

333.91  
L293A  
(19)

최 종  
연구보고서

GOVP1200210674

## 산원수자원의 종합적 관리시스템의 개발

Development of Integrated Management System of  
Forest Water Resource

연구 기관

서울대학교  
임업연구원  
영남대학교  
충북대학교

농 립 부



# 제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “산원수자원의 종합적 관리시스템의 개발” 과제의  
최종보고서로 제출합니다.

2001년 10월 일

주관연구기관명 : 서울대학교

총괄연구책임자 : 우 보 명

연 구 원 : 최 형 태

연 구 원 : 박 주 원

연 구 원 : 이 상 호

협동연구기관명 : 임업연구원

협동연구책임자 : 정 용 호

연 구 원 : 박 재 현

협동연구기관명 : 영남대학교

협동연구책임자 : 박 정 일

연 구 원 : 박 재 철

연 구 원 : 석 수 일

협동연구기관명 : 충북대학교

협동연구책임자 : 김 재 수

# 요 약 문

## I. 제 목

산원수자원의 종합적 관리시스템의 개발

## II. 연구개발의 목적 및 중요성

환경의 오염이 점차 증가하는 현대사회에서 산원수자원의 중요성이 더욱 커지고 있으며, 산지유역의 물 순환 각 과정에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있다. 이러한 산원수자원의 수량과 수질을 유지·보존하기 위해서는 지속적인 모니터링 및 자료 수집으로 산지유역의 수문·수질환경속성 및 산원수 수질형성과정을 구명하여 산림의 수자원함양 및 수질정화기능을 계량화하여야 하며, 최근 급증하는 산지유역에 대한 개발이 산원수 수질에 미치는 환경영향에 대한 체계적인 평가 및 평가기법의 고도화를 이룩되어야 한다. 또한, 장단기 환경변화에 대처하기 위한 산지유역의 수문 및 수질환경 예측모형과 건전한 산원수환경을 유지·개선하기 위한 최적 산림관리기법의 개발이 필수적이다.

따라서, 이 연구는 국민활동영역의 확대 및 휴양공간의 창출 등 점증하는 산지유역의 개발욕구에 대처하여 상수원수의 근원인 깨끗하고 안전한 산원수의 수질보전과 건강하고 쾌적한 산림 물환경을 보호·육성하기 위한 산원수자원의 종합적 관리시스템의 개발을 목표로 한다.



### III. 연구개발 내용 및 범위

각 연구과제별 연구개발내용 및 범위는 다음과 같다.

#### 과제 1. 산원수 수질보전 및 수량증대를 위한 최적 산림관리기법의 개발

- 유역환경 및 산림상태에 따른 유역별 산림의 수자원함양기능 및 수질정화기능을 수량화
- 산림의 수자원함양 및 수질정화기능을 증진시키기 위한 최적 산림관리기법의 개발

#### 과제 2. 산림수문환경모니터링을 위한 원격 무인자동관측시스템의 개발

- 산지의 장기적 수문 및 수질변화의 예측을 위한 산림수문환경 모니터링 시스템 구축
- 산지유역의 수문·수질 관측자료의 처리 및 분석 소프트웨어 개발
- 산지유역의 수문·수질의 감시시스템 구축

#### 과제 3. 산지유역의 수질변동 예측을 위한 산원수 수질해석모형 개발

- 산지 물순환과정별 산원수의 수질형성과정의 정량적·정성적 해석
- 산지유역의 장기적 수질변화의 예측을 위한 산원수 수질해석모형 개발

#### 과제 4. 산지개발에 따른 산원수 환경영향 평가기법 및 산원수자원의 종합적 관리시스템의 개발

- 산지개발이 산원수환경에 미치는 영향평가 및 환경변화 예측기법의 개발
- 산원수자원의 종합적 관리시스템 개발

#### IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

##### 과제 1. 산원수 수질보전 및 수량증대를 위한 최적 산림관리기법의 개발

본 연구는 유역환경 및 산림상태에 따른 유역별 산림의 수자원함양기능 및 수질정화기능의 수량화와 증진을 위한 최적 산림관리기법의 개발을 목적으로 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

○ 산림유역의 수질환경기준에 있어서 일반적으로 적용가능한 물리적 인자는 수온, 경도(硬度), 맛 등 10종이었으며, 화학적 인자는 칼슘( $Ca^{2+}$ ), 인(P), 마그네슘( $Mg^{2+}$ ) 등 15종이었다.

○ 강우, 임내우(수관통과우, 수간류), 토양수, 계류수에서 전기전도도는 이온동태 뿐만 아니라 pH 등 현행 하천수질환경기준 및 먹는 물 수질기준의 지표인자를 설명할 수 있는 중요한 평가항목인 것으로 분석되었다.

○ 임내우, 토양수, 계류수에서 강수량과 선행무강우일수, 양이온( $Na^+$ ), 음이온( $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ), 양·음이온총량, pH 등이 수질에 중요한 영향관계가 있는 것으로 분석되었다.

○ 산림의 수원함양기능 증진, 즉 표층토양에서의 조공극률을 증진시키기 위해서는 상층식생 울폐도를 조절할 필요가 있는 것으로 분석되었다.

##### 과제 2. 산림수문환경모니터링을 위한 원격 무인자동관측시스템의 개발

본 연구는 산지유역의 수문·수질상태를 원거리에서 실시간 모니터링을 목적으로 산림 수문·수질환경의 각 측정인자들의 종합적인 측정 및 분석이 가능한 관측시스템을 개발하고자 수행하였다. 개발한 관측시스템의 특징은 다음과 같다.

○ 개발한 관측시스템은 크게 신호처리부, 전동식센서부, 전원제어부, 무선데이터통신부로 구성하였다.

○ 관측시스템 구성은 각 기능별로 완전한 독립구조의 모듈형태로 구성되어, 측정 센서의 교체, 추가 등의 변경이 용이하도록 하였다.

○ 웨어부착형 전동식 센서유닛을 개발하여 계류수의 결빙 및 급류에 의한 센서의 파손을 방지하도록 하였으며, 동시에 항상 일정한 측정수심을 유지하도록 하였다.

○ 관측시스템을 현장에 설치하여 시험 운영해 본 결과 장기적이고 안정적인 수문 및 수질인자의 측정이 가능할 것으로 평가되었으며, 지속적인 자료수집과 모니터링이 가능할 것으로 평가되었다.

### 과제 3. 산지유역의 수질변동 예측을 위한 산원수 수질해석모형 개발

본 연구는 산지 물순환과정별 산원수의 수질형성과정을 정량적·정성적으로 해석하고, 산지유역의 장기적 수질변화의 예측을 위한 산원수 수질해석모형을 개발하고자 수행하였다. 개발된 모형의 특징은 다음과 같다.

○ 산원수 수질해석을 위하여 TOPMODEL의 기본 개념을 바탕으로 강우-유출 현상을 모델링하였다.

○ 물질 이동·확산은 일차원 이류-확산 방정식을 이용하여 모델링하였다.

