

최종보고서

농업생태환경 모니터링 및 종합적 환경관리시스템 개발 사업

Monitoring Agro-ecological Environments and Developing
Comprehensive Agricultural Environmental Management Systems

서울대학교 농업생명과학대학

농 립 부



제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “농업생태환경 모니터링 및 종합적 환경관리시스템 개발 사업” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2000. 12. 29

주관연구기관명 : 서울대학교 농업생명과학대학

총괄연구책임자 : 박 승 우

세부연구책임자 : 이준호 이변우

이도원 박광우

연구 원 : 임상준 강문성

김상민 강민구

서춘석 전종안

허용구 손정호

최라영 박홍현

김광호 한상현

요 약 문

I. 제 목

농업생태환경 모니터링 및 종합적 환경관리시스템 개발 사업

II. 연구개발의 목적 및 중요성

지구상의 생물학적 생명체 (biological life)를 지속시키는 수단을 제공하는 자연 생태계 (ecological system)는 5대 생물학적 시스템으로 구성된다. 5대 생물학적 시스템은 산림계 (forest system), 농경지와 초지계 (cropland and grassland system), 도시계 (urban system), 대기계 (air system), 그리고 수생계 (water system) 등이다. 이들 생물학적 생명체는 흙의 경우를 포함하는 대기중이나 수중에서 발생되며, 생물학적 시스템은 균형적으로 상호 관련성을 갖기도 하지만 자원의 과다 이용, 혹은 손실이나 손상 등에 의하여 균형을 잃기도 한다.

농업생태계는 농경지의 자연환경상태로서 자연생태계의 구성원이며, 산림과 수생 생태계의 중간에 위치한다. 농업생태계는 농작물을 생산하고 공급하는 기능외에도 수문 순환과정에서 홍수 조절, 대기 및 수질 정화, 기후 완화, 생물학적 다양성의 유지 등 환경보전기능으로서 중요한 역할을 담당하고 있다.

지난 30여년 동안 토지의 농작물 생산성은 품종개량, 농업기반시설의 설치, 농약과 비료의 보급, 농업생산자동화 등을 통하여 괄목할 만한 진전을 가져왔다. 그러나, 농업 내외적 수질오염과 과도한 농업화학물질의 사용에 의한 농경지의 토양오염은 농경지의 지속적인 생산을 보장하는 경지 생태계의 안정성에 심각한 문제를 야기시키고 있다. 또한, 과다한 농약, 비료 등의 잔류량과 농산물의 유독성 잔류량의 검출 등은 인간의 건강에도 위협을 초래하고 있다.

한편, 농산물의 안정성과 관련하여 저공해 식품 수요가 꾸준히 진행되고, 환경친화적 농업에 대한 인식이 확산되어 결국 농업생산성 향상에 의한 농업발전에 비하여 농업환경보전 분야의 빠른 신장이 기대된다. 이러한 배경으로 인해 다양한 농업환경 관리 방안에 대한 수요가 늘게 될 것이며, 농업생태계의 보전방안에 대한 국가적 지역적 수요가 증가하리라 사료된다. 이를 대비하여 농업 생태계의 각종 최적관리 방안을 사전에 평가할 수 있는 종합적 환경관리정보가 구축되어야 하며 이의 기초가 되는 농업생태계의 현장 모니터링과 실시간 자료의 종합관리기법이 제시되어야 할 것이다.

종합적인 농업생태환경 관리를 위해서는 농업유역에서의 수문과 물질순환과정을 정량적으로 분석하고, 이를 통하여 주요 오염원을 파악하며, 이를 효과적으로 조절하기 위한 유역수질관리 기술개발과 함께, 경지와 주변 생태계에 미치는 영향 등을 극소화할 수 있는 종합적인 연구가 필요하다. 따라서, 과학적이고 체계적인 농업생태계 모니터링 및 모델링 기술의 개발과 이를 바탕으로 종합적 환경관리를 위한 시스템의 개발이 이루어져야 할 것이다.

본 연구의 목적을 정리하면 다음과 같다.

농업생태환경의 구성요소인

- 기상·수문인자

- 지형, 지세, 토지이용과 경지, 지질과 토양, 용배수 조직과 하천 등의 물리적 인자
- 환경오염의 원인인 생활계, 축산계, 토지이용계 등 점원·비점원 오염원 인자
- 농작물 생육, 산림생태, 수변식물 생태 및 미생물과 곤충 등 동식물 생태 인자
- 경운, 파종, 비료, 농약의 살포 등 영농 관리 인자
- 하천 수질과 토양의 오염 등 물질 오염 상황 등을

종합적이고 체계적으로 파악하고, 인자들의 상호 관련성 등을 계량적으로 구명하기 위한 현장 모니터링 기술과 수학적 모델을 개발하기 위하여,

- ① 농업 생태환경 모니터링 기법 정립
- ② 유역 수문 및 수질, 농작물 생육환경, 곤충생태, 주변 생태환경 등의 농업 생태환경 모니터링 기술 개발
- ③ GIS 자료구축 및 응용기술 개발
- ④ RS 자료현행화 기술 개발
- ⑤ 농업유역의 수문순환 모델링 기술 개발
- ⑥ 수문 및 수질 모델링 기술 개발
- ⑦ 농업생태환경 모델링 기술 개발
- ⑧ 수환경관리 및 평가시스템의 개발
- ⑨ 농업환경정보관리시스템의 개발

등을 통하여 농업생태환경 자료의 구축을 위한 모니터링 기술을 계획, 평가하고, 예측모델링 기술 및 종합적 환경관리시스템을 개발하는데 목적이 있다.

III. 연구개발 내용 및 범위

본 연구는 1996년부터 2000년까지 5개년에 걸쳐서 실시되었으며, 총 연구기간에 걸쳐 지속적인 농업생태환경 모니터링을 수행하였고, 제1차년도와 제2차년도는 자료의 수집, 모니터링 기법 정립 및 모니터링 결과 분석, 제3차년도는 GIS와 RS 자료구축 및 응용기술 개발 및 적용, 제4차년도에서는 농업생태 모델링 기술 개발 및 적용, 그리고 제5차년도는 종합적환경관리시스템의 개발 및 적용성 평가 등을 위주로 시행되었으며, 농업생태환경 모니터링과 첨단 생태환경 예측 기술의 개발, 그리고 종합적 환경관리시스템의 개발을 위한 연구를 중심으로 시행하였다.

본 연구의 개발 내용과 범위는 다음과 같다.

(1) 농업생태환경 모니터링 기법 정립

농업생태 모니터링 및 모델링과 환경관리시스템과 관련된 기존의 국내외 문헌을

수집하여 연구사례를 검토한다. 또한, 대상지구를 선정하여 각 세부연구분야별 생태환경 계측망을 구성하여 모니터링 기법을 정립한다.

(2) 농업생태환경 모니터링 기술 개발

농업생태환경의 구성요소인 기상·수문인자, 유역의 물리적 인자, 하천 및 토양의 오염원 인자, 농작물 생육인자, 곤충생태인자, 산림생태인자, 수생식물생태인자, 영농관리인자, 그리고 동식물 생태인자 등을 종합적이고 체계적으로 측정·조사하여 현장 모니터링 기술을 발전시킨다. 이를 통해 농업생태환경관리정보시스템의 실시간 자료의 구축을 위한 기초자료를 제공하고, 각각의 농업생태환경 인자들간의 상호 관련성을 계량적으로 구명한다.

(3) GIS 자료구축 및 응용기술 개발

지리정보시스템을 이용하여 대상 유역에 대한 지리정보, 공간정보, 그리고 각종 속성과 특성정보 등의 GIS자료기반을 구축한다. 이를 토대로 농업생태 모델링을 위한 유출곡선번호, 토지이용별 면적 등의 다양한 입력자료를 추출하는 응용기술을 개발하고, 그 적용성을 평가한다.

(4) RS 자료현행화 기술 개발

위성영상자료의 현행화 기술 개발을 위하여, GPS를 이용한 농업기반시설 자료의 현행화 기술을 개발하고, 위성영상의 처리 및 분석 방법을 정립한다. 이를 통해 다시기 위성영상을 대상으로 토지피복상태 및 변화를 고찰하며, 유출곡선 번호를 추정한다. 또한, Markov 과정을 이용하여 장래 토지피복상태의 추정 및 수확량 예측 등의 원격탐사 (Remote Sensing, RS)기술을 이용한 농업수계환경의 진단, 예측 기술을 개발하고 적용성을 검토한다.

(5) 농업유역의 수문순환 모델링 기술 개발

농업유역의 수문순환 거동을 분석하고, 이를 해석하기 위한 수학적 모델을 구성

하여 농업유역에서의 수자원 이용 현황의 파악 및 물수지 분석을 실시함으로써 농업유역의 실제 사용량을 조사하여 제시한다.

(6) 수문모델링 기술 개발

수문모델링 기술 개발을 위하여, 수집된 시험유역의 수문자료를 바탕으로 논에서의 저류 효과 및 유출 특성을 고려한 단기 유출추정모형을 개발한다. 또한, 관개용 저수지군을 포함하는 농업용 소유역의 일유출량 추정 모형, 하천에서의 일유출량 추정 모형, 그리고 신경망이론을 이용한 소유역에서의 일유출 추정 모형 등의 장기 유출모형을 개발하여 그 적용성을 평가한다.

(7) 수질모델링 기술 개발

수질모델링 기술 개발을 위하여, 각 하천에서의 실측 수질자료를 바탕으로 원단 위법 및 채수빈도를 고려한 발생, 배출, 유출부하량을 산정하고, 유역 단위의 비점원 오염 추정을 위한 GIS-NPS 호환모형을 개발하여 시험유역에 적용한다. 이를 바탕으로 유역에서의 수질오염을 정성적, 정량적으로 해석하고, 수질오염의 관리대안에 따른 최적관리기법을 제시한다.

(8) 생태환경 모델링 기술 개발

생태환경 모델링 기술개발을 위하여, 농작물 생육추정, 병충해의 예찰과 방제계획, 농작업 일수의 결정 등을 수행하기 위한 일별기상발생모의 모형을 개발하고, 논에서의 영양물질추정 모형과 벼에너지 흐름 모형을 개발하여 쌀 경작체계의 생태환경과 논에서의 물질순환과정을 분석 평가한다.

(9) 수환경관리 및 평가시스템의 개발

건전한 수계환경관리방안과 평가를 위하여, 농업생태 자료관리, 환경영향 평가, 개선, 보전 및 관리, 환경변화 예측기술, 유역의 최적관리기법의 결정 등이 가능한 사용자 중심의 편의시스템인 종합적 수계환경관리 및 평가 시스템을 개발하여 그 이

용방안을 모색한다.

(10) 농업환경정보관리시스템의 개발

Web 기반 농업생태정보시스템을 개발하기 위하여, 농업생태정보시스템의 구성 범위를 설정하고, 시험유역을 선정하여 수문, 수질 및 생태 계측망 구성에 따른 시기별, 측정별 생태정보 자료를 구축하여 데이터베이스를 구축하고, GIS 및 RS의 자료 구축 정보를 제공하고, 예측모델의 입력 모듈과 그 추정결과 정보를 제공한다. 이를 통하여 종합적 농업환경정보관리시스템의 구축을 위한 프로토 타입을 제시한다.

IV. 연구개발결과 및 활용에 대한 건의

1. 연구결과

본 연구의 최종적인 연구개발 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 농업 생태환경 모니터링 기법 정립

모니터링의 계획은 수질환경과 생태 시스템에 미치는 영향을 고려하여 유역규모, 포장 규모 및 시험구 규모를 설정하여 상호 유기적, 경제적, 종합적으로 수립하였고, 농업생태환경의 현황을 조사하기 위한 시험유역을 선정하여 모니터링 계획과 방향을 설정하였으며, 그 상호관련성을 평가하였다.

(2) 유역 수문 모니터링 기술 개발

시험유역에 수문계측망을 구성하여 토양, 토지이용, 유역특성인자 등을 조사하였고, 기상, 하천수위, 저수지 수위, 관개량, 지하수위, 유속 등을 측정하였으며, 이를 바탕으로 수위-유량관계, 유출율, 시기별 관개량, 지하수위 변화 등을 분석 고찰하였다.

(3) 유역 수질 모니터링 기술 개발

시험유역을 대상으로 수질계측망을 구성하고, 수질시료의 채취시기와 방법, 그리고 수질분석방법 등의 수질모니터링 기술 개발을 수립하였다. 또한, 수질 측정에서의 수질자료를 측정, 분석하여 그 결과를 평가하였고, 주 오염원은 생활계인 것으로 나타났으며, 이들 결과를 바탕으로 하천오염도를 작성하여 농업생태환경과의 상호관련성을 구명하도록 하였다.

(4) 농작물 생육환경 모니터링 기술 개발

농작물 생육환경 모니터링을 위한 논과 밭에 대한 시험포장을 선정하였고, 못자리 및 본답기의 관개수질자료를 수집 분석하여 논에서의 영양물질 기작 요소들의 상호관련성을 파악하였으며, 밭에서의 수문·수질 자료를 측정하여 분석하였다. 또한, 벼 생장과 생육 자료를 수집하고 체계적인 모니터링 기술을 구축하였다.

(5) 곤충생태 모니터링 기술 개발

시험유역에 조사지점을 선정하여 논에서의 절지동물의 각 기능군별 발생자료를 구축하였고, 이들 자료 분석을 통해 절지동물의 군집구조 및 변화 패턴을 구명하였다. 또한, 해충을 중심으로 한 먹이그물 작성 및 논에서의 포식자 그룹인 거미류 발생시기예측 모델을 작성하였으며, 이들 자료가 환경 조화형 해충 방제기술에의 접목이 가능하도록 하였다.

(6) 주변생태 모니터링 기술 개발

산림 및 하천주변의 식물생태 및 수생식물분포와 수질환경에 미치는 영향을 분석하기 위해 기초자료를 수집하고 그 환경요인을 분석하였으며, 각 환경요소별 표본수, 주기, 분석 방법 등이 모니터링 결과에 미치는 영향을 분석하였고, 주변생태환경의 변화를 고찰함으로써 하천오염과 식물생태계의 관계를 구명하기 위한 모니터링 기술을 정립하였다.

(7) GIS 자료구축 및 응용기술 개발

농업생태환경관리를 위한 시험구역의 기본도 및 주제도 등의 GIS 자료기반을 구축하였고, 수문정보 분석과 예측모델을 위한 응용기술인 수문모형 전처리 시스템을 개발하여 적용성을 평가하였다. GIS 자료 기반의 구축과 이용기술은 원격탐사 기술, 호환모형의 개발, GPS 응용기술의 개발 등과 연계될 수 있도록 구성하였다.

(8) RS 자료현행화 기술 개발

위성영상의 분석기법을 정립하였고, 시험구역에 대하여 다시기 위성영상을 이용한 토지피복상태를 추출하여 그 변화를 분석하였다. 이를 바탕으로 수문 유출고 선번호를 추정하였고, 장래의 토지피복상태의 변화와 수확량을 예측하여 결과를 평가하였다.

(9) 농업구역의 수문순환 모델링 기술 개발

농업구역에서 배후구역의 유출특성을 분석하고 이로부터 유역 유출량을 추정하는 유역 유출량 모형을 개발하였으며, 농업용수의 공급에 따른 관개지구의 지표배수량과 지하수 유출량, 그리고 관개회귀수량을 추정하기 위한 관개지구 유출량 모형을 구성하였다. 또한, 유역 유출량 모형과 관개지구 유출량 모형을 통합하여 농업구역의 수문순환모형을 개발하였으며, 유역의 물수지 분석을 통해 적용성을 평가하였다.

(10) 수문모델링 기술 개발

수집된 시험구역의 수문자료를 바탕으로, 논에서의 저류 효과 및 유출 특성을 고려한 강우-유출 모형, 관개용 저수지군을 포함하는 농업용 소유역에서의 일유출량 추정 모형 등 농업구역의 특성을 고려한 TR-20모형, SSARR 모형, 수정 Tank 모형, 신경망이론을 이용한 장기유출 추정 모형 등의 장단기 수문모형을 개발하였고, 이를 시험구역에 적용하여 적용성 및 응용성을 평가하였다.

(11) 수질모델링 기술 개발

하천에서의 오염원 등의 환경인문조사와 실측 수질자료를 바탕으로 원단위법에 의한 발생, 배출, 유출부하량을 산정하였고, 소하천에서 채수빈도를 고려한 오염부하량과 유출량에 대한 평균농도를 산정하였으며, 유역단위의 비점원오염 추정을 위한 GIS-NPS 호환모형을 개발하여 적용성을 평가하였다. 이들 결과로부터 유역에서의 수질오염부하량의 정성적, 정량적인 평가가 가능하였고, 개발된 수질 모델링 기술은 수환경 평가관리시스템과 연계하여 수질환경을 평가하고 이에 대한 관리대안을 제시할 수 있었다.

(12) 생태환경 모델링 기술 개발

생태환경 모델링 기술개발을 위하여, 농작물 생육추정, 병충해의 예찰과 방제계획, 농작업 일수의 결정 등의 입력자료로서 이용하기 위한 일별기상발생모의 모형을 개발하였다. 또한, 논에서의 영양물질추정 모형과 벼에너지 흐름 모형을 개발하였고, 구축된 모니터링 자료를 이용하여 그 적용성을 평가하였으며, 이를 통하여 체계적인 논 생태계의 분석 지표를 제시하였다.

(13) 수환경관리 및 평가시스템의 개발

대상 시험유역으로부터의 수계환경자료의 생성, 갱신, 검색, 저장, 자료 현행화 등을 수행할 수 있는 자료관리시스템, 구축된 자료를 토대로 수문 및 수계환경오염을 산정하고 예측할 수 있는 예측모델시스템, 예측된 결과를 바탕으로 수계환경의 오염도를 평가, 개선, 보전 및 관리가 가능하도록 구성된 수환경평가관리시스템, 그리고 모델을 구현함과 아울러 각각의 시스템을 종합적으로 관리할 수 있는 사용자 중심의 사용자편의시스템 등으로 구성된 수계환경관리 및 평가 시스템을 개발하였다. 이를 시험유역에 적용함으로써 건전한 수계환경의 관리와 평가가 가능하도록 하였다.

(14) 농업환경정보관리시스템의 개발

환경변화에 따른 생태환경 데이터베이스와 농업생태계 요소들의 거동을 예측할 수 있는 모형의 상호 호환을 통하여 최적관리대안을 평가할 수 있도록 하기 위한 Web 기반 농업생태환경관리시스템을 개발하였으며, 이를 Web site를 이용하여 농민, 농업연구자 또는 국가 개발 계획에 활용할 수 있도록 종합적 농업환경정보관리 시스템의 구축을 위한 프로토 타입을 제시하였다.

2. 활용계획 건의

이상의 연구결과로부터 활용계획을 요약하면 다음과 같다.

(1) 기존의 농업개발사업의 영향평가 기술은 실제 농업 생태계의 보전과 관리에 응용할 수 없는 단편적인 연구가 이루어졌으며, 이를 통합시키기 위해서는 농업생태 환경에 영향을 주는 지형, 토지이용, 토양, 기후, 수문 및 수질과 농작물, 곤충과 동물, 주변 생태계 등의 각 환경 인자들의 종합적인 현장 모니터링 기술의 정립이 필요하였다.

(2) 농업유역에서의 수자원 관리는 정량적인 측정자료가 부족한 상태로서, 이로 인한 농경지로부터의 유출량, 지하수 유입량 등을 고려하지 않은 상태에서 물 부족을 보충하는 데 급급해 왔다. 따라서, 유역내 물의 이동과 순환기작을 분석하고, 효율적인 수자원 관리를 위한 농업유역의 수문순환 해석이 필요하고, 농업유역의 수문유출현상을 정량적으로 해석할 수 있는 수학적 모형을 개발하여 체계적이고 합리적인 유출해석의 시도가 필요하였다.

(3) 농업생태환경 모니터링 기법의 정립은 실시간 농업환경자료의 구축을 위한 조사 방법으로서의 활용이 가능하며, 기후변동, 경지환경 변화 등에 따른 농업환경생태계의 영향을 예측하는 기초 자료로서 활용할 수 있을 것이다.

(4) 예측 모델링 기술의 개발은 농업유역에서의 수질의 정량적 평가와 논에서의 영양물질의 거동 예측이 가능할 것으로 기대되며, 수환경평가관리시스템과 연계하여 수질환경을 평가하고 이에 대한 관리대안을 제시할 수 있으며, 체계적인 생태계의 분석지표를 설정할 수 있을 것으로 기대된다.

(5) 원격탐사 자료와 농작물 생육과의 관계를 정립함으로써, 수확량 예측기술을

발전시키고, 지리정보시스템을 이용한 데이터베이스와의 호환 모형을 개발함으로써, 환경예측기술의 보편화를 기할 수 있을 것으로 기대된다.

(6) 농업생태계의 환경 예측과 영향평가기술을 개발함으로써, 환경 관리 목표와 수준에 맞는 최적관리기법의 선정이 용이해지며, 각 관리기법에 따른 환경변화를 예측하고, 이를 상호 비교함으로써 다양한 환경인자를 감안한 계층적 환경관리 의사결정지원 시스템 기술의 발전에 기여할 수 있을 것이다.

(7) 최적관리기법의 도입을 통하여 최소의 비용으로 최대의 환경보전기능을 확보할 수 있으므로 투자 비용을 절감할 수 있으며, 농작물의 생육과 수확량의 예측 등 실시간 농업정보의 제공으로 정보화시대를 선도하는 첨단 영농을 통하여 농업 생산성을 높이는 데 기여할 것으로 기대된다.

(8) 각종 농업환경예찰과 관리 등을 위한 도구로써 활용될 수 있으며, 농업의 환경보전기능을 계량적으로 표시할 수 있는 도구로 활용될 수 있으며, 환경 친화적 지속농업을 위한 영농시스템의 구축에 필요한 시나리오의 검토에 활용될 수 있다.

(9) 농업환경자료 데이터와의 호환 시스템을 구축함으로써, 실시간 환경자료의 갱신을 통한 환경관리가 가능하도록 개발함으로써 관련분야의 프로토타입 관리시스템으로 활용할 수 있다.

(10) 국가적 차원의 환경관리시스템의 구축을 위한 프로토타입을 제시함으로써 장차 전국을 대상으로 하는 종합적 환경관리 시스템의 기반 기술을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

(11) 환경관리 시스템을 이용한 저공해 농업생산 체계를 확대할 수 있으므로써 국민의 농업에 대한 신뢰 회복으로 농산물의 시장 경쟁력을 높일 수 있고, 지구환경보전, 기후협약, 기타 환경관련 국제적 분쟁에서 농업분야의 경쟁력을 높일 수 있으므로써 경쟁력을 확보할 수 있을 것이다.

(12) 온라인 시스템을 이용하여 전국적인 농업생태정보 데이터베이스를 구축하는 기반 기술로서 활용하고, 국가적 차원에서의 농업환경관리를 위한 각종 대안을 검토하는 등 정책 입안을 위한 모델로써 활용이 기대된다.

(13) 농업생태환경관리시스템은 환경변화에 따른 생태환경 데이터베이스와 농업생태계 요소들의 거동을 예측할 수 있고, 모형의 상호 호환을 통한 최적관리대안의 평가가 가능함으로 농민, 농업연구자 또는 국가 개발 계획에의 활용이 기대된다.

SUMMARY

I. TITLE

**Monitoring Agro-Ecological Environments and Developing
Comprehensive Agricultural Environmental Management Systems**

II. OBJECTIVES AND SIGNIFICANCE

Agro-ecological systems, sometimes referred as cropland and grassland systems, constitute one of the five basic ecological systems on the Earth. The others are the forest system, urban system, air system, and water system. Agro-ecological systems are situated in-between the forest and water systems. Agro-ecological systems not only offer crops and other agricultural products invaluable for the human beings, but play important roles to control flood, purify air and water quality, mitigate climate, and sustain the diversity of biological lives.

During the past thirty years, significant improvement in crop production from agricultural lands has been made to the degree to be called the green revolution. The green revolution was possible through improvement of crop varieties, expansion of irrigation and drainage, applications of agricultural chemicals like fertilizer and pesticides, and mechanization of crop production systems. At the same time, the water quality of streams and rivers degrades resulting in part from untreated sewers and unused fertilizers applied to croplands. And soils are

contaminated from overused agricultural chemicals. These may impose the threat to the stability of agro-ecological systems to ensure sustainable productivity of croplands. The residuals from overused fertilizers and pesticides, and the toxic residues on agricultural products may threaten the health of the human beings.

The safety questions to traditional agricultural products prompt the increases in the market demands for low-polluted foods. This contributes to increasing promotion of environmentally sound agriculture as compared to the conventional system. This may increase the demands for sound and diversified environmentally sound agriculture and promote nationally and regionally the measures for conserving agro-ecological system. And it is time to develop a comprehensive environmental management system that can be used to evaluate the best management practices for agro-ecological systems. The system should be based on field monitoring of the agro-ecological systems based on the real time field data.

In order to efficiently and comprehensively manage agro-ecological system environments, various aspects of the system behavior should be measured qualitatively and quantitatively. Typical agro-ecological systems consist of soils, air, water, biological lives, and their interactions. In addition, they are affected by human interference through agricultural activities. They are extremely complex in nature. No single solution is possible to justify the soundness of the viable ecosystem. This requires scientific and comprehensive monitoring systems to learn about the dynamics of the ecosystem, and water quality issues at a watershed scale.

This study was carried out to develop field monitoring technology and models that can quantitatively evaluate the factors affecting agro-ecological systems and their interactions at a watershed scale. Among many factors constituting agro-ecological systems, the followings were selected in the study:

- Weather and hydrologic parameters
- Physiological features such as topographic, land use patterns and croplands, geology and soils, quantitative geomorphology
- Point and nonpoint pollution sources including livestock wastes
- Plant and animal ecological conditions such as crop growth and yields, forest ecology, aquatic ecology, and entomology.
- Agricultural management factors such as cultural practices, seeding, and fertilizer and pesticide applications
- Pollutant loading to stream flow and soils

The objectives of the study were:

- 1) To review and establish a monitoring technique for agro-ecological systems that ensues comprehensive and feasible means to assess the present status of the system.
- 2) To quantitatively evaluate the effectiveness of monitoring schemes for agro-ecological systems on watershed hydrology, water quality, crop production, entomology, and surrounding ecosystems such as forest and water.
- 3) To develop the geological information system for applying to agro-ecological system management.
- 4) To develop technology to retrieve database for the ecological system through remote sensing technology
- 5) To develop mathematical models for hydrologic processes in agricultural watersheds.

- 6) To develop hydrological and water quality models for agricultural watersheds.
- 7) To develop mathematical models for agro-ecological environment systems.
- 8) To develop water environment management and evaluation systems.
- 9) To develop a user-friendly model for managing agricultural environment information system.

Each of the enlisted items at the objectives belonged to one of the three categories: planning and evaluating of monitoring techniques, evaluating the results, and developing predictive mathematical models. They are all aimed for developing the database system for agro-ecological system and for developing mathematical models to predict the consequences of ecological factors from a management change, and for developing a prototype comprehensive ecological management system that is ready for practical applications.

III. CONTENTS AND SCOPES OF THE STUDY

This study was carried out for five year from 1996 to 2000. During the five years, field monitoring of agro-ecological systems has been conducted. During the first two years of the study period, major emphases were placed upon the collection of field data, the evaluation of different monitoring schemes, and the assessment of monitoring results. In the third year, efforts were made to build up GIS and Remote Sensing databases for the test sites. And probable applications of GIS and RS technologies to the identifications of parameters that may affect the agro-ecological systems were also explored. Among the applications was modeling of non-point source pollution from the tested watersheds. During the fourth year, existing and new models for

agro-ecological systems were formulated, and tested with the field data from the test sites. And during the fifth year, the results from all the previous efforts were mould into the development of a comprehensive environmental management system. And the system was applied to identify and find relevant management strategies for improving environmental conditions in a watershed scale.

The contents and scopes of the research may be summarized as follows.

(1) Establishing Technologies For Monitoring Agro-Ecological Systems

Previous works and publications regarding monitoring of agro-ecological systems, modeling, and environmental management information systems were to be review and evaluated. Based on the results from literature review, probable test sites were surveyed and the project site selected. For the project sites, monitoring systems for various aspects of agro-ecological systems were built up and methodologies for detailed sampling and surveying established.

(2) Developing Technologies for Monitoring Agro-Ecological System Indicators

Major factors affecting the agro-ecological systems include weather and hydrologic parameters, watershed physiological characteristics, polluting sources for stream flow and soils, crop growth parameters, entomological parameters, forest ecological indicators, aquatic plant ecological indicators, agricultural management practices, and biological ecological indicators. Each of ecological indicators was field surveyed and the results reviewed. Efficient and comprehensive monitoring schemes for survey schedules and methodologies were explored that ensured accurate evaluations of the systems. Results from monitoring studies were to be applied to real time data system for agro-ecological environment management information systems, and quantitative

relationships among different indicators for agro-ecological systems were searched for.

(3) Establishing GIS Databases and Developing the Application Techniques

Geographic and spatial information and the attributes and characteristic data were surveyed and processed for developing GIS databases. Using the GIS databases, technologies for extracting various physical and ecological parameters such as SCS runoff curve number and land use information were explored and the results tested and validated.

(4) Developing Database Retrieval Techniques Using Remote Sensing Data

Frequent GIS database updating was needed to reflect the changes in land use patterns and agronomical practices at the project sites. The remote sensed image data were found to best suit the data retrieval. Agricultural infrastructures were field surveyed using the global positioning system (GPS) and the results updated to the databases. Multi-temporal TM data were used to investigate the changes in crop covers and the results were used to define the runoff curve number. A Markov process was used to simulate the future changes in land use and treatments. TM data were also applied to forecast crop yields from the project sites. Other probable applications of remote sensing technologies for agro-ecological system management were also explored.

(5) Developing Hydrological Models for Agricultural Watersheds

Hydrologic processes in an agricultural watershed were field measured quantitatively and mathematical models to describe the processes formulated,

tested and validated. Hydrologic models were applied to detail water uses within the watershed, to analyze the water balance, and to quantify the water use for agricultural purposes.

(6) Developing Rainfall-Runoff Models for Agricultural Watersheds

A storm water model was developed that depicts the retention effects of and runoff processes from paddies. The resulting model was tested with field data. A daily stream flow model was developed that is capable of simulating daily runoff from small watersheds and routing stream flow through a series of reservoirs, and validated with field data.

(7) Developing Technologies for Modeling Runoff Water Quality

To develop a practical, physical parameter based water quality model, a unit load method was applied to define pollutant loading and delivered loading based on field data. And a watershed scale model was formulated to estimate nonpoint source pollution from project sites based on a GIS-NPS interactive model. The water quality model identifies quantitatively and qualitatively pollutant loadings from various sources and spatial variations of the loading were to be pinpointed. The results should be valuable to identify the best management practices suited to the watersheds in efforts to implement effective water quality management.

(8) Modeling Ecological Environments

In efforts to develop an agro-ecological environment model, a daily weather forecasting model was formulated to be used for existing crop growth simulation models, pest forecasting models, and pest control models. Nutrient models for paddy rice and energy flow chart models were to be developed for ecological

environments associated with rice cultivation.

(9) Developing Water Environment Management and Evaluation Systems

To evaluate if a water environment management alternative is technically sound and effective, and economically feasible, a comprehensive watershed environment management and evaluation system was to be developed. The system is a user friendly model that consists of the database subsystem for agro-ecological system, the assessment subsystem of environmental consequences, conservation, and management, the model subsystem to evaluate environmental impacts, and to define the best management practices. And the applicability of the system is to be explored.

(10) Developing Agro-Environmental Information Management Systems

In an effort to develop a web-based agro-ecological information system, the context of the system was to be explored, and the comprehensive agro-ecological information system to be developed. The system consists of the database subsystem, model subsystem, and user-interface subsystem. The data subsystem contains all agro-ecological indicators including weather, hydrologic and water quality data and temporal and spatial variations of ecological resources for the project sites. The GIS and remote sensing databases were also added. The model subsystem consists of hydrologic and stream water quality, and non-point source pollution models. And the user-interface subsystem offered modules for the input data for the model subsystem, and presented tabular and graphical forms of the output from the models. The prototype agro-ecological information system demonstrated the applicability of similar ones for general purposed information systems.

IV. RESEARCH RESULTS AND PROPOSED APPLICATIONS

1. RESEARCH RESULTS

The followings are the summarized results from the research project.

(1) Establishing Technologies For Monitoring Agro-Ecological Systems

A demonstration project site was selected for monitoring agro-ecological systems. The site consists of hydrologic and stream water quality monitoring system, and forest, cropland, and aquatic ecological monitoring systems. The monitoring sites varied in size and extent with the specific monitoring purposes. The sizes ranged from plot to block, to watershed. Each site had a specific meaning and paired to other sites to explore probable relations in the ecological features with others.

(2) Monitoring Watershed Hydrology

A hydrologic gauging network was established within the project sites. For each stream flow gauging station, watershed physiological features like soils, land use, topography and other geomorphologic characteristics were surveyed. Weather and hydrologic data to be recorded were rainfall, stream water level, reservoir water level, irrigation diversion rates, and flow velocities. For stream flow gauging stations, the stage-discharge relationships were developed, which were used to estimate flow rates. And stage-storage relationships for two irrigation reservoirs were obtained. The hydrologic data yielded rainfall-runoff ratios, seasonal variations of irrigation intakes, and groundwater fluctuations.

(3) Monitoring Watershed Stream and Reservoir Water Quality

A network for the water quality sampling was built for the project watershed. Various sampling methods and scheduling were applied, and the results analyzed and compared. Based on the field data, the water quality monitoring procedure was proposed. The water quality data from different sampling sites reflected that the major sources of water pollution were attributed to sewers from villages. The results from water quality sampling were used to derive a stream water pollution map. The stream and reservoir water quality data were analyzed for their relations with agro-ecological systems.

(4) Monitoring Crop Environments and Agronomical Practices

Test plots for paddy and croplands were chosen and the crop environments and agronomical practices were surveyed. For paddy test plots, seasonal variations of irrigation and drainage amount, and inundating depths were surveyed from transplanting period to harvesting. The water and soil samples were taken and analyzed for nutrient constituents. The results were used to develop a hydrologic and water quality model for paddy. For cropland test plots, runoff, sediment, and nutrient losses were measured using the standard plot experiment procedures. In addition, the surveyed agronomical practices were analyzed for energy balance in the practices. Crop growth and yield data were taken and analyzed.

(5) Monitoring Agricultural Entomological Parameters

We collected occurrence data of each functional group of arthropods in paddy fields which were located on experiment streams during the study years, and determined arthropod community structure and fluctuation pattern through analysis of these data. To support and raise the level of pest management

techniques, we also constructed pest-centered food web and occurrence model of spiders that were the most dominant predator group and considered as a natural control factor in paddy fields.

(6) Monitoring Surrounding Ecological Systems

As an agro-ecological system is closely associated with surrounding ecological systems such as forest, and aquatic ecological systems, vegetative densities, varieties, and life cycles were monitored. Forest ecological system was surveyed for its spatial variability of trees and plantation. And stream water quality and aquatic plantation were monitored for the aquatic ecology. For those surrounding ecological systems, the effects of sampling sizes, intervals and analyzing procedures on the environmental indicators were investigated. Efforts were also made to relate vegetative ecology along streams with the water quality.

(7) Developing GIS Databases and their Applications

GIS databases for the project watershed were developed that include basic and thematic maps and their attributes. The GIS database system was instrumental for developing the agro-ecological environment management system. An interface routine was developed that enables the GIS databases to be used for pre-processing input data for spatially varying hydrological and nonpoint source pollution models. The systems were also developed to incorporating remote sensing techniques and global positioning system applications in addition to interfacing with mathematical models.

(8) Applications of Remote Sensing Technologies to Updating Databases

Methodologies for analyzing satellite images were built up and tested for their

applicability to the agro-ecological system management. Multi-temporal image of satellite data were used to extract land use and cover conditions for the project sites, whose variations through the years were investigated. The land use and vegetative cover conditions were used to determine the runoff curve number. And future land use patterns were simulated using a stochastic model. Crop yields were estimated from the satellite image data and the results evaluated.

(9) Modeling of Hydrological Processes in Agricultural Watersheds

Hydrologic Models were developed for the processes in a typical agricultural watershed having irrigated paddies. Runoff processes from upstream source areas like forest, and paddy and croplands without irrigation were modeled using a linear tank model for daily stream flow. Drainage from irrigated paddies and consequent groundwater releases due to irrigation, and the return flow from irrigation were modeled. The results from each model were incorporated to the runoff model for irrigated agricultural watershed. The model was tested satisfactorily with field data from the project watersheds. And the model was applied to analyze the water balance for the watershed.

(10) Developing Hydrological Models

Storm water model like modified TR-20 considering the retention storage and the water balance of paddies, and daily stream flow models such as SSARR, Tank Model, and Neural Network Model were developed and applied to the project watersheds. The results from modeling efforts were close to the observed data from the project watersheds, implying that the hydrologic data from this studies were accurate enough to justify many of existing hydrologic models.

(11) Developing Water Quality Models

Water quality data from the project sites were analyzed to define daily, monthly, and annual pollutant loadings from the project watersheds. The results were compared with unit load methods for estimating pollution loading and delivery rates to stream. Empirical delivery ratios for nutrient constituents were proposed for the project watershed. And GIS-NPS interface model which is capable of simulating non-point source pollution loadings from various land use and treatments was formulated and validated with the water quality data from the project site. The model was found applicable to watershed scales within a reasonable degree of accuracy. The proposed model was incorporated to the water environment evaluation and management system and might be applied to defining management alternatives for improving the water quality.

(12) Modeling of Agro-Ecological Environment

A daily weather data generator was developed and tested with the data from weather stations. The generator was incorporated to existing crop growth simulation model, and pest forecasting model. It was also applicable to defining the number of work days for agronomical practices. Mathematical models were developed to simulate nutrient fluctuations on paddies, and to estimate the energy flux for paddy rice, and were validated with field data from the project sites. The results were investigated to pin point the analysis indices for ecological soundness of the rice.

(13) Developing Water Environment Assessment and Management Model

A prototype, comprehensive water environment assessment and management model that is ready to apply for an agro-ecological system was developed from the research. The model consists of the data subsystem, the predictive model

subsystem, the water environment assessment and management model subsystem, and the user interfacing subsystem. The data subsystem is to develop, update, and retrieve the data for any watersheds. The predictive model subsystem is to simulate and forecast hydrology and water quality of streams for a given watershed. The water environment assessment and management subsystem is to predict, improve, conserve, and manage the water quality of a watershed. The user-interfacing subsystem combines all three subsystems with a user friendly environment. The prototype was applied to the project watershed, and the results appeared ensuring the practical applications.

(14) Developing Agro-Ecological Environment Information Management System

A Web-based agro-ecological environment management system was developed that consisted of ecological environment database system, model system, and interface system. The database system is to retrieve ecological data from environment changes. The model system is to evaluate the behavior of agro-ecological parameters. The interface system is to derive the best management practices for sound agro-ecological systems by comparing the results from the other two systems. The web-based system is a prototype that is accessible through internet by potential users like farmers, agricultural scientists, and interested groups. The prototype is a model for comprehensive management tools for sound agro-ecological systems.

2. APPLICATIONS AND RECOMMENDATIONS

The probable applications from the research results may be summarized as follows.

(1) Many of existing environmental assessment technology for agricultural development may be fragmentary in the nature and not easily applicable to conserving and managing agro-ecological systems. Such results should be incorporated into working environmental indices to measure the soundness and/or degrees of the deterioration, if any. To derive comprehensive and combined indices, various factors affecting the ecological systems should be accurately and feasibly monitored and evaluated. Some of the important factors are topographic, land use, soils, climate and weather data, hydrologic and water quality data, crop growth and yields, entomological and other insect population, and surrounding ecological systems like forest and water. The sampling intervals for each factor differ, and may be subject to local conditions. The results from analyzing methods may also be different. This requires a standard routine for sampling and analyses. And many of suggested methods from this research are applicable to practical implementation of monitoring an agro-ecological system.

(2) Water resources management for agricultural watersheds has not been implemented based on quantitative measurement of flow rates, and merely focused on sufficing the shortage of water for irrigation. Field measurements for runoff from irrigated fields or ground water releases from infiltration were not conducted. Mathematical models proposed in this research may be applied to quantitatively define runoff processes in agricultural watersheds. And the resulting models appear to do a better job in simulating runoff from a

watershed having irrigated paddy blocks than conventional models. Therefore, the results from the research may contribute to the better water resources management.

(3) The proposed monitoring techniques for agro-ecological systems may be applied to the surveying methodology for real time agricultural environment data collection. They are also applicable to the research methods for quantifying the effects of weather modifications and cropland alternation on the possible system behavior.

(4) The proposed simulation and predictive modeling efforts may be applied to predicting nutrient constitutes in rice paddies and to quantitatively evaluating the water quality in agricultural watersheds. The models are also applicable along with the water environment assessment and management system to evaluate the water quality environments and to explore probable management alternatives to improve the stream water quality. They also provide with environmental indicators for a comprehensive environment management.

(5) The proposed remote sensing techniques for crop production may contribute to indirect forecasting of crop yields. And the GIS interface systems used in the research may contribute to the expansion of environment forecasting technology.

(6) The proposed environment assessment methods for agro-ecological system may be applied to assessing the environment consequences from large-scaled development projects. They are also applicable to identifying appropriate management alternatives to meet environmental management goals. They offer

the resulting changes to environmental indicators from different alternatives. Thus the results may be used for a basis of a decision support system for hierarchical decision making for environmental management

(7) The proposed algorithms for identifying the best management practices to improve stream water quality should provide with economically feasible alternatives for the best results. This will help save the costs for investment. The results will also contribute to improving crop productivity along with the crop growth and yield prediction data from the proposed predictive models in the study.

(8) The proposed research results may be applicable to monitoring, forecasting, and management of agricultural environments. The indicators may be used for the environmental conservation functions from agricultural activities. They are useful for establishing different scenarios for environment friendly sustainable agriculture.

(9) The proposed prototype of environmental management may be applied to similar efforts for ecological management system. Of particular features that may be adopted to other systems are real time retrieval of environmental data along with agricultural environment database systems.

(10) The proposed prototype may be served as an example for the future environment information systems in a national level. Any comprehensive environment information system should contain the functions and attribute which are demonstrated in this study. The research may serve a benchmark for related studies.

(11) The environment management system is useful to low polluted food and feed production. This may help gain the credibility from potential consumers, which in turn raises the market competence of the agricultural products against imported food. And the efforts eventually contribute to the gains in international cooperation for earth environmental movement and climate changes.

(12) The proposed web-based information system has a great potential of being adopted as a basic tool for comprehensive national network for agro-ecological systems. And the results may be expanded to policy making tools for agricultural environment management systems.

(13) The proposed agro-ecological environment management system may be widely applied for developing ecological environment database systems, simulating agro-ecological indicators, and identifying the best management practices for agro-ecological systems. Potential users for the comprehensive systems include farmers, agricultural scientists, and planners for national development.

CONTENTS

Chapter 1. General Descriptions

Section 1. Introduction	59
Section 2. Backgrounds for Study	60
Section 3. Necessity of Research and Development	61
1. Technical Aspects	61
2. Economical Aspects	66
3. Social Aspects	67
Section 4. Previous Works and Future Perspectives	67
1. Previous Works	67
2. Weakness in Previous Technology	70
3. Future Perspectives	71
Section 5. Goals and Scopes of Research	72
1. Ultimate Goals of Research	72
2. Annual Research Objectives and Scops	72
Section 6. Implementation Strategies and Methods	78
1. Interdisciplinary Cooperative Research	78
2. Outlines of Research Methods	78
Section 7. Anticipated Effects	83
1. Technical Aspects	83
2. Economical and Industrial Aspects	84
3. Potential Applicability	84
Section 8. Summary and Conclusions	87
References	88

Chapter 2. Monitoring of Agro-Ecological Environments

Section 1. Introduction	95
Section 2. Agro-Ecological Environment Systems and Water quality	97
1. Introduction	97
2. Ecological Environment Systems	97
3. Non-Point Source Pollution and Water quality	102
4. Hydrologic and Nutrient Cycle and Pollution	104
5. Non-Point Source Pollution in Small Watershed	112
6. Managements for Agro-Ecological Systems	117
Section 3. Selecting Project Site and Investigation Planning	119
1. Introduction	119
2. Characteristic of Agricultural Watershed	119
3. Selection and Criteria of the Project Site	124
4. Planning of Monitoring the Project Site	126
Section 4. Summary and Conclusions	133
References	135

Chapter 3. Monitoring Watershed Hydrology

Section 1. Introduction	145
Section 2. Study Watershed and Watershed Characteristic Factor	146
1. Description of Study Watershed	146
2. Surveying Watershed Characteristic Factor	148
Section 3. Soil and Land Uses	150
1. Soil Investigation	150

2. Land Uses Investigation	153
Section 4. Hydrologic Network and Investigation Method	154
1. Hydrologic Network	154
2. Investigation Method	156
Section 5. Results of Meteorological Monitoring	168
1. Meteorological Data	168
2. Daily Precipitation	171
Section 6. Results of Hydrologic Monitoring	174
1. Daily Stage	174
2. Stage-Discharge Relationship	176
3. Runoff	186
4. Elevation and Storage of Reservoir	187
5. Groundwater Table	192
Section 7. Summary and Conclusions	193
References	194

Chapter 4. Monitoring Watershed Stream and Reservoir Water Quality

Section 1. Introduction	199
Section 2. Water Quality Network	200
1. Compositions of Water Quality Network	200
2. Water Sampling and Analyzing Method	201
Section 3. Results of Water Quality Monitoring	204
1. Water Quality Monitoring of each Sub-Watershed	204
2. Variation of Water Quality from Storage Effect	215
3. Groundwater Quality Monitoring	217

Section 4. Calculation of Pollutant Loads	223
1. Load-Discharge Relationship	223
2. Pollutant Loads of Sub-Watershed	230
3. Pollutant Loads from Land Use	234
4. Water Quality Map of Watershed	237
Section 5. Summary and Conclusions	239
References	242

Chapter 5. Monitoring Crop Environments and Agronomical Practices

Section 1. Introduction	249
Section 2. Hydrologic and Water Quality Monitoring in Crop Land	251
1. Introduction	251
2. Hydrologic and Water Quality Monitoring in Paddy Fields	254
3. Results of Monitoring in Paddy Fields	259
4. Results of Water Balance in Paddy Fields	264
5. Results of Water Quality Balance in Paddy Fields	267
6. Hydrologic and Water Quality Monitoring in Upland	278
Section 3. Crop Growth Environment Monitoring	287
1. Introduction	287
2. Methodology of Research	288
3. Results of Monitoring	289
4. Application of Crop Growth and Yield Model	291
5. Model Calibration	295
Section 4. Summary and Conclusion	298
Reference	299

Chapter 6. Monitoring Agricultural Entomological Parameters

Section 1. Introduction	305
Section 2. Materials and Methods	306
1. Project Site	306
2. Monitoring Arthropod Group	307
3. Monitoring Pests and Predators	308
4. Surveying Space Distribution	311
5. Stable Isotope Analysis	312
6. Occurrence Model	313
Section 3. Results and Discussion	313
1. Monitoring Arthropod Group	313
2. Monitoring Pests and Predators	332
3. Surveying Space Distribution	342
4. Stable Isotope Analysis	345
5. Occurrence Model	350
Section 4. Summary and Conclusions	353
References	355

Chapter 7. Monitoring Surrounding Ecological Systems

Section 1. Introduction	361
Section 2. Monitoring of Forest	363
1. Introduction	363
2. Selection of an Object Area	364
3. Framing of a Vegetation Map	364

4. Vegetation Research	376
5. Prospection of Future Vegetation	381
6. Evaluation	382
Section 3. Monitoring of Aquatic Plants	390
1. Introduction	390
2. Methodology	391
3. Results of Analysis	398
4. Vegetation and Environmental Factor	404
5. Vegetation Distribution	407
6. Characteristic Comparison	413
Section 4. Summary and Conclusions	421
References	423

Chapter 8. Developing GIS Databases and Their Applications

Section 1. Introduction	429
Section 2. GIS Databases	430
1. GIS	430
2. Method for Representing GIS Data	431
3. Results of Representing GIS Data	436
Section 3. GIS Applications	438
1. Pre-Processing Input Data	438
2. Creating GIS Data	439
3. Results of Creating GIS Data	444
4. Estimation of Runoff Curve Number	448

Section 4. Summary and Conclusions	449
References	450

Chapter 9. Applications of Remote Sensing Technologies to Updating Database

Section 1. Introduction	455
Section 2. Methodologies for Analyzing Satellite Images	457
1. Landsat-5 TM Images	457
2. Pre-Processing of Satellite Images	457
3. Band Recompositions	459
4. Image Classifications	463
Section 3. Changing Land Cover for Multi-Temporal Images	468
1. Selecting Project Site and Satellite Image Data	468
2. Pro-Processing of Satellite Images	469
3. Results of Land Cover Classification	470
4. Estimating and Analyzing Land Cover Change	473
5. Trend of Land Cover Change	474
Section 4. Runoff Curve Number Using Satellite Images	475
1. Satellite Images and Pro-Processing	475
2. Estimation of Runoff Curve Number	476
3. Landuse Classification	480
4. Resulting Estimation	481
Section 5. Summary and Conclusions	483
References	485

Chapter 10. Modeling of Hydrological Processes in Agricultural Watersheds

Section 1. Introduction	495
Section 2. Development of Hydrological Process Model in Agricultural Watersheds	496
1. Background	496
2. Watershed Runoff Model	498
3. Irrigation Runoff Model	502
Section 3. Applications of Hydrological Process Model in Agricultural Watersheds	513
1. Applications of Watershed Runoff Model	513
2. Applications of Irrigation Runoff Model	523
Section 4. Water Balance Analysis in Agricultural Watersheds	529
1. Methodology of Water Balance Analysis in Agricultural Watersheds	529
2. Water Balance Analysis at Gicheon District	531
3. Water Balance Analysis at Balan District	533
Section 5. Summary and Conclusions	535
References	536

Chapter 11. Developing Hydrological Models

Section 1. Introduction	541
Section 2. Short-term Rainfall-Runoff Relationship	542
1. Introduction	542
2. Synthesis of Runoff Hydrograph	543
3. Test Watershed and Data Used	546

4. Verifications of Modified TR-20 Model	547
5. Runoff Variations due to Landuse Changes	550
Section 3. Daily Runoff Analysis for Multiple Reservoir Systems	552
1. Introduction	552
2. Computational Methods	553
3. Model Applications	555
4. Model Verification	558
Section 4. Development and Applications of Modified TANK Model	560
1. Introduction	560
2. Parameter Optimization	561
3. Applications of Modified TANK Model	562
4. Calibration and Verification	566
Section 5. Runoff Model using Neural Network Theory	570
1. Introduction	570
2. Model Development	571
3. Results and Discussions	575
Section 6. Summary and Conclusions	582
References	584

Chapter 12. Developing Water Quality Models

Section 1. Introduction	591
Section 2. Computation of Pollutant Loadings Using Pollutant Mass Unit Method	594
1. Pollutant Mass Unit Method	594
2. Status of Pollutant Source at the Project Site	596
3. Estimation of Pollutant Loadings Using Pollutant Mass Unit Method	599

Section 3. Computation of Pollutant Loadings Considering Sampling Frequency	603
1. Introduction	603
2. Hydrologic and Water Quality Data	604
3. Computation method of Pollutant Loadings and Water Quantity-Averaged Concentration	604
4. Result of Computation of Pollutant Loadings and Water Quantity-Averaged Concentration	607
Section 4. Non-Point Source Pollution Simulation Model	610
1. Introduction	610
2. AGNPS	611
3. ARC/INFO-AGNPS Interface Model	614
4. Model Input Data	615
5. Computation of Pollutant Loadings	625
6. Model Calibration	628
7. Model Verification	632
8. Model Application	636
9. Best Management Practice	638
Section 5. Summary and Conclusions	642
References	645

Chapter 13. Modeling of Agro-Ecological Environment

Section 1. Introduction	653
Section 2. Daily Weather Factor Generating Model	654
1. Introduction	654
2. Status of Weather Observation Station	655
3. Method of Parameter Estimation	655

4. Parameter Estimation	658
5. Application of the Model	659
6. Practice of the Model	663
Section 3. Estimation Model of Nutrient Material on Paddies	666
1. Introduction	666
2. Development of the Model	667
3. Application of the Model	673
Section 4. Energy Flow Model on Paddies	681
1. Introduction	681
2. Method of Energy Flow Analysis	682
3. Computation of Energy Flow	684
Section 5. Summary and Conclusion	688
Reference	690

Chapter 14. Developing Water Environment Assessment and Management Model

Section 1. Introduction	699
Section 2. Developing WEMES	700
1. Database System	700
2. Forecasting Model System	701
3. Evaluation and Management System of Water Environment	703
4. Graphic User Interface	712
Section 3. Operation of WEMES	712
1. Database System	712
2. Forecasting Model System	716
3. Evaluation and Management System of Water Environment	724

Section 4. Summary and Conclusion	729
Reference	729

Chapter 15. Developing Agro-Ecological Environment Information Management System

Section 1. Introduction	735
Section 2. Developing Agro-Ecological Environment Information Management System	737
1. Description of System	737
2. Scope of System	738
Section 3. The Composition of Agro-Ecological Environment Information Management System	739
1. Database	739
2. Modeling	739
Section 4. Summary and Conclusion	743
Reference	744

APPENDIX

- I . Hydrological Soil Group and Physical Characteristics
- II . Daily Stage Data
- III . Water Quality Data
- IV . Ponding Depth
- V . Results of Entomological Ecology Parameters Investigation
- VI . Results of Forest Ecosystem Data Investigation
- VII . Results of Aquatic Plants Ecosystem Data Investigation

목 차

제출문	1
요약문	2
SUMMARY	13
CONTENTS	31
목 차	43

제 1 장 총 론

제 1 절 서 론	59
제 2 절 연구의 배경	60
제 3 절 연구개발의 필요성	61
1. 기술적 측면	61
2. 경제적 측면	66
3. 사회적 측면	67
제 4 절 지금까지의 연구개발 실적과 앞으로의 전망	67
1. 기존의 연구 내용	67
2. 기존 기술의 취약성	70
3. 앞으로의 전망	71
제 5 절 연구개발 목표 및 내용	72
1. 연구의 최종목표	72

2. 연차별 연구개발목표 및 내용	72
제 6 절 추진전략 및 방법	78
1. 학제간 공동 연구	78
2. 연구방법의 개요	78
제 7 절 기대효과	83
1. 기술적 측면	83
2. 경제산업적 측면	84
3. 활용방안	84
제 8 절 연구진의 구성	85
제 9 절 요약 및 결론	87
참고문헌	88

제 2 장 농업생태환경 모니터링 기법

제 1 절 서론	95
제 2 절 농업유역의 생태환경 시스템과 수질오염	97
1. 개론	97
2. 자연생태환경 시스템	97
3. 비점오염과 수질오염	102
4. 농업유역의 수문·물질 순환과 오염	104
5. 농업 유역의 비점원오염	112
6. 농업유역의 생태환경시스템의 관리	117
제 3 절 농업생태환경 모니터링 대상지역의 선정과 조사계획	119
1. 개론	119
2. 농업 유역의 특징	119
3. 대상 유역의 선정 기준과 선정	124

4. 발안지 유역의 모니터링 계획	126
제 4 절 요약 및 결론	133
참고문헌	135

제 3 장 유역수문 모니터링 기술 개발

제 1 절 서론	145
제 2 절 시험유역과 유역 특성 인자	146
1. 시험유역의 개요	146
2. 유역특성인자 조사	148
제 3 절 유역의 토양과 토지이용조사	150
1. 토양조사	150
2. 토지이용조사	153
제 4 절 수문 계측망의 구성과 수문 조사 방법	154
1. 수문 계측망의 구성	154
2. 수문측점의 선정과 설치	156
제 5 절 기상 모니터링 결과	168
1. 기상자료	168
2. 일 강수량	171
제 6 절 수문 모니터링 결과	174
1. 일 수위	174
2. 수위-유량관계	176
3. 유출량	186
4. 저수지 수위와 저수량	187
5. 지하수위	192

제 7 절 요약 및 결론	193
참고문헌	194

제 4 장 유역수질 모니터링 기술개발

제 1 절 서론	199
제 2 절 유역 수질 계측망	200
1. 수질 계측망의 구성	200
2. 수질 샘플링과 분석방법	201
제 3 절 수질모니터링 결과	204
1. 소유역별 수질 모니터링	204
2. 저수지 저류효과로 인한 수질 농도 변화	215
3. 지하수 수질 모니터링	217
제 4 절 오염부하량 산정	223
1. 유량-부하량 관계	223
2. 소유역별 오염부하량	230
3. 토지이용에 따른 오염부하	234
4. 유역 수계 오염도	237
제 5 절 요약 및 결론	239
참고문헌	242

제 5 장 농작물 생육환경 모니터링 기술개발

제 1 절 서론	249
제 2 절 농경지 수문, 수질 모니터링	251
1. 개론	251

2. 논에서의 수문수질 모니터링	254
3. 논에서의 수문수질 모니터링 결과	259
4. 논에서의 물수지 조사 결과	264
5. 논에서의 물질수지 조사 결과	267
6. 밭에서의 수문수질 모니터링	278
제 3 절 농작물 생육환경 모니터링	
1. 개론	287
2 연구방법	288
3. 생육환경 조사 결과	289
4. 생장모델의 적용가능성 검토	291
5. 모델의 보정	295
제 4 절 요약 및 결론	298
참고문헌	299

제 6 장 곤충생태 모니터링 기술 개발

제 1 절 서론	305
제 2 절 재료 및 방법	306
1. 조사지역	306
2. 절지동물 군집 모니터링	307
3. 여러 가지 트랩들을 이용한 해충 및 천적 모니터링	308
4. 분담내 논거미 공간 분포 조사	311
5. 안정성 동위원소 분석	312
6. 황산적거미와 턱거미의 발생 모델	313
제 3 절 결과 및 고찰	313
1. 절지동물 군집 모니터링	313
2. 다양한 트랩들을 이용한 수도 해충 및 천적 모니터링	332

3. 본답내 논거미 정착 및 공간 분포	342
4. 절지동물 군집내 먹이 그물 규명	345
5. 황산적거미, 턱거미의 발생 모델	350
제 4 절 요약 및 결론	353
참고문헌	355

제 7 장 주변 생태환경 모니터링 기술 개발

제 1 절 서론	361
제 2 절 산림생태환경 모니터링	363
1. 개론	363
2. 대상지역 선정	364
3. 산림 식생도 구축	364
4. 남북사면 식생조사	376
5. 향후 식생 전망	381
6. 산림생태계 순생산량 산정	382
제 3 절 수생식물 환경생태 모니터링	390
1. 개론	390
2. 연구방법	391
3. 하천변 식생, 생물량, 토양 조사 분석 결과	398
4. 하천변 식생과 환경요인	404
5. 수생식물의 식생분포	407
6. 농경하천의 특성 비교	413
제 4 절 요약 및 결론	421
참고문헌	423

제 8 장 GIS자료 구축 및 응용기술 개발

제 1 절 서론	429
제 2 절 GIS자료기반 구축	430
1. 지리정보시스템	430
2. GIS자료의 구축 방법	431
3. GIS자료 구축 결과	436
제 3 절 GIS 응용기술 개발	438
1. GIS자료의 전처리	438
2. GIS 지형자료의 구축	439
3. GIS 지형자료 구축 결과	444
4. 유출 곡선 번호 추출	448
제 4 절 요약 및 결론	449
참고문헌	450

제 9 장 RS 자료현행화 기술 개발

제 1 절 서론	455
제 2 절 위성영상자료 처리방법	457
1. Landsat-5 TM 영상	457
2. 영상의 전처리	457
3. 밴드 재구성	459
4. 영상 분류	463
제 3 절 다시기 영상에 의한 토지피복변화 추정	468
1. 대상지구 선정 및 위성영상 자료	468
2. 위성영상의 전처리	469

3. 토지피복분류 결과	470
4. 토지피복변화 분석 및 추정	473
5. 토지피복변화 추이 분석	474
제 4 절 위성영상을 이용한 유출곡선번호의 추정	475
1. 영상자료 및 전처리	475
2. 유출곡선번호의 추정 방법	476
3. 토지이용 분류	480
4. 유출곡선 번호 추정 결과	481
제 5 절 요약 및 결론	483
참고문헌	485

제 10 장 농업유역의 수문순환 모델링

제 1 절 서론	495
제 2 절 농업유역의 수문순환 모델의 개발	496
1. 모델의 기본 개념	496
2. 유역 유출량 부모형	498
3. 관개지구 유출 부모형	502
제 3 절 농업유역의 수문순환 모델의 적용	513
1. 유역 유출량 모형의 적용	513
2. 관개지구의 유출 모형의 적용	523
제 4 절 농업유역의 물수지 분석	529
1. 농업유역의 물수지 해석방법	529
2. 기천 관개지구의 물수지 분석	531
3. 발안 관개지구의 물수지 분석	533
제 5 절 요약 및 결론	535
참고문헌	536

제 11 장 수문모델링 기술 개발

제 1 절 서론	541
제 2 절 단기 강우-유출 해석	542
1. 개론	542
2. 유출수문곡선의 추정	543
3. 대상유역 및 자료	546
4. 수정 TR-20 모형의 검증	547
5. 경작상태에 따른 유출 변화	550
제 3 절 저수지군에서의 일유출해석	552
1. 개론	552
2. 모형의 구성	553
3. 모형의 적용	555
4. 모형의 검증	558
제 4 절 수정 TANK 모형의 개발 및 응용	560
1. 개론	560
2. 최적화 모형	561
3. 유출모형의 적용	562
4. 모형의 보정 및 검증	566
제 5 절 신경망이론을 이용한 유출 해석모형	570
1. 개론	570
2. 모형의 개발	571
3. 결과 및 고찰	575
제 6 절 요약 및 결론	582
참고문헌	584

제 12 장 수질모델링 기술 개발

제 1 절 서론	591
제 2 절 원단위법에 의한 부하량 산정	594
1. 원단위법	594
2. 시험유역내 오염원 현황	596
3. 원단위법을 이용한 오염부하량 추정	599
제 3 절 채수빈도를 고려한 오염부하량 산정	603
1. 개론	603
2. 시험유역 및 수문, 수질 자료	604
3. 오염부하량 및 유량 평균농도 산정 방법	604
4. 오염부하량 및 유량 평균농도 산정 결과	607
제 4 절 유역비점원오염 추정 모형	610
1. 개론	610
2. AGNPS 모형	611
3. ARC/INFO-AGNPS 호환모형	614
4. 모형의 입력자료 구축	615
5. 오염부하량 산정	625
6. 모형의 적용 및 보정	628
7. 모형의 검증	632
8. 모형의 응용	636
9. 최적관리기법	638
제 5 절 요약 및 결론	642
참고문헌	645

제 13 장 생태환경 모델링 기술 개발

제 1 절 서론	653
제 2 절 일별 기상인자 발생 모형	654
1. 개론	654
2. 국내 기상관측소 현황 및 자료	655
3. 매개변수의 결정방법	655
4. 매개변수의 추정	658
5. 모형의 적용	659
6. 모형의 응용	663
제 3 절 논에서의 영양물질추정 모형	666
1. 개론	666
2. 모형의 개발	667
3. 모형의 적용	673
제 4 절 벼 에너지 흐름 모형	681
1. 개론	681
2. 에너지 흐름 분석 기법	682
3. 에너지 흐름량 산정	684
제 5 절 요약 및 결론	688
참고문헌	690

제 14 장 수환경관리 및 평가시스템 개발

제 1 절 서론	699
제 2 절 WEMES의 개발	700
1. 자료관리 시스템	700

2. 예측모델시스템	701
3. 수환경평가/관리시스템	703
4. 사용자 편의시스템	712
제 3 절 WEMES 조작과 운용	712
1. 자료관리시스템	712
2. 예측모델시스템	716
3. 수환경평가시스템	724
제 4 절 요약 및 결론	729
참고문헌	729

제 15 장 농업환경정보 관리시스템 개발

제 1 절 서론	735
제 2 절 농업환경정보시스템의 개발	737
1. 시스템의 개요	737
2. 시스템의 구성 범위	738
제 3 절 농업생태환경정보시스템의 구성	739
1. 데이터베이스	739
2. Modeling	739
제 4 절 요약 및 결론	743
참고문헌	744

연구성과 활용실적	747
-----------------	-----

제 I 편 총론

여 백

총 론

2000년 12월

“농업생태환경 모니터링 및 종합적 환경관리시스템 개발 사업”

서울대학교 농업생명과학대학 부속 농업개발연구소

최종보고서 제 I 편 제 1 장

여 백

제 1 장 총 론

제 1 절 서 론

‘농업생태환경 모니터링 및 종합적 환경관리 시스템 개발 사업’은 농림수산 특
정 연구과제 중 첨단기술개발사업의 환경분야 연구과제로서, 1995년 12월 재단법인
농림기술관리센터와 서울대학교간의 연구 협정으로 1995년 12월 부터 2000년 12월
까지 총 5개년에 걸쳐 서울대학교를 주관 연구기관으로 20여명의 연구원이 참여하
는 학제간 공동연구로 수행되었다. 본 보고서는 5개년도의 연구 결과를 정리한 최
종 보고서이다.

첨단기술개발사업은 생물, 물리, 화학, 기계, 전자, 생명공학, 환경공학 등을 응용
하여 농림업에 적용되는 첨단기술을 개발하거나 이미 타 분야에서 개발된 기술을
농림업 분야에 접목시켜 생산성의 향상 또는 농산물의 부가가치를 높일 수 있는 사
업이다. 따라서, 첨단기술개발사업은 현장애로기술개발사업과는 달리 현장에서 제
기되는 문제를 현재까지 개발된 기술을 응용하여 비교적 단기간에 해결하기 보다는
장차 제기될 수 있는 문제나 현재 제기되고 있는 문제점 중 관련 분야의 첨단기술
을 종합적으로 활용하여 보다 심층적인 연구를 통하여 해결방안을 제시하기 위한
기술개발 분야이다 (농림부·농림기술관리센터, 1999).

본 연구는 첨단기술개발사업분야 중에서 환경분야로서 친환경 및 자원보존형 기
술 개발에 포함된다. 따라서, 이상과 같은 사업의 기본 목표를 바탕으로 본 연구에
서는 첨단 기술을 도입하여 유역 규모에서의 농업생태환경 시스템이 어떻게 분포하
고, 여러 가지 인위적 관리인자에 따라 변화하는가를 파악하며, 시스템의 구성 인자
들간의 관계를 구명하는 등 생태환경의 모니터링과 함께 이들 각 과정을 정량적으
로 표현할 수 있는 수학적 모델을 개발하며, 사용자 중심의 종합적인 환경관리 시스
템을 구축하는 데 그 목표를 두었다.

본 장에서는 ‘농업생태환경 모니터링 및 종합적 환경관리 시스템 개발 사업’의 연
구 배경과 그 필요성을 기술적, 경제적, 사회적 측면에서 살펴보고, 지금까지의 연구

개발 실적과 앞으로의 발전과제를 정리하며, 연구 개발의 목표와 내용, 세부 수행 방법, 추진계획 등을 정리하도록 한다. 또한, 본 연구의 기대효과를 기술적, 경제산업적 측면에서 고찰해보고, 연차별 연구목표와 내용, 연구진의 구성과 역할 등을 정리하도록 한다.

제 2 절 연구의 배경

농업생태계는 논, 밭, 과수원, 초지 등과 같은 농경지의 자연 환경 생태를 말하며, 농작물, 동물과 식물, 그리고 기상, 물과 토양 등으로 구성된다. 농업생태계는 자연 생태계의 구성원이며, 산림과 수생 생태계의 중간에 위치한다. 또한, 농업생태계는 전체 지면생태계에 대하여 면적 규모로 23%에 달하는 국토 자연생태계의 주요 부분이다. 이와 같은 농업생태계는 여타의 자연생태계 및 인간 생활권과 상호 관련을 갖고 있다.

지금까지 농업생태계는 단지 농작물을 생산하고 공급하는 기능을 갖는 것으로 간주되어 왔다. 그러나 농업생태계는 이와 같은 생산 기능 이외에도 1) 수문 순환과정의 중요 단계에 있어 홍수를 조절하여 주고, 2) 대기와 수질을 정화하며, 3) 기후를 완화하여 주고, 4) 자연 생태계의 생물학적 다양성을 유지하는 등 환경보전기능을 가지고 있다. 실제로 이와 같은 환경보전기능 자체만으로도 우리 나라 농업총생산량에 못지 않은 주요한 경제적 역할을 담당하고 있는 것이다.

지난 30여년 동안 농업생태계는 토지 생산성 위주의 관리로 인하여 농작물 생산성에서는 괄목할 만한 진전을 보였다. 품종 개량, 농업기반시설의 설치, 농약과 비료의 보급, 농기계 작업등을 통하여 주곡인 쌀의 생산량은 50% 이상의 증수를 가져왔으며, 주곡의 자립을 달성하는 녹색혁명을 이룩하였다.

그러나 농업 내외적 수질오염과 과도한 농업화학물질의 사용으로 농경지의 토양오염과 함께 비점오염 등 수질오염 피해의 확산, 작목의 단순화 등으로, 농경지의 지속적인 생산을 보장하는 경지 생태계의 안정성에 위협을 받고 있으며, 과다한 농약·비료 등의 잔류량, 농산물에 유독성 잔류량의 검출 등 인간의 건강에 대한 위협을 초래하고 있다.

이상과 같이 농업생태계는 농업 내외적 요인에 대하여 대단히 취약한 특징을 갖고 있다. 이상 기후로 인한 농업재해, 농약과 비료에 따른 동식물 생태계의 파괴, 토양유실과 오염물질로 인한 수질오염과 토양오염 등은 농경지의 생태환경의 취약성을 나타내주는 하나의 현상인 것이다.

더욱이, WTO체제로 농산물 시장 개방은 농경지의 이용체제에 있어서 큰 변화를 예견하고 있다. 농지의 타목적 전환이 가속되고, 농업 수익성이 높지 않은 한계농지는 방치되고, 생산성 제고를 위한 대규모화 영농체제는 농작물의 단순화를 초래하게 될 뿐만 아니라, 생물생태환경의 변화를 수반할 수 있을 것이다. 따라서, 농경지 생태계의 환경 관리를 위한 적절한 대책이 필요하다.

농업생태환경관리를 위하여는 1) 환경 관리의 목표와 수준을 정하고, 2) 과학적이고 체계적인 현장 모니터링을 통해 현황을 파악하여, 3) 최적관리 방안을 강구하고 이를 실행하며, 4) 이상의 단계를 반복하여 당초의 목표를 달성하는 과정이 필요하다.

따라서, 과학적이고 체계적인 농업생태계 모니터링 기술의 개발과 이를 바탕으로 종합적 환경관리를 위한 시스템의 개발이 필요하다.

제 3 절 연구개발의 필요성

1. 기술적 측면

농업 생태계는 다양한 생물·무생물적 요소로 구성되며, 이들 요소간은 상호 유기적인 관계를 갖는다. 따라서, 각각의 환경 요소를 대상으로 하는 독립적인 환경 모니터링은 농업생태계 환경 전반에 대한 정보의 수집과는 관련이 없고, 이를 근거로 하는 환경관리 방안은 건전하고 지속적인 농업생태 환경관리를 위한 대안을 모색하는 데 부족하다. 따라서, 각 구성 요소에 대한 이해와 현황의 파악과 함께, 구성 요소들간의 상호 관련성을 구명하기 위한 종합적인 환경관리 기술개발이 요청된다.

특히, 해충관리, 농업유역의 비점원오염의 최적관리 등 환경보전적 영농체계의 도입이나, 저공해 농산물 생산 시스템 등을 계획할 때, 지역 특성에 적합한 관리방안

을 수립하기 위하여는 종합적인 농업환경 관리를 위한 데이터베이스와 진단, 평가를 위한 체계적인 수단이 필요하다.

또한, 기후 변화, 농경지의 타목적 이용이나 형질변경, 농업기반시설의 설치 등 농업 환경 변화에 따른 농업과 주변 생태계에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해서는 종합적 농업환경관리 시스템의 개발이 필요하다.

농업생태계 모니터링 시스템과 종합적 환경관리 시스템 개발의 필요성을 농업환경생태의 구성요소별로 정리하면 다음과 같다.

가. 농경지, 농업기반시설 정보분야

- ① WTO체계의 출범과 함께 농지제도 개선, 지방자치제 실시 등 국내외적 요인에 따라 농지의 타목적 이용 및 개발이 증가하고 있으며,
- ② 대규모 경지정리 등 농지 기반 시설의 개조 사업이 추진되고 있고,
- ③ 농지환경의 변화로 인하여 농업생태계에 영향을 주는 원인이 제공되고 있으므로,
- ④ 이들 지형 공간적 변화, 지리적 변화 등에 따른 농업생태계의 영향을 구명하기 위한 자료의 구축, 정보의 현행화 등 기술개발이 필요하고,
- ⑤ 농업생태계 밖에서의 생활오수, 산업폐수 등이 관개용 수질에 영향을 미치고 있으며, 이로 인하여 관개수질의 악화, 토양오염 등이 일어나고 있으나,
- ⑥ 실제 오염 부하량과 그 영향에 대한 기작이 검토되지 않으므로서 이로 인하여 인체에 유해한 반응이 발견될 때까지 사전에 충분한 대책이 마련되지 못하는 등 기술적 제약이 따르고 있다.
- ⑦ 따라서, 경지와 농업기반시설에 관한 공간적 지리정보를 관리하고, 이들과 농업생태계의 관련성을 연관하는 환경관리 시스템이 개발되어야 한다.

나. 농업유역이 수문·수질 환경분야

- ① 농경지에서의 물의 순환과정, 즉 수문순환에 대하여 정성적으로는 잘 알려져 있으나, 정량적인 측정자료가 부족하며,

- ② 이로 인하여, 농경지로부터 유출량, 지하수 유입량 등을 고려하지 않은 상태에서 물 부족을 보충하는 데 급급해 왔으므로,
- ③ 농경지에서의 영양물질 유입에 의한 하천수질의 부영양화, 지하수의 오염 등의 문제가 발생하고,
- ④ 토양유실 등으로 인하여 경사지의 밭은 표토의 유실과 황폐화가 빚어지고, 이로 인하여 하천 수질 악화 등이 발생되고 있는 등의 문제점이 산재해 있다.
- ⑤ 특히, 농업유역의 수문 및 수질 환경은 기상, 지형, 토양, 토지이용상태, 영농방법 등의 여러 인자에 의하여 좌우되므로, 이들과의 관계를 정량적으로 해석할 수 있는 수학적 모형을 개발, 응용하여 대상 유역에 관한 체계적이고 합리적인 최적관리기법 (Best Management Practice, BMP)을 강구하는 것이 필요하며,
- ⑥ 농업 유역에서의 물질 순환과의 관계를 조사 분석하여, 효과적인 비점원오염의 억제를 위한 관리방안의 모색이 필요하다.

다. 농작물 생육 환경분야

- ① 지역별 기상환경 영농방법에 따른 벼 생육과의 정량적 관계를 구명함으로써, 기후변화와 영농형태에 따른 농업생태계의 변화를 예측할 수 있는 기술을 개발하고,
- ② 원격탐사법과 병행하여 지역의 작황 평가 시스템을 구축함으로써, 실시간 작황 예보와 각종 생육 저해 요인에 대한 효과적인 대책을 수립할 수 있도록 하며,
- ③ 환경평가 관리시스템에서 생물을 활용하는 새로운 기술을 정립함으로써 환경평가의 질을 향상시킬 수 있고,
- ④ 각 농업생태 환경인자와 생물지표간의 관계를 정립함으로써, 안정적인 환경관리 기준을 제시할 수 있을 것이다.
- ⑤ 특히, 실제 영농에서 적용하는 농약의 종류별 사용시기 및 양 등과 생물 지표와의 관계를 정량화하며 영농방법에 따른 농업생태계의 영향을 정량적으로 구성함으로써, 농업유역의 환경평가 기술의 정립이 필요하다.

라. 주변 생태환경분야

- ① 농업생태계는 산림, 수생생태계와 상호 밀접한 관계를 가지므로, 이들의 상호 관련성을 고려한 자연 생태계의 보전 방안을 강구해야 하며,
- ② 농업생태계와 주변 생태계간의 상호 관련성을 구명함으로써 자연생태계의 진단에 필요한 자료를 축적하여, 농업생태계 보전에 따른 환경보전기능을 정량화해야 하며,
- ③ 농경지로부터의 수질오염의 정화 등에서도 주변 생태계를 활용하는 기술 등이 모색되어야 하므로,

주변생태계와 농업생태계의 상호 관련성을 고려한 환경친화적 농업체제의 타당성을 평가할 수 있는 모델을 구축함으로써, 종합적 농업환경관리기술의 발전이 가능한 것이다.

마. 농업곤충 생태환경분야

- ① 농업과 주변 생태계에는 다양한 곤충 등이 서식하고 있으며, 이들은 농작물의 생육과 수확량에 영향을 미치며, 반면에 농약 살포 등 방제 관리에 따라 영향을 받으므로,
- ② 현재, 해충의 예찰과 방제를 위한 전국적인 조사와 감시가 이루어지고 있고, 종합적 해충관리방안 (Integrated Pest Management, IPM)이 연구 개발되고 있다.
- ③ 농업생태환경의 모니터링과 관리를 위해서는 다양한 곤충종을 대상으로 할 경우, 시간적, 경제적으로 어려우므로 곤충생태를 대표할 수 있는 수종의 지표생물을 선정하고, 이들의 생태학적 특성을 파악함으로써 농업생태계의 동향을 파악하고, 체계적이고 종합적인 환경관리 시스템의 구축과 운영이 필요하다.
- ④ 또한, 기상, 수문, 토양, 주변 생태계 등과 지표생물의 관련성 등에 대한 과학적 분석 방법이나 모델을 응용한 환경 평가와 관리를 위한 기술 개발이 필요하다.

바. 농업생태환경 모니터링 분야

- ① 농업생태계의 현장 모니터링은 각 환경요소별 속성의 시간적 공간적 변화를 파악하는 것으로, 양질의 농업생태환경 자료를 구축하는 것은 종합적 환경관리를 위한 전제조건이 된다.
- ② 농업생태계 모니터링 기술의 발전을 위해서는 자료의 수집방법과 수집 자료의 신뢰도, 정확도의 검증, 결측값의 보정, 미관측값 추정 등이 필요하며, 이 분야의 통계적, 수학적 기법의 개발이 선행되어야 한다. 따라서, 우리 실정에 맞는 농업환경 자료의 구축을 위해서는 자료의 속성, 표본 추출방법, 정량화 방안 등에 대한 기준을 설정해야 하며,
- ③ 또한, 환경 관리시스템의 구성을 위한 생태환경 데이터베이스 시스템을 구축할 수 있도록 각 자료의 속성을 분석하고, 정보의 현행화 과정을 체계화하며, 이를 바탕으로 하는 D/B시스템의 개발이 필요하고,
- ④ 다양한 환경관리 목표와 수준에 대응하는 최적 관리기법의 선정과 실행을 위하여 적절한 사전 분석과 평가를 위한 시뮬레이션 모형의 적용에 필요한 각종 자료를 생성할 수 있도록 하는 기술개발이 요청되며,
- ⑤ 농업 생태정보의 지속적 자료 보충 및 관리를 위한 체계가 마련되어야 하고,
- ⑥ 이를 바탕으로 하는 종합적 환경관리시스템의 구축이 필요하다.

사. 종합적 환경관리시스템 개발분야

- ① 환경 친화형 지속농업 시스템의 구축을 위해서는 영농체제와 방법에 따른 농업생태계 요소들의 거동을 예측할 수 있는 모델링 기술의 개발이 필요하며,
- ② 농업생태 정보 데이터베이스 시스템과 이들 모델의 상호호환을 통해 최적관리 대안의 평가를 위한 시스템을 구축하여야 하고,
- ③ 이를 통하여 농민, 농업연구 및 지도자, 혹은 국가적 농업개발 계획에서 활용할 수 있는 범용성의 환경 관리 시스템을 구축해야 하며,
- ④ 환경변화에 따른 농업생태계에 미치는 위험도의 예측평가 등을 위한 종합적 환경 영향 평가 시스템의 개발이 필요하다.

2. 경제적 측면

농업 내외적 요인에 의한 수질, 대기오염, 쓰레기 공해 등 환경오염과 피해화, 농산물의 농약잔유량 등 식품의 안전성 등이 제기되므로써 저공해 농산물에 대한 국내의 수요 증가와 국제적 환경 규제에 능동적으로 대처하는 환경친화형 농업체제의 구축이 필요한 시점에서,

- ① 농경지와 농업기반시설 등의 이동, 변화, 설치 등으로 인한 환경 경제적 피해를 극소화 하기 위한 환경관리 기술이 요청되며,
- ② 환경 관리를 위한 다양한 관리기법 중 현실적이고 효과적인 수단과 그 효과를 계량할 수 있는 종합적 환경 관리시스템을 구현하므로써 효율의 증대와 시행착오를 최소화하므로써 국가경제에 기여할 수 있고,
- ③ 농업생태계의 건전한 관리를 위한 기술개발을 통해 환경파괴와 피해를 막고, 안전한 식품을 지속적으로 공급하므로써 국민의 건강을 지키는 노력이 필요하며,
- ④ 농업 환경 정보와 기술의 정보화 시스템을 구축하므로써 선진국형 환경 관리 기술 개발에 기여하며,
- ⑤ 보편, 일률적이고 단편적인 현재의 농업 환경 정보를 발전시키고, 관련 기술의 분배, 훈련, 지도, 보급을 지역별, 작목별, 전문성과 특수성을 고려한 다양화로 첨단 농업 기술의 현장 적용을 추진하므로써, 기술적 파급효과를 극대화하는 노력이 필요하며,
- ⑥ WTO, 기후변화협약 등 국제적 환경 변화에 적극 대응하기 위한 국가적 차원의 농업환경 정보 시스템과 관리시스템을 개발하므로써 해외경쟁력을 높여 농업의 국제화 기틀을 마련해야 하는 시점에 처하여 있다.
- ⑦ 또한, 농업 생태 환경정보를 단편적으로 구축하고, 다양한 지표를 적용하는 데 따르는 혼란과 중복적인 투자를 극복할 수 있도록 종합 관리 체제의 개발이 필요하다.

3. 사회적 측면

농업생태계의 모니터링 기술과 종합적 환경관리 시스템 개발기술을 연구발전하
므로써

- ① 건전한 농업 생태 환경의 회복을 통하여 농산물의 안전성을 확보하고 국민적
신뢰를 회복해야 하며,
- ② 생태적으로 안정된 환경을 추구하는 세계적 동향에 능동적으로 부응하여 선진
화된 농업시스템을 구축해야 하며,
- ③ 농업의 공익적 기능의 확대를 통한 농업에 대한 국민적 지지 기반을 확대해
가므로써 국민 속의 농업으로 발전시켜야 한다.

제 4 절 지금까지의 연구개발 실적과 앞으로의 전망

1. 기존의 연구 내용

농업생태계의 현장 모니터링 시스템과 종합적 농업 환경 관리 분야의 연구개발
은 주로 단편적이고, 부분적으로 접근해 온 것이 현실이며, 각 분야별 연구개발 실
적을 살펴보면 다음과 같다.

가. 농경지, 농업기반시설 정보분야

- ① 매년 수천억원의 국고보조금을 투입하여 농지개발, 농업 기반 조성사업을 실시
해왔으며, 그 결과는 지구별 자료로서 보전되고 있다.
- ② 농경지와 농업기반 시설의 개발에 따른 농업 생태환경의 영향평가는 대규모
간척사업 등에 국한되어, 자연생태 환경과 교통환경 영향 등의 평가에 머물러
있다.
- ③ 이와 같은 농업개발사업의 환경영향 평가 기술은 실제 농업 생태계의 보전과
관리에 응용될 수 없는 내용으로 구성된다.
- ④ 또한, 농경지의 이용상황 등에 대한 체계적인 정보가 구축되지 않아, 지역 단
위 또는 국가적 차원의 농지정보 관리체계가 마련되어야 할 것이다.

나. 농업 유역의 수문·수질 환경분야

- ① 농업유역의 강우-유출기작에 대한 단편적인 연구가 시행되었으며, 이를 바탕으로 하는 수문모형이 개발되어 이용되고 있다.
- ② 논에 대한 강우-유출기작의 구명을 위한 SCS의 유출 곡선 번호(Curve Number, CN)의 추정을 위한 포장 실험과 유역 적용 실험 연구가 진행되고 있어, 우리 나라의 농경지 유역에 적용 가능한 자료가 제시될 수 있을 것이다.
- ③ 그러나, 다양한 농업 특성에 따른 구역 규모에서의 수문기작에 관한 자료가 부족하며, 효율적인 농업 생태 환경 모니터링에 필요한 측정방법, 밀도, 그리고 자료처리 시스템에 관한 연구가 부족하다.
- ④ 농업유역에서의 수질 오염은 자료가 매우 부족하며, 부분적인 연구과제로 수행하고 있는 상태로서, 유역의 오염부하량은 원단위 추정에 의한 방법이 적용되고 있는 실정으로,
- ⑤ 최적 관리기법의 정립을 위하여, 농업유역내의 영양물질의 순환기작과 이의 현장 모니터링 등의 기술이 취약한 실정이고,
- ⑥ 시험유역을 대상으로 하는 체계적인 수질자료 수집, 최적관리기법의 평가와 이로 인한 농업생태계 변화 등 상호 관련성을 중심으로 하는 연구가 필요하다.

다. 농작물 생육환경분야

- ① 논벼 등의 생육환경과 수확량 예측을 위한 전국적인 표본지구와 현장 조사가 시행되고 있으며, 그 결과로부터 생산량의 추계가 이루어지고 있으며,
- ② 농정 업무의 일환으로 직파재배 등 신기술의 보급이 추진되고, 현장 조사 결과가 농업통계로 수집분석되고 있다.
- ③ 그러나, 환경상태 정보 시스템의 개발과 환경 관리를 위한 목적으로 이들 생육환경 조사방법의 적용성과 조사밀도의 조정, 결측자료의 보완방법 등 통계적 분석이 필요하고,
- ④ 기후인자와 생육상황과의 관계를 정밀 조사 분석하여 생장 모형들의 적용성을

평가하고, 필요한 보완을 시행하며, 환경변화에 따른 벼 생육 및 수확량 변동
을 예측할 수 있는 기술 개발이 필요하다.

라. 농업곤충 생태환경분야

- ① 농업 해충의 예찰과 방제를 위한 시스템이 개발되어, 해충 생태자료가 수집,
분석되고, 이를 바탕으로 해충발생예보가 시행되고 있으며,
- ② 종합적 해충관리계획의 적용을 위한 포장단위의 시험이 진행되고 있고, 이 분
야의 환경관리를 위한 연구개발이 이루어지고 있다.
- ③ 그러나, 농업 해충과 익충의 생태적 인자와 수생생물동태, 농업기반 시설과 각
종 영농방법 등에 따른 생태변화와의 관계에 대한 연구가 부족하며,
- ④ 환경 지표 생물로서의 통계적 특성, 자료 수집처리, 분석 등의 일관된 연구가
부족하여 종합적 환경 관리 시스템으로써 요건을 판단할 수 있는 수준에 이르
지 못한 실정이다.

마. 주변 생태환경분야

- ① 농업 생태계내의 식생, 곤충 환경에 대한 연구는 작물 보호와 방제를 중심으로
이루어져 왔으며,
- ② 각종 병해충 예찰을 위한 자료수집과 모델링 등은 실용화 단계에 있다.
- ③ 농업과 관련한 생태학적 연구가 미진하여 농업생태계와 주변 생태계와의 관계
에 관한 연구결과가 부족하며,
- ④ 농업생태계의 변화에 따른 주변 환경과의 영향을 평가할 수 있는 모델이 전무
하여, 체계적인 접근이 이루어지고 있지 않고,
- ⑤ 농업생태계의 물질 순환, 에너지 순환 등에 대한 모델이 연구되지 못한 실정이
다.

바. 농업생태환경 정보시스템과 종합 환경관리 시스템분야

- ① 농업 환경 정보 데이터 베이스 분야에서는 국내에서는 토양정보의 전산 데이

터베이스화의 초기 단계에 있으며, 지리정보 시스템을 이용한 단편적인 적용 단계에 머물러 있으나, 외국의 경우는 지형, 토양 등 주요 환경요소의 데이터 베이스를 완성하고, 지리정보 시스템의 응용에서의 실용화 단계에 있으며,

- ② 환경 변화에 대한 모니터링 분야에 있어서는 국내의 경우 연구 개발 단계로 제한적인 요소에 대한 원격탐사를 적용하는 단계이나, 외국에서는 원격탐지기 술을 이용하여 준실시간 모니터링 시스템을 구축하고 있고, 작물의 생육 수확 량 예측 등의 실용화 단계에 있는 실정이다.
- ③ 농업 환경 정보 시스템 분야에 있어서는 단편적인 농업 관련 자료의 수집, 배 분을 위한 시스템의 개발과 구축이 진행되고 있으나, 외국에서는 지역별로 종 합적 농업 환경 정보 시스템의 구축이 완료된 상태에 있다.

2. 기존 기술의 취약성

농업생태계의 현장 모니터링과 종합적 농업 환경 관리 시스템 구축을 위한 현 재의 기술상태의 취약성은 다음과 같다.

- ① 농업 환경 자료의 다양성과 시공간적 변화, 그리고 환경인자간의 상호관련성으 로 인하여 종합적 농업 생태 환경의 기작이 잘 알려져 있지 않은 상태로서,
- ② 모니터링 자료의 수집을 위한 속성과악, 관측, 표본추출방법, 정량화 방안 등이 미흡하며,
- ③ 자료의 변환과 가공에 필요한 신뢰도, 정확도의 검증이 미흡하고, 결측자료의 보정과 미관측자료의 추정 등의 방법이 정립되지 않았고,
- ④ 자료의 분석과 환경영향평가 등을 위한 시뮬레이션 모형의 개발, 위험도, 신뢰 성의 평가방안 등이 미진하며, 특히 일반화된 종합적 환경영향 평가 모델이 설정되지 않은 관계로 동일 기작에 대한 평가분석의 반복성이 결여되어 있으 며,
- ⑤ 자료의 배분을 위하여 필요한 네트워크의 구축이 이루어지지 않고 표준적인 프 로토콜이 마련되지 않고 있으며,
- ⑥ 시스템의 설계, 평가·보완, 운영, 유지 등 실용화를 위한 사전 검토가 없고, 경

힘이 전무한 실정이다.

3. 앞으로의 전망

농업생태계의 현장 모니터링과 실시간 지역별 농업 환경 관리 시스템에 대한 실수요자의 요구가 크게 상승할 것이며, 환경 보전형 지속적 농업에 대한 국내외적 관심이 고조될 것이다. 특히, 농산물의 안전성과 관련하여 저공해 식품 수요가 꾸준히 진행되고, 환경 친화형 농업에 대한 인식이 확산되어 결국 농업생산성 향상에 의한 농업발전에 비하여 이 분야의 빠른 신장이 예상된다.

따라서, 다양한 농업환경 관리 방안에 대한 수요가 늘게 될 것이며, 농업생태계의 보전 방안에 대한 국가적 지역적 수요가 증가하리라 본다.

이를 대비하여, 농업생태계의 현장 모니터링과 실시간 자료를 종합관리하고, 각종 최적관리 방안을 사전에 평가할 수 있는 종합적 환경관리정보가 필요하게 될 것이다.

제 5 절 연구개발 목표 및 내용

1. 연구의 최종목표

- 농업생태 환경 요소인 기상, 수문, 지형, 경지, 토지이용, 토양과 용배수 조직 등의 물리적 인자와, 농작물, 산림·수생 식물과 곤충 등 생태계 인자, 그리고 경운, 파종, 비료·농약 살포 등 영농관리 인자, 수질 및 토양 오염 등 물질오염 상황 등 실시간 자료를 구축할 수 있는 농업환경생태 정보시스템을 구축하고,
- 대상지역을 선정, 계측망을 구성하고, 환경 물리적 요소, 생태계 요소, 영농관리 요소, 그리고 물질오염 요소 등을 측정·조사하며,
- 지형, 경지, 토양, 토지이용 등을 지리정보시스템 (Geological Information System, GIS)을 이용하여 구축하고, GPS (global positioning system)를 이용한 농업기반시설 자료의 현행화 기술을 개발하며,
- 원격탐사 (Remote Sensing, RS) 기술을 이용한 농업생태환경의 진단, 예측 기술을 개발하며, 그 결과를 GIS자료와 연결하여 구축하고,
- 환경 진단을 위한 지표 생물 (곤충, 미생물, 식물)을 선정하며, 자료의 표준화, 자료의 안정성, 결측자료 보완, 미계측 자료의 생성 등을 위한 통계적·수학적 기술을 발전시켜, 농업생태환경 모니터링 기술을 개발하고
- 각 환경 요소의 평가를 위한 모델의 개발·적용성을 분석하며,
- 농업생태 환경영향평가기술, 환경변화 예측기술, 유역의 최적관리기법 (Best Management Practices, BMP)을 결정할 수 있는
- 범국가적이고 종합적 농업환경정보 관리시스템의 구축을 위한 프로토타입을 개발하고자 한다.

2. 연차별 연구개발목표 및 내용

제1차~제5차 년도의 연구개발목표와 내용, 범위 등은 <표 1-1>에서와 같다. 제4차 년도 (1999년) 이후에는 전문가 평가 결과의 반영으로 연구계획을 수정하였는데, 주변생태환경분야를 제외하고, GUI 환경관리시스템의 개발에 중점을 두어 연

구를 수행하였다.

<표 1-1> 연차별 연구개발 목표와 내용

구 분	연구개발 목표	연구개발 내용 및 범위
1차 년도 (1996)	<ul style="list-style-type: none"> ● 농업환경생태 모니터링 지역의 선정 ● 농경지, 농업기반시설등 GIS자료 구축 ● 대상유역 수문특성조사 분석 ● 농업유역의 유출과 수질 오염 계측망 구성 및 측정 ● 농작물 생육환경의 모니터링 기술 확립 ● 주변 생태계 모니터링 기술 개발 ● 곤충·미생물 생태계 모니터링 기술 개발 ● 농업환경 정보 시스템의 개발 및 자료 구축 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 대상구역의 선정 ○ 지리정보시스템 자료기반의 구축 (지형, 수계, 토양, 교통, 토지이용, 용배수 시설) ○ 구역내 농경지 변화상태 조사 및 원인분석 ○ 기상자료 수집분석 ○ 유역별 수문특성 조사 분석 ○ 강우, 유출자료의 측정망 시설 및 수문관측 ○ 수질측정망 구성/수질분석 ○ 물질순환 기작 측정 포장 선정 조사 ○ 영농방법 농작물 생육, 수확량 조사 ○ 주변 산림, 수생 생태조사 지점 선정/조사 ○ 주요 수도해충 발생량 조사 ○ 포식성 곤충 및 거미류 등의 지표 생물 가능성 조사 및 발생분포 ○ 표본구/조사 밀도규모, 측정 방법, 시기 및 빈도에 따른 변량 분석 ○ 기존 환경정보 시스템 분석 평가 ○ 환경정보 데이터베이스 구성 ○ 환경 모니터링 자료의 데이터 베이스 구축

<표 1-1> (계속)

구 분	연구개발 목표	연구개발 내용 및 범위
2차 년도 (1997)	<ul style="list-style-type: none"> ● 지리정보시스템 자료 구축 ● 농업유역의 유출과 수질 오염 측정 분석 ● 논·의 물질순환기작 모델링 ● 농작물 생육환경 조사 기술의 정립 ● 주변 생태계와의 관련성 조사기술의 정립 ● 지표곤충 모니터링 체계 개발 ● 농업환경정보 시스템의 정보 현행화 기술개발 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 대상 지역의 지리정보시스템 자료구축 ○ 기상자료 조사 ○ 수문자료 측정(강우, 유출, 용배수 상황) ○ 수질 샘플채취, 분석 ○ 수질·토양 분석 ○ 농경지내에서 영양물질 분석 ○ 논·의 물질순환 모니터링 ○ 토양 샘플링, 분석 ○ 관행영농방법 조사 ○ 농작물 생육, 수확량 조사 ○ 산림, 수생 생태환경 조사 ○ 주요 수도해충 및 지표곤충 조사체계 설정/평가 ○ 이동성 해충의 이동, 확산 경로 연구 ○ 지표 생물 선정 가능성 분석 ○ 조사 표본구의 밀도, 규모, 측정방법에 따른 변량 특성 분석 ○ 환경정보 수요분석 ○ 정보현행화 시스템개발 ○ 농업환경정보 데이터베이스 시스템의 개선

<표 1-1> (계속)

구 분	연구개발 목표	연구개발 내용 및 범위
3차 년도 (1998)	<ul style="list-style-type: none"> ● 원격탐사기술을 이용 한농업환경 GIS자료 현행 화 기술개발 ● 농업유역의 유출, 수질 오염 측정 분석과 모형 개발 ● 논·의 물질순환기작 모 델링 ● 벼생육·생산성 모니터 링 기술개발 ● 주변 생태계의 지표 식물의 선정, 모니터링 기 법의 분석 ● 농경지 지표곤충 모니 터링을 이용한 환경평가 체계개발 ● 농업환경 정보 시스템 의 실시간 정보처리 기술 개발 ● 환경관리시스템 기본 프로그램구축 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 원격탐사 기술과 GIS의 접합계획 ○ 원격탐사자료의 토지이용 자료의 검색, 생성, 기 술개발 ○ 대상구역에 대한 RS/GIS 자료시스템 구축 ○ 유역의 수문수질 모니터링 ○ 수질·토양 분석 ○ 농경지내에서 영양물질 분석 ○ 논·의 물질순환 모니터링/모델링 ○ 농업환경 정보시스템을 위한 수질오염 부하량 스크린 모델 개발 ○ 대상 유역의 영농조사, 생육조사 ○ 벼생장모델 적용성 분석 ○ 주변 산림·수생 생태계의 모니터링 ○ 지표식물의 선정, 모니터링 기법의 타당성 분석 ○ 지표곤충 발생량, 출현빈도와 환경등급 설정 연구 ○ 해충밀도 변동요인 규명 ○ 환경정보자료 보완, 제어 방법의 검토 ○ 정보 현행화 체계·기술 개발 ○ 환경관리를 위한 각 요소별 스크린모형의 호환 시스템 개발

<표 1-1> (계속)

구 분	연구개발 목표	연구개발 내용 및 범위
4차 년도 (1999)	<ul style="list-style-type: none"> ● GPS/RS의 농업환경 GIS자료 구축 기술 개발 ● 농업유역의 수문, 수질 오염 모니터링과 모델링 ● 밭의 수문 모니터링 ● 밭의 토양유실량 및 영양물질순환 모니터링 ● 밭작물 생육환경조사 ● 시험유역의 농업용수 실제 사용량 조사 ● 농경지 지표곤충발생 정보시스템 분석기법개발 ● 논에서의 물질순환 모니터링/모델링 ● 종합적 환경관리시스템 구축 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ○GPS에 의한 실시간 토지이용조사분석 기술의 검토 ○RS를 이용한 수확량 예측 정보 현행화 기술개발 ○농업기반시설 자료 현행화 기술개발 ○유역의 수문, 수질오염 조사분석 ○수질·토양 샘플 분석 ○수문모형 및 농업비점원오염 모형의 응용성 평가 ○시험포장 선정 및 유량측정장치 설치 (H-L 플룸, 자기수위계) ○유출량 조사 ○토심별 토양수분 조사 ○유출수/침투수의 수질 샘플링 및 분석 ○토양유실량 조사 ○시험포장의 영양물질수지 분석 ○시험포장의 영농환경조사 ○시험포장의 지피도 조사 ○작물생육 및 수확량 조사 ○지하수 천공(3개공), 하천수위측점 추가(5개 측점) ○하천 수위-유량 측정 ○시기별/측점별 지하수위 측정/분석 ○원격탐사를 이용한 수확량 예측정보현행화기술 개발 ○경관생태 환경영향평가 기법의 개발 ○지표곤충 생태 조사분석 ○해충발생모델 적용성 분석 ○시기별/측점별 지하수 측정/샘플링 및 수질분석 ○기상, 영농방법, 농작물 생육, 수확량 조사 ○논에서의 물질순환 모델링 ○GIS에 의한 유역수문,수질, 농작물수확 예찰 스크린 모델이 개발 ○환경영향 평가를 위한 GIS 스크린 모델의 개발 ○종합적 농업 환경관리 시스템의 완성 및 시스템의 지속적 보완 방안의 검토

<표 1-1> (계속)

구 분	연구개발 목표	연구개발 내용 및 범위
5차 년도 (2000)	<ul style="list-style-type: none"> ● GIS를 이용한 농업 환경 자료 구축 기술 ● 농업유역의 수문, 수질 오염 모니터링과 모델링 ● 밭의 수문/수질 모니터링/모델링 ● 밭작물 생육환경조사 ● 논외 물질순환모델링 ● 지표곤충 모니터링을 이용한 환경평가체계 개발 ● 환경영향평가, 환경변화예측, 최적관리방안을 위한 GIS-스크린모형의 개발 ● 종합적 농업환경관리시스템 구축 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 토지이용자료의 검색, 생성 기술 개발 ○ 농작물 생육 상황과의 관계 분석 ○ 농업유역의 수문, 수질오염 모니터링/모델링 ○ 농업용수 실제 사용량 조사/분석 ○ 유역 지하수 오염 모니터링/모델링 ○ 밭의 수문 모니터링/모델링 ○ 밭의 토양유실 및 영양물질순환 모니터링/모델링 ○ 시험포장의 영양물질수지 분석 ○ 시험포장의 영농환경조사 ○ 시험포장의 지피도 조사 ○ 작물생육 및 수확량 조사 ○ 논외 물질순환 모니터링/모델링 ○ 농작물 생육 모니터링/모델링 ○ 지표곤충발생량, 출현빈도와 환경등급 설정 연구 ○ 해충밀도 변동요인 규명 ○ 기존 농업환경자료에 의한 실시간 환경 자료 분석 ○ 농업환경정보 시스템을 위한 수질오염부하량 스크린 모델 개발 ○ 환경관리를 위한 각 요소별 스크린 모형의 호환 시스템 개발 ○ 농업환경관리시스템 프로토타입의 개발

제 6 절 추진전략 및 방법

1. 학제간 공동 연구

농업생태환경 모니터링 및 종합적 환경관리 시스템의 기술개발은 1) 지형, 토양, 농경지, 농업기반시설 등 GIS 자료구축과 현행화 연구팀, 2) 농업유역 수문 및 수질환경 모니터링 및 모델링 연구팀, 3) 농작물 생육환경 모니터링 및 모델링 연구팀, 4) 주변 산림·수생 생태환경 모니터링 및 모델링 연구팀, 5) 지표 생물 생태 모니터링 기술 연구팀, 6) 농업환경 관리 정보 시스템 개발 연구팀의 6개 분야의 연구진이 참여하는 학제간 공동연구로 추진한다.

그러나 제4차 년도 연구에서는 평가결과에 따라 주변생태환경분야를 제외하고, GUI 환경평가시스템의 개발에 중점을 두는 방향으로 연구가 조정되어 추진되었다.

2. 연구방법의 개요

본 연구 방법의 개요는 다음과 같다.

1) 대상 지역을 선정 하고, 각종 측정 시설을 설치하며, 각 전문 연구진들의 공동 연구 조사를 실시하여 지역내의 조사 밀도, 시기, 빈도, 방법 등에 따른 변량의 통계적 특성과 대표성을 분석하여, 환경 인자의 통계적 특성, 지역 대표성, 환경 요인들 상호간의 관련성 등을 조사하여 모니터링의 기술을 정립하며,

2) 대상 지역의 생태환경을 대표할 수 있는 적정 계측망의 구성 방법과 수준 등을 정하며,

3) 계측망의 측점을 선정하여, 수문, 수질, 토양, 영농상황, 작물생육 상황, 해충 및 유역 곤충 발생상황, 주변 생태계 환경 등의 현장 측정과 자료 분석을 실시하며,

4) 각 전문분야별 모니터링 결과를 분석하고,

5) 지형, 기상, 영농형태 및 방법 등에 대한 조사 결과와 각 환경 요인들과의 상관성, 요인들 상호 관련성을 분석하며,

6) 각 환경요인별 모니터링 결과로 부터 환경 관리 시스템의 구축시 대표적 지표 생물 또는 인자를 선정하고, 이들에 대한 정밀 생태 환경 모니터링 기술을 정립하며,

7) 각 환경 요인별 관리방법에 따른 환경 변화예측 모델의 적용성을 분석하며, 스크린 모델을 구성하고,

8) 각 환경 요인별 계층적 관계를 수립하여, 종합적 환경 관리 시스템에 의한 환경변화의 예측과 환경영향평가, 그리고 적절한 환경관리방안의 제시 등 관련 기술을 개발하는 것이다.

■ 농업생태환경 모니터링 기술개발

전문 연구분야별 모니터링/모델링 기술개발 내용은 다음과 같다.

(1) 농경지, 농업기반시설 정보 분야

- 대상 구역의 선정
- 지리정보시스템 자료기반의 구축 (지형, 수계, 토양, 교통, 토지이용, 용배수 시설)
- 구역내 농경지 변화상태 조사 및 원인분석
- 영농자료의 입력
- 격자별 속성 입력
- 원격탐사자료의 토지이용 자료의 검색, 생성, 기술개발
- 대상 구역에 대한 RS/GIS 자료시스템 구축
- RS/GPS 자료에 의한 실시간 토지이용 상황 분석 기술의 검토
- 농경지 환경 변동의 현행화 기술평가
- 환경영향 평가를 위한 GIS 스크린 모델의 개발

(2) 농업유역 수문수질 모니터링/모델링 기술 분야

- 수문/수질계측망 구성 및 기기설치
- 수문관측
- 수질샘플 채취·분석
- 수질 샘플링의 밀도 조사시기, 방법에 따른 변량특성의 분석
- 토양 샘플채취, 분석
- 배후 유역의 수문수질 오염 분석

- 농경지내에서 영양 물질 순환 분석
- 농업환경정보 시스템을 위한 수질오염 부하량 스크린 모델 개발
- 농경지의 영양물질 순환기작의 조사분석
- 농업 환경 정보 시스템을 위한 수질오염관리 스크린 모델의 적용성 분석
- 농업 유역의 수문, 수질오염 모델의 응용

(3) 농작물 생육환경 모니터링/모델링 기술 분야

- 토지이용상황 및 영농방법 조사
- 기상자료 축점 선정, 조사
- 농작물 생육, 수확량조사
- 생육조사 표본구의 밀도 규모, 측정방법에 따른 변량 분석
- 농작물 생육, 수확량 조사
- 생육조사 표본구의 밀도, 규모, 측정방법에 따른 변량 특성 분석
- 생육모델의 적용성 분석
- 해충발생모델 적용성 분석
- RS자료를 이용한 정보현행화 기술개발
- 모형기술의 응용성 검토
- 환경 관리 시스템을 위한 예측기법의 개발

(4) 주변 생태 환경 모니터링/모델링 기술 분야

- 농경지 생태계 인접 산림, 수생 생태환경 조사 지점의 선정
- 산림 생태환경 조사
- 수생 생태환경 조사
- 농업생태계와의 관련성 조사 분석
- 표본구의 밀도, 규모, 조사빈도, 측정방법에 따른 변량 분석
- 표본구의 지표 생물 선정 가능성 분석
- 지표식물의 선정, 모니터링 기법의 타당성 분석

(5) 지표 생물 생태 환경 모니터링/모델링 기술 분야

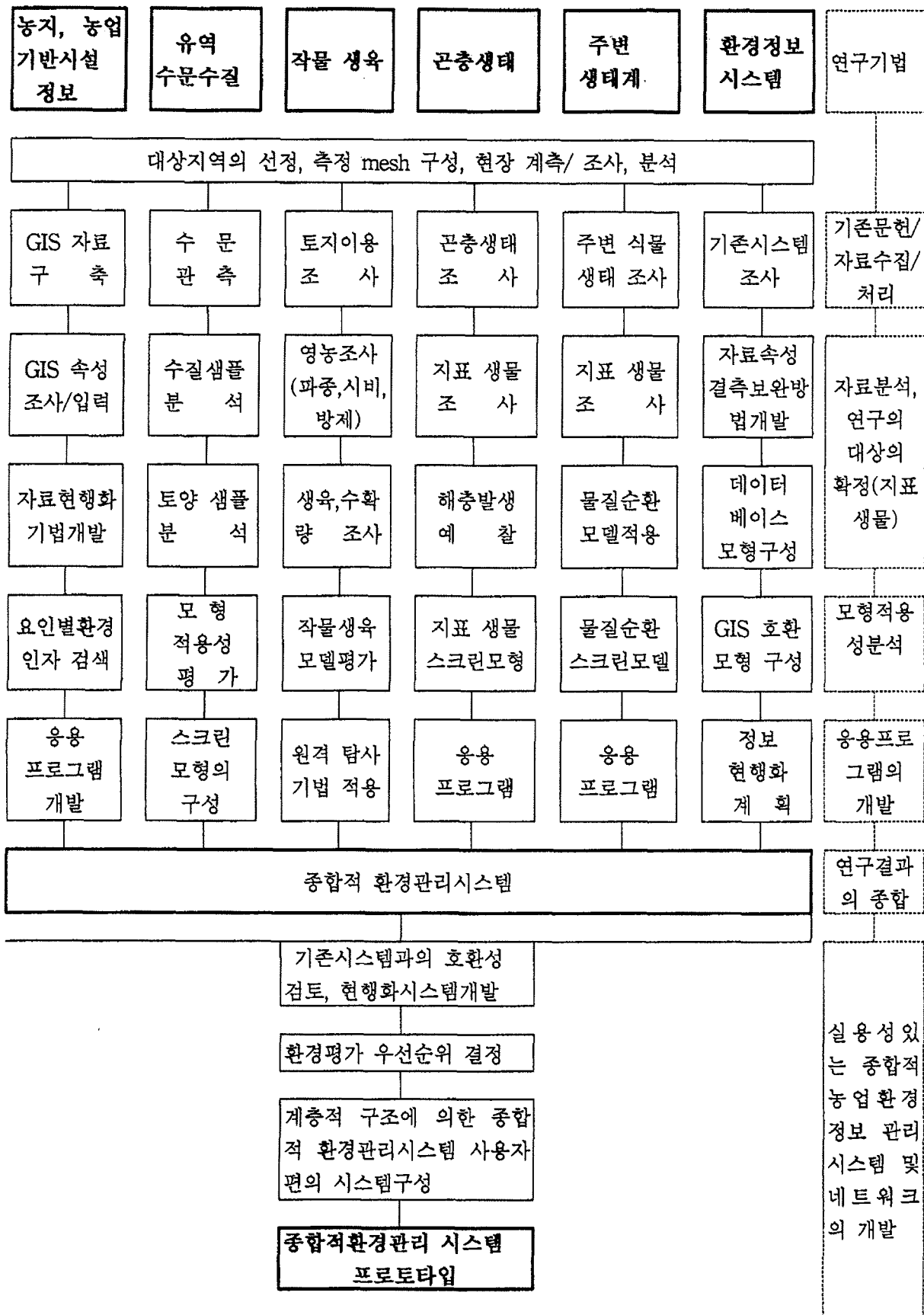
- 주요 수도해충 발생조사 비교평가 및 발생량 조사

- 포식성 곤충 및 거미류 등의 지표 생물 가능성 조사 및 발생분포
- 측정밀도, 규모, 조사빈도, 측정방법에 따른 변량 분석
- 주요 수도 해충 및 지표곤충 조사 체계 설정 및 평가
- 이동성 해충의 이동, 확산 경로 연구

■ 종합적 환경관리 시스템 구축 기술개발

종합적 환경관리 시스템은 1) 데이터베이스 시스템의 구축, 2) 지리정보 시스템의 구축, 3) 원격탐사법에 의한 환경변화 자료의 현행화 기술 개발, 4) 환경생태 모니터링 자료의 현행화, 5) 기존 농업환경조사자료와의 호환성 유지 및 정보현행화 방안의 수립, 6) 환경관리 목표와 수준에 적합한 최적관리기법의 선정과 평가를 위한 스크린 모델의 집합 기술, 7) 환경변화 예측 모델의 적용, 8) 환경 영향 평가 등을 위하여, 각 전문분야별 스크린/시뮬레이션 모델을 적용하여, 종합적 관리 대안을 검색하는 기술을 개발한다.

3. 연구개발 추진체계



제 7 절 기대효과

1. 기술적 측면

가. 농업생태 환경 모니터링 기술분야

- (1) 농업생태 환경에 영향을 주는 지형, 토지이용, 토양, 기후, 수문 및 수질과 농작물, 곤충과 동물, 주변 생태계 등의 각 환경 인자들의 종합적인 현장 모니터링 기술을 정립하고,
- (2) 각 환경 인자의 측정 밀도, 시기, 방법 등에 따른 환경 모니터링의 정도에 미치는 영향을 구명하며,
- (3) 환경 생태의 지표 식물과 곤충 등 지표 생물을 결정하고, 이들과 여타 생물 생태와의 관계를 추정하는 기술을 개발하며,
- (4) 환경 인자별 결측치의 보완, 미측정구의 추정 방법 등 모니터링 자료의 구축과 처리와 관련한 기술을 정립하며,

나. 농업생태계 예측 기술 분야

- (1) 농업유역의 수문, 수질환경의 예측 모형을 선정, 다양한 토지이용을 갖는 대상 지역의 정밀 계측결과를 통하여 적용성을 평가하므로써, 모형의 응용성을 분석하고,
- (2) 환경생태인자간의 상관성, 환경요인과의 관련성 등을 정량화함으로써 환경변화에 따른 농업생태계의 변화를 예측할 수 있는 자료기반을 제공하고,
- (3) 농작물 생육 및 수확량 모델의 현장 평가를 실시하고,
- (4) 원격탐사 자료와 농작물 생육과의 관계를 정립하므로써, 수확량 예측기술을 개발하며,
- (5) 영농방법, 환경변화 등에 따른 지표생물의 동태를 추정할 수 있는 모델을 선정, 그 적용성을 검토하므로써, 환경영향 평가를 위한 모델을 정립하며,
- (6) 지리정보시스템을 이용한 데이터베이스와의 호환 모형을 개발하므로써, 환경 예측기술의 보편화를 기한다.

다. 환경관리기술분야

- (1) 농업생태계의 환경 예측과 영향평가기술을 개발함으로써, 환경 관리 목표와 수준에 맞는 최적관리기법의 선정이 쉬워지고,
- (2) 각 관리기법에 따른 환경변화를 예측하고, 이를 상호 비교함으로써 다양한 환경인자를 감안한 계층적 환경관리 의사결정지원 시스템 기술의 발전에 기여하며,
- (3) 기존의 농업환경자료 데이터와의 호환 시스템을 구축함으로써, 실시간 환경자료의 갱신을 통한 환경관리가 가능하도록 개발함으로써 관련분야의 프로토타입 관리시스템으로 활용될 수 있고,
- (4) 국가적 차원의 환경관리시스템의 구축을 위한 프로토타입을 제시함으로써 장차 전국을 대상으로 하는 종합적 환경관리 시스템의 기반 기술을 제공한다.

2. 경제산업적 측면

- ① 환경관리 시스템을 이용한 저공해 농업생산 체계를 확대할 수 있으므로 국민의 농업에 대한 신뢰 회복으로 농산물의 시장 경쟁력을 높일 수 있고,
- ② 지구환경보전, 기후협약, 기타 환경관련 국제적 분쟁에서 농업분야의 경쟁력을 높일 수 있으므로 경쟁력을 확보할 수 있으며,
- ③ 최적관리기법의 도입을 통하여 최소의 비용으로 최대의 환경보전기능을 확보할 수 있으므로 투자 비용을 절감할 수 있으며,
- ④ 농작물의 생육과 수확량의 예측 등 실시간 농업정보의 제공으로 정보화시대를 선도하는 첨단 영농을 통하여 농업 생산성을 높이는 데 기여할 것으로 기대된다.

3. 활용방안

본 연구는 5개년에 걸쳐 개발이 되었으며, 최종 연구 결과의 활용 방안은 다음과 같다.

- ① 실시간 농업환경자료의 구축을 위한 조사 방법으로 활용하며,
- ② 기후변동, 경지환경 변화 등에 따른 농업환경생태계의 영향을 예측하는 데 적용할 수 있고,

③ 온라인 시스템을 이용하여 전국적인 농업생태정보 데이터베이스를 구축하는 기반 기술로서 활용하고,

④ 국가적 차원에서의 농업환경관리를 위한 각종 대안을 검토하는 등 정책 입안을 위한 모델로써 활용할 수 있고,

⑤ 국가적 농업환경관리 시스템의 구축을 위한 데이터베이스, 지리정보시스템 등의 구축에 필요한 프로토타입으로 활용될 수 있으며,

⑥ 각종 농업환경예찰과 관리 등을 위한 도구로써 활용될 수 있으며,

⑦ 농업의 환경보전기능을 계량적으로 표시할 수 있는 도구로 활용될 수 있으며,

⑧ 환경 친화적 지속농업을 위한 영농시스템의 구축에 필요한 시나리오의 검토에 활용될 수 있다.

제 8 절 연구진의 구성

‘농업생태환경 모니터링 및 종합적 환경관리 시스템 개발’ 연구진의 구성은 <표 1-2>에서와 같다. 연구진의 구성은, 총괄연구책임자와 각각의 세부연구과제의 연구책임자 등으로 구성되며, 각 세부연구책임자는 연구팀장으로 해당 분야에 대한 연구업무를 수행하였다. 다만, 계속연구과제의 특성상 연구가 지속되면서 연차별 연구진의 변동이 있었다.

<표 1-2>는 농업생태환경 모니터링 및 종합적 환경관리 시스템 개발 연구의 연구진과 주요 업무 내용을 정리한 것이다.

<표 1-2> 주요 참여연구원 명단

구 분	성 명	소속 및 직위	주요담당업무
책임연구원	박 승 우	서울대학교 교수	연구총괄
세부연구 책임자	박 승 우	서울대학교 교수	유역수문/수질 모니터링/모델링
	박 승 우	서울대학교 교수	논의 물질순환 모니터링/모델링
	박 승 우	서울대학교 교수	종합적 농업환경관리시스템개발
	이 변 우	서울대학교 부교수	영농/작물생육 모니터링
	이 준 호	서울대학교 부교수	곤충생태계 모니터링
	이 도 원	서울대학교 조교수	주변생태계 모니터링
	박 승 우	서울대학교 교수	GIS구축/응용 프로그램 개발
연구원	박 광 우	산림청 임업연구원	산림생태 모니터링
	임 상 준	서울대학교 농공학과	수문 모니터링/모델링
	강 문 성	서울대학교 대학원	환경관리평가시스템 개발
	김 상 민	서울대학교 대학원	수질 모니터링/모델링
	강 민 구	서울대학교 대학원	수문 모니터링/모델링
	박 홍 현	서울대학교 대학원	곤충생태 모니터링
	임 경 수	서울대학교 대학원	주변생태 모니터링
	남 택 수	서울대학교 대학원	영농/작물 생육 모니터링
연구조원	박 회 성	한국건설기술연구원	자료처리
	김 철 겸	한국건설기술연구원	자료처리
	서 춘 석	국립환경연구원	자료처리
	전 종 안	한국건설기술연구원	자료처리
	허 용 구	서울대학교 대학원	자료처리
	손 정 호	서울대학교 대학원	자료처리
	임 재 천	서울대학교 대학원	자료처리
	최 라 영	생산공학연구소 정보처리사	자료처리
	김 광 호	서울대학교 대학원	자료처리
	한 상 현	서울대학교 대학원	자료처리

제 9 절 요약 및 결론

본 장의 목적은 ‘농업생태환경 모니터링 및 종합적 환경관리 시스템 개발사업’의 배경과 그 필요성을 기술적, 경제적, 사회적 측면에서 살펴보고, 지금까지의 연구개발실적과 앞으로의 발전과제를 정리하며, 연구의 목표와 내용, 세부 수행방법, 추진계획 등을 고찰하는 데 있다. 또한, 연차별 연구목표와 내용, 연구진의 구성 등을 정리하였다.

- ① 농업생태계는 국토 자연환경생태계의 주요 인자중의 하나로서, 농작물 생산기능 이외에도 환경보전기능을 가지며, 환경적으로 안전하게 보전되고 관리되어야 하며, 이를 위한 종합적 환경관리기술 개발이 필요하다.
- ② 농업생태환경관리와 관련하여 그 주요 인자인 농경지 기반시설환경, 유역의 수문·수질환경, 작물생육환경, 주변생태환경, 미생물·곤충생태환경 등에 대한 종합적인 모니터링과 관리 기술의 개발이 필요하다.
- ③ 지금까지의 농업생태환경관리 기술은 주로 단편적이고, 부분적으로 접근해 왔으며, 각 부문을 대표하는 지표의 설정과 조사방법, 정량화 등이 정립되지 않아, 종합적이고 체계적인 모니터링과 관리기술이 마련되지 않은 실정이다.
- ④ 본 연구의 최종목표는 농업생태환경요소의 종합적 모니터링 기술의 확립, 각 부문의 속성을 대표하는 지표의 설정과 조사방법을 정하고, 유역단위의 정교한 수학적 모델링을 통해 관리대안의 정량적 평가가 가능하도록 하며, 범국가적인 농업환경정보 관리시스템의 구축을 위한 프로토타입의 개발에 있다.
- ⑤ 본 연구는 학제간 공동연구를 전제로, 대상 지역을 선정하고, 농업생태환경에 영향을 주는 인자들의 모니터링 기술을 적용하고, 각 속성을 대표하는 지표를 선정하며, 모니터링 방법에 따른 각 변량의 통계적 특징과 상호관계 등을 분석하도록 한다.
- ⑥ 본 연구의 추진은 기존 방법에 대한 평가, 현장 계측을 통한 대표 속성 (지표 생물 등)의 선정, 모델의 개발, 모델의 적용성 분석, 응용 프로그램의 개발, 각 인자들의 상호관련성 분석, 연구결과의 종합과 실용화를 위한 종합환경관리 시스템의 구축 등의 단계를 통해 발전시킬 계획이다.

- ⑦ 본 연구의 기대효과를 기술적, 경제산업적 측면에서 고찰하고, 예상되는 결과와 그 활용방안을 제시하였다.
- ⑨ 연차별 연구계획 (목표, 추진계획, 연구방법) 등을 정리하고, 연구진의 구성과 그 주요 업무 등을 정리하였다.

참고문헌

1. 김광은, 이태섭, 1994. 수질오염 감시에의 활용을 위한 항공원격탐사의 적용 연구, 한국GIS학회지, 2(1), pp. 65-74.
2. 김범철, 1996. 우리나라 호소수질환경의 개선방향, 한국수자원학회지, PP. 51-61
3. 김종수, 박경배, 최정, 1993. 오염관개수가 벼 생육 및 미질에 미치는 영향, 한국토양비료학회지, 26 (2), pp. 132-137.
4. 김한태, 권순국, 1993. 농촌유역에서의 수질오염 특성에 관한 연구, 한국환경농학회지 12(2): 129-143.
5. 농촌진흥청, 1998. 벼멸구·흰등멸구의 발생과 방제 자료집, 농촌진흥청 농과원.
6. 농촌진흥청, 1998. 연구사업보고서, 농업경영연구보고 제60호.
7. 농촌진흥청, 1999. 농작물 병해충 예찰.
8. 박승우, 1984. 소유역 수문모형의 개발과 적용(I), 한국농공학회지, 26(2): 125-132.
9. 서승덕, 김동훈, 윤학기, 1994. 농업용 저수지수역의 수질환경 오염원 조사분석, 한국농공학회지, 36 (3), pp. 100-112.
10. 신동석, 1990. 논에서의 질소 및 인의 농도와 유출입, 서울대학교 대학원 석사학위논문.
11. 심순보 등, 1994. 수질 종합 관리에 있어서 시스템 인터페이스를 위한 모듈 개발, G-7과제연구보고서.
12. 심순보 등, 1996. 원격탐사기법을 이용한 충주저수지 오염부하량 산정 연구, 충북대학교, 수자원·수질연구센터 논문집 2(1).

13. 이길성, 조홍연, 1995. 저수지 수질모델링, 한국수자원학회지, 기술정보, 28 (3), pp. 71-76
14. 이호진, 정영상, 1993. 지속적 작물생산과 환경관리, 지속적 농업과 환경보전 국제심포지엄, 서울대 농업개발연구소, pp. 31-55.
15. 이홍근, 1994. 수질자동측정망의 효과적 계획과 운영방안, 수질자동측정망의 구성 및 효과적 운영관리 방안. 환경처, pp. 5-29.
16. 정이근, 1994. 농업용수의 오염과 관개수의 적정판단, 토양비료과제훈련교재, 농촌진흥청, 3, pp.57-68.
17. 조홍연, 1996. 호소수질모형의 현황과 개발방향, 한국수자원학회지, PP. 51-61.
18. 최지용, 박원규, 이상일, 1996. 하천 및 호소수 수질관리를 위한 자동측정망의 설계, 한국수자원학회지, 29(2), pp. 167-178.
19. 최진규, 손재권, 구자웅, 1996. 전북도내 농업용저수지의 수질조사 연구, 한국농공학회지, PP. 65-74.
20. 홍성구, 권순국, 1989. 농경지로부터의 오염물질 유출부하특성, 한국농공학회지 31(3): 92-102.
21. Bishop, E. 1990. Meteorological aspects of spider ballooning, Environ. Entomol., 19:1381-1387.
22. Bodo, B., and Unny, T. E., 1983. Sampling Strategies for mass-discharge estimation, ASAE, Journal of Environmental Engineering, Vol. 109, No. 4.
23. Chow, Ven Te., et al., 1964, Handbook of Applied Hydrology : Sec. 21 Hydrology of Agricultural lands, Sec. 22 Hydrology of Forest lands and Rangelands, McGraw-Hill.
24. Daniel E. Line, 1995. Nonpoint sources, Water Environment Research, Vol. 67, No. 4.
25. Donald H. burn, 1990. Real-Time Sampling Strategies for Estimating Nutrient Loadings, ASAE, Journal of Water Resources Planning and Management,

Vol. 116, No. 6.

26. Gilbert, R. O., 1987. Statistical methods for environmental pollution monitoring, VAN NOSTRAND REINHOLD, New York.
27. Heinrichs, E. A., 1994. Biology and management of rice insects, Wiley Eastern Limited, New Delhi.
28. Lajtha, K. and R., Michener, 1994. Stable isotopes in ecology and environmental science, Blackwell scientific publications.
29. Maidment, David R., et al., 1992. Handbook of Hydrology : Chap. 24 Remote Sensing, McGraw-Hill.
30. Maitoza, P., Valade, J. A., and Madigan, W. T., 1989. Continuous monitoring of volatile hydrocarbons in water at the ppb level with sparger and process chromatograph, American Laboratory, pp. 33-36.
31. Mcbean, E. A., and Gorrie, J. E., 1975. Non-point source contributions to water quality problems. Proc., 10th Canadian Symp. on Water Pollution Res. in Canada, pp. 142-150.
32. Sabins, Floyd F., Jr., 1987. Remote Sensing Principles and Interpretation, New York : W. H. Freeman and Co..
33. SCS, 1972. National Engineering Handbook, Sec. 4, Hydrology, U.S. Department of agriculture, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C..
34. Stephen M. Yaksich, Frank H. Verhoff, M., 1983. Sampling Strategy for River Pollutant Transport, ASAE, Journal of Environmental Engineering, Vol. 109, No. 1.
35. UNESCO, 1978. Water Quality Surveys - A Guide for the Collection and Interpretation of Water Quality Data. IHD-WHO Working Group on Water Quality, UNESCO/WHO, Geneva, Switzerland.

제 Ⅱ 편

농업생태환경 모니터링 기술 개발

여 백

농업생태환경 모니터링 기법

2000년 12월

“농업생태환경 모니터링 및 종합적 환경관리시스템 개발 사업”

서울대학교 농업생명과학대학 부속 농업개발연구소

최종보고서 제 II 편 제 2 장

여 백

제 2 장 농업생태환경 모니터링 기법

제 1 절 서 론

농업생태환경을 파악하고, 환경보전을 위한 적절한 관리를 위해서는 우선 환경 관리의 목표를 설정하고, 대상 지역의 생태환경 인자들이 어떻게 분포하고, 순환하며, 상호 작용을 갖고 있으며, 어떻게 환경 오염에 영향을 미치는가를 정량적으로 파악하며, 설정한 목표에 미치지 못할 경우는 실행 가능한 관리 대안을 적용하는 등의 과정을 단계적으로 반복해서 실행하는 것이 필요하다. 여기서 가능하다면 복잡한 생태환경 시스템의 현황과 상호작용 등을 대표할 수 있는 지표 인자를 설정하며, 이를 근거로 하여 생태환경관리 목표의 설정과 모니터링, 그리고 관리방안의 모색 등을 실시함으로써, 건전한 생태환경보전을 꾀하는 것이 중요하다

그런데, 농업생태환경 시스템을 파악하는 데 있어서, 공간적으로는 어떤 규모 내지는 면적에서, 그리고 시간적으로는 어떤 간격으로 하는가 하는 것이 의문이 된다. 작게는 미세한 크기의 물, 공기, 토양에서도 생태 환경 시스템이 유지되며, 넓게는 지구 전체의 범위에서 상호 관계를 가지며, 짧게는 수 초에서 길게는 수백 년, 혹은 수만 년의 단위에서 생태환경 시스템을 파악하는가 하는 것이 설정되어야 하기 때문이다.

농업환경시스템의 기작과 상호관계, 그리고 오염과의 관계 등의 구명을 위한 면적 범위에는 ① 시험구 단위 (plot scale), ② 포장 단위 (field scale), ③ 유역 단위 (watershed scale) 등이 있다. 시험구 단위는 일정 크기의 구획을 설정하여, 적절한 처리를 실시하고, 그 결과를 파악하는 방법으로, 1×1m 정도의 소구획으로부터 0.05ha의 크기까지 다양한 규모¹⁾를 적용한다. 포장단위는 동일한 경종방법을 채택하는 구획을 대상으로 하는 것으로²⁾, 구획의 크기는 0.1ha 정도의 소규모 포장에서 수백 ha의 비교적 대규모에 이르기까지 다양한 포장을 적용한다. 한편, 유역 단위의 모니터링은 두 개 이상의 포장 단위를 포함하는 것으로, 1ha 이하의 소규모 유역에서부터, 수백, 수천 km²에 달하는 수계에 대하여 적용한다.

1) 1×1m 포장은 비점오염 측정에 사용되며, 10×30m 혹은 3×24.1m 포장은 처리별 토양유실량 측정과 비점오염 측정 등에 사용된다.

2) 포장단위는 CREAMS 등과 같이 경종에 따른 비점오염 추정을 목적으로 하는 모형 등의 기본 단위로 적용된다.

그리고, 농업 환경 시스템의 분석 기간은 토양과 물, 작물 등과 밀접한 관계를 가지므로, 생육기간을 중심으로 고찰해야 할 것이나, 매년 동일한 작목을 경작하는 경우가 아니면, 최소한 2~3년 이후까지 영향을 미치는 것이 보통이다. 반면에, 도시 지역의 하수구를 통한 유출과는 달리 지표월류 등에 의한 영향이 크므로, 시간 간격에서는 지표월류가 발생하는 기간에는 수분 간격의 수질 샘플링과 조사 분석이 이루어지기도 한다.

본 연구는 농업유역에서의 생태환경 시스템의 모니터링을 목적으로 하고 있다. 여기서, 농업유역이란 농경지만을 포함하는 것이 아니라 인접한 산림, 농촌 마을, 소하천 등의 지역을 대상으로 하는 소위 농촌 유역 (rural watershed)를 의미하고 있다. 물론, 농업유역에서는 주요 토지 이용이 산림이나 농경지이나, 유역 내에 도시화가 진행되거나, 이로 인한 도로, 철도 등 시설 등이 건설되는 경우를 포함하는 것으로 하였다.

한편, 어떤 지역의 농업생태 시스템의 구성 인자들은 기후와 기상, 지형, 토지이용, 영농방법, 축산, 교통, 도시화 정도 등 자연적, 인위적 환경에 따라 영향을 받는다. 한 지역의 생태 시스템이 공간적으로 독립적일 수 없으므로, 단순히 그 지역내의 요소만이 아니라, 인접 지역 혹은 광범위한 범위에서 각 인자들이 정의되고, 상호작용을 갖게 된다. 시간적으로는 생태 시스템의 동적 균형을 전제로 한 장기간에 걸쳐 파악되어야 한다. 따라서 농업생태환경의 특징을 파악하기 위해서는 다양한 요소들의 공간적, 시간적 변화와 그 상호작용을 정성적, 정량적으로 조사 분석해야 한다.

본 연구의 목표에서 전제한 농업생태환경 모니터링의 실현을 위해서는 이상과 같은 생태 시스템의 특성을 비교적 상세히 파악하고, 생태 시스템의 구성 인자에 영향을 주는 요소들을 파악하며, 이를 정량적으로 분석하는 수준의 현장 조사가 이루어져야 할 것이다.

본 장에서는 먼저 문헌조사를 통해 자연생태시스템에 대한 개괄적인 특징과 수질 오염 기작과의 상호관련성 등을 정리하며, 농업생태환경의 현황을 조사하기 위한 대상유역의 선정기준을 설정하여 시험유역을 선정하고, 유역에서의 농업생태환경 모니터링의 기본 계획과 방향을 설정하고자 한다.

제 2 절 농업유역의 생태환경 시스템과 수질오염

1. 개론

본 연구의 목표는 유역 규모에서의 농업생태환경 시스템이 어떻게 분포하고, 여러 가지 인위적 관리인자에 따라 변화하는가를 파악하며, 시스템의 구성 인자들간의 관계를 구명하는 등 생태환경의 모니터링과 함께 이들 각 과정을 정량적으로 표현할 수 있는 수학적 모델을 개발하며, 종합적인 환경관리 시스템을 구축하는 데 있다.

이러한 연구목표의 달성을 위해서는 농업 유역에서의 생태환경 시스템의 특징과 상호 작용, 그리고 오염과의 관계 등의 일반적인 사항을 고찰하고, 그 기작 등을 살펴보고, 이를 통하여 농업유역 모니터링과 모델링, 관리 방안 등의 연구 방법과 관련된 기초적 내용을 정리함으로서 연구의 기본적인 방향을 설정하여야 할 것이다.

따라서, 본 절에서는 자연 생태환경 시스템에 대한 특징을 살펴보고, 유역의 수문 순환과 오염과의 관계, 그리고 유역 오염과정에 영향을 주는 일반적 기작 등을 정리 하도록 한다.

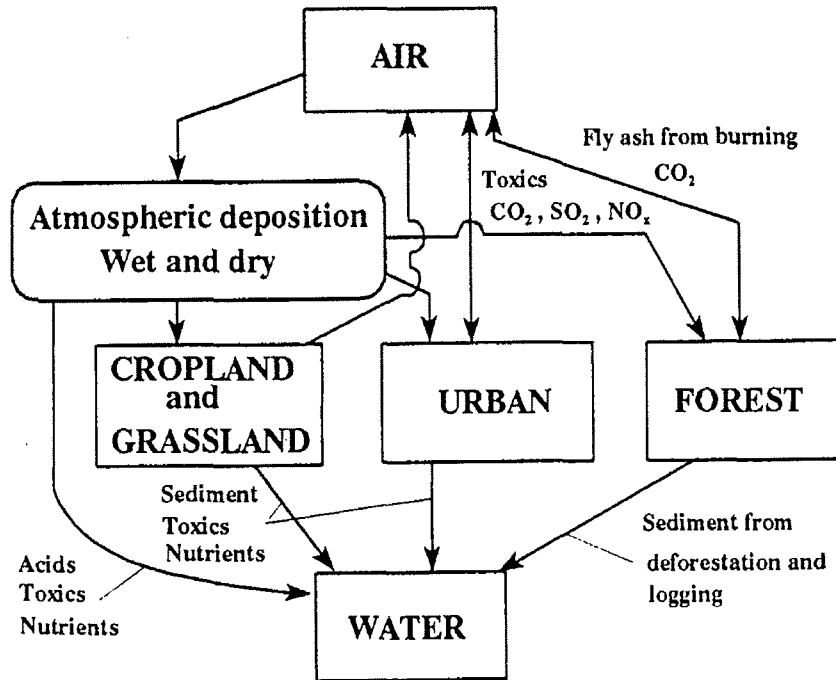
2. 자연생태환경 시스템

가. 생태시스템의 구성

지구상의 생물학적 생명체 (biological life)를 지속시키는 수단을 제공하는 자연 생태계 (ecological system)는 5대 생물학적 시스템 (biological system)으로 구성된다. 5대 생물학적 시스템은 삼림계 (forest system), 농경지와 초지계 (cropland and grassland system), 도시계 (urban system), 대기계 (air system), 그리고 수생계 (water system) 등이다. 이들 생물학적 생명체는 흙의 경우를 포함하는 대기중이나 수중에서 발생된다. 생태학적 시스템은 균형적으로 상호 관련성을 갖고 있다. 그러나, 자원의 과다 이용, 혹은 손실이나 손상 등에 의하여 균형을 잃기도 한다.

(그림 2-1)은 5대 기본적 생태환경 시스템간의 오염물질의 상호 관련성을 나타낸 것이다. 대기 오염은 인간에 주는 직접적인 해 이외에도 수질에도 영향을 미친다. 산림의 훼손이나 파괴, 혹은 토지 자원의 손실은 수자원과 대기에 지대한 영향을 미

치게 된다. 도시화는 또 다른 자연의 손실을 주며, 이로부터 공기, 물, 토양의 오염을 초래한다. 농경지나 건설 현장 등에서의 토양 유실은 수체에 지나친 유사량을 초래하게 되어, 수자원 이용상의 제한을 주며, 수중의 생물상을 파괴하는 등의 영향을 미친다. 유사는 또한 오염 물질을 운반하는 역할을 하므로, 적조나 녹조 현상을 초래하며, 경우에 따라서는 독극 물질이 오염을 초래하기도 한다.



(그림 2-1) 기본적 생태환경 시스템

나. 생태 시스템의 파괴 원인

생태환경 시스템은 정지된 것이 아니라 연속적으로 진화하며 변화한다. 세계적으로는 20세기 이전까지의 환경 시스템 변화는 주로 토양 침식, 화산폭발, 홍수 등 자연상태의 변화로부터 비롯되었다. 물론, 국지적으로는 인간 활동으로 인해 상당 규모의 생태환경의 파괴가 이루어진 것이 사실이나, 대부분 국지적인 것에 머물렀다. 따라서, 이들 5대 시스템간의 균형이 유지될 수 있었으며, 생태적인 부작용을 최소화할 수 있었다.

그러나, 20세기 후반에 들어서, 환경 생태계의 균형에 심각한 손상을 초래하는 일들이 등장하였으며, 이로 인해 환경 오염은 가속적으로 확산되기에 이르렀다. 그

주요 원인은 다음과 같다.

즉, ① 인구의 폭발적 증가, ② 산림 파괴, ③ 토지 자원의 집약 농업화, ④ 도시화, 산업화, 그리고 ⑤ 생활 수준의 향상과 그로 인한 자연 자원 사용량의 증가 등이다.

1) 인구 증가

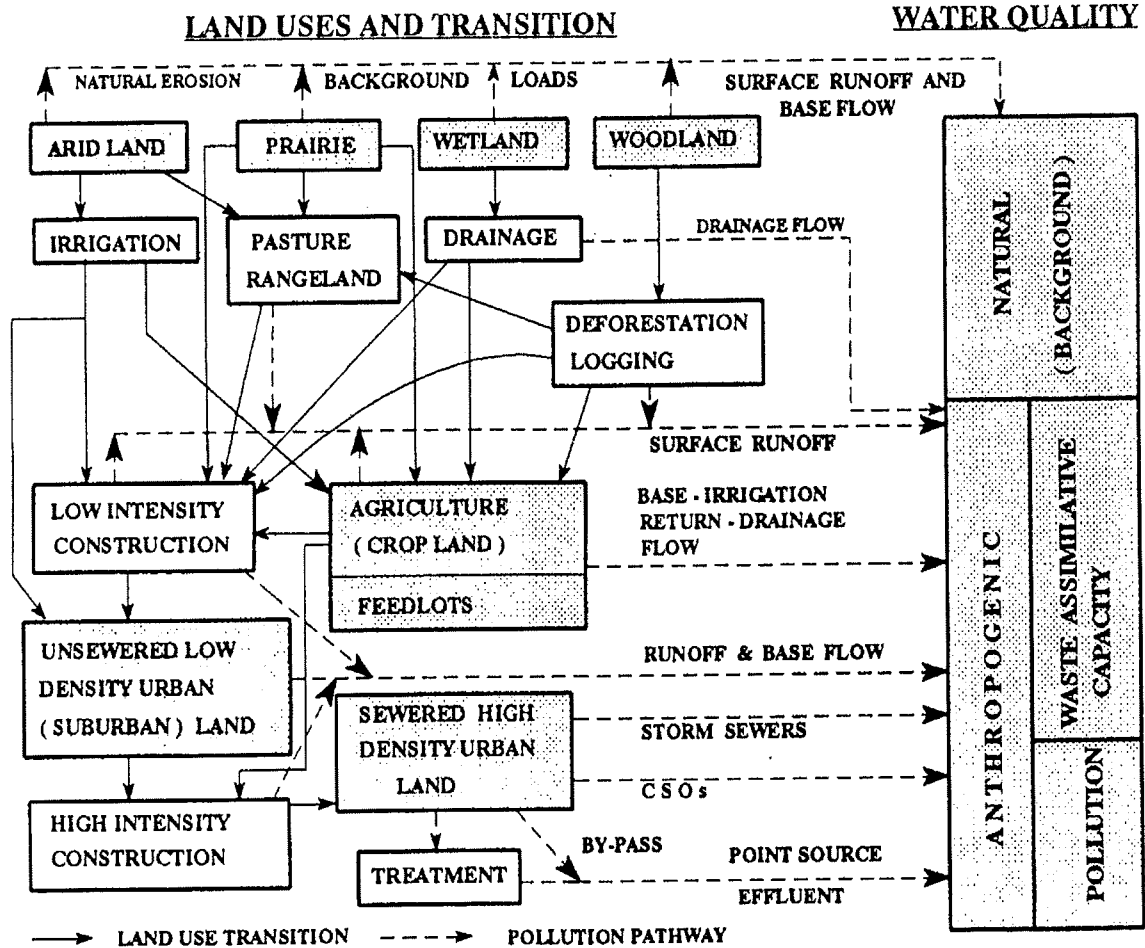
인구의 증가는 생산적 자원의 수요를 의미하고, 이로 인한 추가적인 자원의 소모는 물론이고, 생명과정을 유지하는 데 필요한 쓰레기들을 증가시키게 된다. 또한, 인구 증가는 토지이용의 가속적 변화를 초래한다. 농촌 지역에서는 경제적으로 인구의 수용에 한계를 가지므로, 직업을 찾거나, 혹은 생존을 위하여 필연적으로 도시로 유입되어 이로 인한 환경의 오염을 초래한다. 그런데, 도시에서도 자체 인구 증가를 수용하고, 유입 인구를 포용하는 데는 한계를 가지며, 따라서 이들 모두에게 주택을 제공하는 데 어려움을 갖게 되고 결국 비위생적인 상황이 발생하므로, 이로 인한 환경오염의 정도를 심화시키는 요인이 된다.

2) 산림 훼손

산림을 타목적으로 바꾸는 일은 환경적 파괴이며 오염을 일으키는 토지 이용활동을 의미하며, 실제로 지구 전체의 생태환경에 위협을 주고 있다. 산림의 훼손은 토양을 보호하는 식생층을 제거하게 되어 급격한 토양 유실을 초래한다. 결과적으로 하류의 수체의 수질은 유사량과 유기물질이 증가하게 되어 극단적으로 나빠지게 된다.

(그림 2-2)는 산림 훼손과 토지 이용의 변화로 인한 오염 물질의 순환 과정을 정리한 것이다. 자연 상태에서의 수질과 인공적인 훼손으로 인한 수질 환경의 변화를 도식적으로 나타내고 있다.

한편, 농경지나 초지 등의 확보를 위한 우림지 (rain forests)의 열대 원시림의 방화 등 훼손으로 인해 대기중의 탄산가스의 수준이 매우 높아지고 있으며, 이로 인해 소위 온실 효과 (green house effects)를 초래하기에 이르렀다. 그 결과는 대기 오염 뿐만 아니라 수질 오염과 나아가 지구 자원의 오염을 초래하고 있다.



(그림 2-2) 오염물질의 순환과정

3) 집약적 농업

20세기 후반에 이르러 녹색혁명은 소위 농경지 면적의 확대와 함께, 단일 작목의 집단적 재배, 기계화 영농, 농업화학물질의 사용과 집단화된 축산 등에 의한 것이다. 농경지 면적의 확대는 토양 유실량을 늘리고, 이로 인해 수질의 악화를 초래한다. 토양 유실량은 특히 밭 농사를 위주로 하는 구미 지역에서 큰 문제가 되고 있는 반면, 아시아 지역에서는 논벼의 재배로 인해 담수 상태와 테라스 등으로 상대적으로 그 증가율이 높지 않다. 그러나, 전반적으로 경작 면적의 증가와 경운으로 인해, 토양 유실량은 크게 증가하였으며, 이는 농경지의 주요 오염 물질이 되고 있다.

더구나, 농약과 비료 등으로 인해 토양과 수질 오염 등을 초래하였다. 세계적으로 비료와 농약의 사용량은 지난 30여년 동안 거의 2~3배로 크게 증가하였다. 이로 인해 농작물의 수확량은 크게 증가하였으나, 과도한 시비량으로 인한 토양내 영양물질의 축적과 지표수와 지하수의 수질 오염 문제를 야기하고 있으며, 지하수의 경우는 식용 불가의 경우가 많은 것이 현실이다.

그밖에도 건조지대의 경우 관개를 통한 영농 방법이 보편화됨으로서, 토양중의 염분의 조절 등을 위한 잉여수의 퇴수의 수질 문제 등이 발생하고 있다.

축산의 경우도 방목지 이외에도 비육장과 방목장 등으로부터의 가축 분뇨 등은 농업부문에 있어서 중요한 점원 오염 (point source pollution)이며, 우리 나라의 경우 분뇨의 지표수 유입과 침출수로 인한 지하수 오염 등은 농촌 지역의 수질악화의 주요 원인으로 되고 있다. 특히, 축산 폐기물은 BOD, COD, 총질소, 총인 등의 부하가 매우 높으므로, 적절한 처리가 시급하다.

4) 도시화

자연 생태계에 가장 악영향을 미치는 것은 도시화로 부터라고 할 수 있다. 인구 증가와 이주, 그리고 경제적 개발이 도시화를 비롯하게 된다.

도시화는 산림이나 기타 자연 상태 혹은 농경지 상태의 토지 이용을 도시 용지로 변환하는 것으로 여러 단계를 통해 일어난다. 도시화는 대기중의 성분과 유역의 수문을 변화시키며, 이로 인해 하천과 그밖의 수체, 그리고 토양을 변화시키며, 자연 상태의 생태계는 도시 생태계로 치환된다. 쓰레기 배출량은 증가하며, 오염원도 다양해진다. 즉, 공장, 주택의 난방, 교통, 하수 운송과 처리, 쓰레기의 수집과 처리, 불포화 표면에 낙엽이나 기타 물질의 퇴적, 그리고 도로면의 염분 등이 그 내용이다.

도시화 과정에서의 오염원은 ① 도시건설중의 토양유실 ② 불투수면으로부터의 지표유출량의 증가, 지하수 회수율의 감소 등 유역 수문의 변화, ③ 하수구 부재의 도시 발전으로 인한 오염, ④ 도시 개발 후 오염, ⑤ 하수구 월류의 오염 부하량에 의한 영향 등이 그 것이다.

5) 생활 수준향상

생활 수준의 향상은 보다 많은 자원의 이용과 이로 인한 쓰레기의 증가 등 오염 물질의 증가를 초래한다. 이와 같은 생활 수준의 효과는 도시화 과정에서와 같은 결과를 초래하게 되며, 자연 생태계의 주요 오염원의 하나이다.

3. 비점오염과 수질오염

가. 수질과 오염의 정의

수질 (water quality)은 자연적 원인이나 인간의 문명 활동의 영향으로 인해 측정 가능한 물의 성분으로 물의 이용 목적과 관련하여 정의된다. 수질은 물의 이용 목적에 따라 다양한 매개변수로서 정의되는 데, 식수의 경우는 박테리아나 바이러스 등의 기준을 적용하고, 수산업 분야에서는 물고기의 생장에 적합한 기준 등을 고려한다.

한편, 오염 (pollution)은 사람이나 혹은 그들의 활동에 의하여 공기, 토지 자원과 수자원의 물리적, 화학적, 방사능 혹은 생물학적 성질의 변화로 인하여, 이들 자원의 이용이나, 그 잠재력에 훼손을 주는 것을 말한다. 물론, 인간의 활동과는 관계없이 화산폭발이나 기타 자연적 현상 등 천재로 인하여 극심한 오염이 초래될 수 있으나, 이 경우는 오염이라고 하지 않는다.

수질과 오염은 물의 물리적, 화학적, 생물학적, 미생물학적, 방사능적 양과 매개변수를 기준이나 표준에 비교하여 결정하거나 측정된다. 수질과 관련한 기준은 관련 기관에서 설정하는 데 여기에는 하천기준 (stream standards), 배출기준 (effluence standards), 기능기준 (performance standards) 등이 있다.

나. 점원오염과 비점원오염

오염을 일으키는 원인이나 오염원 (pollution sources)은 점원 (point source)과 비점원 (nonpoint source)으로 구분하기도 한다.

점원은 오염물질이 뚜렷이 정의할 수 있고, 그 양을 측정할 수 있는 운반되는 통로부터 오염되는 경우를 말하며, 그렇지 않는 경우는 비점원이라 한다. 그런데, 이와 같은 정의는 경우에 따라서는 애매한 것이 사실이므로 각 경우의 예를 살펴보면

다음과 같다.

1) 점오염원

주요 점오염원은 다음과 같다.

- ① 도시나 공장으로부터의 하수관을 통한 배출수
- ② 고형 물질 쓰레기 처리장으로부터의 유출수와 물질
- ③ 가축 비육장으로부터 나오는 유출수와 침출수
- ④ 공단지역으로부터 우수관을 통하지 않고 흘러나오는 유출수
- ⑤ 인구 10만 이상의 도심지 우수관으로부터 유출수
- ⑥ 우수와 하수 겸용관으로부터의 유출수
- ⑦ 고형 쓰레기 집하장으로부터의 침출수
- ⑧ 광산이나 유전으로부터의 유출수나 배출수
- ⑨ 선박, 훼손된 저장 탱크, 혹은 화학물질의 저장고로부터 나오는 배출수
- ⑩ 2ha 이상의 건설부지로부터의 유출수

등이다.

2) 비점오염원

주요 비점오염원은 다음과 같다.

- ① 관개농지로부터의 회수수 (return flow)
- ② 기타 농업 유출수와 이들 지역에서의 침투수 (가축 비육장 제외)
- ③ 초지나 방목지로부터의 유출수
- ④ 하수처리 시설을 갖춘 인구 10만 이하의 도시로부터의 유출수
- ⑤ 하수처리 시설이 없는 도시로부터의 유출수
- ⑥ 2ha 이하 혹은 분산된 건설현장으로부터의 유출수
- ⑦ 정화조의 표면수나, 정화조 침출수
- ⑧ 수면상의 대기 퇴적물 (산성비 포함)
- ⑨ 폐광지로부터의 유출수
- ⑩ 그밖의 쓰레기나 오염물질을 유발하는 활동으로 벌목이나 벌채; 습지 배수나 개발; 하도 개발이나 댐, 도수시설의 건설; 토지개발이나 건설; 도시간의 교통;

군부대 훈련이나 기동; 대규모 옥외 휴양 활동 등이다.

다. 비점오염원의 특징

비점오염원의 특징은 다음과 같다.

- ① 확산 유출 (diffusive runoff)이 확산 형태로 비주기적 간격으로 하류구간의 하천이나 기타 지표수로 유입되며, 대부분 기상학적 사상과 관련을 갖는다.
- ② 오염 혹은 폐기물의 생성이 광범위한 면적의 토지로 부터 발생하며, 그것이 지표수에 유입되거나 침투되기까지 지표면 위로 이동한다.
- ③ 비점 오염원은 그 근원지에서 모니터링이 어렵거나 혹은 불가능하다.
- ④ 일반적인 점원과는 달리, 비점오염의 관리 (abatement)는 토지와 유출에 대한 조절방법을 적용한다.
- ⑤ 적절한 모니터링은 물보다는 토지에 대하여 시행된다.
- ⑥ 폐기물 방출이나 배출량은 배출 한계치 개념으로는 측정할 수 없다.
- ⑦ 확산 폐기물 배출 혹은 오염의 범위는 지리적, 지질학적 조건과 함께 어떤 정도까지 조절 불가능한 기후적 사상에 관계되며, 지역에 따라 연도에 따라 크게 다를 수 있다.
- ⑧ 주요 관리 대상에 되는 비점오염원으로부터의 가장 중요한 폐기물 성분은 부유물, 비료분과 독성 성분이다.

4. 농업유역의 수문·물질 순환과 오염

가. 수문순환

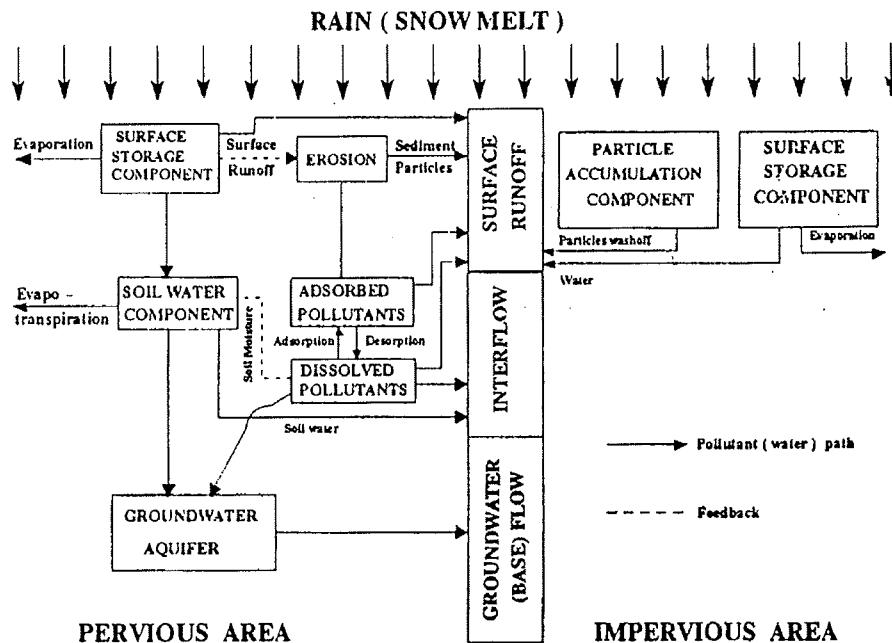
비점오염원으로부터의 오염은 기상학적 사상, 즉 강수로 인하여 구동된다. 실제로 유역으로부터의 오염 부하량은 강수량, 침투량과 유역의 저류특성, 토양의 투수성, 그리고 그밖의 수문학적 매개변수 등과 밀접한 상관성을 보인다. 이와 같은 사실은 비점오염이 일반적인 점원 오염과 차이점인데, 점원 오염은 유역의 수문기작과는 거의 관련성이 없다.

비점오염의 시작은 대기중의 오염물질의 운송으로부터 비롯되며, 그 빈도와 강도는 수문 순환과 밀접한 관계를 갖는다. 따라서, 비점원으로부터의 오염 부하량은

무작위성과 비예측성 성분을 갖는다. 더구나, 유역의 수문학적 변경이 발생하면 비점오염 부하량이 증가하거나 감소된다.

강우 에너지와 타격력은 토립자의 탈립을 유발시키고, 지표 월류에 의하여 하류로 이동된다. 이때, 농업화학물질이나 유기물 비료가 지면에 살포된 상태에서 지표월류가 발생되면, 이들 오염물질은 상당량이 지표수에 손실된다. 또한, 이동상태의 오염물질은 물과 함께 지중으로 침투되어, 지하수에 달하면 지하수 오염을 일으킨다. 따라서, 비점오염은 지표월류가 발생하는 고수나 홍수시에 농도가 가장 높은 것이다. 반면에 점원으로부터의 오염물질 농도는 저수시 가장 위험 상태에 달하는 특징을 가진다.

유역에서의 수문순환과 비점오염과의 관계는 (그림 2-3)에서와 같다. 수문 순환 과정 중 비점 오염의 부하와 관계가 깊은 것은 지표월류와 이로 인한 지표수 순환 과정과 침투이며 이와 관련한 지중수와 지하수이다.



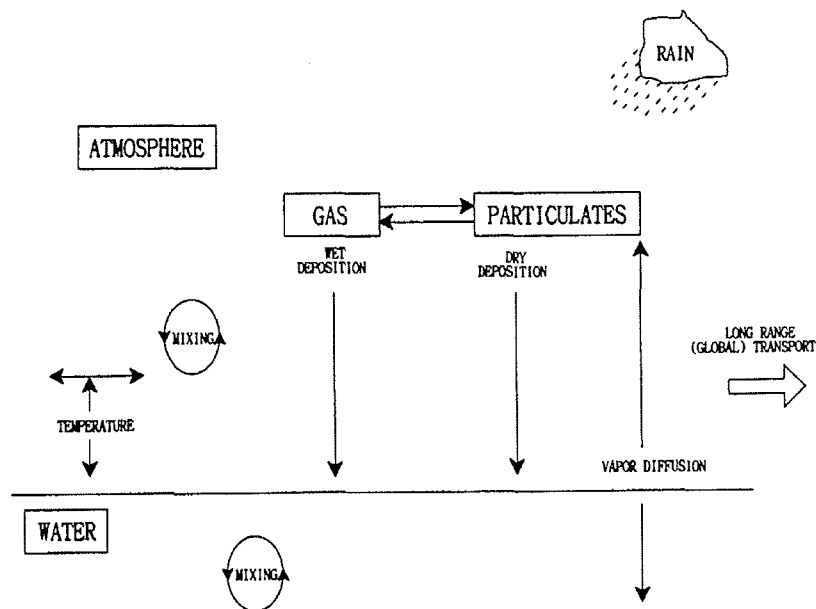
(그림 2-3) 수문순환-비점오염 기작 요소

나. 물질 순환

유역의 수문 순환은 비점오염의 운송에 밀접한 관계를 갖는다. 그런데, 실제로 비점오염 부하는 오염 물질이 수문순환과 함께 운송되는 물질 순환 기작에 지배된다. 유역의 물질순환과정은 대기 퇴적과정, 지면에서의 토립자와 오염물질, 그리고, 토양과 물에서의 오염물질의 순환과정 등과 밀접한 관계를 갖는다.

1) 대기순환과정

(그림 2-4)는 대기 퇴적과정을 정리한 것으로, 어떤 유역의 대기 퇴적은 국지적 퇴적과정과 지구 전체의 퇴적 과정으로 구분된다. 국지퇴적은 주로 도시나 공장으로부터 대기중에 배출된 물질의 퇴적으로 비롯되며, 그 중 일부는 대기순환에 잔류하여 여타 지역으로 확산되는데, 반대로 유역 밖에서의 유역으로 대기 순환과정에서 유입된 물질의 퇴적이 발생되기도 한다.

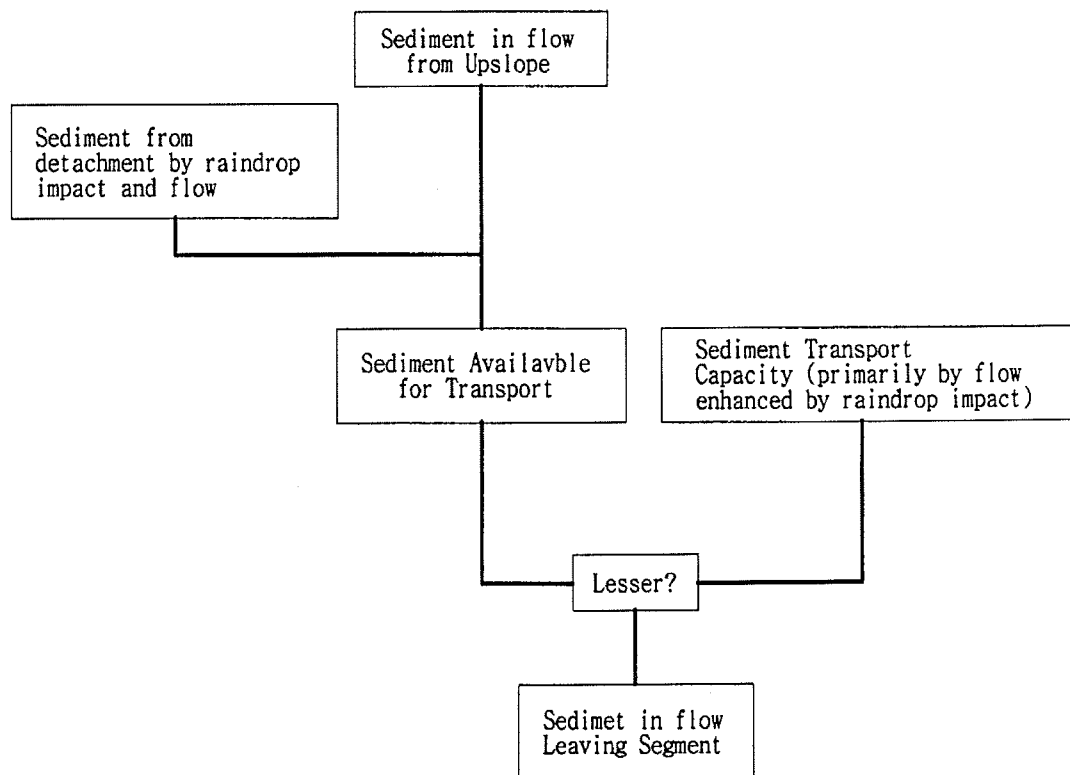


(그림 2-4) 강수·대기의 물리화학적 순환 기작

2) 토양유실

(그림 2-5)는 농경지에서의 토양 유실 기작을 보여주는 데, 강우나 지표수에 의한 탈립과 운송, 퇴적 등의 과정으로 순환되며, 상류로부터 유입되어 퇴적되지 않으면 토양 침식으로 일어나며, 만약 퇴적량이 유실량보다 많으면 이 지역에서는 물질의 퇴적이 발생된다.

그런데, 운송되는 토사는 하류로 이동되는 동안 퇴적이 일어나 유사량이 줄게 되는데, 유실량과 유사량의 비를 운송비 (delivery ratio)라고 한다. 그리고, 퇴적은 작은 입자 토사보다 큰 입자 토사에서 더 쉽게 일어나므로, 점차 실제 토양의 입정보다 작은 입경의 물질이 증가된다. 이를 부유화율 (enrichment ratio)이라고 한다. (그림 2-6)은 운송비와 부유화율의 유로장과의 관계를 개념화한 것이다.



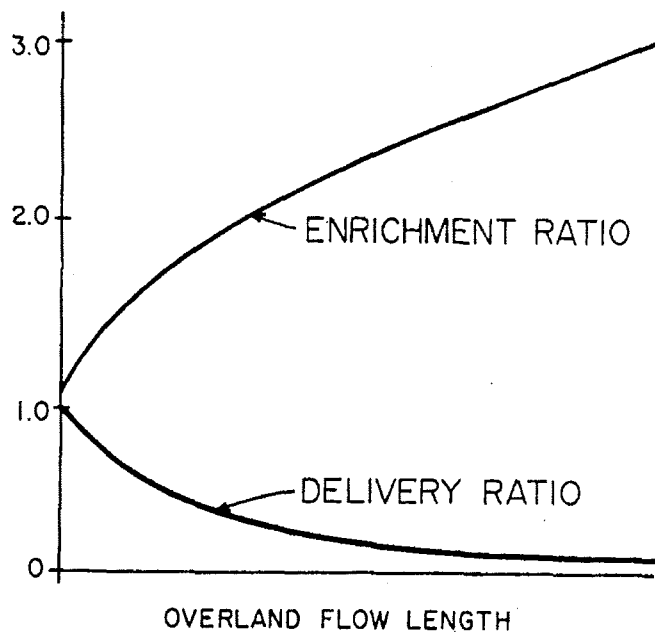
(그림 2-5) 토양유실 기작

3) 토양 중의 물질순환

유역의 수문순환과 물질 순환에 있어서 중요한 매체의 하나는 토양이다. 토양은 수문 순환 중 침투를 지배하며, 유사의 공급원이다. 토양은 오염물질을 저류하고, 변화시키거나, 분해나 혹은 흡착할 수 있다. 매년 막대한 양의 유기물질이나 대기중의 오염물질, 그리고 액상 혹은 고형 폐기물질이 토양 중에 퇴적되거나 혼합되고 있다. 실제로, 토양은 유기물질의 부패화를 촉진시키는 매체로 활용되어 왔으며, 농경지의 경우는 비료분을 보유하여 작물 생육에 활용되는 성분으로 변화시키는 역할을 해왔다.

사실, 그동안 오염 물질들의 대부분은 일단 토양에 버려지거나 혼합되고, 그 다음에는 물에 방치되는 과정을 거쳐왔다. 토양의 오염물질 분해력은 무한정한 것으로 여겨왔으며, 심지어, 토양을 이용하여 오염된 물을 자정하는 것까지도 고려되어 왔다.

그러나, 과도한 비료분이나 농약의 사용은 토양의 자정 효과를 초과하게 되어 결국 물질의 축적이 이루어 지게 된다. 실제로 토양의 오염물질의 자정력은 한계가 있으며, 이를 초과하는 경우는 토양 오염을 일으키게 된다.

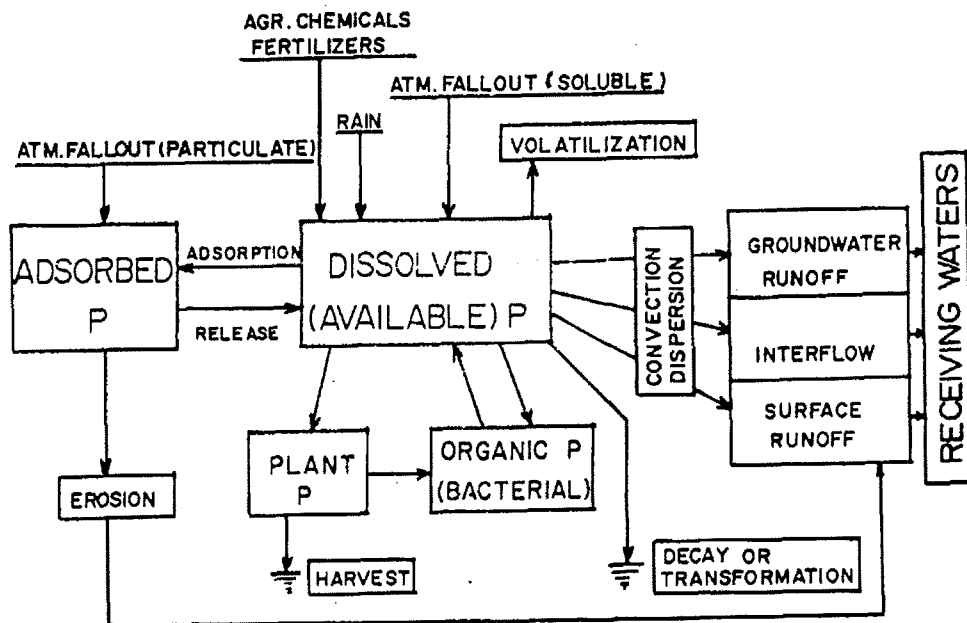


(그림 2-6) 운송비와 부유화율의 관계 (점토)

한편, 그밖의 지표수 오염물질의 운송은 지표수에 용해되거나, 비용해 상태로 운송되는 것과 토립자에 부착되어 운송되는 데, 그 과정을 정리하면 다음과 같다.

- ① 토양침식과 지표월류 운송은 오염물질이나 토립자에 흡수된 물질 등을 운반한다. 이때 운송 역사는 토립자의 경우와 유사하다.
- ② 토양수분에 포함된 오염물질은 지표유출이나 중간유출에 의하여 운송될 수 있다. 이들 오염물질은 비용해 성분이거나 이온 (ion)의 형태이며, 대부분의 성분에서는 비용해상태와 흡착상태간에 동적 평형을 이룬다.
- ③ 지하수대에 유입되는 오염물질은 비용해성이나 이온 상태의 경우만 가능하며, 지하수의 기저 유출 형태로 지면에 나타날 수 있다.

(그림 2-7)은 토양과 토양수분, 지하수 등과 관련한 오염물질의 이동 경로를 도식화한 것이다.



(그림 2-7) 토양오염 경로의 흐름

4) 수생 생태계와 물질 순환

수생 생태계는 하천, 강, 호수, 습지, 하구 등의 수체와 지하수와 토양 수분 등에 존재하는 생태환경을 말하며, 그들의 수리동력학적, 생물학적, 화학적 과정과의 관계를 말한다. 수생 생태계의 주요 에너지는 태양 에너지이나, 그밖에도 폐기물 중의 유기물질, 폐기열 등으로부터 입력된다. 또한, 생태계 구성인자는 생물 성분의 생장을 촉진시키는 물질이나, 생장을 늦추거나, 폐해를 초래하는 물질, 심지어는 생물체를 죽이는 성분 등에 의하여 평형상태를 유지한다.

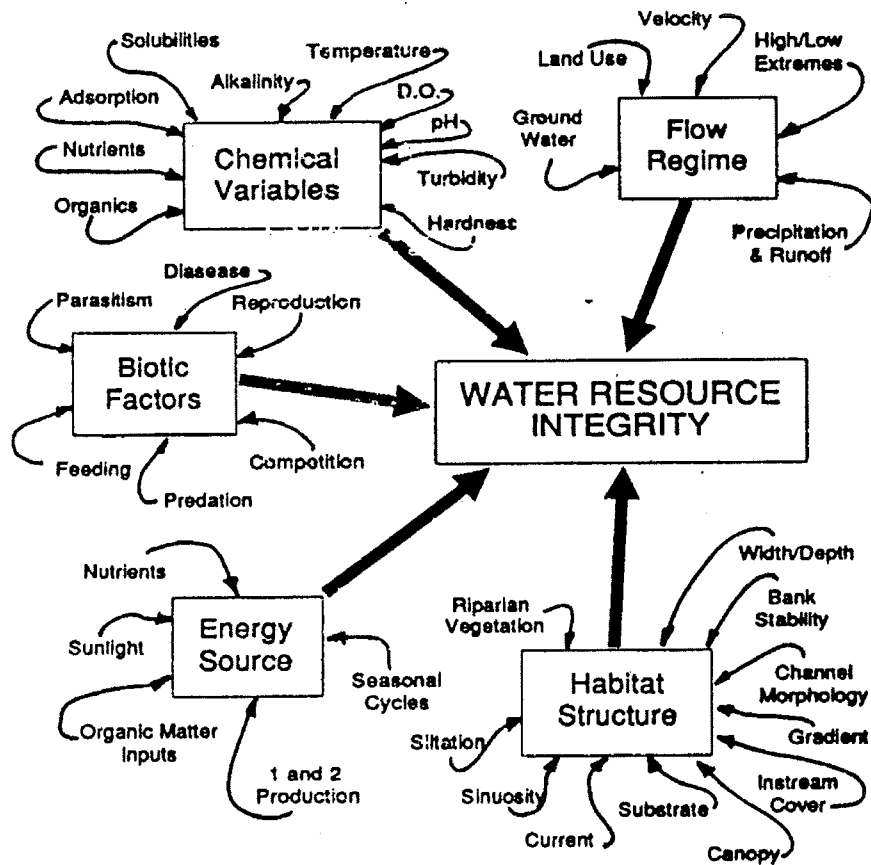
수생 생태계는 수중계와 수변계, 저생계 등으로 구분할 수 있다. 수중계는 태양 광선의 침투 여부에 따라 투광대 (euphotic zone)와 심연대 (profundal zone)로 구분된다. 수변계 (littoral zone)에서는 주로 초생이나 이에 서식하는 생물이 존재하며, 수중계는 각종 플랑크톤과 미생물, 어류 등으로 구성하며, 저생계는 수중이나 수변의 땅속에 서식하는 생물류가 있다.

하천 수생계의 물질 순환은 하천의 수량과 수질, 그리고 서식 동식물과 밀접한 관련을 가지며, 소위 먹이 사슬로부터 물질 순환이 이루어 진다.

한편, 지표 수체의 완전한 보전은 수체의 화학적, 물리적, 생물학적 보전을 되찾고, 유지하기 위한 수질 오염의 조절이 목표이다. 수생 생태계의 보전이란 어떤 지역의 자연적 생물상에 비견하여 균형적이고, 총체적인 생물공동체가 다양성을 갖고, 기능적 구조를 갖도록 하는 일이다. 수생생태계의 보전에 영향을 주는 인자들 상호관계는 (그림 2-8)과 같이 흐름 특성, 화학적 성분, 생물상 인자, 에너지원, 서식지 구조 등에 영향을 받는다.

수생 생태계의 생물상 보전 상태를 진단하는 데는 여러 가지 인자들이 적용된다. 종다양성 지수 (species diversity indice, SDI), 생물상 보전지수 (index of biotic integrity, IBI), 무척추 공동체 지수 (invertebrate community index, ICI) 등이 그 예이다.

한편, 수체의 수질 기준으로 화학적 기준이나 독성물질기준 등이 주로 이용되어 왔으나, 근래에는 생물학적 기준 (biological criteria)의 적용이 시도되고 있다.



(그림 2-8) 수생 생태계의 인자 상호관계

생물학적 기준은 생물상 조사와 지역 생태학적 접근 방법을 통해 수체의 수질을 진단하는 것으로 그 주요 내용은 다음과 같다.

- ① 표준 지점의 분류와 선정
- ② 표준 지점에서의 수질과 생물학적 조사를 실시하고,
- ③ 예측 모델을 개발하며,
- ④ 시험 지점에서 생물학적, 화학적 조사를 시행하고, 서식처 진단과 기존의 오염 원이나 예상되는 오염원을 조사하며,
- ⑤ 모델을 시험 지점에 적용하고,
- ⑥ 손상 상태를 점검하며,
- ⑦ 시험지역의 허용 수질 목표와 특정 수질 기준을 정하는 것이다.

5. 농업 유역의 비점원오염

가. 산림의 오염원과 오염 물질

자연 상태의 산림에서의 물질 부하량은 앞서 살펴본 바와 같이 오염이라 할 수 없다. 그러나, 산림의 벌목, 인위적 훼손, 혹은 토지의 다목적 전용 등으로부터 비롯되는 폐기물, 유기물, 토사 등은 오염 물질이며, 이와 같은 일이 발생하는 지역을 오염원이라 할 수 있으며, 산림으로부터 하류 하천에 유입되는 주요 물질은 토사, 유기물 등이 있다.

나. 농업의 오염원과 오염물질

비점원오염은 주로 토지이용 활동에 의한 지형적 현상이다. 비점원오염은 다양한 원인으로부터 비롯되지만, 그 주요 원인은 농경지의 영농과 관련이 있다. 여기에는 농지의 이용방법, 작물이나 가축의 종류, 운작, 토양, 기후 조건, 영농기술, 그리고 관개 배수 등이 있다. 특히, 비육장 (feedlot)이나 축사 운동장 등으로부터 하천에 이르는 배수구와 같은 오염 유발 농업 형태는 농업 오염의 주요 원인의 하나이다. 반면에, 식생 격리대를 설치하거나, 가축들이 직접 하천이나 수로에 들어가지 못하게 하는 것 등으로 오염 부하를 크게 줄일 수 있는 것이다.

농업과 관련된 주요 오염물질들은 유사량, 비료분 특히 질소와 인산, 농약과 그 밖의 독성물질, 박테리아나 세균, 그리고 염분이나 염분물질 등이며, 오염량은 영농 방법에 따라 차이가 난다.

농경지로부터의 유출이나 지중수 등의 주요 오염물질의 우선 순위는 다음과 같다.

- ① 건조지역의 농지: 유사, 비료분과 농약 등
- ② 관개 농지: 관개 회수량과 함께 유사, 흙착이나 비용해성 비료와 농약 성분, 약간의 중금속이나 염분, 혹은 박테리아나 세균, 그 밖의 미생물 등
- ③ 초지: 박테리아, 비료성분, 유사, 경우에 따라서는 농약성분 등
- ④ 목장지: 유사, 박테리아, 비료분, 경우에 따라서는 중금속 물질 혹은 이나 농약 성분 등
- ⑤ 산림지: 대부분 유사, 유기물질 등과 별채시는 흙착된 비료성분 등

⑥ 격리된 비육장: 박테리아, 바이러스, 그 밖의 미생물; 그리고 비용해 및 흡착 비료분, 유사, 유기물질, 염분, 중금속 등

⑦ 특정 지역

(1) 양식장: 비용해 상태의 비료분, 박테리아, 그리고 그밖의 병원균 등

(2) 과수원이나 육묘장 : 비료분 (일반적으로 비용해 상태), 농약, 염분, 박테리아, 유기물질과 약간의 중금속 등

⑧ 야생동물용지: 야생동물수가 불균형을 이룬 경우에는 박테리아와 비료성분을 유발할 수 있다.

그 밖에도 영농 활동으로부터 비점오염 부하량에 큰 영향을 주는 주요 인자들은 다음과 같다.

① 가축들이 하천 연안에 출입하게 되는 경우: 하천 제방의 토사에 전단력을 가하고, 식생을 훼손 제거하므로써 하천지대의 지표 및 지하수 수문과 하천 형태에 변화를 초래하며 결과적으로 하천 흐름의 변화, 수온의 증가, 그리고 비용해성 산소함량의 감소 등을 초래한다.

② 작물 생산을 위해 하천 제방 근처까지 경운하게 되면, 제방의 훼손이나 절리의 발생을 초래하게 된다. 이와 같은 하천 구간의 제방이나 절리로 부터 유발되는 물질은 수생 식생에 영향을 주거나, 하천 구간의 퇴적 등을 초래한다. 이와 같은 식생대의 파괴로 인해 수생 동물 종과 그 다양성이 변화하게 되며, 하천 흐름과 온도, 용존산소 (dissolved oxygen) 등의 변화를 초래한다.

③ 저습지의 배수를 실시하여 농경지를 개발하게 되면 그 지역의 물리적 조건에 큰 영향을 미친다. 수생식생의 제거, 배수로 인해 지역상태의 높은 지하수위 감소, 이들 지역과 같은 홍수 조절력의 상실 등은 하천 수량의 급변을 초래하고, 건조기에는 가뭄이 심화된다. 하천의 기저유량의 감소는 대부분의 수생생물의 번식지에 치명적인 영향을 미친다.

<표 2-1>은 토지이용에 따른 원단위 오염부하량을 정리한 것이다.

<표 2-1> 토지이용에 따른 원단위 오염부하량

(kg/km²/일)

구 분	BOD	T-N	T-P
논	5.12	8.2	1.4
밭	5.18	8.95	0.39
산 림	1.0	4.64	0.0021
대 지	87.6	10.05	0.55
기 타	0.96	4.64	0.027

다. 도시지역의 비점오염과 오염물질

도시 지역으로부터의 비점오염은 도시 유출과 함께 발생한다. 즉, 우수관이나 우수, 하수 겸용관 등으로부터 월류량에 의한 오염을 뜻한다. 도시화로 인해 유역의 수문 특성은 크게 달라지는 데, 그 주요 특징을 들면 다음과 같다.

- ① 도시 지역의 대부분은 불투수 표면으로 고도의 수문학적 반응이 초래되며, 일반적으로 도시화는 유출량의 증가를 초래한다.
- ② 유역의 강수에 대한 수문 응답이 빠르며, 첨두유량이 증가되고, 이로 인해 침수 위험이 증가된다.
- ③ 도시화는 흔히 지하수위를 낮추게 되며, 이로 인해 기저 유출량이 감소된다.
- ④ 건설 현장을 제외한 대부분의 도시 유출은 토양 유실이 줄며, 유속이 증가하므로, 하천 제방의 유실이 크게 된다.
- ⑤ 우수관 시설 지역의 경우, 도로의 청소나 바람 등에 의해 제거되지 않는 오염물질은 장기적으로 결국 지표 유출과 함께 배제된다.
- ⑥ 오염 물질을 운송하는 유출 사상의 발생빈도가 증가된다.
- ⑦ 오염물질의 유출은 최소 초기 저류량 이상의 강우시 발생된다.

한편, 도시 지역의 오염 부하량은 토지 이용과 관련이 높으며, 토지 이용에 따른 오염 잠재력을 기준하면 대략 다음과 같이 구분할 수 있다.

- ① 그룹 I (저오염 부하 지역) - 저급 혹은 중급 밀도의 주택가 지역 (1 ha당 125

인 이하)과 제한된 산업활동 지역 (도매업, 창고업 등)

- ② 그룹 II (중급 오염부하 지역) - 고밀도 주택가 (1 ha당 125인 이상), 상업지구
- ③ 그룹III (고도 오염부하 지역) - 중급과 고밀도 산업지구
- ④ 그룹IV (최저 오염위험지역) - 공원이나 놀이장 등

도시 비점오염 물질은 다음과 같다.

- ① 강수중 용해된 오염 물질
- ② 투수성 지역의 토양 유실량
- ③ 대기 퇴적물, 도로 쓰레기, 자동차 매연물질
- ④ 하수구의 고형 퇴적물
- ⑤ 정화조로 부터 오염 물질의 잔류량의 지표수, 지하수 용출량
- ⑥ 세설 화학물질
- ⑦ 도시 지역의 초목에 살포된 비료나 농약 성분
- ⑧ 자동차 폐유허유, 부동액 등의 배수구 폐기량
- ⑨ 하수 관로와 우수관로의 결합으로부터의 월류량 등이다.

<표 2-2>와 <표 2-3>은 생활하수와 산업폐수에 의한 원단위 오염부하량을 나타내고 있다.

라. 기타 오염원

이상의 비점오염원으로부터의 오염 물질과 함께 농업 유역의 오염원은 유역내에 산재된 도시 상업지구, 공장과 산업체, 축산 비육장 등으로부터 하수관로를 통해 처리되지 않은 채 유입되는 점원 오염 등이 있다. 일부 지역에서는 하천 구간의 일부를 하수처리장까지의 유입로로 활용하는 등 점원 오염물질의 처리가 이루어지지 않은 경우도 있다.

<표 2-4>는 가축의 원단위 오염부하량을 나타낸 것이다.

<표 2-2> 생활하수 원단위 오염부하량

(g/인/일)

구 분	수질항목	도 시	농 촌
생활하수	BOD	23.20	22.0
	T-N	2.60	1.0
	T-P	0.82	0.4
분 뇨	BOD	18.0	
	T-N	9.0	
	T-P	1.0	

<표 2-3> 산업폐수에 따른 원단위 오염부하량

(g/일/m')

구 분	BOD	T-N	T-P
식품제조시설	2421	32.42	16.98
음료제조시설	164	37.76	17.22
섬유제조시설	987	103.42	11.25
기 타	288	51.99	21.46

자료: 1. 국립환경연구원, 1987. 폐수배출시설 표준원단위 조사연구(I), 국립환경연구원보, Vol(9)
 2. 국립환경연구원, 1988. 폐수배출시설 표준원단위 조사연구(II), 국립환경연구원보, Vol(10)
 3. 장정렬, 1994. 농촌유역 수질관리모형의 개발에 관한 연구, 서울대 대학원 석사학위논문

<표 2-4> 가축의 원단위 오염부하량

(g/두/일)

구분	BOD		T-N		T-P	
	분	뇨	분	뇨	분	뇨
한 우	331	95.7	60.3	47.9	11.0	1.1
육 우	576	95.7	340.0	47.9	18.2	1.1
유 우	330	111.6	252.0	58.1	14.5	1.3
돼 지	141.2	31.1	18.5	12.2	12.5	0.6
닭	3.4	-	4.8	-	0.2	-
오 리	5	-	12.7	-	1.75	-
기 타	160	-	21.0	-	7.5	-

6. 농업유역의 생태환경시스템의 관리

가. 최적관리기법

최적관리기법 (best management practice, BMP)은 유역의 비점오염을 방지하거나 수질 목표와 부합되는 수준까지 낮추기 위한 방법으로 영농법이나 구조적 방법을 말한다. 효과적인 BMP는 경제적, 기술적으로 타당한 것이어야 한다. BMP는 구조적 방법과 관리법으로 구분되는 데, 각각은 특정한 비점오염의 조절에 다른 방법보다 효과적이다.

나. 최적관리기법의 종류

BMP는 다음과 같은 종류가 있다.

1) 경종법

보전 경운법, 지피작물법, 윤작법 등의 방법이 있다. 보전 경운법에는 무경운법, 등고선 경운법, 대상재배법 등이 쓰이며, 이들은 주로 오염원의 부하량을 줄이는 조절방법이다.

2) 종합적 해충관리법

종합적 해충관리법 (integrated pest management, IPM)은 오염을 최소로 하는 수준에서 작물의 병해충을 관리하는 방법으로, 경종방법으로는 ① 내병충 작물이나 품종의 재배, ② 윤작, ③ 파종일의 조정 등의 방법이 있으며, 농약 살포량의 조정방법으로 ④ 최적 시간 시용법, ⑤ 최소동성화학물질이나 최소 내성 화학물질을 선택하는 방법 등이 있다.

3) 구조적 방법

구조적 방법을 적용하는 BMP에는 ① 테라스나 수로를 설치하는 방법, ② 특정 지역에 대한 경사 조절이나 위험지역의 사방을 적용하는 방법, ③ 침사지를 설치하거나, 유사조절지, 저류지 등을 설치하는 방법, ④ 가축폐기물 저류나 처리 시설을 설치하는 방법, ⑤ 가축의 접근을 차단하도록 하는 방법 (하천변에 철조망을 부설하는 방법 등 포함), ⑥ 초생대나 포장 경계 독을 설치하는 방법 등이 있다.

4) 기타 방법

그 밖의 BMP로는 ① 습지를 보전하여 자연 생물에 의한 오염물질의 자정 효

과를 얻는 방법, ② 하천변 완충대 (buffer zone)을 설치하는 방법, ③ 관배수 관리를 통해 잉여 회수수의 방류를 억제하는 방법, ④ 하천 제방의 안정화 방법, ⑤ 석축-갈대 등을 이용한 미생물 여과시설, ⑥ 방목지, 초지 관리 등이 있다.

다. 최적관리기법의 선정

이상의 여러 가지 BMP 가운데 특정한 BMP의 선정은 ① 오염원으로부터 오염을 조절하는 목적이나, ② 토지 이용 방법에 따른 구분으로부터 오염을 억제하는 목적에 따라 선택한다.

BMP의 선정 방법은 다음과 같다.

- ① 수질 문제를 확인하고,
- ② 그 문제를 일으키는 오염 물질과 예상되는 오염원을 확인하며,
- ③ 각 오염물질이 어떻게 물에까지 운반되는가를 정하며,
- ④ 수자원 이용 목적에 대한 타당성 있는 수질 목표를 정하고,
- ⑤ 수질개선 효과, 지하수 개선효과, 경제적 타당성, 대상 지역에 대한 적용가능성 등을 만족하는 적절한 BMP를 결정한다.

제 3 절 농업생태환경 모니터링 대상지역의 선정과 조사계획

1. 개론

우리 나라의 기상, 수문, 수질, 농업과 축산, 인구, 생산활동 등 다양한 요소들은 여러 기관에서 지속적으로 자료의 수집이 이루어지고 있다. 기상대와 건설교통부, 농림부, 환경부, 내무부 등 관련 기관에서 주기적으로 조사되고 있다. 그러나, 어떤 지역 내에서의 생태 시스템의 구성 인자들의 상호관련성을 정량화 하는 데는 충분하지 않으며, 더욱이 정교한 자료기반 위에 환경요소들의 정량적 해석을 위한 소위 모델링 (modeling) 혹은 모델의 검정에 필요한 수준에는 못 미치는 것이 현실이다.

본 연구에서는 농업생태환경 시스템의 현황을 파악하고, 그 구성인자들의 특징과 상호작용, 그리고 수질오염과의 관계 등을 계량적으로 측정하기 위한 현장 모니터링 (monitoring)을 목적으로 하고 있다.

따라서, 본 절에서는 우리 나라의 농업유역의 일반적 특징을 살펴보고, 이들을 바탕으로 농업생태환경의 현황을 조사하기 위한 대상 유역 (혹은 시범유역) (demonstration watersheds)의 선정 기준을 설정하고, 현장 답사를 통해 적합한 지역을 선정하며, 이를 토대로 유역 모니터링 기본 계획과 방향을 설정하고자 한다.

2. 농업 유역의 특징

가. 토지이용

우리 나라의 국토면적은 99,392km²로서 이중 산림이 66.1%, 논 12.7%, 밭 8.7% 등이고, 대지면적은 2.1%, 기타 10.5% 등이다 (한국도시행정연구소, 1995).

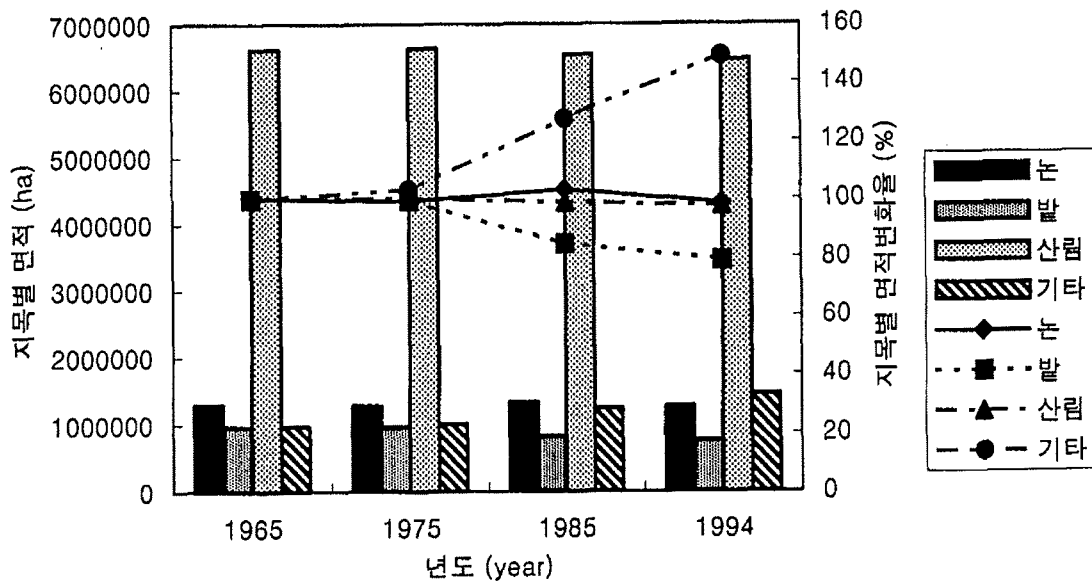
시도별 토지이용을 살펴보면 <표 2-5>에서와 같다. 서울, 부산, 대구, 인천, 광주, 대전 등 특별시와 광역시 등 도시지역은 대지와 그 밖의 도로, 공원용지 등의 토지이용이 25.4~65.6%를 차지하고 있으며, 경기, 강원, 충청, 전라, 경상 등은 7.6~15.3%로 구성된다. 제주도는 28.1%로서 도시지역의 수준에 달하고 있다.

<표 2-5> 시도별 토지이용 현황

구 분	합 계	논		밭		산 립		대 지		기 타	
		ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	ha
서울특별시	60540	2416	4.0	2232	3.7	16137	26.7	20977	34.7	18778	31.0
부산광역시	53106	7608	14.3	1853	3.5	21942	41.3	8073	15.2	13630	25.7
대구광역시	45590	4475	9.8	2979	6.5	22900	50.2	5641	12.4	9595	21.0
인천광역시	33940	5977	17.6	2999	8.8	10074	29.7	4427	13.0	10463	30.8
광주광역시	50086	11988	23.9	4598	9.2	20778	41.5	3624	7.2	9098	18.2
대전광역시	53686	5735	10.7	3865	7.2	29684	55.3	4745	8.8	9657	18.0
경 기 도	1078016	177895	16.5	118105	11.0	616905	57.2	26791	2.5	138320	12.8
강 원 도	1689727	64466	3.8	115453	6.8	1381395	81.8	11104	0.7	117309	6.9
충 청 남 도	835181	177005	21.2	88007	10.5	455991	54.6	18231	2.2	95947	11.5
충 청 북 도	743558	74464	10.0	73160	9.8	509431	68.5	10953	1.5	75550	10.2
전 라 남 도	1185822	204172	17.2	125834	10.6	716018	60.4	22750	1.9	117048	9.9
전 라 북 도	804246	164746	20.5	71967	8.9	464601	57.8	15806	2.0	87126	10.8
경 상 남 도	1177934	162913	13.8	73452	6.2	805811	68.4	21855	1.9	113903	9.7
경 상 북 도	1945091	1985514	10.2	140222	7.2	1405643	72.3	24504	1.3	176208	9.1
제 주 도	182660	890	0.5	36748	20.1	93743	51.3	4407	2.4	46872	25.7
계	9939183	1263264	12.7	861474	8.7	6571053	66.1	203888	2.1	1039504	10.5

(그림 2-9)는 국토이용의 연도별 변화를 나타낸 것이다. 1961에서부터 본 연구사업의 추진되던 해인 995년간 논·밭의 면적은 12,109km²에서 12,671km²으로 약간 증가하였으나, 산림면적은 8,217km²에서 7,656km²로 약 6.8%가 감소하였으며, 산림면적은 67,529km²에서 64,556km²으로 약 4.4% 정도 감소하였다. 반면에 대지나 도시용지 등은 10,576km²에서 14,511km²로 약 4,000km²가 증가하였으며, 연평균 1.1%씩 증가하고 있다.

년도별 토지이용상태



(그림 2-9) 우리 나라 국토이용의 연도별 변화

나. 농업유역

한편, 우리 나라의 농촌 지역이라고 할 수 있는 군, 면 지역의 토지이용상의 특징은 지형적인 영향에 따라 다르다. 산간지의 경우는 산림이 차지하는 면적이 매우 높은 반면, 평야지는 논 면적이 상대적으로 많다. 예를 들어 경기도의 경우, 가평군은 산림 면적이 83.7%에 달하는 데 논 면적은 불과 3.7%이며, 강화군은 논 면적이 33%인데 반하여, 산림 면적이 45.1%에 불과하다 (<표 2-6> 참조).

농업 유역은 농경지를 포함하는 집수 구역으로 정의된다. 그런데 지형지세의 굴곡이 심하고, 평탄지가 많지 않고, 여름철 유량이 많아 하천이 잘 발달된 지형적 특징으로 농경지만으로 구성되는 집수구역은 그 범위가 작다. 또한, 대부분의 농경지는 산림지를 배후에 두고, 하천을 끼고 완만한 지형변화를 갖는 지역에 분포하므로, 농업 유역은 농경지와 배후지를 포함하는 집수구역으로 구성된다. 따라서, 농업유역은 산간지, 평탄지에 따라 차이가 있으나, 대략적으로 농지면적의 비율이 높고, 대지나 기타 도시용지가 차지하는 비율이 낮은 지역으로 정의할 수 있다.

<표 2-6> 경기도 시군별 토지이용 현황

구분	합계	논		밭		산림		대지		기타	
		ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
수원	10551	1964	18.6	1080	10.2	3149	29.8	1827	17.3	2531	24.0
성남	14176	1629	11.5	1342	9.5	7845	55.3	107	7.3	2323	16.4
의정부	8183	846	10.3	665	8.1	5089	62.2	525	6.4	1058	12.9
안양	5840	514	8.8	300	5.1	3244	55.5	867	14.8	915	15.7
부천	5217	1377	26.4	410	7.9	1032	19.8	1280	24.5	1118	21.4
광명	3887	691	17.8	450	11.6	1517	39.0	622	16.0	607	15.6
송탄	4122	952	23.1	463	11.2	1580	38.3	347	8.4	780	18.9
동두천	9528	480	5.0	952	10.0	6674	70.0	311	3.3	1111	11.7
안산	7745	1071	13.8	328	4.2	1958	25.3	1055	13.6	3333	43.0
고양	26640	7051	26.5	2583	9.7	11397	42.8	965	3.6	4644	17.4
과천	3582	294	8.2	287	8.0	2325	64.9	266	7.4	410	11.4
구리	3110	333	10.7	560	18.0	1295	41.6	251	8.1	671	21.6
평택	4303	1687	39.2	696	16.2	781	18.2	351	8.2	788	18.3
미금	4602	696	15.1	599	13.0	2592	56.3	203	4.4	512	11.1
오산	4054	1081	26.7	689	17.0	1411	34.8	251	6.2	622	15.3
시흥	13396	2966	22.1	1785	13.3	5416	40.4	433	3.2	2796	20.9
군포	2070	281	13.6	231	11.2	907	43.8	248	12.0	403	19.5
의왕	5344	584	10.9	536	10.0	3396	63.5	273	5.1	555	10.4
하남	8775	1231	14.0	978	11.1	5003	57.0	253	2.9	1310	14.9
양주	30345	4204	13.9	3703	12.2	18858	62.1	610	2.0	2970	9.8
남양주	41915	3626	8.7	3477	8.3	31383	74.9	606	1.4	2823	6.7
여주	61061	10586	17.3	7376	12.1	33420	54.7	910	1.5	8769	14.4
평택	35613	15527	43.6	4235	11.9	8643	24.3	970	2.7	6238	17.5
화성	73151	18134	24.8	11260	15.4	31819	43.5	1668	2.3	10270	14.0
파주	67774	13154	19.4	9652	14.2	34969	51.6	1328	2.0	8671	12.8
광주	43160	3744	8.7	3770	8.7	30487	70.6	557	1.3	4602	10.7
연천	73367	5694	7.8	9984	13.6	40109	54.7	650	0.9	16930	23.1
포천	80840	6922	8.6	9301	11.5	56390	69.8	1112	1.4	7115	8.8
가평	84534	3097	3.7	4901	5.8	70728	83.7	616	0.7	5192	6.1
양평	87237	7784	8.9	6330	7.3	65443	75.0	918	1.1	6762	7.8
이천	46270	11877	25.7	8084	17.5	19759	42.7	1041	2.2	5509	11.9
용인	59175	9168	15.5	5802	9.8	35787	60.5	1428	2.4	6990	11.8
안성	55305	12713	23.0	5881	10.6	28868	52.2	1145	2.1	6698	12.1
김포	31894	10568	33.1	3137	9.8	10450	32.8	676	2.1	7063	22.1
강화	40805	13503	33.1	4163	10.2	18422	45.1	910	2.2	3807	9.3
옹진	20544	1870	9.1	2114	10.3	14758	71.8	281	1.4	1521	7.4
계	860730	144341	16.8	95990	11.2	500052	58.1	14210	1.7	106137	12.3

자료 : 전국통계연감 (한국도시행정연구소, 1995)

농업유역은 그 지형적 특징과 토지 이용에 따라 <표 2-7>에서와 같이 산간지, 중산간지, 평탄지, 도시 근교 등으로 구분할 수 있다. 산간지 농업 유역은 산림의 면적 분포가 크고, 그 구릉과 계곡지에 농지가 분포하는 경우이다. 평탄지 농업유역은 상대적으로 지형지세의 변화가 심하지 않은 지형에 농경지가 분포하는 지역이다. 중산간지는 산간지와 평탄지의 중간 정도로 각각의 특징을 동시에 갖는 경우이다. 도시근교 농업유역은 저밀도 혹은 고밀도 도시 인근에 농경지가 분포하는 경우로 정의할 수 있다.

그러나, 농업생태환경은 단순히 지형지세나 농경지의 면적 구성비에 따라서 좌우되지 않고, 그밖의 구성 요소들에 의해서 영향을 받는다. 산림 유역과 도시유역의 생태환경은 중간지나 농경지의 그것과 상이한 경우가 많다. 따라서, 농업유역의 특징은 <표 2-7>의 기준 이외에도, 생태환경계에 따라 분류되는 것이 중요하다.

<표 2-7> 농업유역의 구분

구 분	주 요 특 징
산간지 유역	산림의 비율이 높고, 지형지세의 굴곡이 심하며, 취락분포가 낮고 농경지의 구성비가 낮은 지역
중산간지 유역	산림의 분포가 중간정도이고, 계곡이 잘 발달되어 있으며, 농경지의 구성비가 중간정도이고, 저밀도 취락지가 산재된 지역
평탄지 유역	산림의 구성비가 낮고, 지형지세가 평탄하며, 농경지의 구성비가 높은 지역
도시근교 유역	저밀도 혹은 고밀도 집단취락지의 구성비가 높고, 산림이나 농경지의 구성비가 낮은 지역

3. 대상 유역의 선정 기준과 선정

가. 선정 기준

이상에서 살펴본 우리 나라 농업유역의 일반적 특징을 갖고 있으며, 농업환경이 비교적 넓은 지역을 대표할 수 있는 범위에서 정밀한 유역 모니터링이 이루어지는 것이 필요하다. 그런데, 토지 이용이나 농업현황이 전국적으로 보편적인 특징을 갖춘 지역이란 현실적으로 발견하는 것이 불가능하지 않더라도 실제 모니터링의 목표에 부합되는 여러 가지 조건을 구비한 지역을 선정하는 것은 용이하지 않다. 따라서, 대상 유역을 선정하기 위한 '적합한 조건'을 설정하여, 이를 바탕으로 가능한 후보지를 선정하고, 각 후보지 중 해당 조건에 부합성이 높은 지역을 선정하도록 하였다. 또한, 선정된 유역의 현장 모니터링을 검토하여, 생태 시스템 특성상 그 지역에서 환경 요소의 상호작용을 밝힐 수 있는 정량적 자료 수집이 어려운 경우는 별도의 시험포장을 선정하거나, 유역을 선정하여 시행하도록 하였다.

농업생태환경 모니터링 시범 유역의 선정 기준으로는 다음을 고려하였다.

- ① 농업생태환경 모니터링 기술 개발을 위한 학제간 종합적 연구가 가능한 지역
- ② 유역의 지상, 토양, 토지이용 상태 등이 인접지역과 유사한 지역
- ③ 유역의 임상, 식생 피복, 수생식물 등 식생 상태가 인접지역과 유사한 지역
- ④ 곤충생태가 다양하고, 인접지역과 상호 관련성을 보장할 수 있는 지역
- ⑤ 농경지, 농업기반시설 등 자료구축이 용이한 지역
- ⑥ 지구내 개발보전지역, 집단농지, 자연적 혹은 계획 취락지 등이 분포하며, 장기간 모니터링이 가능한 지역
- ⑦ 다양한 수준의 하천 수질 오염이 있거나, 가능성이 있는 지역 등이다.

나. 후보 유역의 조사

1) 예비조사

농업생태환경 모니터링을 위한 대상 유역의 선정을 위해 우선 경기도 서해안 인접지역을 대상으로 최신 1/50,000과 1/25,000 지형도를 이용하여, 후보 지역들을 선정하였다.

후보 지역은 교통적으로 접근성, 선정 기준에의 부합성, 또한 지역의 하천 특성

등을 우선하여 7개소를 설정하였으며, 각각에 대한 유역의 규모나 하천 상황, 취락 상황 등을 구분하였다.

예비 조사 유역의 범위는 경기도 안산시, 화성군, 평택군 등지였으며, 가급적 주요 접근도로 인근 지역을 피하고, 소위 농촌 지역 특징을 지닌 곳이었다.

2) 답사

예비조사로 선정된 지역을 중심으로 현장 답사를 실시하였다. 현장 답사에서는 앞서 논의한 유역 선정 기준을 중심으로 평가하도록 하였으며, 그 결과 4개 후보지를 선정하였다.

4개 후보지역은 <표 2-8>에서와 같이 안산시 1개소, 화성군 3개소 등이었다. 각각에 대한 유역의 개황을 조사하고, 선정 기준에 의한 평가를 시행하였으며, 그 결과는 <표 2-8>에서와 같았다.

<표 2-8> 농업생태환경 모니터링 대상유역 답사 결과

후 보 지	유 역 특 성	평가순위	비 고
경기 안산, 반월 저수지 유역	산간지, 중산간지 유역, 개발보전지 포함 유역 수문 모니터링 실시 중인 지역, 곤충생태환경이 단순함, 근접성 양호, 저수지 2개소, 경지정리 지구 포함	2	반월천
경기 화성, 어천저수지	평탄지, 도시화, 경지정리 지구, 유역형상이 단순함, 수질오염 중간, 근접성 양호, 서해안 고속도로, 고속전철 통과예정지	3	
경기 화성, 기천·발안 저수지	산간지, 중산간지, 평탄지, 취락지 등 다양성, 개발보전지 포함, 식생다양, 곤충생태 환경 양호, 경지정리 지구, 도시화 진행중, 수질오염수준 다양	1	발안천
방농장 저수지	서해안 간척지, 중산간지, 평탄지, 식생단순, 곤충생태 환경 양호, 경지정리 지구, 수질오염수준 보통	4	

<표 2-8>에서와 같이 경기 화성군관내 기천저수지와 발안저수지 및 그 물리구역 중 일부를 선정하는 것이 유리하다고 생각되었다. 그리고, 선정된 시험유역을 기천·발안저수지 유역으로 명하고 약칭으로 <발안지 유역>으로 하도록 하였다.

3) 세부조사

발안지 유역을 대상으로 세부 조사를 실시하였으며, 여기서는 우선 유역의 분할, 조사 지역의 설정, 모니터링 지점과 조사항목 등을 계획하였다. 각 지점에 대한 세부 조사 결과는 추후에 논의하도록 하며, 여기서는 모니터링 계획을 논의하고, 각 측정점과 측정망의 주요 조사 목표 등을 설정하는 조사를 시행하였다.

4. 발안지 유역의 모니터링 계획

가. 유역규모 조사, 세부조사와 처리구 조사

발안지 유역을 대상으로 하는 농업생태환경 모니터링 계획에서는 비교적 넓은 지역을 범위로 하므로 조사 항목과 방법, 빈도 등에 따라 엄청난 비용이 소요되는 것이 보통이다. 따라서, 주어진 재원을 바탕으로 모니터링 결과의 극대화를 꾀하는 것이 불가피하며, 이를 전제로 현황조사계획을 마련하였다.

한편, 유역규모 모니터링 (watershed-scale monitoring)은 많은 제약 조건을 갖는다. 앞서 언급한 모니터링 방법과 빈도 등 재정적 제약이외에도, 유역내의 토지이용과 영농방법, 폐기물 처리방법 등 모든 현상들이 소위 '자연상태'에서 실제로 발생하는 것이며, 이를 조절하거나 제한할 수 없는 것이 그것이다. 따라서, 유역규모 모니터링에서는 그 조사 밀도 등에서 한계를 갖는 것이 분명하다.

이를 보완하기 위한 포장규모 모니터링 (field-scale monitoring)이 필요하다. 포장 규모란 동일한 영농형태를 갖는 구역으로 이를 세부조사 구역이라 할 수 있다. 포장 규모 모니터링은 세부조사를 위한 포장을 선정하여, 각종 생태 시스템 구성인자들과 그 상호작용을 파악하기 위해서 조사를 실시하는 것을 말한다.

그런데, 영농형태나 방법 등 인위적 인자들에 대한 생태 시스템 구성인자들의 거동과 상호관련성 등을 구명하기 위해서는 적절한 수준의 처리가 불가피한 데, 세부조사 구역에서의 포장규모 모니터링에서는 유역내에 위치한 포장들을 대상으로 현

장 조사를 실시하므로 별도의 처리나 조절 등을 시행하기 위해서는 영농을 대행하거나, 처리에 따른 제반 피해를 보상하는 등이 필요하다. 또한, 비록 이러한 처리가 가능할 경우라도, 인접 지역과의 관계, 비배관리 등 실제 처리하는 데 제약이 있을 뿐만 아니라, 그 효과도 확신하기 어려운 것이 현실이다. 따라서, 독립된 환경에서의 처리가 가능한 상태에서의 조사지역 즉 처리구 (treated plots)의 설정이 필요하다. 이와 같은 처리구에서의 현장 조사를 보통 시험포 규모 모니터링 (plot-scale monitoring)이라고 한다.

시험포 규모 모니터링을 위한 시험포로서는 서울대학교 농업생명과학대학 부속 농장내의 시험포장을 사용하도록 하였다. 여기서는 표준영농법에 의한 농작물의 생육상황의 조사 및 논에서의 수질변화 등 포장규모 현장 모니터링에서 조사가 어려운 인자들에 대한 현황 진단과 조사를 실시하도록 하였다.

나. 유역 구분과 조사지역

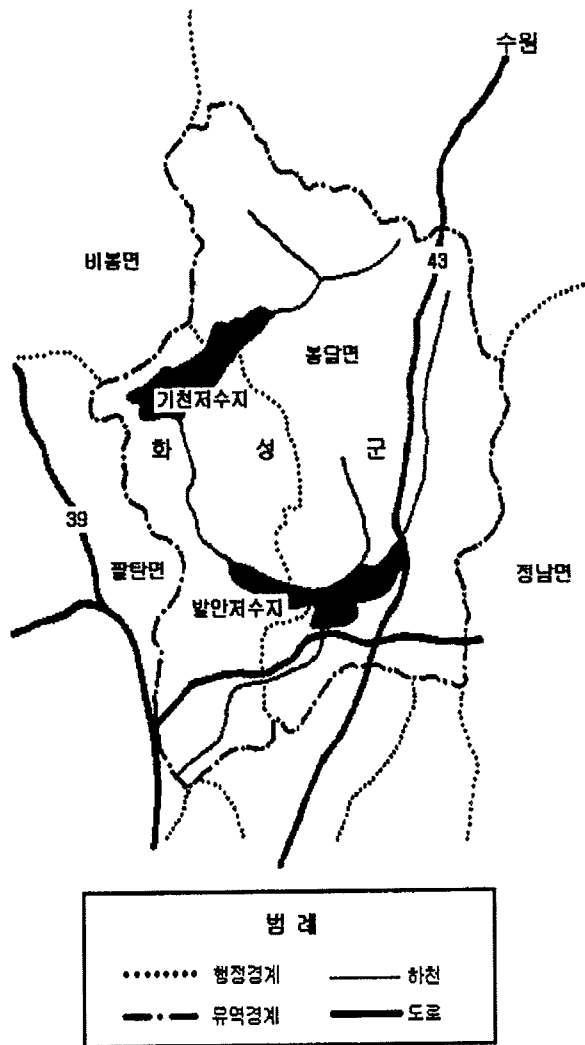
1) 조사개요

(그림 2-10)은 발안지유역의 위치를 나타낸 것이다.

시험유역의 세부 유역은 수문관측망을 중심으로 구분하였다. 여기서는 기상과 강우, 하천 수위와 유량, 저수지 수위와 저수량 등을 조사하도록 하였다.

시험유역은 세부 유역 단위로 수질관측망을 구성하였으며, 여기서는 상시 수질 측점을 두고, 하천 유황에 따른 수질 변화와 토지이용 및 도시화에 따른 수질 오염 상황을 파악할 수 있도록 구성하였다.

이상의 유역 규모 모니터링이외에도 3개 지역을 선정하여 세부조사구역으로 하였으며, 여기서는 산림 식생생태, 수변식물생태, 영농환경생태, 곤충생태 등 농업환경 생태를 파악하도록 하고, 물관리 상황 등 환경 요인들에 대한 세부 조사를 시행할 수 있도록 하였다.



(그림 2-10) 시험구역의 위치도

2) 유역규모 모니터링

수문계측 지점에 수위계를 설치하고, 수위변화와 유황을 조사하도록 하였다. 각가의 수문 계측 측점은 각각 독특한 수문특성을 갖는 독립적인 유역으로서의 특성과 함께 발안천 상하류에 계통적으로 위치하여, 기천저수지와 발안저수지의 물관리 (관개배수 등)에 따른 유역내 수문환경의 변화를 파악할 수 있도록 계획하였다.

수질 측점의 선정도 유역의 오염부하량을 파악할 수 있도록 수문 측점과 동일한 점을 선정하는 동시에 발안천 주위의 수질 상황을 파악할 수 있도록 오염상황이나 오염 가능성을 기준으로 배치하였다.

3) 포장규모 모니터링

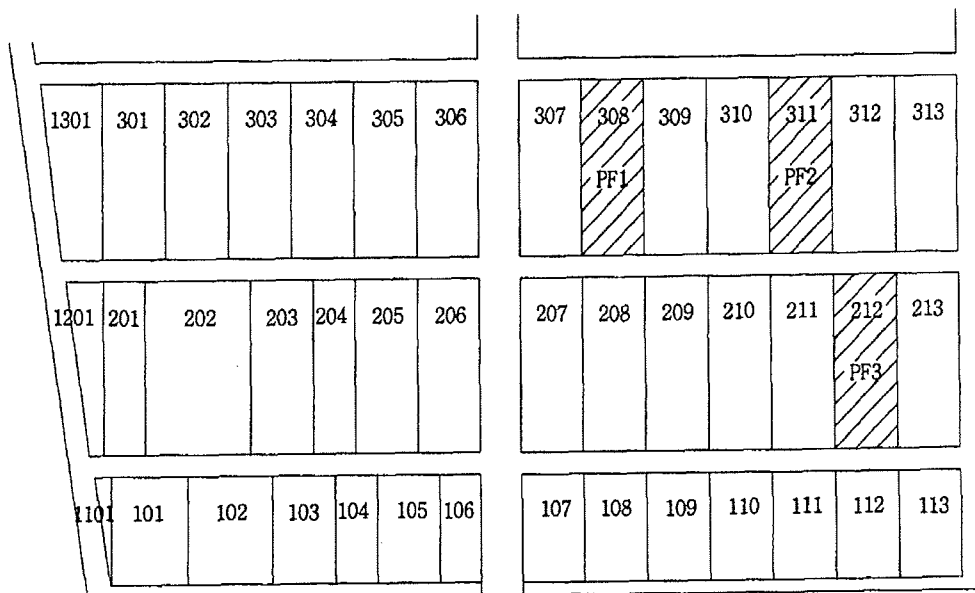
발안지 유역의 세부조사 지역은 각 수문 측점으로 대표되는 유역 특성에 따른 영향의 분석과 함께 영농방법 등에 따른 농업생태환경인자들의 특성을 조사할 수 있도록 하는 포장구역 3개소와 수변식물상을 조사하기 위한 하천구간, 산림지역 등으로 각각 구분하여 설정하고, 연구 기간동안의 생태환경의 조사와 분석이 이루어질 수 있도록 하였다.

세부 조사 지역은 각각 PB, PK, PD 등의 기호로 구분하였으며, 그 각 세부조사 지역의 특징은 다음과 같다.

- (1) 발안지 하류 (PB군) : 44개의 시험 포장, 경지 정리
- (2) 기천지 하류 (PK군) : 16개의 시험 포장, 경지 정리
- (3) 당하교 (HS#3) 상류 (PD군) : 10개의 시험 포장, 등고선 대상 경작

4) 시험구 규모 모니터링

앞서 언급한 바와 같이 시험구는 서울대학교 농업생명과학대학 부속 농장에 위치하였으며, 그 배치도는 (그림 2-11)에서와 같다. (그림 2-11)에서와 같이 정밀처리구는 논에서의 물질 순환의 조사를 위해 관행구와 대비구로서 직파재배구를 선정하여 수질 조사를 실시하였으며, 별도의 처리구에서 작물생육조사를 실시하였다.



(그림 2-11) 정밀시험 포장의 배치도

다. 조사 개요

발안지 유역과 처리구 등에서의 현황 모니터링 내용 등은 <표 2-9>에서와 같다.

<표 2-9>에서와 같이 수문조사는 시간별 강우량 자료, 시간별 일별 하천 수위자료, 저수위 수위, 지하수위, 관개량, 배수량, 수위-유량관계, 그리고 수위-내용적 관계 등을 수집하고, 그 결과를 분석하는 내용을 포함한다. 수질조사는 주기적 (주1회)으로 수질 표본을 샘플링하고, 수질 분석을 실시하며, 오염물질 부하량을 조사하는 것으로 구성하였다.

유역 지상인자 조사는 대상 유역의 지상인자를 조사하는 것으로 1/25,000지형도, 토양도, 토지이용도 등의 자료를 이용하며, 현지답사를 통해 보완하고, 그밖에도 항공사진 분석, 원격탐사, NGIS 등을 시행하도록 하였다.

유역생활환경 및 현황조사는 분할 유역내의 인구, 산업, 경제 등의 변동사항을 조사하며, 연도별 변동 상황을 집계 분석하도록 하며, 축산 품종별 두수 변화 등도 조사하도록 하였다.

영농상황조사는 유역내의 토지이용구분별로 주요 품종과 재배상황, 비료 농약 사용량 등을 청문조사를 통해 파악하는 것이다.

물관리 상황조사는 세부조사 구역내의 필지별 물관리 상황을 조사하고, 용배수 상황에 따른 수질환경의 영향을 위한 자료를 수집 분석하는 것이다.

산림생태조사는 유역내 조사구를 설정하고, 조사구내의 식생 상황을 연 3회 조사하고, 그 변동상황을 파악하며, 생태변화를 추정하는 것이다.

수변 식생조사는 유역내 하천 구간의 식생분포를 조사하며, 그 계절적 변화와 수질과의 관계 등 제 요인간의 관계를 구명하도록 하였다.

곤충생태조사는 세부조사 구역내의 곤충분포와 생태를 조사하며, 그 시기적 변화를 밝히는 조사이다.

<표 2-9> 시험유역과 처리구 현황 및 내용

구 분	측 점	조 사 항 목	조 사 방 법	비 고
수문조사	HP#1~HP#14 GW#1~GW#3	-시간별 강수량 자료 -시간별 하천 수위 자료 -시간별 저수위 자료 -수위-유량 관계 -저수지 수위-내용적 관계 -지하수위, 관개량, 배수량	- 강우계 - 자기수위계 - 수위표 - 유속 측정 - WL14	수문계측망
수질조사	HP#1~HP#14 HQ#1~HQ#3 GW#1~GW#3	수온, PH, DO, SS, NO ₃ -N NH ₄ -N, T-N, PO ₄ -P, T-P	- 현장 측정 - 실험실 분석	수질계측망
유역지상 인자조사	시험유역	- 유역면적 - 기복량 - 형상계수 - 평균경사 - 하천밀도	- 1/25,000 지형도 - 1/25,000 토양도 - 1/25,000토지이용도 - 항공사진분석 - 원격탐사 연구 - 현장답사	
인문/사 회환경 조사	시험유역	- 인구현황 - 산업현황 - 경제현황 - 축산현황	- 현장답사 - 설문조사	차기년도 (1997) 계획
영농상황 조사	시험유역	- 작물 품종, 생육환경 - 농약/비료 시비량	- 현장답사 - 설문조사	
물관리 상황조사	현장시험포장 (5개지구 61개 필지)	- 관개량, 배수량 - 담수심, 물꼬높이 - 수질 조사	- 현장측정 - 실험실 분석	
산림생태 조사	시험유역	- 산림식생 - 산림 생태 환경 - 주요 산림 군락	- 방형구 설치 - 현장답사	
수변식생 조사	시험유역 (15개지점)	- 식생지도 - 생물량 - 서식처 환경 - 토양환경	- 방형구 설치 - 실험실 분석	
곤충생태 조사	시험 유역 (3개 지점)	- 절지동물 분포 - 절지동물 다양성 - 절지동물 생물량	- 방형구 설치 - 채집 - Tullgren Funnel 분석	

라. 모니터링 계획의 상호 관련성

이상의 유역규모, 포장 규모 및 시험구 규모 모니터링 계획은 상호 유기적이고, 종합적이며, 학제간 공동 연구로 시행하고 있으며, 각각의 현황조사 결과가 수질 환경과 생태 시스템에 미치는 영향을 종합적으로 파악할 수 있도록 구성하였다.

본 현장 모니터링 계획의 상호관련성을 정리하면 다음과 같다.

- ① 시험구 규모 모니터링은 미세 기상, 수문, 수질 및 생태환경인자 등의 변화를 파악할 수 있으므로, 이들의 상호 관련성과 기작을 정량적으로 파악할 수 있고,
- ② 시험구 규모에서는 영농방법에 따른 이들 인자들의 영향을 비교할 수 있고,
- ③ 따라서, 기초적이고 이론적인 관련성을 정량적으로 분석할 수 있으며,
- ④ 포장 규모에서는 실제 농민의 영농형태에 따른 수문기작과 수질 및 토양오염, 곤충 생태환경 등에 대한 자료를 얻을 수 있으며,
- ⑤ 포장규모의 자료와 시험구의 결과를 비교함으로써, 포장에서의 수문과 물질순환, 곤충 등 생물상의 인접 포장과의 관련성 등에 대한 자료를 비교할 수 있으며,
- ⑥ 포장 규모 (길이, 면적 등)에 따른 생태환경인자의 변화 등을 파악할 수 있으며,
- ⑦ 유역 규모에서의 현장 자료를 수집하여, 이상의 결과를 상호 비교 분석함으로써, 광역 규모에서의 생태환경 기작의 변화를 정량적으로 해석이 가능하며,
- ⑧ 현장 자료를 바탕으로하는 모델링과 매개변수의 추정 등에 필요한 정량적 자료를 얻을 수 있으며,
- ⑨ 규모의 증가에 따른 계측밀도의 감소에 따라 생태환경인자의 통계적 특징의 변화를 파악할 수 있고,
- ⑩ 이를 바탕으로, 주요 생태환경요소의 현장 모니터링 기술을 비교 분석할 수 있으며,

나아가 경제적인 모니터링과 모델링도 가능해질 것이다.

제 4 절 요약 및 결론

본 장에서는 자연생태시스템에 대한 특징과 수질오염 기작과의 상호관련성 등을 정리하였고, 농업생태환경의 현황을 조사하기 위한 대상유역의 선정기준을 설정하여 시험유역을 선정하였으며, 이를 바탕으로 유역에서의 농업생태환경 모니터링 기본 계획과 방향을 설정하였다.

본 절에서의 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- ① 자연생태계는 산림계, 경지·초지계, 도시계, 대기계, 수생계 등으로 구성되며, 각 시스템은 균형적인 상호관련성을 가지나, 인구증가, 산림훼손, 집약적 농업, 도시화, 생활수준의 향상 등으로 인한 자원의 과다 이용 혹은 손실 등에 의하여 균형을 잃기도 한다.
- ② 수질 오염은 물의 물리적, 화학적, 생물학적, 미생물학적, 또는 방사능물질 양 등의 매개변수에 의하여, 이용 목적에 따른 수질 기준 혹은 표준과 비교하여 정의되며, 점원오염과 비점원오염에 의하여 비롯된다.
- ③ 비점원오염은 토지 위에서 발생하며, 지표면 위로 이동하여 지표수로 유입되며, 토지와 유출에 대한 조절방법을 적용하며 관리되며, 그 주요 폐기물 성분은 부유물질, 비료분, 독성물질 등으로 구성된다.
- ④ 농업유역에서의 비점원오염은 강우현상에 의하여 구동되며, 수문순환과 밀접한 관계를 갖고 이로 인해 토양유실과 운송, 물질순환 등이 발생되며, 이들은 대기퇴적, 토양계와 수생계의 물질 순환과도 상호관련성이 있다.
- ⑤ 농업유역에서의 비점오염물질은 주로 토사, 비료분 (주로 질소와 인산), 유기물질, 농약 등이며, 그 부하량은 산림, 농경지, 도시지역과 기타 오염원 등에 따라 다르다.
- ⑥ 농업유역의 생태환경시스템을 적절한 수준으로 유지하며, 오염을 줄이기 위해서는 최적관리기법을 적용하며, 여기에는 경종법, 종합적 해충관리법 등의 비구조적인 방법과 테라스 설치, 사방사업, 저류지, 가축폐기물 저류 시설 등 구조적인 방법, 그리고 습지보전, 완충대 설치 등 기타 방법 등이 있다.

- ⑦ 최적관리기법의 선정은 수질 문제의 확인, 오염원과 오염물질의 확인, 운반경로의 확인, 수질 목표의 설정 후, 이 조건에 가장 적합한 관리기법의 결정 등의 순서에 의한다
- ⑧ 우리 나라의 농업유역의 일반적 특징을 살펴보고, 이들을 바탕으로 농업생태환경의 현황을 조사하기 위한 시범유역 (demonstration watersheds)의 선정 기준을 설정하고, 현장 답사를 통해 적합한 지역을 선정하며, 유역 모니터링 기본 계획과 방향을 고찰하고, 그 상호 관련성 등을 살펴보도록 하였다.
- ⑨ 우리 나라의 토지이용의 현황과 연도별 변화를 살펴보고, 지역별 토지이용상의 특징을 고찰하였으며, 농업 유역의 분류와 특징을 정리하였다.
- ⑩ 연구 대상 유역의 선정 기준을 정리하고, 후보 유역의 조사 결과를 논의하였다.
- ⑪ 발안지 유역의 모니터링에서는 시험구, 포장, 유역 단위별 조사를 시행하도록 하였으며, 대상지역의 조사계획을 정리하였다.
- ⑫ 발안지 유역의 계측망의 구성과 그 상호관련성을 살펴보고 주요 처리구 현황과 조사내용 등을 정리하였다.
- ⑬ 시험구, 포장, 유역 규모의 모니터링 계획의 필요성과 상호관련성을 고찰하였다.

참고문헌

1. 권순국, 1998, 우리나라 비점원 수질오염 관리의 문제점과 개선방안, 대한환경공학회지, 20(11), pp.1497-1510.
2. 권혁윤, 1992. 하천 유량변동에 따른 수질변화에 관한 연구, 연세대학교 보건대학원 석사학위논문.
3. 김광은, 이태섭, 1994. 수질오염 감시에의 활용을 위한 항공원격탐사의 적용 연구, 한국GIS학회지, 2(1), pp. 65-74.
4. 김범철, 1996. 우리나라 호소수질환경의 개선방향, 한국수자원학회지, PP. 51-61
5. 김복영, 조재규, 1995. 벼 재배에서 방류수에 의한 영양염류의 유실, 한국관개배수 2(2): 150-156.
6. 김우철 외, 1985. 현대통계학, 영지문화사.
7. 김종수, 박경배, 최정, 1993. 오염관개수가 벼 생육 및 미질에 미치는 영향, 한국토양비료학회지, 26 (2), pp. 132-137.
8. 김진택, 1995. 농업 비점원 오염모형을 위한 지리자원정보시스템 호환모형의 개발 및 적용, 서울대학교 박사학위논문.
9. 김진택, 박승우, 1994. 경사지의 경종에 따른 유출 및 토양유실에 관한 연구, 한국농공학회지, 36(1): 73-82.
10. 김진택, 박승우, 1997. 농업비점원오염모형을 위한 GIS 호환모형의 개발 및 적용 (I), 한국농공학회지 39(1): 41-47.
11. 김진택, 박승우, 1997. 농업비점원오염모형을 위한 GIS 호환모형의 개발 및 적용 (II), 한국농공학회지 39(2): 53-61.
12. 김진택, 박승우, 1997. 농업비점원오염모형을 위한 GIS 호환모형의 개발 및 적용 (III), 한국농공학회지 39(3): 138-143.
13. 김한태, 권순국, 1993. 농촌유역에서의 수질오염 특성에 관한 연구, 한국환경농학회지 12(2): 129-143.
14. 남현옥, 박경윤, 조성익, 1989. 원격탐사기법에 의한 소유역의 홍수수문곡선 결정, 대한원격탐사학회지 5(1) : 13-27.

15. 농림부, 농업기반공사, 1996. 농업생산기반사업통계연보.
16. 농림부, 농업기반공사, 1997. 농업생산기반사업통계연보.
17. 농림부, 농업기반공사, 1998. 농업생산기반사업통계연보.
18. 농림부, 농업기반공사, 1999. 농업생산기반사업통계연보.
19. 농림부, 농업기반공사, 2000. 농업생산기반사업통계연보.
20. 농림부 · 국립농산물검사소, 1999. 1998년산 작물통계.
21. 농수산부, 농업진흥공사, 1985. 작물 소비수량 산정방법의 정립, 서울대학교 농업생명과학대학 부속 농업개발연구소.
22. 농촌진흥청, 1998. '97 농축산물표준소득, 농업경영연구보고.
23. 농촌진흥청, 1998. 벼멸구 · 흰등멸구의 발생과 방제 자료집, 농촌진흥청 농과원.
24. 농촌진흥청, 1998. 연구사업보고서, 농업경영연구보고 제60호.
25. 농촌진흥청, 1998. 작목별 작업단계별 노동력 투하시간, 농업경영연구보고 제60호.
26. 농촌진흥청, 1999. 농작물 병해충 예찰.
27. 박승우, 1984. 소유역 수문모형의 개발과 적용(I), 한국농공학회지, 26(2): 125-132.
28. 서승덕, 김동훈, 윤학기, 1994. 농업용 저수지수역의 수질환경 오염원 조사분석, 한국농공학회지, 36 (3), pp. 100-112.
29. 신동석, 1990. 논에서의 질소 및 인의 농도와 유출입, 서울대학교 대학원 석사학위논문.
30. 심순보 등, 1994. 수질 종합 관리에 있어서 시스템 인터페이스를 위한 모듈 개발, G-7과제연구보고서.
31. 심순보 등, 1996. 원격탐사기법을 이용한 충주저수지 오염부하량 산정 연구, 충북대학교, 수자원 · 수질연구센터 논문집 2(1).
32. 오경두, 1994. 하천 수질관측망 최적설계 기법 개발, 국제수문개발계획(IHP) 연구보고서, 건설부.
33. 윤용남, 1986. 공업수문학, 청문각.

34. 이광식, 1990. 농업용수 수질오염이 작물에 미치는 영향, 농공기술, 농업진흥공사 농업토목시험연구소, 7 (2), pp. 127-134.
35. 이길성, 조홍연, 1995. 저수지 수질모델링, 한국수자원학회지, 기술정보, 28 (3), pp. 71-76.
36. 이상도, 이용환, 백경원, 송재우, 1996. 중소하천의 유량과 수질의 통계적 분석, 수자원학회, 96학술발표논문집.
37. 이종식, 김복영, 우기대, 1994. 수원지방 강우의 성분조성과 작물에 미치는 영향, 한국환경농학회지 13(1): 31-38.
38. 이호진, 정영상, 1993. 지속적 작물생산과 환경관리, 지속적 농업과 환경보전 국제심포지엄, 서울대 농업개발연구소, pp. 31-55.
39. 이흥근, 1994. 수질자동측정망의 효과적 계획과 운영방안, 수질자동측정망의 구성 및 효과적 운영관리 방안. 환경처, pp. 5-29.
40. 정상옥, 1995. 농업용 화학물질 이동 추정모형의 발달 -GLEAMS 모형을 중심으로-, 한국관개배수지 2(1): 10-19.
41. 정이근, 1994. 농업용수의 오염과 관개수의 적정판단, 토양비료과제훈련교재, 농촌진흥청, 3, pp. 57-68.
42. 조홍연, 1996. 호소수질모형의 현황과 개발방향, 한국수자원학회지, pp. 51-61.
43. 최주운, 김기형, 이무옥, 1996. GIS를 이용한 하천내 수질오염 조사 자료의 관리, 수자원학회, 96학술발표논문집.
44. 최지용, 박원규, 이상일, 1996. 하천 및 호소수 수질관리를 위한 자동측정망의 설계, 한국수자원학회지, 29(2), pp. 167-178.
45. 최진규, 손재권, 구자웅, 1996. 전북도내 농업용저수지의 수질조사 연구, 한국농공학회지, PP. 65-74.
46. 최진용, 1996. 지리정보시스템을 이용한 장기 유출모형의 개발에 관한 연구, 서울대학교 박사학위논문.
47. 통계청, 1999. 1998년 농산물생산비통계.
48. 한국농기계농업협동조합 · 한국농업기계학회, 1998. 농업기계연감.

49. 홍성구, 권순국, 1989. 농경지로부터의 오염물질 유출부하특성, 한국농공학회지 31(3): 92-102.
50. Bishop, E. 1990. Meteorological aspects of spider ballooning, Environ. Entomol., 19: 1381-1387.
51. Bodo, B., and Unny, T. E., 1983. Sampling Strategies for mass-discharge estimation, ASAE, Journal of Environmental Engineering, Vol. 109, No. 4.
52. Chhikara, RAJ S., 1984. Effect of Mixed (Boundary) Pixel on Crop Proportion Estimation, Remote Sensing of Environment 14 : 207-218.
53. Chow, Ven Te., et al., 1964. Handbook of Applied Hydrology : Sec. 21 Hydrology of Agricultural lands, Sec. 22 Hydrology of Forest lands and Rangelands, McGraw-Hill.
54. Cochraan, W. G., 1997. Sampling techiques. Third Ed., John Wiley and Sons, New York, N. Y..
55. Daniel E. Line, 1995. Nonpoint sources, Water Environment Research, Vol. 67; No. 4.
56. Dolan, D. M., Yui, A. K., and Geist, R. D., 1981. Evaluation of river load estimation methods of total phosphorus. J. Great Lakes Res., 7(3), pp. 207-214.
57. Donald H. burn, 1990. Real-Time Sampling Strategies for Estimating Nutrient Loadings, ASAE, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 116, No. 6.
58. Gilbert, R. O., 1987. Statistical methods for environmental pollution monitoring, VAN NOSTRAND REINHOLD, New York.
59. Harms, L. L., dornbush, J. N., and Anderson, J. R., 1974. Physical and Chemical Quality of Agricultural Land Runoff. J. Water Poll. Control Fed., 46, 2460.
60. Hawkins, R. H., A. T. Hjelmfelt, and A. W. Zevenbergen, 1985. Runoff

Probability, Strom Depth, and Curve Numbers., ASCE, J. Irr. & Dr. 11(4) : 330-340

61. Heinrichs, E. A., 1994. Biology and management of rice insects, Wiley Eastern Limited, New Delhi.
62. Hetling, L. J., Carlson, G. A., and Bloomfield, J. A., 1976. "Estimation of the optimal sampling interval in Assessing water quality of streams," Environmental modeling and simulation, EPA 600/9-76-016, Environmental protection agency, Washington, D. C., July, 1976.
63. Hirsch, R. M., and Slack, J. R., 1982. Techniques of trend analysis for monthly water quality data, Water Resour. Res., 18(1), pp. 107-121.
64. Lajtha, K. and R., Michener, 1994. Stable isotopes in ecology and environmental science, Blackwell scientific publications.
65. Lettenmaier, D. P., Hooper, E. R., Wagoner, C., and Faris, K. B., 1991. Trends in stream quality in the continental United States, 1978-1987, Water Resour. Res., 27(3), pp. 327-339.
66. Lillesand, Thomas M. and Ralph W. Kiefer, 1994. Remote Sensing and Image Interpretation, New York: John Wiley and Sons.
67. Maidment, David R., et al., 1992. Handbook of Hydrology: Chap. 24 Remote Sensing, McGraw-Hill.
68. Maitoza, P., Valade, J. A., and Madigan, W. T., 1989. Continuous monitoring of volatile hydrocarbons in water at the ppb level with sparger and process chromatograph, American Laboratory, pp. 33-36.
69. Mcbean, E. A. and Gorrie, J. E., 1975. Non-point source contributions to water quality problems. Proc., 10th Canadian Symp. on Water Pollution Res. in Canada, pp. 142-150.
70. McFeeters, S. K., 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, Int. J. Remote Sensing

17(7) : 1425-1432

71. Orlob, G. T., 1983. Mathematical Modeling of Water Quality : Streams, Lakes, and Reservoirs, Johe-Wiley & Sons
72. Park, S. W., S. Mostaghimi, R. A. Cooke, and P. W. McClellan, 1994. BMP Impacts on Watershed Runoff, Sediment, and Nutrient Yields. Water Resources Bulletin 30(6): 1011-1023.
73. R. Peter Richards and Jim Holloway, 1987. Monte carlo studies of sampling strategies for estimating tributary loads, Water Resource Research, Vol. 23, No. 10, pp. 1393-1448.
74. Sadao Shoji, Ho Ando and Genshichi Wada, 1986. Fate of Nitrogen in Paddy Fields and Nitrogen Absorption by Rice Plants, JARQ 20(2): 127-134.
75. Sharp, W. E., 1972. A topologically optimum water sampling plan for the Edisto river, North Carolina, WMO No. 324, Casebook on hydrological network design practice, World Meteorological Prganization.
76. Sigekazu Yamamuro, 1986. Behavior of Nitrogen in Paddy Soils, JARQ 20(2): 100-107.
77. Singh, V. P., 1995. Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources publications Colorado, PP. 367-394.
78. Smith, D. G., and Massdam, R., 1994. New Zealand's National River water quality network: 1. Design and physico-chemical characterisation. New Aealand J. Mar. Freshwar. Res., Vol. 28, No. 1., pp. 19-25.
79. Stephen M. Yaksich, Frank H. Verhoff, M., 1983. Sampling Strategy for River Pollutant Transport, ASAE, Journal of Environmental Engineering, Vol. 109, No. 1.
80. Thomas, R. B. 1985. Estimating total sediment yield with probability sampling. Water Resour. Res., 21(9), pp. 1381-1388.
81. Toshiya Furuki, 1983. Water Movement and Requirements in Paddyfields,

Advanced Rice Cultivation, Irrigation and Drainage Technology in Japan, pp. 126-139.

82. UNESCO, 1978. Water Quality Surveys - A Guide for the Collection and Interpretation of Water Quality Data. IHD-WHO Working Group on Water Quality, UNESCO/WHO, Geneva, Switzerland.
83. Vladimir Novotny and Harvey Olem, 1994. Water Quality Prevention, Identification, and Management of Diffuse Pollution, Van Nostrand Reinhold.
84. Ward, R. C., Loftis, J. C., and McBride, G. B., 1990. Design of water quality monitoring systems, Van Nostrand Reinhold.
85. Weidner, R. B., et al., 1969. Rural runoff as a factor in stream pollution. Jour. water Poll. Control Fed., Vol. 41, pp. 377-384.
86. Williams, J. R., A. D. Nick, and J. G. Arnold, 1985. Simulator for water resources in rural basins. J.Hydraul. Eng. 111(6), pp. 970-986.
87. Yasuhumi Mori, 1990. A Model for Changes in the Surface Water Nitrogen Concentration in Paddy Fields, Trans. JSIDRE, pp. 15-25. (in Japanese).
88. Yasuhumi Mori, 1991. Modeling for Changes in Surface Water Phosphorus Concentration in Paddy Fields, Trans. JSIDRE, pp. 45-53. (in Japanese).
89. Young, R. A., C. A. Onstad, D. D. Bosch, and W. P. Anderson, 1987. AGNPS, Agricultural Non-Point Source Pollution Model. A Watershed Analysis Tool. USDA, Conserv Res. Report 35.

여 백

유역수문 모니터링 기술 개발

2000년 12월

“농업생태환경 모니터링 및 종합적 환경관리시스템 개발 사업”

서울대학교 농업생명과학대학 부속 농업개발연구소

최종보고서 제 II 편 제 3 장

여 백

제 3 장 유역수문 모니터링 기술 개발

제 1 절 서 론

유역의 수문 순환은 물질 순환 및 이로 인한 수질 오염 등과 밀접한 관계를 갖는다. 실제로, 수문 변량인 강수, 유출 등은 유역으로부터 비점오염을 구동하는 원동력이 된다. 또한, 유역의 농업생태환경에 영향을 주는 인자들과 그 상호작용, 그리고 수질 오염과의 관계를 구명하기 위해서는 수문모니터링이 중요하다.

유역 수문조사는 유역의 기상인자와 강수량, 하천수위와 유량 등 수문자료의 수집, 강우-유출관계를 구명하는 일을 말한다. 유역의 수문특성은 기상인자 이외에도 지형과 지세, 토양, 토지이용 등의 지상인자나 영농, 관개방법, 도시화, 그밖의 목적으로의 도수나 채수 등 인위적 인자(문명적 인자) 등 여러 가지 요인에 의해 좌우된다. 따라서, 유역 수문조사에서는 궁극적으로는 수문계측과 자료의 관리 및 분석, 그리고 지상인자나 문명적 인자들과의 상호 작용 등을 파악하는 일이 필요하다.

유역의 수문특성의 시간적, 공간적 변화를 현장 조사하고, 이들간의 상호 관계 등을 구명하는 일을 유역 수문 모니터링(watershed hydrologic monitoring)이라 한다. 즉, 수문 측정에서의 자료를 수집 분석하고, 유역내 지상인자나 인간의 활동과 관련한 제반 인자 등을 조사하며, 이들의 영향들을 분석하는 일을 말한다.

본 연구의 목적은 유역의 특성 조사와 하천 배수 상황 조사, 토양 조사 등을 실시하고, 유역의 토지 이용과 영농, 인구, 경제활동 등에 대한 조사 결과를 정리하도록 한다. 또한, 대상 유역에 대한 수문 계측망을 구성하고, 수문 인자들의 측정을 위한 설비, 측정, 자료 관리와 분석 등 수문 모니터링을 실시하며 그 결과를 분석하는 데 있다. 또한, 유역 수문조사 등은 대상 유역의 농업생태환경조사를 위한 범위에서 실행되었으므로, 이들과의 관계 등을 고찰하도록 한다.

제 2 절 시험유역과 유역 특성 인자

1. 시험유역의 개요

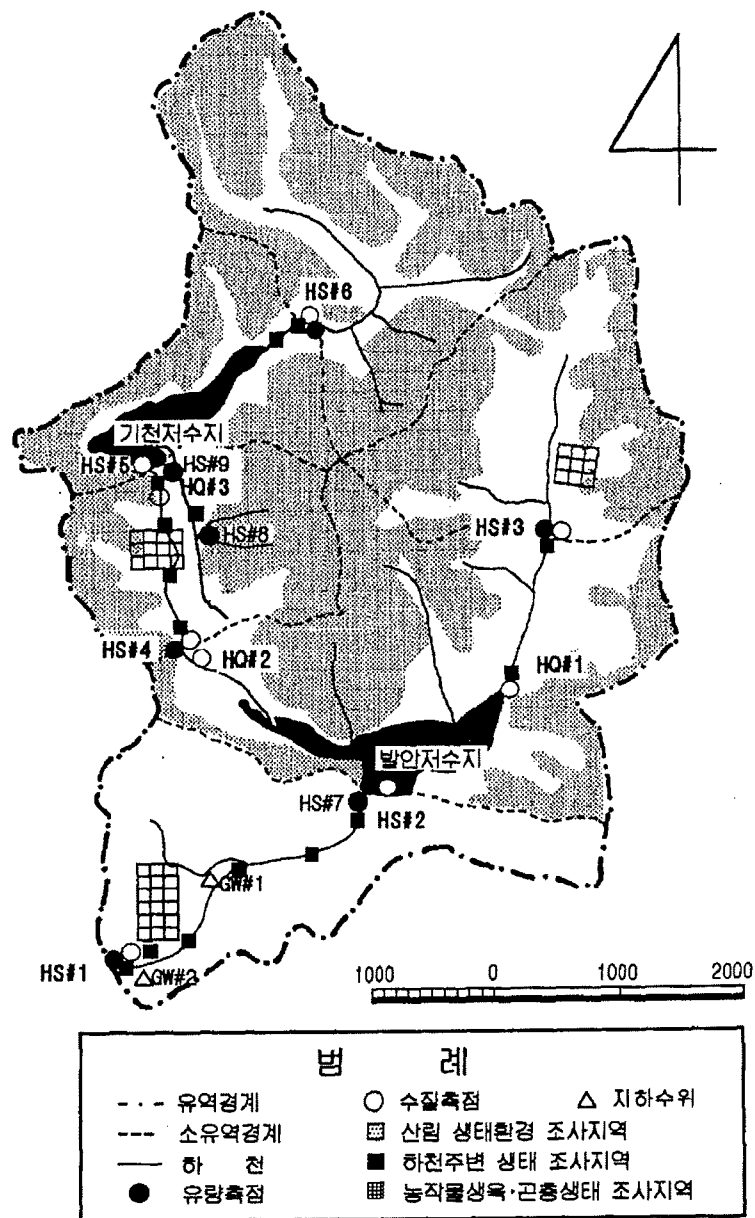
본 연구의 시험유역으로 선정된 발안저수지 유역은 경기도 화성군 발안면과 팔탄면에 위치하고 있으며, 1996년부터 서울대학교 농공학과에서 수문/수질 모니터링을 실시하고 있다. 유역면적 29.79km²의 발안저수지 유역은 산간지, 중산간지, 평탄지, 취락지 등 다양한 토지이용상태를 보이고 있으며, 경지정리지구 및 개발보전지를 포함하고 있음은 물론, 도시화의 진행 등으로 수질 오염 수준이 다양한 특징을 보이고 있다. 1996년 수문/수질 계측망이 구성되었을 때는 HP#2, HP#5, HP#6, HP#7, HP#12, HP#14의 6개 소유역으로 구분되어 있었으나, 1998년부터 유역말단의 HP#1을 추가하여 총 7개의 소유역으로 구분되었다. 1998년 추가된 수문/수질 관측망으로는 저수지 관개량을 측정하기 위해 HP#4, HP#11, HP#13지점이 추가되었으며, 논에서의 관개회귀수 모니터링을 위하여 HP#3, HP#8, HP#9, HP#10, HP#11의 4개지점을 추가하여 설치하였다. 또한, 관개시기의 지하수의 수위와 수질변화를 고찰하기 위해 GW#1, GW#2, GW#3의 지하수 관측공이 추가로 설치되었다.

발안저수지 유역의 소유역 구분과 소유역별 수문관측지점의 위치는 (그림 3-1), (그림 3-2)에서 보는 바와 같다.

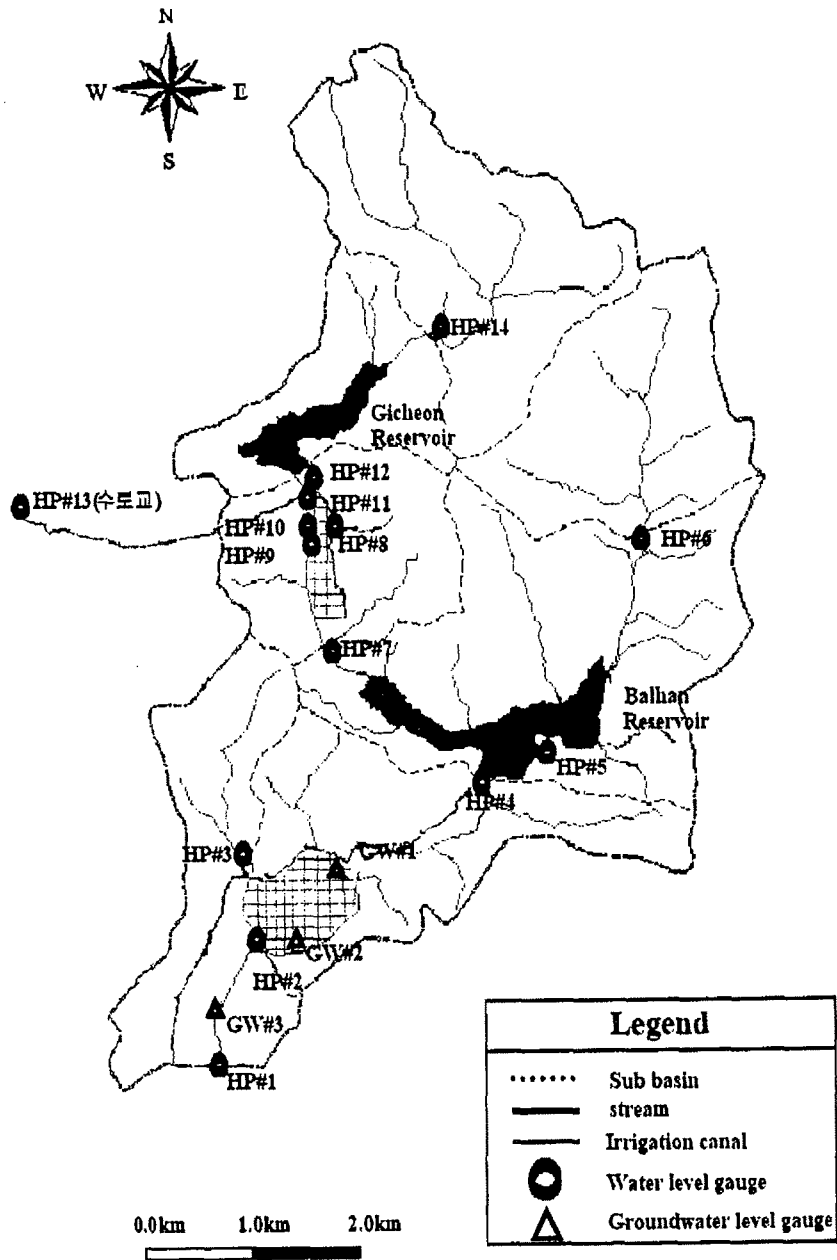
(그림 3-1)은 1996년 수문계측망을 설치하였을 때의 관측지점 번호와 소유역 경계를 나타내고 있다. 1996년에는 HS#1, HS#2, HS#3, HS#4, HS#5, HS#6 등의 6개 소유역으로 구분하였으며, 수질의 정성적인 관측을 위하여 수문계측지점 이외에 HQ#1, HQ#2, HQ#3의 3개 지점을 대상으로 수질측정을 실시하였다.

(그림 3-2) 1998년부터 수문계측망을 재정비하여 토지이용, 유역특성에 따라 7개의 소유역으로 구분하였으며, 각각의 소유역별 특징을 살펴보면 다음과 같다. HP#6 소유역은 발안저수지 상류에 위치하고 있으며, 도로를 중심으로 식당이나 상점이 들어서 있어 도시화가 진행중이며, HP#14 소유역은 기천저수지 상류에 위치하고 있으며, 축산농가가 비교적 많으며 최근 공장이 신축되고 있다. HP#12 소유역은 관개면적 270.7ha, 최대저수용량 2,247 천 톤의 기천저수지를 포함하고 있다. HP#5 소유역은 관개면적 497.6ha, 최대저수용량 4,134 천 톤의 발안저수지를 포함하

고 있다. HP#7 소유역은 기천저수지 하류부에 위치하고 있는 동시에 발안저수지 상류부에 위치하고 있으며, 기천저수지 관개지구를 포함하고 있다. HP#2 소유역은 발안저수지 하류부에 위치하고 있으며, 발안저수지 관개지구를 포함하고 있다. HP#1 소유역의 경우 1998년 이후 수위계가 설치된 지구로 유역의 말단에 위치하고 있으며, 관개회귀수의 영향이 나타나는 소유역이다.



(그림 3-1) 시험유역의 모니터링 개요도 (1996-1997)



(그림 3-2) 시험유역의 모니터링 개요도 (1998-2000)

2. 유역특성인자 조사

유역의 특성을 나타내는 인자로는 유역 면적, 유역평균경사, 유역의 방향성, 유역표고 등과 유역 형상 등이 있다. 또한, 유역내 하천의 특성을 나타내는 인자로는 유로장, 하폭, 하상경사, 하천밑도, 하상계수, 하천차수 등의 인자가 있다.

이들 유역특성인자와 하천특성인자의 조사는 지형도와 현지답사, 측량성과, 지리

정보시스템 등을 이용하였다. 본 연구에서는 각 소유역별로 유역면적, 형상계수, 유로장, 최대기복량, 기복량비, 하천평균경사, 하천빈도 등을 조사하였으며, 그 결과는 <표 3-1>에서 보는 바와 같다.

<표 3-1> 소유역별 유역특성인자

구분	1996년 구분	면적 (ha)	형상계수	유로장 (km)	최대 기복량 (m)	기복량비	하천 평균경사 (m/m)	하천빈도 (개/km ²)
HP#2	HS#1	2648.80	0.1280	14.40	316	0.0220	0.0076	0.8683
HP#5	HS#2	2162.50	4.6584	11.45	236	0.0240	0.0092	1.5722
HP#6	HS#3	412.50	1.5620	1.63	246	0.0895	0.0178	0.9697
HP#7	HS#4	1068.75	2.2724	6.95	246	0.0354	0.0127	2.3392
HP#12	HS#5	756.25	1.0124	5.38	266	0.0495	0.0127	1.4545
HP#14	HS#6	506.25	0.5184	3.13	266	0.0832	0.0218	1.9753

1998년부터 수문관측이 실시된 HP#1 소유역을 제외한 나머지 6개의 소유역별 유역특성인자를 살펴보면, 유역면적은 HP#6 소유역이 412.5ha로 가장 작았으며 HP#2 소유역이 2648.8ha로 가장 큰 값을 보였다.

유역 형상계수는 유역의 형상을 나타내는 무차원수로 유역면적을 본류의 유로장에 나눈값으로 정의된다. 따라서 유역의 형상계수가 크면 길이에 비하여 폭이 넓은 유역을 의미하고, 형상계수가 작으면 좁고 긴 유역의 형상을 갖는다. 정사각형 유역에서 유역 형상계수는 1.0 정도이며, 원형유역은 0.8 정도이고, 방사상 유역은 0.1 정도가 된다. 각 유역별 유역형상계수는 <표 3-1>에서와 같이 HP#5가 4.6584로 가장 크고, HP#2가 0.128로 가장 작았다. 그런데 HP#2, HP#14를 제외한 대부분의 유역에서 형상계수의 값이 1.0 이상의 값을 나타내고 있어 유역의 폭이 길이보다 큰 형상 (보통 우상유역이라 함)을 보이고 있다.

유역의 최대 기복량은 HP#2에서 316m로 가장 큰 값을 보였으며, 대부분 230~260m 범위의 값을 보여, 표고 차이가 비교적 커서 경사가 심한 것을 알 수 있었다.

유역의 기복량비는 최대기복량과 유로장의 비를 나타내는 것으로 소위 유역평균 경사를 나타내는 값의 하나이다. <표 3-1>에서는 각 유역별 기복량비를 보여주며, 0.02~0.09의 범위로서 비교적 경사가 심한 상태를 보여주었다.

하천의 평균경사 (하천의 두점간의 표고차를 거리로 나눈 값)는 <표 3-1>에서와 같이 0.008~0.02의 범위로서 기복량비보다 경사는 작으나, 대체적으로 경사가 급한 상태였다.

하천밀도는 유역내의 지류의 많고 적음을 수량으로 나타내는 것으로 본류와 지류를 포함한 전체 하천의 총길이를 유역 면적으로 나눈 값으로 정의한다. 또한, 하천 빈도는 유역내의 하천의 총수를 면적으로 나눈 값으로 정의하며, HP#2에서 0.8683으로 가장 작은 값을 보이며, HP#7에서 2.3392로 가장 큰 값을 보이고 있다.

제 3 절 유역의 토양과 토지이용조사

1. 토양조사

유역의 토양특성은 강우로 인한 유출과정에 직접적인 영향을 미친다. 즉, 토양의 성질에 따라 투수능이 상이하므로 총우량중 직접유출로 유하하는 유효우량의 크기도 다를 수 밖에 없다. 그런데 토양의 성질을 양적으로 표시하기가 어려우므로 미국의 토양보전국에서는 토양의 투수능을 기준으로 <표 3-2>와 같이 4개의 토양군으로 분류하였다.

<표 3-2>에서 토양의 배수특성에 따라, 토양군을 A, B, C, D의 4개 군으로 구분하였고, 토양의 침투능의 크기는 A, B, C, D 순이며 유출율은 이의 역순이다.

<표 3-3>에서는 수문학적 토양군의 분류기준을 보여주고 있다. 배수가 양호한 수문학적 토양군 A에는 Fba, Fbb, Afc, Lta 등의 토양이 포함되고, 배수가 대체로 양호한 토양군 B에는 Afa, Apb, Apc, Apg 등의 토양이 포함된다. 또한, 배수가 대체로 불량한 토양군 C에는 Fma, Fmb, Fmc, Fmk 등의 토양이 포함되며, 배수가

불량한 토양군 D에는 Fta, Fmd, Fml, Lf, Ro 등의 토양이 포함된다.

<표 3-2> 수문학적 토양군의 분류

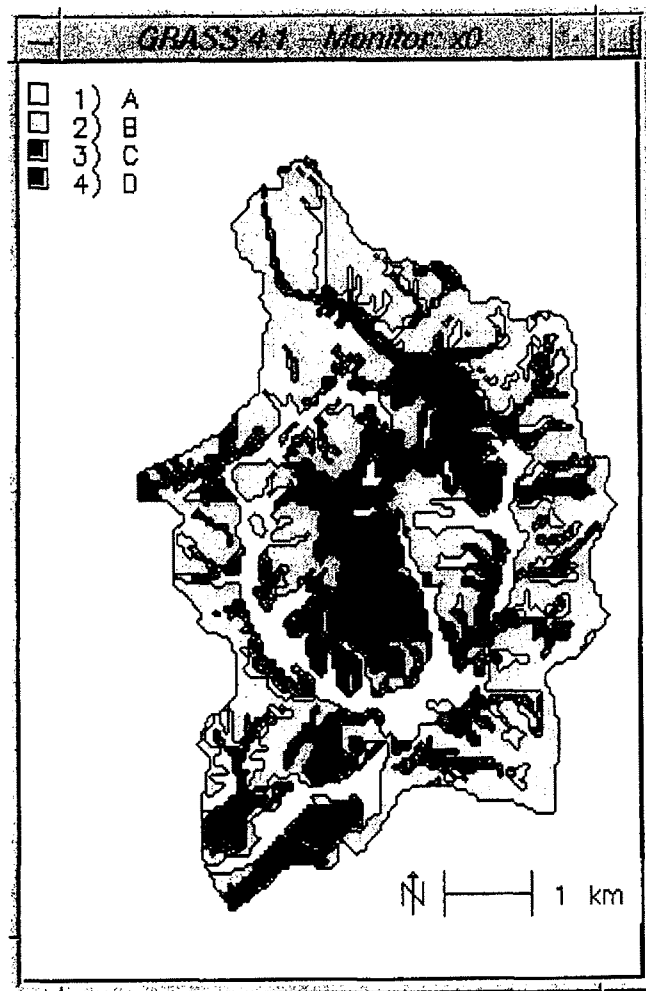
토양군	토양의 성질
A	낮은 유출율, 침투율이 대단히 크며 자갈이 있는 부양질, 배수 매우 양호
B	침투율이 대체로 크고 돌 및 자갈이 섞인 사질토, 배수 대체로 양호
C	침투율이 대체로 작고, 대체로 세사질 토양층, 배수 대체로 불량
D	높은 유출율, 침투율이 대단히 작고, 점토질 종류의 토양으로 거의 불투성, 배수 대단히 불량

<표 3-3> 수문학적 토양군 분류기준

토양군	토 양 명
A	Fba, Fbb, Afc, Lta, Ltb, Rea, Rsa, Mab, Mac, Mja, Mla, Mlb, Mma, Mmb, Msa, Msb, Mub, Mva, Mvb
B	Afa, Apb, Apc, Apg, Anb, Anc, And, Lpa, Lpb, Raa, Rab, Rac, Rad, Rea, Rlb, Rsb, Rsc, Rva, Rvb, Rvc, Rvd, Maa, Mua
C	Fma, Fmb, Fmc, Fmk, Afb, Apa, Apd, Ana, Rxa
D	Fta, Fmd, Fml, Lf, Ro

유역의 토양조사는 1/25,000 정밀토양도와 1/50,000 개략토양도를 이용하여 소유역별 토양분류를 실시하고, 그 배수특성의 속성에 따라 수문학적 토양군으로 분류하였다. (그림 3-3)은 대상 유역의 토양군의 분류상태를 보여준다. 이를 면적 구성비로 표시하면 <표 3-4>에서와 같았다. <표 3-4>에서와 같이 발안지 유역(HP#2)는 A, B 군이 각각 55%, 22% 등으로 전체의 약 77%에 달하였으며, 최상류지점인 HP#14에서는 A, B군이 각각 61%, 35%로 대부분 A, B군의 비중이 높은

데, 이는 논 면적이 상대적으로 많은 까닭이다.



(그림 3-3) 유역의 토양군 분류도

<표 3-4> 소유역별 수문학적 토양군 분류

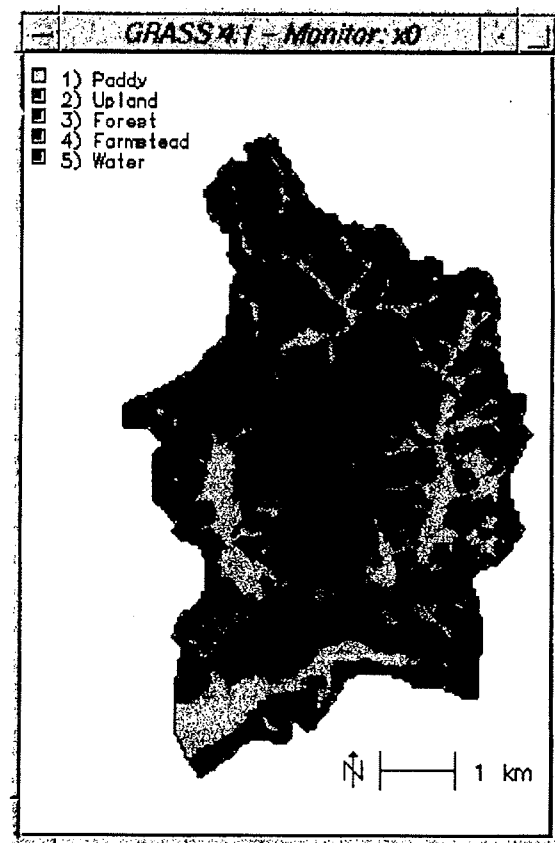
소유역	수문학적 토양군 (%)			
	A	B	C	D
HP#2	54.6	21.5	20.8	3.1
HP#5	35.7	21.3	40.3	2.7
HP#6	49.7	14.6	31.8	3.9
HP#7	49.6	18.6	26.5	5.3
HP#12	51.0	47.1	0.0	2.0
HP#14	61.0	34.9	0.0	4.0

2. 토지이용조사

유역의 토지이용상태를 토지이용도와 행정조사 결과를 이용하여, 산림, 논, 밭, 대지, 기타 등으로 구분하였으며, (그림 3-4)는 지리정보시스템을 이용하여 토지이용을 구분한 결과를 보여주고 있다.

소유역별 토지이용조사 결과는 <표 3-5>에서 보는 바와 같다. <표 3-5>에서 소유역별 토지이용 현황은 HP#2 소유역의 경우 산림 63%, 논 23%로 논의 비중이 높아 전체적으로 평탄지의 특징을 나타내고 있으며, HP#6의 경우는 논, 밭의 면적이 각각 26.3%, 9.6%로 논밭의 면적이 상대적으로 큰 것으로 조사되었다. HP#14의 경우는 유역의 최상류 부분으로 산림지의 구성비가 79%로 산간지에 가까운 토지이용 구조를 보였다.

이상과 같이, 대상유역내의 소유역은 토지이용 측면에서는 산간지, 중산간지, 경지, 취락지 등 다양한 분포를 나타내고 있으며, 각각의 소유역별 농업생태환경의 조사는 토지이용형태에 따른 특징을 반영할 수 있도록 구성하였다.



(그림 3-4) 유역의 토지이용상태

<표 3-5> 소유역별 토지이용상태

소유역	토지이용상태 (%)			
	논	밭	산림	기타
HP#2	23.0	4.5	63.3	9.2
HP#5	20.2	3.7	66.9	9.3
HP#6	26.3	9.6	58.1	6.1
HP#7	14.9	2.2	75.0	8.0
HP#12	13.7	1.7	75.9	8.6
HP#14	16.2	1.2	78.7	3.9

제 4 절 수문 계측망의 구성과 수문 조사 방법

1. 수문 계측망의 구성

본 연구에서 유역수문 모니터링은 대상 유역의 수문특성을 구명하기 위해 수문 자료를 조사 분석하며, 수질조사분석을 통해 유역의 오염 부하량을 구하고, 그 결과와 유역의 특성 및 인위적 인자들과의 관계를 파악하여, 농업 유역의 비점오염의 추정과 그 정량적 분석, 농업생태환경과의 관계를 구명하기 위한 것이다.

따라서, (그림 3-2)에서와 같이 대상 유역인 발안저수지 유역을 토지이용상태 등을 기준으로 6개의 소유역으로 분할하고, 각각에 대한 수문자료를 조사함으로써, 유역 특성에 따른 강우-유출관계의 영향을 파악하며, 비점오염 부하량의 조사를 통해 그들의 상호관계를 파악할 수 있도록 구성하였다.

이상과 같은 기본 방향에 맞추어, 유역의 상하류를 상호 연결하는 방식, 즉, 계측망을 구성하고, 그 수문특성을 조사하도록 함으로써, 각 측정별로 강우-유출관계의 구명과 함께, 유역의 형상이나 지상인자, 그리고 유역내의 도시화, 영농방법 등에 따른 수문 특성의 차이를 비교할 수 있도록 구성한 것이다.

(그림 3-2)의 각 수문측점이 대표하는 유역 특징의 상호 관계와 그 배경을 정리

하면 다음과 같다.

가. 산간지, 중산간지 유역 수문 모니터링

HP#14지점 (상기교 지점)은 산림지의 비율이 높고, 유역내의 취락지 분포도가 낮은 소위 중산간지 혹은 산간지 유역으로서, 이 지점에서의 강우-유출관계는 주로 이들 산림지 수문특성에 의해 지배된다고 볼 수 있다. HP#12 지점 (기천저수지 지점)인 기천지의 경우도 산림지의 구성비가 높은 지역이며, 이 지점에서의 수문특성은 HP#14의 유역면적이 전체의 약 67%를 차지하므로 대부분의 유입량이 이 유역으로부터 유입되는 것을 의미한다. 따라서 HP#12와 HP#14의 수문자료간의 비교를 통해 기천저수지 인접지역의 여타 유역의 수문특성을 파악할 수 있도록 한다.

나. 관개 회수수 유역 수문 모니터링

HP#7(기천교 지점)은 기천저수지 유역으로부터의 유입량과 함께, 인접 배후지와 농경지 등으로부터 유입되는 유량의 변화를 측정하기 위한 지점이다. HP#7의 유역면적 1,068ha중 기천지 유역이 756ha로 약 71%를 차지하며, 그 밖의 면적인 29%중 상당부분이 농경지로 구성되어 있다. 기천지로부터 관개수의 회수수의 대부분은 기천교 지점 상류구간에 회수되므로, 결국 HP#7지점의 수문은 관개회수수의 영향이 크게된다. 따라서 이 지점의 수문자료는 관개 회수수의 영향을 파악하는데 이용될 수 있다.

그밖에도 HP#2 (구장교 지점)의 경우도 발안지 물리구역을 포함하여, 발안지 하류구간의 관개 회수수의 영향을 받는 지역으로 계획되었다.

HP#5 (발안지 지점)에서는 기천지 하류에 위치하고, HP#6지점으로부터 유입되는 유역과 HP#7지점을 통한 유입량이 집수되며, 관개수 도수 외에도 생공용수가 채수되고 있는 상황이다. 따라서, 발안지 지점의 수문자료는 상류 저수지의 월류량과 관개 회수수, 도시 유역으로부터의 유입수 등과 관개수 채수 상황 등을 파악할 수 있도록 계획되었다.

HP#1 (지월교 지점)은 1998년부터 추가로 설치되어 운영되고 있으며, 관개 회수수의 영향을 받는 지역으로 계획되었다.

관개기간동안의 지하수위의 변동을 고찰하기 위해 1998년부터 HP#2 소유역내에

GW#1, GW#2의 지하수위 측정용, HP#1 소유역내에 GW#3 지하수위 측정용 설치하여 운영하고 있다.

다. 도시화 유역 수문 모니터링

(당하교)지점은 산림지가 상대적으로 작고, 논, 밭의 구성비가 높은 평탄지로 도로를 중심으로 도시화가 진행중인 지역이다. 이와 같은 유역 특성으로 해서, 당하교 지점은 생활오수의 방류량이 많고, 도시화로 인한 수질 오염이 상대적으로 심한 특징을 보인다. 따라서, HP#6 지점은 이와 같은 평탄지와 농촌지역의 도시화, 교통 등으로 인한 수문과 수질 영향 등을 파악할 수 있도록 설치된 수문측점이다.

라. 관개수와 포장 수문 모니터링

HP#12 (기천지 지점), HP#5 (발안지 지점)에서는 각각 기천지와 발안지에서의 저수위 변화를 측정할 수 있으므로, 각 저수지의 관개수량을 조사하는 데 활용하도록 계획하였다. 1998년부터 저수지에서의 관개량을 측정하기 위하여 기천저수지 관개수로에 HP#11, HP#13 (수로교 지점)를, 발안저수지 관개수로에 HP#4 지점을 설치하여 운영하고 있다.

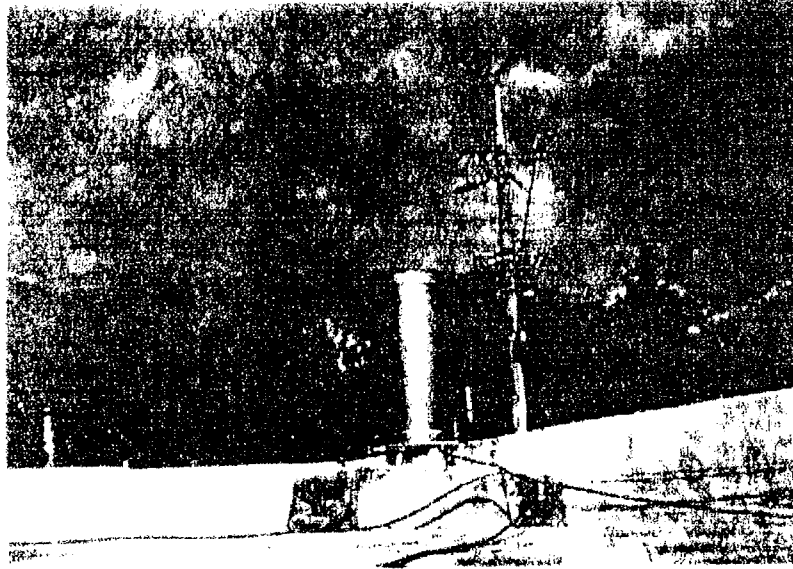
또한, 유역하류의 2개 지역에서 관개구획내 포장 담수심 조사를 통해 실제 논에서 관개수를 조사할 수 있도록 하였다.

2. 수문측점의 선정과 설치

발안저수지 유역의 수문조사는 유역의 기상, 강수량, 하천 수위와 유량, 저수위와 저수량, 관개량, 논·밭의 담수심 등의 조사로 구성하였다.

가. 기상과 강수량

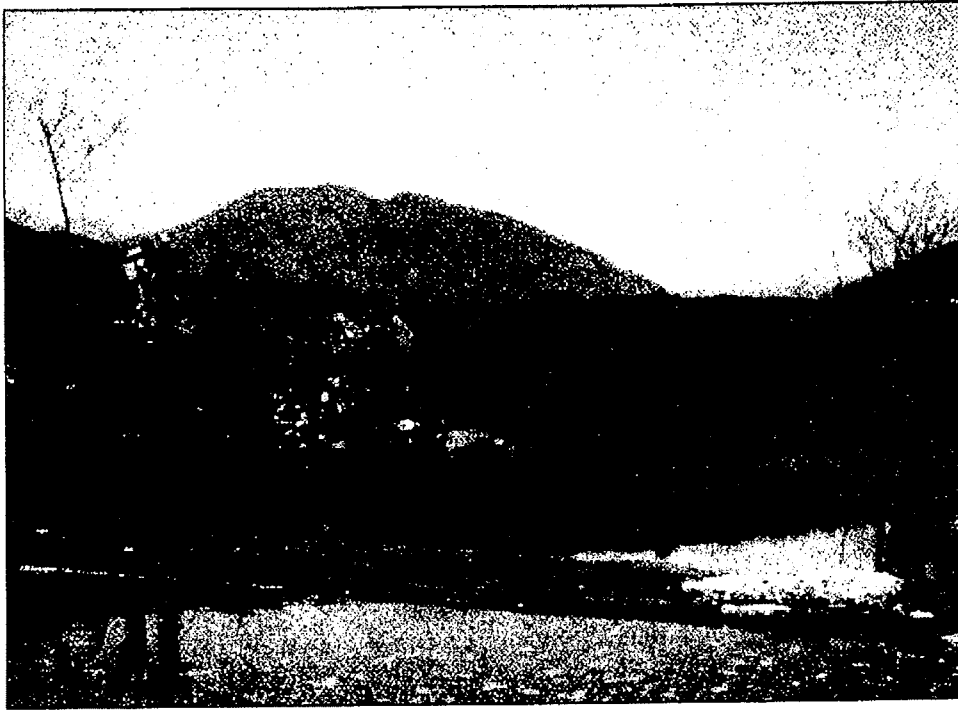
기상자료와 강우자료는 발안지 유역으로부터 약 10km에 위치한 수원기상대의 자료를 이용하였다. 발안저수지 유역과 수원측후소의 공간적 차이를 고려하여 1996년부터 1997년까지 발안저수지 유역내의 봉담면사무소에 설치된 강우계로부터 시강우량 자료를 수집하였으며, 1998년부터 발안저수지 유역내의 팔탄면사무소 옥상에 디지털 강우계를 설치하여 운영하고 있으며, (그림 3-5)는 강우계의 현장설치 광경을 보여주고 있다.



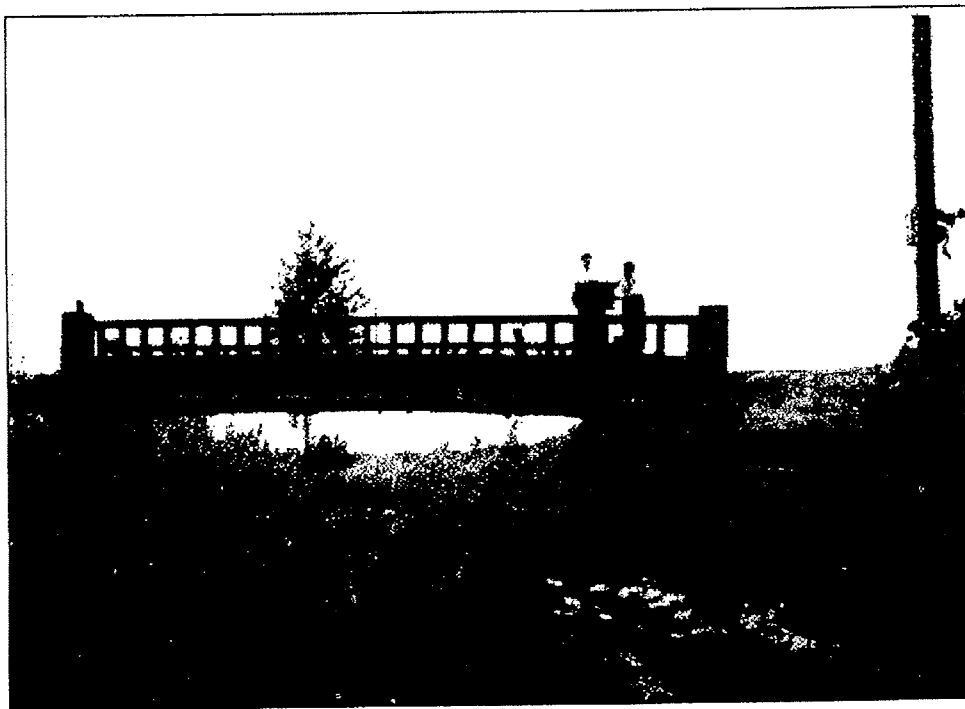
(그림 3-5) 유역내 강우계 설치

나. 하천 수위와 유량

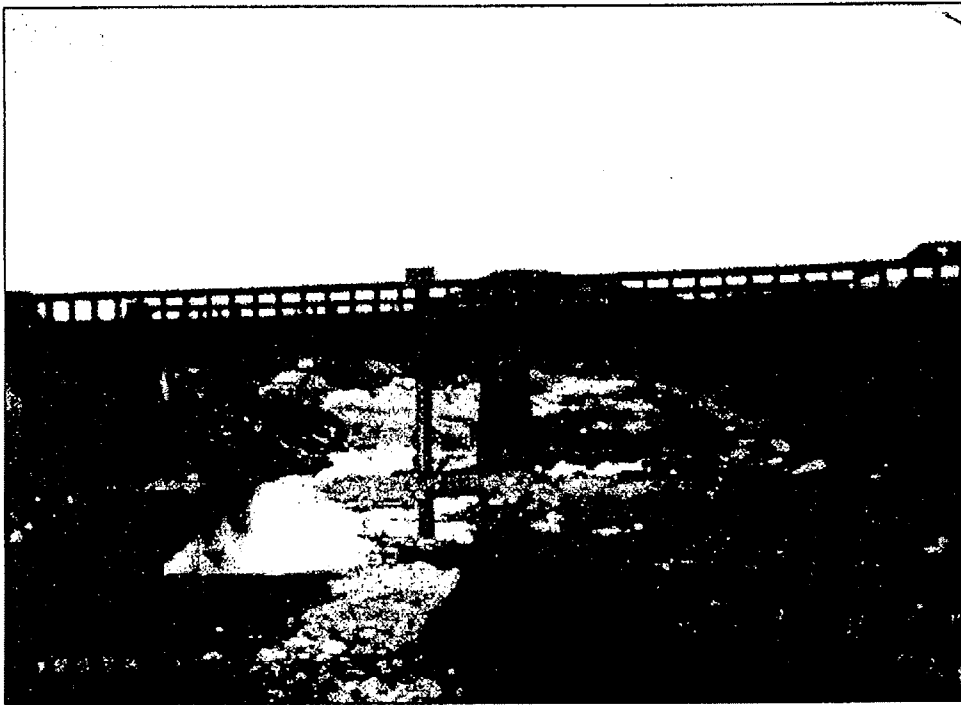
하천 수위는 HP#1, HP#2, HP#6, HP#7, HP#8, HP#14 등 6개 지점에서 수위표와 수위계를 이용하여 측정하며, 그 지점의 수위-유량관계를 조사하여, 이로부터 유량자료를 수집하였다. 1996년 수위계 설치 당시에는 HP#2, HP#6, HP#7, HP#14 등의 4개 지점에 자기수위계를 설치하여 운영하였으며, (그림 3-6) ~ (그림 3-9)는 측정별 자기수위계 전경을 보여주고 있다.



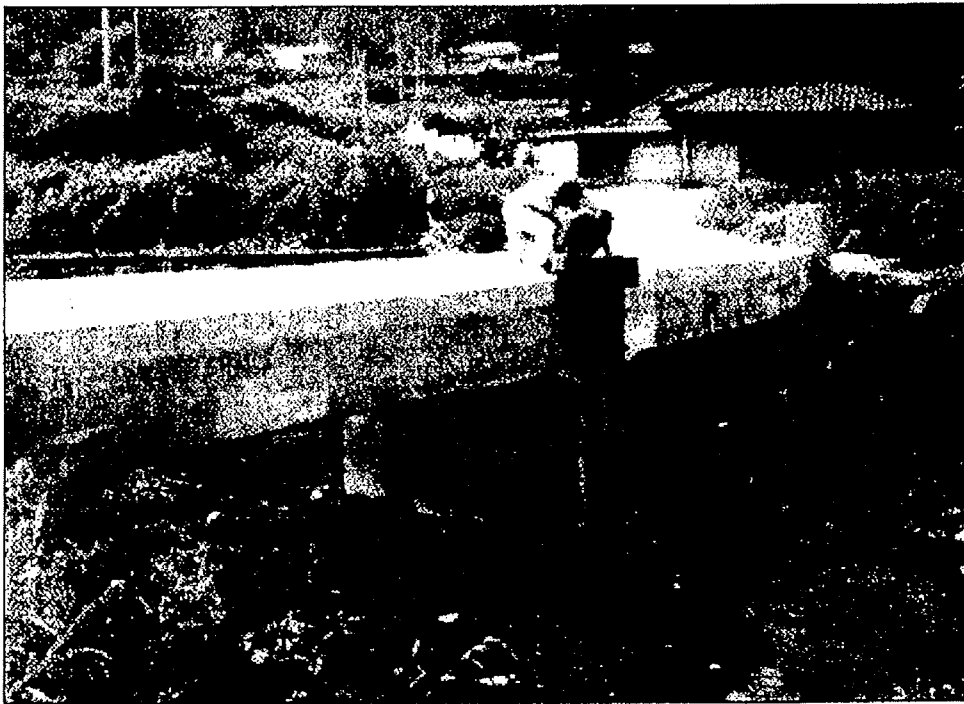
(그림 3-6) HP#2 수위관측소 전경



(그림 3-7) HP#6 수위관측소 전경



(그림 3-8) HP#7 수위관측소 전경



(그림 3-9) HP#14 수위관측소 전경

본 연구에 사용된 자기수위계는 부유형 (floating type)으로, 수위의 변화에 따라 부표의 시간별 위치변동을 자기 기록지에 도시하도록 하는 것이다. 측점의 선정은 일반적인 하천 수위측점의 선정 요령 등을 참고하여, 가급적 유로의 급변이 없는 구간 중에서 접근이 용이한 지점을 선정하였다. 한편, 각각의 수위측점 지점에는 자기수위계 이외에 별도의 수위표를 설치하여 목측을 통해 수위를 조사하도록 하였다. 이와 같은 수위계는 자기 수위계의 자료 보완과 오차의 검측을 실시하는 이외에도, 동절기 결빙으로 자기수위계의 이용에 어려움이 있을 때에 수위측정에 활용하도록 하였다.

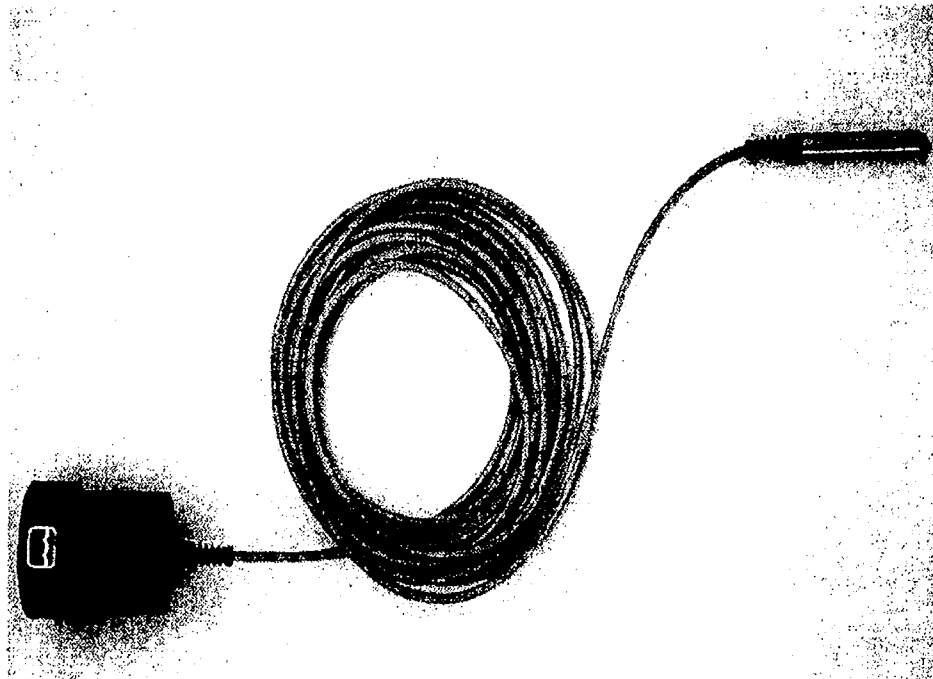
1998년 관개회귀수의 모니터링을 위하여 HP#1 지점이 추가로 설치되었으며, 산림 지에서의 유출특성을 측정하기 위해 HP#8 지점이 추가로 설치되었다. 또한, 기존의 HP#6, HP#7, HP#14 측점에 설치하였던 자기수위계는 1998년 대홍수로 유실되었다. (그림 3-10)는 1998년 홍수로 유실된 수위계의 전경을 보여주고 있다.



(그림 3-10) 수위탑 유실 광경 (HP#7)

유실된 수위측점 지점에는 압력식 수위계를 이용하여 수문관측지점을 재설치하였으며, (그림 3-11)에서는 수위측정에 이용된 압력식 수위계를 보여주고 있다. 압력식 수위계는 Global Water사에서 만든 WL-14 Global Water Level Logger를 이용

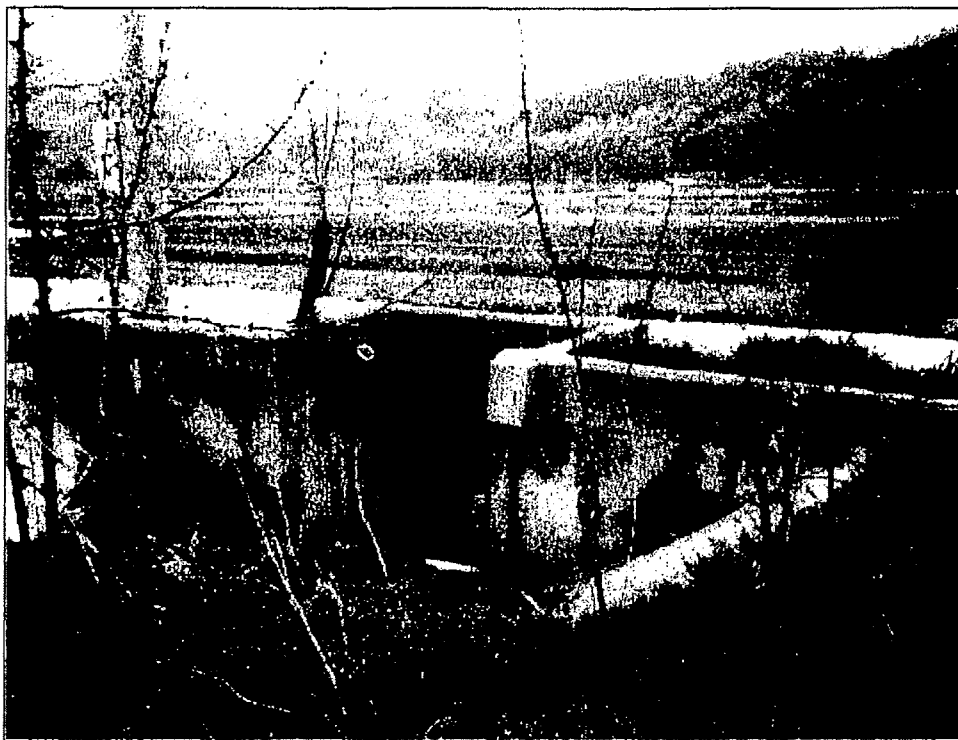
하였다. (그림 3-12)~(그림 3-14)는 하천에 압력식 수위계가 설치된 전경을 보여주고 있다.



(그림 3-11) 압력식 수위계 (WL-14)



(그림 3-12) HP#1 수위관측소 전경



(그림 3-13) HP#8 수위관측소 전경

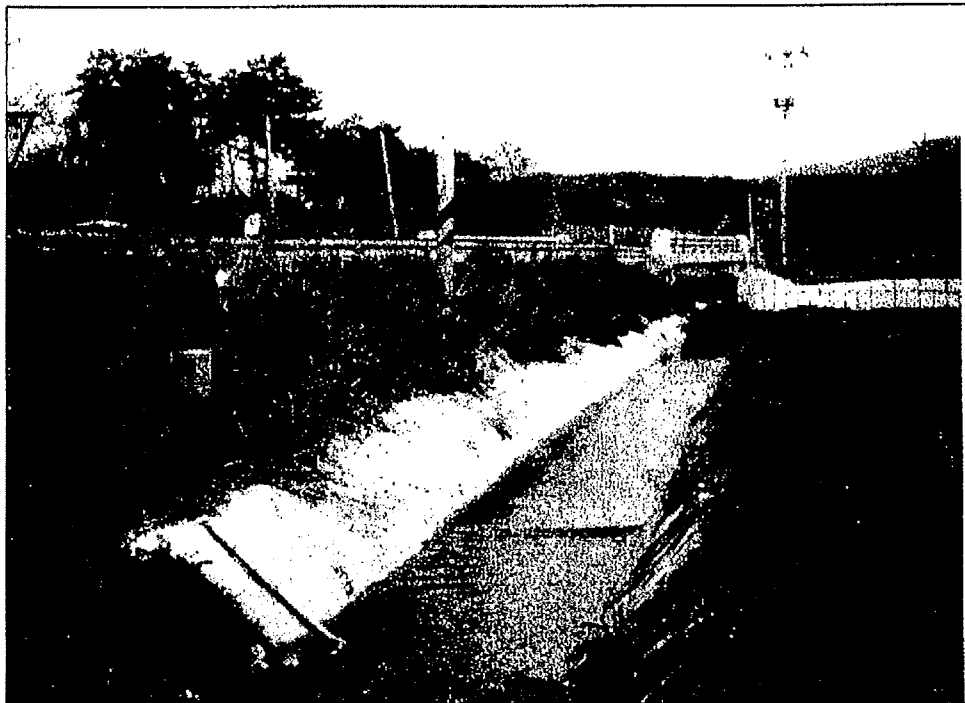


(그림 3-14) HP#7 압력식 수위계 재설치 광경

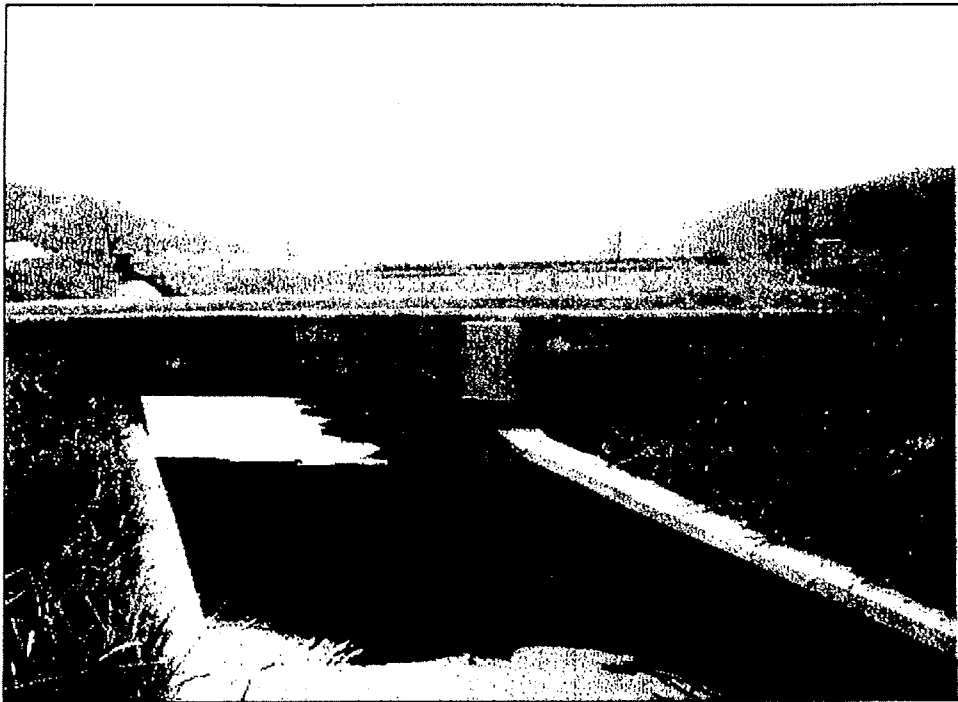
다. 저수위와 관개량

기천지와 발안지의 저수위는 HP#5, HP#12 지점의 수위표를 활용하여 측정하고, 발안지의 경우는 시간별 수위자료를 조사하였다. 저수량 자료는 각 저수지별로 수위-내용적 관계로부터 수집하였다.

관개량은 기천, 발안저수지의 방류량 자료를 수집·분석하였으며, 또한 1998년부터 HP#4, HP#11, HP#13 지점을 설치하여 관개량을 측정하였다. (그림 3-15) ~ (그림 3-17)은 관개량을 측정하기 위해 설치된 HP#4, HP#11, HP#13 수위관측소 전경을 보여주고 있다. HP#4 지점은 발안저수지 하단에, HP#11 지점은 기천저수지 하단에, HP#13 지점은 기천저수지 하단의 수로교에 위치하고 있다.



(그림 3-14) HP#4 수위관측소 전경



(그림 3-16) HP#11 수위관측소 전경



(그림 3-17) HP#13 수위관측소 전경

라. 지하수위

관개지구의 지하수위 변화를 고찰하기 위해 GW#1, GW#2, GW#3 지점을 1998년부터 설치하여 운영하고 있으며, (그림 3-18)~(그림 3-20)은 설치된 지하수 관측 지점의 전경을 보여주고 있다.



(그림 3-18) GW#1 지하수측점 전경



(그림 3-19) GW#2 지하수측점 전경



(그림 3-20) GW#3 지하수측점 전경

마. 논·논의 담수심과 포장관개량, 배수량

논의 담수심 조사는 현장 포장구역내 개별 포장에서의 담수심을 조사하였다. 담수심의 조사는 1996년 실시되었으며, (그림 3-21)은 시험포장의 전경을 보여주고 있으며, (그림 3-22)는 담수심 및 물고높이 측정광경을 보여주고 있다.



(그림 3-21) 시험포장 관측지점 전경

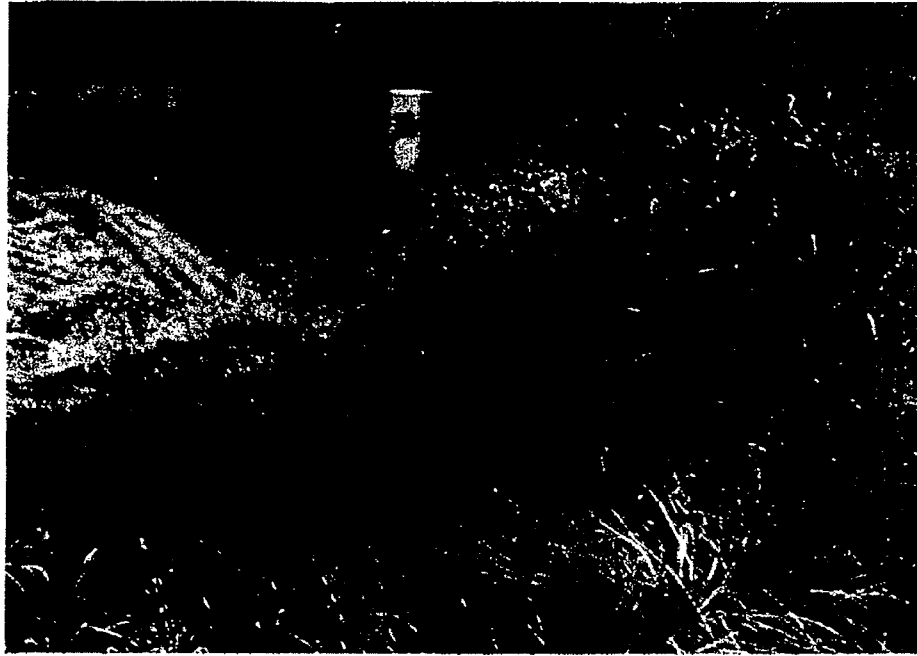


(그림 3-22) 담수심 및 물고높이 측정광경

또한, 포장단위에서의 물수지를 조사하기 위해 발안저수지 유역내에 있는 시험포장의 관개량과 배수량을 측정하였으며, 이를 위해 1998년부터 HP#9, HP#10의 수위관측지점을 설치하여 운영하고 있다. (그림 3-23), (그림 3-24)는 설치된 수위관측지점의 전경을 보여주고 있다.



(그림 3-23) HP#9 수위관측소 전경



(그림 3-24) HP#10 수위관측소 전경

제 5 절 기상 모니터링 결과

1. 기상자료

수원측후소의 기상자료로부터 1996년부터 2000년까지의 평균기온, 강수량, 월강우일수, 상대습도, 증발량, 풍속 등의 자료를 조사하였으며, 조사결과는 <표 3-6>, <표 3-10>에 나타난 바와 같다. 월평균 기온은 2000년 7월 26.9℃로 가장 높았으며, 1997년 1월 -3.2℃로 가장 낮았다. 강우일수는 1996년 106일, 1997년 108일, 1998년 117일, 1999년 99일, 2000년 10월까지 98일로 나타났다. 월강수량은 1998년 8월 591.6mm로 5개년 중 최대 월강우량을 보였으며, 다음으로 2000년 8월 448.8mm의 강우를 기록했다. 증발량의 경우 1996년 764.6mm, 1997년 1222.5mm, 1998년 1102.3mm, 1999년 1227.3mm, 2000년 10월까지 1091mm인 것으로 나타나, 1999년의 증발량이 가장 큰 것으로 나타났다.

<표 3-6> 수원측후소의 월별기상 ('96. 1 ~ '96. 12)

월 별	평균기온 (℃)	강 수 량 (mm)	월 강수일수 (일)	상대습도 (%)	증 발 량 (mm)	풍 속 (10m)
1	-2.4	12.1	10	57	34.9	1.5
2	0.0	4.1	5	63	44.2	1.3
3	5.8	100.8	11	64	52.2	1.9
4	10.7	51.1	6	55	72.6	2.0
5	16.6	26.5	9	60	94.3	1.7
6	21.5	286.4	16	67	100.4	1.5
7	24.8	241.1	17	77	82.7	1.6
8	26.4	77.5	11	80	82.6	1.5
9	20.0	9.2	6	75	75.9	1.1
10	15.1	70.0	7	75	50.9	0.9
11	5.6	43.6	8	70	46.6	1.2
12	-1.6	0.0	0	69	27.3	1.2
평 균/합	11.88	922.4	106	67.67	764.6	1.45

<표 3-7> 수원측후소의 월별기상 ('97. 1 ~ '97. 12)

월 별	평균기온 (℃)	강 수 량 (mm)	월 강수일수 (일)	상대습도 (%)	증 발 량 (mm)	풍 속 (10m)
1	-3.2	1.8	1	52	42.6	1.7
2	0.3	31.3	5	57	54.3	1.7
3	5.9	31.7	6	62	81.1	1.9
4	12.0	59.4	5	57	121.2	2.0
5	16.9	269.1	17	69	124.2	1.8
6	22.8	289.9	9	68	157.7	1.5
7	25.9	181.3	10	80	144.0	1.7
8	26.6	289.6	15	78	165.1	1.9
9	20.2	25.0	8	69	131.7	1.6
10	12.9	52.3	11	61	112.0	1.8
11	8.3	82.0	10	71	51.2	1.4
12	1.5	48.7	11	69	37.4	1.6
평 균/합	12.5	1362.1	108	66.1	1222.5	1.72

<표 3-8> 수원측후소의 월별기상 ('98. 1 ~ '98. 12)

월 별	평균기온 (℃)	강수량 (mm)	월강우일수 (일)	상대습도 (%)	증발량 (mm)	풍속 (10m)
1	-1.4	23.7	12	60	36.4	1.9
2	2.6	34.3	10	61	47.6	1.9
3	6.5	44.0	3	67	95.3	2.0
4	15.2	105.9	12	73	101.4	1.8
5	18.5	86.4	9	67	143.8	1.9
6	21.6	213.7	10	73	128.6	2.1
7	25.2	306.0	17	74	143.1	2.6
8	25.6	591.6	19	76	112.5	1.9
9	23.0	141.2	8	77	107.5	1.7
10	16.7	25.0	5	75	88.1	1.6
11	6.9	51.6	9	71	58.4	1.6
12	1.4	3.5	3	70	39.6	1.3
평균/합	13.48	1,626.9	117	70.3	1102.3	1.86

<표 3-9> 수원측후소의 월별기상 ('99. 1 ~ '99. 12)

월 별	평균기온 (℃)	강수량 (mm)	월강우일수 (일)	상대습도 (%)	증발량 (mm)	풍속 (10m)
1	-1.1	7.3	5	66	46.4	1.7
2	0.4	1.8	2	67	51.1	1.9
3	6.0	54.0	6	60	92.7	1.9
4	12.8	73.6	7	67	130.9	2.1
5	16.9	121.3	7	72	147.8	1.9
6	22.4	76.7	7	75	170.0	1.7
7	25.5	345.0	15	78	151.1	2.2
8	25.9	338.4	15	78	146.5	1.9
9	22.9	402.2	11	81	99.6	1.6
10	13.9	92.3	7	76	86.5	1.3
11	7.3	25.3	9	76	60.9	1.4
12	-0.1	18.2	8	67	43.8	1.1
평균/합	12.73	1,556.1	99	71.92	1227.3	1.73

<표 3-10> 수원측후소의 월별기상 (2000. 1 ~ 2000. 10)

월별	평균기온 (℃)	강수량 (mm)	월강우일수 (일)	상대습도 (%)	증발량 (mm)	풍속 (10m)
1	-2.0	57.7	12	66	47.4	2.1
2	-2.1	1.4	6	58	47.2	1.9
3	5.6	3.1	5	57	91.4	1.7
4	11.6	20.4	8	56	133.6	1.5
5	17.5	43.7	9	68	146.4	1.3
6	23.3	118.2	10	70	148.9	1.2
7	26.9	375.8	11	75	153.2	2.0
8	25.9	448.8	20	77	133.0	2.1
9	20.1	182.2	10	72	102.2	2.0
10	14.1	21.6	7	66	87.7	1.4
평균/합	14.09	1,272.9	98	66.5	1091.0	1.72

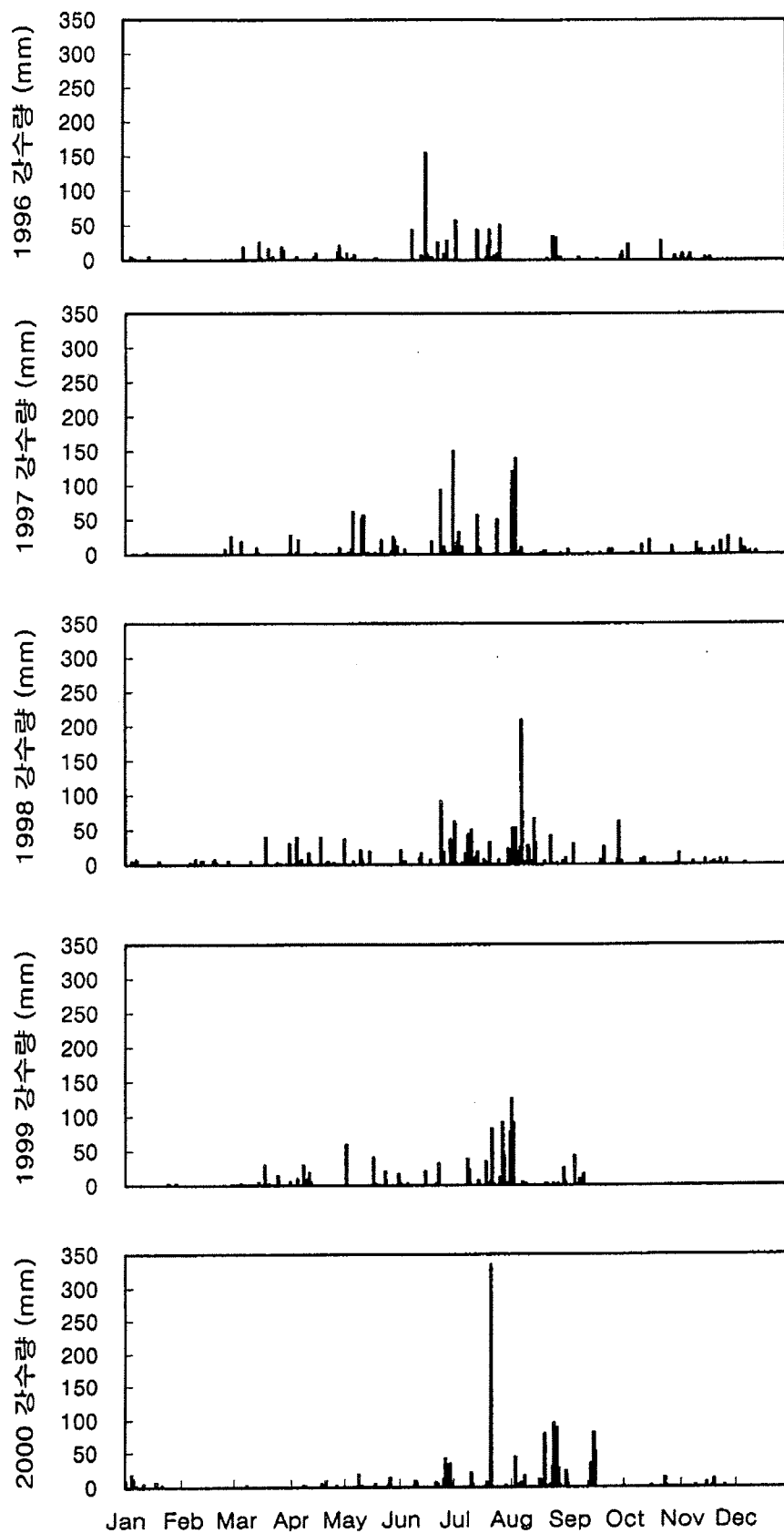
2. 일 강수량

1996년부터 2000년 10월까지의 수원측후소 일 강수량 자료를 살펴보면, 연강수량은 1996년 922.4mm, 1997년 1362.1mm, 1998년 1661.9mm, 1999년 1094.3mm, 2000년 10월까지 1300.4mm로 나타나, 1998년 가장 많은 강수량을 기록했으며, 1996년과 1999년은 상대적으로 작은 강수량을 기록했다.

일최대강수량의 경우 1996년 6월 17일 153.6mm, 1997년 6월 30일 150.4mm, 1998년 8월 7일 208.1mm, 1999년 8월 1일 125.9mm, 2000년 7월 21일 333.2mm로 2000년 7월 21일에 기록적인 최대 일강우를 나타냈다.

(그림 3-25)는 1996년부터 2000년 10월까지의 수원측후소 일강우량의 분포를 나타내고 있다. (그림 3-25)에서와 같이 1998년 6월에서 8월까지 비교적 많은 집중호우가 발생했음을 보여주고 있으며, 1996년과 1999년 강우량이 상대적으로 적음을 알 수 있다.

또한, 2000년의 경우 1월에서 6월까지의 강우는 예년에 비해 적으나, 7월의 폭우로 예년의 강우량을 회복하고 있음을 보여주고 있다.



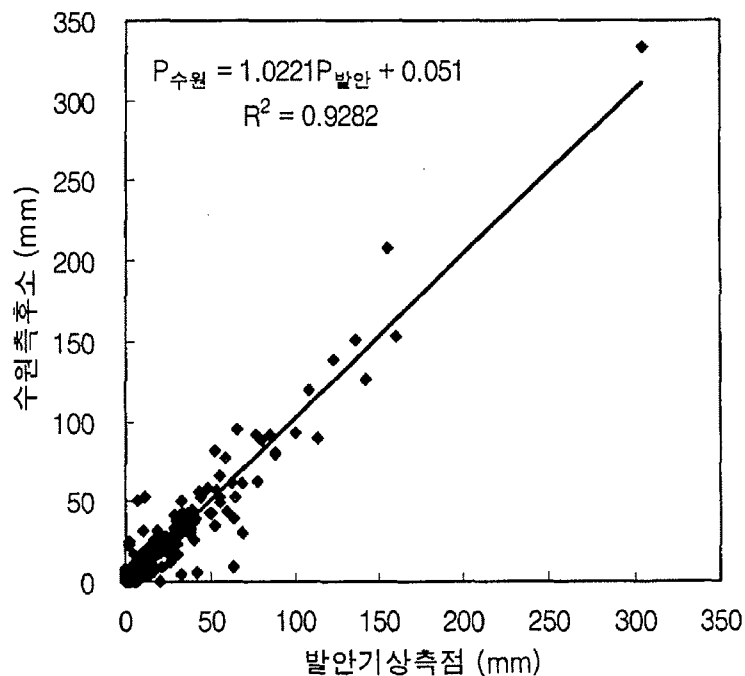
(그림 3-25) 일강수량 분포 (1996-2000년 10월)

한편, 발안저수지 유역과 수원측후소 간에는 10km의 공간적인 차이가 존재하므로 보다 정확한 강수량 자료를 얻기 위해 발안저수지 유역내에 강수측점을 설치하였으며, 이를 수원측후소 강수량자료와 비교하였다. 이는 자료의 결측시 결측구간의 자료의 보정 등에 이용될 수 있다.

발안저수지 유역의 일강수량과 수원측후소의 강수량은 높은 상관성을 보였는데, 그 비교 결과는 (그림 3-26)에서와 같다.

(그림 3-26)에서와 같이 상관계수(R^2)는 0.9282로 높은 상관성을 나타냈으며, 선형 회귀식은 다음과 같았다.

$$P_{\text{수원}} = 1.0221P_{\text{발안}} + 0.051 \quad (3-1)$$

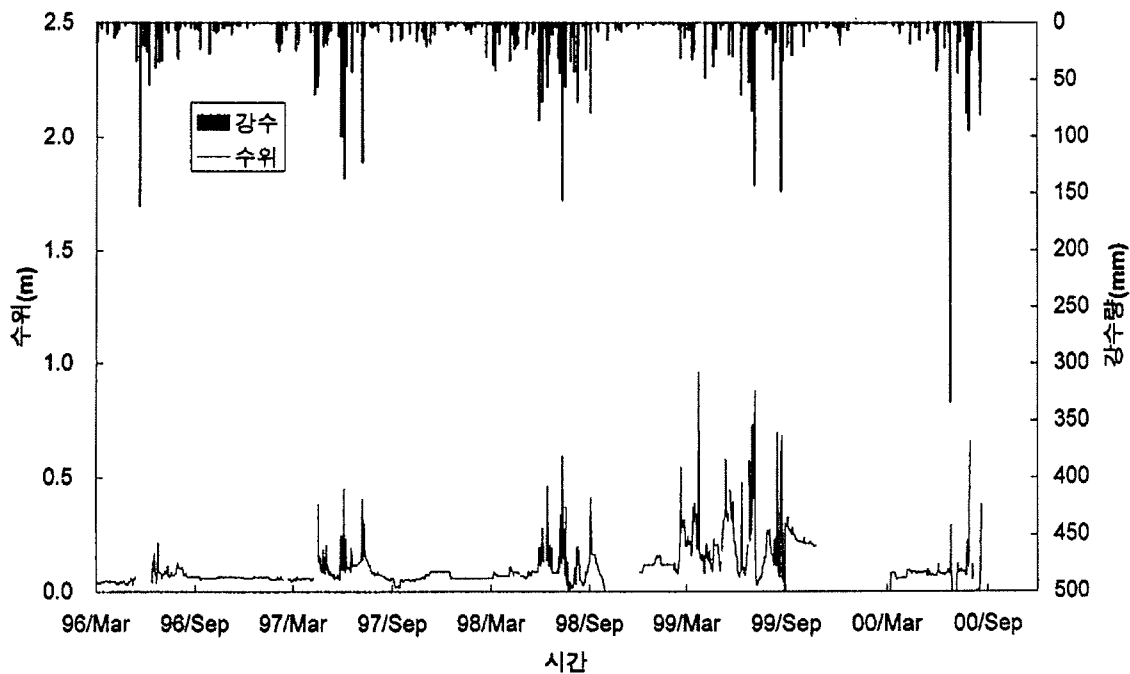


(그림 3-26) 발안유역과 수원측후소의 일강수량 관계

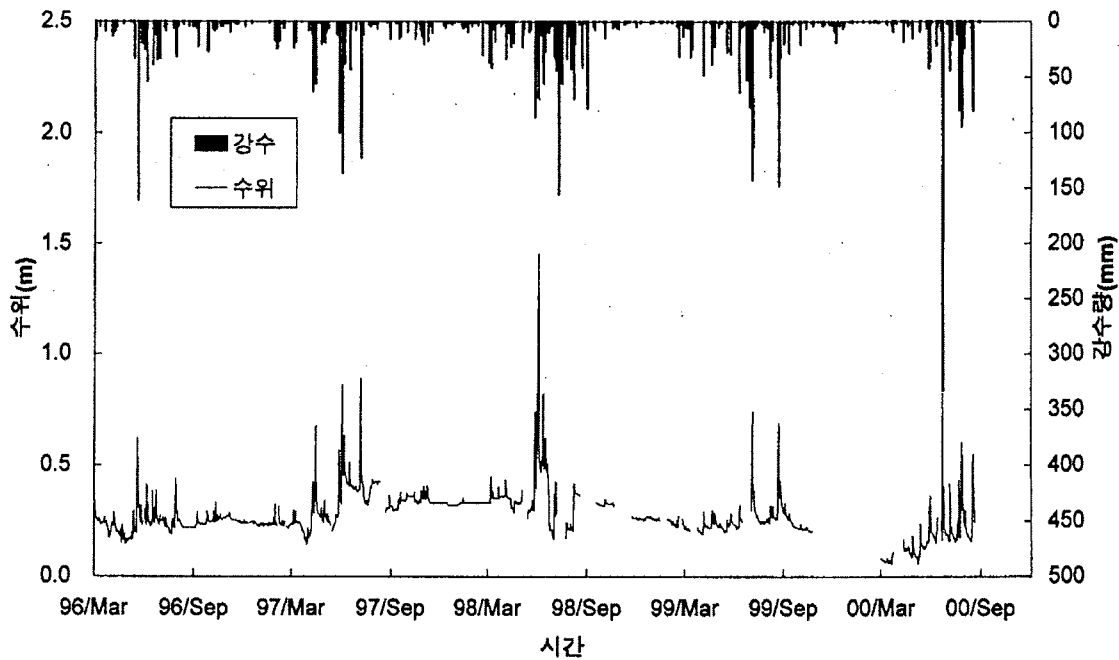
제 6 절 수문 모니터링 결과

1. 일 수위

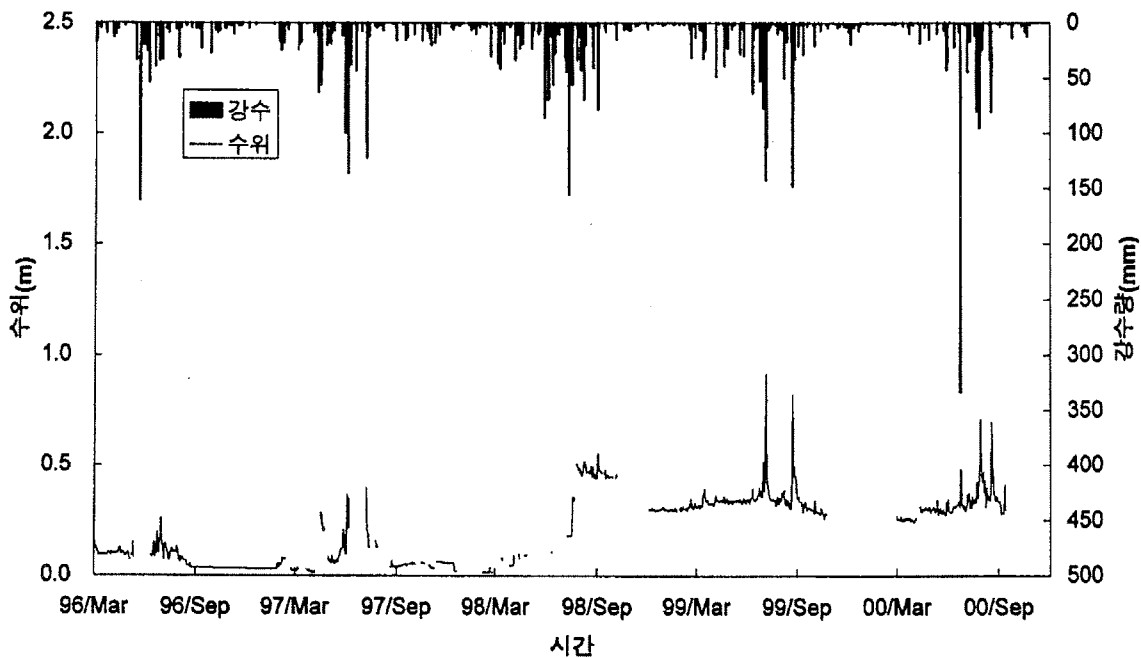
자기수위계의 경우 수위기록지로부터 읽어진 눈금값과 수위통에 부착된 표척값을 읽어 시간별 수위를 구하고, 이를 시간에 대한 가중평균을 통해 일평균수위를 구한다. 압력식 수위계의 경우 시간별로 입력된 압력값을 수위-압력 상관관계를 통해 시간별 수위로 환산한 뒤, 이를 시간에 대한 가중평균을 통해 일평균수위를 구한다. 각 측정점별 수위자료는 부록에 첨부하였으며, (그림 3-27)에서 (그림 3-29)는 1996년부터 2000년 10월까지 HP#2, HP#6, HP#7 지점의 강우-수위 관계를 나타낸 것이다.



(그림 3-27) HP#2 지점의 강우-수위 상관관계



(그림 3-28) HP#6 지점의 강우-수위 상관관계



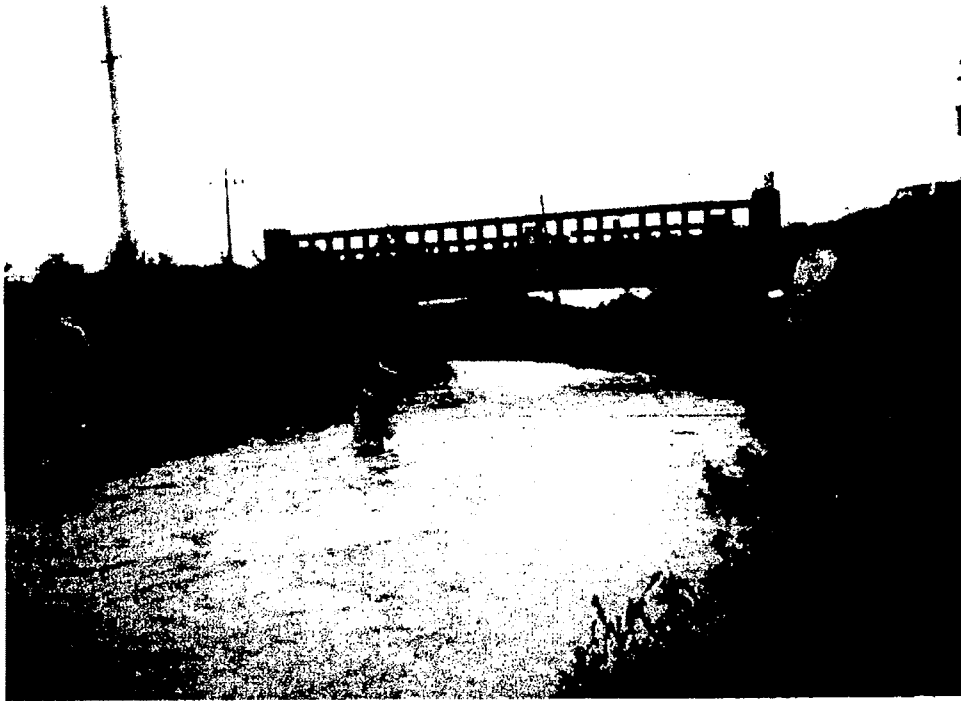
(그림 3-29) HP#7 지점의 강우-수위 상관관계

2. 수위-유량관계

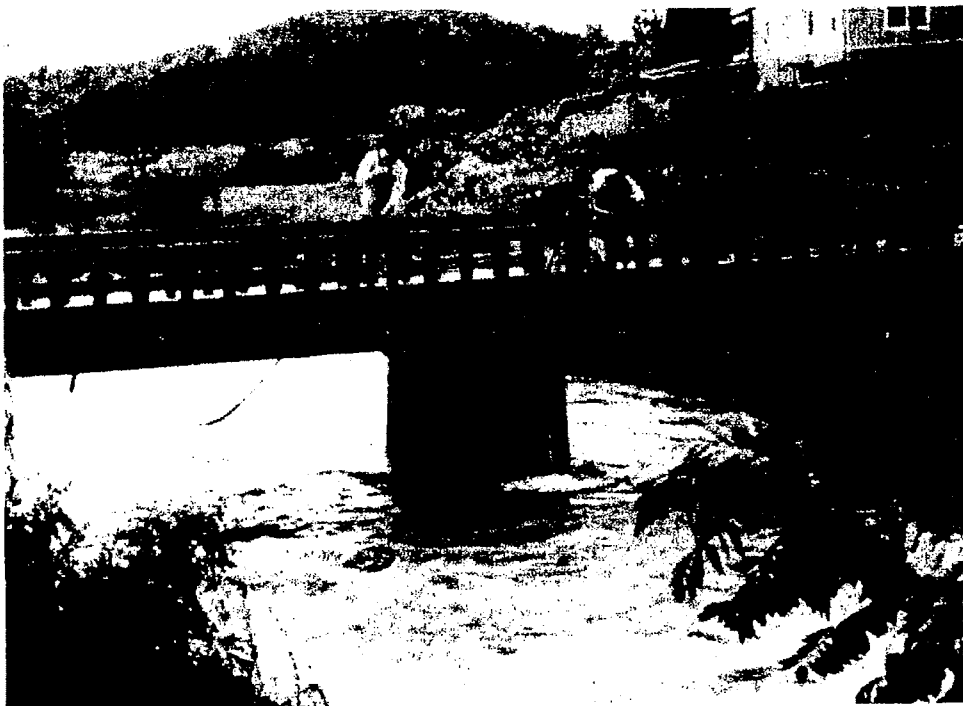
하천 수위측점에 대한 수위-유량관계를 조사하기 위해, 수위별로 유량을 조사하였다. 현장 출장을 통해 폭우시 고수위 유량 측정과 평상시 저수위 유량 측정을 측정하여 수위-유량관계를 구하였다. 일정 수량 이상의 하천 유량은 유속측정과 단면 측량을 실시하여, 단면적에 유속을 곱하여, 이를 단면 구간에 대하여 적분하여 구하였다. 이때, 유속은 프라이스식 유속계를 이용하였으며, 유속 측점은 수심이 얇은 경우는 1점법, 수심이 깊은 경우는 2점법을 적용하였다. 여름철 홍수가 발생하면 하천단면이 변화하므로, 해마다 현장출장을 통해 수위-유량관계를 보정하였으며, (그림 3-30)은 저수위 현장 유속 측정 광경을 보여주고 있으며, (그림 3-31)과 (그림 3-32)는 폭우시 고수위 현장 유속 측정 광경을 보여주고 있다.



(그림 3-30) 저수위 현장 유속 측정 광경



(그림 3-31) 고수위 현장 유속 측정 광경 (Ⅰ)



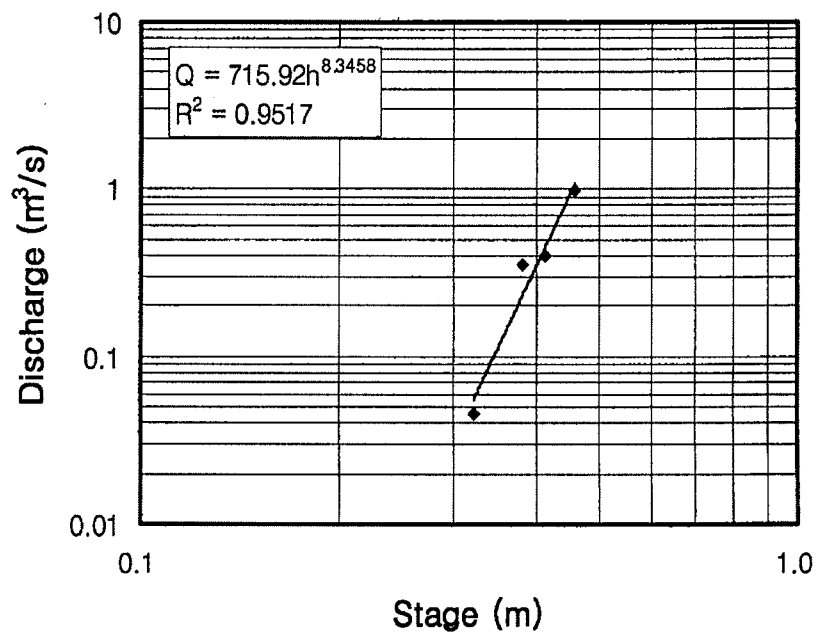
(그림 3-32) 고수위 현장 유속 측정 광경 (Ⅱ)

현장 측정을 통하여 얻어진 수위-유량관계를 정리하면 다음의 <표 3-11>과 같다. 자료측정기간 중 발생한 홍수로 인해 연도별로 서로 다른 수위-유량 관계를 가지는 지점도 있으며, 수위의 고저에 따라서도 다른 수위-유량 관계를 보이는 지점도 있는 것으로 조사되었다. 수위-유량의 상관관계식에서 보여준 결정계수의 범위는 0.903 ~ 1.00을 보여 비교적 높은 상관관계가 있는 것으로 나타났다.

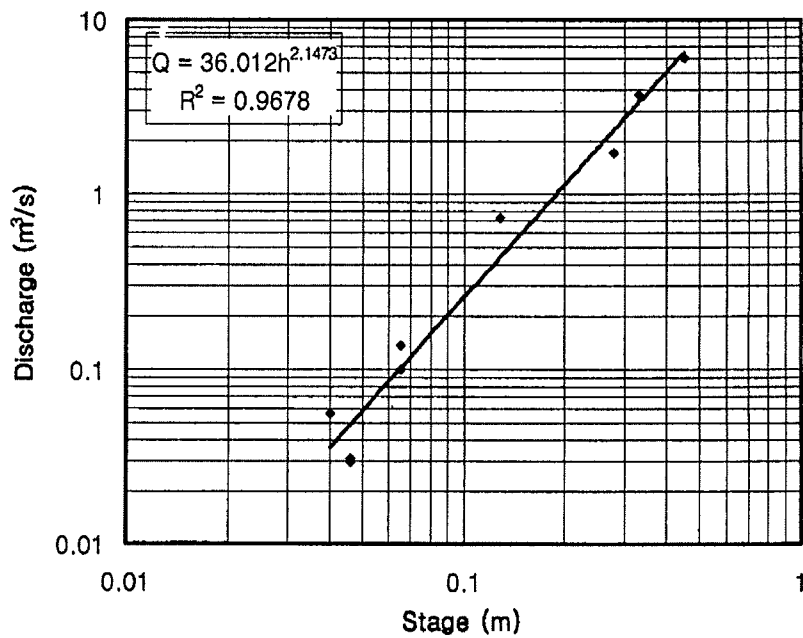
(그림 3-33)에서 (그림 3-46)은 각 지점별로 현장 측정을 통해 조사된 수위-유량 관계를 보여주고 있다.

<표 3-11> 측정별 수위-유량 관계

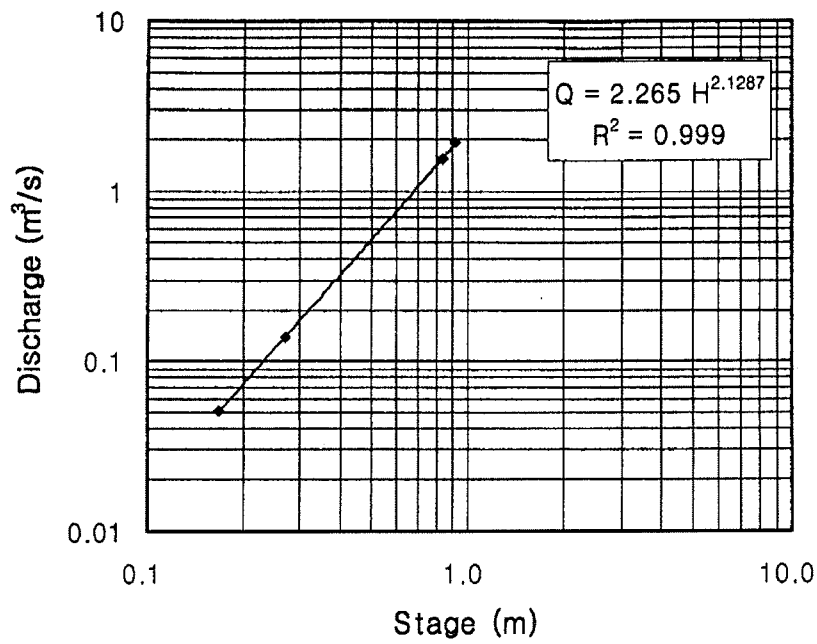
측점	수위-유량	R ²
HP#1	$Q=5.8644h^{2.4711}$	0.970
HP#2	$Q=36.012h^{2.1473}$	0.968
HP#3	$Q=2.265h^{2.1287}$	0.999
HP#4	$Q=1.6823h^{1.3615}$ (1998)	0.960
	$Q=1.7298h^{1.3699}$ (1999)	0.940
HP#6	$Q=9.2169h^{4.2384}$ (1996 ~ 1998)	0.913
	$Q=13.356h^{3.0625}$ (1999 ~ 2000)	0.979
HP#7	$Q=18.045h^{2.5378}$ (1996 ~ 1998/8)	0.916
	$Q=249.87h^{7.3164}$ (1998/9 ~ 2000)	0.903
HP#8	$Q=72.558h^{3.6595}$	0.979
HP#9	$Q=0.1881h^{1.2384}$ (저수위)	0.923
	$Q=0.8343h^{1.7227}$ (고수위)	0.958
HP#10	$Q=3E+11h^{18.508}$	1.000
HP#11	$Q=0.8286h^{4.088}$	0.936
HP#13	$Q=1.2884h^{1.3966}$	0.998
HP#14	$Q=13.18h^{3.0772}$	0.927



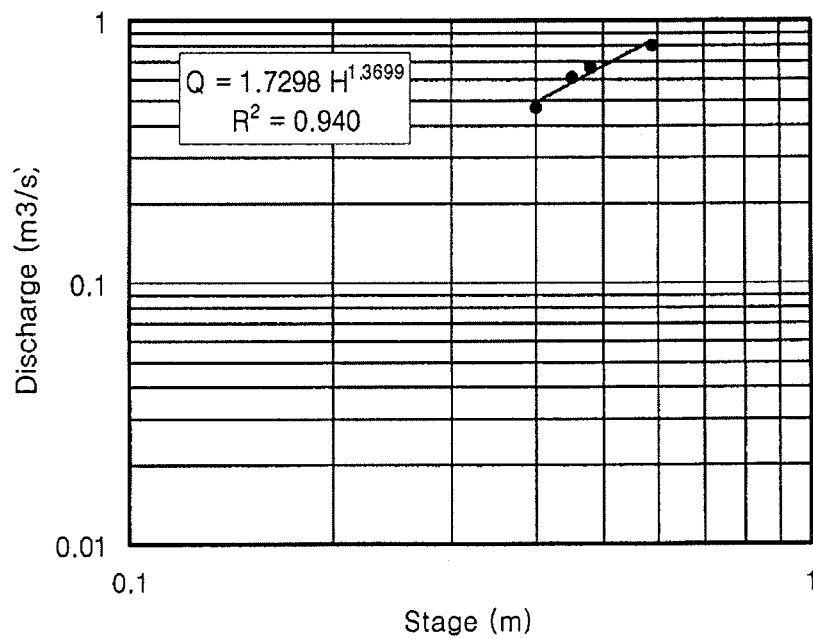
(그림 3-33) HP#1 측점의 수위-유량관계 곡선



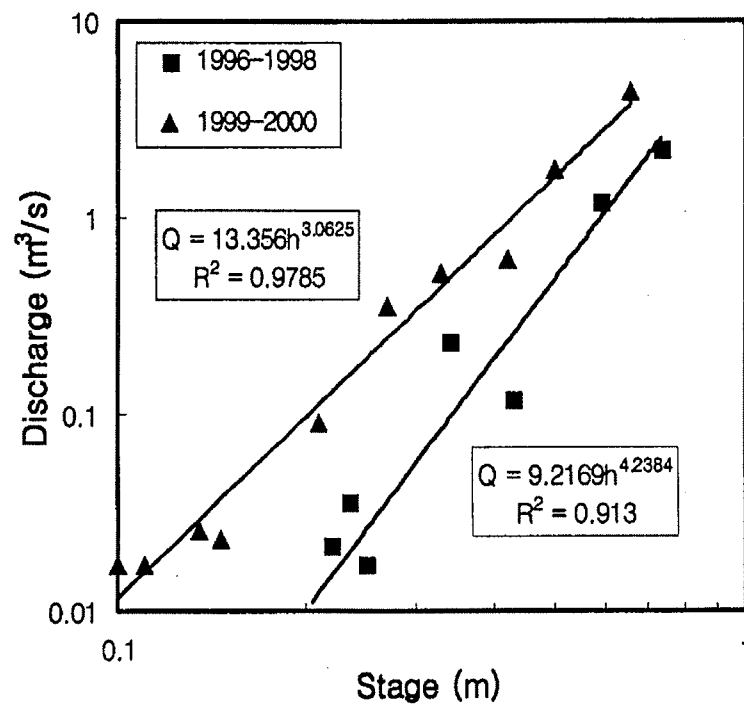
(그림 3-34) HP#2 측점의 수위-유량관계 곡선



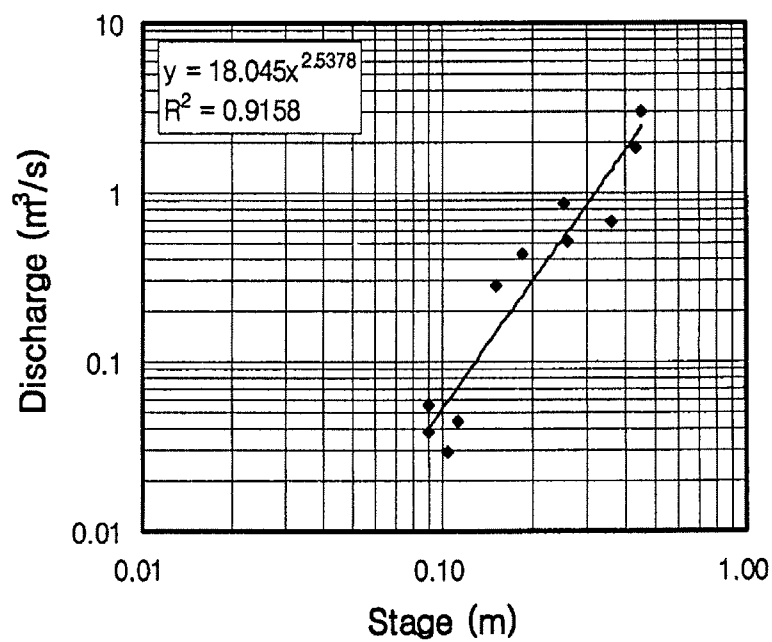
(그림 3-35) HP#3 측점의 수위-유량관계 곡선



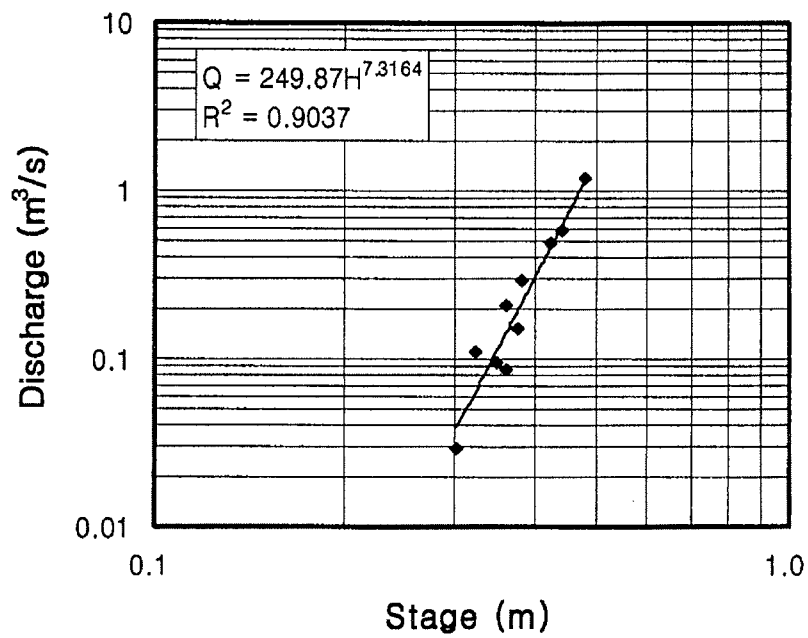
(그림 3-36) HP#4 측점의 수위-유량관계 곡선 (1999)



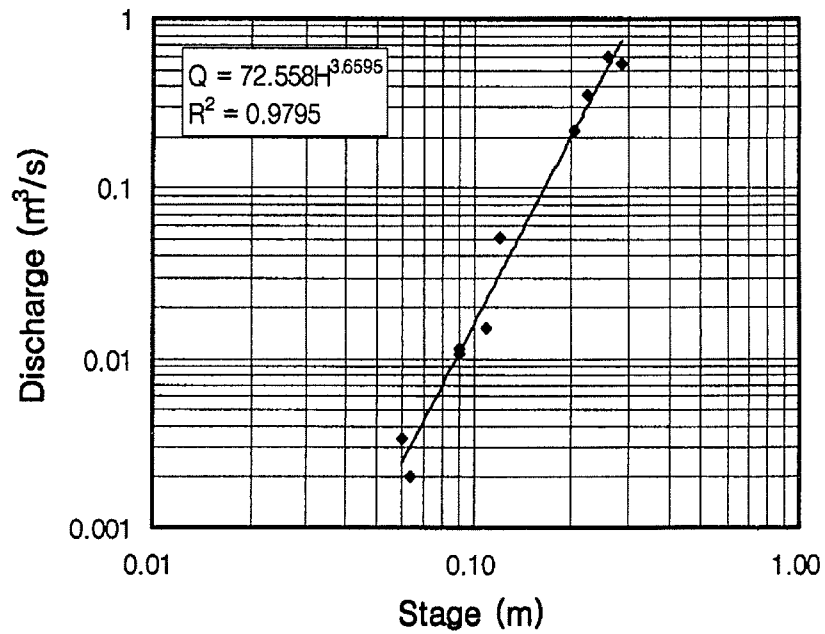
(그림 3-37) HP#6 측점의 수위-유량관계 곡선



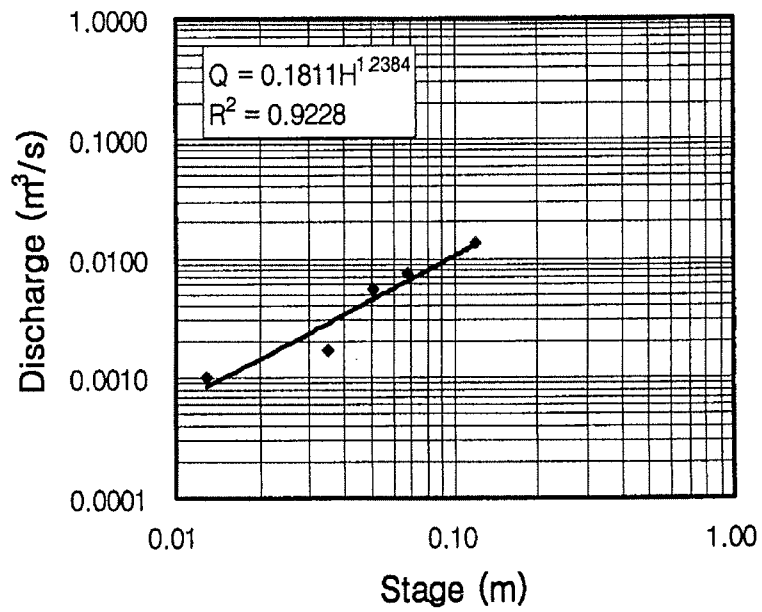
(그림 3-38) HP#7 측점의 수위-유량관계 곡선 (1996 ~ 1998/8)



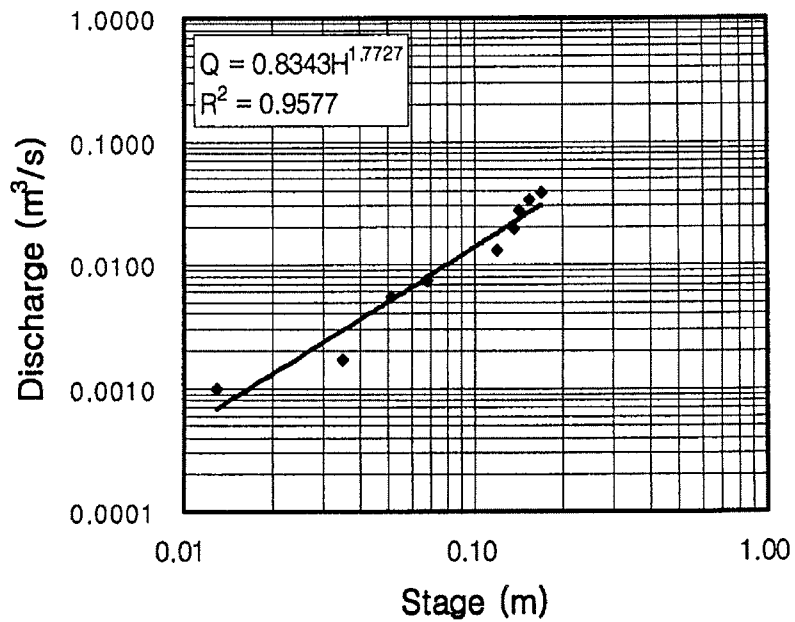
(그림 3-39) HP#7 측정점의 수위-유량관계 곡선 (1998/9 ~ 2000)



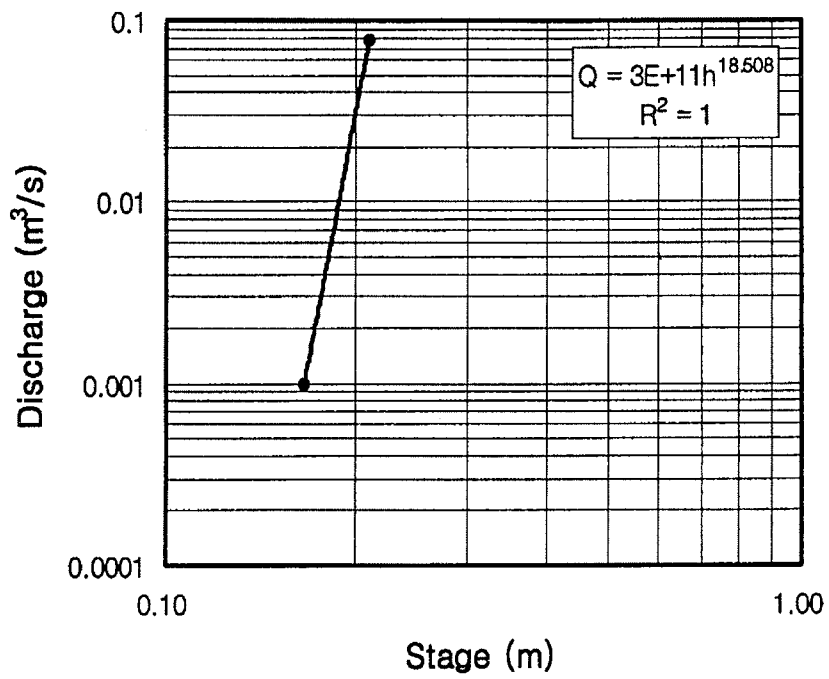
(그림 3-40) HP#8 측정점의 수위-유량관계 곡선



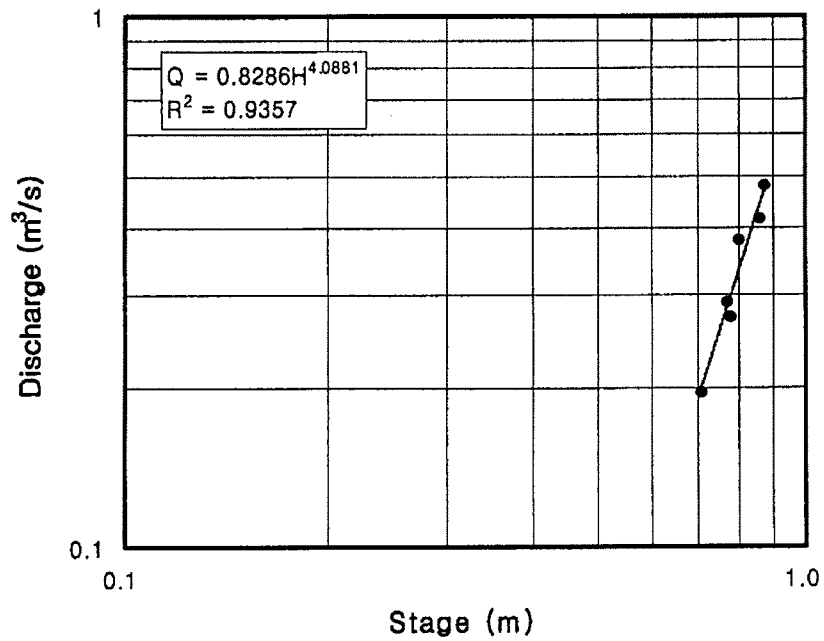
(그림 3-41) HP#9 측점의 수위-유량관계 곡선 (저수위)



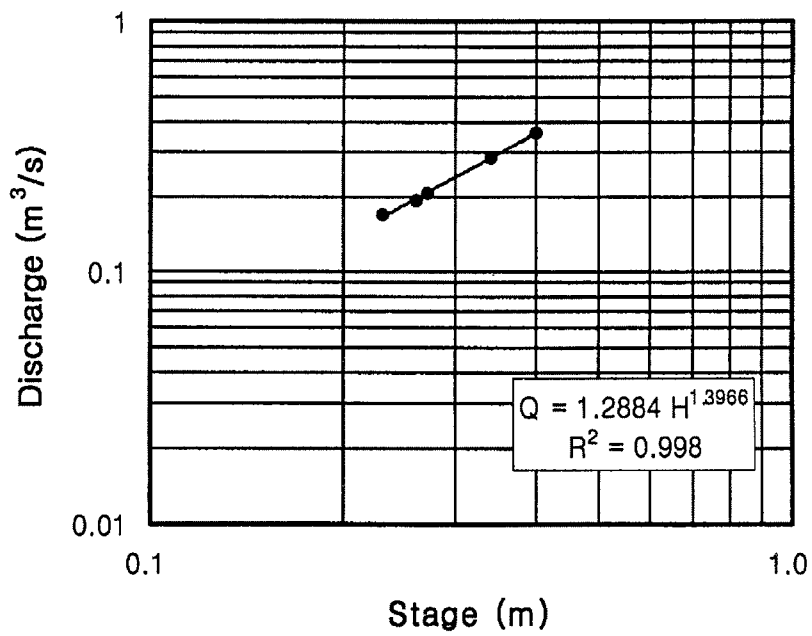
(그림 3-42) HP#9 측점의 수위-유량관계 곡선 (고수위)



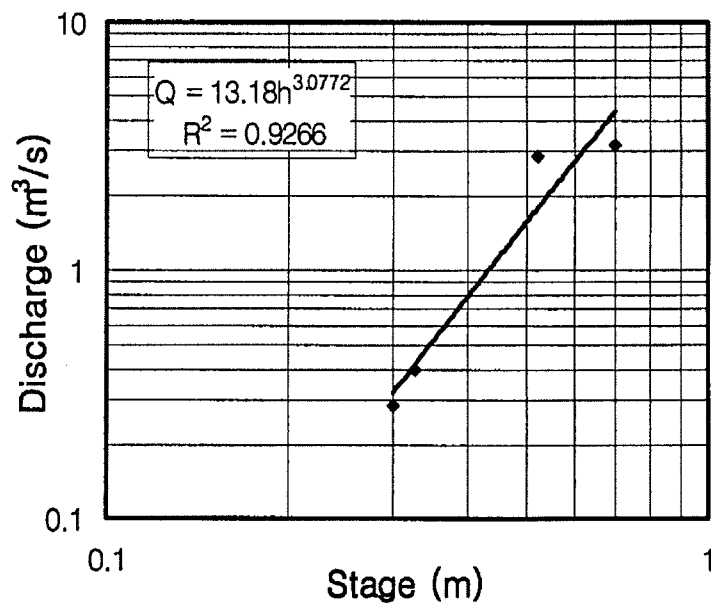
(그림 3-43) HP#10 측정점의 수위-유량관계 곡선



(그림 3-44) HP#11 측정점의 수위-유량관계 곡선



(그림 3-45) HP#13 측점의 수위-유량관계 곡선



(그림 3-46) HP#14 측점의 수위-유량관계 곡선

3. 유출량

<표 3-12>는 강우량과 소유역별 유출량을 연도별로 보여주고 있다. 강우량은 유출량의 결측구간을 제외한 구간을 대상으로 산정하였으며, HP#14의 경우 수위계 고장으로 1996, 1998, 1999년 자료가 결측되었다. 발안저수지 하단에 위치한 HP#2 소유역의 유출율은 1999년의 경우 34.8%로 최대값을 보이고 있으며, 발안저수지 상단에 위치한 HP#6, HP#7 소유역의 유출율은 1998년에 각각 64.5%, 48.1%로 최대값을 보였다.

<표 3-12> 소유역별 유출율

소유역	연도	자료기간 (일)	유출량		강우량 (mm)	유출율 (%)
			(10 ⁶ m ³)	(mm)		
HP#2	1996	242	2.50	94.2	496.5	19.0
	1997	349	8.16	308.0	1054.0	29.2
	1998	297	11.68	440.8	1588.3	27.8
	1999	362	14.37	542.1	1556.1	34.8
	2000	150	6.51	245.8	1312.8	18.7
HP#6	1996	273	1.50	364.8	838.5	43.5
	1997	348	2.71	659.9	1228.0	53.7
	1998	274	2.64	644.3	999.3	64.5
	1999	279	2.47	601.9	1194.0	50.4
	2000	151	2.70	659.6	1341.2	50.2
HP#7	1996	272	1.51	141.2	830.8	17.0
	1997	250	1.70	158.6	636.0	24.9
	1998	199	4.28	399.9	832.1	48.1
	1999	279	3.44	321.4	1194.0	26.9
	2000	190	5.27	492.2	1252.2	39.3
HP#14	1997	226	1.43	280.0	694.5	40.3
	2000	117	2.44	482.7	820.6	58.8

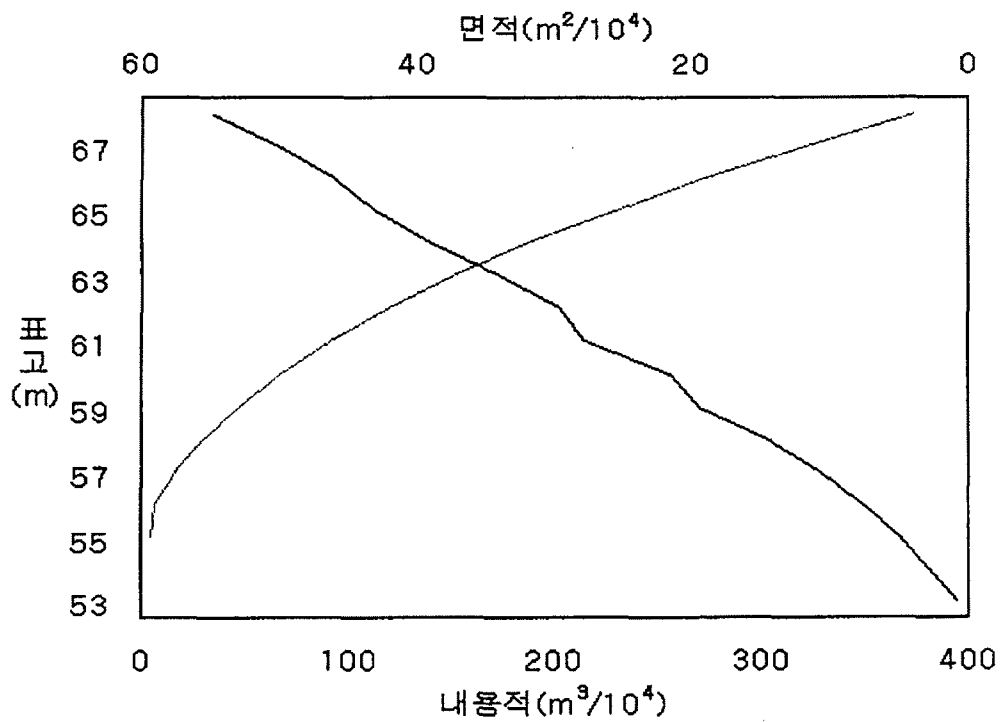
4. 저수지 수위와 저수량

시험유역에는 발안저수지가 유역 하단에, 기천저수지가 유역상단에 위치하고 있으며, 각각의 저수지의 주요 제원을 조사하였으며, 그 결과는 <표 3-13>과 같다. <표 3-13>에서와 같이, 발안저수지의 유역면적은 2,270ha, 만수면적은 110.3ha이고, 저수량은 4,134 천톤으로 조사되었다. 또한, 최고수심은 14.5m이며, 여수토의 연장은 20.4m, 높이는 3.5m이다. 기천저수지의 유역면적은 775ha로 발안저수지의 약 1/3에 해당되고, 만수면적은 약 43ha로 발안저수지의 약 1/3값을 보였다. 저수량은 2,247 천톤으로 발안저수지의 절반정도를 저류할 수 있는 것으로 나타났다. 최고수심은 14.7m로 발안저수지와 거의 비슷하였으나, 여수토의 연장은 발안지의 3배 정도에 해당되는 60m의 값을 보였다.

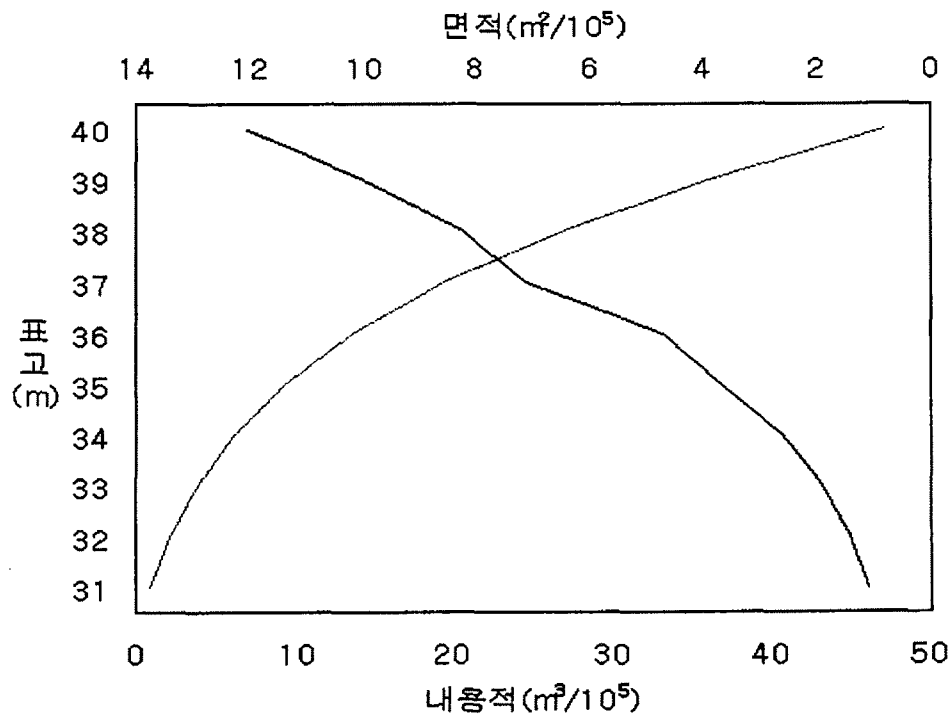
<표 3-13> 유역내 저수지의 주요 제원

저수지명	위치	유역 면적 (ha)	홍수 면적 (ha)	만수 면적 (ha)	저수량 (천톤)	최고수 심 (m)	제당		여수토	
							제장 (m)	제고 (m)	연장 (m)	높이 (m)
발안 저수지	화성군 봉담면 덕우리	2270	10.00	110.3	4134	14.50	387.0	14.0	20.4	3.5
기천 저수지	화성군 팔탄면 기천리	755	3.26	42.98	2247	14.70	172.0	16.7	60.0	3.0

발안 유역에 위치한 발안저수지 (HP#5), 기천저수지 (HP#12)의 수위-수면적, 수위-내용적 관계는 수화농지개량조합 발안출장소의 자료를 이용하였으며, (그림 3-47), (그림 3-48)은 각각 기천저수지와 발안저수지의 수위-내용적 관계 곡선을 보여주고 있다.

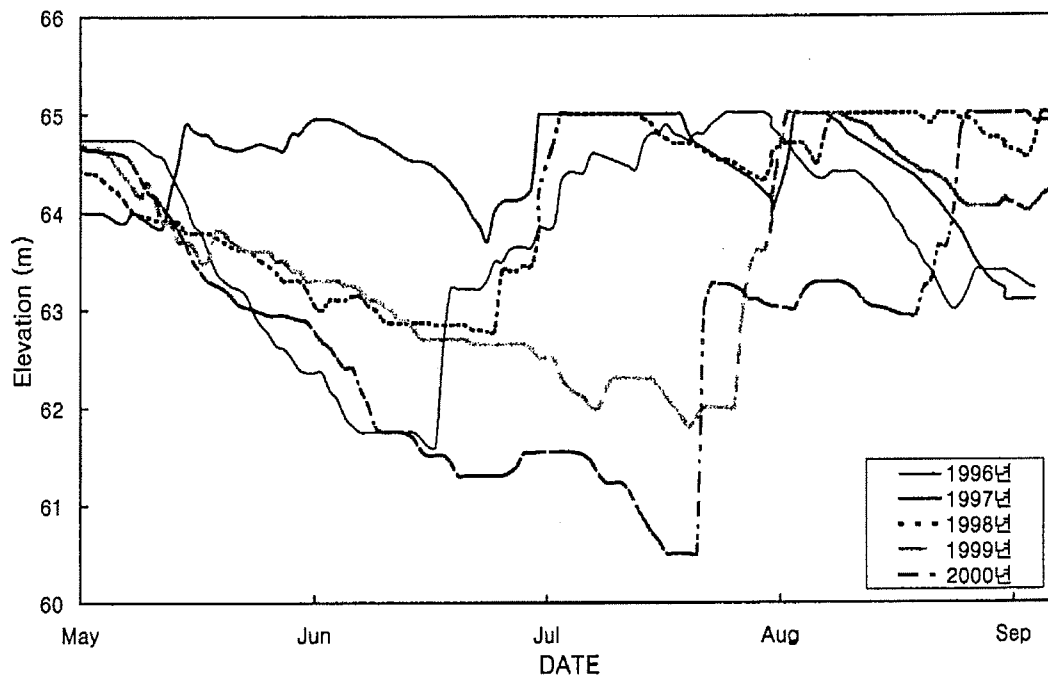


(그림 3-47) 기천저수지 수위-내용적 곡선

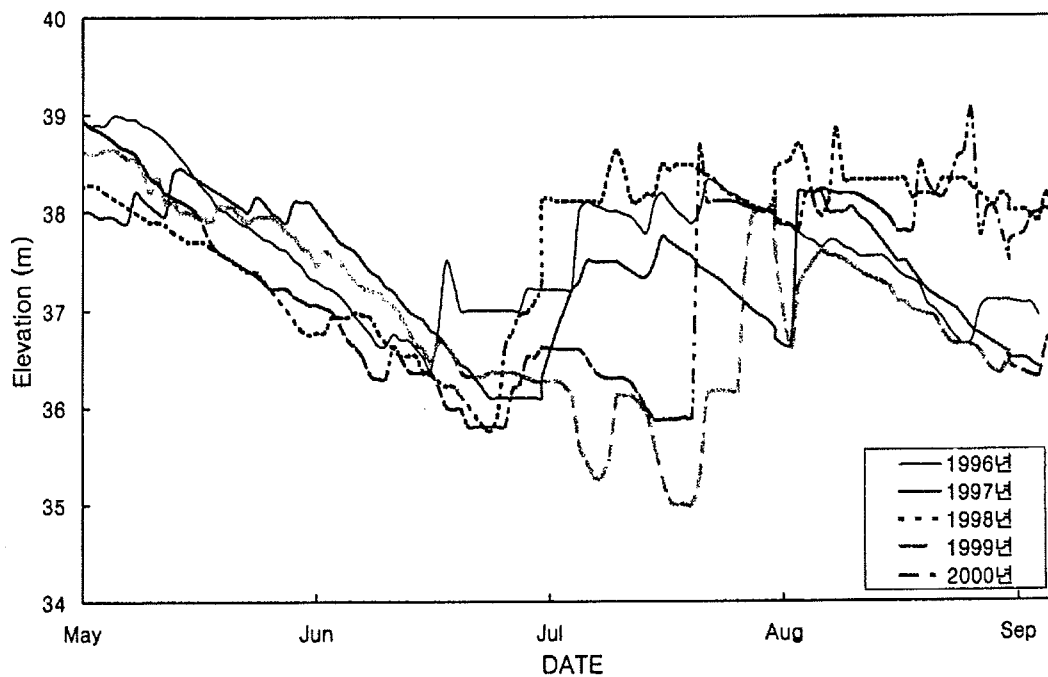


(그림 3-48) 발안저수지 수위-내용적 곡선

관개기간동안의 기천저수지와 발안저수지의 일별 저수위의 변화를 연도별로 도시한 결과는 (그림 3-49), (그림 3-50)과 같이 나타났다.



(그림 3-49) 기천저수지 저수위 변화 (1996 ~ 2000)



(그림 3-50) 발안저수지 저수위 변화 (1996 ~ 2000)

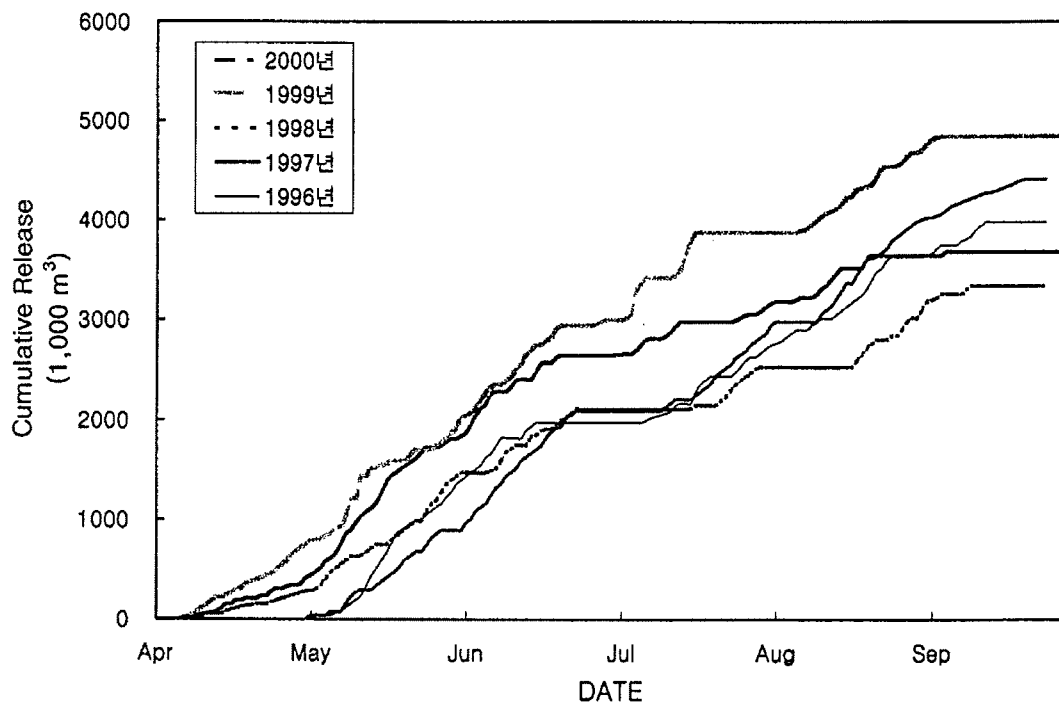
기천저수지의 수위는 (그림 3-49)에서와 같이 4월 초순에 만수위에서 못자리 용수까지 약간 감소하다가 이앙용수의 급수개시후 6월 중순에 이르러 최저수위를 보였다. 장마가 시작되면서 저수위가 상승하여 7월하순에 이르러 만수위 가까이에 달하다가 8월 하순까지 관개용수의 급수를 통해 저수위가 줄다가 9월부터 상승하는 현상을 나타냈다. 그러나, 1997년의 경우 다른해와 다른 저수위의 변화양상을 나타냈으며, 이는 1997년의 경우 5월과 6월 강우가 상대적으로 많았기 때문인 것으로 분석되며, 발안저수지에서도 상대적으로 1997년 5, 6월의 저수위가 다른해에 비해 높게 나타나고 있다.

발안 저수지의 수위는 (그림 3-50)에서와 같이 4월 초순 만수위 가까이에서 못자리 용수의 급수개시와 함께 점차적으로 감소하여 5월 중순경 모내기와 함께 관개수를 급수하게 되어 수위가 급격히 낮아지고 있으며, 최저수위는 6월 중순경에 이르러 발생하였다. 이후 장마기에 들어 저수위가 상승되어 7월 하순에 이르러 극대값을 보여주었으며, 이후 8월 하순까지 수위가 강하하고 있음을 보여준다.

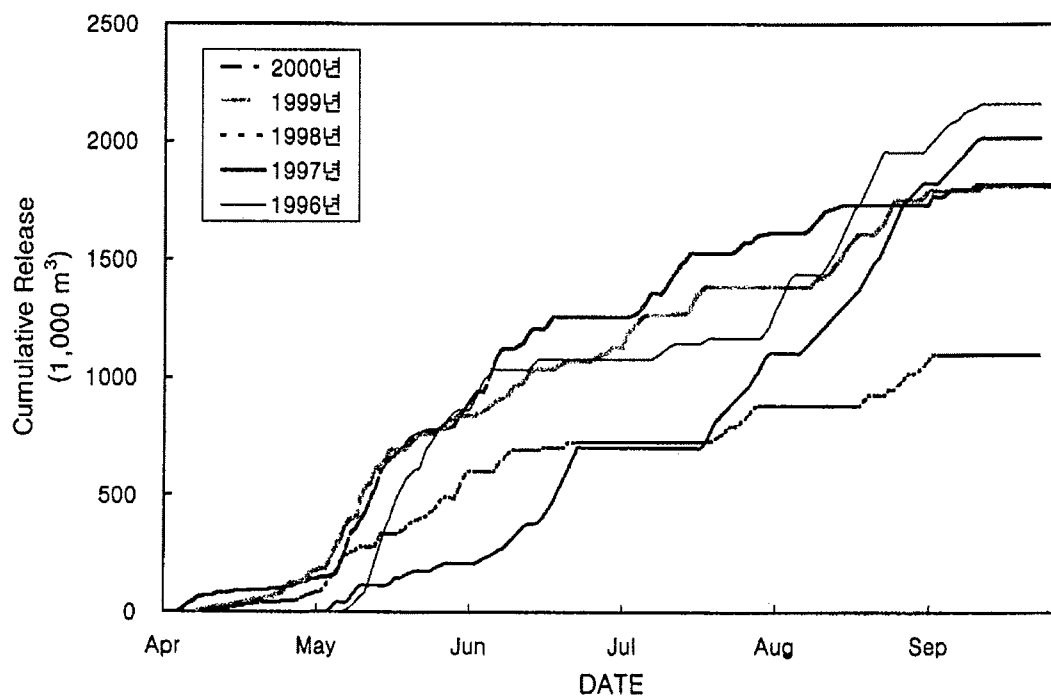
이와 같은 저수위의 변화는 대부분의 농업용 저수지의 수위 변화 유형을 보이고 있으나, 다만 발안 저수지의 경우, 장마 직후의 저수위가 만수위 이하를 보인 것은 홍수 방지를 위해 설치한 텐더게이트를 통해 저수위를 낮게 유지하였기 때문이며, 그 이외에는 발안과 기천 저수지의 수위 변화 경향에는 차이가 없음을 알 수 있었다.

기천저수지와 발안저수지의 일별 관개량은 (그림 3-51), (그림 3-52)에서 보는 바와 같다. 기천저수지의 경우 총 누가 관개량은 상대적으로 강우량이 적었던 1999년 가장 많은 관개량을 보이고 있으며, 가장 강우량이 많았던 1996년 가장 작은 값을 보이고 있다. 4월부터 시작된 관개는 장마기간인 6월말과 7월초와 8월경에 관개를 중단하며, 9월 중순경까지 관개가 계속되는 것을 알수 있다.

발안저수지의 경우도 기천저수지와 유사한 경향을 보이고 있으며, 가장 관개량이 많았던 해는 상대적으로 강우량이 가장 작았던 1996년이며, 가장 관개량이 작았던 해는 1998년으로서 여름철 홍수가 많아 가장 많은 강우를 기록한 해였다.



(그림 3-51) 기천저수지 누가관개량 (1996 ~ 2000)

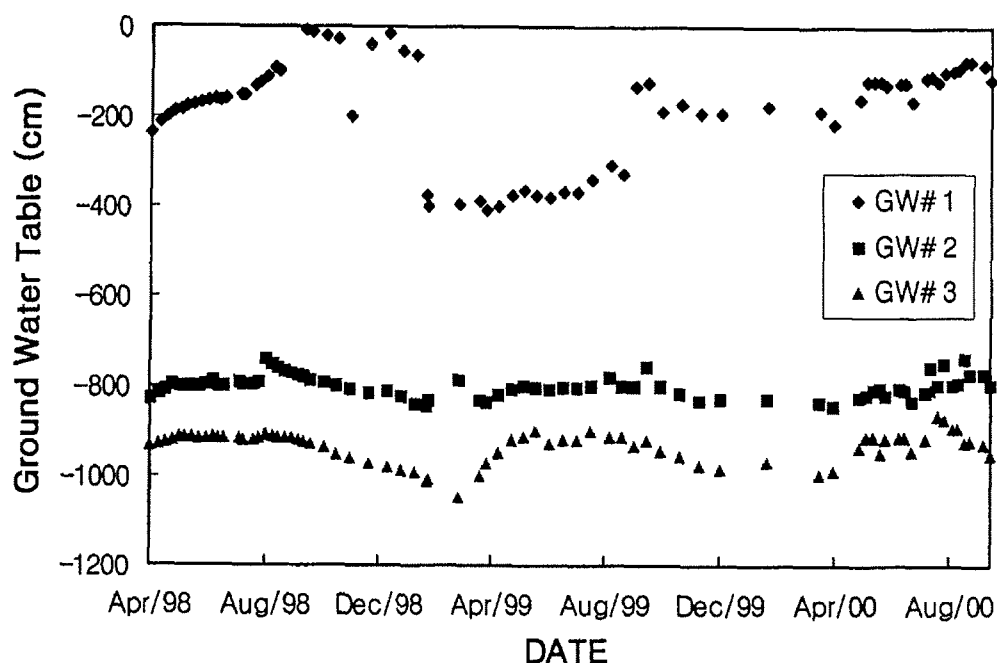


(그림 3-52) 발안저수지 누가관개량 (1996 ~ 2000)

5. 지하수위

시험지구의 지하수위를 측정하기 위하여 발안지구에 지하수위 관측공 3개를 현장 타설하였다. 지하수위 관측공 GW#1, 2, 3은 관개지구의 상류부에 1개, 하류부에 2개를 각각 설치하였으며, G & C Tech. 사의 Water Level Indicator를 이용하여 주기적으로 지하수위를 조사하였다.

(그림 3-53)은 지하수위의 조사 결과를 보여주고 있다. (그림 3-53)의 지하수위는 상류에 위치하고 있는 GW#1 지표면을 기준으로 하여 상대적으로 나타낸 것이다. 지하수위는 4월부터 서서히 증가하여 홍수기인 8월에 최대를 보이고 있으며, 관개 종료후에는 감소하여 다음 년도의 3월까지 감소 추세는 지속되고 있다. GW#1의 경우 1999년 8월에 관측공 내부로 지표수가 유입되는 문제가 발생하여 지하수위가 높게 나타나고 있다.



(그림 3-53) 발안저수지 유역내 지하수위 변화

제 7 절 요약 및 결론

본 장에서는 시험유역으로 선정된 발안저수지 유역의 수문 계측망을 구성하여 그 특성에 대하여 고찰하였고, 강우-유출 특성분석과 오염원의 정량적 해석을 위한 기초자료로서 대상유역의 수문특성을 조사분석하기 위하여 시험유역을 대상으로 1996년부터 2000년까지 수문모니터링을 실시하고 그 결과를 고찰하였다. 유역의 특성에 따라 시험유역을 7개의 소유역으로 구분하였고, 각각의 소유역을 대상으로 유역특성인자, 토양, 토지이용상태 등을 분석하였다. 또한, 시험유역에 설치된 수문 계측망으로부터 얻어진 기상, 강우, 수위-유량관계, 하천유출, 저수지 관개량, 저수위, 지하수위 등의 결과를 분석하였다.

본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- ① 농업유역의 수문특성을 분석하기 위하여 시험유역인 발안저수지 유역을 대상으로 수문계측망을 설치하고, 소유역별로 개략적인 특성을 정리하였다.
- ② 소유역별 유역특성을 분석하기 위해 유역면적, 유역 형상계수, 유로장, 최대기복량, 기복량비, 하천평균경사, 하천빈도 등의 유역특성인자를 조사하였다.
- ③ 1/25,000 정밀토양도와 1/50,000 개략토양도를 이용하여 배수상태에 따른 수문학적 토양군 (A, B, C, D)을 구분하고, 각 소유역별 토양군을 분류하여 그 면적비를 정의하였다.
- ④ 1/25,000 토지이용도와 현장답사를 통해 각 소유역별 토지이용상태를 논, 밭, 산림, 기타 등 4가지로 구분하고 그 구성비를 정의하였다.
- ⑤ 시험유역의 소유역별 수문계측망의 구성현황을 고찰하고, 계측망의 특성에 대하여 고찰하였다.
- ⑥ 대상유역의 강우 자료 분석을 위하여 일 강우량을 조사하였으며, 장기 강우자료의 생성을 위하여 인근에 위치한 수원축후소의 강우량에 대한 상관성 분석을 실시한 결과, 높은 상관성을 보였다.
- ⑦ 하천수위 관측지점별 일별 수위자료를 측정하였으며, 현장 유속측정을 통하여 수위-유량 관계식을 구성하였다. 수위-유량관계의 결정계수는 0.903 ~ 1.00

으로 비교적 높은 상관성을 보였다.

- ⑧ 일수위 자료와 수위-유량 관계식으로부터 측정별 일유량을 계산하였으며, 소유역별 유출율을 계산한 결과 HP#2 소유역의 경우 19% ~ 34.8%의 범위를 보였으며, HP#6 소유역의 경우 43.5% ~ 64.5%의 범위를 보였다.
- ⑨ 대상유역내에 위치한 발안저수지 및 기천저수지의 주요 제원을 조사하고, 수위-내용적 곡선을 조사하였다. 또한, 일별 저수위 자료를 조사하여 관개시기 저수위의 변동특성을 고찰하였으며, 연도별 누가 관개량을 조사·분석하였다.
- ⑩ 관개시기동안 지하수위의 변화를 측정하기 위해 발안지구에 지하수 관측공 3개를 설치하여 지하수위를 측정한 결과, 지하수위는 4월부터 서서히 증가하여 홍수기인 8월에 최대를 보이며, 관개종료 후에는 감소하여 다음해 3월까지 감소하는 추세를 유지하는 것으로 조사되었다.

참고문헌

1. 김상민, 박승우, 강문성, 2000. 토지이용에 따른 소유역의 오염부하량 분석, 제 1회 한일 농촌계획 국제 심포지움 발표논문집, pp. 174-182.
2. 김우철 외, 1985. 현대통계학, 영지문화사
3. 김진택, 1995. 농업 비점원 오염모형을 위한 지리자원정보시스템 호환모형의 개발 및 적용, 서울대학교 박사학위논문.
4. 박승우, 류순호, 강문성, 1997. 소유역의 토지이용에 따른 비점원오염 부하량, 한국농공학회지, 39(3), pp. 115-127.
5. 박승우, 이혜원, 임상준, 1996. 농업유역의 수문·수질·생태환경 모니터링/모델링 연구,
6. 서승덕, 김동훈, 윤학기, 1994. 농업용 저수지의 수질환경 오염원 조사분석, 한국농공학회지, 36(3), pp. 100-112.
7. 윤용남, 1986. 공업수문학, 청문각

8. 이상도, 이용환, 백경원, 송재우, 1996. 중소하천의 유량과 수질의 통계적 분석, 수자원학회, 96학술발표
9. 최지용, 박원규, 이상일, 1996. 하천 및 호소수 수질관리를 위한 자동측정망의 설계, 한국수자원학회지, 29(2), pp. 167-178.
10. 최진규, 손재권, 구자용, 1996. 전북도내 농업용저수지의 수질조사 연구, 한국농공학회지, 38(2), pp. 65-74.
11. 한국농촌계획학회 춘계 학술논문발표회, 17-20.
12. Chow, Ven Te., et al., 1964. Handbook of Applied Hydrology : Sec. 21 Hydrology of Agricultural lands, Sec. 22 Hydrology of Forest lands and Rangelands, McGraw-Hill.
13. Cochraan, W. G., 1997. Sampling techniques. Third Ed., John Wiley and Sons, New York, N. Y.
14. Donald, H. Burn, 1990. Real-time sampling strategies for estimating nutrient loadings, J. of Water Resour. Planning and Management, ASCE, 116(6), pp. 727-741.
15. Hawkins, R.H., A.T. Hjelmfelt, and A.W. Zevenbergen, 1985. Runoff Probability, Strom Depth, and Curve Numbers., ASCE, J. Irr. & Dr. 11(4) : pp. 330-340
16. Kartikeyan, B., B. Gopalakrishna, M.H. Kalubarme and K.L. Majumder, 1994. Contextual techniques for classification of high and low resolution remote sensing data, Int. J. Remote sensing 15(5) : pp. 1037-1051
17. Novotny, V., and Olem, H., 1994. WATER QUALITY Prevention, Identification, and Management of Diffuse Pollution, Van Nostrand Reinhold.
18. Park, S.W., S. Mostaghimi, R.A. Cooke, and P.W. McClellan, 1994. BMP Impacts on Watershed Runoff, Sediment, and Nutrient Yields. Water Resources Bulletin 30(6) : pp. 1011-1023.
19. SCS, 1972. National Engineering Handbook, Sec. 4, Hydrology, U.S.

Department of agriculture, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

20. SCS, 1975. Urban Hydrology for small watersheds, Thechnical Release No. 55.
21. Sharp, W. E., 1972. A topologically optimum water sampling plan for the Edisto river, North Carolina, WMO No. 324, Casebook on hydrological network design practice, World Meteorological Prganization.

유역수질 모니터링 기술 개발

2000년 12월

“농업생태환경 모니터링 및 종합적 환경관리시스템 개발 사업”

서울대학교 농업생명과학대학 부속 농업개발연구소

최종보고서 제 II 편 제 4 장

여 백

제 4 장 유역수질 모니터링 기술 개발

제 1 절 서 론

농업유역의 토지이용과 영농 및 생활환경 등 유역의 물리적, 경제사회적 특성에 따른 비점원오염의 영향을 파악하기 위해서는 적절한 하천, 호수 및 지하수 등의 수체에 대한 수질 모니터링을 실시하는 것이 필요하다.

수질 모니터링은 대상 유역의 하천 수질의 시간적, 공간적 상황을 파악하는 일을 말하며, 수질 시료와 저니질 시료를 현장 채취하여, 그 물리적, 화학적, 생물학적 특징을 분석하고, 이용 목적에 따른 수질기준과의 관계를 비교 검토하는 것을 포함한다. 따라서, 유역의 지형과 지세, 토지이용, 영농방법, 경제 활동 등 다양한 자연적, 인공적 환경을 조사하고, 수문조사와 수질 분석을 실시하며, 그 오염물질의 양을 파악하는 것이 중요하다.

농업 유역의 주요 오염 물질은 유사량과 비료물질, 농약성분 등이며, 그밖에도 생물학적 산소요구량 등 수질 기준에 적용하는 물질 등도 중요하다. 그런데 기존 수질 측정에서 다양한 수질 성분자료를 분석하고 있으므로, 농업유역의 특성에 부합되는 영양물질을 위주로 조사하는 것이 보통이다.

특히, 농업유역의 오염은 주로 비점오염에 의한 것이므로, 이를 고려한 조사방법의 설정이 필요하다. 수질 조사 방법에는 조사 지점의 선정과 수질 샘플의 채취 방법, 조사 시기 등과 수질 분석 방법 등 다양한 내용을 말하며, 이 중 수질 분석 방법은 공정시험법을 통해 일관성 있는 자료를 구축하여야 할 것이다.

본 연구의 목적은 시험유역인 발안저수지 유역을 대상으로 수질 계측망을 구성하고, 수질 시료의 채취 시기와 방법, 그리고 수질 분석 방법 등 수질 모니터링 기술을 정립하고, 시험유역을 대상으로 수질 모니터링을 실시하여 농업유역에서의 수질 오염부하의 특성을 분석하는 데 있다.

제 2 절 유역 수질 계측망

1. 수질 계측망의 구성

발안저수지 유역의 수질 계측망은 수문계측망의 소유역별 수문측점에 수질측점을 운영하여 유역에서의 오염부하량을 정량적으로 분석할 수 있도록 하였다. 이를 위해 각각의 소유역별로 하천수 측정지점과 저수지 수위측점 지점, 지하수 측정지점 등에 수질측점을 설치하여 운영하였다.

<표 4-1>은 발안저수지 유역에 설치된 수질 측정망의 현황을 보여주고 있다.

<표 4-1> 수질 측정망의 현황

구 분	측점명	측점수
하천수질조사	HP#2, HP#6, HP#7, HP#14	4개점
저수지 수질조사	HP#5, HP#12	2개점
포장 수질조사	HP#9, HP#10	2개점
지하수 수질조사	GW#1, GW#2, GW#3	3개점
강수 수질조사	RGQ#1	1개점
계		13개점

유역에서의 오염부하량을 정량적으로 분석하기 위해 수질측점은 하천수문계측망과 동일한 곳을 수질 모니터링 측정점으로 선정하였으며, 수위, 유량 측정인 HP#2, 6, 7, 14 등 4개 지점에서 1996년부터 수질 모니터링을 실시하였다. 이들 측정에서는 일별 수위-유량 등의 수문조사 결과를 활용하여, 수질 항목별 오염물질의 농도뿐만 아니라 오염부하량을 구할 수 있도록 하였다.

저수지 수질측점은 저수위 측정인 HP#5, 12 등 2개 지점을 대상으로 하였으며, 수질 샘플링은 발안저수지와 기천저수지의 취수탑 부근에서 실시하였다. 저수지에서 수질측점은 저수지 수질 변화를 정성적으로 파악할 수 있는 지점으로, 1996년

부터 운영되었다.

포장 수질조사는 논에서의 물질수지를 분석하기 위하여 포장에 관개되는 지점과 배수되는 지점에 설치된 수문 모니터링 지점에서 수질 모니터링을 실시하였으며, 2000년부터 수질 모니터링을 실시하였다.

지하수 수질측점은 1998년부터 설치하여 운영하고 있으며, 관개기간 동안의 지하수의 수질변화를 고찰하기 위해 선정된 지점이다.

강우수질측점은 1개 지점으로 강우의 수질을 조사함으로서, 유역에 유입되는 수질 성분 또는 오염 물질의 양을 파악하기 위해서 선정된 지점으로 서울대학교 농공관 옥상에서 모니터링을 실시하였다.

2. 수질 샘플링과 분석방법

가. 수질 샘플링

임의 지점에서 수질 분석을 위하여 채수하는 일을 수질 샘플링 (water sampling)이라 하며, 그 채수위치와 방법은 다음과 같다.

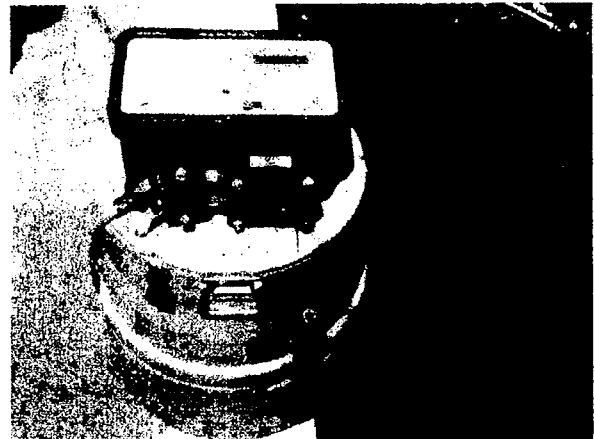
채수위치는 하천과 저수지 등에 따라 다르다. 하천에서의 채수 위치는 하천 단면의 유심부에서 실시하는 것을 원칙으로 하였다. 그런데, 갈수기의 경우는 유심부에 접근이 용이하므로 문제가 없으나, 풍수기에는 유심부의 접근이 어려운 경우가 있는 데, 이 경우에는 좌안 또는 우안에서 일정한 간격을 두고 수질 샘플링을 실시하였다. 저수지의 시료는 제방에서 1m 정도의 위치에서 표층수를 채수하였다.

하천과 저수지에서의 수질 샘플링은 1000cc 플라스틱 공병을 증류수로 씻어 건조한 상태로 보관된 채수병을 사용하여 수작업으로 유심부에서 수면하 10cm정도 지점에서 2병을 채수하였다. 그 중 1병은 채수 즉시 표준 수질 분석법에 따라 산처리를 실시하였으며, 나머지 1병은 원래 상태로 실험실로 운반하여 분석하였다. (그림 4-1)은 하천에서의 수질샘플링 광경을 보여주고 있다.

폭우시 하천에서의 폭우사상에 대한 시간별 수질샘플링과 지하수 수질샘플링은 미국의 ISCO사에서 제작한 자동채수기를 이용하였다. (그림 4-2)는 자동채수기를 이용한 수질샘플링 광경을 보여주고 있다.



(그림 4-1) 하천에서의 수질 샘플링 광경



(그림 4-2) 자동채수기를 이용한 수질 샘플링 광경

나. 수질분석방법

수질 샘플의 분석은 pH, DO, 수온 등은 현장에서 측정하였으며, 부유물질, TN, TP 등의 영양물질은 실험실 분석을 실시하였다. 현장 측정은 채수위치에서 채수전에 현장에서 수질 조사를 실시하였다. 현장 조사는 수온, pH, DO 등을 표준계기를 이용하여 조사하였다. (그림 4-3)은 현장에서의 수질분석 광경을 보여주고 있다.



(그림 4-3) 현장 수질 분석 광경

현장 측정에 사용된 기기와 수질항목별 분석방법은 <표 4-2>에서와 같다. 수질 분석은 공정시험법에 따라 각 항목별로 분석하였으며, 부유물의 경우 필터 (Filter) 법으로 분석하였으며, 질소의 경우 Ion chromatograph와 Kjeldahl 방법을 이용하여 분석하였다. 분석항목은 농업유역의 수질분석에 필요한 총 9성분으로 하였다.

<표 4-2> 수질 분석 방법

구 분	성 분	분 석 방 법	비 고
pH, DO, 온도	pH, DO, 수온	pH meter, DO meter, 온도계	현장 관측
부유물	부유물	Filter법	실험실 분석
질소	NO ₃ -N NH ₄ -N T-N	Ion chromatograph Kjeldahl method Kjeldahl distillation	실험실 분석
인	PO ₄ -P T-P	Ion chromatograph Ascorbicacid reduction method	실험실 분석

제 3 절 수질모니터링 결과

1. 소유역별 수질 모니터링

발안저수지 유역에 대한 소유역별 수질모니터링 결과는 <표 4-3>과 같다. <표 4-3>은 pH, DO, SS, TN, TP의 5가지 항목에 대해 각 소유역별 자료기간, 자료개수와 최대값, 최소값, 평균, 표준편차 등의 통계자료를 보여주고 있다.

<표 4-3> 시험유역의 수질분석결과 통계치

소유역	자료기간 (개수)	항목	pH	DO	SS	TN	TP
				(mg/ℓ)			
HP#2	1996/3 ~2000/9 (73)	최대값	8.7	12.1	247.2	19.9	0.730
		최소값	6.0	1.7	0.1	0.2	0.002
		평균	7.1	7.4	12.7	3.1	0.068
		표준편차	0.5	2.2	35.9	3.4	0.096
HP#3	1996/3 ~2000/9 (68)	최대값	9.7	15.4	73.8	9.4	0.480
		최소값	6.4	1.2	0.3	0.3	0.005
		평균	8.2	8.4	10.0	2.1	0.080
		표준편차	1.0	2.9	10.2	1.4	0.075
HP#6	1996/3 ~2000/9 (76)	최대값	9.7	12.4	2170.0	25.4	1.550
		최소값	6.0	0.4	0.1	1.2	0.018
		평균	7.4	7.4	74.9	7.3	0.387
		표준편차	0.7	2.6	293.2	4.0	0.271
HP#7	1996/3 ~2000/9 (77)	최대값	9.4	15.4	207.8	9.4	0.984
		최소값	5.9	1.0	0.1	0.1	0.001
		평균	7.4	9.1	16.2	1.9	0.066
		표준편차	0.7	3.2	36.4	1.8	0.132
HP#12	1996/3 ~2000/9 (68)	최대값	10.3	15.2	129.2	9.0	0.550
		최소값	5.9	1.1	0.2	0.4	0.001
		평균	8.1	7.6	9.8	1.9	0.047
		표준편차	1.1	2.4	16.8	1.5	0.070
HP#14	1996/3 ~2000/9 (65)	최대값	8.3	12.3	595.6	7.3	1.160
		최소값	5.9	0.9	0.3	0.7	0.015
		평균	7.1	8.2	34.7	3.1	0.147
		표준편차	0.6	2.6	109.8	1.5	0.178

각 측정별 pH의 평균치는 7.1~8.2의 범위를 보여 대체로 중성의 값을 나타냈으며, DO 평균치는 7.4~9.1mg/ℓ의 범위를 보였다. TN의 평균치는 1.9~7.3mg/ℓ, TP의 평균치는 0.047~0.387mg/ℓ의 범위를 나타냈다. 발안저수지 (HP#5) 측정과 기천저수지 (HP#12) 측점에 대해 각 항목별 농업용수 수질기준과 비교해 본 결과, pH (6.0~8.5), DO (2 이상), TP (0.1 이하), SS (15 이상)의 경우 수질기준을 만족하고 있으나 TN(1.0이하)의 경우 농업용수 수질기준을 초과하고 있는 것으로 나타났다.

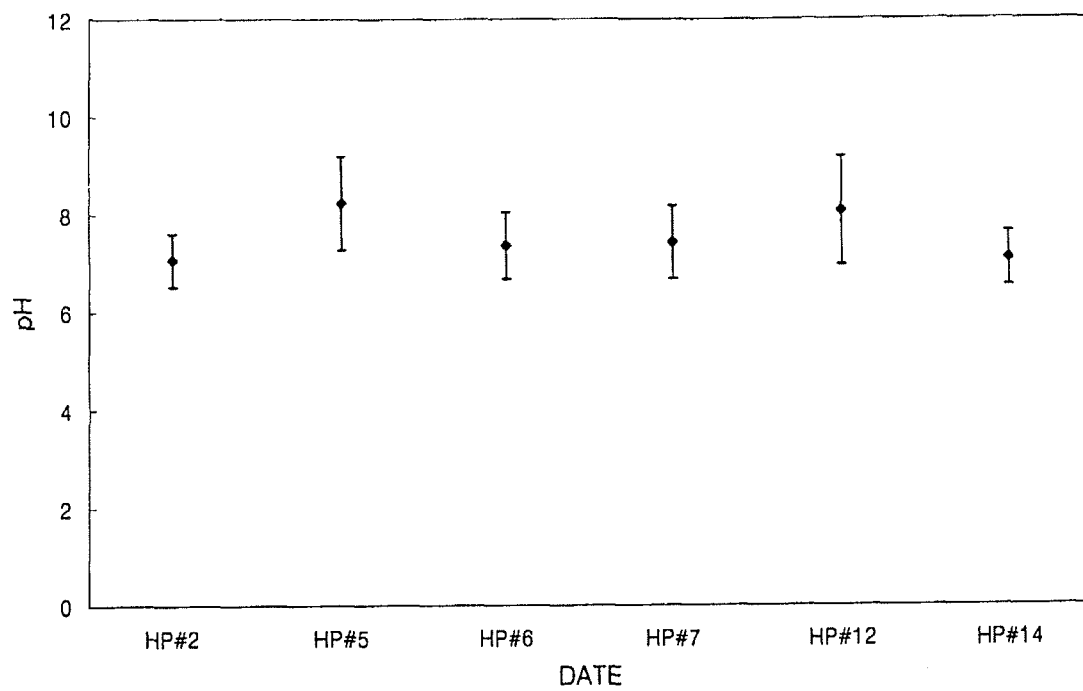
(그림 4-4)에서 (그림 4-7)은 소유역별 수질항목의 변화를 보여주고 있다.

pH는 (그림 4-4)에서와 같이, 저수지 측정인 발안저수지 측정 (HP#5), 기천저수지 측정 (HP#12)에서 상대적으로 높게 나타났음을 알 수 있으며, HP#12 측정에서 비교적 변화 범위가 크게 나타나고 있다.

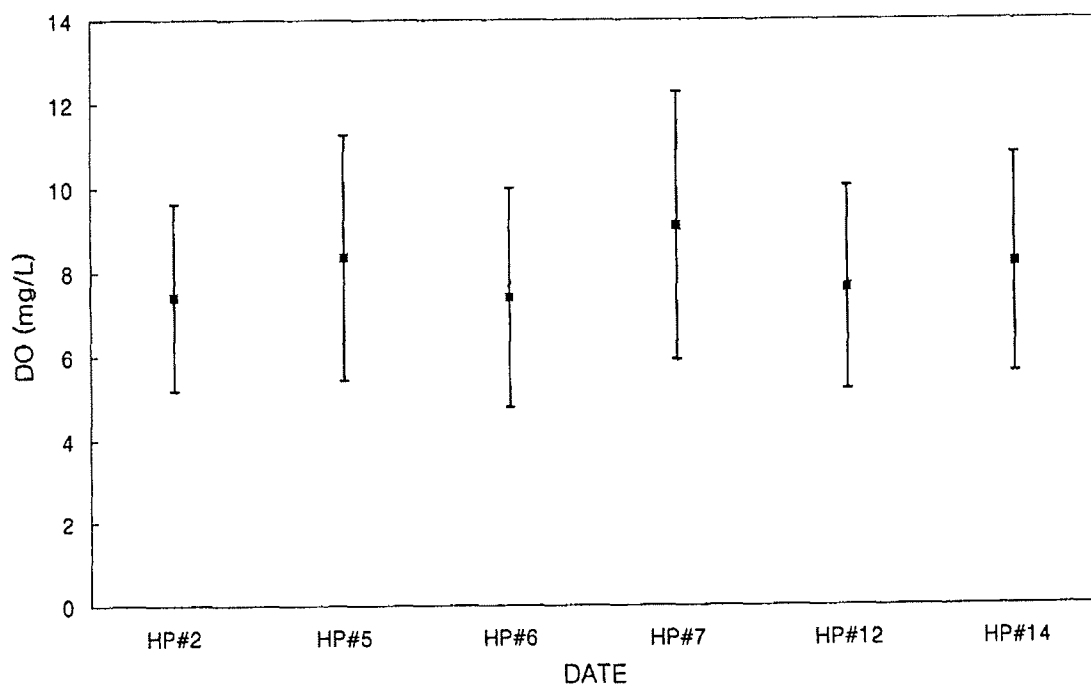
DO는 (그림 4-5)에서 보듯이 도시화가 진행되고 있어 생활오수의 영향을 많이 받는 HP#6 측정에서 가장 낮은 경향을 보이고 있다. 또한, pH의 변화에 비해 상대적으로 변동폭이 크다는 것을 알 수 있다.

TN의 농도변화는 (그림 4-6)에서와 같이, HP#6 소유역에서 가장 높은 농도를 나타나고 있으며, HP#2 소유역과 HP#6 소유역의 TN 변동폭이 상대적으로 크게 나타나고 있으며, 저수지 측정인 HP#5와 HP#12 측정의 경우 상대적으로 TN의 변동폭이 작게 나타나고 있음을 알 수 있다.

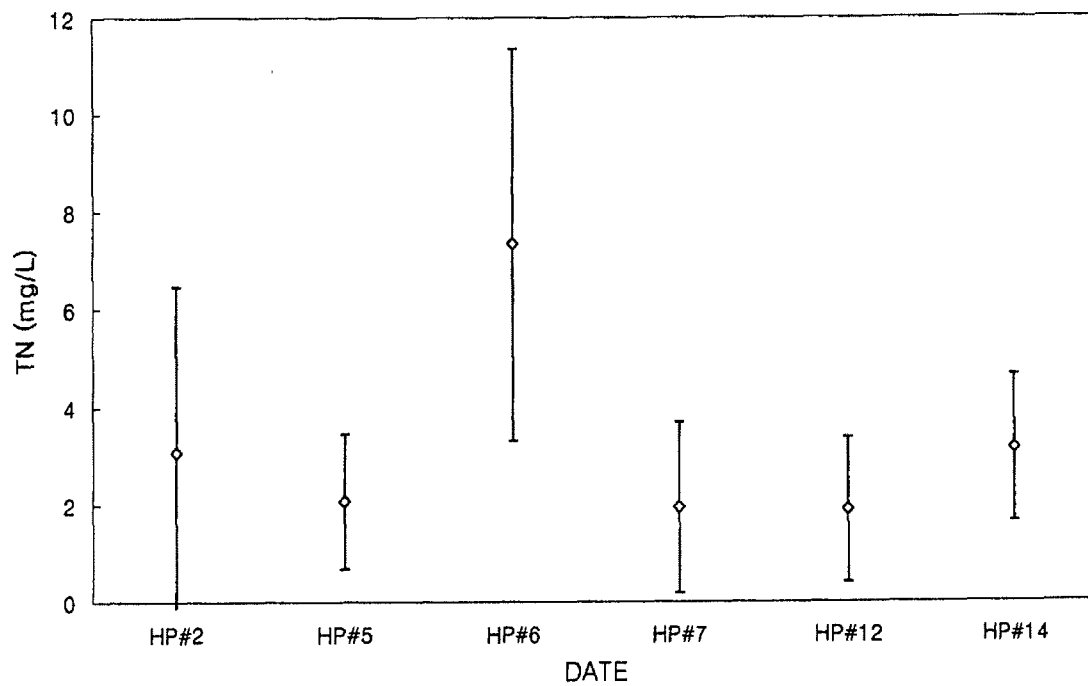
TP 농도변화는 TN의 농도변화에서와 마찬가지로 HP#6 소유역에서 가장 높은 농도를 나타나고 있으며, 다음으로 HP#14 소유역에서의 TP 농도가 높게 나타나고 있다. TP의 경우도 저수지 측정에서의 농도 변동폭이 상대적으로 작아 TN의 경향과 비슷하게 나타남을 알 수 있다. 또한, HP#6 소유역과 HP#14 소유역에서의 TP의 변동폭이 상대적으로 크게 나타나고 있다.



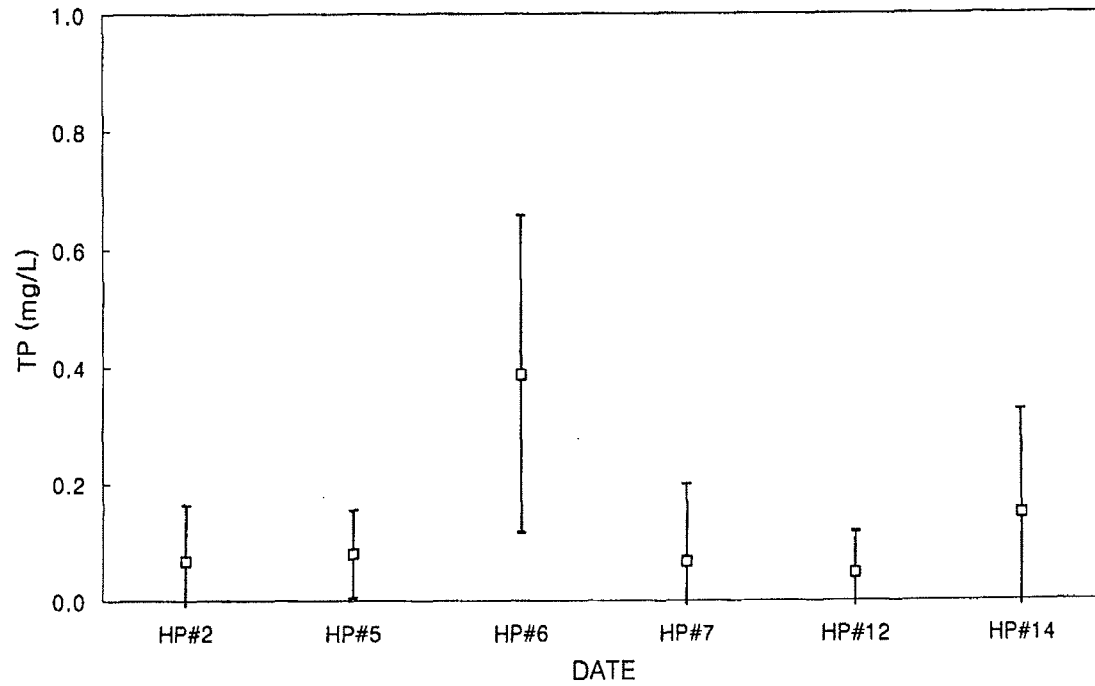
(그림 4-4) 소유역별 pH 변화 (1996년 ~ 2000년)



(그림 4-5) 소유역별 DO 농도변화 (1996년 ~ 2000년)



(그림 4-6) 소유역별 TN 농도변화 (1996년 ~ 2000년)



(그림 4-7) 소유역별 TP 농도변화 (1996년 ~ 2000년)

(그림 4-8)에서 (그림 4-13)은 자료기간에 대해 소유역별 수질분석 결과를 항목별로 나열하여 보여주고 있다. 자료기간은 1996년에서 2000년 10월까지이며, 소유역별로 온도, pH, DO, TN, TP의 5가지 항목에 대한 그래프를 도시하였다.

(그림 4-8)은 발안저수지 하단에 위치하여, 유역의 말단부근에 있는 HP#2 소유역의 수질항목별 농도변화를 보여주고 있다. 온도의 경우 해마다 뚜렷한 주기성을 보이는 것을 알수 있으며, pH의 경우 대략 6~8의 범위를 보여 중성을 나타내고 있다. DO는 2~12mg/ℓ로 비교적 변동폭이 크게 나타나고 있으며, TN의 경우 1996년부터 1999년까지는 0~5mg/ℓ의 범위를 보이고 있으나, 2000년의 경우 상대적으로 다른해에 비해 높게 나타나고 있다. TP의 경우 0.01~0.2mg/ℓ의 범위를 보이고 있으며, 1996년을 제외하고는 비교적 작은 범위에서 변화하고 있다.

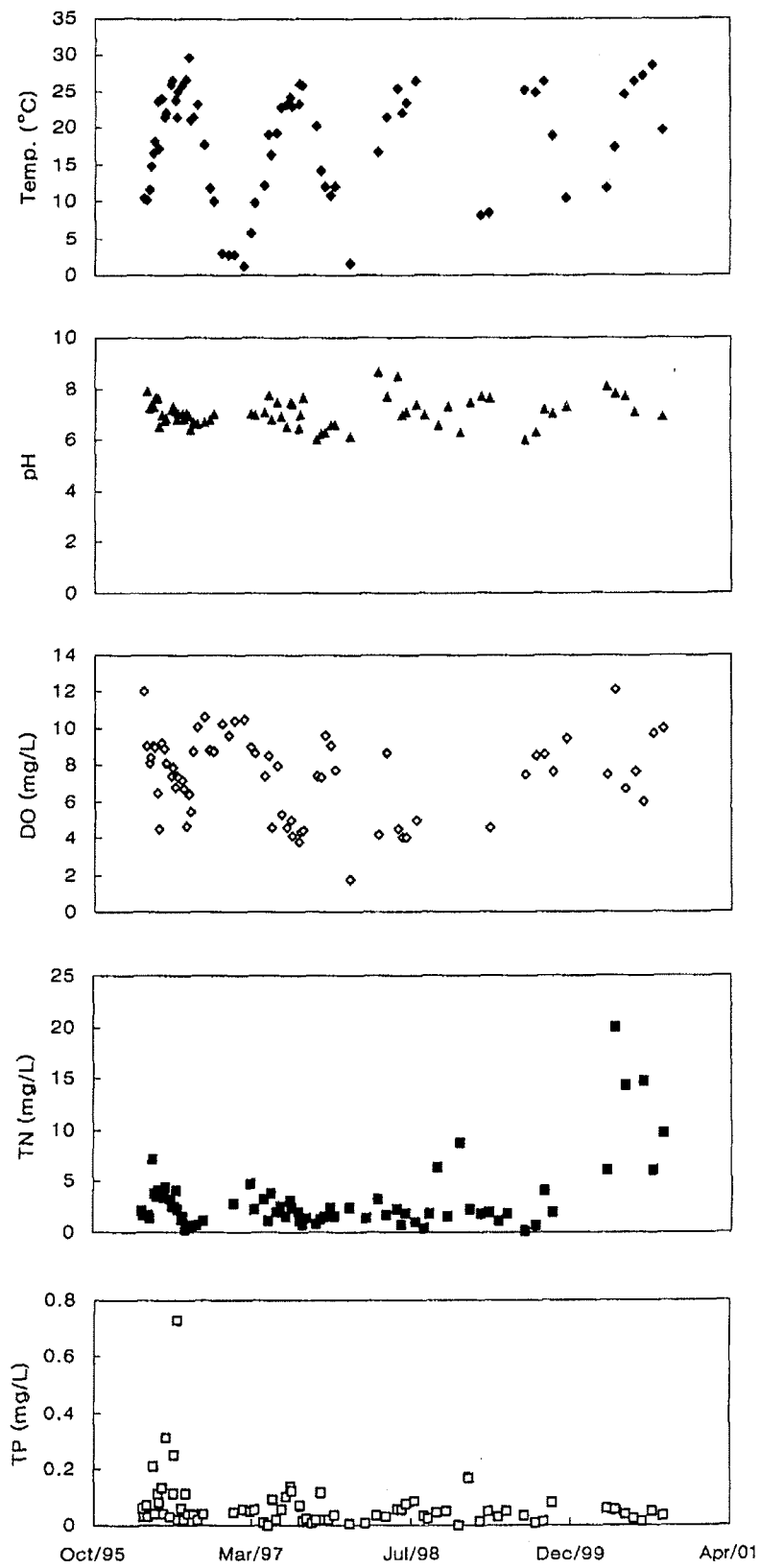
(그림 4-9)는 발안저수지에서 측정한 HP#5 소유역의 농도변화를 보여주고 있으며, (그림 4-8)과 같이 온도는 뚜렷한 주기성을 보이고 있다. pH의 경우 어느 정도의 주기성을 보이고 있으며, 온도의 주기성과 유사한 경향을 가지고 있는 것으로 조사되었다. DO의 경우 변동폭이 크며, TP의 경우 0.01~0.2mg/ℓ의 범위를 보이고 있다.

발안저수지 상단에 위치한 HP#6 소유역의 농도변화를 보여주고 있는 (그림 4-10)에서 TN과 TP의 농도가 다른 소유역에 비해 높게 나타나고 있다.

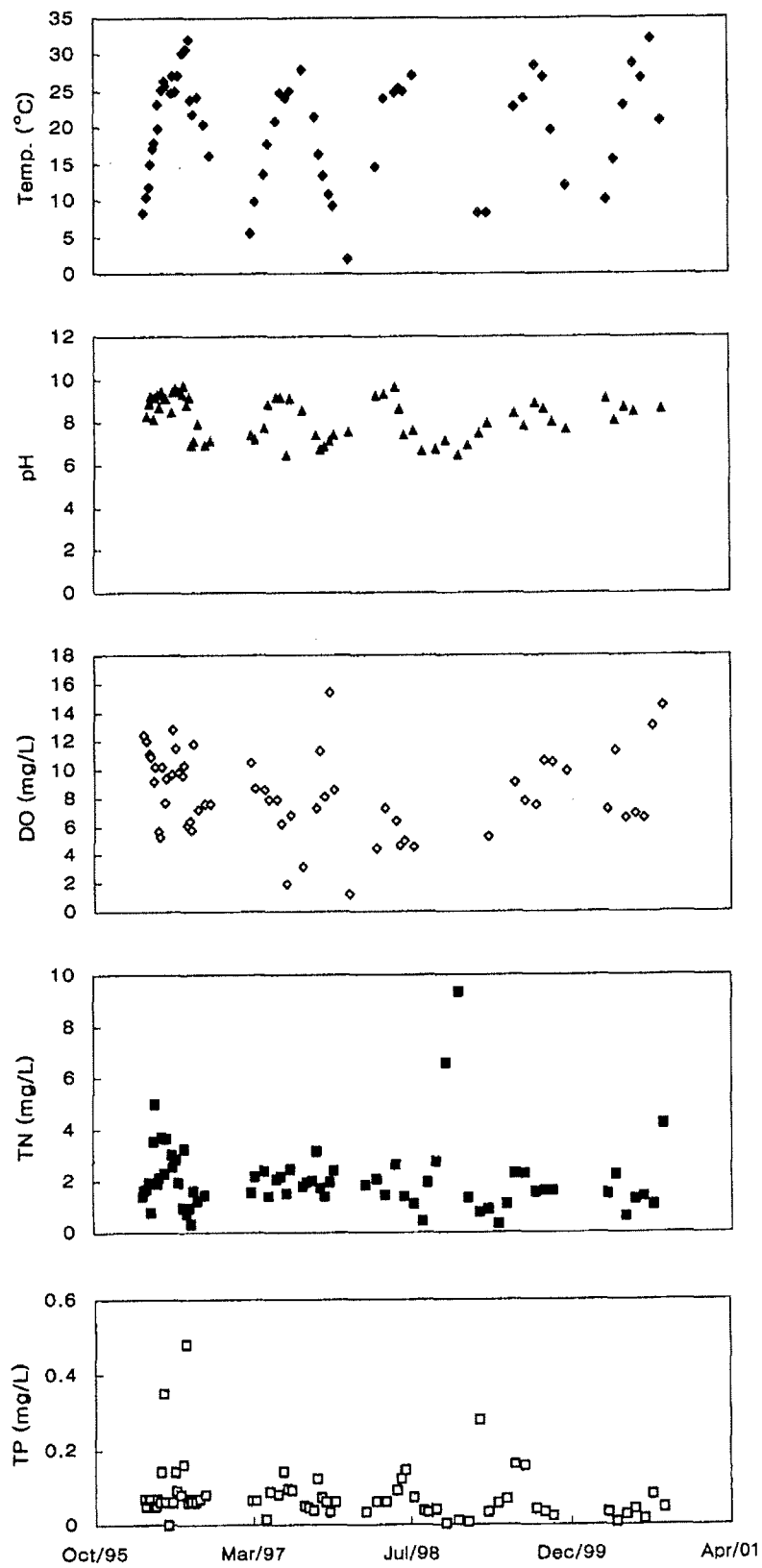
기천저수지 하단에 위치한 HP#7 소유역의 농도변화를 보여주고 있는 (그림 4-11)에서 TN은 0~4mg/ℓ의 비교적 높은 값을 나타내고 있으나, TP의 경우 대부분의 기간에서 0.01~0.1mg/ℓ의 범위를 나타냈다.

(그림 4-12)는 기천저수지에서 측정한 HP#12 소유역의 수질변화를 보여주고 있으며, 발안저수지 측점인 HP#5와 대체로 유사한 경향을 보였다.

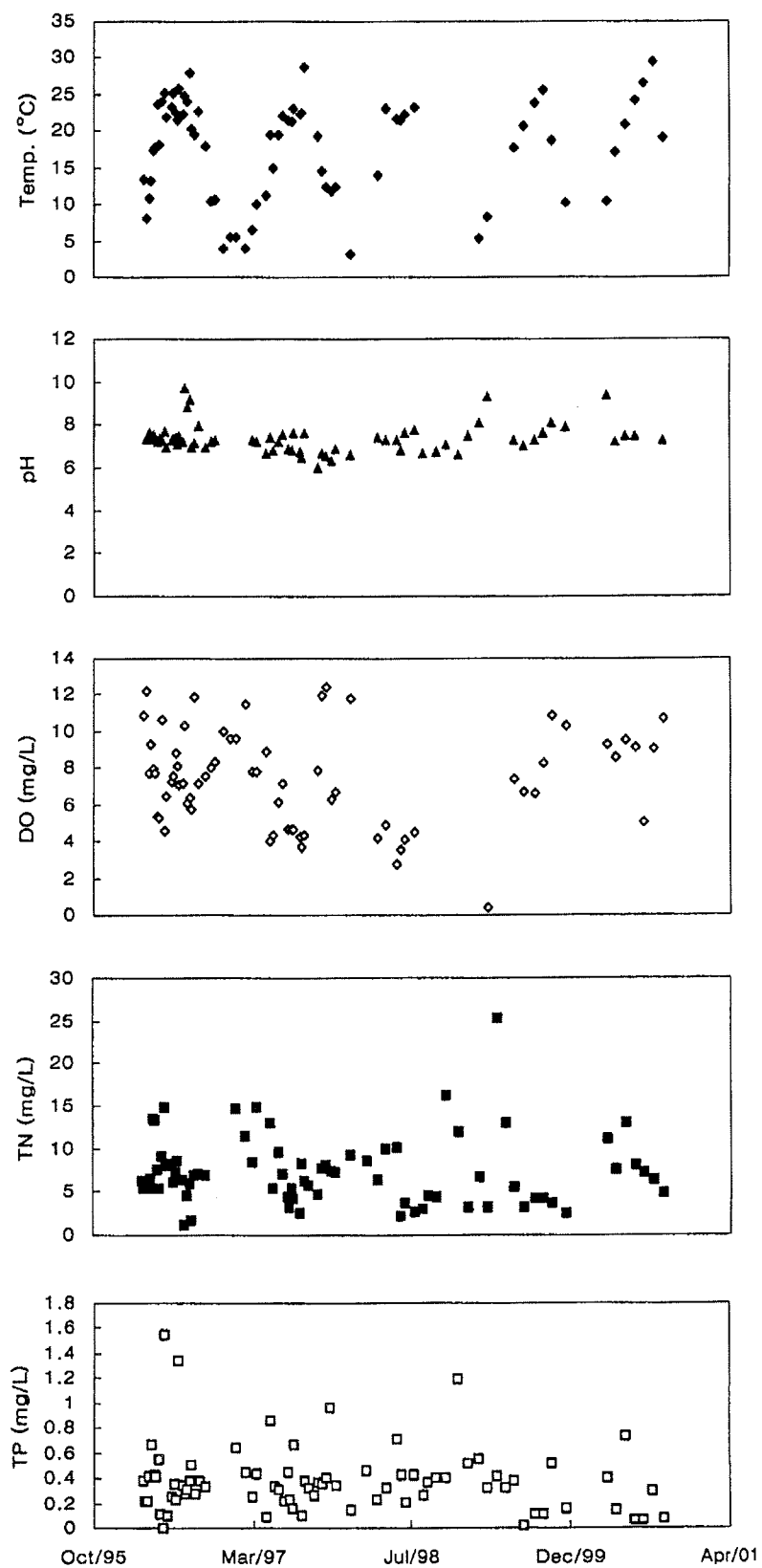
기천저수지 상단에 위치한 HP#14 소유역의 농도변화를 보여주고 있는 (그림 4-13)에서 TN의 농도가 1~8mg/ℓ의 높은 범위를 보여주고 있으며, TP의 농도도 0.01~0.6mg/ℓ의 비교적 높은 범위를 보여주고 있다.