○ 질소의 공급과 더불어 자연 생태계 내에서 변화하는 질소의 움직임을 파악하고자 하였다. 분진과 강수에 의하여 자연적으로 공급되는 것과 식물체의 흡수, 낙엽, 낙지에 의하여 공급되는 양, 탈질작용, 질산태 질소의 산화, 질소의 고정, 유기질 질소의 분해, 공중질소 고정, 암모니아의 휘발, 암모니아의 흡착 등을 고려하였다.

○ 질소 및 암모니아 등의 토양내 흡착과 용해는 Freundlich 식에 의하여 구분하였다.

○ 수질해석모형을 모의운영한 결과, 산림유역내 물질순환 과정의 재현

성이 양호하였으며, 산원수 수질형성과정의 정량적, 정성적 해석이 가능하였다.

#### 과제 4. 산지개발에 따른 산원수 환경영향 평가기법 및 산원수자원의 종합적 관리시스템의 개발

본 연구는 산지개발이 산원수환경에 미치는 영향평가 및 환경변화 예측 기법과 산원수자원의 종합적 관리시스템을 개발하고자 수행하였다. 개발한 시스템의 특징을 요약하면 다음과 같다.

○ 산지개발에 따른 산원수 환경영향 평가기법은 크게 산림유역 강우-유출모형과 임도 배수량예측 모형 및 토사유출모형으로 구성하였다.

○ 산림유역 강우-유출모형은 분포형 수문모형으로서 유역의 지형에 따른 포화층에서의 흐름과 유출기여면적을 고려하여 유출현상을 재현하는 TOPMODEL의 개념을 바탕으로 산림유역의 유출특성에 적합하도록 유출재현과정을 수정하였다.

○ 토사유출모형은 Green-Ampt 모형을 기반으로 산지개발에 따른 지역적 침투능변화로 인한 초과강우량 발생을 재현할 수 있도록 개발한 지표유출모형과, 지표유출수량에 따른 토사유출발생을 모의할 수 있는 토사유출모형으로 구성하였다.

○ 산원수자원의 종합적 관리시스템은 지리정보의 처리·분석부분과 수문환경영향 평가 및 예측부분으로 구성되어 있으며, 임도 개설 등의 산지개발사업에 따른 유량 및 토사유출량 변화 등의 물환경영향 평가와 이에 대한 공간적 자료 제공으로 산원수자원의 효과적인 관리를 위한 의사결정지원에 유용하게 사용할 수 있는 것으로 분석되었다.

## **SUMMARY**

### **I. Subject**

Development of Integrated Management System of Forest Water Resource

### **II. Objectives and Importance of Research**

Importance of highly qualified forest-based water is, recently, very much emphasized. It is essential to elucidate hydrological environment for forest-based water and its quality in the forest watersheds. For sustainable conservation of the forest-based water and its quality, continuous monitoring for the water yield and its quality, investigation into attributes of hydrological environment and water quality, and quantitative research for the effectiveness of forests on the water yield and purification from the forest watersheds, are needed. The environmental assessment technologies and the best management practices of the forest-based water are also needed. For the successful conservation of forest-based water and its quality, above mentioned elements should be integrated together.

This study, therefore, was conducted to develop integrated management system for conservation and yield of pure forest-based water resources.

### **III. Contents and Scope of Research**

This study was composed of four parts. Main subjects of research of each part are as follows:

Part I : Development of Best Management Practices for Forest Water Retention and Conservation of Water Quality

Part II : Development of On-Line Monitoring System of Hydrological Environment

Part III : Development of Water Quality Model for Forest Watershed

Part IV : Development of Environmental Assessment and Integrated Management System of Forest-based Water Resource

### **IV. Research Results and Suggestion for Application**

#### **Part I : Development of Best Management Practices for Forest Water Retention and Conservation of Water Quality**

- The physical factors of water quality standard for application to forest watersheds are water temperature, dissolved oxygen, suspended solid and turbidity of water, etc. And, chemical factors of that are Calcium, Phosphorus and Magnesium, etc. Total numbers of both physical and chemical factors are 25.
- Electrical conductivity is the most important factor to show ion dynamics in throughfall, stemflow, soil water and streamwater in forest watersheds.
- Control of the crown coverage of forest trees is valuable

management practice to enhance the effect of forest on the water retention and yield.

## **Part II: Development of On-Line Monitoring System of Hydrologic Environment**

- Monitoring systems are consisted of a signal process system, motor drive sensor unit, radio modem unit and power supply.
- The hardware was made of several independent modules with independent CPU. As each module is designed by slot system, it can be easily mounted and took off and also easily to be repaired, added, removed and changed their function and expansion.
- The motor drive sensor unit protects sensor from swift current and freezing and can always measure water level at the same time.
- This monitoring system was proved to be applicable to measure various data for water quality in the forest watershed.

## **Part III: Development of Water Quality Model for the Forest Watershed**

- The rainfall-runoff process in the forest watershed was modelled by using the basic concept of TOPMODEL.
- For the application of water quality model, spatial distribution indices of solute, such as TI (topographical index), TI1, TI2, was estimated.

- The concentration of solute (nitrate) was positively correlated with topographical index, and the 5 day API (antecedent precipitation index) was also positive correlated with the slope of regression line for the concentration of nitrate and topographical index.

#### **Part IV: Development of Environmental Assessment Model and Integrated Management System of Forest Water Resource**

- The environmental assessment model of forest-based water resources was composed of two components. One was to simulate rainfall-runoff processes in forest watersheds, and the other was to simulate the sediment-runoff generation in hillslopes.
- Rainfall-runoff processes were modelled by modifying concepts of the TOPMODEL, and sediment-runoff generation processes were modelled by using the Green-Ampt equation.
- The integrated management system of the forest-based water is combined with the Geographic Information System, the rainfall-runoff model, the sediment-runoff generation model and the expert system.
- The integrated management system of the forest-based water was effective on the evaluation of environmental impacts of construction in forest watersheds and on the planning of alternative to reduce environmental impacts.