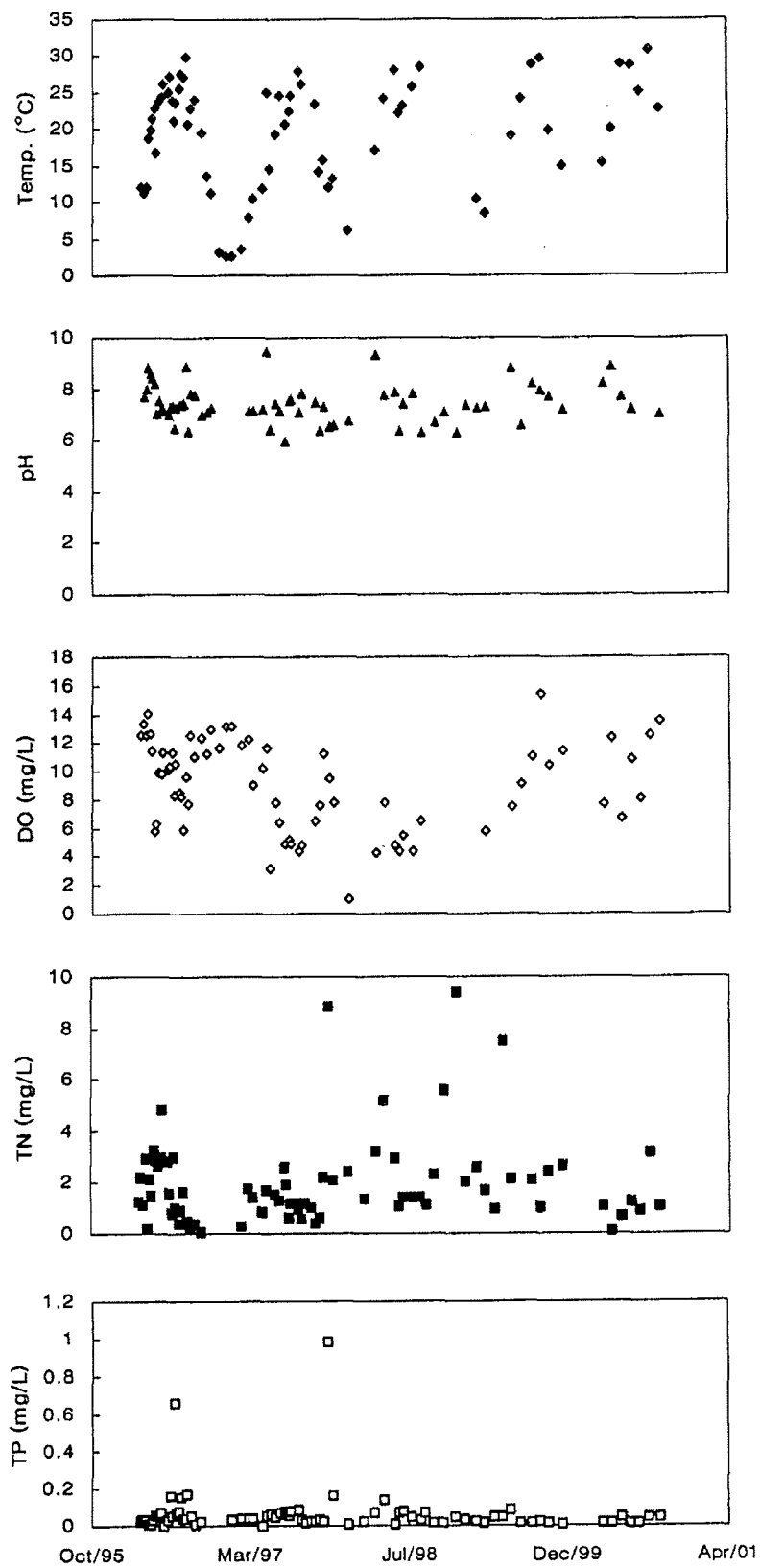
(그림 4-8) 수질항목별 농도변화 (HP#2)



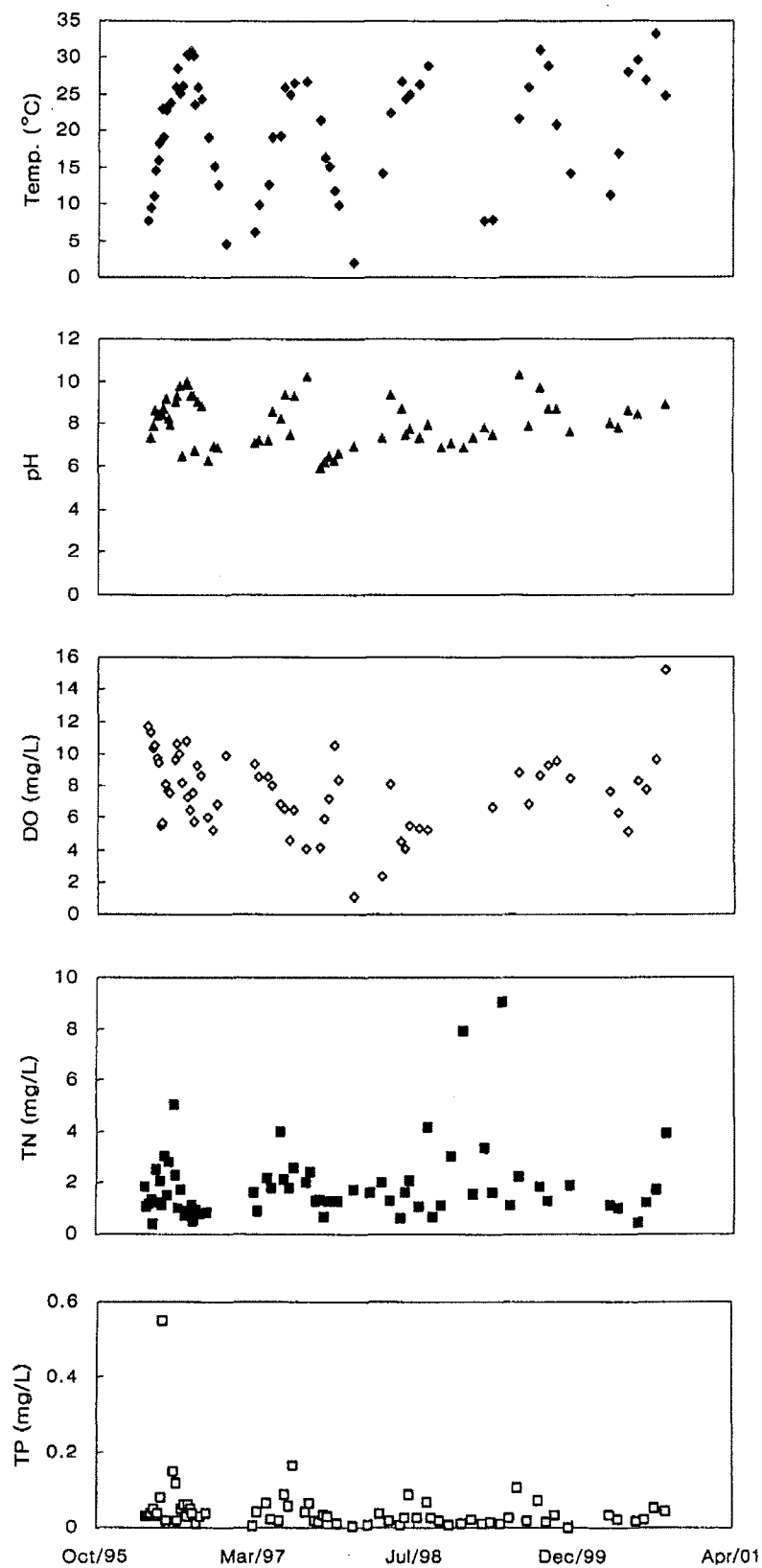
(그림 4-9) 수질항목별 농도변화 (HP#5)



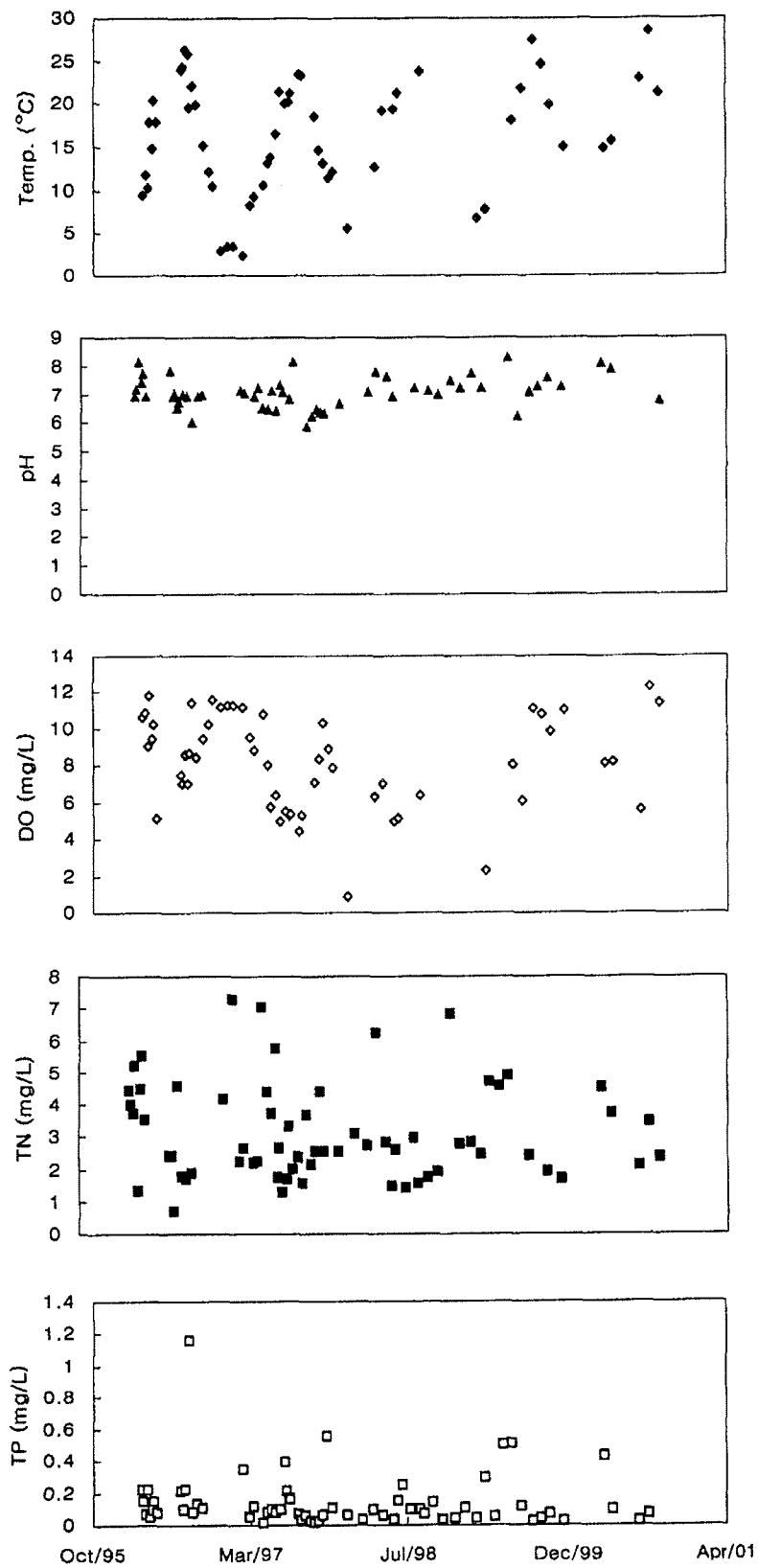
(그림 4-10) 수질항목별 농도변화 (HP#6)



(그림 4-11) 수질항목별 농도변화 (HP#7)



(그림 4-12) 수질항목별 농도변화 (HP#12)



(그림 4-13) 수질항목별 농도변화 (HP#14)

2. 저수지 저류효과로 인한 수질 농도 변화.

앞 절에서 살펴본 바와 같이 저수지에서의 수질은 하천에서의 수질측정값과는 다른 특성을 보이고 있으며, 저수지에서 발생하는 저류효과로 인해 저수지 상류와 하류에서의 수질도 차이를 보이게 된다.

본 연구에서는 저수지 상류와 하류, 저수지에서의 수질의 변화를 고찰하기 위해 기천저수지와 발안저수지를 대상으로 수질의 변화를 분석하였으며, <표 4-4>와 <표 4-5>는 1996년부터 2000년까지의 분석결과를 보여주고 있다. 여기서 얻어진 결과는 2주마다 샘플링한 시료와 폭우시 수시 샘플링한 시료를 모두 포함하고 있으며, SS, TN, TP의 세가지 항목에 대해 비교하였다.

<표 4-4>에서 기천저수지 하류인 HP#7에서의 SS 평균치는 16.2mg/ℓ, TN 1.9mg/ℓ, TP 0.066mg/ℓ 으로, 기천저수지 상류인 HP#14에서의 SS 평균치 34.7mg/ℓ, TN 3.1mg/ℓ, TP 0.147mg/ℓ 에 비해 현저히 작은 값을 보이고 있다. 기천저수지 하류의 HP#7 지점에서의 수질 측정값은 기천저수지 지점인 HP#12 지점에서의 수질측정값과 유사한 경향을 보이고 있다.

<표 4-5>에서 발안저수지로 유입되는 HP#6지점과 HP#7지점을 비교하여 보면, 기천저수지를 거쳐서 흘러나온 HP#7지점에 비해 HP#6지점의 수질측정값이 상대적으로 크게 나타남을 알 수 있고, 상류부에 비해 하류부인 HP#2지점의 값이 작게 나타나고 있다. 기천저수지의 경우와 마찬가지로 발안저수지 하류인 HP#2 지점에서의 수질측정값은 발안저수지 지점인 HP#5 지점에서의 수질측정값과 유사한 경향을 보이고 있다.

저수지의 수질과 저수지 하류부의 수질이 유사한 경향을 보이는 것은 기천저수지와 발안저수지 하류인 HP#7지점과 HP#2지점이 저수지에서 멀리 떨어지지 않은 곳에 위치하고 있으며, 유입지천이 없어 저수지 방류수의 영향을 크게 받고 있기 때문인 것으로 분석된다.

<표 4-4> 기천저수지 상하류의 수질변화 (1996년 ~ 2000년)

통계치	SS(mg/ℓ)			TN(mg/ℓ)			TP(mg/ℓ)		
	HP#14 상류	HP#12 기천지	HP#7 하류	HP#14 상류	HP#12 기천지	HP#7 하류	HP#14 상류	HP#12 기천지	HP#7 하류
평균	34.7	9.8	16.2	3.1	1.9	1.9	0.147	0.047	0.066
최소	0.3	0.2	0.1	0.1	0.4	0.1	0.015	0.001	0.001
최대	595.6	129.2	207.8	7.3	9.0	9.4	1.160	0.550	0.984
표준편차	109.8	16.8	36.4	1.5	1.5	1.8	0.178	0.070	0.132

<표 4-5> 발안저수지 상하류의 수질변화 (1996년 ~ 2000년)

통계치	SS(mg/ℓ)				TN(mg/ℓ)				TP(mg/ℓ)			
	HP#6 상류	HP#7 상류	HP#5 발안지	HP#2 하류	HP#6 상류	HP#7 상류	HP#5 발안지	HP#2 하류	HP#6 상류	HP#7 상류	HP#5 발안지	HP#2 하류
평균	74.9	16.2	10.0	12.7	7.3	1.9	2.1	3.1	0.387	0.066	0.080	0.068
최소	0.1	0.1	0.3	0.1	1.2	0.1	0.3	0.2	0.018	0.001	0.005	0.002
최대	2170	207.8	73.8	247.2	25.4	9.4	9.4	19.9	1.550	0.984	0.480	0.730
표준편차	293. 2	36.4	10.2	35.9	4.0	1.8	1.4	3.4	0.271	0.132	0.075	0.096

기천저수지와 발안저수지의 수질오염 저감효과를 분석하기 위해 상류부의 수질에 대한 하류부의 수질의 비율을 백분율로 분석하였다. <표 4-6>은 분석결과를 보여주고 있으며, 하류/상류의 농도백분율로 저수지의 저류효과를 표시하였으며, 백분율의 숫자가 작을수록 저수지에서의 저류효과가 큰 것으로 본다.

상류의 유입지천이 하나인 기천저수지의 경우, SS 46.69%, TN 61.29%, TP 44.90%로 TP의 저감효과가 가장 큰 것으로 나타났다. 상류의 유입지천이 HP#6, 7 두 개로 구성되어 있는 발안저수지에서는 HP#6으로부터 흘러든 유입지천의 경우, SS 16.95%, TN 42.47%, TP 17.57%로 SS와 TP 저류효과가 큰 것으로 나타나고

있으며, 이 경우 기천저수지에 비해 저감효과가 큰 것으로 나타났다. HP#7로부터 흘러든 유입지천의 경우, SS 78.39%, TN 163.16%, TP 103.03%로 SS 이외에는 저류효과가 없는 것으로 나타났다. 발안저수지에서는 기천저수지에서 저류되었다가 방류되어 비교적 수질이 양호한 HP#7 유입지천과 생활하수로 오염되어 비교적 수질이 나쁜 HP#6 유입지천이 흘러들어 상대적으로 HP#7 유입지천의 경우 발안저수지에서의 저류효과는 크지 않은 것으로 나타났다.

<표 4-6> 저수지 수질오염 저류효과 (1996년~2000년)

저수지명	하류 / 상류	하류/상류 농도백분율(%)		
		SS	TN	TP
기천저수지	HP#7 / HP#14	46.69	61.29	44.90
발안저수지	HP#2 / HP#6	16.95	42.47	17.57
	HP#2 / HP#7	78.39	163.16	103.03

3. 지하수 수질 모니터링

관개기간동안의 지하수위와 지하수의 수질변화를 모니터링하기 위해 설치된 GW#1, 2, 3 측점을 대상으로 1999년부터 2000년까지 2개년간 수질 모니터링을 실시하였으며, <표 4-7>에서 <표 4-9>는 각각 GW#1, 2, 3의 모니터링 결과를 보여주고 있다.

<표 4-7>에서 GW#1 측점의 경우 SS, TN, TP의 평균치는 각각 118.0, 2.31, 0.0213 mg/ℓ 로 조사되었다. SS의 경우 99년 초의 값이 높은 경향을 보여 자료기간 동안의 평균치와 표준편차가 높게 나타났다.

<표 4-8>에서 GW#2 측점의 경우, SS, TN, TP의 평균치는 각각 32.8, 1.8, 0.019 mg/ℓ 로 조사되어 GW#1 측점에 비해 수질이 양호한 것으로 나타났다.

<표 4-9>에서 GW#3 측점의 경우, SS, TN, TP의 평균치는 각각 43.3, 1.4,

0.0216 mg/ℓ 로 조사되어 GW#1 측점에 비해 수질이 양호하며, GW#2 측점과 유사한 값을 보이고 있다.

GW#2, 3의 측점에서도 GW#1 측점과 마찬가지로 모니터링 초기의 SS값이 상대적으로 매우 높게 나타나고 있다. 지하수의 SS값이 이처럼 높게 나타나는 이유는 지하수 샘플링시 흰색 이물질이 많기 때문이며 지속적인 고찰이 요구된다.

<표 4-7> 지하수 수질 모니터링 결과 (GW#1)

구분	SS	TN	TP
99/01/22	319.40	2.520	0.0083
99/04/01	831.83	5.278	0.0232
99/05/06	322.17	1.787	0.0047
99/06/02	83.50	0.737	0.0222
99/07/30	35.00	4.120	0.0040
99/09/01	27.24	2.910	0.0337
99/09/28	10.20	1.450	0.0214
99/11/02	13.29	-	0.0003
99/12/14	24.56	-	0.0239
00/03/29	6.20	3.431	0.0355
00/05/31	31.50	1.250	0.0232
00/07/04	8.30	2.237	0.0221
00/07/25	22.40	-	0.0195
00/08/23	30.40	1.194	0.0475
00/09/20	4.10	0.811	0.0291
평균	118.01	2.310	0.0213
표준편차	223.80	1.410	0.0128
최대	831.83	5.278	0.0475
최소	4.10	0.737	0.0003

<표 4-8> 지하수 수질 모니터링 결과 (GW#2)

구분	SS	TN	TP
99/01/22	101.60	0.224	
99/04/01	59.54	9.772	0.005
99/05/06	73.00	1.871	0.004
99/06/02	10.13	0.014	0.005
99/07/30	32.86	1.830	0.004
99/09/01	24.48	1.510	0.021
99/09/28	20.96	0.780	0.035
99/11/02	21.94	0.820	0.024
99/12/14	43.56		0.021
00/03/29	13.60	2.141	0.006
00/05/31	13.50	0.424	0.023
00/07/04	5.60	0.700	0.021
00/07/25	13.40	2.530	0.016
00/08/23	43.60	0.783	0.052
00/09/20	13.80		0.031
평균	32.77	1.800	0.0190
표준편차	27.20	2.518	0.0140
최대	101.60	9.772	0.0516
최소	5.60	0.014	0.0039

<표 4-9> 지하수 수질 모니터링 결과 (GW#3)

구분	SS	TN	TP
99/01/22	189.40	0.280	0.003
99/04/01	47.89	5.838	0.011
99/05/06	20.71	0.877	0.008
99/06/02	7.50	0.387	0.029
99/07/30	20.64	1.890	0.005
99/09/01	16.15	1.570	0.028
99/09/28	10.13	0.420	0.019
99/11/02	10.00		0.003
99/12/14	48.25		0.020
00/03/29	38.10	3.101	0.020
00/05/31	11.40	0.178	0.013
00/07/04	15.00	0.814	0.020
00/07/25	141.10	0.673	0.061
00/08/23	67.70	0.782	0.051
00/09/20	5.80		0.032
평균	43.32	1.401	0.0216
표준편차	53.49	1.627	0.0169
최대	189.40	5.838	0.0612
최소	5.80	0.178	0.0031

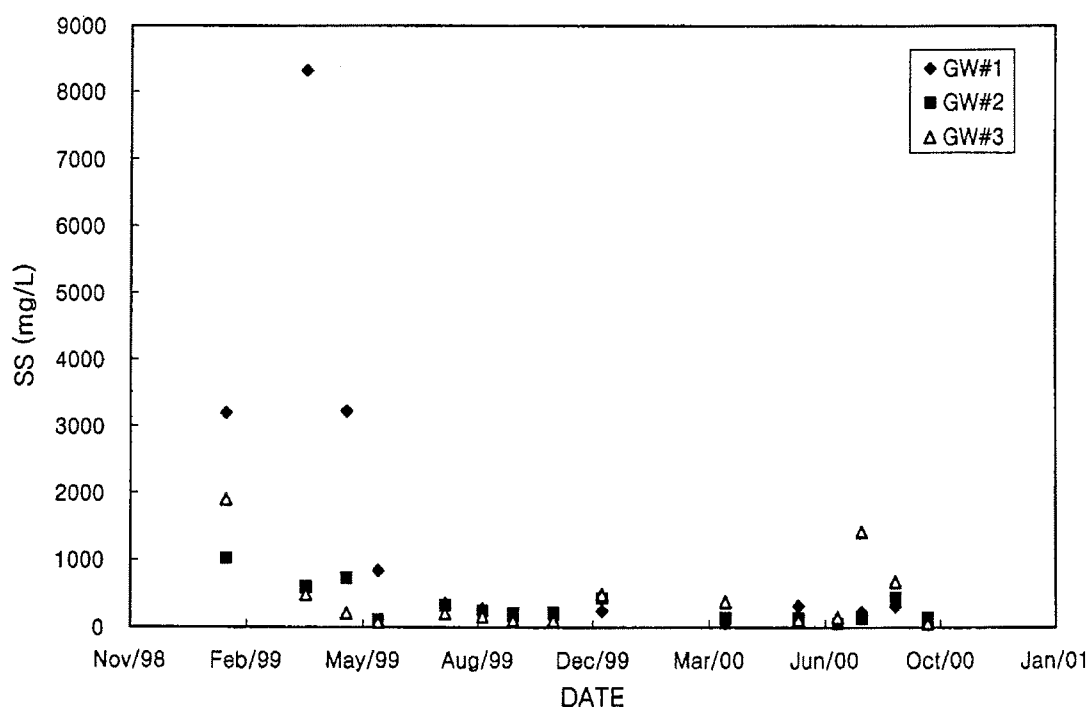
(그림 4-14)에서 (그림 4-16)은 GW#1, 2, 3의 수질 측정값을 항목별로 함께 도시하여 보여주고 있다.

SS는 (그림 4-14)에서와 같이 모니터링 초기에 높은 측정값을 보여주고 있으며, 나머지 자료기간에서는 뚜렷한 특징을 보이지 않고 있다.

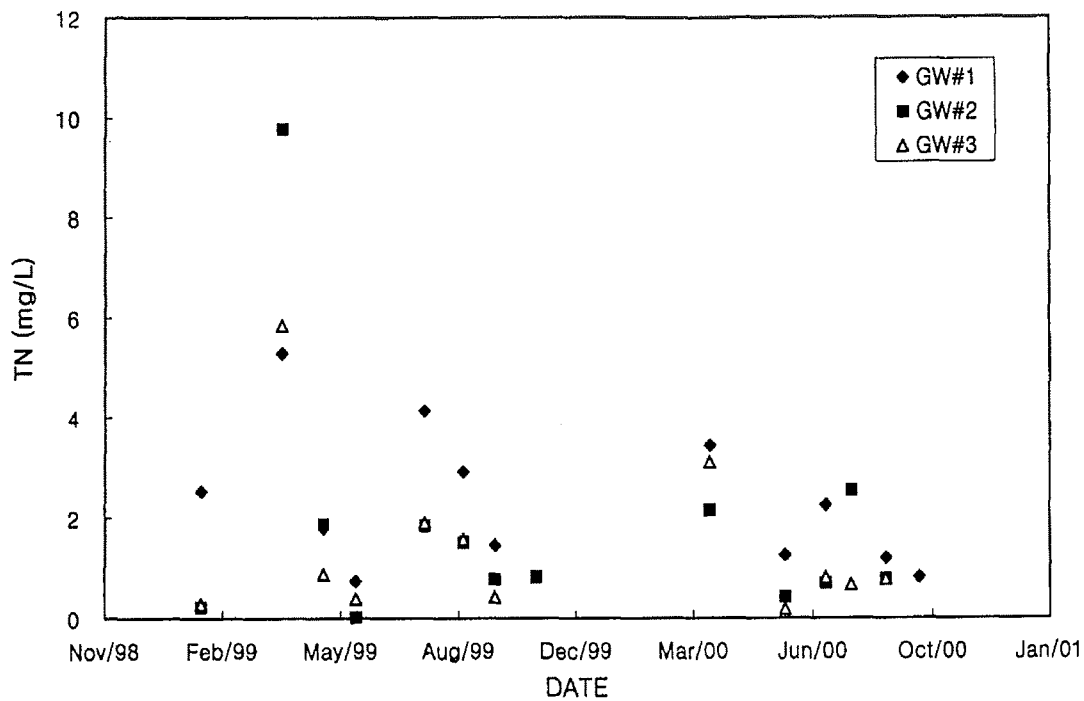
TN은 (그림 4-15)에서 나타낸 바와 같이 GW#1 측점에 비해 GW#2, 3 측점의 값이 대체로 낮은 경향을 보이고 있으며, SS와 마찬가지로 모니터링 초기에 비교적

높은 측정값을 보였다. 또한, 관개기간에 측정된 값이 비관개기간에 비해 높은 경향을 보이고 있는 것으로 나타났다.

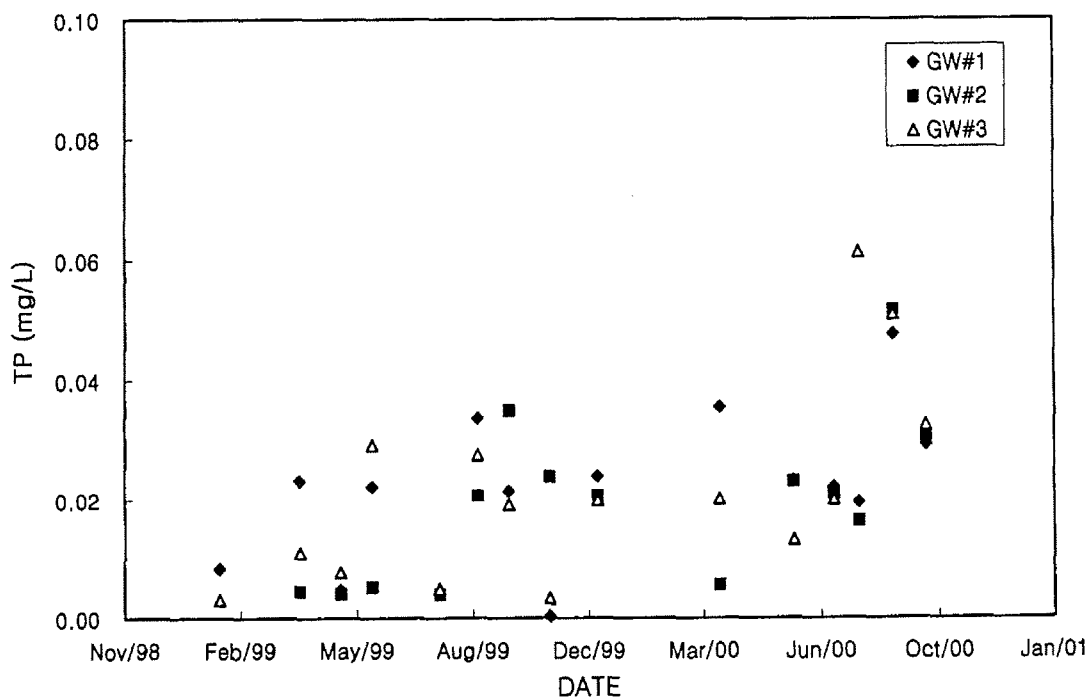
TP의 수질항목값을 보여주고 있는 (그림 4-16)에서는 모니터링 초기 관정굴착의 영향을 받고 있지 않은 것으로 나타났으며, 관개기간에 측정된 값이 비관개기에 비해 상대적으로 높은 값을 보이고 있으나, 뚜렷한 차이를 보이고 있지는 않은 것으로 나타났다. TP의 경우 모든 측정에서의 측정값이 0~0.06mg/ℓ의 범위를 보여, 하천수나 저수지에서의 수질에 비해 매우 낮은 값을 보이고 있음을 알 수 있다.



(그림 4-14) 지하수 측정별 SS 비교



(그림 4-15) 지하수 측정별 TN 비교



(그림 4-16) 지하수 측정별 TP 비교

제 4 절 오염부하량 산정

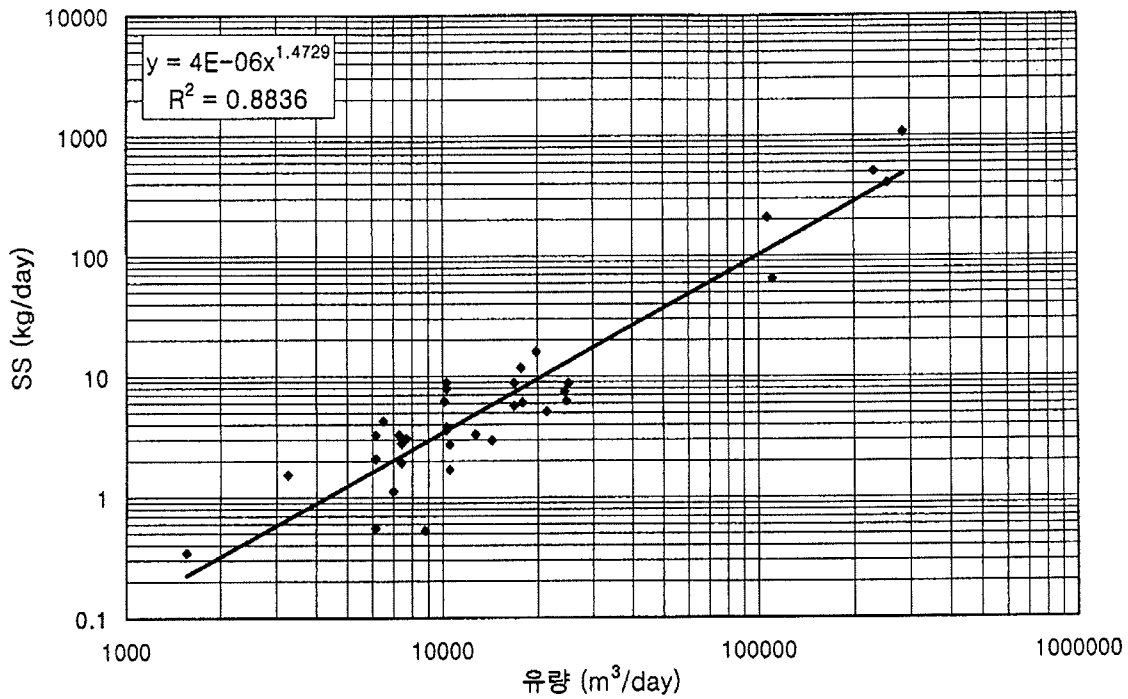
1. 유량-부하량 관계

하천측점에서의 오염부하량을 측정하기 위해 측점별로 SS, TN, TP에 대한 오염부하량(L)과 유량(Q)의 회귀식인 L-Q식을 산정하였으며, L-Q식 산정을 위해 이용된 자료는 1996년부터 2000년까지 측정된 자료를 이용하였으며, 특이치는 제외하였다.

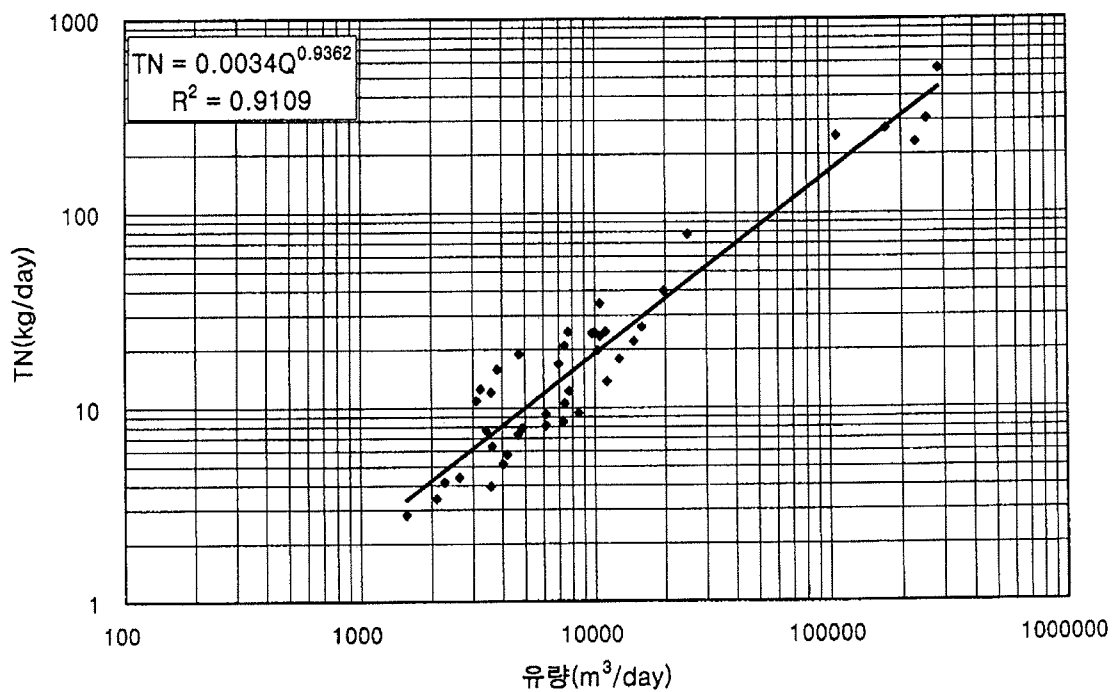
<표 4-10>은 각 측점별로 SS, TN, TP에 대한 L-Q관계식과 결정계수(R^2)값을 보여주고 있다. 산정된 L-Q식은 <표 4-10>에서 나타낸 바와 같으며, SS의 경우 결정계수가 0.8598~0.9418의 범위를 보였으며, TN의 경우 0.8639~0.9299, TP의 경우 0.8964~0.9232의 범위를 보였다. (그림 4-17)에서 (그림 4-28)은 측점별 SS, TN, TP에 대한 L-Q관계를 보여주고 있다.

<표 4-10> 측점별 L-Q 관계식

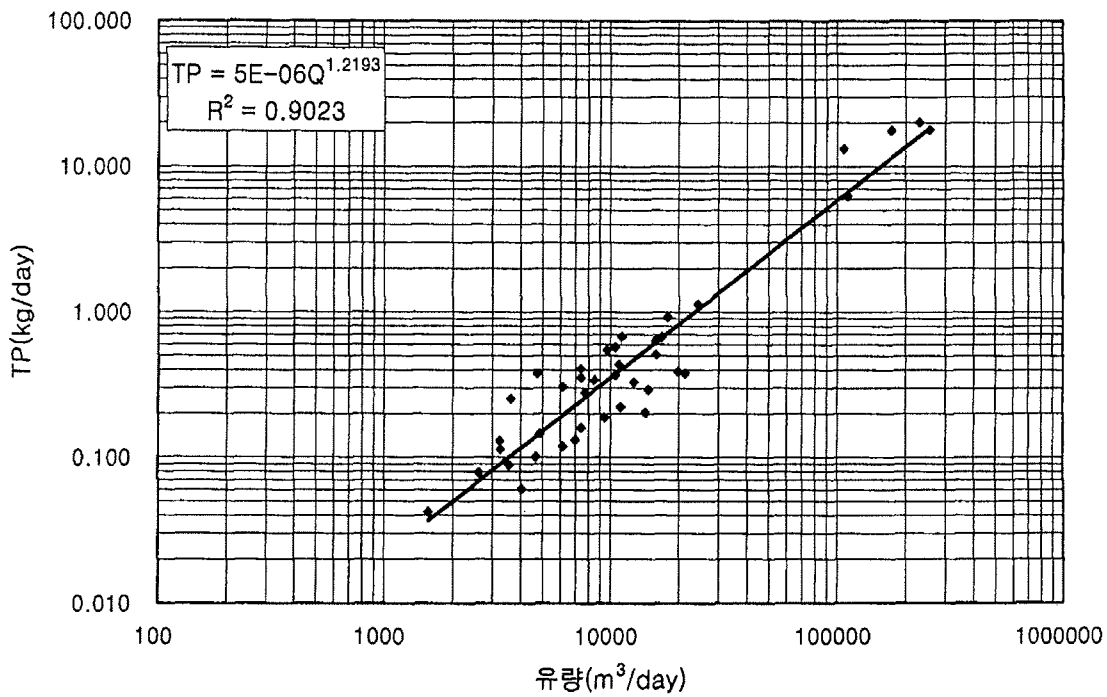
소유역	L-Q 관계식	R^2
HP#2	SS = $4 \times 10^{-6} Q^{1.4729}$	0.8836
	TN = $0.0034 Q^{0.9632}$	0.9109
	TP = $5 \times 10^{-6} Q^{1.2193}$	0.9023
HP#6	SS = $0.0002 Q^{1.4868}$	0.9231
	TN = $0.0256 Q^{0.8569}$	0.9215
	TP = $5 \times 10^{-4} Q^{0.9687}$	0.9232
HP#7	SS = $7 \times 10^{-7} Q^{1.9281}$	0.8598
	TN = $0.0019 Q^{0.9926}$	0.8639
	TP = $5 \times 10^{-6} Q^{1.2413}$	0.8964
HP#14	SS = $0.0329 Q^{1.10431}$	0.9418
	TN = $0.0038 Q^{0.9717}$	0.9299
	TP = $3 \times 10^{-5} Q^{1.1314}$	0.9034



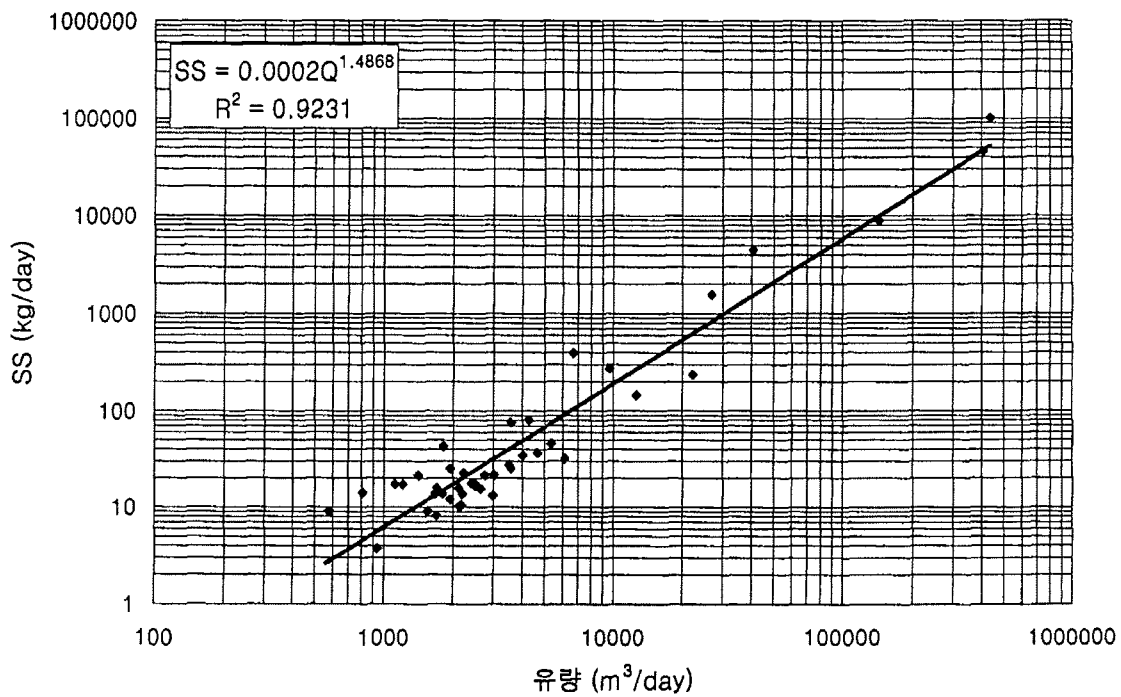
(그림 4-17) HP#2 지점의 유량-부하량 관계 (SS)



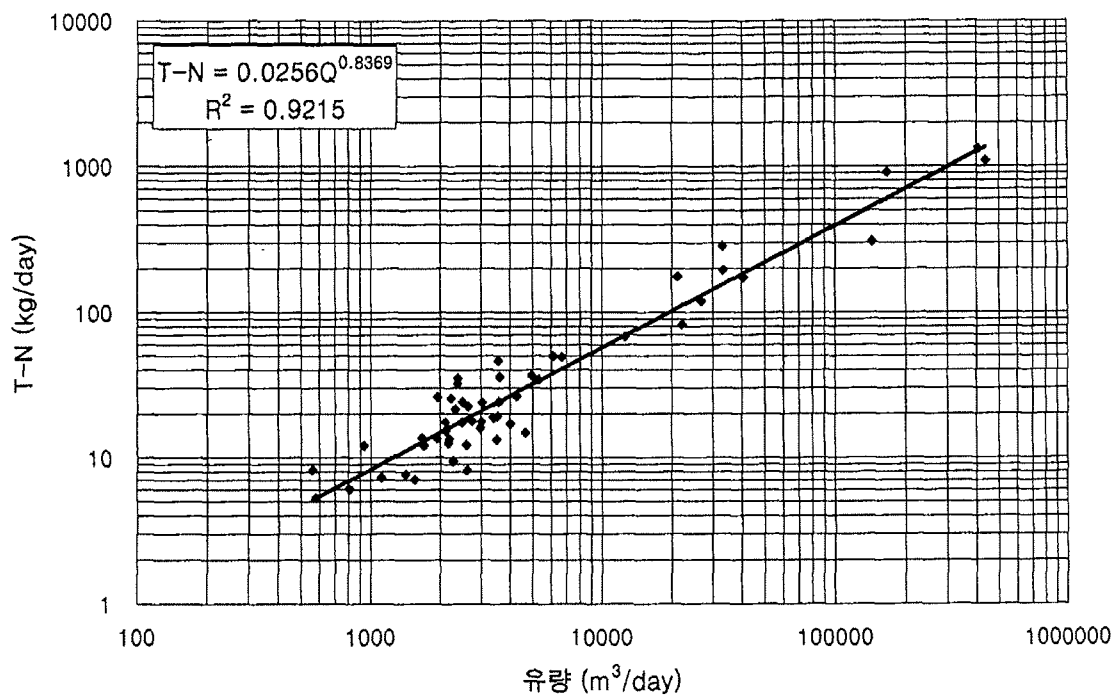
(그림 4-18) HP#2 지점의 유량-부하량 관계 (TN)



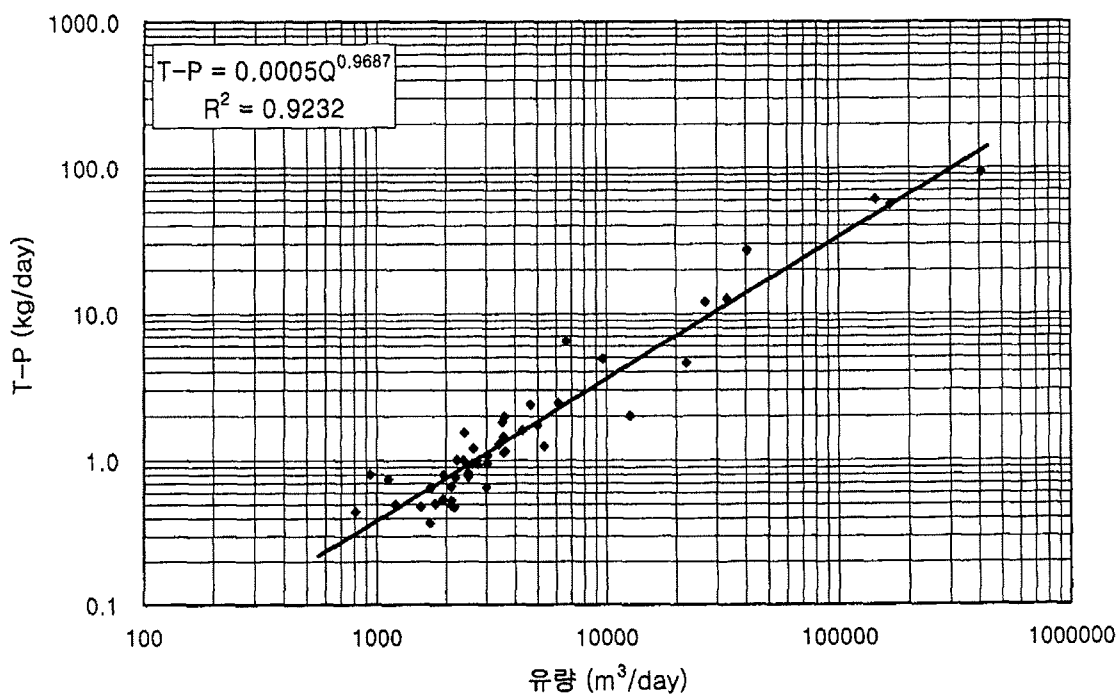
(그림 4-19) HP#2 지점의 유량-부하량 관계 (TP)



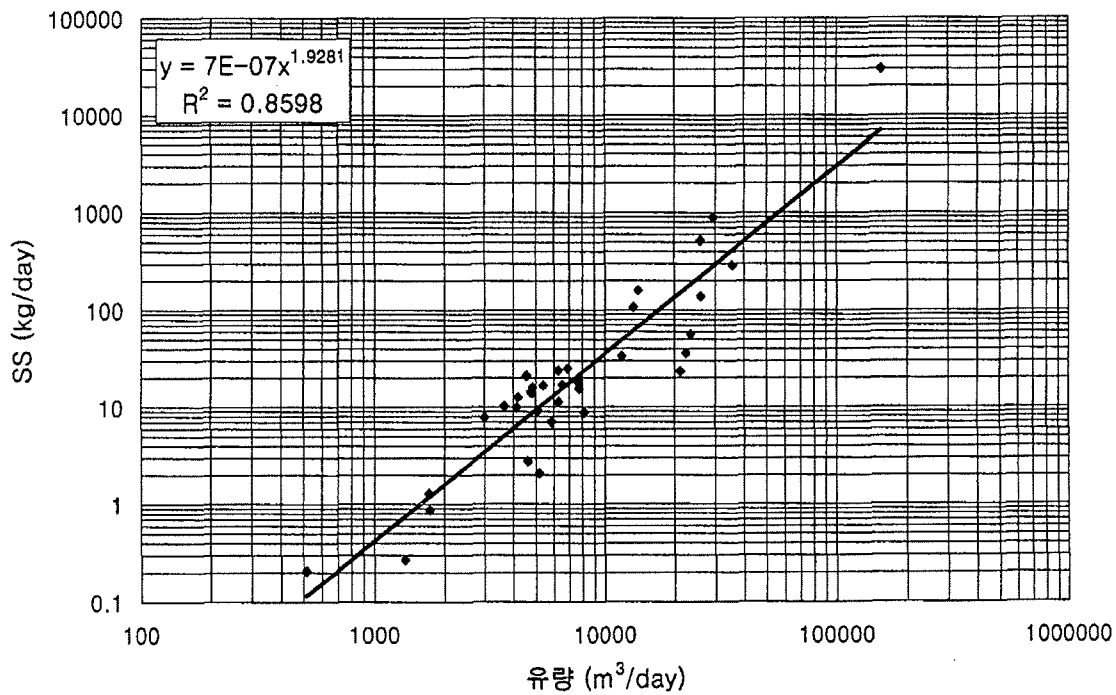
(그림 4-20) HP#6 지점의 유량-부하량 관계 (SS)



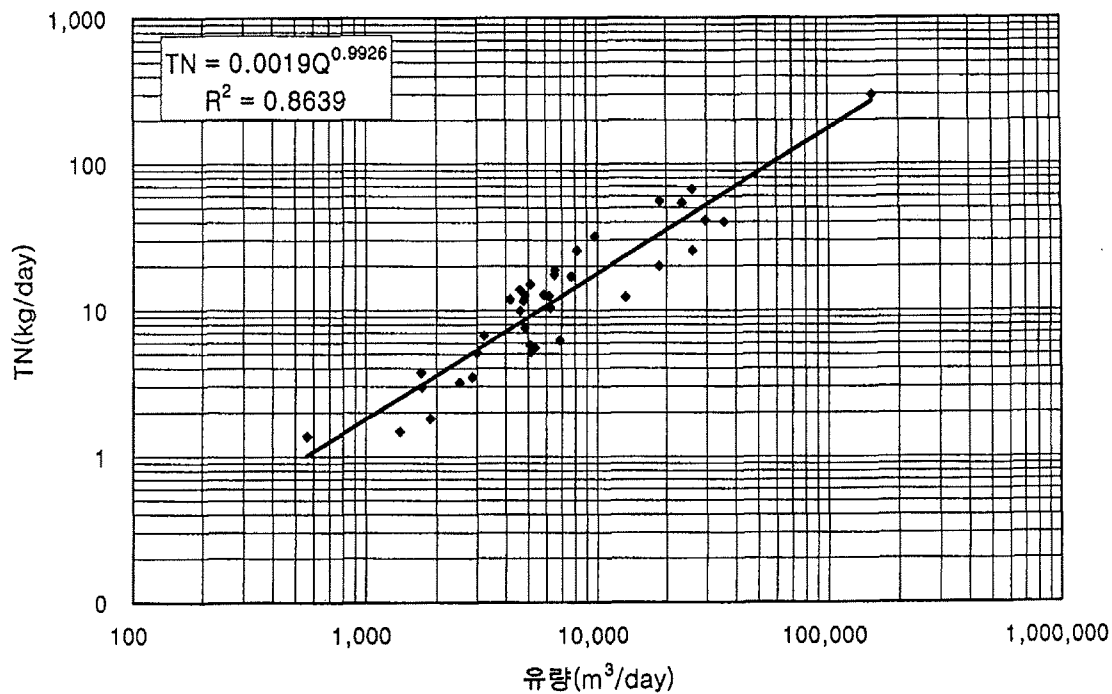
(그림 4-21) HP#6 지점의 유량-부하량 관계 (TN)



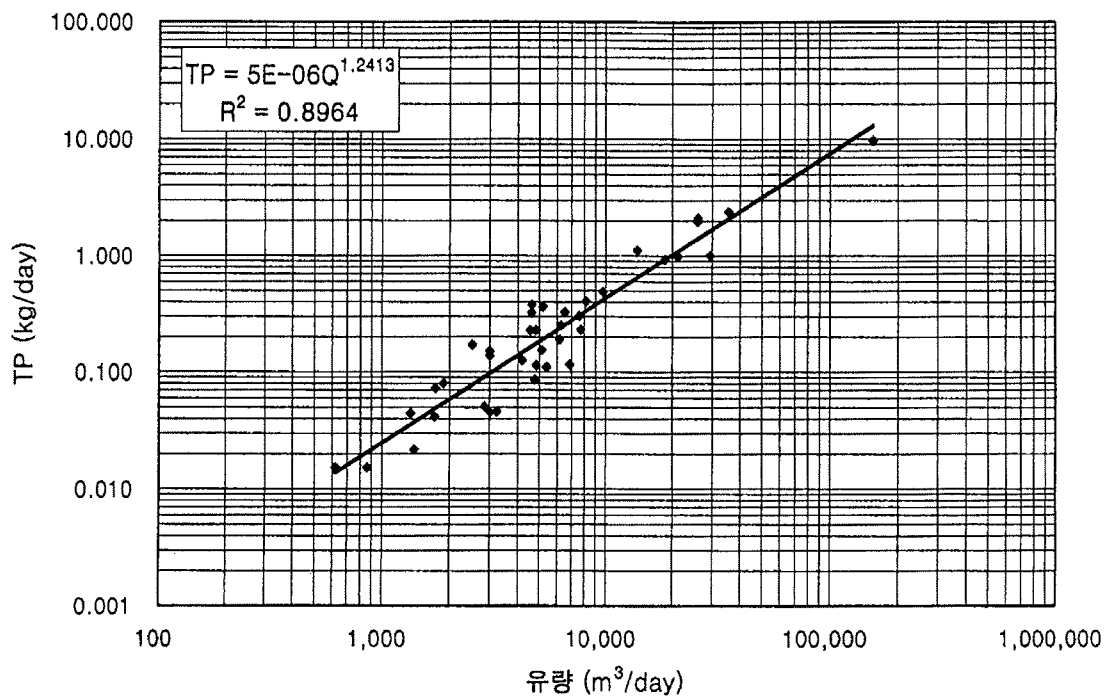
(그림 4-22) HP#6 지점의 유량-부하량 관계 (TP)



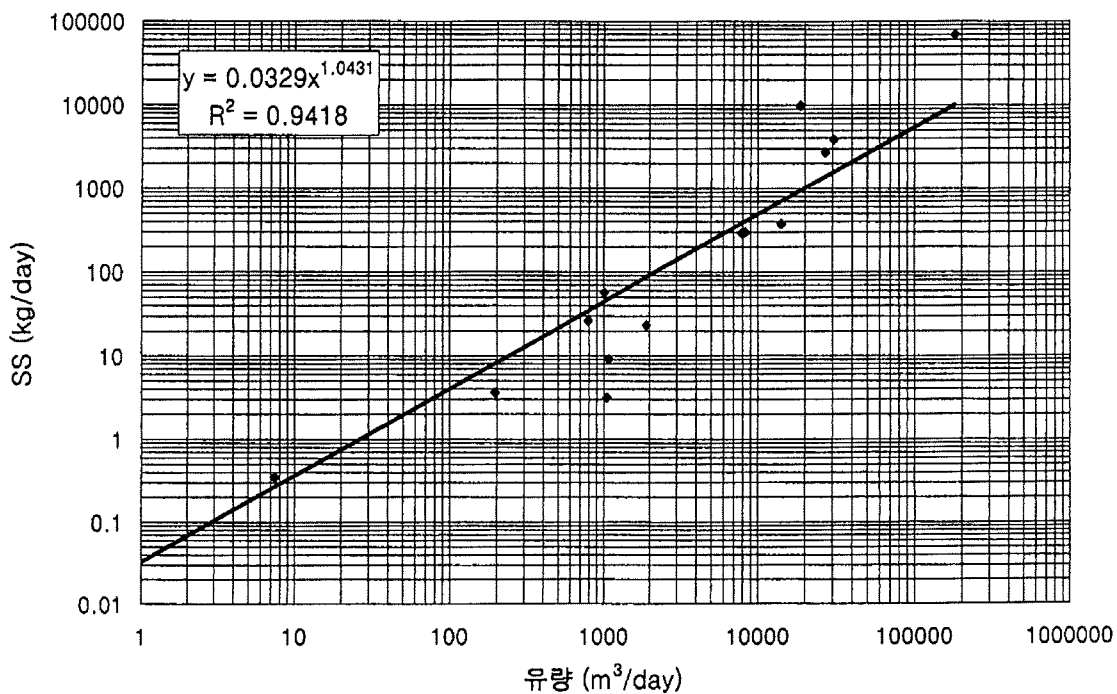
(그림 4-23) HP#7 지점의 유량-부하량 관계 (SS)



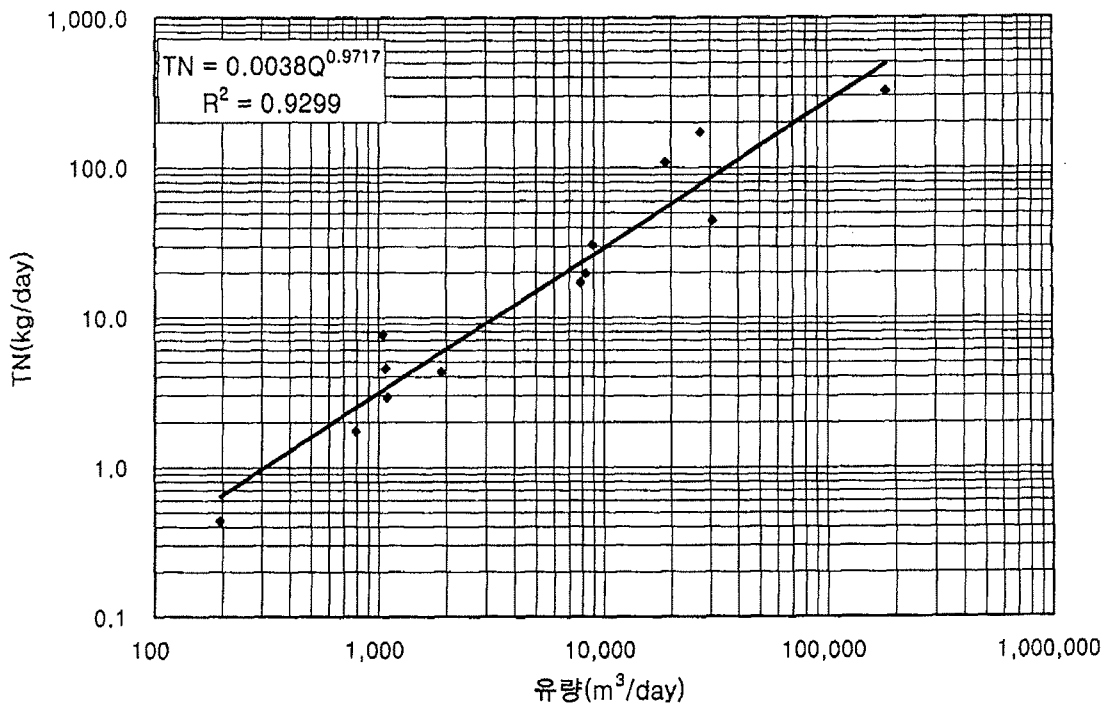
(그림 4-24) HP#7 지점의 유량-부하량 관계 (TN)



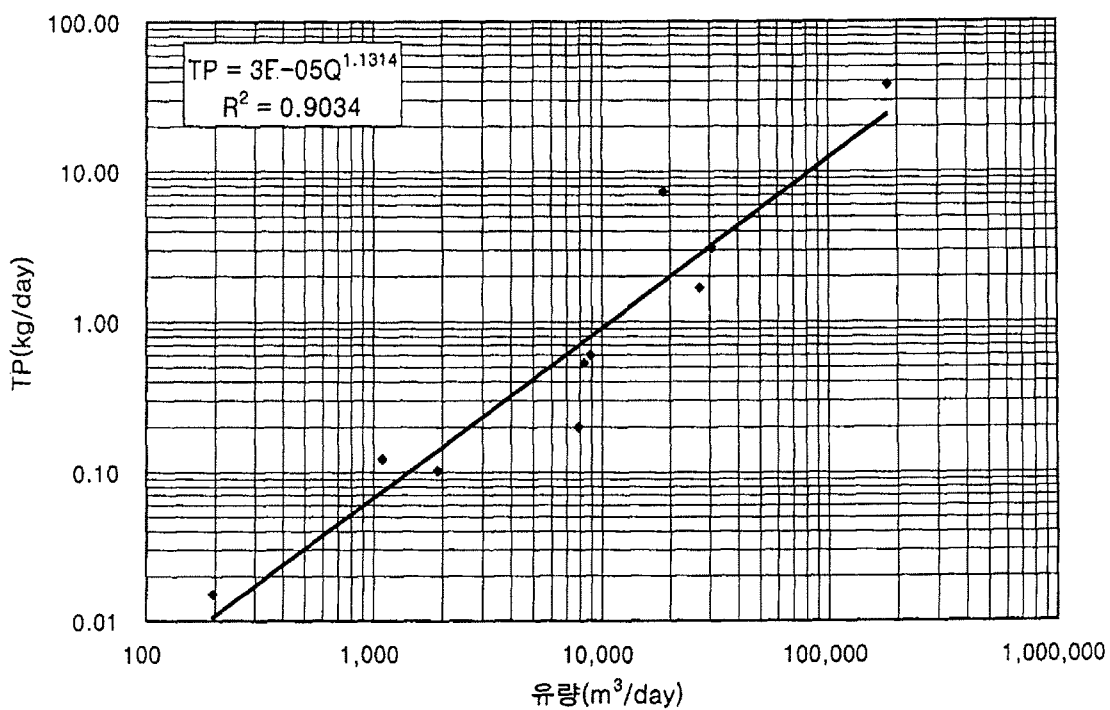
(그림 4-25) HP#7 지점의 유량-부하량 관계 (TP)



(그림 4-26) HP#14 지점의 유량-부하량 관계 (SS)



(그림 4-27) HP#14 지점의 유량-부하량 관계 (TN)



(그림 4-28) HP#14 지점의 유량-부하량 관계 (TP)

2. 소유역별 오염부하량

하천수문, 수질 측정인 HP#2, 6, 7, 14 소유역을 대상으로 유역으로부터의 오염 부하량을 산정하였다. 유량측정과 수질항목별 농도측정을 통해 얻어진 L-Q관계식을 이용해 각 소유역별로 일별 오염부하량을 산정하였으며, 수질항목별로 자료기간 동안의 평균치를 구하여 일평균 부하량을 산정하였다.

<표 4-11>은 소유역별 측정일수와 일평균유량과 수질항목별 일평균부하량을 보여주고 있다. 자료기간은 HP#2 소유역 1,400일, HP#6 소유역 1,325일, HP#7 소유역 1,190일, HP#14 소유역 343일로 나타났으며, HP#14 소유역의 경우 폭우시 기기 유실과 기기고장으로 인한 결측기간이 길어 상대적으로 매우 짧은 자료기간을 보였다.

유역의 말단부근에 위치한 HP#2 소유역에서의 일평균유량이 30.87 천톤으로 가장 높은 값을 보였으며, HP#6 소유역에서의 일평균유량이 9.07 천톤으로 가장 작은 값을 보였다. 수질항목별 일평균부하량을 살펴보면, SS의 경우 HP#6 소유역에서의 일평균부하량이 1505.82kg으로 가장 높았으며, HP#2 소유역에서 44.81kg으로 가장 낮은 값을 보였다. TN의 경우 HP#2 소유역에서 67.19kg으로 가장 높았으며, HP#7 소유역에서 23.73kg으로 가장 작은 값을 보였다. TP의 경우 HP#14 소유역에서 3.38kg으로 가장 높은 값을 나타냈으며, HP#7 소유역에서 1.15kg으로 가장 작은 값을 보였다. 영양물질의 경우 HP#7 소유역에서의 오염부하량이 가장 낮은 것으로 조사되었으며, HP#6 소유역의 경우 유역면적에 비해 오염부하량이 상대적으로 매우 높게 나타났다.

유역면적을 고려할 경우 저수지 하류부에 위치한 HP#2, HP#7 소유역의 경우 저수지 상류에 위치한 HP#6, HP#14 소유역에 비해 상대적으로 오염부하량이 작은 것으로 조사되었다.

HP#14 소유역에서의 SS 부하량이 상대적으로 매우 높게 나타난 것은 고수위에서의 자료가 많지 않은 관계로, 고수위에서의 유사부하량이 과다 추정되었기 때문인 것으로 풀이된다.

<표 4-11> 소유역별 오염부하량

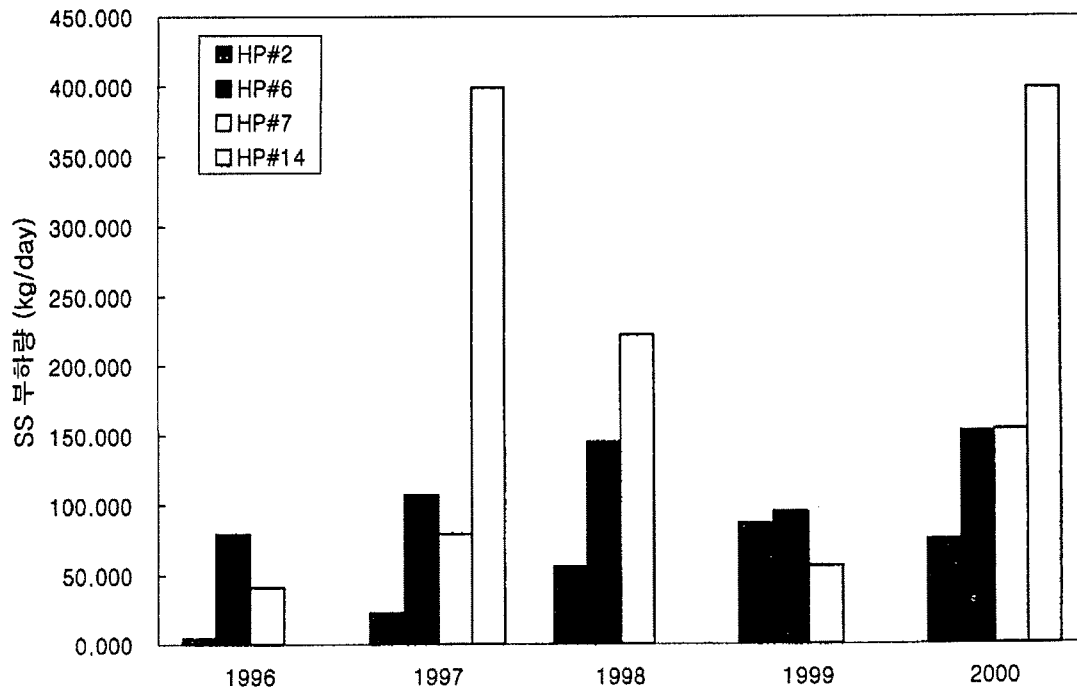
소유역	측정일수 (day)	일평균유량 (10 ³ m ³ /day)	수 질 항 목	일평균부하량 (kg/day)
HP#2	1,400	30.87	SS	48.81
			TN	67.19
			TP	2.24
HP#6	1,325	9.07	SS	111.98
			TN	52.11
			TP	3.25
HP#7	1,190	13.61	SS	101.16
			TN	23.73
			TP	1.15
HP#14	343	9.53	SS	1505.82
			TN	26.56
			TP	3.38

자료기간 동안의 연도별 소유역별 오염부하량은 <표 4-12>와 같으며, (그림 4-29)에서 (그림 4-31)은 수질항목에 따른 연도별 오염부하량의 경향을 보여주고 있다. (그림 4-29)에서 SS 부하량의 경우 HP#14 소유역에서의 가장 높은 값으로 나타났으며, 연도별로는 HP#14를 제외하고는 1998년과 2000년에 비교적 높은 유사 부하량을 보였다. (그림 4-30)에서 TN 부하량의 경우도 1998년과 2000년에 비교적 높은 TN 부하량을 보였으며, HP#2 소유역에서 비교적 높은 TN 부하량을 보이고 있다. TP 부하량을 보여주고 있는 (그림 4-31)에서 TN과 마찬가지로 1998년과 2000년 부하량이 비교적 높게 나타나고 있으며, 1998년 HP#14 소유역에서 매우 높게 나타나고 있는 것은 고수위에서의 자료가 부족하여 폭우시 과다 추정되었기 때문인 것으로 사료된다. 모든 수질항목에서 HP#7 소유역에서의 오염부하량이 가장 낮게 나타나고 있으며, 이는 HP#7 소유역이 증산간지의 유역특성을 보이고 있으며, 기천저수지 하류에 위치하여 저수지에서의 저류효과로 인해 오염부하량이 상대적으로 작기 때문인 것으로 보인다.

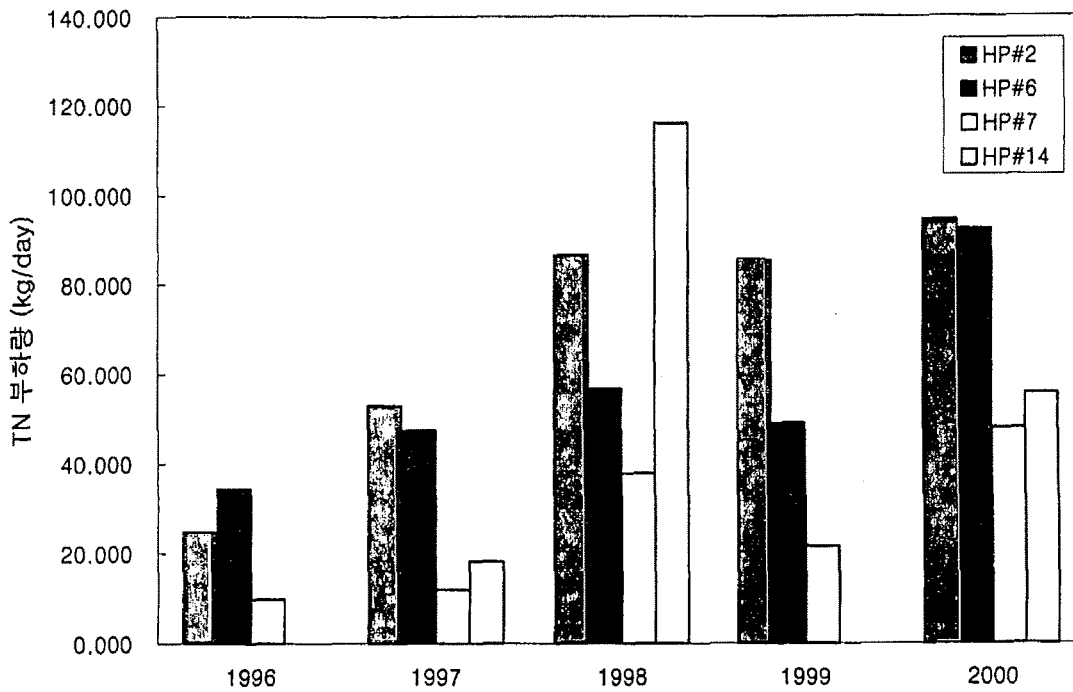
<표 4-12> 연도별 오염부하량

(kg/day)

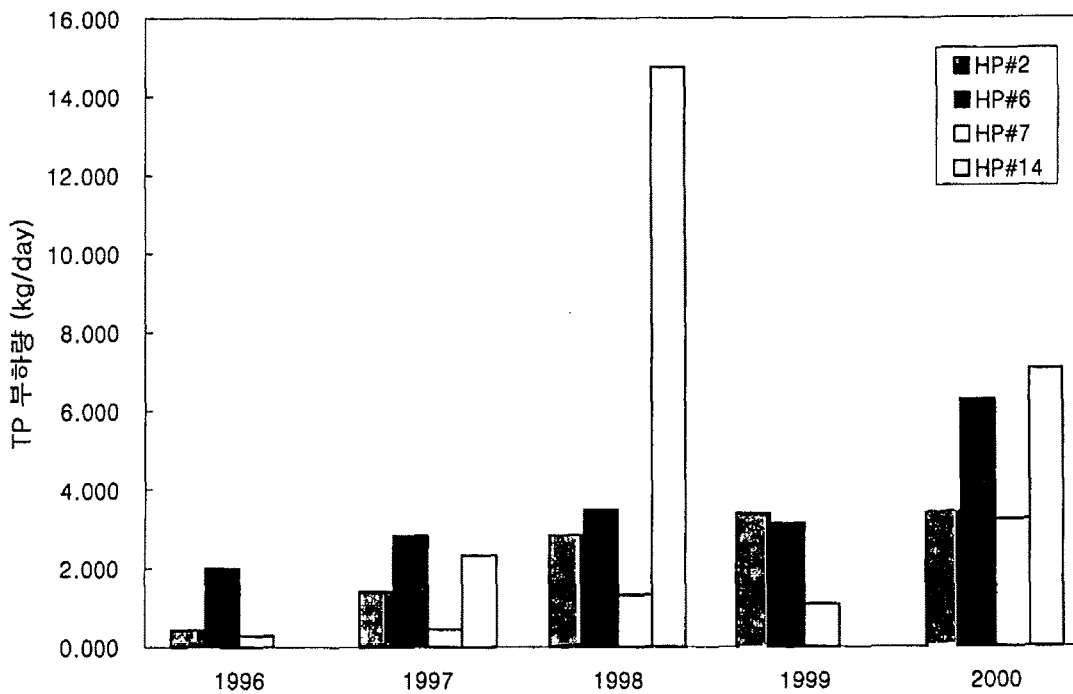
관측점	항목 연도	1996	1997	1998	1999	2000
HP#2	SS	4.12	22.82	56.00	86.86	75.32
	TN	24.69	52.99	86.56	85.48	94.40
	TP	0.43	1.41	2.82	3.39	3.40
HP#6	SS	79.47	106.99	145.59	95.03	152.55
	TN	34.37	47.50	56.73	48.96	92.29
	TP	2.00	2.83	3.48	3.14	6.27
HP#7	SS	41.21	79.60	222.63	56.22	154.14
	TN	9.84	11.94	37.84	21.53	47.97
	TP	0.28	0.45	1.32	1.09	3.23
HP#14	SS	-	399.35	4434.09	-	398.91
	TN	-	18.21	115.91	-	55.59
	TP	-	2.33	14.75	-	7.05



(그림 4-29) 연도별 SS 부하량 변화



(그림 4-30) 연도별 TN 부하량 변화



(그림 4-31) 연도별 TP 부하량 변화

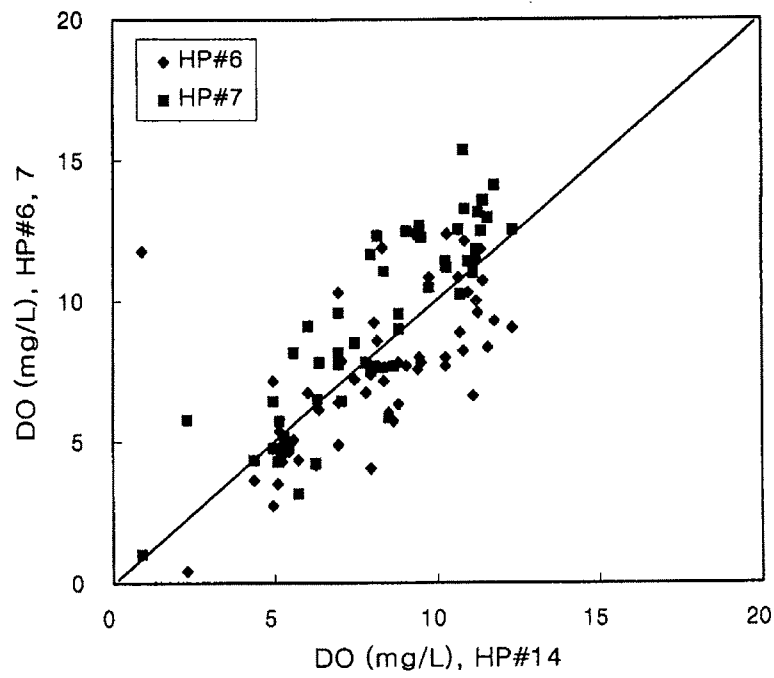
3. 토지이용에 따른 오염부하

유역에서의 오염부하는 토지이용상태에 따라 다르며, 중산간지인 HP#14지점에 대해 취락지인 HP#6과 중산간지인 HP#7의 수질농도를 항목별로 비교하였다. (그림 4-32)에서 (그림 4-35)는 DO, SS, TN, TP의 4개 수질항목에 대한 토지이용별 수질농도 비교 결과를 보여주고 있다.

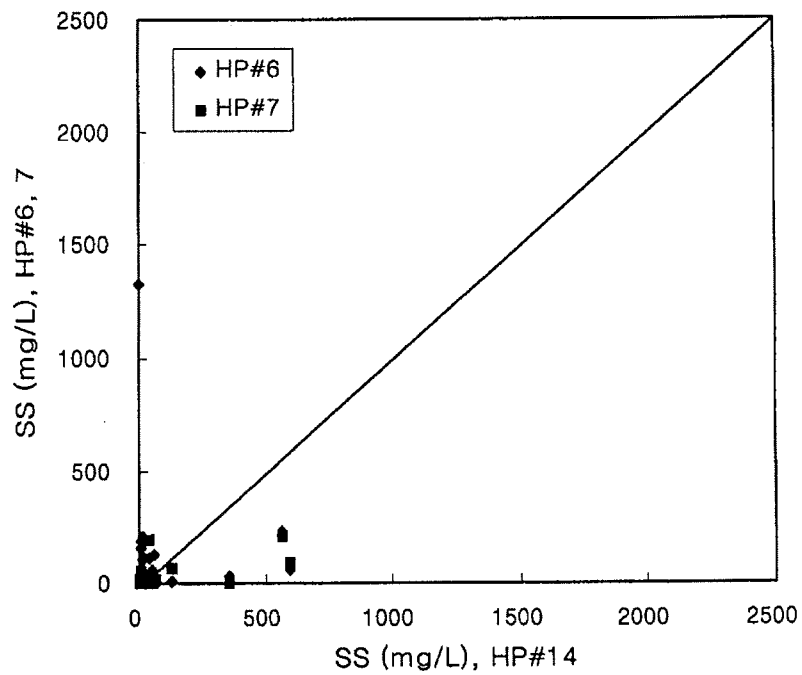
(그림 4-32)는 용존산소량의 토지이용에 따른 농도를 비교한 결과인 데, 중산간지인 HP#14지점에 대해 취락지가 발달한 HP#6지점의 용존산소량이 작은 경향을 보였으며, 중산간지인 HP#7지점에 대해서는 높은 값을 나타내었다. 이는 HP#7지점의 경우 기천저수지 하류에 위치에 저수지에서의 저류효과로 HP#14에 비해 수질이 양호한 결과를 보이고 있기 때문이다.

(그림 4-33)은 부유물 농도를 토지이용에 따라 도시한 결과이다. (그림 4-)에서와 같이, 산간지에 비해 취락지에서 비교적 높은 부유물 농도를 나타내었으나, 중산간지인 HP#7 지점에 대해서는 뚜렷한 경향은 보이지 않았다.

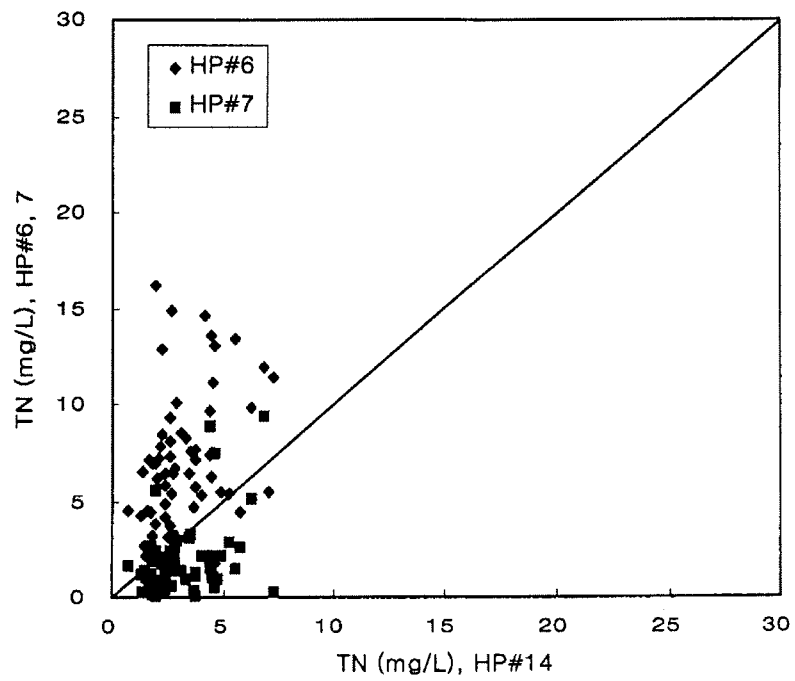
(그림 4-34)와 (그림 4-35)는 토지이용에 따른 총질소와 총인의 오염부하를 비교하여 도시한 결과이다. (그림 4-34)와 (그림 4-35)에서 보듯이 중산간지인 HP#14 지점에 비해 취락지역인 HP#6지점의 영양물질인 총질소와 총인의 오염부하가 뚜렷이 높은 경향을 보였으며, 산간지인 HP#7지점에서는 오염부하가 작은 것으로 나타났다. 같은 산간지이면서도 HP#14지점이 높은 오염부하를 보이는 것은 앞서 고찰한바와 같이 기천저수지에서의 저류효과로 인한 것이며, 또한 HP#14측점 상류에 축산농가가 존재하고 있으며, 제조업 공장이 들어섰기 때문에 HP#7 지점에 비해 수질이 나쁜 것으로 분석되었다.



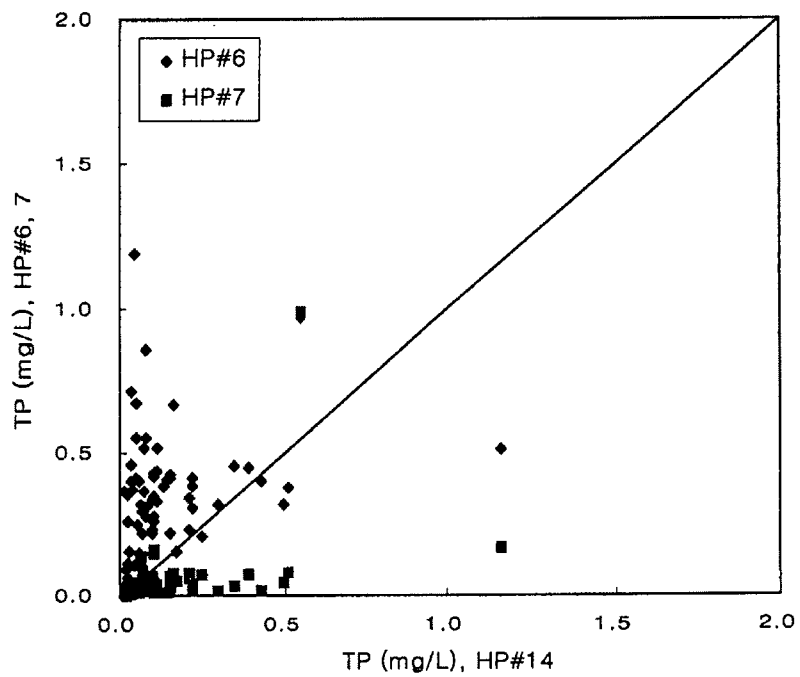
(그림 4-32) 토지이용에 따른 DO 농도 비교



(그림 4-33) 토지이용에 따른 SS 농도 비교



(그림 4-34) 토지이용에 따른 TN 농도 비교



(그림 4-35) 토지이용에 따른 TP 농도 비교

4. 유역 수계 오염도

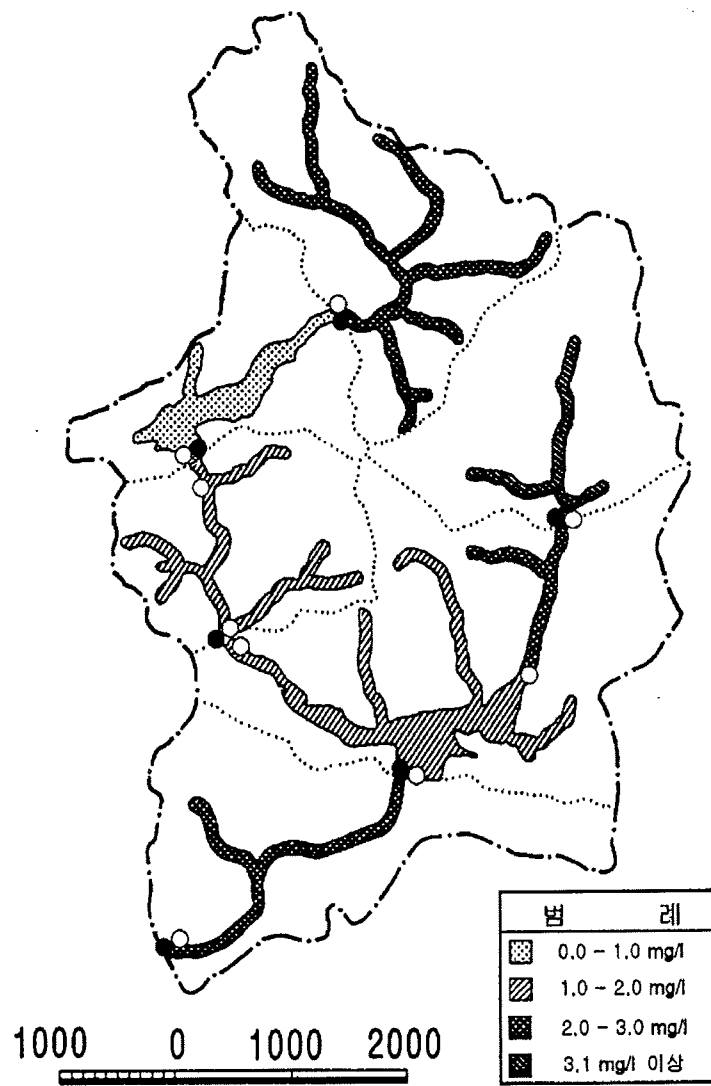
<표 4-3>의 수질 분석 자료를 이용하여 영양물질인 총질소와 총인을 대상으로 발안지 유역의 하천 구간별 수질상황을 추정하였으며, 이를 도식적으로 나타낸 결과는 (그림 4-36)과 (그림 4-37)에서 보는 바와 같다.

(그림 4-36)은 각 수질 측정점에서 분석된 총질소 농도의 평균값을 기준하여, 각 하천 구간별 수질을 구분한 결과이다. 총질소 농도의 구분을 0~1mg/ℓ, 1~2mg/ℓ, 2~3mg/ℓ, 3.1mg/ℓ 이상 등으로 하여 각 하천별 오염 정도를 나타내었다. (그림 4-36)에서와 같이, 취락지가 발달한 HP#6 지점에서 유입되는 생활계 오수의 영향으로 인해 하천수의 수질이 가장 악화되어 있는 상태로 높은 농도의 총질소 부하를 보이고 있는 반면에, 상류구간인 HP#6 지점의 총질소 농도가 높음에도 불구하고 발안저수지의 총질소 농도가 가장 낮게 나타나고 있으며, 기천저수지와 지천저수지 하류구간이면서 발안저수지의 상류구간에서 낮은 총질소 농도를 보이고 있다. 이는 유역내에 있는 기천지와 발안지가 저수지 자정작용의 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

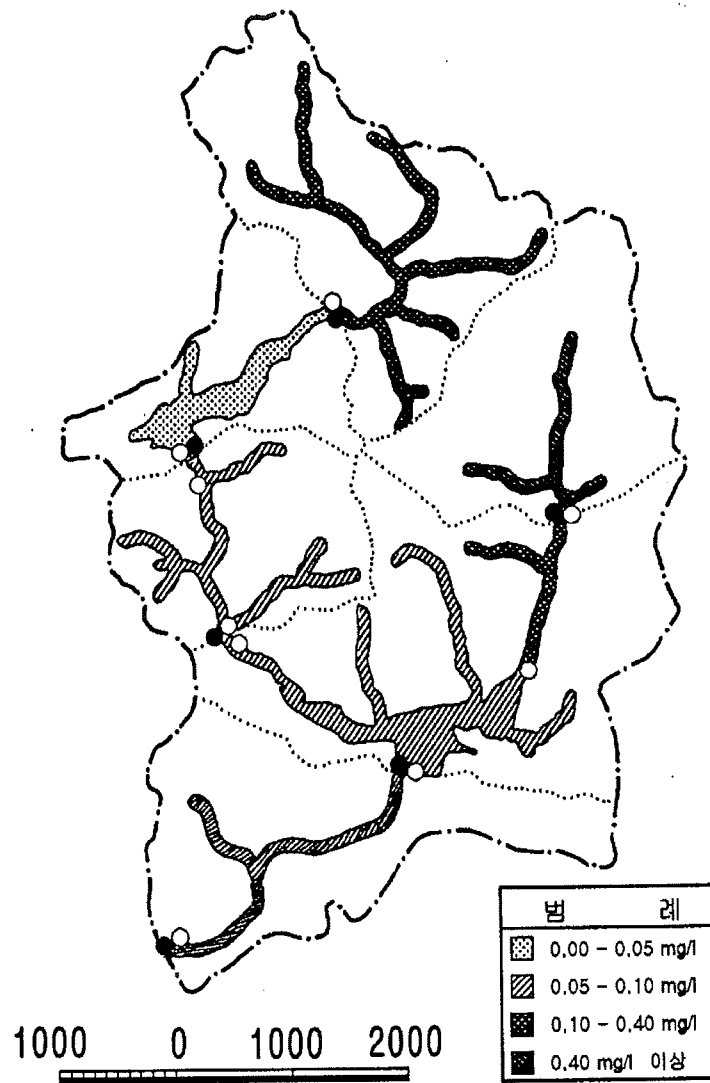
(그림 4-37)은 발안지 수계의 각 수질 측정점의 분석자료를 이용하여 추정한 수계별 총인 농도로서 각 측정점의 평균 총인 농도를 사용하였다. (그림 4-37)의 수계별 총인은 0.1mg/ℓ 이하, 0.11~0.21mg/ℓ, 0.21~0.30mg/ℓ, 0.31mg/ℓ 이상 등으로 구분하여 각 지천별 수질 상태를 나타내었다. 총인 농도는 HP#6지점과 HP#2지점, 그리고 HP#14지점 등, 취락지가 발달하고 하천 주변에 논경지가 산재된 곳에서 유입되는 하천수량이 오염정도가 높았으며, 기천저수지 (HP#12)와 발안저수지 (HP#5)에서 낮은 값을 나타내었다.

(그림 4-36)과 (그림 4-37)을 비교하면, 영양물질인 총질소와 총인은 취락지가 발달한 지역에서 비교적 높은 오염정도를 보였고, 저수지에서는 낮은 오염정도를 나타내었는데, 이는 발안지 수계 상류에서의 생활계 오수의 유입에 기인하는 것이며, 기천지와 발안지가 비교적 낮은 오염 정도를 보이는 것은 저수지의 자정작용에 의한 것으로 사료된다. 발안지 하류의 총인 농도가 비교적 높은 것은 물리구역이 넓게 자리잡고 있고, 물리구역 위쪽에서 도시화가 이루어지고 있기 때문인 것으로 보

인다.



(그림 4-36) 시험구역의 하천구간별 총질소 (TN) 오염도



(그림 4-37) 시험유역의 하천구간별 총인 (TP) 오염도

제 5 절 요약 및 결론

본 연구에서는 농업생태환경 및 종합적 환경관리시스템 구성을 위한 농업유역의 수질모니터링 기술개발을 위하여 발안저수지, 기천저수지 및 그 인접 유역을 대상으로 수질 계측망을 구성하고, 수질 시료의 채취 시기와 방법, 그리고 수질분석방법 등 수질 모니터링 기술 개발에 필요한 방법을 고찰하였고, 시험유역을 대상으로

수질모니터링을 실시하고 그 결과를 고찰하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① 발안지 유역을 대상으로 하천의 오염부하 실태를 파악하기 위한 수질계측망을 구성하고, 그 특징을 고찰하였다.
- ② 농업유역의 수질모니터링 기술 정립을 위하여, 현장에서의 수질 샘플링의 시기와 방법, 그리고 수질분석방법 등을 고찰하였다.
- ③ 1996년부터 2000년까지 5년간 발안저수지 유역의 각각의 수질 측점에 대하여 수질 항목별로 수질모니터링을 실시하고, 모니터링 결과를 분석하였다.
- ④ 수질모니터링 결과, 각 측점별 pH의 평균치는 7.1~8.2의 범위를 보여 대체로 중성의 값을 나타냈으며, DO 평균치는 7.4~9.1 mg/l의 범위를 보였다. TN의 평균치는 1.9~7.3 mg/l, TP의 평균치는 0.047~0.387 mg/l의 범위를 나타냈다.
- ⑤ 발안저수지 (HP#5) 측점과 기천저수지 (HP#12) 측점에 대해 각 항목별 농업용수 수질기준과 비교해 본 결과, pH(6.0~8.5), DO(2이상), TP(0.1이하), SS(15이상)의 경우 수질기준을 만족하고 있으나 TN(1.0이하)의 경우 농업용수 수질기준을 초과하고 있다.
- ⑥ 저수지에서의 저류효과를 분석하기 위해 기천저수지와 발안저수지를 대상으로 상하류의 수질을 비교해본 결과, 저수지 하류에서의 수질이 현저히 낮은 값을 보였으며, 저수지 하류에서의 수질은 저수지에서의 수질과 유사한 경향을 보였다.
- ⑦ 기천저수지와 발안저수지의 수질오염 저감효과를 분석하기 위해 상류부의 수질에 대한 하류부의 수질의 비율을 백분율로 분석한 결과, 기천저수지의 경우, SS 46.69%, TN 61.29%, TP 44.90%로 TP의 저감효과가 가장 큰 것으로 나타났다.
- ⑧ 1999년부터 2000년까지의 지하수 수질측정결과, 모니터링 초기에 SS의 값이 높게 나타나고 있으며, GW#1 측점에 비해 GW#2, 3 측점의 수질측정값이 대체로 양호한 경향을 보이고 있다. TP의 경우 모든 측점에서의 측정값이 0~

0.06mg/ℓ의 범위를 보여, 하천수나 저수지에서의 수질에 비해 매우 낮은 값을 보이고 있음을 알수 있다.

- ⑨ 하천측점에서의 오염부하량을 측정하기 위해 측점별로 SS, TN, TP에 대한 오염부하량(L)과 유량(Q)의 회귀식인 L-Q식을 산정한 결과, SS의 경우 결정계수가 0.8598~0.9418의 범위를 보였으며, TN의 경우 0.8639~0.9299, TP의 경우 0.8964~0.9232의 범위를 보였다.
- ⑩ L-Q관계식을 이용해 각 소유역별로 일별 오염부하량을 산정한 결과, SS의 경우 HP#14 소유역에서의 일평균부하량이 59.3kg으로 가장 높았으며, TN의 경우 HP#2 소유역에서 67.19kg으로 가장 높았으며, TP의 경우 HP#14 소유역에서 3.38kg으로 가장 높은 값을 나타냈다.
- ⑪ 수질항목에 따른 연도별 오염부하량의 경향을 고찰한 결과, SS, TN, TP 모든 항목에서 1998년과 2000년의 부하량이 상대적으로 높게 나타나고 있으며, 모든 수질항목에서 HP#7 소유역에서의 오염부하량이 가장 낮게 나타나고 있으며, 이는 HP#7 소유역이 중산간지의 유역특성을 보이고 있으며, 기천저수지 하류에 위치하여 저수지에서의 저류효과로 인해 오염부하량이 상대적으로 작기 때문이다.
- ⑫ 토지이용상태에 따른 수질오염농도의 비교를 위해 중산간지인 HP#14지점에 대해 취락지인 HP#6과 중산간지인 HP#7의 수질농도를 항목별로 비교하였다. 용존산소의 경우, HP#14지점에 대해 HP#6지점의 용존산소량이 작은 경향을 보였으며, HP#7지점에 대해서는 높은 값을 나타내었다. 총질소와 총인의 경우, HP#14지점에 비해 HP#6지점의 농도가 뚜렷이 높은 경향을 보였으며, HP#7지점에서는 수질농도가 낮은 것으로 나타났다.
- ⑬ 유역에서의 수질모니터링의 결과를 보다 효과적으로 도시하기 위하여 TN과 TP에 대해 하천구간별 수계오염도를 작성하였다.

참고문헌

1. 강상준, 최철수, 1991. 대청호 유역의 식생, 대청호 호서 생태계 조사 연구 보고서.
2. 국립환경연구원, 1987. 폐수배출시설 표준원단위 조사연구 (I), 국립환경연구원보, Vol (9).
3. 국립환경연구원, 1988. 폐수배출시설 표준원단위 조사연구 (II), 국립환경연구원보, Vol (10).
4. 국립환경연구원, 1989. 폐수배출시설 표준원단위 조사연구 (III), 국립환경연구원보, Vol (11).
5. 권혁윤, 1992. 하천 유량변동에 따른 수질변화에 관한 연구, 연세대학교 보건대학원 석사학위논문.
6. 김광은, 이태섭, 1994. 수질오염 감시에의 활용을 위한 항공원격탐사의 적용 연구, 한국GIS학회지, 2(1), pp. 65-74.
7. 김범철, 1996. 우리나라 호소수질환경의 개선방향, 한국수자원학회지, PP. 51-61
8. 김진택, 1995. 농업 비점원 오염모형을 위한 지리자원정보시스템 호환모형의 개발 및 적용, 서울대학교 박사학위논문.
9. 김진택, 박승우, 1994. 경사지의 경종에 따른 유출 및 토양유실에 관한 연구, 한국농공학회지, 36 (1), pp. 73-82.
10. 김진택, 박승우, 1994. 경사지의 경종에 따른 유출 및 토양유실에 관한 연구, 한국농공학회지, 36(1): 73-82.
11. 김진택, 박승우, 1997, 농업비점원오염모형을 위한 GIS 호환모형의 개발 및 적용 (I), 한국농공학회지 39(1) : 41-47
12. 김진택, 박승우, 1997, 농업비점원오염모형을 위한 GIS 호환모형의 개발 및 적용 (II), 한국농공학회지 39(2) : 53-61
13. 김진택, 박승우, 1997, 농업비점원오염모형을 위한 GIS 호환모형의 개발 및 적용 (III), 한국농공학회지 39(3) : 138-143
14. 김한태, 권순국, 1993, 농촌유역에서의 수질오염 특성에 관한 연구, 한국환경농학

회지 12(2): 129-143.

15. 남현옥, 박경운, 조성익, 1989, 원격탐사기법에 의한 소유역의 홍수수문곡선 결정, 대한원격탐사학회지 5(1) : 13-27
16. 박승우, 1996. 영농방식에 따른 농업비점오염 부하량 조사분석, 농업과학공동기센타.
17. 박충현, 박희경, 현인환, 1996. 21세기 물 수요를 대비한 종합수질 관리방안, '96 세계 물의 날 기념 심포지엄, pp. 71-119.
18. 백경원, 정용태, 한건연, 송재우, 1996. 한강하류부 수질의 통계학적 해석, 한국수자원학회, 29(2), PP. 179-190.
19. 백중철, 허준행, 조원철, 1996. 수질자료의 추이분석기법에 관한 연구, 한국수문학회, 96학술발표
20. 서승덕, 김동훈, 윤학기, 1994. 농업용 저수지수역의 수질환경 오염원 조사분석, 한국농공학회지, 36 (3), pp. 100-112.
21. 서승덕, 김동훈, 윤학기, 1994. 농업용 저수지의 수질환경 오염원 조사분석, 한국농공학회지, 36(3), 100-112.
22. 서울특별시, 1995. 한강 생태계 조사 연구.
23. 오경두, 1994. 하천 수질관측망 최적설계 기법 개발, 국제수문개발계획(IHP) 연구보고서, 건설부.
24. 이길성, 조홍연, 1995. 저수지 수질모델링, 한국수자원학회지, 기술정보, 28 (3), pp. 71-76
25. 이상도, 이용환, 백경원, 송재우, 1996. 중소하천의 유량과 수질의 통계적 분석, 수자원학회, 96학술발표
26. 이흥근, 1994. 수질자동측정망의 효과적 계획과 운영방안, 수질자동측정망의 구성 및 효과적 운영관리 방안. 환경처, pp. 5-29.
27. 장정렬, 1994. 농촌유역 수질관리모형의 개발에 관한 연구, 서울대학교 대학원 석사학위 논문.
28. 정하우 등, 1986. 저수지 물관리 연구 (I), 농림부, 농어촌진흥공사.

29. 최주운, 김기형, 이무옥, 1996. GIS를 이용한 하천내 수질오염 조사 자료의 관리, 한국수자원학회 96학술발표.
30. 최지용, 박원규, 이상일, 1996. 하천 및 하소수 수질관리를 위한 자동측정망의 설계, 한국수자원학회지, 29(2), 167-178.
31. 최지용, 박원규, 이상일, 1996. 하천 및 호소수 수질관리를 위한 자동측정망의 설계, 한국수자원학회지, 29(2), pp. 167-178.
32. 최진규, 손재권, 구자웅, 1996. 전북도내 농업용저수지의 수질조사 연구, 한국농공학회지, 38(2), 65-74.
33. 환경부, 1995. 21세기 환경비전.
34. 환경처, 1989. 현존식생도 (서울, 경기도). 72-75.
35. Bodo, B., and Unny, T. E., 1983. Sampling Strategies for mass-discharge estimation, ASAE, Journal of Environmental Engineering, Vol. 109, No. 4.
36. Braun-Blanquet, J., 1964. Pflanzensozioilogie. Spring-Verlag. New York.
37. Cochraan, W. G. (1997). Sampling techniques. Third Ed., John Wiley and Sons, New York, N. Y.
38. Daniel E. Line, 1995. Nonpoint sources, Water Environment Research, Vol. 67, No. 4.
39. Donald H. burn, 1990. Real-Time Sampling Strategies for Estimating Nutrient Loadings, ASAE, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 116, No. 6.
40. Donald, H. Burn, 1990. Real-time sampling strategies for estimatings nutrient loadings, J. of Water Resour. Planning and Management, ASCE, 116(6), 727-741.
41. Gilbert, R. O., 1987. Statistical methods for environmental pollution monitoring, VAN NOSTRAND REINHOLD, New York.
42. Harms, L. L., dornbush, J. N., and Anderson, J. R., Physical and Chemical Quality of Agricultural Land Runoff. J. Water Poll. Control Fed., 46, 2460

(1974)

43. Heinrichs, E. A., 1994. Biology and management of rice insects, Wiley Eastern Limited, New Delhi. 779.
44. Hipel, K. W., Mcleod, A. I., and Weiler, P. R., 1988. Data analysis of water quality time series in lake Erie, Water Resources Bulletin, 24(6), pp. 533-544
45. Hirsch, R. M., and Slack, J. R., 1982. Techniques of trend analysis for meonthly water quality data, Water Resour. Res., 18(1), pp. 107-121
46. Mcbean, E. A., and Gorrie, J. E. (1975). Non-point source contributions to water quality problems. Proc., 10th Canadian Symp. on Water Pollution Res. in Canada, 142-150.
47. Nilsson, C., and Grelsson, G., 1990. The effects of litter displacement on river bank vegetation, Can. J. Bot. (68), 735-741.
48. Novotny, V. and H. Olem, 1994. Water Quality Prevention, Identification, and Management of Diffuse Pollution. Van Nostrand Reinhold.
49. Park, S. W., S. Mostaghimi, R. A. Cooke, and P. W. McClellan, 1994. BMP Impacts on Watershed Runoff, Sediment, and Nutrient Yields, American Water Resources Association, 30 (6). pp. 1011-1023.
50. Park, S.W., S. Mostaghimi, R.A. Cooke, and P.W. McClellan, 1994. BMP Impacts on Watershed Runoff, Sediment, and Nutrient Yields. Water Resources Bulletin 30(6): 1011-1023.
51. Preston, S. D., Bierman, V. J., and Silliman, S. E., 1989. An evaluation of methods for the estimation of tributary mass loads, Water Resour. Res., in Canada, pp. 142-150.
52. Samson, F. B., and Fritz., L., 1996. Ecosystem management: selected reading. Springer-Verlag New York, Inc. 462.
53. Stephen M. Yaksich, Frank H. Verhoff, M., 1983. Sampling Strategy for River Pollutant Transport, ASAE, Journal of Environmental Engineering, Vol.

109, No. 1.

54. Thomann, R. V., 1976. Time series analysis of water quality data, J. Sanit. Eng. Div., Asce. Vol. 93, No. 1, pp. 1-23.
55. Thomas, R. B. 1985. Estimating total sediment yield with probability sampling. Water Resour. Res., 21(9), pp. 1381-1388.
56. Ward, R. C., Loftis, J. C., and McBride, G. B., 1990. Design of water quality monitoring systems, Van Nostrand Reinhold.
57. Weidner, R. B., et al, Rural runoff as a factor in stream pollution. Jour. water Poll. Control Fed., 41, 377 to 384 (1969)
58. Williams, J. R. , P. T. Dyke and C. A. Jones, 1983. EPIC: A Model for Assessing the Effects of Erosion on Soil Productivity. In Analysis of Ecological Systems: State-of-the Art in Ecological Modeling. Eds. W. K. Laurenroth et al., Elsevier, Amsterdam, pp. 553-572.
59. Yaksich, S. M., and Verhoff, F. H., 1983. Sampling strategy for river pollutant transport, J. Envir. Engrg., ASCE, 109(1), 219-231.
60. Yasuhumi Mori, 1990. A Model for Changes in the Surface Water Nitrogen Concentration in Paddy Fields, Trans. JSIDRE, pp. 15-25. (in Japanese).
61. Young, R., C. A. Onstad, D. D. Bosch and W. P. Anderson, 1987. AGNPS: Agricultural Non-Point Source Pollution Model: A Watershed Analysis Tool. USDA-Agricultural Research Service. Conservation Research Report 35., U. S. Department of Agriculture, Washington, D. C.

농작물 생육환경 모니터링 기술 개발

2000년 12월

“농업생태환경 모니터링 및 종합적 환경관리시스템 개발 사업”

서울대학교 농업생명과학대학 부속 농업개발연구소

최종보고서 제 Ⅱ 편 제 5 장

여 백

제 5 장 농작물 생육환경 모니터링 기술개발

제 1 절 서 론

지금까지 농경지는 단순히 농작물을 생산하고 공급하는 기능을 갖는 것으로 간주되어 왔다. 농경지는 이와 같은 생산 기능 이외에도 1) 수문 순환과정의 중요 단계에 있어 홍수를 조절하여 주고, 2) 대기와 수질을 정화하며, 3) 기후를 완화하여 주고, 4) 자연 생태계의 생물학적 다양성을 유지하는 등 환경보전기능도 가지고 있다. 실제로 이와 같은 환경보전기능 자체만으로도 우리 나라 농업총생산량에 못지 않은 주요한 경제적 역할을 담당하고 있는 것이다.

지난 30여년 동안 농업생태계는 토지 생산성 위주의 관리로 인하여 농작물 생산성에서는 괄목할 만한 진전을 보였다. 품종 개량, 농업기반시설의 설치, 농약과 비료의 보급, 농기계 작업등을 통하여 주곡인 쌀의 생산량은 50% 이상의 증수를 가져왔으며, 주곡의 자립을 달성하는 녹색혁명을 이룩하였다.

그러나, 농업 내외적 수질오염과 과도한 농업화학물질의 사용으로 농경지의 토양오염과 함께 비점오염 등 수질오염 피해의 확산, 작목의 단순화 등으로, 농경지의 지속적인 생산을 보장하는 농경지의 안정성에 위협을 받고 있다.

더욱이, WTO체제로 농산물 시장 개방은 농경지의 이용체제에 있어서 큰 변화를 예견하고 있다. 농지의 타목적 전환이 가속화되고, 농업 수익성이 높지 않은 한계농지는 방치되고, 생산성 제고를 위한 대규모화 영농체제는 농작물의 단순화를 초래하게 될 뿐만 아니라, 생물생태환경의 변화를 수반할 수 있을 것이다. 따라서, 농작물의 생육과 함께 농경지 생태계의 환경 관리를 위한 적절한 대책이 필요하다.

현재 농작물 생육분야에 있어서는 논벼 등의 생육환경과 수확량 예측을 위한 전국적인 표본지구와 현장조사가 시행되고 있으며, 그 결과로부터 생산량의 추계가 이루어지고 있으며, 농정 업무의 일환으로 직파재배 등 신기술의 보급이 추진되고 있으며 현장 결과가 농업통계로 수집 분석되고 있다.

그러나, 환경생태 정보 시스템의 개발과 환경관리를 위한 목적으로 이들 수집된 자료는 생육환경 조사방법의 적용성과 조사밀도의 조정, 결측자료의 보완방법 등 통계적 분석이 필요하다. 또한, 기후인자와 생육상황과의 관계를 정밀 조사 분석하여 생장 모형들의 적용성을 평가하고, 필요한 보완을 시행하며, 환경변화에 따른 벼 생육 및 수확량 변동을 예상할 수 있는 기술이 필요하다.

한편, 농경지로부터의 비점원 오염은 부하형태가 다양하고 복잡하여 주위영향을 크게 받아 정확한 부하량이나 부하양상을 구명하기 어렵다. 특히, 논은 영양염류를 정화시키는 자정작용이 있는 측면과, 논에 유출수에 비료분이 많아 영양염류에 의한 수질오염원이 되는 양면성이 있는 것으로 알려져 있다. 농경지의 비점오염은 점원과는 다르게 봄, 여름에 주로 부하되어 연간 변동율이 크다. 그러나, 경우에 따라서는 점원보다는 비점원에서의 영양물질 부하량이 크기 때문에 호소의 수질관리 및 수질예측을 위해서는 이러한 영양물질 부하의 구명이 요구된다.

밭의 물질순환기작을 규명하기 위해 많은 연구가 구미 각국에서 이루어져 왔으며, 이와 같은 연구를 바탕으로 미국의 경우 GLEAMS (Knisel, 1993), EPIC (Williams 등, 1984)과 같은 전산모형을 개발하여 그 유용성을 살피고 있다. 하지만, 작부체계가 다른 이유로하여 논에 대한 영양염류의 물질순환에 대한 연구는 상대적으로 미흡하다.

따라서, 농작물의 생산량을 지속시키며, 농경지로부터의 오염부하량을 최소화하기 위한 농작물 생육환경에 관련된 전반적인 농작물 생육 모니터링 기술의 개발이 요구되어 진다.

본 연구의 목적은 농작물의 생육환경 및 영양물질의 모니터링을 위하여, 논에서의 영양염류의 수지와 그 순환기작을 고찰하고, 물질순환기작의 구성인자들의 특성을 파악하며, 이를 근거로 논에서의 물질순환기작을 구명하기 위하여 시험포장을 선정하여 못자리 및 본답기의 관개수와 자연강수의 채수 시기와 방법 그리고 분석방법을 정립하고 논에서의 영양물질 기작 요소들의 상호관련성을 구명한다. 또한, 밭에서의 장단기 유출량 및 영양물질 추정을 위한 밭 수문, 수질 모니터링을 수행하며, 농경지 생태계의 주 구성요소인 벼의 생장과 생육의 체계적인 모니터링 기술 개발하는 데 있다.

제 2 절 농경지 수문, 수질 모니터링

1. 개론

논에서의 물질 순환에 대한 연구는 대부분 이웃 일본과 우리 나라에서 이루어지고 있으며 우리 나라의 경우 논에서의 물질순환을 규명한 모형이 아직까지 개발되어 있지 않은 상태이다. 본문에서는 일본에서의 연구결과를 중심으로 논에서의 영양염류의 부하와 순환기작에 관하여 개괄적으로 살펴 보고자 한다.

논에서의 영양 염류의 부하에 대해 國松 (1985, 1986)은 일본의 통계자료로부터 논의 물질 수지의 평균치를 발표하였고, 우리 나라에서는 권 등 (1989) 및李 등 (1990)이 논에서의 질산과 인산의 부하량을 추정 한 바 있다. 國松의 자료에 의하면 질소 (N)의 경우 비료가 전체 유입량의 63%, 미생물에 의한 질소 고정인 25%로 비료와 함께 미생물에 의한 질소 고정도 영양물질 유입에 주요한 부분인 것으로 나타났다. 관개수와 강수에 의한 질소 유입은 각각 7%와 5%정도인 것으로 추정되었다.

인 (P)의 경우 비료가 논으로 유입되는 전체양 중 96%를 차지하고, 관개수나 강수에 의한 유입은 매우 낮은 것으로 보고 되었다. 투입된 질소의 손실 경로를 살펴보면 작물에 의한 소모가 63%, 지표 유출량이 18%, 침투수에 의해 19%가 손실되는 것으로 추정되었다. 인의 경우 작물에 의한 소모가 83%로 가장 많고, 유출에 의해 10% 지하침투에 의해 7% 정도가 손실되는 것으로 추정되었다 (國松, 1986).

우리 나라의 경우 권 등은 조사구역에서의 논으로의 질소유입량은 146 kg/ha/yr, 인은 75 kg/ha/yr이었으며,李 등은 질소가 114.9 kg/ha/yr, 인이 7114 kg/ha/yr 유입되었다고 보고하였다. 지표유출과 침투수에 의한 손실은 권등이 질소가 연간 42.4 kg/ha, 인이 7.4 kg/ha 라고 추정했으며,李 등은 질소가 34 kg/ha, 인이 2.4 kg/ha 손실 되는 것으로 보고하였다. 우리 나라 자료에서는 질소고정량과 작물의 흡입에 의한 손실량은 보고 되지 않았다. 우리 나라의 자료에 의하면 지역에 따른 비료의 사용량, 관개용수 및 강수의 종류에 따라 논에서의 영양염류 유출입량이 상당한 차이가 있음을 보여주었다.

논의 계는 표면수, 토양표층 (산화층) 및 토양하층 (환원층)으로 구분할 수 있다.

질산화는 대부분 토양표층 1cm 내외에서 이루어지므로 토양표층에서는 암모니아태 질소 ($\text{NH}_4\text{-N}$)로 변환이 일어나지만, 토양 하층에서는 질산화가 이루어지지 않는 것으로 알려져 있다. 탈질 (Denitrification)은 상당히 두꺼운 토양에서도 일어나는 것으로 알려져 있으며, 토양의 표층과 하층 양쪽에서 탈질작용 후 휘산으로 손실된다. 논에서 질소가 가스상태로 휘산되는 양은 10~15%인 것으로 알려져 있다.

우리 나라의 경우 논에서의 영양염류 물질 순환과 영양염류에 의한 부하량을 예측하는 모형이 개발되어 있지 않은 실정이다. 논에서의 수질 변화를 예측하기 위해서는 현상의 이해가 먼저 선행되어야 한다. 한편, 관개수량, 관개수의 수질, 시비량과 시비방법에 의한 논의 수질변화 자료 구축이 선행되어야 한다.

논에서의 물질 순환 해석을 위해서는 기존의 하천이나 호소 또는 하수처리 장치 등에서 쓰이는 수질 모형을 그대로 적용하는 데는 몇가지 문제점이 있는 것으로 사료된다. 논은 경우 비료가 주 투입원이며 벼에 의한 질소와 인의 흡수가 투입된 질소와 인의 소모 경로에 주요한 부분을 차지한다. 그러므로 논에서의 물질순환을 예측하기 위해서는 작물에 의한 질소와 인의 흡수량 추정이 중요한 부분이다. 벼에 의한 흡수량은 작물 생육정도와 밀접한 관계가 있는데 작물생육은 일조량, 관개량, 시비량, 품종 등에 의해 영향을 받는다. 논에서의 영양염류 부하를 예측하기 위해서는 상기한 요소를 고려한 작물 모형의 개발이 필요하다. 논은 경우 연중 담수기간이 100일 내외이고, 그 외의 기간은 표면수가 없으며 동절기에는 표면이 결빙하는 등 그 상태가 변하므로 시기적인 상태 변화가 고려되어야 한다. 또한, 담수심의 깊이도 10 cm 내외이므로 담수심 내의 온도 차이를 무시할 수 있고, 물질 변환 반응속도 또한 호소모형에서와는 다를 것으로 여겨진다.

논에서의 물질순환 모형은 일본의 森保文 등이 개발한 바 있지만 국내에서 적용된 바는 없다. 논에서의 물질순환 모형의 개발을 위해 미국에서 밭의 경우를 대상으로 한 CREAMS와 GLEAMS를 논의 경우에 적용할 수 있도록 수정하는 연구가 진행 중에 있다. 각각의 인자들을 살펴보면 다음과 같다.

가. 강수

강수 중에 함유된 질소와 인의 양은 해당지역의 대기 오염정도에 따라 상이하 며 동일지역에서도 시기별 변화를 보인다. 李 등 (1990)이 조사한 바에 의하면 강 수 중 질소 농도는 6월 중 1.1~1.3 ppm이었고 이후 점차 감소하는 경향을 보였다 고 한다. 인의 경우는 시기에 관계없이 0.04~0.08 ppm정도의 매우 낮은 함량을 보인 것으로 보고되었다.

나. 관개

농경지에 관개되는 관개수의 양은 강우빈도와 강우량에 좌우되며 관개수의 수 질은 주위의 수질 오염원의 여부에 따라 달라진다. 李 (1990)가 시험한 포천군 소 홀면 고모리 지역의 관개수중 N, P 농도는 시험기간 동안 N이 0.28~0.85 ppm이었 고 P가 0.01~0.08 ppm이었다. 이에 반해 권 등 (1989)이 시험한 화성군 정남면 패 광리 지역에서의 관개수는 N의 농도가 1.0~15 ppm이었고 P가 0.01~3.2 ppm으로 李 등 (1990)의 결과보다 높은 농도를 보여 주었다.

다. 시비량

일반적으로 수도의 경우, 작물의 생리상 기비, 분얼비, 수비로 나누어 시비하고 있다. 우리 나라에서 수도의 경우 연간 110~150 kg/ha/yr의 질소비료가 보통 시 비되며, 70~90 kg/ha/yr의 인산 비료를 시비하고 있다. 시비방법에는 전층시비와 표층시비 방법이 있는데 李 등 (1990)이 시험 조사한 결과에 의하면 전층시비에 비 해 표층 시비가 질소는 1.7배, 인은 1.8배 더 많이 손실되는 것으로 발표했다. 전층 시비가 권장되고 있지만, 강원·전북 등 지역에 따라서는 표층시비를 선호하는 곳도 있다. 표층 시비를 하는 이유는 시간이 없거나 노동력의 부족이 주된 이유이다.

질소비료의 경우 탈질 용탈을 최소화하기 위해 표준시비 회수를 3~4회로 권장하 고 있으나 보통 2~3회를 실시하고 있는 것으로 조사되었다. 또한, 농민들이 표준 시비량을 넘어 상당수 (70%)가 과량 시비하고 있는 것으로 조사된 바 있다.

라. 벼에 의한 흡수

작물에 의한 질소와 인의 흡수는 시비량과 작물 생육에 미치는 환경인자, 인, 일조, 온도, 토양수분 등에 좌우된다. 國松 (1986)은 벼에 의한 질소의 소모가 63%

에 달하는 것으로 발표하였고, 자가현 농업시험장 자료는 약 40%의 투입된 질소가
벼에 의해 흡수된다고 조사한 바 있다.

벼는 생육초기에 $\text{NO}_3\text{-N}$ 보다 $\text{NH}_4\text{-N}$ 을 많이 흡수하지만 생육 후기에는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 을
다량 흡수한다고 알려져 있다. 하지만 어떤 경우에서 얼마만한 정도의 벼가 어떤
질소 형태를 선택하게 되는지는 명확히 밝혀져 있지 않다.

2. 논에서의 수문수질 모니터링

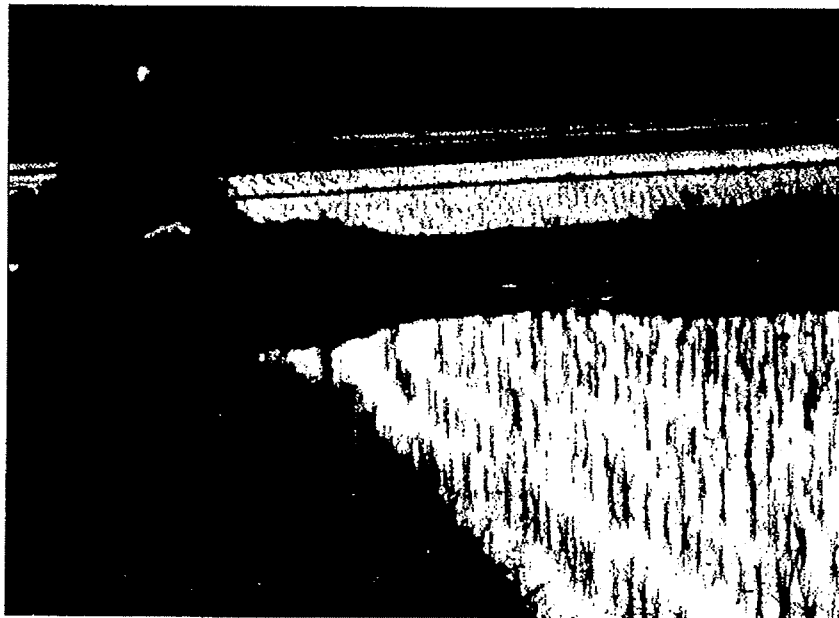
가. 시험구역의 개요

논에서의 관행물관리 현황과 논에서의 수문순환과 물질수지를 조사하기 위하여
시험포장을 대상으로 모니터링을 실시하였다. 시험포장의 선정은 논에서의 영양물
질의 물질수지와 유출특성을 조사하기 위해 가능한한 경지정리가 된 곳으로 월답배
수가 적고, 제반 관측 시설의 설치 및 관리가 편리하며, 기상자료의 수집이 용이한
곳을 대상으로 선정하여야 한다. 시험포장은 경기도 수원시에 위치한 서울대학교
농업생명과학대학 시험포장을 대상으로 1996년 모니터링을 실시하였으며, 발안저수
지 유역내 시험포장을 선정하여 1996년과 2000년에 논외 담수심 및 물꼬높이 등을
모니터링하였다.

논에서의 관행물관리 현황을 조사하기 위해 발안저수지 유역내 시험포장을 대상
으로 6월 초순부터 8월 중순까지 논외 담수심과 물꼬높이를 모니터링 하였다. <표
5-1>은 1996년 발안저수지 유역내 시험포장의 현황을 보여주고 있으며, 발안지 하
류와 기천지 하류에 총 70개 필지를 대상으로 하였다. 담수심은 (그림 5-1)과 같이
필지별로 표척을 설치하여 주 1회 측정하였다. (그림 5-2)는 현장에서 담수심과 물
꼬높이를 측정하는 장면을 보여주고 있다. (그림 5-3)은 논에서의 수질샘플을 채취
하고 있는 장면을 보여주고 있다.

<표 5-1> 발안저수지 유역내 시험포장 현황 (1996년)

시험포장	필지수	위 치
발안지 하류 A	24	발안지 하류 팔탄면
발안지 하류 B	23	발안지 하류 팔탄면
기천지 하류 A	8	기천지 하류 봉담면
기천지 하류 B	8	기천지 하류 봉담면
당 하 교	7	발안지 상류 봉담면
합 계	70	



(그림 5-1) 시험포장 관측지점 전경

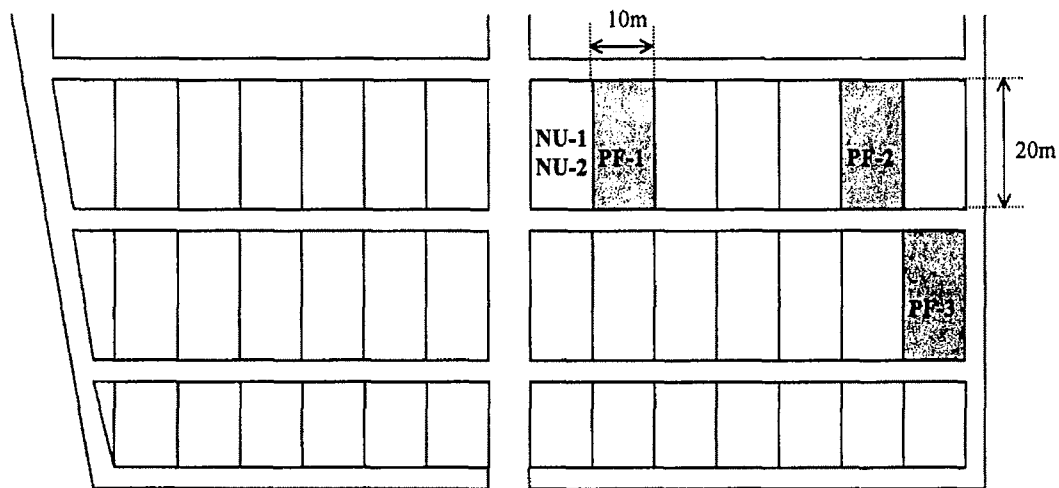


(그림 5-2) 담수심 및 물꼬높이 측정광경



(그림 5-3) 논에서의 수질샘플 채취광경

논에서의 수문순환과 물질수지를 조사하기 위해 서울대학교 농업생명과학대학 시험포장을 대상으로 모니터링을 실시하였다. (그림 5-4)는 경기도 수원시에 위치한 서울대학교 농업생명과학대학 시험포장의 구성도를 보여주고 있으며, 각 단위답의 면적은 200 m²이다. 용수원은 지하수를 이용하고 있으며 토양은 사양토로 이루어져 있다. 물질순환을 구명하기 위해 못자리 2개 시험구 (NU-1, NU-2), 본답기 3개 시험구 (PF-1, PF-2, PF-3)를 선정하였다.



(그림 5-4) 서울대학교 농업생명과학대학 시험포장 구성도 (1996년)

포장에 대한 조사기간은 1996년 4월 25일부터 9월 10일까지 약 120일간이었다. 공시품종인 화성벼의 종자를 최아시키고 이앙상자에 파종한 후 4월 25일에 못자리에 내었고, 5월 26일에 이앙하였으며, 9월 10일에 출수하였다. 수질분석을 위해 못자리 기간에 2개의 포장과 이앙 후에 3개의 포장을 선정하여 주 3회에 걸쳐 현장모니터링을 실시하였다.

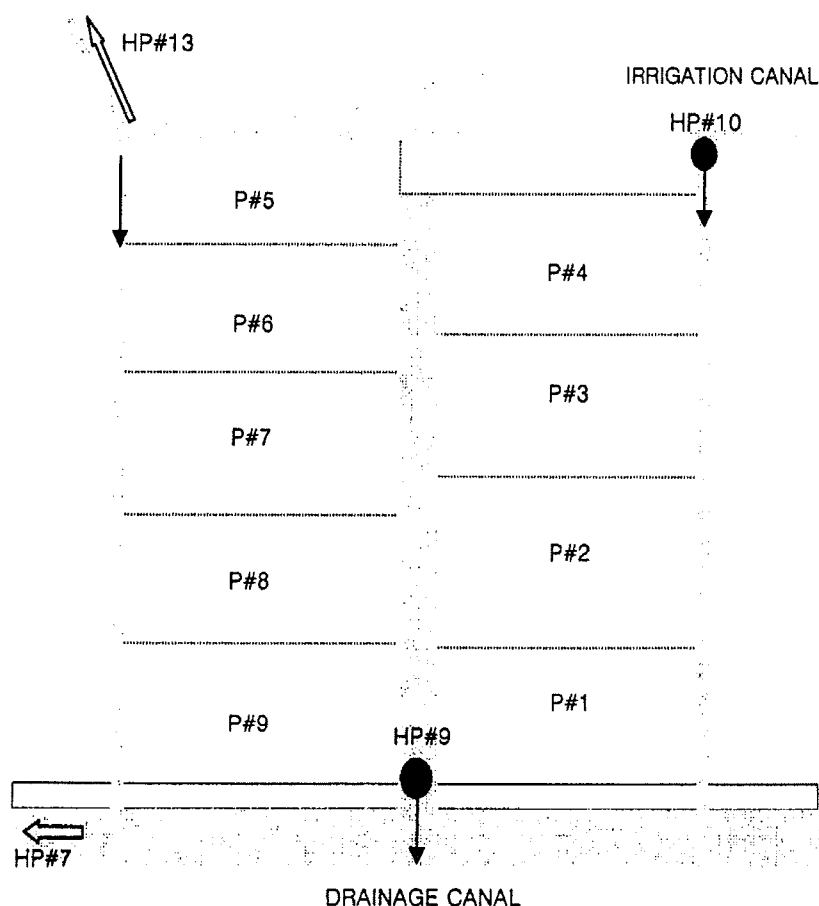
1996년 서울대학교 시험포장에서의 수문/수질 모니터링의 자료에 추가하여 2000년에 관개기 논에서의 수문 및 물질모니터링을 위한 시험지구로 경기도 화성군 팔탄면 기천리 일대의 기천지구를 시험포장으로 선정하였다. 발안저수지 유역내에 위치한 기천지구의 시험포장을 대상으로 2000년 5월부터 9월까지 모니터링을 실시하였다. 기천지구는 단일 용수원인 기천저수지로부터 관개용수를 공급받으며, 용배

수 계통이 단순하여 물수지 및 영양물질의 유출입 모니터링이 용이하며, 지구내 시설원예단지나 집단시설 및 축사가 존재하지 않는 소규모의 관개블록이다. 시험지구의 면적은 2.7 ha 이며, 토양은 식양토로서 물리적 성질은 <표 5-2>와 같다.

(그림 5-5)는 시험지역의 용배수 체계를 나타낸 것이다.

<표 5-2> 시험포장 토양의 물리적 성질

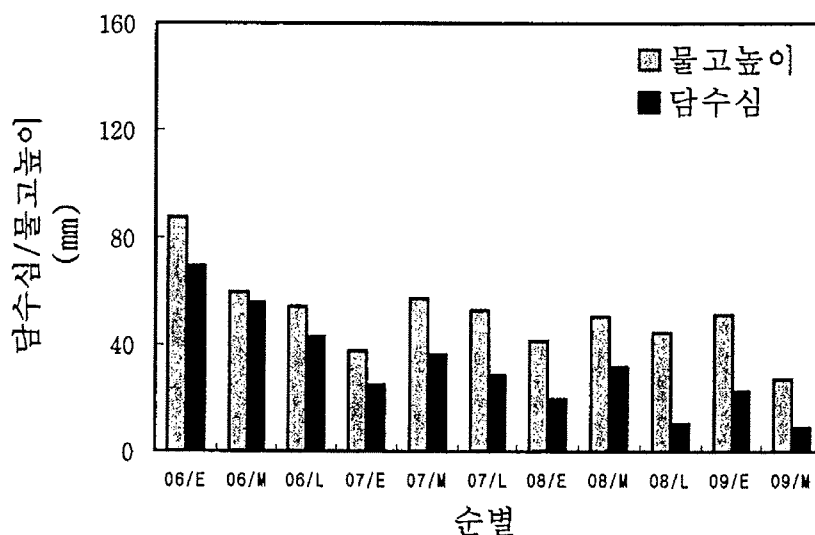
	Gravity	Alterberg		Field Density		permeability (cm/sec)
		LL(%)	PI(%)	$\gamma_t(g/cm^3)$	$\gamma_d(g/cm^3)$	
Top-soil	2.627	31.5	10.2			
Sub-soil	2.667	26.7	6.85	1.91	1.56	1.195×10^{-5}



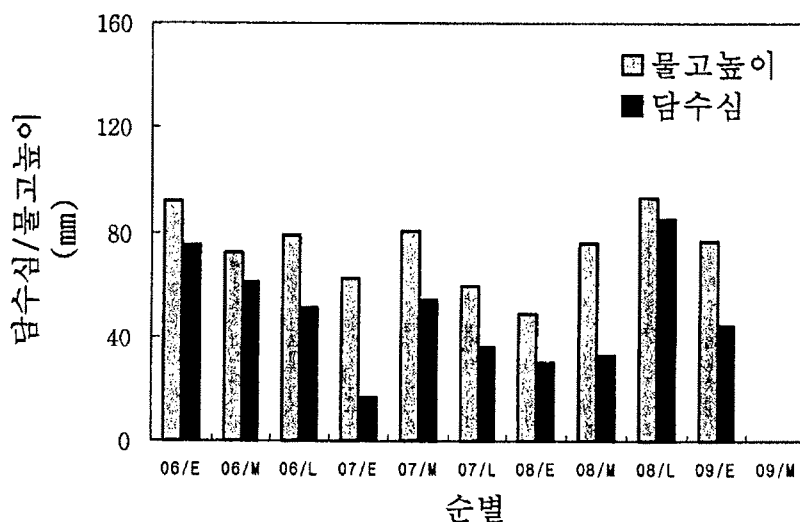
(그림 5-5) 기천지구 시험포장 구성 (2000년)

3. 논에서의 수문수질 모니터링 결과

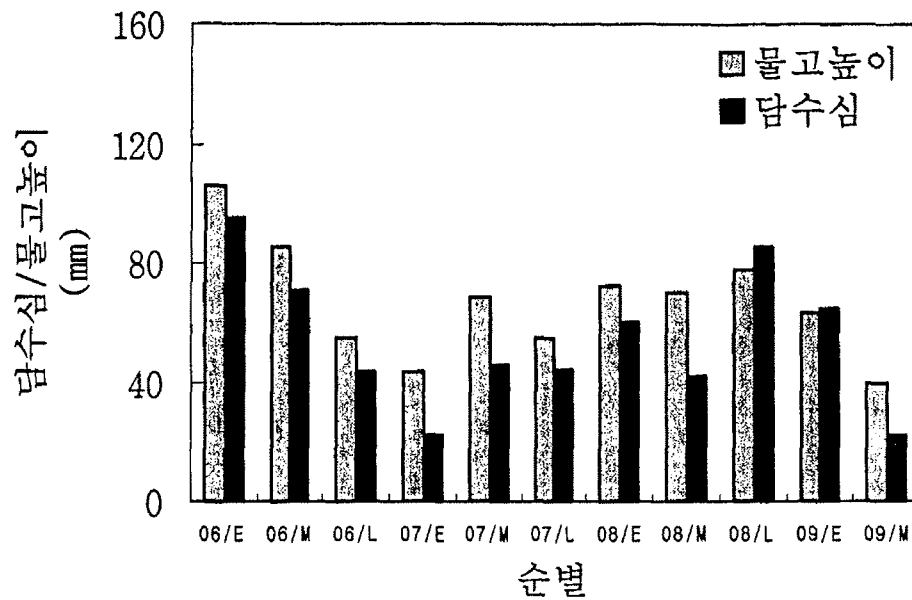
발안저수지 유역내 70개 필지를 대상으로 한 담수심과 물꼬높이의 모니터링 결과, (그림 5-6)~(그림 5-10)과 같이 나타났다. (그림 5-6)~(그림 5-10)은 지구별 평균 담수심과 물꼬높이의 변화를 순별로 보여주고 있다. 지점별로 담수심과 물꼬높이가 약간의 차이를 보이고 있으나, 순별 경향은 대체로 유사한 것으로 나타났다.



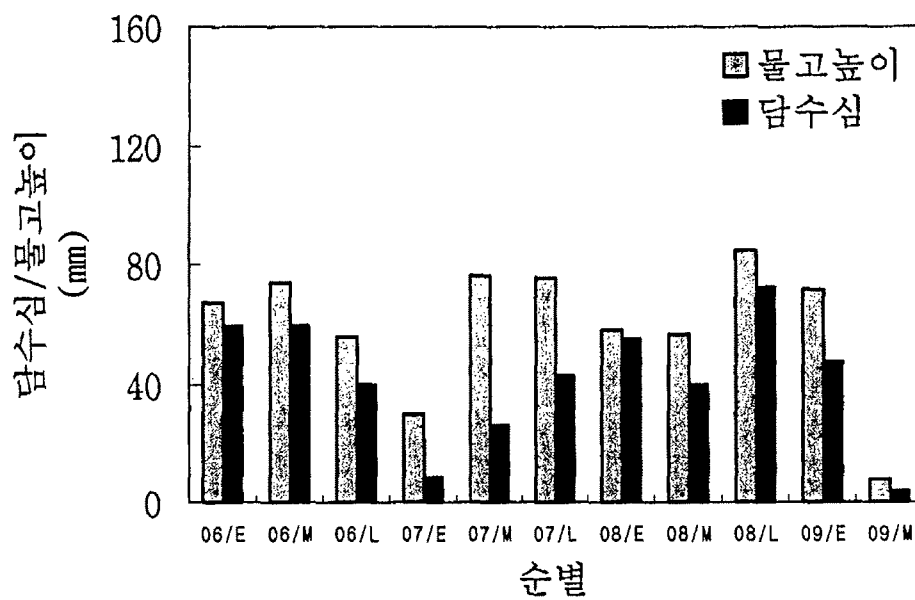
(그림 5-6) 시험포장의 담수심 및 물꼬높이 변화 (당하교, 1996년)



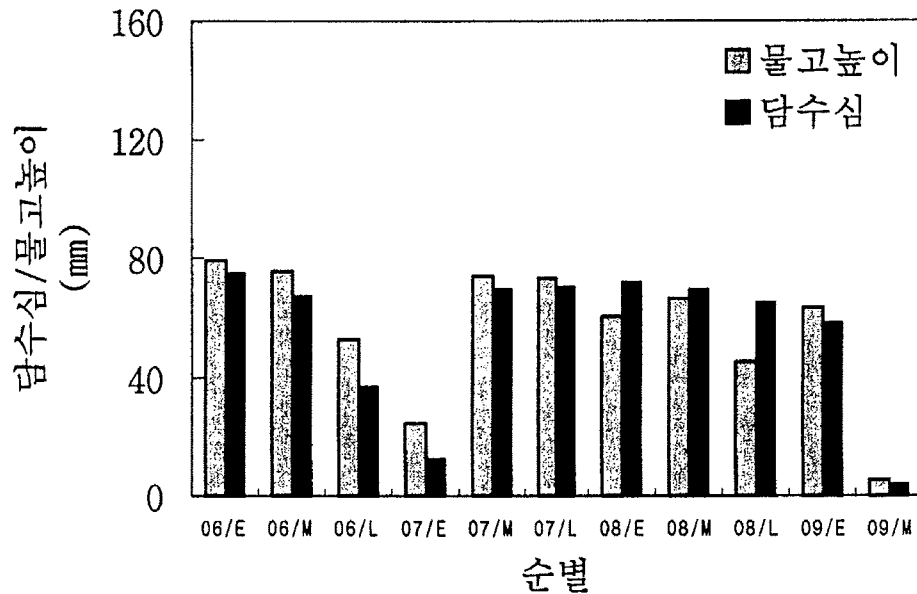
(그림 5-7) 시험포장의 담수심 및 물꼬높이 변화 (기천지 하류 B, 1996년)



(그림 5-8) 시험포장의 담수심 및 물고높이 변화 (기천지 하류 A, 1996년)



(그림 5-9) 시험포장의 담수심 및 물고높이 변화 (발안지 하류 B, 1996년)



(그림 5-10) 시험포장의 담수심 및 물꼬높이 변화 (발안지 하류 A, 1996년)

담수심은 수원공의 용량이나 영농방식에 따라 다르나, 시기별 평균 담수심은 <표 5-3>에서와 같이 6월 초순에 71.5 mm로서 깊게 담수하고 있으며, 중간낙수기인 7월 초순과 9월 중순에는 담수심이 작았으며, 그 값은 14.1 mm 와 6.4 mm이었다.

물꼬높이는 실험실에서 제작한 물꼬높이 측정기를 이용하여 주 1회 측정하였다. 관개지구의 물 관리 특성을 나타내는 물꼬높이는 일정 수위의 담수심을 유지하기 위한 포장의 물리적 요소로서, 포장의 특성이나 물관리 방식에 따라 많은 차이를 보이게 되는데 시험지구의 경우, 물꼬높이를 직접 조사하여 순별로 적용하였다. 물꼬높이는 담수심과 같이 관행 영농방식에 따라 변화하며, 대체적으로 담수심보다 10~20 mm정도 높게 나타나고 있다. 시기별 물꼬관리는 이앙직후인 6월 초순에 81 mm정도 높게 유지하며, 중간낙수기인 7월 초순에는 35 mm정도로 낮게 유지하는 데, 이들 결과는 담수심의 시기별 변화와 유사하다. <표 5-4>는 시험포장에 대한 시기별 물꼬높이를 보여주고 있다.

<표 5-3> 발안저수지 유역 내 시험포장의 시기별 담수심 변화 (1996년)

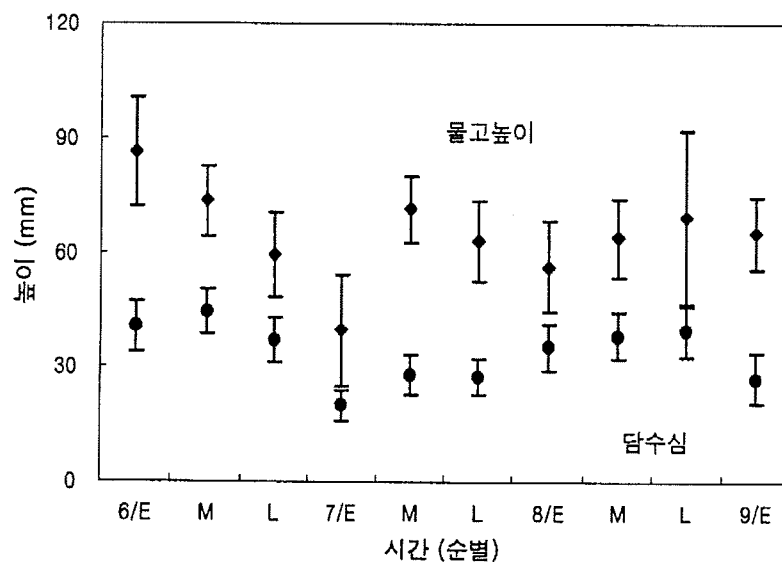
순 별	발안지 A	발안지 B	기천지 A	기천지 B	당하교	평 균
6/E	74.32	59.55	94.88	75.00	69.14	71.46
6/M	67.14	59.77	70.63	61.13	55.29	63.18
6/L	36.40	39.47	43.50	51.13	43.14	40.92
7/E	11.90	8.32	22.19	16.75	25.14	14.08
7/M	69.32	25.80	45.63	53.75	36.14	47.52
7/L	70.29	42.39	44.14	36.00	28.43	49.75
8/E	71.86	55.18	60.25	30.38	19.71	54.33
8/M	69.10	39.71	41.86	32.75	31.86	48.40
8/L	65.05	72.58	85.13	85.00	10.57	66.35
9/E	58.10	47.60	64.57	44.25	22.29	49.75
9/M	4.05	4.18	22.13	0.00	9.00	6.32

<표 5-4> 발안저수지 유역내 시험포장의 시기별 물꼬높이 변화 (1996년)

순 별	발안지 A	발안지 B	기천지 A	기천지 B	당하교	평 균
6/E	79.32	67.41	106.25	91.38	86.86	80.9
6/M	75.55	73.77	85.50	72.38	59.00	74.0
6/L	52.25	55.74	55.00	78.88	53.71	57.3
7/E	24.71	29.63	43.44	62.00	37.36	34.6
7/M	73.55	76.38	68.50	80.13	57.29	72.9
7/L	72.86	75.22	55.13	59.50	52.29	67.2
8/E	60.57	58.10	72.50	48.63	41.57	57.5
8/M	66.14	56.53	70.43	75.88	50.57	63.4
8/L	44.71	84.89	78.00	93.38	44.00	67.2
9/E	63.10	71.30	63.29	76.63	50.86	66.1
9/M	5.68	7.50	39.88	0.00	26.86	11.9

(그림 5-11)은 시기별 물꼬높이와 담수심 자료를 평균과 표준편차를 이용하여 도시한 것이다. 그림에서 오차막대의 끝점은 표준편차를 나타내고 있으며, 중앙점은 평균값을 표시하는 것으로 물꼬높이 및 담수심의 필지별 분산 정도를 나타내고 있다. (그림 5-11)에서 담수심의 경우 관개기간동안 표준편차의 변화가 크지 않은 것으로 조사되었으나, 물꼬높이의 경우 7월 하순과 8월 하순에 상대적으로 큰 편차를 보이고 있으며, 전반적으로 담수심에 비해 큰 편차를 보이고 있는 것으로 조사되었다.

<표 5-5>는 2000년 기천지구내의 시험포장에서의 물꼬높이 변화를 조사한 값과 1996년 기천지 A, B지구의 자료와 비교한 것을 보여주고 있다. 물꼬높이와 담수심은 기상조건에 따라 영향을 받기 때문에 1996년의 경우 7월 초순과 중순에 물꼬높이가 가장 낮은 것으로 조사되었으나, 2000년의 경우 8월 하순에 물꼬높이가 가장 낮은 것으로 조사되었다. 또한, 전반적인 물꼬높이는 2000년의 경우 1996년에 비해 상대적으로 높게 나타났다.



(그림 5-11) 시기별 물꼬높이와 담수심 변화 (발안저수지 유역, 1996년)

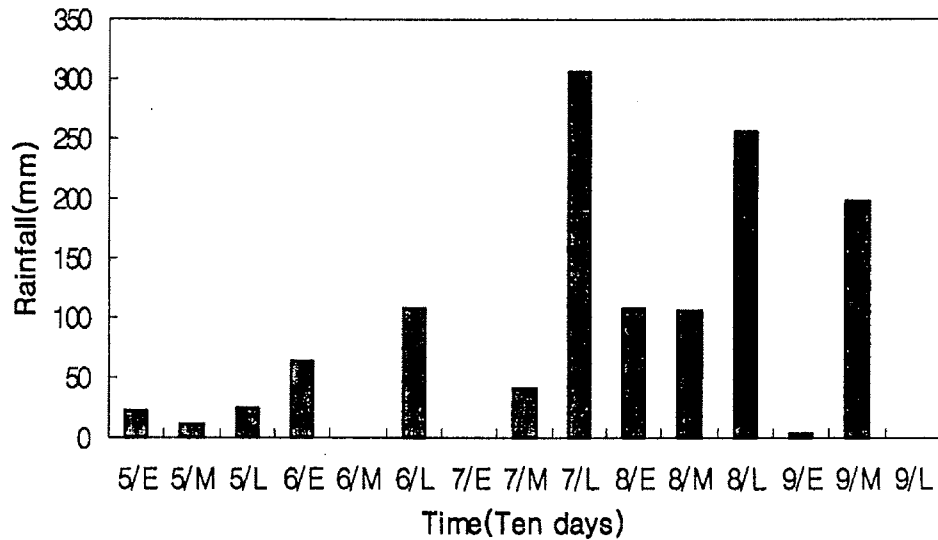
<표 5-5> 기천지구내 시험포장의 시기별 물꼬높이의 변화

Date	1996		2000	
	Mean of 16 samples	Standard deviation	Mean of 8 samples	Standard deviation
6/E	99	47	95	10
6/M	79	20	94	8
6/L	67	38	72	12
7/E	52	32	83	23
7/M	53	25	72	12
7/L	74	30	100	22
8/E	57	22	78	12
8/M	73	24	88	12
8/L	86	31	50	15

4. 논에서의 물수지 조사 결과

기천지구내에 있는 시험포장의 물수지 자료는 강우량과 배수량을 측정하였다. 시험지구의 일별 강우량은 지구에서 0.5 km 떨어진 팔탄면 사무소에 자기강우계를 설치하여 일 강우량 자료를 수집하였다.

논벼의 생육기간인 5월~9월의 강우량은 1,243 mm로 장마기간 이후 7, 8월 기간 동안 집중호우로 인하여 예년에 비하여 많은 강우가 내렸다. 50 mm이상의 강우가 9회 왔으며, 100 mm이상의 강우가 7월 22일 303.6 mm의 폭우가 내렸다. 순별 강우량 자료는 (그림 5-12)와 같다.



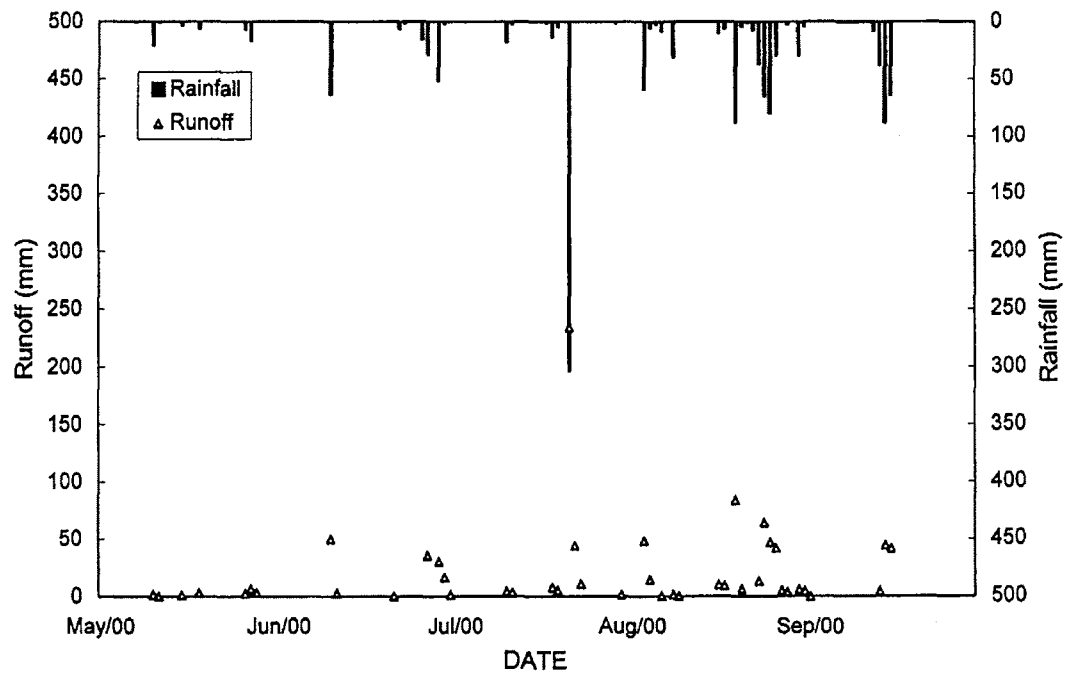
(그림 5-12) 기천지구내 순별 강수량 변화 (2000년)

시험지구에서의 배수량을 측정하기 위하여 HP#9의 수위자료를 이용하였다. HP#9는 배수로 말단에 위치하고 있어 블록내의 배수량만을 측정할 수 있으며, 현장 유속측정에 의한 수위-유량 관계식을 이용하여 일별 배수량을 산정하였다. (그림 5-13)은 배수량을 측정하기 위한 HP#9의 전경을 보여주고 있다.

현장 모니터링을 통해 얻어진 2000년 기천지구내 논에서의 배수량의 변화를 도시한 결과는 (그림 5-14)와 같다. (그림 5-14)는 강수량과 배수량의 변화를 일별로 도시한 것으로 관개기간 동안 강수량은 1,243 mm, 배수량은 918 mm를 나타냈으며, 7월 22일의 폭우로 인해, 이날 하루동안 303.6 mm의 강우가 발생해 233.9 mm의 배수량이 발생했다.



(그림 5-13) 배수량 측정을 위한 수위계 전경 (HP#9)



(그림 5-14) 기천지구내 시험포장의 강우량, 배수량 변화 (2000년)

5. 논에서의 물질수지 조사 결과

논에서의 물질수지를 측정하기 위해 1996년 서울대학교 시험포장을 대상으로, 2000년 기천지구내 시험포장을 대상으로 모니터링을 실시하였다. <표 5-6>은 1996년 시험포장에서 시료채취 시기, 측정주기, 측정수를 나타내고 있다. <표 5-6>에서와 같이, 논에서의 영양물질 순환기작을 조사분석하기 위하여 못자리는 2개 시험구, 본답기는 3개 시험구에 대해 주 3회에 걸쳐, 4월 25일부터 9월 10일까지 현장 모니터링을 실시하였다. 샘플링한 시료는 총 8개 항목에 대하여 수질분석을 실시하였으며, 세부방법은 제 4 장에서 서술한 바와 같다.

<표 5-6> 정밀시험포장의 수질샘플링 현황

구 분	시 기	측정주기	측 점 수
못자리	4/25 ~ 5/25	주 3회	2 (NU-1, NU-2)
본답기	5/26 ~ 9/10	주 3회	3 (PF-1, PF-2, PF-3)

2000년 시험지구에서의 수질시료의 채취는 주 1회를 기준으로 하였고, 폭우시 수시출장을 통해 채취하였으며, 배미별 물꼬높이와 담수심, 초장, 물꼬폭 등을 동시에 측정하였다. 현장모니터링은 이양후부터 담수가 끝나는 9월 초순까지 실시되었고, 배출수는 폭우시 현장 출장을 통해 채취하였다.

가. 강우중 영양물질량

강우 중에 함유된 질소와 인의 양은 해당지역의 대기 오염정도에 따라 상이하 며 동일지역에서도 시기별 변화를 보이게 되므로 포장과 약 0.5 km 거리에 위치한 서울대학교 농업생명과학대학 농공학과 옥상에서 약 9회 정도에 걸쳐 샘플링하였 다. <표 5-7>과 <표 5-8>은 1996년과 2000년에 측정한 시험기간 동안의 강우수 질 분석결과이다.

1996년 강우수질의 경우 <표 5-7>에서 보는 바와 같이 수원지방의 1996년 4월 ~ 8월 중의 강우의 pH는 평균 4.7의 산성을 나타내었으며, 6월 17일에는 3.75로 가장

산성도가 높은 반면에 7월 26일에는 5.94로 가장 낮은 값을 나타내었다. 총질소 농도는 0.54~6.76 mg/ℓ의 범위로서 평균 2.48 mg/ℓ, 표준편차 2.05 mg/ℓ의 큰 변화폭을 나타냈다. 총인 농도는 0.01~0.47 mg/ℓ의 범위를 보였으며, 평균 0.10 mg/ℓ, 표준편차 0.16 mg/ℓ의 변화폭을 나타냈다.

2000년 강우수질의 경우 <표 5-8>에서 보는 바와 같이 총질소의 경우 평균 1.090 mg/ℓ였으며, 총인의 경우는 0.036 mg/ℓ로 나타났다. 이는 동일지역에의 1996년 강우 수질자료의 총질소 농도는 평균 2.48 mg/ℓ보다 상당히 작게 나타났는데 이는 강우의 수질이 계절적으로 시기적으로 큰 변동을 하고 있음을 나타낸다. 총인의 경우도 평균 0.036 mg/ℓ로서 96년의 평균치 0.10 mg/ℓ보다는 작게 나타났다.

<표 5-7> 시험기간 동안의 강우수질 분석결과 (1996년)

강우사상	pH	T-N (mg/ℓ)	T-P (mg/ℓ)
96/04/30	5.00	2.04	0.11
96/06/09	4.52	4.20	0.01
96/06/17	3.75	2.57	-
96/06/24	5.31	2.34	0.06
96/06/28	4.20	2.92	0.21
96/07/15	4.38	0.83	-
96/07/22	3.91	0.54	-
96/07/26	5.94	6.76	0.47
96/08/27	5.00	0.16	0.02
평균	4.67	2.48	0.10
표준편차	0.71	2.05	0.16

<표 5-8> 시험기간 동안의 강우수질 분석결과 (2000년)

(단위 : mg/ℓ)

강우사상	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-N	T-P
00/6/26	0.092	0.192	0.699	0.032
00/7/22				0.012
00/7/22				0.031
00/8/6	0.797	0.192	1.596	0.054
00/8/9				0.031
00/8/17	0.878	0.659	2.259	0.050
00/8/20	0.385		0.646	0.048
00/8/25	0.386		0.800	0.034
00/8/31	0.631	0.055	1.355	0.042
00/9/14	0.274		0.500	0.029
00/9/16	0.329		0.866	0.030
평균	0.472	0.137	0.952	0.036
표준편차	0.271	0.227	0.600	0.001

나. 관개수 영양물질량

관개수로부터 유입되는 영양물질량은 관개수 농도에 따라 그 양이 미미할 수도 있지만 농도가 클 경우 전체 부하량의 큰 비중을 차지하게 된다.

논으로 공급되는 관개수는 일부가 토양과 작물에 흡수되나, 흡수율은 농도와 수온, 토양의 종류와 작물의 생육단계 등에 따라 다르다. 2000년 기천지구의 시험포장에서는 상류에 위치한 기천저수지부터 단일 관수로를 통해 관개하므로, 관개수 유입구인 HP#10에서 채취하여 분석하였다. <표 5-9>는 관개수의 농도를 나타낸 것으로, 관개수의 총질소 농도는 평균 1.091 mg/ℓ 였으며, 총인의 경우 평균 0.028 mg/ℓ 로 나타났으며, 시기별로 어느 정도의 변동을 하였다.

<표 5-9> 기천지구 시험포장 관개수에서의 수질변화 (HP#10, 2000년)

날짜	NH ₄ N	NO ₃ N	TKN	TN	TP(mg/L)	SS(mg/L)
2000/4/24	0.256	0.851	0.906	1.757	0.00475	7.30
2000/5/10	0.229	0.376	0.449	0.825	0.01146	15.31
2000/5/24	0.284	0.184	0.000	0.184	0.00998	3.57
2000/6/21	0.000	0.303	0.151	0.454	-	-
2000/7/19	0.000	0.127	1.085	1.212	-	-
2000/8/17	0.000	1.208	0.549	1.757	-	-
2000/8/23	0.000	0.805	0.645	1.450	0.08515	11.21
평균	0.110	0.551	0.541	1.091	0.028	9.347
표준편차	0.138	0.407	0.386	0.623	0.038	5.051

다. 논물 영양물질농도 변화

1996년 서울대학교 시험포장을 대상으로 실시한 논물의 농도변화는 <표 5-10>에서 보는 바와 같다.

수소이온농도는 액체의 산성, 알칼리성 또는 중성을 나타내는 지표로서, 수도의 pH 허용범위는 상당히 넓고, 논에서는 관개수 pH가 식물생육에 직접적인 영향을 미치는 경우는 적으며 간접적인 영향이 큰 것으로 알려져 있다. <표 5-10>에서와 같이 대부분의 자료가 pH 6.5 ~ 9.5의 범위를 보였으며, 각 포장별 최대/최소값과 평균값이 비슷한 경향을 보였으며, 이앙전과 후의 pH 값은 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

용존산소는 물 속에 녹아있는 산소량을 말하며, 일반적으로 물이 차고 순수할수록 용존산소량이 높아진다. 관개수 중 용존산소는 수도생육에 직접적인 영향을 미치지 않으며, 간접적인 수질지표항목으로서 의미를 가진다. <표 5-10>에서와 같이, 이앙전인 NU-1, NU-2의 평균값이 각각 8.40, 9.03으로 이앙후인 PF-1, PF-2, PF-3에서의 값보다 높은 경향을 보였다.

수중질소는 유기태 질소, 암모니아태 질소, 아질산태 질소, 질산태 질소 등으로 총 질소는 이들의 합계를 말한다. 농업에서는 질소가 비료로서 다량 사용되므로 수중에 질소성분을 많이 함유하게 되며, 질소과다에 의한 수도피해로는 도복, 등숙불량, 병충해 만연, 미질의 저하 등이 있다. <표 5-10>에서와 같이 NU-2 에서의 평균값이 9.68 mg/ℓ, 최대값이 45.40 mg/ℓ 로 가장 큰 값을 나타내었다. 평균값이 최소인 측점은 NU-1으로 2.20 mg/ℓ 를 나타냈으며 전체 샘플중에서 가장 최소의 값은 PF-1에서 0.28 mg/ℓ 로 나타났다. 총질소는 측점별, 시기별로 변동이 크게 나타나는데 이는 시비량과 시비시기 및 물관리에 관련된 것으로 생각된다.

총인의 경우는, NU-1 에서 평균값이 0.59 mg/ℓ 로 최대이고 NU-2 와 PF-1 에서 평균값이 0.28 mg/ℓ 로 최소로 나타났다. 최대값은 NU-1 에서 2.61 mg/ℓ, 최소값은 PF-3 에서 0.04 mg/ℓ 로 나타났다. 총인의 변동폭은 총질소에 비해 그다지 크지 않은 경향을 나타내었다.

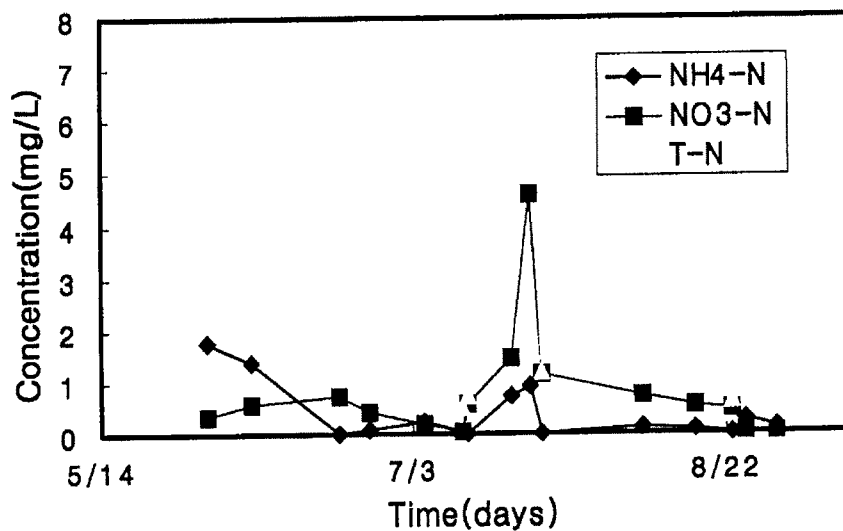
<표 5-10> 서울대학교 시험포장의 측점별 수질분석 결과 (1996년)

포장	측정기간 (측점수)	구 분	pH	DO	T-N	T-P	비 고	
					mg/ ℓ			
NU-1	96/4~96/5 (11)	최대/최소	8.92/6.84	10.40/5.50	10.24/1.00	2.61/0.17	못 자 리	
		평균	7.65	8.40	2.20	0.59		
		표준편차	0.69	1.99	2.84	0.79		
NU-2	96/4~96/5 (11)	최대/최소	9.39/6.84	12.20/5.50	45.40/1.12	0.48/0.15		
		평균	7.75	9.03	9.68	0.28		
		표준편차	0.83	2.57	15.69	0.12		
PF-1	96/5~96/9 (31)	최대/최소	9.53/6.54	14.03/4.29	35.84/0.28	0.75/0.05		본 답 기
		평균	7.74	8.04	4.87	0.28		
		표준편차	1.00	2.68	8.07	0.17		
PF-2	96/5~96/9 (16)	최대/최소	9.49/6.85	12.60/2.50	7.88/0.72	2.51/0.06		
		평균	7.63	7.43	3.23	0.55		
		표준편차	0.73	2.49	2.18	0.63		
PF-3	96/5~96/9 (19)	최대/최소	9.65/6.61	11.70/2.95	3.86/0.44	0.49/0.04		
		평균	7.52	6.13	2.27	0.31		
		표준편차	0.83	2.56	1.14	0.13		

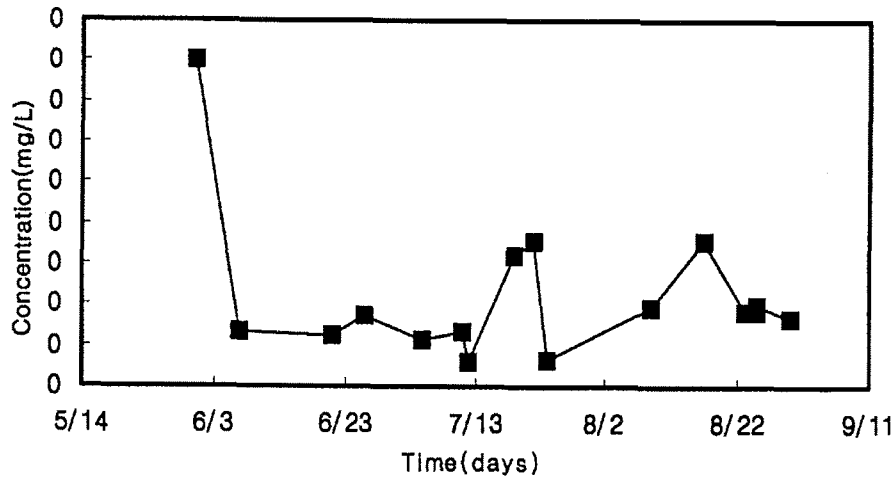
2000년 기천지구에서 실시한 논물 모니터링은 격주 혹은 주단위로 측정하였으며, 폭우가 발생한 경우는 폭우이후에 채수하여 수질을 측정하였다. 영양물질에 대한 논물 모니터링의 결과는 (그림 5-15), (그림 5-16)에서 보는 바와 같다.

(그림 5-15)는 관개기간 동안의 암모니아태 질소, 질산태 질소, 총질소의 농도변화를 보여주고 있다. 총질소의 농도는 0.508~6.897 mg/ℓ의 범위로 평균은 1.986 mg/ℓ인 것으로 조사되었으며, 암모니아태 질소는 0~1.768 mg/ℓ의 범위로 평균은 0.376 mg/ℓ인 것으로 조사되었다. 또한, 질산태 질소는 0~4.577 mg/ℓ의 범위로 평균 0.787 mg/ℓ로 나타났다. 암모니아태 질소의 경우 분얼비인 요소비료 시비의 표충시비 후 급격히 증가하는 경향을 가졌다.

(그림 5-16)은 관개기간 동안의 총인의 농도변화를 보여주고 있다. 총인의 농도는 0.012~0.160 mg/ℓ의 범위를 보였으며, 평균은 0.045 mg/ℓ로 조사되었다. 총인의 농도는 기비 후 일시적으로 증가하였다가 점차 감소하는 경향을 보였다.



(그림 5-15) 기천지구 논물의 질소농도변화 (2000년)

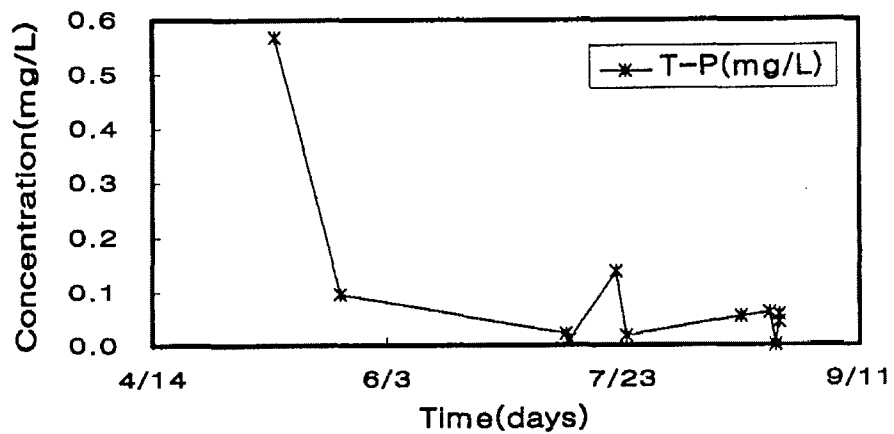
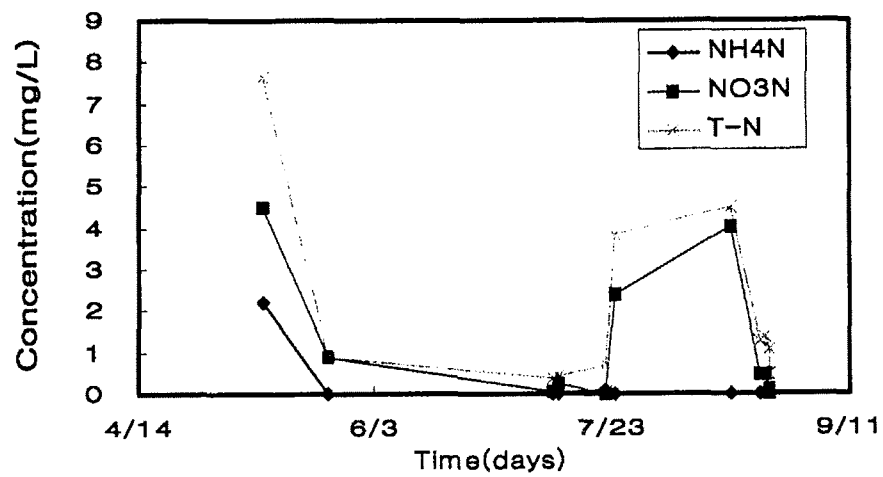
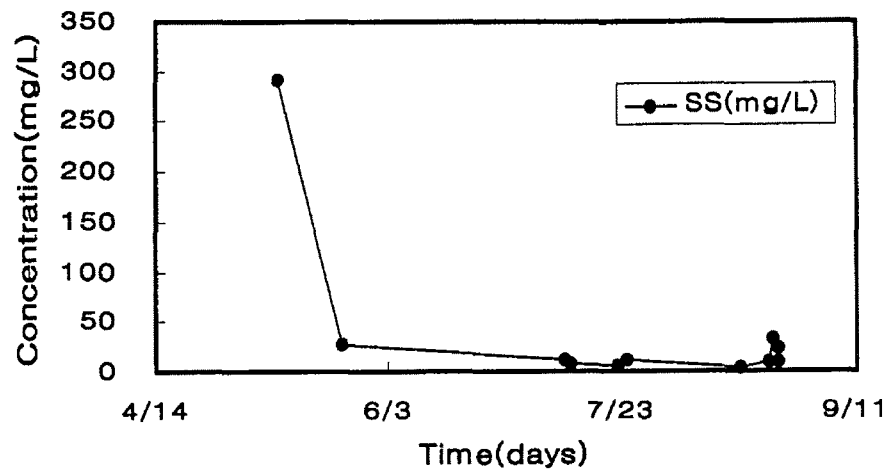


(그림 5-16) 기천지구 논물의 인농도변화 (2000년)

라. 배출수 수질

배출수의 수질은 2000년 기천지구를 대상으로 모니터링을 실시하였다. 논에서 배출수의 수질은 배수가 발생하는 폭우시 샘플링을 통하여 측정하였다. 모내기전 물빼기 수질은 기비의 영향으로 매우 높게 나타났는데, 이는 물로터리 작업후 기계이앙을 위해 물을 빼는 관행 때문인 것으로 보인다.

(그림 5-17)은 배출수의 수질모니터링 결과를 보여주고 있다. 부유사랑의 경우 4.30~291.5 mg/ℓ 범위에서 분포하였으며, 평균은 39.61 mg/ℓ 로, 이앙전 물빼기 기간동안 고농도가 배출되었다. 총질소의 농도는 최대값 7.64 mg/ℓ, 평균 2.05 mg/ℓ, 암모니아태 질소는 최대 2.188 mg/ℓ, 평균 0.22 mg/ℓ 로 나타났으며, 질산태 질소는 최대값 4.48 mg/ℓ, 평균 1.67 mg/ℓ 로 나타났다. 이는 질산화를 통해 암모니아태 질소가 질산태 질소로 변환된 후 용해되어 쉽게 유출과 함께 배출되었기 때문이다. 총인의 농도는 최대값 0.568 mg/ℓ, 평균 0.097 mg/ℓ 로 기비 시비후 일시적으로 증가하였다가 점차 감소하는 경향이였다. 따라서 총인의 경우는 기비 직후의 물관리에 따라서 그 배출량을 크게 줄일 수 있는 것으로 보인다.



(그림 5-17) 기천지구 배출수의 영양물질, SS 농도변화 (2000년)

마. 시비량

시비량 조사는 1996년 서울대학교 시험포장과 2000년 기천지구를 대상으로 실시하였다. 비료는 작물 생리상 필요한 시기에 필요한 성분만을 필요한 만큼 시비한다. 이 불확실성이 비료 유출의 평가를 어렵게 하고 있다. 동일작물이라 해도 시비량이 지역, 지방에 따라 다르다.

1996년 포장에서의 시비량은 <표 5-11>와 같이 질소는 기비, 분얼비, 수비를 나누어 시비하였으며, 인은 기비로만 시비하였다.

2000년 기천지구에서는 기비의 경우 복합비료를 이앙전 쉼레질과 함께 토양전층이 시비하였으며, 분얼비는 요소비료를 표층 시비하였으며, 수비의 경우는 수비전 용비료를 표층 시비하였다. <표 5-12>에서 보는 바와 같이 총 질소질 비료 시비량은 235 kg/ha로서 벼 표준시비량인 110 kg/ha와 우리 나라 평균 시비량인 212.8 kg/ha보다 훨씬 많았는데 이는 시험지구의경의 중산간지의 논이기 때문인 것으로 보인다. 인산의 경우 표준시비량 70 kg/ha와 비슷한 값이다.

<표 5-11> 서울대학교 시험포장에서의 시비량 (1996년)

구 분		기비	분얼비	수비
시 기		96/05/24	96/06/04	96/07/10
시비량 (kg/ha)	N	146	87	59
	P	80	0	0

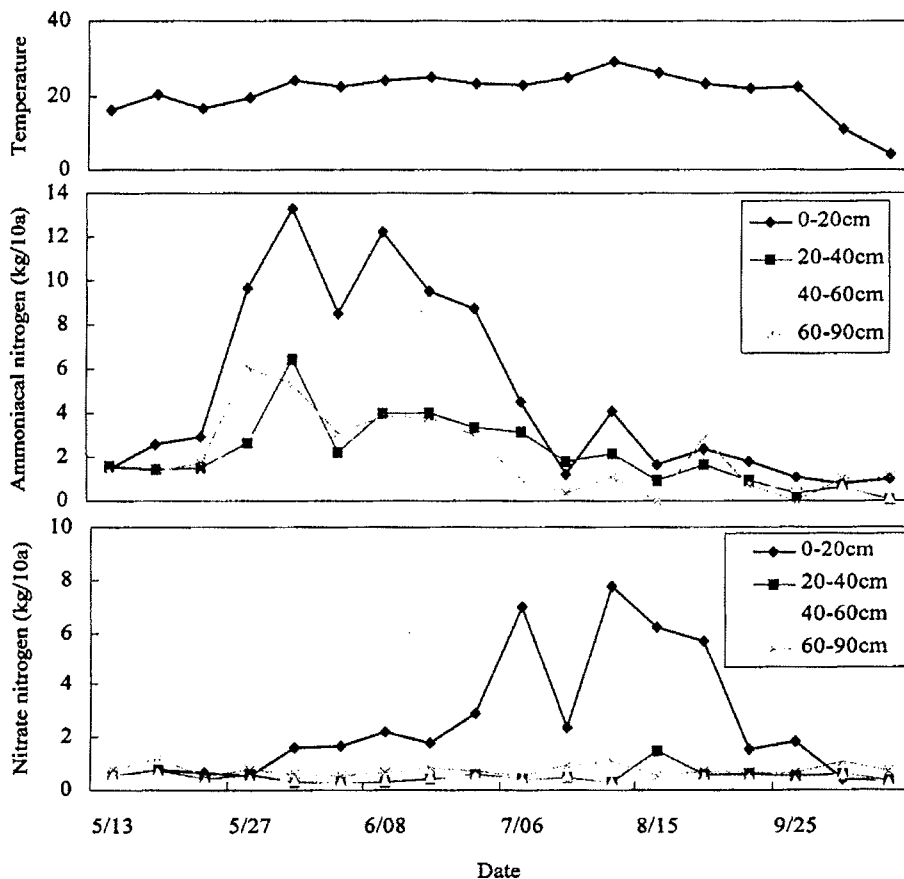
<표 5-12> 기천지구 시험포장에서의 시비량 (2000년)

구 분		기비	분얼비	수비
시 기		2000/05/20	2000/06/01	2000/07/24
시비량 (kg/ha)	N	84	92	59
	P	63	0	0

바. 토양 잔존질소량 분석

1996년 서울대학교 시험포장을 대상으로 토양에서의 잔존질소량을 측정하였으며, 시험기간 중 포장내의 토양을 깊이에 따라 4개 구간 (0~20 cm, 20~40 cm, 40~60 cm, 60~90 cm)으로 나누어 각 토층에서의 온도와 암모니아태 질소, 질산태 질소의 관계를 측정하였다. (그림 5-18)은 토양 잔존질소량 분석결과를 보여주고 있다.

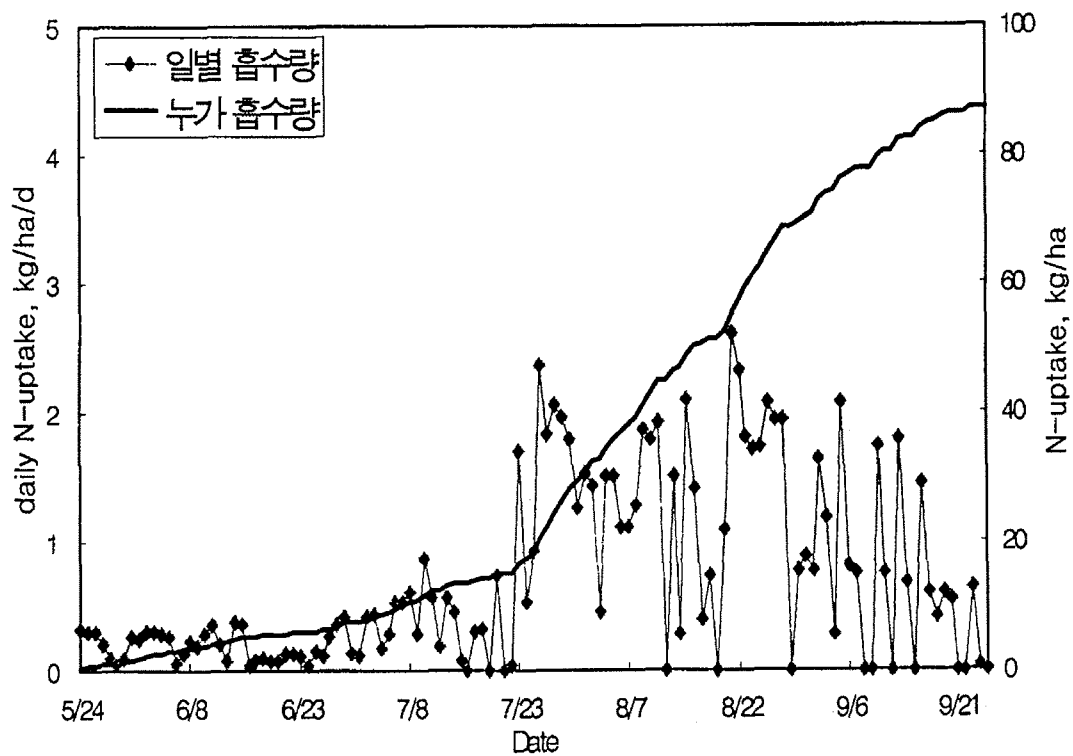
(그림 5-18)에서 보는 바와 같이, 구간 중 0~20 cm를 제외한 나머지 구간에서는 질산태 질소의 양이 시기별로 큰 변화를 나타내지 않았다. 0~20 cm의 구간에서는 질산태 질소가 초기에는 낮은 값을 보이다 점차 증가한 후 감소하게 된다. 초기에는 표층에서 암모니아태 질소의 농도가 높고 질산태 질소의 농도가 높지 않았으나 온도가 높아짐에 따라 질산태 질소로 변화하는 양이 증가한 것으로 사료되며 이는 일본에서의 연구결과와 비슷한 경향이다.



(그림 5-18) 서울대학교 시험포장 토양잔존 질소량의 변화 (1996년)

사. 벼에 의한 흡수량

(그림 5-19)는 최적의 조건에서 벼에 의한 N의 흡수량을 EPIC모형에 의하여 모의발생한 결과를 보여 주고 있다. (그림 5-19)에서와 같이, 기상조건에 따라서 일별 흡수량이 변하였고, 누가량의 경우는 생육초기에는 서서히 증가하다 생육이 왕성한 시기에는 급격히 증가하는 경향을 보였다. EPIC모형 등의 모델을 이용한 N의 흡수량 추정은 이후에서 지속적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

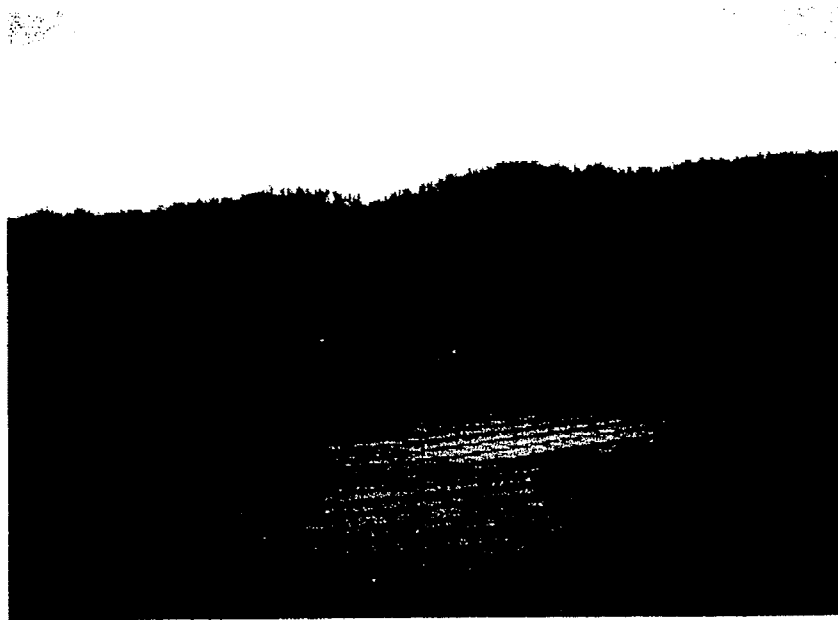


(그림 5-19) EPIC모형에 의한 일별 및 누가 N-uptake

6. 밭에서의 수문, 수질 모니터링

가. 시험포장 개요

밭의 수문/수질/토양 모니터링을 위한 시험포장으로 경기도 화성군 양감면 요당리 밭기반정비사업 지구를 선정하였다. (그림 5-20)은 선정된 시험포장의 전경을 보여주고 있다.

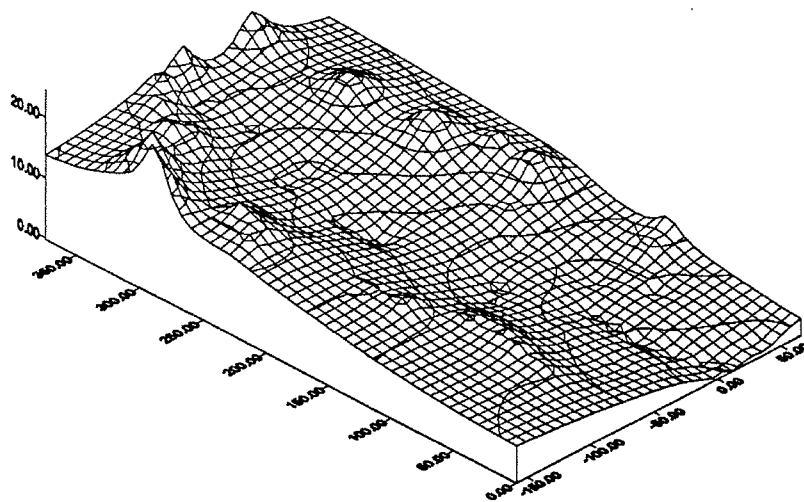


(그림 5-20) 밭시험포장의 전경

(그림 5-21)은 EDM과 GPS를 이용하여 시험포장에 대한 측량을 실시하고 있는 장면을 보여주고 있다. 현장 측량을 실시한 결과 시험포장의 면적은 4419.8 m², 시험포장의 둘레는 1070.3 m으로 측정되었다. (그림 5-22)는 밭 시험포장의 측량결과를 3차원으로 도시하여 보여주고 있다.



(그림 5-21) 밭 시험포장의 측량 광경

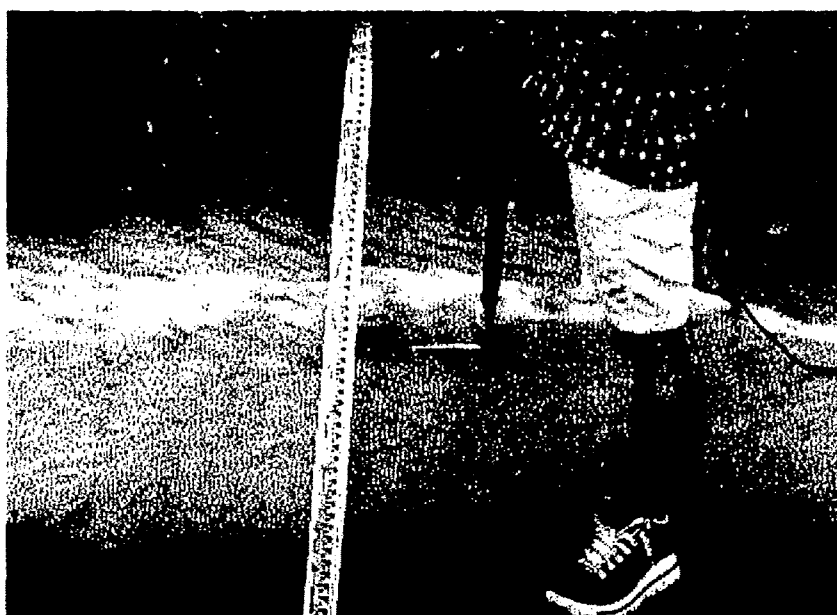


(그림 5-22) 밭 시험포장의 측량 결과

시험포장을 대상으로 구성한 수문/수질 계측망은 시험포장 배수구의 말단에 압력식 수위계 설치를 설치하여 유출량을 측정하였으며, 폭우시 현장 수질 샘플링을 통해 수질분석을 실시하였다. (그림 5-23)은 시험포장에서 폭우시 유출이 발생하는 장면을 보여주고 있으며, (그림 5-24)는 폭우시 현장유속 측정광경을 보여주고 있다.



(그림 5-23) 시험포장의 유출 광경



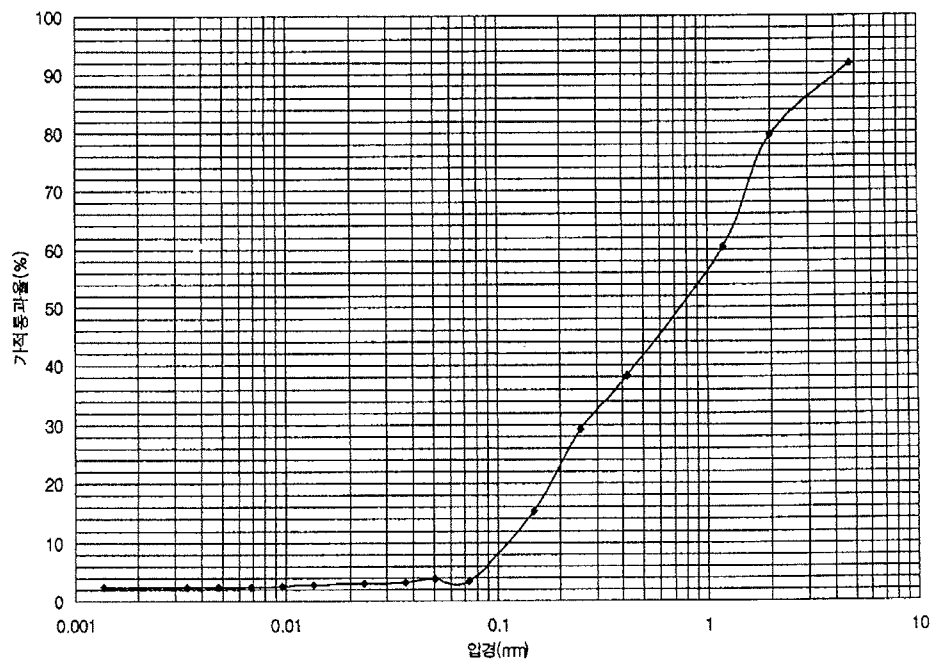
(그림 5-24) 유속측정 광경

나. 토양특성 분석 결과

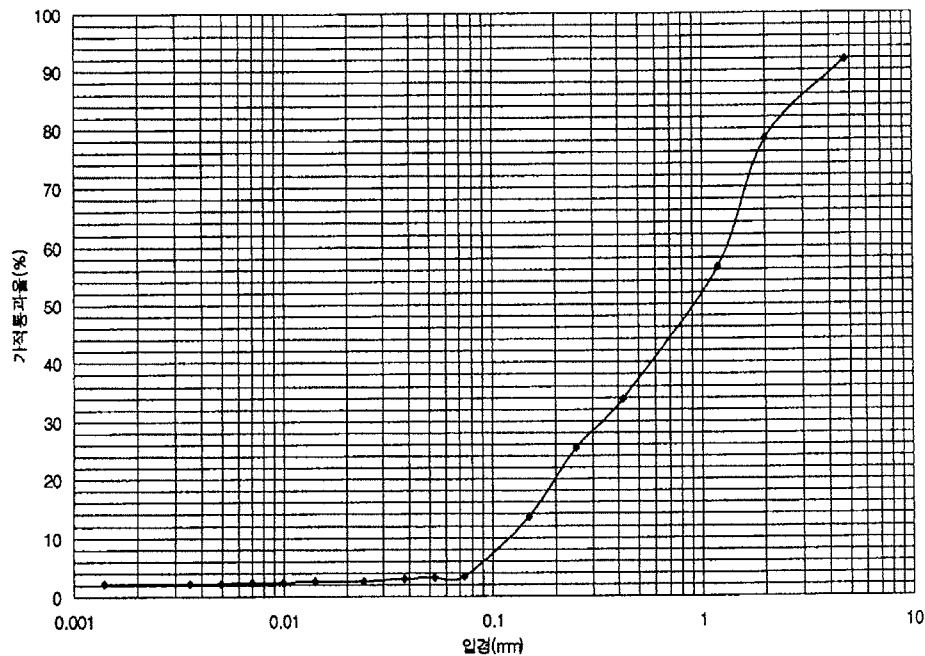
시험포장의 토양특성을 분석하기 위하여 현장 토양시료를 채취하여 분석하였으며, 토양의 물성시험과 토양의 이화학적 특성 분석시험을 실시하였다.

토양특성을 분석하기 위한 토양시료 채취는 1999년 9월 14일 요당리 시험포장에서 실시되었으며, 표토는 토양표면, 심토는 표면으로부터 40 cm 깊이에서 채취하였다.

토양의 물성 분석을 위한 실험으로 입도분포, 함수비, 비중, 수축한계, 수축율 등의 항목을 실험하였으며, 삼각분류법과 통일분류법을 이용해 토양을 분류하였다. (그림 5-25), (그림 5-26)은 요당리에서 채취한 표토와 심토의 입도분포 곡선을 보여주고 있다.



(그림 5-25) 요당리 토질 입도분포 곡선 (표토)



(그림 5-26) 요당리 토질 입도분포 곡선 (심토)

삼각분류법에 의해 토양을 분류한 결과 모래와 자갈이 많은 사질토로 분류되었으며, 통일분류법에 의한 분류 결과, 4.76 mm 통과량이 50 % 이상, $C_u > 6$ 이므로 SW로 분류되었다. 또한, 소성 및 액성시험 결과 N.P (none plastic)로 판정되었다.

시험포장의 표토와 심토에 대한 토질 기초 물성 분석 결과는 <표 5-13>과 같다. 표토와 심토의 함수비는 16.89%, 18.26%로 조사되었고, 비중은 2.73, 2.66으로 조사되었다. 또한, 표토와 심토의 수축한계는 5.49와 3.95로 조사되었으며, 수축율은 1.48%와 1.61%로 조사되었다.

<표 5-13> 요당리 토질 물성 분석 결과

구분	함수비(%)	비중	수축한계	수축율(%)
표토	16.89	2.73	5.49	1.48
심토	18.26	2.66	3.95	1.61

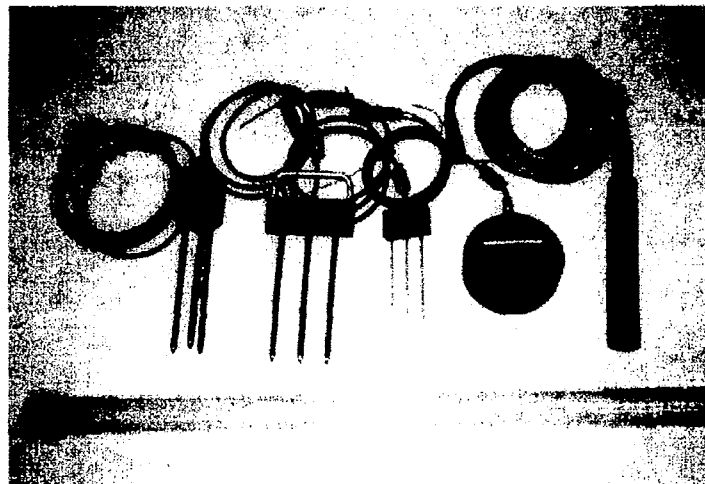
요당리 시험포장의 표토와 심토에 대한 화학분석결과를 <표 5-14>와 같다. pH는 표토가 6.6, 심토가 5.7로 나타났고, EC의 경우 표토가 0.135 dS/m, 심토가 0.538 dS/m로 조사되었다. 또한, 유기물의 함량은 표토가 1.7 g/kg, 심토가 3.4 g/kg으로 나타났고, TN의 경우 표토가 408.8 mg/kg, 심토가 170.8 mg/kg으로 조사되었다.

<표 5-14> 요당리 토양 시료 화학 분석 결과

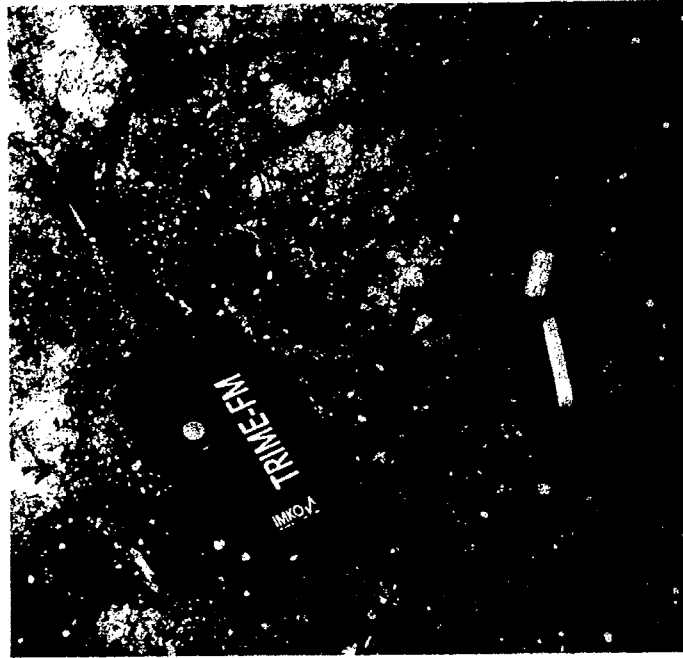
구분	pH	EC (dS/m)	유기물 함량 (g/kg)	T-N (mg/kg)
표토	6.6	0.135	1.7	408.8
심토	5.7	0.538	3.4	170.8

다. 토양수분 측정

시험포장을 대상으로 토양수분 측정하였으며, 토양수분 측정방법은 TDR (Time Domain Reflectometry Method)을 이용하였다. TDR법은 전기신호의 전도 특성을 이용하여 반향시간과 토양의 유전율상수(dielectric constant)의 관계를 이용하여 함수량을 추정하는 방법으로, TDR의 측정용 탐침 및 측정용 봉의 형태는 (그림 5-27), (그림 5-28)과 같다.

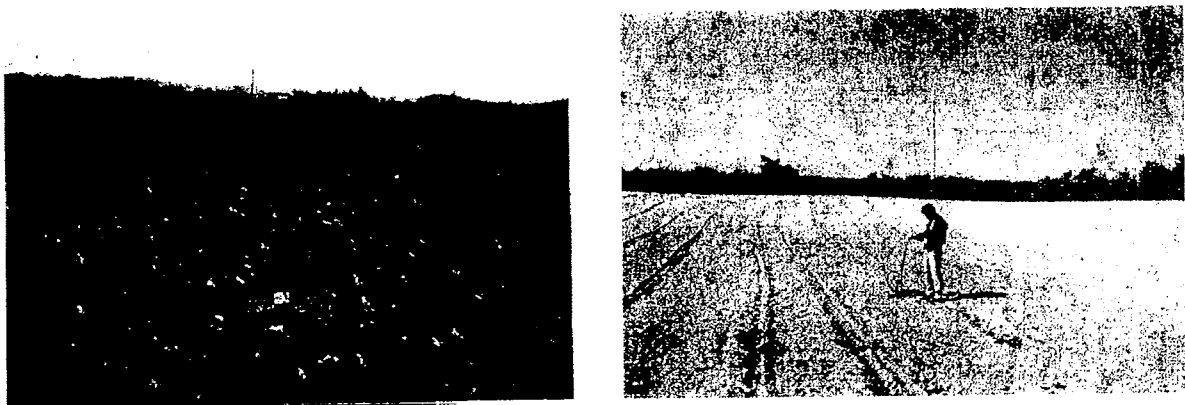


(그림 5-27) TDR의 측정용 탐침

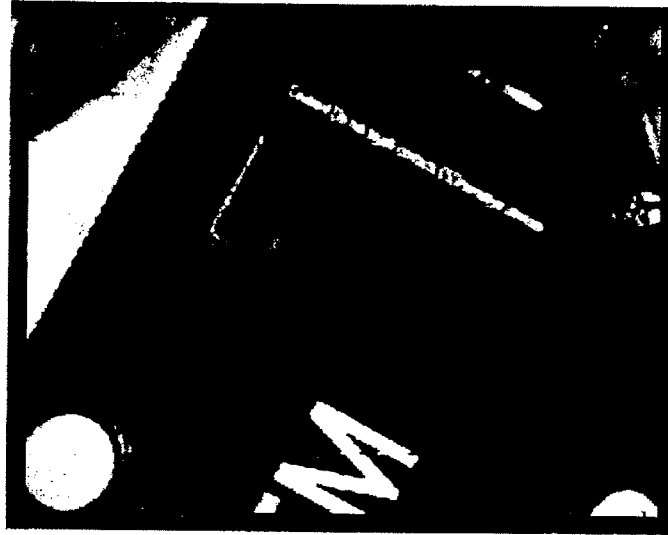


(그림 5-28) TDR의 측정용 봉

(그림 5-29)와 (그림 5-30)은 TDR의 현장 설치 및 현장에서의 토양수분 측정 광경을 보여주고 있다.

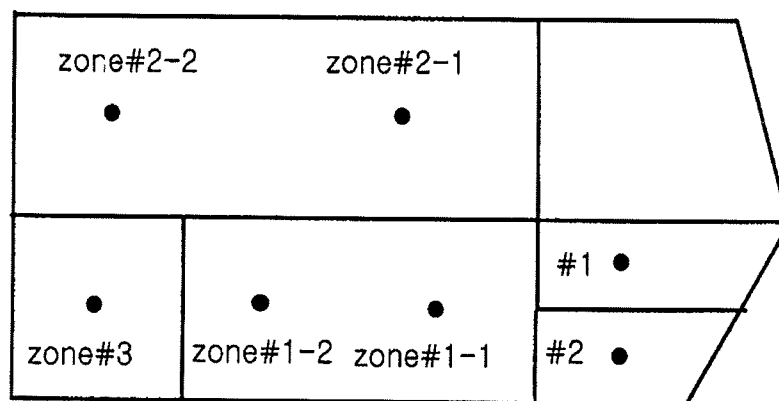


(그림 5-29) TDR의 현장 설치광경



(그림 5-30) TDR을 이용한 토양 함수비 현장 측정 광경

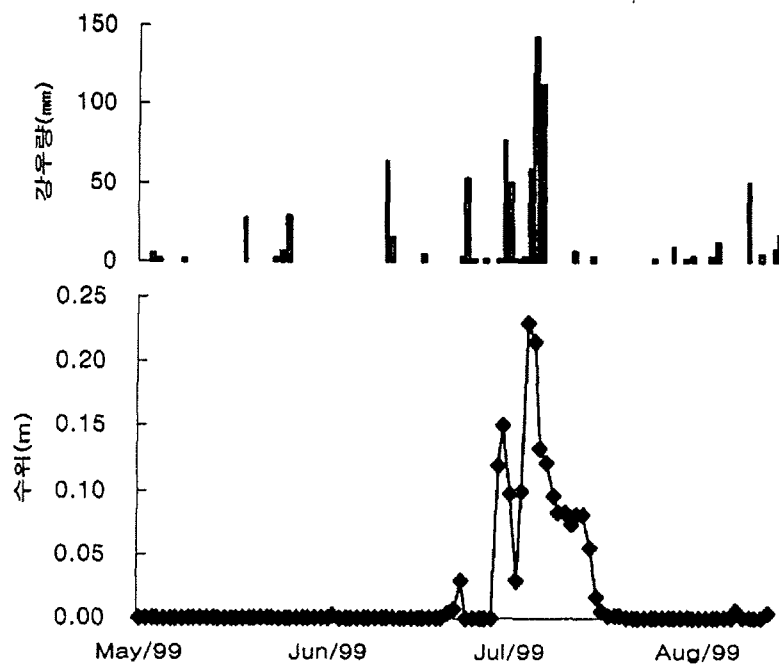
(그림 5-31)은 시험포장의 측정봉 설치 위치를 보여주고 있으며, 토양수분 측정은 보리 파종 직후부터 측정을 시작하였다.



(그림 5-31) 시험포장의 형태 및 측정봉 설치 위치

라. 밭의 수문/수질 모니터링

시험포장의 배수구 말단에 설치한 압력식 유속계를 이용해 폭우시 수위를 측정하고, 수위-유량관계로부터 폭우시 유량을 측정하였다. (그림 5-32)는 시험포장의 강우-유출 변화 측정 결과를 보여주고 있다.



(그림 5-32) 밭 시험포장의 강우-유출 변화

제 3 절 농작물 생육환경 모니터링

1. 개론

최근 벼의 재배가 이앙재배에서 직파 재배로 전환되는 경향이 뚜렷하며
역에는 양자를 혼재하는 경우도 있다. 전통적인 이앙재배에 대해서는 생육
조사 기준이 마련되어 있으나 직파재배는 조사 기준이 설정되어 있지 않은
다. 이앙재배의 경우도 실험포장의 생육·수량 조사 기준이 있을 뿐이며 스
위의 생육수량 모니터링을 위한 표본 단위, 표본 추출 방법, 표본수 등에 대한
은 마련되어 있지 않다.

한편, 우리 나라와 같이 관개 재배되고 영양관리가 적절하게 이루어지는
서 재배되는 벼의 생육과 수량은 지역 및 연차에 따르는 기상환경 변동과
주로 지배를 받는다. 그러므로 일사량, 온도 등 기상요소를 입력변수로 하는
장모델의 선정, 모델의 변수 추정, 보정 및 검정 등을 위한 벼 생육 및 수량
자료의 수집이 이루어져야 할 것이다.

따라서, 지역 단위의 생육·생장 모니터링을 정확하게 하기 위해서는 재
토양의 균일도 등에 따른 벼의 생장·수량성의 모집단내 개체간 변이성을
정확한 표본조사 방법 등이 우선적으로 확립되어야 할 것이다.

농지생태계의 주 구성요소인 벼의 생장과 생육의 체계적인 모니터링 기술
필요하며, 벼 생육모델, 원격탐사 등을 통한 벼 생육 및 수량의 모니터링 기술
립하기 위해 지역단위의 정확한 생육, 수량조사 자료가 집적되어야 할 것이
한, 생육모델, 원격탐사 등을 통한 벼 생육, 수량 모니터링 기술 확립을 위한
료 구축의 구축이 필요하다.

본 절에서는 벼 직파 재배와 이앙재배 벼의 모집단을 대표할 수 있는 효
표본 조사 체계를 확립하고, 재배 양식 및 토양의 변이도에 따른 모집단내
량의 변이성을 고려한 적정 표본 단위의 크기와 형태, 표본수 등을 조사하고,
장 모델에 의한 생육, 수량 모니터링 기술 구축 및 생육모델의 적용 가능성을
하도록 한다.

2 연구방법

가. 시험포장 선정

농작물의 생육환경을 모니터링 하기 위한 시험포장은 발안·기천지구의 현장 시험포장을 선정하였고, 조사 지역의 면적 및 토성에 따라 10개 포장 선정하였다. 정밀시험포장은 서울대학교에 위치한 실험포장을 선정하여 이앙재배와 직파재배에 대한 생육조사를 수행하였다.

나. 포장실험의 방법

정밀시험포장은 직파재배와 이앙재배를 주구로 하였으며, 시비량 (표준질소구 (12 kg/ 10 a), 무질소구)을 세구로 하여 실험하였다. 세구 (split plot design)의 배치는 3반복을 적용하였고, 실험구당 면적은 60 m²로 설정하였다.

이앙 재배구는 35일 묘를 1996년 5월 25일에 재식거리 30 x 15 cm에 1주 3본식으로 이앙하였고, 건답직파구는 5월 14일에 휴간 거리 30 cm로 조파하였으며, 파종량은 4 kg/10a였다. 기타 비배관리는 관행에 준하여 재배하였다.

다. 농작물 생육조사

농작물의 생육조사는 이앙 및 파종후 15일 간격으로 분얼수, 초장, 건물중, 엽면적을 조사하였고, 이앙 재배의 경우 분얼수 초장은 구당 3반복으로 각 반복당 10개체를 조사하였다. 건물중과 엽면적은 구당 3반복으로 4개체씩 sampling하여 조사하였으며, 건답 직파의 경우 분얼수 초장은 구당 3반복으로 휴장 1 m씩 조사하였고, 건물중과 엽면적은 구당 3반복으로 휴장 15 cm씩 sampling하여 모니터링을 실시하였다.

라. 수량 구성요소의 조사

수량조사는 이앙재배의 경우 구당 36개체씩 3반복 조사하였고, 직파재배의 경우는 구당 1 m²씩 3반복으로 sampling하여 조사하였다.

모집단내 수량 및 수량 구성요소의 변이성 검토를 위한 조사는 표준 질소구의 1반복 선택하여 구 전체 면적을 60 m²으로 선정하여 이앙재배는 개체별로 줄, 직파재배는 휴장 30 cm씩 sampling하여 조사하였다.

마. 조사내용

생육환경 모니터링의 조사내용은 품종, 이앙, 시비, 방제, 물관리, 관개용수, 잡초방제 등의 포장의 영농관리 상태를 조사하였고, 벼의 생육 및 수량 조사로서 초장, 분얼수, 엽록소, 건물중, 엽면적 지수, 수량, 천립중 등을 측정 조사하였다. 토양중의 무기태 질소 함량 조사 분석은 20 cm까지 auger로 샘플링하여 분석하였으며, 군락 반사율 조사는 vegetation analyzer를 이용하여 측정하였다.

바. 토양중의 영양물질 조사 분석

토양중의 영양물질은 토양중의 무기태 질소 ($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$) 등을 대상으로 2주 1회 작토 20 cm의 auger를 이용하여 시료 채취한 후 KCL로 추출하여 분석하였다.

사. 농작물 생육환경의 통계적 적용 방법

최적 표본단위 (sampling unit)의 크기 및 형태 결정을 위하여 환경 균일도를 고려한 Smith(1938)의 empirical variance law 방법과 Koch & Rigney(1951) 및 Hatheway & Williams(1958)이 제안한 표본 단위의 크기에 따른 분산 계산 방법을 적용하여 통계치를 산정하였다.

표본 수와 표본 추출 방법은 abraham (1966)의 방법을 적용하였다.

3. 생육환경 조사 결과

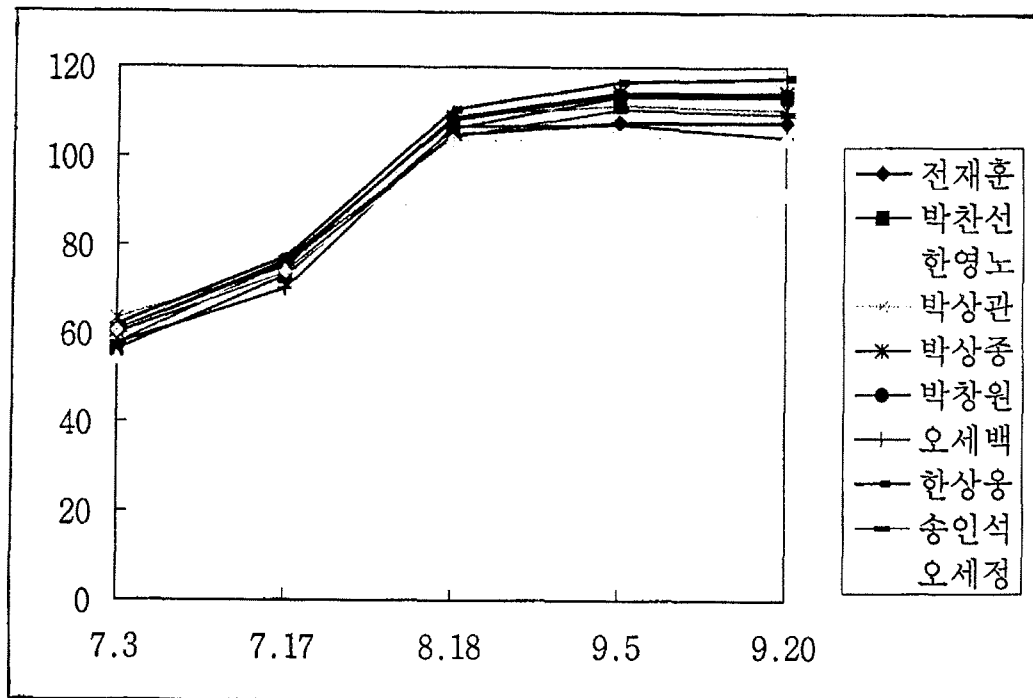
시비량은 10지점의 포장을 선택하여 조사하였는데, 실제 재배하는 농가들이 추천 시비량보다 많은 비료를 사용하고 있었다. 기비보다는 분얼비의 사용이 컸으며 수비의 양도 많이 나타났다. 시비량은 14 kg/10a부터 24 kg/10a까지 재배농가에 따라 차이가 큰 것으로 나타났다.

영농방법 조사 결과, 일반제인 추청벼를 재배하고 있었으며, 이앙시기와 출수일은 7일 이내로 5월 18일, 8월 15일 전후로 비슷하였다. 모든 조사포장에서 이앙후 10일에서 14일에 제초제를 살포하고 있었고, 초기에 멸강충 및 멸구방제를 위하여 살충제를 살포한 것으로 나타났다. 통일제인 다산벼를 제외하고 추청벼는 후기까지 엽면적 지수가 높은 경향 보였다.