## CONTENTS

Presentation Sentence .....	1
SUMMARY(in Korean) .....	2
SUMMARY .....	7
Contents .....	11
Contents(in Korean) .....	13
Chapter 1. Introduction .....	15
Sec. 1. Necessities of Research Development .....	15
Sec. 2. Objectives and Contents of Research Development .....	21
Chapter 2. Development of Best Management Practices for Forest Water Retention and Conservation of Water Quality .....	24
Sec. 1. Introduction .....	24
Sec. 2. Status of Research .....	27
Sec. 3. Method of Research .....	50
Sec. 4. Results and Discussions .....	56
Sec. 5. Conclusion and Proposal .....	120
Chapter 3. Development of On-Line Monitoring System of Hydrologic Environment .....	124
Sec. 1. Introduction .....	124
Sec. 2. Outline of Observation System .....	133
Sec. 3. Development of Hardware for Observation System .....	141

Sec. 4. Development of Software for Observation System .....	181
Sec. 5. Results of Experimental Observation .....	188
Sec. 6. Application of Development System .....	197
Sec. 7. Conclusion and Proposal .....	200
 Chapter 4. Development of Water Quality Model for Forest Watershed .....	 203
Sec. 1. Introduction .....	203
Sec. 2. Status of Research .....	204
Sec. 3. Method of Research .....	219
Sec. 4. Results and Discussions .....	240
Sec. 5. Conclusion and Proposal .....	292
 Chapter 5. Development of Environmental Assessment and Integrated Management System of Forest Water Resource .....	 294
Sec. 1. Introduction .....	294
Sec. 2. Status of Research .....	296
Sec. 3. Method of Research .....	306
Sec. 4. Results and Discussion .....	370
Sec. 5. Conclusion and Proposal .....	460
 Reference .....	 462

## 목 차

제 출 문 .....	1
요 약 문 .....	2
SUMMARY .....	7
Contents .....	11
목 차 .....	13
제 1 장 서 론 .....	15
제 1 절 연구개발의 필요성 .....	15
제 2 절 연구개발의 목표 및 내용 .....	21
제 2 장 산원수 수질보전 및 수량증대를 위한 최적 산림관리기 법의 개발 .....	24
제 1 절 서 설 .....	24
제 2 절 연구동향 .....	27
제 3 절 연구방법 .....	50
제 4 절 연구결과 및 고찰 .....	56
제 5 절 종합결론 및 제언 .....	120
제 3 장 산림수문 환경 모니터링을 위한 원거리 무인 자동관측 시스템 개발 .....	124
제 1 절 서 설 .....	124
제 2 절 관측시스템 개요 .....	133

제 3 절 관측시스템 H/W개발 .....	141
제 4 절 관측시스템 S/W 개발 .....	181
제 5 절 시험 관측 결과 .....	188
제 6 절 개발시스템 응용 .....	197
제 7 절 종합결론 및 제언 .....	200
제 4 장 산지유역의 수질변동 예측을 위한 산원수 수질 해석 모형의 개발 .....	203
제 1 절 서 설 .....	203
제 2 절 연구동향 .....	204
제 3 절 연구방법 .....	219
제 4 절 연구결과 및 고찰 .....	240
제 5 절 종합결론 및 제언 .....	292
제 5 장 산지개발에 따른 산원수 환경영향평가기법에 및 산원 수자원의 종합적 관리시스템 개발 .....	294
제 1 절 서 설 .....	294
제 2 절 연구동향 .....	296
제 3 절 연구방법 .....	306
제 4 절 결과 및 고찰 .....	370
제 5 절 종합결론 및 제언 .....	460
참고문헌 .....	462

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구개발의 필요성

최근 급증하고 있는 상류 산지유역에 대한 인위적인 개발과 이에 따른 산림의 파괴는 과거로부터 안전하고 깨끗한 물로서 인식되어 오던 산원수(山源水)에 대한 심각한 수질오염문제를 야기시킴으로 인해, 하류지역의 인간생활 및 자연생태계에 미치는 악영향이 매우 클 것으로 예상되고 있다. 그러나 현재까지 1차적 상수원 지역인 산지유역에 대한 개발은 개발로 인한 자연훼손 및 수질오염에 대해 고려하지 않고 이용목적 및 개발편의에만 국한하여 진행되어 왔기 때문에, 향후 심각한 산원수 오염의 원인이 될 수 있으며, 이러한 상류 1차유역에서부터의 수질오염은 하류로 갈수록 그 파급효과가 매우 심각할 것으로 우려된다.

현재까지 주요 상수원 지역인 산지유역에 있어서는 산림지가 청정수역이라는 기본적인 인식 하에 별다른 수질관리대책의 수립없이 인간의 간섭 및 개발행위를 최소화하는 산림지의 현상유지 및 시설규제 등의 소극적인 방법이 주도되어 왔다. 그러나, 국민활동영역의 확대 및 휴양공간의 창출 등 점증하는 국민적 요구로 인하여 산지유역은 더 이상 방치되고 폐쇄적인 공간이 아닌 국민활동의 한 장으로서 자리매김할 수밖에 없다. 이에 따라 증대되는 산원수 오염의 위협성을 저감하기 위한 새로운 방법의 도입과 적극적인 대책의 수립이 시급히 요구된다.

## 1. 기술적 측면

특정 유역이나 하천의 수질 관리를 위해서는 해당 유역 또는 하천의 수질을 달성하기 위하여 일련의 체계적인 작업이 필요하며, 적절한 수질항목과 이에 대한 수질목표가 마련되어야 할 것이다.

수질목표는 현재의 수질현황, 오염원 조사 그리고 장래 수질농도의 예측 결과에 따라 적절히 설정되어야 할 것이며, 이에 준하여 오염물질 배출 등에 대한 기준이 마련되어야 한다. 그러나 우리 나라의 경우 수질관리체계는 위와 같은 일련의 과정이 이루어지지 않은 채 다소 무계획적이고 지역적인 특성이 고려되지 않은 획일적인 정책실행으로 말미암아 많은 부분의 보완과 제도의 개선이 필요할 것으로 보인다. 특히, 최근 각종 위락시설의 증가와 인구유입 등으로 인한 산림지의 용도변경 등, 각종 오염원이 양산되고 수질 오염현상이 심화되고 있는 산지유역은 상수원수의 근원지라는 지리적 특성과 그 내부에 많은 생물을 담보하는 자연생태계라는 독특한 지위에도 불구하고 현재까지 이를 반영한 어떠한 수질 및 수자원관리체계도 마련되지 못한 채 방치되고 있어 이에 대한 대책이 시급히 요구된다.

급증하는 산지유역의 개발욕구에 대처하여 수질오염의 위험성에 직면하고 있는 산원수의 수질을 보전하고 산지유역의 쾌적한 물환경을 유지·관리하기 위해서는 산지유역의 장기적인 수문환경변화에 대한 예측기술의 개발 및 종합적 수자원관리시스템의 구축이 필수적인 과제이며, 이를 위해서는 다음과 같은 연구가 반드시 수행되어야 할 것이다.

산지유역에서의 수질 및 환경관리에 있어서 산지개발과 산원수자원 관리의 조화문제는 산지유역이 하나의 거대한 자연생태계임을 간과하여서는 이루어질 수 없는 명제이다. 따라서, 산림생태계가 가지는 수질보전효과 및 수자원함양효과에 대한 면밀한 파악과 명확한 이해가 선행되어야 할 것이

며, 이를 위해서는 산림의 수자원함양 및 수질정화기능 등과 같은 산원수의 수질형성과정에 대한 체계적이고 종합적인 연구가 필수적이다. 또한, 산지 개발로 인한 산원수의 물환경변화에 대한 정량적, 정성적인 분석 및 평가를 통하여 산지개발로 인한 산원수의 수질오염지표를 확정하고 산지개발이 해당 산지 및 그 하류에 파급시키는 수환경영향을 평가할 수 있는 기법에 대한 연구가 요구된다. 이러한 연구는 해당 산지구역의 개발시 적절한 수질환경기준을 제시해 줄 수 있을 것이며, 이러한 기준의 확립은 수자원관리시스템 구축의 필수적인 요소가 된다.

수원의 근원지인 산지구역은 홍수조절 및 수자원함양에 대한 산림의 효과가 종합적으로 나타나는 곳으로서 독특한 유출특성을 가진 지역으로 인식되고 있다. 이러한 산림의 환경적 정화기능을 계량화하기 위해서는 산원수 수질이 형성되는 과정에 대해 물순환 소과정별로의 지속적인 모니터링 및 각종 수문·수질자료의 축적이 필수적이나, 해당장소가 원거리이고 접근이 용이하지 않은 관계로 많은 인력과 비용이 소요되는 등 이들 자료의 축적이 곤란한 상황이었다. 따라서 산지구역의 수문·수질자료의 부족문제를 해결하고 지속적인 산지 수문환경모니터링을 가능하게 할 수 있는 원격 자동관측 시스템의 구축이 시급히 요구되고 있다.

산지구역의 개발시 산원수자원 보전을 위한 산지구역의 종합적 물환경관리계획을 수립하기 위해서는 인위적인 개발 및 관리형태의 변화와 같은 유역환경변화에 따른 미래의 수문·수질현상의 변화를 예측하여야 한다. 정확한 예측결과는 종합적인 환경관리를 위해서 필수적인 것으로서, 이와 같은 예측을 위해서는 산지구역에서의 물순환 및 수질정화 메카니즘에 대한 명확한 구명과 아울러 수질현상을 계량화할 수 있는 수질해석모형의 개발이 필요하다. 산지구역에서의 수질정화기구는 산림생태계라는 거대한 시스템 내에서 이루어지는 것이기 때문에, 수질모형은 산림생태계에서의 수질정화현

상과 여기에 결정적 영향을 미치는 주요 인자 등을 물리적 수식으로 조직화할 수 있어야 한다. 또한, 개발될 수질모형은 산림이 물질 및 영양의 순환, 산림의 천이 등으로 그 자체 내에서도 항상 동적이고 변화해 나가기 때문에 산림이라는 생태적인 조건과 배경에 합당하여야 하며, 이와 같은 기반에서만 산지유역에서의 개발에 따른 수질 및 수문환경변화를 정확히 예측할 수 있을 것이다.

장래 유역환경변화에 따른 수문환경변화의 정확한 예측성을 바탕으로 산지유역에 대한 개발 및 관리계획의 수립시 친환경적이고 수질보전적인 계획입안을 유도·지원할 수 있는 시스템의 구축이 요구되며, 더불어 수질오염의 산림생태적 저감방안과 산원수의 수질보전 및 수량증대에 효과적인 산림유역의 최적관리기법에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

## 2. 경제·산업적 측면

자연계의 물은 그 스스로가 유입된 오염물질을 물리화학적 및 생물학적 작용에 의해 정화할 수 있는 자정능력을 갖고 있다. 특히, 최상류 상수원 지역인 산지유역은 그 내부에 다양한 식물, 동물, 미생물 및 산림토양과 산지계류를 포괄하는 하나의 종합적인 자연생태계를 형성함으로써 물의 자정능력과 더불어 더욱 우수한 자연적 수질정화기능을 가지고 있는 것으로 평가되고 있다. 그러나, 최근 급증하는 산지유역에 대한 인위적인 개발은 자연생태계의 일부, 혹은 전체를 교란·파괴함으로써 산림의 수질정화기능을 약화시키고 있으며, 감소된 환경용량에 비해 증가된 유역내의 각종 오염원에서 발생하는 과도한 오염부하량이 주요 상수원의 근원지인 산지유역의 수질상황을 악화시키고 있는 실정이다. 따라서 더 이상 상류 산원수의 수질도 안심할 수 없는 상황에 다다르고 있다.



오염된 물을 정화하는 데에는 막대한 비용이 소모되며, 이러한 비용은 결국 사회적, 경제적 활동을 위축시키는 부작용을 낳을 우려가 있다. 또한, 한번 오염된 물은 정수처리를 잘 한다 하여도 질이 낮을 수밖에 없다. 따라서 안전하고 깨끗한 물의 공급을 위해서는 기본적으로 상수원수의 수질을 향상시키기 위한 노력이 경주되어야 할 것이다. 그러나, 상수원수의 근원인 산원수에 대한 오염의 위험성이 증대되어 가고 있는 실정에 비추어 볼 때 향후 상수원수의 발원지에서부터의 심각한 수질오염이 예상되며, 이는 결국 수질정화 및 개선을 위한 비용의 기하급수적인 증가와 이에 따른 산업계 및 사회전반에서의 경제활동 및 산업활동의 심각한 위축현상을 초래할 것으로 우려된다.

따라서, 최근 급증하는 산지유역의 개발에 따라 예상되는 산원수의 심각한 오염문제를 예방하기 위한 산지유역의 친환경적 수질관리체계의 확립이 필수적으로 요구된다. 이를 위해서는 산림생태계의 수자원함양 및 수질정화 기능에 대한 종합적인 연구와 산원수 수질형성과정의 과학적 구명 및 유역 수문환경모니터링시스템과 유역의 장기적 수문환경변화 예측기술의 개발에 대하여 집중적인 연구가 선행되어야 할 것이며, 이를 바탕으로 산지유역의 개발시 수질보전적 개발 및 친환경적 산원수자원 관리계획의 수립을 위한 종합적 시스템화가 필수적으로 요구된다.

### 3. 사회·문화적 측면

현대의 고도산업화의 진전에 따른 환경악화, 도시화 경향에 따른 인구 집중, 경제발전에 따른 국민여가의 증대 등이 원인이 되어 휴양활동, 환경보전 등의 사회간접적 기능에 대한 수요가 급증하고 있다. 이러한 영향이 원인이 되어 산림에 있어서도 간접적 효용이라 할 수 있는 산림의 공익적

기능에 대한 관심이 고조되고 있으며, 전국에 산재되어 있는 접근이 용이한 산림자원은 국민의 복지증진과 사회의 건전한 가치확립을 위한 휴양서비스의 제공처로 중요성이 인식되고 있으며, 산지로부터의 맑은 물의 지속적인 공급에 대한 사회적인 욕구가 점차 증대하고 있다.

급속히 증대되는 국민생활영역의 확대 및 여가공간의 창출요구는 필연적으로 산지유역의 개발확대를 초래하고 있다. 그러나 이러한 산지유역의 개발은 대부분 토목적 시설의 확충이 우선됨으로 인하여 산림의 훼손 및 파괴가 수반되는 등 산림의 공익적 기능의 효용성 증대라는 명제하에 오히려 그 기능의 저해행위가 벌어지고 있는 실정이다.

이렇듯 상수원지역의 인구유입 및 산업활동, 위락시설 증가로 산지와 농경지가 줄어들고 생활하수와 산업폐수가 늘어나고 있으나, 이를 정화시킬 하수처리시설은 부족하여 생활하수는 60%가 축산폐수는 98%가 하천으로 그대로 유입되어 상수원수의 수질악화현상이 심화되고 있다.