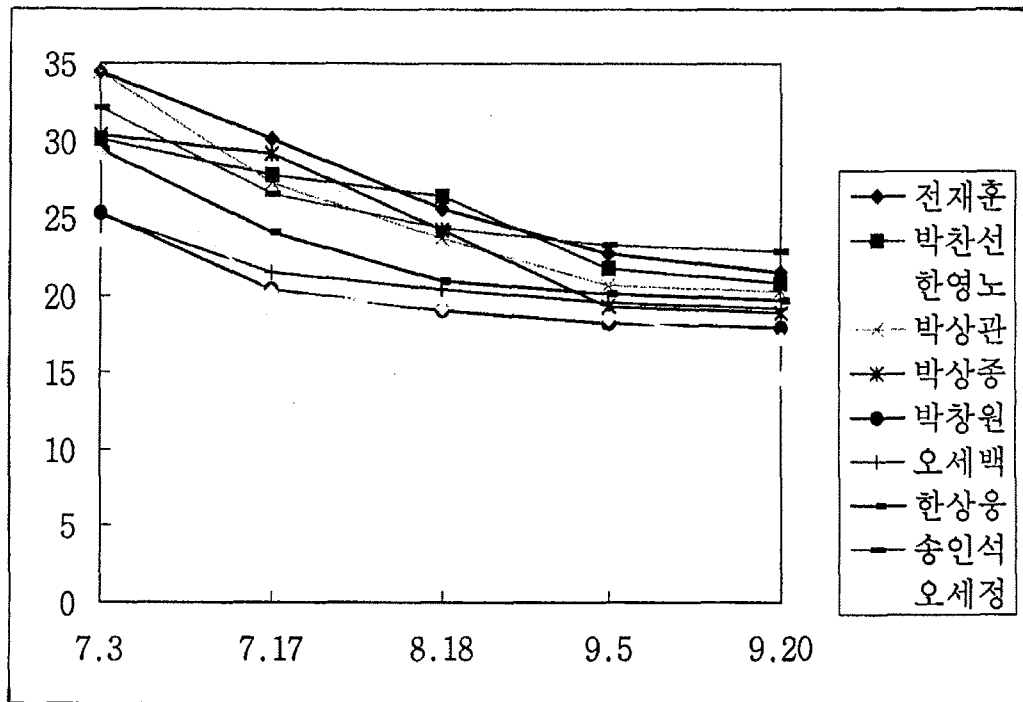
분얼수는 포장에 따라 초기에는 차이가 있었으나 출수기 이후에는 비슷한 경향을 나타내었다. 그림 (그림 5-33)은 경작 농가에 대한 시기별 분얼수의 변화를 보여주고 있다.

초장은 같은 품종내에서는 비슷한 수치를 나타내었다. (그림 5-34)는 조사 농가에 대한 시기별 초장의 변화를 보여주고 있다.

조사결과에서 엽면적 지수, 분얼수, 초장이 작은 경우가 있었는데 이는 토성 및 관리방법에 따라 비료의 손실량이 달랐기 때문인 것으로 생각되나 보다 세밀하게 검토가 이루어져야 할 것으로 보인다.



(그림 5-33) 조사농가에 대한 시기별 분얼수 변화



(그림 5-34) 조사농가에 대한 시기별 초장의 변화

4. 생장모델의 적용가능성 검토

가. 모델의 선정

생장모델은 ORYZA1모델 (Kfoff 등, 1995), SIMRIW(Horie, 1987) 등을 선정하였다.

생장모형의 입력변수는 ORYZA1모델의 경우 파종기, 이앙기, 재식밀도, 일사량, 최고기온, 최저기온, 품종 특성치 등으로 구성되며, SIMRIW모델의 경우는 이앙기, 일사량, 최고기온, 최저기온, 품종 특성치 등으로 구성되어진다.

생장모형의 출력변수는 ORYZA1모델의 경우에 엽면적, 발육단계, 지상부건물중, 수량 등으로 구성되고, SIMRIW모델은 엽면적, 발육단계, 지상부건물중, 수확지수, 수량 등으로 구성되어진다.

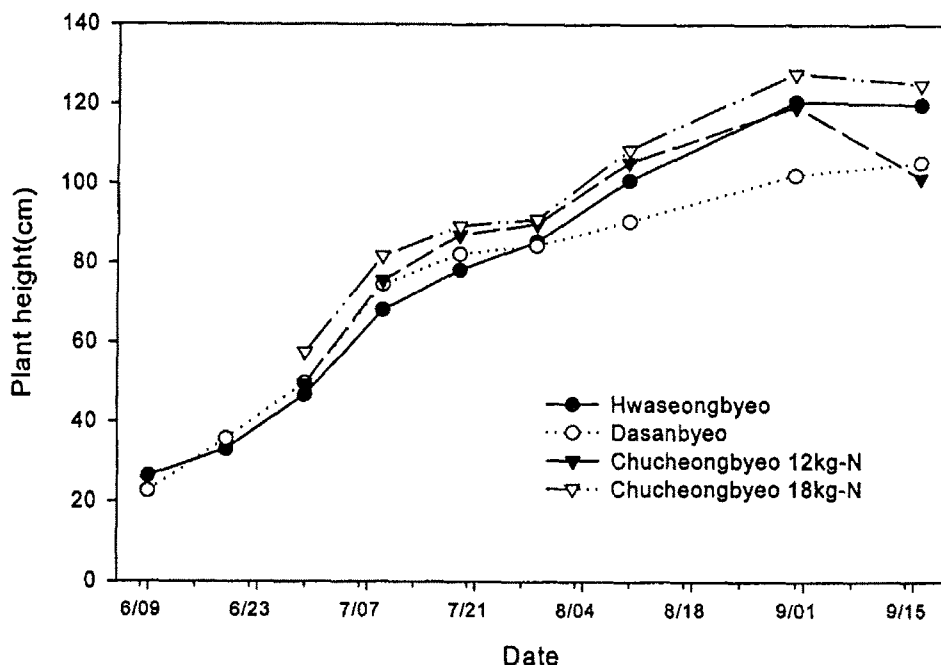
나. 모델변수 추정 및 보정을 위한 실험의 연구결과 및 고찰

모델 변수 추정 및 보정을 위한 실험은 서울대학교 농업생명과학대학 부속농장

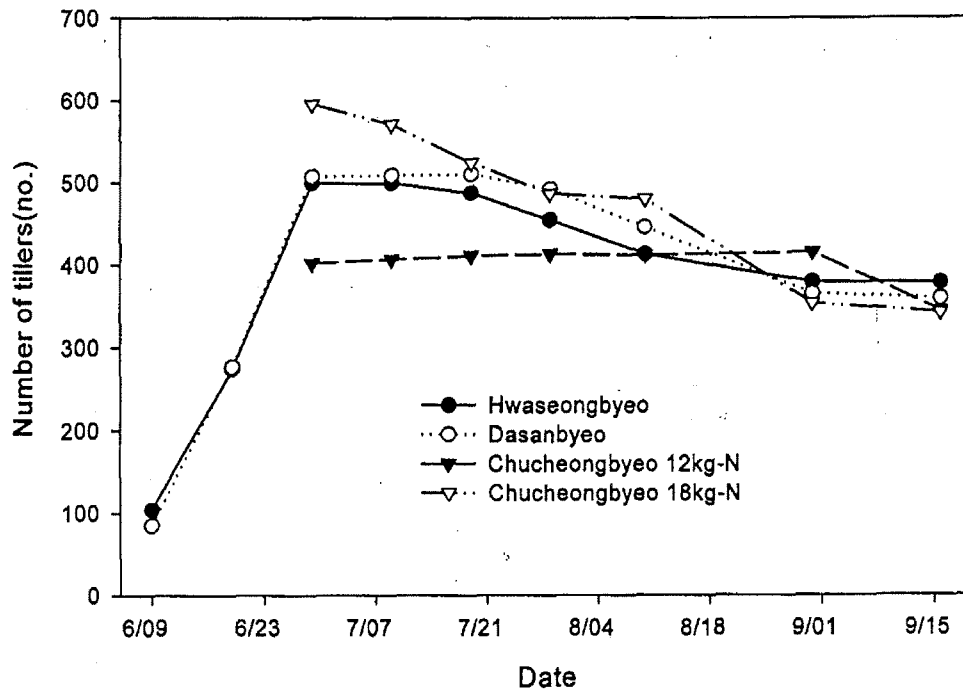
에서 행하여졌다. 공시 품종은 대상지구 주 재배품종인 추청벼, 화성벼 및 다산벼로 구성하였고, 재식밀도는 30×15 cm였으며, 시비수준은 추청벼의 경우 질소 12 kg/10a 및 18 kg/10a, 화성벼와 다산벼는 18 kg/10a으로 하였다. 이앙 후 15일 간격으로 분얼수, 초장, 엽면적, 지상부 건물중량을 조사하였다.

공시품종별 이앙후 초장의 변화는 (그림 5-35)에서 보는 바와 같다. 이앙후 초장은 추청벼에 18 kg/10a의 질소비료를 시용한 경우 가장 큰 값을 보였고, 화성벼와 추청벼에 12 kg/10a의 질소비료를 시용하였을 때에는 비슷한 경향을 보였으며, 다산의 초장이 가장 작은 값을 나타내었다.

이앙 후 공시품종별 분얼수의 변화는 (그림 5-36)에서와 같다. 분얼수는 출수기 전에 최고 분얼기까지 급격히 증가하였다가 감소하기 시작하였으며, 추청 18 kg/10a에서 가장 많고 추청 12 kg/10a가 작은 값을 보였으며, 모든 시험에서 출수기 이후에는 비슷한 것을 알 수 있었다.

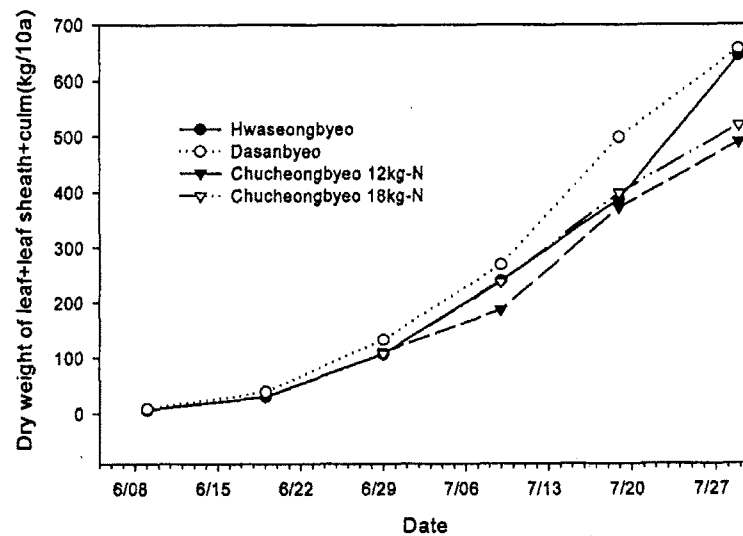


(그림 5-35) 이앙후 초장의 변화



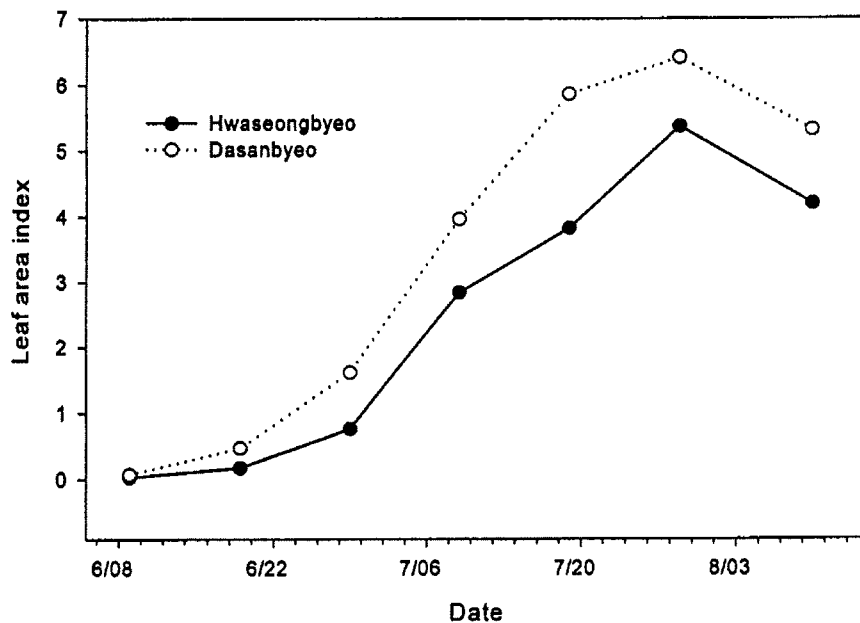
(그림 5-36) 이앙 후 분얼수의 변화

식물체 전체의 건물중의 변화는 (그림 5-37)에서와 같이, 식물체 전체의 건물중의 변화는 다산벼가 가장 많았고, 유수분화기까지는 추청 18 kg/10a 시용구와 화성벼가 비슷한 수치를 보였으며, 12 kg/10a를 시용한 추청벼가 가장 작은 값을 보였다.

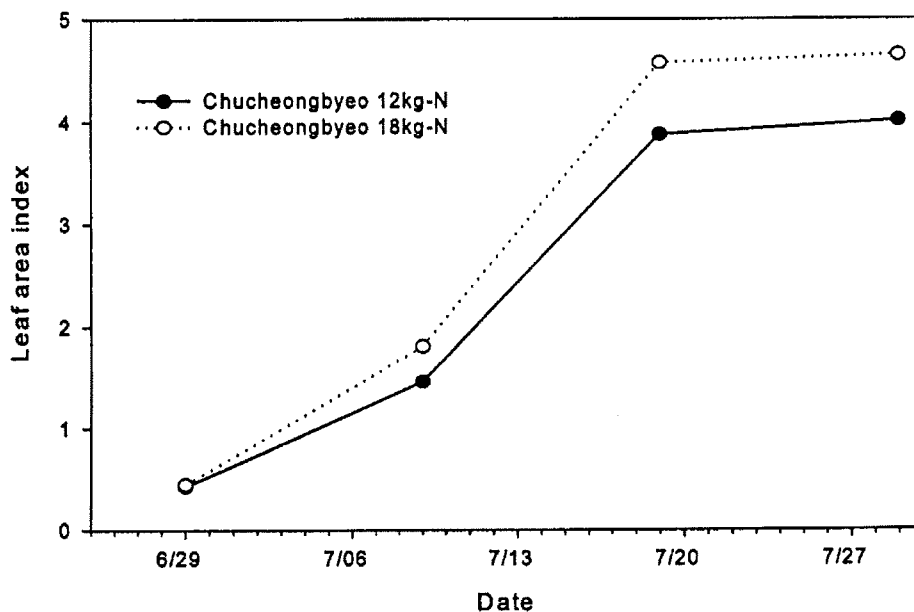


(그림 5-37) 식물체 전체의 건물중의 변화

(그림 5-38)은 이앙 후 식물체에서의 엽면적의 변화를 도시하고 있고, (그림 5-39)는 질소다비구에서의 엽면적의 변화를 보여주고 있다. 엽면적은 수잉기까지 증가하였고, 다산벼가 화성벼보다 컸으며 추청벼의 경우 질소다비구가 큰 경향을 보였다.



(그림 5-38) 이앙 후 식물체에서의 엽면적의 변화



(그림 5-39) 질소다비구에서의 엽면적의 변화

5. 모델의 보정

가. 지구선정

생육모델의 보정을 위한 조사지구로서 발안·기천지구에서 10개 포장을 선정하였으며, 이양 후 15일 간격으로 초장, 분얼수, 엽면적지수 등의 생육조사를 실시하였다.

나. 영농관리 현황

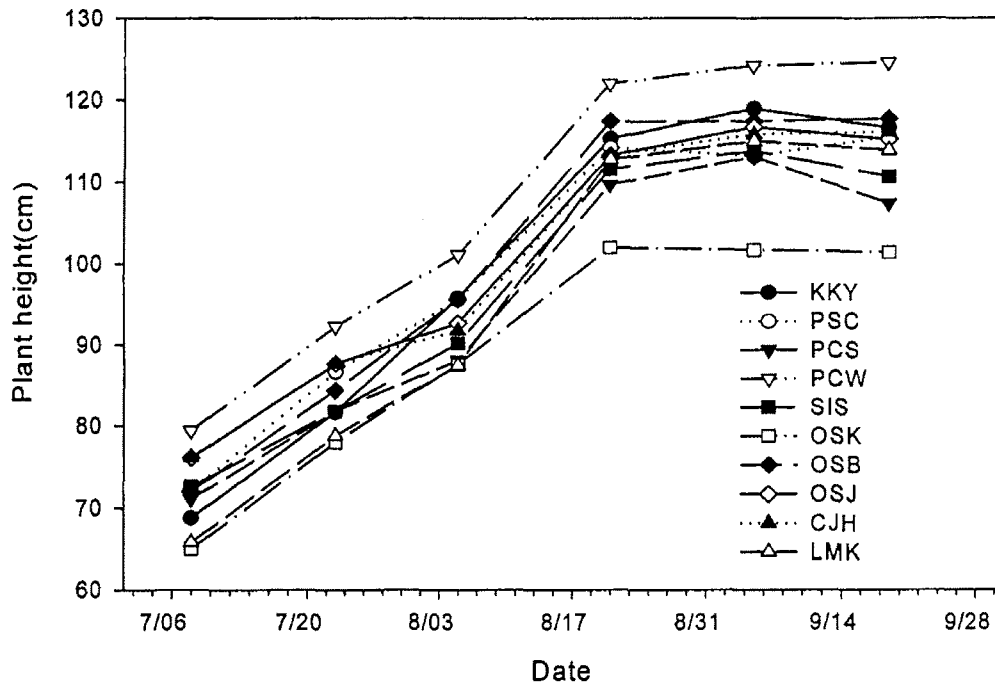
각 포장별 시비관리와 포장관리 현황의 조사 결과는 <표 5-15>에 나타낸 바와 같다. <표 5-15>에서와 같이, 시비량이 97년도보다 많지가 않았는데 이는 도복을 방지하기 위한 목적으로 시비량을 최소화한 것으로 나타났으며, 박창원의 답에서는 도복이 발생하였다.

<표 5-15> 포장의 시비관리와 포장관리 현황

Location	Cultivator	Cultivar	Rate of fertilizer(kg/10a)			Transplant Heading	
			Basal F. N-P-K	Tillering F. N-P-K	Panicle F. N-P-K	-ing Day	Date
Danghali	JeonJae Hun	Chucheong	4-3-3	9-0-0	0-0-0	5.12	8.18
	ParkChanSeon	"	5-4-4	7-0-0	2-0-2	5.18	8.17
Gujangli	KimKooYeon	"	-	-	-	-	8.20
	LeeMooKil	"	6-5-5	6-0-0	2-0-2	5.16	8.16
	ParkSangCheon	"	-	-	-	-	8.16
	ParkChangWon	"	8-7-7	7-0-0	1-0-0	5.15	8.19
Gicheonli	OhSeBaeg	"	8-7-7	5-0-0	3-0-0	5.15	8.18
	OhSeJeong	"	-	-	-	-	8.16
	OhSeKook	"	-	-	-	-	8.14
	SongInSeok	"	8-7-7	5-0-5	2-0-0	5.15	8.17

다. 초장의 변화

최고분얼기 이후의 초장의 변화는 (그림 5-40)에서와 같다. 초장의 변화는 출수기까지 증가하였으며 도복이 발생한 박창원의 답에서 가장 큰 값을 보였고, 오세국의 답이 가장 작은 값을 보였으며, 나머지 8개 포장은 차이가 적게 나타났다.



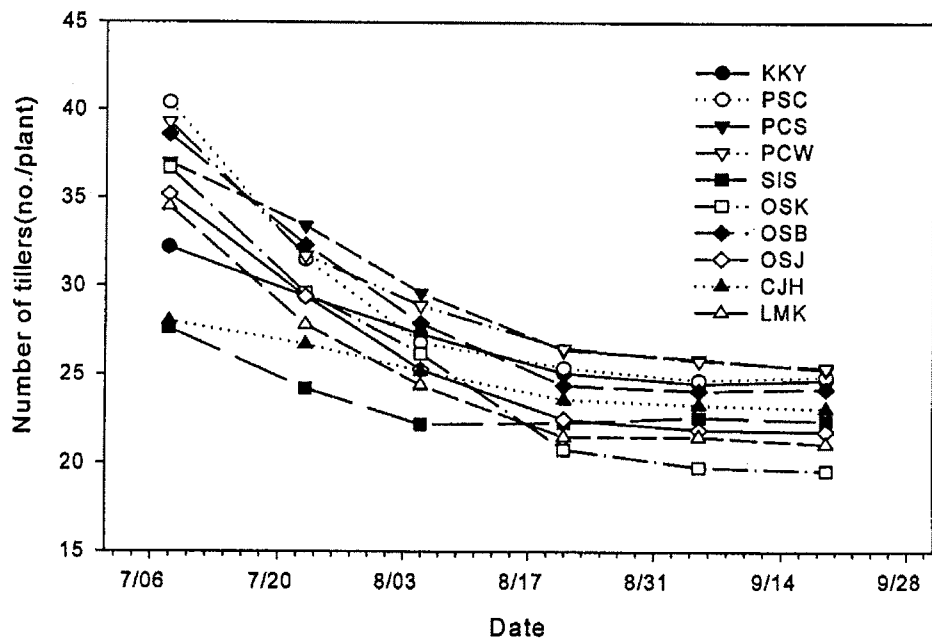
(그림 5-40) 최고분얼기 이후의 초장의 변화

라. 분얼의 수

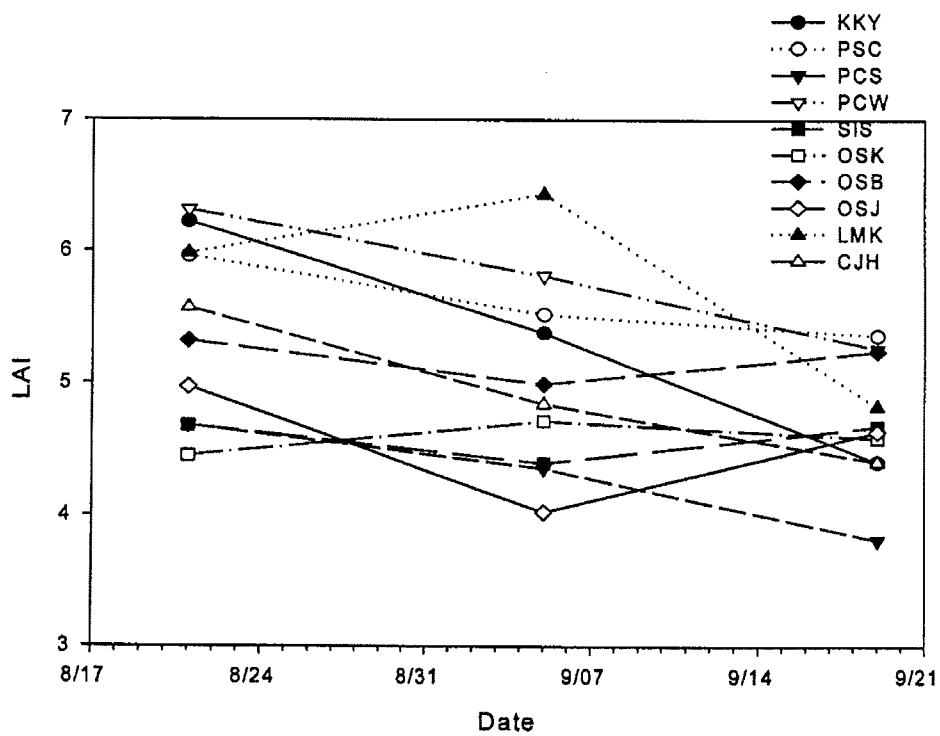
최고분얼기 이후의 분얼의 수는 (그림 5-41)에 나타낸 바와 같다. 분얼의 수는 계속 감소하는 추세를 보였으며, 박창원, 박찬선의 답에서 가장 많고 오세국의 답이 출수기 이후 가장 적게 나타났다.

마. 출수기 이후 LAI 변화

출수기 이후 LAI 변화는 (그림 5-42)에 보는 바와 같다. LAI 변화는 출수기 이후 후기 생육이 지연된 답에서 일시적인 LAI의 증가하였으나 대체로 감소하는 추세를 보였으며, 박창원, 박찬선의 답에서 가장 큰 것을 나타내었다.



(그림 5-41) 최고분얼기 이후의 분얼의 수



(그림 5-42) 출수기 이후 LAI의 변화

제 4 절 요약 및 결론

본 연구에서는 농작물 생육환경 및 영양물질의 모니터링을 위하여, 논에서의 영양염류의 수지와 그 순환기작을 고찰하고, 물질순환기작의 구성인자들의 특성을 파악하여 논에서의 영양물질 기작 요소들의 상호관련성을 구명하도록 하였고, 밭에서의 장단기 유출량 및 영양물질 추정을 위한 밭 수문, 수질 모니터링 기법을 정립하였으며, 농경지 생태계의 주 구성요소인 벼의 생장과 생육의 체계적인 조사 기법을 정립하였다.

본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- ① 논에서의 물질순환기작을 분석하기 위하여 현장의 관행영농을 시행하고 있는 현장시험포장과 논에서의 물질수지 조사를 위한 정밀시험포장을 선정하였고, 관개량, 배수량, 담수심과 물꼬높이 측정, 통양 및 수질 샘플링과 시기, 그리고 분석방법 등의 모니터링 기법을 정립하였다.
- ② 논에서 채수된 시료의 수질과 토양 물성 등을 조사, 분석하였으며, 시기별 온도, pH, 용존산소량 등과 영양물질인 총질소, 총인 등을 조사 분석하였고, 관개량, 배수량, 담수심, 물꼬높이, 물수지 등을 조사 분석하였고, 그들간의 순환기작을 고찰하였다.
- ③ 강수중에 포함된 영양물질의 양을 파악하기 위하여, 1996년과 2000년의 총 20회에 걸쳐 강수를 채수하고 분석한 결과, 자연강수는 강산성을 나타냈으며, 질소의 함유량은 시기에 따라 차이를 보였다.
- ④ 논에서의 물질순환기작의 분석을 위하여 현장시험포장과 정밀시험포장에서의 관개수, 배수수, 논물 등을 채수하여 영양물질을 조사 분석하였고, 시비량에 따른 영양물질의 순환기작을 구명하였으며, 벼에 의한 질소의 흡수량을 EPIC 모형을 이용하여 추정하였다.
- ⑤ 밭 시험포장을 선정하여 측량, 토양특성 분석, 토양수분 측정, 강우-유출에 따른 토양유실량 조사 등을 통하여 밭에서의 모니터링 기법을 정립하였다.
- ⑥ 농작물 생육환경 모니터링을 위하여, 현장시험포장과 정밀시험포장을 선정하였고, 모니터링과 생육환경조사 기법을 정립하였다.

- ⑦ 관행영농조사 결과, 시비량은 농가에서 추천 시비량보다 과다하게 사용하고 있었으며, 추청벼는 엽면적지수가 높은 경향을 보였고, 분얼수와 초장은 같은 품종내에서 비슷한 수치를 보였다.
- ⑧ 생장모델을 선정하여 모델변수 추정 및 보정을 위해 정밀시험포장을 이용하여 추청벼, 화성벼 및 다산벼를 대상으로 실험을 수행하였으며, 그 결과를 고찰하였다.
- ⑨ 생육모델의 보정을 위한 조사지구로서 발안지구에 10개 포장을 선정하여 영농관리현황, 초장의 변화, 분얼수 변화, 그리고 출수기 이후 LAI 변화를 조사하고, 그 결과를 고찰하였다.

참고문헌

1. 국립환경연구원, 1993. 비점오염원으로 부터의 오염물질 유출특성 조사를 위한 방법론적 연구.
2. 국립환경연구원, 1994. 비점오염원 유출부하량 조사지침.
3. 國松孝男 外, 1989. 河川汚濁の モデリ解析, 技報堂出版.
4. 김진수, 오승영, 김규성, 1999. 광역논에서의 질소·인의 농도와 오염부하량 특성, 한국농공학회지, 제41권 4호, pp. 47-56.
5. 농림부, 1997. 영농방식 변화에 따른 필요수량 변화 연구.
6. 박승우, 윤광식, 진영민, 이변우, 1997. 논외 물질순환 모니터링, 서울대농학연구지 제22권 1호, pp. 19-27.
7. 박은진, 1999. 하천 수변 범람 지역에서 질소 동태 관찰과 모형 구축, 서울대학교 대학원 박사학위논문.
8. 森保文, 1990. 水田表面水窒素濃度變化の モデリ化, 日本農業土木學會論文集 146, pp. 15-25.
9. 森保文, 1991. 水田表面水リン濃度變化の モデリ化, 日本農業土木學會論文集 153, pp. 45-53.
10. 신동석, 1990. 논에서의 질소 및 인의 농도와 유출입, 서울대학교 대학원 석사학

위 논문.

11. 이상모, 류순호, 김계훈, 1995. 수도재배 포장에서 침투수의 Urea-N, NH_4 -N 및 NO_3 -N의 농도 변화, 한국토양비료학회지 제28권 2호, pp. 160-164.
12. 임상준, 2000. 농업유역의 논 관개회귀수량 추정 모형의 개발, 서울대학교 대학원 박사학위논문.
13. 임상준, 박승우, 1997. 논역 유출곡선번호 추정, 한국수자원학회지 제30권 4호, pp. 379-387.
14. 정상옥, 1995. 농업용 화학물질 이동 추정 모형의 발달 : GLEAMS 모형을 중심으로, 한국관개배수지 제2권 1호, pp. 10-19.
15. 진영민, 1998. 논역 비점오염물질 배출량 추정을 위한 CREAMS-PADDY 모형의 개발, 서울대학교 석사학위 논문.
16. 홍성구, 권순국, 1999. 부하함수를 이용한 비점원오염 부하량의 예측, 한국관개배수, 제6권 2호, pp. 176-184.
17. Cabon. F., G. Girard and E. Ledoux, 1991. Modelling of the nitrogen cycle in farm land areas. In Groot, J. J. R., P. de Willigen, E. L. K. Verberne (eds.), Nitrogen turnover in the soil-crop system. Kluwer Academic Publishers, Netherlands. pp. 161-169.
18. Cooper, G. S., and R. L. Smith, 1963, Sequence of products formed during denitrification in some diverse western soils, Soil Sci. Soc. Am. J, 27, pp. 659-662.
19. De Datta, S. K. 1987, Nitrogen transformation process in relation to improved cultural practices for lowland rice, Plant Soil, 100, pp. 47-69.
20. Heatwole, C. D., K. L. Campbell, and A. B. Bottcher, 1987. Modified CREAMS hydrology model for Coastal Plain flatwood. Trans. of ASAE, 30 , pp. 1014-1022.
21. Knisel, W. G., 1980. CREAMS : A field-scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems, Conservation Report No.

- 26, USDA-SEA, Washington, D.C.
22. Martin, J. P. and H. D. Chapman, 1951. Volatilization of ammonia from surface-fertilized soils. *Soil Sci.* 71: 25-34.
23. Mehran, M. and K. K. Tanji. 1974. Computer modeling of nitrogen transformations in soils. *J. Environ. Qual.* 3: 31-396.
24. Reddy, K. R., and W. H. Patrick, Jr., 1986, Fate of fertilizer nitrogen nitrogen in the rice root zone, *Soil Sci, Soc. Am. J.*, 50, pp. 649-651.
25. Sohn, B., 1998. Effects of carbon, nitrate, and moisture on denitrification in riparian soil of Yangjae Stream. M. S. Thesis. Seoul National University.
26. Stanford, G. and S. J. Smith. 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 36, pp. 465-472.

여 백

곤충생태 모니터링 기술 개발

2000년 12월

“농업생태환경 모니터링 및 종합적 환경관리시스템 개발 사업”

서울대학교 농업생명과학대학 부속 농업개발연구소

최종보고서 제 Ⅱ 편 제 6 장

여 백

제 6 장 곤충생태 모니터링 기술 개발

제 1 절 서 론

벼는 우리 나라 농업에서 대표적 작물이며, 벼가 재배되는 논은 안정적인 쌀 생산 뿐만 아니라 홍수 조절, 토양 유실 방지 같은 공익 기능과 여러 가지 생물들의 서식처로서 생태계 보전 기능을 담당하고 있다. 안정적인 수확량 확보를 위해 논에는 노동력 및 다양한 종류의 에너지들이 인위적으로 투입되어 왔는데, 이로 인해 논이라는 생태계는 천이 초기 단계에 머물러 있어 자연 생태계들보다 안정성과 생물 다양성이 낮아지게 되었다 (현 1980).

논은 다양한 생물군들의 영구적인 또는 일시적인 서식처가 되는데, 여기에는 벼 뿐만 아니라 벼를 중심으로한 다양한 생물군이 공존하고 있다. 이들 중에서 많은 부분은 곤충류나 거미류를 포함하는 절지동물들이다. 우리 나라에서 논에 서식하는 절지동물에 대한 연구는 이화명나방이나 벼멸구 등과 곤충류에 속하는 해충들에 집중되어 왔는데, 주로 이들의 개체군 동태나 피해 해석, 약제 방제에 관한 연구가 대부분이었다. 그리고 이들 해충들과 더불어 논에서 공존하는 또 다른 절지동물들인 거미류나 기생자들에 대한 일부의 연구가 있었다. 현재까지 논에서 주요 문제해충들에 대한 방제 기술은 상당한 수준에 도달했고 (엄 등, 1991), 이러한 기술 발전에 힘입어 안정적인 식량 생산이라는 목표달성이 가능하게 되었다.

하지만 이런 기술들 대부분이 농약 사용에 의한 방제가 근간을 이루고 있어, 농약 사용에 의한 농업 환경에 미치는 여러 가지 부작용들은 아직까지 미해결 과제로 남아있다. 우리 나라에서 농민들의 농약 살포는 문제해충들에 대한 철저한 모니터링에 의해서라기보다는 농약회사의 벼 재배력에 의존하는 경우가 대부분이다. 그렇지만, 벼에 피해를 주는 해충들의 발생량은 해마다 일정치 않아 매년 똑같이 농약 살포가 되풀이될 필요는 없다. 반복되는 농약 살포는 해충 방제뿐만 아니라 천적들에게도 나쁜 영향을 미쳐 농업 환경 전체에 대한 부담만 가중시킬 뿐이다. 논이라는 생태계에는 해충을 포식하는 다양한 천적군이 공존하고 있어 이들의 포식에 의한 자연 방

제가 어느 정도 수준까지는 일어날 수 있는 잠재 가능성이 있다. 그리고 논에서 또 하나의 기능군 그룹인 비해충류도 논에서 먹이사슬 유지에 중요한 역할을 담당하여 천적들에게 유리하게 작용하고 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 이들 군집들에 대한 종합적인 자료나 변화 패턴등에 대한 분석은 거의 없으며, 이들의 생태계내 구체적인 기능도 아직까지 제대로 파악되지 못한 실정이다.

본 연구에서는 곤충생태 환경 모니터링 기술개발을 위하여, 대상지구를 선정하여 논에서의 절지동물의 각 기능군별 발생자료를 구역별로 구축하고, 이들 자료분석을 통해 절지동물 군집구조 및 변화 패턴을 구명한다. 또한, 이들 자료가 환경조화형 해충 방제 기술에 접목될 수 있도록 해충을 중심으로 한 먹이그물 작성 및 논에서의 포식자 그룹인 거미류의 발생시기를 예측하는 모델을 구성하여, 적용가능성을 검토하도록 한다.

제 2 절 재 료 및 방 법

1. 조사지역

본 연구는 경기도 화성군 발안지역에 위치한 일반 농가의 포장을 조사지로 선정하였다. 기천지 하류 (HWF50)는 900평 정도 규모로 농지 정리 및 관개 시설이 잘 정비되어 있었고, 약제 살포는 제초제, 살충제, 살균제를 포함해서 일년에 7-8회 정도 살포하고 있었다. 발안지 상류 (HWF30)는 500평정도 규모로 조사구를 포함한 3000평정도의 논들이 낮은 산에 의해 둘러 쌓여있는 골짜기 지형 특성을 가지며, 농지정리 및 관개시설은 불완전하였다. 약제 살포는 재배 농민에 따르면 지난 10년간 살충제가 전혀 살포되지 않았다고 한다. 발안지 하류(HWF20)는 800평정도 규모로 농지정리 및 관개시설이 잘 정비되어 있고, 주변 논들의 넓이가 약 105ha로 경기도 지역의 대표적인 벼 재배지로, 그동안 민·관합동으로 해충에 대해 항공 방제가 매년 2차례 이상 이루어져 왔었다. 주 방제 대상은 벼멸바구미(*Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel)로 피레스로이계를 살포하였고, 벼멸구 (*Nilaparvata lugens* Stål) 방제를 위하여 카바메이트계를 살포하였다. (그림 6-1)은 조사지역의 전경을

보여주고 있다.



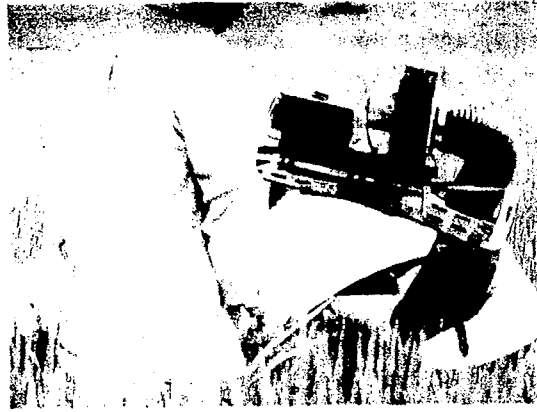
(그림 6-1) 발안지 상류(좌)와 하류(우)의 수도 포장 전경

2. 절지동물 군집 모니터링

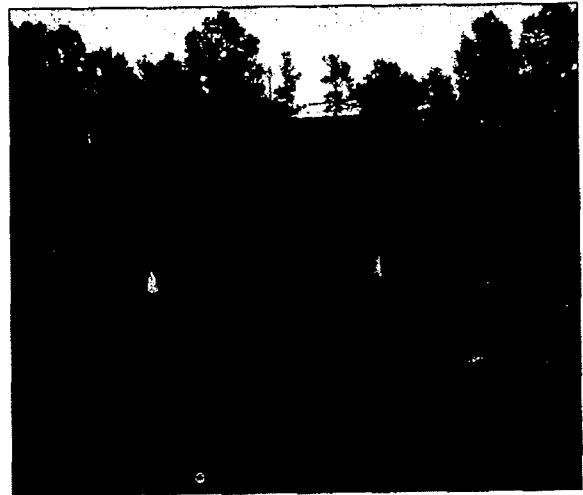
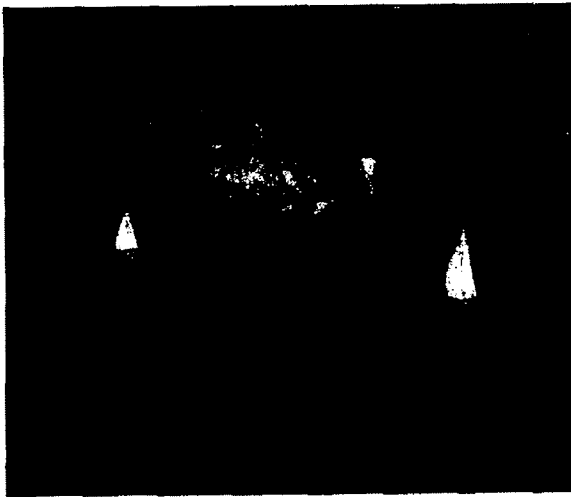
벼 포기뿐만 아니라 논에 서식하는 절지동물을 채집하기 위해 각 조사지에서 동일한 방법이 적용되었다. 한 개의 표본은 조사지내에 임의의 지점을 선정하여 아크릴 케이지 (0.5 x 0.5 x 0.7m)로 주변과 차단한 후 케이지내 있는 수면위의 절지동물들을 동력흡충기(D.C. 12V, John W. Hock Co.)를 사용하여 전부 흡충하는 방법으로 취해졌다. (그림 6-2) 조사시기마다 조사지당 10개의 표본을 취했고, 벼 주수로 환산하면 벼 생육초기에는 한 개의 표본에 벼가 6주가량 차단되었는데, 벼 생육중, 후기에는 조사주수가 3-4개로 줄어들었다. 조사는 벼 이앙후부터 수확전까지 주 1회씩 실시하였고, 오전 11시에서 오후 3시 사이에 이루어졌다. (그림 6-2)는 동력흡충기를 이용한 조사광경을 보여주고 있다.

조사 2년차 (1997)에는 벼 생육초기에 밀도가 집중되어 있는 깔다구류에 대한 조사를 이앙 전, 후에 실시하였다. (그림 6-3)은 깔다구류 (Chironomidae) 발생 예찰을 위한 트랩 설치 광경을 보여주고 있다.

채집된 절지동물들은 실험실로 운반되어 급속냉동 (-70℃)시킨 후, 75% 알코올 용액에 표본들을 저장하였고, 후에 기능군별 (해충군, 천적군, 비해충군)으로 구분하여 대분류한 후 주요 해충과 천적은 종수준까지 동정하였다.



(그림 6-2) 동력 흡충기를 이용한 조사

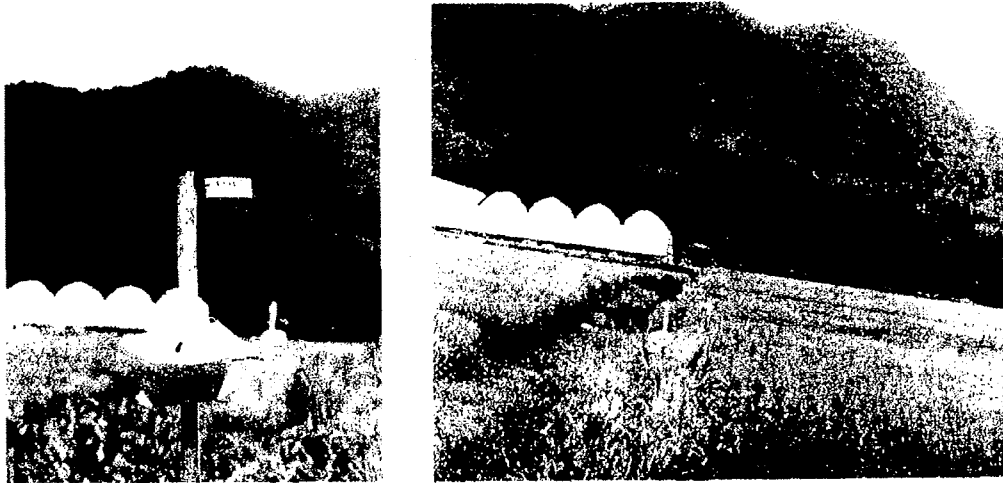


(그림 6-3) 깔다구류(Chironomidae) 발생 예찰을 위한 트랩 설치

3. 여러 가지 트랩들을 이용한 해충 및 천적 모니터링

가. 페로몬 트랩

1999년에 페로몬 트랩을 이용한 이화명나방, 흑명나방 발생 모니터링이 연구가 수행되었다. 페로몬 트랩의 종류로는 wing trap을 사용하였고, 내부에 고무로 만들어진 lure (유인하는 물질)가 철사고리에 매달려 있다. (그림 6-4)는 페로몬 트랩 (wing trap)과 설치 광경을 보여주고 있다.



(그림 6-4) 페로몬 트랩(wing trap)과 설치 전경 (경기도 발안 하류, 1999)

경기도 발안지 하류에 이화명나방 트랩은 논둑에 15개를 30m 간격으로 설치하였고, 흑명나방 트랩은 10m 간격으로 21개를 발안지 하류, 9개를 서울대 실험포장에, 18개를 충남 당진의 수도 포장에 설치하였다. 이화명나방, 흑명나방에 사용된 유인 물질의 조성은 <표 6-1>과 같다.

<표 6-1> 이화명나방, 흑명나방의 성 페로몬(sex pheromone) 조성

종명	화합물	비율 및 양	참고문헌
이화명나방	Z11-16:ALD Z9-16:ALD Z13-18:ALD	50:5:6 (1mg)	송 등 (1978) Tatsuki (1990)
흑명나방	Z13-18:Ac Z11-16:Ac	A (100:0) B (95:5) C (90:10) D (80:20) E (70:30) F (60:40) G (control)*	Rao <i>et al</i> (1995)

* Control 화합물로 hexane을 사용하였음.

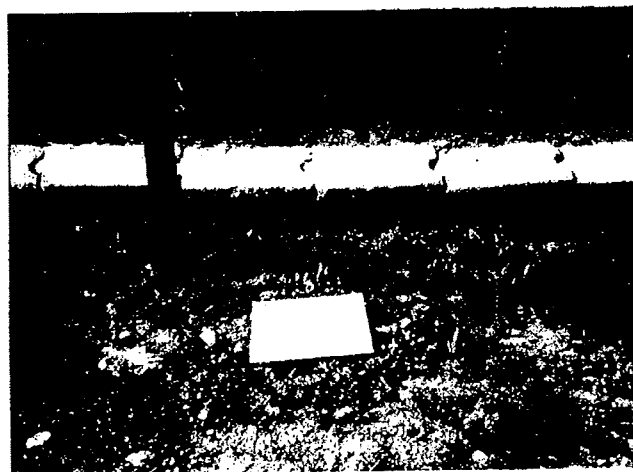
페로몬 트랩에 대한 조사는 이화명나방은 1999년 5월 18일부터 8월 25일까지 5일간격으로, 흑명나방은 8월 9일부터 9월 13일까지 이루어졌다.

나. 유아등

서울대 실험 포장에 1999년 6월 30일에 규격화된 유아등(농진청, 1999)을 설치하여 주요 해충인 멸구·매미충류, 벼물바구미등과 비해충인 깔다구류에 대한 조사가 6월 30일부터 9월 15일까지 일별로 이루어졌다.

다. 핏폴(pitfall) 트랩

수도 포장의 본답과 논둑에 서식하는 거미류에 대한 발생 및 활동을 모니터링하기 위해 1999년도에 서울대 실험포장과 수원시 당수동 소재 수도 포장에 핏폴 트랩을 설치하였다. 핏폴 트랩은 비가림용 덮개 (25cm × 25cm)와 투명 플라스틱 용기(지름 13.5cm, 높이 17cm), 혼합용액(water 50ml+ethylene glycol 50ml)으로 구성되었고, 용액은 1주일마다 교체하였다. (그림 6-5)는 핏폴 트랩 설치 전경을 보여주고 있다.



(그림 6-5) 핏폴 트랩 전경 (수원 당수동, 1999)

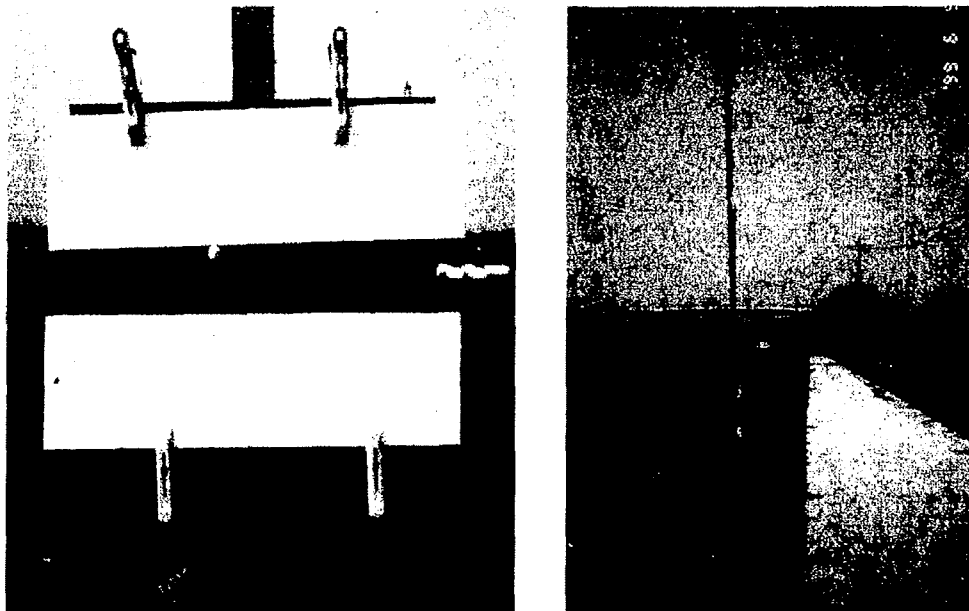
서울대 실험포장에서는 논둑 2지점, 논 내부 2지점등 4곳에, 당수동 수도포장에서는 동, 서, 남, 북 4방위의 논둑에 설치하였는데, 각기 5반복으로 하였다. 조사기간은 서울대 실험 포장에서는 본답에 물을 대기전인 4월 24일부터 이루어졌고, 당수동 포장에서는 6월 9일부터 이루어졌다. 그리고 거미 활동에 영향을 미치는 토양온도 측

정을 위해 서울대 실험포장에 data logger를 이용해 매 2시간 마다 측정하였다.

라. 끈끈이 트랩

알에서 부화한 어린 거미들은 살기에 적합한 곳을 찾기 위해 바람에 실려 유사 비행을 하는데, 이들 어린 거미류에 대한 모니터링이 끈끈이 트랩을 이용해 이루어졌다. 트랩은 나무판 (30×30cm)에 흰색의 끈끈이 (32×8.5cm) 2장을 집게를 이용해 고정시켰다. 1999년 6월 7일에 수원시 당수동 수도 포장 주변 논둑에 높이 3.5m의 지주대를 50cm 가량 땅에 묻고 높이 1m 간격으로 트랩을 설치하였다. 설치하는 동, 서, 남, 북 4방위에 각각 5반복으로 설치하여 일주일 간격으로 수거해 밀도 및 종구성을 조사하였다.

(그림 6-6)은 끈끈이 트랩 및 설치 전경을 보여주고 있다.

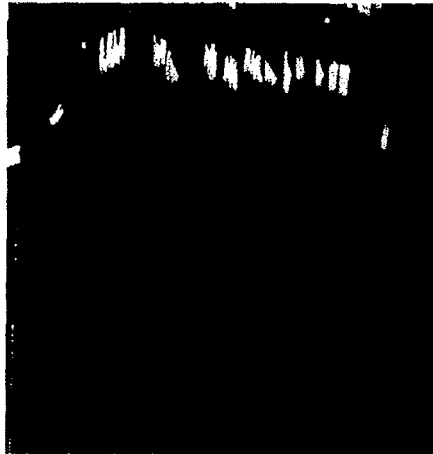


(그림 6-6) 끈끈이 트랩 및 설치 전경

4. 분담내 논거미 공간 분포 조사

서울대 실험포장에서 1999년 7월 3일부터 9월 30일까지 벼 100주 (10 × 10주)를 고정적으로 선택하여 집중적으로 논거미 공간 분포에 대한 조사를 실시했다. 공간 분포 패턴 파악에는 variance/mean ratio 분석이 이용되었다.

(그림 6-7)은 논거미 공간분포 조사 포장 전경을 보여준다.



(그림 6-7) 논거미 공간분포 조사 포장 전경

5. 안정성 동위원소 분석(stable isotope analysis)

는 생태계내 해충과 천적간의 먹이 연쇄(food chain)을 규명 및 먹이 그물(food web) 분석을 위해 안정성 동위원소 분석 (stable isotope analysis)이 이용되었다. 안정성 동위원소 분석은 기존의 방사성물질표지 및 면역학적 방법에 비해 인체에 안전하고 시료준비가 간편하면서 결과치가 뚜렷하며 그리고 비교적 저렴하다는 면에서 분석의 새로운 대안으로 주목받고 있다 (Lajtha and Michener 1994). $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 의 동위원소비는 아래의 계산식을 이용하여 ‰(퍼밀) 단위의 δ (델타)값으로 나타내지는데, 이중에서 $\delta^{13}\text{C}$ 는 먹이 소스를 밝혀줄 수 있고, $\delta^{15}\text{N}$ 는 각 구성원들의 영양단계를 밝히는데 매우 중요하게 이용된다.

$$\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}} - 1} \times 1000 \quad (6-1)$$

R_{sample} 은 sample의 원자백분율을 나타내고, R_{standard} 은 표준 물질의 원자백분율을 나타낸다.

본 연구에서는 1998년 발안하류, 1999년 서울대 실험포장, 2000년에 당수동 수도포장에서 채집된 개체들을 대상으로 동위원소 분석을 실시하였다. 그리고 벼멸구를 중심으로한 먹이그물을 작성하기 위해 안정성 동위원소로 표지된 벼멸구를 야외에

접종하였다. 표지 벼멸구는 실내에서 10% 농도의 황산암모늄으로 키운 벼 유묘에 벼멸구를 접종시켜 ^{15}N 을 전이시켰다. 그런 다음, 이들을 수도포장의 벼에 30마리씩 10반복으로 접종시켜 천적들의 포식여부를 실험하였다. 천적들의 채집은 접종후 5일이 지난 다음, 접종주를 중심으로 15주를 동력흡충기를 이용하여 흡충하여 실내에서 중별로 동정하여 분석샘플을 만들었다. 동위원소 분석에 사용된 기기는 서울대 농생대 NICEM에 설치된 안정성 동위원소비 질량분석기(Stable isotope ratio mass spectrometer) ISOPRIME[®]을 사용하여 절지동물들의 탄소 (^{13}C)와 질소 (^{15}N) 동위원소비를 측정하였다.

6. 황산적거미와 턱거미의 발생 모델

2000년 7월에 서울대 실험포장에서 채집한 황산적거미와 턱거미의 알을 확보하여 이들을 실내에서 부화시켜 $27\pm 1^\circ\text{C}$ 에서 50반복으로 개체 사육하였다. 이들의 먹이로는 매일 초파리, 나방파리 및 벼멸구중 한가지를 평균 5마리 이상씩 공급하였다. 실험온도는 2시간 간격으로 자동 온도측정기(HOBO)를 통해 기록되었다. 각 발육단계에 필요한 온도인 degree-day (DD) 계산은 일일 최저와 최고온도의 평균을 사용하였다 (Pruess 1983). 그리고 1998년까지의 수원기상대에 기록한 평년기온을 이용하여 이들 거미들이 논에서 발생하는 시기를 예측하는 모델을 만들었다.

제 3 절 결과 및 고찰

1. 절지동물 군집 모니터링

경기도 발안지역에서 절지동물 군집에 대해 모니터링한 자료는 부록에 실었다. <표 6-2>는 발안지역의 수도포장들에서 단위 면적당 (0.25m^2) 절지동물 밀도이다. 절지동물의 발생밀도는 평균 30마리에서 80마리까지 범위를 보였다. 전체 밀도는 조사지마다 조금씩 차이가 났는데, 1997년에는 조사지간에 밀도차이가 크게 났다. 이들 중에서 해충류는 평균 8.7마리에서 52.9마리까지 조사 년도에 따라 밀도차가 크게 난 반면, 천적류에서는 9.7에서 17.9마리로 그 폭이 작았다. 비해충류는 조사 년도에 관계없이 조사지간 차이는 없었지만, 1996년이 다른 조사 년도에 비해 발생밀

도가 높았다.

<표 6-2>는 발안지역 수도 포장의 절지동물 전체밀도 및 기능군별 밀도를 나타내고있다.

<표 6-2> 발안지역 수도 포장의 절지동물 전체밀도 및 기능군별 밀도¹

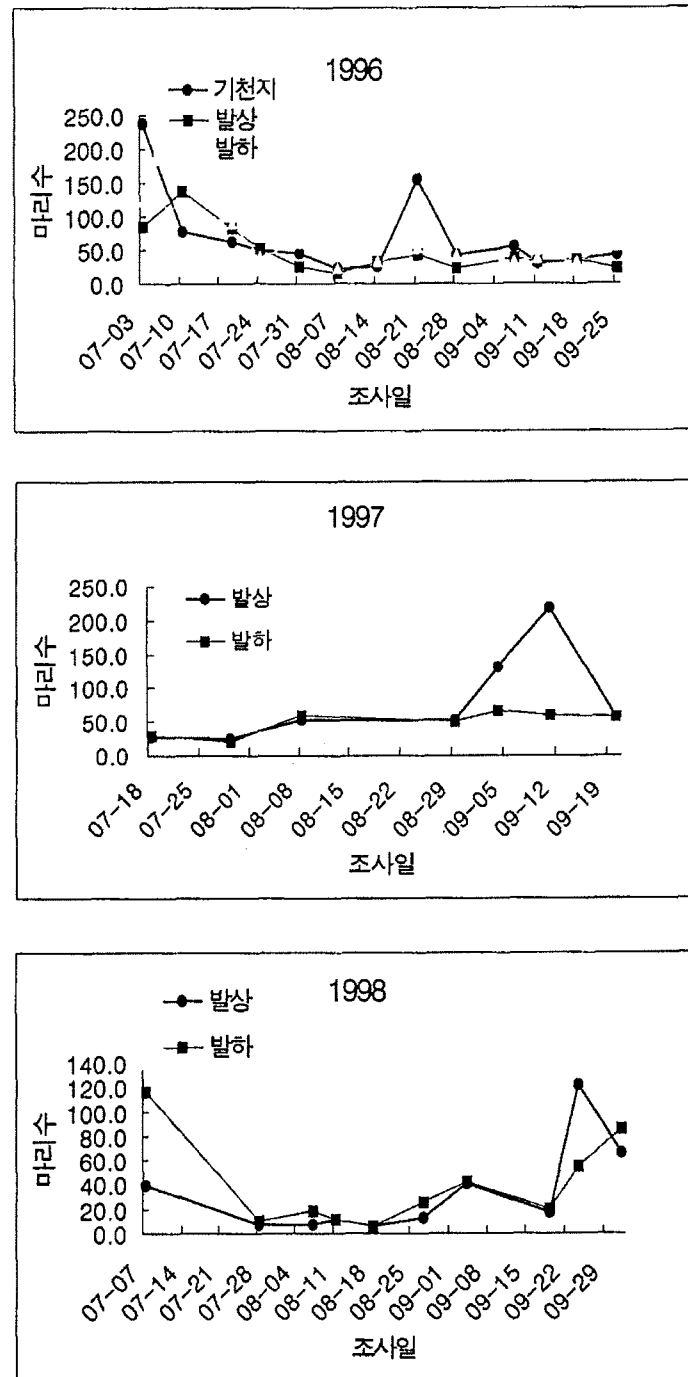
구분	1996 평균±SD	1997 평균±SD	1998 평균±SD
전체밀도			
기천	68.2±61.1		
발안상류	47.8±34.2	80.5±70.5	32.8±37.0
발안하류	56.0±31.6	49.1±17.6	39.1±36.6
해충류			
기천	21.0±28.1		
발안상류	8.7±4.4	52.9±62.8	14.3±16.1
발안하류	10.1±4.7	29.7±16.6	15.8±18.5
천적류			
기천	10.8±9.0		
발안상류	9.7±6.8	17.9±10.9	9.9±10.0
발안하류	10.7±7.4	11.6±6.5	10.1±6.4
비해충류			
기천	36.5±60.7		
발안상류	29.4±40.5	9.7±5.9	8.7±13.4
발안하류	35.3±35.5	7.8±5.5	13.3±32.4

¹ 평균±SD, 샘플 크기 (0.5 × 0.5m), 7-13회 채집.

1996년에 세 곳의 조사지에서 초기에 높은 밀도가 서서히 낮아져 50마리 내외의 일정하게 유지됐는데 반해, 1997, 1998년에는 후기에 밀도의 급증이 있었다. 발안지역 조사지간에는 1996년에 기천지에서 8월하순에 피크를 보였고, 1997년에 발안 상류와 하류는 초기 발생패턴은 같았으나 후기 패턴이 다르게 나타났다. 이상의 결과

에서 논 생태계에서 절지동물 발생 패턴은 초기에 높은 밀도의 발생을 보이며, 이후 일정수준의 밀도 감소가 나타나고, 후기에 밀도가 일정하게 유지되거나 한번의 피크를 나타내는 형태를 띤다고 할 수 있다.

(그림 6-8)은 발안지역 수도포장에서 전체 절지동물 밀도 변동 패턴이다.



(그림 6-8) 발안지역 수도포장에서 전체 절지동물 밀도 변동

<표 6-3> 발안지역 수도 포항에서 발생하는 절지동물의 종류 및 밀도¹

구 분		기 천	1997				1998		평균(%)
			발안 상류	발안 하류	발안 상류	발안 하류	발안 상류	발안 하류	
매미목	진딧물과	4.28	1.61	2.71	1.46	0.14	0.57	0.50	1.61(3.02)
	끝동매미충	0.08	0.04	0.07	0.03	0.13	0.00	0.04	0.06(0.11)
	매미충	0.19	0.09	0.10	0.01	0.00	0.15	0.01	0.08(0.15)
	매미충약충	0.58	0.16	0.28	0.00	0.00	0.68	0.55	0.32(0.60)
	벼멸구	0.15	0.05	0.13	6.41	5.36	0.78	1.36	2.04(3.81)
	흰등멸구	4.60	2.60	1.40	5.29	7.09	1.51	0.62	3.30(6.18)
	애멸구	0.38	0.60	0.83	0.41	0.39	0.28	0.06	0.42(0.79)
	멸구약충	9.62	2.18	3.26	38.23	16.16	9.53	12.39	13.05(24.45)
노린재목	식식성노린재	0.58	0.84	0.63	0.60	0.00	0.39	0.03	0.44(0.82)
총채벌레목	총채벌레류	0.15	0.25	0.21	0.00	0.00	0.11	0.00	0.10(0.19)
메뚜기목	메뚜기류	0.03	0.08	0.13	0.11	0.09	0.00	0.00	0.06(0.12)
나비목	이화명나방	0.00	0.02	0.04	0.00	0.00	0.11	0.00	0.10(0.19)
	흑명나방	0.02	0.01	0.03	0.00	0.16	0.01	0.01	0.03(0.06)
	멸강나방	0.00	0.00	0.01	0.00	0.04	0.03	0.00	0.01(0.02)
	기타	0.01	0.02	0.08	0.11	0.01	0.00	0.00	0.03(0.06)
딱정벌레목	벼물바구미	0.17	0.11	0.04	0.01	0.00	0.14	0.16	0.09(0.17)
	벼뿌리바구미	0.07	0.03	0.08	0.03	0.00	0.01	0.00	0.03(0.06)
	앞벌레 1	0.04	0.02	0.06	0.17	0.03	0.01	0.00	0.05(0.09)
	앞벌레 2	0.05	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01(0.03)
	앞벌레 3	0.01	0.00	0.02	0.03	0.00	0.05	0.00	0.01(0.03)
노린재목	포식성노린재	0.30	0.51	0.60	1.43	0.31	0.93	2.27	0.91(1.70)
벌목	벌류	0.12	0.12	0.20	0.10	0.03	0.18	0.15	0.13(0.24)
딱정벌레목	무당벌레과	0.02	0.01	0.07	0.04	0.00	0.02	0.00	0.02(0.04)
	반날개과	0.05	0.02	0.05	0.24	0.01	0.18	0.03	0.08(0.16)
	딱정벌레과	0.13	0.46	0.34	0.70	0.10	0.08	0.02	0.26(0.49)
메뚜기목	귀뚜라미과	0.00	0.03	0.14	0.06	0.00	0.00	0.00	0.03(0.06)
사마귀목	사마귀과	0.01	0.02	0.01	0.11	0.04	0.00	0.00	0.03(0.05)
잠자리목	잠자리류	0.05	0.05	0.07	0.13	0.13	0.02	0.09	0.08(0.15)
거미목	거미류	10.08	8.50	9.20	15.10	10.99	8.44	7.53	9.98(18.69)
목도기목	목도기류	1.75	0.85	7.86	3.83	3.04	5.91	1.74	3.57(6.69)
파리목	갈다구과	30.28	24.84	21.45	4.93	4.53	2.50	11.28	14.26(26.71)
	파리류	4.41	3.59	5.92	0.77	0.20	0.00	0.00	2.13(3.99)
벌목	개미	0.05	0.07	0.03	0.17	0.00	0.32	0.27	0.13(0.24)
메뚜기목	여치과	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.01(0.02)

¹ 샘플 크기(0.5 × 0.5m), 7-13회 채집

논에 서식하는 절지동물들을 그들의 섭식 습성, 구기의 모양, 서식 장소 등에 따라 기능군으로 대분류를 하였는데, 벼를 가해하는 해충류 (pests), 해충들을 잡아먹는 천적류 (natural enemy), 해충과 천적에 속하지 않는 비해충류 (non-pests) 그룹으로 나누었다. 해충류는 6목에 걸쳐서 매우 많은 종류의 해충이 존재하였다. 이들은 즙액을 빨아먹거나 씹어먹어 해를 주고, 유충과 성충시기에 따라 벼에 대한 가해 정도가 다르게 나타났다. 현재의 문제 해충은 매미목의 멸구·매미충류, 딱정벌레목의 벼물바구미, 나비목의 이화명나방, 흑명나방 등이 대표적인 것들이다. 천적류는 식성의 범위가 비교적 넓은 거미, 노린재를 포함하는 일반포식자 그룹과 먹이, 즉 기주특이성이 강한 기생자그룹들이 있다. 대표적인 거미들로는 황산적거미, 등줄에 접시거미, 턱거미등이 있다. 비해충류는 물속의 유기물을 먹거나 부식질을 먹는 깔다구류나 톱토기등이 있다. <표 6-3>은 발안지역 논에서 발생하는 절지동물의 종류 및 밀도이다. 전체적으로 기능군에 관계없이 우점군으로 매미목의 멸구류가 전체 밀도의 30% 이상을 차지하며, 깔다구류가 27%, 거미류가 19%를 차지한다. 그 외에 톱토기, 파리류 등의 밀도가 높았다.

(그림 6-9)는 우리 나라 논에 서식하는 절지동물의 기능군별 종수 및 비율이다 (윤, 1997). 곤충류 및 거미류를 포함하는 포식자의 종수가 107종으로 50% 이상을 차지하여 압도적으로 많았고, 해충류 31종, 기생자 25종, 비해충류 24종으로 나타났다. Settle 등 (1996)은 열대 지방 논포장에서 포식자 그룹의 종수가 가장 많았고, 비해충류 종수도 상당히 다양하다고 보고했다.

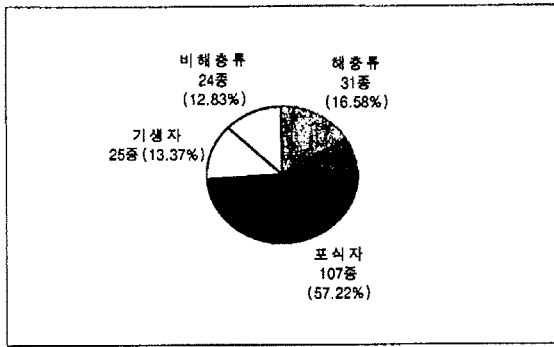
(그림 6-10)은 발안지역에서 조사된 기능군별 개체수 및 비율이다. 비해충류>해충류>천적류 순으로 개체수 비율이 높게 나타났는데, 송과 최 (1993), 윤 (1997), 이 등(1997)과는 또다른 패턴이었다. 이 등 (1997)은 절지동물의 기능군별 점유율은 지역, 파종방법에 따른 본답초기 식생구조의 차이, 표본조사방법등 여러 요인들의 영향에 기인한다고 보고했다.

(그림 6-11)은 벼 생육시기에 따른 기능군별 점유율이다. 벼 생육초기에는 비해충류의 90% 가까이 점유했고, 중기, 후기로 가면서 해충류, 천적류의 점유율이 높아졌다.

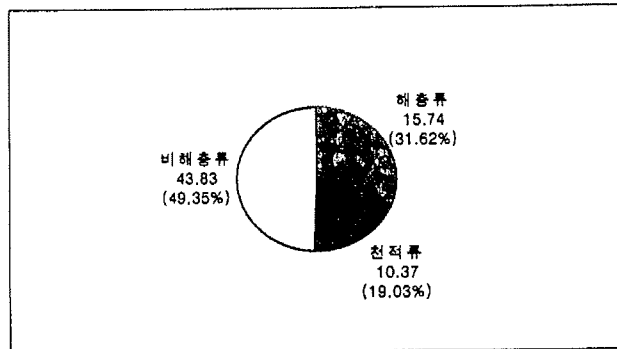
(그림 6-12)는 해충류 발생패턴이다. 1996년에는 해충밀도가 발안 상류와 하류, 기천지에서 20마리 내외의 밀도가 유지되었으나, 기천지에서는 8월 하순에 한번의 큰 피크를 보였는데, 이는 조사지간의 특수성을 반영한 것으로 볼 수 있다. 1997년에는 해충들의 밀도가 높게 유지되었는데 발안상류에서 9월 중순에 특히 높은 밀도를 나타냈다. 1998년에는 전반적으로 낮은 밀도로 유지되었으나 9월 하순경에는 두 지역에서 밀도가 높게 나타났다. (그림 6-8)에서의 전체 절지동물 밀도 변동에서 후기 패턴은 (그림 6-12)에서 나타났듯이 해충류의 밀도에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

(그림 6-13)은 천적류의 발생 패턴을 보여주고 있다. 조사구 및 조사년도에 관계없이 초기밀도는 매우 낮게 유지되고, 중기에 급속한 밀도증가가 이루어지며 후기에 최고밀도를 이루고 있었다. 이러한 패턴을 갖게 되는 것은 최우점 그룹인 거미류의 본답내 유입 및 이들 개체군의 성장과 밀접한 관련을 맺고 있다고 유추할 수 있다. 거미류 같은 천적들은 벼 수확이 끝나고 기온이 낮아져 서식처 환경이 불리해지면, 논에 그대로 머물러서 월동하기보다는 서식처로서 더 적합한 논둑이나 인근 월동처로 이동을 하게 되며, 이듬해 논안에 이양이 이루어져 서식처로서 알맞은 조건이 갖춰지면 다시 활발히 이입하는 특징을 가진다.

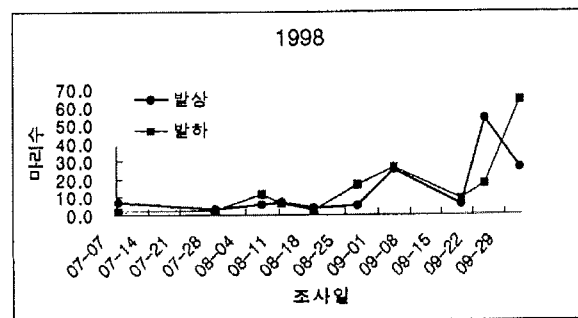
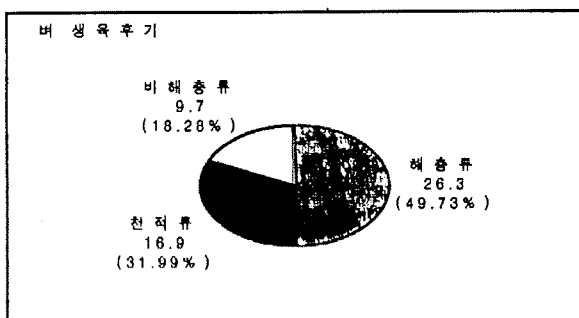
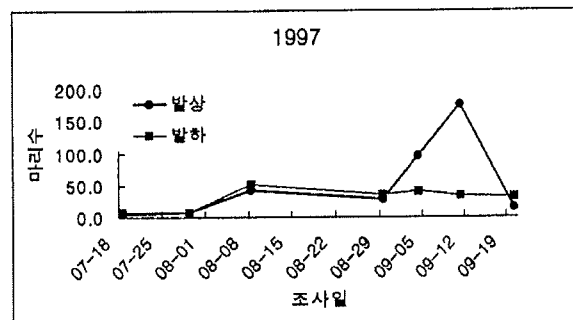
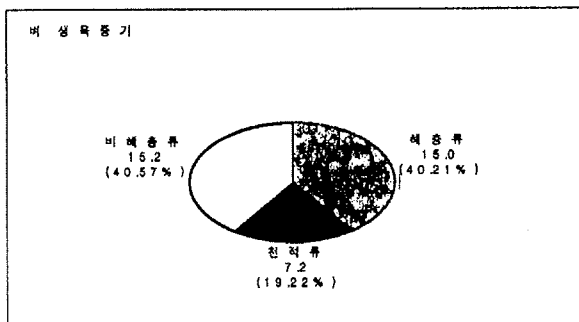
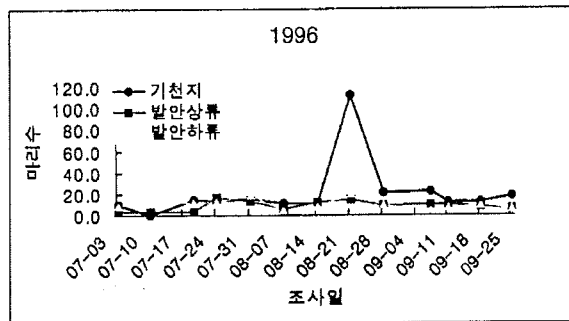
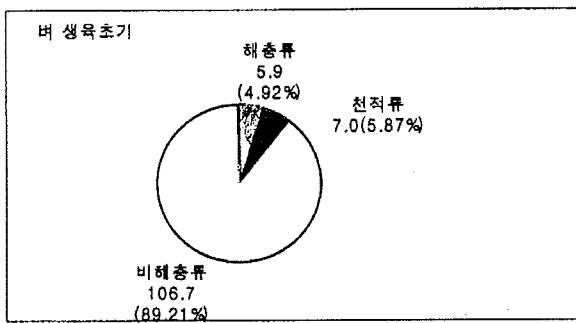
(그림 6-14)는 비해충류의 발생패턴이다. 갈다구류가 최우점군을 형성하였는데, 이들은 벼 생육초기에 매우 높은 밀도를 이루며, 7월말까지 감소하는 패턴을 보였는데, 김 (1999)의 갈다구 군집에 대한 조사에서도 같은 결과를 얻었다. (그림 6-14)에서와 같이 1997년과 1998년에는 벼 생육후기에 소규모 피크가 있었는데, 이는 비해충류의 또하나의 우점군인 톱토기류의 밀도가 증가했기 때문이다. 이상의 결과를 요약하면 전반적인 비해충류 발생은 벼 생육초기의 한 개의 큰 피크와 후기의 작은 피크를 갖는다고 볼 수 있다. 초기의 큰 피크는 파리목의 갈다구류 및 파리류들이 만드는 것으로 윤 (1997)은 이들이 배회성 거미류를 본답내로 유인하는 중요한 역할을 하고 있다고 하였다.



(그림 6-9) 논에 서식하는 절지동물
기능군별 종수 및 비율 (윤, 1997)

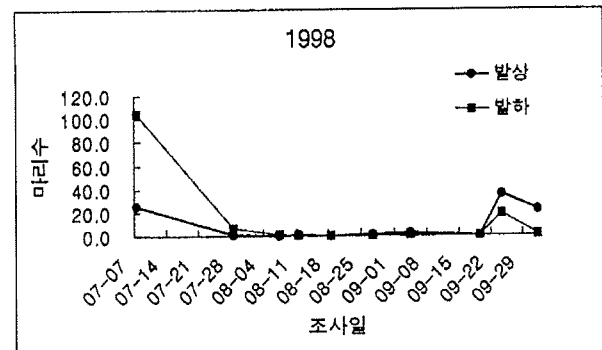
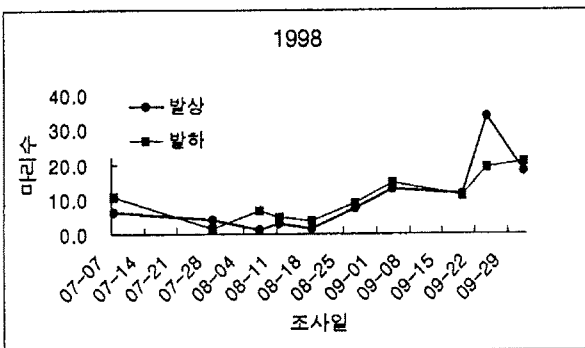
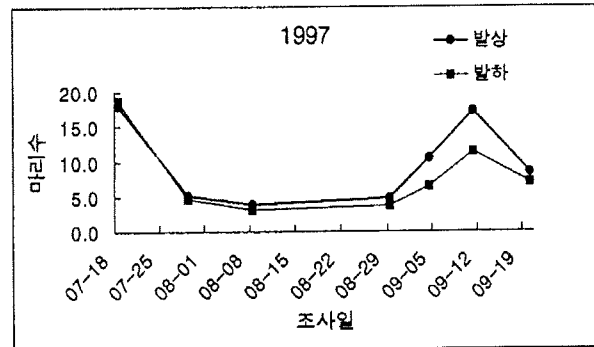
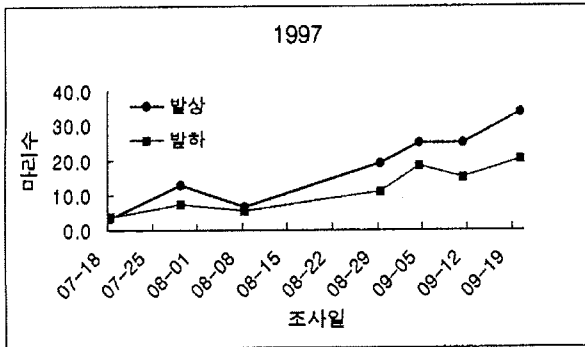
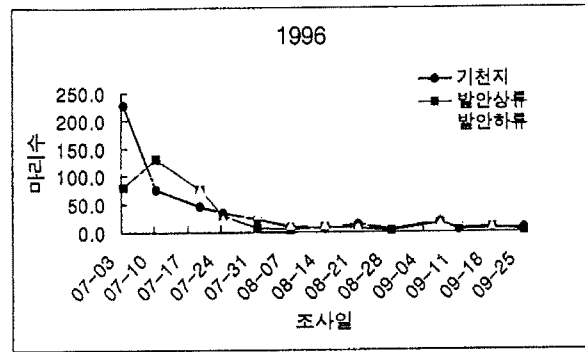
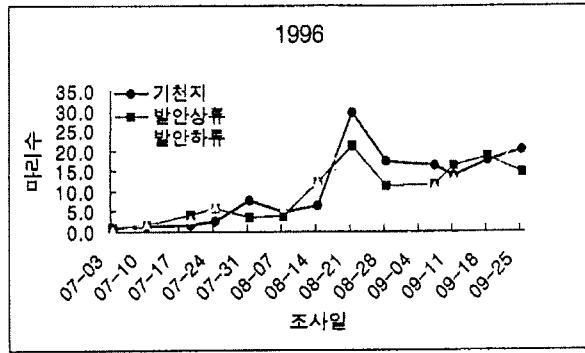


(그림 6-10) 발안지역의 절지동물
기능군별 개체수 및 비율



(그림 6-11) 벼 생육에 따른
기능군별 점유율

(그림 6-12) 발안지역의 논에서
해충류의 발생 패턴

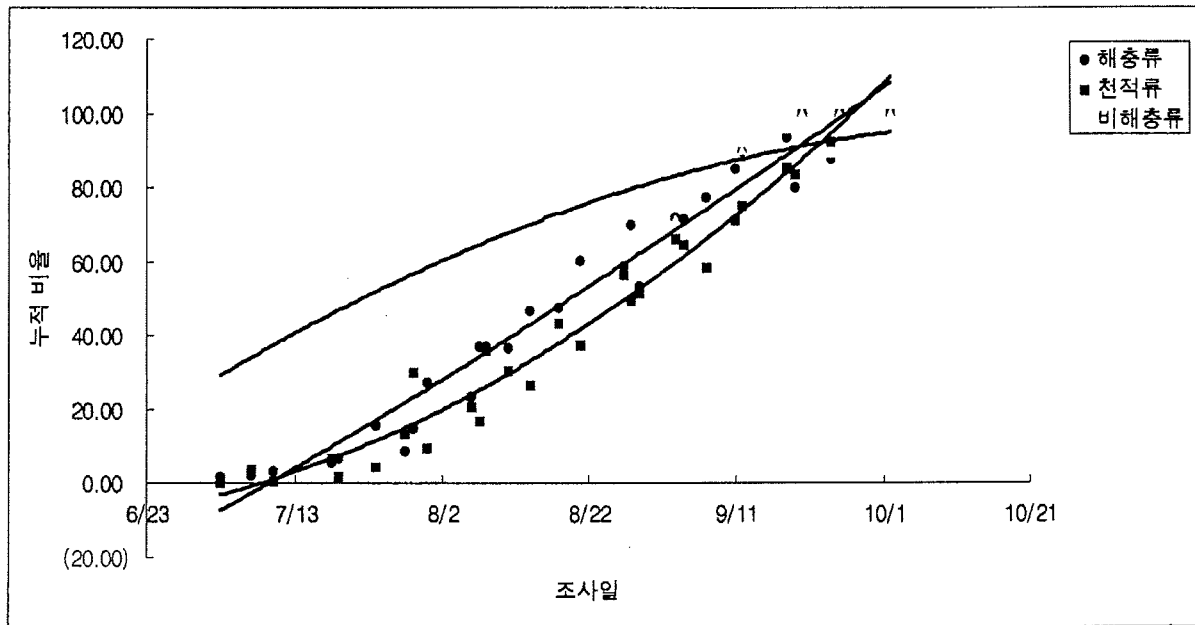


(그림 6-13) 발안지역의 논에서
천적류의 발생 패턴

(그림 6-14) 발안지역의 논에서
비해충류의 발생 패턴

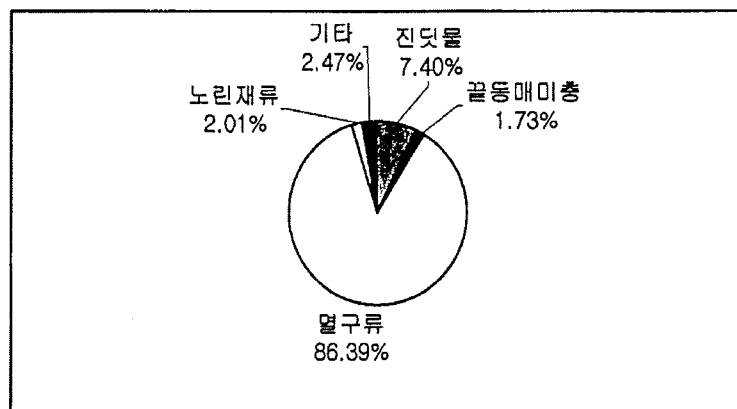
(그림 6-15)는 발안지역 논에서 절지동물 발생을 각 기능군별로 전체 발생밀도에 대한 각 조사시기의 밀도들의 비율을 누적시킨 것이다. 비해충류, 해충류, 천적류의 발생패턴의 차이를 볼 수 있는데, 비해충군은 초기에 대부분의 밀도가 집중된 반면, 해충군은 초기부터 후기까지 일정한 비율로 발생이 되었고, 천적류는 초기, 중기, 후기로 갈수록 발생 비율이 증가했다. 이러한 패턴은 Settle 등 (1996)의 열대지방 논에서 기능군별 발생 비율 패턴 (비해충군의 발생에 이어 천적류의 발생이 이어졌

음) 과는 차이를 보였다. 논에서 초기에 천적류의 발생이 높은 비율로 이루어진다면 중, 후기 해충들의 밀도 억제를 통한 자연방제 가능성을 더욱 높힐 수 있다고 생각한다.



(그림 6-15) 각 기능군별 전체 발생밀도에 대한 각 조사시기의 밀도들의 비율 누적

(그림 6-16)은 주요 해충의 발생비율이다. 멸구류(벼멸구, 흰등멸구, 애멸구 포함)가 우점했고, 진딧물, 노린재, 끝동매미충 순이었다.



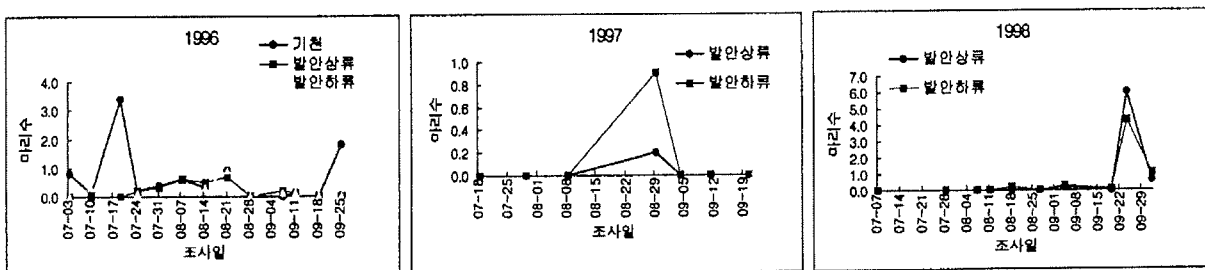
(그림 6-16) 발안지역 논에서 주요 해충의 발생비율

<표 6-4>는 발안지역의 끝동매미충의 발생 밀도이다. 끝동매미충은 벼 오갈병을 매개하므로 해충으로서 중요성이 강조되어 왔는데, 전체적으로 발생 밀도가 상당히 낮았다. 1996년에는 기천지에서 다른 지역보다 밀도가 높았고, 1997년에는 발안하류가 상류보다 높았고, 1998년에는 두 조사지가 비슷한 밀도를 보였다.

<표 6-4> 발안지역 논에서 끝동매미충(성충+약충) 발생

구분	1996	1997	1998
기천	0.66 ± 0.97		
발안상류	0.20 ± 0.25	0.03 ± 0.08	0.68 ± 1.88
발안하류	0.35 ± 0.56	0.13 ± 0.34	0.60 ± 1.34

(그림 6-17)은 끝동매미충의 발생패턴이다. 전체 기간동안 밀도가 낮게 유지되었지만, 몇 번의 소규모 피크는 볼 수 있었다. 1996년에는 7월 중순과 하순에 각각 기천지와 발안 하류에서 피크가 있었고, 기천지에서 9월 하순에 피크가 있었다. 1997년에는 전체밀도가 상당히 낮았고, 1998년에는 발안 상류와 하류에서 9월 하순에 뚜렷한 피크를 나타내주었다. 끝동매미충은 연중 여러 세대를 거치면서 9월 중순에서 하순에 걸쳐 논에서 최고 밀도를 기록하였다.



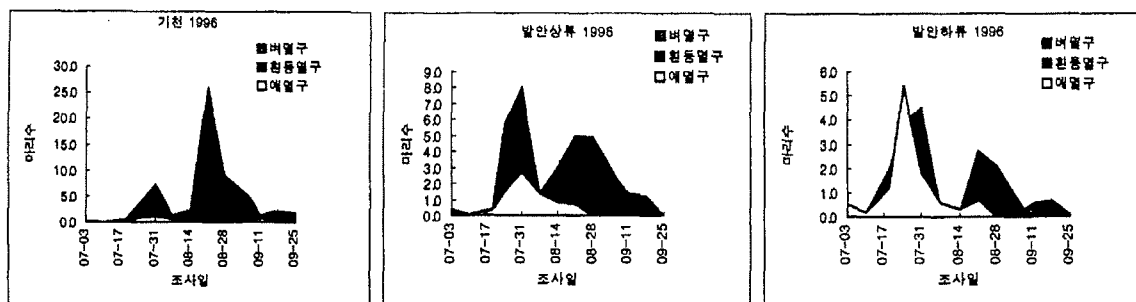
(그림 6-17) 발안지역 논에서 끝동매미충의 발생

<표 6-5>는 벼멸구, 흰등멸구, 애멸구 성충의 발생을 종합한 것이다. 이들 중 흰등멸구의 밀도가 가장 높게 나타났다. 벼멸구는 1997년에 밀도가 높게 나타났고, 애멸구는 1996에서 1998년에 걸쳐 낮은 밀도를 보였다. 흰등멸구는 벼멸구에 비해 보통 비래량이 10배 이상 된다고 알려져 있는데 (농진청 1998), 본 조사에서도 같은 결과를 얻었다.

<표 6-5> 멸구류(벼멸구, 흰등멸구, 애멸구(성충)) 발생

구 분		1996	1997	1998
벼멸구	기천	0.15±0.28		
	발안상류	0.05±0.12	6.41±12.75	0.78±1.04
	발안하류	0.13±0.39	5.36±4.24	1.36±2.35
흰등멸구	기천	4.60±6.99		
	발안상류	2.60±2.55	5.29±3.48	1.51±1.58
	발안하류	1.40±1.50	7.09±3.34	0.62±0.67
애멸구	기천	0.38±0.46		
	발안상류	0.60±0.82	0.41±0.54	0.28±0.89
	발안하류	0.83±1.48	0.39±0.57	0.06±0.19

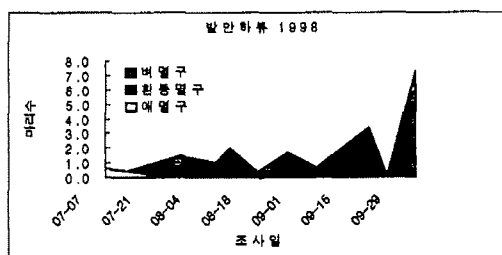
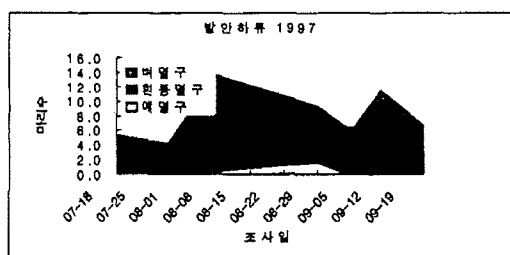
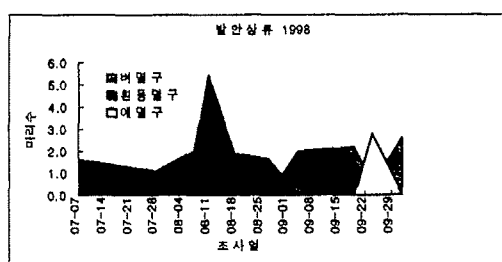
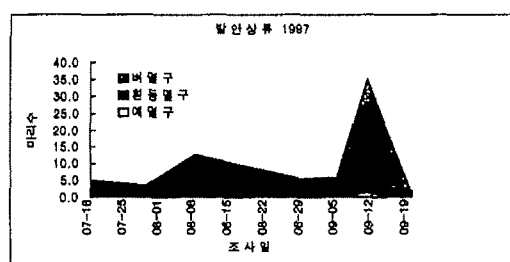
(그림 6-18)은 1996년에 발안지역 논에서 발생한 멸구류 동태이다. 흰등멸구는 발안상류와 발안하류에서 발생밀도와 시기가 거의 같았고, 기천지에서는 이들 지역보다 높게 나타났다. 반면 애멸구는 기천지에서는 낮게 나타났고, 발안상류와 하류에서는 7월중, 하순에 소폭의 피크가 있었다. 벼멸구의 발생은 거의 없었다.



(그림 6-18) 1996년 발안지역 논에서 멸구류 발생

(그림 6-19)는 1997년의 멸구류 발생이다. 9월 하순에 벼멸구의 커다란 피크가 있었고, 발안상류가 발안하류보다 발생밀도가 높았다. 흰등멸구 발생은 두 조사지에 비슷하였다. 이런 조사지간의 차이는 약제 방제에 따른 차이로 보인다. 발안상류 지역은 약제 방제가 없었던 반면, 발안하류지역은 약제가 2-3회 살포되었다.

(그림 6-20)은 1998년 발안지역 논에서 멸구류 발생이다. 두 조사지에서 9월 초부터 벼멸구 발생이 나타나고 있는데 발생밀도는 1997년에 비해 낮았다. 흰등멸구는 발안상류에서 8월중순에 피크가 있었고, 9월 하순에 발안상류에서 애멸구의 발생이 다소 높게 나타났다.

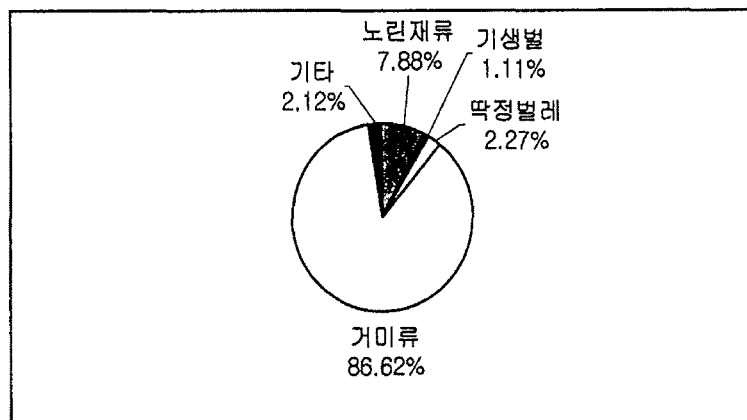


(그림 6-19) 1997년 발안지역
논에서 멸구류 발생

(그림 6-20) 1998년 발안지역
논에서 멸구류 발생

멸구류는 해충류중에서 수적 우위를 보였는데, 비래해충인 벼멸구, 흰등멸구의 발생밀도에 크게 좌우되었다. 애멸구는 토착해충으로 연중 소규모로 발생하였지만, 벼멸구는 조사년도에 따라 발생량에서 커다란 차이를 보였다.

(그림 6-21)은 해충을 포식하는 주요 천적의 점유율이다. 거미류가 압도적으로 우위를 점하고 있고 (86.62%), 뒤를 이어 노린재류, 딱정벌레, 기생봉순으로 나타났다.



(그림 6-21) 천적류중 주요 천적의 발생비율

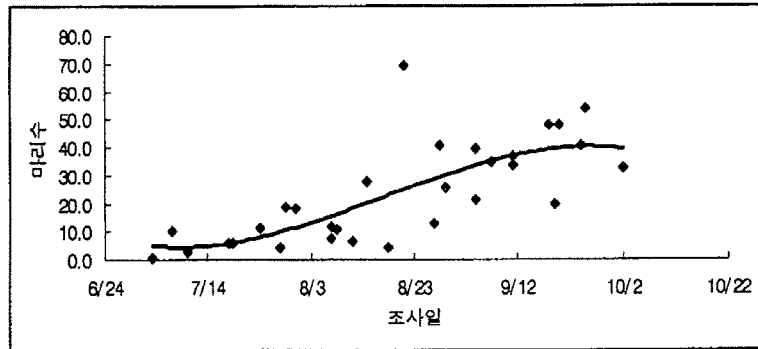
<표 6-6>은 천적류중 우점하는 거미류 발생밀도이다. 단위면적당 ($0.25m^2$) 평균 10마리 정도로 나타났는데, 1997년에 발안상류에서는 15마리 정도까지 높게 나타났다.

<표 6-6> 거미류 발생 밀도

구분	1996	1997	1998
기천	10.08±8.98		
발안상류	8.50±6.31	15.10±9.27	8.44±8.13
발안하류	9.20±7.13	10.99±6.14	7.53±5.05

(그림 6-22)는 1996년부터 1998년까지 발안지역 거미류를 이용하여 발생 패턴을 종합한 것이다. 밀도증가가 7월초부터 서서히 이루어지며, 계속 증가되어 9월하순

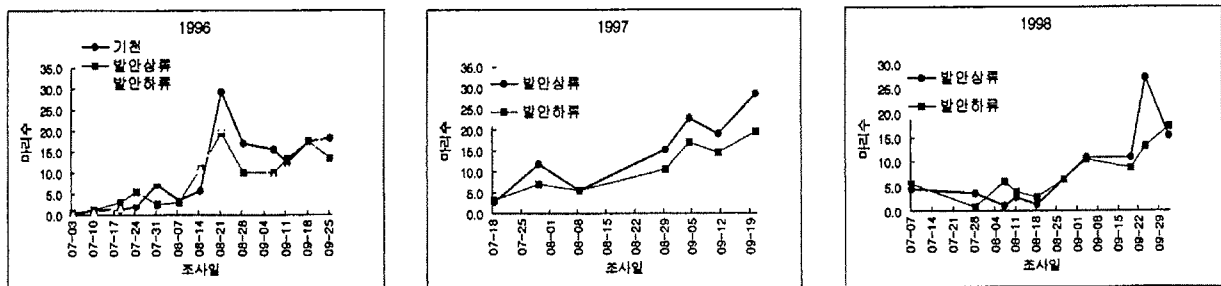
까지 높은 밀도가 안정되게 유지되다가 감소하는 패턴을 보였다.



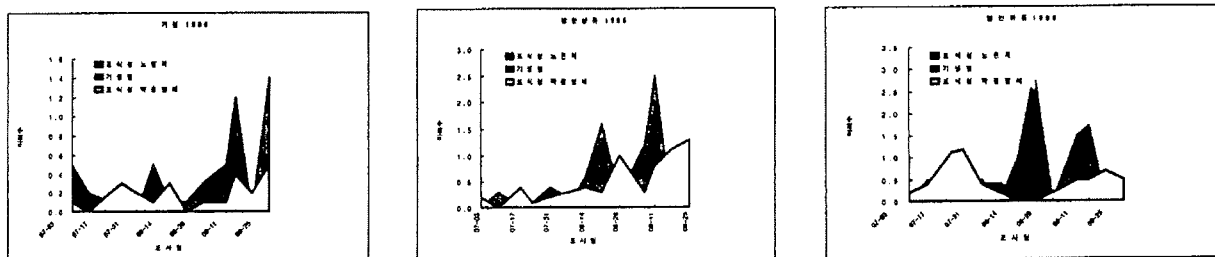
(그림 6-22) 발안지역 거미류 발생 패턴

(그림 6-23)은 1996년부터 1998년까지 각 조사지에서 패턴인데, (그림 6-22)의 발생 패턴과 유사하며 조사지간에도 패턴의 차이는 크게 없게 나타났다.

(그림 6-24)는 1996년에 발안지역에서 거미류를 제외한 포식성 및 기생성 천적들의 발생을 나타낸 것이다. 전체적으로 이들의 밀도는 낮았지만, 애꽃노린재나 깨알소금쟁이등의 포식성 노린재는 8월 중순이후부터 피크를 이루었다. 기생봉과 포식성 딱정벌레는 뚜렷한 피크는 없었지만 조사기간동안 낮은 밀도로 계속 존재했다.



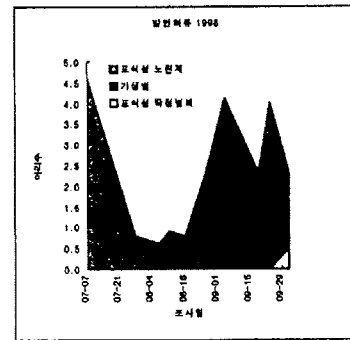
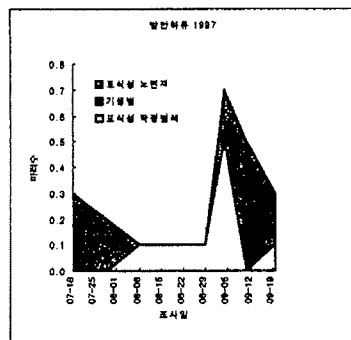
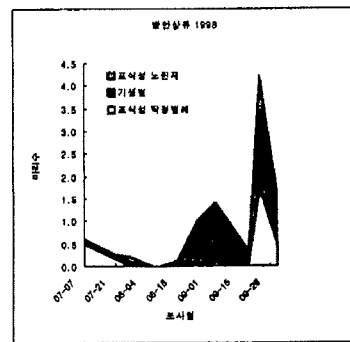
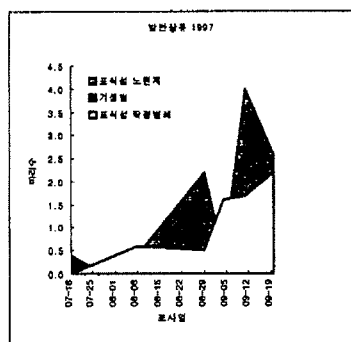
(그림 6-23) 1996년에서 1998까지 발안지역 거미류 발생



(그림 6-24) 1996년 발안지역 논에서 천적류 발생

(그림 6-25)는 1997년의 결과인데, 발안상류 조사지에서 발안하류 조사지에 비해 포식성 노린재, 딱정벌레의 밀도가 높게 나타나고 있었고, 포식성 노린재는 1996년의 패턴과 유사하였다.

(그림 6-26)은 1998년의 결과인데, 다른 조사년도에 비해 이들의 밀도가 높게 나타났다. 발안상류에서는 1996, 1997년과 동일한 패턴이었으나, 발안하류에서는 후기 패턴은 전년도들과 같았으나 초기에 발생밀도가 높게 나타났다. 이러한 패턴의 차이는 벼 생육초기에 발생밀도가 높은 소금쟁이들의 밀도가 크게 반영되었기 때문으로 생각된다.



(그림 6-25) 1997년 발안지역
논에서 천적류 발생

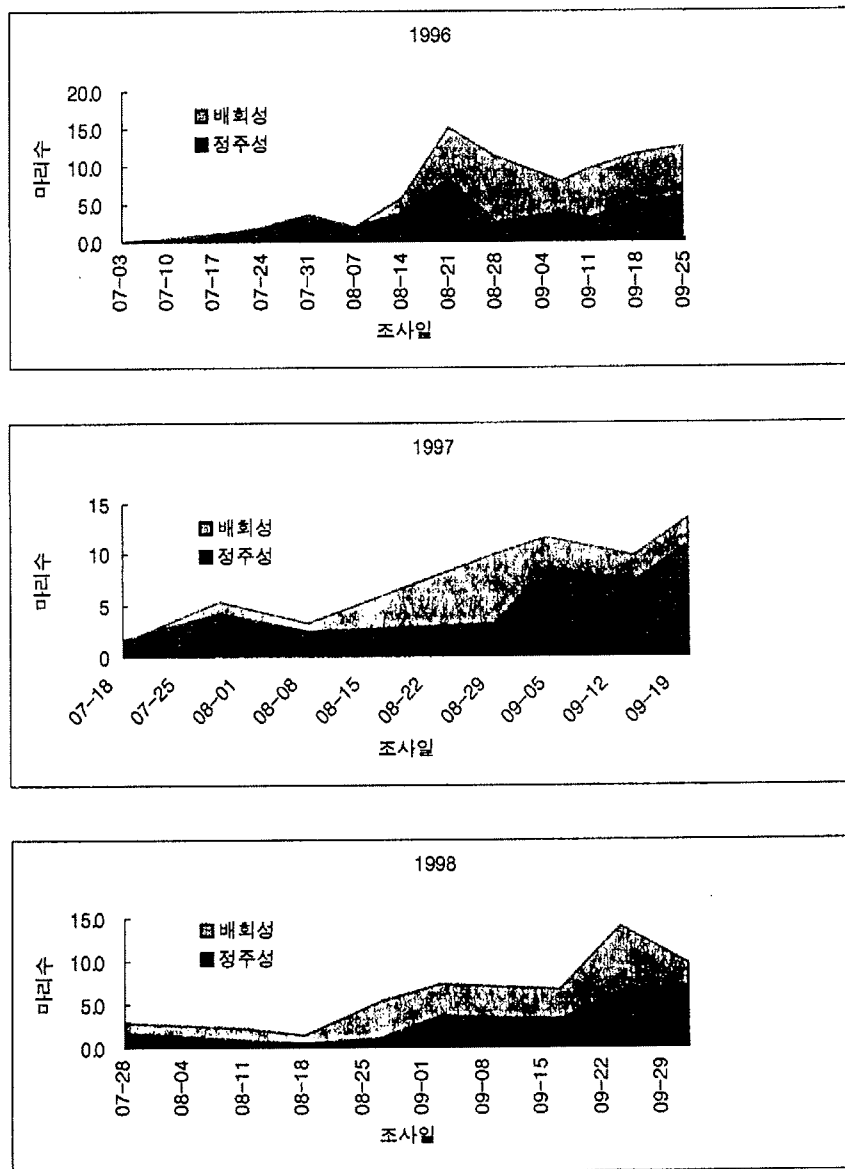
(그림 6-26) 1998년 발안지역
논에서 천적류 발생

<표 6-7>은 논 생태계내 천적류중에서 절대 우점군을 이루는 거미류 종구성 및 비율을 나타낸 것이다. 황산적거미가 최우점종이었고 (49.32%), 턱거미, 등줄가슴애 접시거미 순으로 나타났다. 유체를 포함하여 과별 점유율은 늑대거미과>갈거미과>접시거미과>염낭거미과>꼬마거미과 순이었다. 과별로 출현하는 종수는 갈거미과와 접시거미과에서 다수의 종들이 출현하였고, 나머지 과들은 2-3종이 대부분이었다.

<표 6-7> 발안지역 논에서 거미류 종구성 및 비율

과 명	종 명	종별점유비율	과별점유비율
늑대거미과 (Lycosidae)	황산적거미 (<i>Pirata subpiraticus</i>)	49.32	49.3
염낭거미과 (Clubionidae)	각시염낭거미 (<i>Clubiona kurilensis</i>)	1.69	10.7
	노랑염낭거미 (<i>C. japonicola</i>)	0.61	
	<i>Clubiona</i> spp. spiderling	8.37	
깡충거미과 (Salticidae)	수검은깡충거미 (<i>Marpissa magister</i>)	1.27	4.6
	<i>Marpissa</i> spp. spiderling	3.31	
게거미과 (Thomisidae)	<i>Xysticus</i> spp.	0.24	0.24
갈거미과 (Tetragnathidae)	턱거미 (<i>Pachygnatha clerki</i>)	12.62	15.9
	비단갈거미 (<i>Tetragnatha lauta</i>)	0.02	
	민갈거미 (<i>T. maxillosa</i>)	0.65	
	점박이가랑갈거미 (<i>Dyschirioghatha quadrimaculata</i>)	0.15	
	<i>Tetragnatha</i> spp. spiderling	2.47	
접시거미과 (Linyphiidae)	등줄애접시거미 (<i>Ummeliata insecticeps</i>)	2.97	13.8
	모등줄애접시거미 (<i>Ummeliata angulituberis</i>)	0.62	
	황갈애접시거미 (<i>Gnathonarium dentatum</i>)	1.99	
	흑황갈애접시거미 (<i>G. gibberum</i>)	0.12	
	흑갈톱날애접시거미 (<i>Erigone prominens</i>)	0.13	
	<i>Erigoninae</i> spp. spiderling	7.92	
꼬마거미과 (Theridiidae)	작살가랑잎꼬마거미 (<i>Enoplognatha japonica</i>)	0.75	5.3
	여덟점꼬마거미 (<i>Coleosoma octomaculatum</i>)	1.08	
	<i>Theridiidae</i> spp. spiderling	3.51	
왕거미과 (Araneidae)	넉점애왕거미 (<i>Hysosinga pygmaea</i>)	0.05	0.2
	<i>Araneidae</i> spp. spiderling	0.13	

(그림 6-27)은 정주성 및 배회성 거미류의 발생을 나타낸 것이다. 배회성 거미류는 늑대거미과, 염낭거미과, 깡충거미과, 게거미과의 거미들이며, 정주성 거미류는 갈거미과, 접시거미과, 꼬마거미과, 왕거미과 등으로 구성된다. 1996년 1998년까지 두 종류의 거미류가 초기에는 낮은 밀도를 나타냈는데, 이때는 거미들이 본답으로 이동하는 단계로 볼 수 있다. 이어서 밀도증가가 일어나며 그 증가폭은 배회성 거미류들에서 크게 나타나고 있다. 후기에는 두 종류의 거미류의 밀도가 모두 높게 나타났다.



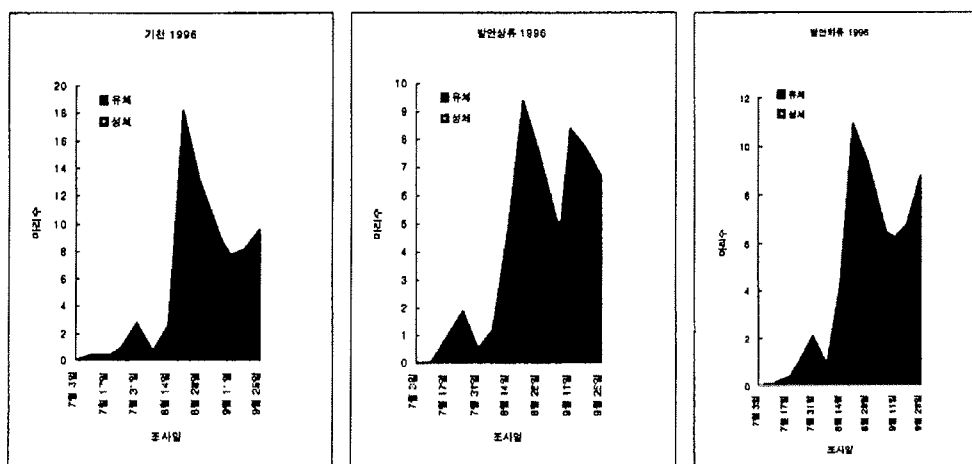
(그림 6-27) 1996년부터 1998년까지 발안지역 정주성과 배회성 거미류의 발생

<표 6-8>은 발안지역의 단위면적당 ($0.25m^2$) 황산적거미의 밀도이다. 평균 4.15에서 6.83마리까지의 범위로 세 지역에서 비슷한 밀도를 보였으며, 조사년도에 따라 차이가 없었다.

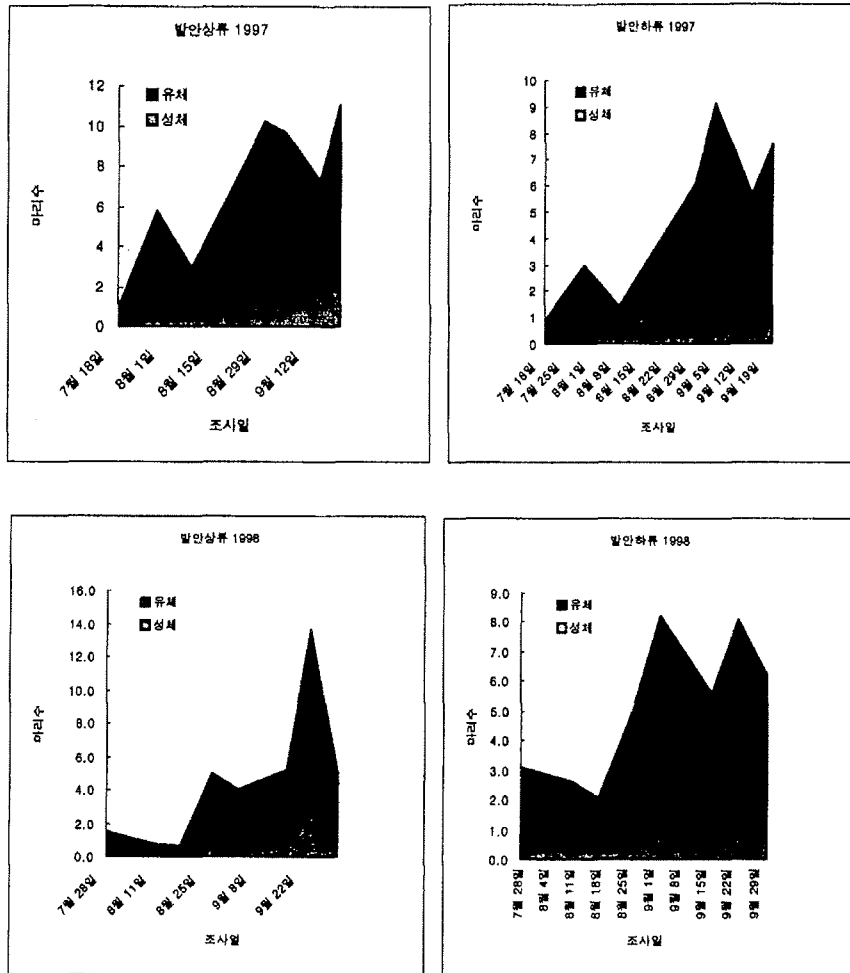
<표 6-8> 발안지역 논에서 황산적거미 발생 밀도

구분	1996	1997	1998
기천	5.64 ± 5.78		
발안상류	4.15 ± 3.50	6.83 ± 3.85	4.46 ± 4.16
발안하류	4.38 ± 3.89	4.83 ± 3.13	5.12 ± 2.38

(그림 6-28)은 발안지역의 황산적거미 발생이다. 거미의 발육은 알, 유체, 아성체, 성체의 네단계로 나눌 수 있는데, 황산적거미는 벼 생육 전기간동안 유체의 비율이 성체보다 훨씬 높게 나타났다. 유체들이 본격적으로 증가한 시기는 7월 중순경부터였고, 이후로 유체의 비율이 높게 유지되었다. 이러한 패턴은 황산적거미의 월동이 발육이 완료된 성체가 아닌 미성숙된 유체 단계에서 많이 들어가 이듬해 초기에 성체로 발육이 완료된다는 것으로 추정할 수 있다.



(그림 6-28) 발안지역 논에서 황산적거미(*P. subpiraticus*)의 발생 (계속)



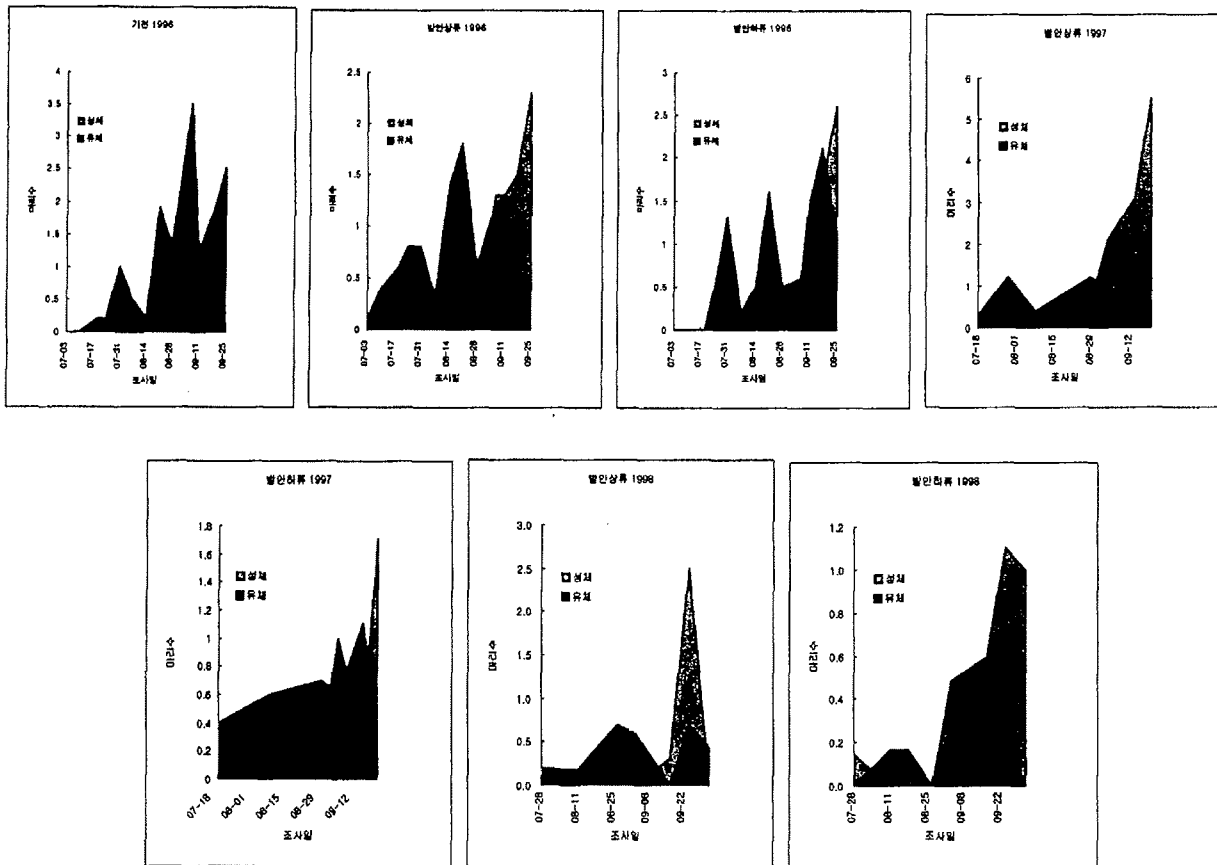
(그림 6-28) 발안지역 논에서 황산적거미(*P. subpiraticus*)의 발생

<표 6-9>는 발안지역의 단위면적당 ($0.25m^2$) 톱거미 밀도이다. 1996년에는 세 조사지에서 1.33 ~ 1.44 마리 정도로 비슷했으나 1997년에는 발안상류가 발안하류보다 2배정도 높았고, 1998년에는 밀도가 가장 낮았다.

<표 6-9> 발안지역 수도 포장에서 톱거미 발생 밀도

구분	1996	1997	1998
기천	1.43 ± 1.38	-	-
발안상류	1.40 ± 0.88	2.83 ± 2.69	0.79 ± 1.00
발안하류	1.33 ± 1.37	1.14 ± 0.57	0.54 ± 0.48

(그림 6-29)는 발안지역의 턱거미 발생이다. 초기와 중기에는 유체의 비율이 높게 나타났는데, 후기에는 성체의 비율이 높았다. 벼 생육초기에 논으로 이입은 성체에 의해 일어나고, 본답내에서 번식이 이루어져 유체의 비율이 높아졌고, 후기에 이들이 성체까지 거의 발육되어 월동에 들어간다는 것으로 알 수 있다.



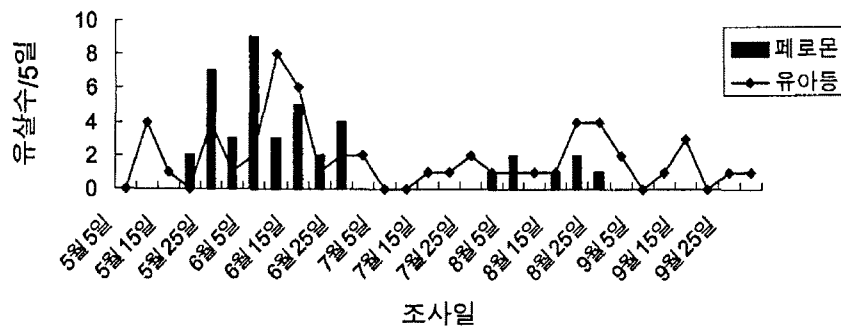
(그림 6-29) 발안지역 논에서 턱거미(*P. clerki*) 발생

2. 다양한 트랩들을 이용한 수도 해충 및 천적 모니터링

가. 페로몬 트랩(pheromone trap)

이화명나방은 벼의 대표적 해충이었으나, 1970년대부터 발생이 감소되기 시작하여 현재는 낮은 발생이 되고 있다 (엄 등, 1991). 현재 이 해충에 대한 발생 예찰은 주로 유아등을 사용하고 있다. 본 연구에서는 수도 포장의 위치상 유아등 설치가 어려운 발안지 하류 수도 포장에 페로몬 트랩을 이용해 이화명나방 성충의 발생

을 모니터링 하였다. (그림 6-30)은 1999년 경기도 발안지역 유아등 자료와 본 연구에서 페로몬 트랩을 이용한 성충 유살수를 나타낸 것이다. 이화명나방은 년 2회 발생하는 해충인데, (그림 6-30)에서 페로몬 트랩과 유아등의 유살수가 월동 성충은 5월중순부터 7월상순까지 우화하면서 6월 상순에 최성기의 1화기 패턴이, 제 2세대 성충은 7월하순부터 8하순까지 우화하면서 8월 상순의 최성기 패턴이 나타났고, 2화기의 밀도는 1화기에 비해서 매우 낮았다.

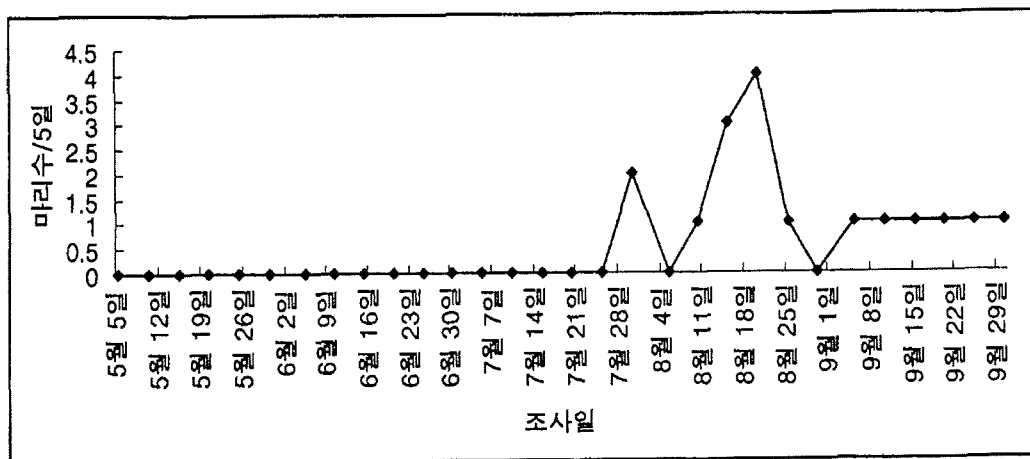


(그림 6-30) 1999년 경기도 발안지역 이화명나방 유아등과 페로몬 트랩의 유살수

본 연구에서 사용된 성 페로몬 화합물 조성은 송 등 (1978)이 이용한 두 가지 성분 (Z11-16:ALD, Z13-18:ALD)에 한가지 성분 (Z9-16:ALD)를 추가하여 사용하였다. 송 등 (1978)은 미교미 암컷과 합성 페로몬과의 비교에서 미교미 암컷의 유인력이 월등히 높아 합성 페로몬의 유인력이 낮다는 것을 지적하면서 합성 페로몬의 유효구조, 사용농도, 사용방법등의 부적합성을 원인으로 고려하였다. 본 연구는 차후 미교미 암컷과의 비교 실험등이 수행되어야 실험에서 사용되었던 세가지 성분의 조성에 대한 유인효과를 더 정확하게 판단할 수 있겠지만, 일단 유아등과의 유살수 비교에서는 유인효과가 인정된다고 할 수 있다. 그리고 본 연구를 보완하기 위해 이화명나방 발생이 비교적 많은 충남 당진 수도포장에 똑같은 페로몬 트랩을 설치한 결과, 이화명나방 12마리가 유인되는 결과를 얻었다.

(그림 6-31)은 경기도 발안지역의 흑명나방 유살수를 나타낸 것이다. 흑명나방은 국내에서 월동하지 못하고 외국에서 비래한다고 알려져 있다. (그림 6-31)에서 아

주 적은 개체의 유살을 볼 수 있는데, 이는 1999년의 이지역에 흑명나방 비래가 매우 낮았음을 보여주었다. 한편, 흑명나방을 모니터링하기 위해 설치된 페로몬 트랩에 전혀 유인되지 않았다. 흑명나방의 페로몬 조성은 국제적으로 널리 사용되는 성분을 이용하였는데 (Rao *et al.* 1995), 국내에서 이 해충에 대한 유인 실험은 처음으로 시도되는 것이라, 6가지의 다양한 조성비율로 유인하였으나 실패하였다. 실패 원인으로는 경기도 발안지역에서 육안 관찰에서도 포장에서 거의 볼 수 없어 일차적으로 발생밀도가 매우 낮기 때문이라고 추정할 수 있는데, 흑명나방이 포장에서 쉽게 관찰되는 충남 당진에 똑같이 설치한 결과도 전혀 유인효과가 없는 것으로 나타나 화합물 및 조성비율에 문제가 있었던 것으로 추정되며, 차후에 보완실험이 이루어져야만 할 것으로 생각된다.



(그림 6-31) 1999년 경기도 발안지역 유아동의 흑명나방 유살수

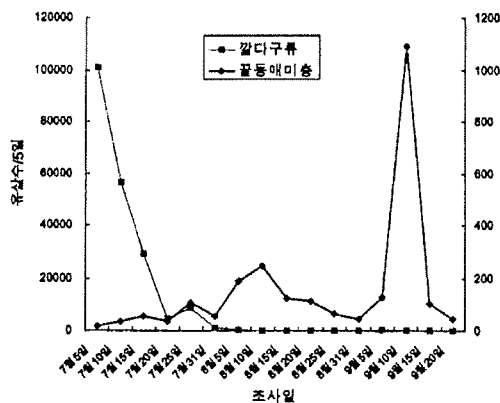
나. 유아등(light trap)

서울대 실험포장에 설치된 유아등에서 벼멸구, 흰등멸구, 애멸구, 끝동매미충, 벼물바구미, 갈다구류에 대한 유살수가 1999년 6월30일부터 9월15일까지 조사되었다. (그림 6-32)와 (그림 6-33)은 유살수가 많은 벼물바구미, 끝동매미충, 흰등멸구, 갈다구류에 대한 유살수를 나타내주고 있다. 유아등 조사에서 벼멸구, 애멸구는 거의 찾아볼 수 없었는데, 1999년에 벼멸구의 비래량이 매우 적었고, 토착 해충인 애멸구는 서울대 실험포장에서 밀도가 매우 낮았던 것으로 추정된다. (그림

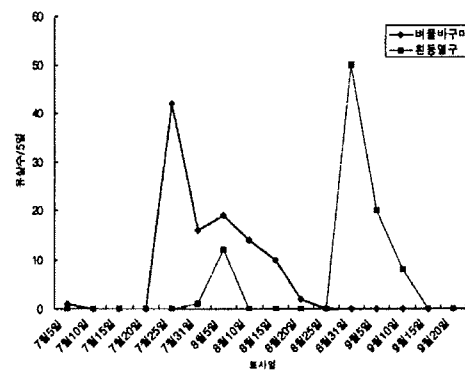
6-32)는 발생 밀도가 비교적 높은 깔다구류와 끝동매미충의 밀도 변동 패턴이다. 깔다구류는 본답에 물을 댄 후 부터 밀도가 매우 높게 나타나 7월 말까지 지속되는 것으로 나타났고, 8월 말부터 약간의 발생이 9월중순까지 나타났다. 끝동매미충은 1년에 4-5회 발생하며, 1회 성충이 4월 중순에 발생한다고 알려져 있다. 조사 기간 내내 성충의 발생은 계속 이루어졌고, 8월 상순에 작은 피크를, 9월 상순에 큰 피크를 보여 벼 생육후기에 이들의 밀도가 매우 높아짐을 알 수 있었다.

(그림 6-32)는 1999년 서울대 실험포장 유아등에서 깔다구류와 끝동매미충 유살수의 변동을 보여주고 있다.

(그림 6-33)은 벼물바구미와 흰등멸구의 유살수를 나타낸 것인데, 벼물바구미는 벼 이앙초기에 월동성충으로부터 부화한 유충들이 벼 뿌리를 가해해 피해를 주는 해충으로 알려져 있다 (농진청, 1992). 유아등 조사에서 신성충은 7월 하순에서 최성기를 이루며, 이후 1개월동안 지속적으로 감소하는 발생 패턴을 보였다. 흰등멸구는 해외에서 벼멸구 처럼 비래하는 해충인데, 7월 말에서 8월 초에 작은 피크와 8월 말에서 9월 초에 매우 큰 피크가 확인되었다.



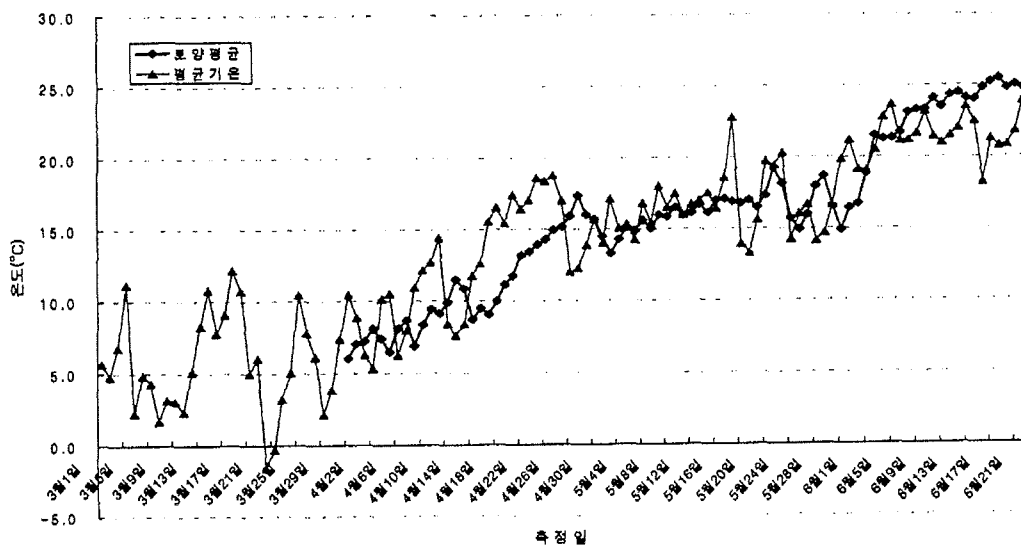
(그림 6-32) 1999년 서울대 실험포장 유아등에서 깔다구류와 끝동매미충 유살수



(그림 6-33) 1999년 서울대 실험포장 유아등에서 벼물바구미와 흰등멸구의 유살수

다. 핏폴 트랩(pitfall trap)

(그림 6-34)는 대기 및 토양온도가 겨울을 난 거미의 활동개시에 미치는 영향을 알아보려고 1999년 3월에서 6월까지 서울대 실험포장의 일별 평균 토양온도 및 기온을 나타낸 것이다. 토양온도는 3월 말에 6℃ 정도였으며, 서서히 증가하여 4월 중순 이후에 10℃를 넘었다. 5월 중순에 15℃, 6월초에는 20℃를 넘어섰다. 대기온도는 토양온도와 비슷한 패턴이었는데 증가가 5일정도 일찍 시작되었다. 토양 및 대기온도는 수도해충의 포식자인 거미류들의 발육, 산란 및 포식행동 커다란 영향을 미치게 되는데, 논에서 관찰한 결과와 본 기상 자료를 근거로 추정할 수 있는 것은 평균기온이 10℃ 전후인 4월 초순경에 논거미들의 활동이 개시되는 시점일 것으로 생각된다. 그러나 여기에 대해서는 논거미 종류별로 온도에 따른 발육 실험이 추가로 이루어져만 정확히 결론 내릴 수 있겠다.



(그림 6-34) 1999년 3월부터 6월까지 서울대 실험포장의 일별 평균 토양 온도 및 기온

<표 6-10>은 서울대 실험포장에 설치한 초기 핏폴 트랩에서 잡힌 곤충목록이다. 해충으로는 본답에서 벼에 바이러스병을 옮기는 끝동매미충이 조사되었고, 풀밭에서 식물 뿌리를 가해하는 풍뎅이 종류들이 곤충 목록의 주류를 이루고 있고, 포식자로 반날개, 일부 개미종들이 포함되었다.

<표 6-10> 1999년 서울대 실험 포장에서 핏폴 트랩 곤충 목록(4월 하순 - 5월중순)

메뚜기목(Orthoptera)	
<i>Gryllotalpha orientalis</i> (Burmeister)	땅강아지
<i>Criotettix japonicus</i> (de Haan)	가시모메뚜기
<i>Tetrix japonica</i> (Bolivar)	모메뚜기
매미목(Hemiptera)	
<i>Nephotettix cincticeps</i> (Uhler)	끝동매미충
딱정벌레목(Coleoptera)	
<i>Chlaenius (chlaeniellus) inops</i> Chaudoir	노랑테먼지벌레
Aleocharinae	바수염반날개아과
<i>Tachyusa</i> sp.	반날개 일종(한국?)
<i>Othiellus</i> sp.	반날개 일종(한국?)
<i>Aleochara</i> sp. near to <i>trisulcata</i>	똥똥뎡이
<i>Aphodius rectus</i> (Motschulsky)	오카모토우단똥뎡이
<i>Maladera okamotoi</i> (Murayama)	애우단똥뎡이
<i>Maladera orientalis</i> (Motschulsky)	좀뽕간우단똥뎡이
<i>Maladera</i> sp.	참검정똥뎡이
<i>Holotrichia diomphalia</i> (Bates)	곤봉털모래똥뎡이
<i>Trichiorhyssemus asperulus</i> (Waterhouse)	참소리쟁이에좀쌀바구미(개칭)
<i>Rhinoncus jakovlevi</i> Faust	썩벌레과
Lathridiidae sp.	
벌목(Hymenoptera)	
Scelionidae	검정알벌과
Myrmicinae	두마디개미아과
<i>Tetramorium caesiopodem</i>	주름개미

<표 6-11>은 서울대 실험포장의 4지점 (A, B, C, D)의 핏폴 트랩에서 조사된 거미 밀도이다. A 지점은 차량 및 사람이 지나는 농로의 가장 자리에 있고, B지점은 논둑이며, C지점은 논둑에서 1m 위치, D지점은 논둑에서 10m에 위치해 있다. 트랩 설치 일주일 후 밀도는 길가, 논둑, 논안 1m지점에서는 거의 비슷했으나, 논안에서 밀도가 3지점에 비해 1/2정도로 낮게 나타났다. <표 6-11>의 결과는 4월 말의 토양 온도 및 기온 등이 거미의 활동에는 제약이 되지 않는다는 것을 알 수 있으며, 논안의 거미 밀도가 낮은 것은 이곳이 논둑이나 길가에 비해 먹이가 서식공간인 풀밭이 조성되지 않아 먹이가 되는 것들의 밀도가 상당히 낮기 때문으로 해석할 수 있다. 특히 거미류의 먹이가 되는 톱토기류의 밀도는 3지점과 논안 10m 지점에서 차이가 있게 조사되었다. 이후, 논안에는 물을 대어 이양하는 관계로 핏폴 트랩을 제거했

고, A, B 두 지점에서만 트랩이 운용되었다. 두 지점이 7월 중순까지는 비슷한 밀도가 유지되다가 7월 말부터 B지점인 논둑에서 밀도가 높게 나타났다. 이것은 본답내의 벼 생육이 진척되어 거미가 서식하기에 알맞은 조건이 조성되고, 먹이가 풍부해져 거미들이 본답내로 활발히 이입하기 때문에 찢폴 트랩에 잡힌 개체수가 늘어난 것으로 추정할 수 있고, 이후 논둑에서는 거미의 활동이 활발하게 이루어지고 있었다.

<표 6-11> 1999년 서울대 실험 포장의 찢폴 트랩 평균 개체수¹

조사일시	A(논로가)	B(논둑)	C(논안 1m)	D(논안 10m)
4월31일	5.4	6	6	3.2
5월13일	5.2	3.8	1.4	1
5월21일	4.6	1.2		
5월28일	4	5		
6월 5일	2.6	1.4	0.6	0.4
6월 13일	5.2	5		
6월 19일	0.8	0.8		
6월 26일	2.2	1.2		
7월 3일	0.2	1.6		
7월 11일	12.2	7.6		
7월 19일	2.4	1.6		
7월 30일	2.2	3		
8월 6일	3.2	6.4		
8월 16일	3.6	13		
8월 23일	1.4	6.6		
8월 31일	3.8	11.4		
9월 7일	1.2	3.8		
9월 20일	2	6.8		

¹ 7일 동안 잡힌 개체수

<표 6-12>는 수원시 당수동 수도 포장에 동, 서, 남, 북 4방위에 설치한 트랩에서 수거한 개체수에 관한 자료이다. 트랩 초기에 거미밀도가 상당히 높았고, 이후 적정밀도가 꾸준히 유지되고 있고, 방위별로 별다른 차이 없이 밀도가 유지되었다.

<표 6-12> 1999년 수원시 당수동 논둑에서 핏폴 트랩 평균 개체수¹

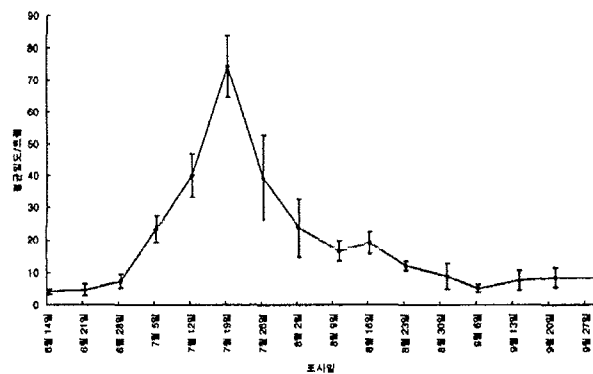
조사일시	동	서	남	북
6월 17일	9.6	40.8	8.6	8
6월 24일	4	5.2	3.2	4
6월 30일	9.2	16.2	7.4	6.4
7월 7일	4.8	1.2	2.4	5
7월 13일	2.6	1.4	1.8	1.8
7월 20일	4.6	1.4	1.2	3
7월 27일	1.2	1.2	1.4	1.8
8월 3일	1	1.8	0.4	0.6
8월 10일	2	2.4	0.4	1.4
8월 17일	4.4	1.8	1.6	2.2
8월 23일	1	1.2	0.6	0.8
9월 1일	0	5.2	0	2
9월 20일	0	0.3	0	0.3

¹ 7일 동안 잡힌 개체수

라. 끈끈이 트랩 (sticky trap)

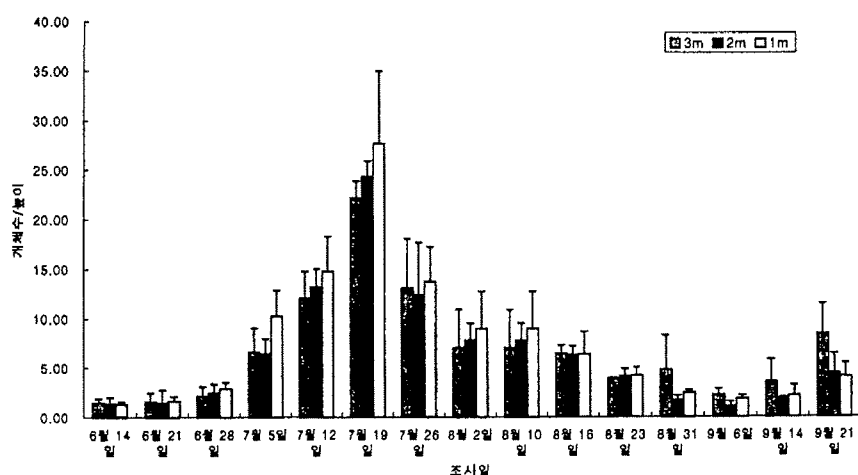
거미의 유사비행은 주로 어린 거미들에게서 일어나고 (임과 김, 1999), 농업 해충의 주 포식자인 거미류가 본답 내로 이동하는데 중요한 수단이 되고 있다.

(그림 6-35)는 수원시 당수동에 설치된 끈끈이 트랩당 거미류 평균 개체수를 나타낸 것이다. 트랩당 최저 4.2마리에서부터 최고 74.1마리까지 밀도를 기록하였고, 한번의 커다란 피크를 가졌는데, 7월 초순부터 급격히 밀도가 상승해 7월 중, 하순에 최고밀도를 기록하며 8월 초순부터 밀도가 감소하여 9월에 일정한 수준으로 유지되고 있다.



(그림 6-35) 1999년 수원시 당수동 논에서 끈끈이 트랩당 거미류 평균 개체수

(그림 6-36)은 높이별 트랩에 잡힌 거미 개체수의 차이가 있는지를 나타낸 것이다. 전적으로 본 조사에서는 높이별로 차가 없게 나타나고 있어 지상에서 3m 내에서는 유사 비하는 거미의 밀도가 균일하다고 볼 수 있다. Bishop(1990)은 1m, 14m, 22m, 33m, 44m 높이에서 조사한 결과 봄에는 22m 높이에서 가을에는 44m 높이에서 많이 비행한다는 결과를 보고했다, 미국 루이지애나에서는 비행기에 포충망을 달고 조사한 결과, 3000m높이에서도 거미를 채집할 수 있었으며 1500m까지는 매우 많은 거미를 채집할 수 있었다고 한다 (임과 김, 1999).



(그림 6-36) 1999년 수원시 당수동 논에서 끈끈이 트랩 높이별 거미류 평균 개체수

<표 6-13>은 유사비행 트랩의 높이별 평균 개체수를 방위별로 조사한 자료이다. 밀도가 높아지는 7월 중순에서 8월 초순사이에 크게 나타나고 있어 방위별로 밀도차가 나타났는데 이는 유사비행이 바람에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

<표 6-13> 1999년 수원시 당수동 논 끈끈이 트랩에서 방위별 평균 개체수

조사일	트랩높이	동	서	남	북
6월 14일	3m	1.4 ^a	1.0	1.6	2.0
	2m	1.8	0.8	1.0	2.0
	1m	1.2	1.6	1.0	1.4
6월 21일	3m	2.6	1.6	1.6	0.4
	2m	3.0	0.2	0.8	2.0
	1m	2.0	1.8	1.0	1.8
6월 28일	3m	3.0	0.8	2.6	2.2
	2m	2.4	1.2	3.4	2.8
	1m	2.4	2.4	3.2	3.6
7월 5일	3m	5.8	7.2	3.8	9.6
	2m	8.2	5.0	5.4	7.2
	1m	14	9.4	9.4	8.2
7월 12일	3m	8.0	13.8	13.2	13.2
	2m	10.6	13.4	14.6	14.2
	1m	12.6	17.0	18.4	11.0
7월 19일	3m	20.4	24.0	21	23.2
	2m	22.4	24.8	23.8	26.2
	1m	19.6	24.6	29.8	36.6
7월 26일	3m	14.4	10.4	19.4	8.0
	2m	12.4	8.0	19.8	9.4
	1m	12.4	11.6	19.0	12.0
8월 2일	3m	6.4	8.8	2.0	11.0
	2m	8.8	9.2	5.4	7.8
	1m	11.2	10.6	3.4	10.8
8월 10일	3m	5.2	4.0	4.2	6.6
	2m	3.6	6.0	5.6	5.2
	1m	4.6	6.8	5.8	9.0
8월 16일	3m	6.8	7.0	6.8	5.2
	2m	5.8	7.6	6.2	5.8
	1m	5.6	9.4	4.0	6.6
8월 23일	3m	4.0	3.8	3.8	4.0
	2m	4.6	3.6	3.4	5.0
	1m	5.2	9.4	4.0	6.6
8월 31일	3m	2.4	1.8	5.6	9.4
	2m	1.4	2.0	1.2	2.2
	1m	2.2	2.2	2.6	2.8
9월 6일	3m	2.0	3.0	1.6	2.4
	2m	0.8	1.6	0.6	1.4
	1m	1.4	1.8	2.0	2.2
9월 14일	3m	2.6	0.8	5.4	5.4
	2m	1.8	1.8	2.0	2.0
	1m	3.4	0.8	2.2	2.2
9월 29일	3m	4.2 ^b	8.2	11.4	9.8
	2m	2.4	3.6	4.8	7.0
	1m	3.0	2.8	4.6	5.8

^a 7일 동안의 트랩당 평균 개체수, ^b 14일 동안의 트랩당 평균 개체수

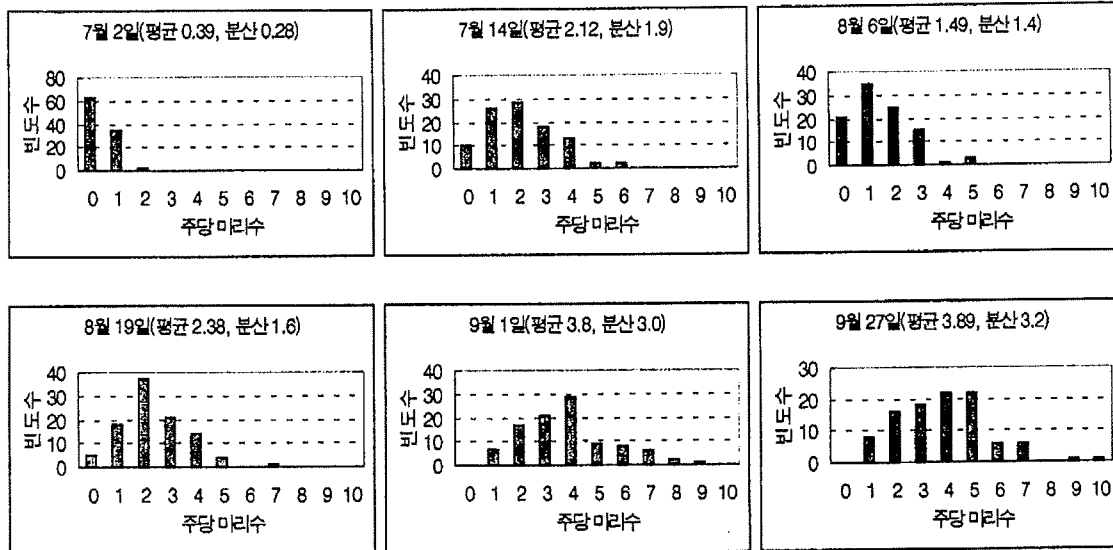
3. 본답내 논거미 정착 및 공간 분포

<표 6-14>는 1999년에 서울대 부속 수도포장에서 벼 100주 (10 × 10주)를 벼 재배기간 동안 포장에서 육안 조사하여 얻은 결과이다. 벼 분얼이 진행중인 생육초기에 있어 (7월 2일) 거미의 정착율은 37%로 아직까지 본답내 정착이 더디게 진행되었고, 역시 주당 밀도도 상당히 낮았다. 분얼 말기경인 7월 14일에는 정착율이 91%, 주당 마리수 2.12마리로 이 기간동안 거미 개체군의 밀도증가가 이루어졌다. 벼의 생육 단계상 수잉기에 속하는 8월 6일에는 거미밀도가 약간 낮게 나타났는데, 이에 대한 원인은 태풍의 영향으로 정착율 및 주당밀도가 낮아진 것으로 추정된다. 출수기 이후 (8월 19일) 부터는 거미류의 밀도가 계속증가하고, 정착율도 높아져 등숙기 (9월1일)에 100%의 정착율을 보였다.

<표 6-14> 벼 100주당 거미의 정착율(%), 밀도 및 주당 밀도

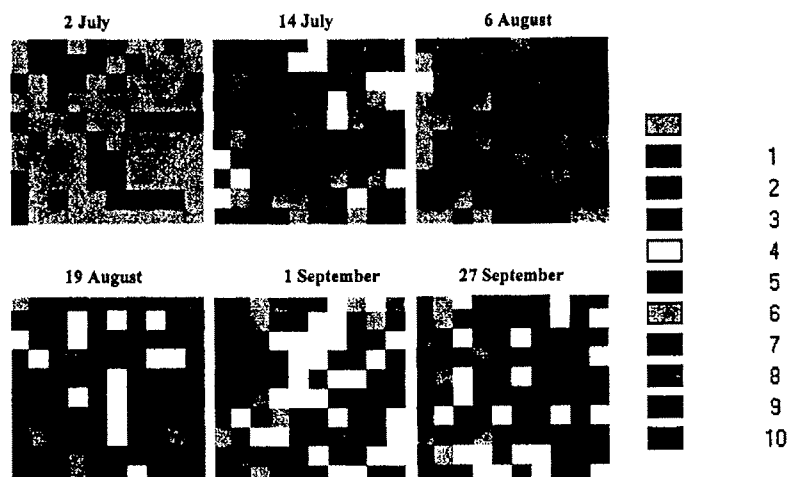
구분	7월2일	7월14일	8월6일	8월19일	9월1일	9월27일
정착율(%)	37	91	79	97	100	100
100주 밀도	39	212	149	238	380	389
주당 밀도	0.39	2.12	1.49	2.38	3.8	3.89

(그림 6-37)은 조사시기별 거미의 주당 개체수 빈도를 분석한 것이다. 주당 개체수는 0마리에서 10마리까지 기록되었는데, 조사 초기에서 후기로 갈수록 주당 마리수가 높아지는 빈도 패턴을 보여주었다. 각 조사시기별로 평균과 분산을 비교한 결과, 초기에 해당하는 8월 초까지는 임의 분포경향이 뚜렷했고, 8월 중순 이후에는 평균값이 분산보다 커서 거미류의 분포가 집중되는 경향을 보였다. 이러한 결과는 벼 생육후기에 거미들간의 niche의 중복이 심해진다는 것을 나타내준다.



(그림 6-37) 1999년 서울대 실험 포장에서 거미류 주당 개체수 빈도

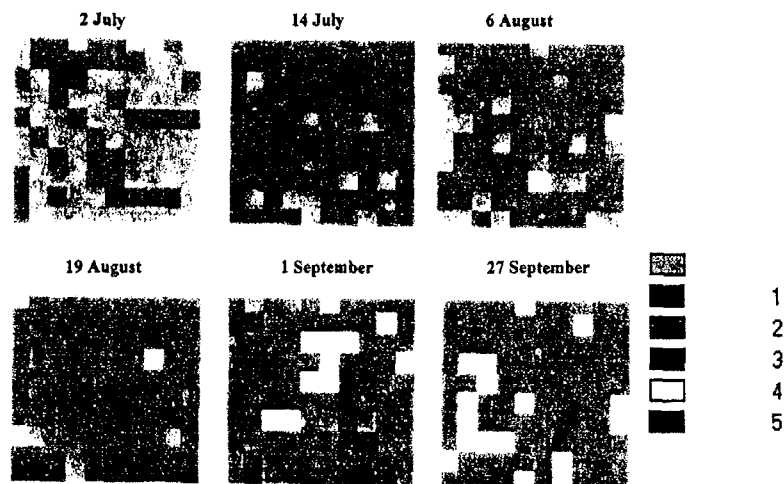
(그림 6-38)은 서울대 실험포장 벼 100주 (10 × 10주) 조사에서 논거미가 본답에 정착되는 과정에서 밀도 형성을 나타낸 것이다. 7월 중순부터 최고 주당 5마리까지 거미의 밀도가 급격히 증가했고, 이후 밀도가 계속 높아져 9월 말에는 주당 10마리 까지도 밀도를 기록했다.



(그림 6-38) 논거미의 주당 밀도(100주 조사)

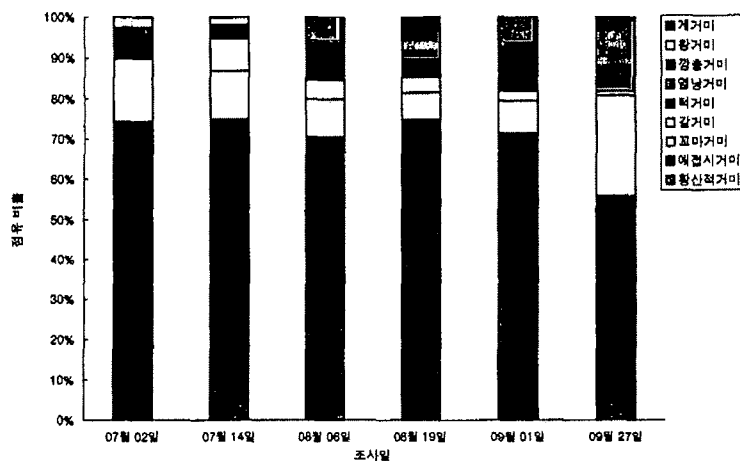
(그림 6-39)는 논거미가 정착하면서 주당 종수 변화를 나타낸 것이다. 7월 초에는 벼 한주에 한 종만이 점유하였으나, 7월 중순부터 다른 종들이 같은 주내에 분포하기 시작하였다. 9월 초에는 3종 이상이 함께 공존하는 주가 많았고 최고 5종이 공존

하는 경우도 9월 말에 여러 주에서 나타났다.



(그림 6-39) 논거미의 주당 종수(100주 조사)

(그림 6-40)은 황산적거미를 비롯한 주요 논거미들의 점유율 추이를 나타낸 것이다. 7월 초에는 애접시거미의 비율이 가장 높고, 황산적거미, 꼬마거미 순서로 나타났다. 7월 중순과 8월 초에도 비슷한 패턴이나, 애접시거미의 비율이 줄어들고, 황산적거미의 비율이 증가했다. 8월 중순부터 황산적거미의 비율이 가장 높았고, 애접시거미, 턱거미 순으로 높았다. 그리고, 9월 말에는 꼬마거미, 염낭거미의 비율이 초기에 비해 높게 나타나고 있다.



(그림 6-40) 1999년 서울대 실험포장에서 우점 거미류의 점유율 추이

4. 절지동물 군집내 먹이 그물 규명

생태계내 먹이연쇄에서 영양단계가 한단계씩 증가할수록 ^{15}N 의 값은 3-4퍼밀 정도 증가하는 것으로 보고되었다 (Minagawa & Wada, 1984).

<표 6-15>는 1998년 발안하류에서 채집된 절지동물들을 이용하여 안정성 동위원소 분석을 실시한 결과이다. 먹이 연쇄에서 포식자 그룹에 속하는 깨알소금쟁이, 거미류의 $\delta^{15}\text{N}$ 의 값이 이들의 먹이가 되는 벼멸구, 흰등멸구보다 약 3-4정도 높게 나타나고 있다. 이런 결과는 Minagawa 와 Wada (1984)의 보고와도 일치하여 논에서 절지동물 군집에 있어 여러 영양단계가 존재하는것을 입증해주고 있다.

<표 6-15> 1998년 발안하류에서 채집된 절지동물들의 안정성 동위원소의 값

분석시료	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$
토양	-24.28	1.39
뿌리 ^a	-25.16	6.55
줄기와 잎 ^a	-26.49	4.83
달팽이	-17.56	5.71
벼멸구	-26.98	6.14
흰등멸구	-25.75	5.68
깨알소금쟁이	-26.37	8.03
거미	-24.86	10.48

^a 실내에서 재배한 어린묘

<표 6-16>은 1999년도 서울대 실험포장에서 채집된 절지동물들을 분석한 것으로 해충과 포식자간에는 질소비($\delta^{15}\text{N}$)에서 3-4퍼밀의 값의 증가가 있었다. 그렇지만 식물체와 해충간에는 그 차이가 적게 나타났다. 그리고 포식자인 황산적거미의 값은 약 9정도로 나타났다.

<표 6-16> 1999년 7월에 서울대 수도포장에서 채집된 샘플들의 안정성 동위원소 값

분석시료	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$
벼 줄기	-28.47	4.75
벼 잎		4.50
벼멸구	-29.70	3.60
나방류		4.42
메뚜기류	-31.59	6.12
식식성 딱정벌레	-26.64	6.20
잠자리류	-27.52	7.59
여치	-28.68	8.05
황산적거미	-27.98	9.45
갈거미	-28.04	5.73
사마귀	-26.60	10.59

<표 6-17>은 당수동 수도포장에서 채집한 절지동물들을 분석한 값들이다. 몇 개의 샘플을 제외하고는, 식식성 곤충류는 8이하의 값을 나타냈고, 포식성 절지동물들은 10이상의 값을 나타냈다. 조사시기에 따라 동위원소값에는 크게는 2정도의 차이를 보였는데, 이는 파리류나 꼬마거미 같은 단일종 샘플이 아닌 경우에서 나타났다. 그렇지만, 당수동 포장에서 포식자들의 최대값은 12값을 대부분 넘지 않았다.

<표 6-17> 당수동 수도포장에서 채집된 샘플들의 안정성 동위원소 값

분석시료	6월	7월
	$\delta^{15}\text{N}$	$\delta^{15}\text{N}$
토양		3.6
벼	7.21	2.62
파리류	9.66	12.35
갈다구류	9.64	8.77
벼물바구미	6.93	7.16
벌류		6.67
벼잎벌레	7.53	2.55
진딧물	5.16	
식식성노린재	5.79	
매뚜기		5.15
흰등멸구		5.39
멸구류 약충		8.68
애멸구		5.01
매미충		2.28
복토기		7.08
애접시거미	8.68	9.52
꼬마거미	9.58	14.19
게거미	2.95	9.69
기생봉	6.74	8.33
갈거미	10.18	12.01
턱거미	10.32	11.77
황산적거미	9.66	
깡충거미		10.29
무당벌레	2.57	
사마귀		12.02
반날개	9.69	
염낭거미	9.01	
소금쟁이	7.92	11.08
실잠자리	9.61	11.9
여치		9.08
잠자리		9.22
왕거미		10.89
깨알소금쟁이		11.11

<표 6-18>은 ^{15}N 의 농도가 10%인 황산암모늄으로 표지된 벼멸구를 실내에서 황산적거미에 5마리에서 20마리까지 섭식시켰을 때 질소 동위원소비이다. 벼 육묘 및 황산적거미에 있어 처리와 무처리간에는 차이가 매우 높게 나타나고 있어 처리 효과가 분명했다. 표지된 벼멸구를 섭식한 황산적거미들에 있어서 5~15마리까지는 그 차이가 없게 나타났으나, 20마리를 섭식한 황산적거미는 값이 다소 높게 나타났다.

<표 6-18> 황산암모늄(^{15}N , 10%)로 처리된 벼멸구 섭식량에 따른 황산적거미의 동위원소비

분석시료	Nitrogen content(%)	$\delta^{15}\text{N}$
벼육묘 (무처리)	2.185	44.7
벼육묘 (처리)	2.281	2709.74
벼멸구 처리	11.45	3916.82
황산적거미 (무처리)	11.07	12.64
황산적거미 (벼멸구 5마리 섭식)	10.73	420.90
황산적거미(벼멸구 10마리 섭식)	11.05	456.73
황산적거미(벼멸구 15마리 섭식)	10.54	557.80
황산적거미(벼멸구 20마리 섭식)	10.71	803.59

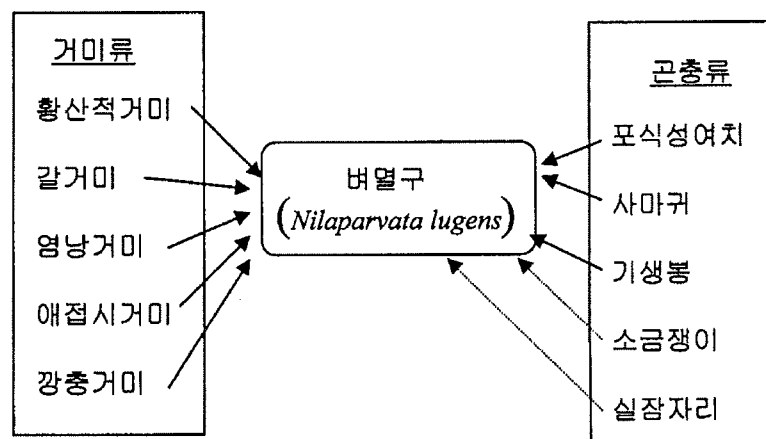
* 3반복으로 수행되었음.

<표 6-19>는 2000년 7월 13일과 26일 2차례에 걸쳐 안정성동위원소(^{15}N)로 표지된 벼멸구를 수도 포장에 30마리씩 접종시켰을 때 이들을 포식하는 천적류들의 동위원소비 값이다. 황산적거미를 비롯한 천적류들에서 ^{15}N 값이 높게 나타남을 알 수 있는데, 이는 이들이 벼멸구를 포식했다는 증거를 단적으로 제공하고 있다.

또한, (그림 6-41)은 벼멸구를 포식하는 천적류들의 먹이그물을 나타내고 있다. 논에서 우점인 거미류는 전체 벼멸구 포식에 관여됨을 알 수 있고, 곤충류에서도 사마귀를 비롯한 포식성 천적들이 관여되고 있다.

<표 6-19> 수도 포장에 동위원소로 처리된 벼멸구¹를 접종시 절지동물들의 동위원소 값

분석시료	2000년 7월 13일	2000년 7월 26일
	1차 처리($\delta^{15}\text{N}$)	2차 처리($\delta^{15}\text{N}$)
접종 벼멸구 1	652.43	424.03
접종 벼멸구 2	1189.87	1597.05
황산적거미 1	12.94	
황산적거미 2	30.27	26.86
황산적거미 유체		18.38
여치류	16.51	
갈거미	17.41	
깡충거미	22.15	7.71
사마귀	19.92	
소금쟁이	8.12	
턱거미	20.65	
염낭거미	9.65	45.81
애접시거미	9.74	222.8
식식성 딱정벌레	10.11	
실잠자리	9.7	
기생봉		20.5
<i>Pardosa</i> spp.		9.33
반날개		7.94



(그림 6-41) 벼멸구를 포식하는 천적류들의 먹이 그물

5. 황산적거미, 턱거미의 발생 모델

<표 6-20>과 <표 6-21>은 황산적거미와 턱거미가 유체에서 성체로 발육을 완료하는데 필요한 각 발육단계별 degree-day (DD) 값이다. DD값은 곤충같은 변온동물의 발생시기를 예측하는데 많이 사용된다 (Pruess 1983, Higley 등, 1986). 황산적거미는 자연계에서 5-8회에 걸쳐 탈피가 일어나지만 (Hamamura 1977, 김 1992), 본 연구의 발육실험에서는 전 개체들이 6-7회의 탈피를 하여 성체가 되었다. 교미에서 성체가 되는데 요구되는 평균 DD값은 1454.73으로 조사되었고, 알기간의 DD값이 특히 높게 나타났다. 유체 (2령-5령) 단계 중에서는 2령에서 값이 높았고, 아성체 (6령-7령)단계가 유체보다 더 높게 나타났다.

<표 6-20>은 황산적거미의 발육단계별 DD값을 나타내고 있다.

<표 6-20> 황산적거미(*Pirata subpiraticus*)의 발육에 필요한 degree-day

발육단계	개체수	평균	편차
교미-산란	16	137.69	73.81
알-부화	15	372.26	52.83
2령	46	165.41	27.05
3령	45	122.53	27.74
4령	45	128.30	26.47
5령	40	136.53	18.67
6령	39	191.11	53.85
7령	12	200.89	33.87
합계		1454.73	

턱거미는 본 실험에서 4-6회의 탈피를 하여 성체가 되었다. 암수간에 교미가 일어난 후 성체로 발육하는데 요구되는 평균 DD값은 1115.91였다. 교미에서 2령까지의 DD값이 높게 나타났고, 유체 (2령-4령) 단계에서는 낮았으며, 아성체 (5령-6령)단계에서 조금 높게 나타났다.

<표 6-21> 턱거미(*Pachygnatha clerki*)의 발육에 필요한 degree-day

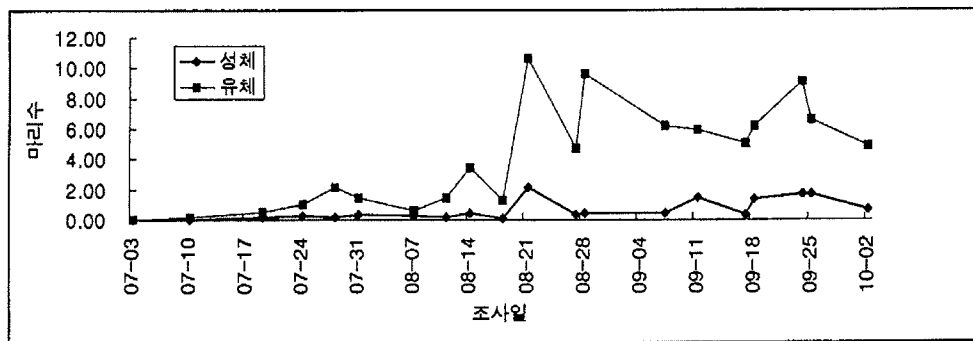
발육단계	개체수	평균	편차
교미-산란	11	207.82	53.18
알-부화	6	220.47	40.41
2령	48	201.82	33.05
3령	44	92.40	28.34
4령	46	97.82	26.31
5령	44	134.00	29.51
6령	25	161.59	31.08
합계		1115.91	

(그림 6-42)는 황산적거미 온도 발육자료를 1998년까지 평년기온에 적용시켜 만든 황산적거미 발생 모델이다. 이 발생 모델은 아성체단계 (6령)로 월동한 황산적거미가 평균기온 10℃이상에서 발육을 재개한다는 가정하에 작성된 것이다. 아성체 월동에 대한 근거는 김 (1998)의 조사에서 황산적거미는 유체, 아성체, 성체의 발육단계로 월동하고 있다고 보고를 바탕으로 하였다. 황산적거미는 분얼기에 알주머니를 배끝부위에 매달고 다니며, 분얼이 끝나는 시기인 7월중순쯤에 유체들이 나타나기 시작한다. 그리고 이들이 발육하여 9월하순쯤에 성체로 된다.

월, 일	4		5		6		7		8		9
	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10
벼 생육	← 파종, 육묘기 →		← 이앙기 →		← 분얼기 →		← 이삭형성, 출수기 →		← 동숙기 →		
황산적 거미	아성체				교미, 알				유체		아성체
					성체						

(그림 6-42) 평년기온을 기준으로 만든 황산적거미(*P. subpiraticus*) 발생 모델

(그림 6-43)은 1996년에서 1998년까지 발안지역 논에서 황산적거미 발생동태이다. 초기인 7월초에는 성체와 유체의 개체수가 낮지만, 7월중순경부터 유체의 개체수가 증가하고 있다. 8월 중순경부터 높게 유지되고 있는데 황산적거미의 산란이 단 1회에 그치는 것이 아니라 몇 번에 걸쳐 일어난다는 것을 감안하면 본 발생 모델과 일치하고 있음을 알 수 있다.



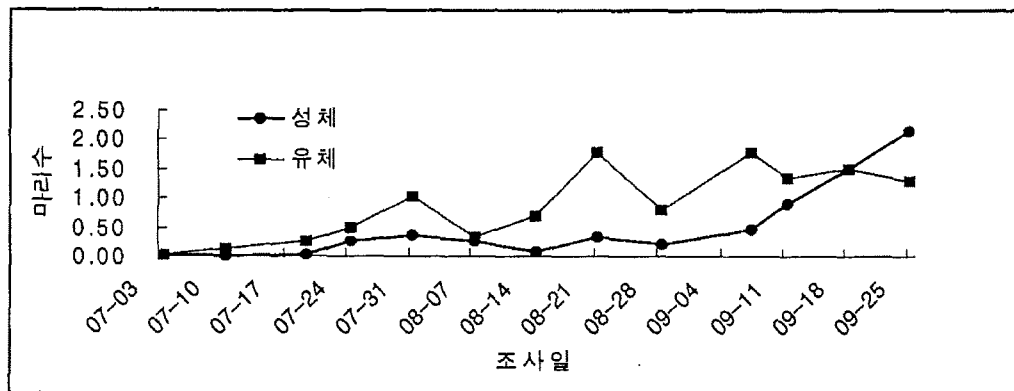
(그림 6-43) 1996년부터 1998년까지 발안지역 논에서 황산적거미 발생동태

(그림 6-44)는 텍거미 온도 발육자료를 평년기온에 적용해 만든 텍거미 발육단계별 발생 모델이다. 이 발생 모델은 성체으로 월동한 텍거미가 평균기온 10℃ 이상에서 교미가 일어난다는 가정하에 작성된 것이다. 텍거미는 벼 이앙후부터 산란하여 분얼기에 유체시기를 거치며, 아성체단계를 거쳐 출수기 이전부터 성체가 된다.

월, 일	4		5		6		7		8		9	
	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20
벼 생육	← 파종, 육묘기 →		← 이앙기 →		← 분얼기 →		← 이삭형성, 출수기 →		← 등숙기 →			
텍거미 발육	교미, 산란				알기간		유체		아성체		성체	

(그림 6-44) 평년기온을 기준으로 만든 텍거미 (*P. clerki*) 발생 모델

(그림 6-45)는 1996년에서 1998년까지 발안지역 논에서 톱거미 발생동태이다. 톱거미는 월동태 조사에서 성체로 월동하는 것으로 보고되었다 (김, 1998). (그림 6-45)에서 7월초부터 유체의 밀도가 증가하기 시작하는데 이는 (그림 6-44)의 발생 모델과 일치하는데, 성체의 출현이 발생 모델에서 10일 정도 빨랐다.



(그림 6-45) 1996년부터 1998년까지 발안지역 논에서 톱거미 발생동태

제 4 절 요약 및 결론

본 연구에서는 곤충생태 모니터링 기술개발을 위해서, 대상지구를 선정하여 절지동물의 기능군별 발생자료를 수집·분석하였으며, 이들 자료를 바탕으로 먹이 그물 및 발생시기 예측 모델을 구성하였고, 그 적용가능성을 평가하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① 전체 절지동물 발생밀도는 세 조사지에서 단위면적당($0.25m^2$) 평균 30에서 80 마리의 범위를 보였고, 조사지간에 유의한 차이는 없었지만, 조사년도 간에는 차이가 있었다. 이러한 결과의 원인은 해충들의 발생량이 해마다 일정하지 않다는데 있다.
- ② 벼생육시기별 절지동물 발생패턴은 초기에는 깔다구 같은 비해충류의 발생밀도가 높게 나타났고, 중기 이후에 해충의 대발생여부에 따라 커다란 피크가 있거나 없는 형태로 나타났다.
- ③ 논에 서식하는 절지동물 우점군으로는 해충류인 멸구류가 30%이상을 차지했

고, 비해충류인 깔다구류가 27%, 천적류인 거미류가 19%를 차지했다.

- ④ 생육시기에 따른 기능군별 점유율은 초기에는 비해충류가 90%로 압도적인 우위를 보였고, 중, 후기로 가면서 해충류, 천적류의 점유율이 높아졌다. 기능군마다 전체밀도에 대한 각 조사시기별 밀도비율을 누적했을 때, 비해충류는 초기에 높은 비율을, 해충류는 일정한 비율로 계속증가를, 천적류는 일정 시점 이후에 급격한 증가를 보여주었다.
- ⑤ 주요해충으로는 멸구류가 다수를 차지했고, 주요 천적류로는 거미류였다. 거미류는 초기에는 밀도가 낮았으나 7월 중순경부터 밀도 증가가 이루어졌으며 9월하순까지 높은 밀도가 안정되게 유지되다가 감소하는 패턴을 보였다.
- ⑥ 거미류 종구성 및 비율은 황산적거미가 최우점종이었고, 턱거미, 등줄가슴애접시거미순으로 나타났다. 과별 점유율은 늑대거미과>갈거미과>접시거미과>염낭거미과>꼬마거미과 순이었다. 과별로 출현하는 종수는 갈거미과와 접시거미과에서 다수의 종들이 출현하였고, 나머지 과들은 2-3종이 대부분이었다.
- ⑦ 발안지역의 단위 면적당 ($0.25m^2$) 황산적거미의 밀도는 평균 4.15-6.83마리 범위로 세 지역에서 비슷한 밀도를 보였으며, 조사 년도에 따라 차이가 없었다.
- ⑧ 페로몬 트랩을 이용한 이화명나방, 흑명나방 모니터링을 위해 조성된 페로몬 성분중, 이화명나방 조성 (Z11-16:ALD, Z9-16:ALD, Z13-18:ALD을 50:5:6 비율로 섞음)만이 적합하게 나타났다.
- ⑨ 핏폴 트랩을 이용한 거미류 모니터링 결과, 본답으로 거미의 이동은 먹이가 풍부해지는 7월에 본격적으로 이루어지는 것으로 나타났다. 유사비행을 통한 거미의 본답내로 이입은 7월 중순에 한 개의 뚜렷한 피크를 보였다.
- ⑩ 벼에 정착한 논거미의 주당 개체수는 0마리에서 10마리까지 조사되었는데, 조사 초기에서 후기로 갈수록 주당 개체수 및 종수가 높아지는 패턴을 보여주었다. 분포패턴은 초기에는 임의 분포, 후기에는 집중 분포 경향을 보였다.
- ⑪ 거미류의 점유 비율은 초기에는 애접시거미의 비율이 가장 높았지만, 8월 중순 이후에는 황산적거미의 점유비율이 가장 높게 나타났고, 주요 논거미들은 중

또는 그룹마다 독특한 밀도 변동을 보였다.

- ⑫ 안정성 동위원소 분석결과, 해충과 포식자간에는 질소비 ($\delta^{15}\text{N}$) 값이 3-4퍼밀 정도의 증가가 있었고, 대표적인 포식자인 황산적거미는 9 정도의 값으로 나타났다.
- ⑬ 안정성 동위원소 (^{15}N)로 표지된 벼멸구를 논에 베풀기 전에 집중시켰을 때 이들을 포식하는 천적류들에서는 ^{15}N 값이 높게 나타났는데, 특히 거미류들은 모두 높게 나타났다.
- ⑭ 실내 발육을 바탕으로 만들어진 황산적거미와 턱거미 발생모델은 야외에서 이들의 발생패턴과 유사한 결과를 나타냈다.

참고문헌

1. 김승태, 1998, 논거미 군집의 생태학적 특성과 벼멸구 (*Nilaparvata lugens*) 방제를 위한 황산적거미 (*Pirata subpiraticus*)의 이용에 관한 연구, 건국대학교 대학원 박사학위논문, p. 90.
2. 김진영, 1999, 벼를 가해하는 갈따구(파리목: 갈따구과)의 서산 A, B 지구에서의 계절적 발생과 피해양상, 서울대학교 대학원 석사학위논문, p. 52.
3. 김홍선, 1992, 황산적거미에 의한 벼멸구 밀도억제 효과, 동국대학교 대학원 박사학위논문, p. 69.
4. 농진청, 1992, 벼물바구미 생태와 방제, 삼미인쇄사, p. 172.
5. 농진청, 1998, 벼멸구·흰등멸구의 발생과 방제 자료집, 농촌진흥청 농과원, 상록사, p. 192.
6. 농진청, 1999, 농작물 병해충 예찰, p. 295.
7. 박홍현, 배윤환, 이준호, 1997, 경기도 반월지역에서의 농업용수 수질에 따른 수도포장내 절지동물군집, 한국생태학회지, 20 : 375-384.
8. 박홍현, 이준호, 1997, 경기도 발안지역 수도포장에서의 살충제 처리에 따른 절지동물군집 모니터링. 서울대농학연구지, 22 : 9-18.
9. 백종철, 이영복, 이형래, 최귀문, 1979, 수도 해충의 생리 생태 및 방제에 관한 연

- 구, 농진청 농업기술연구소 시험연구보고서(병해충, 유전), pp. 341-367.
10. 송 유한, 송 혜영, 김학기, 장영덕, P.C. Lippold, 1978, 이화명충과 과수잎말이나 방류 해충의 합성 페로몬에 관한 연구, 한국식물보호학회지, 17 : 41-47.
 11. 송유한, 이영걸, 1994, 진주와 남해지역의 논거미상에 관한 연구, 한국환경농학회지, 13 (1) : 98-110.
 12. 엄기백, 최귀문, 현재선, 1991, 수도해충의 종합적방제, 응용곤충학논총, 서울대학교 농생물학과 동창회, pp. 16-65..
 13. 임문순, 김승태, 1999, 거미의 세계 : 거미 · 거미줄 그리고 인간, 다락원, pp. 239.
 14. Bishop, E. 1990, Meteorological aspects of spider ballooning, Environ. Entomol, 19 : 1381-1387.
 15. Hamamura, T. 1971, Ecological studies of *Pirata subpiraticus* (Boesenbert et Strand) (Araneae: Lycosidae) I. Acta arachnol., 23 : 29-36.
 16. Hamamura, T. 1977, Ecological studies of *Pirata subpiraticus* (Boesenbert et Strand) (Araneae: Lycosidae) II. Acta arachnol., 27 : 229-238.
 17. Heinrichs, E. A. 1994, Biology and management of rice insects, Wiley Eastern Limited, New Delhi, p. 779.
 18. Heong, K. L., Aquino, G. B., and A. T. Barrion, 1991, Arthropod community structures of rice ecosystems in the Philippines, Bulletin of Entomological Research, 81 : 407-416.
 19. Higley, L. G. L. P. Pedigo, and K. R. Ostlie, 1986, Degday : A program for calculating degree-days, and assumptions behind the degree-day approach, Environ. Entomol., 15 : 999-1016.
 20. Lajtha, K. and R., Michener, 1994, Stable isotopes in ecology and environmental science, Blackwell scientific publications, p. 316.
 21. Minagawa, M. and E. Wada, 1984, Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains : Furthur evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age, Geochimica et Cosmochimica Acta vol. 48 : 1135-1140.

22. Pruess K. P., 1983, Day-degree methods of pest management, Environ. Entomol. 12 : 613-619.
23. Settle, W. H., H. Ariawan, E. T. Astuti, W. Cahyana, A. L. Hakim, D. Hindayana, A. S. Lestrari, and Pajarningsih, 1996, Managing tropical rice pests through conservation of generalist natural enemies and alternative prey, Ecology 77 : 1975-1988.
24. Tatsuki, S., 1990, Status of application of sex pheromone of rice stem borer moth, *Chilo suppressalis* in Japan, Insect Sci., Appl., 11 : 807-812.

여 백

주변생태 모니터링 기술 개발

2000년 12월

“농업생태환경 모니터링 및 종합적 환경관리시스템 개발 사업”

서울대학교 농업생명과학대학 부속 농업개발연구소

최종보고서 제 Ⅱ 편 제 7 장

여 백

제 7 장 주변 생태환경 모니터링 기술 개발

제 1 절 서 론

자연생태계는 산림계 (forest system), 농경지와 초지계 (cropland and grass land system), 도시계 (urban system), 대기계 (air system), 그리고 수생계 (water system) 등의 5대 생물학적 시스템으로 구성된다.

농업생태계는 농업활동을 통해서 주변 경관요소(landscape element)와 에너지 및 물질을 교환하며 특징을 유지한다 (Bunce et al. 1993). 산업화와 더불어 최근의 농경방식은 과도한 화학물질의 투여, 무절제한 화학살충제의 사용, 토양에 과부하를 주는 연작 등으로 생산량도 증가하지 않을 뿐만 아니라 주변 생태 환경에도 많은 부작용을 일으키고 있다. 따라서 지속적인 농업생산량을 유지하고 주변 생태환경요소에 미치는 영향을 최소화하기 위해서는 농경지와 산림계 및 수생계 등의 주변생태환경에 대한 지속적인 모니터링이 필요하다.

산림계 생태계에서 산림을 타목적으로 바꾸는 일은 환경적 파괴이며 오염을 일으키는 토지 이용활동을 의미하며, 실제로 지구 전체의 생태환경에 위협을 주고 있다. 산림의 훼손은 토양을 보호하는 식생층을 제거하게 되어 급격한 토양 유실을 초래한다. 결과적으로 하류의 수체의 수질은 유사량과 유기물질이 증가하게 되어 극단적으로 나빠지게 된다.

농경지나 초지 등의 확보를 위한 우림지의 열대 원시림의 방화 등 훼손으로 인해 대기중의 탄산가스의 수준이 매우 높아지고 있으며, 이로 인해 소위 온실 효과를 초래하기에 이르렀다. 그 결과는 대기 오염 뿐만 아니라 수질 오염과 나아가 지구 자원의 오염을 초래하고 있다.

한편, 수생 생태계는 하천, 강, 호수, 습지, 하구 등의 수체와 지하수와 토양 수분 등에 존재하는 생태환경을 말하며, 그들의 수리동력학적, 생물학적, 화학적 과정과의 관계를 말한다. 수생 생태계의 주요 에너지는 태양 에너지이나, 그밖에도 폐기물 중의 유기물질, 폐기열 등으로 부터 입력된다. 또한, 생태계 구성인자는 생물 성분

의 생장을 촉진시키는 물질이나, 생장을 늦추거나, 폐해를 초래하는 물질, 심지어는 생물체를 죽이는 성분 등에 의하여 평형상태를 유지한다.

수생 생태계는 수중계와 수변계, 저생계 등으로 구분할 수 있다. 수중계는 태양 광선의 침투 여부에 따라 투광대와 심연대로 구분된다. 수변계에서는 주로 초생이나 이에 서식하는 생물이 존재하며, 수중계는 각종 플랑크톤과 미생물, 어류 등으로 구성하며, 저생계는 수중이나 수변의 땅속에 서식하는 생물류가 있다.

하천 수생계의 물질 순환은 하천의 수량과 수질, 그리고 서식 동식물과 밀접한 관련을 가지며, 소위 먹이 사슬로 부터 물질 순환이 이루어진다.

지표 수체의 완전한 보전은 수체의 화학적, 물리적, 생물학적 보전을 되찾고, 유지하기 위한 수질 오염의 조절이 목표이다. 수생 생태계의 보전이란 어떤 지역의 자연적 생물상에 비견하여 균형적이고, 총체적인 생물공동체가 다양성을 갖고, 기능적 구조를 갖도록 하는 일이다. 수생 생태계의 보전에 영향을 주는 인자들 상호관계는 흐름 특성, 화학적 성분, 생물상 인자, 에너지원, 서식지 구조 등에 영향을 받는다.

수체의 수질 기준으로 화학적 기준이나 독성물질기준 등이 주로 이용되어 왔으나, 근래에는 생물학적 기준 (biological criteria)의 적용이 시도되고 있다. 수체의 수질의 진단은 생물상 조사와 지역 생태학적 접근 방법을 통해 생물학적 기준으로서 평가가 가능하다.

본 장에서는 주변생태환경 모니터링 기술 개발을 위하여, 산림 및 하천주변의 식물생태 및 수생식물분포와 수질환경에 미치는 영향 분석을 위한 기초자료를 수집하고, 그 환경요인을 분석하여 결정하며, 각 환경요소별 표본수, 주기, 분석 방법 등에 따른 모니터링 결과에 미치는 영향의 분석을 통하여, 농업생태 환경인자 모니터링의 정밀도를 분석하여 생태환경 변화를 고찰함으로써 모니터링 기법을 정립하며, 하천 오염과 식물 생태계의 관계를 구명하고자 한다.

제 2 절 산림생태환경 모니터링

1. 개론

우리 나라 국토 면적의 70%가 산림 지역으로 한반도의 생태계에 발생하는 주요 영향 요인은 주변 산림에 달려 있는 것이다. 산림 지역이 광활하게 분포하기 때문에 농경지는 산림 지역과 인접하거나 산림 지역이 주변을 포위하고 있는 U자 또는 V자 형태로 일부 에워싸고 있거나 완전히 둘러쌓는 O자 형태를 하고 있는 것이다.

농경지에 발생하는 병충의 서식지가 산림일 수가 있고 가해지만 경작지일 수가 있다. 또는 가해 소동물중 산림이 주요 서식지이고 농경지가 그 일부일 경우가 있다. 그러므로 농경지의 병충에 관련된 연구는 주변 산림 환경의 영향을 동시에 연구되어야 한다는 것이다. 그러나 지금까지 연구는 산림과 농경지가 개별적으로 연구되는 경우가 많았고 산림 병충해 방제나 농경지 병충해의 방제 역시 개별적이어서 방제 효과면에 있어서 최상이 아니었다고 사료된다.

농경지는 물의 계속적인 관수가 필요로 하는 벼, 연재 배지 그리고 일시 또는 필요시 관수가 필요로 하는 배추, 무, 토마토 등 엽근과채류 재배지, 인위적인 관수보다는 자연 강우로 경작되는 옥수수, 깨, 도라지, 천궁, 황기 등 여러 가지 형태가 있다.

이러한 경작 형태가 평야의 광활한 농경지에서 이루어 졌을 때는 산림의 병해충의 영향이 최소화 될 수 있으나, 4 km 전후 거리에 위치하는 농경지는 산림의 병해충의 영향을 받을 것이며, 조류 등 야생동물의 영향을 충분히 받을 수 있는 거리이다 (오, 박, 1994, 1995).

따라서, 본 절에서는 농경지에 발생하는 병해충의 영향을 미치는 산림생태중 식물의 정량적 분석을 시기별, 위치별로 실시하여 농경지 병해충방제가 국부적이 아닌 산림을 포함한 주변 환경을 통합적으로 연구함으로서, 산림계와 하천오염과의 관계를 구명하도록 한다.

2. 대상지역 선정

본 조사 지역의 식생분포역은 우리 나라의 온도 기후를 연관시켜 식생분포를 결정짓는 공식에 따라 ($WI = 89.0 \sim 98.7^{\circ}\text{C month}$), 그 범위가 냉온대 북부에 해당되므로 낙엽활엽수림대가 주요한 산림식생을 형성하는 곳임을 알 수가 있다 (임 1975, 1977). 그러나 조사 지역을 구성하는 임야 면적은 산의 중복이하는 조립된 침엽수림이 대부분을 점유하고 있다. 이것은 과거 인간의 간섭에 의해서 형성된 2차림이 많기 때문이다.

따라서, 본 연구에서의 조사 대상 지역의 선정은 저수지 환경의 영향권에서 벗어난 지역, 저수지 환경의 영향권내의 지역, 주거지역에서 다소 분리되어 주거 환경의 영향을 벗어난 지역 등을 기준으로 3개 지역으로 나누었다.

이상과 같은 기준으로 산림 생태 환경 모니터링을 위한 대상 지역의 선정은 담수 저수지로부터 2 km 이상 격리된 지역에서 농경지 부근에 위치한 2차림으로 15년 이상된 상수리나무림 지역, 리기다소나무림으로서 조립된지 20년생 이상 되어 식생이 안정된 지역, 담수 저수지로부터 0.5 km 이내에 위치한 농경지 부근 2차림으로 15년 이상된 상수리나무림 지역, 20년 이상된 리기다소나무 조립 지역 등 농경지 생태계의 인접 지역을 산림 생태 환경 조사 지점으로 선정하였다.

3. 산림 식생도 구축

식생도 구축을 위한 주요 산림 식생 조사는 1996년 5월 5일, 15일로 2일간 실시하였고, 농경지 생태계 인접 산림 생태 환경 조사 지점에서의 식생 조사는 1996년 4월 15일, 5월 20일, 7월 15일, 10월 10일 등 4회에 걸쳐서 실시하였다.

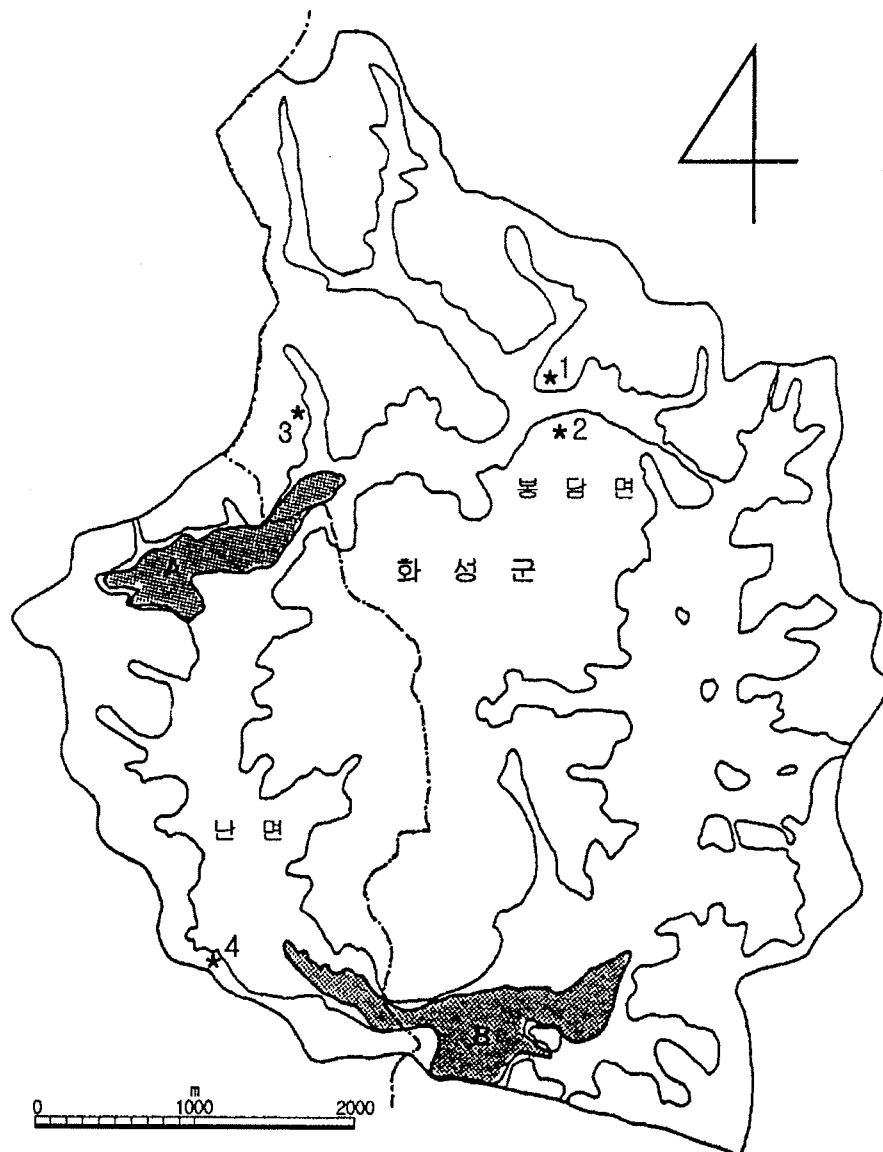
가. 조사방법

산림 식생 조사를 위하여, 교목층 (T1), 아교목층 (T2), 관목층 (S) 등에 30m마다 10x10m의 방형구를 설치하였으며, 초본층 (H)에는 10m마다 1x1m 또는 2x2m의 방형구를 각각 1개씩 설치하였다.

나. 조사지점

주요 산림식생도 구축을 위하여 농경지 생태계 인접 산림을 대상으로 생태환경

을 조사하였으며, 그 주요 지점은 (그림 7-1)에서 보는 바와 같다. (그림 7-1)에서와 같이, 제1지점은 저수지 2 km외측 상수리나무림, 제2지점은 저수지 2 km외측 리기다소나무림, 제3지점은 저수지 0.5 km이내의 상수리나무림, 그리고 제4지점은 저수지 0.5 km이내의 리기다소나무림 등으로 조사지점을 선정하였다.



A : 기천저수지 B : 발안저수지

1 : 저수지 2 Km외측 상수리나무림, 2 : 저수지 2 Km외측 리기다소나무림

3 : 저수지 0.5Km이내의 상수리나무림, 4 : 저수지 0.5Km이내의 리기다소나무림

(그림 7-1) 농경지 생태계 인접 산림 생태 환경 조사 지점

다. 식생 조사지점 선정 기준

식생 조사지의 선정은 군락의 상관이 비교적 균일하고 입지도 일정하다고 생각되는 곳을 대상으로 하였다 (김, 1987). 식생조사에서 우점도는 Braun-Blanquet (1964)의 방법에 따랐으며, 그 기준은 다음과 같다.

- 5 : 피도가 조사 면적의 3/4 이상을 점유하고 있는 것으로 개체수는 임의이다.
- 4 : 피도가 조사면적의 1/2~3/4를 점유하고 있는 것으로 개체수는 임의이다.
- 3 : 피도가 조사면적의 1/4~1/2를 점유하고 있는 것으로 개체수는 임의이다.
- 2 : 개체수가 대단히 많거나 또는 피도가 1/10~1/4을 점유하고 있는 것이다.
- 1 : 개체수가 많으나 피도가 1/20이하 인 것이거나, 또는 피도가 1/4이하로 개체수가 적은 것이다.
- + : 개체수가 적고 피도도 낮은 것이다.
- r : 대단히 드물게 최저피도로 출현하는 것이다.

라. 주변 산림 환경과 현존식생의 개관

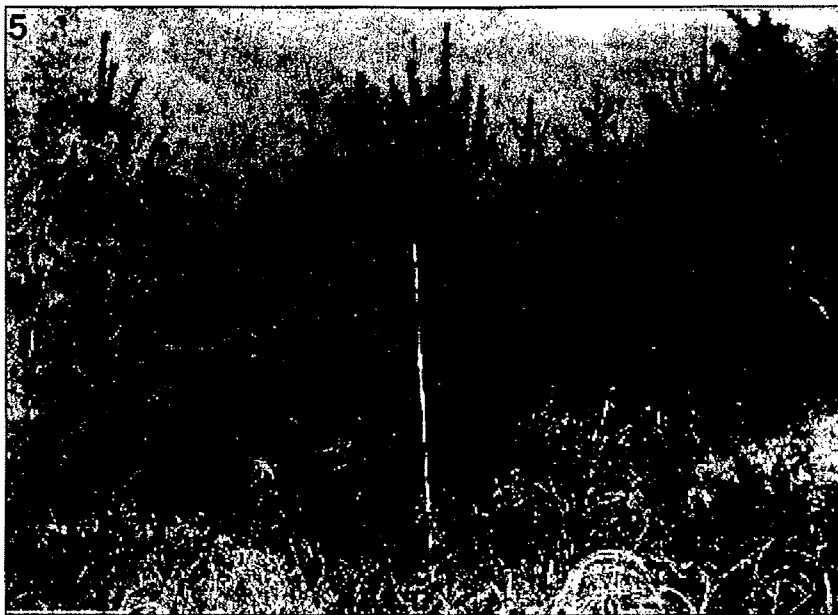
조사 지역의 대부분은 인간의 생활 활동으로 인해 자연식생과는 다른 종조성이거나 구조를 한 식물 군락으로 변화되어 버린 대상식생 (substitute vegetation)이며, 대상식생에 속하는 분류군중에서 인위식생 (artificial vegetation)에 속한다. 이것은 식재림 또는 조경지 등은 원래의 자연 반자연식생의 파괴뿐 아니라, 그 후의 색생회복과정에 이르기까지 완전히 인위적 관리에 의존하는 식생이다.

조사지역의 해발고는 발안저수지 해발 20m에서 건달산 337.2m, 태행산, 삼봉산 267m, 철마산 160m 등 400m 이하의 낮은 산지로 구성되어 있다. 건달산의 주능선은 남북으로 뻗은 일자형으로 화성군 봉담면과 팔남면의 경계를 이루고 있다. 건달산의 서측면은 북서쪽의 기천저수지에서 남쪽의 발안저수지로 흐르는 수계로 동측단은 수원-평리로 이어지는 국도에 의해 경계지어지고 있다. 해발 200m 이상은 경사가 가파른 암반으로 이루어졌으며, 유리 (柳里)로부터 당하리와 세곡리에 이르는 계곡을 제외하고는 지형이 비교적 단순하다. 건달산은 해발 140m 이하의 지대는 20°, 140~200m에서는 25°, 200m이상의 지대는 30°의 경사도를 나타내고 있다.

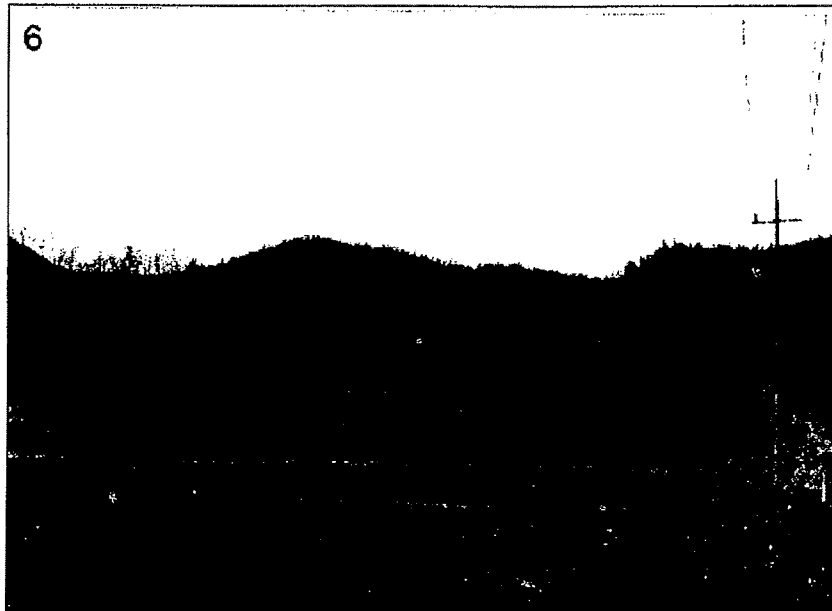
화성군 봉담면 세곡리에 이르는 동경사면 내지 동남경사면은 35° 의 암석 사태지(沙汰地)가 군데 군데 형성되어 있고 임지는 대부분 IV급지를 이루고 있다. 산복에는 잔적토로서 토심이 얇고 토양습도는 건조한 상태를 나타냈다. 토양은 침식이 심한 사양토이다. 해발 100~200m인 지대는 III급지의 임지로 토심이 깊은 편이고 토양수분은 비교적 적운상태이었다. 토양침식은 거의 없고 퇴적양식은 잔적토이며 토성은 대부분 사양토로서 비교적 양호한 토양조건을 나타내었다 (강, 1988).

건달산 8부능선 위쪽에는 소나무 2차림이 형성되어 있고 그외 낮은 지역에는 인위적으로 벌채된 후 일부 2차림이 형성된 지역이 있지만 대부분이 리기다소나무, 잣나무, 현사시, 아카시나무조림지 등으로 사방지 복구용식재와 활잡목 수종갱신용으로 조림한 곳으로 구성되어 있다. 그러나 민가부근에는 밤나무 등 과수원이 존재하고 있다.

(그림 7-2)은 화성군 팔탄면 기천리 산지의 잣나무 조림지를 보여주고 있으며, (그림 7-3)은 화성군 팔탄면 산지의 개별지역 무림목지를 보여주고 있다.



(그림 7-2) 잣나무조림지 전경

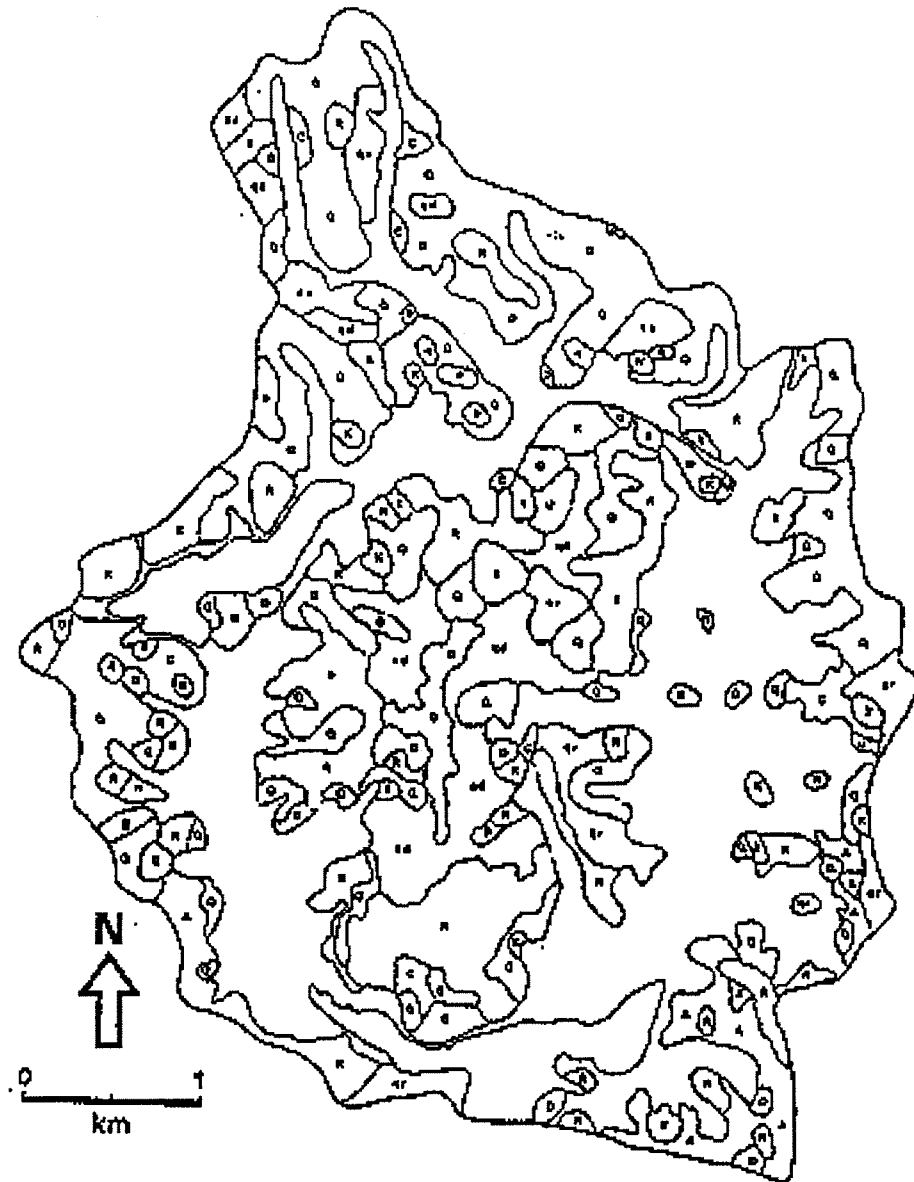


(그림 7-3) 개발지역으로 무림목지 전경

마. 식생조성

발안저수지와 기천저수지 주변 농업 생태 환경 조사 지역에서 식물사회학적인 방법으로 확인한 산림 군락은 자연식생 4군락, 인공식생 6군락으로 총 10개 군락이 있으며, 그 외에 최근에 벌채된 소규모의 벌채지가 있었다. (그림 7-4)는 대상 지역의 산림식생도를 보여주고 이따.

자연군락으로는 소나무군락, 상수리나무군락, 상수리나무-소나무군락, 상수리나무-팔배나무군락이 있었으며, 인위적인 군락으로는 아카시나무군락, 잣나무군락, 상수리나무-리기다소나무군락, 은사시나무군락, 리기다소나무군락, 밤나무군락 등이었다. 이들 군락은 모두 냉온대 중부 (cool temperature forest, central zone)에 분포하는 군락들이다.



A: 아카시나무군락, D: 소나무군락, G: 초지, 개별에 의한 무림목지, K: 잣나무군락
 N: 묘포장, O: 과수원, Q: 상수리나무군락, R: 리기다소나무군락, T: 은사시나무군락
 qd: 상수리-소나무군락, qr: 상수리-리기다소나무군락, qs: 상수리-팔배나무군락,

(그림 7-4) 조사지역의 산림식생도

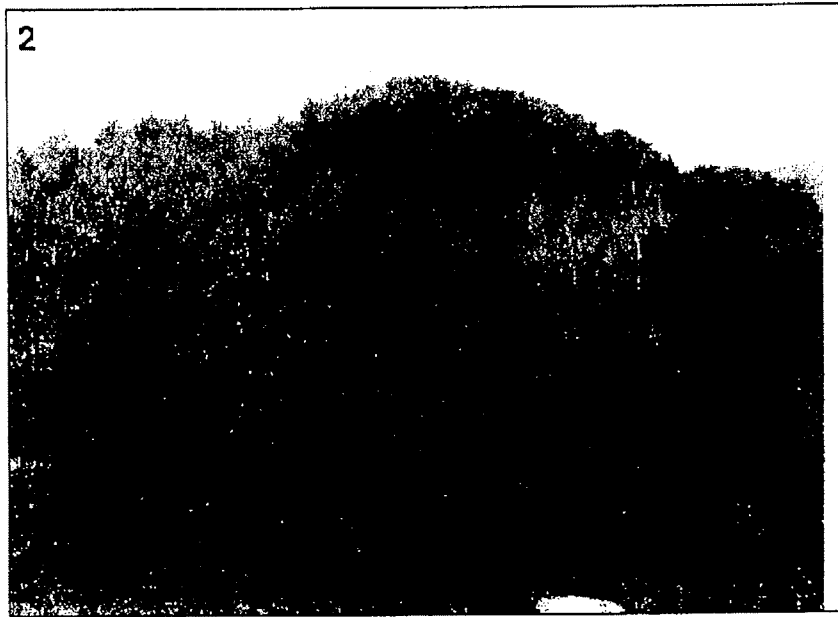
이상의 식물군락에서 넓은 면적을 점유하고 있거나 임상이 좋은 대표적인 군락은 다음과 같다. 상수리나무군락 (*Quercus acutissima* community), 리기다소나무군락 (*Pinus rigida* community), 소나무군락 (*Pinus densiflora* community), 상수리나무-소나무군락 (*Quercus acutissima*-*Pinus densiflora* community) 및 아카시나무군락 (*Robinia pseudo-acacia* community)의 5개 군락으로 형성되어 있었다.

농경지에 영향을 미치는 주변환경은 농경지에서 1km 이내 분포하는 산림지역으로 상수리나무군락과 리기다소나무군락 등 이 조사지역내 넓은 면적으로 분포하는 대표적인 산림식생이었다. 저수지나 호수건설이 주변 미기상과 생태 환경에 미치는 영향이 크기 때문에 저수지 주변 0.5km 이내 군락과 1km 외측에 있는 군락을 대상으로 식생조성을 조사하였다.

(그림 7-5)는 발안저수지 부근의 산지에 위치해 있는 상수리나무군락을 보여주고 있으며, (그림 7-6)은 리기다소나무-상수리나무군락으로서 화성군 팔탄면 기천리 산지의 전경을 보여주고 있다. 또한, (그림 7-7)은 화성군 봉담면 상기리 산지에 군락을 형성하고 있는 리기다소나무군락의 광경이며, (그림 7-8)은 화성군 팔탄면 기천리 산지의 소나무-상수리나무군락의 식생군락의 전경을 보여주고 있다.



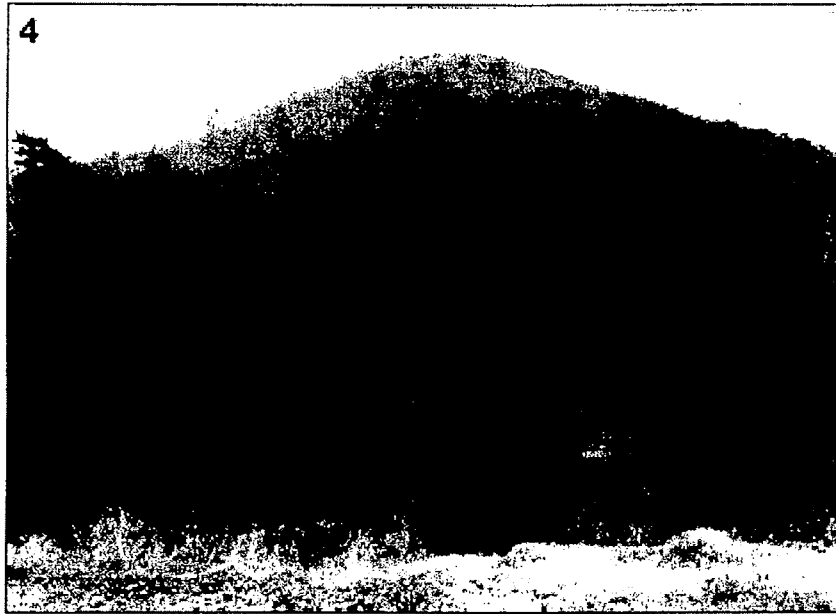
(그림 7-5) 상수리나무군락 전경



(그림 7-6) 리기다소나무-상수리나무군락 전경



(그림 7-7) 리기다소나무군락 전경



(그림 7-8) 소나무-상수리나무군락 전경

1) 저수지에서 1km 외측 산림 식물 군락

가) 상수리나무군락

상수리나무군락은 (그림 7-1)의 1지역으로서 해발 100~150m에 분포하고 있다. 기천저수지에서 북동방향으로 1km 외측에 위치하며 농경지에 인접된 많은 산림이 본 2차림인 상수리나무군락으로 이루어져 있다. 이 군락의 계층(階層)구조는 층위발달이 비교적 좋은 편이고, 교목층(T1)은 평균수고 13m, 식피율 70%를 형성하고 아교목층(T2)은 수고 7m, 식피율 40%를 형성하고 있었다. 교목층에는 상수리나무가 우점하고 굴참나무가 20%정도 구성하였으며, 아교목층에는 리기다소나무와 아카시나무가 20%정도 점유하고 있었지만 상층목과는 경합을 이루지 못할 것으로 보여 점차 쇠퇴하리라 본다. 관목층에는 누리장나무, 갈참나무가 우점하였고, 초본층에는 맑은대쑥, 닭의장풀, 애기나리 등이 우점도가 높게 나타났다.

나) 리기다소나무군락

리기다소나무군락은 (그림 7-1)의 2지역이며, 기천저수지에서 북동방향으로 1km 외측에 위치하며 경작지와 30m 이내의 산림이다. 낙엽활엽목에 산림을 제거하고 리

기다소나무를 조림한 지역으로 교목층은 수고가 13m 정도의 리기다소나무조림목이 우점종이었고, 조림전 기존 분포종인 상수리나무와 밤나무가 상층수관으로 진입하고 있는 단계에 있었다. 아교목층은 떡갈나무와 상수리나무가 30%이하로 점유하고 있었으며, 관목층은 진달래, 개웃나무, 싸리, 청가시나무, 노린재나무 등이 식피율을 40% 정도로 나타냈다. 초본층은 뱀고사리, 맑은대쭉, 밀나물, 노루발풀 등 순으로 우점하여 식피율 20%을 보였다.

2) 저수지에서 0.5km 내측 산림식물군락

가) 상수리나무군락

본 군락은 해발 90~150m 에 분포하고 있다. 2차림인 상수리나무군락은 기천저수지에서 북쪽방향으로 0.1km 외측에 위치하며 농경지와 폐경지에 인접되어 있다. 이 군락의 계층(階層)구조는 층위발달이 비교적 좋은 편이고, 교목층(T1)은 평균수고 15m, 식피율 70%를 형성하고 아교목층(T2)은 수고 7m, 식피율 20%이었다. 교목층에는 상수리나무가 우점하고 떡갈나무가 20%정도 구성하였으며, 아교목층(T2)에는 상수리나무와 떡갈나무가 경합을 버리며 우점하고 있었다. 관목층에는 졸참나무와 진달래가 우점하였으며 식피율은 20%이었다. 초본층에는 뱀고사리와 산거울 등이 우점도가 높게 나타났다.