오염된 자원은 더 이상의 효용성을 가지지 못할 뿐만 아니라 오히려 인간에게 해를 끼칠 수 있는 위험성을 가지게 된다. 산지유역의 경우에도 개발에 따른 환경피해로 인해 오염된 수자원은 산림의 공익적 기능을 저하시킴과 동시에 하류 상수원수의 수질을 악화시켜 인간생활에 심각한 부작용까지 주게 되므로 이를 예방하고 저감하기 위한 대책이 요구된다.

이러한 대책은 산지유역의 개발시 산원수의 수질오염을 방지할 수 있는 개발계획의 수립을 가능하게 할 수 있도록 수립되어야 할 것이며, 최적관리 기법 및 저감대책의 적절한 선정을 통하여 수질오염의 위험성을 최소화하여 쾌적한 산지유역의 물환경을 유지·보전할 수 있어야 할 것이다.

## 제 2절 연구개발의 목표 및 내용

이 연구는 국민활동영역의 확대 및 휴양공간의 창출 등 점증하는 산지구역의 개발욕구에 대처하여 상수원수의 근원인 깨끗하고 안전한 산원수의 수질보전과 건강하고 쾌적한 산림 물환경을 보호·육성하기 위한 산원수자원(山源水資源)의 종합적 관리시스템(Integrated Management System of Forest Water Resource) 개발을 최종적인 목표로 한다.

이를 위하여 산지구역의 수문·수질환경속성 및 산원수 수질형성과정을 규명하여 산림의 수자원함양 및 수질정화기능을 계량화하고 산지구역에 대한 개발이 산원수 수질에 미치는 환경영향에 대한 체계적인 평가 및 평가기법의 고도화를 이룩하며, 이를 바탕으로 산지구역의 수문 및 수질환경예측모형과 최적 산림관리기법을 개발한다. 또한 산지구역의 효과적 수문환경모니터링시스템의 완성을 위한 원격 무인자동관측시스템과 산지개발시 산원수의 수질보전 및 개선을 위한 종합적 산원수자원 관리시스템을 개발한다.

과제 1. 산원수 수질보전 및 수량증대를 위한 최적 산림관리기법의 개발

과제 2. 산림수문환경모니터링을 위한 원격 무인자동관측시스템의 개발

과제 3. 산지구역의 수질변동 예측을 위한 산원수 수질해석모형 개발

과제 4. 산지개발에 따른 산원수 환경영향 평가기법 및 산원수자원의 종합적 관리시스템 개발

각 연구과제별 연구개발목표와 내용은 다음과 같다.

## 과제 1. 산원수 수질보전 및 수량증대를 위한 최적 산림관리기법의 개발

### ● 연구개발목표

- 유역환경 및 산림상태에 따른 유역별 산림의 수자원함양기능 및 수질정화기능을 수량화
- 산림의 수자원함양 및 수질정화기능을 증진시키기 위한 최적 산림관리기법의 개발

### ● 연구내용

- 산지유역의 유역환경 및 산림상태와 수문·수질환경에 대한 실태조사를 통한 산림의 수자원함양기능 및 수질정화기능의 수량화
- 산원수의 수질보전 및 수량증대를 위한 최적 산림관리기법의 적용가능성 및 응용성을 분석
- 산림의 수자원함양 및 수질정화기능을 극대화할 수 있는 최적 산림관리기법의 적정시업기준 확립

## 과제 2. 산림수문환경모니터링을 위한 원격 무인자동관측시스템의 개발

### ● 연구개발목표

- 산지의 장기적 수문 및 수질변화의 예측을 위한 산림수문환경 모니터링 시스템 구축
- 산지유역의 수문·수질 관측자료의 처리 및 분석 소프트웨어 개발
- 산지유역의 수문·수질의 감시시스템 구축

### ● 연구내용

- 기존의 산림수문·수질 관측시설의 실태조사 및 개선방안
- 산지유역의 수문·수질 무인자동관측시스템 및 관측자료의 무선전송 시스템 개발

- 산지유역의 수문·수질자료의 자동관측 및 원거리 전송을 위한 하드웨어 및 소프트웨어 개발
- 관측자료의 처리 및 분석 소프트웨어 개발
- 관측 및 전송시스템의 타지역 확대 활용기술 개발

### 과제 3. 산지유역의 수질변동 예측을 위한 산원수 수질해석모형 개발

- 연구개발목표
  - 산지 물순환과정별 산원수의 수질형성과정의 정량적·정성적 해석
  - 산지유역의 장기적 수질변화의 예측을 위한 산원수 수질해석모형 개발
- 연구내용
  - 산지유역 물순환과정의 수리·수문학적 특성분석
  - 산지유역의 산원수 수질변동성향 및 물순환과정별 수질형성과정 분석
  - 산지유역의 강우-유출현상의 장기 모의발생모형 개발
  - 산원수의 장기적 수질변화 해석 및 모의예측모형 개발

### 과제 4. 산지개발에 따른 산원수 환경영향 평가기법 및 산원수자원의 종합적 관리시스템의 개발

- 연구개발목표
  - 산지개발이 산원수환경에 미치는 영향평가 및 환경변화 예측기법의 개발 및 산원수자원의 종합적 관리시스템 개발
- 연구내용
  - 산지개발이 산원수환경에 미치는 영향요인 평가
  - 산지개발에 따른 산지유역 물환경변화 예측모델 개발
  - 산원수자원관리에 있어서 지리정보시스템의 활용
  - 효과적인 산원수자원 관리를 위한 종합적 관리시스템 개발

## 제 2 장 산원수 수질보전 및 수량증대를 위한 최적 산림관리기법의 개발

### 제 1 절 서 설

#### 1. 연구의 배경 및 목적

최근 들어 그 심각성을 더하여 가고 있는 상수원수의 수질오염문제는 상수원수의 근원지인 상류 산림유역의 급증하는 개발욕구에 비추어 볼 때, 이에 대한 대책을 마련하지 못한다면 향후 더욱 큰 문제를 야기할 것으로 우려되고 있다.

따라서 상수원수의 친환경적 수질보전을 위한 산지유역의 체계적이고 종합적인 수문환경관리가 시급히 시행되어야 할 것이나, 현재의 국내 연구상황에 비추어 볼 때, 해결해야 할 몇 가지 문제점이 있다.

국내에서 산지유역의 수문환경속성에 관한 연구는 일본이나 미국 등 선진 임업국에 비하여 매우 뒤떨어지고 있으며, 특히 이 분야에 대한 연구는 일부 연구자들에 의해 산림내 계류수질이 하천수질기준 상수원수 1급수로 평가되거나 사람이 음용수로 이용하기에 특별한 문제가 없다고 하여 개발가능하다는 등의 연구결과가 보고되고 있을 뿐 이에 대한 광범위하고 종합적인 평가는 미진한 상태에 있다.