나) 리기다소나무군락

리기다소나무군락은 발안저수지에서 서쪽방향으로 0.4km 외측에 위치하며 경작지와 20m거리에 위치한 산림이다. 사방지로 예측되는 지형으로 조림당시 토사유출이 심하게 나타났던 흔적이 있는 곳으로 리기다소나무와 아카시나무를 조림한 지역으로 교목층은 수고가 11m정도의 리기다소나무가 우점종하고 있었으며, 조림전 기존 분포종인 상수리나무가 상층수관으로 진입하고 있는 단계에 있으며, 아교목층(T2)의 졸참나무와 교목층(T1)의 20%식피율을 보이는 상수리나무와 함께 점차 2차 우점종으로 성장하고 있는 형태의 산림이었다. 관목층(S)에는 진달래, 국수나무, 생강나무, 개암나무, 청미래덩굴 등이 식피율 30%를 점유하였다. 초본층(H)에는 뱀딸기, 취, 새, 주름조개풀, 포아풀 등이 우점하여 식피율 30%을 보였다. 특기할 식물은 희귀멸종위기식물로 보호받고 있는 관중이 20여 개체가 자라고 있는 것은 저수지 주

변의 영향을 충분히 받아 산림내 공중습도가 다른 지역보다 높은 영향으로 사료된다.

바. 식물 군락별, 시기별 식물종 출현의 변화

층위의 변화는 상층 목본식물일 경우 수년 또는 수십 년이 소요되지만 하층 덩굴성 목본이나 초본류는 계절적인 변화를 보이기 때문에 식물군락별 시기별 식물종 출현의 변화를 보인다. 개화시기에 따라서 종의 출현이 달라진다. 낙엽활엽수림하의 봄개화식물은 5월이며, 하순에 결실을 끝내는 경우가 많기 때문에 여름철에는 사라지는 경우가 많아 계절적인 변화는 초본에서 많이 나타난다.

<표 7-1>은 중점 조사지역의 산림식물의 계절별 출현종수를 나타내고 있다.

1) 저수지에서 1km외측 산림 식물 군락

가) 상수리나무군락

군락내 출현식물의 계절변화는 4월에 16종, 5월에 33종, 7월에 35종, 10월에 32종으로 계절변화를 하였는데 종의 출현 변화는 초본층에서만 나타났으며 2차림 상수리나무군락의 출현종은 총 35종이었다.

나) 리기다소나무군락

군락내 출현식물의 계절 변화는 4월에 25종, 5월에 31종, 7월에 31종, 10월에 28종으로 계절 변화를 하였는데, 종의 출현 변화는 관목층에서 4월에 11종에서 5월 12종으로 1종이 더 나왔고, 초본층에서는 4월에 6종, 5월에 11종, 7월에 11종, 10월에 7종으로 계절 변화를 하였으며, 리기다소나무군락의 출현종은 총 31종이었다.

2) 저수지에서 0.5km 내측 산림 식물 군락

가) 상수리나무군락

군락내 출현 식물의 계절 변화는 4월에 28종, 5월에 39종, 7월에 40종, 10월에 37종으로 계절 변화를 하였는데 종의 출현 변화는 수관층에서는 관목층에서 4월에 17종에서 5월에 18종으로 1종이 늘었으며 초본층에서 4월에 3종, 5월에 13종, 7월에 14종, 10월에 11종으로 계절 변화를 나타냈으며 총 출현종은 40종이었다.

나) 리기다소나무군락

군락내 출현 식물의 계절 변화는 4월에 32종, 5월에 48종, 7월에 48종, 10월에 43

종으로 계절 변화를 하였는데, 종의 출현 변화는 관목층에서 4월에 19종에서 5월 20종으로 1종이 더 나왔고, 초본층에서는 4월에 7종, 5월에 22종, 7월에 22종, 10월에 18종으로 계절 변화를 하였으며, 리기다소나무군락의 출현종은 총 48종이었다.

<표 7-1> 중점조사지역의 산림식물의 계절별 출현종수 (1996)

조사시기 조사지		수관층위	4/15	5/20	7/15	10/10	종수
저수지 2km 외 측	상수리나무림 (2차림; 15년생이상)	교목층(T1)	2	2	2	2	2
		아교목층(T2)	2	2	2	2	2
		관목층(S)	18	18	18	18	18
		초본층(H)	4	11	13	10	13
		종 수	16	33	35	32	35
	리기다소나무 조림지 (20년생이상)	교목층(T1)	3	3	3	3	3
		아교목층(T2)	5	5	5	5	6
		관목층(S)	11	12	12	12	12
		초본층(H)	6	11	11	7	11
		종 수	25	31	31	27	31
저수지 0.5 K m 내 측	상수리나무림 (2차림; 15년생이상)	교목층(T1)	3	3	3	3	3
		아교목층(T2)	5	5	5	5	5
		관목층(S)	17	18	18	18	18
		초본층(H)	3	13	14	11	14
		종 수	28	39	40	37	40
	리기다소나무 조림지 (20년생이상)	교목층(T1)	3	3	3	3	3
		아교목층(T2)	3	3	3	3	3
		관목층(S)	19	20	20	20	20
		초본층(H)	7	22	22	18	22
		종 수	32	48	48	44	48

4. 남북사면 식생조사

가. 조사지역 선정

산림생태환경 조사지점에서 남쪽사면과 북쪽사면의 숲가장자리에서 산정부 방향으로 식생조사를 실시하였다.

(그림 7-1)에서의 동일 조사지역에서 산의 능선을 경계로 하거나 계곡으로 분리된 지역으로 남향사면, 북향사면으로 산림의 환경이 전형적인 남향과 북향으로 구분되는 지역을 선정하여 추가 조사하였다. 담수저수지로부터 2 km 이상 격리된 지역에서 농경지 부근에 위치한 2차림으로 15년 이상된 상수리나무림 또는 굴참나무림 지역, 리기다소나무림으로서 조림된지 20년생 이상되어 식생이 안정된 지역 등 저수지환경의 영향권에서 벗어난 지역, 담수저수지로부터 0.5 km 이내에 위치한 농경지 부근 2차림으로 15년 이상된 상수리나무림 또는 굴참나무림 지역과 20년 이상된 리기다소나무 조림지 등 저수지환경의 영향권내에 들어간 지역으로 구분하여 (그림 7-1)과 같이 선정하여 조사한다. 각 조사지역에서 남향과 북향의 경사면에서 숲가장자리에서 산정부로 조사지역을 선상으로 설정하였다.

산림환경 식생조사는 년4회로 5월초, 6월초, 8월초 9월초에 실시하고, '96년도 조사지점에서 남쪽사면과 북쪽사면을 숲가장자리에서 숲내 산정부 방향으로 조사한다. 조사지점인 ①~④에서 농경지에서 남북으로 수직인 산림지역으로 50~100m까지 들어가 교목층(T1)~관목층(S)은 30m마다 10x10m 방형구 1개씩, 초본층(H)은 10m마다 1x1m 또는 2x2m방형구 1개씩을 설치하여 식생을 조사한다. 초본층(F)에서 식물종 출현율을 숲가장자리 5m에서 출현하는 종(Fs), Fs조사지역 안쪽의 숲내에서 출현하는 종(Fi)으로 구분하여 조사한다.

나. 산림생태환경 시기별 변화조사

본 조사지역에서 5월 남사면 식생출현종은 총 43종으로 T1교목층은 2종, T2아교목층은 5종, 관목층은 17종, 초본층에서 숲가장자리에서 출현하는종은 8종, 숲내에서 출현하는종은 11종이었다. 북사면에서 식생출현종은 총 57종으로 T1교목층은 6종, T2아교목층은 6종, 관목층은 12종, 초본층에서 숲가장자리에서 출현하는종은 15종, 숲내에서 출현하는종은 18종이었다.

6월 남사면 식생출연종은 총 57종으로 T1교목층은 2종, T2아교목층은 5종, 관목층은 21종, 초본층에서 숲가장자리에서 출현하는종은 11종, 숲내에서 출현하는종은 18종이었다. 북사면에서 식생출연종은 총 72종으로 T1교목층은 6종, T2아교목층은 6종, 관목층은 20종, 초본층에서 숲가장자리에서 출현하는종은 10종, 숲내에서 출현하는종은 30종이었다. 5월에 북사면과 남사면에서 종의 출현율은 북사면이 남사면보다 33% 높게 나타났고, 6월에는 북사면에서 남사면보다 26% 높게 나타났다. 5월과 6월의 남사면간의 종출현율은 6월에 33% 증가하여 나타났으며, 북사면간에는 6월이 26% 종출현이 증가하였다.

(그림 7-9)는 상수리나무군락의 전경을 보여주고 있고, (그림 7-10)은 리기다소나무조림지의 전경을 보여주고 있다.

<표 7-2>는 남북사면의 식생조사 결과를 보여주고 있다.

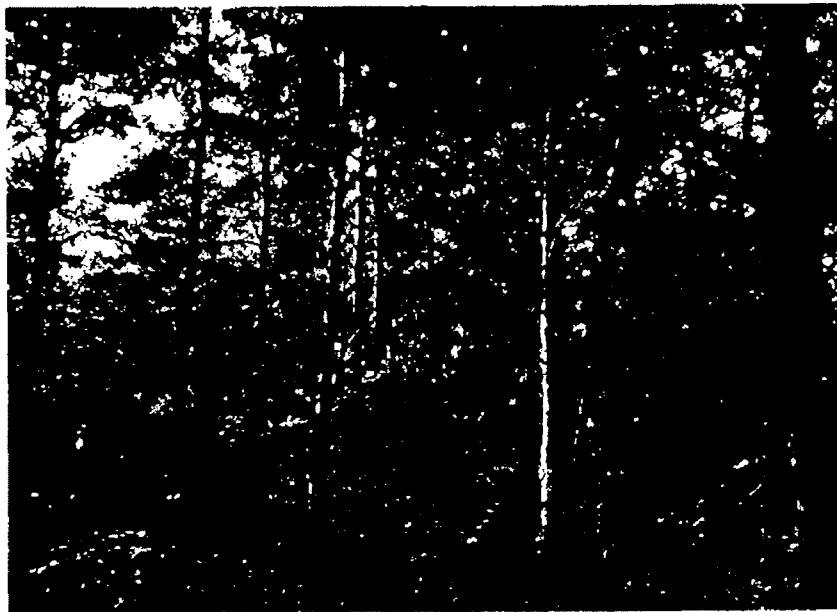
1) 리기다소나무군락의 식생변화

조림지역인 본 조사지역에서 5월 남사면 식생출연종은 총 43종으로 T1교목층은 2종, T2아교목층은 5종, 관목층은 17종, 초본층에서 숲가장자리에서 출현하는종은 8종, 숲내에서 출현하는종은 11종이었다. 북사면에서 식생출연종은 총 42종으로 T1과 T2교목층은 동일하였고 관목층은 16종, 초본층에서 숲가장자리에서 출현하는종은 9종, 숲내에서 출현하는종은 11종이었다.

6월 남사면 식생출연종은 총 61종으로 T1교목층은 2종, T2아교목층은 5종, 관목층은 28종, 초본층에서 숲가장자리에서 출현하는종은 14종, 숲내에서 출현하는종은 12종이었다. 북사면에서 식생출연종은 총 59종으로 T1과 T2교목층은 동일하였고 관목층은 23종, 초본층에서 숲가장자리에서 출현하는종은 19종, 숲내에서 출현하는종은 10종이었다. 5월에 북사면과 남사면에서 종의 출현율은 남사면이 북사면보다 2% 높게 나타났고, 6월에는 남사면에서 북사면보다 3% 높게 나타났다. 5월과 6월의 남사면간의 종출현율은 6월에 42% 증가하여 나타났으며, 북사면간에는 6월이 40% 증가하였다.



(그림 7-9) 상수리나무군락의 전경



(그림 7-10) 리기다소나무조림지의 전경

<표 7-2> 조사지역내 남북사면별 시기별 식생변화 (1997)

지역	조사일	총위	남향사면식생		북향사면식생	
			종수	합계	종수	합계
1	5월 5일	T1	2	43	6	57
		T2	5		6	
		S	17		12	
		H	Fs 8		15	
			Fi 11		18	
	6월 6일	T1	2	57	6	72
		T2	5		6	
		S	21		20	
		H	Fs 11		10	
			Fi 18		30	
2	5월 5일	T1	2	43	2	42
		T2	5		5	
		S	17		16	
		H	Fs 8		9	
			Fi 11		10	
	6월 6일	T1	2	61	2	59
		T2	5		5	
		S	28		23	
		H	Fs 14		19	
			Fi 12		10	
3	5월 5일	T1	3	42	4	55
		T2	5		6	
		S	22		19	
		H	Fs 8		19	
			Fi 4		7	
	6월 6일	T1	3	47	4	71
		T2	5		6	
		S	22		19	
		H	Fs 10		27	
			Fi 13		15	
4	5월 5일	T1	1	35	2	45
		T2	3		3	
		S	11		14	
		H	Fs 6		7	
			Fi 14		14	
	6월 6일	T1	1	44	2	53
		T2	3		3	
		S	16		18	
		H	Fs 10		11	
			Fi 14		19	

2)저수지에서 0.5km내측 산림식물군락

가)상수리나무군락의 식생변화

본 조사지역에서 5월 남사면 식생출연종은 총 42종으로 T1교목층은 3종, T2아교목층은 5종, 관목층은 22종, 초본층에서 숲가장자리에서 출연하는종은 8종, 숲내에서 출연하는종은 4종이었다. 북사면에서 식생출연종은 총 52종으로 T1교목층은 3종, T2아교목층은 4종, 관목층은 19종, 초본층에서 숲가장자리에서 출연하는종은 19종, 숲내에서 출연하는종은 7종이었다.

6월 남사면 식생출연종은 총 53종으로 T1교목층은 3종, T2아교목층은 5종, 관목층은 16종, 초본층에서 숲가장자리에서 출연하는종은 10종, 숲내에서 출연하는종은 13종이었다. 북사면에서 식생출연종은 총 71종으로 T1과 T2교목층은 동일하였고 관목층은 19종, 초본층에서 숲가장자리에서 출연하는종은 27종, 숲내에서 출연하는종은 15종이었다. 5월에 북사면과 남사면에서 종의 출현은 북사면이 남사면보다 31% 높게 나타났고, 6월에는 북사면에서 남사면보다 34% 높게 나타났다. 5월과 6월의 남사면간의 종출현율은 6월에 26% 증가하여 나타났으며, 북사면간에는 6월이 34% 증가하였다.

나)리기다소나무군락

본 조사지역에서 5월 남사면 식생출연종은 총 35종으로 T1교목층은 1종, T2아교목층은 3종, 관목층은 11종, 초본층에서 숲가장자리에서 출연하는종은 6종, 숲내에서 출연하는종은 14종이었다. 북사면에서 식생출연종은 총 41종으로 T1교목층은 2종, T2아교목층은 3종, 관목층은 14종, 초본층에서 숲가장자리에서 출연하는종은 3종, 숲내에서 출연하는종은 19종이었다.

6월 남사면 식생출연종은 총 44종으로 T1교목층은 1종, T2아교목층은 3종, 관목층은 16종, 초본층에서 숲가장자리에서 출연하는종은 10종, 숲내에서 출연하는종은 14종이었다. 북사면에서 식생출연종은 총 53종으로 T1과 T2교목층은 동일하였고 관목층은 18종, 초본층에서 숲가장자리에서 출연하는종은 11종, 숲내에서 출연하는종은 19종이었다. 5월에 북사면과 남사면에서 종의 출현은 북사면이 남사면보다 32% 높게 나타났고, 6월에는 북사면에서 남사면보다 20% 높게 나타났다. 5월과 6

월의 남사면간의 종출현율은 6월에 26% 증가하여 나타났으며, 북사면간에는 6월이 18% 증가하였다.

다. 식생의 시기별 출현빈도

이상의 산림 식생을 조사한 결과를 바탕으로 시기별 출현빈도를 분석하였다.

저수지에서 1km외측 산림 식물군락의 관목이하 초본층에서 시기별 식물종의 조성변화가 나타났다. 상수리나무군락은 남사면보다 북사면에서 5월대비 7월에 10% 정도 식물출현율이 높은 것으로 조사되었고, 리기다소나무조림지는 북사면보다 남사면에서 4% 정도 식물출현율이 높은 것으로 나타났다.

저수지에서 0.5km 내측 산림 식물군락은 관목이하 초본층에서 시기별 식물종의 조성변화가 나타났고, 상수리나무군락은 남사면이 북사면에 비해 5월 대비 7월에 8% 정도 식물출현율이 높은 것으로 나타났으며, 리기다소나무조림지는 북사면이 남사면에 비해 5월 대비 7월에 10% 정도 식물출현율이 높은 결과를 보였다.

식생의 시기별 출현빈도는 저수지에서 격리되어 있는 거리에 따라서 식물의 종조성이 영향을 받는 것으로 조사되었다.

5. 향후 식생 전망

기천저수지와 발안저수지 주변 산림 군락 구조와 시기별 종조성의 변화를 조사하였다. 주변의 자연식생으로는 상수리나무군락 (*Quercus acutissima* Community), 상수리나무-소나무군락 (*Quercus acutissima*-*Pinus densiflora* Community), 상수리나무-팔배나무군락 (*Quercus acutissima*-*Sorbus alnifolia* Community), 소나무군락 (*Pinus densiflora* Community) 등 4개 군락과 인위적인 식재림으로 리기다소나무림 (*Pinus rigida* Plantation), 잣나무군락 (*Pinus koraiensis* Plantation), 은사시나무군락 (*Populus tomentigladulosa* Plantation), 아카시나무림(*Robinia pseudo-acacia* Plantation), 리기다소나무-상수리나무림 (*Pinus rigida* - *Quercus acutissima* Plantation), 밤나무식재지 (*Castanea crenata* Plantation) 등 6개 군락이었다. 따라서, 본 조사 산림지역내 총 군락 수는 10개 군락과 기타 벌채지로 구분되었다.

기천저수지와 발안저수지의 형향권내외에 분포하는 농경지 주변 산림환경은 식물

군락구성이 인위적인 조림으로 인해 형성된 리기다소나무군락, 잣나무군락, 아카시나무군락 등과 자연적인 갱신에 의해서 형성된 2차림인 참나무류 (상수리나무, 굴참나무, 졸참나무 등)와 소나무가 혼효된 집단으로 구성되어 있다. 소나무군락은 주변 참나무류가 침입이 진행되어 가는 단계에 있는 곳이 많아 참나무류가 소나무와의 경쟁에서 이김으로서 점차 참나무류의 식생이 우점하여질 것으로 사료된다.

산악의 능선부는 건조하고 토양이 척박하기 때문에 소나무와 경쟁하는 참나무류의 정착에도 부적합하므로 소나무의 유식물의 보충이 용이하여 소나무 군락이 계속 유지될 것으로 보여지며, 남북사면의 중복 이상에서는 소나무는 소멸되고 참나무류 식물로 대체될 것으로 보여진다 (이, 1989, 강, 1991). 이러한 사실을 고려하면 기천저수지와 발안저수지 유역의 식생은 능선부나 척박한 토양 조건인 곳을 제외하면 그 외의 대부분의 유역은 앞으로 참나무속 식물이 우점하는 식생으로 변하게 될 것이고, 참나무류와 같은 활엽수림은 토양수분의 보수력이 높으므로 기천저수지와 발안저수지의 수질이나 수량의 조정에 유리할 것으로 보인다.

6. 산림생태계 순생산량 산정

가. 조사방법

조사지점은 '96년 선정한 지역으로 각 지점 산림식생에서 남향과 북향의 경사사면에 조사지점을 분리하여 선정하였다.

조사지역의 토양분석은 식생별 조사지역의 토양을 채취한 후 시료를 완전히 음건시켜 입도분석, pH, 유기물함량, 전질소함량, 유효인산, C.E.C, 치환성양이온 함량 등을 조사, 분석하였다.

산림생태계 순생산량 조사는 농경지 생태계 인접산림 생태환경 조사지점 5곳에 표준지와 표준목을 선정하여 년순생산량을 산정하였다. 순생산량 산정을 위해 식생별 남향, 북향사면에 각 3개씩, 크기 1 x 1m²의 방형구에 대해 낙엽낙지 생산량 측정하였고, 낙엽낙지 채집구에서 수집한 것을 분석하였다. 낙엽생산량을 측정하기 위해 건조기내 온도 80℃, 항량이 될 때까지 건조후 무게를 산정하여 낙엽건조 항중량을 측정하였다. 측정부위는 낙지와 낙엽에 대해 ha당 연간 낙지와 엽생산량을

조사하였다. 조사입목의 년생산량 측정은 조사지 입목수고(H)의 단판을 이용하여 추정된 년평균흉고지경생장(d)과 년평균 흉고생장(h)에 대하여 d^2h 를 계산하고, 이것을 기초로 하여 현존량을 추정하고, 순생산량을 산출하였다 (강상준, 1991, Kira & Shidei, 1967).

(그림 7-11)은 산림조사시 표준목의 입목을 조사하는 광경이고, (그림 7-12)와 (그림 7-13)은 각각 표준목의 수간, 가지, 잎의 중량을 조사를 위한 벌목 후 조사광경을 보여주고 있다.

(그림 7-14)와 (그림 7-15)는 토양조사의 광경으로서 각각 리기다소나무조림지 토양 조사와 낙엽, 낙지 생산량 조사 표준지를 보여주고 있다.



(그림 7-11) 표준목의 입목 조사 광경



(그림 7-12) 벌목후 수간석해용 disk 채취



(그림 7-13) 잎의 중량측정을 위한 엽채취



(그림 7-14) 리기다소나무조림지 토양 조사



(그림 7-15) 낙엽, 낙지 생산량 조사 표준지

나. 토양분석 결과

조사지역의 토양분석 결과는 <표 7-3>에 나타난 바와 같다. 모래함량은 상수리나무림, 상수리-갈참나무림, 리기다소나무조림지, 리기다소나무조림지에서 남쪽사면이 북쪽사면보다 높게 나타났지만 굴참나무림에서는 북쪽사면이 모래함량이 높은 값을 보였다. CEC함량은 남사면보다 북사면에서 높게 나타났으며, 치환성양이온은 K, Na 함량에서도 북사면에서 높은 값을 보였다.

<표 7-3> 조사지역의 토양분석 결과

조사 지역	입도분석 (%)				산도 pH.	유기물 O.M.(%)	총 질소 (%)	유효 인산 (ppm)	C.E.C (me/100g)	치환성 양이온(me/100g)			
	모래	미사	점토	토성						K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
* 1-S	57.7	33.7	8.6	SL	4.4	2.5	0.08	9	6.82	0.10	0.15	0.82	0.18
1-T	51.9	31.7	16.4	L	4.4	1.4	0.14	2	8.00	0.13	0.16	0.85	0.42
1-N	35.4	60.1	4.5	SIL	4.5	4.5	0.20	5	9.29	0.18	0.14	0.90	0.40
2-S	38.4	52.9	8.7	SIL	4.3	3.0	0.16	6	8.85	0.13	0.16	0.74	0.33
2-T	40.1	53.2	6.7	SIL	4.4	4.5	0.13	17	9.51	0.15	0.15	0.77	0.28
2-N	27.9	68.9	3.2	SIL	4.4	3.6	0.14	5	9.53	0.90	0.14	0.72	0.29
3-S	46.2	44.5	9.3	L	4.5	2.9	0.14	11	8.67	0.15	0.16	0.76	0.39
3-T	34.0	56.0	10.0	SIL	4.5	3.5	0.13	3	9.29	0.13	0.16	0.78	0.27
3-N	49.0	40.4	10.6	L	4.5	1.4	0.06	2	8.28	0.13	0.15	0.76	0.36
4-S	79.5	17.3	3.2	LS	4.8	1.2	0.44	3	7.48	0.90	0.14	1.08	0.66
4-T	65.3	30.2	4.5	SL	4.7	0.8	0.04	1	7.48	0.19	0.14	1.54	1.530
4-N	25.9	57.7	16.4	SIL	4.4	2.4	0.11	1	7.75	0.16	0.14	1.05	0.40

* 1: 상수리나무림, 2:상수리-갈참나무림, 3: 리기다소나무조림지, 4:굴참나무림,
5: 리기다소나무조림지, S: 남쪽사면의 토양, T: 산정부의 토양, N: 북쪽사면의 토양

다. 산림 식생별 낙엽, 낙지생산량 산정

산림 식생별 낙엽, 낙지생산량을 조사한 결과는 <표 7-4>에서와 같다.

낙엽 낙지 생산량을 조사한 결과, 상수리나무림 (조사구1)에서의 낙엽낙지 연평균 생산량은 36.25 kg/ha였다. 방위별로는 남사면에서는 31.9 kg/ha였고, 북사면에서는 40.6 kg/ha로 나타나 북사면의 생산량이 다소 높게 나타났다.

<표 7-3> 산림식생별 낙엽낙지의 생산량 비교

구 분	방위	총량 (kg/ha/yr.)	낙엽 (kg/ha/yr.)	낙지 (kg/ha/yr.)	낙엽낙지 평균생산량 (kg/ha/yr.)
1. 상수리나무림	S	31.9	28.9	3.0	36.25
	N	40.6	36.9	3.7	
2. 기다소나무조림지	S	65.1	55.1	1.0	54.15
	N	43.2	39.6	3.6	
3. 굴참나무림	S	48.6	43.0	5.6	46.2
	N	43.8	36.9	6.9	
4. 리기다소나무조림지	S	40.8	39.4	1.4	38.25
	N	35.7	32.2	3.5	

리기다소나무림 (조사구2)에서의 낙엽낙지 연평균생산량은 54.15 kg/ha였다. 방위별로는 남사면에서는 65.1 kg/ha였고, 북사면에서는 43.2 kg/ha로 나타나 남사면의 생산량이 다소 높게 나타났다.

굴참나무림 (조사구3)에서의 낙엽낙지 연평균생산량은 46.2 kg/ha였다. 방위별로는 남사면에서는 48.6 kg/ha였고, 북사면에서는 43.8 kg/ha로 나타나 남사면의 생산량이 다소 높게 나타났다.

리기다소나무림 (조사구4)에서는 낙엽낙지 연평균생산량은 38.25 kg/ha였다. 방위별로는 남사면에서는 40.8 kg/ha였고, 북사면에서는 35.7 kg/ha로 나타나 남사면의 생산량이 다소 높게 나타났다.

라. 현존량 조사 결과

현존량은 상대 생장법에 의해 구하였으며, 그 결과는 <표 7-4>에 나타내었다.

1조사지인 상수리나무림의 현존량 추정치는 수간(Ws) 550kg, 가지(Wb) 61kg, 엽중량(Wl) 25.5kg이었으며, 2조사지인 리기다소나무조림지의 현존량 추정치는 수간(Ws) 788kg, 가지(Wb) 86.5kg, 엽중량(Wl) 35.1kg이었다. 3조사지인 굴참나무림의

현존량 추정치는 수간(Ws) 1,240kg, 가지(Wb) 136.2kg, 엽중량(Wl) 53.9kg이었고, 4조사지인 리기다소나무조림지는 수간(Ws) 1,206kg, 가지(Wb) 120kg, 엽중량(Wl) 52.3kg인 것으로 나타났다.

<표 7-4> 식생과 위치별 현존량 비교

구 분	방위	평균 DBH (D)	sq. diameter D ²	평균 수고 (H)	D ² H	stem wt (Ws)	branch wt (Wb)	leaves wt (Wl)
1. 상수리나무림	S	10.3cm	106.1	8.9m	944.3	49.3kg	5.3kg	2.2kg
	N	11.7	136.9	8.5	1,156.0	60.8	6.9	2.9
2. 리기다소나무조림지	S	12.0	144.0	11.0	1,584.0	78.5	6.6	3.9
	N	13.0	169.0	11.8	1,994.2	79.1	10.7	3.9
3. 굴참나무림	S	18.4	338.6	11.1	3,758.5	198.8	21.8	8.6
	N	16.2	262.4	11.2	2,938.8	155.5	17.1	6.8
4. 리기다소나무조림지	S	17.0	289.0	12.4	3,583.6	177.6	15.2	7.0
	N	15.3	234.1	11.4	2,668.7	106.1	13.1	5.3

마. 순생산량 조사 결과

산림 생태계의 순생산량 조사 결과는 <표 7-5>에서와 같다.

순생산량 조사 결과, 1조사지인 상수리나무림의 년순생산량은 총 42.09 ton/ha, 2조사지인 리기다소나무조림지는 총 28.75 ton/ha, 3조사지인 굴참나무림은 총 48.45 ton/ha, 4조사지인 리기다소나무조림지는 총 47.46 ton/ha인 것으로 나타났다.

2차림인 상수리나무림과 굴참나무림에서 년순총생산량이 조림지인 리기다소나무림보다 다소 떨어지는 원인은 1900년대 초반에 마을주변산림으로 인간의 간섭을 많이 받아 지피식물의 피도가 낮아 표토의 유실이 높게되므로써 그후 사방조림시 복구가 행하여진 곳으로 2차림에 비하여 총순생산량이 떨어지는 경향을 보였다.

<표 7-5> 식생과 위치별 년순생산량 비교

구 분	방위	stem wt.(Ws) ton/ha	branch wt.(Wb) ton/ha	leaves wt.(Wl) ton/ha	terrestrial organs(Wt) ton/ha
1. 상수리나무림	S	16.4	1.7	0.73	18.83
	N	20.1	2.2	0.96	23.26
	mean	18.25	1.95	0.85	42.09
2. 리기다소나무조림지	S	23.5	1.9	1.2	26.60
	N	26.10	3.5	1.3	30.90
	mean	24.8	2.7	1.25	28.75
3. 굴참나무림	S	52.9	5.8	2.3	61.00
	N	31.1	3.4	1.4	35.90
	mean	42.0	4.6	1.85	48.45
4. 리기다소나무조림지	S	58.6	5.02	2.3	65.92
	N	24.7	3.1	1.2	29.00
	mean	41.65	4.06	1.75	47.46

제 3 절 수생식물 환경생태 모니터링

1. 개론

농업생태계는 태양에너지를 근간으로 주변생태계와 에너지 및 물질순환을 통하여 인간의 먹을거리를 생산하는 인위적인 생태계이다. 최근의 농경방식은 과도한 화학물질의 투여, 무절제한 화학 살충제의 사용, 토양에 과부하를 주는 연작 등으로 더 이상의 생산량 증가가 나타나고 있지 않을 뿐만 아니라 주변생태계에도 큰 변화를 일으켜 환경오염 문제까지 유발하게 되었다. 따라서 지속적인 농업생산량을 유지하고 주변 생태계의 영향을 최소화하기 위해서는 농경지와 주변의 환경에 대한 지속적인 모니터링과 이를 통한 정보시스템을 확립하고 이를 근간으로 한 종합적인 환경관리시스템이 필요하다.

자연생태계에서 식생은 생태계내에서 일차 생산자이면서 토양, 지질, 수질, 기질 등의 여러 가지 환경요인에 따라 변화하는 특성을 가지고 있다. 일정지역의 식물상과 식생형태는 그 지역의 환경요인과 밀접하게 연관되어 있어 환경요인이 변하게 되면 그에 따라 식물상과 식생도 영향을 받는다고 한다 (최, 1992). 특히 하천변은 육상생태계와 수생태계의 전이지대이어서 하천변의 식생은 하천의 물리적 특성, 하천의 수리, 수문 특성, 수질 특성, 하변토양의 특성뿐만 아니라 주변 육상생태계의 종류, 토지이용, 교란 등에 의해 영향을 받을 것이다. 또한 하변지역의 식생은 하천의 범람, 침식, 인간행위 등의 외부의 교란에 크게 영향을 받는다고 알려져 있으므로 (Martin and Bouchard, 1993) 하변지역의 식생은 한 지역의 생태계 교란을 나타내는 좋은 지표가 될 수 있다.

한편, 하천 주변은 일종의 습지로서 하변이 만드는 독특한 물리, 화학적 환경과 이와 어우러지는 식생군집이 수생태계로 투입되는 오염물질의 영향을 완화하거나 정화하는 기능을 하고 있다 (Reimond 1994). 따라서 농경지 주변의 하변식생은 농경지 주변 생태환경의 변화를 평가하고, 농경에 의한 환경영향을 최소화하는 환경관리수단이라는 두 가지 측면에서 중요성을 가지고 있다.

그러나 이러한 중요성에 비해 이 분야의 우리 나라 연구는 미약한 실정이며, 무엇보다도 현재 우리 나라 하변에 서식하고 있는 식색종을 파악하는 일이 우선적으

로 이루어져야 하고, 이들의 서식환경을 분석하여 하변식생의 생태를 파악해야 할 것이다. 따라서, 농경지 주변 하변의 식생을 조사하고 서식환경요인을 식생종의 분포를 개체 및 군집수준에서 분석하여 하변식물 생태에 대한 기초자료를 구축하여야 할 것이다.

본 절에서는 농경지 주변 수생식물 생태환경 모니터링 기술개발을 위하여 연구대상지에 조사지점을 선정하여 식생 조사, 식생종 분포에 영향을 미치는 환경요인을 분석하는 생태조사, 토양호흡, 토양의 영양소 함량, 일차생산량, 식물의 영양소 함량 등의 조사를 수행함으로써 하변 생태계에서의 영양소거동 및 탄소순환 과정을 분석하고, 농경지 주변 하천환경과 농경지 이용간의 문제점을 파악하고 개선방안을 마련하고자 한다.

2. 연구방법

가. 대상지구 선정

본 연구의 조사 대상지역은 경기도 화성군에 위치한 발안천의 인근지역으로 위도 $37^{\circ} 10'$, 경도 $126^{\circ} 60'$ 에 위치하고 있다. 발안천은 화성군내의 야산을 분수령으로 하여 서해로 직접 유입되는 중규모의 하천으로 상류부에 기천지와 중류부에 발안지라는 저수지가 조성되어 있다. 본 연구의 조사지역은 기천지와 발안지를 포함하는 발안천의 중상류부 약 12km 구간으로서 최하류 조사지점의 유역면적이 약 26Km^2 이며, 하천주변은 대부분 농경지로 이용되고 있고 일부지역은 도시적 토지이용을 나타내고 있다.

연구 대상지내에 조사지점은 하류에서 상류까지 400-500m 간격으로 총 15개 지점을 선정하였다. 이 중 HS-1, HS-23, HS-22, HS-21, HS-2 지점이 중류부 저수지인 발안지 하류에 위치하며, HS-4, HS-52, HS-51, HS-5 지점은 발안지와 상류부 저수지인 기천지 사이에 위치하고, HS-6, HS-61은 기천지의 상류에 위치하고 있다. 한편 HS-31과 HS-3 지점은 발안지에 유입되는 지천에 위치하고, 농수로 주변의 식생과 하변 식생과의 차이를 살펴보기 위하여 HS-5*지점을, 범람원의 식생 차이를 살펴보기 위하여 HS-1*지점을 선정하여 하변의 조사와 동일한 조사를 실시

하였다.

선정된 조사지점의 개략적인 위치와 하폭, 하변폭, 경사 등의 물리적 환경 조사 결과는 <표 7-6>과 같다. 조사지점중 HS-1은 좌측 하변이 돌망태공법에 의한 하안공사가 완료되어 조사를 진행할 수 없었으며, HS-1*는 범람의 영향을 조사하기 위한 것이라 좌측 하변을 조사하지 않았고, HS-6의 좌측 하변은 방형구를 설치하였으나 하변공사로 인하여 6월 이후에는 조사를 진행할 수 없었다.

<표 7-6> 식생조사 방형구 설치 현황 및 서식처 환경조사 결과

지점명	위 치	방형구 수		방형구 모양		하폭 (m)	하변폭(m)		경사(°)		식생 피도 조사명
		좌	우	좌	우		좌	우	좌	우	
HS-6	기천지상류 마을입구	5	5	+	1 ¹⁾	1.5	8.3	11.7	20	40	
HS-61	기천지 유입부 다리 상류	5	5	-		8.2	2.2	8.6	20	30	#1
HS-5	기천지 방류구 하류	5	5	+		11.0	5.5	8.2	35	30	
HS-5*	기천지 하류 농수로	5	5	-	-	0.5	3.95	4.25	30	30	
HS-51	기천지 농경지 근처	5	5			2-5	4.5/9.0	8.0	30	30	#2
HS-52	기천지 하류 농로다리	5	5			5.8	8.0/3.5	10.0	30	30	#3
HS-4	팔탄-기천지 다리 상류	5	5	+	+	7.0	14	9.5	30	30	#4
HS-3	진입다리	5	5		+	5.4	3.0	5.7	10	30	
HS-31	평촌마을 입구	5	5	-	+	2.2	9.7	5.7	35	15	
HS-2	발안지 방류구 하류	5	6			5.4	34.0	23.0	5	5	#5
HS-21	녹생토 진입 다리 상류	5	5	+		9.8	6.5	7.5	20	35	#6
HS-22	차량 통과가능지 상류	5	5	+	+	12.0	6.9	11.7	15/30	30	#7
HS-23	약수터 하류	5	5	+		7.0	5.5	9.5	5/30	15/3	#8
HS-1	구장교 상류		5	-		12.4	-	11.8	-	5/30	#9
HS-1*	HS-1 상류 범람원		5	-		-	사주넓이 8 m		-	-	#10

¹⁾ 방형구 모양을 상징기호로 표시

농경하천의 특성을 도시형 하천과 산지형 하천 등과 비교하기 위한 조사 하천 및 조사지점은 <표 7-7>에서와 같다. 도시형 하천은 경기도 과천시 및 서울특별시 소재에 있는 탄천의 지천인 양재천을 선정하였고, 산지형 하천은 기존의 발안천과 경기도 양평군 서종면 노문리 소재의 북한강의 지천인 사기막천을 선정하였다. 조사지점은 각 하천의 상류로부터 하류에 이르는 지역을 선정하였다. (그림 7-16)은 각각의 조사지점의 광경을 보여주고 있다.

<표 7-7> 연구조사 하천 및 조사지점

발안천 지점명	위치	양재천 지점명	위치	사기막천 지점명	위치
PA-1	발안천 상류	YJ-1	관악산 입구 양재천 상류	SK-1	노문리 상류
PA-2	기천지 유입부 상류	YJ-2	선바위	SK-2	노문리
PA-3	기천지 방류구 하류	YJ-3	교육문화회관	SK-3	지그래미
PA-4	기천지 하류 농노다리	YJ-4	학여울 (탄천유입부)	SK-4	수입교 상류
PA-5	발안지 유입구 상류				



PA1 상기2리 경관



PA1.5 상기교



PA1- 발안천상기2리



PA2 기천저수지 유입구



PA3 기천저수지하류



PA4



PA4 경관



PA5 발안저수지상류

(그림 7-16) 조사지점의 광경

나. 연구의 방법

1) 식생피도 조사

각 조사지점에서 하천 흐름에 수직방향으로 $1 \times 1 \text{ m}^2$ 방형구를 5개 설치했다. 하변의 길이가 짧아 5개의 방형구가 일직선으로 배열되지 않을 경우는 하천흐름에 수직방향으로 3개, 좌우에 1씩 개의 방형구를 +자 모양으로 설치했고, +모양의 설치도 불가능한 경우에는 -자 모양으로 방형구를 설치하였다. (그림 7-17)은 조사지점인 하천주변에서 방형구를 설치하여 식생피도를 조사하는 광경을 보여주고 있다.



(그림 7-17) 식생피도 조사 광경

방형구내 식생조사는 4월의 예비조사를 거쳐 6월, 8월, 10월 4차례에 걸쳐 실시되었다. 매번 조사시 각 방형구내 모든 식물종에 대하여 피도를 조사하여 Braun-Blanquet의 방법을 수정한 피도등급으로 표시하였다 (Brower et al. 1990). 이렇게 조사된 피도등급과 절대빈도로부터 상대피도 (%)와 절대빈도 (%)를 계산하였고, 두가지 값의 평균값인 중요치 (%)를 산출하였다. 중요치는 한 지역에서 식물종이 얼마나 주요하게 분포하고 있는나를 나타내는 지표인데, 많이 출현하면서 넓은 범위를

차지하는 종의 중요치가 높게 나타난다. 즉, 우점종이 된다. 매회의 조사마다 출현된 식생을 동정하고 각 종마다 피도로부터 산출된 중요치를 바탕으로 우점종을 판단하였다.

종 조성을 군집 수준에서 살펴보기 위하여 계절별 조사지점별로 종 다양성 지수 (species diversity index)와 종 풍부도를 구하였다. 종 다양성 지수는 Shannon-Wiener diversity index (H')로 다음과 같은 식에 의해 구해진다.

$$H' = - \sum [(n_i / N) \times \ln (n_i / N)] \quad (7-1)$$

여기서, n_i : Importance value of each species, N : Sum of importance value of species 이며, 종 풍부도는 출현한 종수를 의미하며 각 조사지점에서 나타난 총 종수로 하였다.

2) 생물량 조사

조사지점간의 상대적인 거리와 두 개 저수지의 상·하류를 고려하여 15개의 식생 조사지점중 5개 지점을 생물량 조사지점으로 선정하였다. 선정된 5개 지점은 HS-23, HS-20, HS-40, HS-51, HS-61이다. 이 지점의 식생조사 방형구 5개중 하천에서부터의 거리가 다른 3개의 방형구를 선택하여 그 주변에 $1m^2$ 방형구를 설치하고 지면위의 모든 식물을 수확했다. 이전 해에 떨어진 잎을 제외했다. 수확한 식물은 현장에서 생중량을 측정하였고, 질량비 1/10씩을 방형구별로 분리하여 실험실에서 $80^\circ C$ 건조기에서 48시간 건조한 후 건중량을 측정하였다.

하변지역에서 생물량은 하변 식생의 종 조성을 결정하는 주요한 요인으로 알려져 있으며 (Day et al, 1988), 종 다양도와 풍부도는 생물량과 역비례 관계가 있음이 보고되고 있다. (Holt et al, 1994).

3) 토양환경조사

생물량 조사지점과 동일한 지점에서 토양환경조사를 위한 토양을 채취하였다. 토양은 생물량 조사를 위하여 식생을 수확한 방형구에서 5-10 cm 깊이의 토양을 약 200g을 채취하였다. 토양은 채취후 바로 수분함량을 측정하였고, 음건한 후 pH, 유기물 함량, 전질소함량, 총인, 칼륨, 토성 등의 토양 특성을 분석하였다.

토양의 pH는 dry soil 5g을 비이커에 넣고 25ml의 증류수를 가한 다음, 10-20분

간격으로 토양액을 유리막대로 저어 주며 1시간 후에 여과하여 pH meter로 측정하였다.

토양 수분함량은 식 (7-2)로부터 구하였다.

$$\text{Soil Moisture Content(\%)} = \frac{\text{fresh soil weight(g)} - \text{dry soil weight(g)}}{\text{dry soil weight(g)}} \times 100 \quad (7-2)$$

식 (7-2)에서 토양의 수분의 정의가 단위 건조토양 1g이 함유할 수 있는 수분의 g수이므로 토양이 매우 습할 경우에는 이 값이 100%를 넘을 수도 있다.

유기물 함량은 105℃에서 말린 토양의 무게를 잰 후 미리 건조시킨 도가니에 담아 450℃ 전기로에서 태운 다음 무게를 잰 다음, 다음 식 (7-3) 으로부터 구하였다 (Loss on Ignition Method).

$$\text{Organic Material Content(\%)} = \frac{\text{Ignited soil weight(g)} - \text{dry soil weight(g)}}{\text{dry soil weight(g)}} \times 100 \quad (7-3)$$

전질소함량은 micro-Kjeldahl법으로, 유효인은 pH 8.5로 조절된 0.5M NaHCO₃ 추출용액으로 추출한 후 발색시켜 측정하였다 (HITACHI U-2000 Spectrophotometer). 토양속의 칼륨의 함량은 2mm체를 통과시킨 토양 1g을 1N ammonium acetate 용액 25ml로 30분간 진탕한 다음 Whatman No. 44 filter paper로 여과시켜 만든 용액을 Shimadzu AA-680 atomic absorption spectrophotometer로 정량하였다 (Wilde et al, 1979).

토성 (soil texture)은 Ben Meadows Company에서 나온 soil texture unit를 이용하였다. 이 방법은 토양에 dispersingsolution (2% sodium pyrophosphate) 와 물을 넣고 혼합한 후 침전속도에 따라 모래, 미사, 점토의 양을 측정하는 hydrometer법이다.

4) 식생분포의 환경요인 분석

종의 분포에 미치는 환경요인을 파악하고 조사지점간의 유사성을 결정하기 위하여 중요치의 자료로 DCA (Detrended Correspondence Analysis) Ordination을 수행하였다 (Hill, 1979. Hill and Gauch, 1980. 최, 1992). Ordination이란 간접경사분석 (indirect gradient analysis)의 하나로서 종이나 sample plot을 그 유사도에 따라 추상적으로 구성된 축 위에 분포시키는 방법이다. Ordination의 graph 위에서 종의

조성이 비슷한 sample plot은 서로 가깝게 위치하게 된다. Ordination의 결과 계산된 각 sample plot의 axis와 환경인자간의 상관계수가 조사되면 종 조성을 다르게 만드는 주요 환경요인을 인지할 수 있게 된다.

식생의 군집수준의 종 조성과 환경요인간의 상관성을 알아보기 위하여 종 다양성 지수 및 종 풍부도와 환경인자간의 상관관계를 그림으로 도시하고 1차 회귀식과 2차 회귀식을 통해 상관성의 정도를 분석하였다.

3. 하천변 식생, 생물량, 토양 조사 분석 결과

가. 식생분포

1996년도의 계절에 따른 식생의 변화는 그 우점종 구성의 측면에서 식물생장기간의 초기인 4월을 제외하고 6월, 8월, 10월이 큰 차이를 보이지 않았다. 4월의 종분포의 특징은 봄에 모든 생장을 마치는 황새냉이 (*Cardamine flexuosa*)가 우점하였으며, 뚝새풀(*Alopecurus aequalis* var. *amurensis*)도 이 기간에 우점종으로 나타났다. 그러나 본격적으로 식물의 생장이 일어나는 시기인 6월 부터는 우점종의 구성이 고마리 (*Persicaria thubergii*), 뚝새풀 (*Alopecurus aequalis* var. *amurensis*), 쭉 (*Artemisia princeps*), 쇠뜨기 (*Equisetum arvense*) 등으로 바뀌었는데, 4월의 우점종과 이들을 대치할 종들이 함께 우점하는 것으로 나타났다.

따라서 이 시기 (6월)에 나타난 종수도 다른 시기에 비해 많았다. 식물의 최대 생장이 이루어지는 8월의 종구성은 6월의 식생분포에서 4월의 우점종이 사라지고, 고마리 (*Persicaria thubergii*)가 최우점종으로 나타났으며, 특히 환삼덩굴과 달뿌리풀 (*Phragmites japonica*), 돌콩 (*Glycine soja*), 쭉 (*Artemisia princeps*) 등이 우점하였다. 식물생장기간 말기인 10월의 식생은 종구성이나 종수에서 8월의 식생과 크게 다르지 않았다. 조사지점에 따른 식생의 분포는 큰 차이를 보이고 있지 않아 하천의 상하류간의 식생의 변화가 크지 않은 것을 알 수 있었으며, 우점종의 경우도 각 조사지점의 중요치 상위 5종은 그 순서만 다를 뿐, 그 구성은 대체로 유사하였다.

하천 흐름의 수직방향에 따른 식생의 분포 변화는 크게 나타나지 않았지만, 하천

과의 거리에 따라 우점종은 차이를 보였다. 4월에는 사초속의 식물이 하천과의 거리에 상관없이 우점하는 반면, 쑥과류의 식물은 하천에서 어느정도 떨어진 지점에서 우점하였다. 6월에는 쇠뜨기가 하천과의 거리에 상관없이 골고루 우점하였다. 8월의 경우에는 하천에 가까운 지점에서는 고마리가, 하천과 떨어져 있는 지점에서는 환삼덩굴이 우점하였다. 10월에도 8월과 유사한 현상을 보였으나, 환삼덩굴의 서식면적이 좀 더 하천쪽으로 확장하였음을 알 수 있었다.

종 다양성지수 (H')나 종 풍부도 (종수)는 6월에 가장 높고 점차 감소하는 계절적 변화를 보이고 있지만, 상하류간의 변화는 계절에 따라 일관성있는 경향을 보이고 있지 않았으며 하변 좌우의 차이도 나타나지 않았다 (<표 7-8>). 하천 흐름과 수직방향으로의 종 다양성지수와 종 풍부도는 하천에서 멀어질수록 증가하는 양상을 보였으나, 종다양성이 가장 높았던 6월에는 하천변의 중간지점에서 종다양성이 가장 높았다.

<표 7-8> 조사지점의 종 다양성 지수와 종 풍부도의 계절변화

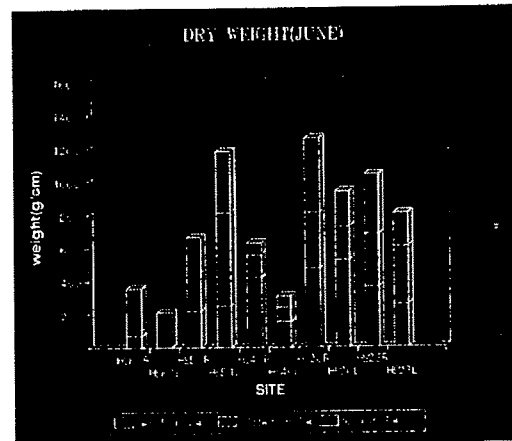
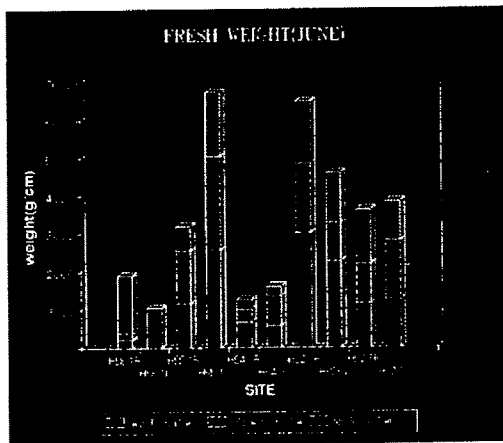
Site		Season							
		April		June		August		October	
		Richness	H'	Richness	H'	Richness	H'	Richness	H'
HS61	R	10	2.11	23	2.90	13	2.19	10	1.95
	L	21	2.81	31	3.28	24	2.64	12	2.33
HS51	R	16	2.67	28	3.18	9	1.96	13	2.36
	L	18	2.60	23	3.02	8	1.75	13	2.31
HS4	R	16	2.49	24	2.97	16	2.49	13	2.34
	L	11	2.15	24	2.91	14	2.63	23	2.87
HS2	R	17	2.75	33	2.90	18	2.38	16	2.61
	L	7	2.14	17	2.53	12	2.71	14	2.44
HS23	R	18	2.56	27	2.48	16	3.17	16	2.56
	L	10	2.16	16	3.17	11	2.48	18	2.74

* 종 다양성 지수 (H' : Shannon-weiner index)

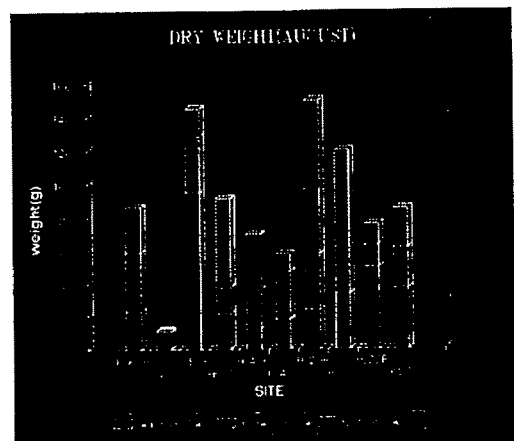
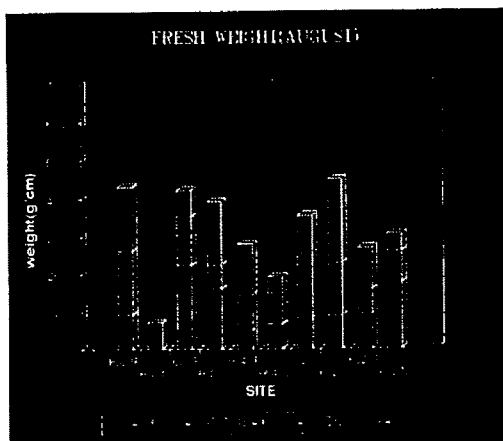
나. 생물량

생물량은 하천에서 중간적 거리에 있는 지점에서 변이가 없이 고르게 나타났으며, 특히 최대 생장시기인 8월에 매우 적은 변이를 보이고 있다. 하천과 멀리 떨어진 지점의 경우에는 조사지점마다 생물량은 일정한 경향이 없이 큰 폭으로 변동하고 있다. 하천에 가까운 지점에서는 HS-40 지점을 축으로 다른 양상을 보이는데 HS-40보다 상류부에서는 높은 생물량 값을, HS-40보다 하류부에서는 낮은 생물량 값을 보이고 있다.

(그림 7-18)과 (그림 7-19)는 각각 1996년도의 측정점별 6월과 8월의 생물량의 변화를 보여주고 있다.



(그림 7-18) 6월의 측정점별 생물량



(그림 7-19) 8월의 측정점별 생물량

다. 토양환경

토양환경 조사는 토양의 물리 화학적 특성을 조사 분석하였으며, 그 결과는 <표 7-9>와 <표 7-10>에 나타내었다. 각각의 특성을 고찰하면 다음과 같다.

<표 7-9> 측정별 토양수분, pH, 유기물량 조사 결과 (6월)

Site	Water Cotent(%) [*]			pH			Organic Matter(%) ^{**}		
	N	M	F ^{***}	N	M	F	N	M	F
HS61R	7.18	4.17	2.25	5.18	5.12	4.8	7.12	7.87	6.93
HS61L	4.02	-	-	6.4	-	-	5.79	-	-
HSR1R	14.55	9.29	10.62	6.18	5.64	5.4	4.01	2.16	3.13
HS51L	10.50	8.34	10.50	4.97	6.36	5.12	2.06	3.40	3.38
HS40R	30.72	18.34	12.11	5.38	4.92	5.4	2.72	2.94	3.30
HS40L	21.95	11.86	3.73	5.1	5.02	5.04	0.10	3.29	2.11
HS20R	17.92	41.04	14.55	6.61	5.66	5.6	3.03	4.51	4.02
HS20L	36.05	3.52	5.26	6.42	5.77	6.18	3.09	2.48	2.15
HS23R	3.09	4.93	7.64	6.44	5.38	5.6	1.03	1.04	4.46
HS23L	29.53	34.77	33.16	5.73	5.6	6.17	1.74	1.81	3.20

* Water Cotent = (Weight of Wet Soil-Weight of Dry Soil) / Weight of Dry Soil × 100

** Organic Matter = (Weight of Dry Soil-Weight of Ignified Soil) / Weight of Dry Soil × 100

*** N : Near from River M : Middel from River F : Far from River

<표 7-10> 측정별 토양수분, pH, 유기물량 조사 결과 (8월)

Site	Water Cotent(%) [*]			pH			Organic Matter(%) ^{**}		
	N	M	F ^{***}	N	M	F	N	M	F
HS61R	6.64	11.02	9.06	5.05	5.29	4.58	1.50	2.16	3.57
HS61L	27.17	-	-	4.61	-	-	4.76	-	-
HSR1R	52.42	58.78	2.49	4.78	6.31	4.94	2.19	2.87	0.70
HS51L	137.03	41.8	2.92	5.07	5.06	5.98	6.03	3.44	2.69
HS40R	17.64	24.23	4.84	5.34	4.96	4.47	1.60	1.93	4.41
HS40L	21.16	46.67	8.42	4.59	4.91	4.38	1.14	3.98	1.01
HS20R	13.11	13.16	15.02	5.12	4.77	4.91	3.06	3.21	3.65
HS20L	9.6	23.17	7.44	5.06	4.99	4.96	1.45	3.00	1.03
HS23R	36.55	31.09	6.6	5.32	5.15	4.87	2.49	3.24	4.26
HS23L	3.58	15.92	11.26	5.16	5.18	4.80	2.85	1.54	2.75

1) 물리·화학적 특성

하천변의 토양의 성질은 대부분이 모래였다. 이러한 성질은 상하류간에 큰 차이가 없었으며, 하천으로부터 거리가 멀어질수록 모래의 함량이 줄어들었으나, 크게 변하지는 않았다 (<표 7-11>).

<표 7-11> 조사 측정점의 토성 분포

Site	Near from River			Middle from Rive			Far from River		
	Sand(%)	Clay(%)	Silt(%)	Sand(%)	Clay(%)	Silt(%)	Sand(%)	Clay(%)	Silt(%)
HS61R	62.50	5.00	32.50	61.25	6.25	32.50	86.25	6.25	7.50
HS61L	96.25	3.75	0.00	91.25	3.75	5.00	65.00	7.50	27.50
HSR1R	90.00	1.25	8.75	91.25	5.00	3.75	77.50	3.75	18.75
HS51L	90.00	2.50	7.50	92.50	5.00	2.50	90.00	5.00	5.00
HS40R	92.50	2.50	5.00	87.50	6.25	6.25	87.50	3.75	8.75
HS40L	95.00	2.50	2.50	97.50	1.25	1.25	92.50	5.00	2.50
HS20R	90.00	3.75	6.25	83.75	2.50	13.75	86.25	5.00	8.75
HS20L	88.75	2.50	8.75	82.50	6.25	11.25	96.25	3.75	0.00
HS23R	96.25	3.75	0.00	95.00	3.75	1.25	81.25	2.50	16.25
HS23L	92.50	6.25	1.25	88.75	3.75	7.50	87.50	6.25	6.25

2) pH

토양의 pH는 하천의 상하류 방향으로 일반적인 경향은 보이지 않았지만, 하천으로부터 거리가 멀어질수록 pH가 감소하는 양상을 보였다. 계절별로는 8월에 가장 낮았으며, 10월에 가장 높은 값을 나타냈다. 이러한 계절에 따른 pH의 변화는 하천으로부터 중간적 거리의 지점에서 가장 적은 폭을 보였으나, 하천에서 가까운 지점과 먼 지점에서는 계절별 pH의 변화가 중간 지점에 비해 다양하게 나타났다.

부록 V는 각 측정점에 대한 계절별 토양의 pH 측정결과를 보여주고 있다.

3) 토양함수비

토양의 수분함량은 상하류간 변화에 경향을 찾을 수 없었다. 그러나 하천에서 가까운 지점에서는 수분함량의 계절적 변이가 크지 않았으나, 중간 지점과 먼 지점에서는 계절적 변이가 크게 나타남을 알 수 있었다. 특히, 중간 지점에서는 8월에 수분함량이 높고, 10월에 낮은 양상을 보였고, 먼 지점에서는 반대로 10월에 대체적으로 높은 값을, 8월에 낮은 값을 나타냈다.

부록 V에서는 각 측정점에 대한 토양습도 측정결과를 보여주고 있다.

4) 유기물함량

유기물함량의 경우, 상류에서 하류로의 지점별 차이는 6월과 8월에 하천에서 가까운 지점들에서 약간 나타났다. 하천으로 중간 거리의 지점과 먼 지점에서는 계절별 변이와 지점별 변이가 적었다. 전체적으로는 10월에 가장 낮은 값을 보였고, 6월이 대체적으로 높은 값을 나타냈다. 중간 지점에서는 6월과 8월의 유기물 함량이 유사하였고, 먼 지점에서는 6월의 유기물 함량이 다른 계절보다 약간 높은 값을 보였다.

부록 V에서는 각 측정점별 계절별 토양 유기물함량을 보여주고 있다.

5) 토양의 화학적 특성

토양속의 총질소 함량은 계절별, 조사지점별 변화의 일관성을 보이지 않았다. 그러나 대체적으로 8월의 총질소 함량이 낮았고, 10월이 총질소 함량이 높았다. 토양속의 총인의 함량은 기천지와 발안지 사이의 지점들의 값이 낮았고 발안지 하류 지점들의 값이 높은 편이었으며, 특히 기천지 상류의 HS-61지점의 6월의 값이 매우 높았다. 칼륨함량은 10월에 대체적으로 높았고 6월과 8월의 함량은 비슷하였다. 하천으로부터 거리별 칼륨의 함량은 일정한 경향을 보이지 않았다.

부록 V에서는 토양내의 총질소, 총인, 칼륨의 측정결과를 보여주고 있다.

4. 하천변 식생과 환경요인

가. DCA분석

4월 식생의 DCA는 특이한 분포를 보였다. 하천에서 우측 하변과 좌측 하변이 축1을 따라 나뉘어지는 양상을 보였다. 축2에 따른 각 조사지점의 분포는 우측 하변 지점들이 축2을 따라 길게 분포하는 반면, 왼쪽 하변지점들은 오른쪽에 비해 약간 몰려서 분포하였다. 6월의 식생은 축1을 따라 우측 하변 지점들이 큰 값을 차지하며, 왼쪽 하변 지점들은 축1의 작은 값들을 가지고, 중간값에서 우측 하변 지점과 왼쪽 하변 지점들이 만난다. 이러한 분포는 4월의 식생 분포가 축1에 의해 극단화되어 있다가 완화되는 경향을 보여준다. 8월의 식생의 DCA분포는 더욱 중간 값에 집중하고 있음을 나타내었다. 10월의 DCA분포는 축1과 축2에 따라 골고루 분포함을 보이고 있다.

부록 V에서는 계절별 식생의 DCA 분석 결과를 보여주고 있다.

나. 식생과 환경요인의 관계

먼저 DCA 분석의 축1과 여러 가지 환경요인간의 상관관계를 살펴보았다. 상관관계가 특별하게 높은 환경요인은 없었으나, 축1은 토양의 유기물함량과 가장 높은 상관성을 보였으며, 축2는 토양의 칼륨함량과 상관성이 높았다. 부가적으로 여러 가지 환경요인들간의 상관관계도 살펴보았는데, 유기물 함량과 총인, pH와 유기물 함량, pH와 생물량, 총인과 총질소, 총질소와 생물량 순으로 상관관계가 높았다.

<표 7-12>는 DCA 분석의 축1과 다양한 환경인자들간의 상관분석 결과를 나타내고 있고, <표 7-13>은 DCA 분석의 축2와 다양한 환경인자들간의 상관분석 결과를 보여주고 있다.

종 다양성지수 및 종 풍부도와 환경요인과의 관계에서도 높은 상관관계를 가진 환경요인은 나타나지 않았다. 대개의 환경요인들이 종 다양성의 지표값들과 소수 2자리 이하의 상관계수를 보이고 있지만 토양습도는 0.218에서 0.246의 상관계수를 보이고 있다. <표 7-14>는 종다양성 지수와 다양한 환경변수들간의 상관관계를 나타내고 있으며, 종 다양도 지수와 환경인자의 상관관계와 종 풍부도 지수와 환경인자의 상관관계는 부록 V에 나타낸 바와 같다.

<표 11-12> DCA 분석의 축1과 다양한 환경인자들간의 상관분석

	Axis 1	Biomass	Soil pH	WC(%)	OM(%)	T-N(mg/g)	T-P(μ g/g)	K(mg/g)
Axis 1	1.000							
Biomass	0.060	1.000						
Soil pH	-0.170	-0.414	1.000					
WC (%)	0.143	-0.206	-0.001	1.000				
OM (%)	0.419	0.365	-0.504	-0.067	1.000			
T-N (mg/g)	0.041	-0.307	0.298	0.372	-0.072	1.000		
T-P (μ g/g)	0.287	-0.219	0.025	-0.065	0.639	0.343	1.000	
K (mg/g)	0.230	-0.292	0.269	0.240	-0.025	0.184	0.306	1.000

Environmental measures with their abbreviation are as follows: Biomass (g/m²): Biomass, Soil Water Content (%): WC, Loss on ignition (%): OM, Total Nitrogen (mg/g): T-N, Total Phosphate (μ g/g): T-P, Potassium (mg/g): K

Correlation analysis: Pearson's product-moment coefficient

<표 11-13> DCA 분석의 축2와 다양한 환경인자들간의 상관분석

	Axis 2	Biomass	Soil pH	WC(%)	OM(%)	T-N(mg/g)	T-P(μ g/g)	K(mg/g)
Axis 2	1.000							
Biomass	-0.232	1.000						
Soil pH	0.080	-0.414	1.000					
WC (%)	0.047	-0.206	-0.001	1.000				
OM (%)	-0.068	0.365	-0.504	-0.067	1.000			
T-N (mg/g)	-0.009	-0.307	0.298	0.372	-0.072	1.000		
T-P (μ g/g)	0.024	-0.219	0.025	-0.065	0.639	0.343	1.000	
K (mg/g)	0.446	-0.292	0.269	0.240	-0.025	0.184	0.306	1.000

Environmental measures with their abbreviation are as follows: Biomass (g/m²): Biomass, Soil Water Content (%): WC,

Loss on ignition (%): OM, Total Nitrogen (mg/g): T-N, Total Phosphate (μ g/g): T-P, Potassium (mg/g): K

Correlation analysis: Pearson's product-moment coefficient

<표 11-14> 종다양성 지수와 다양한 환경변수들간의 상관관계

	Species diversity													
	Shannon-weiner index								No. of species					
	y = a + bx				y = a + bx + cx ²				y = a + bx			y = a + bx + cx ²		
	a	b	r ²	a	b	c	r ²	a	b	r ²	a	b	c	r ²
Biomass(gDM/m ²)	2.56	0.0003	0.009	2.457	0.002	-0.000004	0.059	2.55	0.0003	0.009	2.45	0.002	0.000004	0.05
pH	2.59	0.003	0.00005	1.305	0.460	-0.040	0.002	13.13	0.838	0.006	-25.87	-14.69	-1.21	0.01
Water content (%)	2.91	0.015	0.218	2.757	0.0006	-0.0003	0.246	23.46	-0.264	0.242	24.25	-0.339	0.001	0.245
Loss on ignition (%)	2.49	0.049	0.028	2.460	0.0675	-0.0025	0.029	14.22	1.453	0.085	13.25	2.153	-0.098	0.09
Total-N (mg/g soil)	2.67	-0.013	0.002	1.922	0.293	-0.0293	0.022	18.81	-0.212	0.001	-4.06	9.171	-0.899	0.064
Total-P (μg/g soil)	2.57	0.003	0.006	2.674	-0.011	0.0003	0.024	16.63	0.099	0.024	17.04	0.043	0.001	0.025
K (mg/g soil)	2.78	-1.231	0.060	2.997	-4.500	9.5750	0.087	21.06	-23.04	0.07	23.16	54.72	92.8	0.08

5. 수생식물의 식생분포

가. 식생피도 조사지점

식생피도 조사는 하천의 상류로부터 하류에 이르는 지역에 <표 7-14>에서와 같이 조사지점을 선정하였다. 각 조사지점에서 하천의 폭을 한 축으로 방형구를 설치하였고, 방형구의 격자 크기는 $1 \times 1 \text{ m}^2$ 로 하였다. 각 조사지점에서 $1 \times 1 \text{ m}^2$ 방형구 5개를 임의로 선정하여 방형구내 존재하는 모든 대형수생식물을 Braun-Blanquet 피도 등급으로 조사하여 중요치를 산출하였다.

각 조사지점의 하변 1m내의 식물을 조사하기 위해 양 하변에 각각 1 m^2 의 방형구 설치하여 피도조사를 수행하였고, 조사 결과를 바탕으로 조사지점별 종다양성 지수와 종풍부도를 산출하였다.

<표 7-14> 연구 조사 지점

지점명	표시명	위치	하변폭 (m)
HS-5	#1	기천지 방류구 하류	10
HS-51	#2	기천지 농경지 근처	15
HS-52	#3	기천지 하류 농노다리	6
HS-4	#4	팔탄-기천지 다리 상류	9
HS-2	#5	발안지 방류구 하류	3
HS-21	#6	녹생토 진입 다리 상류	8
HS-22	#7	차량 통과가능지 상류	10
HS-23	#8	약수터 하류	10
HS-1	#9	구장교 상류	26
HS-1*	#10	HS-1 상류 사주부근	4

나. 조사방법

1) 식생피도 조사

하천의 상류로부터 하류에 이르는 지역에 10 곳의 조사지점을 선정하였다. 각 조사지점에서 하천의 폭을 한 축으로 방형구를 설치한 후 그 방형구를 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 의 격자로 나누었다. 각 조사지점에서 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 방형구 5개를 임의로 선정하여

방형구 안에 존재하는 모든 대형수생식물을 Braun-Blanquet 피도 등급으로 표시하였다 (Brower et al. 1990). 각 조사지점의 하변 1 m 내의 식물을 조사하기 위해 양 하변에 각각 1 m² 크기의 방형구를 설치하여 피도 조사를 하였다. 조사한 피도 등급과 절대빈도로부터 상대 피도 (%)와 절대빈도 (%)를 계산하였고, 두 가지 값의 평균값으로부터 중요치 (%)를 산출하였다. 조사지점별로 종다양성 지수와 종풍부도는 다음과 같은 식에 의해 계산하였다.

Shannon-Wiener diversity index (H')

$$H' = - \sum \{ (n_i / N) \times \ln (n_i / N) \} \quad (7-4)$$

여기서 n_i 는 각 종의 중요치이고, N 은 전체 종의 중요치 합을 나타낸다. 종풍부도는 조사 방형구 안에 출현한 전체 종수를 의미한다.

2) 생물량 조사

각 조사지점에서 식생조사 방형구 5개중 3개를 선택하여 0.5m²내 모든 식물을 수확하여 실험실로 옮겼다. 수확한 식물체는 실험실에서 종별로 나누어 세척한 다음 80℃ 건조기에서 48시간 동안 건조시킨 다음 무게를 측정하였다.

3) 토양환경 조사

각 생물량 조사 지점에서 저토를 채취하여 실험실로 옮겼다. 채취한 토양은 그늘에서 말린 다음 pH, 유기물 함량, 총질소함량, 총인 등의 토양특성을 분석하였다. 토양의 산도는 그늘에서 말린 토양 5 g을 비이커에 넣고 25 ml의 중류수를 가한 후 30분간 진탕하고 페하미터(pH meter)로 측정하였다. 유기물 함량은 450 ℃ 전기로에서 태운 후 작열소실법에 의하여 측정하였다.

다. 식생분포 조사 분석 결과

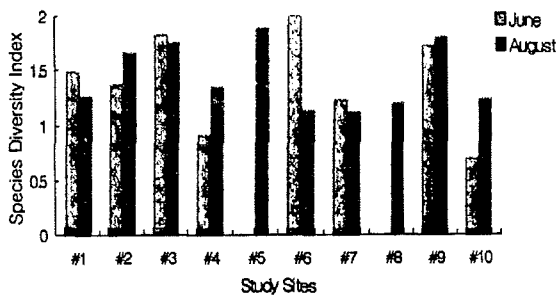
하천내에 서식하는 수생식물의 분포는 검정말과 붕어마름이 가장 높은 중요치를 보였으며, 상류에서 하류에 이르기까지 고른 분포를 나타내었다. 6월의 하천변 식생의 종수는 8월에 비해 높았으며, 6월과 8월 모두 고마리가 가장 높은 중요치를 보였다.

연구 장소에서 하천내에는 검정말과 붕어마름이 우점하고 있으며, 하천에서 가장 근접한 지역내에는 고마리가 서식하고 있었으며, 하천변식물의 종다양성은 지점간의

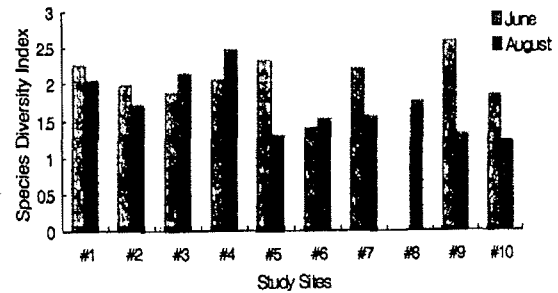
차이가 수생식물의 종다양성에 비해 고른 분포를 보임을 알 수 있었다.

하천변식물의 종다양성지수는 (그림 7-20)에서 보는 바와 같이 수생식물보다 각 지점에서 더 높게 나타났다.

수생식물의 종풍부도는 상류에서는 8월이 6월에 비해 높았으나, 하류지점에서는 6월에 비해 8월이 높았다. 하천변식물의 종풍부도는 하류지점에서 뚜렷하게 8월에 비해 6월이 더 높은 값을 나타내었다. (그림 7-21)은 측점별 종풍부도를 보여주고 있다.

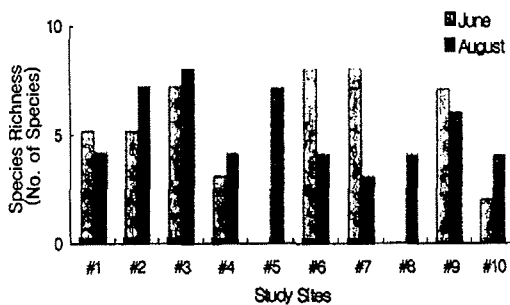


(a)

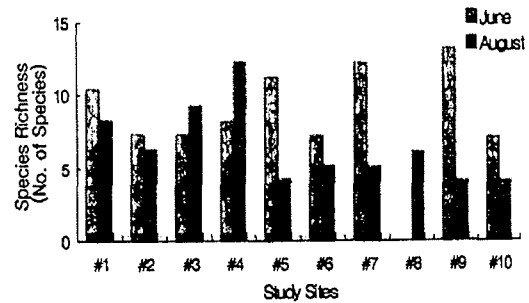


(b)

(그림 7-20) 연구지점의 종다양성 (a; 수생식물, b; 하천변식물)



(a)



(b)

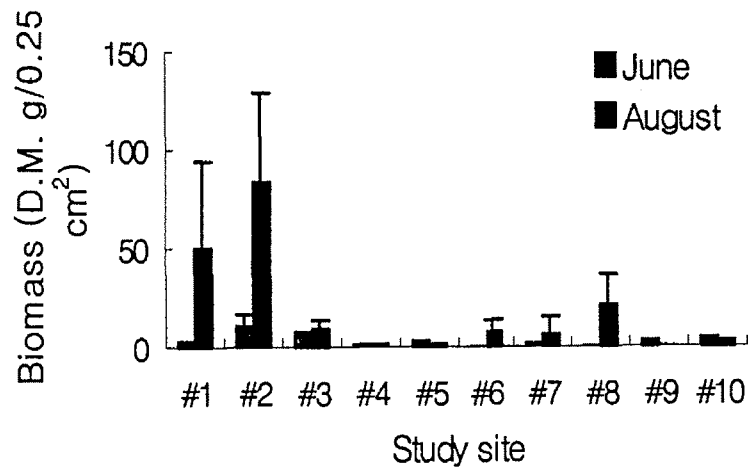
(그림 7-21) 연구지점의 종풍부도 (a; 수생식물, b; 수변식물)

라. 생물량 조사 분석 결과

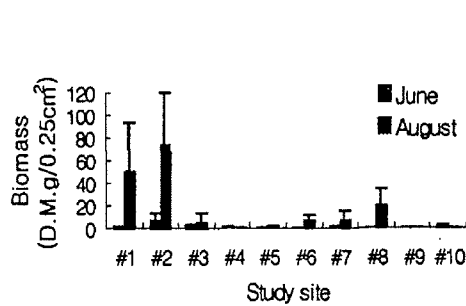
식물생물량은 하류보다 상류에서 높았고, 6월부터 8월 사이에 급속하게 증가했다가 10월에는 감소하였다. 각 지점별 총생물량의 분포는 상류지역인 #1, #2, #3 지역에서 점차 높았다가, 발안저수지 상류입구인 #4지점과 하류지역인 #5 지역에는 생물량의 값이 매우 적었다. #5지역은 저수지 배수로 인접지역으로서, 심한 하상 변화가 식물생육에 저해작용을 한 것으로 추측된다. #6지점부터 생물량의 값은 다소 증가하였다. 그러나 상류지역과 비교할 때 하류지역은 사람에 의해 영향을 상대적으로 많이 받아 총생물량이 낮은 것으로 보인다. 식물종의 생물량을 비교하면 검정말이 가장 높았고, 그 다음은 붕어마름이었다. 검정말과 붕어마름은 같은 지점에서 서식하는 경향이 있었으며, 말과 말죽은 일부지점에서만 출현하였으며 생물량도 적었다. 상류는 하류에 비해 보가 많고 유속이 느려 수생식물에 유리한 서식처를 제공하여 생물량이 큰 것으로 판단된다. 계절별로는 검정말의 경우 8월에 생물량이 가장 컸으며, 10월에는 감소하였다. 붕어마름은 연구지점 2에서 오히려 8월보다는 10월에 생물량이 급격하게 증가하였다. 그리고 검정말에 비해 전체적으로 생물량이 10월에 많이 감소하지는 않았다.

말과 말죽은 하폭이 좁고 유속이 빠른 연구지점 3에서 말과 말죽은 10월에 그 생물량이 매우 컸지만 검정말은 거의 출현하지 않았다. 상대적으로 보가 많고 하폭이 넓어 유속이 느리며 하상 침전물이 많은 연구지점1과 2에서는 검정말과 붕어마름이 우점하고 말과 말죽이 상대적으로 매우 적은 생물량을 보여 유속은 생물량의 크기 뿐만 아니라 종 분포에도 큰 영향을 준다는 사실을 알 수 있다.

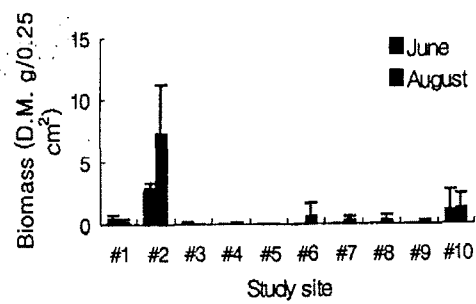
(그림 7-22)는 총 생물량을 측정별로 보여주고 있으며, (그림 7-23)은 각 생물에 대한 측정별 총 생물량을 보여주고 있다. 이러한 결과는 조사지점의 상류가 하류에 비해 유속이 느리고 보가 많이 있기 때문에 상류지역의 생물량이 더 큰 것으로 보인다.



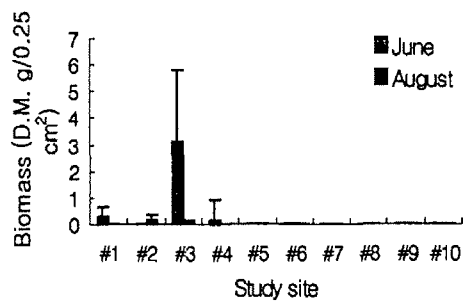
(그림 7-22) 조사지점의 총 생물량



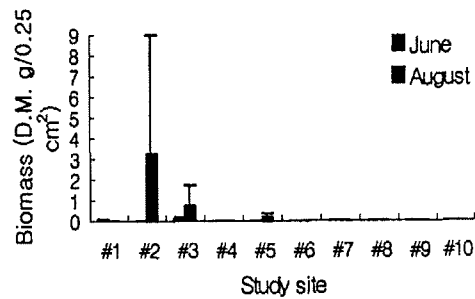
(a)



(b)



(c)



(d)

(그림 7-23) 조사지점의 총 생물량 (a; 검정말, b; 붕어마름, c; 말, d; 말짚)

마. 토양환경 조사 분석 결과

토양환경 조사 결과, 저토의 pH는 5~6사이의 값을 나타내었고, 저토의 유기물 함량은 상류지점에서 높았으며, 하류쪽이 낮아지는 경향을 보였다. <표7-15>는 조사지점의 토양특성값을 나타내고 있다.

<표 7-15> 연구지점별 계절에 따른 토양특성

Study sites	Soil characteristics			
	June			
	pH	Organic matter (%)	Total nitrogen (mg/g)	Phosphate ($\mu\text{g/g}$)
#1	5.32 \pm 0.17	2.12 \pm 0.59	17.0 \pm 0.68	4.21 \pm 0.80
#2	5.86 \pm 0.24	2.42 \pm 0.69	17.2 \pm 2.36	4.12 \pm 1.29
#3	5.62 \pm 0.43	2.07 \pm 0.60	15.1 \pm 2.95	3.51 \pm 1.35
#4	5.46 \pm 0.18	1.89 \pm 0.75	6.67 \pm 2.39	1.67 \pm 0.52
#5	6.07 \pm 0.18	1.94 \pm 0.66	4.60 \pm 0.64	4.55 \pm 2.26
#6	5.70 \pm 0.42	1.94 \pm 1.32	8.19 \pm 2.21	3.06 \pm 0.24
#7	6.09 \pm 0.33	1.29 \pm 0.17	9.10 \pm 0.89	3.47 \pm 1.54
#8	5.83 \pm 0.10	1.55 \pm 0.58	8.40 \pm 0.64	3.98 \pm 2.52
#9	6.21 \pm 0.24	1.74 \pm 1.28	5.47 \pm 0.50	2.57 \pm 1.06
#10	6.07 \pm 0.22	1.23 \pm 0.27	6.91 \pm 1.87	3.02 \pm 0.83
August*				
#1	5.39 \pm 0.86		26.4 \pm 16.3	2.76 \pm 1.63
#2	5.21 \pm 0.42		28.7 \pm 8.02	5.22 \pm 1.34
#3	6.32 \pm 0.03		16.3 \pm 4.43	4.51 \pm 1.75
#4	6.46 \pm 0.24		31.7 \pm 5.20	6.51 \pm 1.06
#5	6.12 \pm 0.31		43.3 \pm 51.3	10.3 \pm 9.17
#6	5.54 \pm 0.46		50.9 \pm 53.4	8.73 \pm 6.57
#7	6.03 \pm 0.24		12.5 \pm 1.04	3.04 \pm 0.92
#8	6.38 \pm 0.27		11.6 \pm 0.49	3.86 \pm 0.15
#9	6.05 \pm 0.56		12.7 \pm 1.67	3.15 \pm 0.62
#10	5.82 \pm 0.38		15.8 \pm 3.98	3.66 \pm 1.82

6. 농경하천의 특성 비교

가. 조사방법

개발된 지표식물 및 모니터링 기법의 타당성을 검증하기 위해 농경형 하천과 상이한 성격을 지닌 도시형 하천 및 산지형 하천과의 비교 연구를 수행하였다. 농경형 하천에 널리 존재하는 저수지에 의한 상하류 하천생태계의 영향에 대한 조사를 통해 모니터링 지점 및 주기에 대한 정보의 제공이 가능해질 것이다.

즉, 농경하천의 특징적인 구조물 중의 하나인 저수지가 저수지 상하류의 하변생태계에 미치는 영향을 평가하고, 토양호흡, 토양의 영양소 함량, 일차생산량, 식물의 영양소 함량 등을 조사함으로써 하변생태계에서의 영양소거동 및 탄소순환을 조사하여 향후 하천생태계의 물질수지모형 개발을 위한 기초자료를 제공하기 위함이다.

1) 조사하천 및 조사지점의 선정

조사하천 및 조사지점의 선정은 앞서 서술한 바와 같이 도시형 하천은 양재천, 산지형 하천은 사기막천을 선정하여 각 하천의 상류로부터 하류에 이르는 지역에 조사지점 선정을 선정하였다.

2) 토양호흡량 조사

토양호흡을 현장에서 측정하는 방법으로 널리 이용되는 것에는 Alkali absorption method (A-A method), Open-flow infrared gas analyzer method (O-F method), Closed chamber method (C-C method), Dynamic closed chamber method (D-C method) 등이 있다. 이 중 O-F, C-C, D-C method 들이 비교적 균일한 결과를 보여준다고 알려져 있다. 따라서, 본 연구에서는 O-F method에 입각한 토양호흡측정장비(EGM-2, PP systems)를 이용해 각 조사지점에서 토양호흡을 측정하였다.

3) 식물 조사

각 조사지점에서 임의로 선정된 세 곳에 대해 25cm×25cm의 방형구 안에 들어오는 모든 식물의 지상부를 수거한 후, 수거된 샘플을 건조기에서 75°C에서 48시간 이상 건조된 후, 건조질량 측정에 이용하였다. 건조된 식물을 분쇄하여 2mm 체로 친 후, digestion을 거쳐 자동분석기를 이용해 총인, 총질소를 분석하였다.

나. 연구 조사 결과

토양호흡의 연구 조사 결과, 발안천, 양재천, 사기막천에서 7월, 8월 중에 모두 토양호흡이 증가하는 경향을 보였다. 이는 지온의 증가에 의한 영향으로 보여진다. 토양호흡은 양재천, 발안천, 사기막천 순으로 높은 수치를 보여준다. 이러한 차이는 세 하천간의 유기물 함량의 차이에 의한 것으로 보여진다. 양재천과 사기막천에서 상류에서 하류로 갈수록 토양호흡이 증가하는 경향이 나타나는 반면에 발안천에서는 뚜렷한 양상을 발견할 수 없었다. 일반적으로 하변토양의 유기물 함량은 하류로 갈수록 증가한다. 그러나 발안천은 기천지와 발안지에 의한 여과효과가 기대되므로 일반적인 양상을 적용하기 힘들다. 이러한 유기물 함량의 종적인 변화양상이 토양호흡에 영향을 미친 것으로 기대된다.

조사지점의 토양유기물 함량은 양재천, 사기막천에서 하류로 갈수록 증가하는 반면에 발안천에서는 종적으로 증감을 보여 주었다. 이는 보에 의한 효과로 보여지며, 이러한 효과는 토양호흡과 토양수분함량에도 영향을 미치는 것으로 보여진다.

하변토양의 토성은 퇴적물의 특성을 나타내는 자료로 사용될 수 있다. 하류로 갈수록 모래의 비율이 작아지고 점토의 비율이 커지는 일반적인 양상을 보인다. 지난 여름의 폭우가 지나간 후, 양재천의 경우 이러한 종적인 특성이 잘 나타나고 있는 반면에 사기막천과 발안천에서는 오히려 중상류에서 모래의 비율이 감소하는 양상을 보여주었다. 이는 보와 하변식생에 의한 효과와 조사지점의 하폭, 유속과도 관계된 것으로 파악된다.

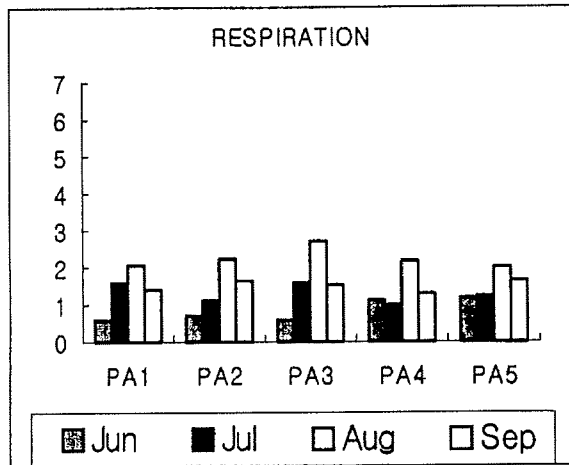
토양호흡, 지온, 토양수분, 토양유기물함량간의 상관성 분석결과 동일 시점의 조사에서는 지온이, 전 기간에 걸쳐선 수분과 유기물 함량이 높은 상관성을 보여주었다. 이들 요인들간의 보다 자세한 상관관계를 도출해내기 위한 통계분석이 시행될 예정이다.

기타 토사퇴적량과 대기로부터의 영양염 유입을 정량화하기 위한 실험이 고안되었으나, 설치장비의 훼손과 분실로 인해 유의미한 자료를 얻기가 어려웠던 관계로 본 분석에서 제외하였다.

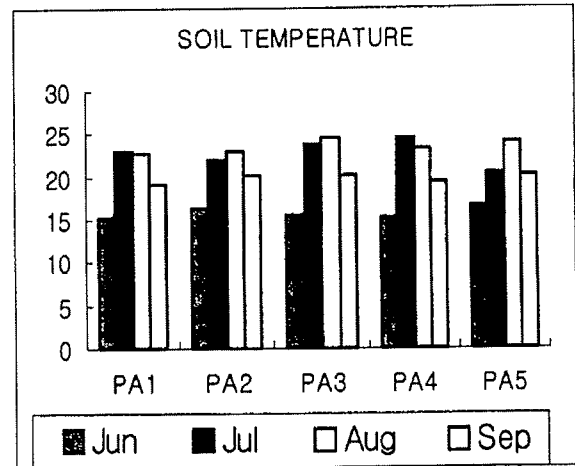
각각의 연구 조사 결과는 다음과 같다.

1) 토양호흡, 지온, 토양수분, 토양유기물 함량 조사 결과

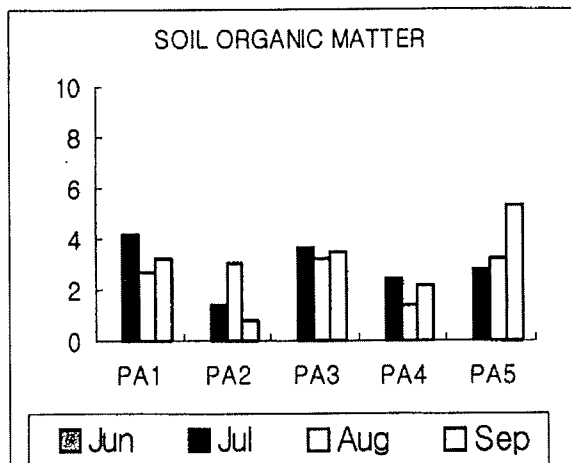
발안천 지구의 토양호흡, 지온, 토양수분, 토양유기물 함량 조사 결과는 (그림 7-24)에서와 같다.



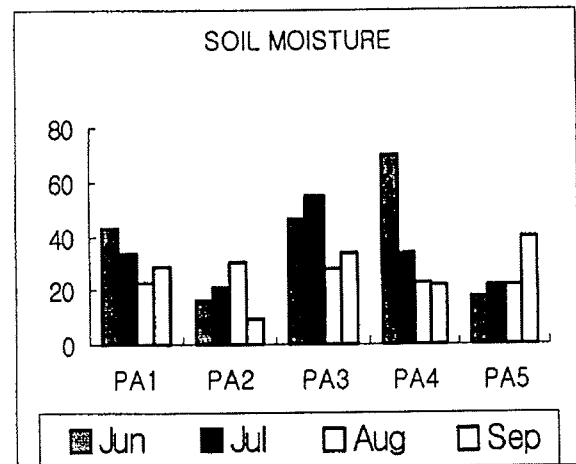
(A)



(B)



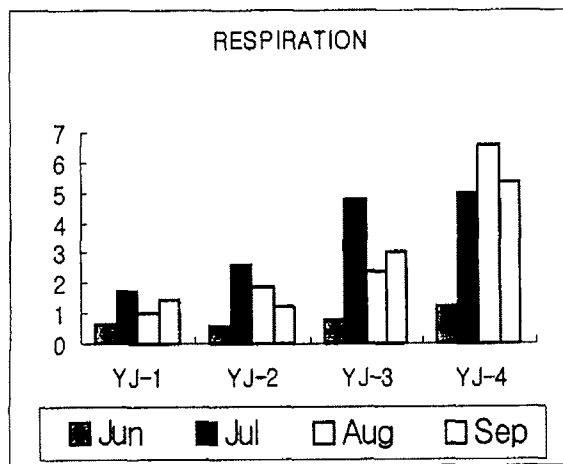
(C)



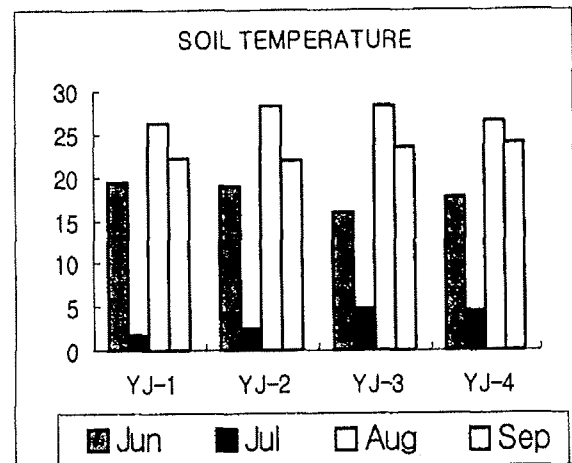
(D)

(그림 7-24) Longitudinal variations of (A) soil respiration, (B) soil temperature, (C) soil moisture, and (D) soil organic content in riverine wetlands of Palan Stream from JUN and SEP in 1998.

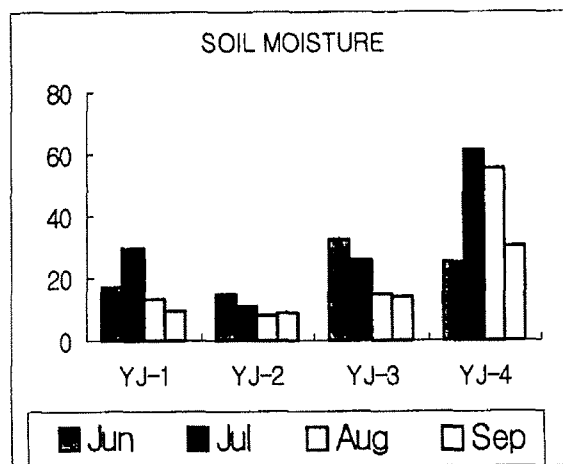
양재천 지구의 토양호흡, 지온, 토양수분, 토양유기물 함량 조사 결과는 (그림 7-25)에 나타낸 바와 같다.



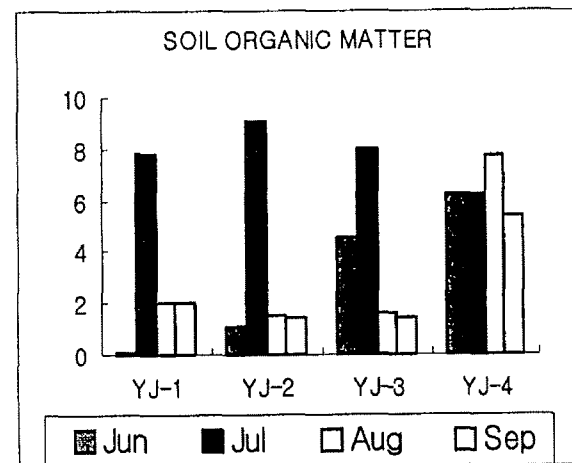
(A)



(B)



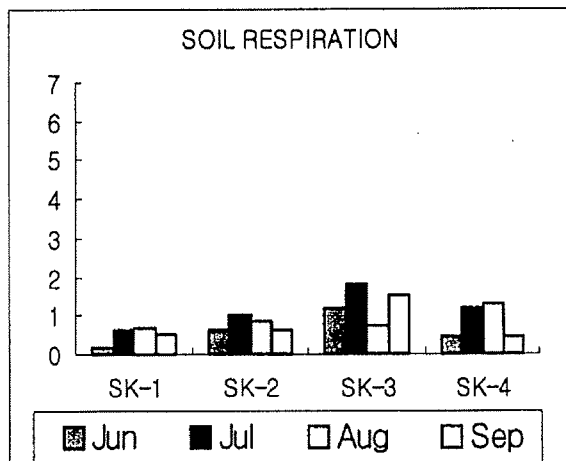
(C)



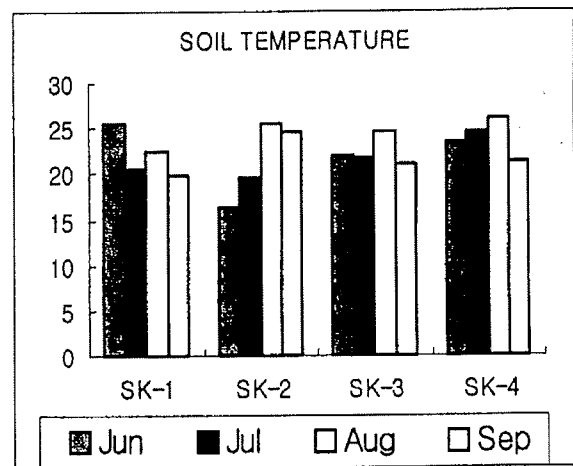
(D)

(그림 7-25) Longitudinal variations of (A) soil respiration, (B) soil temperature, (C) soil moisture, and (D) soil organic content in riverine wetlands of Yangjae Stream from JUN and SEP in 1998.

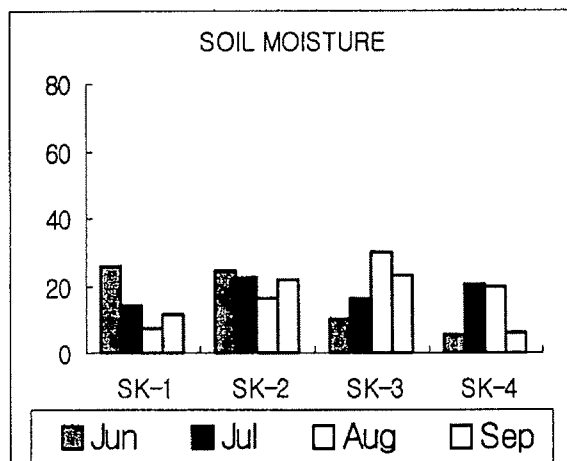
사기막천 지구의 토양호흡, 지온, 토양수분, 토양유기물 함량 조사 결과는 (그림 7-26)에서와 같다.



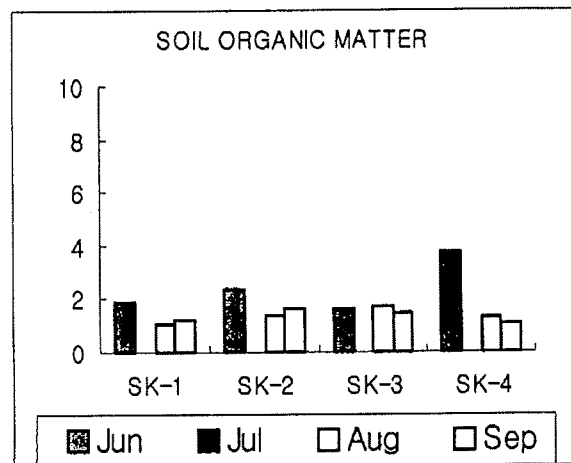
(A)



(B)



(C)



(D)

(그림 7-26) Longitudinal variations of (a) soil respiration, (b) soil temperature, (c) soil moisture, and (d) soil organic content in riverine wetlands of Sagimak Stream from JUN and SEP in 1998.

2) 토양 호흡량과 지온, 토양수분, 유기물함량간의 상관성 분석 결과

발안천지구의 토양 호흡량과 지온, 토양수분, 유기물함량간의 상관 분석 결과는 <표 7-16>에서와 같다.

<표 7-16> 발안천지구의 토양 호흡량과 지온, 토양수분, 유기물함량

구 분	호흡	지온	수분	유기물
호흡	1			
지온	0.73	1		
수분	-0.23	-0.25	1	
유기물	0.09	0.02	0.70	1

양재천지구의 토양 호흡량과 지온, 토양수분, 유기물함량간의 상관 분석 결과는 <표 7-17>에서와 같다.

<표 7-17> 양재천지구의 토양 호흡량과 지온, 토양수분, 유기물함량

구 분	호흡	지온	수분	유기물
호흡	1			
지온	-0.10	1		
수분	0.68	-0.30	1	
유기물	0.57	-0.69	0.56	1

사기막천지구의 토양 호흡량과 지온, 토양수분, 유기물함량간의 상관 분석 결과는 <표 7-18>에 나타낸 바와 같다.

<표 7-18> 사기막천지구의 토양 호흡량과 지온, 토양수분, 유기물함량

구 분	호흡	지온	수분	유기물
호흡	1			
지온	0.01	1		
수분	0.16	0.12	1	
유기물	-0.29	-0.08	-0.05	1

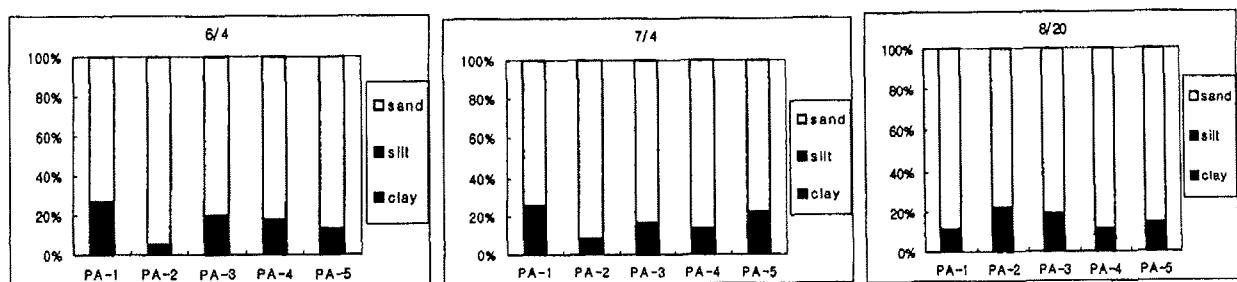
④ 전지구의 토양 호흡량과 지온, 토양수분, 유기물함량간의 상관 분석 결과는 <표 7-19>에서와 같다.

<표 7-19> 전지구의 토양 호흡량과 지온, 토양수분, 유기물함량

구 분	호흡	지온	수분	유기물
호흡	1			
지온	-0.16	1		
수분	0.36	-0.24	1	
유기물	0.26	-0.65	0.52	1

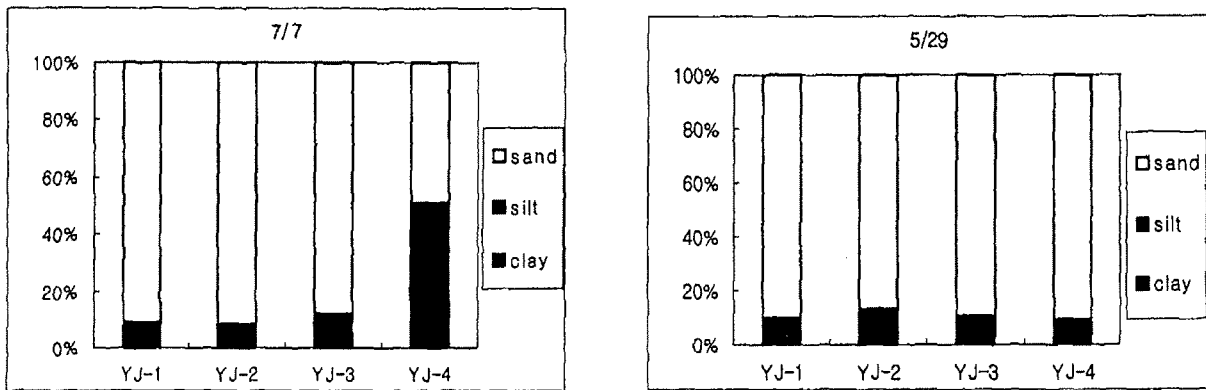
3) 시간적 공간적 토성의 변화 분석 결과

발안천 지구의 시간적 공간적 토성의 변화는 (그림 7-27)에서와 같다.



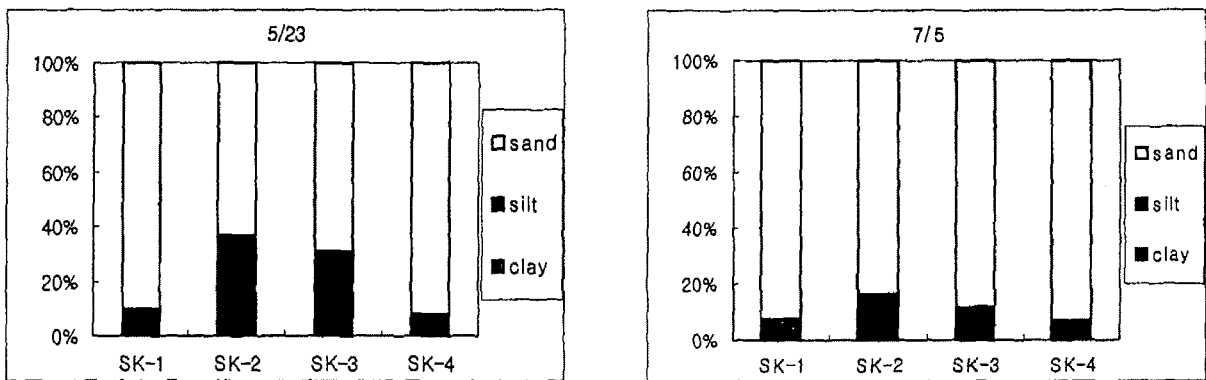
(그림 7-27) 발안천 지구의 시간적 공간적 토성의 변화

양재천 지구의 시간적 공간적 토성의 변화는 (그림 7-28)에서와 같다.



(그림 7-28) 양재천 지구의 시간적 공간적 토성의 변화

사기막천 지구의 시간적 공간적 토성의 변화는 (그림 7-29)에서와 같다.



(그림 7-29) 사기막천 지구의 시간적 공간적 토성의 변화

제 4 절 요약 및 결론

본 장에서는 주변생태환경 모니터링 기술 개발을 위하여, 산림 및 하천 주변의 식물생태 및 수생식물분포와 수질환경에 미치는 영향 분석을 위한 기초자료를 수집하고, 그 환경요인을 분석하여 결정하며, 각 환경요소별 모니터링 결과에 미치는 영향의 분석을 통하여, 농업생태 환경인자 모니터링의 정밀도를 분석하여 생태환경 변화를 고찰함으로써 하천 오염과 주변 생태계의 관계를 구명하였다.

본 장에서의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① 산림 생태 모니터링 기술 개발을 위하여, 대상지구인 발안천 유역을 중심으로 조사 지점의 선정하고 방형구 설치를 설치하여 산림 식생도를 구축하고, 주요 산림식물 군락의 구조, 산림 식생의 층위구조 및 출현빈도 등을 조사 분석하였다.
- ② 농경지 인접 산림생태의 시기별 변화를 조사하였으며, 산림식생의 층위별 식물 종조성을 조사하고 그 결과를 고찰하였다.
- ③ 산림식생별 낙엽, 낙지 생산량 조사, 조사지별 연간 낙엽 낙지 생산량 조사 등을 통하여 식생별 현존량 및 순생산량 조사 분석하였다.
- ④ 수생식물 환경생태 모니터링을 위하여 조사지점의 선정하여 방형구를 설치하고 서식처 환경조사를 실시하였으며, 식생피도와 생물량을 조사 분석하였다.
- ⑤ 대상조사지점에 대하여 토양채취 및 토양분석을 통한 토양환경 조사 분석하였다.
- ⑥ 수변 식물종에 대한 Ordination 결과 크게 대별되는 식생군락은 없었으며 하변에 나타나는 다양한 서식처에 따라 다양한 식물종이 서식하였다.
- ⑦ 한 시점에서 공간적으로는 생물량이 높은 지역과 그렇지 않은 지역이 차이를 보이고 있어 식생생태 변화의 모니터링의 좋은 지수가 될 수 있을 것으로 판단되었다.
- ⑧ 농경지 주변의 하변 식생의 분포는 주변의 토지이용이나 농경 방식에 따라 변

이를 나타낸다고 보다는 하천에 미치는 인위적인 간섭에 더 큰 영향을 받는 것으로 보였다.

- ⑨ 농경지는 하변보다는 하천 수체에 더 많은 영향을 줄 것이므로 하변 식생보다는 하천의 수생식물에 대한 모니터링이 추가적으로 필요할 것으로 생각되었다.
- ⑩ 농경지 주변 하천내에 서식하는 수생식물은 주로 검정말과 붕어마름이었고, 농경지 주변 하천변에 서식하는 식물은 고마리였으며, 수생식물의 생물량은 하류에 비해 상류에서 더 높은 값을 나타내었고, 생물량이 가장 큰 종은 검정말이었음
- ⑪ 토양호흡은 발안천, 양재천, 사기막천에서 7월, 8월 중에 모두 증가하는 경향을 보였으며, 이는 지온의 증가에 의한 영향으로 보여지며, 양재천, 발안천, 사기막천 순으로 높은 수치를 보였다.
- ⑫ 토양유기물 함량은 보의 영향으로 인해 양재천, 사기막천에서 하류로 갈수록 증가하는 반면에 발안천에서는 종적으로 증감을 보였으며, 이러한 효과는 토양호흡과 토양수분함량에도 영향을 미치는 것으로 보여진다.
- ⑬ 하변토양의 토성은 하류로 갈수록 모래의 비율이 작아지고 점토의 비율이 커지는 일반적인 양상을 보였으며, 이는 보와 하변식생에 의한 효과와 조사지점의 하폭, 유속과도 관계된 것으로 파악되었다.
- ⑭ 토양호흡, 지온, 토양수분, 토양유기물함량간의 상관성 분석결과 동일 시점의 조사에서는 지온이, 전 기간에 대해서는 수분과 유기물 함량이 높은 상관성을 보여주었다.

결과적으로 식물종의 분포는 본 연구에서 조사한 서식지 환경의 어떤 한 요인에 의해 지배적으로 영향받지 않는 것으로 보였다. 이러한 이유는 본 연구에서 고려하지 않은 다른 환경요인, 즉 범람의 정도나 하변의 개조상태, 인위적 교란의 정도 등이 더 큰 영향을 주기 때문으로 보인다. 앞으로 지속적인 식생변화의 모니터링과 다양한 환경요인을 조사를 통하여 현재의 결과를 보완해 나가야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 수변식생조사와 실험하천에서의 식생호안재 선정 및 적용
2. 서울특별시, 한강 생태계 조사연구, 1994.7
3. 최홍근, 김룡법, 조도순, "경안천 상류지역의 식물상과 식생연구", 경안천 자연생태계 조사연구보고서, 1992.
4. 한국건설기술연구원 외, 국내여건에 맞는자연형 하천공법의 개발, 1996.7
5. Day, R.T., Keddy, P.A., and McNeill, J. 1988. Fertility and disturbance gradients: a summary model for riverine marsh vegetation. *Ecology* 69: 1044-1054.
6. Keddy, P.A. 1984. Plant zonation on lakeshores in NOVA SCOTIA: a test of the resource specialization hypothesis. *Journal of Ecology* 72: 797-808.
7. Keddy, P.A. 1989. Effects of competition from shrubs on herbaceous wetland plants: a 4-year field experiment. *Can. J. Bot.* 67: 708-716.
8. May, R.M. 1986. The search for patterns in the balance of nature: advances and retreats. *Ecology* 67:1115-1126.
9. Nilsson, C., and Grelsson, G. 1990. The effects of litter displacement on riverbank vegetation. *Can. J. Bot.* 68: 735-741.
10. Samson, F.B., and Fritz, L. 1996. Ecosystem management: selected reading. Springer-Verlag New York, Inc. pp.462.
11. R.T. Day, P.A. Keddy, J. McNeill, 1988. Fertility and disturbance gradients : A summary model for riverine marsh vegetation, *Ecology*, 69(4) pp. 1044-1054
12. Tanya Dolores Holt, Ilya Blum and Nicholas Morison Hill, 1995. A watershed level analysis of the lakeshore plant community, *Can. J. Bot* 73 : 598-607
13. T.J. Carleton, 1984. Residual ordination analysis : A method for exploring vegetation-environment relationships, *Ecology*, 65(2), pp 469-477

14. Wisheu, I.C., and Keddy, P.A. 1989. Species richness-standing crop relationships along four lakeshore gradients: constraints on the model. Can. J. Bot. 67: 1609-1617.
15. Braun-Blanquet, J. 1964. Pflanzensozioologie. springer-Verlag. New York. 865pp.
16. 김준민, 김길수, 박봉규. 1987. 식생조사법. 일신사. 170pp.
17. 강상준, 최철수. 1991. 대청호 유역의 식생. 대청호호서생태계조사연구보고서. 127-163pp.
18. 오경환, 박광우. 1995. 수원시 매탄4지구 택지개발사업 환경영향평가서(동식물상 조사분석). 경상대학교 환경보전연구소. 65pp.
19. 오경환, 박광우. 1994. 고색-의왕간 도로개설사업 환경영향평가서(생태계조사 및 장래예측). 경상대학교 환경보전연구소. 77pp.
20. Yim, Y. J. and T. Kira. 1975. Distribution of forest vegetation and climate in the Korean peninsula. I. Distribution of some indices of thermal climate. Jap. J. Ecol. 25(2):77-88.
21. Yim, Y. J. 1977. Ditto. IV. Zonal distribution of forest vegetation in relation to thermal climate. Ibid. 27(4):269-278.
22. 환경청. 1989. 현존식생도(서울, 경기도). 72-75p.
23. 강희성. 1988. '88자연생태계 전국조사(II-1), 제3차년도(서울.경기의 식생 : 4평택군,화성군).환경청. 148-152p.

제 Ⅲ 편

GIS/RS 자료구축 및 응용기술 개발

여 백

GIS 자료구축 및 응용기술 개발

2000년 12월

“농업생태환경 모니터링 및 종합적 환경관리시스템 개발 사업”

서울대학교 농업생명과학대학 부속 농업개발연구소

최종보고서 제 Ⅲ 편 제 8 장

여 백

제 8 장 GIS자료 구축 및 응용기술 개발

제 1 절 서 론

농업생태환경 시스템의 구성 인자들과 그들의 상호작용, 그리고 이와 관련한 수질오염의 정량적 해석과 진단, 그리고 수질오염 억제를 위한 최적관리기법의 선정 등을 위해서는 지형, 자원, 환경, 사회, 경제적 현황 등 방대한 양의 정보가 필요하다. 이러한 다양한 정보들을 정확하고, 시기 적절하게 수집하여 분석하는 과정은 계획 전반의 운영과 주요한 의사결정에 있어서 주요한 역할을 하며, 가능하면 각종 자료들이 소요 목적에 부응하는 적절한 형태로 정리되어 출력되는 것이 이상적이다.

이러한 일을 위해서 컴퓨터를 이용한 자료처리체계 (data processing systems)가 시도되어 왔으며, 이중 토지, 자원, 환경 및 이와 관련한 각종 정보를 종합적, 연계적 처리를 위해 컴퓨터를 이용한 지리정보시스템 (geographic information system, GIS)이 이용되었다. 지리정보체계는 지구 및 우주공간 등 인간활동공간에 관련된 제반 과학적 현상을 정보화하고, 시간적 공간적 분석을 통해 그 효율성을 극대화하기 위한 정보 체계를 말하며, 여기에는 지형공간정보 (혹은 지리정보), 특성정보, 영상정보, 속성정보 등으로 구성한다. 즉 지형공간정보체계를 이러한 지형정보와 공간정보를 능률적으로 결합하여 주어진 문제의 해결 및 의사결정에 최대한 효율을 얻기 위한 결합된 정보체계를 말한다.

지리정보체계는 토지정보체계, 지리정보체계, 도시 및 지역정보체계, 수치지도제작 및 지도정보체계, 도면자동화 및 시설물관리체계, 측량정보체계, 도형 및 영상 정보체계, 교통정보체계, 환경정보체계, 자원정보체계, 조경 및 경관정보체계, 재해정보체계, 해양정보체계, 기상정보체계, 국방정보체계 등 다양한 목적으로 개발되어 실용에 적용되고 있다. 각각의 정보체계는 관련된 자료기반을 구축하는 일과 정보처리를 위한 일, 그리고 의사결정을 위한 일 등으로 다양한 기능을 갖는 부체계들로서 구성된다.

한편, 효과적인 수문학적 문제 해결을 위하여 효율적인 수문정보 시스템의 개발이 필요하게 되었는데, 최근에 들어와 급속히 발전하는 컴퓨터 하드웨어 및 소프트웨어의 개발은 지형정보의 효율적인 획득을 위하여 개발된 지리정보체계의 구성을 가능케 하였다. 1960년대부터 지형과 연결되는 속성자료들을 지형자료와 동시에 저장하고 이들 자료로부터 원하는 정보를 생성하기 위한 지리정보체계(geographic information system, GIS)에 대한 연구가 시도되었으며, 이런 연구들은 수치지형 및 속성 데이터들을 조합하여 데이터간의 가능한 모든 관계를 분석하고 결과를 출력할 수 있는 공간과 정보의 개념으로 확장되었고 복잡한 수문분석을 위한 효과적인 수단이 되었다.

현재 국내에서는 NGIS 수행으로 국가 기본도를 수치지도로 작성하고 있으며, 이를 기반으로 하여 비교적 적은 비용으로 각 분야에서 GIS자료를 구축하고, 이를 이용한 공간 분석에 응용하고 있다. 따라서, 지리정보시스템의 기본이 될 국가 기본도의 수치지도가 완전히 작성되고 이 자료의 활용이 활발해지면 향후 GIS의 응용은 보다 더욱 활발해질 것으로 전망된다 (정규장, 1999).

본 연구에서는 농업생태환경정보시스템의 구축을 위해, 지리정보시스템을 이용하여 대상 유역에 대한 지리정보, 공간정보, 그리고 각종 속성과 특성정보 등의 GIS자료기반을 구축하고, NGIS 수치지도를 이용해서 GIS 자료(ARC/INFO)를 구축하여 수문모형을 위한 유출곡선번호, 토지이용별 면적 등의 다양한 입력자료를 추출하는 응용기술을 개발하는 데 목적이 있다. 본 장에서는 지리정보시스템 관련된 내용을 정리하고, 농업생태 환경정보 시스템 구성을 위한 기본도, 주제도 특성 및 속성정보 등의 내용을 고찰하며, 이를 이용한 주제도 생성과 수문모형의 입력자료를 추출할 수 있는 응용기술에 대하여 살펴보도록 한다.

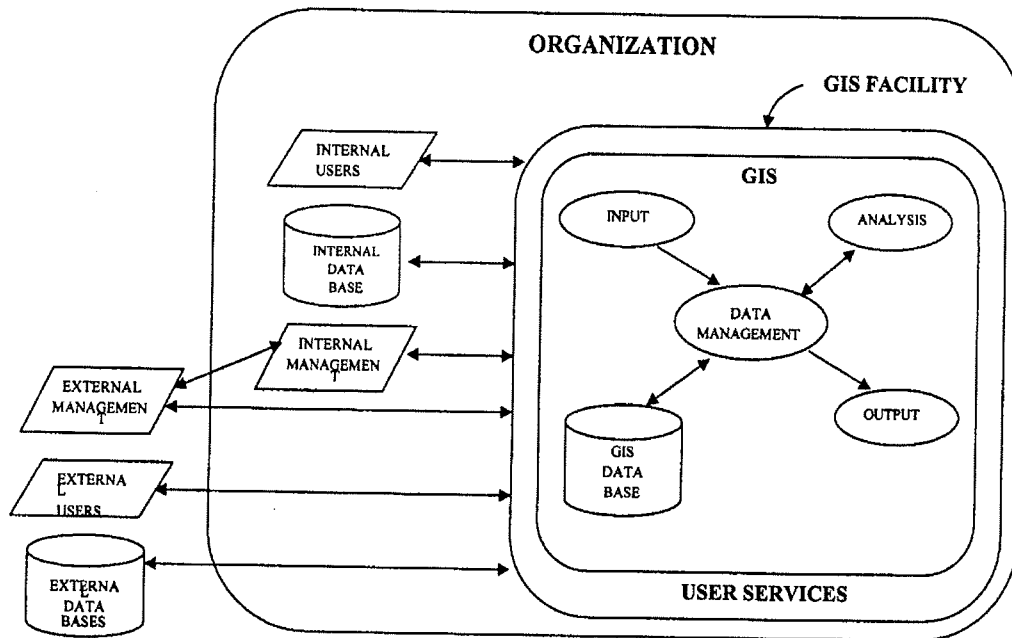
제 2 절 GIS자료기반 구축

1. 지리정보시스템

가. 정의

지리정보시스템 (GIS)은 지리적 정보의 저장과 처리 등에 이용되는 컴퓨터에

기초한 시스템을 칭한다. 여기서, GIS는 지리적으로 대표되는 자료의 처리를 위하여 ① 입력, ② 자료관리 (자료의 저장과 검색), ③ 자료의 생성과 분석, ④ 출력 등의 기능을 수행할 수 있는 시스템을 말한다. (그림 8-1)은 GIS의 기본적 성분과 그 환경을 정리한 것이다.



(그림 8-1) GIS의 기본적 성분과 환경

나. GIS 하드웨어와 소프트웨어

농업생태환경 정보 시스템의 개발을 위한 GIS의 하드웨어, 소프트웨어의 구성은 다음과 같다.

1) 시스템 하드웨어

GIS 환경은 <표 8-1>에서와 같이 Sun Spark™(Axil 320)과 PC로 구성하며, 입력자료의 생성을 위한 스캐너, 출력장치로서 컬러 프린터 등을 이용하였다.

2) 시스템 소프트웨어

GIS의 소프트웨어는 <표 8-1>에서와 같이 ARC/INFO™과 GRASS를 활용하였다. ARC/INFO는 상용 GIS와 DB 소프트웨어로 널리 이용되고 있는 것으로, 본

연구에서는 자료의 입력 및 구축 등에 활용하도록 하였다. 또한 PC용 버전인 ARCVIEW를 적용하였다.

GRASS는 미공병단에서 개발한 공용 소프트웨어로서 자료의 관리, 생성과 분석 등의 도구로 활용하였다. GRASS의 활용은 농업생태환경정보 시스템이 구축된 후, 보다 일반적으로 활용이 가능한 범용성을 높이기 위한 것이며, 그 밖에도 GRASS가 부프로그램의 개발과 적용에 용이한 환경을 갖추고 있기 때문이다.

<표 8-1> 지리정보 시스템(GIS)의 하드웨어 및 소프트웨어 환경

구분	내용
하드웨어	Sun UltraSPARC-1, Pentium-II MMX, Scanner, Color Printer (HPC3099A), GPS, EDM
소프트웨어	<ul style="list-style-type: none"> o AutoCAD R14 - NGIS 수치지도 자료 전처리 o ARC/INFO 7.1.2 - 자료구축/저장/검색/생성/분석/전후처리시스템 o GRASS - 자료 관리 및 분석 o IDRISI - GIS자료 및 영상 처리, 분석

2. GIS자료의 구축 방법

가. 자료의 구분

GIS자료는 지형·공간자료, 특성자료, 영상자료, 속성자료 등으로 구분된다. 이 중 지형자료는 각종 지도로서 정의되는 공간적 특성을 표시하는 것으로, 그 위치가 불변하는 기본적 자료로부터 생성되는 기본도와 이를 바탕으로 특정한 속성을 표시하는 주제를 나타내는 주제도로 구분하는 것이 보통이다.

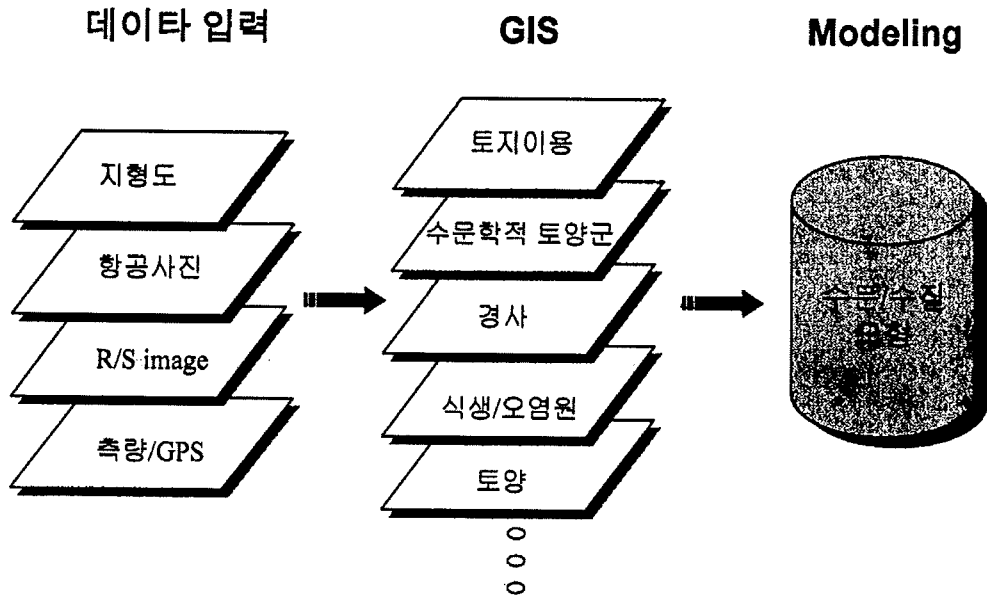
기본도의 예로서는 지형도, 하천도 등이 있으며, 주제도의 예로는 토양도, 유역도, 수문학적 토양군 등이 있다.

나. GIS자료 구축 방법

GIS자료 구축은 1/25,000지형도, 항공사진, 원격탐사, GPS, 측량 및 현장 답사 등을 통하여 기본자료를 수집하고, GRASS와 ARC/INFO를 이용하여 자료를 변환하고 분석하였다. 구축된 자료는 향후 분포형 수문, 수질 모형의 입력자료로서 이용

되어진다.

(그림 8-2)는 자료구축의 개념도를 보여주고 있으며, (그림 8-3)은 GPS의 현장 측정 광경을 보여주고 있다.



(그림 8-2) 자료구축의 개념도



(그림 8-3) GPS의 현장 측정 광경

다. 기본도 자료

<표 8-2>는 농업생태환경정보시스템의 구축을 위한 기본도의 내용을 정리하였다. 즉, 기본도로서 지형도, 하천도, 교통도, 토지이용도 등 4개 자료 기반을 구축하였다.

<표 8-2> 기본도의 자료 구축 현황

구 분	원도축척	Data형태	속 성	비 고
지 형 도	1/25,000 1/50,000	선	고도값	등고선 (20m간격)
하 천 도	1/25,000	선	하천명, Node의 고도값, 저수지 내용적 곡선 및 배수갑문 제원, 여수토	하 천 망
교 통 도	1/25,000	선	차선수, 포장상태, 재질	현장답사
토지이용도	1/25,000	면	DBMS와 연결 (구분, 각각에 대한 현황)	현장답사

1) 지형도

지형도는 대상유역인 발안지 유역을 포함하는 1/50,000과 1/25,000 지형도를 기준으로 등고선도를 작성하고, 이를 스캔하여 ARC/INFO상에서 검색하고, 편집과정을 걸쳐 작성하였다.

2) 하천도

하천도는 발안지 유역내에 발달한 하천구간을 1/25,000 지형도상에 표시된 하천구간을 트래싱하여, 이를 스캔하고, ARC/INFO 상에서 검색하고 편집을 통해 작성하였다. 하천 구간별 속성과 특성자료의 구축을 위하여 구간별 구분이 가능하도록 하였고, 이때 임의로 하천 구간의 세분이나 통합이 이루어질 수 있도록 하였다.

3) 교통도

교통도는 유역내의 도로망을 1/25,000 지형도상에 표시된 내용을 스캔하여 편집, 작성하였다.

4) 토지이용도

토지이용도는 1/25,000 토지이용도를 근거로하여 스캔하여 편집, 작성하였으며, 산림, 논, 밭, 대지, 기타 등으로 구분하였다.

라. 주제도

농업생태환경 정보시스템 구축을 위한 GIS 주제도 자료로는 <표 8-3>에서와 같이 유역도, 토양도, 수문학적 토양군도, 경사방향도, 경지구획도 등의 자료를 구축하였다. 주제도는 기본도를 근간으로 하여, 각 속성에 따라 형성하거나 혹은 별도의 추가적 도면을 제작하여, 스캔하고, 그 결과를 검색, 편집과 수정 등을 통하여 구성하였다.

<표 8-3> 주제도의 자료 구축 현황

구분	원도축척	Data형태	속성	비고
토양도	1/25,000 1/50,000	면	DBMS와 연결 (명칭, 배수상태, 토심 등)	개략토양도, 정밀토양도
유역도	1/25,000	면	유역명칭 및 지상인자 값들	지형도
수문학적토양군	1/25,000	면	A, B, C, D	정밀토양도
경사방향도	1/25,000	raster	경사방향 (1~360)	지형도
경지구획도	1/5,000	선	경지구분	지형도

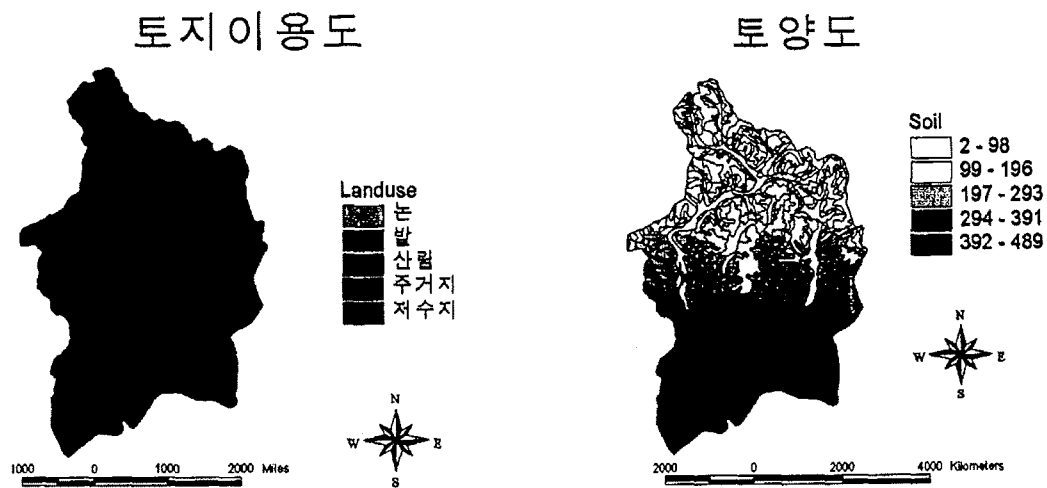
마. 속성 및 특성자료

각 주제도의 구분에 따라 그 특성을 나타내는 매개 변수와 그 성질 등을 조사 분석하고, 이를 적절한 DB화하여 정리하였다. 이와 같은 자료를 속성자료라고 하는데, 그밖에 매개변수의 특성을 표시하여 특성자료라고하여 일반적인 속성자료와 구분하기도 한다. 기존의 지형도나 토양도, 토지이용도 등을 이용하여, 각각의 속성을 정리하였고, 특정한 성질을 갖는 매개변수의 추출과 이들의 자료를 생성할 수 있도록 하였다.

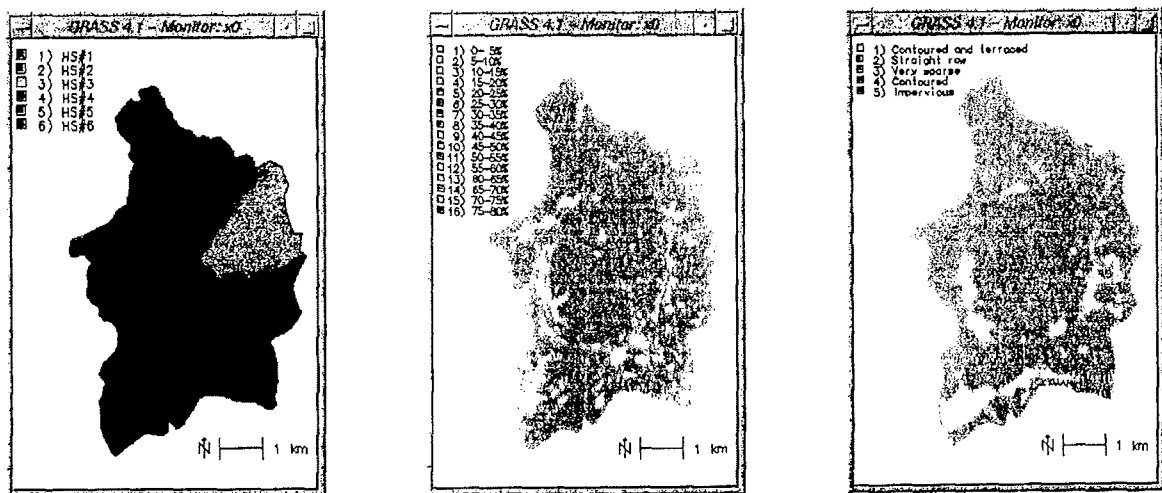
3. GIS자료 구축 결과

농업생태환경 지리정보 시스템 자료의 구축을 위하여, GIS자료 구축의 방법에 따라 각각 ARC/INFO와 GRASS를 이용하여 속성자료를 입력하고, 향후 수문, 수질 모델링 기술 개발의 입력 자료 등으로 이용될 수 있도록 하였다.

(그림 8-4)는 ARC/INFO를 이용한 자료관리 및 분석 예로서 시험유역에 대하여 구축된 토지이용도와 토양도를 보여주고 있으며, (그림 8-5)는 GRASS를 이용한 자료관리 및 분석 예를 나타내고 있다.



(그림 8-4) ARC/INFO를 이용한 자료관리 및 분석 예

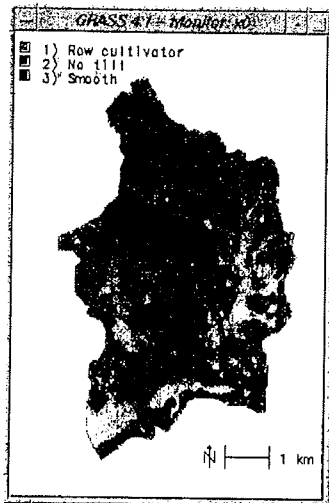


유역도

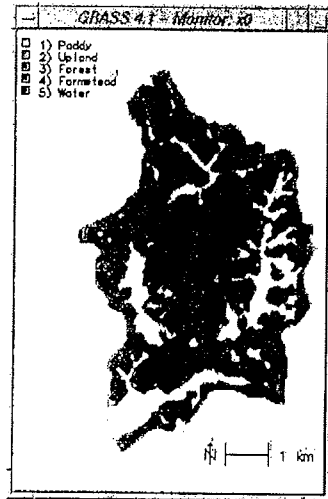
모래함양도

포장관리상태도

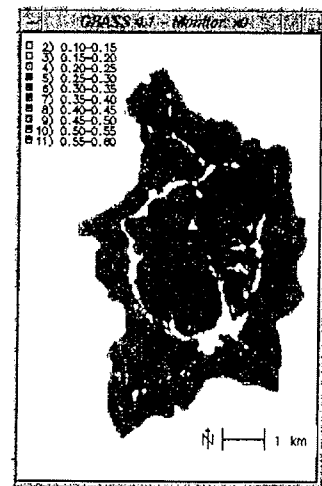
(그림 8-5) GRASS를 이용한 자료관리 및 분석 예



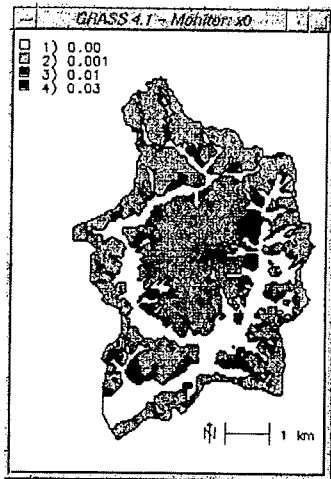
경운방법도



토지이용도



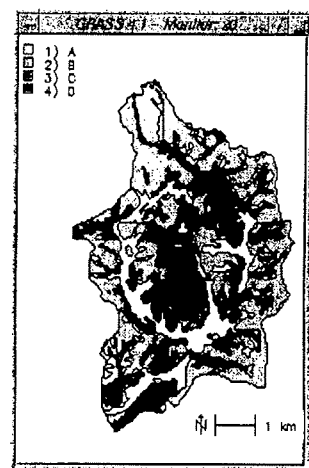
USLE_K



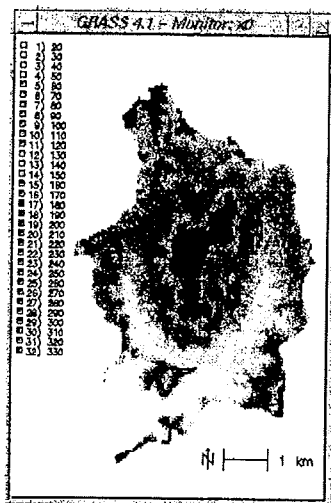
USLE_C



점토함양도



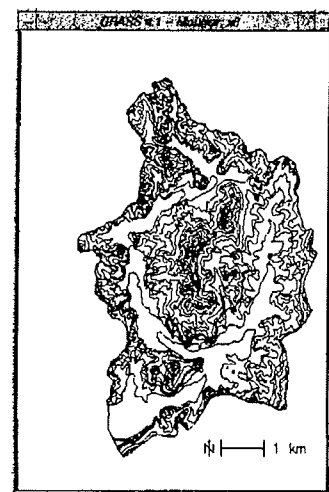
수문학적 토양군도



수치표고도



경사방향도



등고선도

(그림 8-5) 계속

제 3 절 GIS 응용기술 개발

지리정보시스템을 이용한 응용기술의 개발을 위하여, 본 연구에서 기 구축된 GIS자료를 근간으로 수문모형의 전처리 시스템 모형을 개발하였다. 본 절에서는 수치지도인 1/5,000 NGIS 자료를 이용해서 GIS 자료(ARC/INFO COVERAGE)를 구축하고, 수문모형을 위한 유출곡선번호, 토지이용별 면적 등의 다양한 입력자료를 추출하도록 한다.

1. GIS자료의 전처리

본 연구에서는 GIS 응용기술 개발을 위하여 대상유역을 제2장서 기술한 바 있는 산간지, 중산간지, 평탄지, 취락지 등 다양한 토지이용상태를 보이고 있는 경기도 화성군 발안 및 팔탄면 소재 발안저수지와 기천저수지 유역을 선정하였다.

본 연구에 사용된 수치지도는 NGIS에서 구축한 1/5,000 수치지도로 대상유역에 해당하는 총 11장이었다. 먼저, DEM 자료 구축을 위해서, AutoCAD에서 등고선 layer를 분리해 내었고, 토지이용도 구축을 위해서는 남아있는 layer중에서 주기 layer 등 불필요한 layer를 삭제하여 GIS자료로의 변환이 용이하게 하였다.

수치지도 전처리를 위한 NGIS에서 구축된 레이어코드 및 내용은 <표 8-4>에서와 같다.

<표 8-4> 레이어코드 및 내용

레이어코드	1	2	3	4	5	6	7	8	9
내용	철도	하천	도로	건물	지류	시설물	지형	행정 및 지형경계	주기

<표 8-4>에서 보듯이 커버리지별 레이어의 구분은 하천코드(2), 지형코드(7), 토지이용코드(1, 3, 4, 5, 8) 등으로 구성하였고, 커버리지별 레이어 중 시설물 코드(6), 주기코드(9)는 삭제하였다.

2. GIS 지형자료의 구축

가. 구축방법

국가GIS의 수치지도는 AutoCAD R14를 이용해서 전처리 하였으며, GIS 자료의 변환 및 수정은 워크스테이션 ARC/INFO version 7.1.2 를 사용하였다.

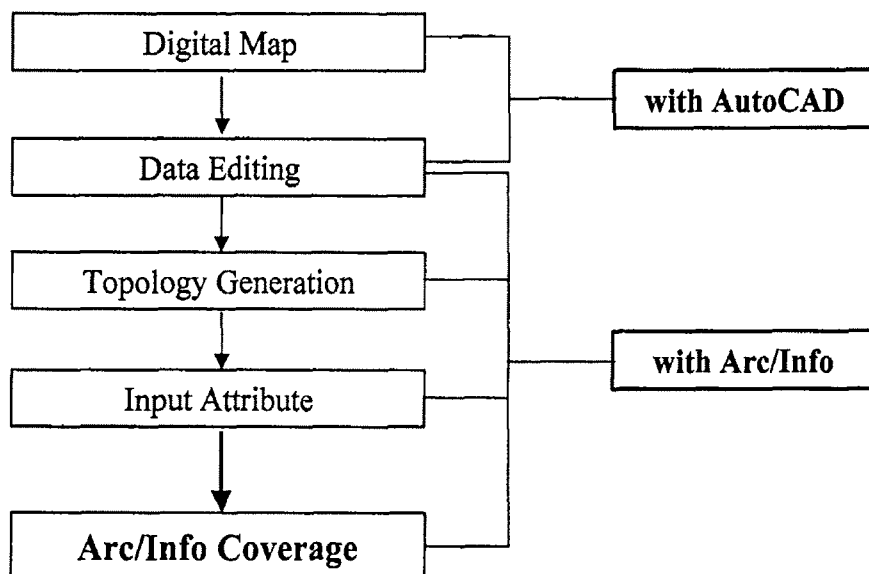
NGIS의 1/5,000 수치지도는 철도, 하천, 도로, 건물, 지류, 시설물, 지형, 행정 및 지형경계, 주기 등 9개의 레이어코드로 구성되어 있는데, 주제도별 레이어 코드를 이용하여 등고선도, 수치표고모델 (DEM), 사면 경사도, 경사방향도, 토지이용도와 하천도 등을 구축하였으며, 그 과정은 (그림 8-6)과 (그림 8-7)과 같다.

토양도는 1/25,000 정밀토양도 (농촌진흥청, 1973)를 래스터 스캐닝 한 후에 벡터자료로 변환하고 수정 편집하여 구축하였다. (그림 8-8)은 토양도의 구축 절차를 보여주고 있다.

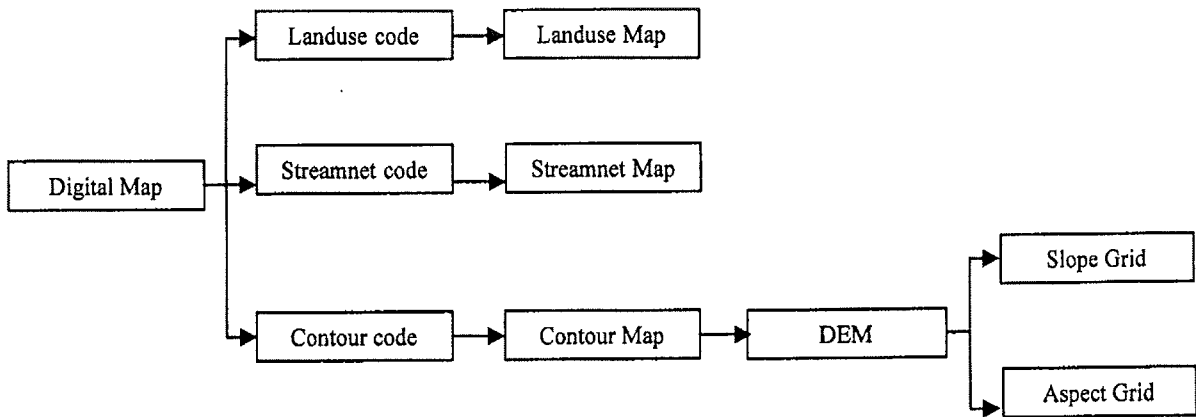
나. GIS자료 구축

1) 등고선도

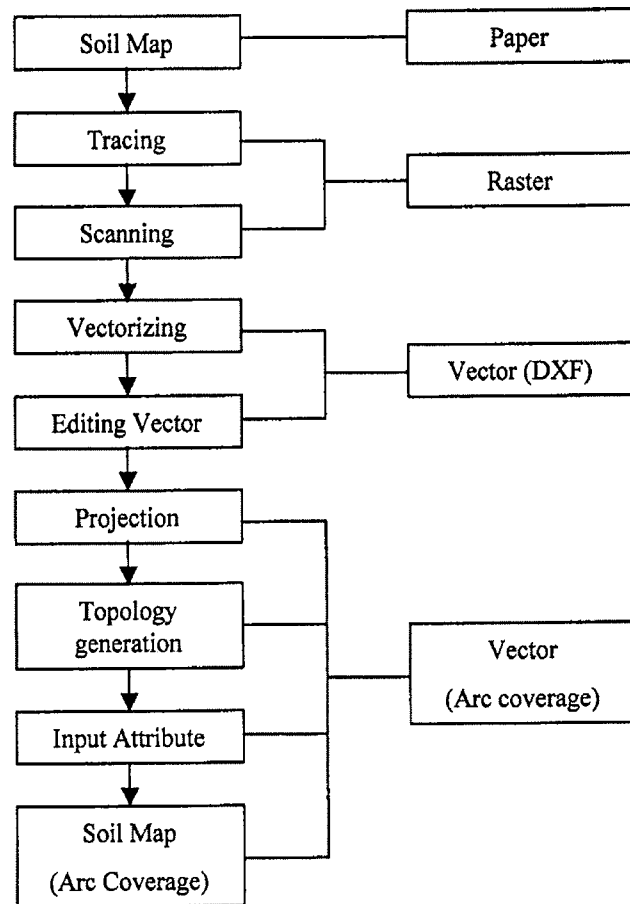
등고선도에서 등고선은 NGIS 1/5,000 수치지도로부터 Arc/Info Coverage로 변환하였으며, 구축된 등고선도는 5m 간격의 등고선도이다.



(그림 8-6) GIS 자료변환 흐름도



(그림 8-7) 주제도 자료구축 모식도



(그림 8-8) 토양도 자료구축 모식도

2) 토지이용도

토지이용도는 NGIS 1/5,000 수치지도로부터 Arc/Info Coverage로 변환한후 논, 밭, 임야, 주거지, 기타 등 5가지의 속성을 입력하였다. 토지이용도로부터 USLE C 인자도, USLE P인자도, 지표상태상수 (Surface condition constant), 시비수준도 등의 주제도를 생성하였다.

3) 토양도

토양도는 농촌진흥청의 1/25,000 정밀토양도로부터 벡터라이징한후 토양통명을 속성으로 입력하였으며, 토양통명으로부터 수문학적 토양군도, USLE K인자도, 토성 (Soil texture) 등의 속성을 추가하였다.

한편, 수문학적 토양군도의 속성으로는 토양의 배수 특성에 따라 A토양군, B토양군, C토양군, D토양군으로 분류되며, 본 연구에서는 허기술 등 (1987)의 연구에 따라 <표 8-5>에서와 같이 90개 토양통에 대하여 수문학적 토양군을 분류하였다.

USLE의 K인자도의 K인자는 <표 8-6>과 같이 김진택 (1995)의 연구결과를 이용하여 속성을 입력하였으며, 토성도는 정밀토양통 설명서와 AGNPS 매뉴얼을 참고하여 분류한 후 속성 입력하였다.

<표 8-5> 수문학적 토양군의 분류 표준

Hydrologic soil group	Soil codes
A	Ng, SAB, SAC, SzB, SzC, WoB, WoC, Jd, PuB, Hf, Hr, RS, RC, RL, BRS
B	Gt, Gy, Mg, SgD2, SgE2, SE, SNC2, SND2, SND3, SND4, SNE2, SNE3, SNE4, SRE2, SRE3, SRF2, SRF3, SqB, SqC, YaC2, YaC3, YaD2, YaD3, YaD4, OnD2, OnD3, OnD4, OnE2, OnE3, OnE4, EgB, EgC
C	GcB, ScB, ScC, SoC2, SoC3, SoD2, SoD3, Sh, AnC, AnD, YeB, YjB, YjC, WaB, WdB, WdC, Jb, JiB, JiC, Ce, Pt, Hh
D	GpB, GeE3, Dy, BcB, Bg, YcB, YcC, OcB, JnC2, CaE2, CaE3, CaF2, CaF3, CmE2, CmE3, CvF2, CvF3, Pe, Hd, HdB, TF

<표 8-6> 토양군의 물리적 특성

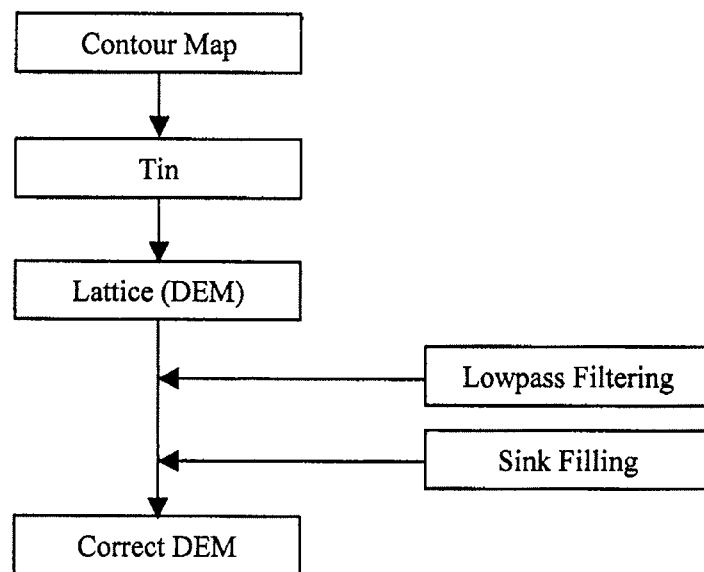
토양명	Soil code	USLE K	토양명	Soil code	USLE K	토양명	Soil code	USLE K
감천토	GcB	0.23	송산토	SRF3	0.16	원곡토	WdC	0.29
강서토	Gt	0.34	송정토	SoC2	0.27	월곡토	WoB	0.20
고평토	GpB	0.37	송정토	SocC3	0.27	월곡토	WoC	0.20
관악토	GeE3	0.08	송정토	SoD2	0.27	은곡토	EgB	0.29
규암토	Gy	0.42	송정토	SoD3	0.27	은곡토	EgC	0.29
남계토	Ng	0.10	수암토	SqB	0.26	전남토	JnC2	0.30
덕평토	Dy	0.27	수암토	SqC	0.26	전북토	Jb	0.30
만경토	Mg	0.55	신흥토	Sh	0.31	중동토	Jd	0.30
반천토	BcB	0.40	안릉토	AnC	0.28	지산토	JB	0.47
부용토	Bg	0.45	안릉토	AnD	0.28	지산토	JiC	0.47
사촌토	ScB	0.26	연곡토	YcB	0.41	청산토	CaE2	0.15
사촌토	ScC	0.26	연곡토	YcC	0.41	청산토	CaE3	0.15
삼각토	SgD2	0.14	예산토	YaC2	0.20	청산토	CaF2	0.15
삼각토	SgE2	0.14	예산토	YaC3	0.20	청산토	CaF3	0.15
상주토	SAB	0.24	예산토	YaD2	0.20	청산토	CmE2	0.15
상주토	SAC	0.24	예산토	YaD3	0.20	청산토	CmE3	0.15
석천토	SE	0.29	예산토	YaD4	0.20	청산토	CvF2	0.15
성산토	SzB	0.27	예천토	YeB	0.20	청산토	CvF3	0.15
성산토	SzC	0.27	오산토	OnD2	0.31	청원토	Ce	0.51
송산토	SNC2	0.16	오산토	OnD3	0.31	평택토	Pt	0.33
송산토	SND2	0.16	오산토	OnD4	0.31	포승토	pe	0.41
송산토	SND3	0.16	오산토	OnE2	0.31	풍천토	PuB	0.20
송산토	SND4	0.16	오산토	OnE3	0.31	합창토	Hh	0.30
송산토	SNE2	0.16	오산토	OnE4	0.31	화동토	Hd	0.41
송산토	SNE3	0.16	옥천토	OcB	0.25	화동토	HdB	0.41
송산토	SNE4	0.16	용지토	YjB	0.32	화봉토	Hf	0.21
송산토	SRE2	0.16	용지토	YjC	0.32	황룡토	Hr	0.27
송산토	SRE3	0.16	원곡토	WaB	0.29			
송산토	SRF2	0.16	원곡토	WdB	0.29			

4) 하천도

하천도는 NGIS 1/5,000 수치지도의 하천 레이어 코드를 이용하여 Arc/Info Coverage로 변환한 후 속성을 입력하였다.

5) 수치표고모델 (DEM)

수치표고모델은 (그림 8-9)와 같이 이미 구축된 등고선도를 이용하여 5m 해상도로 구축하였으며, 로우패스 필터링 (Lowpass filtering)으로 정점에서의 오류를 수정하였고, 싱크 필 (Sink fill)로 유역의 물흐름도 (Flow direction)에서 비정상적으로 발생하는 싱크 (Sink)를 수정하였다.



(그림 8-9) DEM 추출 알고리즘

6) 사면경사도와 경사방향도

사면경사도와 경사방향도는 수치표고모델을 이용하여 Arc/Info Function을 이용하여 구축하였다.

다. 유출곡선번호 추정

논에서의 AMC의 결정은 유역에서와 같이 5일 선행강우량과는 무관하며, 생육시기별로 CN값의 변화는 초기담수심과 물고높이 등에 기인한다고 하였다(임 등,

1995). 또한 수문학적 토양군 A, B, C, D 등에 의한 CN값의 변화는 논에 적용되지 않는다고 제시하였으며, CN_I, CN_{II}, CN_{III}의 값으로 각각 69, 78, 88을 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 토양조건에 관계없이 임 등(1995)이 제시한 값들을 사용하였다.

산림에서의 CN은 Forest값을, 밭의 경우는 Row crops : straight row : poor의 값을, 주거지의 경우는 Farmstead의 값을 사용하였고, 초지의 경우는 Pasture or range : : poor의 값을, 저수지나 호소의 경우는 100을 사용하였다.

앞서 구한 수문학적 토양군 Coverage와 토지이용 Coverage로부터 CN값을 구하기 위하여, AMC-II를 기준으로 <표 8-8>와 같이, 각각의 토지이용상태에 대하여 수문학적 토양군별로 CN값을 적용하였다.

<표 8-8> 토지이용형태별 입력 유출곡선 번호

Land use	Hydrologic Soil Group				Land cover, Treatment, Hydrologic Condition
	A	B	C	D	
Paddy	78	78	78	78	임 등(1995)
Upland	72	81	88	91	Row crops, Straight row, Poor
Forests	56	75	86	91	Forests, Very sparse
Farmstead	59	74	82	86	Farmstead
Pasture	68	79	86	89	Poor
Reservoir	100	100	100	100	

3. GIS 지형자료 구축 결과

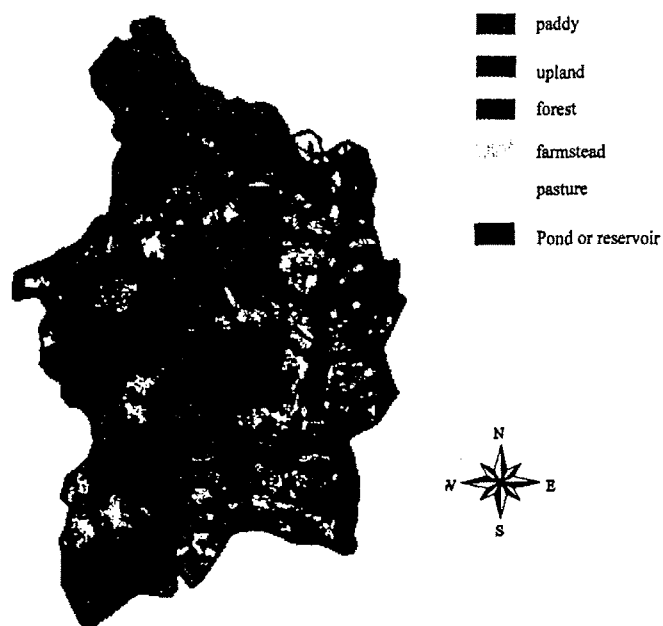
가. 토지이용도 및 수문학적 토양군

대상유역(발안저수지 유역과 기천저수지 유역)의 토지이용속성을 입력하여 토지이용도를 구축하였다. 본 유역의 전체 면적이 2,670.6ha로 구적계를 이용해 구한 2,650ha와는 약 20ha정도가 차이가 났다. 이는 유역 경계를 스캔하는 중이나, 구적계를 사용하는 중의 오차일 가능성이 큰 것으로 추정할 수 있다. <표 8-9>은 수

문모형 전처리 시스템에 의한 대상구역의 토지이용별 면적을 나타내고 있다. <표 8-9>에서 보는 바와 같이, 대상구역의 논면적은 484.6ha로 18.1%를 차지하며, 산림면적은 1,737.0ha로 65%를 차지하고 있다. (그림 8-10)은 대상구역의 토지이용도 구축 결과를 보여주고 있다.

<표 8-9> 대상 구역의 토지 이용별 면적

토지이용상태	면적 (ha)	면적비 (%)
paddy	484.6	18.1
upland	221.9	8.3
forest	1,737.0	65.0
farmstead	84.2	3.2
pasture	29.6	1.1
reservoir or pond	113.2	4.2
합계	2,670.6	100.0

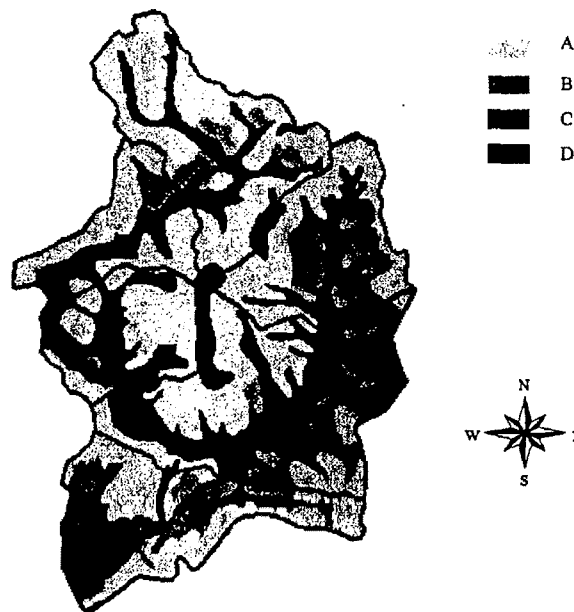


(그림 8-10) 대상구역의 토지이용도

대상구역의 1/50,000 개략토양도를 이용해 수문학적 토양군을 재분류하였고, 재분류한 수문학적 토양군을 기준으로 ARC/INFO COVERAGE를 구축하였다. 각각의 수문학적 토양군의 면적과 면적비는 Table 3에서 보는 바와 같다. <표 8-10>에서 배수상태가 매우 양호한 수문학적 토양군의 A 그룹이 전체 2,670ha 중 1,297.3ha로 48.6%, 배수상태가 약간 양호 및 약간 불량인 C그룹이 856.3ha로 약 32.1%로 나타났다. (그림 8-11)은 개략토양도로부터 재분류한 대상구역의 수문학적 토양군도를 보여주고 있다.

<표 8-10> 대상 구역의 수문학적 토양군

수문학적 토양군	면적(ha)	면적비(%)
A	1,297.3	48.6
B	437.4	16.4
C	856.3	32.1
D	49.6	2.9
합계	2,670.6	100.0

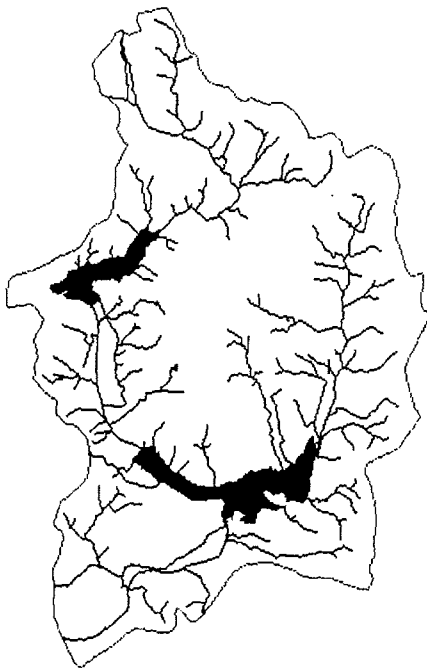


(그림 8-11) 대상구역의 수문학적 토양군도

나. 수문정보 커버리지 구축 및 추출

대상유역의 수문정보를 얻기 위한 기본적인 커버리지는 수계망도와 등고선도 등이며, 이를 통하여 수문모형의 입력자료로 이용되는 수문지형정보를 GIS 수문정보 전처리시스템으로부터 추출하였다.

(그림 8-12)과 (그림 8-13)은 수계망도와 등고선도의 커버리지 구축 결과를 보여주고 있다.



(그림 8-12) 수계망도



(그림 8-13) 등고선도

구축된 수계망도와 등고선도의 커버리지를 이용하여 ARC/INFO를 사용하여 대상유역의 수문지형정보를 추출하였다. 그 결과, 대상유역의 유로장은 12.63km, 형상계수는 0.0167, 기복량비는 0.025, 유역평균경사는 0.247의 값을 나타내었다.

<표 8-11>은 유역의 지형인자를 추출한 결과를 나타내고 있다.

다. 유역경계추출

기 구축된 DEM 커버리지와 GIS자료를 이용하여 음영기복도를 구축하고, 모형의 응용기술로서 유역의 경계를 추출할 수 있는 모형을 구성하였다.

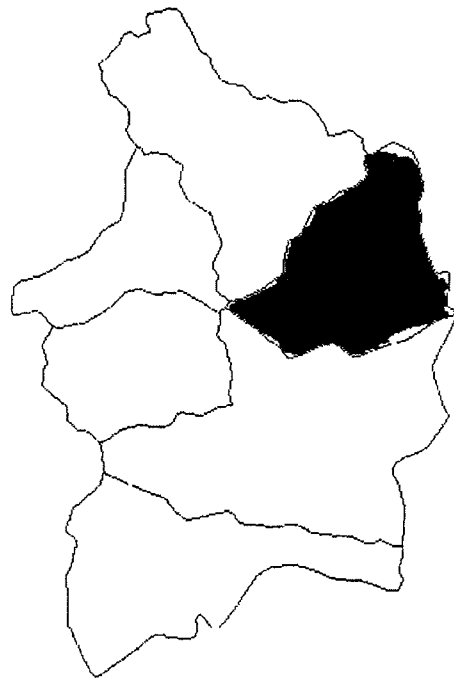
(그림 8-14)와 (그림 8-15)는 구축된 음영기복도와 유역경계추출 모형의 결과를 보여주고 있다.

<표 8-11> 유역지형인자의 추출

유로장	형상계수(F)	기복량비	유역평균경사
12.63 km	0.0167	0.025	0.247



(그림1-14) 음영기복도



(그림1-15) 유역경계 추출

4. 유출 곡선 번호 추출

유출곡선번호 (runoff Curve Number, CN)는 수문학적 토양-피복형의 성질을 대변하는 것으로서, 한 유역의 유출능력을 표시하는 유출곡선지수를 의미하며, 유역의 토지이용, 토양종류, 수문학적 토양조건 등에 의한 값으로 1~100의 범위를 갖는다. 생태환경 주제도의 지리정보시스템 자료 자동 생성을 위해서, 토양통, 토지이용, 경종방법, 수문조건 등에 따른 토양피복형을 생성하고, AMCⅡ 조건의 SCS의

CN값은 식 (8-1)과 같이 정의된다.

$$CN_{II} = \frac{25,400}{S + 254} \quad (8-1)$$

여기서, S는 유역의 최대잠재보유수량과 초기손실의 합을 나타낸다.

AMC 조건에 따른 CN_I , CN_{III} 값은 다음 식 (8-2), 식 (8-3)과 같이 추정한다.

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2.281 - 0.01281CN_{II}} \quad (8-2)$$

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0.427 + 0.00573CN_{II}} \quad (8-3)$$

대상유역의 토지이용 Coverage와 수문학적 토양군 Coverage로부터 유출곡선번호를 추정했고, 대상유역의 평균 CN 값은 73으로 나타났다.

제 4 절 요약 및 결론

농업생태환경관리를 위한 GIS 자료구축과 다양한 수문정보를 비교적 용이하게 분석하기 위해 지리정보시스템을 이용한 수문 모형 전처리 시스템을 구성하였고, 이를 대상유역인 발안지 유역에 적용함으로써 GIS자료기반의 구축과 응용기술의 개발을 시도하였다.

본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- ① 농업생태환경정보를 종합적으로 처리 및 관리하기 위한 GIS자료로서 기본도와 주제도를 작성하고, ARC/INFO와 GRASS를 이용하여 속성과 특성자료를 구축하였다.
- ② NGIS의 수치지도를 이용한 토지이용도, 수계망도, 등고선도, DEM 등의 Coverage를 구축하였다.
- ③ 토지이용상태, 유로장, 형상계수, 기복량비, 유출곡선번호, 유역경계 등의 수문지형정보 추출 모형의 개발하고, 그 적용성을 평가하였다.
- ④ 수치지도로부터 구축된 토지이용도에 의한 토지이용별 면적은 논: 484.6ha (18.6%), 밭: 221.9ha (8.3%), 산림: 1,737ha (65.0%), 주거: 84.2ha(3.2%), 초지:

29.6ha(1.1%), 물 113.2ha(4.2%), 로 나타났다.

⑤ 수문학적 토양군별 면적은 A: 1,297ha (48.6%), B: 437.4ha (16.4%), C: 856ha (32.1)%, D: 79.6ha (2.9%)로 나타났다.

⑥ 본 유역의 토지이용도와 수문학적 토양군도로부터 추정 한 유역의 평균 CN 값은 73으로 나타났다 .

본 연구의 결과인 농업생태환경정보 모델링을 위해 개발된 입력자료의 자동생성 알고리즘은 GIS자료 기반의 구축과 이용기술의 개발, 호환모형의 개발, 원격탐사기술의 개발, GPS응용기술의 개발 등과 호환되며, 기존의 수문, 수질 등의 모델의 입력자료의 생성과 출력자료의 처리 등을 위한 호환모형으로 개발되며, 최적관리기법의 선정 등에 활용이 가능하다.

참고문헌

1. 김윤종, 김원영, 유일현, 이석민, 민경덕, 1994, 금강유역 토양 유실 분석을 위한 GIS 응용연구, The Journal of GIS Association of Korea, 2(2), pp.165-174.
2. 김지훈, 1998. 지리정보시스템을 이용한 SWAT/GRASS 모형의 적용, 서울대학교 석사학위논문.
3. 김진수, 1997. AGNPS 모형에 의한 농업비점원오염 해석에 관한 최근의 연구동향, 농업환경 과학연구의 최근 동향-1997년도 NICEM해외교육훈련 결과 Symposium : 127-135.
4. 김진택, 1995. 농업 비점원 오염 모형을 위한 지리정보 시스템 호환모형의 개발 및 적용, 서울대학교 박사학위 논문.
5. 심순보, 김주동, 고덕구, 김동심, 1996. 오염부하량 산정 지형공간 데이터베이스 구축, 수자원학회, 96학술발표논문발표회.
6. 이규성, 1994. 산림유역의 토양유실량 예측을 위한 지리정보시스템의 범용토양유실식(USLE)에의 적용, 한국임학회지, 83(3) : 322-330.
7. 정규장, 조효섭, 1999. 수자원 실무분야에서의 국내 GIS활용 사례, 한국수자원학회지 31(1), pp. 70-78

8. 조재필, 1998. 복합 토지이용 특성의 농촌유역에 대한 농업비점원오염모형의 적용, 서울대학교 석사학위 논문.
9. 조홍연, 이길성, 1995. 직교곡선격자를 이용한 수질 모형의 개발 및 적용, 대한토목학회논문집, 15 (5), pp. 1311-1322.
10. 최주운, 김기형, 이무옥, 1996. GIS를 이용한 하천내 수질오염 조사 자료의 관리, 수자원학회, 96학술발표논문집.
11. 최진용, 1996. 지리정보시스템을 이용한 장기 유출모형의 개발에 관한 연구, 서울대학교 박사학위논문.
12. Brannan. K. and J. M. Hamlett. 1998. Using Geostatistics to Select Grid-cell Layouts for the AGNPS Model, Transactions of the ASAE, 41(4), pp. 1011-1018.
13. CAD Land, Ltd., 1992. Introduction to PC ARC/INFO 3.4D PLUS.
14. Chansheng He, James F. Riggs, and Yung-Tsung Kang, 1993. Integration of geographic information systems and a computer model to evaluate impacts of agricultural runoff on water quality, Water Resources Bulletin, 29(6) : 891-900.
15. Environmental Systems Research Institute, 1991, ARC/INFO User's Guide : Cell-based Modeling with GRID, Redlands, CA. USA.
16. ESRI, 1995. ArcView Version 2 Shapefile Technical Description, ArcView White Paper Series.
17. ESRI, 1995. Understanding GIS, The ARC/INFO Method, Self-study workbook, pc-version.
18. GeoSystems, 1997. MapQuest(<http://www.mapquest.com/>)
19. Line, D. E., W. W. Coffey. and D. L. Osmond. 1997. WATERSHEDSS GRASS-AGNPS MODEL TOOL, Transactions of the ASAE. 40(4), 971-975.
20. McCool, D. K., L. C. Brown, G. R. Foster, C. K. Mutchler, and L. D. Meyer, 1987. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation.

Trans. ASAE, 30(5) : 1387-1396.

21. Setia, P., and R. Magleby, 1987. An economic analysis of agricultural nonpoint pollution control alternatives. Journal of Soil and Water Conservation, 42(6) : 427-431.
22. Singh, V. P. and A. N. Singh, 1996. A remote sensing and GIS-based methodology for the delineation and characterization of rainfed rice environments, Int. J. Remote Sensing 17(7): 1377-1390.
23. Young, R. A., C. A. Onstad, D. D. Bosch, and W. P. Anderson, 1987. AGNPS, Agricultural Non-Point Source Pollution Model. A Watershed Analysis Tool. USDA, Conserv Res. Report 35.
24. Zhang, H., C. T. Haan and D. L. Nofziger, 1990. Hydrologic modeling with GIS: An overview, Applied Engineering in Agriculture, 6(4), pp. 453-458

RS 자료현행화 기술 개발

2000년 12월

“농업생태환경 모니터링 및 종합적 환경관리시스템 개발 사업”

서울대학교 농업생명과학대학 부속 농업개발연구소

최종보고서 제 Ⅲ 편 제 9 장

여 백

제 9 장 RS 자료현행화 기술 개발

제 1 절 서 론

농업유역은 도시영역의 확대에 의한 도로 신설 및 확장과 택지개발에 의한 산림지의 훼손 등으로 인해 토지피복상태의 변화가 이루어지고 있다. 이러한 토지피복의 변화는 유역의 수문유출 특성을 변화시키고, 하천 및 저수지의 수질 및 환경보전에 많은 영향을 끼치게 된다. 따라서, 농업유역의 토지피복변화를 제대로 평가하고 추정하는 것은 농업유역의 수문, 수질 해석 및 환경평가를 위해 중요하다고 하겠다.

유역의 토지피복을 판단하는 방법으로는 측량 및 현지조사를 통한 직접적인 방법과 지도나 항공사진, 위성영상 등의 보조자료를 이용하는 간접적인 방법이 있다. 직접적인 방법은 시간과 비용이 많이 드는 단점이 있으므로 간접적인 방법이 많이 사용된다. 특히, 위성영상의 이용은 정보의 최신성이나 분류의 자동화 및 결과의 수치화 등의 측면에서 이점을 가지고 있으며, Jackson(1977)과 Jensen(1996)은 넓은 유역에 대해서는 시간과 비용면에서도 효과적이라고 하였다.

위성영상을 이용한 원격탐사 기술은 항공사진의 발달과 더불어 그 응용이 시작되었으나, 최근 컴퓨터 및 우주항공기술의 발달에 따른 여러 가지 지구 관측위성의 발사로 인하여 그 기법 및 응용분야에 상당한 발전을 이룩하고 있다. 그 중에서 Landsat 자료를 이용하는 원격탐사 기술은 항공사진에 비하여 보다 광범위한 지역을 일시에 탐사할 수 있으므로 토지피복상태 조사는 물론, 자연환경 변화, 산림자원 조사, 오염확산 상태 파악, 농작물의 작황분석, 홍수예측 및 관련자료 수집 등 여러 분야에서 그 활용성이 시도되고 있다.

토지피복분류에 많이 이용되는 위성영상은 Landsat의 MSS (Multi-Spectral Scanner sensor) 영상과 TM (Thematic Mapper sensor) 영상, SPOT의 HRV (High Resolution Visible sensor) 영상 등이 있으며, 일반적으로 Landsat의 TM 영상이 많은 연구자들에 의하여 사용되어지고 있다 (박희성, 1998).

토지피복에 대한 정확한 분류와 시기별 토지피복변화를 고찰하기 위해서는 단 하나의 위성영상자료만으로는 정확한 분류와 그에 따른 변화를 파악하기 어려운 경우가 많다. 따라서, 이를 극복하기 위해 다시기의 영상을 이용하는 방법이 제기되고 있다.

Folly 등(1996)은 스페인에서 ULSE C-factor를 추정하는 과정에서 두 계절의 Landsat TM 영상과 GIS를 이용하여 피복(Land Cover)을 분류하고 지식 기반(knowledge-based)의 접근 방법을 통하여 토지 이용 분류의 정확도를 높이려고 하였고, Okamoto 등(1996)은 Landsat TM 영상의 혼합셀 면적비를 통하여 논외 면적을 추정하는 연구를 수행하였으며, Civico(1997)은 Landsat TM 영상으로부터 화소 내의 불투수 면적의 비율을 추정하는 하는 데 신경망 이론을 도입한 바 있다. 국내의 경우, 이현영 (1995)은 다시기 영상을 이용한 토지피복변화를 추출하고 이것이 국지기후에 미치는 영향을 평가한 바 있으며, 박민호(1988)는 다른 두 계절에 관측된 영상을 이용함으로써 분류의 정확도를 향상시키는 기법을 제시하였고, 박종화(1995)는 도시녹지의 평가기법을 연구하여 서울시에 적용하여 주변부 탐지를 수행하였으며, 박희성 (1998)은 농업소유역의 토지이용분류 및 유출곡선번호를 추정하여 제시하는 등 국내외에 위성영상을 이용한 연구가 활발히 이루어져 왔다.

본 장에서는 위성영상자료의 현행화 기술 개발을 위하여, 위성영상의 처리 및 분석 방법을 정리하고, 선정된 대상유역에 대상으로 Bayesian 확률론 이론을 통하여 위성영상으로부터 하나의 셀을 이루는 항목별 면적비를 추정하고, 다시기 위성영상을 대상으로 최대우도분류법에 의한 감독분류 및 무감독 분류를 수행하여 토지이용 상태를 추출하며, 시험유역의 토지피복상태 및 변화를 고찰하고, 이를 바탕으로 유출곡선 번호를 추정하여 기존의 방법과 비교하며, Markov 과정을 이용하여 장래의 토지피복상태를 추정하여 그 변화율을 고찰하도록 한다.

제 2 절 위성영상자료 처리방법

1. Landsat-5 TM 영상

Landsat-5 위성은 1984년 3월 1일 발사되었으며 궤도는 지상 705km 상공이다. 회전 주기는 99분으로 매 16일 마다 지상의 같은 점을 통과한다. 탑재되어있는 센서는 Thematic Mapper로서 모두 7 개의 분광밴드를 가지고 있으며, 각 분광밴드의 특성은 Table 3.1 에서 보여지는 바와 같다. 이들 밴드의 공간 해상력은 약 30m 이나, 6번 밴드는 열 적외선 밴드로서 공간 해상력이 120m로 다른 밴드에 비하여 낮다.

2. 영상의 전처리

수집된 위성영상 자료는 여러 가지 원인의 오차가 포함된 불완전한 자료이기 때문에 지상의 수신소 또는 사용자에게 의한 적절한 보정처리가 필요하다. 이를 영상의 전처리라고 하며 크게 기하보정 (Geometric Correction)과 방사량보정 (Radiometric Correction)으로 구분된다.

가. 기하보정 (Geometric Correction)

위성으로부터 획득된 위성영상은 실제 지도면상에 투사되는 영상과는 다르게 나타난다. 이것을 기하학적인 왜곡 (geometric distortion)이라고 하며, 이것을 보정하는 것을 기하보정 (geometric correction)이라 한다.

기하학적인 왜곡은 지구곡률, 지구자전, 위성체 (platform)와 센서(sensor) 혹은 위성의 고도나 자세 등에서 생기는 계통적 왜곡 (systematic distortion)과 그 밖에 알 수 없는 요인에 의한 무작위 왜곡 (non-systematic distortion)이 있으며 계통적 왜곡의 경우는 수신소에서 보정되어 사용자에게 공급된다. 그러나, 무작위 왜곡의 경우는 영상에 남아있게 되는데 이것은 위성영상과 지도 모두에서 정확한 좌표를 알 수 있는 점을 지상통제점 (Ground Control Points; GCP)으로 선정하여 상호간의 좌표변환식을 구함으로써 보정이 가능하다.

1)좌표변환 (Transformation)

지상통제점의 보정 후 영상 좌표를 (i, j) , 입력영상좌표를 (k, l) 이라고 하면 수학

적 모델은 $M(i, j) = (k, 1)$ 이며, 이것을 고차 다항식으로 표현하면 식 (9-1)과 같다.

$$\begin{aligned} Q(i, j) &= q_0 + q_1i + q_2j + q_3ij + q_4i^2 + q_5j^2 + \dots + q_ki^mj^m = k \\ R(i, j) &= r_0 + r_1i + r_2j + r_3ij + r_4i^2 + r_5j^2 + \dots + r_ki^mj^m = 1 \end{aligned} \quad (9-1)$$

미지계수는 최소제곱법을 사용하여 결정하며, 결정된 변환식에 의하여 변환된 영상의 지상통제점좌표와 지도의 지상통제점좌표의 RMSE (Root Mean Square Error)가 1 화소 이내에 들어가도록 지상통제점의 설정을 매우 신중히 해야한다.

2) 재배열 (Resample)

기하보정을 행한후 생성된 화상의 화소값을 결정하는 과정을 재배열 (Resampling)이라 한다. 재배열의 방법에는 원래 영상과 좌표변환된 영상을 겹쳤을 때 가장 가까운 화소의 값을 좌표 변환된 영상의 화소값으로 결정하는 Nearest Neighbor 방법과 근접된 2×2 격자의 화소값들을 거리 가중평균하는 Bilinear Interpolation 방법, 4×4 격자의 화소값들을 거리 가중평균하는 Cubic Convolution 등의 방법이 있다

본 연구에서는 분류의 정확도를 위하여 화소의 DN (Digital Number) 값을 변화시키지 않는 Nearest Neighbor의 방법을 이용하여 시험유역인 발안 및 반월유역과 시험지역이 적절히 포함되는 영역에 대하여 절출하였다.

나. 방사량 보정 (Radiometric Correction)

영상 반사치의 영향요인으로서는 태양고도, 대기상태, 지표면과 센서간의 기하학적 관계, 센서의 반응특성 등이 있으며, 이에 대한 보정을 방사량 보정이라고 한다.

1) 태양고도 보정

위성영상은 그 획득시기에 따라 태양의 고도가 다르므로 이에 따른 방사량의 차이가 생기게 된다. 특히 이것은 시계열적인 영상의 변화를 보고자 할 때 크게 영향을 미치게 되므로 이에 대한 보정이 필요하며, 보정의 방법은 영상획득시기의 태양 고도의 sine값을 각 화소에 나누어 태양이 천정에 있을 때의 값으로 변환함으로써 이루어진다. 이것은 필수적인 과정은 아니지만, 차후의 다른 연구자의 시계열적 분석이 용이하도록 실시하였다.

2) 대기 보정

태양광선은 대기층을 통과하면서 산란되거나 흡수되므로써 그 양적변화를 일으키게 되는데 특히 흡수에 의한 변화를 Haze 라고 하며, 일반적으로 각 화소값에서 특정 분광대에서 전광량을 흡수하는 물체의 화소값을 저감 하므로써 보정이 가능한 것으로 알려져 있다. 또한, TM 영상에서는 Tasseled Cap 변환시 제 4 성분이 Haze의 영향인 것으로 알려져 있으므로, 본 연구에서는 Tasseled Cap 변환에 의하여 영상으로부터 Haze에 의한 성분을 분리해내고 이를 소거시킨 후 다시 본래 영상으로 역산함으로써 대기에 의한 Haze를 제거하였다.

3. 밴드 재구성

지표상의 물체는 각각 고유한 반사특성 (Spectral Signature)을 가지고 있다. 이러한 반사특성은 특정한 분광밴드 (Spectral Band)에 대하여 특정한 값을 가지게 하기도 하지만, 실제로 분광밴드간의 상호관계에 영향을 준다. 예를 들면, 전자의 경우는 수면을 구별하기 위하여 근적외선 밴드(TM4)에서 화소값 (Digital Number; DN)이 40 이하인 부분을 찾아내면 된다는 것이고, 후자의 경우는 식생은 근적외선의 반사율이 높고 적색파장의 반사가 작다는 것이다. 이와 같이 분광밴드 상호간의 관계가 반사체를 식별하는 데 많은 정보를 줄 수 있다.

본 연구에서는 이를 이용하여 원래의 분광밴드를 Tasseled Cap 변환을 통하여 축약하고 여러 연구자들에 의하여 개발된 지수밴드 (Indices Band)를 도입함으로써 분류의 정확도를 높이하고자 하였다. 따라서, 원래영상으로부터 Tasseled Cap 변환으로 추출된 3개의 밴드를 바탕으로 광물과 수분을 나타내는 추가적인 지수밴드로부터 주성분 분석과 상관분석에 의하여 얻어진 4개의 밴드를 합하여 모두 7개의 새로운 밴드를 구성하여 분류에 사용하였다.

가. Tasseled Cap 변환

Tasseled Cap 변환은 식생에 대한 정확한 정보를 얻기 위하여 Kauth와 Thomas (1976)가 Landsat의 Multi-Spectral Sensor에서 수집된 자료를 대상으로 Gram-Schmidt의 연속직교기법 (Sequential Orthogonalization Technique)을 이용

하여 개발한 것을 Crist와 Cicone (1984)이 TM에 적용한 것으로, 밴드 6을 제외한 6개의 밴드를 사용하여 새로운 축을 가지는 6개의 밴드를 생성해낸다. 생성된 첫 번째 밴드는 Brightness 밴드로 토양반사에 대한 주변화를 나타내는 방향으로 정의되며, 두 번째 Greenness 밴드로 Brightness 밴드에 직교하며 녹색식물의 양과 강한 상관관계를 가진다. 세 번째 밴드 (Moisture)는 피복 및 토양함수량과 상관있고, 네 번째 밴드(4-th)는 대기의 산란효과를 나타내는 Haze를 나타내는 것으로 알려져 있으며, 대기 보정에 사용되었다. 기타 (5-th and 6-th)의 밴드는 아주 적은 양의 정보만을 가지고 있으며 큰 특징이 없다.

TM 영상에 대한 Tasseled Cap 변환계수는 <표 9-1>과 같으며, 본 연구에서는 6개의 새로운 밴드 중에서 가장 많은 정보를 포함하고 있는 것으로 알려진 Brightness, Greenness, Moisture의 세 개 밴드를 분광특성을 채취할 대상 밴드로 선정하였다.

<표9-1> TM영상의 Tasseled Cap 변환계수

Index	TM BAND					
	1	2	3	4	5	7
SBI	0.33138	0.33121	0.55177	0.42514	0.48087	0.25252
GVI	-0.24717	-0.16263	-0.40639	0.85468	0.05493	-0.11749
SMI	0.13929	0.22490	0.40359	0.25178	-0.70133	-0.45732

SBI; Soil Brightness Index, GVI; Green Vegetation Index, SMI; Soil Moisture Index

Source : Crist and Cicone(1984)

두개의 분광밴드의 화소값을 대상으로 하나를 x 축으로 하고 다른 하나를 y 축으로 하여 영상의 화소들 옮겨 놓은 것을 분산도 (Scatterplot)이라 하고 두 밴드의 화소값들을 축으로 하는 평면을 특성 공간 (Feature Space) 또는 분광공간 (Spectral Space)이라 한다. 특성 공간에서의 화소의 위치는 반사체의 특징을 결정짓는 요소가 된다. 이러한 특성공간은 다중 차원으로 확장되어 생각되어질 수 있으며, 영상

분류의 기본이 된다.

나. 지수 밴드

Tasseled Cap 변환에 의하여 생성된 새로운 밴드는 앞에서 서술한 것과 같이 식생의 특징을 잘 반영하고 있으나 식생 이외의 특징은 그다지 반영하지 못하는 단점을 가지고 있다. 따라서, 다른 연구자들에 의하여 특정 반사체에 대하여 개발된 지수를 가지고 6 개의 밴드를 추가적으로 구성하였으며 각 지수 Band 들의 특징은 <표 9-2>와 같다.

<표 9-2> 지수밴드의 구성 및 특징

Related Component	Band Ratio	Significance
Vegetation	$(4-3)/(4+3)$	NDVI (common, standard vegetation index)
Water	$(2-4)/(2+4)$	NDWI (Normalized Difference Water Index, open water features have high values)
	2/1	Water Depth (darker is deeper)
Mineral	3/1	Variations in Iron Oxide Content
	5/7	Variations in Clay Minerals Content
	5/4	Variations in Ferrous Minerals Content

* Adapted from ERDAS Inc., 1991 and McFeeters, 1996.

제시된 여섯 가지의 밴드를 살펴보면 식생을 나타내는 하나의 밴드와 수분을 나타내는 두개의 밴드 광물질을 나타내는 세 개의 밴드로 구성되어 있다. 이미 앞의 Tasseled Cap 변환에 의하여 식생에 대한 정보는 추출되었기 때문에 본 연구에서는 식생을 제외한 수분과 광물질을 잘 나타내는 5개의 밴드를 사용하였다.

지수밴드는 주로 밴드간의 비율이 사용되었는데 비율밴드의 기대 효과는 다음과 같다.

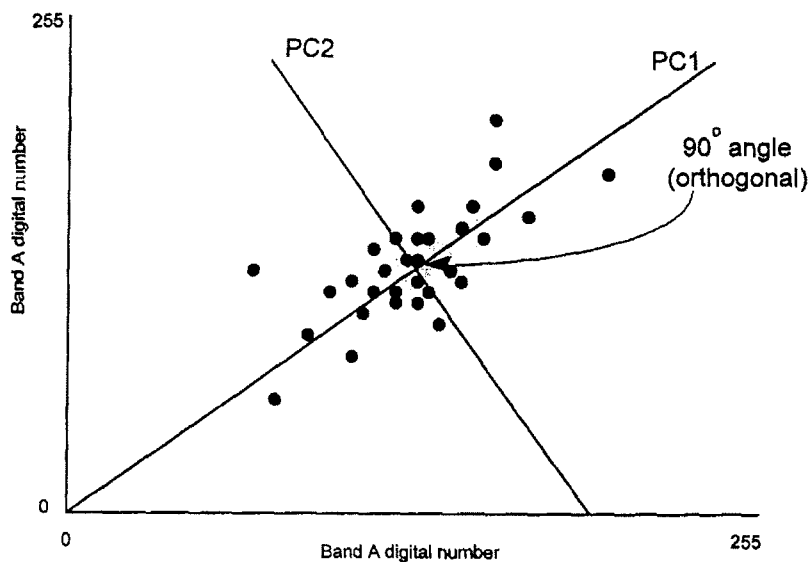
- 두개의 밴드 상에 나오는 불필요한 자료를 억제
- 두개의 밴드 상에서 달리 나오는 자료에 대해서 세밀화 하여 강조

- 대상물에 대한 조명조건, 즉 그림자 음영을 어느 정도 보정

특히, 이러한 지수들은 지수와 대상물의 통계적인 회귀분석 등에 의하여 정량적인 자료를 추출할 때 많이 사용된다.

다. 주성분 분석

영상자료는 통계적인 정보가 여러 밴드에 나뉘어져서 서로 상이한 분포를 하고 있으며, 서로 부분적 중복과 잡다한 요소를 가지고 있다. 주성분 분석은 사용 가능한 모든 밴드를 한번에 특성공간에 적용시켜 최대 분산 라인을 새로운 좌표축으로 잡고, 화소값들을 새로운 좌표체계로 변환시킴으로써 분리도가 큰 것으로부터 순차적으로 밴드를 재구성하는 것이다. (그림 9-1)은 2차원 특성공간에서의 주성분에 의한 좌표변환을 보여준다.



(그림 9-1) 주성분분석; PCA (Source : ERDAS Inc, 1991)

본 연구에서는 앞에서 구성된 지수밴드를 광물질 3개 밴드와 수분 2개 밴드에 대하여 각각 주성분 분석을 실시하여 5개의 밴드를 재구성하였다. 주성분 분석에 의하여 재구성된 밴드들에 대하여 앞에서 Tasseled Cap 변환으로 구성된 3개의 밴드와 특성공간상에서 상관성을 분석한 결과 수분 관련 지수에서 추출된 제 1 성분

과 Tasseled Cap 변환으로 구성된 moisture 밴드가 강한 상관관계를 보였으므로 수분 관련 지수에서 추출된 제 1 성분은 분류에 사용될 밴드에서 제외하였다.

따라서, 영상의 분류에는 Tasseled Cap 변환에 의하여 추출된 3개의 밴드와 지수 밴드의 주성분 분석에 의하여 얻어진 4 개 밴드를 합하여 총 7 개 밴드를 사용하였다.

4. 영상 분류

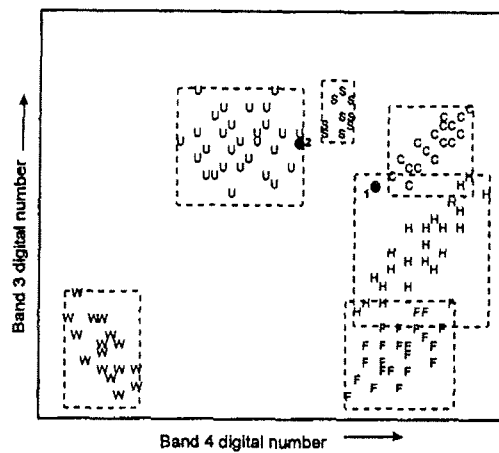
가. 영상 분류의 개요

영상분류의 방법은 크게 감독 분류와 무감독 분류로 구분되어진다. 감독 분류란 분류자가 특정한 훈련지역을 선정하여 분광특성을 추출한 후 그 분광특성에 따라 화소를 분류해 나가는 방법이고, 무감독 분류란 훈련지역에 대한 분광특성을 입력하지 않고 단지 개수나 분류하고자하는 유형만을 지정하여 군집분석법(Clustering method)에 의하여 영상을 분류하는 방법이다.

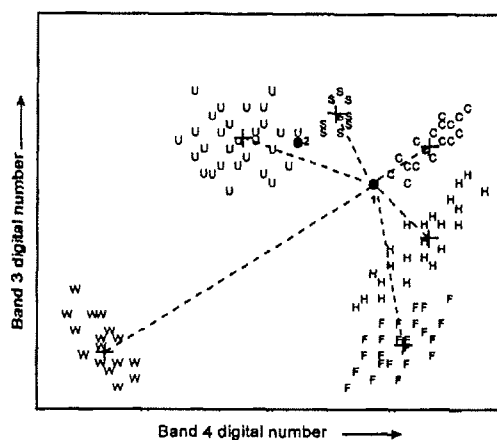
무감독 분류의 경우에는 사용자가 단지 분류의 개수만을 입력하게 되는 경우가 많으므로 손쉽게 사용할 수 있으나 분류된 결과를 해석하는 것은 상당히 어렵다. 감독분류의 경우에는 사용자가 선정한 훈련지역의 분광특성과 비교하여 유사한 분광특성을 가진 것들을 묶어내는 것이므로 훈련지역외의 영역은 도출하여 낼 수 없다는 단점을 가진다.

이러한 감독분류에는 특성공간에 있는 화소를 어떤 방법에 의해 분류하느냐에 따라 평행육면체분류 (Parallelepiped Classification), 최소거리분류 (Minimum Distance Classification), 최대우도분류 (Maximum Likelihood Classification)등의 방법이 있다. 평행육면체분류는 (그림 9-2)에서 보여지는 바와 같이 평균과 표준편차를 기준으로 상한과 하한을 설정하여 그 영역 내의 화소인 경우 같은 군집(Cluster)으로 구분하는 방법이며, 최소거리분류는 (그림 9-3)에서 처럼 주어진 화소와 각 군집 중심간의 분광거리 (Spectral Distance)를 계산하여 가장 가까운 군집에 속하는 것으로 판단하는 것이다.

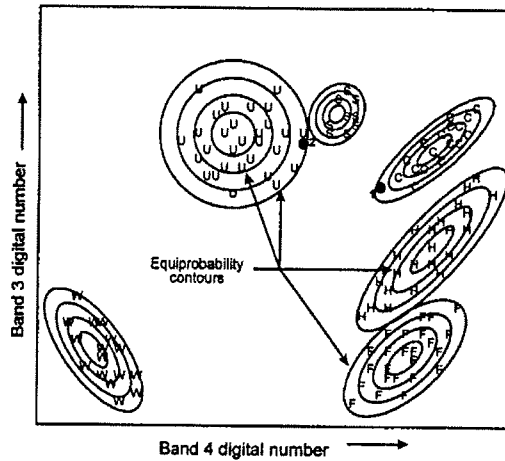
이러한 방법들과는 달리 최대우도분류법의 경우는 통계적인 방법을 통하여 (그림 9-4)에서 보는 바와 같이 화소가 각 군집에 속할 확률을 구하고 확률이 가장 큰 군집에 속하는 것으로 판단하는 방법이다. 최대우도분류는 그 정확도와 활용도가 높은 기법으로 평가되며, 현재 가장 널리 쓰이고 있으며, 분류 이전 단계에서 확률에 의한 분석이 가능하므로 본 연구에서는 영상의 분류를 위하여 최대우도분류방법을 사용하였다.



(그림 9-2) 평행육면체분류 (Source : Lillesand. et al., 1994)



(그림 9-3) 최소거리분류 (Source : Lillesand. et al., 1994)



(그림 9-4) 최대우도법 (Source : Lillesand. et al., 1994)

나. 시험지역 선정과 분광특성 추출

시험지역이란 분류에 사용될 분광특성을 채취할 훈련지역(Training sites)과 분류 후 분류결과를 검증할 검증지역(Testing sites)을 말하며, 도상 선정과 DGPS(Differential Global Positioning System)에 의한 측량 및 보정/순화(Refinement)의 과정을 거쳐 선정되었고 차후 훈련지역과 검증지역으로 분리되었다. 이론적으로 Bayesian 최대우도분류법을 적용하기 위해서는 분류에 사용되는 밴드의 수가 n 일 때 분류 항목 당 필요한 최소의 훈련지역 화소수는 $n+1$ 이며, 더 적은 경우에는 공분산행렬의 행렬식이 0이 되어 역행렬을 계산할 수 없으므로 분류가 불가능하다. 실제로는, 훈련지역의 화소수가 $10n \sim 100n$ 정도일 때 매개변수의 정확한 추정이 가능한 것으로 알려져 있다. 따라서, 적절한 화소수를 얻기 위하여 훈련지역의 크기를 최대한 크게 선정하고자 하였으나, 일부 토지이용항목을 제외하고는 영상 내에서 균질의 토지이용을 얻어내기가 매우 힘들었기 때문에 본 연구에서는 항목당 화소수 기준을 $3n$ 이상으로 하여 시험지역을 선정하였다.

1) 도상 선정

먼저 시험지역은 1:25,000 지형도를 바탕으로 유출곡선번호의 차이가 크고, 반사특성이 서로 다른 토지의 피복을 기준으로 17개 지역을 선정하였으며, 선정된 지역의 특징 및 지역은 <표 9-3>에서 보는 바와 같다.

이와 같은 시험지역의 세분은 분류의 정확도를 높이기 위한 것으로 시험지역에서

균질의 분광특성을 얻기 위한 것이다.

<표 9-3> 시험지역의 선정

번호	구 분	선 정 지 역
1	밭(나지)	농촌진흥청 원예 연구소/시험장
2	밭(식생지)	농촌진흥청 원예 연구소/시험장
3	침엽수림	칠보산 일대
4	활엽수림(명)	안산시 둔대동 212 고지 동쪽 사면
5	활엽수림(암)	안산시 둔대동 212 고지 서쪽 사면
6	초지(산림 초지)	축산 기술 연구소내 방치된 산림 초지 지역
7	초지(골프장 초지)	제일 컨트리클럽
8	논(답수)	안산시 본오동 논/농촌진흥청 시험포장 일부
9	논(비답수)	농생대/농진청 시험포장 일부
10	초지(약한 식생)	비봉면 삼화리 청산농장/축산기술연구소 내 초지
11	나지(식생 없음)	학교 운동장
12	콘크리트 포장	대형건물의 옥상
13	밀집 주거지	수원시 정자동 밀집 주거지 일대
14	길(자갈)	부곡역 근처 철길
15	길(아스팔트)	신갈-안산간 고속도로 요금정수소 일대
16	수면	서호
17	수면 부유물	반월 저수지 북서쪽 수면

2) DGPS 측량

민간용으로 개방된 GPS는 약 100 m에 가까운 위치 오차를 가지고 있으며, 이를 극복하기 위하여 개발된 방법중의 하나가 DGPS (Differential GPS)이다.

DGPS는 Rover와 Base station으로 분리되어 운영된다. Base station은 기지점에 설치 운용되는 고정 수신소이며 Rover는 사용자가 휴대하고 있는 이동 수신기를 말한다. Base station 은 자신의 위치정보를 바탕으로 위성으로부터 전송되는 위치정보의 오차를 계산한다. 이 오차를 Rover가 같은 시각에 수신한 위치자료로부터 감하므로써 좀 더 정확한 Rover의 위치를 알 수 있게 되는 것이다.

이러한 방법으로 민간용 GPS 의 오차를 1 m 이내로 줄일 수 있는 것으로 알려져 있으며, 선정된 시험유역에 대하여 측량을 실시하고 그 자료를 GIS 자료로 변환하였다.

3) 보정 및 순화

DGPS에 의하여 획득된 측량 자료는 지도상의 실제의 위치를 잘 반영하고 있다. 그러나 기하 보정이 끝난 위성영상의 경우 지상기준점 근처의 부분은 지도와 아주 잘 맞지만 지상기준점에서 멀리 떨어진 영역은 지도와 3-4 화소(90~100m) 이상의 오차를 보이고 있다. 따라서, 획득된 측량 자료는 지도와는 거의 일치하지만 영상에서는 다른 위치를 가지고 있을 수 있으므로 육안으로 확인하고, 정확한 영상에서의 영역으로 수정하는 작업이 필요하다.

또한, 측량에 의하여 획득된 자료는 분광의 특성을 일정하게 유지하는 부분과 그렇지 않은 부분으로 구분되어질 수 있다. 분광의 특성이 순수하지 않은 부분은 차후 분류에 악영향을 미칠 수 있으므로 순수한 분광특성을 이끌어 내는 작업이 필요하다. 순수한 분광 특성을 가지는 부분을 채취하기 위하여 식 (9-2)로 표현되는 Spectral Euclidean Distance의 개념과 Region Grow기법을 사용하였으며 Spectral Euclidean Distance와 Seed Pixel을 변화시켜 측량으로 획득된 영역과 거의 일치하는 영역을 시험지역으로 선정하였다. 이러한 방법의 장점은 추출하고자하는 대상지역의 분광특성을 일정하게 이끌어냄으로써 분류시 최적의 확률함수를 결정하여 줄 수 있다는 것이다.

Spectral Euclidean Distance란 n 개 밴드에 대한, 즉, n 차원의 특성공간에서의 두 화소간의 거리를 말하여 임의의 한 점 x 에 대한 밴드별 화소값을 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ 으로 나타내면 점 A 와 B 의 Spectral Euclidean Distance는 다음의 식으로 계산되어질 수 있다.

$$SEF = \sqrt{(A_1 - B_1)^2 + (A_2 - B_2)^2 + (A_3 - B_3)^2 + \dots + (A_n - B_n)^2} \quad (9-2)$$

제 3 절 다시기 영상에 의한 토지피복변화 추정

토지피복상태는 계속적으로 변화하므로 이를 조사하는데 많은 시간과 노력이 필요하다. 따라서 원격탐사 기법을 이용하면 보다 적은 조사기간과 경비 및 인력을 가지고 훨씬 더 정확한 자료를 얻어낼 수 있을 것이며, 다시기의 위성영상을 비교함으로써 대상지역의 토지피복변화의 준실시간 평가가 가능할 것이다.

본 연구의 목적은 다시기의 Landsat TM 영상을 이용한 소유역의 토지피복변화를 평가하기 위하여, 시험유역을 선정하고, 다시기 위성영상을 대상으로 최대우도분류법에 의한 감독분류 및 무감독 분류를 수행하여 토지이용상태를 추출하며, 시험유역의 토지피복변화를 고찰하고, Markov 과정을 이용하여 장래의 토지피복상태를 추정하여 그 변화율을 고찰하는 데 있다.

1. 대상지구 선정 및 위성영상 자료

가. 대상지구 선정

본 연구의 시험유역은 경기도 화성군 봉담읍과 팔탄면 소재 발안저수지와 기천저수지 유역을 선정하였다. 본 소유역을 택한 이유는 산간지, 중산간지, 평탄지, 취락지 등 다양한 토지피복상태를 보이고 있어, 위성영상을 이용한 우리나라 농촌 소유역의 토지피복변화를 평가하는데 용이하기 때문이다. 또한, 1996년부터 서울대 농공학과에서 수문/수질관측을 통한 강우-유출 특성 분석 자료와 비점오염원의 정량적 해석 자료가 구축되어 있기 때문에 다양한 토지피복상태에 따른 수문·수질 변화 분석이 용이하기 때문이다.

나. 위성영상 자료

위성영상의 전처리는 워크스테이션 ERDAS IMAGINE-8.3.0 (1997)을 사용하였고, 위성영상의 분석은 지리정보 및 위성영상의 분류를 목적으로 개발된 PC용 IDRISI (Eastman, 1990)를 이용하였다.

분류 대상 위성영상은 Landsat-5의 Thematic Mapper Sensor에 의하여 관측된 Path 116/Row 34의 영상중 남동쪽 사분을 사용하였다. 또한, 대상 소유역의 토지이용변화를 평가하기 위하여 1985년 5월 14일, 1993년 5월 20일, 그리고 1996년 9월

1일의 다시기 영상을 사용하였다. 대상영상은 경기도 일대와 서해지역, 충청북도, 그리고 서울 등의 일부지역이 포함되어 있다.

2. 위성영상의 전처리

Landsat 위성영상의 1개 면적은 185×185 (km²)이고, 6.5 km/sec의 속도로 주사선을 28초 동안 보통 700~900 km의 고도에서 지구를 촬영하므로 촬영 주사선(Scanner)이 1차원인데 비해 위성의 운동은 2차원이다. 따라서, 인공위성의 자세, 지구의 회전, 곡률 등에 따른 왜곡이 생기게 되며, 이와 같은 상대적인 변위에서 발생하는 기하학적인 왜곡을 보정해 주어야만 한다. 또한, 영상 반사치의 영향으로 발생하는 요인을 제거하기 위해 방사량 보정을 실시하였다.

기하학적인 보정은 다시기 영상좌표와 지도에서 선정된 30개의 지상통제점인 GCP (Ground Control Point)를 이용하여 최소자승법에 의해 좌표변환식을 도출하였다.

좌표변환을 실시하여 최소자승법에 의해 RMSE (Root Mean Square Error)을 계산한 결과, 1985년 영상은 0.3714 m, 1993년은 0.3857 m, 그리고 1996년 영상은 0.3625 m의 값을 보였다.

화상의 화소값을 결정하기 위하여 Nearest Neighbor 방법을 이용하여 재배열(Resampling)을 실시하였다. 재배열의 방법중의 하나인 Nearest Neighbor 방법은 원래 영상과 좌표변환된 영상을 겹쳤을 때 가장 가까운 화소의 값을 좌표 변환된 영상의 화소값으로 결정하는 방법이다. 다시기 영상의 재배열의 크기는 토지이용특성을 고려하여 분류가 용이하도록 실제 시험유역을 포함한 X(185,000, 200,000), Y(400,000, 430,000) 지역으로서, 500 columns \times 1000 rows 영역을 추출하였으며, 해상력은 30 m \times 30 m로 하였다. <표 9-4>는 재배열을 실시하기 위한 영상의 절출 영역과 특징을 나타내고 있다.

방사량보정은 대기층에 의해 흡수되는 영향을 제거하기 위해 ERDAS에 제공하는 메뉴중 Dehaze를 실시하였다. Dehaze는 흡수에 의한 변화인 Haze를 제거하기 위한 것으로서 Tasseled Cap 변환에 의하여 얻어진 영상으로부터 Haze 성분을 분류

하고, 다시 본래 영상으로 역산하는 것이다.

<표 9-4> 재배열 절출 영역

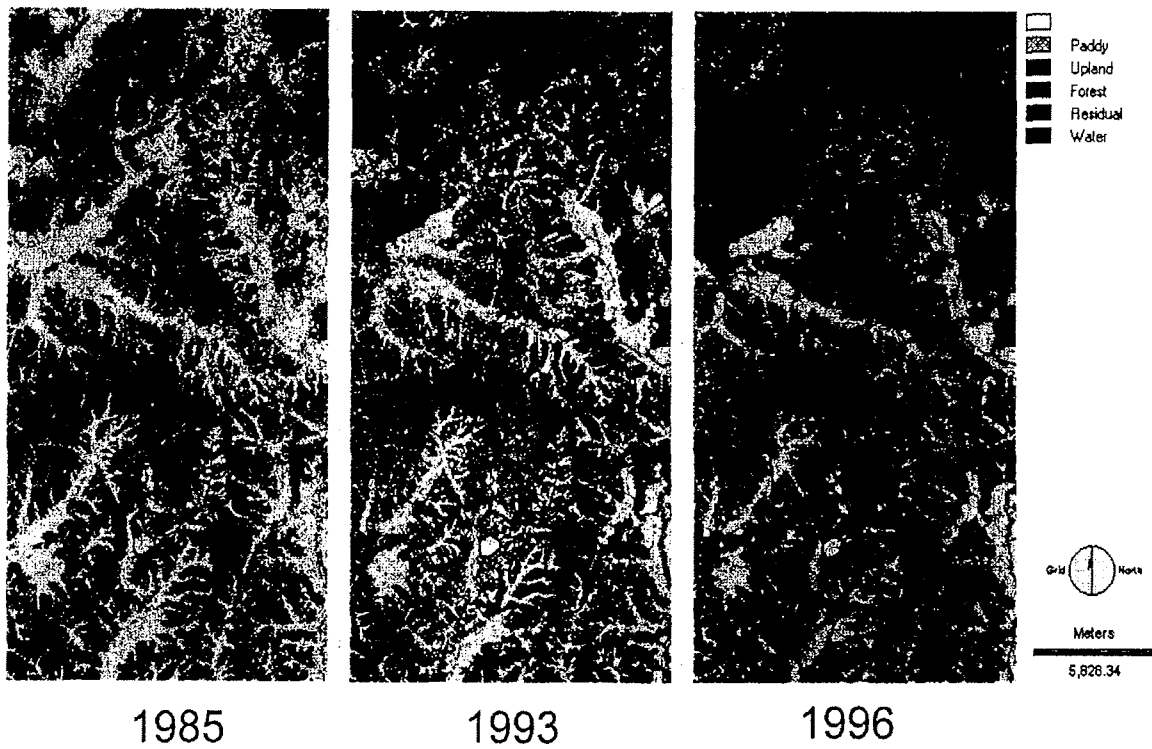
Coordinate	Min.	Max.	Column : 500	Ref. system: TM Korea (Mid ref.)
X	185000	200000	Row : 1000	
Y	400000	430000	Resolution : 30m	

3. 토지피복분류 결과

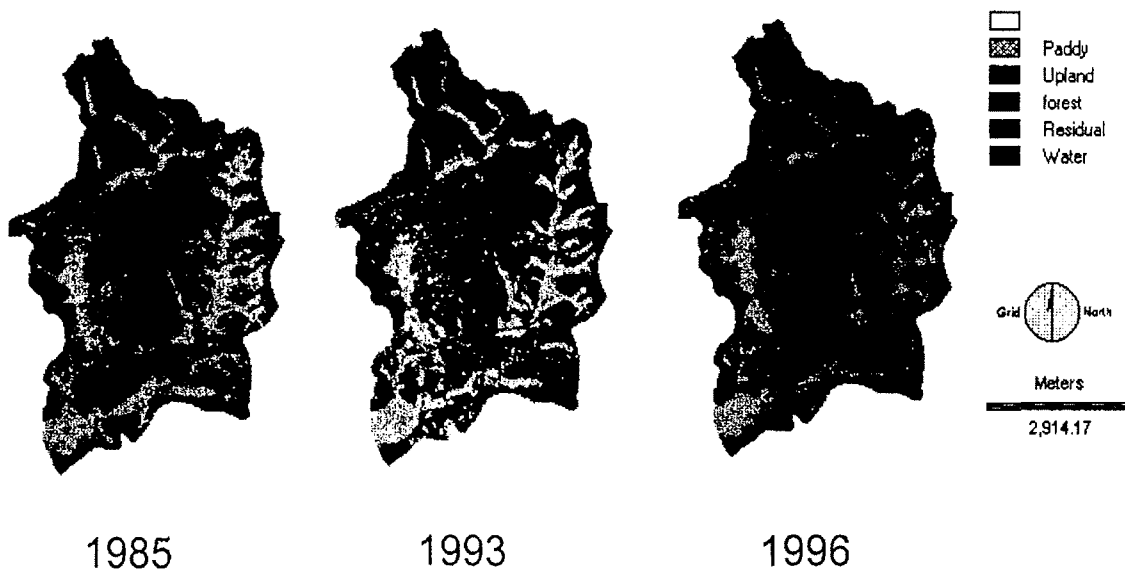
다시기 영상을 대상으로 토지피복변화를 평가하기 위해 과거의 토지피복정보가 정확하지 않은 1985년 영상과 1993년 영상에 대해서는 무감독 분류를 실시하였고, 비교적 최근인 1996년 영상은 1997년에 발간된 1/25,000 지형도를 이용하여 감독분류를 실시하였다. 이는 훈련지역으로 선정된 지역이 현재의 상황이나 도엽과 정확하게 일치하지 않았기 때문에 감독분류와 무감독분류를 병행한 것이다. 시험유역인 기천/발안지 유역은 유역도 벡터 자료를 이용하여 Masking을 통해 절취하였으며, 토지피복상태는 궁극적으로 논, 밭, 산림, 물, 기타로 구분하여 분류하였다.