최적관리기법(Best Management Practice, BMP)은 수질오염을 방지하거나 감소시키기 위한 방법, 수단, 또는 대안을 총칭하는 것으로서, 오염물질이 유입되기 전부터 유입된 후까지의 전체 과정동안 오염물질이 물에 유입되는

것을 방지하거나 저감시키도록 적용될 수 있다(Wilkilson과 Anderson, 1985).

미국의 경우는 1972년 연방 수질오염방지법이 발효된 이래로 농업유역 및 산림유역의 비점오염원을 대상으로 광범위하고 체계적인 최적관리기법이 수립 시행되어 오고 있다. 1974년 이후 시행중인 Forestry Incentive Program과 1985년 시작된 Conservation Reserve Program 등을 통하여 미국 전역의 침식우려지역 중 약 2억 3천만 acres의 면적에 나무가 식재되었으며, 현재는 대부분의 주에서 산림유역의 비점오염원 처리를 위한 계획이 수립·시행되고 있다(Binkley와 Brown, 1993).

최적관리기법은 산림개발 및 벌채, 도로건설 등 산림유역에서의 비점오염원의 확대에 따른 수질오염현상의 저감방안으로서 효과를 인정받고 있으며, 경제적으로도 능률적인 것으로 밝혀져 있다. 또한, 산림훼손지에 식생완충대(vegetation buffer strip)를 형성하여 양분용탈 및 유사발생을 저지하고 더불어 훼손지를 차폐함으로써 경관적인 측면에서도 우수한 효과를 발휘하고 있다(Harvey 등, 1988; Hook 등 1991; Texas Forest Service, 1992).

반면 국내에서는 1990년 이후부터 일부 산림개발지를 대상으로 제한적인 적용이 있어 왔으나 현재까지 최적관리기법의 효과 및 적용성에 대한 체계적인 연구는 미비한 실정이다. 한편, 농촌유역 및 도시유역내 하천변에 대한 식생대를 형성하는 자연형 하천계획기법이 연구된 바 있으나, 연구의 역사가 일천하고 자료도 부족하여 아직까지 실용화된 바는 없다.

## 2. 연구의 내용 및 범위

본 연구과제의 연구개발목표와 내용은 다음과 같다.

### ● 연구개발목표

- 유역환경 및 산림상태에 따른 유역별 산림의 수자원함양기능 및 수질정화기능을 수량화
- 산림의 수자원함양 및 수질정화기능을 증진시키기 위한 최적 산림관리기법의 개발

### ● 연구내용

- 산지유역의 유역환경 및 산림상태와 수문·수질환경에 대한 실태조사를 통한 산림의 수자원함양기능 및 수질정화기능의 수량화
- 산원수의 수질보전 및 수량증대를 위한 최적 산림관리기법의 적용가능성 및 응용성을 분석
- 산림의 수자원함양 및 수질정화기능을 극대화할 수 있는 최적 산림관리기법의 적정시업기준 확립



## 제 2 절 연구동향

### 1. 미국의 산원수 관리를 위한 산림관리방법

미국의 경우 1800년대 후반에 들어서야 산림 및 자연자원 보존론자들과 목재생산과 농업을 위해 산림을 벌채하는 특정 집단간에 계류수 보호를 위한 산림의 가치가 인정되게 되었으나 실질적인 계류수질에 대한 연구는 전무하였다. 미국에서 수질에 미치는 산림 관리의 효과에 대한 관심은 다른 국가들보다 빨라 1950년대부터 계류수질에 영향을 미치는 인자들에 대한 연구가 시작되었다. 이의 예로 Hoover(1952)는 혼탁도, 온도, 부유물질량 등 물리적 성분과 물에 녹는 화학적 성분 그리고 야생동물 등의 분변에서 발생할 수 있는 박테리아 등 미생물적 요인 등이 계류수질 오염원이라고 하였다. 또한 Likens 등(1969)은 개별지역 산림소유역에서 유출되는 계류수에서는  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $NO_3^-$ -N 등의 이온이 급격히 증가하여 수질을 변화시키고, 뉴햄프셔의 실험유역에서 벌채 전후에  $NO_3^-$ -N의 함량은 벌채작업 전에는 0.5ppm에서 벌채 후 80ppm까지 증가하여 미국 연방정부의 먹는 물 허용기준 한계의 8배에 달하였다고 보고한 바 있다. 이후 산림소유역에서의 수질 연구는 1960년대 이래로 미국 북동부에 위치한 Coweeta 수문연구소에서 집중적으로 수행되었고, 수질정화강령을 제정한 1972년이래 산림을 포함하여 여러 지역으로부터 유출되어 강과 계류에 도달한 오염물질에 대해 큰 관심이 모아지게 되었다. 한편, 계류수질 변화를 연구하기 위하여 일정한 시험유역을 정하고, 그곳에서 홍수와 하류의 수원공급, 산림벌채가 유출량 및 유출 시간에 미치는 효과, 계류수질에 영향을 미치는 요인과 계류수질의 오염을 방지하거나 저감할 수 있는 방법들에 대한 연구가 수행되었다.

1970년대 중반에 이르러 비로소 수질과 양료순환과의 관계가 연구자들로 하여금 중요한 관심사로 받아들여지게 되었으며, 1970년대 후반에는 산림소유역 내에서 강우의 화학적 특성들이 어떻게 계류수에서 빠르게 나타나지 않는가에 대한 의문과 더불어 강수의 유출과정을 추정하는 수질화학의 관점에 있어 괄목할 만한 진전가능성을 보였다. 즉, 산림소유역 내에서 수질에 미치는 화학적 영향에 대한 연구동기는 산성우 논쟁과 시비 그리고 지존작업과 벌채 등에 의한 산림훼손으로 발생하는 산성물질의 영향으로 시작되었는데, 이는 자연적인 내적 과정 그리고 황산염과 질산염 화합물의 침전과 같은 인간간섭에 의하여 발생하는 오염 등 외적 영향간의 상호작용에 대한 관심의 증대를 가져왔다.

이는 1852년 Robert Angus Smith가 영국 맨체스터 빗물의 산성화현상을 최초로 발견하고, 1972년 산성우(Acid Rain)란 용어가 처음으로 사용된 이래, Hemphill과 Pierce(1974)는 강수 등에 수반되어 침착하는 대기오염물질들이 빗방울에 의한 입자의 관성충돌, 확산침투, 열 및 전기영동에 의해 포착되어 씻겨 내려와 산림토양을 산성화시키는 등 건퇴적과 습퇴적에 대하여 강조하였다. Malmer(1976)와 Matzner 그리고 Ulrich(1983) 등은 이러한 공해물이 산림지역에서 임상에 따라 어떻게 작용하는가를 구명하려고 하였다. 또한, Reuss(1983)는, 산성우는 토양에서 알루미늄이온의 이동과 치환성양이온의 제거에 영향한다고 하였고, Olson 등(1982)은 알루미늄의 용탈량에 의해 산성우에 저항하는 지역의 토양도를 작성하였다. 이때 산성우에 대한 저항도가 낮은 토양의 특징은 토양 pH가 낮고, 토양의 sulfate 흡착능력이 낮다고 하였다. 토양특성에 따라서 Olson(1985)은 미국 네브라스카의 480개 조사구에서  $\text{NO}_3^-$ -N농도와 환경요인간의 관계를 분석한 결과, 점토함량이 많을수록 토양의 투수성이 낮아지고  $\text{NO}_3^-$ -N의 용탈이 감소되어 지중수 및 지하수에 미치는 영향이 적어진다고 하였다. 이의 영향으로 우리나라에서 현근

수 등(1991)은 토양에 점토함량이 많아질수록 유기물 및 염기치환용량이 증가한다고 하였다.