재배열에 의해 절출된 영역에 대한 해당 년도의 토지피복분류 결과는 (그림 9-5)에서와 같다. (그림 9-5)에서와 같이 논과 산림은 감소하는 추세를 보였고, 주거지 등은 증가하는 경향을 나타내고 있다.

재배열을 수행한 영상에 대해 무감독 분류와 최우도법에 의한 감독분류를 실시한 후, 시험유역의 유역도 벡터 레이어를 중첩시켜 Masking을 수행함으로써 시험유역만을 추출한 '85년, '93년, 그리고 1996년의 결과는 (그림 9-6)에서와 같다. (그림 9-6)에서의 1985년과 1993년도 영상은 무감독 분류 후 재분류를 실시하여 시험유역만을 Masking한 결과이며, 1996년 영상은 감독분류를 한 것이다. (그림 9-6)에서 보는 바와 같이, 시험유역은 저수지를 중심으로 음식점과 도로 신설 및 확장으로 인해 주거지 등이 급속히 증가하는 추세를 보이고 있다.



(그림 9-5) Resampling 지역의 연도별 토지피복분류



(그림 9-6) 시험구역의 연도별 토지피복분류

본 연구에서 유역단위 경계로 토지피복분류 결과를 비교한 이유는 단지 토지피복 상태만을 고찰하는 것이 아니라, 유역내에서의 토지피복의 변화를 파악함으로써 유역내 수문, 수질 기작에 미치는 영향이나 변화를 고찰하고자 하기 때문이다.

다시기의 토지피복 면적과 그 비율의 산정 결과 및 국립지리원에서 발간한 지형도에서 직접 추출한 결과는 <표 9-5>에서와 같다. 시험유역의 총면적은 2,668 ha 이었으며, 1985년에 논과 산림의 비율이 23.9 %, 59.9 %에서 1996년에는 각각 17.2 %와 55.9 %로 감소하였음을 알 수 있다. 이에 비해 주거지 등으로 분류된 기타 클래스는 1985년에 7.3 %에서 20.6 %로 증가하였다. 이는 시험유역이 최근에 면에서 읍으로 승격한 것에서 알 수 있듯이, 1993년까지 나타나지 않았던 도로와 음식점 등이 급증한 이유 때문으로 생각된다.

<표 9-5> 토지피복분류 결과

Item	Area (ha)			Ratio of Area (%)			Park et al. (1997)*	
	1985	1993	1996	1985	1993	1996	Area (ha)	Ratio of Area (%)
Paddy	638	527	459	23.9	19.8	17.2	609	23.0
Upland	136	118	95	5.1	4.4	3.6	119	4.5
Forest	1,597	1,550	1,491	59.9	58.1	55.9	1,677	63.3
Residual	195	382	549	7.3	14.3	20.6	153	5.8
Water	102	91	74	3.8	3.4	2.8	91	3.4
Sum	2,668	2,668	2,668	100	100	100	2,649	100

* Park, S. W. et al., 1997. Monitoring of Agro-Ecological Environments at Small watershed, Journal of KSRP, Vol. 2, No. 2, pp. 91-102.

1/25,000의 지형도에서 직접 추출한 토지피복상태는 1995년 이전의 상태를 나타내므로 본 연구 결과 중에서 1993년 영상의 토지이용상태와 비교하는 것이 시기적으로 볼 때 비교적 적절하다고 생각된다. 시험유역의 총면적의 차이는 0.7%의 근소한 차이를 보였으며, 전체적인 비율에서 볼 때, 영상에서 추출한 결과가 논외의 경우

3.2 %, 산림의 경우는 5.2 % 정도 작게 나타났고, 이에 반해 주거지 등 기타는 8.5 % 정도 크게 나타났다. 이러한 결과는 발안저수지와 접해 있는 상류 지역이 지형도상에는 논과 산림으로 되어 있으나, 실제로는 군사시설이 들어서 있어서 영상분류시에 주거지로 지형도에 의한 분류에서는 논과 산림으로 분류되었기 때문으로 생각된다.

4. 토지피복변화 분석 및 추정

다시기 영상의 토지피복분류를 근거로 하여 각각의 토지피복이 서로 어떤 형태로 전환되었는지를 분석하였다. 토지피복의 변화는 1985년 토지피복 분류자료를 각각의 분류 클래스인 5개의 토지피복상태로 Masking하여 단일 클래스 자료를 생성하고, Error Matrix를 이용하여 1993년과 1996년의 토지피복분류 결과와 비교함으로써 추출하였다.

토지피복변화는 <표 9-6>에서와 같이, 1985년도의 토지피복상태에 비해 1993년과 1996년도에는 산림이 약 300 ha 이상, 논이 약 200 ha 이상이 주거지 등 기타로 전용되었음을 알 수 있다. 이는 시험지구가 전형적인 논농사 중심의 농촌지역이면서도, 저수지를 중심으로 많은 식당이 들어서고 있고, 도로가 계속적으로 신설 및 확장되고 있음을 대변하고 있다.

<표 9-6> 토지피복변화 (Unit : ha)

Item	From 1985 to 1993						From 1993 to 1996					
Land Cover	Paddy	Upland	Forest	Residual	Water	Sum	Paddy	Upland	Forest	Residual	Water	Sum
Paddy	399	13	84	142	0	638	315	17	99	92	4	527
Upland	2	17	102	16	0	137	12	13	51	42	0	118
Forest	110	53	1,304	126	4	1,597	73	27	1,261	189	0	1,550
Residual	6	36	58	95	0	195	56	39	76	211	0	382
Water	10	0	1	4	87	102	2	0	3	16	71	92
Sum	527	119	1,549	383	91	2,669	458	96	1,490	548	75	2,669

농업유역의 토지피복은 1980년대 중반 이후 경지면적이 급격히 감소하기 시작하여 1990년대 들어 감소추세가 더욱 증가하는 실정이다. 이러한 토지피복변화는 국내외의 원인 및 요소와 정부 시책 등에 의해 인위적으로 변화하므로 정확히 추정하기란 쉽지 않다.

5. 토지피복변화 추이 분석

시험유역의 토지피복상태를 예측하기 위하여 각 연도의 토지피복상태의 토지피복변화율로 추이행렬을 구성하고 Markov 과정을 적용하였다. 토지피복상태의 추정식은 식 (9-3)과 같다.

$$y^T = x^T A \quad (9-3)$$

여기서, y^T 는 장래 토지피복상태의 전치행렬, x^T 는 현재 토지피복상태의 전치행렬, A 는 추이행렬을 나타낸다.

본 연구에서는 1993년과 1996년의 토지피복변화율을 이용하여 3년 간격으로 그 추이 확률이 추이행렬로 주어진다고 가정하였고, 1999년과 2002년의 토지이용상태를 예측하였으며, 그 결과는 <표 9-7>에서와 같다. 1999년과 2002년의 토지피복상태는 논이 각각 16.4 %, 16.2 %, 산림이 각각 54.4 %, 53.7 % 등으로 감소하는 반면, 주거지 등의 기타는 각각 22.9 %, 23.9 % 등으로 꾸준히 증가하는 추세를 보였다. 다만, 물의 경우 1.9 %까지 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 시험유역에서 물로 분류된 영역이 저수지임을 고려할 때 과다하게 평가되었음을 알 수 있다.

수확량의 예측은 추정된 논 면적에 단위면적당 수확량을 곱하여 구하였다. 단위면적당 수확량은 경기도 지역의 평균 수확량 (1999)값인 502kg/ha를 사용하였다. 시험유역의 쌀 수확량은 1999년에 219,374kg, 2002년에 216,864kg으로 감소하였다.

<표 9-7> 토지피복변화의 추정 (Unit : ha (%))

Year	Paddy	Upland	Forest	Residual	Water
1999	437 (16.4)	107 (4.0)	1451 (54.4)	612 (22.9)	61 (2.3)
2002	432 (16.2)	113 (4.2)	1433 (53.7)	639 (23.9)	51 (1.9)

제 4 절 위성영상을 이용한 유출곡선번호의 추정

유출곡선번호의 추정을 위해서는 토지이용도가 필요하며 근래 토지이용도의 획득에 위성영상이 종종 이용되고 있다. 위성영상을 이용하여 유출곡선번호를 구하는 일반적인 방법은 토지이용도를 위성영상에서 구한 래스터의 토지이용 분류도로 대체 하는 것이다. 그런데 위성영상의 일반적인 분류 방법은 하나의 셀을 하나의 항목으로 분류하게 된다. 그러나 하나의 셀에 대해 구성 항목별 면적비의 추정이 가능하다면, 면적가중평균을 통하여 셀을 대표하는 좀 더 타당성 있는 유출곡선번호의 추정이 가능할 것이다. 따라서 본 연구에서는 확률론의 Bayesian 이론을 통하여 위성영상으로부터 하나의 셀을 이루는 항목별 면적비를 추정하고 이를 유출곡선 번호의 추정에 사용하는 방법을 시도하고 기존의 방법과 비교해 보도록 하였다.

1. 영상자료 및 전처리

가. 영상자료

위성영상자료로서 93년 5월 20일 Landsat-5의 TM Path 116/Row 34 영상의 남동쪽 사분을 사용하였다. 대상영상의 동쪽은 경기도 일대, 서쪽은 서해지역의 일부를 포함하고 있으며, 남쪽은 충청북도, 북쪽은 서울의 일부지역이 포함되어 있다.

나. 영상의 전처리

영상에 대한 기하학적인 왜곡을 보정하고 지도좌표와 일치 시키기 위하여 지상 통제점(Control Points)을 설정하고 3차의 좌표 변환식을 적용하므로써 기하 보정을 실시하였으며, 유출곡선번호 추정을 위하여 <표 9-8>과 같이 경기도 반월 유역 일대를 포함하는 영역을 절출하였다.

<표 9-8> 영상 절출 영역

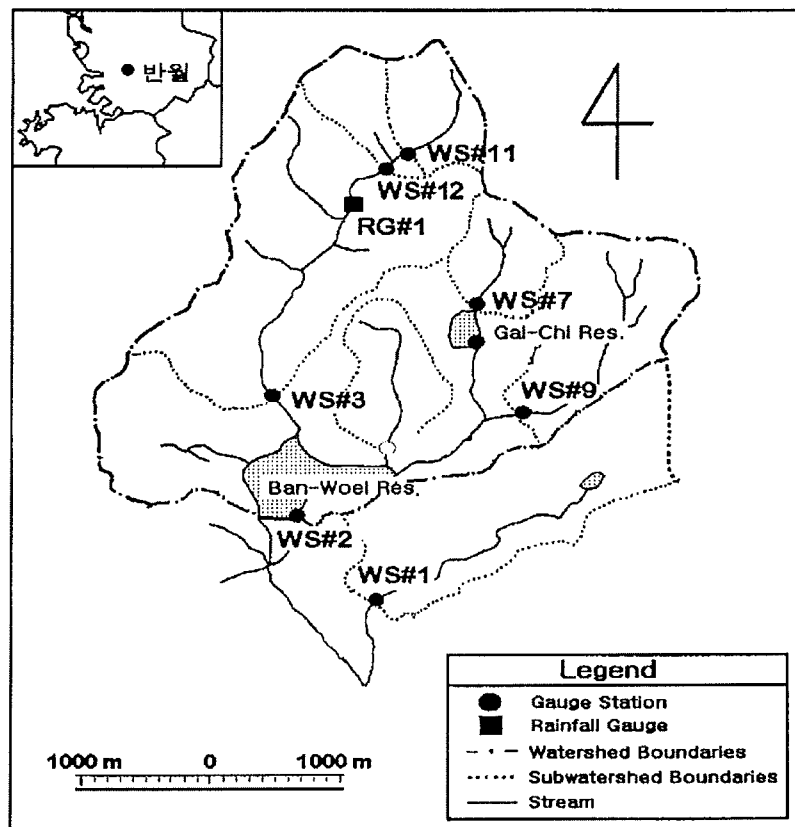
Coordinate	Min.	Max	Col. : 500	Ref. system : TM Korea (Mid ref)
X	187000	199500	Row : 632	
Y	414100	429900	Res. : 25 m	

2. 유출곡선번호의 추정 방법

가. 대상 유역 및 추정방법

유출곡선 번호의 추정을 위한 대상유역은 경기도 화성군 반월면에 위치한 반월저수지 유역을 대상으로 하였다. (그림 9-7)은 대상유역의 위치와 수문, 수질 계측지점을 보여주고 있다.

유출곡선번호의 추정은 영상분류에 의한 방법(방법 1)과 항목별 면적비 추정에 의한 방법(방법 2)의 두 가지 방법으로 실시하였다. 방법 1 에서 영상의 분류는 감독분류의 하나인 최대우도분류를 사용하였고 분류 결과로 나타난 각 셀의 토지이용을 바탕으로 셀의 유출곡선 번호를 추정하였으며 방법 2 에서는 Bayes의 이론을 이용하여 사후확률을 추정하고 이를 셀의 면적비로 가정하므로써 면적에 따른 가중평균으로 셀을 대표하는 유출곡선번호를 추정하였다.



(그림 9-7) 반월저수지 유역도

유출곡선번호는 토지이용 특성과 수문학적 토양군, 선행함수조건에 의하여 결정되며 방법 1의 경우는 대상 유역을 위성영상과 같은 크기의 셀로 쪼개고 셀에 해당하는 토지이용 특성을 단지 위성영상의 분류로부터 얻어진 결과로 대체하는 것이나 방법 2의 경우는 위성영상으로부터 각 셀이 가지고 있을 것이라고 추측되는 토지이용 특성의 비율을 추정하여 그 비율에 의하여 유출곡선번호를 평균하는 것으로 각 토지이용 특성의 비율을 추정에는 확률론에서 보편적으로 사용되는 Bayes 이론을 사용하였다.

1) Bayes 이론

Bayes 이론은 '원인'의 가능성으로서 '사전확률'로부터 관측 결과 나타날 수 있는 '사후확률'을 추정하는 방법으로 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$\begin{aligned} P(F_i | E) &= \frac{P(F_i \cap E)}{P(E)} = \frac{P(E \cap F_i)}{P(E)} \\ &= \frac{P(F_i)P(E | F_i)}{P(E)} \\ &= \frac{P(F_i)P(E | F_i)}{\sum_{i=1}^n P(E | F_i)P(F_i)} \end{aligned} \quad (9-4)$$

여기서, 사건 F_1, F_2, \dots, F_n 을 n 가지의 원인이라고 한다면, $P(F_i)$ 는 '원인'의 가능성으로서 '사전확률(A priori probability)'이라 할 수 있고, $P(E|F_i)$ 는 '원인' F_i 의 결과로서 E 가 관측될 확률을 나타내며, $P(F_i|E)$ 는 E 가 관측된 후에 '원인' F_i 의 가능성으로서 '사후확률(A posteriori probability)'이라 할 수 있다.

Bayes 이론에 의하면 사전확률 $P(F_i)$ 를 알고 있어야만 사후 확률을 계산할 수 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 실제로 각 분류항목에 대한 신뢰할 만한 사전확률은 추정하기 어려우므로 분류항목에 대한 사전 확률을 모두 같게 하는 것이 일반적이다.

이때, 사후확률을 살펴보면 사후확률이란 임의 사건 E 중 표본공간의 사건 F_i 가 차지하는 비율로서 확률을 의미하나 관점을 바꾸어 혼합셀(Mixel)에 대한 면적비율 개념으로 생각한다면, 한 혼합셀 내에서 한가지의 분류항목이 차지하는 면적 비율로 가정할 수 있을 것이다.

2) 관측확률 계산

관측확률은 분류항목이 결과로서 관측될 확률을 의미하며, 관측확률을 계산하는 방법에는 여러 가지가 있지만, 일반적으로 최대우도 분류에서는 각 분류항목에 대한 확률함수를 정규확률밀도함수로 정의하여 표현하고 있으며 1 차원 또는 단일변량 (univariate)의 경우, 분류항목 i 에 대한 정규확률밀도함수는 다음 식과 같다.

$$P(X | \omega_i) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \sigma_i} \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(X - \mu_i)^2}{\sigma_i^2} \right] \quad (9-5)$$

여기서, X 는 전체 측정공간에서의 측정값, ω_i 는 분류항목 i , μ_i 는 $E[X | \omega_i]$ 분류항목 i 내의 측정값의 평균 (기대값), σ_i^2 는 $E[(X - \mu_i)^2 | \omega_i]$ 분류항목 i 내의 측정값의 분산이다. 실제로 μ_i 와 σ_i^2 은 미지값이며 분류실행 전 단계의 훈련지역에서 추정되어야 한다.

이 식을 벡터 및 행렬의 개념을 이용하여 n 차원으로 확장하면 n 차원 다변량 (multivariate) 정규확률밀도함수는 다음 식으로 표현된다.

$$P(X | \omega_i) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} |\Sigma_i|^{1/2}} \exp \left[-\frac{1}{2} (X - M_i)^T \Sigma_i^{-1} (X - M_i) \right] \quad (9-6)$$

여기서, M_i 는 분류항목 i 의 평균벡터, Σ_i 는 분류항목 i 의 공분산행렬, $|\Sigma_i|$ 는 공분산행렬의 행렬식, Σ_i^{-1} 는 공분산행렬의 역행렬이다.

이상의 방법에 의하면 훈련지역의 분광특성으로부터 평균과 공분산행렬을 결정하므로써 분류항목에 대한 사후확률, 즉, 화소내의 면적비를 추정할 수 있다.

나. 수문학적 토양군

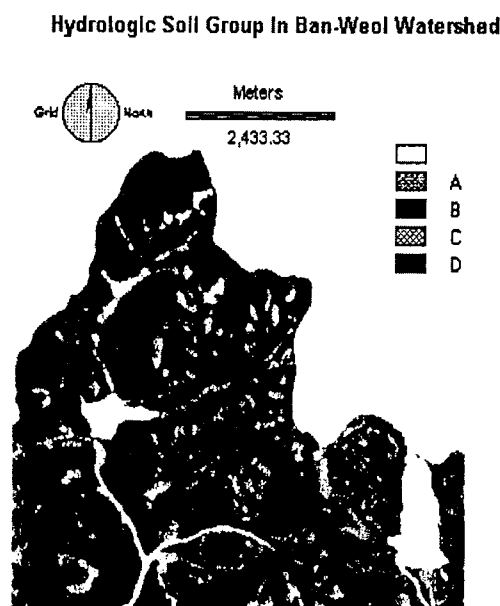
농촌진흥청의 정밀토양도에 나타난 개략적인 토성은 <표 9-9>와 같으며 이것을 <표 9-10>과 비교해 볼 때 사토와 양질사토, 사양토의 경우는 A 군으로 양토와 식양질토는 B 군으로 식질토는 C 군으로 세식질토는 D 군으로 분류할 수 있으며, 정밀토양도로 부터 (그림 9-8)에서 보는 바와 같은 수문학적 토양군도를 얻었다.

<표 9-9> 정밀토양도의 투수성 기준(정밀토양도)

투수정도	투수속도(cm/hr)	대체적인 토성
매우느림	- 0.1	세식질토
느림	0.1 - 0.5	식질토
약간느림	0.5 - 2.0	식양질토
보통	2.0 - 6.0	양토
약간빠름	6.0 - 12.0	사양토
빠름	12.0 - 25.0	양질사토
매우빠름	25.0 -	사토

<표 9-10> 침투속도에 의한 수문학적 토양군 구분(Chow, 1964)

Soil Group	USDA soil textures	Transmission Rate (cm/hr)
A	sand, loamy sand, and sandy loam	0.76 -
B	silt loam and loam	0.38 - 0.76
C	sandy clay loam	0.13 - 0.38
D	clay loam, silty clay loam, sandy clay, silty clay, and clay	0.00 - 0.13



(그림 9-8) 수문학적 토양군도

3. 토지이용 분류

지도와 영상을 바탕으로 반사특성이 서로 다른 토지의 피복을 기준으로 17개 지역을 선정하고 DGPS 측량을 실시하므로써 시험지역을 설정하였으며, 이를 분류에 사용되는 분광특성을 채취할 훈련지역과 분류 후 결과를 검증할 검증지역으로 분리하였다. 훈련지역으로부터 채취된 분광특성을 바탕으로 영상을 17개 항목으로 분류하였고, 분류된 영상의 검증을 위하여 검증지역을 이용하여 오차행렬을 작성한 결과 전체적인 분류정확도는 90.65 % 로 판단되었으며 각각의 항목에 대하여 <표 9-11>과 같이 유출곡선 번호를 선정하였다.

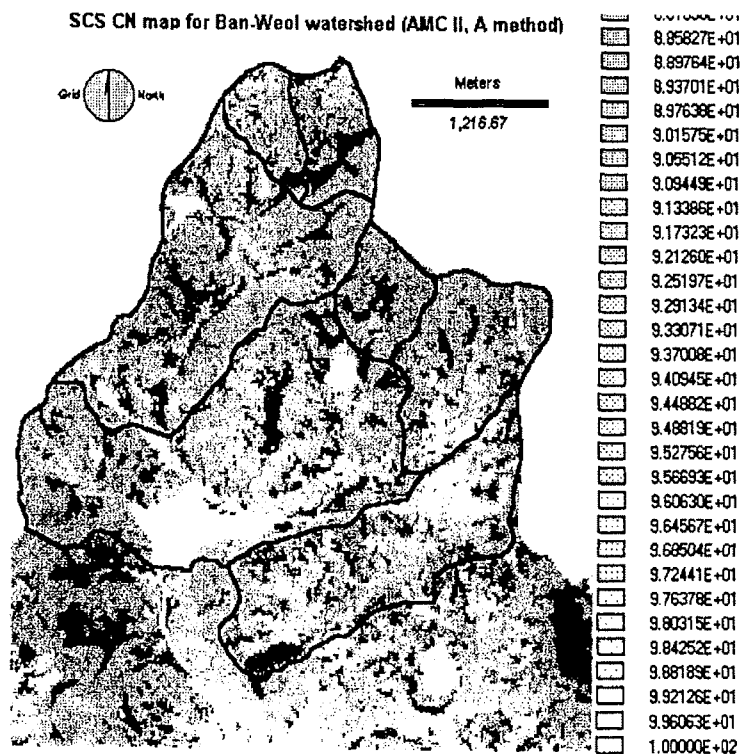
<표 9-11> 토지이용에 따른 유출곡선 번호

구 분	SCS 토지이용구분 (수문학적 조건)	유출곡선번호			
		A	B	C	D
밭(나지)	Cultivated land (without C.T.)	72	81	88	91
밭(식생지)	Cultivated land (with C.T.)	62	71	78	81
침엽수림	forest(very sparse)	56	75	86	91
활엽수림(명)					
활엽수림(암)					
초지(산림초지)	pasture(good)	39	61	74	80
초지(골프장초지)	golf courses (good)	39	61	74	80
논(담수)	paddy	78	78	78	78
논(비담수)					
초지(약한 식생)	pasture(poor)	68	79	86	89
나지(식생 없음)	Streets and roads: dirt	72	82	87	89
콘크리트 포장	Paved roofs: roofs	98	98	98	98
밀집 주거지	72% impervious	81	88	91	93
길(자갈)	Streets and roads: gravel	76	85	89	91
길(아스팔트)	Streets and roads: paved	98	98	98	98
수면	water surface	100	100	100	100
수면 부유물					

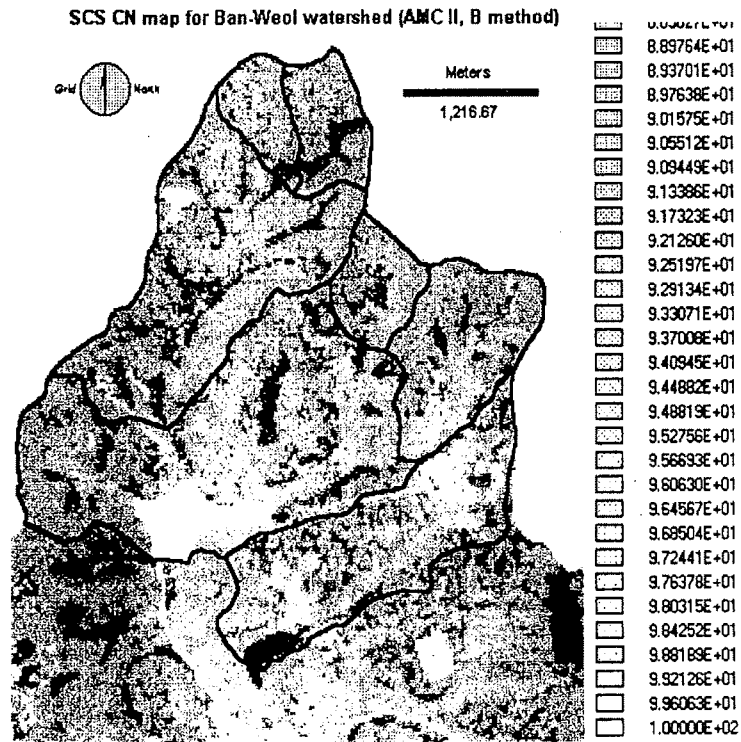
※ C.T. : conservation treatment

4. 유출곡선 번호 추정 결과

방법 1 과 방법 2 를 사용하여 AMC II 조건에 대하여 유역내의 유출곡선번호의 값을 추정하였으며 추정된 유출곡선 번호의 분포는 (그림 9-9)와 (그림 9-10)과 같다. 두 그림이 유사하여 보이나 자세히 살펴보면 방법 2 로 추정된 (그림 9-10)이 더 유연하여 보임을 알 수 있다. 이것은 (그림 9-9)가 각 셀의 유출곡선번호의 값이 상당히 불연속적인데 반하여 (그림 9-10)은 각 셀의 유출곡선번호의 값이 좀 더 부드럽게 연결되어짐을 의미한다.



(그림 9-9) 유출곡선번호추정 결과(방법1)



(그림 9-10) 유출곡선번호추정 결과(방법1)

이상의 결과를 바탕으로 김(1993)의 논문에서 수록된 1993년도 반월 저수지 유역 주요 강우사상 13개에 대하여 직접 유출량을 구하여 실측치와 비교해 본 결과 방법 1과 방법 2의 평균적인 상관계수(R)와 평균제곱근오차(RMSE)는 <표 9-12> 과 같이 좀 더 향상 되는 것으로 나타났다.

<표 9-12> 93년 강우에 대한 평균 R 및 RMSE

Method	방법 1	방법 2
Averaged R	0.97333	0.97507
Averaged RMSE (mm)	5.29	5.10

제 5 절 요약 및 결론

위성영상자료의 현행화 기술 개발을 위하여, 위성영상의 분석기법을 정리하였고, 발안구역과 반월유역을 대상구역으로 선정하여 토지피복분류를 수행하였으며, 다시기 위성영상을 대상으로 토지피복상태를 추출하였고, 대상구역의 토지피복상태 및 변화를 고찰하였다. 이를 바탕으로 유출곡선 번호를 추정하였고, Markov 과정을 이용하여 장래의 토지피복상태를 추정하여 그 변화율을 고찰하였으며, 이를 토대로 수확량의 추정 가능성을 검토하였다.

본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- ① 위성영상에 대한 기하보정과 방사량 보정을 실시하고 밴드를 재구성하여 최대우도분류기법과 무감독분류에 의하여 영상 분류를 실시하였다.
- ② 영상의 정확도는 전체적으로 약 90% 정도였으며 당시의 토지이용상태를 적절히 반영하고 있는 것으로 판단되었다.
- ③ 발안저수지 시험구역의 토지피복상태를 분류하기 위해 1985, 1993, 그리고 1996년의 다시기 영상에 대해 기하학적 보정과 방사량 보정 등의 전처리를 수행하였으며, 30개의 GCP를 이용하여 좌표변환을 한 결과 RMSE는 1985, 1993, 그리고 1996년에 대해 각각 0.37 m, 0.39 m, 그리고 0.36 m의 값을 나타냈다.
- ④ 다시기 위성영상의 토지피복변화를 평가하기 위해 Tasseled Cap 변환지수와 지수밴드를 구성하였으며, Nearest Neighbor 방법에 의해 재배열을 실시한 후 1985년 영상과 1993년 영상은 무감독 분류를 실시하였고, 1996년의 영상은 최대우도법을 이용하여 감독분류를 수행하였다.
- ⑤ 토지피복분류를 실시한 결과, 시험구역의 총면적은 2,668 ha 이었으며, 1985년에 논과 산림의 비율이 23.9 %, 59.9 %에서 1996년에는 각각 17.2 %와 55.9 %로 감소하였고, 주거지 등으로 분류된 기타 클래스는 1985년에 7.3 %에서 '96년에는 20.6 %로 증가하였다.
- ⑥ 본 연구 1993년 토지피복상태와 기존의 지형도에서 직접 추출한 토지피복상태

를 비교한 결과, 시험구역의 총면적의 차이는 0.7%의 근소한 차이를 보였으며, 전체적인 비율에서 볼 때, 영상에서 추출한 결과가 논인 경우 3.2 %, 산림의 경우는 5.2 % 정도 작게 나타났고, 주거지 등 기타는 8.5 % 정도 크게 분류되었는데, 이는 발안저수지와 접해 있는 상류 지역이 지형도상에는 논과 산림으로 되어있으나, 실제로는 군사시설이 들어서 있는 주거지로 분류되었기 때문으로 생각된다.

- ⑦ 토지피복변화는 1985년도의 토지피복상태에 비해 1993년과 1996년도에는 산림이 약 300 ha 이상, 논이 약 200 ha 이상이 주거지 등 기타로 전용되었으며, 이는 도로 신설과 확장 그리고 음식점이 급증하였기 때문으로 생각된다.
- ⑧ Markov 과정을 이용하여 1999년과 2002년의 토지피복상태를 예측한 결과, 1999년과 2002년의 토지피복상태는 논이 각각 16.4 %, 16.2 %, 산림이 각각 54.4 %, 53.7 % 등으로 감소한 반면, 주거지 등의 기타는 각각 22.9 %, 23.9 % 등으로 꾸준히 증가하는 추세를 보였다.
- ⑨ Bayes의 이론을 이용하여 한 화소내의 복합적인 토지이용을 추정함으로써 각각에 대한 유출곡선번호도를 작성하였다.
- ⑩ 1993년도의 실측 강우를 적용한 유출해석을 실시하여 실측 유출량 및 지도를 이용한 기존의 연구결과와 비교한 결과, 실측 유출량과의 상관계수와 평균제곱근오차 면에서 위성영상을 사용한 방법이 지도를 사용하는 기존의 방법과 유사하거나 더 나은 추정결과를 보였다.

이상과 같이, 위성영상을 이용한 토지피복상태의 추출이나 수문 유출곡선번호의 추정은 정보의 최신성과 인력, 시간 및 비용면에서 효과적이며, 농업구역의 경지면적 변화를 파악함으로써 작물의 수확량을 예측할 수 있고, 토지이용변화에 따른 비점오염원의 기여도 평가 및 환경영향평가가 가능하므로 하천의 오염부하량이나 농업생태계의 환경을 간접적으로 파악할 수 있으며, 정부나 연구단체에서 토지 전용 및 농촌계획, 환경보전 및 관리를 위한 정책을 결정하는 기초자료로서의 제공이 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 김광은, 이태섭, 1994. 수질오염 감시에의 활용을 위한 항공원격탐사의 적용 연구, 한국GIS학회지, 2(1), pp. 65-74.
2. 김용일, 1991. 인공위성 원격탐사 데이터의 분석정확도 향상에 관한 연구, 서울대학교 박사학위 논문.
3. 김진택, 1995, 농업 비점원 오염 모형을 위한 지리정보 시스템 호환모형의 개발 및 적용, 서울대학교 박사학위 논문
4. 남현옥, 박경운, 조성익, 1989. 원격탐사기법에 의한 소유역의 홍수수문곡선 결정, 대한원격탐사학회지 5(1) : 13-27.
5. 농림부, 농업기반공사, 1999. 농업생산기반사업통계연보.
6. 농림부 · 국립농산물검사소, 1999. 1998년산 작물통계.
7. 박민호, 1988, 원격탐사 Data의 정확도 향상을 위한 Bitemporal classification 기법의 적용, 서울대학교 석사학위 논문.
8. 박종화, 1992, Landsat 녹색식생지수를 이용한 서울시 도시녹지 변화 조사, 대한원격탐사학회지, Vol. 8, No. 1, pp. 27-43.
9. 박희성, 1998, 위성영상을 이용한 토지이용 분류 및 유출곡선번호의 추정, 서울대학교 석사학위 논문
10. 신동석, 1996. 지상제어점 결정을 위한 스캐닝된 지도의 이용 가능성 연구, 대한원격탐사학회지 12 (1): 71-25.
11. 심순보 등, 1996. 원격탐사기법을 이용한 충주저수지 오염부하량 산정 연구, 충북대학교, 수자원 · 수질연구센터 논문집 2(1).
12. 안충현, 오성남, 박종현, 1995. RS/GIS 수법을 이용한 광역 증발산량의 추정, 대한원격탐사학회지, 11(1): 67-80.
13. 정종철, 유신재, 1998. Landsat TM을 이용한 수온분포 분석, 1998년도 대한원격탐사학회 춘계학술대회 논문집, pp. 67-71.
14. Adinarayana, J., and N Rama Krishna, 1996, Integration of multi-seasonal remotely-sensed images landuse classification of a hilly watershed using

geographical information systems, Int. J. Remote Sensing 17 (9) : 1679-1688.

15. Bondelid, T. R., T. J., Jackson, and R. H., McCuen, 1982. Estimating Runoff Curve Numbers Using Remote Sensing Data, Proc. Int. Symp. on Rainfall-Runoff Modeling, Applied Modeling in Catchment Hydrology, Water Resources Publications, Littleton, Colo., 519-528.
16. Calotto, Mark J., 1996. Spectral Shape Classification System for Landsat Thematic Mapper, Proceedings SPIE 2758.
17. Chhikara, RAJ S., 1984. Effect of Mixed (Boundary) Pixel on Crop Proportion Estimation, Remote Sensing of Environment 14 : 207-218.
18. Chow, Ven Te., et al., 1964, Handbook of Applied Hydrology : Sec. 21 Hydrology of Agricultural lands, Sec. 22 Hydrology of Forest lands and Rangelands, McGraw-Hill.
19. Civco, D.L. and James D. Hurd, 1997. Impervious surface Mapping for the State of Connecticut, ACSM/ASPRS, Annual Convention & Exposition, pp. 124-135.
20. Crist, E. P. and R. C. Cicone, 1984. Comparisons of the Dimensionality and Features of Simulated Landsat-4 MSS and TM Data, Remote Sensing of Environment 14 : 235-246.
21. Crist, E. P. and R. J. Kauth, 1986. The Tasseled Cap De-Mystified., Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 52(1) : 81-86.
22. Crist, E. P. et al. 1986. Vegetation and Soils Information Contained in Transformed Thematic Mapper Data., Proceedings of IGARSS'86 Symposium, ESA Publications Division, ESA SP-254.
23. Crist, E. P., and R. C. Cicone, 1984. Comparisons of the Dimensionality and Features of Simulated Landsat-4 MSS and TM Data, Remote Sensing of Environment 14 : 235-246

24. ERDAS Inc., 1991, ERDAS Field Guide, Atlanta, Georgia.
25. ERDAS Inc., 1991. ERDAS Field Guide, Atlanta, Georgia
26. Folly, A., M. C. Bronsveld, and M. Clavaux, 1996. A knowledge-based approach for C-factor mapping in Spain using Landsat TM and GIS, Int. J. Remote Sensing 17(12) : 1401-1415.
27. Gash, J.H.C., An Analytical Framework for Extrapolating Evaporation Measurements by Remote Sensing Surface Temperature, Int. J. Remote Sensing, 8(8): 1245-1249.
28. Hawkins, R. H., A. T. Hjelmfelt, and A. W. Zevenbergen, 1985. Runoff Probability, Strom Depth, and Curve Numbers., ASCE, J. Irr. & Dr. 11(4) : 330-340
29. Jackson, T. J., R. M. Ragan, and W. N. Fitch, 1977. Test of Landsat-Based Urban Hydrologic Modeling, J. Water Resour. Plann. Manage. Div., ASCE 103 (WR1): 141-158.
30. Jensen, John R., 1996, Introductory Digital Image Processing : A Remote Sensing Perspective, Englewood Cliffs, New Jersey , Prentice-Hall.
31. Kartikeyan, B., B. Gopalakrishna, M. H. Kalubarme and K. L. Majumder, 1994. Contextual techniques for classification of high and low resolution remote sensing data, Int. J. Remote sensing 15(5) : 1037-1051.
32. Kushwaha, S. P. S, S. Kuntz and G. Oesten, 1994. Applications of image texture in forest classification, Int. J. Remote Sensing, 15(11) : 2273-2284.
33. Lee, H. Y, 1995. Potential Effects of Land-Use Change on the Local Climate, Journal of KSRS, Vol. 11, No. 3, pp. 71-81.
34. Lennington, R. K. and C. T. Sorensin, R. P. Heydorn, 1984. A Mixture Model Approach for Estimating Crop Areas from Landsat Data, Remote Sensing of Environment 14 : 197-206.
35. Lillesand, Thomas M. and Ralph W. Kiefer, 1994. Remote Sensing and Image

Interpretation, New York: John Wiley and Sons.

36. Maidment, David R., et al., 1992. Handbook of Hydrology: Chap. 24 Remote Sensing, McGraw-Hill.
37. McFeeters, S. K., 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, Int. J. Remote Sensing 17(7): 1425-1432.
38. Okamoto, K. and M. Fukuhara, 1996. Estimation of paddy field area using the area ratio of categories in each mixel of Landsat TM, Int. J. Remote Sensing 17(9): 1735-1749.
39. Park, C. H, 1995. A Study on the Evaluation Method of Urban Open Spaces of Seoul with Remote Sensing: Detection of the Ecotone of the Mt. Pukhansan National Park, Journal of KSRS, Vol. 11, No. 3, pp. 71-81.
40. Ragan, R. M. and T. J. Jackson, 1980. Runoff Synthesis Using Landsat and SCS Model, J. Hydraul. Div., ASCE 106(HY5) : 667-678.
41. Sabins, Floyd F., Jr., 1987. Remote Sensing Principles and Interpretation, New York : W.H.Freeman and Co..
42. Sabins, Floyd F., Jr., 1987. Remote Sensing Principles and Interpretation, New York : W.H.Freeman and Co..
43. Singh, V. P. and A. N. Singh, 1996. A remote sensing and GIS-based methodology for the delineation and characterization of rainfed rice environments, Int. J. Remote Sensing 17(7) : 1377-1390.
44. Slack, R. B. and R. Welch, 1980. Soil Conservation Service runoff curve number estimates from Landsat data, Water Resour. Bull. 16: 887-893.
45. Tucker, Compton J., 1979. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation, Remote Sensing of Environment 8: 127-150.
46. Van Deventer, A. P., A. D. Ward, P. H. Gowda, and J. G. Lyon, 1997. Using

Thematic Mapper Data to Identify Contrasting Soil Plains and Tillage Practices, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 62(1): 87-93.

47. Welle, P. I. and T. J. Jackson, 1982. Application of Landsat Data and Computer Data Bases for Runoff Curve Number Estimation, ASAE paper 82-2097, ASAE, Summer Meeting, Madison, Wis.
48. Young, R. A., C. A. Onstad, D. D. Bosch, and W. P. Anderson, 1987. AGNPS, Agricultural Non-Point Source Pollution Model. A Watershed Analysis Tool. USDA, Conserv Res. Report 35.

여 백

제 IV 편

농업생태환경 모델링 기술 개발

여 백

농업유역의 수문순환 모델링

2000년 12월

“농업생태환경 모니터링 및 종합적 환경관리시스템 개발 사업”

서울대학교 농업생명과학대학 부속 농업개발연구소

최종보고서 제 IV 편 제 10 장

여 백

제 10 장 농업유역의 수문순환 모델링

제 1 절 서 론

유역에 강우가 발생하면 지표면을 포화시키고 토양중으로 침투되며, 지표면이나 토양속으로 이동하여 하천으로 유출되게 된다. 또한, 태양의 복사에너지에 의한 증발산 현상이 일어나는 데, 식물의 잎이나 줄기를 통해 수분을 대기중으로 방출하거나 토양에 포함된 토양수분을 다시 대기중으로 보내 대기중의 수증기를 보충하고, 이는 다시 구름을 형성하여 강우를 일으키는 원인이 된다. 이와 같이 유역내에서 수분의 이동에 따른 수문순환은 강우, 침투, 증발 및 유출 등의 수문현상이 서로 연결되어 순환적으로 발생한다.

농업유역은 농작물의 재배가 이루어지는 생산공간이다. 따라서, 농작물의 재배를 위한 농경지가 유역내에 산재되어 있으며, 작물의 생육에 필요한 수분을 공급하는 수원공 시설이 위치하고 있다. 우리 나라는 논벼의 재배를 위하여 4월부터 9월까지 많은 량의 물을 관개지구에 공급하고 있으며, 이로 인하여 하천의 상하류 유황이 변화하게 된다. 또한, 관개지구에 공급된 수량중의 일부는 다시 하천으로 흘러나와 하천 수량을 보충하게 되므로, 농업용수의 이용에 따른 수문순환 관계를 해석할 필요가 있다.

이러한 농업유역의 수문순환 해석은 유역내 물의 이동과 순환기작을 분석하고, 효율적인 수자원 관리를 위하여 필요하다. 또한, 유역내 환경 관리를 위한 측면에서도 이들 수문요소들의 기작을 정량적으로 분석하여, 하천이나 호소 등의 수량 및 수질 관리를 병행하여야 한다.

따라서, 본 장에서는 농업유역의 수문순환을 거동을 분석하고, 이를 이용하여 수문순환을 해석하기 위한 수학적 모델을 구성에 대하여 논의하고자 한다. 또한, 개발된 모델을 이용하여 유역내 수자원의 이용 현황을 파악하고, 물수지 분석을 실시하고자 한다.

제 2 절 농업유역의 수문순환 모델의 개발

1. 모델의 기본 개념

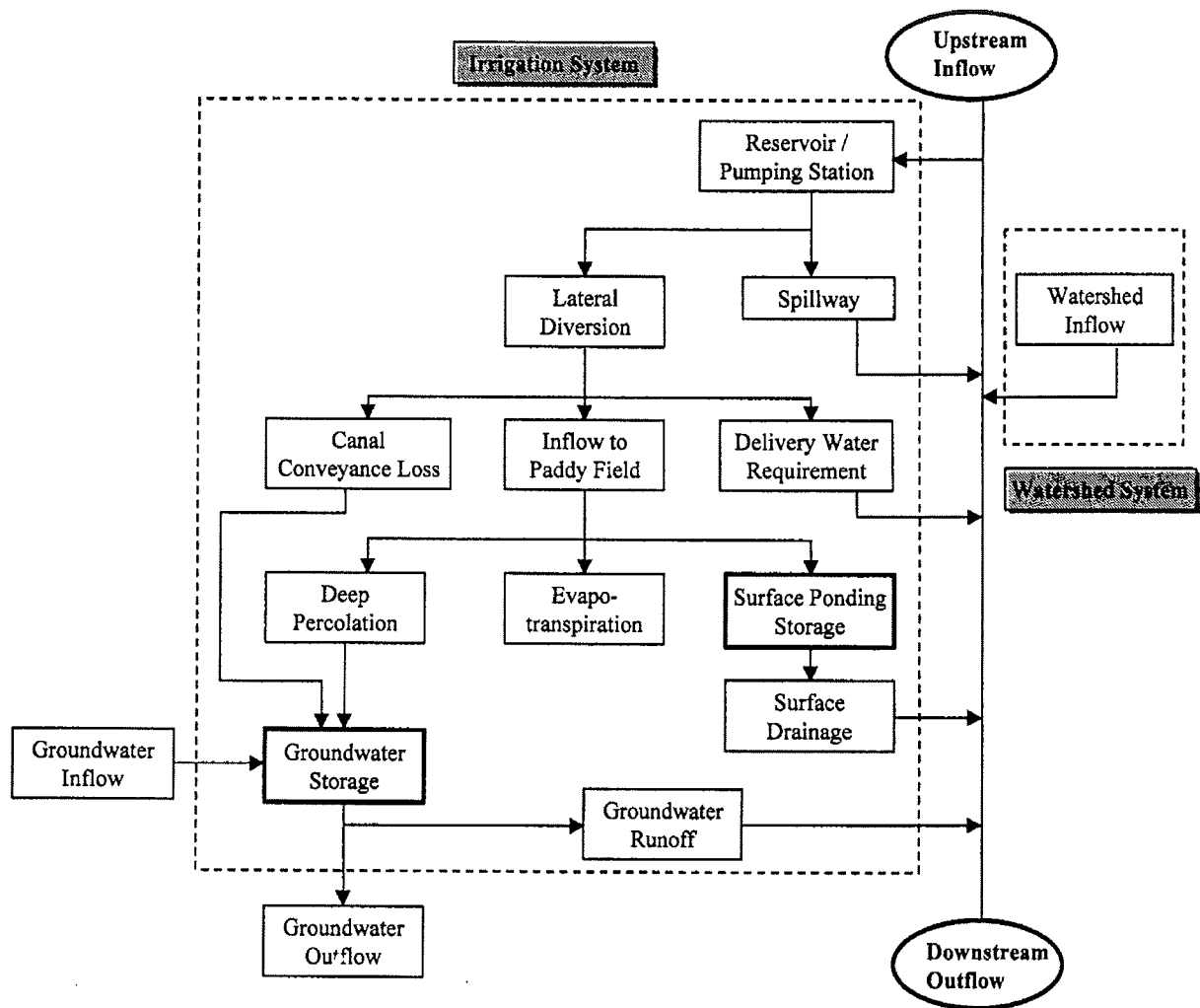
농업유역은 농작물의 재배활동이 이루어지는 생산공간으로서 논, 밭 등의 경작지, 산림지 및 주거지 등으로 구성되어 있으며, 작물의 생육에 필요한 물을 인위적으로 공급하기 위한 수원공 시설이 위치하고 있다. 수원공은 하천수나 지하수를 취수하여 관개지구에 공급하게 되는 데, 이로 인하여 상·하류의 하천 유황이 증가하거나 감소하게 된다.

농업유역의 농업용수의 이용에 따른 수문순환을 도식적으로 표시하면 (그림 10-1)과 같다. 논벼를 주로 재배하고 있는 우리나라에서는 4월부터 9월까지 벼의 생육을 위하여 관개지구에 농업용수를 공급하고 있으며, 이로 인하여 농업유역에는 관개지구의 수문순환과 비관개지구인 배후 유역의 수문순환이 연계되어 복합적으로 발생하고 있다.

(그림 10-1)에서 관개지구의 수문순환을 정리하면 다음과 같다. 농업용수는 대부분 상류에 위치하고 있는 관개용 저수지나 양수장 등 수원공 시설로부터 취수하여 수로조작을 통하여 말단의 포장까지 공급한다. 농업용수는 운송과정에서 침투량 등에 의한 수로손실이 발생하고 있으며, 포장에 급수되고 남은 수량은 용수로로 통하여 다시 하천으로 배수된다. 포장에 공급된 수량은 논의 담수심을 유지하며, 물꼬높이 이상의 수량은 물꼬를 넘어 배수되어 하천으로 흘러나오게 된다. 한편, 담수심은 작물에 의해 소비되거나 토양중으로 침투되는 수량을 보충하여 주며, 토양중으로 이동한 수량은 지하수위를 상승시키고 장기간에 걸쳐 하천으로 유출하게 된다.

관개지구에 공급된 관개량 중에서 하천으로 유출되는량은 지표배수량과 지하수 유출량으로 이루어져 있으며, 지하수 유출량은 수로나 논에서 토양중으로 침투된 수량이 다시 하천으로 흘러나오는 것을 말한다.

유역이나 관개지구에서는 태양의 복사에너지에 의한 증발산이 일어난다. 담수된 논의 표면이나 용수로에서는 수면 증발이 발생하고, 작물의 잎을 통한 증산작용이 활발하게 이루어진다.



(그림 10-1) 농업유역의 수문순환 모식도

한편, 농업유역에는 산림지, 밭 등의 배후유역이 발달되어 있다. 배후유역은 관개를 실시하지 않는 비관개 지구로서, 산지유역이 대부분을 차지하고 있다. 산지유역에서는 강우가 내리면 식물의 줄기나 잎 등에 의한 차단손실이 우선적으로 일어나고, 지표면에 낙하한 강우성분은 토양중으로 침투되어 토양수분을 보충하거나 지표면을 따라 이동하여 하천으로 유출된다. 비강우시에는 지면이나 식물의 잎에 의한 증발산이 일어나고, 이에 필요한 수분은 강우 차단량이나 토양중의 수분으로 보충한다. 또한, 지하수에 의한 지하수 유출량이 발생하여 하천으로 유출되게 된다.

2. 유역 유출량 부모형

유역 유출량 모형은 산지 등의 배후유역에서 발생하는 유역 유출량을 추정하기 위한 것으로, 모형의 기본구성은 (그림 10-2)와 같다. (그림 10-2)의 유역 유출량 모형은 결정론적 (deterministic), 총괄형 (lumped-parameter) 모형으로, 장기 유출 해석을 위하여 개발된 모형들과 유사한 구조를 가지고 있다.

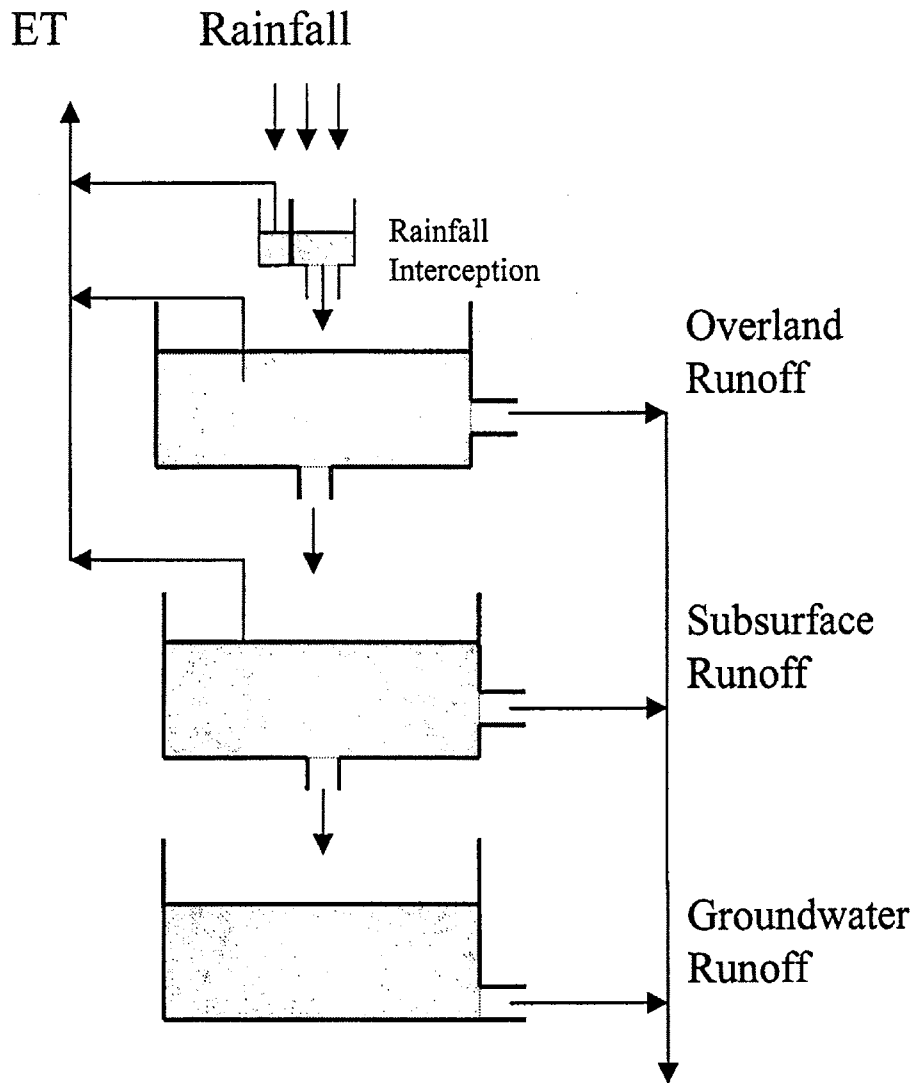
유역 유출량 모형은 유출과정을 3개의 저류 Tank를 이용하여 단순화하였다. 1단 저류 Tank는 지표 유출성분을 모의하며, 2단 및 3단 저류 Tank는 지표하 유출 및 지하수 유출성분을 모의하게 된다. 또한, 산지유역에서 수목에 의한 강우 차단량과 유역 증발산량을 고려하여 유출 과정을 모의하였다.

가. 차단량

강우 차단량이란 강우량 중에서 식물의 줄기나 잎에 의하여 차단되어 대기중으로 증발되는 양으로, 풍속, 습도 등의 기상인자나 강우특성, 수목의 종류에 따라 그 양이 달라지게 된다.

산림지에서는 수목이나 식생의 발달이 왕성하기 때문에 강우시에 수목의 줄기나 잎에 의한 차단 손실량이 많이 발생하는 데, 강우 발생초기에는 강우의 상당부분이 차단 등에 의해 공기중으로 손실되고, 강우의 지속시간이 늘어남에 따라 그 양은 점차적으로 줄어든다.

강우 차단량을 산정하기 위한 모형은 크게 정적 모형과 동적 모형으로 구분할 수 있다. 정적 모형은 강우 차단량을 강우나 엽면적 지수 (leaf area index, LAI) 등을 이용하여 경험식으로 나타낸 것으로, 간단한 관계식으로부터 차단량을 쉽게 추정할 수 있지만, 특정 지역에서 구한 경험식을 유역 특성이나 수목의 종류가 다른 지역에 적용하기 어렵다. 반면에, 동적 모형은 강우의 지속시간동안에 줄기나 잎의 수분 저류량의 변화를 추정하여 차단 손실량을 모의 발생하는 것이다. 이러한 동적 모형은 강우사상에 대하여 시간별 차단량을 모의하는 것으로, 장기적인 유출 해석에는 적용하기 어렵다.



(그림 10-2) 유역 유출량 모형

McKenna와 Nutter (1983)는 강우 차단량을 추정하기 위하여 수목의 종류나 잎의 모양에 따라 다음과 같이 3개의 그룹으로 구분하고, 각각에 대한 회귀방정식을 구하였다. 식 (10-1)에서 Group 1은 소나무 혹은 소나무 혼효림 (pine and mixed hardwood-pine)이며, Group 2는 가문비나무, 전나무, 솔송나무, 히말라야시다 등과 같은 짧은 잎을 가지는 침엽수 (short-leaved conifers)이고, Group 3은 혼효활엽수 (mixed hardwoods)를 나타낸다.

$$\text{Group 1 : } ThruFl = 0.35 \cdot Rainfall - 0.15$$

$$\text{Group 2 : } ThruFl = 0.31 \cdot Rainfall - 0.20$$

$$\text{Group 3 : } ThruFl = 0.37 \cdot Rainfall - 0.15 \quad \text{growing season}$$

$$ThruFl = 0.38 \cdot Rainfall - 0.08 \quad \text{dormant season}$$

(10-1)

여기서, *ThruFl*는 수관통과량 (throughfall, mm/일)으로 강우량 중에서 식물의 줄기나 잎을 통과하여 지면에 도달하는 양이며, *Rainfall*는 일 강우량 (mm/일)이다.

식물의 잎이나 줄기에 의해 차단된 강우는 공기중으로 증발되거나 일부는 지면으로 다시 낙하하여 토양면으로 떨어진다. 이 때, 강우 차단량은 아래와 같이 엽면적 지수와의 관계로부터 구할 수 있다.

$$I = (Rainfall - ThruFl) \cdot R \quad ThruFl > 0 \quad (10-2)$$

$$I = Rainfall \cdot R \quad ThruFl \leq 0$$

여기서, *I*는 차단량 (mm/일)이며, *R*은 엽면적 지수에 따라 결정되는 비례상수로 식 (10-3)으로부터 계산된다.

$$R = \frac{LAI}{3} \quad LAI \leq 3 \quad (10-3)$$

$$R = 1.0 \quad LAI > 3$$

수목에 의한 차단된 강우량은 공기중으로 증발되게 되므로 차단량은 증발을 위한 저류 역할을 하게 된다. 따라서, 강우시 증발량이 차단량보다 적을 경우에는 차단량 중의 일부가 공기중으로 증발되는 것으로 볼 수 있으며, 증발량이 차단량보다 클 경우에는 토양중의 수분이 증발되는 것으로 구성한다.

나. 지표 유출량

강우시에는 지표면의 침투로 인하여 산지 경사면은 급격하게 포화되고, 포화된 수분은 경사면을 따라 지표면으로 다시 유출하게 된다. 이 때, 산지 경사면 중에서 포화되는 토층의 비율은 1단 저류 Tank로부터 계산되어 진다. 1단 저류 Tank는 비선형으로 구성되어 강우에 의해 저류수심이 증가하면 포화토층의 비율이 상대적

으로 증가하여 지표유출이 증가하게 된다.

포화토층의 비율, *SatuArea*는 강우량 중에서 지표 유출로 유출되는 비율을 나타내는 매개변수로 아래의 식 (10-4)와 같이 1단 Tank의 저류수심에 따라 계산되어진다.

$$SatuArea = \begin{cases} 1 - \left(\frac{2(SATUMX - SWT)}{SATUMX} \right), & SWT \geq 0.5 \cdot SATUMX \\ 0, & SWT < 0.5 \cdot SATUMX \end{cases} \quad (10-4)$$

여기서, *SATUMX*는 최대 포화토층(mm)을 나타내는 매개변수이며, *SWT*는 1단 Tank의 저류수심(mm)을 의미한다.

산지유역으로부터의 지표유출량은 식 (10-4)에 의해 구해진 포화토층의 비율, *SatuArea*로부터 계산되어진다. 즉, 강우량 중에서 포화토층의 비율에 해당하는량이 지표유출의 형태로 유출된다. 이를 식으로 나타내면 아래 식 (10-5)와 같다.

$$SurFlow_t = SatuArea \times ThruFl_t \quad (10-5)$$

여기서, *SurFlow*는 지표유출량 (mm/일)이다.

1단 저류 Tank로부터 2단 저류 Tank로 침투가 발생하는 데, 이때 침투량은 최대 침투가능량 및 저류수심으로부터 구하여진다.

$$Perc_t = \begin{cases} 0 & , SWT_{t-1} \leq 0 \\ PERCMX \times \sqrt{\frac{2SWT_{t-1}}{SATUMX}} & , SWT_{t-1} < 0.5 \cdot SATUMX \\ PERCMX & , SWT_{t-1} \geq 0.5 \cdot SATUMX \end{cases} \quad (10-6)$$

여기서, *Perc_t*는 t일의 침투량 (mm/일)이며, *PERCMX*는 최대 일 침투량 (mm/일)을 나타낸다.

한편, 1단 Tank의 저류수심 *SWT*는 전날의 저류수심과 강우량으로부터 물수지 방정식을 이용하여 구하여진다.

$$SWT_t = SWT_{t-1} + ThruFl_t - SurFlow_t - Perc_t \quad (10-7)$$

다. 지표하 유출량

산지유역의 지표하 유출은 2단 저류 Tank의 저류수심으로부터 계산되어 진다.

$$UnSatuFlow_t = CR \cdot (UWT_t - H_u) \quad (10-8)$$

$$DnFlow_t = CP \cdot UWT_t \quad (10-9)$$

여기서, $UnSatuFlow$ 는 지표하 유출량 (mm/일), $DnFlow$ 는 지하수 침투량 (mm/일), UWT 는 2단 저류 Tank의 저류수심 (mm)이며, CR , CP 및 H_u 는 모형의 매개변수이다.

라. 지하수 유출량

지하수 유출량은 3단 저류 Tank의 저류수심으로부터 아래 식을 이용하여 구한다.

$$GWFlow_t = a (GWT_t)^b \quad (10-10)$$

여기서, $GWFlow$ 는 지하수 유출량 (mm/일)이며, a , b 는 유역에 따른 매개변수로 유역면적이나 경사 등의 지형적인 인자에 의해 영향을 받는다. GWT 는 지하수위 (mm)를 나타내며, 아래의 식에 의해 계산된다.

$$GWT_t = GWT_{t-1} + DnFlow_t - GWFlow_t \quad (10-11)$$

3. 관개지구 유출 부모형

가. 지표배수량

지표배수량이란 관개지구에 공급된 수량이 물꼬를 넘어 배수로나 하천으로 지표 월류하는 량이다. 지표배수량은 당일의 담수심과 물꼬높이에 따라 식 (10-12)로부터 구할 수 있다.

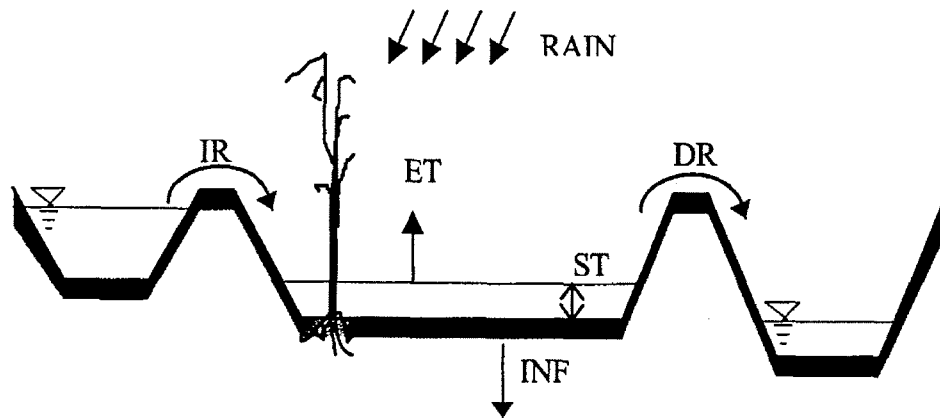
$$\begin{aligned} DR_t &= ST_t - CH, & ST_t > CH \\ DR_t &= 0.0, & ST_t \leq CH \end{aligned} \quad (10-12)$$

여기에서, DR_t 는 t 일의 지표배수량 (mm/일)이며, ST_t 는 t 일의 담수심 (mm), CH 는 물꼬높이 (mm)이다.

담수심은 논에서의 물수지 식으로부터 계산된다. 논에서의 물수지는 관개량, 강우량, 증발산량 및 침투량 등으로부터 담수심을 계산하여 얻을 수 있으며, 이를 그림으로 나타내면 (그림 10-3)과 같다.

$$ST_t = ST_{t-1} + IR_t + RAIN_t - INF_t - ET_t \quad (10-13)$$

여기서, IR 은 관개량 (mm), $RAIN$ 은 강우량 (mm), INF 는 침투량 (mm), ET 는 증발산량 (mm)이다.



(그림 10-3) 관개논의 물수지 모식도

1) 관개량

관개지구에 직접 공급되는 수량은 식 (10-14)와 같이 수원공에 의해 공급된 수량중에서 시설관리 용수량 등의 손실수량을 제외한 량이다.

$$IR_t = WU_t - CL_t - DWR_t \quad (10-14)$$

여기서, IR 는 관개량 (mm), WU 는 수원공으로부터의 공급량 (mm), CL 은 송수손실량 (mm)이며, DWR 은 배분관리 용수량 (delivery water requirement)(mm)이다.

송수손실량은 수원공으로부터 말단 포장까지 용수를 송수하는 과정에서 증발량 및 수로 침투량에 의해 손실되는 수량이다. 배분관리 용수량은 용수의 원활한 배분관리를 위하여 여분으로 공급하는 수량으로, 취수 및 용수 배분을 위하여 수로의 수위를 유지하기 위한 수량이다.

2) 포장 증발산량

논벼의 실제 증발산량은 FAO 수정 Penman식과 작물계수를 이용하여 식 (10-15)와 같이 구하였다.

$$ET_t = K_c \cdot ET_p \quad (10-15)$$

여기서, ET 는 논벼의 실제 증발산량(mm/일), K_c 는 논벼의 작물계수이며, ET_p 는 잠재증발산량(mm/일)이다. 잠재증발산량, ET_p 는 수정 Penman식을 이용하여 식 (10-16)으로부터 구하여진다.

Penman식은 Penman이 열수지법과 공기역학적 방법인 Dalton법을 조합하여 제시한 것으로, 습윤지대에서 기온, 습도, 일조시간, 증기압 및 풍속 등의 기상자료를 이용하여 증발산량을 구하는 데 적합한 방법이다. Penman식은 여러 가지 기상요인을 많이 포함하고 있기 때문에 정확성이 높고, 일 단위의 잠재 증발산량을 산정할 수 있기 때문에 관개계획 (irrigation Scheduling)의 수립이나 수문모형의 증발산량 추정 등에 많이 이용되고 있다. Penman식은 그 동안 많은 수정 공식이 발표되었으나, 1977년 발표된 FAO 수정 Penman식이 많은 연구를 통하여 작물계수 등이 제시되어 있고, 유용성이 입증되어 지금까지 많이 이용되고 있다.

FAO 수정 Penman식은 식 (10-16)과 같다.

$$ET_p = C [W \cdot R_n + (1 - W) \cdot f(u) \cdot (e_a - e_d)] \quad (10-16)$$

여기서 ET_p 는 기준작물 (reference crop)의 잠재증발산량 (mm/일), W 는 온도로 계산되는 가중치 (weighting factor), R_n 은 순일사량 (mm/day), $f(u)$ 는 풍속함수, e_a 는 평균기온에서의 포화증기압 (mmHg), e_d 는 대기에서의 실제 평균 증기압 (mmHg)이며, C 는 주야의 기후차에 의한 보정계수이다. 가중치 W 는 식 (10-17)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$W = \Delta / (\Delta + \gamma) \quad (10-17)$$

여기서, Δ 는 평균기온에 대한 포화수증기압의 구배로서 식 (10-18)과 같고, γ 는 온도와 고도에 따른 습도계수 (psychrometric constant)로서 식 (10-19)와 같다.

$$\begin{aligned}\Delta &= \frac{de_a}{dT_k} = \frac{d}{dT_k} [\exp(54.878919 - (6790.4985/T_k) - 5.02808 \cdot \ln(T_k))] \\ &= \left[\frac{6790.4985/T_k - 5.0281}{T_k} \right] \cdot e_a\end{aligned}\quad (10-18)$$

$$\gamma = 0.386 \cdot (1013.0 - 0.1055 \cdot EL) / (595.0 - 0.51 \cdot T) \quad (10-19)$$

여기서, EL 은 고도 (m), T 는 평균기온 (℃)이다.

e_a 는 평균 기온에서 공기의 포화수증기압으로서 식 (10-20)으로 계산할 수 있으며, 실제수증기압 e_d 는 상대습도를 이용하여 식 (10-21)로부터 계산할 수 있다.

$$e_a = \exp[54.878919 - (\frac{6790.4985}{T_k}) - 5.02808 \cdot \ln(T_k)] \quad (10-20)$$

$$e_d = RH \times \frac{e_a}{100} \quad (10-21)$$

여기서, RH 는 일 평균 상대습도 (%)이고, T_k 는 평균 기온의 절대온도 ($T^{\circ}\text{C} + 273.16$)이다.

공기동력항에서 풍속함수, $f(u)$ 는 식 (10-22)와 같이 계산한다.

$$f(u) = 0.27 (1 + U \times Cu / 100.0) \quad (10-22)$$

여기서, U 는 2m 높이에서 측정된 풍속 (km/일)이며, Cu 는 풍속 보정 계수로서 2m에서 측정된 풍속이 아닌 경우에는 <표 10-1>의 값을 사용하여 보정한다.

<표 10-1> 계기의 측정 높이에 따른 풍속 변환계수

계기 측정 높이(m)	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
변환 계수 (C_u)	1.35	1.15	1.06	1.00	0.93	0.88	0.85	0.83

한편, 순일사량, R_n 은 단파 일사량에서 지구 복사에 의한 장파 복사량의 차로써 얻을 수 있는데, 순일사량은 기상청이나 측후소에서 측정하지 않으므로, 식 (10-23)과 같이 일사량, 일조시간, 및 온도 등의 기상자료를 이용하여 계산한다.

$$R_n = (1 - al)R_s - f(T) \cdot f(e_d) \cdot f(n/N) \quad (10-23)$$

여기서, R_n 는 순일사량, R_s 는 측정 일사량, al 은 알베도 (albedo)이다. $f(T)$ 는 장파의 흑체 반사량이며, $f(e_d)$ 는 습도에 대한 산란장파로 계산되는 값이고, $f(n/N)$ 는 일조시간 대 가조시간의 함수로 계산되는 값이다. 위 식의 각 항을 살펴보면 식 (10-24)~(10-26)과 같다.

$$f(T) = \epsilon \cdot T_k^4 \quad (10-24)$$

여기서, ϵ 는 Stefan-Boltzman상수 ($11.71 \times 10^{-8} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{day}$), T_k 는 평균온도의 절대온도 값이며,

$$f(e_d) = a_1 + b_1 \sqrt{e_d} \quad (10-25)$$

이고, 여기서, a_1 , b_1 는 계수 ($a_1 = 0.34$, $b_1 = -0.044$)이며, e_d 는 평균 이슬점 온도에서의 절대습도 (mb)이며,

$$f(n/N) = 0.1 + 0.9(n/N) \quad (10-26)$$

이고, 여기서, n/N 은 일조시간 대 가조시간의 비이다. 가조시간은 <표 10-2>를 이용하여 구할 수 있다.

<표 10-2> 위도별 월별 가조시간

위도	월별 가조시간 (hr)											
	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
30°	10.4	11.1	12.0	12.0	13.6	14.0	13.9	13.2	12.4	11.5	10.4	10.2
35°	10.1	11.0	11.9	13.1	14.0	14.5	14.3	13.5	12.4	11.3	10.3	9.8
40°	9.6	10.7	11.9	13.3	14.4	15.0	14.7	13.7	12.5	11.2	10.0	9.3

* 자료 : Crop Water Requirement, FAO Paper Vol. 24.

한편, Doorenbos와 Pruitt (1977)는 기상자료 중에서 일사량 자료가 없는 경우에 일조시간으로부터 일사량을 계산하여 Penman의 잠재 증발산량을 산정할 수 있도록 식 (10-27)을 제시하였다.

$$R_s = [a_2 + b_2 \cdot (n/N)] \times R_a \quad (10-27)$$

여기서, R_s 는 일사량, a_2 , b_2 는 계수 ($a_2 = 0.25$, $b_2 = 0.5$)이고, R_a 는 <표 10-3>에

서 계산되는 대기권 밖의 일사량 (extra terrestrial radiation)이다.

<표 10-3> 월별 대기권 밖의 일사량

위도	월별 일사량 (mm/일)											
	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
30°	8.9	10.7	13.0	15.2	16.5	17.0	16.7	15.7	13.9	11.7	9.5	8.3
35°	7.6	9.6	12.2	14.7	16.4	17.2	16.8	15.5	13.2	10.7	8.2	7.0
40°	6.4	8.5	11.3	14.2	16.3	17.3	16.7	15.1	12.5	9.6	7.0	5.7

* 자 료 : Crop Water Requirement, FAO Paper Vol. 24.

작물계수 K_c 는 잠재 증발산량과 실제 증발산량의 비로서, 각 지역별로 다른 값을 가지게 되는 데, <표 10-4>와 같이 서울대학교 농업개발연구소에서 발표한 자료를 이용하였다.

<표 10-4> 논벼의 작물계수

월 별	6 월			7 월			8 월		
	상	중	하	상	중	하	상	중	하
K_c	0.97	1.03	1.27	1.27	1.34	1.47	1.57	1.43	1.41

3) 침투량

논에서의 침투량은 강우 또는 관개에 의해 공급된 물이 토양속으로 스며드는 량으로, 논두렁 침투량과 지하배수 침투량으로 구분할 수 있는데 이 중 논두렁 침투량은 하류의 논에서 재이용 되거나 그 양이 지하배수 침투량에 비하여 작으므로, 논에서의 침투량은 보통 지하배수 침투량을 의미한다. 침투량은 논의 토양조건이나 토층 구조, 담수심, 경지의 고저차, 지질, 지하수위에 따라 큰 차이가 있으므로, 실측에 의해 구한다. 일반적으로 토양의 종류별 침투량은 <표 10-5>와 같다.

<표 10-5> 토양의 종류에 따른 일별 침투량

토양의 종류	sand	sandy loam	loam
일별 침투량 (mm/일)	3~6	2~3	1~2

4) 물꼬높이

논벼는 밭 작물과는 달리 시기별로 적정한 담수심을 유지하도록 물꼬를 관리한다. 물꼬높이는 영농방식에 따라 관리되고 있는 요소로, 지표배수량 및 유효우량을 결정하는 주요 인자이다.

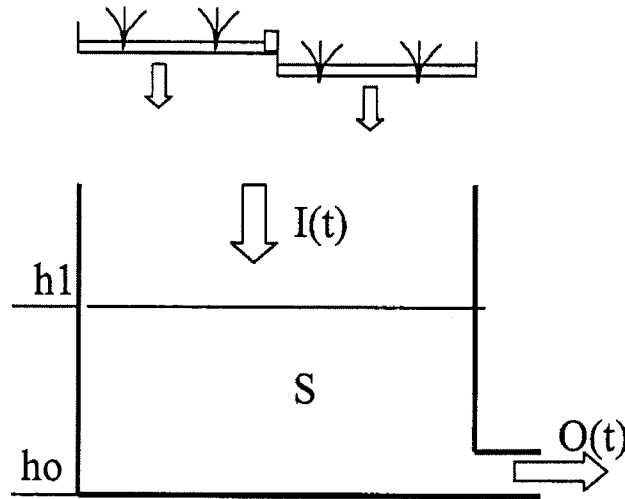
물꼬높이는 인위적인 물관리 요소로서, 실측 자료를 이용하여 시기별 물꼬높이를 결정하여야 한다.

나. 지하수 유출량

강우나 관개수의 일부분은 침투로 인하여 토양속으로 이동하여 지하수위를 상승시키고, 서서히 지하수 유출의 형태로 하천으로 유출된다. 이 때, 토양속에서의 수분이동은 투수계수 등과 같은 토양의 특성이나 지형 및 지하수위에 따라 결정된다.

농업유역의 지하수 유출량은 연속적인 Tank의 개념을 이용하여 추정할 수 있다. 이 방법은 유역이나 저수지의 하도 추적을 위해서 많이 적용되고 있는 것으로, (그림 10-4)와 같이 Tank의 유입성분과 Tank내에 저류된 토양수분량으로부터 지하수 유출량을 추정하는 것이다.

(그림 10-4)는 농업유역을 지하수 흐름을 개념화하여 표시한 것으로, S는 지표면으로부터 토양중으로 유입되는 토양수분이며, 토양의 특성이나 강우량, 관개량 등에 따라 결정된다. 토양중으로 유입된 수량은 지하수위를 상승시키게 되는 데, 이 때 지하수위의 변화량은 토양의 저류계수 (storage coefficient)에 영향을 받는다.



(그림 10-4) 지하수 탱크의 모식도

1개의 Tank에 대한 저류방정식은 아래 식 (10-28)과 같다.

$$I(t) - O(t) = \frac{dV}{dt} \quad (10-28)$$

식(10-28)에서 I 는 Tank로 유입되는 량(mm)으로, 토양중의 침투량과 상류 유역의 Tank로부터 유입되는 량의 합이다. O 는 Tank의 유출성분 (mm)으로 하단의 Tank나 하천으로 유출되는 지하수 유출량을 의미한다. V =토양중의 총 저류량(mm)을 나타내며, 지하수위와 토양의 특성으로부터 계산할 수 있다.

$$V(h) = S(h_1 - h_0)^n \quad (10-29)$$

여기서, 저류계수 (storage coefficient), S 는 토양중의 저류량을 지하수위로 변환하는 상수로서, 토양의 공극률에 해당된다. n 은 지형특성 계수이며, h_0 은 기준면의 표고이며, h_1 은 지하수 Tank의 저류수심이다. 선형 저류 방정식의 경우 $n=1$ 이므로, 식 (10-28)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dV}{dt} = S(h_1 - h_0) \frac{dh}{dt} \quad (10-30)$$

$$I(t) - O(t) = S(h_1 - h_0) \frac{dh}{dt} \quad (10-31)$$

한편, 지하수 유출량, $O(t)$ 는 Darcy의 법칙으로부터 식 (10-32)와 같이 계산된다.

$$O(t) = K \frac{(h_1 - h_2)}{L} A \quad (10-32)$$

여기서, K 는 투수계수 (hydraulic conductivity)이며, h_2 는 인접한 지하수 Tank의 저류수심으로, $(h_1 - h_2)/L$ 은 인접한 지하수 Tank사이의 수두경사 (hydraulic gradient)이다.

식 (10-32)에서 포화토층의 길이가 L 이고, 두께가 B 인 토양층으로부터 유출되는 지하수 유출량은 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} O(t) &= K \frac{(h_1 - h_2)}{L} (h_1 - h_0) B \\ &= T' \frac{(h_1 - h_2)}{L} B \\ &= T(h_1 - h_2) \end{aligned} \quad (10-33)$$

여기서, $T' (= K(h_1 - h_0))$ 는 첫 번째 지하수 Tank의 대수층 전달계수이며, $T (= T' \frac{B}{L})$ 는 대수층의 지형특성을 고려한 전달계수로 매개변수이다. 위의 식을 이용하여 다시 정리하면, 아래의 식 (10-34)를 얻을 수 있다.

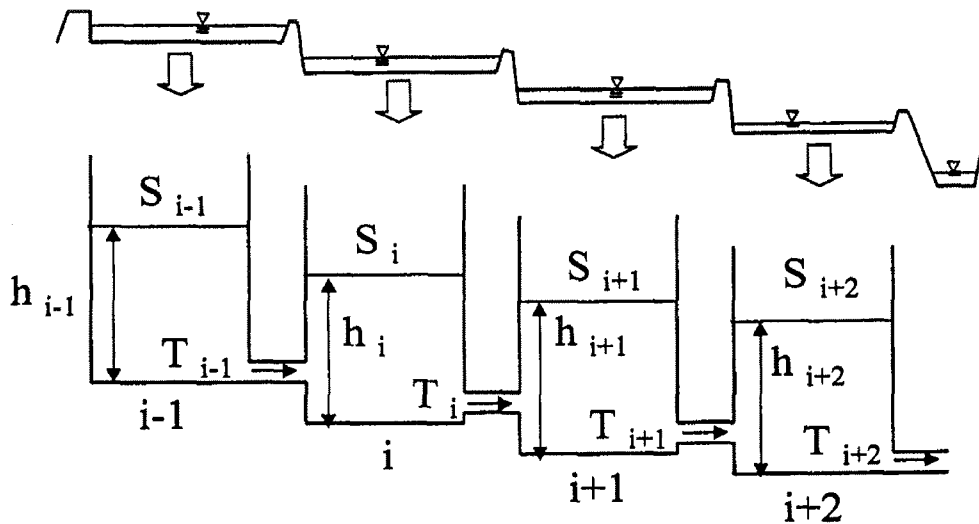
$$\begin{aligned} I(t) - T(h_1 - h_2) &= S \frac{dh}{dt} \\ \frac{dh}{dt} &= - \frac{T}{S} (h_1 - h_2) + \frac{1}{S} I(t) \end{aligned} \quad (10-34)$$

실제적으로 관개지구의 지하수 유출량은 (그림 10-5)와 같이 연속된 몇 개의 Tank를 이용하여, 저류계수 S 와 전달계수 T 로부터 아래의 식 (10-35)~식 (10-37)을 이용하여 추정할 수 있다. 관개지구의 연속된 지하수 Tank중에서, 마지막 Tank의 수위 강하량, dh/dt 이 지하수 유출량이 된다.

$$\frac{dh_i}{dt} = \frac{1}{S_i} [(h_{i+1} - h_i)T_{i+1}] + \frac{1}{S_i} I_i(t) \quad (10-35)$$

$$h_i = h_i + \frac{dh_i}{dt} \quad (10-36)$$

$$h_{i+1} = h_{i+1} - \frac{dh_i}{dt} \quad (10-37)$$



(그림 10-5) 관개지구의 지하수 유출량 모형의 모식도

다. 회귀수량

논의 관개에 있어서 관개된 수량이 작물에 의해 모두 소비되는 것이 아니라, 일부는 송수되는 과정에서 침투 등의 손실로 지하로 스며들어 지하수위를 상승시키게 되고, 담수된 수량이 물꼬높이보다 많으면 물꼬를 넘어 배수되게 된다. 이와 같이 농업용수의 순환과정에서 지표수 혹은 지하수의 형태로 배수되어 하천으로 흘러나오는 양을 회귀수량 (return flow)이라 하며, 전체 관개량중에서 회귀수량의 비율을 회귀율 (return flow rate)이라 한다.

신속 회귀수량이란 물꼬를 넘어 월류하는 배수량이나 수로의 수위를 유지하기 위한 배분관리 용수량 등이며, 지연 회귀수량은 수로의 침투량이나 논 토양의 침투량이 지하수 유출로 하천으로 흘러나오는 것을 말한다.

논에 강우량, 관개량 등의 공급량과 증발산량, 침투량 등의 소비량으로부터 일별 담수심을 추정하고, 당일의 물꼬높이를 이용하여 지표배수량을 계산한다. 관개는 일차적으로 강우에 의해 이루어지며, 부족한 수량만을 인위적인 수단으로 공급하는 것이다. 그러므로 강우시에는 강우량이 먼저 공급되고, 그 이후에 관개량이 공급되는 것으로 계산하였다.

신속회귀수량, QRF 는 아래 식과 같이 배분관리용수량, DWR 과 지표배수 관개량, OF 로부터 구한다.

$$QRF_t = OF_t + DWR_t \quad (10-38)$$

여기서, DWR 는 배분관리 용수량이며, OF 는 지표배수량 중에서 관개용수의 공급으로 인하여 발생하는 량으로 관개량, 담수심, 물꼬높이 등에 따라 결정된다.

관개용수 중에서 지표배수되는 량, OF 는 다음과 같이 구한다.

① 무강우시에는 물꼬를 넘어 월류하는 수량으로 한다.

② 강우량에 의하여 증가된 담수심이 물꼬보다 높을 경우에는 관개량을 모두 지표배수 관개량으로 한다.

③ 강우에 의한 담수심이 물꼬보다 낮으면, 공급된 관개량으로부터 담수심을 계산하여 물꼬 월류량을 지표배수 관개량으로 한다.

지연 회귀수량은 토양층으로 침투한 수량이 포화된 토양층으로부터 유출되는 것으로, 지하수 유출에 대한 모델링을 통하여 관개와 비관개 조건에 대한 지하수 유출성분의 변화를 추정하고, 이로부터 농업용수로 인한 지연 회귀수량을 계산한다. 이를 위하여 본 모형에서는 비관개 조건의 관개지구 (imaginary block)를 구성하였다.

$$DRF_t = GWFIR_t - GWFNO_t \quad (10-39)$$

여기서, DRF 는 지연 회귀수량 (mm/일)이며, $GWFIR$ 는 관개지구로부터 유출되는 지하수 유출량 (mm/일)이고, $GWFNO$ 는 동일한 관개지구에서 관개량이 공급되지 않는 조건 (imaginary block)에서 유출되는 지하수 유출량 (mm/일)을 의미한다.

관개 회귀수량은 식 (10-40)과 같이 신속 회귀수량과 지연 회귀수량을 모두 합하여 일별로 추정하며, 관개 회귀율은 수원공에서 공급된 수량, WU 와 관개회귀수량의 비로써 계산한다.

$$RETFLO_t = QRF_t + DRF_t \quad (10-40)$$

$$RATIO_t(\%) = \frac{RETFLO_t}{WU_t} \times 100.0 \quad (10-41)$$

제 3 절 농업유역의 수문순환 모델의 적용

1. 유역 유출량 모형의 적용

가. 유역 유출량의 추정

유역 유출량 모형의 매개변수를 보정하기 위하여 최적화 기법인 SCE-UA (shuffled complex evolution - University of Arizona)법을 적용하였다. SCE-UA 법은 Duan et al. (1992)에 의해 제안되었으며, simplex법, controlled random search법, 경쟁적 진화 (competitive evolution) 등 기존의 탐색기법과 집합체의 혼합 (complex shuffling)이라는 새로운 개념을 적용한 전체 탐색법 (global search method)이다.

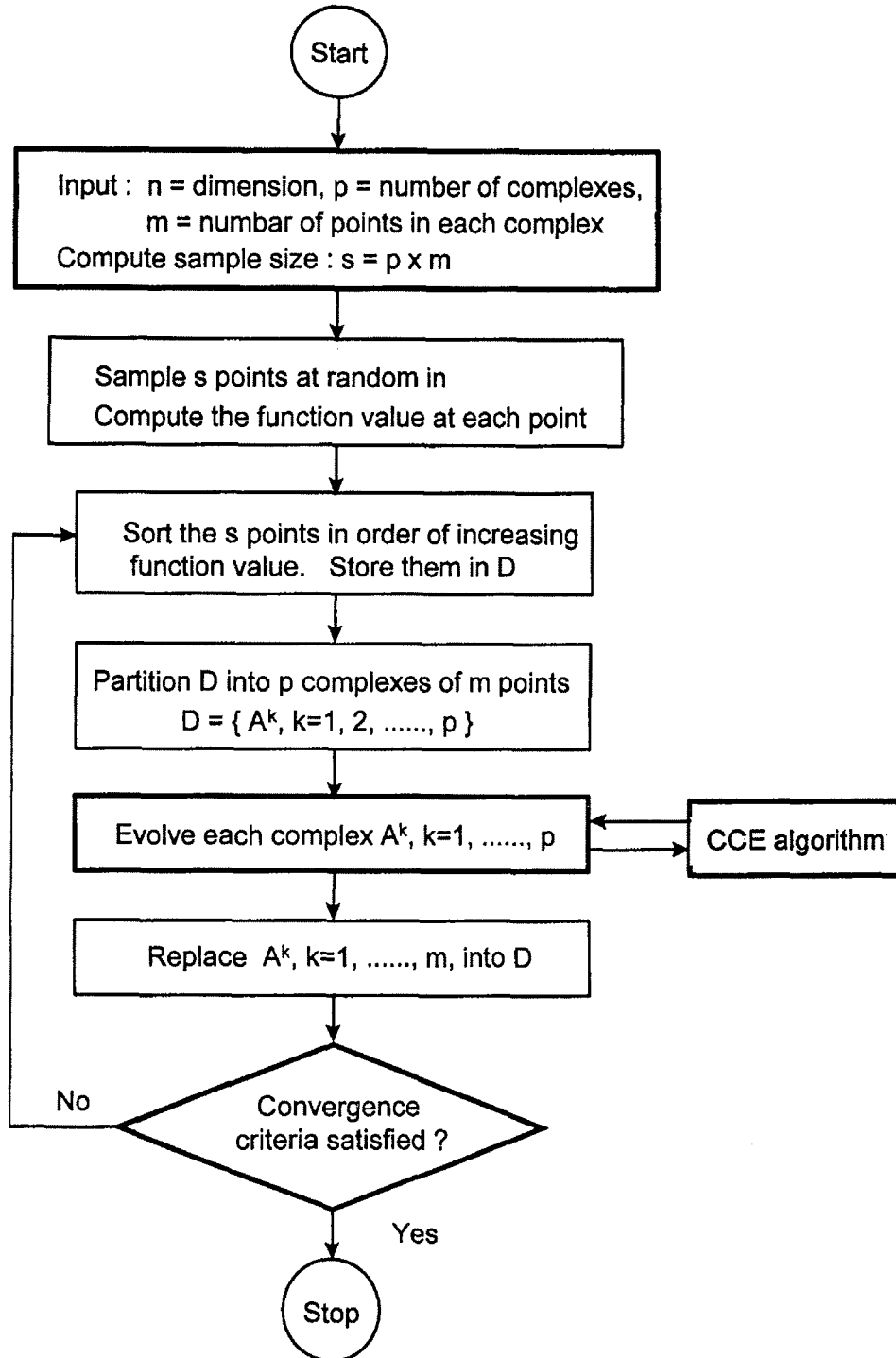
SCE-UA법은 (그림 10-6)과 같이 자연진화의 과정을 최적화 탐색과정에 도입한 것으로, s개의 선정된 점을 이용하여 하나의 모집단을 구성하며, 이 모집단을 몇 개의 집합체 (complex)로 다시 분할하여 각각 다른 방향으로 탐색 진행하며 진화한다. 계속적인 진화의 과정에서 집합체는 재분할되며, 이 과정에서 각 집합체에서 얻은 탐색공간에 대한 정보를 공유한다.

최적화기법은 오차의 판단기준이 되는 목적함수를 정의하여야 한다. 목적함수는 사용하는 자료의 특성이나 모형의 적용범위를 고려하여 적절하게 선정하여야 하며, 이 때, 사용하는 목적함수에 따라 매개변수 조합이 달라지게 된다. Diskin and Simon (1977)은 목적함수의 선정은 주관적이고, 목적함수는 모형의 최적 매개변수의 추정에 영향을 미친다고 하였으며, 모형의 매개변수의 추정에 이용되는 12개의 목적함수를 제안하였다.

유역 유출량 모형은 장기간 동안의 일별 유출량을 추정하기 위한 것으로, 저수 유출량의 정확한 추정이 중요하다. 그러므로 유출량의 추정에 이용되는 목적함수는 분석대상인 저수 유출량을 잘 모의할 수 있도록 정의하여야 한다. 유역 유출량 모형의 매개변수 보정을 위한 목적함수로 식 (10-42)와 같이 RMSE (root mean square error)를 이용하였다. RMSE는 Patry and Marino (1983)에 의해 유출량 모형의 매개변수 모형에 적용된 바 있으며, 일 유량과 같은 단위를 가진다.

$$\min RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Q_c(i) - Q_o(i)]^2} \quad (10-42)$$

여기서, Q_c , Q_o 는 추정 및 실측 일별 유출량 (mm/일)이며, i 는 계산 일이다.



(그림 10-6) SCE-UA법의 계산 흐름도

유역 유출량 모형의 매개변수 보정은 발안저수지 유역의 HP#3, HP#8의 두 유역의 유출량 자료를 이용하였다. SCE-UA법과 목적함수를 이용하여 구한 최적 매개변수는 <표 10-6>과 같다. SATUMX는 HP#3의 경우에는 75.02mm이고, HP#8은 50.24mm이며, PERCMX는 각각 7.88mm, 7.50mm이었다. <표 10-6>에서와 같이 최대 포화토층을 나타내는 SATUMX는 유역에 따라 차이를 보이고 있으나, 다른 매개변수는 거의 비슷한 값을 나타내었다.

<표 10-6>의 최적 매개변수로부터 HP#3, HP#8에 대한 유역 유출량을 추정하였으며, 그 결과는 <표 10-7>, (그림 10-7), 그리고 (그림10-8)과 같다. <표 10-7>에서 실측치와 추정치의 비교를 위하여 통계적인 변량을 이용하였다. 실측 유출량과 추정 유출량의 추정 오차를 평가하기 위하여 상대오차 (relative error)를 계산하였으며, RMSE, R^2 , E^2 (model efficiency) 등을 이용하여 비교하였다.

모형의 효율을 계산하는 E^2 은 Nash와 Sutcliffe (1970)에 의해 제안된 방법으로 식 (10-43)와 같이 계산한다.

$$E^2 = \frac{\sum(\bar{Q}_o - Q_o)^2 - \sum(Q_c - Q_o)^2}{\sum(\bar{Q}_o - Q_o)^2} \quad (10-43)$$

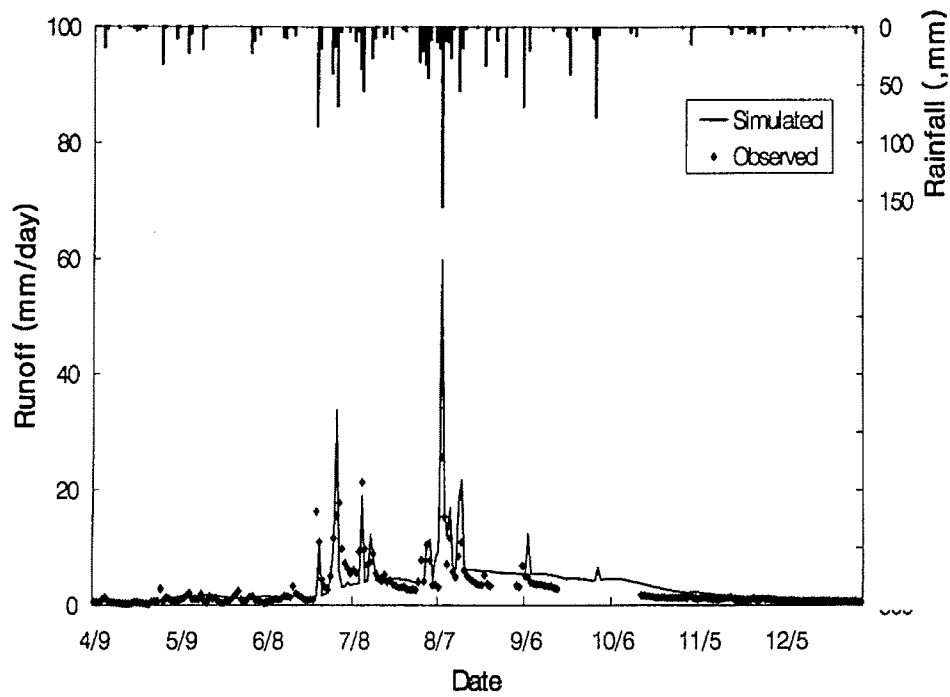
여기서, Q_o 는 실측 유출량 (mm/일), \bar{Q}_o 는 실측 유출량의 평균치 (mm/일), Q_c 는 추정 유출량 (mm/일)이다.

<표 10-6> SCE-UA법에 의한 유역 유출량 모형의 최적 매개변수

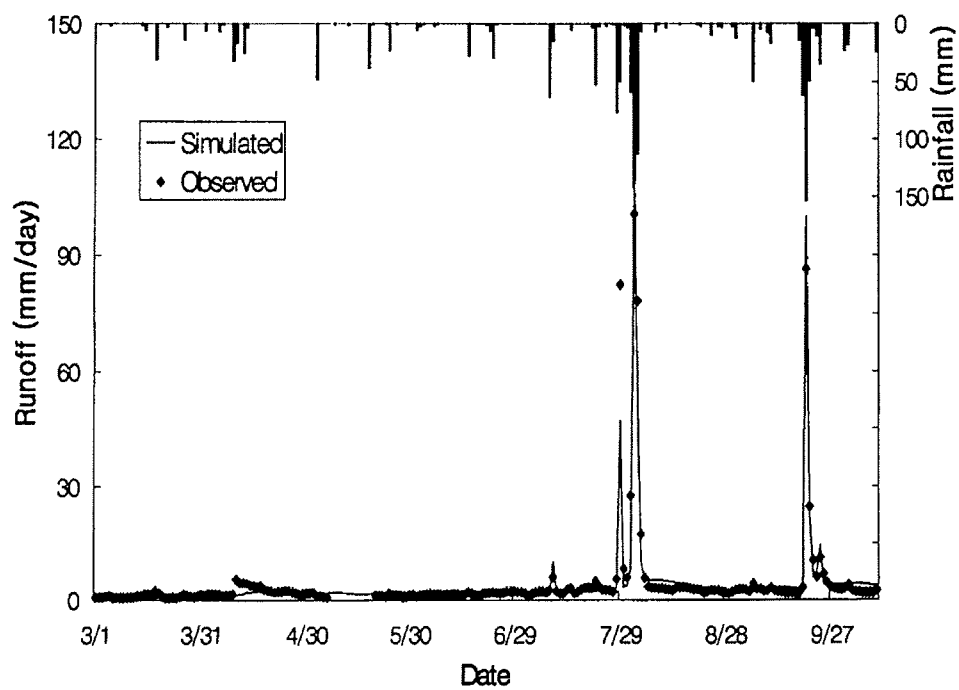
유역명	SATUMX (mm)	PERCMX (mm)	CR	CP	Hu	a	b
HP#3	75.02	7.88	0.030	0.029	15	0.252	0.4
HP#8	50.24	7.50	0.028	0.031	15	0.270	0.4

<표 10-7> 보정기간에 대한 유역 유출량 추정 결과

유역명	강우량 (mm)	유출량 (mm)			R^2	RMSE	E^2
		실측	추정	상대오차(%)			
HP#3	1238	632	788	24.7	0.633	3.38	0.10
HP#8	1385	875	867	0.9	0.837	5.19	0.81



(그림 10-7) 보정기간에 대한 HP#3 유역의 유출량 비교(1998)

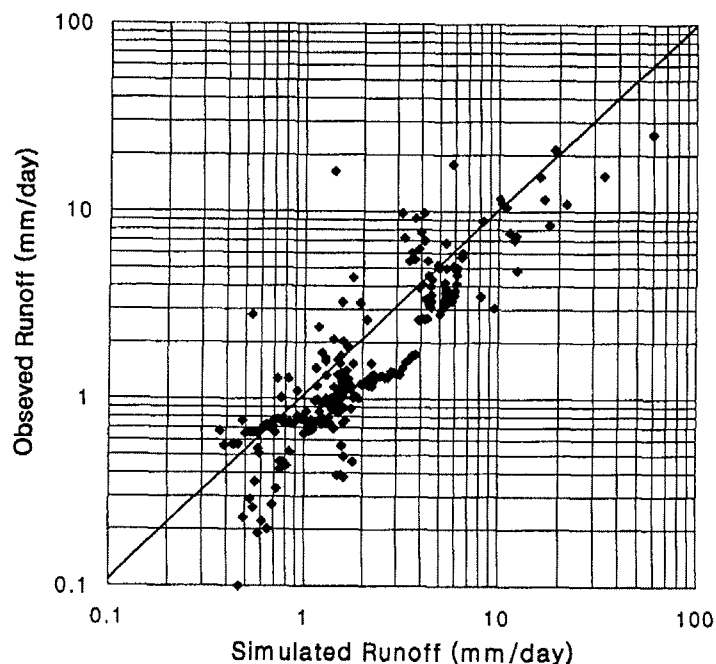


(그림 10-8) 보정기간에 대한 HP#8 유역의 유출량 비교(1999)

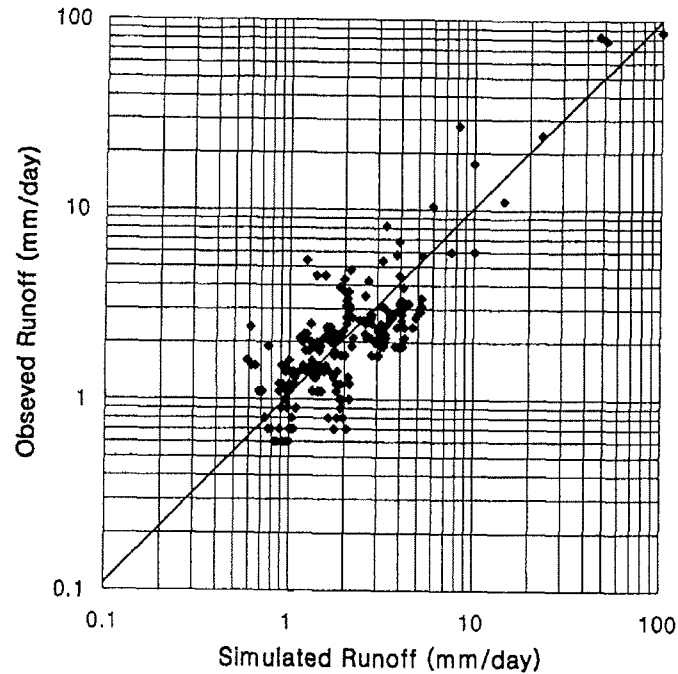
유역 유출량 모형을 이용하여 HP#3, HP#8의 유출량을 추정한 결과, 무강우일에는 잘 일치하고 있으나, 홍수시에는 추정 유출량이 실측 유출량보다 많게 나타났다. HP#3은 1998년의 보정기간에 대하여 강우량이 1238.3mm이었으며, 유출량은 추정치가 787.9mm이고 실측치는 631.9mm로 나타났다. HP#3에 대한 유역 유출량의 추정 결과, R^2 는 0.633이었으며, RMSE는 3.38mm이었다.

HP#8은 1999년에 대하여 강우량이 1385mm이었으며, 추정 유출량은 867mm이고 실측 유출량은 875mm로 나타났다. 유출량의 R^2 는 0.837로 높게 나타났으며, RMSE는 5.19이었다. 실측 유출량과 추정 유출량의 상대오차는 HP#3은 24.7%로 높게 나타났으며, HP#8은 0.9%이었다.

(그림 10-9)와 (그림 10-10)은 일별 유출량 추정 결과를 산포도로 나타낸 것이다. 유역 유출량 모형은 장기유출모형으로 기저 유출성분의 모의 결과를 비교하기 위하여 모형의 추정 결과를 대수적으로 나타내었다. (그림 10-9)와 (그림 10-10)에 의하면 추정 유출량이 실측 유출량보다 전체적으로 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.



(그림 10-9) HP#3 유역의 실측 및 추정 일별 유출량 비교(1998)



(그림 10-10) HP#8 유역의 실측 및 추정 일별 유출량 비교(1999)

나. 유역 유출량 모형의 검정

유역 유출량 모형의 검정을 위하여 매개변수의 추정에 이용되지 않은 자료를 이용하여 모형의 일관성을 검토하였다. HP#3은 1999년 자료를 이용하였으며, HP#8은 1998년의 자료를 이용하였다.

유역 유출량 모형의 최적 매개변수를 이용하여 검정을 실시한 결과는 <표 10-8>과 같다. HP#3의 유출량은 실측치가 510mm이었으며, 추정치는 563mm로 나타났으며, 유출률은 각각 50%, 55%이었다. 일별 유출량에 대한 R^2 는 0.869로 높게 나타났으며, RMSE는 4.37mm이었다.

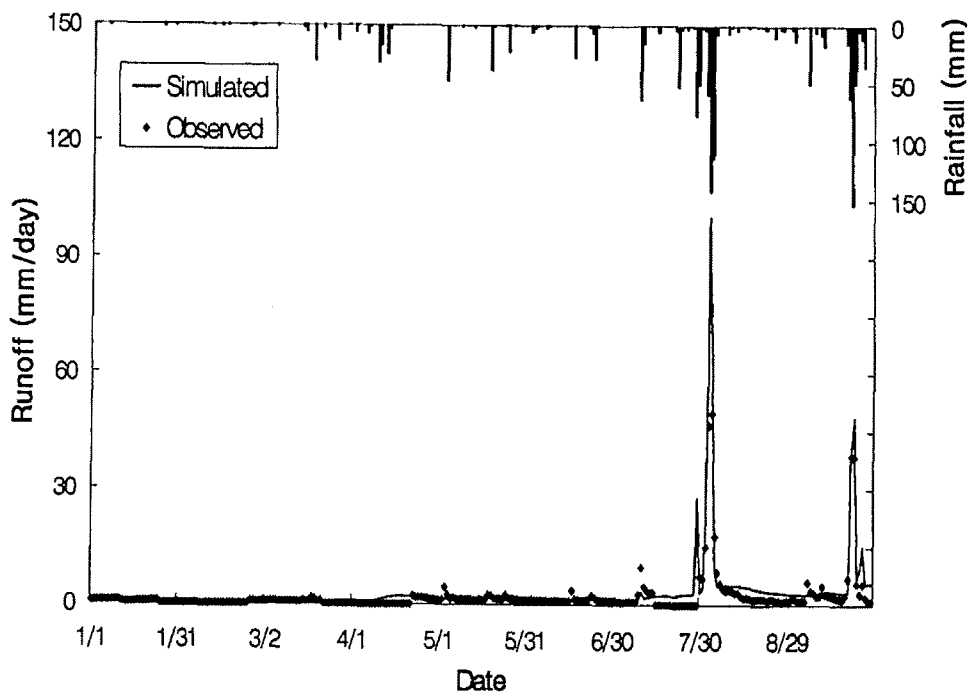
HP#8의 1998년의 실측 유출량은 822mm로 유출률은 57.9%이었으며, 추정 유출량은 745mm로 유출률은 52.5%이었다. 유출량 추정 결과에 대한 비교는 R^2 는 0.541로 나타났으며, RMSE는 4.34mm이고 모형의 효율 (E^2)는 0.53이었다.

모형의 검정 결과를 보정의 경우와 비교하면, 대체로 유사하게 나타났으며, HP#3은 보정시 보다 실측치에 근접한 결과를 보였으며, HP#9는 보정의 경우보다 추정치와 실측치의 차이가 많이 나타났다.

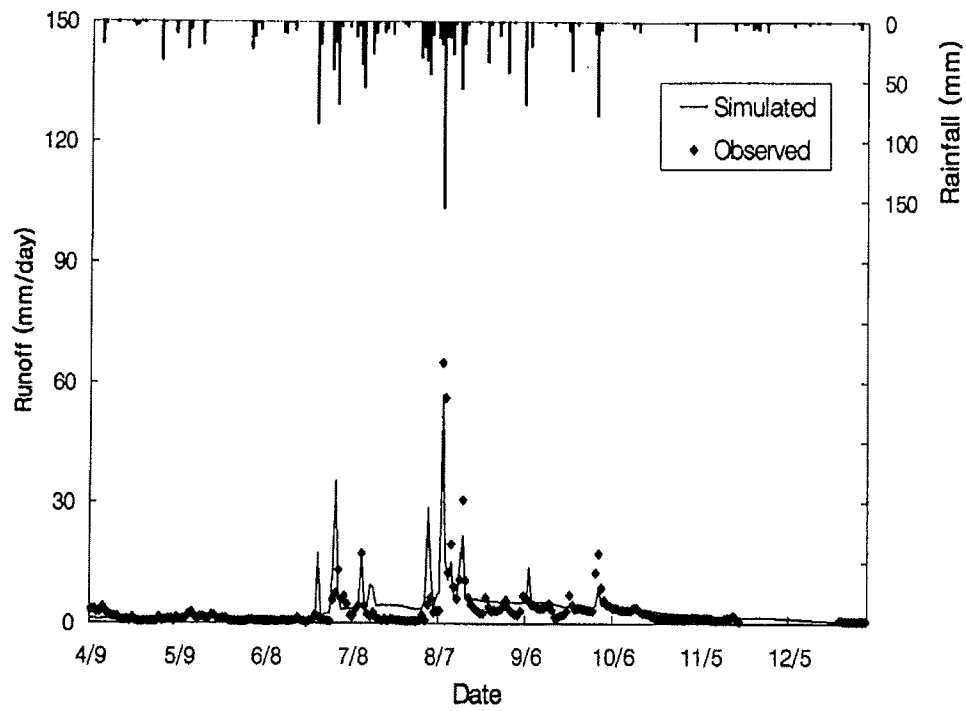
<표 10-8> 검정기간에 대한 유역 유출량 추정 결과

유역명	강우량 (mm)	유출량 (mm)			R ²	RMSE (mm)	E ²
		실측	추정	상대오차 (%)			
HP#3	1071	510	563	10.0	0.869	4.37	0.52
HP#8	1418	822	745	9.4	0.541	4.34	0.53

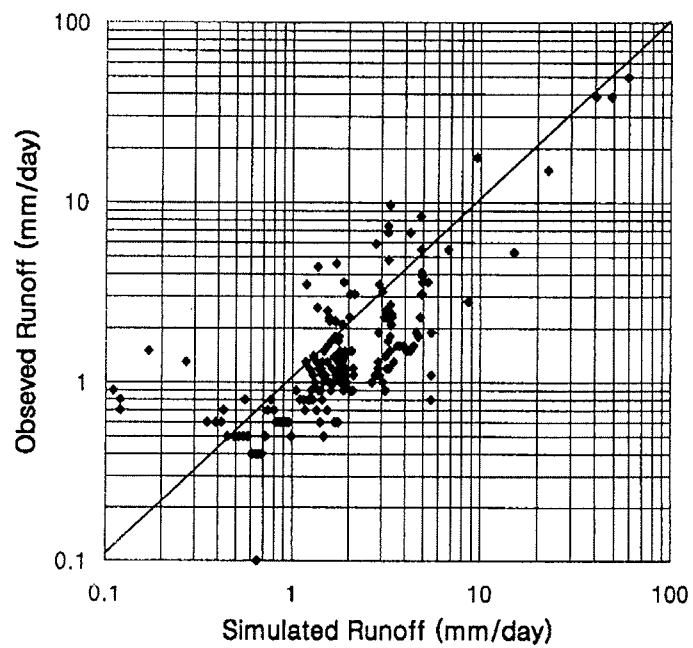
(그림 10-11)과 (그림 10-12)는 HP#3, HP#8의 검정기간에 대한 유출량의 추정 결과를 일별로 나타낸 것이며, (그림 10-13)과 (그림 10-14)는 모형의 검정기간에 대한 일별 유출량을 대수적으로 나타내어 비교한 것이다. 모형의 검정 자료에 의한 유출량의 추정 결과도 보정 자료의 추정 결과와 유사한 경향을 보이고 있다.



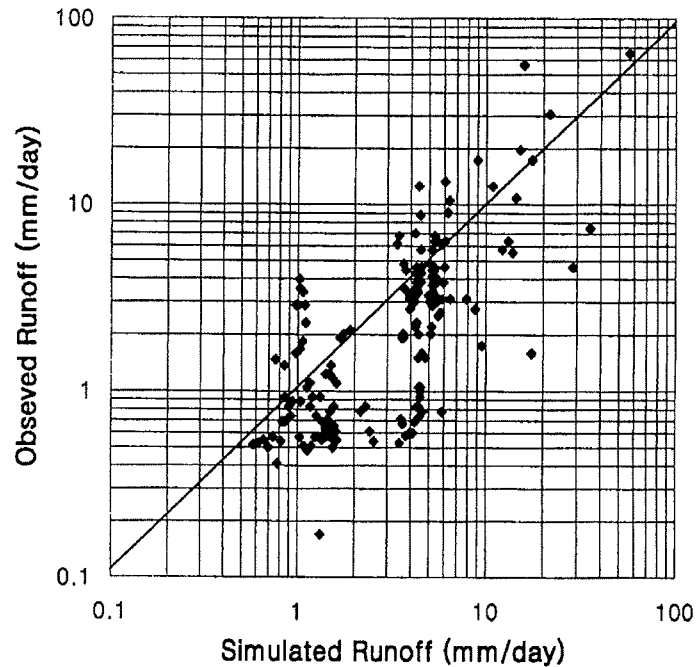
(그림 10-11) 검정기간에 대한 HP#3유역의 일별 유출량 비교(1999)



(그림 10-12) 검정기간에 대한 HP#8 유역의 일별 유출량 비교(1998)



(그림 10-13) HP#3 유역의 실측 및 추정 유출량 비교(1999)



(그림 10-14) HP#8 유역의 실측 및 추정 유출량 비교(1998)

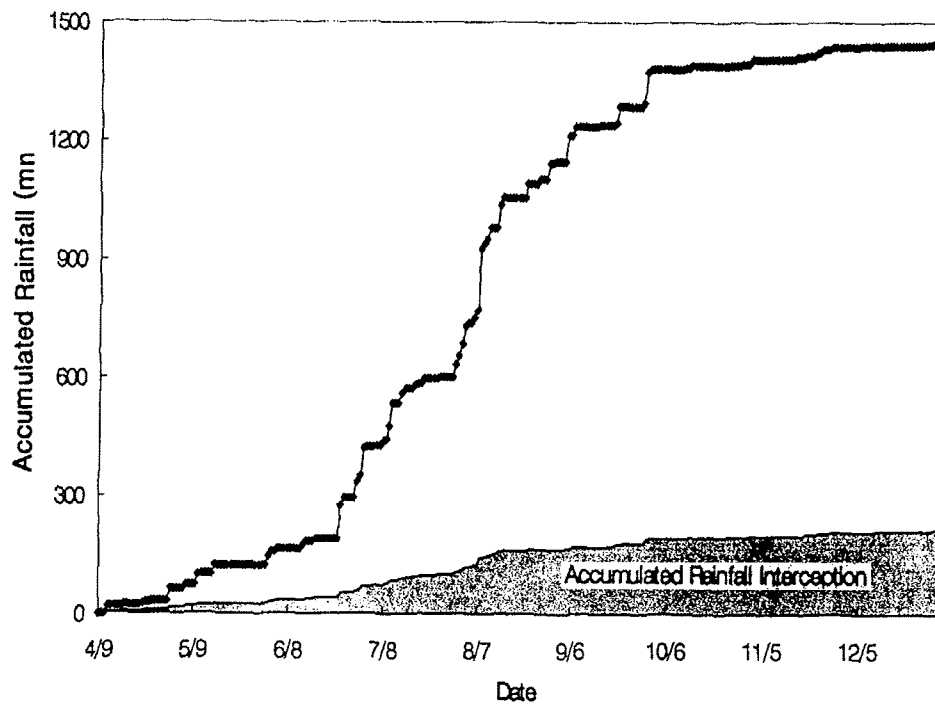
다. 유역 유출량 모형의 응용

산림지 유역은 식물의 식생에 의한 강우 차단량이 많이 발생하고 있다. 유역 유출량 모형에서는 산림지에서의 강우차단량을 강우량과 엽면적지수를 이용하여 추정하였으며, 그 결과는 (그림 10-15)와 (그림 10-16)과 같다. (그림 10-15)와 (그림 10-16)은 HP#8에 대하여 1998년, 1999년의 강우 차단량을 추가하여 비교한 것이다.

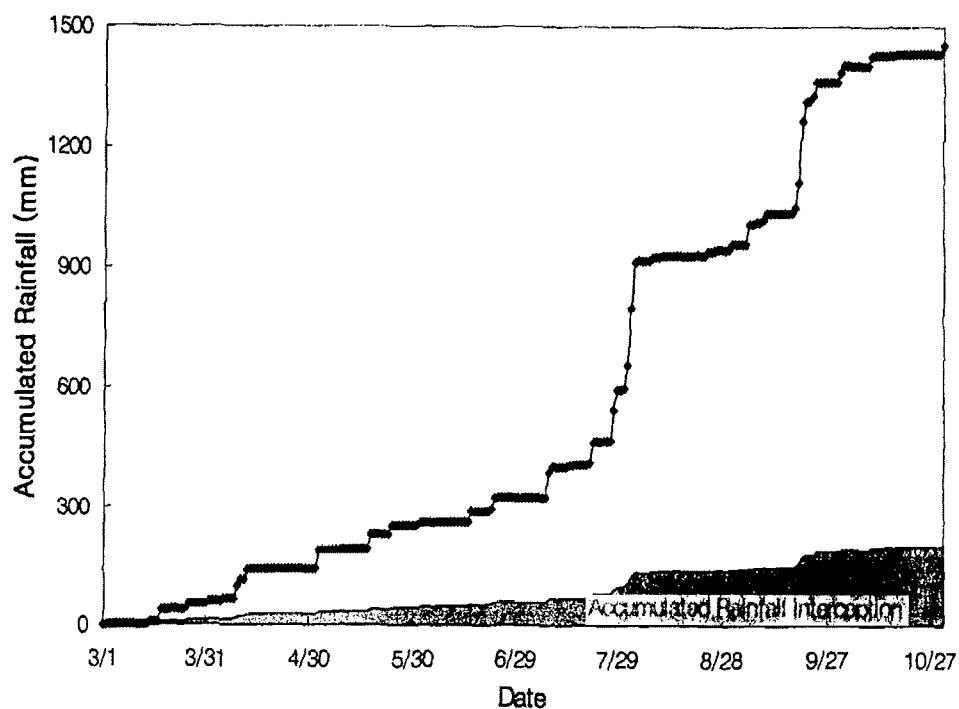
HP#8의 대표 수종은 기존의 연구 결과에 의하면 상수리나무와 리기테다 소나무가 주종을 이루고 있으며, 이에 따라 본 연구에서는 소나무 혼요림인 Group I을 적용하였다.

HP#8의 강우 차단량은 1998년에 213mm로 강우량의 14.7%를 차지하고 있으며, 1999년은 202mm로 강우량의 13.9%를 차지하고 있다. 이 결과는 김경하 등 (1997)이 서울대학교 농업생명과학대학 부속 관악수목원내에서 신갈나무와 리기테다 소나무를 이용하여 조사한 결과와 유사한 값을 나타내었다. 김경하 등은 1986년 7월부

터 1987년 10월까지의 실측자료를 이용하여 신갈나무의 차단손실량은 13.9%, 리기테다 소나무의 차단 손실량은 17.4%라고 하였다.



(그림 10-15) HP#8 유역의 누가 강우 차단량 변화 (1998)



(그림 10-16) HP#8 유역의 누가 강우 차단량 변화 (1999)

강우량의 크기에 따른 차단량은 10mm이하의 적은 강우에서는 강우량의 크기에 지수함수적으로 비례하였으며, 10mm이상의 큰 강우에서는 선형적으로 비례하였다.

2. 관개지구의 유출 모형의 적용

가. 지표 배수량

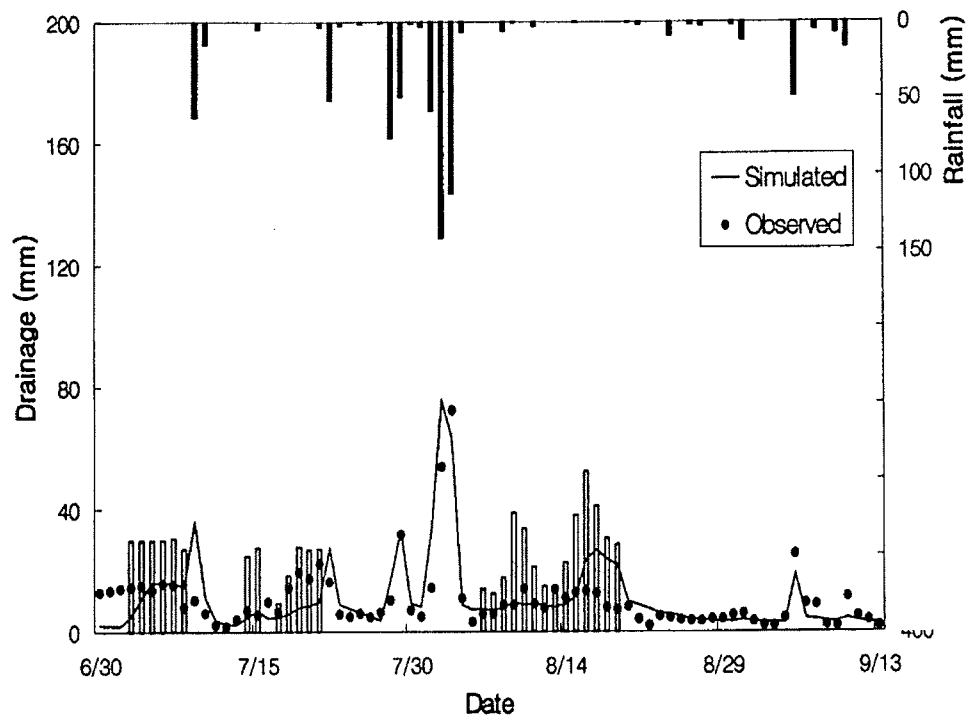
지표배수량의 추정을 위하여 기천저수지 하류에 정밀포장의 자료를 이용하였다. 정밀 포장의 면적은 2.7ha이며, 토양은 사양토로서 침투량은 4.0mm/일로 하였으며, 수로손실량 및 배분관리 용수량은 각각 관개량의 5%, 10%로 하였다. 또한, 물고높이는 1996년의 기천지구 실측 자료를 적용하였으며, 관개기인 6월 30일부터 9월 13일까지의 자료를 이용하여 배수량을 추정하였다. <표 10-9>는 지표배수량 추정을 위한 모형의 입력 조건을 정리한 것이다.

<표 10-9> 관개지구 유출 모형의 입력자료

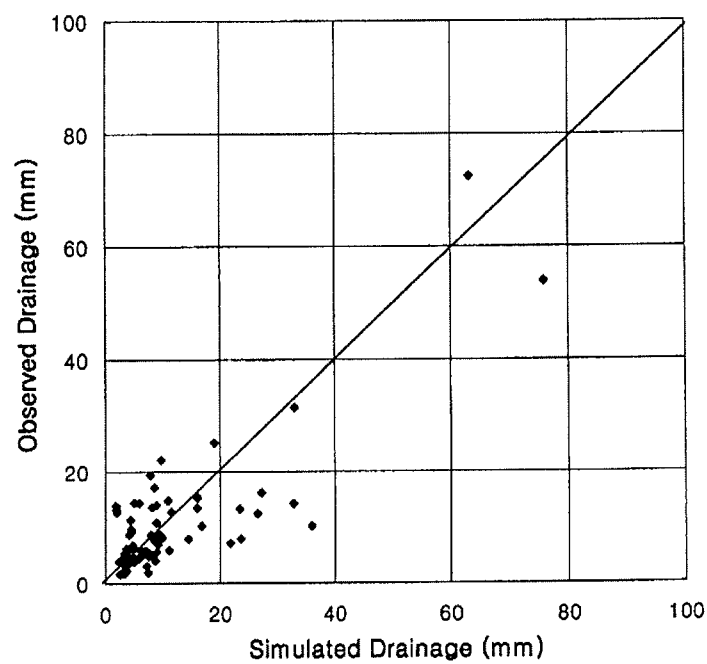
구 분	단 위	사용 자료
관개면적	ha	2.7
일별 침투량	mm/일	4.0
수로 손실량	%	5.0
배분관리 용수량	%	10.0
자료 기간		6/30/99~9/13/99

정밀 포장의 관개량 및 강우량 자료를 이용하여 지표배수량을 추정한 결과는 (그림 10-17)과 같다. 관개량 자료는 HP#10의 수위 자료를 이용하여 구하였으며, 실측 배수량은 HP#9의 일별 유량 자료를 이용하였다.

대상기간 동안의 강우량은 725mm이었으며, 관개량은 714mm이었다. 지표배수량은 실측치가 772mm이었으며, 추정치는 811mm를 나타내었다. 실측 배수량과 추정 배수량의 R^2 는 0.664로 나타났으며, RMSE는 7.11mm/day이었다. 또한, 모형의 효율을 나타내는 E^2 는 0.54로 나타났다.



(그림 10-17) 정밀 포장의 지표배수량 추정 결과



(그림 10-18) 지표배수량의 실측치와 추정치 비교

추정된 지표배수량과 실측 배수량의 산포도를 도시하면 (그림 10-18)과 같다. (그림 10-18)은 추정된 지표배수량과 실측된 지표배수량을 일별로 비교하여 표시한 것으로, 추정 배수량이 실측 배수량보다 대체적으로 크게 나타나고 있다. 이는 지표배수량의 추정을 위하여 적용한 물고높이의 차이에 의한 것으로, 모형에 사용된 물고높이는 기천지구에서 조사된 순별 평균치를 순별로 일정하게 적용하였으며, 이로 인하여 실제 물고높이를 정확하게 반영하지 못하기 때문이다.

정밀 포장의 지표배수량 추정 결과를 순별로 정리하면 <표 10-10>과 같다. 순별 지표배수량은 강우량 및 관개량에 따라 차이를 보이고 있으나, 강우가 집중된 8월 초순에 추정치가 228mm이며, 실측치가 197mm로 가장 많은 지표배수량을 나타내었으며, 8월 중순에는 답수된 수량이 배수되는 관계로 배수량이 강우량보다 크게 나타나고 있다. 순별 지표배수량의 상대오차를 살펴보면 7월 중순에 41.4%로 가장 큰 차이를 보였으며, 대상기간동안 5.1%~44.2%의 범위를 보였으며, 상대오차는 평균치는 24.0%이었다.

<표 10-10> 지표배수량 추정 결과

시 간	강우량 (mm)	관개량 (mm)	지표배수량 (mm)		
			실 측	추 정	상대오차 (%)
7/상	77.6	176	138	131	5.1
7/중	7.8	133	87	51	41.4
7/하	245.2	27	119	135	13.4
8/상	271.3	116	197	228	15.7
8/중	2.6	262	104	150	44.2
8/하	28.2	0	47	55	17.0
9/상	77.8	0	70	51	37.3
총 계	710.2	714	772	811	24.0

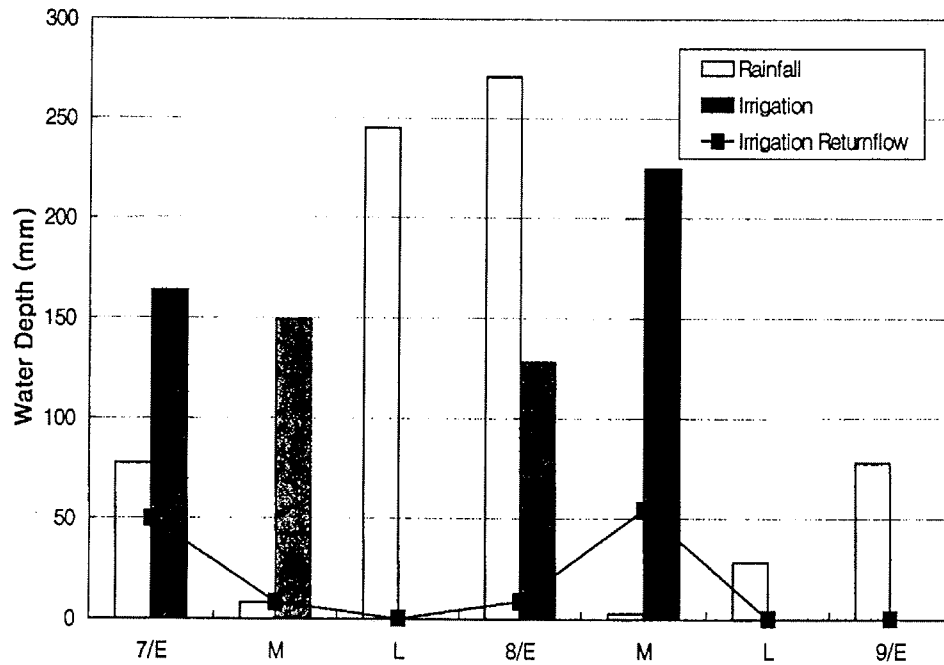
나. 관개회귀수량

정밀 포장에 대하여 신속 회귀수량을 추정한 결과는 <표 10-11>에 나타나있다. 7월 상순부터 9월 초순까지 관개불력에 급수된 전체 관개수량 714mm중에서 16.9%인 121mm가 신속 회귀수량으로 배수되었다. 순별로 살펴보면, 7월 초순에 49.7mm로 회귀율은 30.3%이었으며, 8월 중순에는 관개회귀수량이 54.2mm로 전체 관개량의 24.1%를 차지하였다. 7월 중순과 8월 초순에는 회귀율이 각각 5.4%, 6.8%로 매우 작게 나타났다.

(그림 10-19)는 순별 관개량, 강수량 및 신속회귀수량을 정리하여 도시적으로 나타낸 것이다.

<표 10-11> 정밀 포장의 신속 회귀수량 추정 결과

시 간	강수량 (mm)	관개량 (mm)	신속회귀수량	
			(mm)	(%)
7/상	77.6	176	49.7	30.3
중	7.8	133	8.0	5.4
하	245.2	27	0.0	0.0
8/상	271.3	116	8.7	6.8
중	2.6	262	54.2	24.1
하	28.2	0.0	0.0	-
9/상	77.8	0.0	0.0	-
총계	710.2	714	120.6	16.9



(그림 10-19) 정밀 포장의 시기별 신속 회귀수량 변화

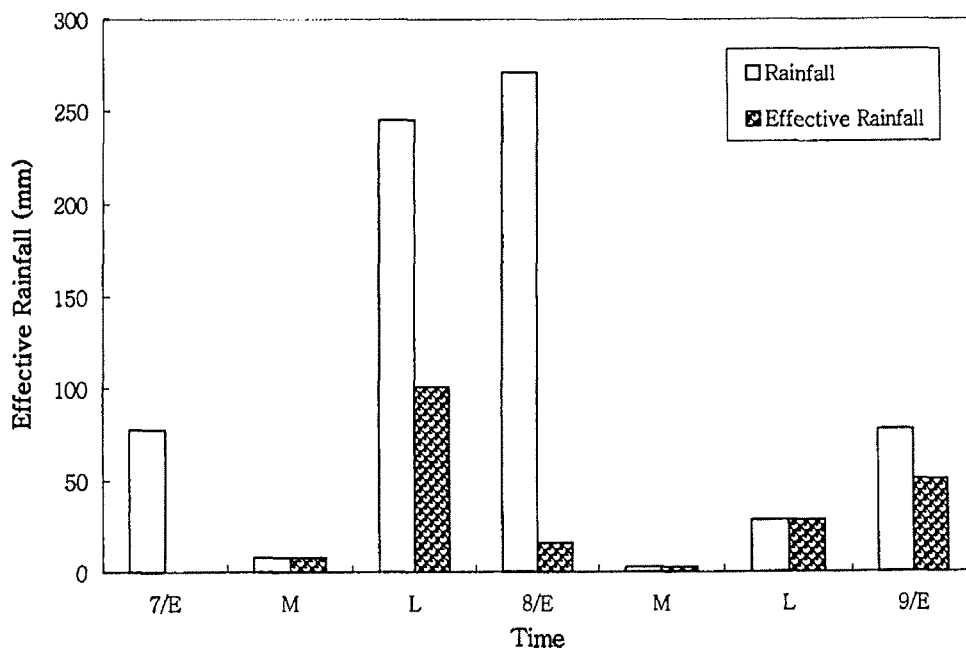
다. 유효수량

논에서의 관개란 논벼의 재배를 위하여 필요한 수량중에서 자연적인 강우에 의해서 공급되는 남은 부족수량을 인위적으로 공급하여 주는 것으로, 유효수량에 크기에 따라 관개량이 결정된다.

정밀 포장의 관개량, 강수량 및 물관리 자료로부터 구한 유효수량은 <표 10-12>, (그림 10-20)과 같다. <표 10-12>에서는 강수량 중에서 작물의 잎에 의해 차단되는 손실량을 무시하였다. 7월 1일부터 9월 10일까지 정밀 포장의 유효수량은 논벼의 생육단계 및 강수량에 따라 차이를 보이고 있으나, 이 기간 동안의 전체 강수량 710.2mm의 29.0%인 206mm가 논벼의 재배에 이용되었다. 시기별 유효수량을 살펴보면, 7월 중순에 100.7mm로 전체 강수량의 41.1%가 작물의 재배에 이용되었으며, 9월 초순에는 50.7mm가 유효수량으로 나타났다. 7월 초순의 경우에는 중간낙수를 실시하므로 물고를 낮게 유지하며, 이로 인하여 전체 강수량 77.6mm가 모두 배수되어 유효수량은 전혀 없었다.

<표 10-12> 정밀 포장의 유효우량 추정 결과

시 간	강우량	유효우량	
		(mm)	(%)
7/상	77.6	0.0	0.0
7/중	7.8	7.8	100.0
7/하	245.2	100.7	41.1
8/상	271.3	16.0	5.9
8/중	2.6	2.6	100.0
8/하	28.2	28.2	100.0
9/상	77.8	50.7	65.2
총계	710.2	206.0	29.0



(그림 10-20) 정밀 포장의 시기별 유효우량 변화

제 4 절 농업유역의 물수지 분석

1. 농업유역의 물수지 해석방법

한정된 수자원을 효율적으로 이용하고 관리하기 위해서는 물수지 요소들을 정의하고, 이들 인자상호간의 관계를 정량적으로 분석하는 것이 선행되어야 하는 데, 이를 물수지 분석이라 한다. 따라서, 물수지 분석이란 주어진 지점의 유입 및 유출 관계를 구명하고, 각각의 물수지 요소가 대상지구내의 물의 이동 및 순환에 미치는 영향을 분석하는 것이다.

논벼의 재배를 주로 하는 농업유역은 수원공 시설의 종류에 따라 저수지 관개지구, 양수장 관개지구, 취입보 관개지구 등으로 크게 구분할 수 있으며, 이외에도 시설원예단지 등이 있다. 농업유역의 물수지 요소는 수원공 시설이나 재배작물에 따라 차이를 보이고 있으나, 주로 취수원에 의한 취입수량, 유역으로부터의 유입량, 하천의 상류 유입량, 관개지구의 회귀수량 등으로 구성된다.

우리 나라 농업유역의 대부분을 차지하고 있는 저수지 관개지구의 물수지 요소를 나타내면 (그림 10-21)과 같다. (그림 10-21)과 같이 저수지 관개지구는 상류의 관개용 저수지에 의해 하천의 유출량의 저류하여 용수로를 통해 하류의 관개지구에 공급하게 된다. 저수지 관개지구의 유입성분은 강우에 의한 배후유역의 유출량과 관개용수의 공급에 따른 회귀수량으로 구성되어 진다.

농업유역에는 일반적으로 산지 등과 같은 배후유역이 많이 산재하여 있으며, 이들 배후유역으로부터 유출되는 수량이 하천으로 흘러들어가 하천 유량을 형성한다. 비관개기의 하천의 유량이나 홍수시의 홍수유출량은 대부분 이러한 배후유역의 유출에 영향을 받게 된다.

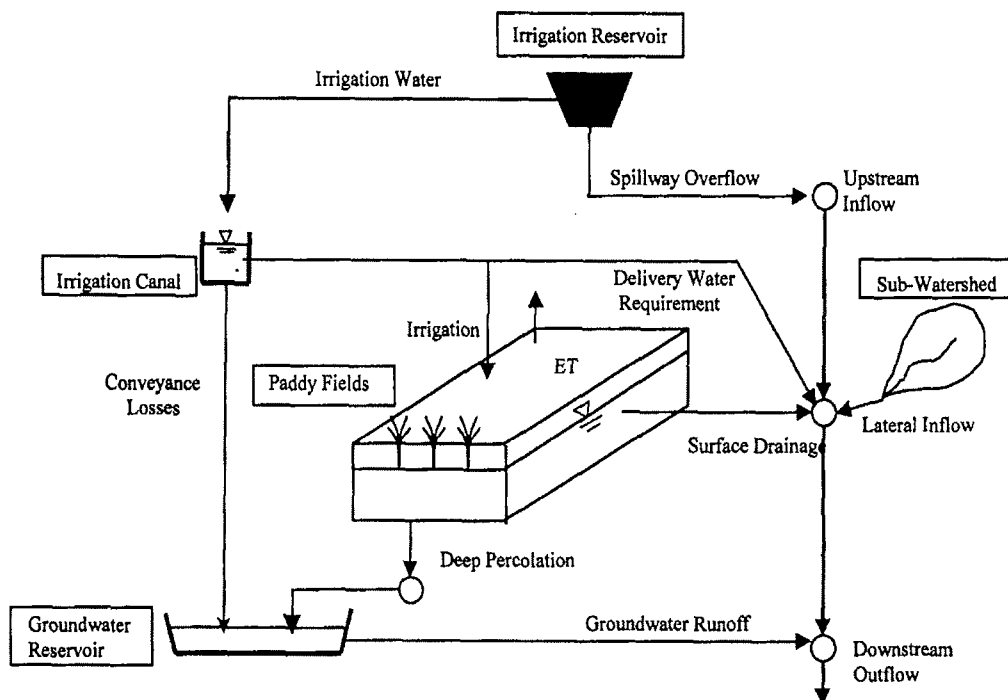
저수지로부터 공급된 수량중의 일부는 용수로에 의한 운송과정에서 토양중으로 침투되고, 수면을 통하여 대기중으로 증발된다. 관개논의 경우에도 담 토양이나 논둑으로의 침투가 발생하며, 담수되어 있는 수면과 논벼를 통한 증발산이 일어난다.

한편, 관개용수의 공급에 따른 회귀수량이 발생하여 하천으로 다시 흘러나오게 된다. 이들 회귀수량은 용수의 공급과정에서 배수로를 통해 유출되거나 논외 물꼬를 넘어 월류하는 수량을 포함된다. 토양중으로 침투된 수량은 지하수위를 상승시

키며, 장기간에 걸쳐 하천으로 다시 유출된다.

(그림 10-21)에서 상류구간의 유입량은 하천의 유지용수를 위한 기저 유량, 하천의 상류 구간으로부터 유입되는 수량, 그리고 저수지의 물넘이를 월류하는 수량으로 구성된다. 우리 나라의 경우, 7~8월의 홍수기에는 태풍이나 폭우 등으로 인하여 집중호우가 발생하며, 이로 인하여 유역의 유출량이 증가하고, 저수지 유입량이 순간적으로 증가하여 저수지 제체의 안전에 대한 문제가 발생할 수 있다. 따라서, 집중호우가 예상되는 시기에는 저수지의 수위를 조절하기 위하여 저수량 중의 일부를 하천으로 방류하거나 물넘이를 통해 월류시키게 된다.

따라서, 물수지 분석이란 위에서 열거한 물수지 요소들에 대한 정량적 분석을 실시하고, 대사지구의 수문순환에 미치는 영향을 파악하기 위해 필요하다.



(그림 10-21) 저수지 관개지구의 물수지 요소

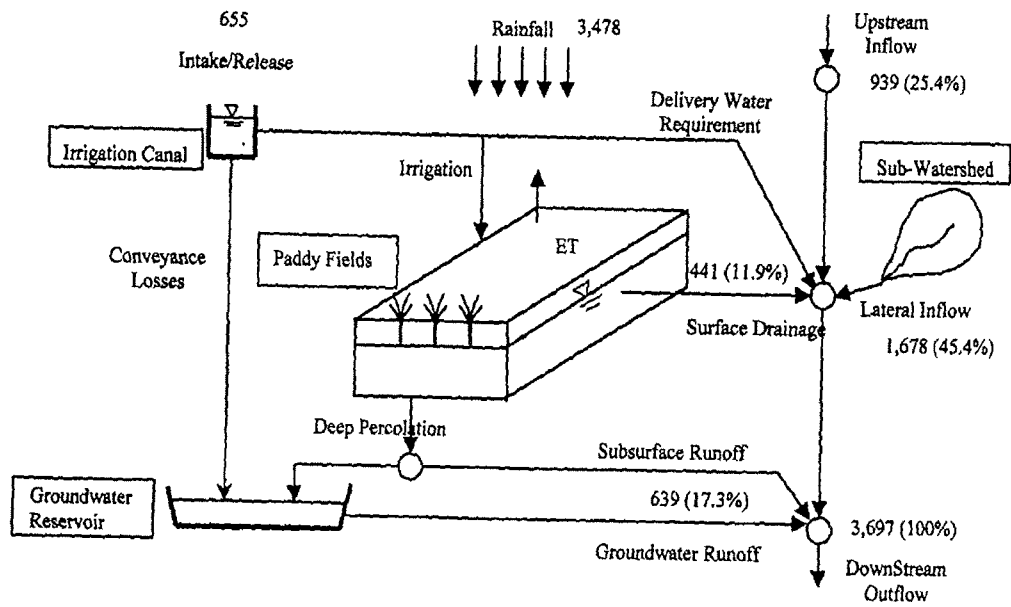
2. 기천 관개지구의 물수지 분석

기천관개지구에 대한 1998, 1999년의 물수지 해석 결과는 <표 10-13>과 같다. <표 10-13>과 같이 기천관개지구의 1998년 조사기간에 대한 연간 하천유량은 3,697천 m^3 이며, 배후유역으로부터 유입된 유량이 1,678천 m^3 으로 전체 하천유량의 45%를 차지하고 있다. 관개지구로부터 회귀되는 지표배수량은 444천 m^3 이며, 지하수 유출량은 639천 m^3 이었다. 이들 관개지구 회귀수량의 구성비는 각각 12%, 17%를 차지하며, 기타 상류하천의 유입량이 25%인 939천 m^3 로 나타났다.

<표 10-13> 기천 관개지구의 물수지 해석 결과

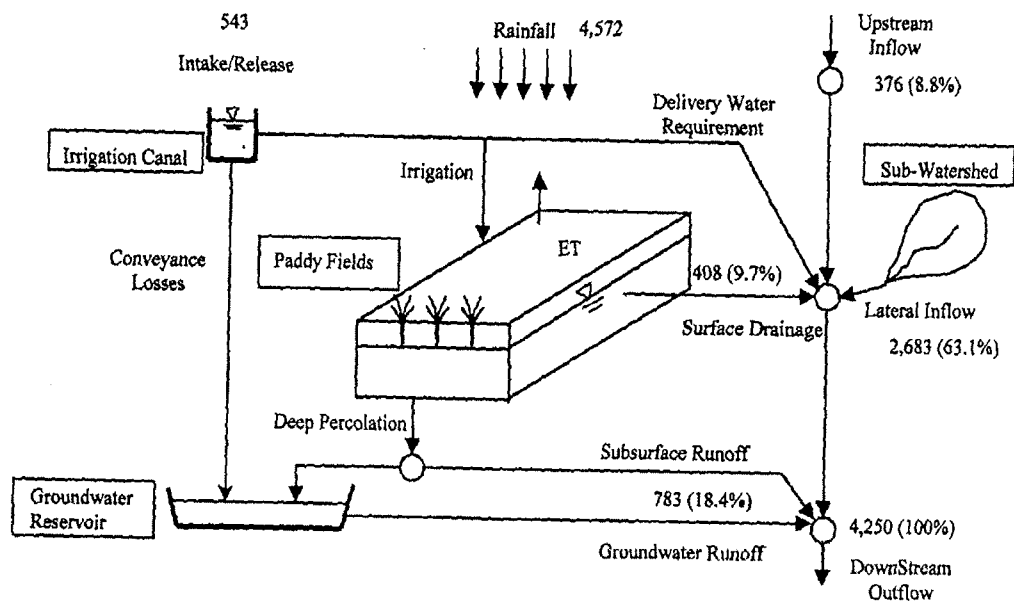
구 분		상류구간 유입량	유역 유입량	관개지구 지표배수량	지하수 유출량	총 하천유량
1998	유량 (천 m^3 /년)	939	1,678	441	639	3,697
	구성비(%)	25.4	45.4	11.9	17.3	100
1999	유량 (천 m^3 /년)	376	2,683	408	783	4,250
	구성비(%)	8.8	63.1	9.7	18.4	100

1999년의 기천 관개지구의 물수지 분석 결과, 총 하천유량은 연간 4,250천 m^3 이며, 이는 1998년보다 약 13% 증가된 수량이다. 배후유역의 유입량은 2,683천 m^3 으로 전체 하천유량의 63%를 차지하고 있으며, 상류하천 유입량은 8%인 376천 m^3 로 나타났다. 관개지구의 회귀수량은 지표배수량이 408천 m^3 이었으며, 지하수 유출량이 783천 m^3 로 나타났으며, 이는 전체 하천 유량의 각각 10%, 18%를 차지한다. (그림 10-22, 23)은 1998, 1999년의 기천 관개지구에 대한 물수지 분석 결과를 도식적으로 나타낸 것이다.



Unit : 10^3m^3

(그림 10-22) 기천 관개지구의 물수지 분석(1998)



Unit : 10^3m^3

(그림 10-23) 기천 관개지구의 물수지 분석(1999)

3. 발안 관개지구의 물수지 분석

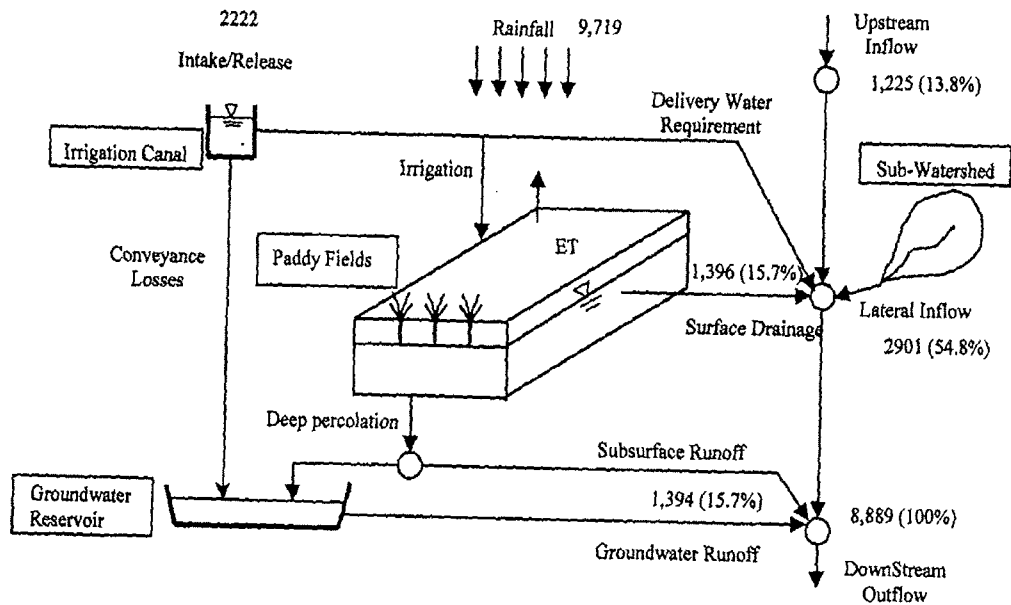
발안 관개지구에 대한 1998, 1999년의 물수지 해석 결과는 <표 10-14>와 같다. <표 10-14>와 같이 발안 관개지구의 1998년 조사기간에 대한 연간 하천유량은 8,889천 m^3 이며, 배후유역으로부터 유입된 유량이 4,874천 m^3 으로 전체 하천유량의 55%를 차지하고 있다. 관개지구로부터 회귀되는 지표배수량은 1,396천 m^3 이며, 지하수 유출량은 1,394천 m^3 이었다. 이들 관개지구 회귀수량의 구성비는 각각 16%, 16%를 차지하며, 기타 상류하천의 유입량이 14%인 1,225천 m^3 로 나타났다.

<표 10-14> 발안 관개지구의 물수지 해석 결과

구 분		상류구간 유입량	유역 유입량	관개지구 지표배수량	지하수 유출량	총 하천유량
1998	유량 (천 m^3 /년)	1,225	4,874	1,396	1,394	8,889
	구성비(%)	13.8	54.8	15.7	15.7	100
1999	유량 (천 m^3 /년)	1,470	2,742	1,401	1,220	6,833
	구성비(%)	21.5	40.1	20.5	17.9	100

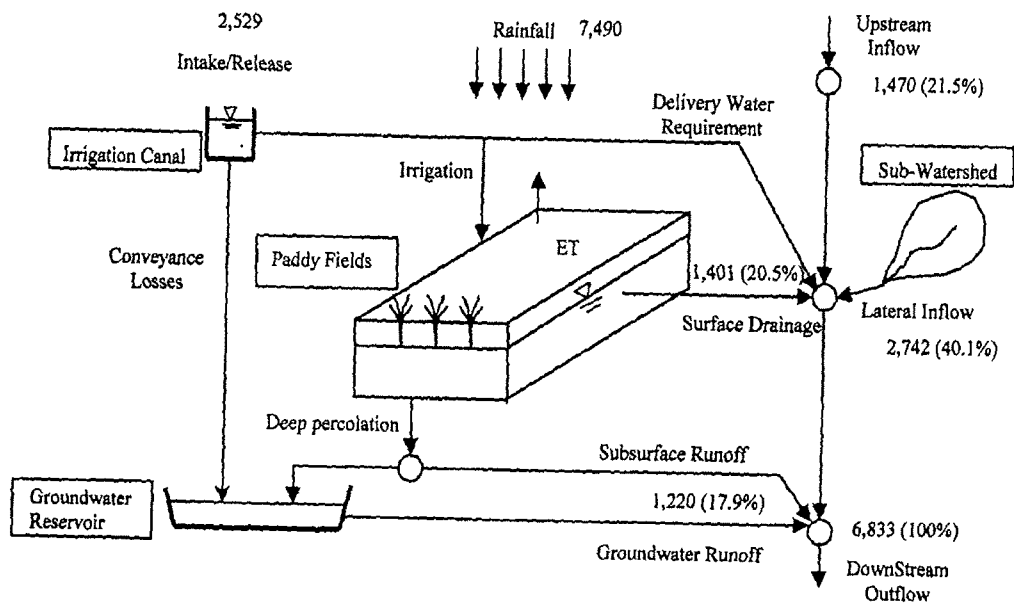
또한, 1999년의 조사기간에 대한 발안 관개지구의 하천 유출량은 6,833천 m^3 이었으며, 이 중에서 40%인 2,742천 m^3 가 배후유역의 유입량이었다. 또한, 관개지구 지표배수량과 지하수 유출량은 각각 1,401천 m^3 , 1,220천 m^3 이었으며, 이는 전체 하천 유출량의 20%, 18%에 해당하였다.

1998, 1999년의 2개년에 대한 기천 및 발안지구의 물수지 분석 결과, 전체 하천유출량 중에서 배후의 산림지 등으로부터 유입되는 수량이 40.1~63.1%로 평균 50.8% 정도를 차지하였다. 관개지구의 지표배수량은 9.7~20.5%로 관개지구에 따라 변화가 많이 났으며, 이는 영농방식이나 물관리의 차이에 의한 것으로 생각된다. 한편, 지하수 유출량은 지형이나 토양의 특성에 따라 결정되는 것으로, 15.7~18.4%의 변이를 보였으며 평균적으로 하천 유출량의 17.3%를 차지하였다.



Unit : 10³m³

(그림 10-24) 발안 관개지구의 물수지 분석(1998)



Unit : 10³m³

(그림 10-25) 발안 관개지구의 물수지 분석(1999)

제 5 절 요약 및 결론

농업유역에서 배후유역의 유출 특성을 분석하고 이로부터 유역 유출량을 추정하는 유역 유출량 모형을 개발하였으며, 농업용수의 공급에 따른 관개지구의 지표배수량과 지하수 유출량, 그리고 관개회귀수량을 추정하기 위한 관개지구 유출량 모형을 구성하였다. 또한, 유역 유출량 모형과 관개지구 유출량 모형을 통합하여 농업유역의 수문순환 모형을 개발하였으며, 이로부터 유역의 물수지 분석을 실시하였다.

이상의 결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

- ① 농업유역의 수문순환 기작을 구명하고, 이로부터 수문요소들간의 연관성을 분석하였다.
- ② 배후유역으로부터 유입되는 유출량을 추정하기 위하여 유역 유출량 모형을 개발하였으며, 강우차단량, 지표 유출량, 지표하 유출량 및 지하수 유출 성분으로 구성하였다.
- ③ 농업용수의 이용에 따른 수문순환을 분석하기 위하여 관개지구 유출 모형을 구성하였으며, 관개지구에 공급된 강우량과 관개량으로부터 지표배수량, 지하수 유출량 및 관개회귀수량을 추정한다.
- ④ 발안저수지 유역의 HP#3, HP#8유역의 1998, 1999년의 강우량 및 유출량 자료를 이용하여 유역 유출량 모형의 매개변수를 추정하고, 모형의 검정을 실시하였다.
- ⑤ 기천저수지 하류의 정밀 포장에 대한 관개량, 강우량, 지표 배수량 자료를 이용하여 관개지구 유출 모형의 적용성을 평가하였으며, 이로부터 유효우량, 신속 회귀수량을 추정하였다.
- ⑥ 농업유역의 수문순환 모형을 이용하여 발안지구 및 기천지구에 대한 물수지 분석을 실시하였다. 물수지 분석 결과, 유역으로부터 유입되는 유역 유출량이 전체 하천수의 50% 정도를 차지하고 있으며, 관개지구 지표배수량이 9.7~20.5%를 차지하였다. 또한, 지하수 유출량은 토양의 특성에 따라 다르나 15.7~18.4%의 범위를 보였다.

참고문헌

1. 강민구, 1998. SSARR모형을 이용한 관개용 저수지 시스템의 거동분석, 서울대학교 석사학위논문.
2. 김경하, 1993. 산림의 강우차단손실량 추정 전산모형 개발에 관한 연구, 서울대학교 대학원 박사학위논문.
3. 김경하, 우보명, 1997. 신갈나무와 리기테다소나무림에서 홍수기의 강우차단손실량을 추정하기 위한 전산모형, 한국수자원학회논문집, 제30권 5호, pp. 503-513.
4. 김재수, 1999. 중부 산림 지역의 증발산량 추정, 한국임학회지, 88(1), pp. 86-92.
5. 김현영, 1988. 관개용 저수지의 일별 유입량과 방류량의 모의발생, 서울대학교 박사학위논문.
6. 임상준, 2000. 농업유역의 논 관개회귀수량 추정 모형의 개발, 서울대학교 박사학위논문
7. 정하우, 1986. 작물 소비수량 산정방법의 정립, 서울대학교 농업개발연구소, 농수산부, 농업진흥공사.
8. Anderson, M. G. and T. P. Burt, 1990. Process studies in hillslope hydrology, John Wiley & Sons, p. 539.
9. Arnold, J. G., and P. M. Allen, 1993. A comprehensive surface-groundwater flow model, Journal of Hydrology, vol.142, pp. 47-69.
10. Diskin, M. H., and E. Simon, 1977. A procedure for the selection of objective function for hydrologic simulation models, Journal of Hydrology, vol. 34, pp. 129-149.
11. Doorenbos, J. and W. O. Pritt, 1977. Guideline for prediction of crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 2, FAO, Rome, Italy.
12. Duan, Q., S. Sorooshian, and V. K. Gupta, 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, Water Resources Research, vol. 28, no. 4, pp. 1015-1031.

13. Manley, R. E., 1977. The soil moisture component of mathematical catchment simulation models, *Journal of Hydrology*, vol. 35, pp. 341-356.
14. McCuen, R. H. and W. M. Synder, 1986. *Hydrologic modeling :Statistical methods and applications*, Prentice-Hall, New Jersey, p. 568.
15. Ritchie, J. T., 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover, *Water Resources Research*, vol. 8, no. 5, pp. 1204-1213.
16. Singh, V. P., 1989. *Hydrologic systems : Watershed modeling*, Prentice-Hall, p. 320.
17. Yashima, S., 1982. Water balance in low and flat paddy land -A case study in the Muda irrigation project area, Malaysia, *JARQ*, vol. 16, pp. 151-157.

여 백

수문모델링 기술 개발

2000년 12월

“농업생태환경 모니터링 및 종합적 환경관리시스템 개발 사업”

서울대학교 농업생명과학대학 부속 농업개발연구소

최종보고서 제 IV 편 제 11 장

여 백

제 11 장 수문모델링 기술 개발

제 1 절 서 론

농업 소유역에서의 강우시 유출은 논에서의 담수심의 변화 및 물꼬 높이에 큰 일시 저류 효과를 가질 수 있으며, 배수로로 배제되는 유출 또한 물꼬를 통과 루어지므로, 자연하천이나 산림지 등의 일반적인 유역의 경우와는 다른 유출 특 가지고 있다. 한편, 관개지역에서의 유출 순환과정은 인위적인 급수로 인해 상태와 다르며, 농업용 저수지는 상류로부터 유입되는 유량을 저류하고, 인위적 방류함으로써 하류하천의 유량에 영향을 미친다. 또한, 관개용수의 급수 과정 발생되는 도수 손실량이나 물리구역으로부터 퇴수되는 등 회귀수량으로 인하여 천유황이 변하기도 한다.

이처럼 소유역에서의 장단기 유출현상은 시간적·공간적 변동이 심한 기상인 수문지상인자 등의 영향을 받음은 물론, 수문자료가 포함하고 있는 비선형성과 실성 등으로 인해 강우-유출과정을 수학적으로 모형화하기란 쉽지 않다.

수문과정의 모형화는 불확실하고 비합리적인 시스템의 초기상태, 강우-유출의 불확실한 모형구조, 그리고 비정규성과 비선형성으로 인한 불확실한 매개변수에 의해 모형과 실측치간에 불일치를 초래하고 있다.

우리 나라는 농경지에서의 물의 순환과정, 즉 수문순환에 대하여는 정성적으로 알려져 있으나, 정량적인 측정자료가 부족한 상태이며, 이로 인하여 농경지로 유출량, 지하수 유입량 등을 고려하지 않은 상태에서 물 부족을 보충하는 데 급왔다.

또한, 국내에서는 농업유역의 강우-유출기작에 대한 단편적인 연구가 시행되며, 이를 바탕으로 하는 수문모형이 개발되어 이용되고 있다. 논에 대한 강우-기작의 구명을 위한 SCS의 유출 곡선 번호 (Curve Number, CN)의 추정을 포장 실험과 유역 적용 실험 연구가 진행되고 있어, 우리 나라의 농경지 유역에

용 가능한 자료의 제시가 가능하게 되었다. 그러나 다양한 농업 특성에 따른 규모에서의 수문기작에 관한 자료는 부족한 상태이다.

따라서, 농업유역의 수문 유출현상은 기상, 지형, 토양, 토지이용상태, 영농방식의 여러 인자에 의하여 좌우되므로, 시험유역을 대상으로 하는 체계적이고 지속 수문자료 수집을 바탕으로 이들과의 관계를 정량적으로 해석할 수 있는 수학적형을 개발, 응용하여 대상 유역에 관한 체계적이고 합리적인 장단기 유출해석을 도하는 것이 필요하다.

본 장에서는 수집된 시험유역의 수문자료를 바탕으로, 논에서의 저류 효과 및 유출 특성을 고려하여 나타낼 수 있도록 한 수정 TR-20모형의 개발 및 적용, 관·저수지군을 포함하는 농업용 소유역의 일유출량 추정에 대한 SSARR 모형의 성의 평가, SCE-UA법을 이용한 수정 Tank 모형의 개발 및 적용, 신경망이론을 응용한 소유역에서의 장기유출 추정 모형의 개발 및 적용 등을 통하여 장단기 유출 해석을 수행하고, 그 결과를 고찰하고 적용성을 평가하고자 한다.

제 2 절 단기 강우-유출 해석

1. 개론

기존의 홍수량 산정방법이나 수문 모형들은 유역 전체를 대상으로 홍수 유출을 산정하거나 단위도 합성 등을 통하여 유출을 모의함으로써, 논·의 유출 특성이 한 고려를 하지 않으며, 기존의 물수지를 이용한 논·의 유출 모형들은 적용성에 포장단위에 한정되는 단점을 가지고 있다 (김채수, 1982; 정하우 등, 1986).

현재까지 논·의 유출 특성을 고려한 유역단위의 유출 모형에 대한 연구는 미상태이며, 주로 토지이용에 따른 모형의 유출 매개변수 보정이나 (안상진 등, 1988), 물꼬 높이 및 담수심 변화의 관측을 통한 포장단위의 유출량 등에 관한 연구가 되어 왔다 (김채수, 1982; 임상준 등, 1997).

따라서, 본 절에서는 논·에서의 저류 효과 및 유출 특성을 나타낼 수 있도록 홍수량 추정 모형인 TR-20 모형을 수정한 수정 TR-20 모형을 개발하고, 이를 리 나라의 농업 소유역에 적용하여 유출수문곡선을 추정하고, 실측 홍수량 자

있는 발안지역을 대상유역으로 선정하여 적용결과를 비교하며, 논에서의 경작상태의 변화에 따른 유역의 유출량 변화로부터, 논 지역이 가지고 있는 홍수경감효과에 대해서 고찰하도록 한다.

2. 유출수문곡선의 추정

가. TR-20 모형에 의한 유역 홍수량 추정

TR-20 모형에서는 소유역에서의 홍수유출량 산정시 SCS에서 제시한 유출곡선 번호법과 무차원 단위도법을 이용하고 있다. 유출곡선번호법에 의한 유효우량은 다음의 식으로 정의된다 (SCS, 1972).

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (11-1)$$

여기서, P 는 강우량 (mm), S 는 유역의 최대잠재보유수량 (mm), Q 는 직접유출량에 해당하는 유효우량 (mm)이다. 식 (11-1)로부터 계산된 유효우량 Q 는 SCS의 무차원 단위도법을 이용한 단위도 합성을 통하여 유출수문곡선을 생성하게 된다.

저수지의 홍수추적은 다음과 같은 저류방정식과 저수지 표고별 저류량 및 방류량 관계 자료를 이용하여, 저류지시법 (storage indication method)을 적용하고 있다 (SCS, 1972).

$$I - O = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (11-2)$$

여기서, I 는 유입량 (m^3/s), O 는 유출량 (m^3/s), Δt 는 추적시간 간격 (s)이며, ΔS 는 Δt 동안 저류량 변화 (m^3)이다.

한편, 하도구간의 홍수추적은 선형 kinematic wave 방법의 하나인,凸추적법 (convex method)을 사용하여 다음과 같은 추적 모형으로 구성된다 (SCS, 1972).

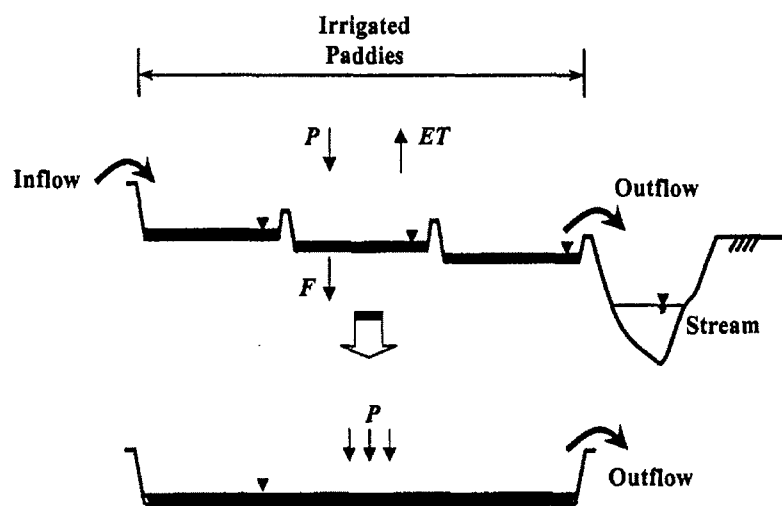
$$Q_{s,t+\Delta t} = (1 - C_s)Q_{s,t} + C_s I_{s,t} \quad (11-3)$$

여기서, $Q_{s,t+\Delta t}$ 는 $(t + \Delta t)$ 시간에서의 하류지점의 유출량 (m^3/s), $Q_{s,t}$ 는 t 시간에서의 하류지점의 유출량 (m^3/s), $I_{s,t}$ 는 t 시간에서의 상류지점으로부터의 유입량

(m^3/s)이며, C_s 는 하도 홍수추적 계수 ($0 \leq C_s \leq 1$)이다.

나. 논에서의 유출 특성을 고려한 수정 TR-20 모형

논에서의 유출량은 담수심, 관개량, 강우량, 증발산량, 침투량 등을 고려한 물수지 방정식으로부터 계산할 수 있다. 일반적으로 홍수시에는 관개를 실시하지 않으며, 증발산량, 침투량 등의 인자들의 영향이 상대적으로 미소하므로, 본 연구에서는 이러한 인자들을 생략하였다. 또한, (그림 11-1)과 같이 여러 필지로 구성된 논을 하나의 광역 필지로 단순화시켜 적용하고, 강우에 따른 담수심의 시간적 변화와 논에서의 저류효과를 고려하여 홍수유출 모형을 구성하였다.

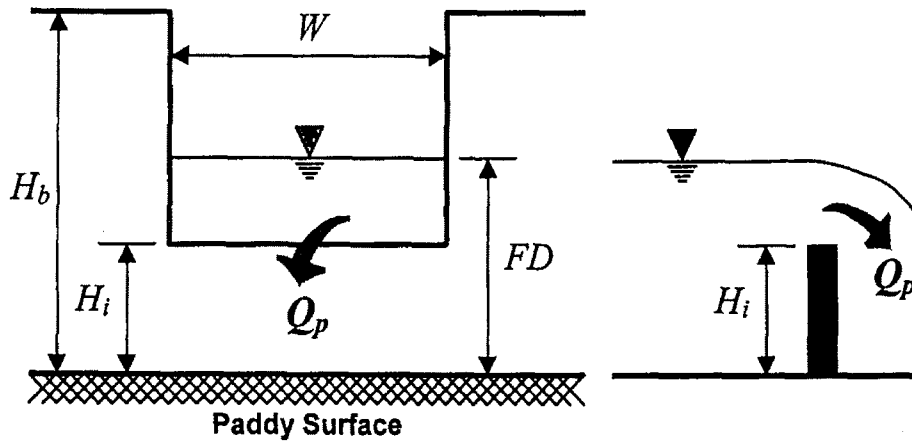


(그림 11-1) 논에서의 홍수유출 개념도

(그림 11-2)는 논에서의 유출 현상을 나타낸 것으로, H_b 는 두렁 높이를, H_i 는 물꼬 높이, FD 는 담수심을 나타낸다. (그림 11-2)에서 물꼬 높이 이하의 담수심에서는 유출이 없고 저류현상만 발생하며, 물꼬 높이 이상에서 두렁 높이까지는 폭 W 를 가지는 물꼬를 통하여 배수가 되며, 두렁 높이 이상일 때에는 전면 배수되는 것으로 모형을 구성하였다. 이 때, 물꼬를 통하여 배제되는 유출량은 다음과 같이 weir의 자유낙하 유량공식을 적용하였다 (최진규, 1997).

$$Q_p = c_p W H_p^{3/2} \quad (11-4)$$

여기서, Q_p 는 유출량 (m^3/s), c_p 는 유출부의 조건에 따라 달라지는 상수이며, W 는 물꼬의 폭 (m)을 나타내고, H_p 는 월류 수두 (m) ($= FD - H_i$)이다.



(그림 11-2) 논에서의 유출모의 개념도

즉, 다음과 같은 물수지 식을 이용하여 시간별 담수심 변화에 따른 유출을 모의하였다.

i) $FD_t < H_i$ 이면, $Q_p = 0$

ii) $H_i \leq FD_t < H_b$ 이면, $Q_p = c_p W H_p^{3/2}$

iii) $FD \geq H_b$ 이면, $Q_p = 10 \times (PA \times P_t) / \Delta t$

$$FD_t = FD_{t-1} + P_t - q_p \quad (11-5)$$

여기서, PA 는 논 면적 (ha), P_t 는 강우량 (mm), Δt 는 모의시간 간격 (s), q_p 는 단위면적당 유출고 (mm)이다.

3. 대상유역 및 자료

가. 대상유역 및 수문자료

유출곡선을 추정하기 위하여 선정한 대상유역은 경기도 화성군 팔탄면과 봉담면에 위치한 발안유역으로, 발안 및 기천저수지가 상류에 위치하고 있는 농업유역이다. 본 연구에서는 HP#6 유역 및 HP#7 유역의 강우-유출 자료를 이용하여 유출수문곡선의 추정 결과를 비교하였다.

HP#6 유역은 제3장에서 기술한 바와 같이 농업소유역으로 유역면적이 412.5ha이고, 유로장이 1,630m이며, 논이 전체 면적의 26.9%를 차지하고 있으며, 산림지가 54.8%를 이루고 있다. HP#7 유역은 상류에 저수지 유역인 HP#12과 농업소유역인 HP#13 유역이 위치하고 있으며, 하도구간의 홍수추적을 모의할 수 있는 유역으로서 전체 유역면적은 990.1ha이다. 시험유역의 계측망 모식도 및 수문학적 특성은 제3장에서와 같다.

강우량은 대상유역에 설치한 강우계의 시간별 자료를 이용하였으며, 1996~1997년의 강우사상 중에서 비교적 강우량이 많고, 유출량 자료가 있는 강우-유출 자료를 선정하였다. HP#6 유역의 강우량 자료는 <표 11-1>과 같이 10개로서 최소 33.5mm에서 최대 230.5mm의 범위를 보였으며, HP#7 유역은 <표 11-2>와 같이 6개의 강우량 자료를 선정하였다.

나. 논 특성자료

강우시 논 지역의 담수심과 물꼬 높이는 1996년의 발안유역 여러 지구에 대한 실측 자료 및 물관리 관행으로부터 추정된 평균값을 적용하였으며, 식(11-4)에서 관개지구의 물꼬 폭을 나타내는 W (m)는 유역내의 논 면적과의 관계를 이용하여 다음의 식으로부터 추정하여 적용하였다.

$$W = \alpha \cdot (PA)^\beta \quad (11-6)$$

여기서, PA 는 유역내 논 면적 (ha)이며, α 와 β 는 보정 매개변수이다.

4. 수정 TR-20 모형의 검증

강우사상별 침투유량과 침투시간, 총 유출량에 대하여 수정 TR-20 모형 및 기존 TR-20 모형에 의한 유출수문곡선의 추정 결과와 실측치를 비교하였다. <표 11-1>은 HP#6 유역의 10개 강우-유출사상에 대한 유출량, 침투유량, 침투시간 등을 비교한 것으로, 수정 TR-20 모형과 기존의 TR-20 모형으로부터 추정한 결과를 함께 나타내어 실측치와 비교하였다.

모형의 적합성 여부는 실측치와 추정치의 침투유량, 침투시간, 총 유출량의 RMSE (root mean square error), R^2 를 산정하여 검토하였다. 추정된 침투유량의 RMSE와 R^2 는 각각 $2.955\text{m}^3/\text{s}$, 0.995로 나타났으며, 이는 기존 모형에 의한 $5.374\text{m}^3/\text{s}$, 0.979의 결과보다 좋은 추정 결과를 보였다. 침투시간의 경우에도 RMSE와 R^2 가 각각 0.4hr, 0.995로서, 기존 모형에 의한 2.2hr, 0.735 보다 좋은 결과를 보였다. 또한, 유출량에 대한 실측치와 추정치의 RMSE는 120.76천 m^3 이었으며, R^2 는 0.936이었다.

<표 11-1> 유출수문곡선의 실측치와 모의치 비교 결과 (HP#6)

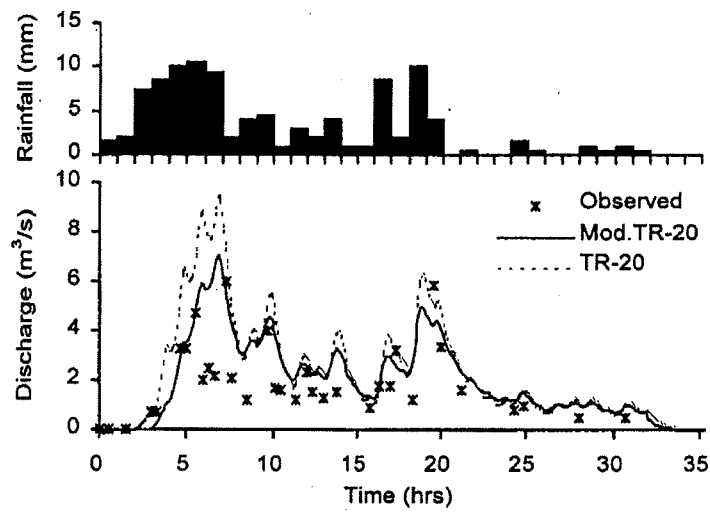
Date	Rainfall (mm)	Peak flow (m^3/s)			Time to peak (h)			Runoff volume (10^3m^3)		
		Obs.	Sim.	TR-20	Obs.	Sim.	TR-20	Obs.	Sim.	TR-20
7/04/96	53.5	6.759	5.299	4.746	7.8	8.0	7.9	87.98	71.77	57.16
7/21/96	46.5	3.984	3.677	1.025	14.0	14.0	13.9	32.01	29.83	6.91
7/27/96	33.5	5.039	3.301	0.812	4.0	4.0	3.9	26.32	26.74	4.09
5/07/97	63.5	3.843	3.317	1.469	7.3	7.0	6.9	56.45	56.81	25.59
5/12/97	102.0	5.977	7.063	9.466	7.3	6.8	6.8	191.85	249.01	297.57
6/25/97	99.5	21.584	20.367	19.381	10.0	9.8	9.8	191.77	230.25	190.98
6/30/97	139.0	45.990	46.011	46.717	12.0	11.9	11.8	524.02	563.90	505.70
7/04/97	50.5	6.125	7.622	7.913	13.5	12.9	12.8	111.89	111.27	106.77
7/15/97	42.5	3.830	1.469	0.632	6.2	6.0	10.9	53.40	24.66	8.14
8/03/97	230.5	70.623	65.365	61.842	11.0	10.9	10.8	1015.82	759.94	652.30
RMSE			2.955	5.374		0.4	2.2		120.76	172.49
R^2			0.995	0.979		0.995	0.735		0.936	0.889

HP#7 유역의 모형 검증 결과는 <표 11-2>에 나타나 있다. <표 11-2>에서와 같이 수정 모형의 경우, 첨두유량에 대한 RMSE는 $1.18\text{m}^3/\text{s}$ 로 나타났으며, 첨두시간의 RMSE는 0.2hr이었다. 이는 기존 TR-20 모형에 의한 추정 결과인 $3.719\text{m}^3/\text{s}$ 와 0.4hr와 비교하여, 본 연구의 결과가 실측치와 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 또한, 총 유출량과 추정 유출량의 R^2 는 0.941로 나타났으며, 기존 모형에 의한 유출량의 R^2 는 0.889이었다.

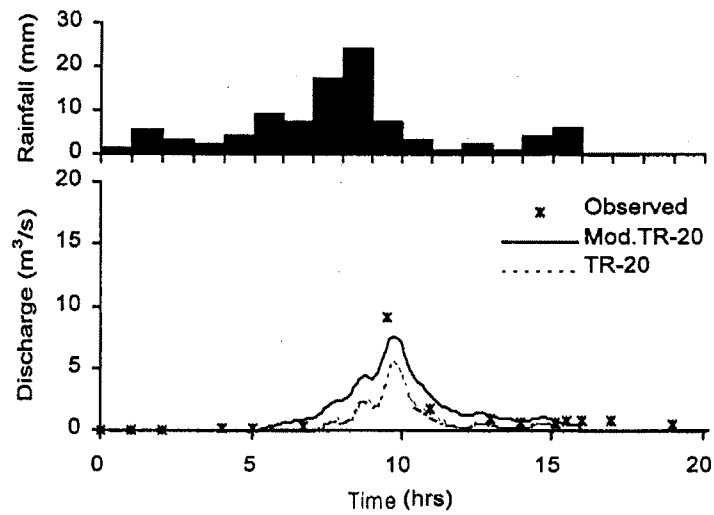
<표 11-2> 유출수문곡선의 실측치와 모의치 비교 결과 (HP#7)

Date	Rainfall (mm)	Peak flow (m^3/s)			Time to peak (h)			Runoff volume (10^3m^3)		
		Obs.	Sim.	TR-20	Obs.	Sim.	TR-20	Obs.	Sim.	TR-20
7/04/96	53.5	3.587	2.724	2.621	7.5	7.8	7.7	124.96	37.22	26.46
7/15/96	39.0	1.277	1.213	0.097	6.7	6.7	6.7	30.28	14.37	0.48
7/21/96	46.5	1.908	2.447	0.343	14.3	14.0	13.7	46.22	19.03	2.13
7/27/96	33.5	1.900	2.223	0.284	4.0	4.0	3.7	107.16	17.34	1.11
6/25/97	99.5	9.200	7.579	5.364	9.5	9.8	9.7	118.78	82.71	37.41
6/30/97	139.0	18.320	20.106	25.179	12.0	11.8	11.7	547.43	230.12	538.93
RMSE			1.180	3.719		0.2	0.4		154.11	78.07
R^2			0.976	0.885		0.995	0.993		0.941	0.889

(그림 11-3)은 발안유역의 추정 및 실측 유출수문곡선들을 그래프로 나타내어 비교한 것이다. (그림 11-3)의 (a)는 HP#6 유역의 유출수문곡선의 실측치와 모의치를 비교한 것이며, (그림 11-3)의 (b)는 HP#7 유역에 대한 추정 결과와 실측자료를 비교한 것을 보여주고 있다.



(a) HP#6, 97/5/12



(b) HP#7, 97/06/25

(그림 11-3) 홍수유출 수문곡선의 실측치와 모의치의 비교

5. 경작상태에 따른 유출 변화

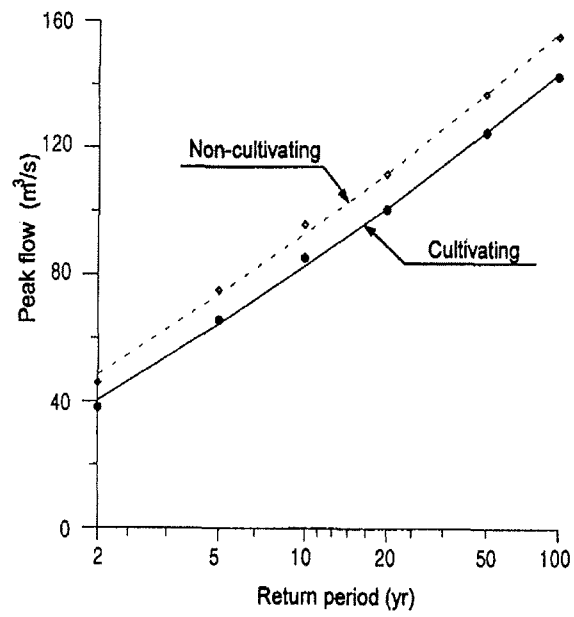
논벼의 경작상태에 따른 유출 변화를 알아보기 위하여, 경작지구와 비경작지구의 두 조건에 대하여, 수정 TR-20 모형을 적용하여 재현기간별 확률강우량에 따른 침투유량을 추정하였다. 강우량은 수원기상대의 확률강우량 자료 (건설부, 1988)를 이용하였으며, SCS의 24시간 강우분포형 (SCS, 1972)을 이용하여 시간별 강우량을 모의하였다.

각 경우에 대한 조건은 早瀬吉雄 (1994)의 연구에서와 같이, 경작지구의 경우는 배수가 되는 물꼬 높이를 60mm, 두렁의 높이는 300mm로 하였으며, 비경작지구에 대해서는 두렁의 붕괴로 인하여 두렁 높이 50mm, 물꼬 높이 10mm로 설정하였다. 이 때의 담수심은 각각 40mm와 0mm로 가정하였다.

<표 11-3>은 강우분포형 II와 IA에 대하여 확률강우량별 침투유량을 나타낸 것으로, 비경작지구에 대한 경작지구의 침투유량을 계산한 결과, 강우분포형-II에서는 $0.83 \sim 0.92 \text{ m}^3/\text{s}$, IA에서는 $0.89 \sim 0.99 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 값을 보였다. (그림 11-4)는 강우분포형-II에 대한 재현기간별 침투유량의 변화를 그림으로 표시한 것이다.

<표 11-3> 확률강우량과 경작상태에 따른 침투유량의 변화

Return period (year)	Rainfall (mm)	Peak flow (m^3/s)					
		SCS Rainfall type-II			SCS Rainfall type-IA		
		Culti-vating(a)	Non-Cultiv.(b)	(a/b)	Culti-vating(a)	Non-cultiv.(b)	(a/b)
2	140	38.146	45.947	0.83	13.175	13.532	0.97
5	205	65.680	75.164	0.87	23.812	23.976	0.99
10	250	85.201	95.688	0.89	31.351	35.066	0.89
50	340	124.788	136.857	0.91	46.618	51.029	0.91
100	380	142.486	155.132	0.92	53.438	58.137	0.92



(그림 11-4) 토지이용에 따른 침투유량의 변화 (Type II)

제 3 절 저수지군에서의 일유출해석

1. 개론

관개지역에서의 유출 순환과정은 인위적인 급수로 인해 자연상태와 다르다. 저수지는 상류로부터 유입되는 유량을 저류하고, 인위적으로 방류함으로써 하류하천의 유량에 영향을 미친다. 또한, 관개용수의 급수 중 발생하는 도수 손실량이나 물리구역의 배수량 등 회귀수량으로 인하여 하천유황이 변하기도 한다. 특히, 2개 이상의 저수지가 위치한 경우는 하천유황이 더욱 복잡하므로, 각 저수지의 저류량의 추정과 하천 유황의 예측 등이 물관리 방식에 따라 좌우되기도 한다.

그러나 지금까지의 대부분의 중소 유역의 하천 유출량 추정에서는 유역내의 농업용 저수지의 영향을 무시하거나, 혹은 충분히 고려하지 않은 경우가 많았다. 또한, 동일 관개구역내에 여러개의 저수지가 직렬과 병렬 형태의 관개시스템을 구성하여 용수를 공급하고 있으나, 이들 저수지군의 용수공급체계는 전체 수자원 시스템을 하나의 관리방식에 의한 종합화가 되지 않고, 단일 저수지 조작방식이 적용되고 있다.

관개용수를 공급하는 저수지는 필요한 시기에 필요한 수량을 공급할 수 있어야 하며, 이를 위해서는 저수지로 유입하는 수량과 유출하는 수량이 시간이 경과함에 따라 어떻게 변화할 것인가를 추정 또는 예측할 수 있어야 한다. 이와 함께 저수지의 유입·유출 수량에 따라 저수지 수위나 저수량의 변화를 정확하게 추적할 필요가 있다.

총괄형 모형 (lumped-system model)의 하나인 SSARR (Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation)모형은 Rockwood (1958)에 의해 유출해석과 홍수예보, 저수지의 설계 및 조절을 목적으로 개발되었다. 이 모형은 토양수분지수 (Soil Moisture Index)를 이용하여 유역의 토양수분의 변화를 추적하며, 유역추적모형, 하도 및 저수지 조작모형으로 구성된다.

SSARR 모형은 Rockwood에 의해 미국의 콜롬비아강 (1961), 베트남의 메콩강 (1968) 등과 같은 대하천에 적용된 적이 있으며, Brendecke (1985)에 의해 고산지 소유역에 적용된 바 있다. 국내의 경우, 강 (1986)이 한강유역에, 안 등 (1989)이 금강수계내 보청천에, 강 등 (1997)이 낙동강 저수유출해석 등에 적용한 바 있다.

본 절에서는 시설의 관개용 저수지군 최적 모의조작을 위한 기초적 연구로서, 관개용 저수지군을 포함하는 농업용 소유역의 일유출량 추정에 대한 SSARR 모형의 적용성을 평가하고 그 결과를 고찰하도록 한다.

2. 모형의 구성

가. 모형의 기본 이론

SSARR 모형의 유역모형과 하도모형에서 채택하고 있는 기본적인 추적방법은 Nash모형과 유사한 'cascade of reservoir' 방법으로서, 홍수파가 연속적인 일련의 저수지를 통과함으로써 평행이동 및 지체효과를 갖게 되는 방법이다.

각 저수지의 추적에는 연속방정식과 저류방정식을 이용하며, 이를 식으로 나타내면 식 (11-7), (11-8)와 같다.

$$\left[\frac{(I_1 + I_2)}{2} - \frac{(O_1 + O_2)}{2} \right] \Delta t = S_2 - S_1 \quad (11-7)$$

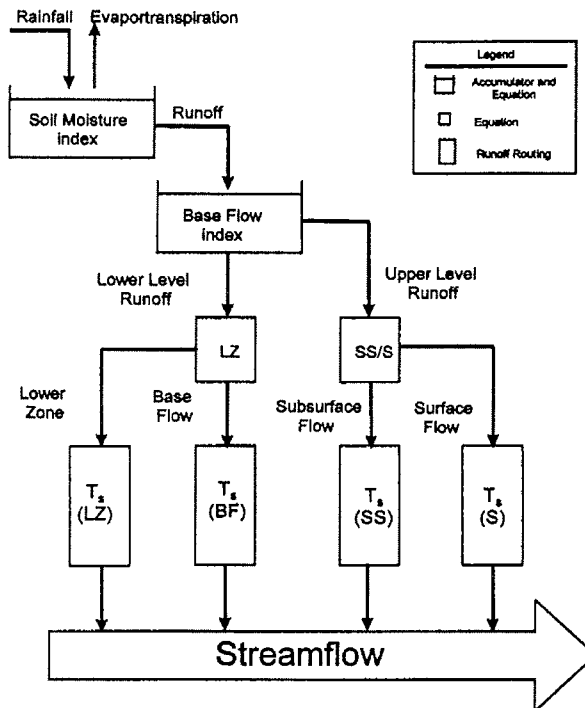
$$O_2 = O_1 + \frac{(I_m - O_1)}{T_s + 0.5\Delta t} \Delta t \quad (11-8)$$

여기서, I는 유입량, O는 유출량, S는 저류량이며, 하첨자 1, 2는 각각 계산시간의 시작점과 끝점이고, I_m 은 평균유입량, T_s 는 저류시간, Δt 는 시간간격이다.

SSARR 모형의 유역모형은 유역으로부터의 유출을 합성하기 위해 수문순환과정을 구성하는 각각의 성분과정을 모식화하고, 이를 강우-유출관계 모형으로 발전시킨 것이다. 모형에서 고려된 성분과정간의 관계와 지표들을 모식화하면 (그림 11-5)에서와 같다.

나. 모형의 매개변수

SSARR 모형의 매개변수를 물리적 매개변수 (physical parameter), 수문기상학적 매개변수 (hydrometeorological parameter), 내부처리 매개변수 (process parameter)로 구분하면 <표 11-4>와 같다.



(그림 11-5) SSARR 모형에서의 토양수분과 유출량 산정 모식도

<표 11-4> SSARR 모형에서의 매개변수 정의

Variables		Parameters
Physical parameter	Watershed area, Weighting factor, Elevation vs. percent area, Reservoir regulation data	
Hydrometeorological parameter	Precipitation data, Elevation vs. weighted precipitation, Rainfall intensity vs. percent of effectiveness of ETI(evapotranspiration index), Temperature vs. percent of effectiveness of ETI, Soil moisture index vs. percent of effectiveness of ETI, Month number vs. percent of effectiveness of ETI, Maximum precipitation interception, Temperature data	
Process parameter	Soil moisture index(SMI) vs. runoff percentage(ROP), Baseflow infiltration index(BII) vs. baseflow percentage(BFP), Total input rate to surface & subsurface components(RGS) vs. surface input rate(RS), Maximum value for BII(BIIMX), Baseflow input limit(BIILIM), Percent of baseflow input to lower-zone(PBLZ), Lower-zone input limit(PGWLIM), Time of storage for the watershed(T _s), Number of increments for the watershed routing(Phase No.)	

3. 모형의 적용

가. 대상유역 및 수문자료

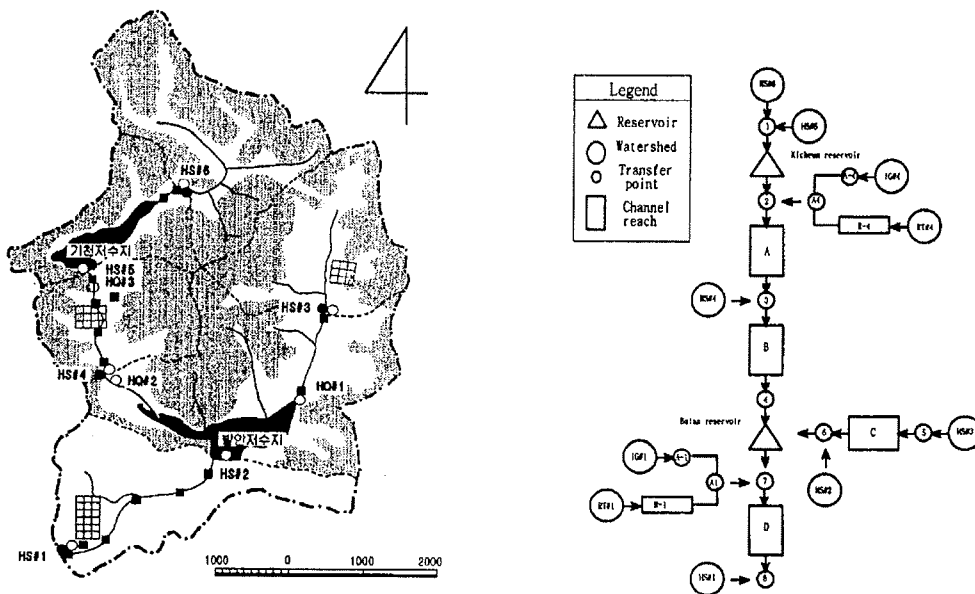
SSARR 모형의 적용성을 분석하기 위한 대상유역은 1996년부터 서울대학교 농공학과에서 시험유역으로 선정하여 수문관측을 시행하고 있는 경기도 화성군 팔탄면과 봉담면에 위치한 발안유역으로 하였다.

발안유역의 수문계측지점의 위치 및 특성은 제3장에서 서술한 바와 같고, 유역내의 발안, 기천저수지의 수위 및 방류량은 수화농조의 자료를 이용하였다.

단지, 제3장에 서술한 수문계측망의 측정명은 계속 연구 수행중에 계측지점이 추가되면서 제1, 2차년도와 측정명과 다르므로 (그림 11-6)을 참조하기 바란다.

나. 시스템의 구성

SSARR 모형을 적용하기 위하여 유역의 지형특성, 하도특성을 고려하여 (그림 11-6)과 같이 유역을 6개의 소유역과 4개의 하도구간으로 분할하고, 2개의 저수지로 시스템을 구성하였다. 발안저수지와 기천저수지의 관개량 취수를 위해 가상의 유역을 이용하였으며, 취수량 중 회귀수량의 유출을 모의하기 위해 가상의 하도구간을 시스템에 추가하였다.



(그림 11-6) 시험유역의 시스템 구성 모식도

다. 모형의 보정

1) 매개변수 결정

SSARR 모형의 매개변수 최적화를 위하여 1996년의 유출량 자료를 이용하여 실측치와 추정치의 잔차의 평방제곱근을 최소로 하는 매개변수를 구하였다.

2) 보정결과

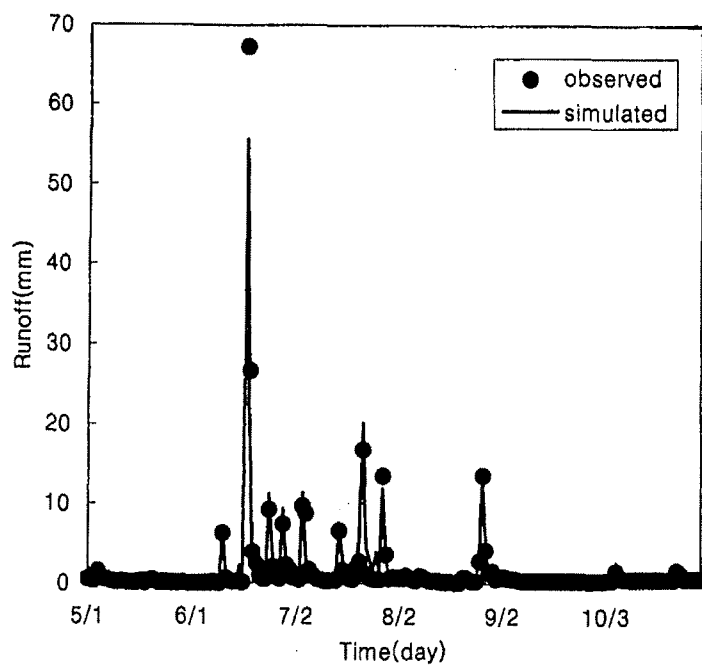
SSARR 모형의 보정 매개변수를 이용하여 소유역의 1996년 일 유출량과 저수지의 수위를 추정하고, 그 결과를 보정기간동안 일별 실측치와 비교하였다. <표 11-5>는 소유역의 실측치와 추정치간의 상관관계와 RMSE를 보정 총기간과 청명일, 강우일로 구분하여 분석한 결과이며, <표 11-6>은 저수지의 일별수위에 대한 실측치와 추정치간의 상관관계와 RMSE를 분석한 결과이다. (그림 11-7)과 (그림 11-8)은 각각 HS#3과 기천저수지의 일별 실측치와 추정치를 도식적으로 비교한 결과이다.

<표 11-5> 유출량에 대한 모형의 적용 결과

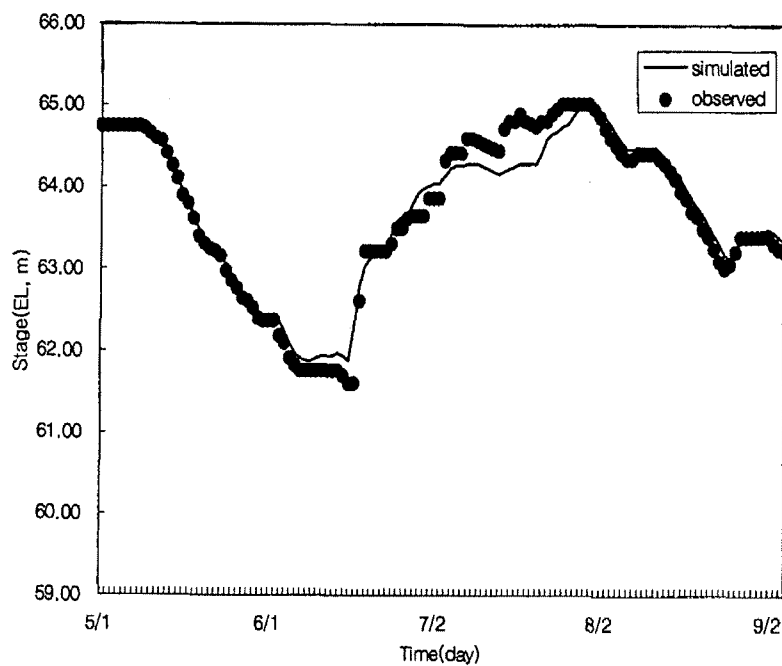
Watershed	Calibration period (1996)	Total runoff				Runoff of clear days		Runoff of rainy days	
		Obs. (mm)	Cal. (mm)	RMSE (mm)	R ²	RMSE (mm)	R ²	RMSE (mm)	R ²
HS#1	5/1 - 10/30	333.9	314.9	1.9	0.67	1.2	0.51	2.7	0.69
HS#3	5/1 - 10/30	294.2	307.4	1.3	0.96	0.5	0.77	2.3	0.97
HS#4	5/1 - 10/30	512.1	487.4	3.8	0.65	1.5	0.42	3.5	0.65

<표 11-6> 저수위에 대한 모형의 적용 결과

Reservoir	Calibration period (1996)	RMSE (m)	R ²
Kicheon reservoir	5/1 - 9/5	0.20	0.97
Balan reservoir	5/1 - 9/5	0.29	0.91



(그림 11-7) 유출량의 모의치와 실측치의 비교 (HP#3)



(그림 11-8) 기천저수위 모의치와 실측치의 비교

4. 모형의 검정

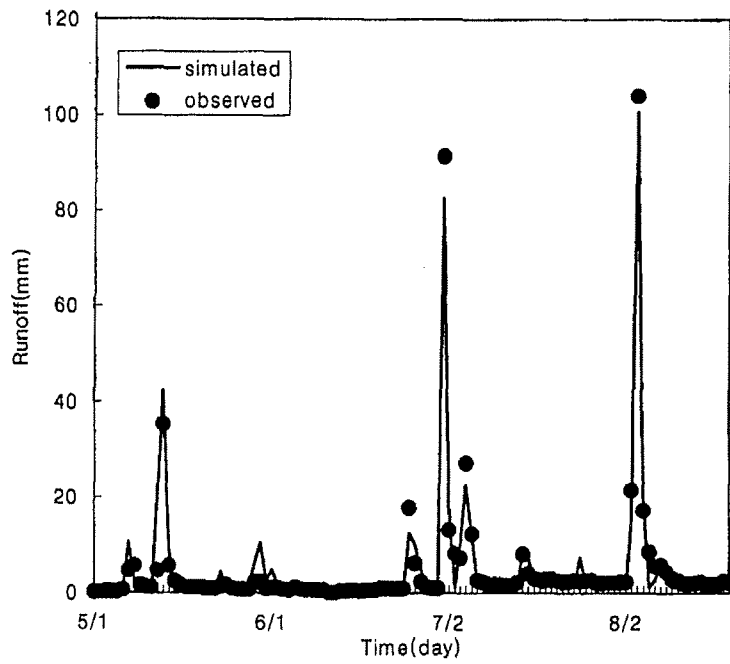
SSARR 모형의 검정을 위하여 보정을 통하여 결정된 매개변수의 값을 이용하여 1997년의 일 유출량과 저수지 수위를 추정하였고, 실측치와 비교하였다. <표 11-7>은 소유역의 일 유출량의 실측치와 추정치간의 상관관계와 RMSE를 검정 총 기간과 청명일, 강우일로 구분하여 분석한 결과이며, <표 11-8>은 저수지의 일별 수위에 대한 실측치와 추정치간의 상관관계와 RMSE를 분석한 결과이다. (그림 11-9)와 (그림 11-10)은 각각 HS#3과 기천저수지의 일별 실측치와 추정치를 도식적으로 비교한 결과이다.

<표 11-7> 일 유출량의 실측치와 모의치의 비교 결과

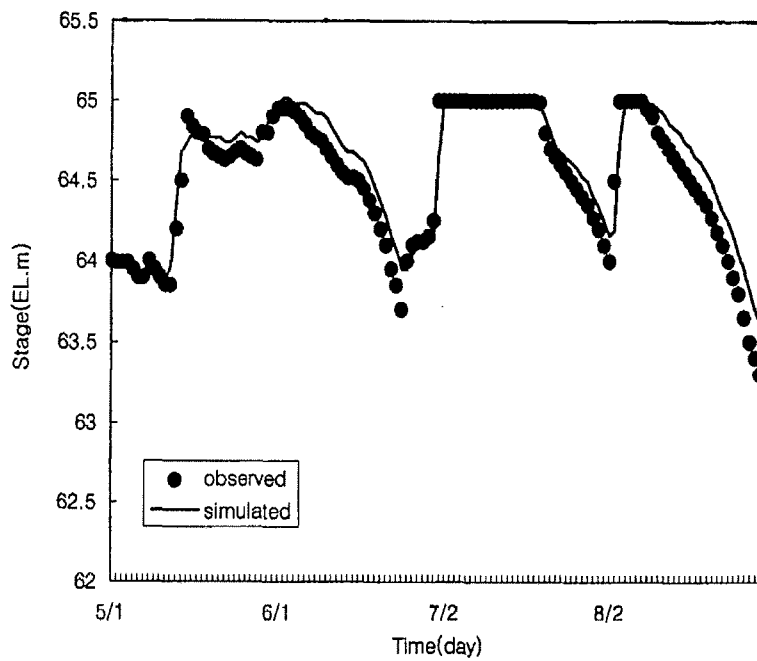
Watershed	Verification period (1997)	Total runoff				Runoff of clear days		Runoff of rainy days	
		Obs. (mm)	Sim. (mm)	RMSE (mm)	R ²	RMSE (mm)	R ²	RMSE (mm)	R ²
HS#1	5/1 - 8/20	1195.2	1308.9	8.4	0.82	1.6	0.98	11.1	0.76
HS#3	5/1 - 8/20	294.2	307.4	6.5	0.96	1.3	0.77	4.15	0.96

<표 11-8> 저수위의 실측치와 모의치의 비교 결과

Reservoir	Verification period (1997)	RMSE (m)	R ²
Kicheon resevoir	5/1 - 8/20	0.22	0.94
Balan reservoir	5/1 - 8/20	0.22	0.88



(그림 11-9) 일 유출량의 실측치와 모의치 비교 (HS#3)



(그림 11-10) 기천 저수위의 실측치와 모의치의 비교

제 4 절 수정 TANK 모형의 개발 및 응용

1. 개론

최근 많은 강우-유출 모형의 개발로 유역의 수문학적 기작을 수식화함으로써 수문사상을 보다 사실에 가깝게 모의하여 하천유황을 신속하고 정확하게 예측할 수 있는 기능이 증대되고 있다. 이들 강우-유출 모형은 적용하는 목적이나, 모형의 정확도, 적용하고자 하는 유역 조건에 맞는 모형을 선택해야 하는 어려움이 있으며, 또한 선택된 모형은 수문, 기상 및 유역의 지형적 특성을 고려한 보정이 필요하다.

모형의 보정 방법에는 시행착오에 의한 수동보정 (manual calibration)과 최적화 기법에 의한 자동보정 (automatic calibration)이 있다. 수동보정 방법은 모형의 관측치와 모의치를 비교하면서 모형 및 유역의 특성을 완전히 이해하고 모형 보정에 숙련된 감각을 갖춘 수문기술자에 의해 매개변수를 조정하는 방법이며, 자동 보정 방법은 최적화 기법을 이용하여 특정한 목적함수를 최대, 최소화하여 모형의 매개변수를 결정하는 방법이다. 대부분의 수문모형의 보정에서는 이들 두 방법을 병용하여 실시하고 있다.

자동보정방법은 매개변수의 국부해 (local optimum)을 찾는 국부 탐색법 (local search method)과 여러 개의 국부해 중에서 한 개의 전체 최적해 (global optimum)을 찾는 전체 탐색법 (global search method)으로 구별할 수 있으며, 국부 탐색법은 비선형성을 포함하고 있는 강우-유출 모형에 적용할 경우에는 여러개의 국부해가 존재하므로 만족할 만한 결과를 얻지 못한다.

전체 탐색법 중 하나인 SCE-UA법은 개념적 수문모형의 매개변수 보정시 발생하는 문제인 ① 한 개의 수렴영역보다 많은 수의 영역 존재, ② 각각의 영역에 존재하는 다수의 국부 최적치의 존재, ③ 불연속적인 도함수를 갖는 거친 반응표면의 존재, ④ 목적함수에 대한 민감도가 낮은 매개변수의 존재, ⑤ Non-convex 표면의 존재 등의 문제를 해결하기 위해 제안되었다.

SCE-UA법은 Duan 등 (1992)에 의해 SIXPAR 모형에 ARS법, multi-start simplex법과 같이 적용하여 비교된 바 있으며, Sorooshian 등 (1993)은 SAC-SMA 모형의 매개변수 보정에 SCE-UA법과 multi-start simplex법을 적용하여 SCE-UA

법이 더 효율적으로 전체 최적해 (global optimum)을 탐색한다고 언급하였다. 또한, Thian 등 (1996)은 SMA모형, NAM모형, Xinanjiang 모형, SMAR모형의 매개변수 보정시 SCE-UA법, multi-start simplex법, local simplex법을 적용하여 상호비교한 결과, SCE-UA법이 효율적이며, 다른 방법들 보다 적은 실행횟수로 매개변수의 최적값을 탐색하였다.

따라서, 본 절에서는 전체탐색법인 SCE-UA법을 개념적 수문모형인 수정 Tank 모형의 자동보정에 적용하였으며, 합성자료 (synthetic data)를 이용하여 전체 최적해 탐색 여부를 파악하는 최적화 모형의 검증을 실시하였으며, 실제 유출량 자료를 이용하여 모형을 보정 및 검증하였다.

2. 최적화 모형

가. SCE-UA법

SCE-UA법은 Duan 등 (1992)에 의해 제안되었으며, Nelder와 Mead (1965)의 simplex법, controlled random search법 (Price, 1987), 경쟁적 진화 (Holland, 1975) 등의 기존 탐색기법의 장점에 집합체의 혼합 (complex shuffling)이라는 새로운 개념을 도입한 혼합형의 전체 탐색법이다.

SCE-UA법은 자연진화의 과정을 최적해 탐색과정에 도입한 것으로, s 개의 선정된 점을 하나의 모집단으로 (population)으로 구성하며, 이 모집단은 몇 개의 집합체로 나뉘어지고 이들 각각은 독립적으로 각기 다른 방향으로 각각의 탐색공간을 찾아서 진화하게 된다. 진화를 한 몇 세대 후에는 이들 집합체들은 혼합되어 재분할과정을 거쳐 재형성된다. 이 과정을 통하여 각각의 집합체에서 독립적으로 얻은 탐색공간에 대한 정보를 공유함으로써 부모세대의 생존가능성을 높이게 된다.

진화과정의 경쟁성을 보장하기 위하여 양호한 부모세대가 불량한 부모세대 보다 자손세대의 생성에 기여할 확률을 높이기 위해서 삼각형 확률분포를 이용하며, Nelder와 Mead (1965)의 simplex법을 부집합체에 적용하여 진화가 발전된 방향으로 진행되도록 하였으며, 가능해 공간의 탐색 중에 예상치 않은 영역에서 진화가 멈추지 않게 하기 위해서 자손의 개념이 도입되었다. 이것은 자연의 생물학적 진화에서

일어나는 스트레스에 대한 반응인 돌연변이와 유사하다. 각각의 돌연변이는 모집단에 저장된 정보량을 증가시키게 된다. 각각의 새로운 자손은 각각의 부모세대가 바뀌거나 소멸되기 전에 재생산에 기여할 최소한의 기회를 주기 위해 부집합체에 존재하는 불량한 점들을 바꾼다.

SCE-UA법의 경쟁적 진화와 집합체의 혼합은 모집단에 포함된 정보가 효과적이고 완벽하게 전달되도록 하며, 정보가 퇴보하는 것을 방지한다. 이러한 특징은 SCE-UA법이 광범위한 범위에서 전체 최적해를 탐색할 수 있게 하며, 수렴조건이 주어지면 전체 최적해를 찾을 확률을 높인다.

나. 목적함수

강우-유출모형의 매개변수 추정을 위한 일반적인 목적함수는 식 (11-9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(E) = f[Q^T - R(I, \Theta)] \quad (11-9)$$

여기서, Q^T 는 실측치를 나타내는 벡터이며, R은 모형에 의한 모의치를 나타내며, I와 Θ 는 모형의 입력변수와 매개변수를 나타낸다.

식 (11-9)에서 오차의 기준 E와 함수 f는 여러 가지 방법으로 나타낼 수 있으며, 본 연구에서는 SSR (sum of square of residual)을 고려하였다.

SSR은 모형의 매개변수의 최적화를 위한 목적함수 중, 관측치와 모의치에 대한 편차의 제곱의 합을 최소로 하는 목적함수이며 식 (11-10)과 같다.

$$\text{Min SSR} = \sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2 \quad (11-10)$$

여기서, Q_{oi} 는 시간 i에서 실측 유량, Q_{si} 는 모의 유량을 나타내고, n은 자료수이다.

3. 유출모형의 적용

가. 수정 Tank 모형

수정 Tank 모형 (박, 1993)은 Sugawara (1978)의 Tank 모형을 기초로하여 우

리 나라의 소유역 유출특성에 맞도록 매개변수를 보정하고, 모형의 증발산 성분
유역증발산량 추정방법을 도입하여 장기유출해석의 정확도를 향상시키기 위한 모형
이다.

수정 Tank 모형은 (그림 11-11)과 같이 3단 tank와 4개의 유출공을 갖는 것으로
하며, 각 tank의 저류량(S)은 식 (11-11)과 같이 나타낼 수 있다.

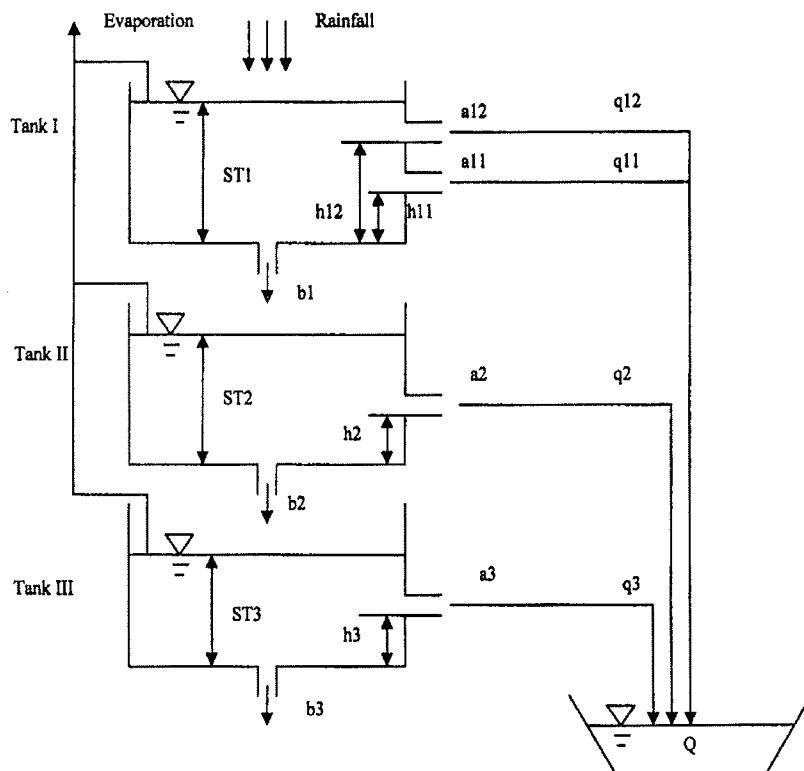
$$S_t = S_{t-1} + U_t - q_t - E_t - D_t \quad (11-11)$$

여기서, S는 tank의 저류량, U는 강우량, q는 유출량, E는 증발산량, D는 배수량
을 나타내며, 하첨자 t와 t-1은 계산일과 계산 전일을 나타낸다.

(그림 11-11)과 같이 유역의 유출량은 식 (11-12)와 같다.

$$Q_t = q_{11} + q_{12} + q_2 + q_3 \quad (11-12)$$

여기서, Q_t 는 t일의 일 유출량, q_{11} 과 q_{12} 는 상단 tank의 상부, 하부 유출공으로부
터의 유출량 성분, q_2 는 중간 tank의 유출량 성분, q_3 는 하단 tank의 유출량 성분을
나타내며, 각 유출공의 유출량은 선형으로 가정한다.



(그림 11-11) Tank 모형 모식도

나. 합성보정(synthetic calibration)

SCE-UA법의 전체 최적해 탐색 유무를 확인하고, 최적해 탐색에 대한 효율을 평가하기 위하여 오차가 없는 합성자료(synthetic data)를 이용하여 모형을 보정하였다.