산림지역에서 시업의 영향에 관하여 Rishel 등(1982)은 개별과 제초제처리 구역에서는 무처리구역보다 계류수의 여름온도는 평균 2°C나 증가하였고, 가을과 겨울에는 3.9°C나 낮아 계류수질에 변동이 발생하였다고 보고하였다. 또한, Remy(1985)와 Willems(1987)는 개별 시업한 지역의 경우 무처리구보다  $\text{NO}_3^-$ -N이 많이 유출되어 계류수질을 악화시키므로 개별은 가능하면 피해야 한다고 강조하였다. 이때의 계류수질에 대한 연구는 급속도로 진전되어 많은 산림소유역에서 연구되어졌는데, 이러한 연구들을 통하여 산림소유역 관리가 계류수질에 미치는 잠재적 영향에 대한 이해가 커지게 되었다. 특히 계류수질 평가인자에 대하여 Brown과 Krygier(1970)는 계류수의 온도 변화는 물의 맛, 색, 향기 등을 변화시킨다고 하였으며, Brown 등(1982)은 계류수에서 수질오염을 나타내는 직접적인 요인은 퇴적물과 혼탁도이고, 온도, 유기물함량, 용존산소, 기타 물에 용존되는 화학적 성분 등도 영향인자라고 하였다. 또한, Hollen 등(1992)은 토양 표층에 있는 질소는 강우시 지표수 유출에 의하여 수계에 유입되면 부영양화를 유발할 수 있는 인자라고 하였다.

Megahan(1975)은 수질공해란 인간과 인간이 만든 화학적, 물리적, 생물적요인 및 방사능이 물을 오염시키는 것이라 정의하면서 산림지는 ha당 가장 높은 질의 물을 생산한다고 하였으며, Teller(1976)는 각 수원에 대하여 수질분류체계를 정립하여야 하는데, 이는 수원의 공급, 어류, 휴양, 상업, 농업, 심미적인 요인 등에 의해 결정해야 한다고 보고하였다. 또한 Flinn 등(1979)은 수온, pH,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  등이 계절적인 시간에 따라 변화하며 계류 주변의 모암상태나 산림상태에 따라 발생하는 양료이동과 축적은 계류수에 용존되어 있는 양료함량을 변화시킨다고 하였는데, 이러한

계류주변의 모암상태나 토양조건 그리고 산림상태 등과 계류수의 용존이온과의 관계는 일본에 비하여 수년 앞서가는 연구이었다. 1980년대에 이르러 산성우로 인한 계류수의 수질변화에 대하여 연구되기 시작하였으며, Glass 등(1982)은 산을 중화시킬 수 있는 암석의 능력에 따라 암석의 형태를 분류하였고 산에 의한 토양의 민감도를 분류하였다.

1990년대에 이르러서는 각종 산림개발 행위로 인한 계류수질의 오염방지 대책을 강구하기 위한 연구가 활발히 진행되었다. 특히, 많은 연구자들은 토양침식과 이로 인한 수질에의 영향에 대하여 특별한 관심을 나타내었다. 그 예로, USDA의 임업책임자로 있었던 Gifford Pinchot는 '토양의 유실은 미국의 발전에 손실을 주는 가장 위험한 요소 중의 하나이다. 이 중 3,000평방마일에 이르는 펜실바니아 남부 고지대의 토양이 산림훼손으로 인한 지표의 노출로 침식, 붕괴되고 있으며 이렇게 유실된 토양은 하상에 쌓이게 되어 매년 막대한 비용을 들여 제거해야 할 상황이다. 더욱이 과도한 개발로 인한 초본식물의 절멸은 침식으로 인한 표층토의 유실, 산림파괴 그리고 물 공급에 상당한 악영향을 미치게 된다'고 토양침식으로 인한 계류 수질오염에 대하여 경고한 바 있다.

광산지역에서 발생하는 중금속 등 오염물질은 산림내 계류수에 유입되고 중소하천으로 유입되어 지역주민 등의 건강생활에 심각한 영향을 초래하는 문제로 대두되고 있는데, Dick 등(1983)은 광산지역에서 산성도, 알칼리도,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Cl}^-$ , 탁도, 경도,  $\text{NO}_3^-$ -N, pH, 페놀,  $\text{SO}_4^{2-}$ , 부유물질, 용존물질, 용존산소, 전기전도도, Al, Sb, Ba, Cd,  $\text{Ca}^{2+}$ , Cu, Fe, Pb,  $\text{Mg}^{2+}$ , Mn, Ni, P, Ag, Sr, Zn,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ -N,  $\text{CN}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , As, Hg, Se, Cr-IV 등 39개 항목에 대하여 광산개발전과 개발 중 그리고 개발 후로 구분하여 수질을 분석하는 등 광산개발에 따른 계류수질의 변동특성을 구명하였다.

최근에 이르러 산림이 계류수질을 화학적, 생물학적으로 정화시켜 자연

적인 보호역할을 한다는 이론이 폭넓게 밝혀지면서 상류 집수구역에서의 토지이용변경이 수자원에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 의문을 해결하기 위하여 계류수질에 대한 관심이 집중되었다. 이와 연계되어 Morgan(1990)은 강수와 계류수에서  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ -N,  $SO_4^{2-}$ ,  $H^+$  그리고  $NH_4^+$  등 9개 항목에 대하여 수질분석하였으며, 계류수에서의 산성화는  $SO_4^{2-}$ 이온의 영향이 가장 컸다고 하였다. Brown과 Binkley(1994)는 산림에서 생산되는 물은 사람이 음용하기에 최상의 수질을 나타내는데,  $NH_4^+$ -N과  $NO_3^-$ -N, 계류수의 온도 등은 계류수의 오염유발원으로 계류수의 오염을 평가하기 위해서는 이들뿐만 아니라 미생물적 오염원인 대장균군의 검사가 필수적이라 하였다. 또한, Donald 등(1995)은 토양 속에서의 물질이동 특성 중 지중수 유출이온은 강수시 지중에 잔재해 있었던 물에 용존되어 있는 이온(old water)이 많이 유출되며, 강우가 끝나면 천천히 강수로부터 유입된 새로운 이온(new water)이 유출된다고 하여 계류수질의 특성을 파악하는데 중요한 영향인자인 토양이온의 이동특성 추적자(tracer)를  $Br^-$ 이온을 사용하여 설명하였다.