산정 매개변수의 정확도를 측정하는 값으로 식 (11-13)과 같은 BRM(average relative bias)를 사용하여 나타내었다.

$$BRM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\theta_i - \theta_i^*|}{\theta_i^*} \quad (11-13)$$

여기서, n은 보정한 매개변수의 수, θ_i 는 매개변수의 추정치, θ_i^* 는 매개변수의 참값을 나타낸다.

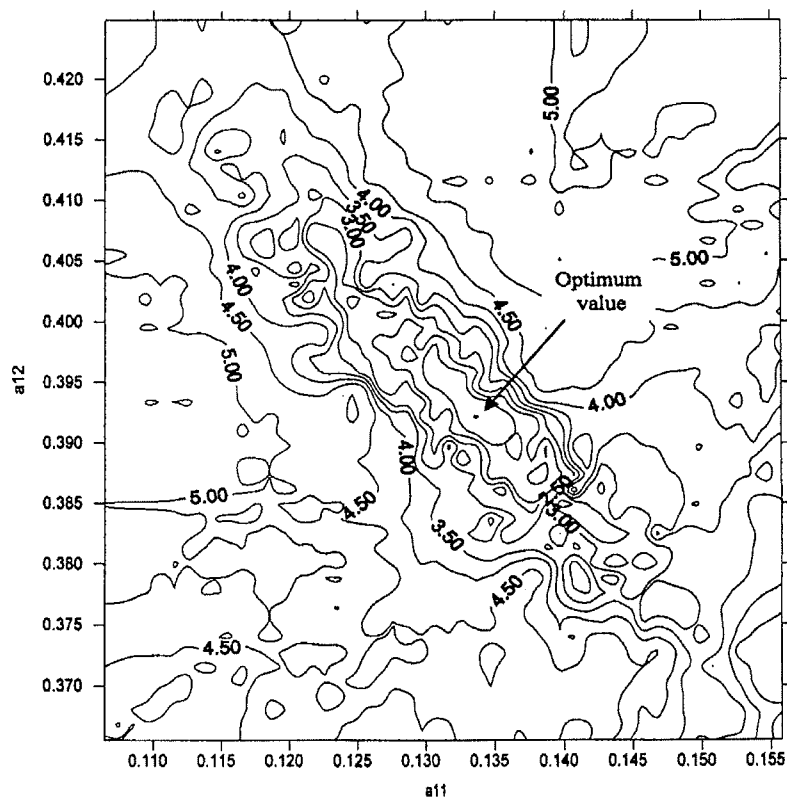
<표 11-9>는 합성자료를 모의발생한 매개변수와 매개변수 최적화에 사용된 초기값과 추정된 매개변수를 나타내고 있다. 매개변수 초기값의 BRM은 0.802이었으며,

<표 11-9> 합성 보정 결과

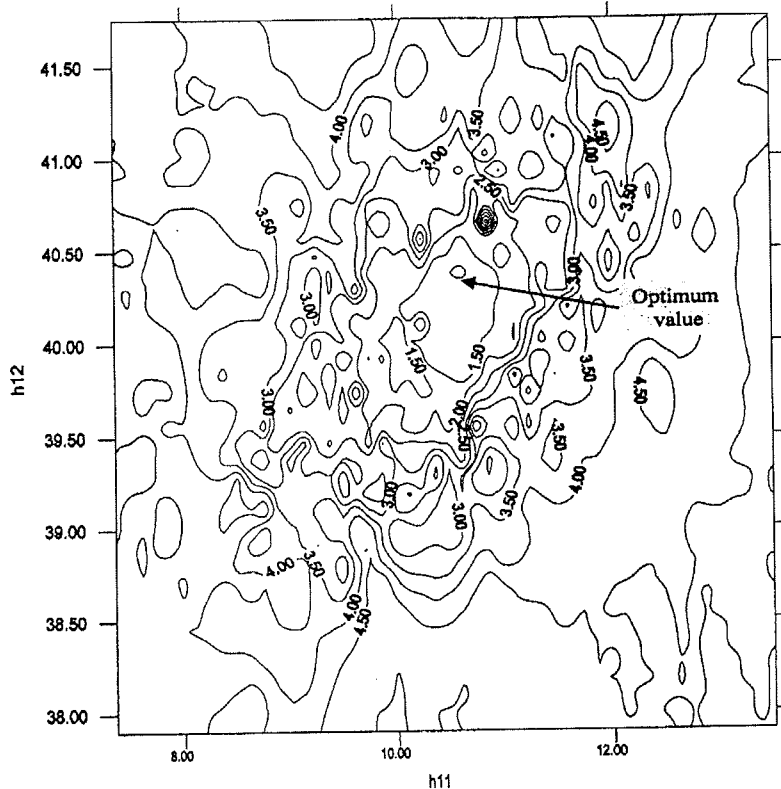
매개변수	초기값	추정치	참값
a ₁₁	0.113	0.134	0.135
a ₁₂	0.029	0.392	0.390
a ₂	0.062	0.094	0.100
a ₃	0.002	0.005	0.005
b ₁	0.427	0.139	0.143
b ₂	0.067	0.024	0.032
b ₃	0.015	0.250	0.210
h ₁₁	5.841	10.639	10.803
h ₁₂	10.000	40.160	40.320
h ₂	10.000	41.398	40.000
RMSE(mm)	3.313	0.073	0.000
BRM	0.802	0.058	0.000

SCE-UA법을 이용하여 추정된 매개변수의 BRM은 0.058이었으며, 추정된 매개변수에 의한 RMSE는 0.073mm이었다. 이처럼 실제 매개변수와 추정된 매개변수가 차이를 보이는 것은 모형의 구조 때문에 각 매개변수의 민감도에 차이가 있기 때문이다.

(그림 11-12)는 합성자료에 의한 추정된 매개변수의 탐색기간 동안 a_{11} 과 a_{12} 의 변화에 따른 목적함수 값을 나타낸 것이며, (그림 11-13)은 h_{11} 과 h_{12} 의 변화에 따른 목적함수 값을 도시한 것이다. 그림에서와 같이, 전체 최적해 이외에 많은 국부해가 존재하는 것을 알 수 있으며, 모형의 매개변수 중, a_{11} 과 a_{12} 이 민감한 매개변수이므로, 전체 최적해의 범위가 h_{11} 과 h_{12} 의 것보다 적게 나타나고 있음을 알 수 있다.



(그림 11-12) 합성 보정시 매개변수 변화에 따른 SSR 등고선도 ($a_{11} : a_{12}$)



(그림 11-13) 합성 보정시 매개변수 변화에 따른 SSR 등고선도 (h_{11} : h_{12})

4. 모형의 보정 및 검정

가. 대상유역 및 수문자료

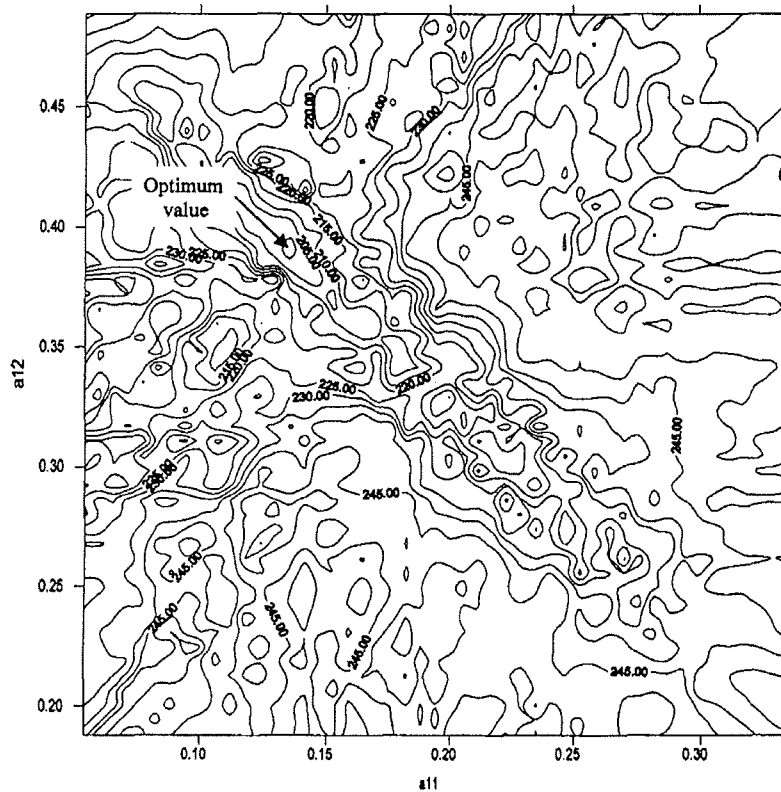
모형의 적용을 위한 대상유역은 1996년부터 서울대학교 농공학과에서 시험유역으로 선정하여 수문관측을 시행하고 있는 경기도 화성군 팔탄면과 봉담면에 위치한 발안유역으로 하였다. 시험유역과 기상자료는 제3장에서 기술한 바와 같고, HS#3 유역의 일 유출량 자료를 이용하여 수정 Tank 모형의 매개변수 최적화를 실시하였다.

나. 모형의 보정 및 검정

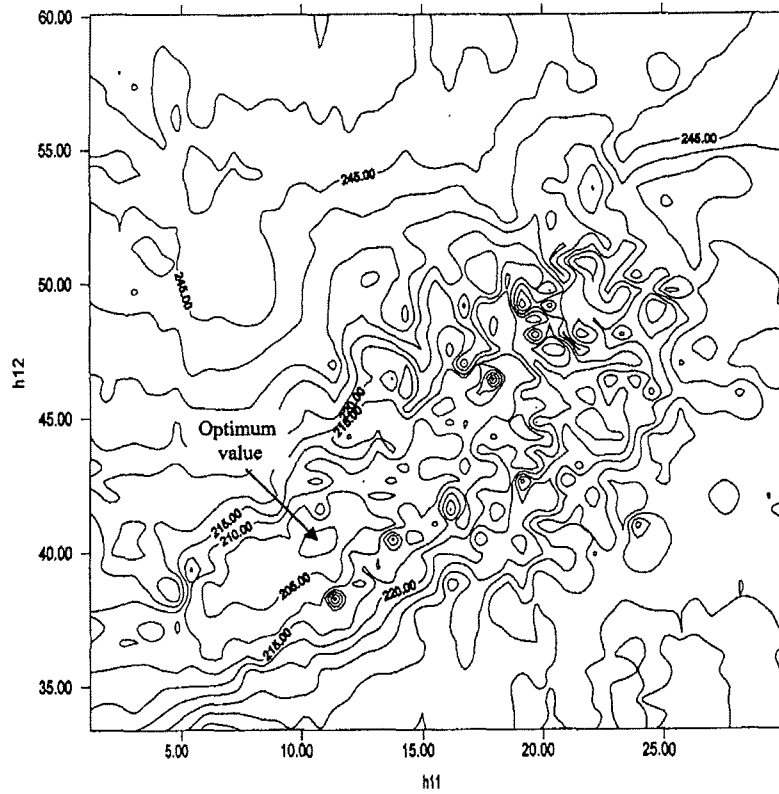
수정 Tank 모형의 매개변수 최적화를 위한 초기값은 박(1993)에 의해 제안된 매개변수와 지상인자와의 관계를 이용하였으며, 매개변수의 보정을 위한 일 유출량

(그림 11-14)는 보정기간 동안의 일 유출량 자료 대한 추정된 매개변수에 대한 탐색기간 동안 a_{11} 과 a_{12} 의 변화에 따른 목적함수 값을 나타낸 것이며, (그림 11-15)는 h_{11} 과 h_{12} 의 변화에 따른 목적함수 값을 도시한 것이다. 상기 그림에서와 같이 전체 최적해 이외에 많은 국부해가 존재하는 것을 알 수 있으며, 이들 국부해 중 전체 최적해를 탐색해내고 있음을 알 수 있다.

<표 11-11>은 보정기간과 검증기간 동안 추정된 매개변수를 이용하여 모의한 추정치와 실측치간의 RMSE와 상관관계, 상대오차를 비교한 것이며, (그림 11-16)과 (그림 11-17)은 보정시와 검정시의 실측치와 추정치를 도식적으로 나타낸 것이다. 보정시와 검정시의 RMSE, 상관계수, 상대오차를 비교해보면, 보정시 보다 검정시의 통계치가 큰 결과를 보이는데, 이는 검정시의 총 강우량이 1021.2mm로 보정시의 총 강우량인 555.0mm보다 2배 정도 커서 매개변수가 다소 저수시의 유출에 보정되었기 때문이다.



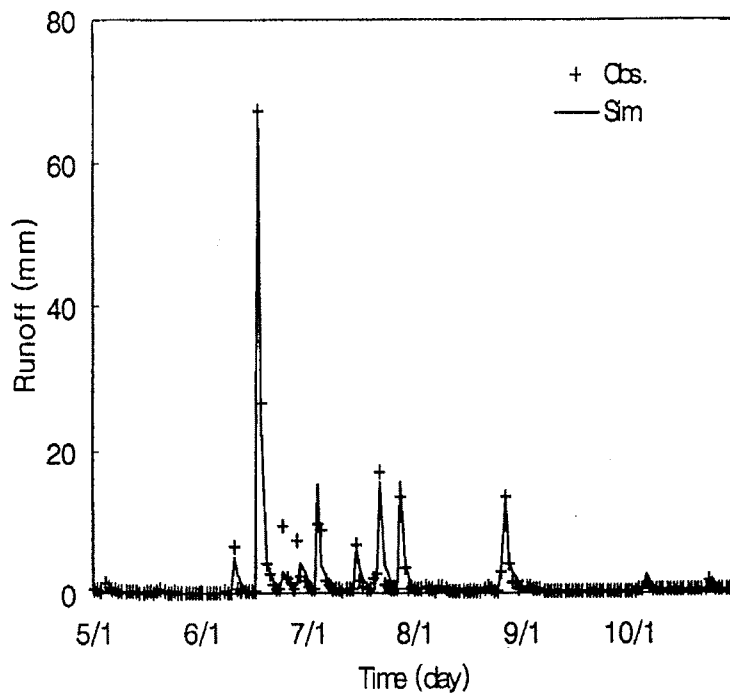
(그림 11-14) 모형의 보정시 매개변수 변화에 따른 SSR 등고선도 (a_{11} : a_{12})



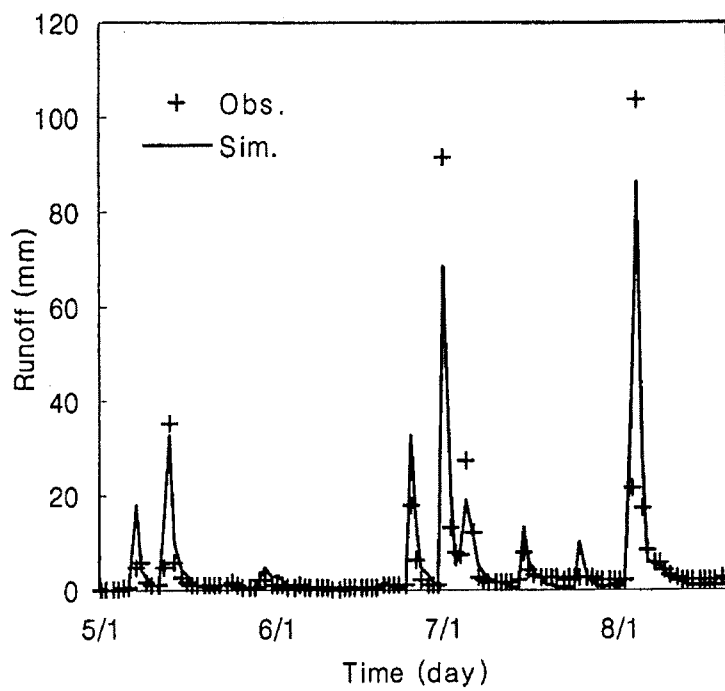
(그림 11-15) 모형의 보정시 매개변수 변화에 따른 SSR 등고선도 (h_{11} : h_{12})

<표 11-10> 실측치와 모의치의 비교

구분	기 간	총유출량				
		실측치 (mm)	모의치 (mm)	RMSE (mm)	R	상대오차 (%)
보정	1996/5/1 - 10/30	294.2	286.3	1.0	0.98	2.69
검정	1997/5/1 - 8/20	550.7	583.5	4.7	0.94	5.99



(그림 11-16) 보정시 실측치와 모의치의 비교



(그림 11-17) 검증시 실측치와 모의치의 비교

제 5 절 신경망이론을 이용한 유출 해석모형

1. 개론

인공신경망 (artificial neural network, ANN) 이론은 인간의 정보처리 과정을 공학적, 수학적으로 모델링한 것으로서, 어떤 시스템의 인과관계를 연상기억능력을 이용하여 인식할 수 있도록 한 블랙박스 모형이다. 인공신경망 이론은 불확실한 비선형 자연현상을 모형화하기 위한 비매개변수법의 일종으로서 수문계의 적용이 1990년 이후 활발히 이루어지고 있다.

인공신경망은 그 모형 자체의 비선형성 (nonlinearity)을 갖음으로서 통계적인 정규성과 정체성 (normality and stationarity)의 가정에서 자유롭다. 또한, 인공신경망은 기존에 설정된 신경망 모형을 문제의 목적에 따라 용이하게 변환이 가능한 적응성 (adaptivity)과 전산학적 병렬계산이 가능하여 그 처리가 합리적인 병렬성 (parallel property) 등의 장점을 지니고 있다.

김주환 등 (1992, 1993, 1998)은 신경회로망의 역전파 알고리즘을 이용하여 유출 수문곡선을 모의하였고, 신현석 등 (1999)은 신경망을 이용한 지역 기상학적인 가뭄 해석과 연평균 강우량의 공간분포 해석을 시도하였으며, 심순보 등 (1998)은 신경망 이론을 이용하여 다목적 저수지의 홍수유입량을 예측하였다. 외국의 경우, Anmala 등 (1995), Anthony 등 (1996), Sureerattanar 등 (1997), Dawson 등 (1998), Sajikumar 등 (1999), 그리고 Zealand 등 (1999) 많은 연구자들이 신경망이론을 이용하여 강우에 따른 유출을 해석하고자 하였다.

신경망 이론의 수문계의 적용에 있어서는 아직 학습방법에 따른 최적해를 구하는데 한계가 있으며, 그 적용의 정규화가 미흡한 단점도 지니고 있다. 따라서, 신경망의 여러 문제들을 해결하기 위해서는 수문계의 다양한 적용을 통한 검토가 이루어져야 할 것이다. 현재 신경망이론을 이용한 수자원 분야에의 응용은 강우-유출 해석과 강우 분포, 지하수 유동과 관련하여 활발하게 적용되어지고 있으나, 시공간적 변화가 심한 소유역에서의 적용은 미진한 상태이다.

따라서, 본 절에서는 신경망이론을 이용한 소유역에서의 장기유출을 해석하기 위하여, 신경망이론 중 모멘트법과 학습적응률을 고려한 오류역전파 알고리즘에 의한

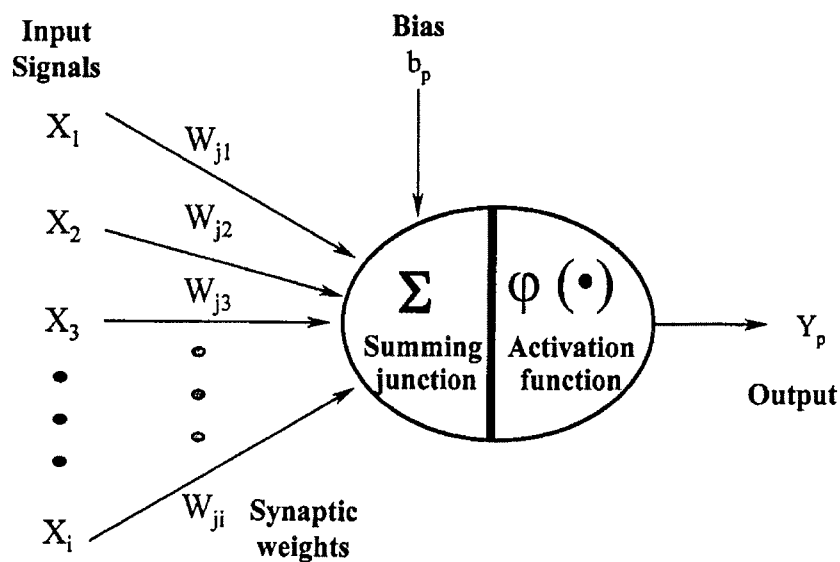
일별 장기유출예측모형을 구성하고, 시험유역에 개발된 모형을 적용하여 그 결과를 고찰함으로써 본 모형의 적용가능성을 평가하도록 한다.

2. 모형의 개발

가. 신경망 이론

신경망 모형은 인간의 정보처리 과정을 수학적으로 모델링한 것으로서 입력과 출력을 가지는 자동적인 학습기계라고 말할 수 있다. (그림 11-18)은 인간의 두뇌를 모델링한 기본적인 신경망 단일소자인 뉴런의 구조를 나타내고 있다.

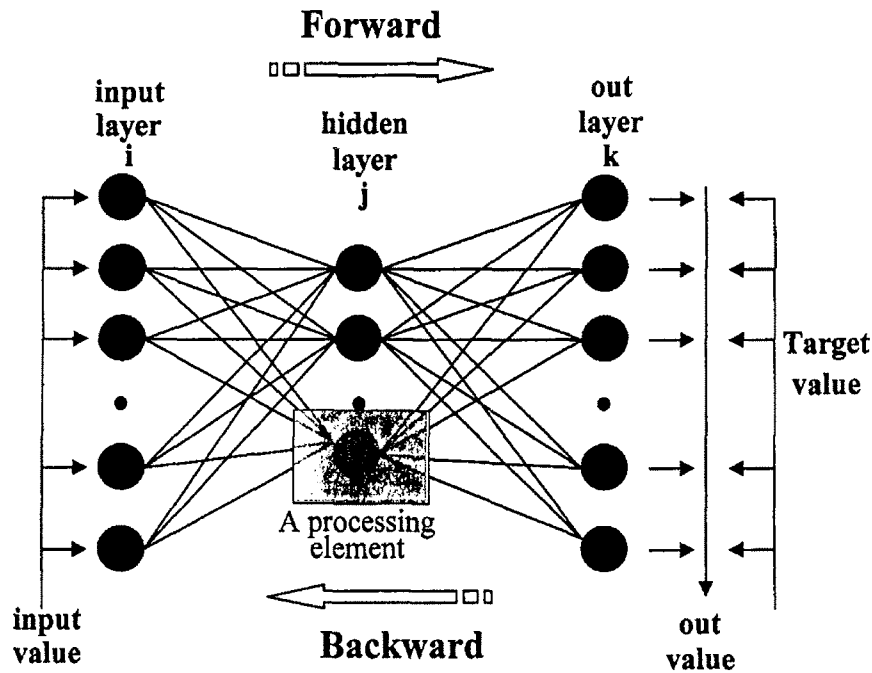
모형에서의 연산과정은 (그림 11-18)에서와 같이 입력자료 (input signal)인 x 와 연결강도 (synaptic weights)의 벡터인 w_i 에 의한 곱의 형태로 나타내어지는 결합함수 (summing junction)인 Σ 가 계산된다. 이 결합함수로부터 출력이 선형 또는 비선형적인 특성을 가지게 하는 활성화함수 (activation function)을 통해 출력의 과정으로 연산이 수행되어진다.



(그림 11-18) 인공신경망의 기본 구조

나. 모형의 구성

장기유출모형은 다층 신경망 구조로 구성되며, 학습방법은 신경망 이론에서 가장 널리 이용되고 있는 오류역전파 (error back propagation, EBP) 알고리즘을 사용하였다. 오류역전파 알고리즘은 일반화된 델타규칙 (generalized delta rule)으로서, 출력층의 오차를 먼저 계산하고, 오차의 미분으로 표현되는 값을 은닉층으로 역전파시켜 연결강도를 반복적으로 조정해 나가는 방법이다. (그림 11-19)는 다층신경망의 구조를 보여주고 있다.



(그림 11-19) 다층신경망의 전형적인 구조

다층 순방향 신경망 (feed-forward neural networks) 훈련은 실측치와 모의치의 비선형 최소 자승인 가중함수를 최소화하는 것으로서 교사훈련 (Supervised training)이라고 한다. 이것은 다음 식 (11-14)와 같이 나타내어진다.

$$E = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^n \sum_{k=1}^m (y_{pk} - p_{pk})^2 \quad (11-14)$$

여기서, E는 총오차, n은 실측치의 패턴 수, m은 총 출력단위, y_{pk} 는 실측된 반응

인 목표출력값으로서 일 유출량, p_{pk} 는 모델에 의한 모의 출력값으로서 일 모의유출량을 나타내며, 식 (11-14)가 하나의 출력단위를 갖는 경우 ($m=1$)는 다음과 같이 나타내어진다.

$$E = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^n (y_p - p_p)^2 \quad (11-15)$$

신경망모형에서 순방향 연결강도의 합과 활성화 함수는 각각 식 (11-16)과 식 (11-17)과 같다.

$$net_{pj} = \sum_{i=1}^n W_{ji} x_{pi} \quad (11-16)$$

$$g(net_{pj}) = \frac{1}{1 + e^{-net_{pj}}} \quad (11-17)$$

여기서, net_{pj} 는 은닉층과 입력층 사이의 연결강도의 합, N 은 총 입력노드의 수, W_{ji} 는 입력층과 은닉층 사이의 연결강도, x_{pi} 는 패턴 p 에 대한 i 번째 값, 그리고 $g(net_{pj})$ 는 뉴런의 활성화함수이다.

출력단위는 다음의 식 (11-18)과 식 (11-19)와 같이 나타내어지는 net input을 받는다.

$$net_{pk} = \sum_{j=1}^m W_{kj} g(net_{pj}) \quad (11-18)$$

$$P_{pk} = g(net_{pk}) \quad (11-19)$$

여기서, m 은 은닉단위의 수, W_{kj} 는 출력층의 k 와 은닉층 노드 j 와 연결되는 연결강도, 그리고 P_{pk} 는 k 번째의 예측 출력값으로서 모의 유출량값이다.

식 (11-14)에 의해 계산된 오차 E 의 최소화는 최적화기법중에서 경사하강법 (gradient descent method)을 사용하였다. 경사하강법은 chain rule을 사용하여 E 을 연결강도에 대한 일차 편미분으로 나타내어지며, 연결강도는 급강하방향으로 이동하여 연결강도의 값을 조정해 나간다. 이것을 수식으로 나타내면 식 (11-20)과 같다.

$$\Delta W_{kj} = -\eta \frac{\partial E}{\partial W_{kj}} \quad (11-20)$$

여기서, η 는 학습율로서 스칼라이다.

본 모형에서는 최적화기법인 경사하강법에 학습과정에서 발생할 수 있는 지역 최소값 (local minima value) 문제와 오차를 최소화하고 수렴속도를 향상시키기 위해 식 (11-20)에서의 적응학습율(adaptive learning rate)에 모멘텀법 (momentum)을 고려하였으며, 식 (11-21)과 같이 나타내어진다.

$$\Delta W_{kj}(t+1) = \eta \delta_{pk} h_{pj} + \alpha \Delta W_{kj}(t) \quad (11-21)$$

여기서, $\Delta W_{kj}(t+1)$ 는 연결강도의 조정량, δ_{pk} 는 p번째 패턴에 대한 출력층의 오차, α 는 모멘텀계수이다. 모멘텀 계수는 0에서 1 사이의 값을 가지며, 본 연구에서는 0.95를 사용하였다. 적응학습율은 학습속도의 향상을 위하여 모멘텀 방법과 병행하여 학습율을 조절하였으며, 본 연구에서는 0.7을 사용하였다.

은닉층에서의 최적 노드수를 얻기 위한 방법으로 Rissanen (1978)가 제안한 BIC (bayesian information criterion)을 사용하였으며, 그 식은 다음과 같다.

$$BIC = M \ln(MSE) + P \ln M \quad (11-22)$$

여기서, M은 신경망의 자료수, MSE는 평균자승오차, 그리고 P는 매개변수의 수 (weights and biases)를 나타낸다.

식 (11-22)에 의해 산정된 BIC를 이용한 은닉층 최적 노드수에서의 stopping rule 은 다음 식 (11-23)과 같이 구성하였다.

$$\left| \frac{BIC(k+1) - BIC(k)}{BIC(k)} \right| \leq 0.001 \quad (11-23)$$

본 모형의 수행 정도를 평가하기 위하여 Nash와 Sutcliffe (1970)가 제안한 효율 지수 (efficiency index, EI)를 사용하였다. 효율지수는 식 (11-24)와 같이 나타내어진다.

$$EI = (ST - SE) / ST \quad (11-24)$$

$$ST = \sum_{t=1}^N (Q_t - \bar{Q})^2 \quad (11-25)$$

$$SE = \sum_{t=1}^N (Q_t - F_t)^2 \quad (11-26)$$

여기서, Q_t 는 t일의 실측유량, \bar{Q} 는 실측유량의 평균값, F_t 는 t일의 모의유량값, ST는 분산의 합, SE는 실측치와 모의치의 자승오차의 합이다.

다. 모형의 입출력 자료

본 모형의 시그모이드 함수는 최소값 0과 최대값 1을 전달함으로 모든 자료는 이론적인 정규화 범위로 변환하였으며, 식 (11-27)과 같다.

$$X' = \left[\frac{1}{(X_{\max} - X_{\min})} \right] \times (X - X_{\min}) \quad (11-27)$$

여기서, X' 은 변환된 변수이고, X_{\max} 와 X_{\min} 은 보정 기간동안 사용된 실측자료의 최대값과 최소값이다.

식 (11-27)을 변환하여 일별 유량값으로 모의할 경우, 유량의 최소값과 최대값에 제한요소가 나타나므로, 좀 더 큰 범위를 나타내기 위한 방법들을 사용할 수 있다 (Huynh, 2000). 본 연구에서의 최소값과 최대값은 $range[0.8Q_{\min}, 1.2Q_{\max}]$ 의 범위를 적용하였다.

본 연구에서는 모형의 입력층에서의 선행 강우량과 일 유량을 고려하여 여러 형태의 모형을 구성하였으며, 최적 모형으로 Model23 모형과 Model34모형을 선정하였다. Model23 모형은 일강우량 시계열 2개 변수와 일유량 시계열 3개 변수로 구성하였으며, Model34 모형은 일강우량 시계열 3개 변수와 일유량 시계열 4개 변수로 구성하였다. 구성된 각 모형의 식은 다음과 같다.

$$Model23; Q(t) = \text{funtion}(R(t), R(t-1), Q(t-1), Q(t-2), Q(t-3)) \quad (11-28)$$

$$Model34; Q(t) = \text{funtion}(R(t), R(t-1), R(t-2), Q(t-1), Q(t-2), Q(t-3), Q(t-4)) \quad (11-29)$$

여기서, $Q(t)$ 는 t일의 유량, $R(t)$ 는 t일의 강우량이다.

3. 결과 및 고찰

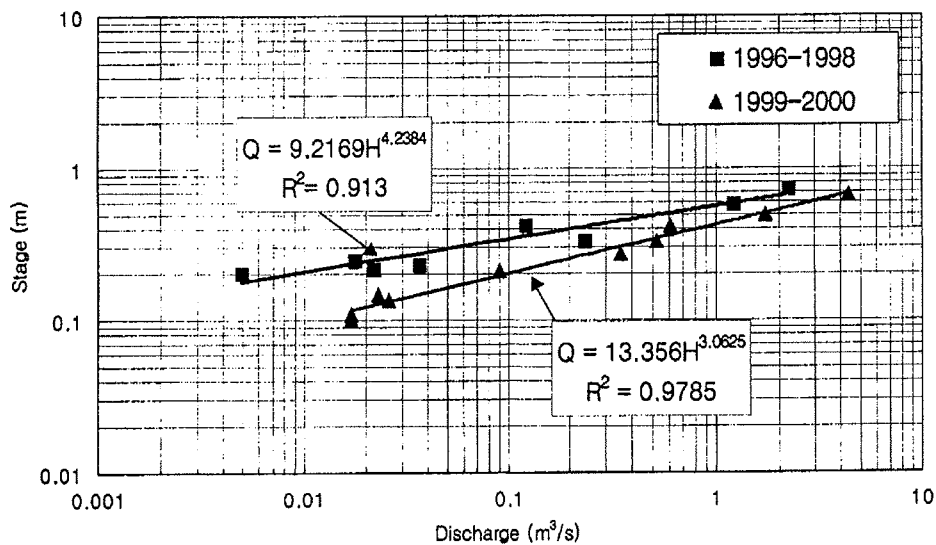
가. 시험유역 및 수문자료

본 연구의 시험유역은 경기도 화성군 봉담읍과 팔탄면에 위치한 발안저수지와

기천저수지를 포함하고 있는 발안유역을 선정하였다. 시험유역의 현황은 제3장에서 기술한 바와 같으며, 적용된 소유역은 HP#6 소유역이다.

본 연구의 자료기간은 1996년부터 2000년의 자료를 이용하였다. 본 모형의 학습은 1996년과 1997년 자료를 이용하여 보정하였고, 검정 자료는 1999년과 2000년도의 유출량 자료를 이용하여 검정하였다.

(그림 11-20)은 1998년의 대홍수에 의한 하상변동 전후의 수위-압력관계를 보여주고 있다. 수위-유량관계식의 결정계수는 1996-1998년이 0.913, 1999-2000년은 0.9875의 값을 보였다.



(그림 11-20) 대상 소유역의 수위-유량 관계 (HP#6)

나. 모형의 보정

모형의 보정을 위한 학습자료는 1996년 4월부터 1997년 12월의 일 유출량 자료를 이용하였다. Model23과 Model34에 대해 은닉층의 최적 노드수를 결정하기 위하여 각 모형의 은닉층의 노드수를 1~21까지 변환시키면서 10000회 반복하여 학습을 수행하였다.

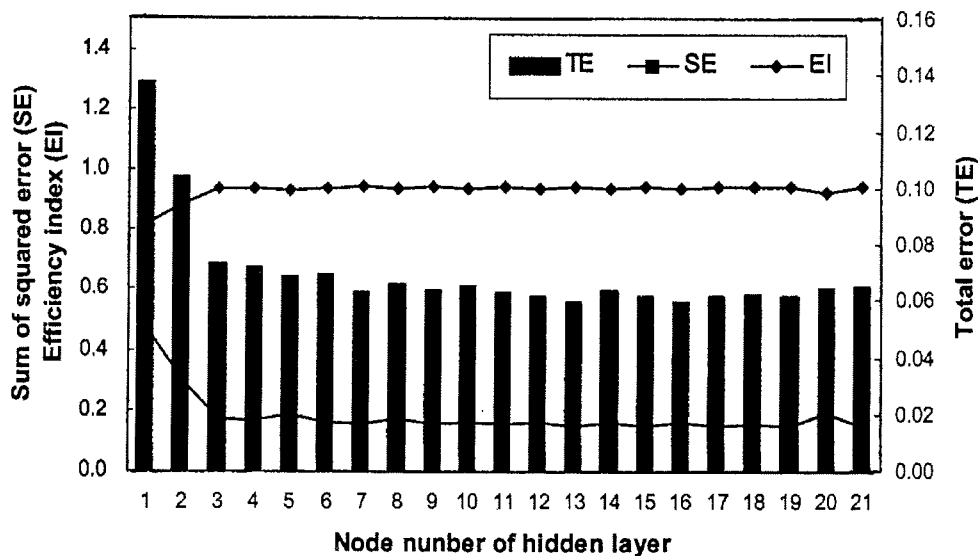
(그림 11-21)과 (그림 11-22)는 각각 Model23과 Model34의 은닉층의 노드수에 따른 총오차 (total error, TE), 자승오차 (sum of squared error, SE), 그리고 모형

의 효율지수(efficiency index, EI)를 보여주고 있다.

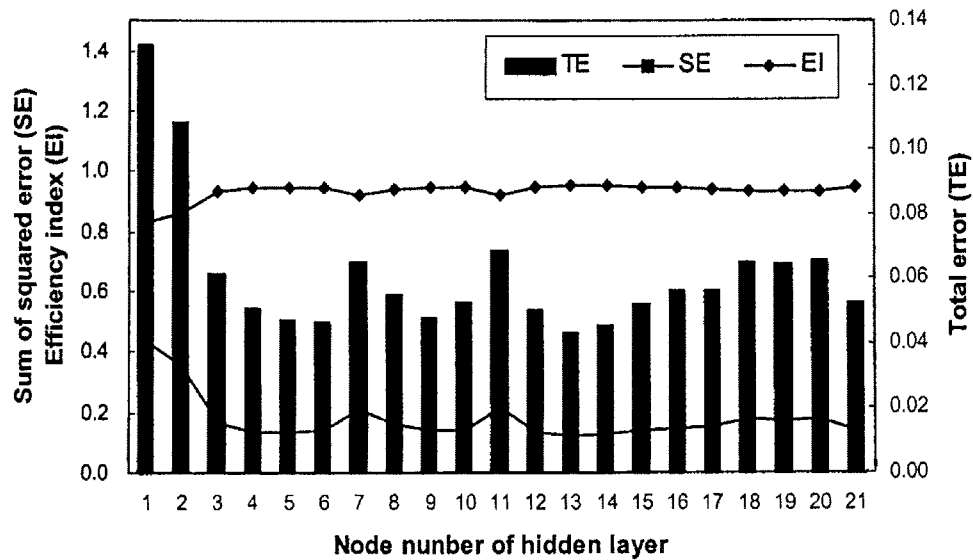
은닉층의 노드수에 따른 모형의 학습 결과, Model23은 (그림 11-21)에서와 같이 은닉층의 노드수에 따른 총오차는 0.059~0.137의 범위를 보였으며, 노드수가 13일 때 가장 작은 값을 나타냈다. 모형의 효율지수는 은닉층의 노드수가 19일 때 가장 큰 0.944의 값을 나타냈으며, 13일 때는 0.942였으며, 전체적으로 0.819~0.944의 값을 보였다. 자승오차합은 0.148~0.466의 범위를 보였다. Model34의 경우, 은닉층의 노드수에 따른 총오차는 노드수가 13일 때 가장 작은 값을 나타냈으며, 전체적으로 0.043~0.132의 범위를 보였다. 모형의 효율지수는 0.83~0.95의 값을 보였으며, 은닉층의 노드수가 13일 때 가장 큰 0.95의 값을 나타냈다. 자승오차합은 0.12~0.43의 범위를 보였다.

이상에서와 같이, Model34가 Model23에 비해 학습이 효과적으로 수행되었음을 알 수 있으며, Model23과 Model34의 은닉층에서의 최적노드수는 13으로 나타났다.

따라서, 본 연구에서는 Model23과 Model34의 학습결과를 바탕으로 모형의 보정에는 Model23에 은닉층의 최적노드수가 13인 Model23-h13 모형과 Model34의 은닉층 최적노드수가 6과 13일 때인 Model34-h6 모형 및 Model34-h13 모형으로 구성하였다.

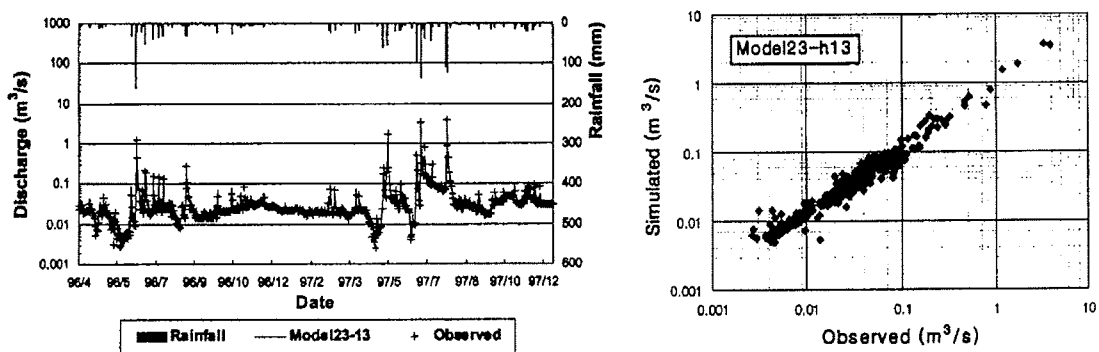


(그림 11-21) 은닉층의 노드수에 따른 학습 결과 (Model23)

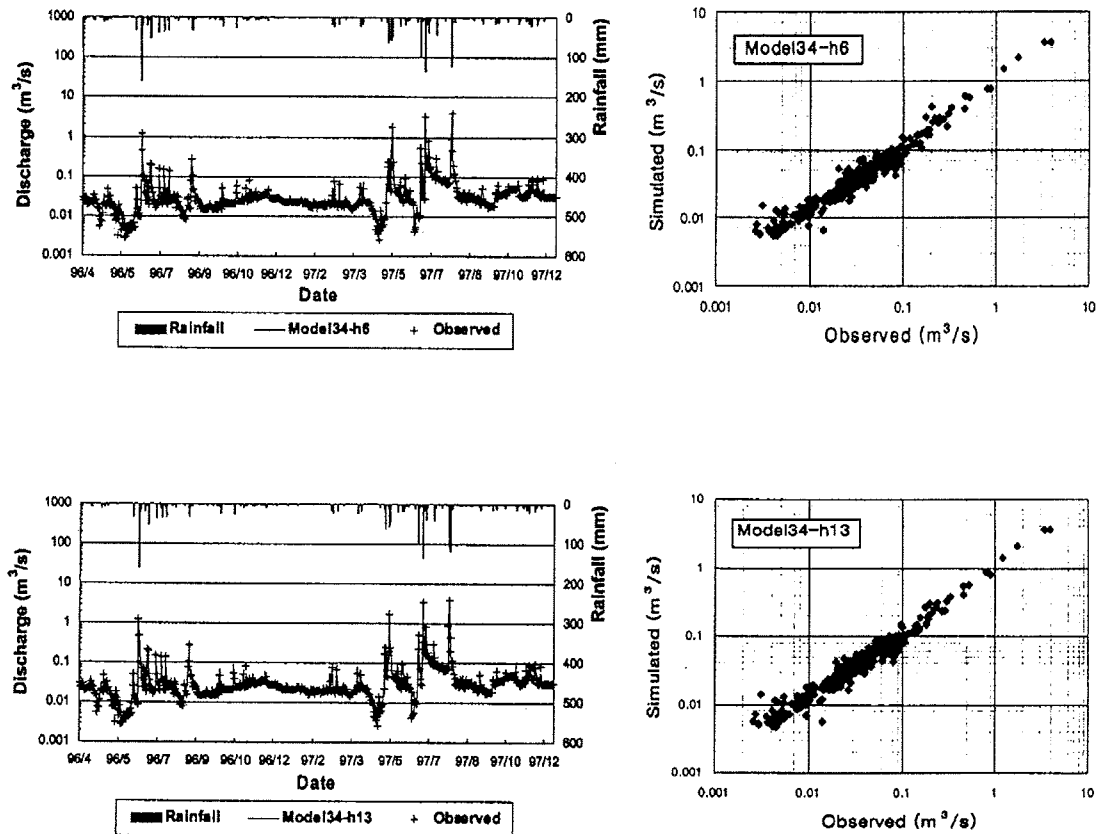


(그림 11-22) 은닉층의 노드수에 따른 학습 결과 (Model34)

(그림 11-23)은 구성된 모형을 적용하여 강우에 따른 일 유출량을 학습한 모의치와 결과값을 비교한 것과 실측치와 모의치의 산포도를 나타내고 있다. (그림 11-23)에서와 같이 모의결과가 실측자료의 경향을 잘 따라가도록 학습되었음을 알 수 있다.



(그림 11-23) 보정시 모형별 실측치와 모의치의 비교 및 산포도



(그림 11-23) 계속

각 모형을 적용하여 얻어진 실측치와 모의치를 비교한 결과는 <표 11-11>에서와 같다. 구성된 모형별 실측치와 모의치를 비교한 결과, 상대오차 (relative bias, RB)는 Model23-h13이 $0.063 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 가장 작은 값을 보였고, RMSE (root mean square error)와 RMAE (relative mean absolute error)는 Model34-h13모형이 각각 0.024, $0.143 \text{ m}^3/\text{s}$ 로서 가장 작은 값을 나타내었다. 결정계수 R^2 (coefficient of determination)의 값은 모형별로 0.98~0.99의 범위를 보였고, 상관계수 R (correlation coefficient)은 세 모형 모두 0.99의 값을 보였으며, 모형의 효율성을 나타내는 효율지수 (efficiency index, EI)는 모형별로 0.982~0.989의 범위를 보임으로서 학습의 결과가 양호한 것으로 나타났다. 이상의 결과로 볼 때, Model34-h13, Model34-h6, 그리고 Model23-h13 모형의 순서로 실측치를 가장 잘 모의하는 것으로 나타났다.

<표 11-11> 모델별 실측치와 모의치의 비교 결과 (unit; m³/s)

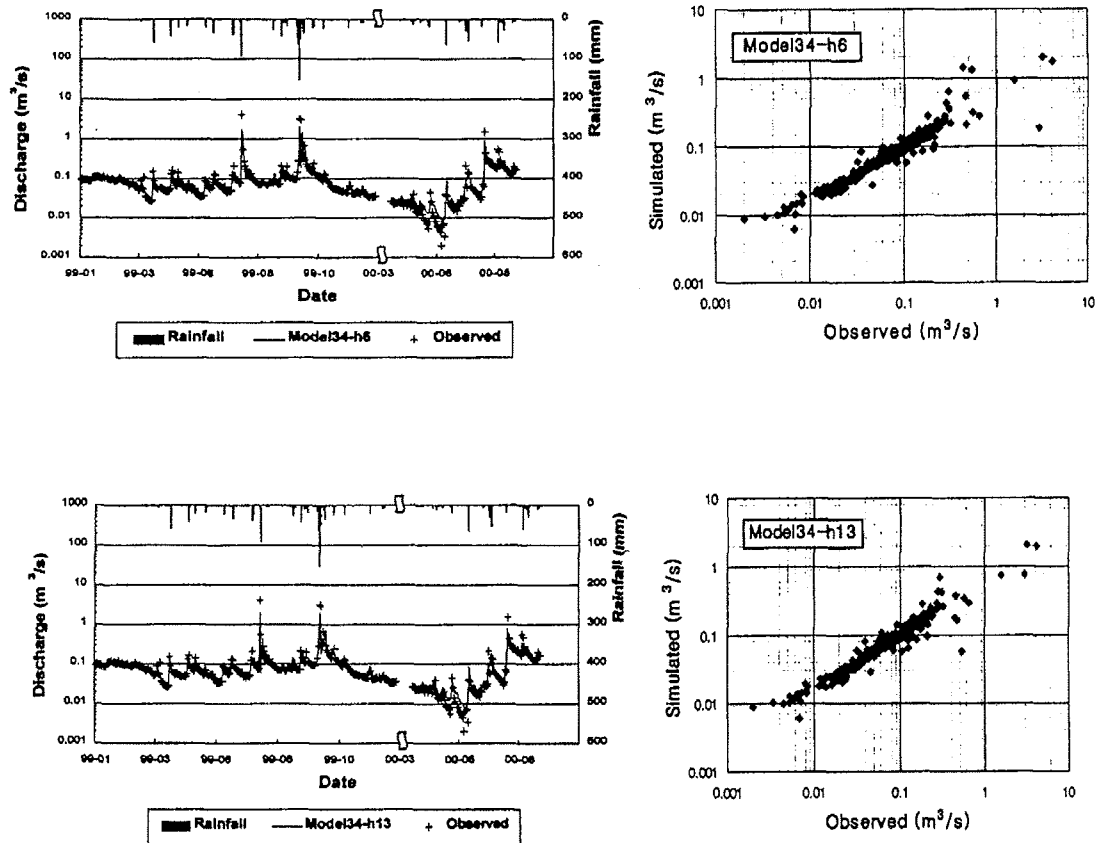
Item	Model23-h13	Model34-h6	Model34-h13
RB	0.063	0.082	0.066
RMSE	0.031	0.031	0.024
RMAE	0.164	0.164	0.143
R ²	0.983	0.985	0.991
R	0.991	0.992	0.995
EI	0.982	0.982	0.989

다. 모형의 검정

학습결과를 바탕으로 Model34-h6과 Model34-h13을 최적 모형으로 선정하였으며, 이를 검정에 이용할 모형으로 결정하였다. 검정자료는 1999년 1월부터 2000년 8월까지의 압력식 수위계로부터 얻어진 일 유출량 자료를 이용하였다.

Model34-h6과 Model34-h13모형을 자료기간의 강우에 대해 적용한 결과와 실측치를 비교한 결과와 각 모형의 검정에 대한 실측치와 모의치의 산포도는 (그림 11-24)에서와 같다.

Model34-h6과 Model34-h13을 검정한 결과는 <표 11-12>에서 보는 바와 같다. <표 11-12>에서와 같이, Model34-h6의 검정 결과, 상대오차가 0.135 m³/s로서 Model34-h13의 0.169 m³/s보다 작은 값을 보였으나, RMSE와 RMAE는 Model34-h13이 각각 0.185, 0.293 m³/s으로서 양호한 결과를 보였다. Model23-h6의 결정계수 R²과 상관계수 R은 각각 0.915, 0.956의 값을 보였으며, Model34-h13은 각각 0.924와 0.961의 값을 나타내었다.



(그림 11-24) 검정시 모형별 실측치와 모의치의 비교 및 산포도

<표 11-12> 검정시 모형별 비교 결과 (unit; m^3/s)

Item	Model34-h6	Model34-h13
RB	0.135	0.169
RMSE	0.219	0.185
RMAE	0.331	0.293
R^2	0.915	0.924
R	0.956	0.961

제 6 절 요약 및 결론

본 장에서는 논에서의 저류 효과 및 유출 특성, 관개용 저수지군을 포함하는 농업용 소유역의 일 유출량 추정, 하천에서의 일 유출량 추정 등 농업유역의 특성을 고려한 장단기 수문 모델링 기술 개발을 위하여 수정 TR-20 모형, SSARR 모형, 수정 Tank 모형, 신경망이론을 이용한 장기유출 추정 모형 등을 개발하였고, 이를 시험유역에 적용하여 그 결과를 고찰하였고 적용성 및 응용성을 평가하였다.

을 평가하고자 한다.

본 장에서의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① 농업유역의 단기 강우-유출해석을 위하여 논에서의 유출특성을 고려한 수정 TR-20 모형을 개발하였고, 모형의 적합성 여부를 실측치와 비교하여 검증하였다.
- ② 기존의 수문 모형에 대하여 논역 유출해석 과정을 추가함으로써, 담수재배를 실시하는 논 지대의 강우-유출 과정을 보다 정밀하게 해석할 수 있으며, 농업유역의 홍수량 및 유출수문곡선 추정에 대한 적용성도 높일 수 있을 것으로 기대된다
- ③ 관개용 저수지군을 고려한 일 유출해석을 위하여 SSARR모형을 선정하여 대상유역에 적용하였고, 그 적용가능성을 평가하였다.
- ④ 대상유역의 1996년 유출량, 저수지 수위 및 방류량 자료를 이용하여 SSARR 모형을 보정한 결과, 소유역의 일 유출량 실측치와 모의치간의 RMSE가 1.3~3.8mm, R^2 가 0.65~0.97이며, 저수지 수위의 실측치와 모의치간의 RMSE가 0.20~0.29m, R^2 가 0.91~0.97이었다.
- ⑤ 보정된 SSARR 모형을 이용하여 1997년 일 유출량을 모의한 결과, 폭우사상시의 유출에서는 소유역의 일 유출량 실측치와 모의치의 RMSE가 4.15~11.1mm, R^2 가 0.76~0.96이며, 저수시에는 소유역의 일 유출량 실측치와 모의치의 RMSE가 1.3~1.6mm, R^2 가 0.77~0.98로, 실측치와 모의치의 RMSE는 폭우사상시 보다 저수시에 작은 값을 나타내었다.
- ⑥ 소하천의 일 유출량 추정을 위하여 매개변수의 자동보정이 가능한 수정

TANK 모형을 개발하였고, 전체 탐색법인 SCE-UA법의 합성보정을 통하여 전체 최적해 탐색 여부 및 효율성을 평가하였다.

- ⑦ 합성자료를 이용하여 TANK 모형의 매개변수를 SCE-UA법을 이용하여 최적화 한 결과, 여러 개의 국부해 중 전체 최적해를 탐지했으며, 산정 매개변수의 정확도를 나타내는 BRM은 0.058이었으며, RMSE는 0.073mm이었다.
- ⑧ 대상유역의 1996년 일 유출량 자료를 이용하여 TANK 모형의 매개변수를 보정하고, 1997년 기상자료를 이용하여 일 유출량을 모의하여 실측치와 비교한 결과, 실측치와 모의치가 비교적 일치하는 결과를 보였다.
- ⑨ 신경망이론의 학습율과 모멘텀계수를 고려한 오류역전파 알고리즘을 이용한 일별 장기유출예측모형을 구성하였으며, 입력층의 노드수를 고려하여 Model23과 Model34모형을 구성하였다.
- ⑩ 신경망 모형의 은닉층의 노드수에 따른 Model23과 Model34 모형의 학습 결과, Model23 모형은 은닉층의 노드수가 13일 때의 오차가 가장 작은 0.059로 나타났고, Model34 모형은 은닉층의 노드수가 6일때와 13일 때 가 각각 0.46과 0.43으로 가장 작은 값을 보임으로써, 은닉층의 최적노드수는 Model23 모형이 13, Model34 모형은 6과 13으로 나타났다.
- ⑪ 신경망 모형인 Model23-h13, Model34-h6, 그리고 Model34-h13 모형을 적용한 결과, 상대오차는 Model23-h13이 $0.063 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 가장 작은 값을 보였고, RMSE는 Model34-h13모형이 $0.024 \text{ m}^3/\text{s}$ 로서 가장 작은 값을 나타내었다. 결정계수 R^2 값은 모형별로 0.98~0.99의 범위를 보였고, 효율지수는 모형별로 0.982~0.989의 범위를 보임으로서 학습의 결과가 양호한 것으로 나타났으며, Model34-h13, Model34-h6, 그리고 Model23-h13 모형의 순서로 실측치를 가장 잘 모의하는 것으로 나타났다.
- ⑫ 학습결과를 바탕으로 최적 모형은 Model34-h6과 Model34-h13 모형이 선정되었으며, 두 모형을 적용한 검정 결과, Model34-h6 모형은 상대오차가 $0.135 \text{ m}^3/\text{s}$ 로서 Model34-h13 모형의 $0.169 \text{ m}^3/\text{s}$ 보다 작은 값을 보였으나, RMSE는 Model34-h13이 $0.185 \text{ m}^3/\text{s}$ 로서 양호한 결과를 보였으며, Model23-h6의 결정

계수 R^2 은 0.915, Model34-h13은 0.924의 값을 나타내었다.

참고문헌

1. 강관원, 박찬영, 김주환, 1992. 패턴인식 방법을 적용한 하천유출량의 비선형 예측, 한국수문학회지, 제25권 제3호, pp. 105-113.
2. 강주환, 1986. 강우-유출모형에 의한 가지야마 공식의 한계성 검토, 공학석사학위 논문, 서울대학교 대학원.
3. 강주환, 김남일, 이길성, 황만하, 1997. SSARR-8 모형을 이용한 낙동강 수계의 저수유출해석, 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 262-267.
4. 건설부, 1988. 수자원관리기법개발연구조사보고서, 제2권 한국확률강우량의 작성, 서울.
5. 김성원, 호세살라스, 2000. 하천수위표지점에서 신경망기법을 이용한 홍수위의 예측, 한국수자원학회지논문집, 제33권 제2호, pp. 247-262.
6. 김주환, 1993. 신경회로망을 이용한 하천유출량의 수문학적 예측에 관한 연구, 인하대학교 박사학위논문.
7. 김채수, 1982. 관개기간중 담유역에서의 강우유출량 추정에 관한 연구, 동국대학교 석사학위 논문.
8. 김현영, 황철상, 강석만, 이광야, 1998. 눈유출 특성을 고려한 홍수분석 시스템 개발, 한국관개배수, 5(1), pp. 8-19.
9. 박봉진, 차형선, 김주환, 1997. 유전자 알고리즘을 이용한 저류함수모형의 매개변수 추정에 관한 연구, 한국수자원학회지, 30(4), pp. 347-355.
10. 박승우, 1993. Tank 모형 셀프프로그램을 이용한 중소하천의 일 유출량 추정, 한국수문학회지, 26(3), pp. 47-61.
11. 신현석, 1998. 인공신경망의 수자원 및 환경 분야에의 응용, 한국수자원학회지, 제31권 제1호, pp. 97-103.
12. 신현석, 박무중, 1999. 신경망 기법을 이용한 연평균 강우량의 공간 해석, 한국수자원학회지논문집, 제32권 제1호, pp. 3-13.

13. 신현석, 박무중, 1999. 신경망을 이용한 우리 나라의 시공간적 가뭄의 해석, 수자원학회지논문집, 제32권 제1호, pp. 15-29.
14. 심순보, 김만식, 심규철, 1998. 신경망이론에 의한 다목적 저수지의 홍수유입량 예측, 한국수자원학회논문집, 제31권 제1호, pp. 45-57.
15. 심순보, 김선구, 고석구, 1992. 최적화 기법에 의한 저류함수 유출 모형의 자동보정, 대한토목학회논문집, 12(3), pp. 127-137.
16. 안경수, 김주환, 1998. 신경회로망을 이용한 유출수문곡선 모의에 관한 연구, 수자원학회지논문집, 제31권 제1호, pp. 13-25.
17. 안상진, 이용수, 1989. SSARR 모형에 의한 유역유출해석, 한국수문학회지, Vol.22(1), pp. 109-116.
18. 안상진, 이종형, 1990. 토지이용의 변화와 홍수유출 Model, 한국수문학회지, 23(1), pp. 24-31.
19. 오경두, 전병호, 1994. 미계측 중소유역 유출 시뮬레이션을 위한 신경회로망모형의 적용, 제36회 수공학 연구발표회 논문집, 한국수문학회, pp. 317-323.
20. 오남선, 선우중호, 1996. 신경망이론에 의한 강우예측에 관한 연구, 한국수자원학회지, 제29권, 제4호, pp. 109-118.
21. 임상준, 박승우, 1997. 논 의 유출곡선번호 추정, 한국수자원학회논문집, 30(4), pp. 379-387.
22. 정하우, 박승우, 1986. 저수지 물관리 연구 (II), 농수산부, 농업진흥공사, pp. 245-306.
23. 早瀬吉雄, 1994. 水田地帯の洪水防止・軽減機能の評価と機能向上事業の提案, 農業土木學會誌, 62(10), pp. 1-6.
24. 진영훈, 2000. 하천의 유출량 예측을 위한 인공 신경망 이론의 적용, 전남대학교 토목공학과 석사학위논문.
25. 최진규, 김현영, 손재권, 1997. 논 의 배수물꼬의 유량에 관한 기초연구, 한국농공학회지, 39(2), pp. 134-142.
26. Anmala. J., Nedunuri, K. V., 1995. Neural networks for prediction of

- watershed runoff, 1st International Conference on Water Resources Eng. Water Resources Planning and Management Div., ASCE, San Antonio, Texas, USA, Aug. 14-18, pp. 348-357.
27. Anthony, W. M., 1996. Extended rainfall-runoff modeling using artificial neural networks, Proc. of the 2nd International Conf. on Hydroinformatics, '96, Zurich, Switzerland, pp. 207-213.
28. Brendecke, C. M., Lahio, D. R., and Holden, D. C., 1985. Comparison of two daily streamflow simulation models of an alpine watershed, J. Hydrology, 77, pp. 171-186.
29. Carpenter, W. C., and Barthelemy, J. F., 1994. Common misconceptions about ANN as approximators, Jour. computing in Civil Eng., ASAE, Vol. 8, No. 3, pp. 354-358.
30. Dawson, C. W., and Wilby, R. 1998. An artificial neural network approach to rainfall-runoff modeling, Hydrological Sciences, Vol. 43, No. 1, pp. 47-66.
31. Duan Q., S. Sorooshian, V. K. Gupta, 1994. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models, Journal of Hydrology, 158, pp. 265-284.
32. Flood, I., and Kartam, N., 1994a. Neural networks in civil eng(1), Jour. computing in civil Eng., ASCE, Vol. 8, No. 2, pp. 149-162.
33. Hsu, K., Gupta, H. V., and Sorooshian, S., 1995. Artificial neural networks modeling of rainfall-runoff process, Water Resources Research, Vol. 31, No. 10, pp. 2517-2106.
34. Karunanithi, N., Grenney, W. J., Whitley, D., and Bovee, K., 1994. Neural Networks for river flow prediction, J. of Computing in Civ. Engrg., ASCE, Vol. 8, No. 2, pp. 201-220.
35. Lachtermacher, G., 1994. Back Propagation in hydrological time series forecasting, Stochastic and Statistical Methods in Hydrology and

Environmental Engineering, Vol. 3, Kluwer Academic Publishers, pp. 229-242.

36. Sajikumar, N. and Thandaveswara, B. S., 1999. A nonlinear rainfall-runoff model using ANN, Journal of Hydrology, Vol. 216, pp. 32-55.
37. Singh, V. P., 1995. Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources publications Colorado, PP. 367-394.
38. Smith, J., and Eli, R. N., 1995. Neural network models of rainfall-runoff process, J. of Water Resour. Plng. and Mgmt., ASCE, Vol. 121, No. 6, pp. 499-508.
39. Soil Conservation Service, 1972. SCS National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
40. Sorooshian, S., V. K. Gupta, 1983. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models : The question of parameter observability and uniqueness, Water Resources Research, 19(1), pp. 260-268.
41. Sureerattanar, S. and Phien, H. N., 1997. Back-propagation networks for daily stream flow forecasting, Water Resources Journal No. 195, pp. 1-7.
42. Thirumalaiah, K., and Deo, M. C., 1998. River stage forecasting using artificial neural networks, J. of Hydro. Eng., ASCE, Vol. 3, No. 1, pp. 26-32.
43. Zealand, C. M., Burn, D. H., and Simonovic, S. P., 1999. Short term stream flow forecasting using ANN, Jour. of Hydrology, Vol., 214, pp. 32-48.
44. 角屋 睦, 1988, 土地利用變化に伴う流出特性の變化, 農業土木學會誌, 56(11), pp. 5-9.

여 백

수질모델링 기술 개발

2000년 12월

“농업생태환경 모니터링 및 종합적 환경관리시스템 개발 사업”

서울대학교 농업생명과학대학 부속 농업개발연구소

최종보고서 제 IV 편 제 12 장

여 백

제 12 장 수질모델링 기술 개발

제 1 절 서 론

하천수에는 인위적인 활동뿐만 아니라, 자연으로부터도 각종의 물질이 유입된다. 인위적인 영향과는 관계없이 육지의 발생원으로부터 수계에 유입, 강하하는 물질에 의하여 수질이 나빠지는 현상을 오염 (contamination) 또는 오탁 (pollution)이라고 한다. 특히, 공중위생상 위험이 발생하거나, 보다 넓게는 장단기적으로 생물의 생존에 위협을 줄 정도로 세균과 유독물질이 자연수 속으로 혼입되는 것을 오염이라고 하고, 독성과는 직접적으로 관계없이 유기화합물과 질소, 인 등을 포함한 유기 무기화합물의 증가로 인하여 세균과 조류 (algae) 등이 과다 증식하여 물 이용을 저해하고 물 환경이 악화되는 현상을 오탁이라 하여, 이 둘의 개념을 구별하기도 한다.

최근 정부는 배출허용 기준이나 방류수 수질기준에 따라 규제하는 농도 규제 중심의 수질관리의 한계를 느끼고 수질오염 총량 관리제를 도입하였다. 수질 오염 총량 관리제는 어떤 관리 목표가 되는 공공수역의 수질환경기준을 유지하기 위해 그 지점으로 오염물질이 흘러드는 유역에서 배출할 수 있는 오염물질의 배출 한도를 정하고 그 유역 내 오염원에 대해 그 배출 한도를 넘지 못하도록 규제하는 방식이다.

따라서, 유역 내의 일정 기간 총 오염 부하량 산정이 필요하게 되었으며, 일정기간의 총 오염 부하량 산정 방법에는 원단위와 유달율을 이용하는 방법과 강우시 유출 부하량과 무강우시 유출 부하량을 합하여 산정하는 방법 등이 있다.

그러나 강우시 유출 특성과 무강우시 유출 특성이 다르고, 원단위와 유달율을 이용하는 방법은 그 적용에 지역적 한계가 있으며, 강우시 유출 부하량의 평가에도 강우유출이 이미 평가되어 있는 곳에 적용해야 한다.

또한, 강우시 유출 부하량이 충분히 반영되지 않는 일정 기간내의 유출 부하량의 추정은 과소 평가되는 경우가 많으므로 강우시 유출 부하량의 추정이 중요하다(海

老瀬潛一, 1984., 山本哲也 등, 1984).

한편, 오염물질이 배출되는 형태에 따라 공장폐수와 같이 오염물질이 특정 지점이나 장소에서 배출되어 오염을 일으키는 점원오염 (point source pollution)과 광범위한 지역에 걸쳐 발생하는 형태의 비점원오염 (nonpoint source pollution)으로 나눌 수 있다.

점원오염은 발생원마다 발생량과 발생형태가 다르다. 따라서, 대상유역에 있는 모든 발생원에 대하여 하나 하나의 오염부하 발생량을 실측하는 것이 기본이다. 특히, 가정배수나 공장배수에서의 오염부하량은 시각에 따라 크게 변동하며, 비점원 오염은 우천일과 청명일에서 크게 달라진다. 따라서 이러한 오염부하량에 대해서는 장기간에 걸친 계속된 조사가 필요하다. 그러나 이러한 전체 발생원의 오염부하량을 계속하여 실측하는 것은 현실적으로 거의 불가능하다.

농업 비점오염의 주요 물질은 농경지에 살포된 유기물질, 비료, 농약 등으로 이루어진다. 이들 물질은 유출과 함께 유역 전체로부터 배출되므로, 그 총량이 커서 강이나 호수, 저수지, 댐, 연안 등의 수체 (water body)에 대한 수질오염의 주요 원인이 되기도 한다 (Park et al., 1996). 또한, 박충현 등 (1996)은 우리 나라 하천, 호수 등의 수질오염원으로 농경지를 최우선 순위로 평가하였다. 그밖에도 강우, 유출 과정에서 지면으로부터 침투수와 함께 지하수를 오염시키게 된다.

농경지 비점오염의 주요 원인 물질인 화학비료와 농약의 사용량은 해마다 증가 추세로서, 1994년 현재 연간 약 400 kg/ha의 화학비료를 시비하고 있는데, 이 양은 세계 평균 시비량인 99 kg/ha나 미국의 평균시비량 94 kg/ha의 4배 이상의 양에 해당한다. 또한, 제초제, 농약 등의 사용량은 성분 기준으로 1984년의 290품목 16.7천 ton에서 1994년에는 무려 568품목 26.3천 ton으로 크게 증가하였다 (농림수산부, 1995).

환경부 (1995)의 비점오염 원단위 추정결과는 T-N의 경우 도시지역은 7.67 kg/ha, 논에서는 2.2 kg/ha, 밭은 0.9 kg/ha 등으로 발표하였다. 이와 같은 원단위 부하량으로부터 전국의 T-N 부하량 전망에서는 2001년을 기준하여 생활배수에 의한 일 추정량은 367ton, 축산배수량은 97ton 등이며, 비점오염원에서는 일 95ton 등으로

예상하고 있다 (박충현 등, 1996)

그러나 유역 규모에서의 비점오염량은 오염원에서 배출되는 양 중 운송과정에서 퇴적이나 그밖의 생화학적 요인에 의하여 소모되어 실제로 하천에 도달하는 양이 작으므로, 유역 규모에 있어서의 오염물질 부하량에 대한 연구가 필요하다. 또한, 현재까지는 원단위 부하량을 기준하여 추정값과의 비율을 유달율 등의 개념을 적용하는 경우가 많으나, 보다 체계적인 자료의 구축과 유역에서의 물질순환 등에 대한 기작을 검토하는 일도 중요하다고 할 수 있다.

본 장에서는 수질모델링 기술 개발을 위하여, 각 하천에서의 실측 수질자료를 바탕으로 원단위법에 의한 발생, 배출, 유출부하량을 산정하고, 소하천에서 채수빈도를 고려한 오염부하량과 유출량에 대한 평균농도를 산정하여 수질오염부하량을 정량적으로 해석, 평가하며, 유역단위의 비점원오염 추정을 위한 GIS-NPS 호환모형을 개발하여 적용하고, 그 결과를 분석 평가하도록 한다.

제 2 절 원단위법에 의한 부하량 산정

1. 원단위법

오염부하는 기본적으로는 발생원마다 발생량과 발생형태가 다르다. 따라서, 대 상유역에 있는 모든 발생원에 대해서 하나 하나의 오염부하 발생량을 실측하는 것이 기본이다. 특히, 가정배수나 공장배수에서의 오염 부하량은 시각에 따라 크게 변동하며, 비점원오염은 강우시와 맑은날에서 크게 달라진다. 따라서, 이러한 오염 부하량에 대해서는 장기간에 걸친 계속된 조사가 필요하다. 그러나 이러한 전체 발생원의 오염부하량을 계속하여 실측하는 것은 현실적으로 거의 불가능하다.

대규모 공장과 하수처리장 등과 같은 대규모 발생원과 참고자료가 없는 발생원에 대해서는 실측을 해야 하지만, 기타 소규모 사업소나 가정배수와 같이 전체적으로 큰 차이가 없다고 생각되는 것에 대해서는 문헌 값과 과거의 조사 사례를 참고로 한다. 각 발생원으로부터 발생하는 오염부하량의 실측자료를 각각 단위당 오염부하 발생량으로서 정리해두면 편리하며, 기간은 1일 또는 1년으로 하는 것이 보통이다. 이것을 오염부하 발생원단위 (pollutant load factor) 혹은 간단히 원단위라고 한다.

원단위를 이용한 연구사례를 살펴보면, 국립환경연구원 (1993)은 “비점원오염으로부터의 오염물질 유출특성 조사를 위한 방법론적 연구”에서 우리 나라 국토 이용현황 자료와 토지이용에 따른 오염물질 부하량을 기존의 원단위로부터 계산한 결과에 의하면 전체 오염원 중 비점원오염이 차지하는 기여율을 연구 한 바 있고, 대개 T-N 60%, T-P 가 14% 비율을 갖는다고 하였다.

환경부 (1995)는 “비점원오염원 조사연구사업 보고서”에서 원단위 모델을 우리 나라 전체유역에 적용하여 전국의 비점원오염 부하량을 계산하여, 전체오염원 중 비점원오염원이 차지하는 기여율을 T-N 50.4%, T-P 26.2%라 하였다.

권 (1998)은 경기도 북하천 상류의 농촌유역에 원단위법을 응용하여 전체 부하량 중 T-N은 비점원 69%, T-P는 비점원 22% 비율을 차지한다고 하였다.

본 연구에서는 환경부에서 1999년 발표한 원단위 기준을 이용하여 발안저수지 유역을 대상으로 오염부하량을 추정하였으며, 이를 실측치와 비교하였다. 환경부에서 제시한 인구, 축산, 비점오염원에 대한 오염부하 원단위는 다음과 같다.

<표 12-1> 인구에 의한 발생부하량

(단위 : g/인·일)

구분		BOD	총질소(TN)	총인(TP)
시가화	가정	50	10.5	1.2
	영업	26	8.0	0.7
비시가화	가정	49	13.2	1.5
	영업	26	8.0	0.7

<표 12-2> 축산에 의한 발생부하량

(단위 : g/두/일)

구분	BOD	TN	TP
젖소	556	161.8	56.6
한우	528	116.8	36.1
말	259	77.6	24
돼지	109	27.7	12.2
양	17	9.5	1.4
사슴	17	9.5	1.4
가금	5	1.1	0.4

<표 12-3> 비점오염원에 의한 발생부하량

(단위 : kg/km²·일)

구분	BOD	TN	TP
논	2.30	6.56	0.61
밭	1.60	9.44	0.24
임야	1.00	2.20	0.14
대지	85.90	13.69	2.10
목장	35.10	5.37	1.72
골프장	1.00	3.56	2.76
기타	1.00	0.06	0.03

2. 시험유역내 오염원 현황

원단위법을 이용한 소유역별 오염부하량을 추정하기 위해 시험유역 내의 생활계, 축산계, 산업계, 토지이용 등으로 구분하여 해당 기관의 소장 자료와 현지 답사를 통해서 기초자료를 수집하였다.

생활계 오염원 현황은 유역내 팔탄면과 봉담면 면사무소의 소장자료를 이용해 자료를 수집하였으며, 생활하수처리 실태는 분뇨의 경우 정화조를 설치하여 사용하였고, 생활잡배수의 경우 별도의 처리시설을 갖추고 있지는 않았다.

축산계의 오염원 현황은 가축 종류별 사육두수의 경우 봉담면 면사무소 소장자료와 현지 답사를 통해서 자료수집 하였으며, 소의 경우 분뇨의 처리는 톱발발효를 이용하여 농지에 환원하고 있었으며, 돼지의 경우는 화성군 양돈 조합에서 전량 수거하여 비료화하고 있었다. 한편, 육우의 경우는 원단위가 제시되어 있지 않아 한우의 발생원단위로 대체하였다.

<표 12-4>는 소유역별 인구와 가축사육 현황을 보여주고 있다. HP#2 소유역의 경우 인구 6,499명, 한우 462두, 유우 1,102두, 돼지 1,150두로 조사되어, 가축의 경우 비교적 유우와 돼지가 차지하는 비중이 높은 것으로 조사되었다. HP#12, 14 소유역의 경우 돼지와 사슴의 사육은 없었으나, 가금의 사육두수가 상대적으로 많은 것으로 조사되었다.

<표 12-4> 소유역별 인구·가축사육 현황(1999년)

소유역	인구	한우	육우	유우	돼지	사슴	가금
HP#2	6,499	462	89	1,102	1,150	40	166
HP#5	5,071	361	84	1,019	1,150	40	162
HP#6	2,298	16	0	540	1,045	20	24
HP#7	882	32	84	271	0	15	132
HP#12	630	8	84	243	0	0	132
HP#14	481	0	84	243	0	0	131

<그림 12-1>은 HP#6 소유역에 있는 우사의 한 형태를 보여주고 있으며, <그림 12-2>는 돈사의 형태와 폐수 집수 처리 시설을 보여 주고 있다.



(그림 12-1) 시험유역내 우사의 형태



(그림 12-2) 시험유역내 돈사의 형태와 폐수 집수 처리 시설

산업계 현황은 봉담면과 팔탄면 면사무소의 소장자료를 이용하여 조사하였으며, 폐수 배출량은 화성군 상하수도 사업소의 내부자료를 이용하여 조사하였다. 대상유

역내의 사업체를 식당, 섬유가공업, 식품가공업, 제조업 등으로 재분류하였으며, <표 12-5>는 HP#6 소유역의 산업계 현황을 보여주고 있으며, 식당 18개소, 제조업 18개소, 식품가공업 2개소로 분류되었다. 본 연구에서는 제조업의 경우 종업원수 5인 이하의 영세 업체는 제외하였다. 제조업의 경우 대부분 소규모 영세업체로 폐수배출량, 용수량 등의 자료를 가지고 있지 않았으며, 자체 관정을 개발하여 사용하고 있었다. 본 연구에서는 AGNPS 모형의 측사가 아닌 경우의 점원조건 (Nonfeedlot)에 대한 입력변수로 화성군 상하수도 사업소의 수도사용량 자료와 장 (1994)의 연구(<표 12-6>)를 이용하여 비슷한 업종과 종업원수를 이용하여 폐수배출량을 추정하여 사용하였다. 한편, 화성군 수도사용량 자료에 의하면 HP#6 소유역의 경우 총 14군데에 설치 되어있으며, 식당의 경우 월 68~347 ton을 사용하고 있으며, 수도를 설치 한 후 자체 관정을 사용하여 수도를 사용하지 않는 곳 도 있었다. 또한, 식당에서의 종업원수당 발생원단위는 일본 문헌을 참고하였으며, <표 12-7>과 같다.

<표 12-5> 산업계 분류 (HP#6)

분류	수
식품가공업	2
섬유가공업	-
식당	18
기타제조업	18

<표 12-6> 산업계로부터의 폐수발생 원단위

구분	T-N	T-P
	g/m ³ /day	
식품가공업	15.86	7.34
섬유가공업	5.69	3.45
기타제조업	35.4	11.47

<표 12-7> 종업원수당 발생원단위

구분	T-N	T-P
	g/head/day	
식당	0.5	0.08

토지이용으로부터 발생하는 비점원오염의 경우, 제3장에서 조사된 소유역별 토지 이용현황 자료를 이용하였으며, 비점오염원의 배출부하량은 발생부하량의 1/4에 해당한다고 제시한 환경부 기준을 적용하여 산정하였다.

3. 원단위법을 이용한 오염부하량 추정

환경부에서 제시한 원단위 기준과 시험유역내의 오염원 현황자료로부터 소유역별 오염부하량을 추정하였다. <표 12-8>과 <표 12-9>는 생활계와 축산계로부터 발생한 TN 과 TP의 오염부하량을 소유역별로 정리하여 보여주고 있다. TN의 경우 상대적으로 인구에 의한 생활계 부하가 큰 비중을 차지하고 있음을 보여주고 있으며, TP의 경우도 TN과 유사한 경향을 나타내고 있다.

<표 12-8> 생활계, 축산계 TN 부하량 (kg/일)

TN	인구부하	한우	유우	돼지	사슴	가금
HP#2	78.8	1.69	4.33	0.59	0.004	0.01
HP#5	61.4	1.37	4.01	0.59	0.004	0.01
HP#6	27.8	0.05	2.12	0.54	0.002	0.00
HP#7	10.7	0.36	1.07	0.00	0.002	0.01
HP#12	7.6	0.28	0.96	0.00	0.000	0.01
HP#14	5.8	0.26	0.96	0.00	0.000	0.01

<표 12-9> 생활계, 축산계 TP 부하량 (kg/일)

TP	인구부하	한우	유우	돼지	사슴	가금
HP#2	9.2	0.22	0.64	0.13	0.001	0.00
HP#5	7.2	0.18	0.59	0.13	0.001	0.00
HP#6	3.2	0.01	0.31	0.12	0.000	0.00
HP#7	1.2	0.05	0.16	0.00	0.000	0.00
HP#12	0.9	0.04	0.14	0.00	0.000	0.00
HP#14	0.7	0.03	0.14	0.00	0.000	0.00

<표 12-10>과 <표 12-11>은 토지이용으로부터 발생하는 비점오염계 TN과 TP의 오염부하량을 소유역별로 정리하여 보여주고 있다. TN의 경우 논과 산림에서 발생하는 오염부하량이 상대적으로 큰 비중을 차지하고 있으며, HP#2 소유역의 경우 논 9.99 kg/일, 밭 2.81kg/일, 산림 9.22kg/일로 나타났다. TP의 경우도 TN과 유사한 경향을 보였으며, HP#2 소유역의 경우 논 0.93kg/일, 밭 0.07kg/일, 산림 0.59kg/일로 나타났다.

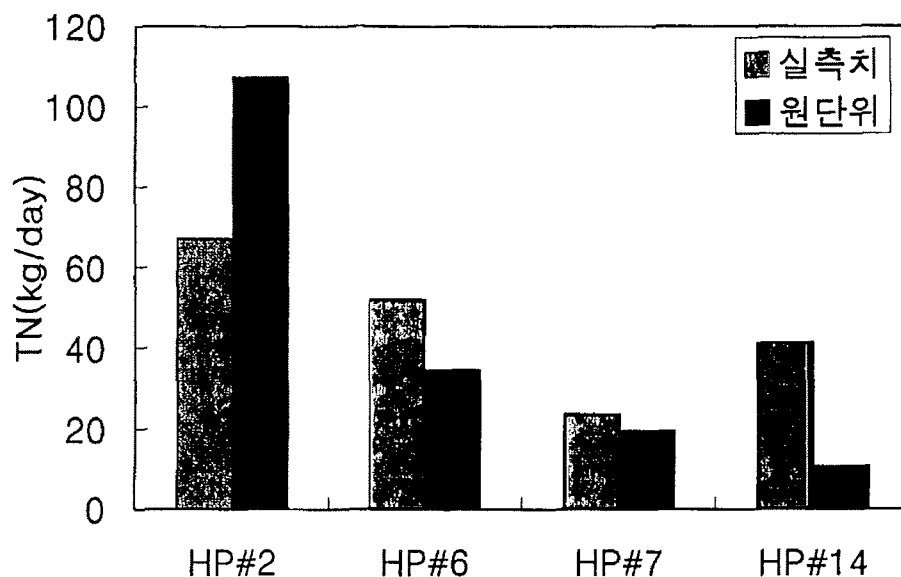
<표 12-10> 비점오염계 TN 부하량 (kg/일)

TN	논	밭	산림	기타
HP#2	9.99	2.81	9.22	0.04
HP#5	7.16	1.89	7.96	0.03
HP#6	1.78	0.94	1.32	0.00
HP#7	2.61	0.56	4.41	0.01
HP#12	1.70	0.30	3.16	0.01
HP#14	1.34	0.14	2.19	0.00

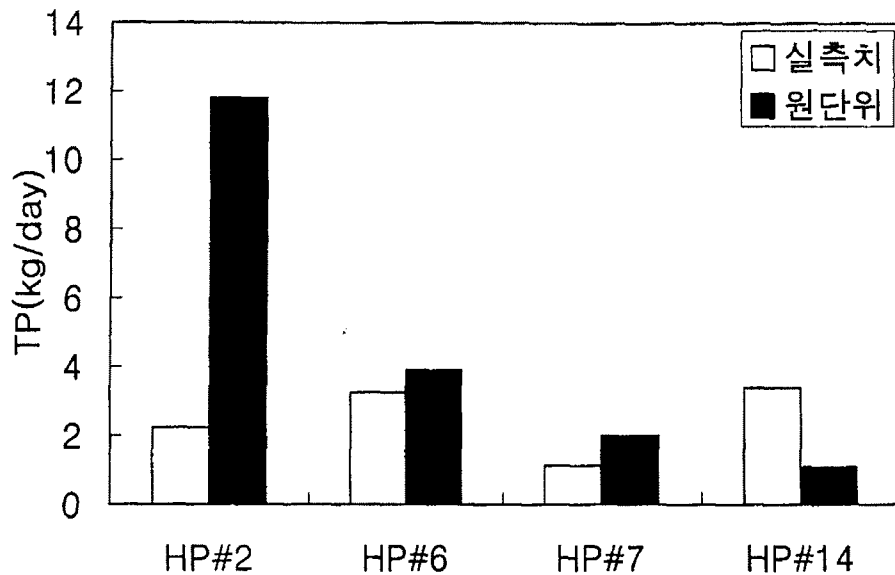
<표 12-11> 비점오염계 TP 부하량 (kg/일)

TP	논	밭	산림	기타
HP#2	0.93	0.07	0.59	0.02
HP#5	0.67	0.05	0.51	0.02
HP#6	0.17	0.02	0.08	0.00
HP#7	0.24	0.01	0.28	0.01
HP#12	0.16	0.01	0.20	0.00
HP#14	0.13	0.00	0.14	0.00

원단위법을 이용해 추정한 오염부하량의 결과를 제 4 장에서 산정한 소유역별 오염부하량과 비교하였다. (그림 12-3)과 (그림 12-4)는 각각 TN과 TP에 대한 결과를 보여주고 있다.



(그림 12-3) 소유역별 실측치와 원단위 비교 (TN)



(그림 12-4) 소유역별 실측치와 원단위 비교 (TP)

(그림 12-3)과 (그림 12-4)에서 발안저수지 하단의 HP#2 소유역의 경우 모두 실측치에 비해 원단위로 계산한 값이 크게 나타났는데, 이는 저수지에서의 저류효과로 인해 오염원이 감소되었기 때문인 것으로 추정된다. 이러한 저수지에서의 저류효과로 기천저수지 하단에 위치한 HP#7 소유역에서도 저수지 상단에 위치한 HP#6, HP#14 소유역에 비해 원단위로 계산한 값이 상대적으로 크게 나타나고 있다. HP#14 소유역의 경우 실측치가 원단위로 계산한 값에 비해 크게 나타나고 있는데, 이는 원단위에서 고려하지 못하는 구역내의 공사구간에서 발생하는 오염원 때문인 것으로 추정된다. HP#6, HP#14 소유역의 경우 구역면적에 비해 오염부하량이 높게 나타나고 있는데, 이는 인구밀도가 높고 가축사육 두수가 다른 소유역에 비해 상대적으로 많기 때문인 것으로 풀이된다.

제 3 절 채수빈도를 고려한 오염부하량 산정

1. 개론

농업유역의 주요 오염 물질은 유사량과 비료물질, 농약성분 등이며, 그밖에도 생물학적 산소요구량 등 수질 기준에 적용하는 물질도 중요하다. 그런데 기존 수질 측정에서 다양한 수질 성분자료를 분석하고 있으므로, 농업유역의 특성에 부합되는 영양물질을 위주로 조사하는 것이 보통이다.

농업유역과 같은 소규모 하천은 대규모 하천에 비해 기상변화에 따라서 유량과 수질이 변화형태가 다양하기 때문에 채수빈도를 적절하게 설정하여야 올바른 수질 상태를 파악할 수 있다 (Sanders and Adrian, 1978). 또한, 오염부하량의 정량적인 해석에 있어서, 채수빈도는 매우 중요한 고려사항으로서, 수질 모니터링의 운용 비용중에 많은 비율이 채수빈도와 직접적으로 관련이 있으며, 오염물질은 수체로 유입되는 경로가 다양하고, 수체 내에서의 오염물질의 거동이 매우 복잡한 요인들로부터 지속적으로 영향을 받으므로, 대상 수체의 특징을 적절히 나타내주지 못하는 수질항목들에 대한 자료라면 유역의 수질에 대한 잘못된 정보를 제공하게 된다. 따라서, 신뢰성 있는 수질자료의 제공을 위해서 수질 측정위치의 선정, 측정횟수, 측정되는 수질 변수의 요인들을 고려하여야 할 것이다 (남궁규철, 1992).

본 연구의 목적은 소하천에서의 수질오염부하량을 정량적으로 해석하기 위하여, 수문, 수질자료를 수집·분석하고, 채수빈도를 고려한 오염부하량과 유출량을 고려한 평균농도를 산정하고, 발생원단위와 배출원단위에 의한 오염부하량을 계산하여 그 결과를 고찰하는 데 있다.

2. 시험유역 및 수문, 수질 자료

본 연구의 시험유역으로 경기도 화성군 발안 및 팔탄면 소재 발안저수지와 기천저수지 유역의 소유역 중에서 HP#6을 선정하였다. 발안지 유역은 1996년부터 서울대 농공학과에서 수문/수질관측을 실시하고 있으며 유역면적 26.5km^2 로 산간지, 중산간지, 평탄지, 취락지 등 다양한 토지이용상태를 보이고 있으며, 본 연구의 시험소유역인 HP#6은 유역면적 4.1km^2 로 발안저수지 상류에 위치하는 중산간지로서 농경지와 취락지를 포함하고 있다.

시험유역의 강수-유출 특성 분석과 오염원의 정량적 해석을 위해 HP#6 소유역의 물리적 특성, 토양, 토지이용상태 등의 수문특성을 조사하였다.

HP#6 소유역의 수문특성으로서 형상계수는 1.55, 유로장은 1.63m, 최대기복량은 246m, 기복량비는 0.15, 하천평균경사는 0.018, 하천빈도는 $0.97 \text{ 개}/\text{km}^2$ 등의 값을 나타냈다.

유역의 토양조사는 1/25,000 정밀토양도와 1/50,000 개략토양도를 이용하여 소유역별 토양분류를 실시하고, 그 배수특성의 속성에 따라 수문학적 토양군으로 분류하였다. HP#6 소유역은 A, B군이 각각 49.7%, 14.6% 등으로 전체의 약 64%를 차지하였고, C, D군이 각각 31.8%, 3.9%의 값을 보였다.

시험유역의 토지이용상태를 토지이용도와 행정조사 결과를 이용하여 산림, 논, 밭, 기타 등으로 구분하였으며, 산림의 면적이 전체 면적의 58.1%, 논이 26.3%, 밭이 9.6%, 기타가 6.1%로서 산림의 비율이 상대적으로 높아 중산간지의 특징을 나타냈다.

시험유역의 수문계측망 및 수문, 수질 자료는 앞서 설명한 제3장과 제4장에서 설명한 바와 같다.

3. 오염부하량 및 유량 평균농도 산정 방법

시료채취방법에는 일정기간에 현장을 방문하여 채수를 하는 고정빈도채수(fixed-frequency -sampling, FFS)와 자동채수기를 이용하여 하천수위변화를 고려하여 연속적으로 채수하는 실시간채수(real-time sampling) 등이 있다. 본 연구에

서는 고정빈도채수에 의한 자료를 중심으로 실시간 연속채취 자료를 이용하여 오염 부하량 및 평균농도를 산정하였다.

유사량은 수위와 부유물 농도를 회귀분석하여 구하였으며, 오염부하량은 식 (12-1)에 나타낸 비율추정법 (ratio estimator)을 이용하여 산정하였다.

$$\bar{L} = \bar{Q} \frac{\bar{l}}{\bar{q}} = \bar{Q} \frac{\sum_{i=1}^n c_i q_i}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad (12-1)$$

여기서, \bar{L} 은 평균 오염부하량, \bar{Q} 는 평균 유출량, \bar{l} 은 평균 채수부하량, 그리고 c_i 와 q_i 는 각각 i 기간의 수질농도와 유출량이다.

유출량을 고려한 평균농도는 식 (12-2)와 같다.

$$C_f = \frac{L}{\sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^m q_j t_j \right]_i} \quad (12-2)$$

여기서, C_f 는 평균농도이다.

가. 유사량

시험유역의 유량과 부유물 농도의 관계는 회귀분석을 시도하였다. 유량-부유물 농도의 관계를 전대수지에 표시하여 본 결과, 부유물 농도는 유량과 지수적 증가를 나타내고 있었기 때문에 식 (4)을 기본 모델로 하여 측정별 상수와 지수를 구하였다.

$$S = c Q^{e_1} \quad (12-3)$$

여기서, S = 부유물 농도 (mg/l), Q = 유량 (m^3/s), 그리고 c 와 e_1 = 상수와 지수이다.

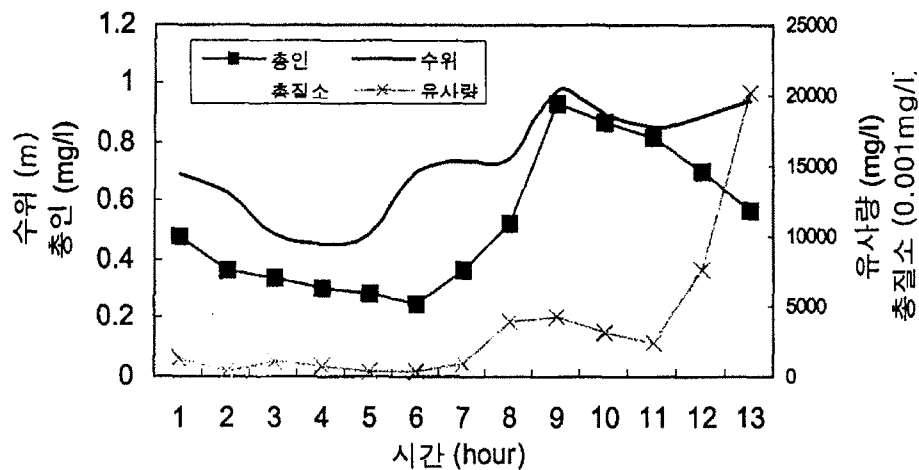
나. 총질소

시험유역의 유량과 총질소와의 변화를 도시한 결과, 유량의 변화와 총질소와의 농도는 뚜렷한 경향이 없었으며, 선형과 지수함수로서 표시하도록 하는 회귀분석을 시도하였으나, 상관성이 나타나지 않았다. 또한, 자동시료채수기에 의한 실시간 채수를 실시하여 유량의 변화에 따른 총질소 농도를 고찰하였으나 경향성이 나타나지

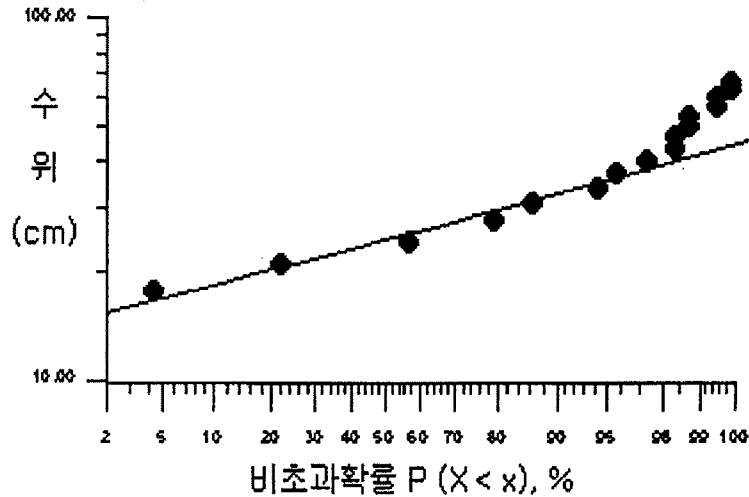
않았다. 따라서, 오염부하량의 산정은 시료의 채수간격을 고려하여 시료가 대표하는 시간간격을 결정하고, 그 시간간격 동안의 유출량과 측정농도를 이용하여 산정하였다.

다. 총인

시험유역의 유량과 총인의 변화에 대해 회귀분석을 실시한 결과, 상관성이 나타나지 않았으나, (그림 12-5)에서와 같이 1998년 6월 25일 10시 30분 부터 30분 간격으로 실시간 채수를 한 결과, 유량과 총인의 농도가 유사한 경향을 보였다. 따라서, (그림 12-6)에서와 같이, 수위에 대한 비초과 확률을 계산한 후, 유출량을 계급으로 구분하여 계층화하였으며, 실시간 채수에 의해 분석된 농도를 근간으로 계층화된 유량의 대표농도를 결정하여 오염부하량을 계산하였다.



(그림 12-5) HP#6 측정점의 수위와 실시간 오염부하 관계



(그림 12-6) HP#6 측점 유량의 비초과 확률

라. 오염 발생 및 배출부하량

유역에서의 오염발생 및 배출부하량은 오염원별로 발생 및 배출 원단위를 적용하여 산출하였다. 유역의 오염배출부하량을 산정하기 위해서 오염원 배출 특성을 조사하고, 배출원단위 자료를 이용하여야 한다.

배출부하량 산정시, 생활잡배수의 배출부하량은 생활하수 처리시설이 없는 것으로 보고, 발생부하량 전량이 하천으로 배출되는 것으로 산정하였고, 분뇨의 경우는 가정용 단독정화조의 부하제거율인 총질소 7%, 총인 15%을 고려하여 계산하였다.

가축에 의한 배출부하량은 환경부 자료를 이용하여 계산하였으며, 토지이용에 따른 배출부하량은 발생부하량 전량이 배출되는 것으로 가정하여 계산하였다.

4. 오염부하량 및 유량 평균농도 산정 결과

가. 수문, 수질 자료

본 연구의 수문, 수질 자료는 (그림 12-7)에서와 같이 1996년도 4월 1일부터 10월 26일까지 자료와 1997년도 전 기간에 대한 HP#6 측점의 자료를 이용하였다.

수문분석을 실시한 결과, 1996년도의 자료기간에 대한 강수량은 734 mm, 유출율은 33%였고, 1997년의 자료기간에 대해서는 강수량이 1228 mm, 유출율이 44%였

다.

수질분석은 수질공정시험법에 제시된 방법에 의해 실시하였다. 시기별 유사량은 강우시에 높게 나타났으며, 최대값은 2307 mg/l, 최소값은 1.0 mg/l, 평균은 190.5 mg/l, 표준편차는 519.5 mg/l의 값을 나타냈다. 총질소와 총인은 각각 최대값이 14.87 mg/l, 1.55 mg/l, 최소값은 1.16 mg/l, 0.09 mg/l, 평균은 7.54 mg/l, 0.43 mg/l 였고, 표준편차는 3.32 mg/l, 0.30 mg/l의 값을 나타내었다.

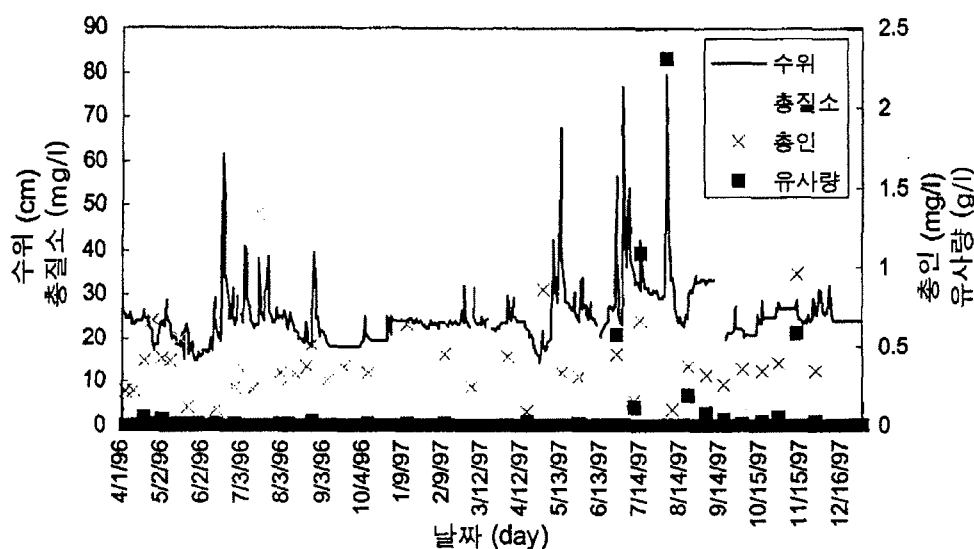
나. 오염부하량, 평균농도

시험유역의 유량과 부유물 농도의 회귀분석을 수행한 결과는 (그림 12-8)에 나타난 바와 같으며, 유량과 부유물 농도와의 관계식은 식 (12-4)와 같고, 상관계수는 0.76이었다.

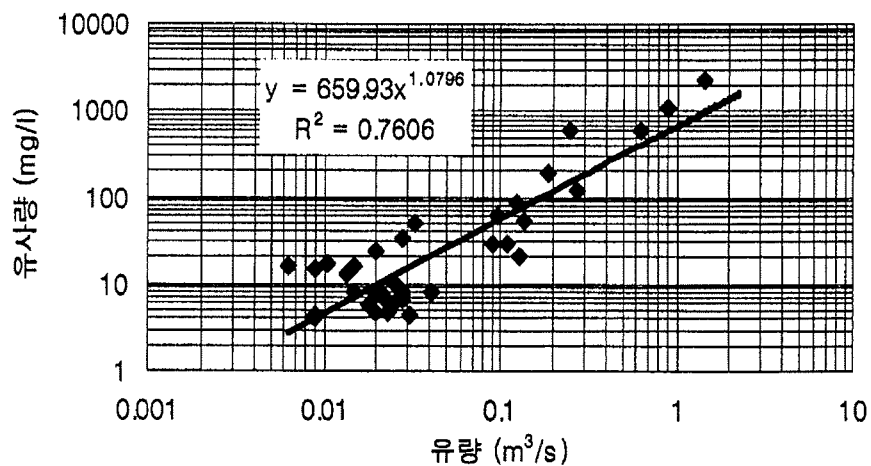
$$S = 695.93 Q^{1.0796} \quad (12-4)$$

시험유역의 유사량, 총질소, 그리고 총인의 연도별 오염부하량과 오염원단위에 의해 계산된 배출부하량과 발생부하량은 <표 12-12>에서와 같다.

유출량을 고려한 평균농도는 <표 12-13>에서와 같았으며, 유사량의 경우는 비교적 큰 값을 보였고, 총질소와 총인은 대상기간에 측정된 농도의 평균값과 비슷한 값을 보였다.



(그림 12-7) HP#6 측정점의 시기별 수위-수질 변화



(그림 12-8) HP#6 측정점의 유량-유사량 관계

<표 12-12> HP#6 측정점의 오염배출부하량과 발생부하량의 비교 (단위; kg/day)

구 분	1996년	1997년	발생부하량	배출부하량
유사량	1385.45	4556.82	1673.15	35.20
총질소	35.44	38.30	60.71	32.16
총 인	1.75	2.39	74.30	4.18

<표 12-13> HP#6 측정점의 유출량을 고려한 평균농도 (단위; mg/l)

구 분	유사량	총질소	총 인
1996년	379.10	7.32	0.36
1997년	709.42	5.96	0.37

제 4 절 유역비점원오염 추정 모형

1. 개론

비점원오염은 농경지에서 강우에 따른 유출수와 더불어 배출되는 토사와 질소나 인과 같은 영양염류 등으로 인한 수계오염을 들 수 있다. 도로나 포장된 불투수층이 대부분을 차지하는 도시지역에서는 표면에 축적되어 있는 각종 분진이나 오물 등이 강우시 지표수와 더불어 씻겨 하천 등으로 유입된다. 이와 같이 비점원오염은 강우시 유출 현상과 밀접한 관련을 맺고 있다(권 등, 1998).

따라서, 유역내의 오염총량은 그 총량이 과소 평가되는 것을 방지하기 위해 강우시 유출 부하량 산정이 필요하며, 강우시 유출 현상과 밀접한 관련을 맺고 있는 비점원오염 부하량 산정이 중요하다.

강우시 유출 부하량은 직접 유출에 의한 부하량과 기저 유출에 의한 부하량으로 구분되며, 이 중 폭우사상 모형으로 추정 가능한 부분은 직접 유출에 의한 부하량이며, 농업유역의 비점원오염 부하량의 추정을 위한 모형 중 폭우사상 모형으로는 ANSWERS, CREAMS, AGNPS 등이 있다.

AGNPS 모형은 농업유역으로부터의 폭우사상에 의한 유출, 유사, 총인, 총질소 및 COD 성분 등의 추정을 위해 미국 농무성의 농업연구소(agricultural research service)와 미네소타 환경보전국(Minnesota pollution control agency) 및 토양보전국(soil conservation service)에서 공동으로 개발한 모형으로 수 ha에서 20,000ha의 유역에 적용이 가능한 분포형 매개변수 모형이다.

AGNPS 모형은 각 지점 요소별 지형, 토양, 토지이용상태, 하천, 비료 및 농약의 살포정도, 기타 점원 오염 부하량 등의 정보를 모형의 입력 변수로 요구하고 있다. 이와 같은 정보는 지형자료, 토양도, 토지이용자료, 농업조사자료 및 기타 오염원조사자료 등으로부터 구하여야 한다. 이와 같은 공간적 특성의 자료의 효율적인 수립, 관리, 분석의 방법으로 지리정보시스템의 응용이 보편화되고 있으며(Zhang 등, 1990), 현재 국내에서는 NGIS 수행으로 국가 기본도를 수치지도로 작성하고 있으며, 이를 기반으로 하여 각 분야에서 이를 이용한 공간 분석에 응용하고 있다(정 등, 1999).

본 절에서는 농업소유역에서 강우시 직접유출에 의한 오염 부하량을 추정하기 위해 GIS-AGNPS 호환모형을 개발하고 적용함으로써, 시비수준과 토지이용변화에 따른 강우시 직접유출에 의한 오염 부하량을 추정하고, 그 결과를 고찰함으로써 모형의 응용성을 평가하고자 한다.

2. AGNPS 모형

AGNPS 모형은 미국 농무성의 농업연구소(agricultural research service)와 미네소타 환경보전국 (Minnesota pollution control agency) 및 토양보전국(soil conservation service)에서 공동으로 개발한 모형으로, 수문부문, 침식부문, 유사와 화학물질의 운송부문으로 이루어져 있으며, 수 acres에서 50,000 acre 크기의 농업소유역으로부터 유출수의 수질을 추정하고 분석이 가능하도록 개발되었다.

Prato 등(1990)은 Idaho 유역에서의 토양 침식 및 비점원 오염조절을 실시하여 토양 유실량과 비점원 오염 억제 방안에 대한 연구를 실시하였다. Summer(1990) 등은 호소의 수질 변화 예측을 위해 호소에 유입되는 오염부하량을 AGNPS 모형으로 추정한 바 있다.

국내외의 연구사례는 다음과 같다.

Line 등(1997)은 GRASS-AGNPS 호환모형을 수문환경의 의사결정지원시스템인 WATERSHEDSS의 구성요소로 개발하였으며, North Carolina 지역의 계측 소유역에 총 11개 폭우사상에 대해 유출량, 유사량, 총인, 총질소를 모의하였다.

Brannan 등(1998)은 AGNPS 모형의 정확도에 영향을 미치는 격자의 크기를 지리통계적 분석(geostatistical spatial analysis)을 통하여 정하는 방법을 제시 하였고, 격자 크기에 따른 SCS 유출곡선번호의 변화에 그에 따른 유출량의 변화를 분석하였다. Parson 등(1998)은 Monte Carlo simulation을 이용하여 입력 매개 변수의 정보가 부족할 때에 나타나는 모의 결과에 대한 의사 결정 지원의 위험도에 대해 분석하였다. Perrone 등(1999)은 Quebec 소유역에서 12개의 폭우사상에 대해 유사량을 모의하고 AGNPS 모형의 적용성을 평가하였다.

김(1995)은 농촌유역에서의 폭우사상에 의한 비점원오염의 분석을 위해 지리자원

해석시스템 (geographic resources analysis support system, GRASS)과 AGNPS 모형을 연계한 GIS-AGNPS 호환 모형을 개발하여 시험유역의 실측치들에 대해 모형의 보정 및 검증을 실시하여 농업비점원오염 관리대안들에 대한 정량적 비교 및 산지개간에 의한 유출량 및 토양유실량의 영향을 분석하였다. 김(1997)은 AGNPS 모형을 이용한 농업비점원오염 해석에 관한 최근 연구 동향을 고찰하였으며, 국내 농촌유역의 적용 시 고려하여야 할 논에 대한 매개변수의 설정 및 보정에 대하여 고찰하였다. 모형의 결과에 영향을 미치는 논에 대한 인자들의 추정을 위해서는 여러 가지 입지조건에서의 연구가 절실히 요구된다고 하였다. 조(1998)는 농촌유역의 복합토지이용 특성을 고려한 GRASS-AGNPS 호환모형의 적용성을 평가하였으며, 산림지역을 비점형 격자로 처리하는 방법으로 모형을 수정하여 적용성을 분석하였다. 또한, 격자 크기에 따른 래스터화 정확도 및 GRASS-AGNPS모형의 거동을 분석하였다.

가. 수문모형

1) 유출량

수문모형에서 유출량은 SCS의 유출곡선지수법 (USDA, 1972)에 의하여 추정되는 데 다음 식과 같다.

$$RO = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (12-5)$$

여기서, RO=직접유출량 (inches), P=강우량 (inches), S=최대잠재보유수량 (inches)이다. 식 (3-1)에서의 잠재보유수량은 다음 식과 같이 정의된다.

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (12-6)$$

여기서, CN은 유출곡선지수로서 0~100의 범위의 값을 갖는 값으로 유역의 토지이용, 토양종류, 수문학적 토양조건등에 의해 결정된다.

2) 침투유량

침투유량은 두가지 방법중 사용자가 어느 하나를 선택할 수 있도록 구성되어 있는데, 식 (12-3)과 같은 CREAMS 모형에서 사용하고 있는 방법 (Smith and Williams, 1980)으로 수로를 삼각형 수로로 가정하여 침투량을 추정하는 방법과 식

(12-4)와 같이 사각형 수로로 가정하여 계산하는 TR55 방법 (USDA, 1986) 등이 있으며, 본 연구에서는 식 (12-3)의 방법을 사용하였다.

$$Q_p = 8.48A^{0.7}CS^{0.16}(RO^{0.8240.017})LW^{-0.19} \quad (12-7)$$

여기서, Q_p =첨두유량 (ft^3/s), A =유역면적 (acres), CS =하천경사 (ft/ft), RO =유출량 (inches), LW =유역주장-면적비 ($L^2/43,560A$), L =유역주장 (ft)이다.

$$Q_p = 10^{\log[C_0 + C_1(\log T_o) + C_2(\log T_o)^2]} \left[\frac{A}{640} \right] Q \quad (12-8)$$

여기서, Q_p =첨두유량 (ft^3/s), A =유역면적 ($miles^2$), Q =유출량 (inches), C_0 , C_1 , C_2 =계수이다.

나. 토양유실 모형

1) 토양유실량

토양유실량 추정에는 단일 강우사상에 적용할 수 있도록 수정된 수정 USLE (modified universal soil loss equation)공식을 사용하며, 다음 식과 같다.

$$SL = (EI)KLSCP[SSF] \quad (12-9)$$

여기서, SL =토양유실량 (ton), EI =강우에너지계수 (hundreds of foot-tonf-inch/acre-hour), K =토양침식인자, L =지형인자, C =작물피복인자, P =보전영농인자, SSF =경사보정인자이다(Wischmeier and Smith, 1978).

2) 유사운송

유역의 토양유실량은 각 셀에서 먼저 계산되고, 다시 5개의 입자 (점토, 실트, 잔골재, 조골재, 모래)로 분할되어 유사운송식에 의해 유역 출구지점까지 추적되는 데, Foster 등 (1981)과 Lane (1982) 등 이 제시한 유사운송 및 퇴적 방정식이 사용 되었으며 다음 식과 같다.

$$Q_s(x) = Q_s(o) + Q_{sl}(x/L_r) - \int_0^x D(x)wdx \quad (12-10)$$

여기서, $Q_s(x)$ =유출부 유사량, $Q_s(o)$ =유입부 유사량, Q_{sl} =측면 유입 유사량, x =구간길이, $D(x)$ = x 지점의 유사퇴적량이다.

다. 영양물질

영양물질의 운송에 사용된 방법은 CREAMS (Frere et al., 1980)과 축산 평가 모형 (Young 등., 1982)을 채택하였으며, 토양 조성에 의한 효과를 반영하도록 수정되었다.

모형의 영양물질은 유출수 중의 용존상태의 영양물질 (Nut_{sol})와 유사에 부착된 상태의 영양물질 (Nut_{sed})의 합으로 각각 다음 식과 같다.

$$Nut_{sed} = (Nut_f)Q_s(x)E_r \quad (12-11)$$

$$Nut_{sol} = C_{nut}Nut_{ext}Q \quad (12-12)$$

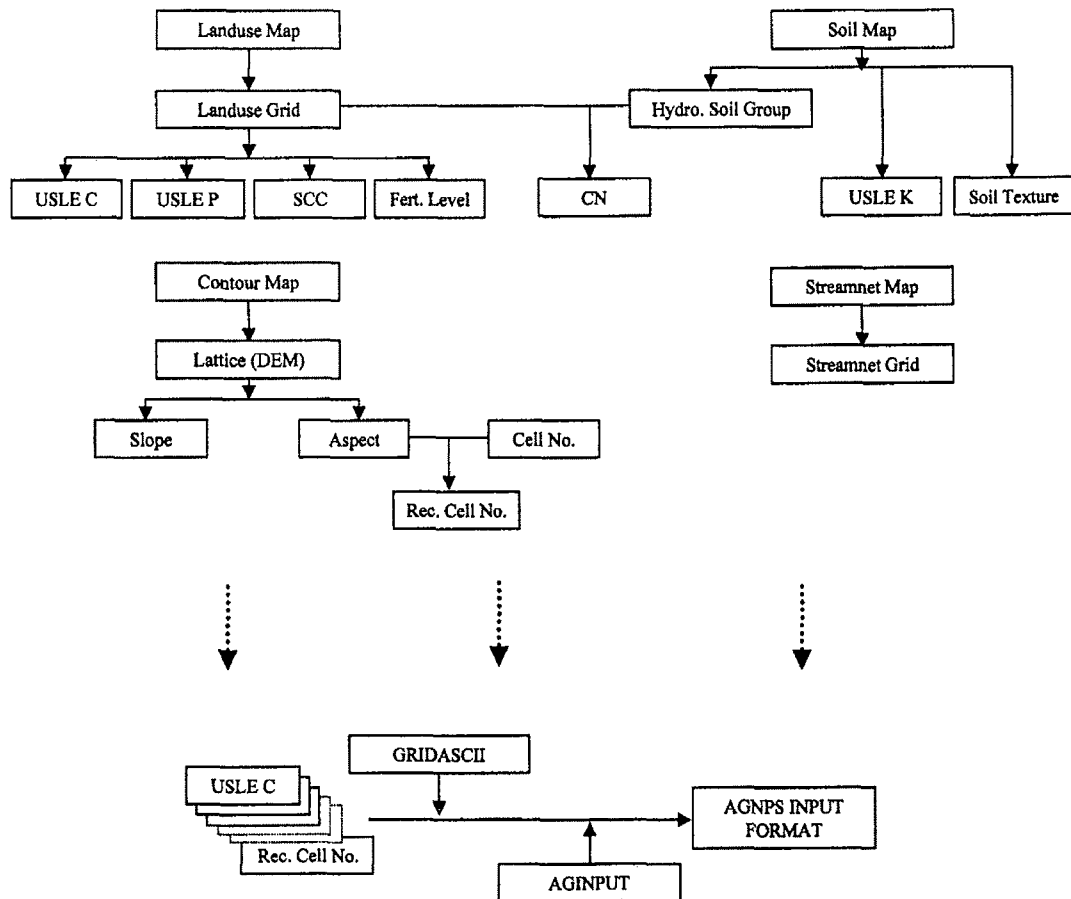
여기서, Nut_f =토양중 영양물질 함량, E_r =고형계수, $Q_s(x)$ =유사량, Nut_{ext} =용탈계수, C_{nut} =유출기간 중 표토에서의 용존 영양물질의 평균농도, Q =유출량이다.

3. ARC/INFO-AGNPS 호환모형

GIS-NPS 호환모형을 개발하기 위한 GIS 지형자료의 구축은 제8장에서 소개한 바와 같다.

ARC/INFO-AGNPS 입력시스템은 AGNPS 모형의 입력 매개변수를 Arc/Info의 AML (arc macro language)과 C 언어를 이용하여 자동으로 생성하는 프로그램인 AGINPUT 모형을 구성하였다. AGINPUT 모형은 AML을 이용하여 GIS 자료를 아스키 코드로 변환하고, 이를 이용하여 AGNPS 입력 형식으로 변환하도록 구성하였다.

(그림 12-9)와 같이 먼저, 벡터자료로 구축된 각각의 주제도를 격자형 자료 (grid)로 변환한 후, 그리드 자료를 아스키 코드로 변환하였으며, 이를 AGINPUT 모형을 이용하여 AGNPS 입력형식으로 변환하였다.



(그림 12-9) ARC/INFO-AGNPS 입력시스템의 모식도

4. 모형의 입력자료 구축

가. 대상지구 수문자료

본 연구에서는 제3장에서와 같이, 경기도 화성군 봉담면과 팔탄면에 위치고 있는 발안유역을 대상유역으로 선정하였다.

AGNPS 모형에서 강우자료는 입력변수 중 유역자료에 해당하는 자료로서 일 강우량과 강우침식인자 (EI_{30})값 등이 있으며, 본 연구에서는 결측자료가 많은 1998년의 자료를 제외한 1996년, 1997년, 1999년, 2000년 강우자료를 이용하였다. 대상강우는 AMCⅡ조건에서 유역의 평균 CN값은 78로, 이 CN 값에서 이론적으로 유출이 생기는 14.3mm이상의 강우를 선정하였다.

강우침식인자는 30분 강우강도와 강우에너지로부터 구하는 값으로, 1996년 과

1997년 강우침식인자는 화성군 농촌지도소의 강우계로부터 1시간 간격으로 계측된 자료로부터 조 (1998)의 연구결과를 이용하여 구하였고, 1999년 과 2000년 강우침식인자는 화성군 팔탄면에 설치된 강우계를 이용하여 30분 최대강우강도로부터 구하였으며, 그 결과는 <표 12-14>와 같다.

$$EI_{30} = 1.5834 EI_{60} \quad (12-13)$$

시험유역의 유량은 제3장에서와 소개한 바와 같이, 소유역 출구의 수위와 수위-유량관계식으로부터 산정하였으며, 1996년과 1997년 유량은 자기수위계자료를 이용하였고, 1999년과 2000년 유량은 압력식 수위계를 이용하였다. 수위-유량 관계식은 제3장에서와 같다.

나. 유출량 및 침투유량

강우사상에 의한 유역의 직접유출량은 유역의 총유출량 중에서 강우사상에 의해 발생된 유량을 분리하여야 하는데, 본 연구에서는 경사급변점법을 사용하였다. 이 방법은 수문곡선의 감수부 유량을 반대수지에 그리면 3개의 직선으로 나타나는 경우가 많음을 이용하여 Barnes(1939)에 의해 고안된 방법이다. 처음과 두 번째의 변곡점이 각각 지표면유출이 끝나는 점과 중간유출이 끝나고 지하수유출이 시작되는 점이 되므로, 직접유출은 수문곡선의 상승부와 두 번째 변곡점을 연결하였을 경우 위 부분에 해당된다. 이 방법은 분리방법의 주관성에 의해서 분석자에 따라 변이가 높지만 (Anderson and Burt, 1980) 홍수수문곡선을 분석하는데 유용한 방법이다 (Fedora and Beschta, 1989). HP#6에서의 강우사상별 직접유출량과 침투유량은 <표 12-15>와 같다.

<표 12-14> 자료기간에 대한 강우량과 EI₃₀

date	EI ₃₀ MJ · mm/ha · h	rainfall (mm)	AMC	date	EI ₃₀ MJ · mm/ha · h	rainfall (mm)	AMC
960329	151.65	32.00	1	990523	8.34	22.61	2
960610	93.27	33.00	1	990616	19.91	27.18	1
960617	1305.09	181.50	1	990623	26.38	28.70	1
960624	61.44	20.00	1	990709	370.36	62.74	1
960704	233.00	53.50	1	990801	248.15	58.67	3
960715	130.88	39.00	1	990802	802.49	192.02	3
960722	97.69	21.50	1	990803	325.42	62.99	3
960728	190.96	33.00	1	990905	106.20	49.28	1
960827	85.95	30.50	1	990909	31.32	23.88	3
961006	18.72	22.50	1	990918	9.36	16.26	1
961024	25.02	26.50	1	990919	229.43	61.72	1
970225	20.42	16.50	1	990920	353.34	147.32	3
970228	8.68	24.00	1	990921	257.00	85.09	3
970306	20.59	17.50	1	990923	53.27	45.97	3
970401	16.85	24.50	1	991001	34.04	38.86	1
970406	17.19	18.00	1	991010	34.55	30.23	1
970507	292.06	63.50	1	991031	7.32	21.84	1
970512	302.11	97.50	1	000526	7.49	23.37	1
970523	69.27	20.00	1	000610	1272.93	63.50	1
970529	24.68	16.50	1	000626	97.69	44.70	1
970530	62.80	18.50	1	000629	694.08	53.85	2
970625	828.19	108.50	1	000711	36.93	18.03	1
970630	1035.84	135.50	1	000722	2569.85	303.53	1
970704	130.20	49.50	3	000804	376.65	58.67	1
970715	174.11	45.50	1	000820	323.21	87.88	2
970803	1711.02	108.50	1	000823	45.95	44.70	3
970804	1520.23	122.00	3	000825	126.80	65.28	3
970926	4.43	15.50	1	000826	269.60	79.76	3
971013	45.44	15.00	1	000827	88.84	29.46	3
971112	40.51	15.50	1	000831	30.98	29.46	3
971128	52.25	24.50	1	000914	27.57	37.85	1
971206	32.68	17.50	1	000915	163.56	68.83	2
990503	40.85	47.50	1	000916	140.59	83.82	3
990518	27.06	38.10	1				

<표 12-15> 유출량과 첨두유량의 실측치와 모의치의 비교

date	El ₃₀ MJ · mm/ha · h	rainfall (mm)	Runoff (mm)	Peak (m ³ /s)	AMC
960329	151.65	32.00	2.25	0.17	1
960610	93.27	33.00	1.39	0.13	1
960617	1305.09	181.50	86.94	29.05	1
960624	61.44	20.00	2.27	0.15	1
960704	233.00	53.50	17.56	4.93	1
960715	130.88	39.00	6.71	2.23	1
960722	97.69	21.50	4.66	3.12	1
960728	190.96	33.00	6.35	0.36	1
960827	85.95	30.50	5.34	1.34	1
961006	18.72	22.50	2.25	0.27	1
961024	25.02	26.50	3.14	0.31	1
970225	20.42	16.50	0.39	0.03	1
970228	8.68	24.00	2.21	0.41	1
970306	20.59	17.50	1.76	0.31	1
970401	16.85	24.50	1.51	0.14	1
970406	17.19	18.00	0.80	0.15	1
970507	292.06	63.50	13.57	2.07	1
970512	302.11	97.50	38.89	4.41	1
970523	69.27	20.00	1.28	1.09	1
970529	24.68	16.50	2.25	1.50	1
970530	62.80	18.50	2.55	1.74	1
970625	828.19	108.50	47.32	14.19	1
970630	1035.84	135.50	58.77	26.99	1
970704	130.20	49.50	16.11	4.64	3
970715	174.11	45.50	11.02	2.94	1
970803	1711.02	108.50	60.00	22.43	1
970804	1520.23	122.00	85.90	30.36	3
970926	4.43	15.50	2.56	0.35	1
971013	45.44	15.00	0.77	0.13	1
971112	40.51	15.50	0.59	0.13	1
971128	52.25	24.50	1.37	0.10	1
971206	32.68	17.50	3.80	0.18	1
990503	40.85	47.50	2.77	0.33	1
990518	27.06	38.10	4.29	0.55	1

<표 12-15> continued

date	El ₃₀ MJ · mm/ha · h	rainfall (mm)	Runoff (mm)	Peak (m ³ /s)	AMC
990523	8.34	22.61	1.18	0.36	2
990616	19.91	27.18	0.96	0.22	1
990623	26.38	28.70	2.58	0.41	1
990709	370.36	62.74	8.13	2.99	1
990801	248.15	58.67	17.59	3.26	3
990802	802.49	192.02	169.78	21.01	3
990803	325.42	62.99	39.83	30.29	3
990905	106.20	49.28	5.16	1.52	1
990909	31.32	23.88	2.13	0.63	3
990918	9.36	16.26	0.87	0.26	1
990919	229.43	61.72	14.73	6.52	1
990920	353.34	147.32	95.00	14.80	3
990921	257.00	85.09	40.39	14.29	3
990923	53.27	45.97	9.93	1.44	3
991001	34.04	38.86	3.56	0.50	1
991010	34.55	30.23	2.27	0.63	1
991031	7.32	21.84	0.83	0.14	1
000526	7.49	23.37	1.53	0.1	1
000610	1272.93	63.50	3.95	3.49	1
000626	97.69	44.70	7.29	1.31	1
000629	694.08	53.85	14.56	10.56	2
000711	36.93	18.03	1.16	0.38	1
000722	2569.85	303.53	187.94	47.46	1
000804	376.65	58.67	21.79	10.98	1
000820	323.21	87.88	23.70	9.24	2
000823	45.95	44.70	32.31	2.01	3
000825	126.80	65.28	29.37	6.21	3
000826	269.60	79.76	42.72	12.31	3
000827	88.84	29.46	18.68	6.51	3
000831	30.98	29.46	4.37	1.55	3
000914	27.57	37.85	7.66	1.02	1
000915	163.56	68.83	20.04	4.55	2
000916	140.59	83.82	30.09	3.82	3

다. 오염원자료

소유역에서 수질관리를 위해서는 오염발생원의 수나 양을 정확히 파악하는 것이 무엇보다도 중요하다. 본 연구에서는 시험유역 내의 생활계, 축산계, 산업계 등으로 구분하여 해당 기관의 소장 자료와 현지 답사를 통해서 기초자료를 수집하였으며, AGNPS 모형의 입력변수로 사용하였다. 오염원자료는 제4장과, 제12장의 제2절을 참조하기 바란다.

라. 수질자료

수질자료는 제4장에서 전술한 바와 같이, 시험유역의 유사량과 영양물질은 HP#6 소유역 말단에서 1ℓ 용기를 이용하여 시료를 채취하여 수질 분석을 실시하였으며, AGNPS 모형을 1996년, 1997년, 1999년 자료로부터 보정하였고, 2000년 자료로부터 검정을 실시하였다.

마. GIS 입력자료

시험유역의 GIS 자료는 1/5,000 NGIS 수치지도와 농촌진흥청의 1/25,000 정밀토양도 (1973)를 이용하였다. 주제도는 1/5,000 NGIS 수치지도로부터 토지이용도, 수계망도, 수치표고모델등을 구축하였고, 1/25,000 정밀토양도로부터 수문학적 토양군도, 토성, USLE K인자도 등을 구축하였다.

한편, 격자형 모형인 AGNPS 모형의 입력자료로 사용하기 위해 벡터 맵으로부터 Arc/Info 의 격자형 자료인 그리드 자료를 구축하였는데, Young 등(1987)이 추천한 셀의 크기와 조 (1998)의 격자의 크기에 따른 모형의 거동 특성을 연구한 결과로부터 100m 크기로 구축하였다. 유역에서의 GIS 입력자료는 제8장을 참조하기 바란다.

1) 토지이용도

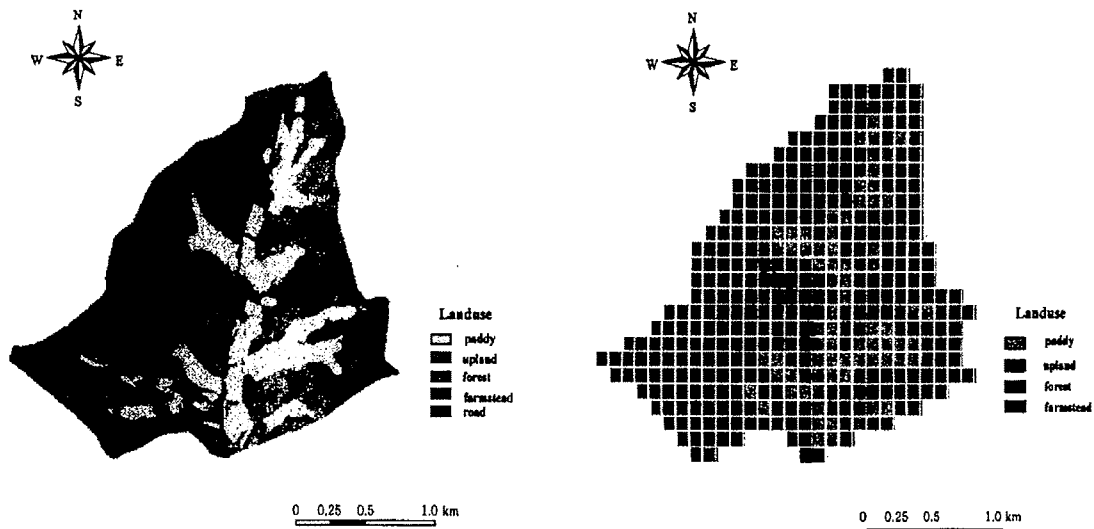
대상 소유역인 HP#6 축점의 토지이용도는 (그림 12-10)의 (a)와 같이 논, 밭, 임야, 주거지, 도로 등 5가지의 속성으로 분류하여 벡터 맵을 구축하였으며, <표 12-16>과 같이 임야가 60.8%로 가장 많은 비율을 차지하고 있으며, 논 (17.6%), 밭 (13.5%), 주거 (5.4%), 도로 (2.7%)의 순으로 나타났다.

(그림 12-10)의 (b)는 토지이용 벡터 맵으로부터 구축한 100m 격자크기의 토지이용 그리드 자료이며, 대상유역의 면적이 391.8 ha에서 390 ha로 약 0.46% 가 줄었

으며, 도로는 격자크기에 따른 영향으로 속성이 나타나지 않았다. 이는 AGNPS 모형의 입력변수에 영향을 미칠 수 있으나 비율이 상대적으로 작으므로 무시할 수 있으리라 사료된다.

2) USLE factor

한편, USLE C 인자도, USLE P 인자도, 지표상태상수 (surface condition constant), 시비수준, Manning 계수 등은 Wischmeir 등 (1978), 김 (1995), 김 (1997), 조 (1998)등의 연구결과를 참조하여 토지이용도 (그리드 자료)로부터 구축하였으며, 그 결과는 <표 12-17>과 같다.



(a) Vector map

(b) Grid

(그림 12-10) HP#6 측점의 토지이용도

<표 12-16> HP#6 측점의 토지이용상태

Landuse	Area	
	ha	%
Paddy	69.1	17.6
Upland	53.1	13.5
Forest	238.3	60.8
Farmstead	21.1	5.4
Road	10.2	2.7

<표 12-17> 토지이용상태에 따른 속성

Land use	Manning's n	USLE C	USLE P	S.C.C	Fert. level
Paddy	0.99	0.00	0.2	0.00	2
Upland	0.06	0.03	0.5	0.05	2
Forest	0.60	0.001	1.0	0.59	-
Farmstead	0.03	0.01	1.0	0.01	-
Water	0.99	0.00	0.0	0.00	-

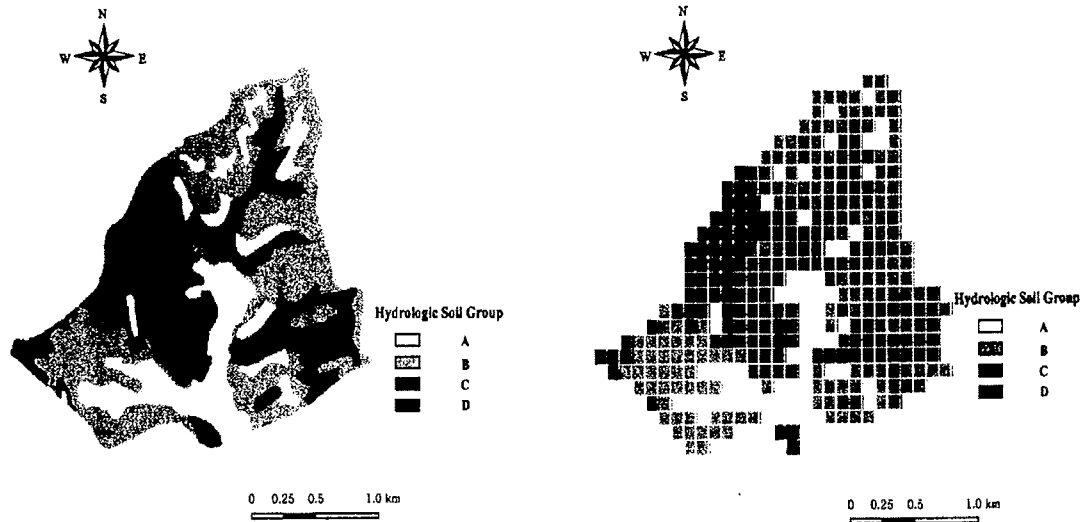
3) 토양도와 수문학적 토양군

토양도는 시험유역의 토양도는 농촌진흥청 (1973)의 정밀토양도로부터 작성하였다. 토양통 부호를 속성으로 입력한 후에 김 (1995)의 연구결과를 이용하여 USLE K 인자도를 구축하였으며, 정밀토양통 설명서와 AGNPS 매뉴얼을 이용하여 토성을 점, 미사, 모래, 물, peat 등의 5가지 속성으로 재분류 하였다.

수문학적 토양군도는 허 등 (1987)의 연구결과를 이용하여 구축하였으며, (그림 12-11)의 (a)는 벡터맵의 수문학적 토양군도를 나타낸 그림이고, (그림 12-11)의 (b)는 벡터맵으로부터 그리드 자료로 변환한 수문학적 토양군도를 나타낸 그림이다. 유역의 토양군의 분포는 <표 12-18>과 같이 B토양군이 162.9ha (41.6%)로 가장 많은 면적을 차지 하였으며, C토양군이 97.8 ha (25.0%), A토양군이 74.3ha (18.9%), D토양군이 56.8ha (14.5%) 순으로 나타났다.

<표 12-18> Hydrologic soil group of HP#6 watershed

Hydro. soil group	Area	
	ha	%
A	74.3	18.9
B	162.9	41.6
C	97.8	25.0
D	56.8	14.5



(a) Vector map

(b) Grid

(그림 12-11) HP#6 축점의 수문학적 토양군

4) 수치표고모델

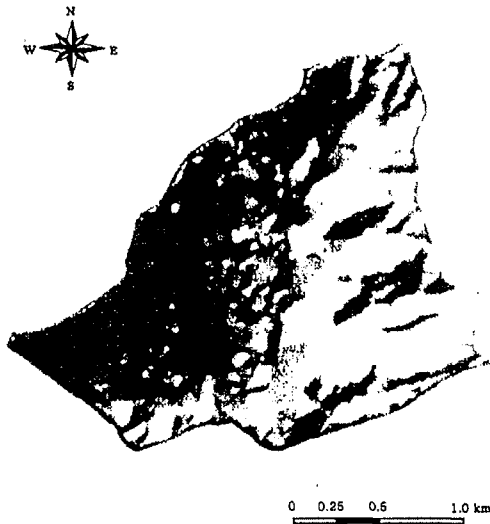
수치표고모델 (DEM)은 1/5,000 NGIS 수치지도로부터 등고선을 분리하여 등고선을 구축하고, 이로부터 Arc/Info의 수치표고모델인 Lattice (DEM)자료를 구축하였다. (그림 12-12)는 HP#6 소유역의 지형을 3차원으로 표현한 그림이며, 해상도는 5m로 정하였다.

5) 사면경사도

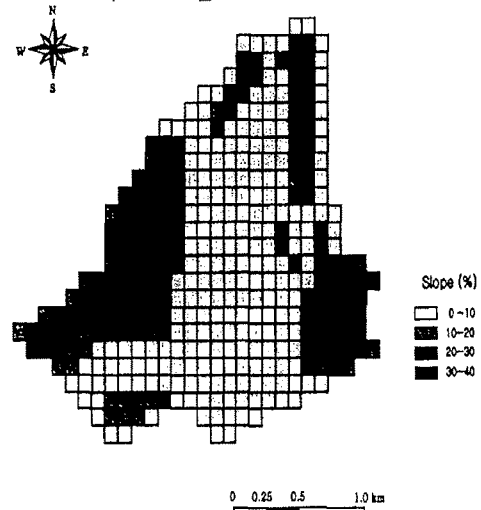
등고선도로부터 구축한 수치표고모델 (Lattice)를 이용하여 사면경사도를 구축하였으며, (그림 12-13)과 같이 주거지와 농경지가 주로 분포하고 있는 지역은 0~10 %의 경사도를 보였으며, 임야지역은 30~40 %까지의 경사도의 분포를 보였다.

6) 경사방향도

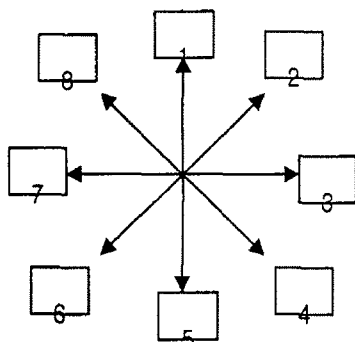
AGNPS 모형은 (그림 12-14)에서와 같이 8개의 경사방향도를 구분하여 모형의 입력변수로 사용하는데, 수치표고모델을 이용하여 경사방향도 (Aspect)를 구축하였으며, (그림 12-15)와 같이 각 경사방향을 화살표와 색으로 구분하도록 하였다



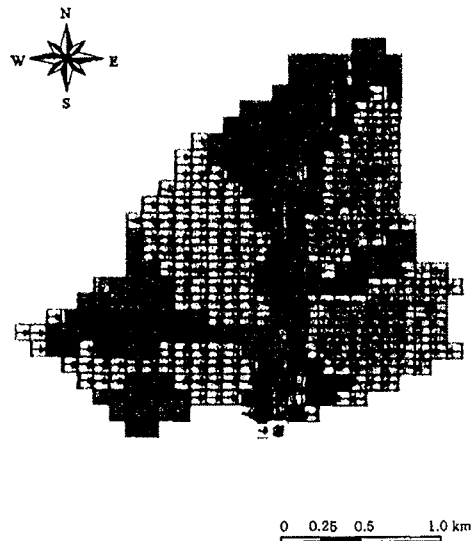
(그림 12-12) 3차원 영상



(그림 12-13) 사면경사도



(그림 12-14) 경사방향



(그림 12-15) 경사방향도

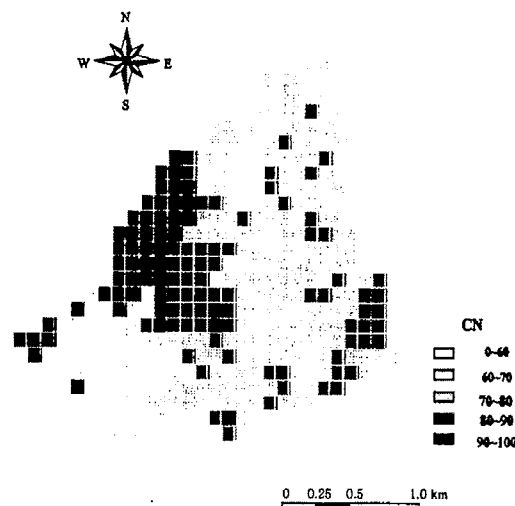
바. 유출곡선지수 산정

유출곡선지수는 토지이용도와 수문학적 토양군도를 이용하여 산정하였으며, 논에서의 AMC 결정은 5일 선행강우량보다는 초기답수심과 물꼬높이에 기인한다고 하는 임 등(1995)의 연구결과를 사용하였다. <표 12-18>는 토지이용형태별 입력 유출곡선 번호를 나타낸 것이고, (그림 12-15)는 구축된 유출곡선지수 그리드 자료이

다.

<표 12-19> 토지이용상태에 따른 유출곡선번호

Land use	Hydrologic Soil Group				Land cover, Treatment, Hydrologic Condition
	A	B	C	D	
Paddy	78	78	78	78	임 등(1995)
Upland	72	81	88	91	Row crops, Straight row, Poor
Forests	56	75	86	91	Forests, Very sparse
Farmstead	59	74	82	86	Farmstead



(그림 12-15) 유출곡선번호도

5. 오염부하량 산정

수위 결측자료가 많은 1998년을 제외한 1996년~2000년 일별 유량 자료와 수질 분석 결과를 이용하여 오염물질 부하량과 유량과의 관계식을 구하고 이로부터 연오염부하량을 산정하였으며, 강우시 직접유출에 의한 부하량을 구분하여 산정하여 AGNPS 모형의 적용성을 평가하였다.

가. 오염물질 부하량-유량 관계식

오염물질 부하량-유량 관계식을 이용하여 연오염부하량을 산정하였으며, HP#6

소유역의 오염물질별 부하량-유량관계식은 <표 12-15>에서와 같다.

오염물질별 부하량과 유량과의 관계를 살펴보면 유사량의 경우는 $SS=0.0001Q^{1.5573}$ 과 $R^2=0.9164$, T-N의 경우는 $TN=0.026Q^{0.8383}$ 과 $R^2=0.9271$, T-P의 경우는 $TP=0.0007Q^{0.9212}$ 과 $R^2=0.9332$ 로 나타났으며, 이 관계식을 이용하여 수위 결측일을 제외한 연오염부하량을 산정하였다.

<표 12-20> 부하량-유량 관계식 (HP#6)

Item	Loads-Discharge relationship	R ²
SS	$SS=0.0001Q^{1.5573}$	$R^2=0.9164$
T-N	$T-N=0.026Q^{0.8383}$	$R^2=0.9271$
T-P	$T-P=0.0007Q^{0.9212}$	$R^2=0.9332$

나. 연오염부하량 산정

오염물질의 연부하량을 부하량-유량관계식으로부터 구하였다. <표 12-16>에서와 같이 유사량과 영양물질모두 1996년에 적게 나타났는데, 이는 1996년이 다른 해에 비해 강우량이 적었기 때문으로 사료 된다.

또한, 영양물질의 경우 1997년에 특히 높게 나타나는데, 이는 <표 12-17>에서 처럼 1997년은 수위 결측일이 다른 해에 비해 적었기 때문 사료되며, 영양물질의 경우에는 1999년에 가장 높게 나타나는데, 강우에 영향을 많이 받는 경향이 있고, 1999년에는 연중 강우일이 110일로 다른 해에 비해 특히 많았기 때문으로 사료된다.

<표 12-21> 연간 오염부하량

Year	SS (ton/year)	T-N (kg/year)	T-P (kg/year)
1996	85	7,777	476
1997	299	16,475	1,089
1999	310	13,086	894
2000	218	11,229	777

<표 12-22> 자료기간에 대한 강우량과 청명일수

Year	Period	P (mm)	measured day of runoff discharge	wet day	wet day (≥13.5)
1996	3/29~12/31	792.5	274	72	15
1997	1/1~12/31	1204	350	82	24
1999	1/1~12/13	1504.2	299	104	29
2000	3/30~9/19	1253	150	60	19

연오염부하량산정시 강우시 직접 유출에 의한 오염 부하량을 구분하였으며, 대상 강우는 강우일 중 AMCⅢ 조건에서 이론적으로 유출이 생기기 시작하는 강우량인 13.5mm 이상인 강우를 선정하였다.

오염물질 부하량-유량 관계식을 이용하여 강우시 직접유출에 의한 오염부하량을 산정하였으며, <표 12-18>과 같이 SS의 경우는 강우일이 많은 1999년이 가장 많았으며, 영양물질의 경우는 수위계측일이 많은 1997년이 가장 높았다. SS의 경우에는 강우시에 전체 부하량의 61~87 %, T-N의 경우 28~58 %, T-P의 경우 34~63 % 정도를 차지하였으며, 이 경우에도 강우일이 많은 1999년이 대체로 높은 비율을 나타냈으나, 2000년의 경우 비율이 높게 나타난 것은 결측일이 상대적으로 많았기 때문인 것으로 사료된다.

<표 12-23> 강우시 직접 유출부하량

Year	SS		T-N		T-P	
	ton	%	kg	%	kg	%
1996	52	61.12	2,234	28.72	163	34.18
1997	193	64.56	6,753	40.99	514	47.21
1999	271	87.46	5,954	45.50	473	52.87
2000	66	76.39	6,549	58.32	490	63.06

6. 모형의 적용 및 보정

모형의 보정은 1996년, 1997년, 1999년에 측정된 강우사상에 대하여 실측치와 비교하여 보정을 실시하였다.

가. 유출량 및 침투유량

본 연구에서 유출량의 보정은 측정 유출량으로부터 선행함수조건에 따른 유출곡선지수를 산정하여 유역에서의 토지이용상태와 수문학적 토양균도로부터 산정한 유출곡선지수와 비교 분석하여 실시하였고, 침투유량은 별도로 보정하지는 않았다.

선정된 강우사상은 대부분 AMC I의 조건이었고, 측정 유출곡선지수는 다음 식 (12-14)를 이용하여 구하였으며, AMC I의 경우 평균 79, AMC II의 경우 평균 79, AMC III의 경우 평균 84의 값을 보였다.

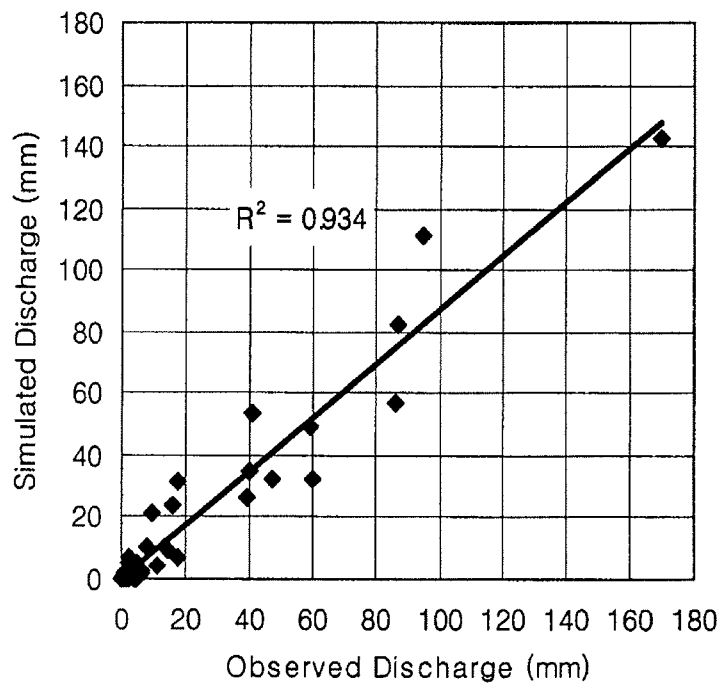
$$CN_{obs} = \frac{25,400}{254 + 5P + 10Q - 10(Q^2 + 1.25QP)^{1/2}} \quad (12-14)$$

한편, 유역의 토지이용상태와 수문학적 토양균도로부터 산정한 유출곡선지수는 AMC I의 경우 65, AMC II의 경우 78, AMC III의 경우 87로, 측정 유출곡선지수와 AMC I은 큰 차이를 보였으며, AMC III의 경우는 비교적 비슷한 값을 보였고, AMC II의 경우는 측정값이 하나의 사상이었지만 비슷한 값을 보였다.

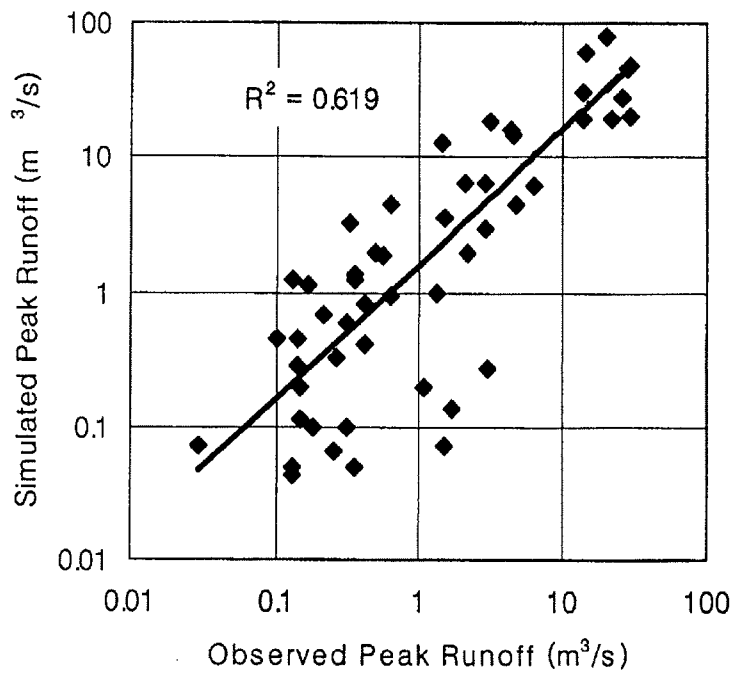
따라서, 본 연구에서는 AMC I과 AMC II 모두 AMC II를 적용하였고, AMC III의 경우는 유역의 평균 유출곡선지수가 측정 유출곡선지수의 값과 같도록 보정하여 적용하였다.

유출곡선지수를 보정하기 전과 보정하여 적용하였을 경우를 비교하면 보정 후에 유출량의 경우 선정된 강우사상에 대해 유출량의 총합이 780.03mm에서 1007.87mm로 실측값 914.83mm에 더 근사했으며, RMSE값이 8.86mm에서 7.53mm로 개선되었다. 또한, 침투유량의 경우는 RMSE값이 11.80m³/s에서 11.52 m³/s로 약간 개선되는 효과를 나타냈다.

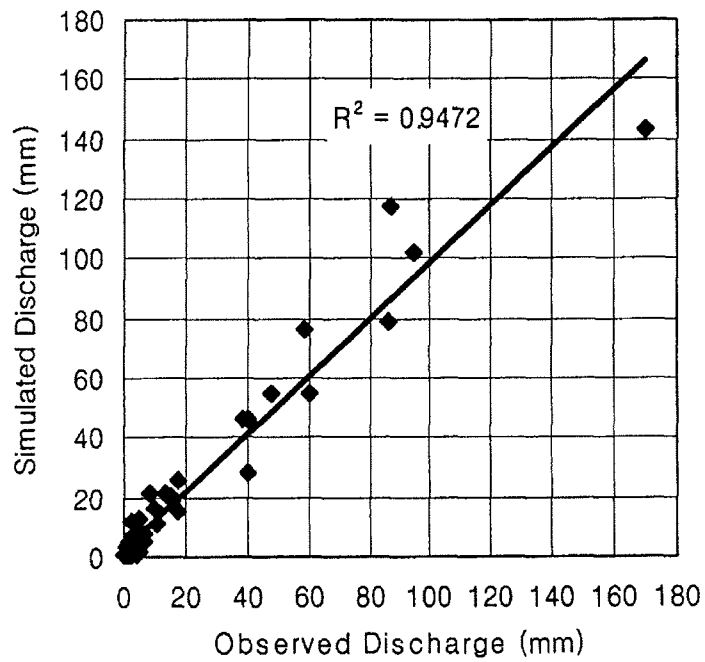
(그림 12-17)~(그림 12-20)은 유출량과 침투유량을 유출곡선지수를 보정 전후의 그림으로 유출량의 경우 R²이 0.934~0.947의 범위를 보였고, 침투유량의 경우는 R²이 0.619~0.806의 범위를 보임으로서 개선되는 효과를 보였다.



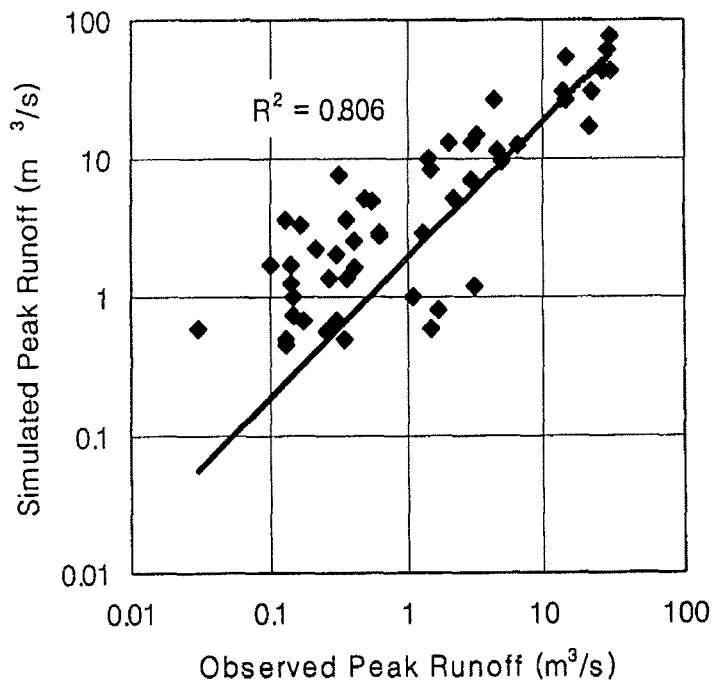
(그림 12-17) 유출량의 실측치와 모의치의 비교



(그림 12-18) 첨두유량의 실측치와 모의치의 비교



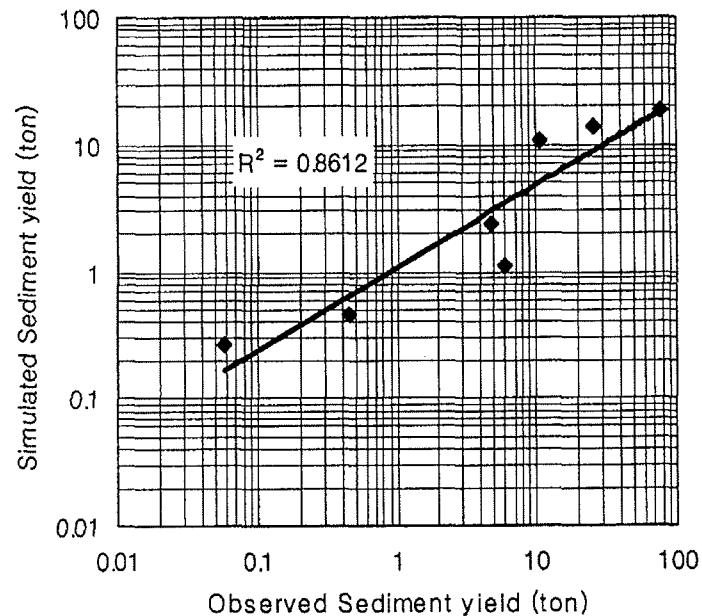
(그림 12-19) 보정후 유출량의 실측치와 모의치의 비교



(그림 12-20) 보정후 첨두유량의 실측치와 모의치의 비교

나. 유사량

유사량의 경우, 김 (1995), 김 (1997), 조 (1998)의 연구 결과를 이용하였으며, 본 연구에서는 별도의 보정을 실시하지는 않았다. (그림 12-21)은 유사량의 실측치와 모의치를 비교하여 나타낸 그림으로 결정계수 R^2 의 값이 0.8612로 나타났다.



(그림 12-20) Observed and simulated seditment yield

다. 영양물질

영양물질의 경우에는 축산계의 축산분뇨의 처리방법을 톱밥발효의 경우, 환경부가 제시한 처리율 20%와 대상 소유역에서 축산농가들은 별도의 처리시설을 갖추고 있지 않았으므로 환경부에서 제시한 20%보다는 낮을 것으로 가정한 처리율 10%로 구분하였으며, 또한 무처리 방류를 30%정도 할 경우와 축산폐수 전체를 농지에 환원하는 경우 등으로 구분하여 적용하였다. 그 내용은 Case I: 처리율 20 %, 무처리 방류 0 %, Case II: 처리율 20 %, 무처리 방류 30 %, Case III: 처리율 10 %, 무처리 방류 0 %, Case IV: 처리율 10 %, 무처리 방류 30 %이며, 실측치와 각각 Case 별 모의치를 비교 분석하였다.

<표 12-24>는 Case 별 실측치와 모의치를 비교한 것으로 총부하량을 기준으로 하였을 때, CaseⅣ가 T-N의 경우 2377.65 kg, T-P의 경우 129.02 kg으로 실측치 T-N 3906.37 kg, T-P 272.26 kg으로 다소 적게 모의되는 경향이 있으나 다른 CaseⅠ, CaseⅡ, CaseⅢ에 비해 타당하다고 사료된다.

<표 12-24> 시나리오별 영양물질의 실측치와 모의치의 비교

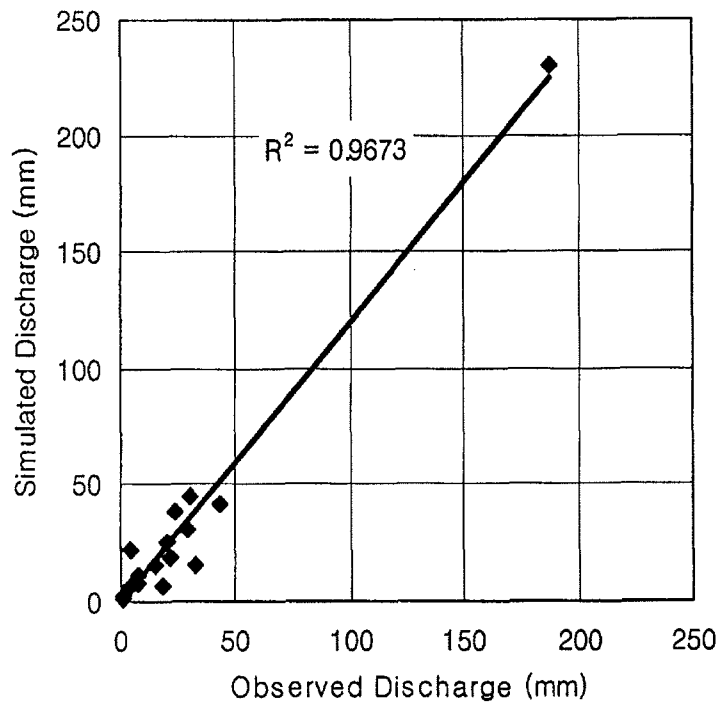
date	Observed		CaseⅠ		CaseⅡ		CaseⅢ		CaseⅣ	
	TN(kg)	TP(kg)	TN(kg)	TP(kg)	TN(kg)	TP(kg)	TN(kg)	TP(kg)	TN(kg)	TP(kg)
960329	54.83	3.35	63.72	4.54	65.61	5.11	64.10	4.54	69.96	6.81
960715	227.14	35.23	92.55	6.17	94.71	6.79	93.17	6.17	100.57	9.26
960827	36.61	10.67	58.54	4.23	60.40	4.74	59.04	4.23	64.63	6.43
970306	57.92	1.72	13.64	1.07	14.63	1.28	13.76	1.07	16.45	2.03
970512	833.47	51.81	340.44	16.21	347.64	18.01	342.24	16.21	365.66	25.22
970529	84.89	2.73	13.79	1.10	14.93	1.34	13.91	1.10	16.90	2.15
970625	825.03	83.43	389.41	19.26	397.97	21.40	389.41	19.26	417.23	27.82
970630	743.74	52.96	507.92	21.04	519.94	24.04	507.92	21.04	540.98	33.06
970715	183.93	28.93	117.68	7.70	120.25	8.56	118.53	7.70	127.09	11.13
970804	838.02		581.19		587.34		584.27		608.87	
990616	20.76	1.43	44.19	3.22	45.74	3.70	44.54	3.22	49.32	5.14
Sum	3906.37	272.26	2223.06	115.30	2269.15	84.55	2230.90	84.55	2377.65	129.02

7. 모형의 검증

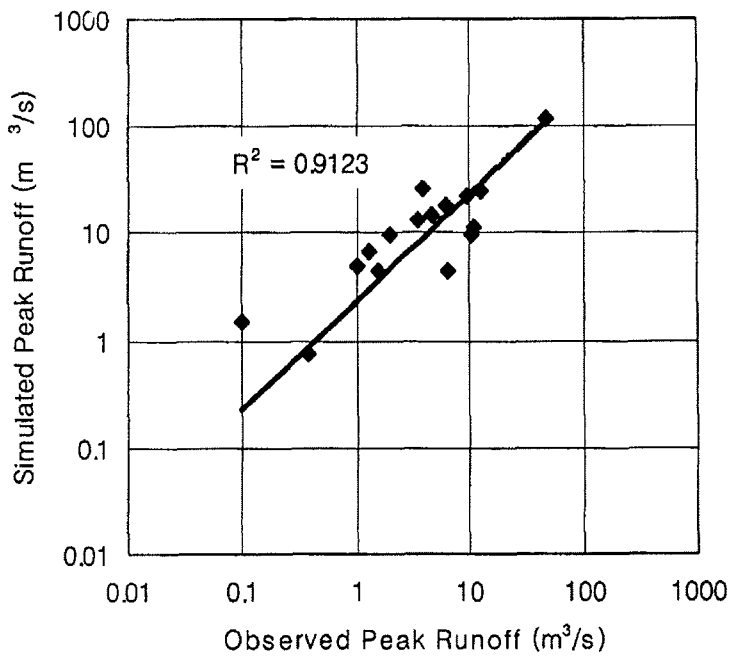
모형의 검증은 보정에 사용되지 않은 2000년에 측정된 강우사상에 대하여 유출량 및 침투유량과 수질자료에 대하여 실시하였다.

가. 유출량 및 침투유량

시험유역의 AGNPS 모형에 의한 추정유출량과 측정유출량에 대한 모형의 검증은 2000년에 측정된 16개 유출량 자료를 사용하였다. 유출량의 추정치와 측정치의 비교는 (그림 12-22)와 같으며, R^2 은 0.9673, RMSE는 13.85mm 이었으며, 침투유량의 경우는 (그림 12-23)에서와 같이 R^2 은 0.9123, RMSE는 19.44m³/s 이었다.



(그림 12-22) 유출량의 실측치와 모의치의 비교

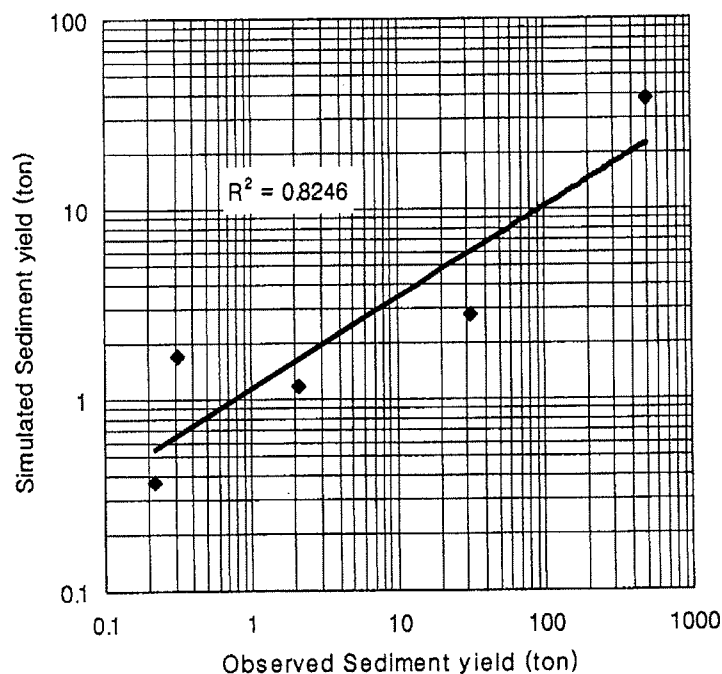


(그림 12-23) 첨두유량의 실측치와 모의치의 비교

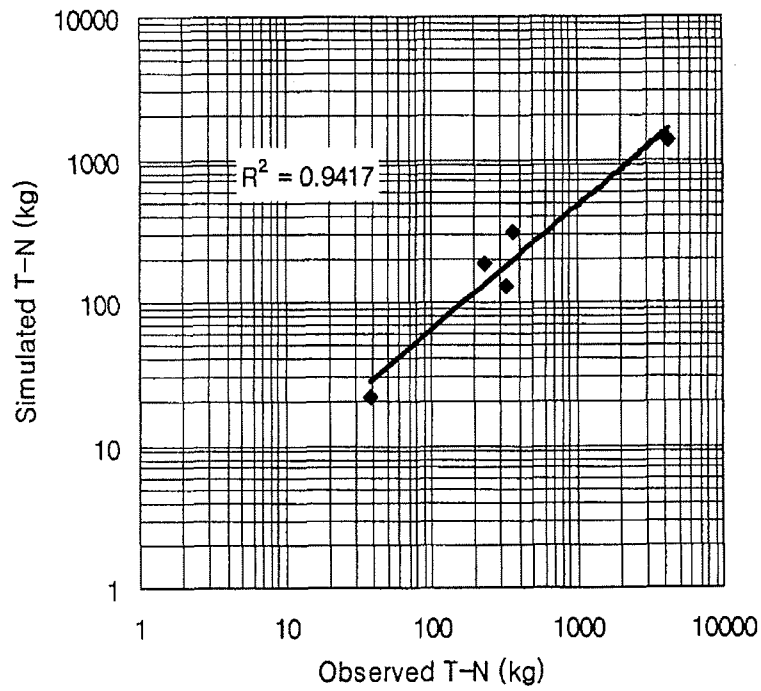
나. 유사량과 영양물질

시험유역의 AGNPS 모형에 의한 추정 유사량 및 추정 영양물질과 측정 유사량 및 측정 영양물질에 대한 모형의 검증은 2000년에 측정된 5개 유사량 및 영양물질을 사용하였다.

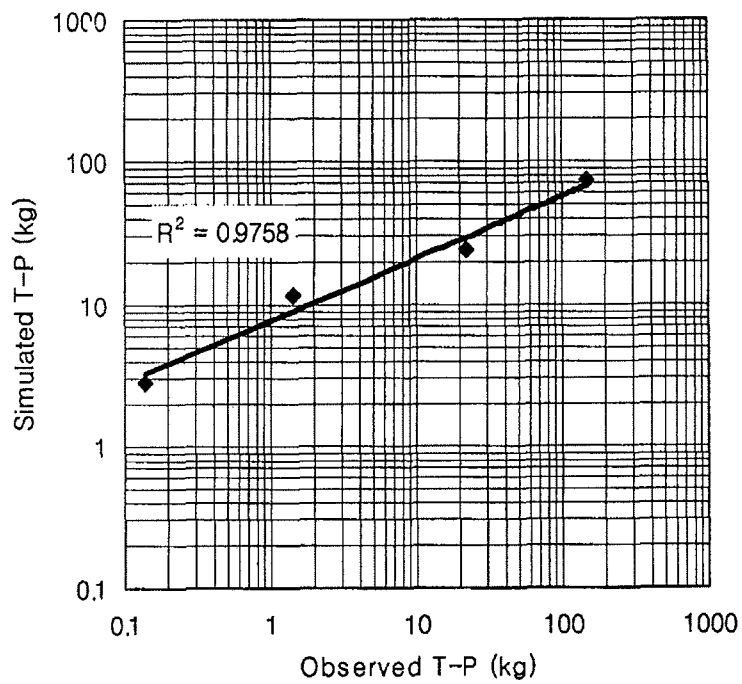
유사량 및 영양물질의 추정치와 측정치의 비교는 각각 (그림 12-24)~(그림 12-26)과 같으며, R^2 은 유사량, T-N, T-P가 각각 0.8246, 0.9417, 0.9758로 보정에 사용한 자료에 비해 높게 나타났는데, 이는 유량이 많을 때가 적을 때 보다 추정치와 측정치의 결정계수가 높게 나타나며, 2000년 자료의 대부분이 다른 해에 비해 비교적 강우량이 많은 때에 측정한 자료이기 때문인 것으로 사료된다.



(그림 12-24) 유사량의 실측치와 모의치의 비교



(그림 12-25) 총인의 실측치와 모의치의 비교

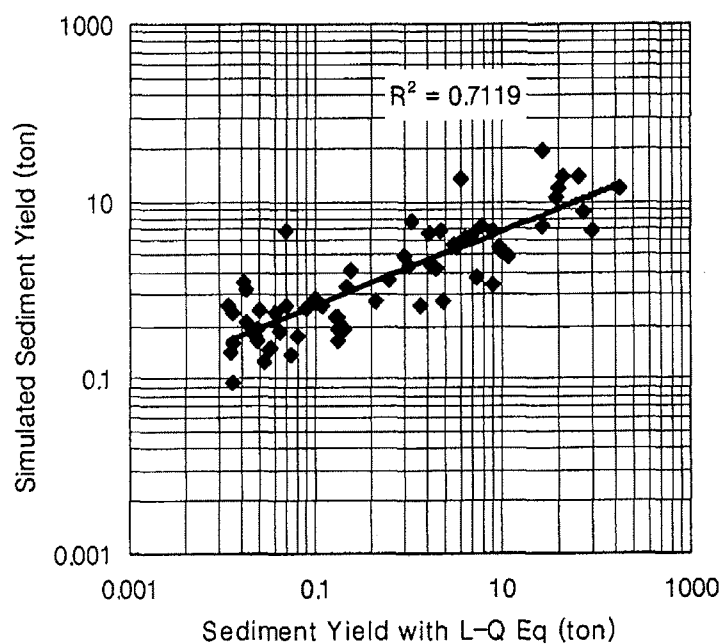


(그림 12-26) 총인의 실측치와 모의치의 비교

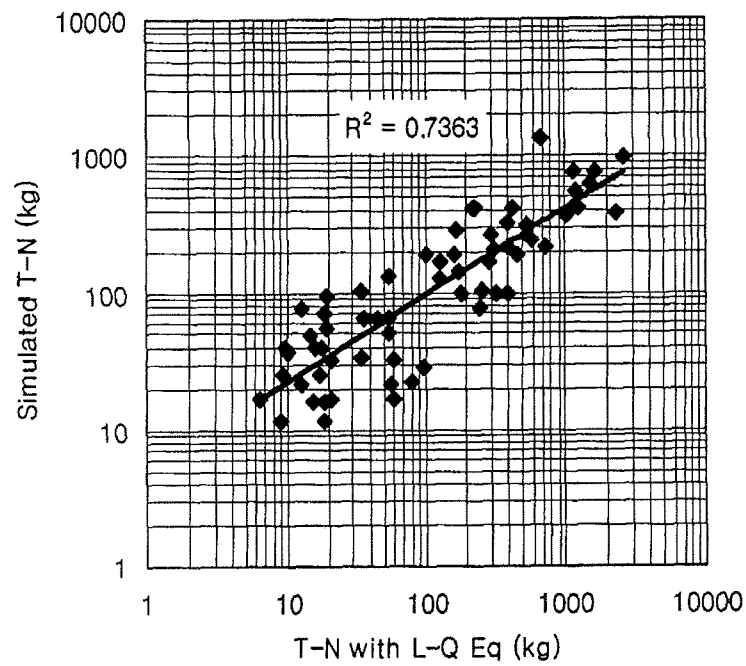
8. 모형의 응용

AGNPS 모형을 이용하여 강우시 직접유출에 의한 부하량을 추정하였고, 이 결과와 오염물질 부하량-유량의 관계식에 의한 부하량을 산정한 값과 비교하여 보았다. (그림 12-27)~(그림 12-29)은 각각 유사량, T-N, T-P의 강우시 직접 유출에 의한 부하량을 비교한 것으로, 결정계수 R^2 이 각각 0.7119, 0.7363, 0.7051로 나타났다. 유사량의 경우 유량이 작은 곳에서는 AGNPS 모형에 의한 추정치가 다소 크게 모의되었고, 유량이 큰 곳에서는 AGNPS 모형에 의한 추정치가 다소 작게 모의되었는데, 실제 유사량의 강우의 유출에 받는 영향을 AGNPS 모형이 잘 반영하지 못하고 있는 것으로 사료된다.

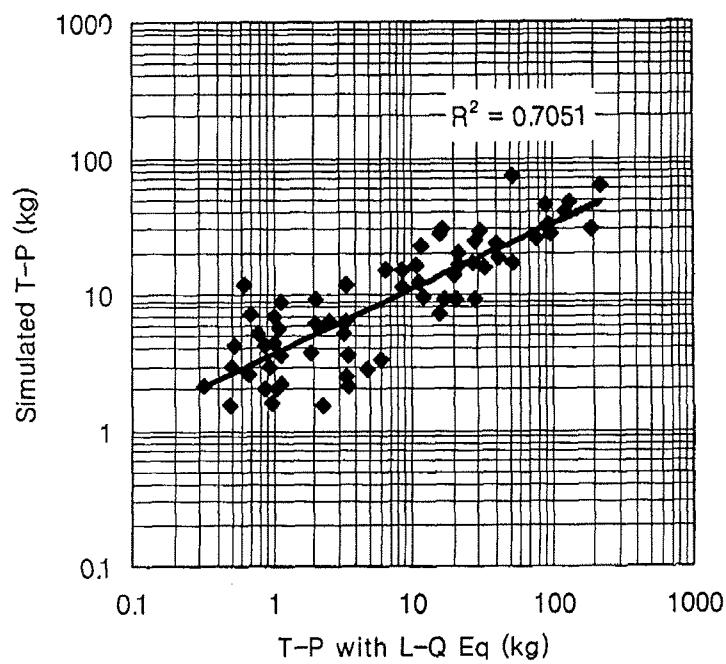
<표 12-25>에서는 선정된 강우사상에 대하여 직접유출에 의한 부하량을 연도별로 비교하여 본 것으로 대체로 AGNPS 모형에 의한 추정치가 부하량-유량 관계식에 의한 값보다 다소 작게 모의되는 경향을 나타냈다. 따라서, AGNPS 모형을 강우사상에 따른 직접유출에 의한 부하량 추정에 정량적 평가에 적용하기에는 다소 한계가 있을 것이라 사료된다.



(그림 12-27) AGNPS와 L-Q관계식에 의한 유사량의 비교



(그림 12-28) AGNPS와 L-Q관계식에 의한 총질소의 비교



(그림 12-29) AGNPS와 L-Q관계식에 의한 총인소의 비교

<표 12-25> AGNPS 모형과 L-Q 관계식에 의한 오염부하량 산정 결과

Year	used L-Q Eq.			simulated		
	SS (ton)	T-N (kg)	T-P (kg)	SS (ton)	T-N (kg)	T-P (kg)
1996	52	2234	163	32	1451	112
1997	193	6753	514	80	3185	233
1999	271	5954	473	52	4075	304
2000	166	6549	490	85	4262	310

9. 최적관리기법

가. 시비수준조절

논에서 평균정도의 시비수준일 때 (Standard)와 시비수준을 30%정도 줄였을 때 (Case V)를 선정된 강우에 대한 유역 말단에서 강우시 직접 유출 부하량의 변화를 살펴보았다. <표 12-26>과 같이 T-N의 경우는 1% 내외, T-P의 경우는 1%~5% 정도 줄어들어 별 다른 효과를 보이지 않았는데, 이는 논이 HP#6 소유역에서 약 12.6%로 전체 면적에 비해 작기 때문으로 사료된다.

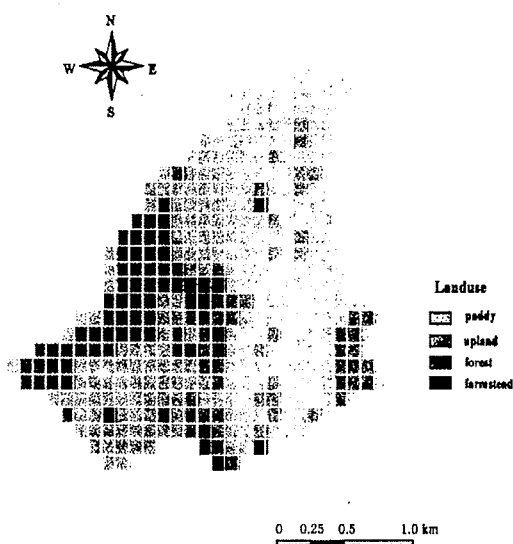
<표 12-26> 시비수준에 따른 비점원오염 배출량

Year	Standard		Case V			
	T-N (kg)	T-P (kg)	T-N (kg)	reduction (%)	T-P (kg)	reduction (%)
1996	1451	112	1433	1.2	106	5.4
1997	3185	233	3149	1.1	231	0.9
1999	4075	304	4029	1.1	294	3.3
2000	4262	310	4220	1.0	305	1.6

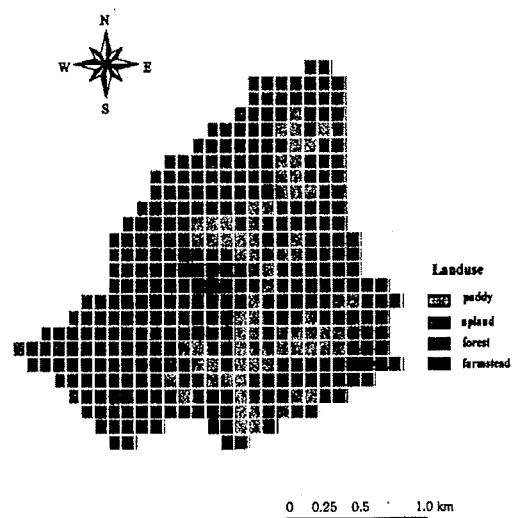
나. 토지이용변화

장래의 토지이용의 변화를 예측하기는 그 지역과 인근 지역의 개발 계획 등을 종합적으로 조사하여야 하는데, 개발 계획에 관한 자료를 얻기가 용이 하지 않다. 따라서, 본 연구에서는 임야를 대상으로 기계경운이 가능한 10° 내외의 경사지를 선정하여 밭으로 개간 할 경우 (Case-upland)와 논으로 개답 할 경우 (Case-paddy)로 나누어 유사량 및 영양물질의 강우시 직접유출에 의한 부하량 변화를 살펴 보았다.

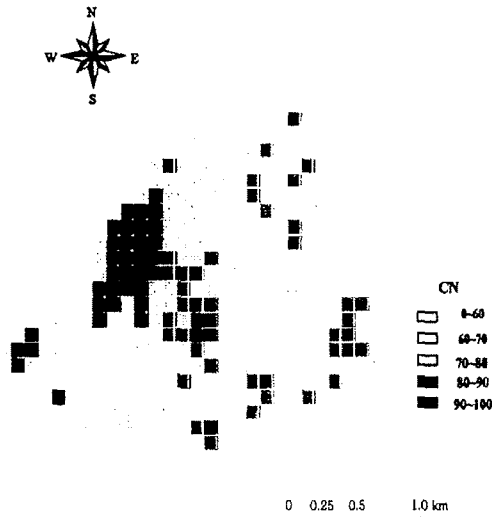
대상 임야지역은 100m 크기의 격자의 수를 기준으로 193개의 격자가 선정되었으며, 가능한 최대 변화량을 추정하기 위해 선정된 193개의 격자를 모두 밭이나 논으로 개간한다고 가정하였다. (그림 12-30)과 (그림 12-31)은 각각 대상 임야를 논으로 개답했을 경우와 밭으로 개간했을 경우 토지이용상태를 나타낸 그림이며, (그림 12-32)와 (그림 12-33)은 토지이용이 변화했을 경우 변화된 유출곡선지수의 분포도이다. 유역의 평균 유출곡선지수는 AMCⅡ 조건에서 토지이용변화 전의 78에서 논과 밭으로 토지이용변화 후에 각각 79, 81이었다.



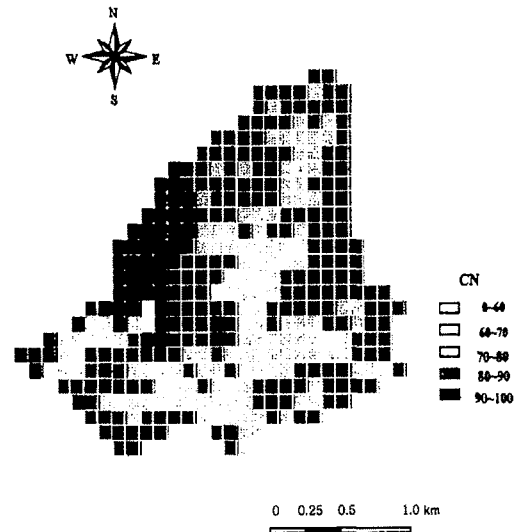
(그림 12-30) 논 개답 토지이용도



(그림 12-31) 밭 개간 토지이용도



(그림 12-32) 논 개답 SCS CN



(그림 12-33) 밭 개간 SCS CN

대상 임야지역을 논과 밭으로 개간하였을 경우, 유사량 및 영양물질의 직접유출에 의한 부하량의 변화는 다음 <표 12-27>와 같이 논으로 개간하는 경우는 유사량이 50~80%, T-N과 T-P는 20~50%정도로 대체로 감소하는 경향을 보였고, <표 12-28>과 같이 밭으로 개간하였을 경우 유사량은 대체로 증가하는 경향을 보였으나, 영양물질은 일관적인 경향을 보이지 않았다. 이는 밭으로 개간했을 경우 모형의 입력변수로 사용한 평균정도 시비량으로는 시비량을 적절히 고려하기 어렵기 때문인 것으로 사료된다.

<표 12-27> 논 개답 비점원오염 추정 결과

Year	before reclamation			results of reclamation		
	sediment, ton	T-N	T-P	sediment, ton	T-N	T-p
		kg			kg	
1996	52	2234	163	28	1070	73
1997	193	6753	514	74	2848	220
1999	271	5954	473	49	4692	414
2000	66	6549	490	80	4534	354

<표 12-28> 발 개간 비점원오염 추정 결과

Year	before reclamation			results of reclamation		
	sediment, ton	T-N	T-P	sediment, ton	T-N	T-p
		kg			kg	
1996	52	2234	163	74	1331	116
1997	193	6753	514	218	4541	412
1999	271	5954	473	150	9529	970
2000	66	6549	490	252	7606	674

제 5 절 요약 및 결론

본 장에서는 수질모델링 기술 개발을 위하여, 각 하천에서의 오염원 등의 환경 인문조사와 실측 수질자료를 바탕으로 원단위법에 의한 발생, 배출, 유출부하량을 산정하였고, 소하천에서 채수빈도를 고려한 오염부하량과 유출량에 대한 평균농도를 산정하였으며, 이를 바탕으로 유역단위의 비점원오염 추정을 위한 GIS-NPS 호환모형을 개발하여 유역에서의 수질오염부하량을 정량적으로 해석하고, 그 결과를 분석 평가하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① 원단위법을 이용한 소유역별 오염부하량을 추정하기 위해 시험유역 내의 생활계, 축산계, 산업계, 토지이용 등으로 구분하여 해당 기관의 소장 자료와 현지 답사를 통해서 기초자료를 수집하였다.
- ② 원단위법에 의한 오염부하량 산정 결과, TN은 논과 산림에서 발생하는 오염부하량이 상대적으로 큰 비중을 차지하였으며, TP도 TN과 유사한 경향을 보였다.
- ③ 원단위법을 이용해 추정한 오염부하량의 결과, HP#2 소유역의 경우 모두 실측치에 비해 원단위로 계산한 값이 크게 나타났는데, 이는 저수지에서의 저류효과로 인해 오염원이 감소되었기 때문인 것으로 추정된다.
- ④ HP#6, HP#14 소유역의 경우 유역면적에 비해 오염부하량이 높게 나타나고 있는데, 이는 인구밀도가 높고 가축사육 두수가 다른 소유역에 비해 상대적으로 많기 때문인 것으로 풀이된다.
- ⑤ 농업유역 소하천에서의 수질오염부하량을 정량적으로 해석하기 위하여, 시험유역인 발안저수지 유역의 HP#6 소유역을 대상으로 1996년과 1997년의 자료기간에 대해 수문, 수질자료를 수집·분석하고, 채수빈도를 고려한 오염부하특성을 분석하였다.
- ⑥ HP#6 측점에 대해 채수빈도와 유출량을 계층화하여 부유물과 총질소, 총인 등의 오염부하량을 추정한 결과, 유사량은 1996년도에 1385.45 kg/day, 1997년에는 4556.82 kg/day의 값을 보였고, 원단위에 의한 배출부하량은 35.20 kg/day

의 값을 나타냈으며, 총질소와 총인은 각각 1996년도에 35.44 kg/day, 1.75 kg/day, 1997년도에는 38.30 kg/day, 2.39 kg/day, 그리고 원단위에 의한 배출 부하량은 각각 32.16 kg/day 와 4.18 kg/day의 값을 나타냈다.

- ⑦ HP#6 측점에 대해 유출량을 고려한 평균농도는 1996년도의 자료기간에 대한 유사량이 397.1 mg/l, 총질소가 7.32 mg/l, 총인이 0.36의 값을 보였고, 1997년도의 자료기간에 대해서는 각각 709.42 mg/l, 5.96 mg/l, 0.37 mg/l의 값을 보임으로서 측정농도의 평균값과 유사한 경향을 보였다.
- ⑧ 유역단위의 비점원오염 부하량을 추정하기 위하여 GIS-AGNPS 호환모형을 개발하였으며, 시험유역의 측정자료들에 대해 모형의 보정 및 검증을 실시하여 모형의 적용성을 분석하였고, 시비수준조절과 토지이용변화에 따른 강우시 직접유출 부하량의 변화를 분석함으로써 모형의 응용성을 평가하였다.
- ⑨ 오염물질 부하량과 유량과의 관계식을 이용하여 연간 오염물질 부하량과 강우시 직접유출 부하량의 비를 구하였으며, 강우시 직접유출 부하량은 시험유역에서 대상기간 중 유사량 61~87%, T-N 28~58%, T-P 34~63%로 나타났다.
- ⑩ 오염원 자료를 생활계, 축산계, 산업계로 나누어 문헌조사와 현지답사 등을 통하여 조사하여 GIS-AGNPS 호환모형의 입력변수로 사용하였다.
- ⑪ SCS 유출곡선지수법에 의한 유출량 산정에 있어서 측정 유출곡선지수를 이용하여 보정을 실시하였고, 보정 후에 유출량의 경우 R^2 이 0.934에서 0.947로 RMSE값이 8.86mm에서 7.53mm로 개선되었으며, 침투유량의 경우는 R^2 이 0.619에서 0.806로 RMSE값이 11.80m³/s에서 11.52 m³/s로 약간 개선되는 효과를 나타냈다.
- ⑫ 영양물질의 경우 CaseIV (툽밥 발효의 효율이 10 %이고, 축산 폐수를 30% 정도 무처리 방류한다고 가정하였을 경우)가 영양물질의 추정에 타당한 것으로 나타났다.
- ⑬ GIS-AGNPS 호환 모형을 2000년의 선정된 강우사상을 통하여 검증을 실시한 결과, 유출량의 경우 R^2 은 0.9673, RMSE는 13.85mm 이었으며, 침투유량의 경우는 R^2 은 0.9123, RMSE는 19.44m³/s 이었으며, 유사량, T-N 및 T-P의 경

우 R^2 이 각각 0.8246, 0.9417, 0.9758로 나타났다.

- ⑭ 오염물질 부하량과 유량과의 관계식으로부터 산정한 강우시 직접유출 부하량과 GIS-AGNPS 호환모형으로 추정 한 강우시 직접유출 부하량을 비교한 결과 대체로 GIS-AGNPS 호환모형에 의한 추정치가 다소 낮게 추정되는 결과를 보였다. 따라서, GIS-AGNPS 호환모형을 강우사상에 따른 직접 유출에 의한 부하량의 정량적 평가에 적용에는 다소 한계가 있을 것으로 사료된다.
- ⑮ GIS-AGNPS 호환 모형을 시비수준 조절에 따른 직접유출에 의한 부하량의 변화는 논에서 시비수준을 30%정도 줄였을 경우 연간 T-N의 경우 1%내외, T-P의 경우 1~5%내외의 삭감 효과를 보였으며, 대상구역의 10° 이하의 경사도를 갖는 임야지역을 논으로 개답하였을 경우 유사량이 50~80%, T-N과 T-P는 20~50%정도로 대체로 감소하는 경향을 보였고, 밭으로 개간하였을 경우는 유사량의 경우는 대체로 증가하는 경향을 보이는 반면, 영양물질의 경우는 일관적인 경향을 보이지 않았으며, 밭에서 적절한 시비수준이 고려되어야 할 것으로 사료된다.

이상의 결과로부터 원단위법에 의한 발생, 배출, 유출부하량은 수질의 정량적 평가가 가능할 것으로 보이며, 소하천에서 채수빈도를 고려한 오염부하량과 유출량에 대한 평균농도는 하천 수질의 정성적 평가가 가능할 것이다. 유역단위의 하천 수질 평가를 위한 GIS-AGNPS 호환모형은 강우시 직접유출에 의한 부하량의 추정은 다소 낮게 추정되는 경향을 보였으며, 정량적인 평가는 다소 한계가 있으리라 사료된다. 그러나 정성적인 평가를 통하여 관리대안 등의 연간 오염 총 부하량의 삭감 방안을 평가하고 활용할 수 있으리라 사료된다. 개발된 수질 모델링 기술은 수환경 평가관리시스템과 연계하여 수질환경을 평가하고 이에 대한 관리대안을 제시할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 권순국 외, 1998. 지역환경공학, 향문사.
2. 권순국, 1998, 우리나라 비점원 수질오염 관리의 문제점과 개선방안, 대한환경공학회지, 20(11), pp.1497-1510.
3. 김윤종, 김원영, 유일현, 이석민, 민경덕, 1994, 금강유역 토양 유실 분석을 위한 GIS 응용연구, The Journal of GIS Association of Korea, 2(2), pp.165-174.
4. 김지훈, 1998. 지리정보시스템을 이용한 SWAT/GRASS 모형의 적용, 서울대학교 석사학위논문.
5. 김진수, 1997. AGNPS 모형에 의한 농업비점원오염 해석에 관한 최근의 연구동향, 농업환경 과학연구의 최근 동향-1997년도 NICEM 해외교육훈련 결과 Symposium : 127-135.
6. 김진택, 박승우, 1994, 경사지의 경종에 따른 유출 및 토양유실에 관한 연구, 한국농공학회 지, 36(1), pp.73-82.
7. 김진택, 박승우, 1997, 농업비점원오염모형을 위한 GIS 호환모형의 개발 및 적용 (I), 한국 농공학회지, 39(1), pp.41-47.
8. 김진택, 박승우, 1997, 농업비점원오염모형을 위한 GIS 호환모형의 개발 및 적용 (II), 한국 농공학회지, 39(2), pp.54-61.
9. 김진택, 박승우, 1997, 농업비점원오염모형을 위한 GIS 호환모형의 개발 및 적용 (III), 한국 농공학회지, 39(3), pp.138-143.
10. 김진택, 1995. 농업비점원오염모형을 위한 지리자원정보시스템 호환모형의 개발 및 적용, 서울대학교 박사학위논문.
11. 농림부, 1997. 농어촌지역 상수보존 및 오폐수처리에 관한 연구.
12. 박성우, 권순국, 서승덕, 안병기, 이순혁, 최예환, 1995. 응용수문학, 향문사.
13. 윤용남, 1993. 공업수문학, 청문각
14. 윤호중, 1995. 산림 소유역에서의 유출 특성과 단위유량도에 관한 연구, 서울대학교 박사학위논문.
15. 이규성, 1994. 산림유역의 토양유실량 예측을 위한 지리정보시스템의 범용토양유

- 실식(USLE)에의 적용, 한국임학회지, 83(3) : 322-330.
16. 이인선 외, 1993. 비점원오염원으로부터의 오염물질 유출특성 조사를 위한 방법론적 연구, NIER No.93-13-382, 국립환경연구원.
 17. 임상준, 박승우, 1995. 논 의 유출곡선번호의 선정과 그 적용에 관한 연구, 1995년도 한국농학회 학술발표회 논문집 : 81-86.
 18. 장정렬, 1994. 농촌유역 수질관리모형의 개발에 관한 연구, 서울대학교 석사학위논문.
 19. 정규장, 조효섭, 1999. 수자원 실무분야에서의 국내 GIS활용 사례, 한국수자원학회지 31(1), pp. 70-78
 20. 정영상, 신제성, 신영화, 1976. 경사지 토양의 침식성 인자에 관하여, 한국토양비료학회지, 9(2) : 109-115.
 21. 정필균, 고문환, 임정남, 엄기태, 최대웅, 1983. 토양유실량 예측을 위한 강우인자의 분석, 한국토양비료학회지, 16(2) : 112-118.
 22. 조재필, 1998. 복합 토지이용 특성의 농촌유역에 대한 농업비점원오염모형의 적용, 서울대 학교 석사학위논문.
 23. 진영민, 1998. 논 의 비점오염물질 배출량 추정을 위한 CREAMS -PADDY 모형의 개발, 서울대학교 석사학위논문.
 24. 최지용 외, 1995. 비점오염원 조사연구사업 보고서, 환경부.
 25. 최진용, 1996. 지리정보시스템을 이용한 장기유출모형의 개발에 관한 연구, 서울대학교 박사학위논문.
 26. 허기술, 우정화, 1988. 한국토양의 수문학적 분류 및 그 응용, 농공기술 4호 : 48-60.
 27. 황근, 조병진, 서승덕, 박승우, 도덕현, 이기춘, 엄병현, 김철기, 1994. 농지공학, 향문사.
 28. 山本哲也・膳村陽子 : 邑川におけ汚濁物質の流出量の變動特性について, 霞ヶ浦流入河川の流出負荷量實態調査第3報, 第18回水質汚濁學會講演集, pp. 90-91, 1984
 29. 海老瀬潛一 : 霞ヶ浦流入河川による總流入負荷量の評價, 國立公害研究所研究報

告, 第50號, pp. 41-58, 1984

30. Anderson, M. G., and R. L. Burt, 1980. Interpretation of recession flow, J. Hydrol., 46 : 89-101.
31. Arnold, J. G., and P. M. Allen, 1993. A comprehensive surface-groundwater flow model, J. Hydrol., 142:47-69.
32. Bates, B. C., and P. K. Davies, 1988. Effect of baseflow separation procedures on surface runoff model, J. Hydrol., 103 : 309-322.
33. Beasely, D. B., L. F. Huggins, and E. J. Monke, 1980. ANSWERS - A Model for Watershed Planning, Trans. ASAE, 23(4) : 938-944.
34. Brannan. K. and J. M. Hamlett. 1998. Using Geostatistics to Select Grid-cell Layouts for the AGNPS Model, Transactions of the ASAE, 41(4), pp. 1011-1018.
35. Chansheng He, James F. Riggs, and Yung-Tsung Kang, 1993. Integration of geographic information systems and a computer model to evaluate impacts of agricultural runoff on water quality, Water Resources Bulletin, 29(6) : 891-900.
36. Environmental Systems Research Institute, 1991, ARC/INFO User's Guide : Cell-based Modeling with GRID, Redlands, CA. USA.
37. Fedora M. A., and R. L. Beschta, 1989. Storm runoff simulation using an antecedent precipitation index (API) model. J. Hydrol., 112 : 121-133.
38. Finney, V. L., 1993. Using the single event model AGNPS to estimate average annual sediment yield from Lindero Canyon, California, U.S.A.
39. Foster, G. R. and W. H. Wischmeier, 1974, Evaluating Irregular Slopes for Soil Loss Prediction, Trans. ASAE 17, pp.305-309.
40. Foster, G. R., L. J. Lane, J. D. Nowlin, J. M. Laflen, and R. A. Young. 1981. Estimating erosion and sediment yield on field-sized areas. Trans. ASAE, 24(50) : 1253-1262.

41. Frere, M. H., J. D. Ross, and L. J. Lane. 1980. The nutrient submodel. In : CREAMS, A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. USDA Cons. Res. Report 26(1) : 65-85.
42. George, E. Dissmeyer, and George R. Foster, 1981. Estimating the cover-management factor(C) in the universal soil loss equation for forest conditions, J. Soil and Water Conserv., July-August : 235-240.
43. Griffin, M. L., D. B. Beasley, J. J. Fletcher and G. R. Foster, 1988, Estimating Soil Loss on Topographically Nonuniform Field and Farm Units, Journal of Soil and Water Conservation, 43, pp.326-331.
44. Lane, L. J., 1982. Development of a procedure to estimate runoff and sediment transport in ephemeral streams. In : Recent developments in the explanation and prediction of erosion and sediment yield. Proceeding of the Expert Symposium. IAHS Publ. No. 137 : 275-282.
45. Line, D. E., W. W. Coffey. and D. L. Osmond. 1997. WATERSHEDSS GRASS-AGNPS MODEL TOOL, Transactions of the ASAE. 40(4), 971-975.
48. Lo. K. F. A., 1995. Erosion assessment of large watersheds in Taiwan, Journal of Soil and Water Conservation, 50(2) : 180-183.
49. Lombardi, F., 1979. Universal Soil Loss Equation (USLE), runoff erosivity factor, slope length exponent, and slope steepness exponent for individual storm. PhD Thesis, Purdue University, W. Lafayette, Ind.
50. McCool, D. K., L. C. Brown, G. R. Foster, C. K. Mutchler, and L. D. Meyer, 1987. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation. Trans. ASAE, 30(5) : 1387-1396.
51. Mitchell J. K., B. A. Engel, R. Srinivasan, and S. S. Y. Wang, 1993. Validation of AGNPS for small watersheds using an integrated AGNPS/GIS system, Water Resources Bulletin, 29(5) : 833-842.
52. Moore, I. D. and G. J. Burch, 1986, Physical Basis of the Length-slope

- Factor in the Universal Soil Loss Equation, Soil Sci. Soc. Am. J. 50, pp.1294-1298.
53. Parson S. C, J. M. Hamlett, and P. D. Robillard, 1996. The impact of uncertainty on decision making with AGNPS, ASAE paper No. 96-2603.
 54. Parson, S. C., J. M. Hamlett, P. D. Robillard and M. A. Foster. 1998. Determining the decision-making risk from AGNPS simulations, Transactions of the ASAE, 41(6), pp.1679-1688.
 55. Perrone, J. and C. A. Madramootoo. 1999. Sediment yield prediction using AGNPS, J. Soil and Water Cons. 54(1), pp.415-419.
 56. Prato, Ton., and Hongqi Shi. 1990. A. comparison of erosion and water pollution control strategies for and agricultural watershed. Water Resources Research. 26(2) : 199-205.
 57. Quinn, P. F., Beven, P. Chevalier and O.Planchon, 1991, The prediction of hillslope Flow Paths for Distributed Hydrological Modelling Using Digital Terrain Models, Hydrological Processes, 5, pp.59-79
 58. Renard, K. G., G. R. Foster, G. A. Weesies, D. K. McCool and D. C. Yoder, 1997, Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), USDA Agr. Handbook No.537
 59. Setia, P., and R. Magleby, 1987. An economic analysis of agricultural nonpoint pollution control alternatives. Journal of Soil and Water Conservation, 42(6) : 427-431.
 60. United States Soil Conservation Service, 1971. Hydrology, SCS National Engineering Handbook Section 4, USDA.
 61. Vieux, B. E., and S. Needham, 1993. Nonpoint-pollution model sensitivity to grid-cell size, J. Water Resources Planning and Management, ASCE, 119(2) : 141-157.

62. Wischmeier W. H., C. B. Johnson, and B. V. Cross, 1971. A soil erodivity nomograph for farmland and construction sites, *Journal of Soil and Water Conservation*, 26 : 189-193.
63. Young R. A., C. A. Onstad, D. D. Bosch, and W. P. Anderson, 1989. AGNPS : A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds, *Journal of Soil and Water Conservation*, 44(2) : 168-173.
64. Young, R. A., C. A. Onstad, D. D. Bosch, and W. P. Anderson, 1987. AGNPS, Agricultural Non-Point-Source Pollution Model: a watershed analysis tool, U. S. Dept. of Agric., Agric. Res. Serv., Conserv. Res. Report 35, Washington D. C., pp. 77.
65. Young, R. A., C. A. Onstad, D. D. Bosch, and W. P. Anderson, 1989. AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watershed, *Journal of Soil and Water Conservation*, 44(2) : 168-173.
66. Young, R. A., M. A. Otterby, and A. Roos. 1982. A technique for evaluating feedlot pollution potential. *Journal of Soil Water Conservation*, 37 : 21-23.
67. Zhang, H., C. T. Haan and D. L. Nofziger, 1990. Hdrologic modeling with GIS: An overview, *Applied Engineering in Agriculture*, 6(4), pp. 453-458
68. <http://www.me.go.kr/www/index.html>.
69. <http://civil.ce.utexas.edu/centers/crwr/reports/online.html>.

생태환경 모델링 기술 개발

2000년 12월

“농업생태환경 모니터링 및 종합적 환경관리시스템 개발 사업”

서울대학교 농업생명과학대학 부속 농업개발연구소

최종보고서 제 IV 편 제 13 장

여 백

제 13 장 생태환경 모델링 기술 개발

제 1 절 서 론

우리 나라의 벼 재배양식은 사회경제적 여건의 변화에 따라서 지속적으로 변천하여 왔다. 1980년대 이전까지는 손 이앙재배가 주류를 이루었으며, 1980년대에는 1970년대 후반부터 보급되기 시작한 기계이앙이 손이앙을 대체하여 중묘 기계이앙 재배가 주요 재배양식으로 자리 잡았다. 한편, UR협상이 타결되어 세계무역기구(WTO)가 출범함에 따라 쌀 농사의 국제경쟁력의 제고가 매우 중요한 과제로 대두됨에 따라서 우리 나라 쌀 생산비 중에서 가장 큰 비중을 차지하는 노동비를 절감하여 생산비를 저감할 필요성이 크게 대두되었다(남택수, 1999). 또한, 환경보전형 지속적 농업에 대한 국내외적인 관심이 고조되면서 소하천에서의 다양한 수환경 보전방안에 대한 국가적·지역적 수요가 증대되고 있다.

우리 나라의 농경지는 전국토의 19.2%를 차지하고 있으며, 이 중 논 면적은 1999년 현재 1152.6천 ha로서 전체 경지면적의 60.7%를 차지하고 있다. 또한, 비료사용량은 1998년 현재 801,387ton으로 단위면적당 비료사용량은 질소 212.8kg/ha, 인의 경우 89kg/ha로서 90년 233.4kg/ha와 106.4kg/ha로 각각 8.8%, 16.4%로 감소추세에 있다. 하지만 이는 세계 평균 시비량인 99kg/ha에 비하여는 상당히 많은 양이다.

한편, 환경친화적 지속농업에 대한 종합적이고 체계적인 환경친화성 평가가 이루어져야 할 것이다. 경작체계는 자연생태계를 변형하여 인간에게 필요한 자원을 생산하는 하나의 생태계이므로 생태학적 관점에서 경작체계를 분석한다면 경작체계의 환경친화성을 평가할 수 있을 것이다(임경수, 1998). 따라서, 생태계를 이해하고 분석하는 주요한 방법인 에너지흐름과 물질순환 분석을 통하여 우리 나라의 주식을 생산하는 쌀 경작체계의 생태환경과 논에서의 물질순환과정을 평가해야 할 것이다.

본 장에서는 생태환경 모델링 기술개발을 위하여, 농작물 생육추정, 병충해의 예찰과 방제계획, 농작업 일수의 결정 등을 수행하기 위한 일별 기상발생모의 모형을 소개하고, 논에서의 영양물질추정 모형과 벼 에너지 흐름 모형을 개발하여 그 적용성을 평가하도록 한다.

제 2 절 일별 기상인자 발생 모형

1. 개론

일별 기상자료는 농업과학분야에서 농작물 생육추정, 병충해의 예찰과 방제계획, 농작업 일수의 결정, 농업 수자원 계획과 물관리 등에서 필요하다. 이와 같은 일에서 기상 조건에 따른 영향을 고찰하기 위해서는 기상자료를 생성해야 하는 데, 이를 기상자료 발생 (weather generation)이라 한다. (강, 1995)

일별 기상자료 발생법은 다음과 같다. 즉, 해당년도와 누가 강수량이 비슷한 연도를 선정하여 과거 특정연도의 기록을 이용하는 방법 (한국건설기술연구원, 1995), 기상예보를 바탕으로 강수일을 예상하고 기상자료를 생성하는 기상예보에 의한 방법 (김, 1993), 수학적 모형을 이용하여 일별 기상자료를 생성하는 기상자료 발생모형에 의한 방법 (김, 1993) 등이 있다.

기상자료 발생모형은 추계학적 방법에 의한 자료를 생성하는 방법으로, 기상요소별 확률분포함수를 이용하여, 매개변수를 결정하고, 난수발생법을 적용하여 일련의 기상자료를 생성하는 방법이다. 그러나 과거자료가 없는 미계측 지역의 기상모의발생은 각 기상요소별 매개변수를 결정할 수 없다. 따라서, 미계측 지역의 기상모의발생을 위해서는 그 유역의 매개변수를 추정하여 기상요소를 모의발생해야 할 것이다. 미계측 지점의 매개변수를 추정하는 방법은 과거 자료로부터 기상자료의 변동특성을 분석하여 보간하는 방법, 기상 위성 자료를 사용하여 보간하는 방법, 인근 기상 자료 관측값을 사용하여 보간하는 방법 등이 있다. (이, 1994)

이 (1994) 등은 기상자료 미계측 지점의 단기 강우 예보모형을 구성하였으며, Richardson과 Wright (1984)는 기상자료 발생모형인 WGEN을 구성하여, 미국 주요 지점의 기상자료를 모의 발생하였다. 강 (1995)은 강수발생일, 강수량, 최고온도, 최저온도, 태양복사량, 그리고 상대습도 등의 농업기상인자에 대해 분포형에 따른 추계학적 모의발생모형을 구성하여, 전국의 주요 관측소에 적용하였다.

본 절에서는 일별 기상인자의 추계학적 모의발생모형을 미계측 유역에 적용하기 위해 전국 71개 관측소의 강수발생일, 강수일, 최고온도, 최저온도, 그리고 상대습도 등의 기상요소별 매개변수를 결정하여 13개소 대상관측소에 적용하여 χ^2 적합도

검정을 실시하여 기상발생모형의 적용성을 평가하였으며, 우리 나라 전역에 대한 매개변수들의 공간적인 특성을 분석하였고, 역거리법에 의한 자료보간을 토대로 미계측 유역에 대한 기상모의발생모형의 매개변수를 추정하며, 수원, 울산 등 2개 지점을 대상으로 모의발생모형을 적용하여 실측치와 모의발생치, 추정치를 비교함으로써 향후 생태환경 모델링의 입력자료로서의 적용성을 평가하였다.

2. 국내 기상관측소 현황 및 자료

김 (1994)은 수자원 계획을 위한 우리 나라의 평균 연 강수량 산출 최소기간을 43년으로 보고하였고, 세계기상기구에서는 30년의 기록기간을 추천하고 있다. 그러나 우리 나라의 71개소 관측소 중 30년 이상의 자료를 보유하고 있는 관측소는 16개소에 불과하다.

우리 나라 관측소는 1945년 이전에는 10개소의 관측소가 있었으나 1960년 이후에 61개소의 관측소가 늘었으며, 1973년에 전국적 관측망의 확충 작업으로 실제로 많은 수의 관측소가 1973년 이후부터 현재까지 약 20년치의 자료를 보유하고 있다. (김, 1994)

본 연구에서는 20년치 이상의 자료를 보유하고 있는 62개 관측소와 공간적 분포를 도시하기 위한 9개소의 관측소를 포함하여 총 71개 관측소의 1998년까지의 기상 자료를 사용하였다.

3. 매개변수의 결정방법

본 연구에 사용된 기상자료 모의발생모형은 강수일 예보 모형, 강수량 예보 모형, 온도 및 태양복사량 예보 모형, 상대습도 예보 모형, 그리고 각각의 함수 부모형으로 구성되어 있다.

강수일 예보 모형은 1차 Markov모형에 의해 강수일유 모의발생하고, 강수량 예보 모형은 강수발생일 예보에 따라 우천일에 왜곡된 정규분포 함수 (skewed normal distribution)을 이용하여 계산하였다. 온도 및 태양복사량 예보 모형은 최고 및 최저온도와 일별 태양복사량을 모의발생하는 부모형으로서 Richardson (1981)이

제안한 잔차계열 (residual series)과 상관계수를 이용하여 계산하였다. 상대습도 예보 모형은 삼각분포 (triangular distribution)를 이용하여 우천일과 청명일 사상에 따라 계산하였다.

본 연구에서는 강수량, 강수일수, 최고온도, 최저온도, 상대습도 등의 인자에 대해 전국의 주요 관측소를 대상으로 기상자료를 수집하고, 추계학적 특성을 분석하여 기상자료 모의발생모형에 필요한 우천일 연속확률, 청명일 연속확률, 왜곡도, 표준편차, 월평균 강수량, 월평균 최고온도, 월평균 최저온도, 월평균 상대습도 등의 매개변수를 결정하였다.

결정된 매개변수를 이용하여 단기간의 기상인자 시계열을 추계적으로 모형화하여 장기간의 시계열을 모의발생시키는 추계학적 기상모의발생모형에 적용하였으며, 이 모형은 강 (1995)에 의해 적합성이 검증된 바 있다.

가. 강수일

어떤 지점의 강수일은 1차 마코브 연쇄 (first-order Markov chain)로 부터 우천일-청명일의 천이확률 매트릭스 (transition probability matrix)를 구하고, 0.0~1.0의 등분포난수를 발생시켜 천이확률과 비교함으로써 우천일을 모의발생하도록 하였다. 우천일-청명일 천이확률은 식 (13-1)로 구하였다.

$$\begin{bmatrix} P_{dd} & P_{dw} \\ P_{wd} & P_{ww} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{dd}/ND & N_{dw}/ND \\ N_{wd}/NW & N_{ww}/NW \end{bmatrix} \quad (13-1)$$

여기서, P_{dd} 는 청명일에 이어 청명일이 지속될 확률, P_{dw} 는 청명일에 이어 우천일이 발생할 확률, P_{wd} 는 우천일에 이어 청명일이 발생할 확률, 그리고 P_{ww} 는 우천일에 이어 우천일이 지속될 확률이다. 또한, N_{dd} 는 청명일에 이어 청명일이 지속된 횟수, N_{dw} 는 청명일에 이어 우천일이 발생한 횟수, N_{wd} 는 우천일에 이어 청명일이 발생한 횟수, N_{ww} 는 우천일에 이어 우천일이 지속된 횟수이며, $ND = N_{dd} + N_{dw}$, 그리고 $NW = N_{wd} + N_{ww}$ 이다.

나. 강수량

월별 일 강수량의 분포는 왜곡정규분포함수로부터 다음 식과 같다.

$$P = \frac{6}{C_s} \left[\left\{ \frac{C_s}{2} \left(\frac{x - \bar{x}}{s} \right) + 1 \right\}^{1/3} - 1 \right] + \frac{C_s}{6} \quad (13-2)$$

여기서, P 는 표준정규변수, x 는 표본변량, \bar{x} 는 평균, s 는 표준편차, C_s 는 왜곡도 계수이다.

다. 최고온도와 최저온도

최고온도와 최저온도의 잔차계열을 발생시키기 위한 모형은 Richardson (1981)이 제안하였는데, 그 방법은 Matalas (1967)가 제시한 약정상 상태 (*weakly stationary*)의 발생과정에 근거를 두고 있다. 이를 수식으로 표시하면 식 (13-3)과 같다.

$$x_i = Ax_{i-1} + B\varepsilon_i \quad (13-3)$$

여기서, x_i 는 최고온도와 최저온도의 잔차 요소로서 t 일에 대한 3×1 매트릭스이다. ε_i 는 정규분포를 나타내는 독립난수요소인 3×1 매트릭스이다. A 와 B 는 계열 상관관계수 (*serial correlation*)와 상호상관관계수(*cross correlation*)로서 정의되는 3×3 매트릭스 요소이다. 식 (13-3)에서 최고온도와 최저온도의 잔차는 정규분포를 이루고 있으며, 각 변수의 계열상관은 1차 선형 자기회귀모형을 나타내고 있다.

최고온도와 최저온도의 모의발생은 식 (13-3)에서 발생된 잔차요소, 월 평균값 및 표준편차의 함수로서 아래의 식으로부터 계산되어진다.

$$t_i = x_i \cdot s_i + m_i \quad (13-4)$$

여기서, t_i 는 최고온도와 최저온도의 일별 모의발생값, x_i 는 식 (13-3)에서 구한 잔차요소, s_i 는 각각의 표준편차, m_i 는 각각의 월평균 값을 나타낸다. s_i 와 m_i 는 각각 우천일과 청명일에 따르는 조건적 함수이다.

라. 상대습도

상대습도의 모의발생은 삼각분포함수를 이용하여 과거의 월평균 값으로부터 구할 수 있다. 온도와 태양복사량과 마찬가지로 상대습도는 우천일과 청명일의 사상에 영향을 받는다. 상대습도의 우천일과 청명일과의 관계는 아래 식과 같다.

$$RHW_j = RHD_j + \phi(1.0 - RHD_j) \quad (13-5)$$

여기서, RHW_j 는 j 월에 해당하는 우천일의 상대습도이고, RHD_j 는 j 월에 해당하는 청명일의 상대습도이다. 그리고 ϕ 는 형상계수로서 0.0~1.0의 값을 가진다.

일별 상대습도는 아래의 식 (13-6)을 이용하여 구하여 진다..

$$RHG_i^* = RHG_i \left(\frac{RHP_i}{\overline{RH}_i} \right) \quad (13-6)$$

여기서, RHG_i^* 는 i 일의 상대습도, RHG_i 는 삼각분포로부터 발생된 상대습도, \overline{RH}_i 는 삼각분포의 평균값이다.

4. 매개변수의 추정

매개변수 추정을 위해 미계측 유역의 강우량 자료보간방법인 산술평균법, 평균등비법, 역거리법 등을 비교하였다. 이러한 자료보간방법들은 보간에 사용되는 가중함수들에 따라 구분되는데, National Weather Service (NWS)에서는 지점간 변화량이 적을 때는 산술평균법을, 지점간 변화량이 클 때는 평균등비법을 추천하고 있으며, 근래의 연구결과에서는 역거리법을 이용한 추정치가 가장 정확한 것으로 알려져 있다.

가. 산술평균법 (arithmetic average method)

산술평균법은 미계측 유역 주변의 n 개 지점을 단순히 산술평균하여 미계측 유역의 매개변수를 추정하는 방법이다. 이 방법은 균일한 분포를 보이는 지점의 평탄한 유역에 적용이 가능하다. 산술평균법을 나타내는 식은 다음과 같다.

$$\omega_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \quad (13-7)$$

여기서 ω_i 는 추정치, p_i 는 n 개 관측소의 관측치이다.

나. 평균등비법 (normal ratio method)

평균등비법은 주위에 있는 n 개 관측소의 영향을 나타내는 가중인자를 이용하여 미계측 유역의 매개변수를 추정하는 방법이며, 그 수식은 식 (13-8)과 같다.

$$\omega_x = \sum_{i=1}^n \left(\frac{N_w}{n \times N_i} \right) \times p_i \quad (13-8)$$

여기서, N_w/N_i 는 주위 관측소의 영향을 나타내는 가중인자, ω_x 는 추정치이다.

다. 역거리법 (inverse-distance method)

역거리법은 본 연구에 적용된 방법으로서, 경험적으로 결정되는 계수 m 은 기존의 연구결과에서 정확하다고 판단된 1~3 사이의 값 중 2를 사용하였으며, 관측소의 개수 n 은 4개 지점을 사용하였다. 역거리법의 수식은 식 (13-9)와 같다.

$$\omega_i = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i / d_i^m)}{\sum_{i=1}^n (1 / d_i^m)} \quad (13-9)$$

여기서 d_i 는 n 개 관측소와 미계측 유역과의 거리이다.

세가지 방법에 대해서 적용성을 평가해 본 결과, 역거리법으로 추정된 매개변수가 실측치와 높은 상관성을 보였으므로, 본 연구에서는 역거리법을 매개변수 추정에 사용하였다.

5. 모형의 적용

일별기상자료로부터 계산된 통계치와 매개변수를 이용하여 각 지점의 일별 기상자료를 대상 측후소 및 관측소의 자료기간에 대하여 모의발생하였으며, 일별기상자료에 대한 χ^2 검증을 통해 본 모형의 적용성을 살펴보았으며, 그 결과는 <표 13-1>에서와 같다. 또한, 기상자료의 비교를 위하여 두 계열간의 R^2 와 RMSE (root mean square error)를 계산하여 실측치와 모의발생치의 상관성을 분석하였으며(이 등, 1994), 그 결과는 <표 13-2>에 나타내었다.

(그림 13-1)~(그림 13-4)는 수원측후소의 일별기상인자 중에서 월평균 강수량과 최고온도에 대한 실측치와 모의치의 결과 예를 보여주고 있다.

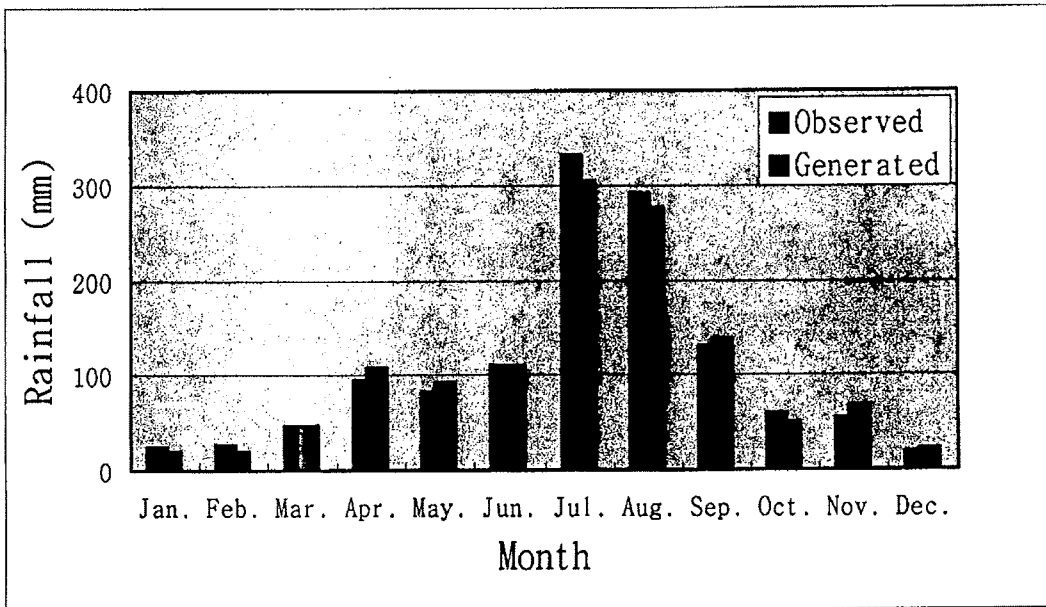
<표 13-1> 적합도 검정

Station	Rainy days		Rainfall		Max. temp.		Min. temp.		Humidity	
	χ^2	GOF*	χ^2	GOF	χ^2	GOF	χ^2	GOF	χ^2	GOF
Gangneung	0.53	NS**	25.61	S***	0.04	NS	0.20	NS	0.49	NS
Seoul	0.86	NS	17.67	NS	0.06	NS	0.19	NS	0.37	NS
Incheon	1.01	NS	14.33	NS	0.04	NS	0.15	NS	0.29	NS
Suwon	1.01	NS	12.62	NS	0.07	NS	0.91	NS	0.35	NS
Cheongju	0.70	NS	4.47	NS	0.07	NS	0.63	NS	0.22	NS
Taejeon	0.67	NS	12.42	NS	0.06	NS	0.29	NS	0.38	NS
Taegu	0.90	NS	11.90	NS	0.03	NS	0.15	NS	0.37	NS
Jeonju	0.52	NS	4.55	NS	0.04	NS	0.18	NS	0.20	NS
Kwangju	1.21	NS	31.53	S	0.04	NS	0.15	NS	0.41	NS
Pusan	1.26	NS	20.80	NS	0.03	NS	4.01	NS	0.47	NS
Mokpo	1.15	NS	18.30	NS	0.03	NS	0.13	NS	0.46	NS
Icheon	1.30	NS	15.26	NS	0.06	NS	1.38	NS	0.23	NS
Chungju	0.96	NS	8.66	NS	0.06	NS	0.85	NS	0.25	NS
Mean	0.92		15.26		0.05		0.71		0.35	

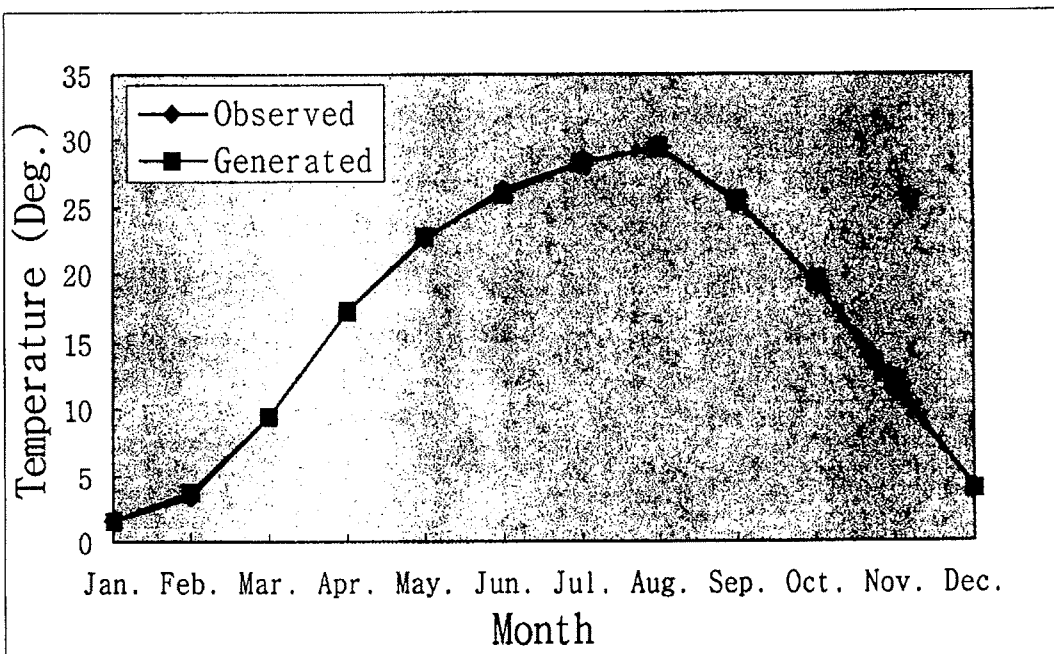
* GOF : Goodness of fit, ** NS : Not significant, *** S : Significant

<표 13-2> 일별 기상의 실측치와 모의치의 R^2 와 RMSE

Station	Rainy days		Rainfall		Max. temp.		Min. temp.		Humidity	
	R^2	RMSE (day)	R^2	RMSE (mm)	R^2	RMSE ($^{\circ}\text{C}$)	R^2	RMSE ($^{\circ}\text{C}$)	R^2	RMSE ($^{\circ}\text{C}$)
Gangneung	0.976	0.58	0.957	14.51	0.926	2.81	0.999	0.32	0.977	1.58
Seoul	0.940	0.76	0.989	13.33	0.999	0.22	0.999	0.29	0.561	4.71
Incheon	0.931	0.76	0.988	9.72	0.999	0.23	0.999	0.24	0.960	1.29
Suwon	0.936	0.76	0.991	11.31	0.999	0.23	0.999	0.29	0.937	1.44
Cheongju	0.924	0.71	0.993	6.70	0.999	0.22	0.999	0.30	0.974	1.15
Taejeon	0.940	0.71	0.989	9.96	0.999	0.23	0.999	0.28	0.963	1.50
Taegu	0.939	0.71	0.990	7.13	0.999	0.22	0.999	0.27	0.966	1.26
Jeonju	0.940	0.65	0.994	6.92	0.999	0.22	0.999	0.27	0.907	1.15
Kwangju	0.816	0.96	0.937	22.25	0.999	0.21	0.999	0.26	0.930	1.58
Pusan	0.865	1.19	0.971	16.03	0.999	0.17	0.994	0.71	0.983	1.55
Mokpo	0.798	0.91	0.950	13.12	0.999	0.20	0.999	0.24	0.933	1.68
Icheon	0.893	0.91	0.984	12.39	0.999	0.24	0.999	0.28	0.972	1.15
Chungju	0.930	0.76	0.991	7.80	0.999	0.23	0.999	0.30	0.972	1.22
Mean	0.910	0.80	0.979	11.63	0.993	0.42	0.999	0.31	0.926	1.64



(그림 13-1) 월 평균강수량의 실측치와 모의치



(그림 13-2) 월평균 최고온도의 실측치와 모의치

가. 강수량

강수발생일의 경우에는 관측치와 모의발생치와의 χ^2 값이 0.52~1.30의 범위로
서 모든 대상 지점에서 그 적합성이 인정되었다. 실측치와 모의발생치의 R^2 은 광주
지점이 0.816으로 가장 낮았고b 강릉지점이 0.976으로 가장 높은 값을 보였으며,
RMSE는 0.58~1.19일의 범위를 나타내었다.

월별 강수량의 관측치와 모의발생치의 월평균 값에 대한 각 지점의 χ^2 값은 4.4
7~31.53의 분포를 보였는 데b 이는 강수발생빈도의 경우보다 큰 값을 나타내었다.
대상 측후소 및 기상관측소 13개소 중에서 강릉, 부산, 목포 등을 제외한 10개소 지
점이 5% 유의수준에서 적합도가 인정되었는 데, 지역적으로 볼 때 전국에 걸쳐 고
르게 분포되어 있다. 모형을 적용한 결과, 실측치와 모의발생치의 R^2 은 0.937~
0.994의 범위로서 높은 상관성을 보였으며, RMSE는 6.70~22.25 mm의 범위를 나타
내었다.

나. 최고 및 최저온도 모의발생

월별 최고온도의 관측치와 모의발생치의 χ^2 값은 0.03~0.07의 범위를 나타내
어 모든 대상 지점에 대해서 5% 유의수준에서 그 적합성이 인정되었다. R^2 은
0.926~0.999의 범위를 나타냈으며, 평균 0.993으로서 실측치와 모의발생한 값은 높
은 상관성을 보였다. RMSE는 강릉지점이 가장 큰 2.81 °C의 값을 보였고, 나머지
대상지점에서는 0.17~0.24 °C의 값을 나타내었다.

월별 최저온도의 관측치와 모의발생치의 χ^2 값은 부산이 4.01로서 가장 큰 값을
보였고 목포지점이 0.13으로서 최소치를 나타냈으며, 모든 대상지점이 0.13~4.01의
범위로서 최고온도보다 높은 값을 나타냈으나 5% 유의수준에서 그 적합성이 인정
되었다. 또한, R^2 은 모든 대상지점에서 0.999의 값을 보였으며, RMSE는 0.24~0.71
°C의 범위를 보였다.

다. 상대습도 모의발생

상대습도는 사용된 자료기간을 이용하여 대상 측후소와 기상관측소 등 13개 지
점을 대상으로 모의발생시켜 관측치와의 월별 변화를 비교하였다.

월별 상대습도의 월평균 관측치와 모의발생치의 χ^2 값은 강릉측후소가 0.49로서

최대값을 보였고, 전주지점이 0.20으로 최소값을 나타냈다. 13개소 대상 측후소 및 기상관측소의 χ^2 값이 0.20~0.49의 범위로서 모든 대상지점에 대해 5% 유의수준에서 그 적합성이 인정되었다. 상대습도의 관측치와 모의발생치의 R^2 와 RMSE는 서울지점에서 0.561과 4.71 %의 값을 보여 낮은 상관성을 보였으나, 나머지 지점에서의 R^2 은 0.930~0.977의 범위를 보여 높은 상관성을 보였으며, RMSE는 1.15~1.68 %의 범위를 보였다.

6. 모형의 응용

가. 대상지점 및 자료

미계측 유역의 기상인자는 2개 관측소를 미계측 관측소로 가정하여 추정하였으며, 사용된 각 관측소의 지형적 특성치와 자료기간은 <표 13-3>과 같다.

수원관측소를 미계측 유역으로 가정하고 주위의 서울, 인천, 양평, 아산관측소의 매개변수들을 이용하여 수원관측소의 매개변수를 추정하였다. 같은 방법으로 울산관측소의 매개변수도 주위의 포항, 부산, 영천, 밀양관측소의 매개변수들을 이용하여 추정하였다.

<표 13-2> 측후소별 현황

Station	Station Number	The North Latitude	The East Longitude	Height (EL.m)	Recording Years
Suwon*	119	37° 16'	126° 59'	36.9	'64-'94
Seoul	108	37° 34'	126° 58'	85.5	'07-'94
Inch'on	112	37° 29'	126° 38'	68.9	'49-'94
Yangp'yong	202	37° 29'	127° 30'	49.0	'73-'94
Asan	232	36° 47'	126° 59'	24.5	'73-'94
Ulsan*	152	35° 33'	129° 19'	31.5	'46-'94
P'ohang	138	36° 02'	129° 24'	2.5	'49-'94
Pusan	159	35° 06'	129° 02'	69.2	'04-'94
Yongch'on	281	35° 58'	128° 57'	91.3	'73-'94
Miryang	288	35° 29'	128° 45'	12.5	'73-'94

* : ungaged station

나. 미계측 유역의 매개변수 추정

수원, 울산관측소를 미계측지점으로 가정하고 매개변수를 추정해 본 결과는 <표 13-4>와 <표 13-5>에서와 같다.

수원관측소에 적용한 결과, 각각의 기상변수에 대해 R^2 값이 0.951~0.999의 범위를 보였고, 울산관측소에 대해서는 R^2 값이 0.861~0.999의 높은 경향성을 보였다. R^2 값은 각각의 기상변수에 대해, 온도가 높은 값을 보였고 강우발생일에 대한 기상변수가 낮은 값을 보였다.

<표 13-4> 매개변수의 실측치와 모의치의 비교

Parameter		Month												RMSE	R ²
		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.		
Pdd	Obs.	0.8162	0.8102	0.8065	0.7783	0.7884	0.7760	0.6319	0.6976	0.7948	0.8167	0.7235	0.7514	0.014	0.951
	Est.	0.8129	0.8160	0.8104	0.7886	0.7914	0.7536	0.6535	0.7126	0.7855	0.8270	0.7510	0.7640		
Pww	Obs.	0.3302	0.3824	0.3559	0.4457	0.4280	0.4843	0.6354	0.5995	0.5037	0.3927	0.4242	0.3295	0.022	0.966
	Est.	0.3318	0.3452	0.3553	0.4270	0.4190	0.4829	0.6455	0.5930	0.4581	0.3803	0.3810	0.3314		
Rainfall	Obs.	24.12	28.44	47.28	90.14	88.91	118.26	326.22	279.98	145.46	59.36	53.52	22.77	11.79	0.988
	Est.	21.75	24.25	45.56	80.04	86.20	133.14	324.88	245.97	141.71	50.34	46.89	26.35		
Tmin	Obs.	-8.84	-6.75	-1.55	4.87	10.80	16.30	21.13	21.37	14.85	7.02	0.41	-5.95	0.247	0.999
	Est.	-8.08	-5.69	-0.50	5.84	11.49	16.64	21.12	21.59	15.71	8.44	1.75	-4.80		
Tmax	Obs.	1.51	3.40	9.38	17.36	22.70	26.28	28.41	29.38	25.28	19.53	11.41	4.05	0.926	0.999
	Est.	0.88	3.39	9.37	17.02	22.55	26.27	28.56	29.68	25.48	19.60	11.38	3.85		
Hum	Obs.	70.22	68.87	68.70	67.38	70.27	75.31	82.13	81.12	78.43	75.91	70.88	70.20	2.44	0.952
	Est.	67.55	66.44	66.06	64.98	67.45	74.32	82.25	80.02	75.55	70.98	69.79	68.87		

* Pdd : Probability of dry/dry day , Pww : Probability of wet/wet day ,
Rainfall : Monthly Mean Rainfall, Tmin : Ave. monthly minimum air temp. ,
Tmax : Ave. monthly maximum air temp. Hum : Ave. relative humidity

<표 13-5> 울산지점의 매개변수 실측치와 모의치의 비교

Parameter		Month												RMSE	R ²
		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.		
Pdd	Obs.	0.8873	0.8548	0.8011	0.7470	0.7672	0.7370	0.7580	0.7615	0.7445	0.8455	0.8383	0.8834	0.014	0.939
	Est.	0.8922	0.8583	0.7958	0.7548	0.7907	0.7455	0.7324	0.7619	0.7754	0.8526	0.8454	0.8807		
Pww	Obs.	0.4039	0.5189	0.3942	0.4345	0.4331	0.5039	0.6443	0.5551	0.5411	0.4175	0.4169	0.3879	0.033	0.861
	Est.	0.3712	0.4999	0.4388	0.4635	0.4655	0.4973	0.5682	0.5307	0.5342	0.4368	0.4473	0.4050		
Rainfall	Obs.	32.64	45.66	70.91	109.69	102.30	165.35	207.45	204.32	185.23	61.99	54.01	32.17	13.86	0.970
	Est.	29.25	38.83	60.54	100.31	96.85	161.22	222.54	193.46	146.81	55.12	45.32	24.45		
Tmin	Obs.	-3.56	-2.03	1.72	7.12	11.92	16.46	21.32	22.19	17.06	10.55	4.37	-1.35	0.427	0.999
	Est.	-4.31	-2.69	1.49	7.08	11.95	16.65	21.18	21.94	16.71	10.24	4.00	-1.89		
Tmax	Obs.	6.43	8.00	12.27	18.11	23.00	25.50	28.88	30.25	25.74	21.34	15.29	9.23	0.388	0.999
	Est.	5.71	7.55	12.29	18.23	23.08	25.59	28.45	29.74	25.68	21.30	14.62	8.50		
Hum	Obs.	56.60	58.92	63.51	69.19	72.21	79.08	83.13	81.09	78.95	71.80	65.98	59.09	3.53	0.970
	Est.	55.71	57.10	60.28	63.66	66.54	74.59	80.31	78.13	74.90	67.99	63.91	59.29		

제 3 절 논에서의 영양물질추정 모형

1. 개론

우리 나라 하천과 호소의 수질관리는 대부분 점오염원 (Point Source)인 생활하수, 축산폐수와 공장폐수를 중심으로 이루어져 왔는데, 최근 들어 이 같은 점오염원에 대한 처리시설과 처리량을 증가시켜도 하천과 호소의 수질이 크게 개선되지 않는다는 것을 인식하게 되었다 (이, 1989). 이러한 현상은 여러 가지 비점오염원 (non-point source) 가운데 수계 환경에 영향을 미칠 수 있는 농약, 비료 및 농업배수와 같은 농업비점오염원 (agricultural non-point source)에 대한 환경용량이 제대로 평가되지 않았기 때문이라는 주장이 제기되고 있다 (박, 1996; 정, 1996; 최, 1996).

따라서, 농경지 생태환경을 체계적이고 환경친화적으로 평가하기 위해서는 논에서의 오염물질 배출량에 대한 평가가 선행되어야 한다. 또한, 논에서의 영양물질의 유출은 강우 및 영농방식에 따라 상이하므로, 논에서의 농업비점오염물질의 유·출입 수지와 유출 메카니즘에 대한 정량적인 평가와 더불어 논에서의 영양물질의 거동을 예측하여 연간 유출부하량을 평가할 수 있는 모형이 필요한 실정이다.

국내의 논에서의 영양물질의 부하에 관한 연구로는 권 등 (1989)과 신 (1990)이 경기도 화성군에서 농경지에서의 질소와 인의 유출에 관하여 조사 분석했으며, 김 (1999)은 충북 청원군 광역논 지구에 대하여 오염물질의 물질수지를 파악하는 등 최근들어 활발히 연구가 진행되고 있다. 그러나 논외 비점오염 배출부하량은 조사지역의 시비량, 관개수량 등의 조건과 샘플링 시기, 방법에 따라 다르게 발표되고 있다. 홍 등 (1989)은 총질소 배출량이 12 kg/ha, 총인은 2 kg/ha 정도로 추정하였다. 신 (1990)은 각각 39 kg/ha, 9 kg/ha, 일본의 國松孝男 (1989)은 31 kg/ha, 1 kg/ha 등으로 추정하였으며, 김 (1999)은 광역논에서 12.1kg/ha, 0.42kg/ha로 추정하였다.

논에서의 물질순환과정에 관한 모형으로는 일본의 Wada, Shoji (1986)의 질소흡수기작모형, Mori (1991)의 질소, 인의 이동기작 모형 등이 있다. 하지만, 이들 모형은 단지 담수조건에서의 영양물질 반응식만이 표현되어 있어 종합적인 비점오염모형이라고 할 수는 없다. 진 (1998)은 포장단위의 농업비점오염 모형인 CREAMS 모형

을 근거로 하여 논외 물수지 및 물질수지를 고려한 CREAMS-PADDY 모형을 구성하여, 경기도 수원시 서울대학교 정밀포장에 적용한 바 있다.

본 절에서는 기존에 개발된 CREAMS-PADDY모형을 논에서의 영농변화와 담수 환원조건에 맞는 영양물질 반응식으로 개선하고, 관행 영농지역에서의 벼의 생육기간 동안 논에서의 시기별 담수농도 및 유출부하의 특성을 파악하여 CREAMS-PADDY 모형의 적용성을 평가하도록 한다.

2. 모형의 개발

가. CREAMS 모형

CREAMS (Chemical, Runoff and Erosion from Agricultural Management System)모형은 미농무성에서 개발된 모형으로서 논에서의 영양물질의 순환과정에 대해 장단기 모의발생이 가능하다. CREAMS 모형은 기상·수문자료, 토양, 경종, 시비량 등 영농관리 자료를 바탕으로 포장에서의 유출, 토양유실, 비료물질의 부하량을 계산한다.

한편, CREAMS의 수문 과정은 관개 논에서의 경우에 적용이 어렵고, 또한 농업화학물질에 있어서도 담수상태의 기작을 표시하는 데 곤란하다. 이를 개선하기 위해 CREAMS 모형의 수문모형을 논외 조건에 맞도록 수정하고, 담수상태에서의 물질 운송 기작을 포함하도록 하였으며, 그 밖의 입력·출력 등의 기능은 그대로 보전하여, CREAMS 모형의 입력자료를 최소한으로 보완하도록 하여 CREAMS 모형과 호환되도록 한 CREAMS-PADDY모형을 구성하였다.

CREAMS를 수정한 모형인 CREAMS-PADDY 모형의 개요를 도식적으로 나타내면 (그림 13-3) 과 같다.

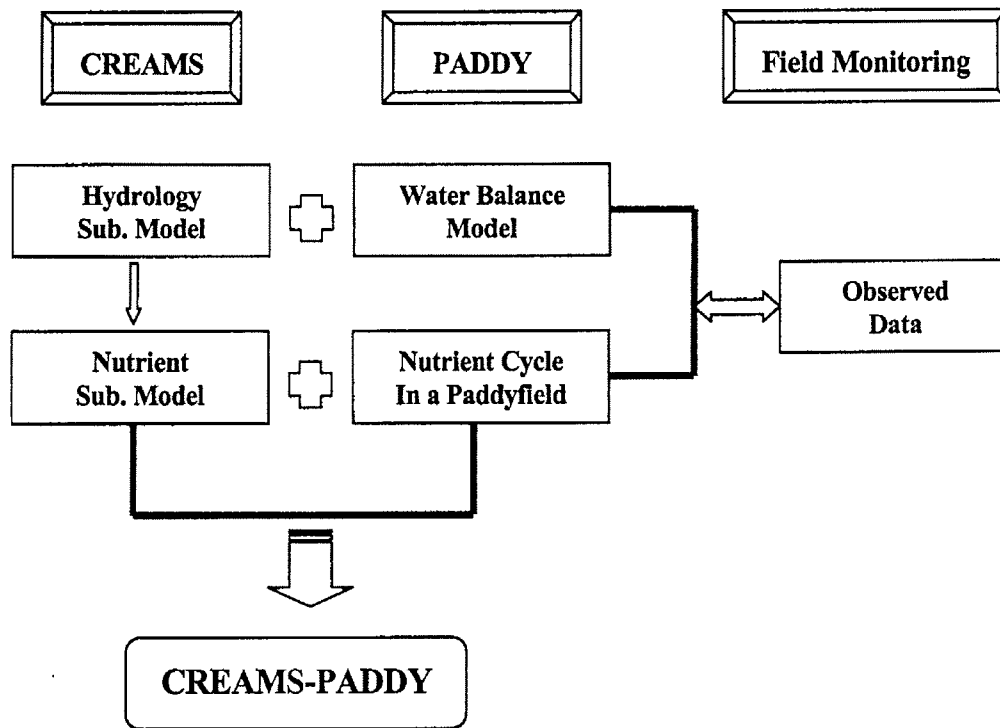
나. CREAMS-PADDY 모형

1) 논에서의 물수지

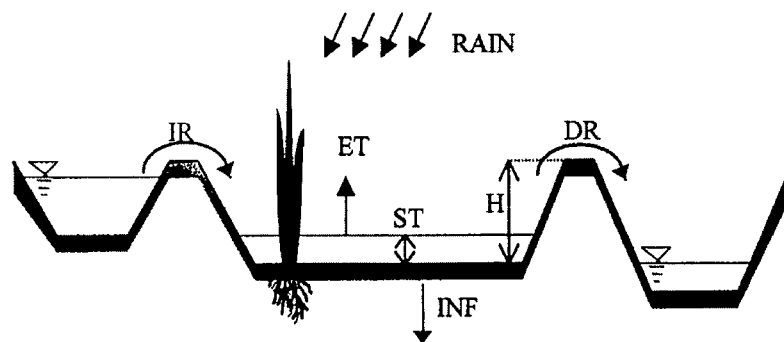
논에서의 일별 담수심은 강우량, 관개량, 침투량, 증발산량, 유출량 등의 변화에 따라 좌우된다. 담수심의 일별 변화를 물수지식으로 표현하면 다음 식과 같다.

$$W_t = W_{t-1} + IR_t + RAIN_t - INF_t - ET_t - DR_t \quad (13-10)$$

여기서, IR은 관개량 (mm), RAIN은 강수량 (mm), INF는 침투량 (mm), ET는 증발산량 (mm), DR은 유출량 (mm)이다. (그림 13-4)는 논에서의 물수지의 개념도를 보여주고 있다.



(그림 13-3) CREAMS-PADDY 모형의 구성도



(그림 13-4) 논에서의 물수지

가) 유출량

유출량은 담수심과 물꼬높이의 관계로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$DR_t = W_t - H_t \quad \text{if } W_t > H_t \quad (13-11)$$

$$DR_t = 0.0 \quad \text{if } W_t \leq H_t$$

여기서, DR_t 는 t 일의 지표배수량 (mm/day), H_t 는 물꼬높이 (mm)로서 담수심이 물꼬높이 이상일 경우 물꼬높이 이상의량은 전량 지표배수되는 것으로 가정하였다.

나) 관개량

논으로의 관개량은 일별 관개량 자료로부터 입력하거나 필요수량과 논에서의 물수지를 이용하여 계산할 수 있도록 하였다. 관개량은 다음 식과 같이 나타내어진다.

$$IR_t = 0.0 \quad \text{if } W_t \geq HPD_t \quad (13-12)$$

$$IR_t = HPD_t - W_t \quad \text{if } W_t \leq LPD_t$$

여기서, HPD 는 최고담수심, LPD 는 최저담수심이다. 즉, 관개는 담수심이 최저담수심이하로 내려갈 경우 최고담수심까지 관개하게 되며, 최고담수심 이상일 경우는 관개하지 않게 된다. 최고담수심 및 최저담수심은 비의 생육에 따라 변화할 뿐만 아니라, 관개방식에 따라서도 변화하게 되므로, 간단관개나 천수관개 등도 모의할 수 있도록 구성하였다.

다) 증발산량

CREAMS모형에서는 Ritchie (1971)식을 이용하여 밭에서의 토양 증발량과 작물의 증산량을 계산한다. 논벼의 경우는 수면에서의 증발량과 작물의 증산량을 증발산량으로 계산하게 되는데, Ritchie식을 그대로 사용할 경우 증발산량이 과소평가되는 문제점이 있다. 이를 보완하기 위해 현재 우리 나라에서 논벼의 일 증발산량을 추정하는데 보편적으로 사용되어지고 있는 FAO 수정 Penman식과 작물계수를 이용하여 식 (13-13)과 같이 구하였다.

$$ET_t = K_c \cdot ET_p \quad (13-13)$$

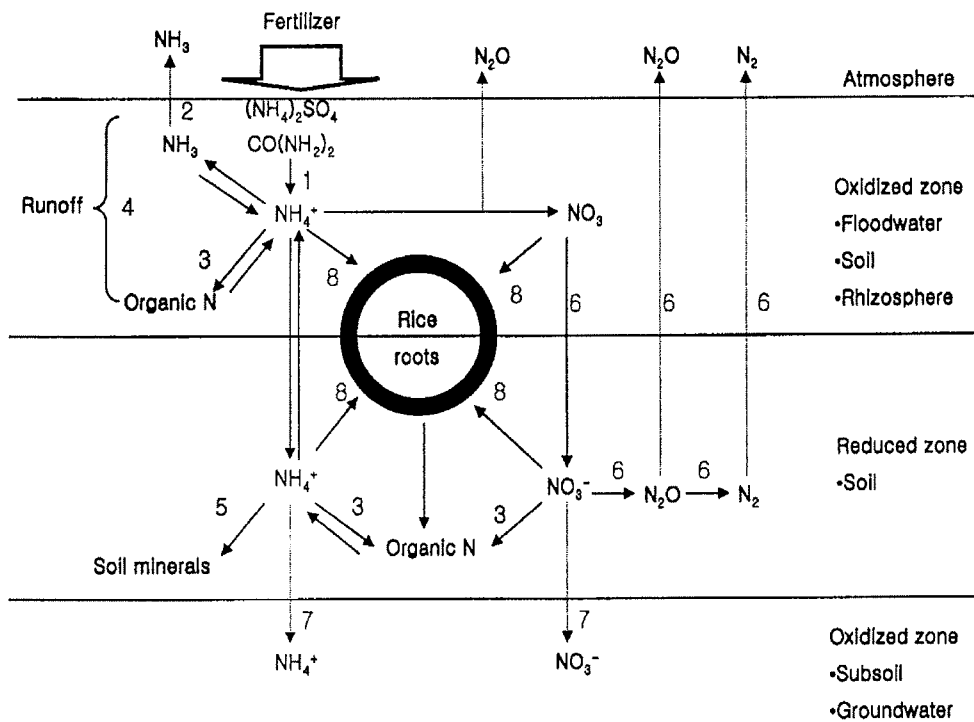
여기서, ET 는 논벼의 실제 증발산량 (mm/day), K_c 는 논벼의 작물계수이며, ET_p 는

잠재증발산량 (mm/day)이다. 잠재증발산량, ET_p 는 수정 Penman식을 이용하여 구하였다.

2) 관개논 질소 수지

논에서의 영양물질의 이동 및 반응은 산화층과 환원층으로 구분하여 설정하였다. 산화층은 담수와 토양표층 1cm로 가정하였으며, 논에서의 유출에 의한 영양물질의 유실은 산화층의 농도에 따라 결정되는 것으로 가정하였다. 영양물질의 형태는 질소의 경우 산화와 환원층에서의 반응양상이 다르므로 암모니아태 질소와 질산태 질소, 유기태 질소 등으로 구분하여 반응식을 구성하였다.

(그림 13-5)는 관개논에서의 질소수지 모식도를 보여주고 있다.



1=urea-hydrolysis, 2=ammonia-volatilization, 3=nitrogen-immobilization, 4=runoff, 5=ammonium fixation, 6=denitrification, 7=leaching, 8=plant uptake.

(그림 13-5) 논에서의 질소수지 모식도

논에서의 질소의 유출입은 강우와 관개수에 용해되어 유입되거나, 비료 및 유기물 형태로 투입되어 침투, 탈질, 휘산, 작물 흡수 등으로 소비되며, 담수에 용해되어 용해 상태로 유출과 함께 흘러 나가거나, 유출 토사에 흡착되어 유실된다.

토양내 질소 등의 영양물질의 이동기작을 해석하는 방법은 식 (13-14)와 같은 이류-확산 반응식 (advective-dispersive-reaction equation)인 물질수지식을 이용하여 해석하였다.

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} + \rho \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (qC) + \Delta \quad (13-14)$$

여기서, θ 는 토양수분 함량 ($\text{m}^3 \text{ water} / \text{m}^3 \text{ soil}$), C 는 영양물질 농도 (g/m^3), S 는 흡착량 (mg/kg), D 는 확산계수 (m^2/day), q 는 깊이방향은 유속 (m/day), Δ 는 영양물질의 공급 및 유출 ($\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$)이다.

흡착의 경우는 암모니아태 질소 및 인산에 대하여 적용되며, 질산태 질소의 경우는 흡착력이 매우 작으므로 흡착은 무시한다. Δ 는 영양물질의 형태 및 위치에 따라 달라지게 된다. 본 연구에서는 식 (13-14)를 물질수지식으로 정리하여 산화층과 환원층에 대한 식을 구성하였다.

가) 산화층에서의 반응 및 이동

산화층에서는 관개수 및 강우에 의하여 유입되거나 시비로부터 투입되어 암모니아 휘산을 통해 외기로 방출되며, 질산화를 통하여 질산태 질소로 변환되어 침투와 유출이 발생하게 된다.

암모니아태 질소의 물질수지식은 식 (13-15)와 같이 구성할 수 있다.

$$\begin{aligned} SOLNH_t = & SOLNH_{t-1} + FERNH_t + RAINNH_t + IRRINH_t \\ & - RNIT_t - VOLT_t - DWNH_t - RONH_t - SEDN_t \end{aligned} \quad (13-15)$$

여기서, $SOLNH$ 는 산화층에서의 암모니아태 질소의 량 (kg/ha), $FERNH$ 는 암모니아태 질소의 시비량 (kg/ha), $RAINNH$ 는 강우로부터의 암모니아태 질소량 (kg/ha), $IRRINH$ 는 관개수로부터의 암모니아태 질소량 (kg/ha), $RNIT$ 는 산화층에서의 암모니아태 질소의 질산화량 (kg/ha), $VOLT$ 는 산화층에서의 암모니아 휘산량 (kg/ha), $DWNH$ 은 환원층으로의 암모니아태 질소 침투량 (kg/ha), $RONH$ 는 표면수에서의 유출에 의한 손실량 (kg/ha), $SEDN$ 은 토양 유실에 따른 손실량 (kg/ha), 침자

t는 시간 (day)이다.

질산태 질소에 대하여는 다음과 같은 물질수지식으로 구성된다.

$$SOLNO_t = SOLNO_{t-1} + FERNO_t + RAINNO_t + IRRINO_t + RNIT_t - DNIT_t - DWNO_t - RONO_t \quad (13-16)$$

여기서, SOLNO는 산화층에서의 질산태 질소의 량(kg/ha), FERNO는 질산태 질소 형태의 시비량 (kg/ha), RAINNO는 강우로부터의 질산태 질소 유입량 (kg/ha), IRRINO는 관개수로부터의 질산태 질소 유입량 (kg/ha), RNIT는 암모니아태 질소의 질산화량 (kg/ha), DNIT는 질산태 질소의 탈질량 (kg/ha), DWNO는 질소 침투량 (kg/ha), RONO는 유출수에 의한 손실량 (kg/ha) 이다.

유기태 질소는 다음과 같은 식으로 표현이 가능하다.

$$SOLORN_t = SOLORN_{t-1} + FERORN_t + RAINORN_t + IRRIORN_t - DWORN_t - ROORN_t \quad (13-17)$$

여기서, SOLORN은 산화층에서의 유기태 질소의 량 (kg/ha), FERORN는 유기태 질소 시비량 (kg/ha), RAINORN는 강우로부터의 유기태 질소 유입량 (kg/ha), IRRIORN은 관개수로부터의 유기태 질소의 유입량 (kg/ha), DWORN는 유기태 질소 침투량 (kg/ha), ROORG는 유출수에 의한 손실량 (kg/ha)이다.

나) 환원층에서의 반응 및 이동

환원층에서의 질소의 수지는 다음과 같다.

$$AMMO_t = AMMO_{t-1} + FERNH2_t + DWNH_t + MINEL_t + FIXN_t - RNIT2_t - UPNH_t - PERNH_t \quad (13-18)$$

여기서, AMMO은 암모니아태 질소의 량 (kg/ha), FERNH2는 토층 시비량 (kg/ha), DWNH는 산화층으로부터의 침투량 (kg/ha), MINEL은 토층에서의 무기화량 (kg/ha), FIXN은 대기로부터의 질소 고정량 (kg/ha), RNIT2는 토층에서의 질산화량 (kg/ha), UPNH는 작물 흡수량 (kg/ha), PERNH는 작토층 이하로의 침투량 (kg/ha)등이다.

질산태 질소의 수지는 다음과 같다.

$$NOX_t = NOX_{t-1} + FERNO2_t + DWNO_t + RNIT2_t - DNI_t - UPNO_t - PERNO_t \quad (13-19)$$

3) 관개논 인 수지

논에서의 인의 거동은 산화층과 환원층의 반응이 같다고 보았으며, 단지 작물에 의한 흡수는 환원층에서 발생한다고 가정하였다.

산화층에서의 총인의 물질수지는 다음과 같다.

$$SOLP_t = SOLP_{t-1} + FERP_t + RAINP_t + IRRIP_t - DWP_t - ROP_t - SEDP_t \quad (13-20)$$

여기서, SOLP는 산화층에서의 총인량 (kg/ha), FERP는 시비 총인량 (kg/ha), RAINP는 강우에 의한 총인량 (kg/ha), IRRIP는 관개에 의한 총인량 (kg/ha), DWP는 환원층으로의 침투량 (kg/ha), ROP는 유출수에 의한 손실량 (kg/ha), SEDP는 토양 유실에 의한 손실량 (kg/ha) 등이다.

환원층에서 총인의 물질수지는 식 (13-21)과 같이 나타내어진다.

$$PO4_t = PO4_{t-1} + FERP2_t + DWP_t - UPPO4_t - PERP_t \quad (13-21)$$

여기서, PO4는 토층내 총인의 양 (kg/ha), FERP2는 토층 시비량 (kg/ha), DWP는 산화층으로부터의 침투량 (kg/ha), UPPO4는 작물에 의한 흡수량 (kg/ha), PERP는 근근역 이하로의 침투량 (kg/ha)이다.

강우 및 관개수와 시비에 의한 총인의 유입량 계산은 질소와 동일하며, 유출수 및 침투수의 농도는 암모니아태 질소와 같이 Langmuir의 등은 흡착식을 통해 구한다.

작물에 의한 총인의 흡수량 $UPPO_4$ (kg/ha)는 작물의 N:P 농도비율인 RNP를 통해 구하였다. 벼의 경우 RNP는 0.75로 알려져 있다. 인 흡수량은 다음 식과 같다.

$$UPPO_4 = UP \times (1 - RNP) \quad (13-22)$$

3. 모형의 적용

가. 대상지구 및 자료

논에서의 영양물질의 물질수지와 유출특성을 조사하기 위해서는 가능한 경지정리가 된 곳으로 월담배수가 적고, 제반 관측 시설의 설치 및 관리가 편리하며, 기상자료의 수집이 용이한 곳을 대상으로 선정하여야 한다. 본 연구에서는 관개기 논에서의

수문 및 물질모니터링을 위한 시험지구로 경기도 화성군 팔탄면 기천리 일대의 기천지구를 선정하였다. 기천지구는 2000년 5월에서 9월간 모니터링 한 자료를 사용하였다. 기천지구는 단일 용수원인 기천저수지로부터 관개용수를 공급받으며, 용배수 계통이 단순하여 물수지 및 영양물질의 유출입 모니터링이 용이하다.

논에서의 물질순환 추정을 위한 모니터링 자료는 제5장을 참조하기 바란다.

나. 모형의 적용 결과

수문부모형의 경우 강우량 1,243 mm에 대하여 실측 유출량이 918 mm이었으며, 추정치는 956 mm로 나타났으며, 유출율은 77%이었다. 일별 유출량에 대한 R^2 는 0.9524로 높게 나타났으며, RMSE는 8.58 mm, E^2 은 0.90이었다.

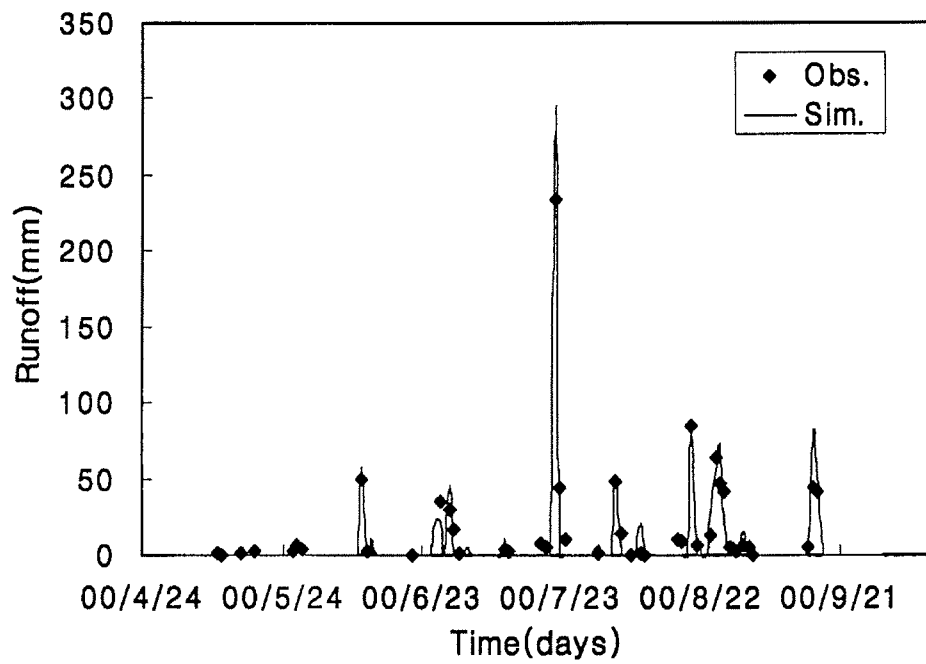
토양침식모형의 경우, 모의기간동안 67.2 kg/ha가 유실되는 것으로 모의되었으며, R^2 는 0.97로 높게 나타났고, RMSE는 5.35 kg/ha, E^2 은 0.94이었다.

영양물질부모형의 경우, 담수농도에 대한 총질소의 실측 평균 농도는 2.36 mg/L이었으며, 추정치는 6.42 mg/L로, R^2 는 0.84로 나타났으며, RMSE는 0.726 mg/L이며, E^2 은 0.502이었다. 총인의 담수농도는 실측치의 평균은 0.04 mg/L이었으며, 추정치는 0.08 mg/L로 모의되었다. 일별 담수농도에 대해서 R^2 는 0.73로 높게 나타났으며, RMSE는 0.032 mg/L, E^2 은 -6.19이었다.

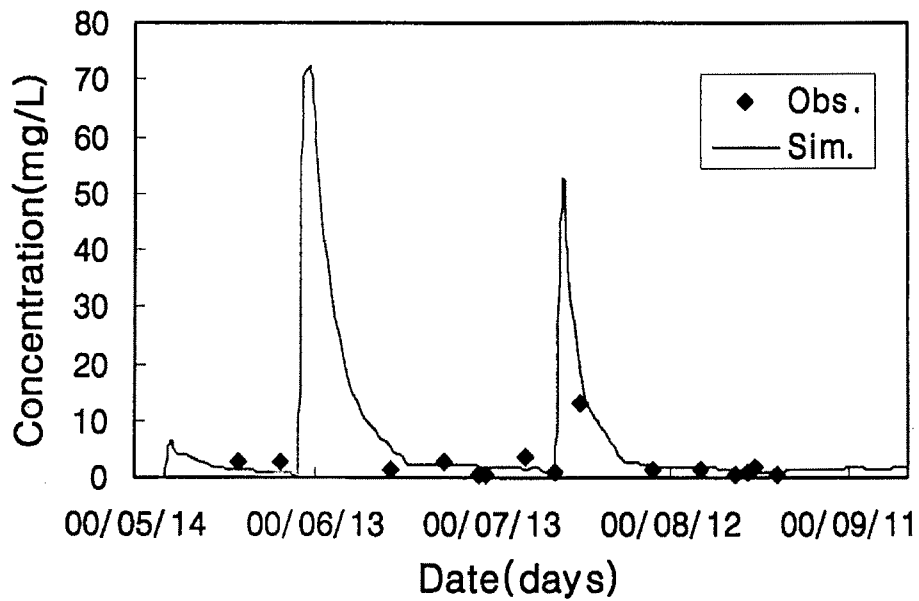
유출수에 의한 유출부하량의 경우, 총질소는 11.27 kg/ha가 배출되었으며, 일별 배출부하량에 대해서는 R^2 는 0.86로 높게 나타났으며, RMSE는 0.08 kg/ha, E^2 은 0.59이었다. 총인의 경우는 0.98 kg/ha가 배출되었으며, 일별 배출부하량에 대해서 R^2 는 0.81로 높게 나타났으며, RMSE는 0.02 kg/ha, E^2 은 0.46이었다.

(그림 13-6)~(그림 13-9)는 모형의 실측치와 모의치를 비교한 것이다.

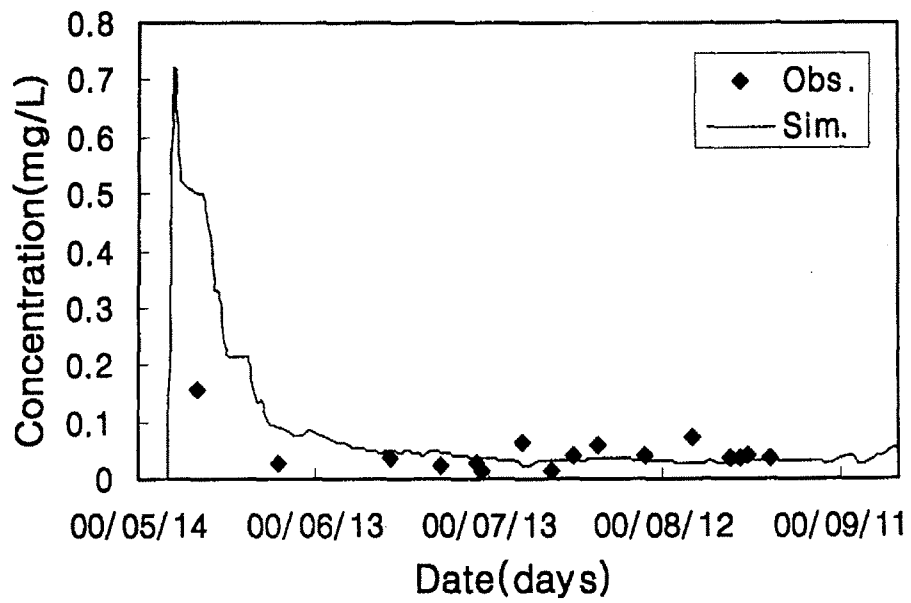
(그림 13-11)~(그림 13-15)는 모형의 일별 추정 결과의 산포도를 보여주고 있다. 수문 유출량의 경우는 추정치의 값이 대체로 크게 모의되었는데, 이는 물수지식에서 호우시 논에서의 지체시간이 고려되지 않아 유출이 당일 모두 발생하는 것으로 모의되었기 때문이다. 토양유실량의 모의 결과는 유실량이 작은 곳에서는 실측값이 유실이 큰 곳에서는 모의값이 크게 모의되었다. 이는 USLE의 LS인자와 P인자의 값이 작게 설정되어 있으므로 작은 강우에 대해서는 토양유실이 매우 작게 모의되었기 때문이다.



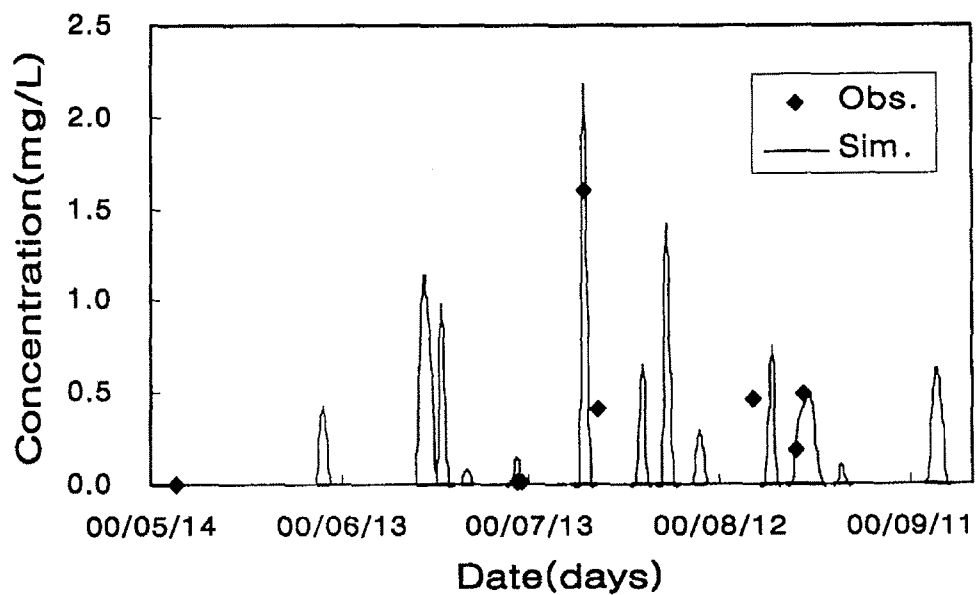
(그림 13-6) 논에서의 유출량 실측치와 모의치의 비교



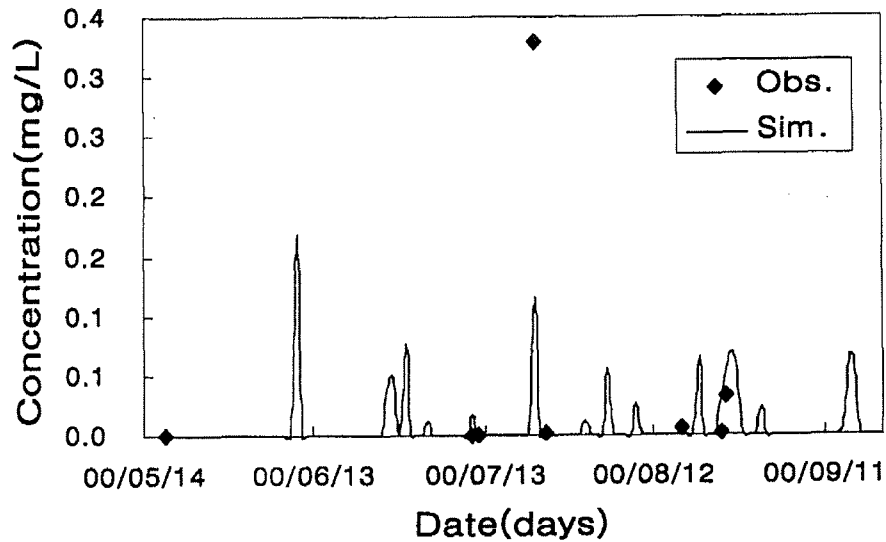
(그림 13-7) 논에서의 총인농도의 실측치와 모의치의 비교



(그림 13-8) 논에서의 총인의 실측치와 모의치의 비교

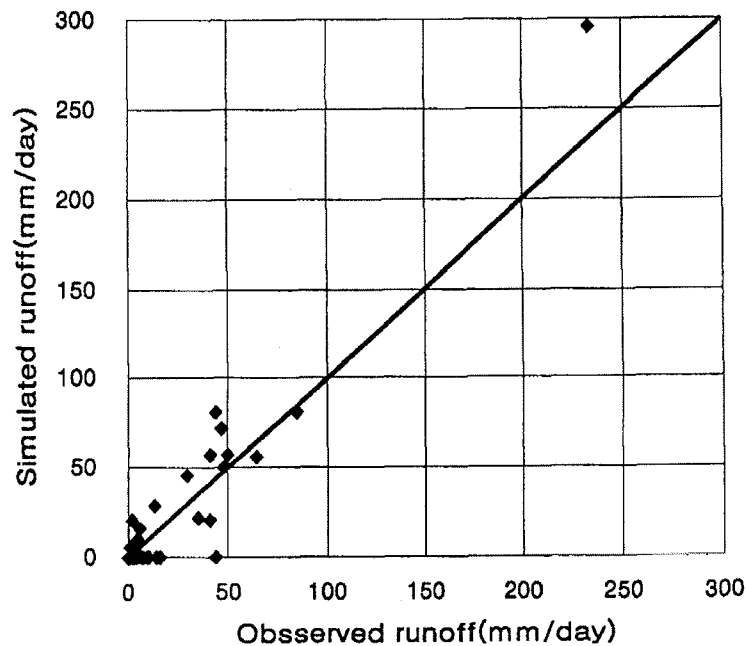


(그림 13-9) 배수시 총질소 유출부하의 실측치와 모의치의 비교

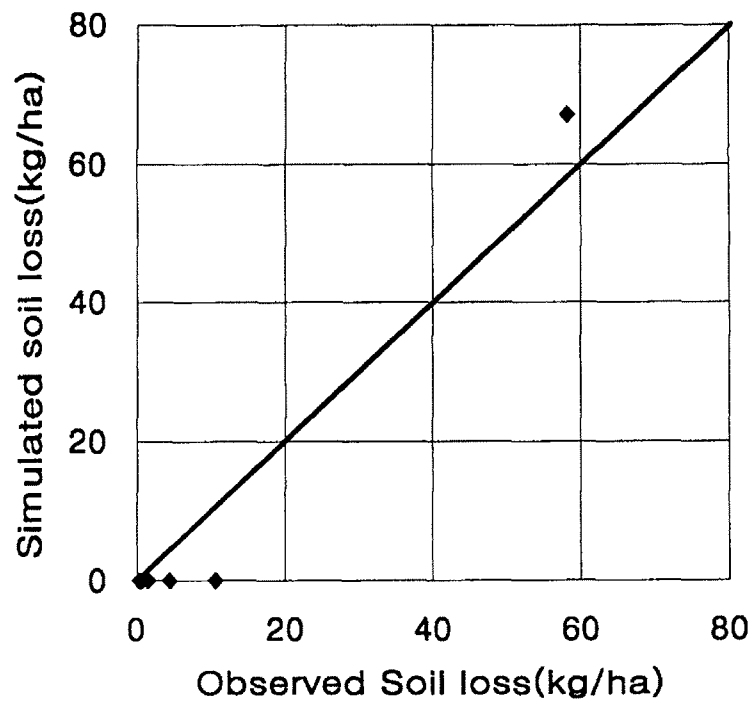


(그림 13-10) 배수시 총인 유출부하의 실측치와 모의치의 비교

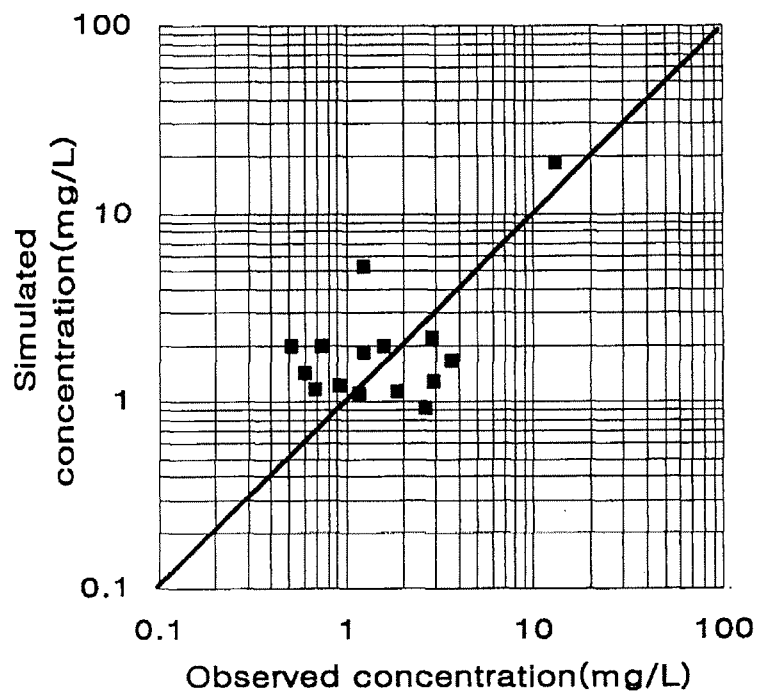
담수의 일별 농도변화는 고농도 부근에서는 모의치의 값이 크게 나타났는데, 이는 시비 직후의 농도가 모형상 크게 나타났기 때문이다. 유출수에 의한 영양물질의 일별 배출부하량의 경우는 실측값의 수가 충분히 크지 않아 상관성 분석을 충분히 할 수는 없지만, 대체적으로 실측값과 유사하게 모의되었음을 알 수 있다.



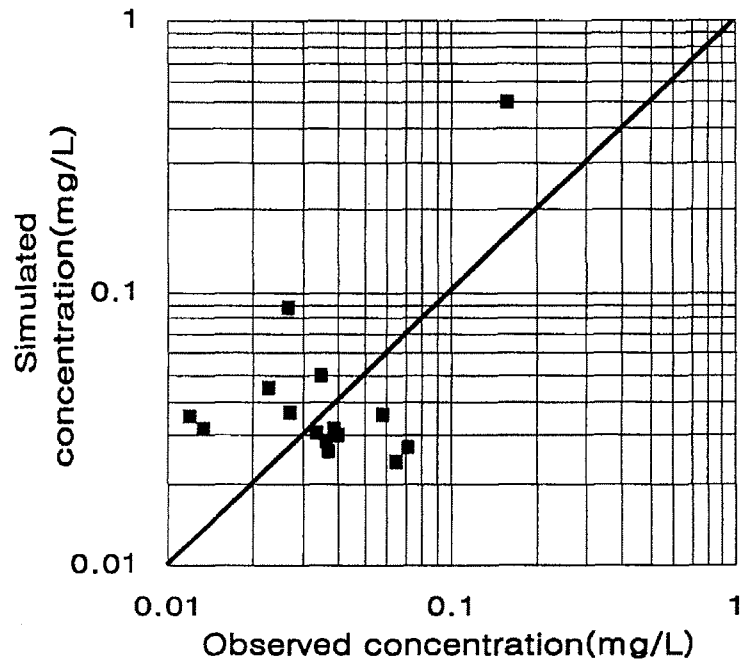
(그림 13-11) 논에서의 유출량의 실측치와 모의치의 산포도 (2000)



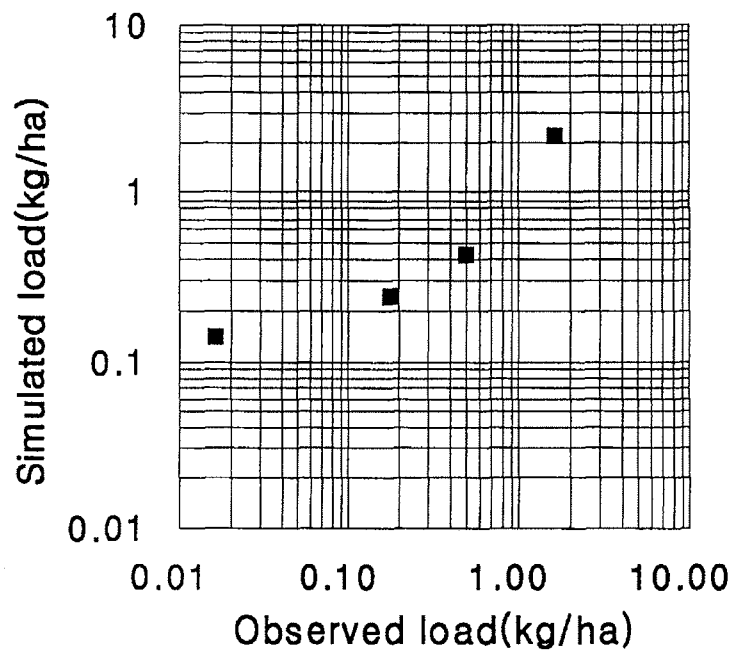
(그림 13-12) 논에서의 유실량 실측치와 모의치의 산포도 (2000)



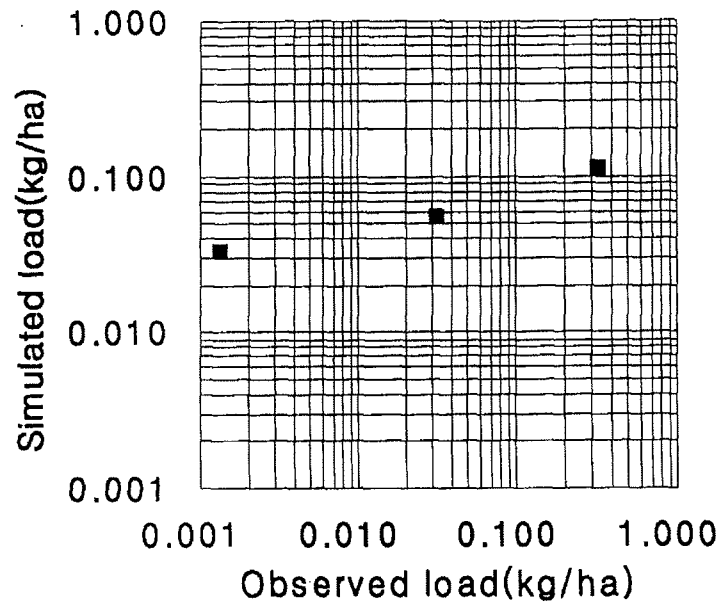
(그림 13-13) 논에서의 총질소 실측치와 모의치의 산포도 (2000)



(그림 13-14) 논에서의 총인 실측치와 모의치의 산포도 (2000)



(그림 13-15) 배수시 총질소 유출부하의 실측치와 모의치



(그림 13-16) 배수시 총인 유출부하의 실측치와 모의치의 비교

<표 13-6>과 <표 13-7>은 영양물질 모형의 검증 결과에 대한 R^2 과 RMSE 및 E^2 의 값을 정리한 것으로, 전체적으로 정확성이 높게 나타났으며, 모형의 효율도 안정권 안에 있음을 알 수 있다.

<표 13-6> 영양물질 실측치와 모의치 비교 결과

Watershed	Detail	Mean Concentration(mg/L)		R^2	RMSE	E^2
		Observed	Simulated			
Kicheon	T-N	2.36	6.42	0.84	0.726	0.50
(2000)	T-P	0.04	0.08	0.73	0.032	-6.19

<표 13-7> 유출수의 오염부하량 실측치와 모의치의 비교 결과

Watershed	Detail	Mean Load(kg/ha)		R^2	RMSE	E^2
		Observed	Simulated			
Kicheon	T-N	0.40	0.09	0.86	0.08	0.59
(2000)	T-P	0.05	0.01	0.81	0.02	0.46

제 4 절 비 에너지 흐름 모형

1. 개론

농업은 광합성에 기본적으로 요구되는 태양에너지 이외에도 보다 많고 안정적인 생산물을 얻기 위해 추가적인 에너지를 필요로 한다. 일반적으로 농업에 사용되는 에너지는 농경지의 질과 연관되어 있다. 경작지의 질에 변화가 없다면 생산량 증가를 위해 더 많은 에너지를 투입하여야 한다. 산업혁명 이후 농업생산성을 향상하는 방법은 비옥하지 못한 토지에서 경작하거나 감소된 비옥도를 보상하기 위해 에너지 투입량을 증가하는 것이었다. 1960년대 평균 1 ton/ha/yr였던 세계 평균 식량생산량은 1980년대 말 2~3 ton/ha/yr로 증가했지만 이는 관개시설 건설, 농기계이용, 에너지 집약적인 비료 사용 등으로 ha당 기름 1 배럴 정도의 에너지를 투입한 결과이다.

따라서, 태양에너지를 비롯하여 다양한 에너지 자원이 인간사회와 자연생태계 사이에서 어떻게 연계되어 있는가에 초점을 맞추고 에너지 흐름의 체계적인 분석이 필요하다.

에너지를 분석하기 위해서는 서로 다른 형태의 에너지를 동일하게 비교할 수 있는 단위가 필요하다. 왜냐하면 다른 형태의 에너지는 경제적 가치, 엔트로피, 효율도, 질, 일을 할 수 있는 능력, 농도 등이 상이하기 때문이다. 이 문제를 해결하기 위해 모든 에너지를 한가지 에너지량으로 전환시켜 나타내어야 한다 (임경수, 1998).

에너지 분석을 응용한 농업생태계의 에너지 분석은 먼저, 농업생태계의 경계를 결정하고 그 경계를 통해 투입, 산출되는 에너지흐름을 파악하고, 농업생태계의 부생태계, 구성요소를 결정하고 상호작용을 파악하며, 이를 바탕으로 농업생태계 내외의 에너지 흐름량을 산출한다. 이상의 결과를 통해 에너지 흐름을 바탕으로 한 적절한 지표를 도입하여 생태계를 분석하여야 한다 (Odum, 1998).

본 절에서는 생태환경 모델링 기술 개발중에서 생태계 분석을 위한 논에서의 물질투입량 및 에너지 흐름 분석 기법을 고찰하고, 논에서의 에너지 흐름을 전국에 대해 도별로 산정하며, 전국 평균 에너지 흐름 분석 결과로부터 논 생태계의 분석 지표를 제시하고자 한다.

2. 에너지 흐름 분석 기법

가. 분석지표

에너지 흐름을 분석하기 위해서는 농업의 행위와 관련되는 직접에너지와 물리량을 등가 에너지로서 변환하여 Calorie나 Joule 단위로 변환시켜야 한다. 농업행위와 관련된 비료, 살충제, 퇴비, 종자, 기계 등의 간접에너지와 시간단위로 조사되어지는 노동력은 간단하게 에너지의 양으로 전환되지 않는다.

이와 같은 에너지의 투입량은 <표 13-8>에서 제시된 방법을 이용하여 산정한다 (임경수, 1998).

농업생태계의 에너지 분석에 사용되어지는 지표는 <표 13-9>에 나타낸 바와 같다. 농업생태계의 에너지 분석 지표는 가장 보편적으로 사용되어지고 있는 토지 및 노동 생산성을 포함하여 다양한 에너지 생산성 지표와 생태학적 특성을 파악하기 위한 사항을 포함하고 있다.

<표 13-8> 연계된 에너지의 투입량 산정방법

방 법	내 용
통계적 분 석	통계자료를 이용하여 산출단위당 에너지 소비량을 산정하는 방법으로 미국의 1975년의 에너지 소비량이 $71,078 \times 10^{12}$ BUT이고 미국의 1975년 GNP가 $\$1516 \times 10^9$ 이면 1975년 미국이 상품 및 용역 \$1당 에너지 소비량은 47,291BUT가 된다.
투입산출 (산업연관) 분 석	국가경제에 대한 투입산출 분석표를 이용하여 부문별 생산물에 대한 에너지 투입량을 계산하는 방법으로 최종산물과 연관되어 있는 모든 에너지 투입이 추적된다.
과정분석	개개 상품이나 용역이 제공되기 까지 필요한 과정을 파악하고 이 과정에 투입된 에너지를 합산하여 최종산물에 투입된 에너지로 계산하는 방법

<표 13-9> 농업생태계의 에너지 분석 지표

구 분	지 수	계 산 방 법
생산성	Energy Ratio	산출에너지/투입에너지
	Energy Productivity	산출량/투입에너지
	Fossil Energy Productivity	산출량/투입한 화석에너지
투 입 에너지	Energy Input	투입에너지/산출량
	Exosomatic Energy Input ¹⁾	투입한 비인력관련에너지/산출량
	Commercial Energy Input	투입한 상업에너지/산출량
	Fossil Energy Input	투입한 화석연료에너지/산출량
재투입 에너지	Net Energy	산출에너지-재투입에너지
	Energy Yield Ratio	산출에너지/재투입에너지
	Energy Investment Ratio	산출에너지/(2차에너지 ²⁾ +재투입에너지)
에너지 구 성	Energy Throughput Ratio	인력관련 에너지 ³⁾ /비인력관련 에너지
	Commercial Energy Ratio	상업에너지/투입에너지
	Fossil Energy Ratio	화석에너지/투입에너지

농업생태계의 물질순환을 분석하는 지표는 <표 13-10>에서와 같다 (임경수, 1998).

<표 13-10> 농업생태계의 물질순환 분석 지표

지 수	계 산 방 법
투입·산출 비율	영양물질 산출량/영양물질 투입량
영양물질 수지	영양물질 투입량 - 영양물질 산출량
영양물질 효율	(산출량-유실량)/투입량
교체율	(영양물질 투입량/영양물질 축적량)/단위시간
체류시간	1/체류시간
생물학적 축적량	(생물적 축적량/영양물질 투입량)
생물학적 체류시간	(순식물흡수량/생물적 축적량)/단위시간

나. 에너지량 산정 환산계수

에너지 흐름량 산정을 위한 쌀 경작과 관련한 에너지량 산정에 사용된 환산계수는 <표 13-11>과 같다. <표 13-11>에서와 같이, 논에서의 에너지는 직접에너지와 간접에너지로 구분되어진다. 직접에너지에는 태양에너지, 노동, 기계, 등유 등이 포함되며, 간접에너지에는 시비량, 농약, 종자, 기타 부산물 등으로 구성된다.

<표 13-11> 논에서의 에너지량 산정 환산계수 (임경수, 1998)

구 분	항 목	단 위	환산계수 (kcal/단위)	비고
직접 에너지	태양에너지	day/ha	162,000.0	
	노동	hr	180.0	
	기계	kg	33,967.2	
	등유	kg	11,598.5	
간접 에너지	질소비료	kg	21,000.0	
	인비료	kg	6,300.0	
	칼륨비료	kg	2,500.0	
	농약	kg	10,000.0	
	종자	kg	3,433.4	
	퇴비	kg	1,734.7	
	볏짚	kg	3,245.2	
	쌀겨	kg	4,389.1	
	자재	kg	20,712.0	

3. 에너지 흐름량 산정

가. 도별 투입에너지

전국의 도별 에너지 흐름량을 산정하기 위해 도별 통계자료를 바탕으로 문헌조사를 수행하였다 (농촌진흥청, 1998; 통계청, 1999; 농림부·국립농산물검사소, 1999; 한국농기계농업협동조합·한국농업기계학회, 1998).

에너지량 산정을 위한 에너지 항목별 도별 투입에너지의 조사 결과는 <표

13-12>에서와 같다. 태양에너지는 벼가 태양에너지를 이용하는 모든 기간을 포괄하여 평균값 180일로 결정하였고, 논에 투입되는 기계는 작업 단계별 기계 투입 시간과 기계 종류를 고려하여 산정하였으며, 자재는 모내기에 사용되는 비닐하우스와 모판을 고려한 전국 평균값을 동일하게 적용하였다.

<표3-11> 도별 투입 에너지량

항 목	단위	경기도	강원도	충청북도	충청남도	전라북도	전라남도	경상북도	경상남도
태양	day	180	180	180	180	180	180	180	180
노동	hr	243.5	312.1	309.0	317.4	346.2	386.3	368.9	361.8
기계	kg	115.8	72.2	88.2	75.2	58.8	80.1	70.6	68.8
등유	kg	692.3	692.3	692.3	692.3	692.3	692.3	692.3	692.3
자재	kg	27.3	27.3	27.3	27.3	27.3	27.3	27.3	27.3
N	kg	135	157	152	135	159	173	128	140
P	kg	64	106	64	43	57	64	66	52
K	kg	82	96	84	62	79	83	79	68
농약	kg	56.6	50.8	55.8	76.7	79.7	91.1	53.7	69.9
퇴비	kg	1934	824.5	815.4	1130.9	1513.8	1916.9	464.4	1534
종자	kg	52.9	68.6	62.4	59.7	62.0	68.38	62.1	63.1
벼짚	kg	6290	5850	5660	6700	6120	6270	5690	6550
쌀겨	kg	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

나. 에너지흐름 산정 결과

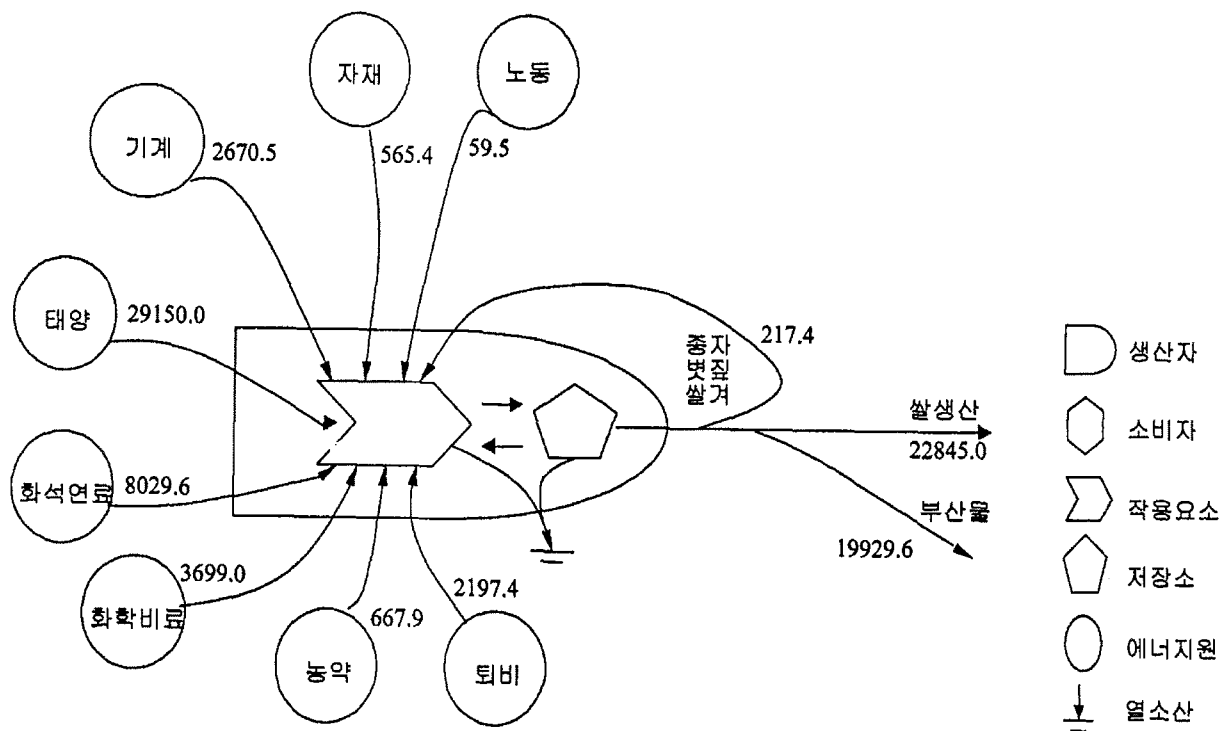
도별 쌀 투입 산출 에너지 흐름 산정 결과는 <표 13-12>에서와 같다. <표 13-12>에서와 같이 투입에너지는 경기도가 $49276.9 \times 10^3 \text{kcal/년} \cdot \text{ha}$ 로서 가장 큰 값을 보였고, 경상북도가 $45076.3 \times 10^3 \text{kcal/년} \cdot \text{ha}$ 로서 가장 작은 값을 보였다. 산출에너지는 충청남도가 $46394.7 \times 10^3 \text{kcal/년} \cdot \text{ha}$ 로서 가장 큰 것으로 나타났으며, 경상북도가 $39649.3 \times 10^3 \text{kcal/년} \cdot \text{ha}$ 로서 가장 작은 수치를 보였다.

<표 13-12> 도별 쌀 투입 산출 에너지 흐름 (단위 : 1000 kcal/년 · ha)

구 분		항 목	경기도	강원도	충청 북도	충청 남도	전라 북도	전라 남도	경상 북도	경상 남도
투 입	작물에 투입한 에너지	태양	29160	29160	29160	29160	29160	29160	29160	29160
		노동	43.8	56.2	55.6	57.1	62.3	69.5	66.4	65.1
		기계	3932.3	2451.7	2995.0	2553.6	1996.7	2720.0	2397.4	2336.3
		등유	8029.6	8029.6	8029.6	8029.6	8029.6	8029.6	8029.6	8029.6
		자재	565.4	565.4	565.4	565.4	565.4	565.4	565.4	565.4
		화학비료 N	2835.0	3297.0	3192.0	2835.0	3339.0	3633.0	2688.0	2940.0
		화학비료 P	403.2	667.8	403.2	270.9	359.1	403.2	415.8	327.6
		화학비료 K	205.0	240.0	210.0	155.0	197.5	207.5	197.5	170.0
		농약	566.1	507.5	557.5	766.9	797.4	911.2	537.3	699.0
		퇴비	3354.9	1430.3	1414.5	1961.8	2626.0	3325.2	805.6	2661.0
		소 계	49095.4	46405.5	46582.9	46355.3	47133.1	49024.7	44863.1	46954.1
	작물에 투입한 재이용 에너지	종자	181.5	235.5	214.1	205.1	212.7	236.2	213.2	216.6
		벼짚	0.0	0.0	0.0	0.0	16.2	0.0	0.0	7.8
		쌀겨	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		소 계	181.5	235.5	214.1	205.1	228.9	236.2	213.2	224.4
	총 계		49276.9	46641.1	46797.1	46560.5	47362.0	49261.0	45076.3	47178.5
산 출	생산물	쌀	23038.1	21218.4	23038.1	24651.8	24411.5	23518.8	21184.1	21699.1
		벼짚	20412.3	18984.4	18367.8	21742.8	19860.6	20347.4	18465.1	21256.1
		쌀겨	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	총 계		43450.4	40202.8	41405.9	46394.7	44272.1	43866.2	39649.3	42955.1

각 도별로 산정된 투입 및 산출 에너지량을 바탕으로 전국 평균 에너지 흐름량을 산정하였으며, 그 결과는 (그림 13-17)에서와 같다. 투입에너지량은 태양에너지, 화석연료, 화학비료 등의 순으로 많이 투입되는 것으로 나타났으며, 산출에너지는 쌀 생산과 부산물 등으로 이루어진다.

본 연구의 결과는 Web 기반 농업생태환경관리정보시스템과 의사결정지원시스템인 수환경관리시스템에서 사용자가 에너지 흐름을 산정할 수 있도록 에너지 흐름 산정 입출력 모듈과 도별 에너지 흐름량 산정 결과를 제공하여준다.



(그림 13-17) 논에서의 전국 평균 에너지 흐름 (1000 kcal/yr · ha)

제 5 절 요약 및 결론

본 장에서는 생태환경 모델링 기술개발을 위하여, 농작물 생육추정, 병충해의 예찰과 방제계획, 농작업 일수의 결정 등의 입력자료로서 이용하기 위한 일별 기상발생모의 모형을 개발하고, 논에서의 영양물질추정 모형과 벼 에너지 흐름 모형을 개발하여 그 적용성을 평가하였다.

본 장에서의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① 우리 나라 71개 관측소의 강수발생일, 강수일, 최저온도, 최고온도, 상대습도 등의 기상인자의 통계적 특성을 분석하여 우천일 연속확률, 청명일 연속확률, 왜곡도, 표준편차, 월평균 강수량, 월평균 최고온도, 월평균 최저온도, 월평균 상대습도의 매개변수를 구성하였다.
- ② 기상발생모형의 적용성을 평가하기 위하여 대상 관측소의 기상요소별 적합도 검정을 실시한 결과, 강수량의 경우 강릉과 광주지점을 제외한 모든 지점에서 5% 유의수준에서 적합성이 인정되었고, 강수발생일, 최고온도, 최저온도 및 상대습도의 경우는 모든 대상지점에서 5% 유의수준에서 그 적합성이 인정되었다.
- ③ 기상자료의 실측치와 모의발생치의 상관성을 분석하기 위하여 두 계열간의 R^2 과 RMSE를 계산하여 적용성을 평가하였다.
- ④ 기상요소별 매개변수의 공간분포도를 도시하고 b 역거리법에 의한 자료 보간을 통해 미계측 구역의 매개변수를 추정하였다.
- ⑤ 수원과 울산관측소에 대해 실측치와 추정치를 비교한 결과, 수원관측소는 각각의 기상변수에 대해 R^2 값이 0.951~0.999의 범위를 보였고, 울산관측소에 대해서는 R^2 값이 0.861~0.999의 높은 경향성을 보였다. R^2 값은 각각의 기상변수에 대해, 온도가 높은 값을 보였고 강수발생일에 대한 기상변수가 낮은 값을 보였다.
- ⑥ 수원과 울산관측소에 대해 추정된 매개변수를 추계학적 모의발생모형에 적용하여 나온 결과를 기존의 실측치, 모의발생치와 함께 비교하였으며, 향후의 수문/수질/생태환경 모델링 분야에서 장래 강우예보로 이용이 가능하도록 구성

하였다.

- ⑦ 포장단위 농업비점원 오염모형인 CREAMS모형을 수정하여 담수상태인 논에서의 유출입 특성을 고려할 수 있도록 제안된 CREAMS-PADDY모형을 개발하였다.
- ⑧ 모형의 수문모형은 논에서의 관개 및 유출량을 정확히 모의하기 위해 물수지식과 증발산량 추정식으로 FAO 수정 Penman식을 사용하였다.
- ⑨ 영양물질 부모형의 경우 담수상태에서 산화와 환원층이 구분된 논에서의 영양물질의 거동을 나타내기 위해 질소반응식들을 수정하였다. 또한 등은 흡착식을 이용하여 토양흡착 및 담수에 용해된 영양물질의 농도를 계산하도록 모형을 구성하였다.
- ⑩ 구성된 모형은 2000년 화성군의 논에서의 모니터링 자료를 이용하여 보정 및 검증 실시하였다. 모의결과 담수농도의 예측에는 R^2 은 총질소가 0.84 총인은 0.73의 값을 나타내었으며, 배출부하량은 총질소가 0.86, 총인이 0.81로 높은 적용성을 보였다.
- ⑪ RMSE는 일별 담수의 농도의 변화에 대해서는 총질소의 경우 0.726mg/L, 총인에 대해서는 0.73mg/L로, 일별 배출부하량에 대해서는 0.08kg/ha, 0.02kg/ha로 적용성이 있는 것으로 나타났다.
- ⑫ 모형의 효율을 나타내는 E^2 의 값은 담수농도의 변화에 대하여 총질소는 0.50, 총인은 -6.19의 값으로 총질소는 담수농도의 예측에 모형의 효율성이 인정되었다. 배출부하량에 대하여는 총질소와 총인은 0.59와 0.46으로 모형의 적용성이 인정되었다.
- ⑬ 관개기간인 5월에서 9월까지의 논에서의 영양물질 유출량은 2000년 경기도 화성군 기천지구 논인 경우, 강우량 1243mm에 대하여 총질소는 11.27kg/ha, 총인은 0.98kg/ha가 배출되었다.
- ⑭ 논에서의 에너지 흐름량 산정 모형을 구성하여 전국에 대해 도별로 투입 및 산출 에너지량을 산정하였으며, 전국 평균 에너지 흐름 분석 결과로부터 논 생태계의 분석 지표를 제시하였다.

이상의 결과로부터, 일별 기상인자의 추계학적 모의발생 모형은 수문/수질/생태환경 모델링의 예측 입력자료로서 이용이 가능하며, CREAMS-PADDY모형을 이용하여 논에서의 영양물질의 거동을 예측 할 수 있을 뿐만 아니라, 유출과 함께 배출되는 부하량을 추정 할 수 있을 것으로 보이며, 논에서의 에너지흐름 모형을 통하여 체계적인 논 생태계의 분석지표를 설정할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 강문성, 1995. 우리 나라 일별기상인자의 추계학적 모의발생에 관한 연구, 서울대학교 대학원 석사학위논문.
2. 강문성, 박승우, 진영민, 1998. 기상자료 미계측 지역의 추계학적 기상발생모형, 한국농공학회지, Vol. 40 No. 1, pp. 57-67.
3. 국립환경연구원, 1993. 비점오염원으로부터의 오염물질 유출특성 조사를 위한 방법론적 연구.
4. 국립환경연구원, 1994. 비점오염원 유출부하량 조사지침.
5. 國松孝男 外, 1989. 河川汚濁の モデル解析, 技報堂出版.
6. 김병진, 1993. 기상예보를 고려한 관개용 저수지의 최적조작 모형, 서울대학교 대학원 박사학위논문.
7. 김진수, 오승영, 김규성, 1999. 광역논에서의 질소·인의 농도와 오염부하량 특성, 한국농공학회지, 제41권 4호, pp. 47-56.
8. 김진택, 1995. 농업 비점원 오염모형을 위한 지리자원정보시스템 호환모형의 개발 및 적용, 서울대학교 박사학위논문.
9. 김철겸, 1999. 논에서의 유출특성을 고려한 농업 소유역의 홍수 유출 추정, 서울대학교 석사학위 논문.
10. 농림부, 1997. 영농방식 변화에 따른 필요수량 변화 연구.
11. 농림부, 1999. 농촌용수 수요량조사 종합보고서.
12. 농림부·국립농산물검사소, 1999. 1998년산 작물통계.
13. 농촌진흥청, 1998. '97 농축산물표준소득, 농업경영연구보고.

14. 농촌진흥청, 1998. 연구사업보고서, 농업경영연구보고 제60호.
15. 농촌진흥청, 1998. 작목별 작업단계별 노동력 투하시간, 농업경영연구보고 제60호.
16. 박승우, 윤광식, 진영민, 이변우, 1997. 논외 물질순환 모니터링, 서울대농학연구지 제22권 1호, pp. 19-27.
17. 박은진, 1999. 하천 수변 범람 지역에서 질소 동태 관찰과 모형 구축, 서울대학교 대학원 박사학위논문.
18. 森保文, 1991. 水田表面水リン濃度變化の モデリ化, 日本農業土木學會論文集 153, pp. 45-53.
19. 신동석, 1990. 논에서의 질소 및 인의 농도와 유출입, 서울대학교 대학원 석사학위논문.
20. 이상모, 류순호, 김계훈, 1995. 수도재배 포장에서 침투수의 Urea-N, NH_4 -N 및 NO_3 -N의 농도 변화, 한국토양비료학회지 제28권 2호, pp. 160-164.
21. 이재형, 전일권, 1994. 기상 자료 미계측 지점의 강우 예보 모형, 대한토목학회논문집, 제14권, 제2호, pp. 307-316.
22. 임상준, 2000. 농업유역의 논 관개회귀수량 추정 모형의 개발, 서울대학교 대학원 박사학위논문.
23. 임상준, 박승우, 1997. 논외 유출곡선번호 추정, 한국수자원학회지 제30권 4호, pp. 379-387.
24. 정상옥, 1995. 농업용 화학물질 이동 추정모형의 발달 : GLEAMS 모형을 중심으로, 한국관개배수지 제2권 1호, pp. 10-19.
25. 진영민, 1998. 논외 비점오염물질 배출량 추정을 위한 CREAMS-PADDY 모형의 개발, 서울대학교 석사학위 논문.
26. 통계청, 1999. 1998년 농산물생산비통계.
27. 한국농기계농업협동조합 · 한국농업기계학회, 1998. 농업기계연감.
28. 홍성구, 권순국, 1999. 부하함수를 이용한 비점원오염 부하량의 예측, 한국관개배수, 제6권 2호, pp. 176-184.

29. 森保文, 1990. 水田表面水窒素濃度變化の モデリ化, 日本農業土木學會論文集 146, pp. 15-25.
30. Cabon. F., G. Girard and E. Ledoux, 1991. Modelling of the nitrogen cycle in farm land areas. In Groot, J. J. R., P. de Willigen, E. L. K. Verberne (eds.), Nitrogen turnover in the soil-crop system. Kluwer Academic Publishers, Netherlands. pp. 161-169.
31. Chow, V. T., 1964. Handbook of Applied Hydrology, McGraw-Hill Book Co., New York, N.Y..
32. Cooper, G. S., and R. L. Smith, 1963, Sequence of products formed during denitrification in some diverse western soils, Soil Sci. Soc. Am. J, 27, pp. 659-662.
33. De Datta, S. K. 1987, Nitrogen transformation process in relation to improved cultural practices for lowland rice, Plant Soil, 100, pp. 47-69.
34. Dean, J. D., and W. M. Snyder, 1977. Temporally and Areally Distributed Rainfall, Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. 103, No. IR2, pp. 221-229.
35. Georgakakos, K. P. and R. L. Bras, 1984. A Hydrologically Useful Station Precipitation Model 1. Formulation and 2. Case Studies, Water Resources Research, Vol. 20, No. 11, pp. 1585-1610.
36. Heatwole, C. D., K. L. Campbell, and A. B. Bottcher, 1987. Modified CREAMS hydrology model for Coastal Plain flatwood. Trans. of ASAE, 30 , pp. 1014-1022.
37. Johnson, E. R. and R. L. Bras, 1980. Multivariate Short-Term Rainfall Prediction, Water Resources Research, Vol. 16, No. 1, pp. 173-185.
38. Knisel, W. G., 1980. CREAMS : A field-scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems, Conservation Report No. 26, USDA-SEA, Washington, D.C.

39. Kruizinga, S., and G. J. Yperlaan, 1978. Spatial Interpolation of Daily Totals of Rainfall, *Journal of Hydrology*, Vol. 36, pp. 65-73.
40. Martin, J. P. and H. D. Chapman, 1951. Volatilization of ammonia from surface-fertilized soils. *Soil Sci.* 71: 25-34.
41. Mehran, M. and K. K. Tanji. 1974. Computer modeling of nitrogen transformations in soils. *J. Environ. Qual.* 3: 31-396.
42. Reddy, K. R., and W. H. Patrick, Jr., 1986, Fate of fertilizer nitrogen nitrogen in the rice root zone, *Soil Sci, Soc. Am. J.*, 50, pp. 649-651.
43. Richardson, C. W., 1981. Stochastic Simulation of Daily Precipitation, Temperature, and Solar Radiation, *Water Resources Research*, Vol. 17, No. 1, pp. 182-190.
44. Richardson, C. W., and D. A. Wright, 1984. WGEN : A model for generating daily weather variables, ARS-8, U.S. Department of Agriculture.
45. Simanton, J. R., and H. B. Osbon, 1980. Reciprocal-Distance Estimate of Point Rainfall, *Journal of the Hydraulic Division, ASCE*, Vol. 106, No. HY7, pp. 1242-1246.
46. Sohn, B., 1998. Effects of carbon, nitrate, and moisture on denitrification in riparian soil of Yangjae Stream. M. S. Thesis. Seoul National University.
47. Stanford, G. and S. J. Smith. 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 36, pp. 465-472.
48. Yeou-Koung Tung, 1983. Point Rainfall Estimation for a Mountainous Region, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 109, No. 10, pp. 1386-1393.

여 백

제 V 편

종합적 생태환경 관리시스템 개발

여 백

수환경관리 및 평가 시스템 개발

2000년 12월

“농업생태환경 모니터링 및 종합적 환경관리시스템 개발 사업”

서울대학교 농업생명과학대학 부속 농업개발연구소

최종보고서 제 V 편 제 14 장

여 백

제 14 장 수환경관리 및 평가시스템 개발

제 1 절 서 론

환경보전형 지속적 농업에 대한 국내외적인 관심이 고조되면서 소하천에서의 다양한 수환경 보전방안에 대한 국가적 지역적 수요가 증대되고 있다. 수계환경관리란 수량, 수질, 공간, 생태계 등 수계환경의 구성요소에 의하여 생성되는 수계환경 기능중 역기능을 최소화하고 순기능을 증진하기 위한 수계관리 행위를 말한다. 따라서, 수계환경관리란 수계환경과 체계적인 모니터링을 통한 수질 현황 등의 파악과 문제점의 진단, 수계환경보전방안의 개선효과와 경제성 비교 등 비구조적인 의사결정을 체계적이고 합리적으로 시행하여야 한다.

이러한 수질환경관리와 평가를 위하여, 대상 수계내의 모든 유역이나 하천에 대하여 수질환경관련 정보를 수집하는 것은 많은 비용과 노력을 필요로 한다. 따라서, 수계내의 관심수역이나 비교를 위한 일부 몇 개의 유역이나 하천에 대하여 지속적인 수계환경 모니터링을 실시하고, 모니터링 결과를 기초로 하여 적절한 수계환경에 측모델을 구성하며, 구축된 모델을 통하여 수계내의 환경변화에 따른 수질예측을 수행하거나 수질환경을 평가할 수 있는 종합적인 수계환경관리 및 평가 시스템(watershed environment management and evaluation systems, WEMES)을 구축하는 것이 더욱 효율적인 방법이다. 또한, 구축된 수계환경관리 및 평가 시스템을 통하여 수계환경관리대안에 대한 수질개선 효과를 개량화하거나 대안의 우선순위를 도출할 수도 있다.

수계환경관리정보 분야는 외국의 경우, 지형, 토양 등 주요 환경요소의 데이터베이스를 완성하고, 지리정보시스템의 응용, 원격탐사기술을 이용한 준실시간 모니터링 시스템의 구축을 통한 작물의 생육 수확량 예측 등의 실용화 단계에 있으며, 지역별로 종합적 농업환경정보시스템의 구축이 완료된 상태이다. 국내의 경우는 환경변화에 대한 모니터링 분야에 있어서 원격탐사를 이용한 연구가 다양하게 시도되고는 있으나, 수계 환경 데이터베이스 분야에서는 토양정보의 전산 데이터베이스화의

구축 단계에 있는 실정이다. 또한, 농업환경정보시스템 분야에 있어서는 단편적인 농업 관련 자료의 수집, 배분을 위한 시스템의 개발과 구축이 진행되고 있으며, 통합적인 환경관리시스템의 구축은 아직 이루어지지 않은 상태이다.

본 장에서는 건전한 수계환경관리방안과 평가를 위하여, 대상 시험유역으로부터의 수계환경자료의 생성, 갱신, 검색, 저장, 자료 현행화 등을 수행할 수 있는 자료관리 시스템, 구축된 자료를 토대로 수문 및 수계환경오염을 산정하고 예측할 수 있는 예측모델시스템, 예측된 결과를 바탕으로 수계환경의 오염도를 평가, 개선, 보전 및 관리가 가능하도록 구성된 수환경평가관리시스템, 모델을 구현함과 아울러 각각의 시스템을 종합적으로 관리할 수 있는 사용자 중심의 메뉴식 화상처리시스템을 통한 사용자편의시스템 등으로 구성된 수계환경관리 및 평가 시스템을 개발하여 시험유역에 적용하고, 그 결과를 평가하는 데 있다.

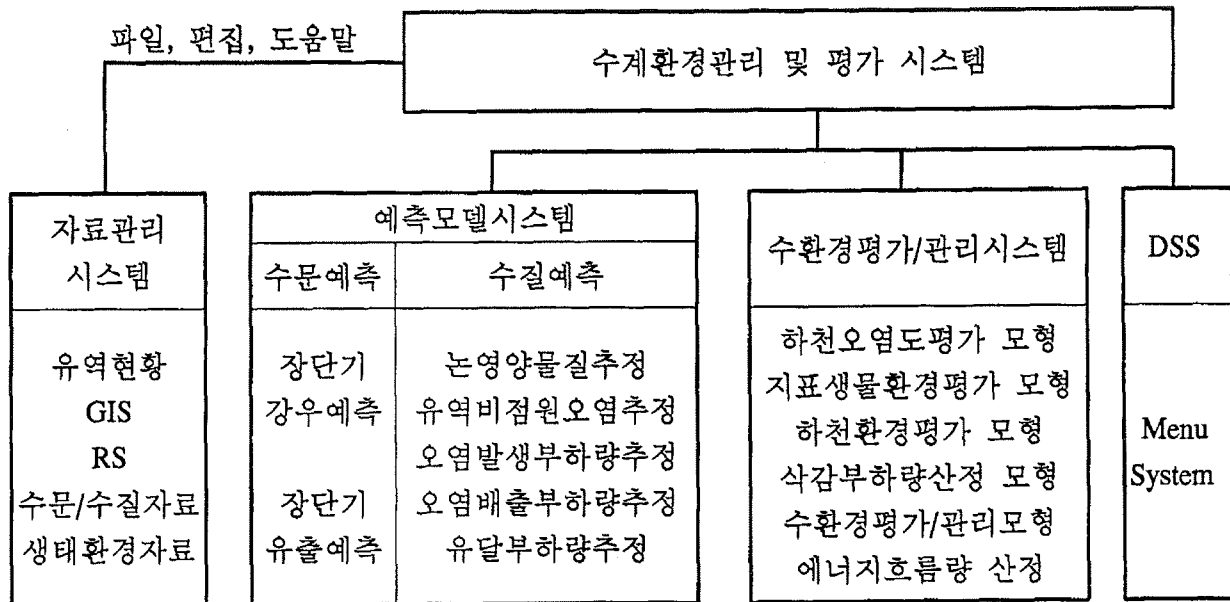
제 2 절 WEMES의 개발

수계환경관리 및 평가시스템은 (그림 14-1)과 같이 자료관리시스템, 예측모델시스템, 수환경평가/관리시스템, 의사결정지원시스템 (decision support system, DSS) 등으로 구성되어 있으며, 이를 메뉴식으로 구성된 사용자 중심의 화상처리시스템 (graphic user interface, GUI)을 통해 컴퓨터와 사용자간의 호환성을 극대화하도록 하였다.

수계환경관리 및 평가시스템의 개발을 위한 소프트웨어는 Visual basic, C와 MS-Fortran을 사용하였다. Visual basic은 시스템의 의사결정지원을 위한 전체적인 메뉴구성과 그래픽 및 텍스트로 주어지는 입출력 모듈의 구성에 사용되며, C와 Fortran은 각각의 모듈에서 구동되는 모델링을 구현하기 위하여 사용되었다.

1. 자료관리 시스템

자료관리 시스템은 대상 시험유역의 현황과 지리정보시스템의 자료구축 현황, 위성영상 이미지 자료, 수문/수질자료와 생태환경자료 등을 수집, 수정, 보완한 후, 각 자료에 대해 검색, 저장 기능이 가능을 갖는 일련의 데이터베이스 프로그램이다.



(그림 14-1) WEMES의 구성도

자료관리시스템에서 구축된 자료는 차후의 예측모델시스템에서의 수문예측과 수질예측의 입력자료로도 이용이 가능하도록 하였다.

2. 예측모델시스템

예측모델시스템은 수집된 수문/수질 자료와 생태자료 등으로 부터 수계환경 평가와 관리를 위한 장단기 수문예측모형과 수질예측모형으로 구성된다.

가. 수문예측모형

수문예측모형의 기능은 시간별, 일별 강우자료 등의 장단기 강우발생자료를 모의발생시키며, 강우자료를 근간으로 폭우사상에 대한 단기 수문예측과 일별 유출량을 모의하는 것이다. 수문예측모형은 장단기 강우발생모형과 수문예측모형으로 구성하였다.

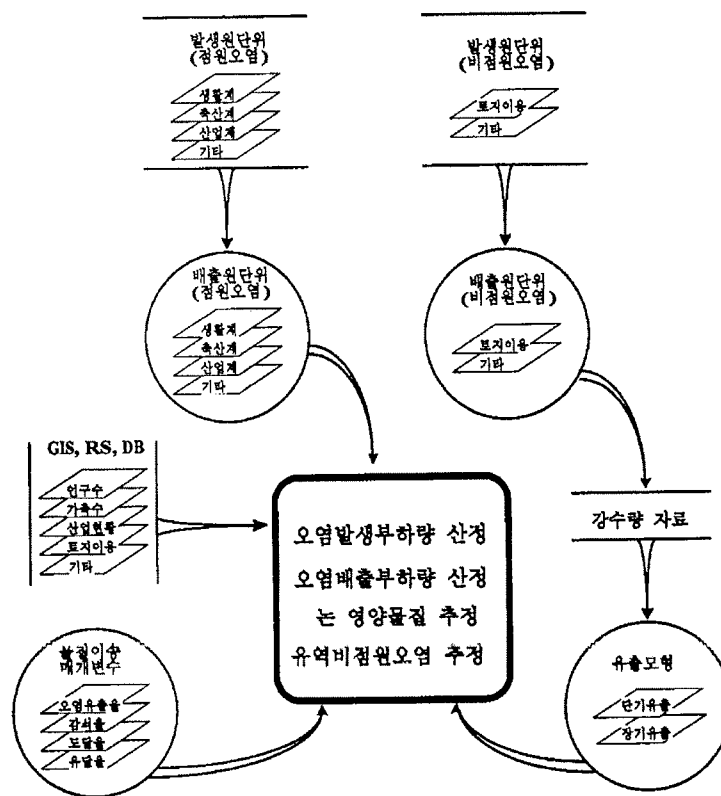
단기 강우발생모형은 SCS(soil conservation service)의 강우형태에 따라 시간별로 모의하도록 구성하였고, 장기 강우발생모형은 수원기상대의 과거 강우자료를 이용하여 제11장에서 개발되어 검정된 일별기상인자의 추계학적 모의발생모형(강문성, 1995, 1998)을 구성하여 일별 강우량을 발생시키도록 하였다.

단기수문예측은 강우시 담수심의 변화 및 물꼬 높이의 변화에 따른 저류효과와

물꼬를 통한 배수 등 논에서의 유출특성을 고려한 홍수유출 모형을 구성하였고, 소
 유역, 저수지, 하도 홍수추적 모형과 결합하여 유역의 홍수를 추적하기 위한 모형으
 로서 제11장에서 기술한 WFRpaddy 모형(김철겸, 1998, 2000)을 이용하여 시간별
 유량을 모의하도록 구성하였다. 장기유출량 예측은 제11장에서 기술한 바가 있는
 장민구 등(1999)이 제안한 SCE-UA(Shuffled Complex Evolution method from the
 University of Arizona)법을 이용한 TANK모형을 구성하여 일별 유량을 모의하도록
 하였다.

나. 수질예측모형

수질예측모형의 주요 기능은 배수구역으로부터 오염부하량을 추정하고, 하천의
 수질을 예측하는 것으로서 논영양물질, 유역비점원오염, 오염발생부하량, 오염배출부
 하량, 그리고 유달부하량 등의 추정이 가능하도록 하는 것이다. 각각의 수질예측모
 형은 제12장과 제13장에서 개발된 모형을 적용하였다. (그림 14-2)는 수질예측모델
 의 개념도를 보여주고 있다.



(그림 14-2) 수질예측모델의 개념도

농업 소유역 토지이용의 큰 비율을 차지하고 있는 논에 대한 영양물질의 산정은 진영민(1997)이 제안한 CREAMS-PADDY 모형을 이용하여 산정하였다. CREAMS-PADDY모형은 본 연구에서 개발된 모형으로 포장단위에서의 농업비점원인 인과 질소에 대해 관개기간에 걸쳐 일별로 추정하도록 구성된 모형이다.

유역단위의 비점원오염을 추정하기 위하여 GIS-NPS 호환모형을 이용하였다. 본 시스템에서는 지리정보시스템으로서 ARC/INFO를 사용하였고, 농업비점원오염모형으로서 수정AGNPS모형을 사용하였다.

배수구역별 오염의 발생 및 배출량은 환경부(2000)에서 제시한 원단위 및 처리시설 등을 고려한 오염 발생/배출 부하량 산정모형을 구성하여 계산하였다. 이상의 결과를 바탕으로 유출부하량을 산정하고, 시험유역의 부하량-유량 관계식을 이용하여 유출부하량을 산정하였다.

3. 수환경평가/관리시스템

수환경평가/관리시스템은 수환경평가모형, 최적수질관리모형, 그리고 에너지흐름모형 등으로 구성된다. 수환경평가/관리시스템의 기능은 배수구역별 수질개선을 위한 관리방안의 계량화는 물론 수환경 평가를 위하여 자료관리시스템과 예측모형 시스템에서의 결과를 바탕으로 현재 상태의 수계환경을 평가하고, 이를 개선, 보전 및 관리 등을 수행하는 것이다.

수환경평가/관리시스템은 사용자로 하여금 관심있는 수계에 대하여 개략적인 수계환경평가를 가능하게 하고, 이로 하여금 향후의 수질보전과 관리, 개선방향 및 대책을 강구할 수 있도록 사용자의 의사 결정을 도와주는 기능을 담당한다.

가. 수환경평가모형

수환경평가모형은 하천오염도평가모형, 지표생물환경평가모형, 그리고 하천환경평가모형 등으로 구성된다.

1) 하천오염도평가모형

하천오염도평가모형은 대상 수계의 수질조사 결과 및 예측모델에 의한 모의 결과를 토대로 하천의 오염도를 수질환경기준에 맞추어 평가하게 된다. 하천오염도를

생활환경기준에 제시되어 있는 pH, DO, BOD, SS, 대장균수의 어느 한 항목만으로 오염도를 평가하는 것은 무리이다. 따라서, 하천오염도평가모형은 여러 가지 항목을 측정하여 종합적으로 수질을 지수화하여 평가할 수 있는 종합수질지표로 구성되어야 한다.

하천오염도평가모형의 기능은 환경부에서 제시하고 있는 DO 포화율(%), pH, 대장균군수, SS, BOD, 암모니아성질소와 질산성 질소의 합 등의 6개 항목에 대해 각각의 수질평점을 산정하여 종합적인 이화학적 수질평가지수를 제시하여 사용자가 하천오염도를 평가하기 위한 의사결정을 도와주는 것이다.

환경부의 환경오염(수질)실태 조사지침에 의하면 이화학적 수질지수로서 6가지의 기준항목을 측정하고, 이들을 점수화한 후 산술평균하여 등급을 매기는 방법을 제시하고 있으며, 각각의 기준항목별 수질평가지수의 산정은 다음과 같다.

가) DO 포화율(%): DO는 수온에 따라 달라지므로 측정된 DO 값보다는 그 온도에서의 포화율이 중요하게 된다. 낮 동안에 광합성이 활발하면 DO가 과포화상태에 도달하는 경우도 있는데, 과포화는 오히려 감점을 한다. DO의 평점을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$\text{비포화상태일 때 DO 평점} = \frac{\text{DO측정농도}}{\text{포화농도}} \times 100 \quad (14-1)$$

$$\text{과포화상태일 때 DO 평점} = 100 - \frac{\% \text{포화율} - 100}{2} \quad (14-2)$$

단, 20% 이하의 포화율은 모두 10점으로 간주

나) pH: y축(평점)을 대수척도, x축(pH 측정값)을 보통척도로 한 그래프에서 두 개의 선분을 그려서 사용한다. pH 6과 9는 60점을 부여하고, pH 7은 100점을 부여한다. 산쪽의 구배가 알칼리쪽 구배의 2배가 되는데, 이는 산성 수질이 알칼리성 수질보다 더 불리하다는 일반적인 사실을 반영한 것이다.

다) 대장균군수: 수영할 수 있는 수질의 한계인 400MPN/100ml를 80점, 대장균이 검출되지 않으면 100점을 부여한다. 대수-보통 그래프에서 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$\text{대장균군 평점} = 10^{2-0.0002423C} \quad (14-3)$$

여기서, C는 대장균군수(MPN/10ml)이다.

라) SS: 부유물질의 양이 20mg/ℓ 이하이면 100점을 부여하고, 48mg/ℓ 이면 80점을 부여한다. 대수-보통 그래프에서 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$\text{부유물질 평점} = 10^{2.0692 - 0.00346C} \quad (14-4)$$

여기서, C는 SS(mg/ℓ)이다.

마) BOD: BOD의 측정값이 1.5mg/ℓ 이면 80점, 0이면 100점을 부여한다. 대수-보통 그래프에서 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$\text{BOD 평점} = 10^{2 - 0.0646B} \quad (14-5)$$

여기서, B:BOD(mg/ℓ)

바) $\text{NH}_3\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$: 하천수에서는 암모니아성 질소($\text{NH}_3\text{-N}$)와 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$)가 아질산성 질소에 비하여 많이 검출된다. 암모니아성 질소와 질산성 질소의 총량이 0.6mg/ℓ 이면 80점, 0이면 100점을 부여한다. 대수-보통 그래프에서 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$\text{질소성분 평점} = 10^{2 - 0.1615N} \quad (14-6)$$

여기서, N은 $\text{NH}_3\text{-N}$ 과 $\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/ℓ)이다.

사) 판정기준: 6개 항목의 평점이 계산되면 산술평균을 내어 그 지점의 수질지수로 하며, 수질의 최종적인 판정기준은 90 이상은 우수, 70~89는 양호, 50~69는 보통, 30~49는 나쁨, 그리고 29 이하는 아주 나쁨으로 구분된다.

2) 지표생물환경평가모형

지표생물환경평가모형은 생물학적 지수를 이용하여 수계환경 오염도를 평가하는 것이다. 하천오염도 평가모형에서 제시하고 있는 이화학적 지수는 유량이나 기상의 영향을 크게 받으며, 상류에서의 일시적인 오염에도 영향을 받는다. 그러므로 수질오염의 축적된 효과를 감지하고 1회의 간단한 조사로 오염상태의 평균을 알아낼 수 있는 생물학적 지수를 이용하여 수계환경 오염도를 평가할 수 있도록 지표생물환경평가모형을 구성하였으며, 하천오염도평가모형에서의 단점을 보완하도록 하였다.

지표생물로는 물고기, 기저생물, 곤충류 등을 이용할 수 있는데, 물고기를 이용하

는 방법이 보편적이다. 즉, 수계내에서 발견되는 지표생물의 종류에 따라 정성적으로 수질을 평가할 수 있는 것이다. 본 연구에서의 수질등급을 나타내는 지표생물의 등급별 기준은 <표 14-1>에서와 같다.

<표 14-1> 수질 등급을 나타내는 지표생물

등급	지표생물
1 급	열목어, 산천어, 버들치, 금강모치
2 급	은어, 피라미, 쏘가리, 다슬기
3 급	붕어, 잉어, 메기, 뱀장어, 미꾸라지
4 급	실지렁이, 나방이류

자료: 환경처, 1992. 중등학교 교사용 환경 교육연수 교재.

3) 하천환경평가모형

하천환경평가모형은 종합적 하천환경평가기준으로서 수계의 야생성, 수질기준, 친수성, 물의 흐름, 지역사회와의 관계 등을 평가기준으로 하고 있다. 하천환경평가모형은 평가기준의 등급에 대한 가중치를 부여하여 수계의 환경평가를 정량화하고, 이를 토대로 수계를 자연보전, 자연이용, 정비자연, 시설이용, 인공정비 등의 구역으로 구분함으로써 수환경관리의 계획을 수립하는데 있어서 효율성을 극대화할 수 있도록 하였다.

본 연구에서의 하천환경 평가 항목, 특징, 기준 및 해당 점수는 <표 14-2>에서와 같다. 하천환경평가를 위한 항목으로는 자연상태를 나타내는 야생성, 수질등급을 나타내는 수질, 자연경관 등을 고려한 친수성, 물의 흐름 및 인공하천의 특징을 나타내는 수리특성, 문화재 등의 기타 지역사회성 등으로 구성되어 있다.

<표 14-2> 하천환경 평가기준(안)

환경 항목	구 분	기 준	점수
야 생 성	자연지역 반자연지역(농경지포함) 개발지역(인공호안, 도로, 기타 인공화 지역) 국립공원/상수원보호구역	-녹색자연도(환경처,1991)에서 1~3등급은 개 발지역으로, 4~8등급은 반자연지역으로, 9~ 10등급은 자연지역으로 간주 -국립공원/상수원 보호구역과 특별히 보전할 필요가 있는 수중 및 수변 생태계 서식처의 경우(천연기념물, 희귀종 등) 25점 이상 부여	30 20 10
수 질 (수중 생태계 포함)	1급수(1ppm 이하) 2급수(1~3ppm) 3급수(3~6ppm) 4급수(6~10ppm) 5급수(10~100ppm) 하·폐수(100ppm이상)	-최근 3년간 해당하천의 대부분 구간에서 월 평균 수질이 연중으로 기준이하인 경우(단 전체기간 중 1~2개월만 특별히 기준 이상인 경우 기준 이하로 고려) 해당 수질등급으로 간주	25 20 15 10 5 1
친수성	높음 보통 낮음	자연경관, 지질 및 지형상 특별성, 수변/수상 위락활동 등을 종합적으로 고려하여 판정. (자 연경관, 지질, 지형학적 특별성, 수변/수상 위 락활동 등)	20 10 3
물의 흐름	자연 보통 인공	-자연적인 물의 흐름 유지 -물의 흐름 유지, 소규모의 제방, 도로 절개지 등 반인공 하천 -댐, 대규모 제방, 수로 준설 등 인공 하천	10 6 1
기타(하천 지역사회 관계 등 고려할 사항)	있음 보통 없음	-낙동강 하회마을, 금강변 공주/부여 백제유적 지 등 전통적으로 하천과 지역사회와의 관계 가 이어져 오는 경우 있음으로 간주(국가 문 화재) -전국적으로 잘 알려져 있지 않으나 지역적으 로 알려져 하천과 지역사회 관계가 있는 경 우 보통으로 간주(지방문화재) -전혀 없는 경우 없음으로 간주	12-15 1-11 1
계			16-100

주) 평가자는 하천환경 평가시 상기 기준을 고려하되, 각 항목별 점수에 대해서는 어느 정도 유연성을 가질 수 있음.

하천환경평가는 평가기준에서의 항목별 점수를 가중하여 산술적으로 합하여 이루어진다. 하천환경의 평가를 위한 하천의 구역 구분은 하천환경 가중시스템의 점수에 대하여 각각 인공정비구역, 시설이용구역, 정비·자연지역, 자연이용구역, 자연보전구역 등의 총 5구역으로 구분하였다. <표 14-3>은 하천환경평가 결과인 환경평가 가중점수에 따른 구역 구분을 보여주고 있으며, <표 14-4>는 하천 구역에 따른 각각의 특징을 나타내고 있다. 가중치 점수가 21~60점이고, 정비자연구역과 시설이용구역을 특별히 구분할 필요가 없는 경우는 하나의 구역으로 취급한다.

<표 14-3> 하천환경 구역구분에 따른 평가

구 역	하천환경 가중시스템 점수	비 고
자 연 보 전 지 역	81점 이상	
자 연 이 용 구 역	61 ~ 80	
정 비 자 연 구 역	41 ~ 60	
시 설 이 용 구 역	21 ~ 40	
인 공 정 비 구 역	20점 이하	

<표 14-4> 하천의 구역 구분

구 역 구 분	내 용
인공정비구역	운동시설, 위락시설, 수상시설, 편의시설 등 인공적 시설을 중심으로 시설을 중심으로 적극적으로 정비하는 구역이다.
시설이용구역	인공정비구역과 같이 인공적 시설이 중심이 되지만, 특히 하천의 자연환경이 뛰어난 부분에 대해서는 자연적 위락시설, 문화시설도 고려한다.
정비·자연구역	인공적 이용과 자연적 이용이 공존하는 구역이며, 산책로 휴식시설 등 정적 이용이 고려된다.
자연이용구역	초원, 자연학습장, 자연관광로 등의 자연적인 시설을 중심으로 정비한다. 편의시설 정도의 인공시설도 일부 고려한다.
자연보전구역	자연생태계 및 자연경관의 보전을 목적으로 한 구역이며, 사람의 적극적인 이용을 도모하기 위한 시설을 원칙적으로 도입하지 않는 것으로 한다.

나. 최적수질관리기법

최적수질관리기법은 오염총량관리 삭감목표량 산정을 위한 삭감부하량산정모형과 수환경정화공법에 따른 수계환경의 보전과 평가를 위한 수환경보전평가모형으로 구성된다.

현재 우리나라 하천수질 정화를 위한 하수처리시설 등 대부분의 대규모 처리시설에는 BOD, SS의 제거율이 높고, 높은 처리장 부지를 요구하지 않는 표준활성슬러지법을 채택하여 왔다(국립환경연구원, 1992). 그러나, 배출되는 오염원의 양이나 주 처리 오염원에 따라 지역특성에 적합한 처리방법을 선택하여야 한다.

사용자가 대상 수계로 유입되는 오염원의 효율적인 처리를 위해서는 여러 가지 처리공정에 대한 검토를 통하여 적절한 대안을 수립하여야 한다. 주어진 지점의 목표수질을 달성하기 위해서는 환경기초시설의 개소수뿐만 아니라 각 시설별 처리공정도 매우 중요하다고 하겠다.

본 연구에서의 삭감부하량산정모형은 먼저 목표수질을 설정하고, 현재의 수질이 이를 만족하지 못할 경우 자료관리시스템과 예측모델시스템의 결과를 바탕으로 오염총량관리 삭감목표량(삭감부하량)을 산정하도록 구성하였다. 삭감부하량은 오염총량제 또는 유량 평균오염부하의 목표수질값을 정량화시켜 그 차이만큼을 삭감해야 할 양으로 처리하였다. 또한 삭감부하량을 유량평균 삭감농도로 나타내어 제시함으로써 수계환경의 정성적 평가가 동시에 이루어지도록 하였다.

수환경보전평가모형은 목표수질을 달성하지 못할 경우에 적절한 수환경 정화공법을 선정하여 수계환경의 개선, 보전 및 평가를 수행하는 것이다. <표 14-5>는 본 연구에서 적용된 처리공정별 특성과 적용가능성을 나타내고 있다.

대상 수계의 수질관리방안은 각 구역별 오염부하 삭감량을 추정하고, 이를 달성하기 위하여 환경기초시설의 설치여부와 환경기초시설에 대한 여러 가지 처리공정별 오염부하 삭감율을 계산하고, 이를 토대로 우선 순위를 도출해야 할 것이다.

<표 14-5> 처리공정별 특성 및 적용가능성

구분	처리공정	처리효율(%)			장 점	단 점
		BOD	T-N	T-P		
일 반 처 리	표준활성 슬러지법	90	20	20	운전변화에 따른 수질제어 가능 폭기량이 적음 대규모 시설에 적합 처리기술의 축적	운전이 복잡 고도의 유지관리기술 이 요구됨 슬러지 발생량이 많음
	산화구법	90	40	30	부하변동에 대응하여 운전가능 유지관리가 용이 슬러지 발생량이 적음 운전조건변화로 영양염류 제거가능	시설면적이 넓음 대규모 시설의 어려움
	연속 회분식법	90	45	35	부하변동의 대응성이 좋음 장치가 간단 운전조건의 변화용이 영양염류 제거 가능 슬러지 팽화현상 억제	스컴의 발생우려가 있음 운전의 제어기능장치가 필요 슬러지 발생량이 많음
	살수 여상법	80	20	20	동력비가 적음 유지관리에 용이	해충발생 가능 수두손실이 큼 막힘현상 발생 넓은 시설면적이 필요
	회전 원판법	90	10-15	5	유리관리가 간단 동력비가 절약 침전조의 부유물질 유출이 적음	수질의 제어가 어려움 온도변화에 민감 처리용량의 한계 해충의 발생 우려
간이 처리	산화지법	80	60	60	동력비가 적게 소요 유지관리가 용이 영양염류의 제거 가능	넓은 용지가 소요 악취 및 해충의 발생 동절기 처리성능 저하 조류의 회수, 처분시스 템 확립
자연 정화능 처리	토양 정화법	60	50	50	유기물 및 인의 제거율이 높다. 동력 및 약품의 소요가 거의 없음 유지관리가 용이 동력소요가 거의 없음 유지관리가 간편	생물막의 탈리, 여재의 막힘 현상 홍수시 침수우려가 있음

수환경정화공법은 <표 14-5>에서와 같이 활성슬러지법, 살수여상법, 회전원판법 등의 일반처리와 간이처리인 산화지법, 그리고 자연정화능 등으로 구성되어 있다. 수환경처리공법의 적용후 삭감량과 목표수질의 만족 여부는 수환경정화공법의 수질 항목별 처리효율을 근거로 하여 산정되어진다.

여러 처리 공정별 선정기준은 오염원의 종류나 지역특성에 따라 다르지만, 대체적으로 <표 14-6>의 가중치를 이용하여 결정한다.

<표 14-6> 시스템의 선정기준 및 가중치

순위	선정 기준 항목	가중치
1	유지관리 조作的 용이성	0.25
2	시설비 및 유지관리비 등의 경제성	0.20
3	잉여슬러지 처리, 처분의 용이성	0.15
4	부하변동의 대응성	0.15
5	처리기준 및 계획수질의 만족성	0.10
6	영양염류 제거 가능성	0.10
7	악취 등 위생학적인 측면	0.05
합계		1.00

다. 논벼 에너지흐름량 산정 모형

논벼에서의 에너지흐름량 산정 모형은 소유역에서의 수계환경과 밀접한 관계를 지니고 있는 논에서의 에너지 흐름량을 산정하여 분석함으로서 수계환경의 분석지표를 제시하도록 하였다. 즉, 수계환경 오염과 직·간접적인 영향을 미치는 비료, 농약, 퇴비, 기계 등 논에서의 에너지 투입량을 조절, 관리, 개선함으로서 수계환경의 최적관리에 유익한 정보를 제공할 수 있다는 것이다.

논벼 에너지 흐름량 산정은 제13장에서 기술한 바와 같이 태양, 노동, 기계, 등유, 자재, 비료, 농약, 퇴비, 종자, 볏짚, 쌀겨 등 12개 항목을 대상으로 하였으며, 이를 통해 각각의 경작방법에 대한 쌀 에너지 투입량을 산출할 수 있도록 하였다.

4. 사용자 편의시스템

사용자 편의시스템은 사용자가 단시간에 필요한 전산처리 업무를 신속하고 원활하게 처리할 수 있도록 팝업메뉴와 풀다운메뉴를 제공하는 메뉴식 구동 시스템으로 구성되었다. 또한, 자료관리시스템, 예측모델시스템, 그리고 수환경평가시스템에서의 자료관리, 예측모델의 모듈화된 모델을 수행하며, 모델 결과의 출력은 GUI를 이용하여 속성을 도식적으로 표시함으로서 사용자가 손쉽게 수계의 환경변화를 인식할 수 있도록 하였다.

제 3 절 WEMES 조작과 운용

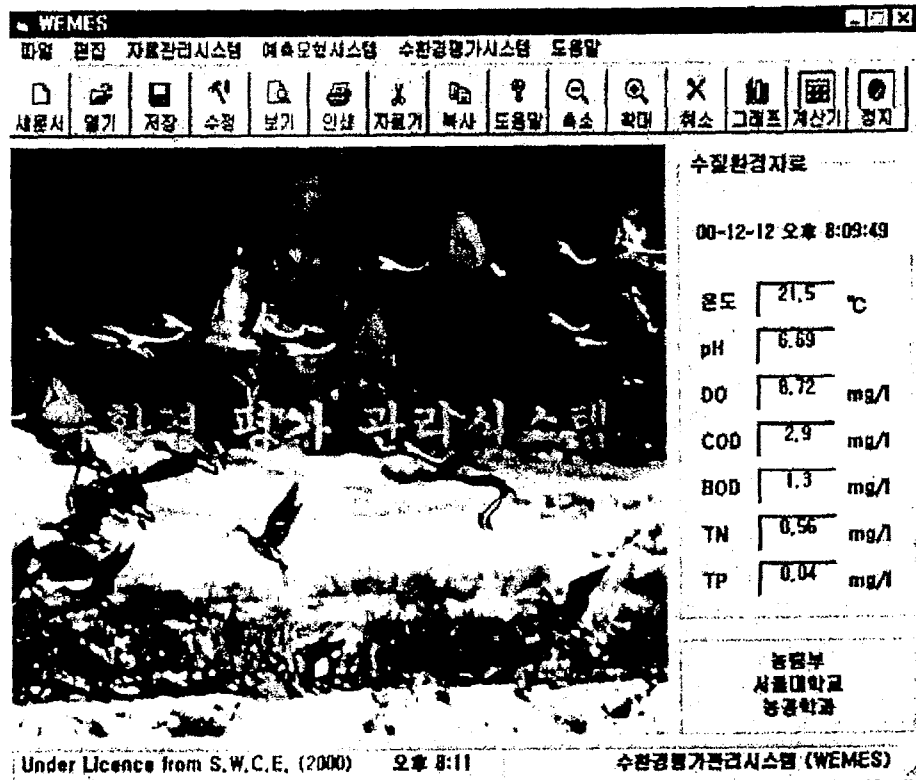
WEMES는 사용자가 수계환경 관리 및 평가하기 위해 의사결정을 지원해 주는 사용자 편의시스템이다. 즉, 구성된 수문/수질 예측 모형 및 관리 평가 모형을 이용하여 대상유역에 적용함으로서 수계환경과 거동을 진단하고 관리하며, 수계환경을 계량화하여 평가함으로서 건전한 수계환경을 보전할 수 있는 방안을 제시하기 위한 시스템이다.

WEMES는 컴퓨터와 조작자의 상호 호환을 위하여 메뉴식 대화식 등에 의하여 시스템의 구동을 행하도록 하였다. 컴퓨터 그래픽을 이용하여 공간적 시간적 수환경의 상황을 제시하고, 사용자가 실제 상황의 변화를 인식하여 평가하는 데 있어서 의사결정을 돕도록 구성하였다.

(그림 14-4)는 WEMES의 구성화면을 나타내고 있다. WEMES는 풀다운 메뉴와 아이콘을 이용하여 각각의 시스템을 수행하며, 현재 수계의 수질 항목별 오염정도를 나타내어준다.

1. 자료관리시스템

자료관리시스템은 대상유역의 지상인자, 수문인자, 오염원 등의 전반적인 유역현황과 구축된 GIS, RS 및 수문, 수질, 생태자료의 데이터베이스를 제공한다.



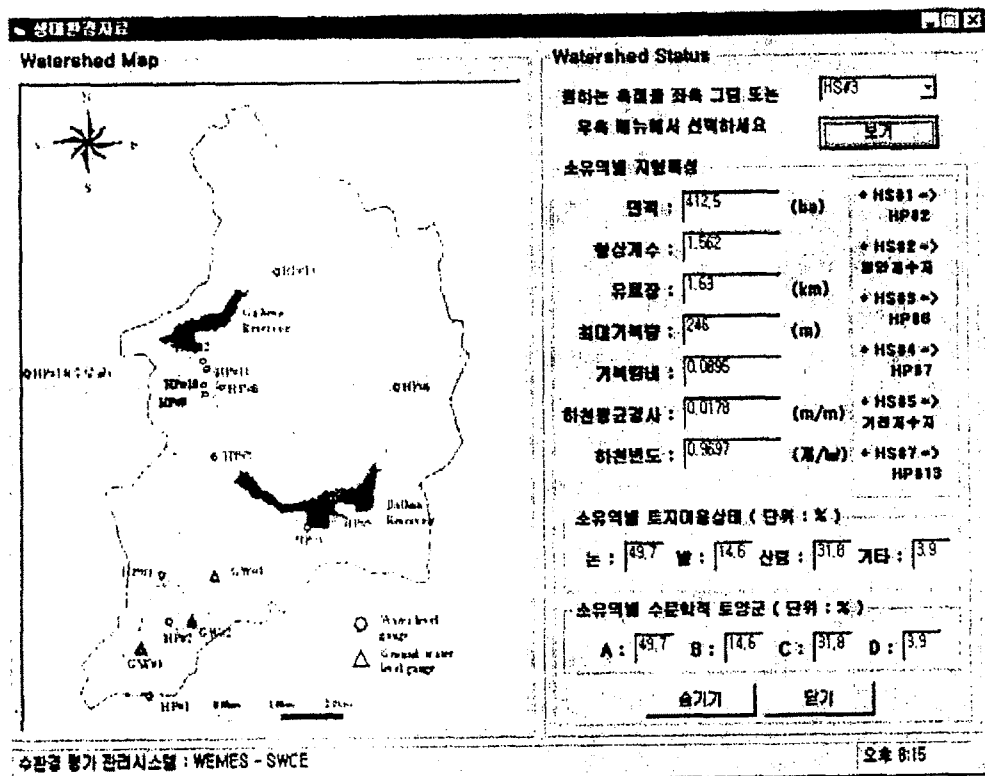
(그림 14-4) WEMES의 logo화면

GIS자료는 제8장과 제9장에서 기술한 바와 같이 지형도 등과 같은 기본도와 토지 이용도, 토양도 등의 주제도를 제공하고, RS자료는 대상유역의 토지피복상태, CN 등의 자료는 물론 다시기의 피복변화도 제공하여준다.

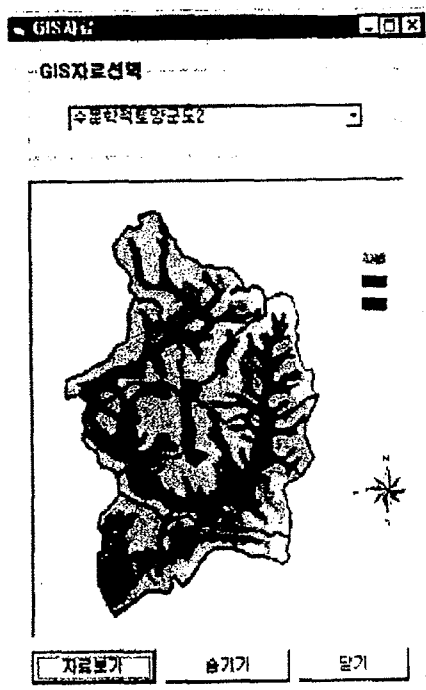
수문/수질/생태자료는 데이터베이스를 구축하여 예측모형시스템의 입력자료 및 현황자료로 이용되어진다.

(그림 14-5)는 시험유역의 유역현황을 보여주고 있다. 유역현황에서는 대상유역에 대해 소유역별 면적, 형상계수, 유로장, 기복량, 하천평균경사, 하천빈도 등의 유역지형특성과 토지이용상태 및 수문학적 토양군을 나타내고 있다.

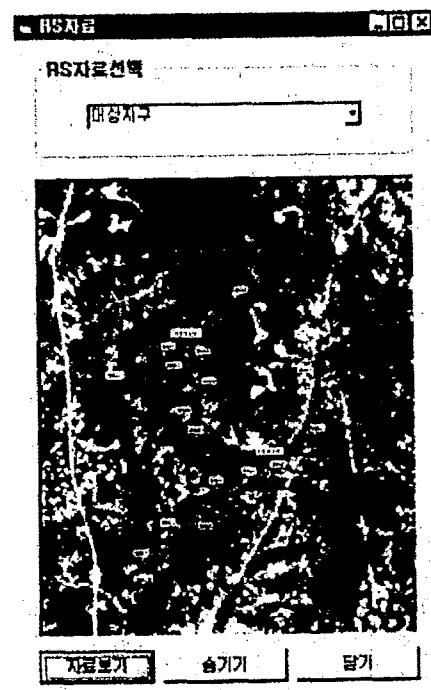
(그림 14-6), (그림 14-7)은 GIS/RS 자료구축을 보여주고 있으며, (그림 14-8), (그림 14-9)은 수문/수질/생태자료의 데이터베이스를 나타내고 있다.



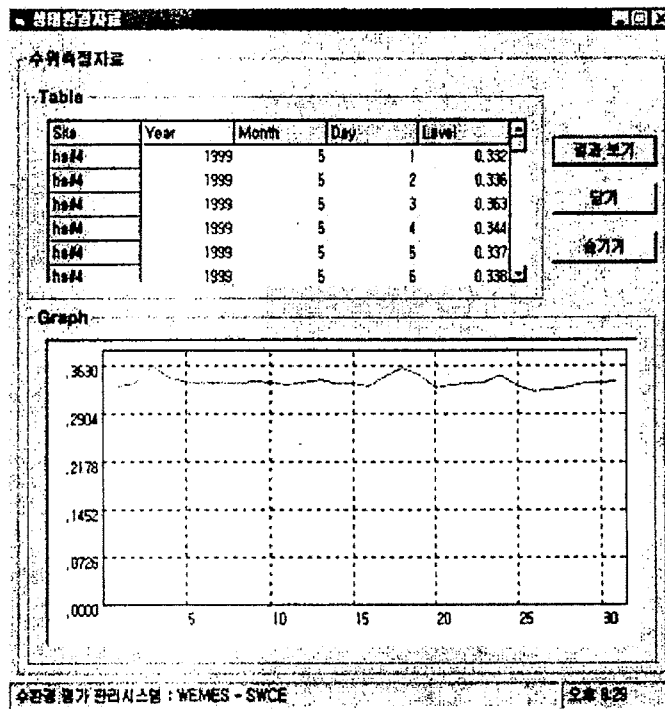
(그림 14-5) 시험구역의 유역현황



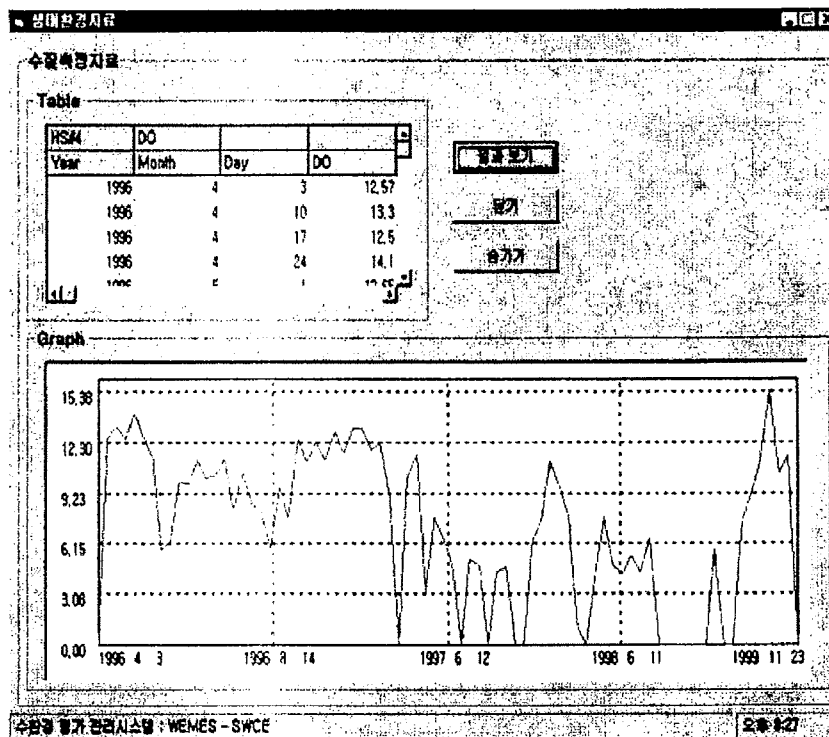
(그림 14-6) GIS 자료구축 예



(그림 14-7) RS 자료구축 예



(그림 14-8) 수문자료 데이터베이스 예



(그림 14-9) 수질자료 데이터베이스 예

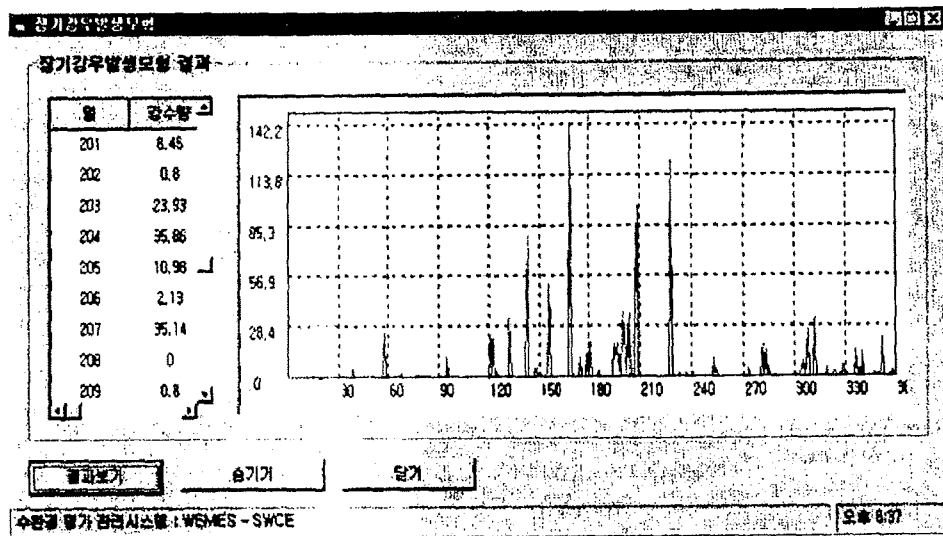
2. 예측모델시스템

가. 수문예측모형

수문예측모형의 수행 모듈은 장단기 강우발생모의와 유출추정 입출력 모듈로서 구성된다.

장단기 강우발생모형의 단기강우모의를 위한 입력모듈은 (그림 14-10)에서와 같이 강우시작시간, 총강우량, 강우지속시간, 5일 선행강우량과 SCS 강우타입 등으로 구성되며, 출력모듈은 (그림 4-11)에서 보는 바와 같이 입력모듈로부터 입력된 기본자료로부터 시간별 강우량을 발생시켜 텍스트와 그래프 형태로 보여준다. 장기강우의 모의는 강문성(1998)이 제안한 추계학적 모의모형을 이용하여 일별 강우량을 발생시킨다. 장기강우의 모의발생 입출력 모듈은 각각 (그림 4-12)와 (그림 4-13)에서 보는 바와 같이, 입력모듈에서 사용자에게 의해 선택된 기상발생년도를 입력자료로 하여 일 강우량을 발생시켜 텍스트와 그래프 형태로 보여준다.

수문예측모형의 단기유출추정은 강우량, 강우형태, 강우지속시간 등의 강우자료와 유역면적, 논면적, CN, 도달시간 등과 같은 수문특성인자를 입력모듈 (그림 14-14)로 구성하였으며, 이를 수행한 결과를 보여주는 출력모듈 (그림 14-15)은 시간별 유출량을 텍스트와 그래프 형태로 나타내도록 구성하였다. 또한, 장기유출추정은 자료관리시스템의 실측 일별강우량 또는 예측시스템의 장기강우발생모형으로부터 발생된 미래의 일별강우량 등의 입력자료를 입력모듈 (그림 14-16)로부터 입력받아, 추정된 해당년도의 일별유출량을 출력모듈 (그림 14-17)을 통해 텍스트와 그래프로 나타내도록 하였다.



(그림 14-13) 장기강우예측의 출력모델

단기유출예측모형

수문특성인자

유역면적 : 3.6 km²

논면적 : 1.1 km²

CN : 75

도달시간 : 0.66 hr

답수심 : 30 mm

단기강수량

강우지속시간 : 15 시 31 분

총강수량 : 42 mm

강우지속시간 : 18 hours

5일 선형강수량 : 10 mm

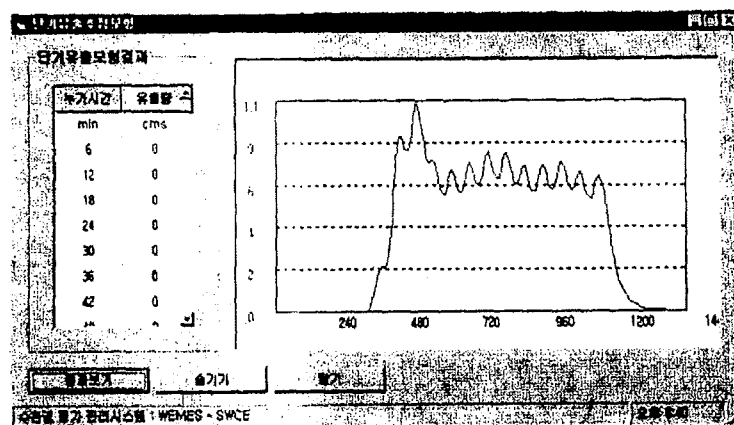
강우 TYPE : 1 1-a 2 2-a

자료입력 습기 달기 재입력

수원장 평가 관리시스템 : WEMES - SWCE

오후 8:38

(그림 14-14) 단기유출예측의 입력모델



(그림 14-15) 단기유출예측의 출력모델

장기유출추정모형

일일유출추정모형입력자료

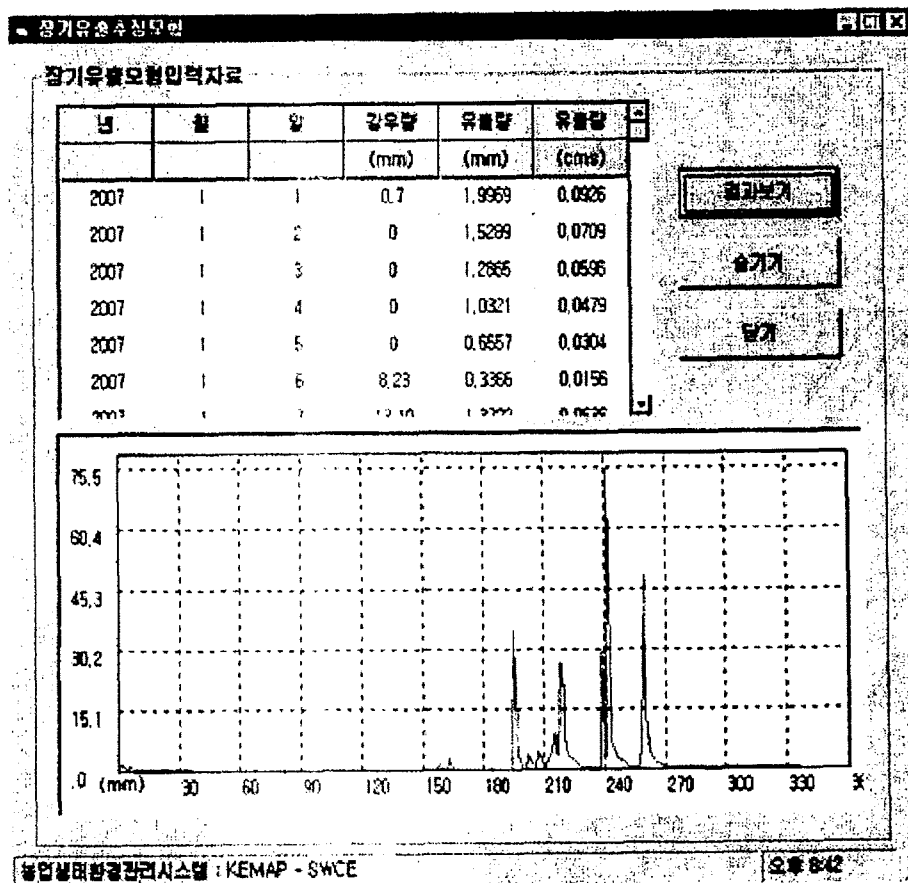
기상자료를 선택하십시오.

2007년

자료입력 습기 말기

수원경 평가 관리시스템 : WEMES - SWCE 오후 8:43

(그림 14-16) 장기유출예측의 입력모듈

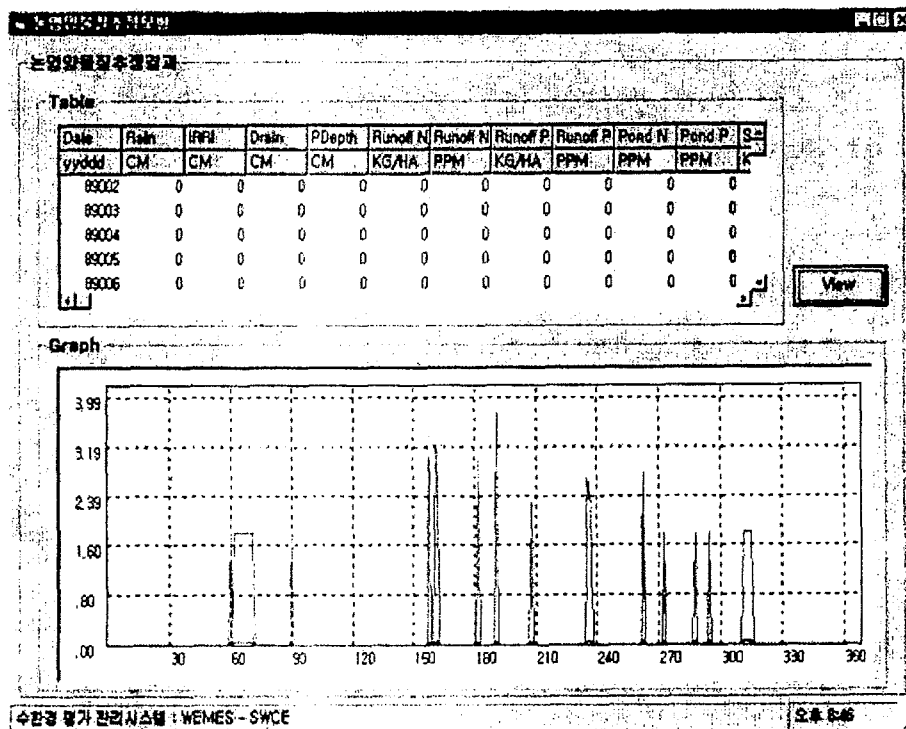


(그림 14-17) 장기유출예측의 출력모듈

나. 수질예측모형

수질예측모형은 논영양물질추정, 유역비점원오염추정, 발생/배출부하량 산정, 그리고 유달부하량을 계산하기 위한 입출력 모듈로 구성된다. 논영양물질모형은 기 구축된 강우자료를 자료관리시스템으로부터 검색을 통해 받아들이며, 입력모듈 (그림 14-18)은 강수와 관개수의 시비농도 그리고 시비량으로 구성되고, 출력결과 (그림 14-19)에서와 같은 출력모듈의 텍스트 및 그래프를 통하여 관개기간중의 영양물질 거동을 나타내도록 하였다. 유역비점원오염의 추정은 자료관리시스템으로부터 GIS 자료를 입력자료로 하여 AGNPS모형을 구동함으로서 (그림 14-20)과 (그림 14-21)에서와 같이 비점오염원을 정성적으로 추정하도록 하였다. 유역 발생/배출 부하량은 유역의 오염원과 기타 처리시설을 사용자가 직접 선정하거나 기 구축된 데이터베이스로부터 입력자료를 구축하여, (그림 14-22) ~ (그림 14-25)과 같이 이에 대해 결과를 정량적으로 나타내도록 하였다. 유달부하량은 입력모듈 (그림 14-26)에서 해당년도를 입력하면 자동적으로 데이터베이스 또는 일별강수모형을 통해 그에 해당되는 연도의 일별강수량을 발생시키며, 이를 입력자료로 하여 일별 유출량을 추정하고, 부하량-유량 관계식을 이용하여 (그림 14-27)과 같이 정성적 정량적으로 나타내도록 하였다.

(그림 14-18) 논영양물질추정모형의 입력모듈



(그림 14-19) 농영양물질추정모형의 출력모델

유역비점원오염추정모형

유역비점원오염추정모형입력자료

년도 : 1997년

강우량 : 24 mm

자료입력 | 숨기기 | 닫기

수환경 평가 관리시스템 : WEMES-SWCE

오후 8:47

(그림 14-20) 유역비점원모염추정모형의 입력모델

유역비점원오염추정모형

유역비점원오염추정결과

강우량 : mm

총질소 (TN) : ppm

총인 (TP) : ppm

부유사질 (SS) : ppm

결과보기 | 숨기기 | 닫기

수환경 평가 관리시스템 : WEMES-SWCE

오전 11:29

(그림 14-21) 유역비점원오염추정모형의 출력모델

발생부하량산정모형 [F4] [F5]

정물계

시가화	가정 :	<input type="text" value=""/>	(인)	영업 :	<input type="text" value=""/>	(인)
대시가화	가정 :	<input type="text" value="1500"/>	(인)	영업 :	<input type="text" value="400"/>	(인)

축산계

한우 :	<input type="text" value="300"/>	(마리)	흑우 :	<input type="text" value="200"/>	(마리)	유우 :	<input type="text" value="500"/>	(마리)
돼지 :	<input type="text" value="400"/>	(마리)	양 :	<input type="text" value=""/>	(마리)	가금 :	<input type="text" value="150"/>	(마리)

산업계 (방류량)

음식업체 :	<input type="text" value="10"/>	(m3/day)	직물업체 :	<input type="text" value="12"/>	(m3/day)
음료업체 :	<input type="text" value="5"/>	(m3/day)	기타 :	<input type="text" value="50"/>	(m3/day)

암석장 (면적)

가두리 :	<input type="text" value=""/>	(m2)	기타 :	<input type="text" value=""/>	(m2)
-------	-------------------------------	------	------	-------------------------------	------

토지여유 (면적)

논 :	<input type="text" value="2000"/>	(ha)	밭 :	<input type="text" value="1500"/>	(ha)	산림 :	<input type="text" value="14000"/>	(ha)	대지 :	<input type="text" value="300"/>	(ha)
기타 :	<input type="text" value="700"/>	(ha)	퇴장 :	<input type="text" value="800"/>	(ha)	골프장 :	<input type="text" value="0"/>	(ha)			

수환경 평가 관리시스템 : WEMES - SWCE 오후 4:00

(그림 14-22) 발생부하량산정모형의 입력모듈

발생부하량산정모형 [F4] [F5]

발생부하량산정결과

유역면적 :	<input type="text" value="19300"/>	ha
BOD :	<input type="text" value="1433.646"/>	kg/day
TN :	<input type="text" value="882.6279"/>	kg/day
TP :	<input type="text" value="138.4062"/>	kg/day

수환경 평가 관리시스템 : WEMES - SWCE 오후 4:55

(그림 14-23) 발생부하량산정모형의 출력모듈

배출부하량산정모형

배출부하량산정모형입력자료

생활거	<input type="checkbox"/> 미처리	<input checked="" type="checkbox"/> 단독정화조	<input type="checkbox"/> 오수처리시설
축산거	<input checked="" type="checkbox"/> 미처리	<input type="checkbox"/> 처리시설	<input type="checkbox"/> 자원화
산업거	<input type="checkbox"/> 미처리	<input checked="" type="checkbox"/> 처리시설	
양식장	<input type="checkbox"/> 미처리	<input checked="" type="checkbox"/> 처리시설	

[프로그램 실행] 숨기기 닫기

수환경 평가 관리시스템 : WEMES - SWCE 오후 9:03

(그림 14-24) 배출부하량산정모형의 입력모듈

배출부하량산정모형

배출부하량산정결과

유역면적 :	19300	ha
BOD :	268.2839	kg/day
TN :	225.5181	kg/day
TP :	24.19894	kg/day

[결과보기] 숨기기 닫기

수환경 평가 관리시스템 : WEMES - SWCE 오후 9:02

(그림 14-25) 배출부하량산정모형의 출력모듈

유달부하량산정모형

유달부하량산정모형입력자료

업별 유출량 산정을 위한
강우자료의 해당연도를 선택하십시오.

강우자료선택 : 1992

[자료입력] 숨기기 닫기

수환경 평가 관리시스템 : WEMES - SWCE 오후 9:06

(그림 14-26) 유달부하량산정모형의 입력모듈

수환경 평가 관리시스템

평가관리

유달부하량산정결과

	BOD	SS	TN	TP	
유달부하량 :	12361.72	71029.99	6519.675	618.2124	kg/yr
유달평균농도 :	7.608389	41.69931	5.001514	0.362931	mg/l
유달율 :	9.36	--	8.966331	72.30161	%

결과보기

승기기

닫기

수환경 평가 관리시스템 : WEMES - SWCE

오류 904

(그림 14-27) 유달부하량산정모형의 출력모들

3. 수환경 평가시스템

가. 수환경 평가모형

수환경평가모형은 자료관리시스템과 예측모형시스템의 결과에 대한 수계의 환경을 평가하기 위하여 하천오염도평가, 지표생물환경평가, 그리고 하천환경평가 등을 수행한다. 하천오염도평가는 (그림 14-28)과 (그림 14-29)과 같이 수온, pH, DO, 대장균수, SS, BOD 및 질소성분의 농도 등이 입력자료로 구성되며, 그 결과의 출력은 가중 점수화하여 하천오염도 지수로서 정량적으로 나타냄은 물론 우수(A)~아주나쁨(E)으로 다섯 등급의 판정기준을 두어 이를 나타내도록 하였다. 지표생물 환경평가는 (그림 14-30)과 (그림 14-31)같이 지표생물 등급을 4개 등급으로 구분하여 사용자가 선정한 생물에 대해 제시된 수질등급으로 수계환경을 평가하게 된다. 하천환경평가모형은 (그림 14-32)와 같이, 야생성, 수질, 하천형태, 사회성 등에 대한 각각의 항목을 사용자가 선택하면, 이를 점수화한 하천환경점수를 정량적으로 제시하고, 이에 따른 적합한 지역의 상태를 나타내어준다.

하천오염도평가모형

하천오염도평가입력자료

수온 : 19 °C pH : 8

DO : 10 mg/l 대장균수 : 120 MPN/100mg

SS : 100 mg/l BOD : 1 mg/l

NH3-N : 1 mg/l NO3-N : 1 mg/l

* 측정자료가 없는 항목은 "1"을, 불검출은 "0"을 입력하십시오.

프로그램 실행 숨기기 닫기 도움말

수환경 평가 관리시스템 : WEMES - SWCE 오후 9:11

(그림 14-28) 하천오염도평가모형 입력모듈

하천오염도평가모형

하천오염도평가결과

하천오염도 지수	00
하천오염도 평가	우수

결과보기 닫기

수환경 평가 관리시스템 : WEMES - SWCE 오후 9:10

(그림 14-29) 하천오염도평가모형 출력모듈

지표생물환경평가모형

지표생물환경평가항목

— 아래의 시식여류 중 관찰된 것을 check 하세요.—

물벼룩	<input type="checkbox"/>	피라미	<input type="checkbox"/>	해거	<input type="checkbox"/>
산천대	<input checked="" type="checkbox"/>	쏘가리	<input checked="" type="checkbox"/>	벌잠대	<input type="checkbox"/>
배불치	<input type="checkbox"/>	다슬기	<input type="checkbox"/>	대꾸러지	<input type="checkbox"/>
금강모치	<input type="checkbox"/>	병대	<input type="checkbox"/>	삼지창대	<input checked="" type="checkbox"/>
문대	<input type="checkbox"/>	알대	<input type="checkbox"/>	나방대류	<input type="checkbox"/>

프로그램 실행 숨기기 닫기

수환경 평가 관리시스템 : WEMES - SWCE 오후 9:12

(그림 14-30) 지표생물환경평가모형 입력모듈

(그림 14-31) 지표생물환경평가모형 출력모듈

(그림 14-32) 하천환경평가모형 입출력모듈

나. 에너지 흐름모형

벼에 대한 투입 및 생산에너지의 산정모듈은 (그림 14-33)에서 보는 바와 같다. 벼에너지 흐름산정에 대한 입력자료는 직접투입에너지, 작물재투입에너지, 그리고 생산물 등이 양으로 입력되며, 출력결과는 작물투입에너지, 작물투입 재이용에너지, 그리고 생산에너지 등이 칼로리로 산출되어진다.

버에너지 : 환경부

기초값을 전국 평균 투입/생산 에너지로 임의

버에너지흐름산정모형입력자료

투입

작물투입에너지

대양 : day 퇴비 : kg/ha
 노동 : kg/ha 지리 : kg/ha
 기계 : kg/ha 농약 : kg/ha
 물 : kg/ha

화학비료(N) : kg/ha
 화학비료(P) : kg/ha
 화학비료(K) : kg/ha

작물지출에너지

종자 : kg/ha
 병충 : kg/ha
 물기 : kg/ha

산출물

종자 : kg/ha 병충 : kg/ha 물기 : kg/ha

버에너지흐름산정결과

작물투입 에너지 : 1000Kcal/yr/ha
 작물투입 지출 에너지 : 1000Kcal/yr/ha
 생산에너지잔량 : 1000Kcal/yr/ha

수환경 평가 관리시스템 : WEMES - SWCE

오류 1/20

(그림 14-33) 버에너지흐름산정모형 입출력모듈

다. 최적수질관리모형

최적수질관리모형은 오염총량관리 삭감목표량 산정과 수환경정화공법에 따른 종합적 하천환경보전 및 평가를 수행한다. 삭감부하량산정은 사용자가 입력모듈상에서 목표수질을 선택하면, 예측모형시스템에서의 결과를 바탕으로 오염항목별 삭감부하량과 유량평균삭감농도를 계산하여 나타내어진다. (그림 14-34)와 (그림 14-35)는 각각 삭감부하량산정의 입출력결과를 보여주고 있다.

수환경보전평가는 사용자가 여러 가지의 정화공법을 선택할 수 있으며, 이에 따른 삭감목표량, 삭감량, 삭감후 하천평균농도 등을 나타낸 목표수질농도와의 비교를 통해 최종적인 목표수질 달성여부에 대한 판정 결과를 사용자에게 제시하여 준다. (그림 14-36)과 (그림 14-37)은 수환경보전평가모듈의 수행결과를 보여주고 있다.

작감부하량산정모형

오염총량관리 목표선정

목표수질:

수환경 평가 관리시스템 : WEMES - SWCE 오후 9:16

(그림 14-34) 삭감부하량산정 입력모듈

작감부하량산정모형

목표수질등급: 등급

오염총량관리삭감목표량 (삭감부하량)

BOD	SS	TN	TP	
<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="25"/>	<input type="text" value="0.4"/>	<input type="text" value="0.03"/>	mg/l
7851.56	28445.3	7838.32	567.110	kg/yr

유량평균삭감농도

BOD	SS	TN	TP	
<input type="text" value="4.60936"/>	<input type="text" value="16.6993"/>	<input type="text" value="4.60161"/>	<input type="text" value="0.33293"/>	mg/l

수환경 평가 관리시스템 : WEMES - SWCE 오후 9:15

(그림 14-35) 삭감부하량산정 출력모듈

수환경보전평가모형

수환경정화공법

물받처리	간이처리
<input type="checkbox"/> 활성슬러지법 <input type="checkbox"/> 산화구법 <input type="checkbox"/> 연속회분식법 <input type="checkbox"/> 삼수대법 <input type="checkbox"/> 회전원판법 <input type="checkbox"/> 없음	<input type="checkbox"/> 산화지법 <input type="checkbox"/> 없음 <input type="checkbox"/> 자연정화법 <input type="checkbox"/> 표층정화법 <input type="checkbox"/> 없음

수환경 평가 관리시스템 : WEMES - SWCE 오후 9:17

(그림 14-36) 수환경보전평가모형 입력모듈

수환정보전평가모형			
식각목표량			
BOD	SS	TN	TP
7851.564	28445.36	7838.32	567.1107
식각량			
BOD	SS	TN	TP
12443.25	69786.97	5111.805	370.9274
식각후 하천평균농도			
BOD	SS	TN	TP
0.304375	0.729737	2.000646	0.145172
목표수질농도			
BOD	SS	TN	TP
3	25	0.4	0.03
최종판정			
전정된 상하관입으로는 목표수질을 만족할 수 없습니다			
결과보기	습기	닫기	
수환경 평가 관리시스템 : WEMES - SWCE			
오후 9:18			

(그림 14-37) 수환정보전평가모형 출력모듈

제 4 절 요약 및 결론

소유역에서의 건전한 수계환경관리방안과 평가를 위하여 수계환경관리 및 평가 시스템을 개발하였고, WEMES의 조작과 운용을 위해 시스템의 구성과 특징에 대하여 정리하였다.

이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① 수계환경의 건전한 관리와 효과적인 평가를 수행하기 위해 자료관리시스템, 예측모형시스템, 수환경평가시스템 등으로 구성된 수계환경관리 및 평가시스템을 개발하였다.
- ② 수계환경을 평가하기 위한 정성적 정량적 평가, 관리, 개선, 보전 방법의 기법을 제시하였다.
- ③ 유역현황과 데이터베이스를 수행하기 위해 자료관리시스템을 구성하였다.
- ④ 수환경평가의 입력자료로 구성되는 수문/수질자료의 예측을 위해 기존의 모형

을 수정 보완하거나 개발하였다.

- ⑤ 수계환경의 수질, 생물, 에너지 흐름 등에 의한 종합적 수환경보전 및 평가모듈을 개발하여 적용하였다.
- ⑥ 개발된 시스템을 풀다운메뉴를 제공하는 메뉴식 구동 시스템으로 구성함으로써, 컴퓨터 시스템에 대한 최소한의 지식을 갖는 조작권리자가 수계환경을 종합적으로 평가, 관리할 수 있도록 한 의사결정지원시스템을 제공하였다.
- ⑦ WEMES는 프로그램의 구동 결과를 모니터나 프린터를 통해 그래픽 영상, 표, 기타 자료 등으로 나타냄으로서, 조작권리자가 수계환경관리 및 평가를 효율적으로 수행할 수 있도록 하였다.

참고문헌

1. 강문성, 1995, 우리나라 일별 기상인자의 추계학적 모의발생에 관한 연구, 서울대학교 석사학위논문.
2. 강민구, 박승우, 임상준, 1999, SCE-UA법을 이용한 수문모형의 매개변수 추정, '99 한국수자원학회 학술발표 논문집.
3. 강상준, 최철수, 1991. 대청호 유역의 식생, 대청호 호서 생태계 조사 연구 보고서.
4. 국립환경연구원, 1987. 폐수배출시설 표준원단위 조사연구 (I), 국립환경연구원보, Vol (9).
5. 국립환경연구원, 1988. 폐수배출시설 표준원단위 조사연구 (II), 국립환경연구원보, Vol (10).
6. 국립환경연구원, 1989. 폐수배출시설 표준원단위 조사연구 (III), 국립환경연구원보, Vol (11).
7. 김범철, 1996. 우리나라 호소수질환경의 개선방향, 한국수자원학회지, PP. 51-61
8. 김우철 외, 1985. 현대통계학, 영지문화사.
9. 김철겸, 1999, 논에서의 유출 특성을 고려한 농업 소유역의 홍수유출 추정, 서울대학교 석사학위논문.

10. 농촌진흥청, 1998. '97 농축산물표준소득, 농업경영연구보고.
11. 농촌진흥청, 1998. 연구사업보고서, 농업경영연구보고 제60호.
12. 농촌진흥청, 1998. 작목별 작업단계별 노동력 투하시간, 농업경영연구보고 제60호.
13. 농촌진흥청, 1999. 농작물 병해충 예찰.
14. 박충현, 박희경, 현인환, 1996. 21세기 물 수요를 대비한 종합수질 관리방안, '96 세계 물의 날 기념 심포지엄, pp. 71-119.
15. 심순보 등, 1994. 수질 종합 관리에 있어서 시스템 인터페이스를 위한 모듈 개발, G-7과제연구보고서.
16. 양영민, 2000. 의사결정지원기법을 이용한 농촌유역 수질관리모형의 개발, 서울대학교 석사학위논문.
17. 이호진, 정영상, 1993. 지속적 작물생산과 환경관리, 지속적 농업과 환경보전 국제심포지엄, 서울대 농업개발연구소, pp. 31-55.
18. 장정렬, 1994. 농촌유역 수질관리모형의 개발에 관한 연구, 서울대학교 석사학위논문.
19. 주경민외, 2000. Visual Basic Programming Bible Ver.6.x
20. 통계청, 1999. 1998년 농산물생산비통계.
21. 한국건설기술연구원, 1997. 하천관리 워크샵, pp. 81-96.
22. 한국농기계농업협동조합 · 한국농업기계학회, 1998. 농업기계연감.
23. 한상옥외, 2000. 신제 환경영향평가론, 향문사.
24. 환경부, 1995. 21세기 환경비전.
25. 환경부, 2000. 사전환경성검토 업무 편람.
26. 환경부, 2000. 오염총량관리계획수립지침(안).
27. 환경처, 1989. 현존식생도 (서울, 경기도). 72-75.
28. Heinrichs, E. A., 1994. Biology and management of rice insects, Wiley Eastern Limited, New Delhi. 779.
29. Preston, S. D., Bierman, V. J., and Silliman, S. E., 1989. An evaluation of

methods for the estimation of tributary mass loads, Water Resour. Res., in Canada, pp. 142-150.

30. Samson, F. B., and Fritz, L., 1996. Ecosystem management: selected reading. Springer-Verlag New York, Inc. 462.
31. Storm Cloud Co. 1997. WebDBC v3.0 - JAVA-ODBC interface and Web database developer.
32. Vladimir Novotny, Harvey Olem, 1994, Water Quality, Prevention, Identification, and Management of Diffuse Pollution, Van Nostrand Reinhold.

농업환경정보 관리시스템 개발

2000년 12월

“농업생태환경 모니터링 및 종합적 환경관리시스템 개발 사업”

서울대학교 농업생명과학대학 부속 농업개발연구소

최종보고서 제 V 편 제 15 장

여 백

제 15 장 농업환경정보 관리시스템 개발

제 1 절 서 론

농업생태계는 농업 내외적 수질오염과 과도한 농업화학물질의 사용에 의한 농경지의 토양오염과 함께 비점오염 등 수질오염 피해의 확산, 작목의 단순화 등으로, 농경지의 지속적인 생산을 보장하는 데 있어서 그 안정성에 위협을 받고 있다. 또한, 과도한 농약, 비료 등의 잔류량과 농산물의 유독성 잔류량의 검출 등은 인간의 건강에 대한 위협을 초래하고 있다. 따라서, 수질보호 및 생태계 보전, 저공해 농산물에 대한 국내의 수요 증가, 그리고 국제적 환경 규제에 능동적으로 대처하기 위한 노력이 요구된다.

이를 위해서 다양한 환경관리 목표와 수준에 대응하는 최적관리기법의 선정과 농업생태정보의 지속적 자료 보충 및 관리를 위한 체제가 마련되어야 하며, 이를 바탕으로 하는 농업환경정보시스템 개발이 필요하다고 하겠다.

현재 국내 보유 중인 농업환경관련자료는 양적인 면에서도 선진국의 수준에 이르지 못할 뿐만 아니라 이미 오래 전에 수집된 자료를 토대로 작성되어 있어 질적인 수준도 그리 높지 않은 실정이다. 더구나 거의 대부분 보고서 등 간행물에 수록되어 있고 최근에 이르러서야 전산데이터베이스 구축의 필요성을 절감하여 관련기관의 전산실을 중심으로 단편적인 전산정보관리시스템을 구축하고자 노력을 기울이고 있다.

더욱이 농업환경정보는 준실시간에 수집, 분석, 배분되어야 하는 특성이 강한 기상, 수문, 작물생육, 오염인자, 생물상 등 동적변화가 상대적으로 높은 요소들로 구성되어 있어 기존의 환경정보와 자료관리시스템만으로는 보다 다양한 농업환경정보의 수집, 가공, 분석 및 배분을 기대하기는 불가능할 수 밖에 없다. 따라서 현재 국내 농업관련 연구기관, 대학 등에서 보유 운영 중인 농업환경관련 정보 및 관리시스템의 운영 실태 조사를 통하여 문제점을 파악하는 한편 개선방안을 강구하여 보다

체계적인 국가단위 농업환경정보시스템의 모형을 개발할 필요성이 점증되고 있다.

농업환경정보시스템은 영농체제와 방법에 따른 농업생태계 요소들의 거동을 예측할 수 있고, 농업생태정보 데이터베이스 시스템과 이들 모델의 상호 호환을 통해 최적관리대안의 평가를 할 수 있는 시스템으로서, 환경변화에 따른 농업생태계에 미치는 위험도를 예측 평가하는 시스템을 의미한다. 이를 통하여 농민, 농업연구 및 지도자, 혹은 국가적 농업개발 계획에 활용할 수 있는 범용성의 시스템을 구축하기 위하여 Internet 망을 이용한 Web기반의 정보관리시스템이 사용되어지고 있다.

Web은 편리한 사용자 환경을 제공할 뿐만 아니라, 별도의 교육이나 훈련이 없이도 Internet 망에 접속되어 있고, Web browser를 갖추고 있는 컴퓨터만 이용하면 정보를 탐색할 수 있으며, 정보제공자의 입장에서 다수의 사용자에게 다양한 정보를 제공할 수 있으며 새로운 정보로의 보완도 용이하다는 장점이 있다.

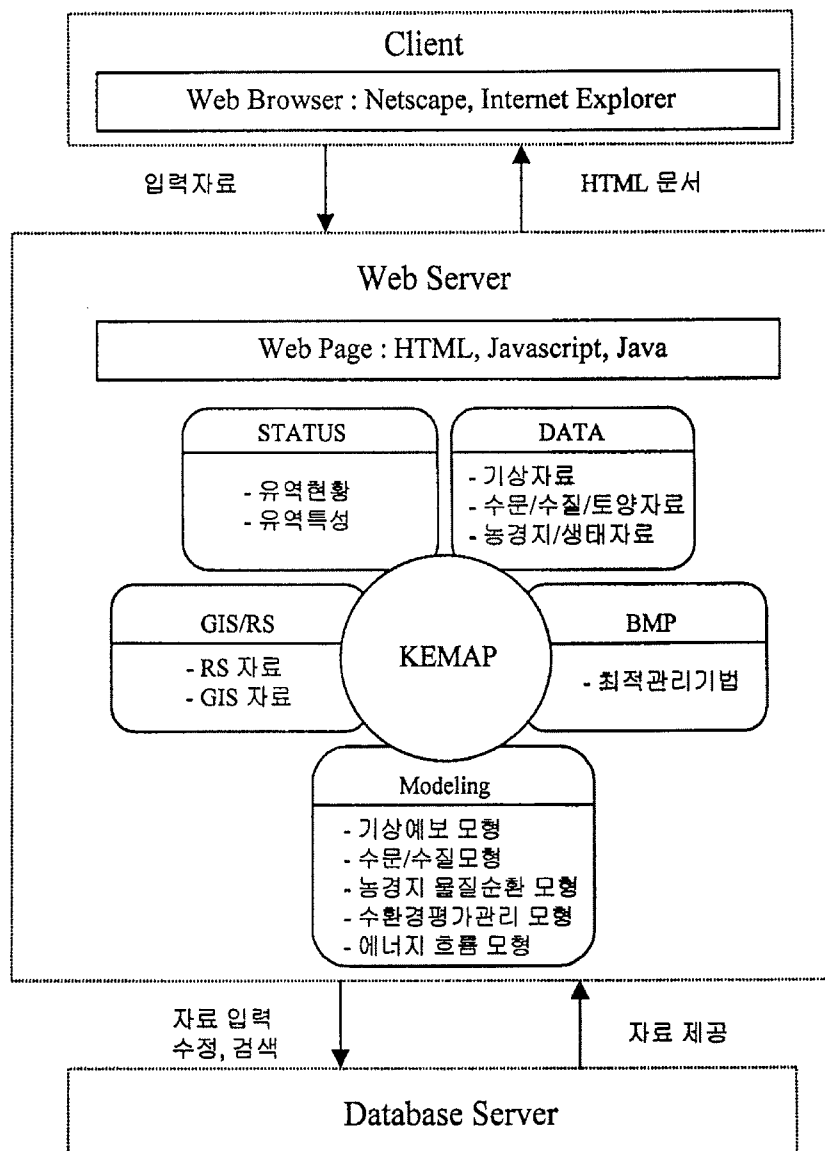
최근 들어 국내에서도 지리정보 시스템을 이용한 수계단위 및 토양정보의 데이터베이스 분야와 원격탐사를 이용한 모니터링 분야 등에서 활발한 연구가 수행되고 있으나 아직 적용단계에 머물러 있으며 제한적이다. 이에 비해 외국의 경우는 주요 환경 요소의 데이터베이스를 완성하고, 지리정보 시스템의 응용에서의 실용화 단계에 있으며, 원격탐사기술을 이용한 준실시간 모니터링 시스템을 구축하는 등의 실용화 단계에 있는 실정이다. 또한, 농업생태정보시스템은 외국의 경우 지역별로 종합적 농업환경정보시스템의 구축이 완성단계에 있는 실정이지만, 국내의 경우 단편적인 농업 관련 자료의 수집, 배분을 위한 시스템의 개발과 구축이 진행되고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구의 목적은 Web 기반 농업생태정보시스템을 개발하기 위하여, 농업생태정보시스템의 구성 범위를 설정하고, 시험유역을 선정하여 수문, 수질 및 생태 계측망 구성에 따른 시기별, 측정별 생태정보 자료를 구축하여 데이터베이스를 통해 제공하며, GIS 및 RS의 자료 구축 현황과 분석결과 및 농업기반시설의 정보를 제공하고, 기상예보모형, 수문, 수질 모형, 농경지물질순환모형, 벼에너지흐름모형 등의 입력 모듈과 그 추정결과 정보를 제공하며, 이를 Web site를 이용하여 농민, 농업연구자 또는 국가 개발 계획에 활용할 수 있도록 하는 데 있다.

제 2 절 농업환경정보시스템의 개발

1. 시스템의 개요

농업환경정보시스템 (Korea Environment Monitoring and Assessment Program, KEMAP)은 농업환경변화에 따른 농업과 주변 생태계에 미치는 영향을 정량적으로 분석하여 농업생태환경 구성요소별 정보를 제공하도록 구성하였으며, 시스템의 구성 모식도는 (그림 15-1)에서와 같다.



(그림 15-1) KEMAP 구성 모식도

본 시스템은 Web 기반 농업생태환경정보를 제공하며, 자료의 구축 및 보완을 위한 데이터베이스 기능을 제공한다. Web site는 유역현황자료, 생태DB자료, GIS/RS 자료, Modeling 결과 자료, BMP 등의 정보 자료를 제공하며, 데이터베이스와의 연동을 통해 사용자에게 의해서 자료의 보완이 가능하도록 하였으며, 지속적인 자료의 수집과 자료 검증, 분석, 배분 기능을 제공하도록 하였다.

2. 시스템의 구성 범위

KEMAP의 구성 범위는 <표 15-1>과 같다. <표 15-1>에서와 같이 KEMAP은 시스템의 개요 및 목적 등을 제시한 KEMAP, 시험유역현황 및 계측망 구성을 보여주는 STATUS, 시험유역의 각종 자료를 검색할 수 있는 DATA, 시험유역의 지리정보자료 및 위성영상 자료 및 분석결과를 제공하는 GIS/RS, 기상, 수문, 수질 및 농경지 물질순환과정과 에너지 흐름 추정 결과를 검색할 수 있는 Modeling, 생태환경 보전을 위한 관리대안 등의 최적관리기법을 제시하는 BMP 등으로 구성되어 있다.

<표 15-1> KEMAP의 구성 범위

항 목	내 용	비 고
KEMAP	개요, 목적	
STATUS	시험유역개황, 유역의 위치도, 유역의 생태환경 계측망	
DATA	기상자료, 수문자료, 수질자료, 농경지자료, 생태환경자료	
RS/GIS	NGIS 수치지도, 시험유역 기본도 및 주제도, 다시기 위성영상 자료 및 분석 결과 자료 정보	
Modeling	기상예보모형, 수문/수질모형, 농경지 물질순환모형, 수환경관리평가모형, 에너지흐름모형 등의 추정 결과 자료 제공	
BMP	최적관리기법, 관리대안 등의 제시	

제 3 절 농업생태환경정보시스템의 구성

농업환경정보시스템은 Web 기반 정보 시스템으로서 양방향 웹 사용자 인터페이스를 위한 Web site를 구성하여 농업생태환경정보에 대한 자료를 제공함은 물론 농업생태정보의 추정 결과와 관리대안 등을 제시하도록 구성하였다.

KEMAP은 크게 데이터베이스 기능과 이를 토대로 모형의 구동 결과의 정보를 제공하는 Modeling으로 구성되어 있다.

1. 데이터베이스

가. STATUS

STATUS의 구성요소는 시험구역인 기천저수지와 발안저수지 구역의 위치, 구역수문특성 자료 등을 제공하며, 시험구역의 수문, 수질 및 생태 계측 현황을 도식적으로 제공하도록 하였다. (그림 15-2)은 STATUS의 시험구역 수문, 수질, 생태 계측망의 구성을 보여주고 있다.

나. DATA

본 시스템의 DATA는 시험구역의 조사현황 및 내용, 시험구역의 수문특성, 수질분석 방법, 수계오염도 등의 데이터 개요와 기상자료, 수문자료, 수질자료, 생태환경자료 등을 제공하도록 하였다.

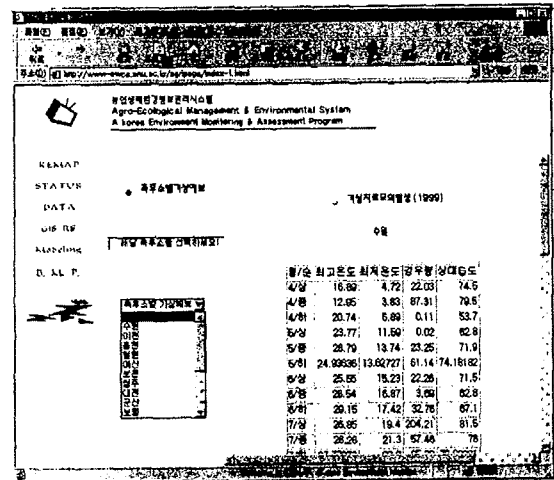
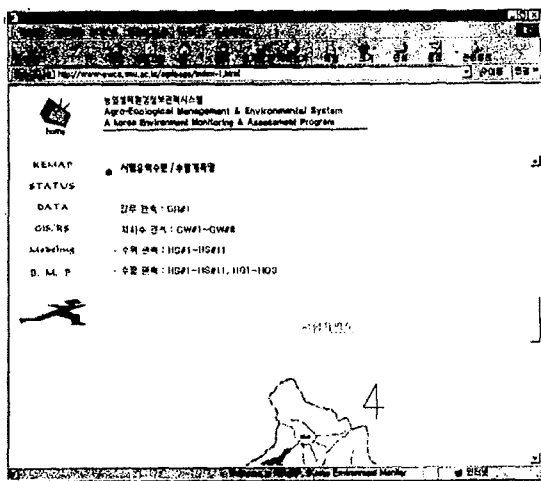
기상정보는 현재의 일 기후 기상자료를 기상청 예보를 이용할 수 있도록 하였으며, 농업기상인자인 강우발생일, 최고온도, 최저온도, 상대습도 등은 전국 주요 측후소를 대상으로 자료를 수집하여 통계적 특성을 분석하여 추계학적 기상모의발생모형을 적용함으로써 수문, 수질, 생태 변화의 장기 추정을 위한 기초자료로 활용할 수 있도록 하였다. (그림 15-2)는 추계학적 장기기상예보모형을 이용한 전국 주요 측후소별 장기 기상을 추정한 결과를 보여주고 있다.

수문, 수질 정보는 시험구역의 시기별, 측정별 측정 및 분석 자료를 제공하며, 생태환경자료는 농경지, 수변생태, 산림생태, 곤충생태 등의 자료 정보를 제공하도록

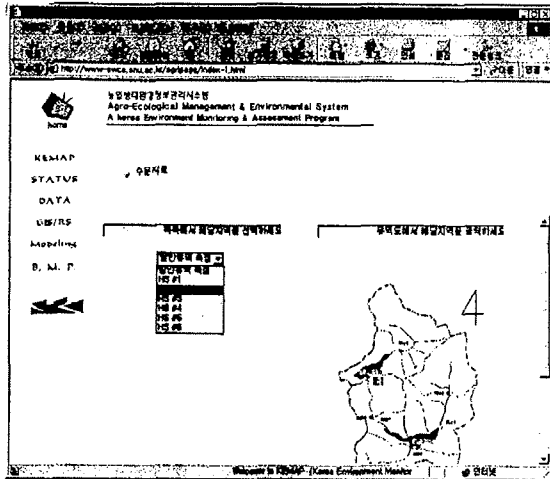
하였다. 수문, 수질 및 생태환경정보는 DBMS를 이용하여 자료 접근이 쉽고 정보 관리가 용이하도록 구성하였다. (그림 15-3)과 (그림 15-4)는 검색을 통한 측정별, 시기별 수문, 수질 정보 제공을 보여주고 있다.

다. GIS/RS

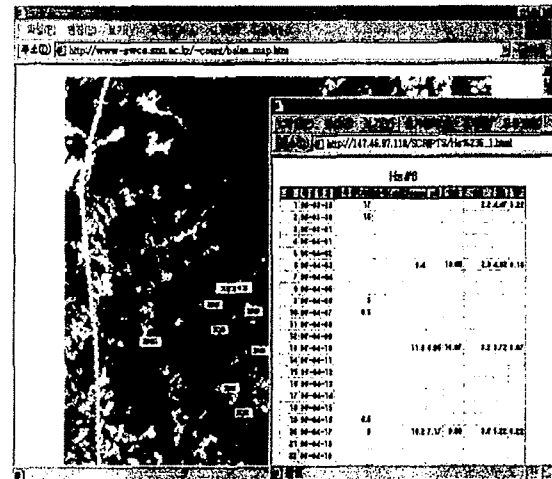
GIS/RS의 정보는 지리정보체계 및 원격탐사를 이용한 농업환경의 자료 현행화 기술 개발의 정보를 제공하기 위하여, 시험유역에 대한 GIS 및 RS의 자료 구축 현황과 농업기반시설의 정보시스템의 구성을 제공하도록 하였다. 또한, 시험유역의 구축 자료와 주제도 구축 도면 등을 제공하며, 유역 수문 특성 추출 기법을 제시하였고, 그 결과를 도시하도록 하였다. 원격탐사의 응용으로서, 다시기 영상을 이용한 토지이용변화 영상 및 분석 자료를 제공하도록 하였다. (그림 15-5)는 시험유역의 위성영상을 감독분류에 의한 토지이용분류 결과의 정보를 보여주고 있다.



(그림 15-1) 시험유역의 수문수질 계측망 (그림 15-2) 측후소별 장기기상예보 정보



(그림 15-3) 측정별 수문 자료

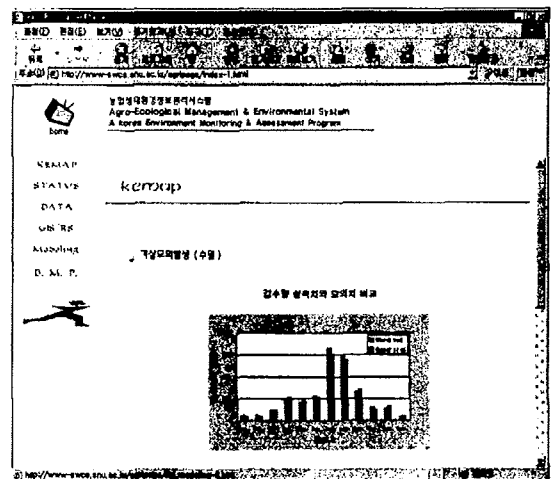
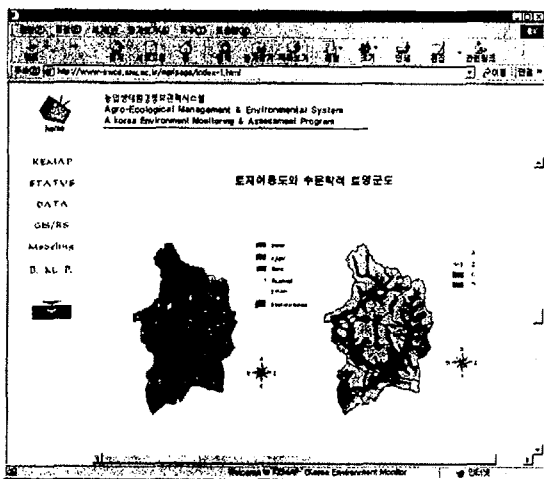


(그림 15-4) 시기별 측정별 수문 자료

2. Modeling

Modeling은 기상예보모형, 수문/수질모형, 농경지물질순환모형, 벼에너지흐름모형, 수환경 평가모형 등에 의해 추정된 결과를 제공한다.

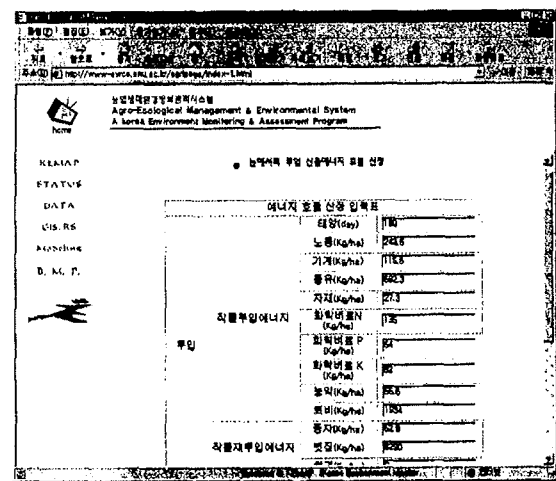
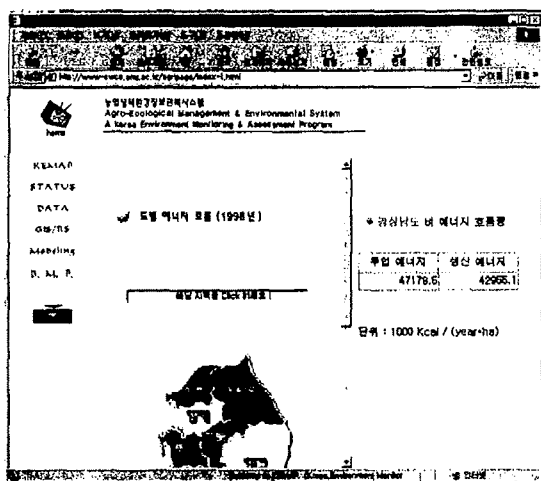
기상예보모형은 장기기상예보의 구성 및 추정결과를 차트로 제공하고, 수문수질모형은 수정 AGNPS 모형, SFRpaddy 모형, DIROM 모형의 구성과 그 추정결과를 제시하도록 하였다. (그림 15-6)은 장기기상예보 결과를 그래픽으로 보여주고 있다.



(그림 15-5) GIS/RS 자료구축 정보 (그림 15-6) Modeling 장기기상예보 결과 정보

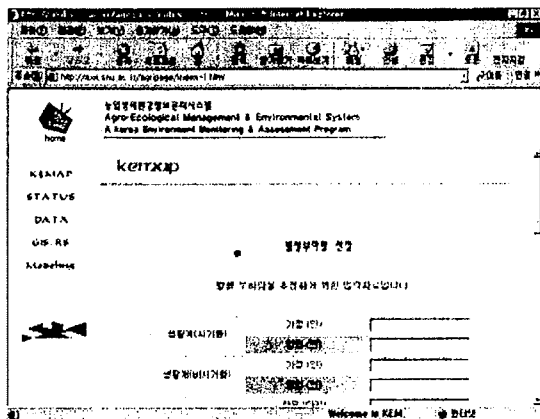
농경지 물질순환모형은 CREAMS 모형과 CREAMS 모형의 구성과 그 추정결과를 제공하고 있으며, 벼에너지흐름모형은 에너지 흐름 산정을 위한 입출력 모듈을 제공함으로써 전국을 대상으로 도별 에너지 흐름 산정결과를 검색하여 보여주도록 하였다.

(그림 15-7)은 전국을 도별로 벼 에너지 흐름량을 계산하여 그 결과를 제공하는 것이며, (그림 15-8)은 Web 상에서 벼 에너지 흐름량 산정을 위한 입력 모듈을 보여주고 있다.

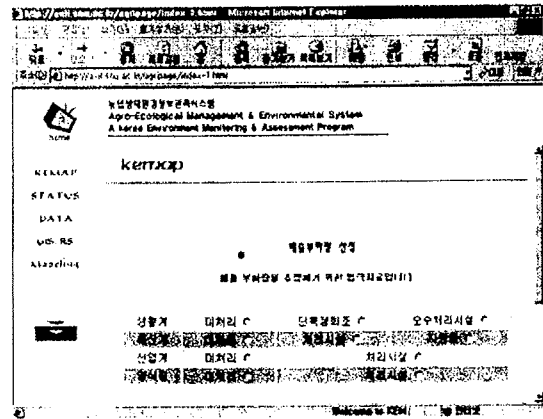


(그림 15-7) 도별 벼 에너지 흐름량 (그림 15-8) 벼 에너지 흐름량 산정 입력 모듈

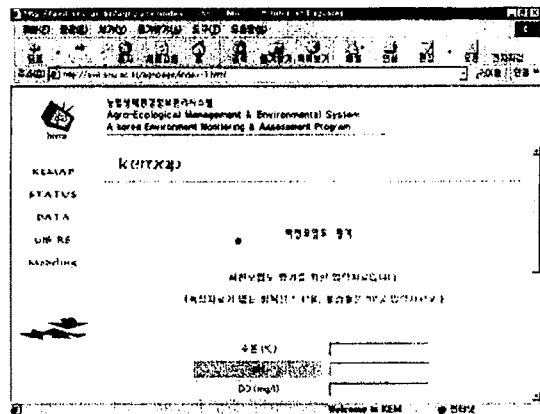
수환경평가모형은 발생부하량산정, 배출부하량산정, 하천오염도평가, 지표생물수질평가 등에 대한 입출력모듈로 이루어져 있다. 유역 발생/배출부하량은 유역의 오염원과 기타 처리시설을 사용자가 직접 선정하거나 기 구축된 데이터베이스로부터 (그림 15-9)와 (그림 15-10)같이 입력자료를 구축하여, 이에 대해 결과를 정량적으로 나타내도록 하였다. 또한, 하천오염도평가는 (그림 15-11)과 같이 수온, pH, DO, 대장균수, SS, BOD 및 질소성분의 농도 등이 입력자료로 구성되며, 그 결과의 출력은 가중 점수화하여 하천오염도 지수로서 정량적으로 나타내는 물론 우수(A)~아주나쁨(E)으로 다섯 등급의 판정기준을 두어 이를 나타내도록 하였다. 지표생물수질평가는 (그림 15-12)과 같이 지표생물 등급을 4개 등급으로 구분하여 사용자가 선정한 생물에 대해 제시된 수질등급으로 수계환경을 평가하게 된다.



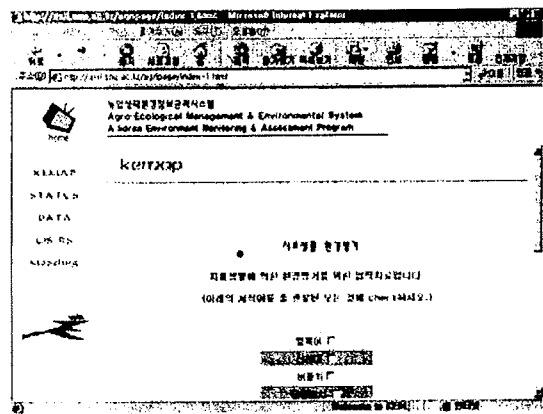
(그림 15-9) 발생부하량산정모형



(그림 15-10) 배출부하량산정모형



(그림 15-11) 하천오염도평가모형



(그림 15-12) 지표생물수질평가모형

제 4 절 요약 및 결론

본 연구에서는 환경변화에 따른 생태환경 데이터베이스와 농업생태계 요소들의 거동을 예측할 수 있는 모형의 상호 호환을 통한 최적관리대안을 평가하기 위한 Web 기반 농업생태환경관리시스템을 개발하였으며, 이를 Web site를 이용하여 농민, 농업연구자 또는 국가 개발 계획에 활용할 수 있도록 하도록 하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① 시험유역의 개황 및 시기별 측정별 수문/수질/토양/생태환경 자료와 기상자료

등을 데이터베이스로 구축하였다.

- ② GIS와 RS를 이용한 주제도의 자료기반을 구축하였고, 다시기 영상의 토지이용변화와 농업생태변화 등의 분석 결과를 제시하였다.
- ③ 장기기상예보모형, 수문/수질 모형, 농경지 물질순환 모형 등의 구성 및 추정 결과를 표와 그림을 통해 제공하도록 하였다.
- ④ 논에서의 에너지흐름모형을 구성하였고, 에너지 흐름량 산정을 위한 입출력 모듈을 설계함으로서 사용자가 Web에서 구동이 가능하도록 하였다.
- ⑤ 영농 및 농업생태환경과 관련된 각 연구분야의 종합적인 관리대안 검색 기법을 연구할 계획이다.

참고문헌

1. 강문성, 박승우, 진영민, 1998. 기상자료 미계측 지역의 추계학적 기상발생 모형, 한국농공학회지, 40(1), pp. 57- 67.
2. 박승우, 윤광식, 임상준, 강문성, 1996. 농업유역의 생태환경 모니터링 기법 연구, 농촌계획, 2(2), pp. 91-102.
3. 서춘석, 박승우, 강문성, 강민구, 1999. 관개용 저수지 운영을 위한 Web 기반 정보시스템의 개발, 1999년 한국농공학회 학술발표회 논문집.
4. 임경수, 1998. 쌀 경작체계의 환경친화성에 관한 연구, 서울대학교 대학원 박사학위논문.
5. Y. Huang, R. E. Lacey, A. D. Whittaker, M. E. Castell, 1999. Database Information Management through the World Wide Web, 1999 ASAE/CSAE-SGCR Annual International Meeting.

연구성과 활용실적

여 백

연구성과 활용실적

▣ 학술지 게재 논문

1. 강문성, 박승우, 2000. 다시기 위성영상을 이용한 소유역의 토지피복변화 평가, 한국농촌계획학회지, 6(2): 50-58.
2. 김철겸, 박승우, 임상준, 2000. 논 의 수문특성을 고려한 소유역의 유출곡선 합성, 한국농공학회지, 42(4): 56-62.
3. 강문성, 박승우, 진영민, 1998. 기상자료 미계측 지역의 추계학적 기상발생모형, 한국농공학회지, 40(1): 57-67.
4. 임상준, 박승우, 강문성, 1998. 이상기후에 따른 농작물의 수확량 및 재해발생 확률의 추정, 한국농공학회지, 39(6): 31-40.
5. 박승우, 윤광식, 임상준, 강문성, 1997. 농업유역의 생태환경 모니터링 기법 연구, 한국농촌계획학회지, 2(2): 91-102.
6. 박승우, 윤광식, 진영민, 이변우, 1997. 논 의 물질순환 모니터링, 서울대농학연구지, 22(1): 19-27.
7. 박홍현, 이준호. 1997. 경기도 발안지역 수도포장에서의 살충제 처리에 따른 절지동물군집 모니터링. 서울대농학연구지, 22(1): 9 ~ 18.
8. Lee, Dowon, 1996. Perspectives of Ecological Engineering to Enhance Nutrient Removal in Wetlands, 환경논총 34권.

▣ 학위논문 (박사)

1. 임상준, 2000. 농업유역의논 관개회귀량 추정 모형의 개발, 서울대학교 대학원 박사학위논문.
2. 남택수, 1999. 건답직파재배에서 요소비료 사용시 벼의 질소흡수이용과 손실, 서울대학교 대학원 박사학위논문.
3. 임경수, 1998. 쌀경작체계의 환경친화성에 관한 연구, 서울대학교 대학원 박사학위논문.

■ 학위논문 (석사)

1. 서춘석, 2001. 관개논에서의 영양물질추정모형의 개발, 서울대학교 대학원 석사학위논문.
2. 전종안, 2001. GIS-AGNPS 호환모형을 이용한 소유역에서의 직접유출에 의한 오염부하량 추정, 서울대학교 대학원 석사학위논문.
3. 박지언, 2000. 황산적거미와 턱거미의 경쟁 및 논생태계내 공간분포, 서울대학교 대학원 석사학위논문.
4. 강민구, 1999. SSARR 모형을 이용한 관개용 저수지 시스템의 거동분석, 서울대학교 대학원 석사학위논문.
5. 김철겸, 1999. 논에서의 유출 특성을 고려한 농업 소유역의 홍수유출 추정, 서울대학교 대학원 석사학위논문.
6. 박희성, 1999. 위성영상을 이용한 토지이용 분류 및 유출곡선번호의 추정, 서울대학교 대학원 석사학위논문.
7. 조창섭, 1999. 황산적거미(*Pirata subpiraticus*)의 일주기 리듬과 포식행동, 서울대학교 대학원 석사학위논문.
8. 김경미, 1998. 수생식물의 현존량 조절에 의한 생활하수의 질소와 인 제거, 서울대학교 대학원 석사학위논문.
9. 조재필, 1998. 복합 토지이용 특성의 농촌유역에 대한 농업비점원오염모형의 적용, 서울대학교 대학원 석사학위논문.
10. 진영민, 1998. 논에 비점오염물질 배출량 추정을 위한 CREAMS-PADDY 모형의 개발, 서울대학교 대학원 석사학위논문.
11. 임언택, 1997. ELISA를 이용한 황산적거미의 벼멸구 포식평가에 관한 연구, 서울대학교 대학원 석사학위논문.

▣ 학술발표회 논문 (국제)

1. Kang M. G., S. W. Park, M. S. Kang, and J. H. Son, 2000. A Web-based Information System for Irrigation Reservoir Operation, the first KSRP/RPA(JAPAN) symposium, on rural planning and rural living sciences for the twenty first century, pp. 183-188.
2. Kang M. S., S. W. Park, and Y. G. Her, 2000. A Water Environment Management and evaluation systems at a Small Watershed, the first KSRP/RPA(JAPAN) symposium, on rural planning and rural living sciences for the twenty first century, pp. 156-165.
3. Kim S. M., S. W. Park, and M. S. Kang, 2000. Analysis of Pollutant Loadings from Land Uses at Small Watersheds, the first KSRP/RPA(JAPAN) symposium, on rural planning and rural living sciences for the twenty first century, pp. 174-182.
4. Im, S. J., S. W. Park and C. E. Park, 2000. Modeling irrigation return flow on small agricultural watersheds. Proceeding the 2000 ASAE Annual International Meeting, Paper No. 002128, Milwaukee, Wisconsin.
5. Im, S. J., S. W. Park, Y. M. Chin and K. S. Yoon, 2000. Development of CREAMS-PADDY model.. Proceeding of the 2000 ASAE Annual International Meeting, Paper No. 002129, Milwaukee, Wisconsin.
6. Lee, J. H. and H. H. Park, 2000. Long-term monitoring of arthropod community in paddy fields in Korea, Proceedings of the international LTER joint seminar between Korea and China, Ecosystem research and sustainable management, pp. 328 - 339.
7. Lim, UT. and J.-H. Lee, 1999. Enzyme-linked immunosorbent assay used to analyze predation of *Nilaparvata lugens* (Homoptera: Delphacidae) by *Pirata subpiraticus* (Araneae: Lycosidae). Environ. Entomol. 28: 1177-1182.
8. Kang, S, K., E. J. Park, D. W. Go, and D. W. Lee., 1998. Nutrient removal from stream to riverline wetland in two different landscapes, Paper presented in the Annual Meeting of US International Association for Landscape Ecology, Michigan State University, Lansing, Michigan.

9. Myeongsu Baek, Kyoungsoo Lim, Dowon Lee, 1996. Relationships between Riparian Vegetation Patterns and Environment, The 50th Anniversary Meeting of the Korean Association of Biological Sciences.

■ 학술발표회 논문 (국내)

1. 강문성, 박승우, 2000. 신경망이론을 이용한 소유역에서의 장기 유출 해석, 한국농공학회 학술발표회, pp. 384-389.
2. 강문성, 박승우, 강민구, 서춘석, 2000. Web 기반 농업생태환경정보시스템 개발, 한국농촌계획학회 춘계 학술발표회, pp. 57-62.
3. 박흥현, 이준호, 2000. 미소서식지(micro-habitat)에서 는 거미 밀도형성 및 공간 분포, 2000년도 한국응용곤충학회, 한국곤충학회 합동 춘계학술발표회.
4. 서춘석, 임상준, 박승우, 윤광식, 2000. 관개논 영양물질 추정모형의 개발, 한국농공학회 학술발표회, pp. 138-143.
5. 임상준, 박승우, 2000. 농업유역의 관계회귀수량 추정 모형의 개발, 2000년 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 441-446.
6. 임상준, 박승우, 강문성, 2000. 중소유역의 관개회귀수량 수문모니터링, 2000년 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 191-196.
7. 임상준, 서춘석, 박승우, 2000. 토지이용에 따른 강우-유출 특성 변화, 한국농공학회 학술발표 논문집, pp. 72-77.
8. 강문성, 박승우 1999. 다시기 Landsat TM 영상을 이용한 소유역의 토지이용변화 분석, 1999 한국농공학회 학술발표 논문집.
9. 강민구, 박승우, 임상준, 1999. SCE-UA법을 이용한 수문모형의 매개변수 추정, 1999 한국수자원학회 학술발표 논문집.
10. 김상민, 박승우, 강문성, 1999. 농업유역의 수문/수질 특성 조사분석, 1999 한국농촌계획학회 추계학술발표.
11. 김철겸, 박승우, 임상준, 1999. 논 의 유출특성을 고려한 소유역의 홍수유출 변화 추정, 1999 한국농공학회 학술발표 논문집.
12. 박희성, 박승우, 1999. 위성영상을 이용한 유출곡선번호의 추정, 1999 한국농공학회 학술발표 논문집.

13. 박흥현, 김승태, 이준호, 1999. 벼멸구(*Nilaparvata lugens*)에 대한 논거미 주요 우점종들의 포획량 연구, 1999년도 한국응용곤충학회 추계 학술연구발표회.
14. 전종안, 박승우, 강문성, 김상민, 1999. 지리정보시스템을 이용한 수문모형의 전처리시스템 개발, 1999 한국농공학회 학술발표 논문집.
15. 강문성, 박승우, 윤광식, 1998. 채수빈도를 고려한 소하천의 수질오염부하량 특성 연구, 1998 한국농공학회 학술발표 논문집, pp. 552-557.
16. 강민구, 박승우, 박창언, 1998. SCE-UA법을 이용한 수문모형의 매개변수 추정, 1998 한국농공학회 학술발표 논문집, pp. 359-365.
17. 김철겸, 박승우, 박창언, 1998. SCS TR-20 모형을 이용한 미계측 소유역의 홍수유출량 추정, 1998 한국농공학회 학술발표 논문집, pp. 370-375.
18. 박희성, 박승우, 1998. 위성영상을 이용한 토지이용분류에 관한 연구, 1998 한국농공학회 학술발표 논문집, pp. 366-369.
19. 임상준, 박승우, 박창언, 1998. 논외 농업용수 회귀수량 추정에 관한 연구, 1998년도 한국농공학회 학술발표 논문집, pp. 87-91.
20. 조재필, 박승우, 강문성, 1998. 복합 토지이용 특성의 농촌유역에 대한 농업비점원 오염모형의 적용, 1998 한국농공학회 학술발표 논문집, pp. 353-358.
21. 조창섭, 임언택, 이준호, 1998. 벼멸구(*Nilaparvata lugens* stål)에 대한 황산적거미(*Pirata subpiraticus*)의 포식행동특성, 한국응용곤충학회 · 한국곤충학회 곤충학 특별강연 및 학술발표학회 발표논문집.
22. 조창섭, 이준호, 1998. 벼멸구에 대한 황산적 거미의 탐색행동, 1998년도 한국응용곤충학회 추계 학술발표대회.
23. 강민구, 박승우, 임상준, 1997. SSARR 모형을 이용한 농업용 소유역의 일유출량 추정, 1997 한국농공학회 학술발표 논문집, pp. 221-226.
24. 김상민, 박승우, 강문성, 1997. 농업유역의 수질오염부하 조사분석, 1997 한국농공학회 학술발표 논문집, 247-252.
25. 김철겸, 박승우, 임상준, 1997. TR-20 모형을 이용한 농업유역의 홍수유출량 추정, 1997 한국농공학회 학술발표 논문집, pp. 210-215.
26. 진영민, 박승우, 윤광식, 1997. CREAMS-PADDY 모형의 개발 및 적용, 1997년도 한국농공학회 학술발표회 발표논문집.
27. Kwang-Ho Kim and Joon-Ho Lee, 1997. Arthropod community in small rice

field associated with different cultural practices in Suwon, 1997년도 한국응용
곤충학회 춘계 학술연구발표회.

28. Lim, Un Taek & Joon-Ho Lee, 1997. Indirect Elisa for the evaluation of
Pirata supiraticus (Aranea : Lycosidae)'s Predation on *Nilaparvata lugens*
(Homoptera : Delphacidae), 1997년도 곤충학 특별 강연 및 학술발표회.
29. 강문성, 박승우, 이혜원, 윤광식, 1996. 농업유역의 수문·수질·생태환경 모니터
링 기법 연구, 한국농촌계획학회 학술논문 발표집, pp. 9-10.
30. 박승우, 이혜원, 임상준, 1996. 농업유역의 수문·수질·생태환경 모니터링/모델
링 연구, 한국농촌계획학회 학술논문 발표집, pp. 17-20.
31. 조재필, 박승우, 이혜원, 1996. 발안유역의 농업생태환경 모니터링, 한국농공학회
학술발표회 논문집, pp. 234-239.
32. 진영민, 박승우, 윤광식, 1997. CREAMS-PADDY 모형의 개발 및 적용, 1997 한
국농공학회 학술발표 논문집, pp. 61-66.
33. 진영민, 박승우, 강문성, 1996. 추계학적 기상 모의발생을 위한 매개변수 추정,
한국농공학회 학술발표회 논문집, pp. 67-72.
34. 조재필, 박승우, 이혜원, 1996. 발안유역의 농업생태 모니터링, 1996년도 한국농
공학회 국제심포지움 및 학술발표회 발표논문집, pp. 223-227.

※ 학술논문발표회에서 발표된 논문은 보완후 학술지 논문에 게재할 예정임.