이러한 지속적인 계류수질 평가인자에 대한 연구는 산림이 극심한 대기오염 지역에서 계류수질을 좋게 하는데 밀접한 관련이 있다는 것을 보편화시키는 계기가 되었으며, 산림지에서 유출되는 화학적인 성분들은 경운이나 관개배수 그리고 시비 등의 영농행위에 의하여 발생하는 화학적 산물과는 다르게 지표유출과 지중유출 경로를 통해 계류수질에 커다란 영향을 미친다는 현상이 밝혀지게 되었다. 즉, 산림지에서 물(강수)은 산림 내에 포함되어 있는 임목, 토양, 암석 등을 통과하는데 이들과 접촉하는 순간에 이들이 함유하고 있는 화학물질들을 용해시키거나 화학반응하여 지표 혹은 지중으로 유출시키므로 계류수질 평가항목을 결정할 때에는 이들 임목, 토양, 암석 등이 함유하고 있는 화학물질에 대한 면밀한 검토가 이루어져야 할 것이

며, 기왕에 연구되었던 계류수질 평가인자들을 충분히 검토할 필요가 있다.

아울러 총체적인 산원수의 수질보전 대책은 환경청이 주관하여 수립하지만 기술적인 문제는 산림청 산하 임업시험장의 연구결과를 이용하여 해결한다. 환경청의 1993년 수질보전대책 보고서(EPA-840-B-92-002)는 산원수의 수질을 보전하기 위해 산림사업시 다음과 같은 각 단계별 대책을 수립해 놓고 있다.

- 임목수확전의 계획(Preharvest planning)
- 계안지역 관리(Streamside management areas)
- 임도 시공 및 재시공(Road construction/Reconstruction)
- 임도관리(Road management)
- 임목 벌채(Timber harvesting)
- 정지작업 및 조림(Site preparation and forest regeneration)
- 산불관리(Fire management)
- 훼손지 복구(Revegetation of disturbed areas)
- 화학물질관리(Forest chemical management)
- 습지관리(Wetlands forest management)

산림지역의 수질보전대책이 수립된 배경은 산림사업과 산림 내에서 일어나는 각종 활동이 수질에 미치는 영향은 매우 심각하여 모든 주정부는 산림작업이 수질에 악영향을 주지 않도록 각종 대책을 마련한데서 시도되었다. 산림사업은 궁극적으로 해안지역의 수질에 영향을 주는 비점오염원이며, 임업분야에서 수질과 관계된 법규는 1972년 연방수질오염 방지법(Federal Water Pollution Control Act)에 나타나 있으며 1977년에 맑은 물 보전법(Clean Water Act)의 208조와 1987년 수질관계법(Water Quality Act) 319조에 비점오염원으로 규정하고 있다.

국가적인 차원에서 산림사업은 수질에 대한 전체 비점오염의 약 3~9%를 차지하며 임목벌채와 임도시공에 의한 지역적인 수질오염은 상류수원지의 경우 매우 심각할 수 있다. 따라서 Megahan(1986)은 임도의 지표침식율은 심하게 침식되는 농지의 침식율과 같거나 초과한다고 보고한 바 있다. 이러한 영향은 식수를 공급하거나 어족자원이 풍부한 보전이 잘 된 유역에서의 산림사업시 매우 중요하게 고려되고 있다.

24개 주정부들이 1990년 수질영향평가 305(b)조에 산림사업을 비점오염을 일으키는 행위로 규정하고 있으며, 영향평가의 결과에 의하면 42개 주에서 산림사업이 하천을 오염시키는 비점오염의 9%를 차지한다고 보고하고 있다. 국유림의 경우도 임목벌채와 관련된 행위로 인하여 수질이 오염되기 때문에 많은 주정부에서 이에 대한 방지대책을 마련하고 있다.

## 2. 영국의 산원수 관리를 위한 산림관리방법

1993년에 영국 산림청은 산원수 관리를 위한 지침서인 『Forests and Water Guidelines』을 발간하였다. 이 지침서에 의하면 영국의 모든 산림관리자들은 1991년 개정된 수자원관리법(Water Resources Act)에 의거 산림사업을 제한 받는다. 관리 지침중 산림사업과 관계된 내용은 다음과 같다.

- 정지작업(Ground preparation)
- 완충지대(Buffer areas)
- 계안식생관리(Managing riparian vegetation)
- 임도시공 및 유지관리(Road construction and maintenance)
- 임목벌채(Harvesting)
- 해충방제(Pesticides)
- 임지비배(Fertilisers)

- 화학물질 및 연료 저장, 취급(Storage and handling of chemicals and fuel oils)
- 화학물질 및 연료 누유에 대비한 비상계획(Contingency plan in case of chemical or fuel oil spillage)
- 산불진화와 야생동물을 위한 저수지(Ponds for fire-fighting or wildlife)

상류수원지는 계류와 인접한 거리에 따라 인접지역(The adjacent land), 계안지역(The riparian zone), 수변지역(The aquatic zone)으로 구분한다. 인접지역은 계류로부터 멀리 떨어진 지역으로 유역내 면적이 가장 넓으며 대부분의 물이 모이는 지역이다. 계안지역은 수변지역과 인접한 지역으로 수변지역에 의해 직접 영향을 받는다. 수변지역은 물이 흐르는 부분과 바로 인접한 지역이다.

완충지대(Buffer areas)는 계안과 계류의 인접지역에서 내려오는 유출수로부터 보호하기 위해 설정된 지역이다. 완충지대는 보통 계안지역을 포함하거나 이보다 더 넓다. 이 지역은 상류에서 내려오는 퇴적물을 걸러서 양료의 농도를 낮추는 기능을 하는데, 이때 완충기능은 면적이 넓고 경사가 완만하며 주변 식생이 왕성할 때 가장 높다. 완충지역의 폭은 퇴적물의 이동 위험도에 의해 정해진다. 이동 위험도는 경작 형태, 토양의 내침식성 그리고 경사도와 유역면적에 의해 영향을 받는다. 완충지대의 평균적인 폭은 1m 폭의 상류수원지 계류는 최소한 계류 양쪽으로 5m까지로 하고, 1~2m 폭의 계류는 계류 양쪽으로 약 10m까지로 하며, 2m폭 이상의 계류는 계류 양쪽으로 약 20m까지로 하고 있다.



### 3. 일본의 산원수 관리를 위한 산림관리방법

일본에서는 1970년대에 이르러 계류수질에 대한 관심이 나타나게 되었고 계류수질 평가인자에 대한 연구가 시작되었다. 그 예로, 川添 强과 吉本 衛(1975)는 비료를 시비한 산림지에서 pH,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ , P,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  그리고  $\text{Mg}^{2+}$  등 7개 항목에 대해 계류수질을 분석한 결과, 항공기 시비의 경우에는 비료가 직접 계류에 유입되므로 계류수의 pH는 떨어지는데, 이때  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 와  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 농도는 시비 전보다 약 50배가 증가하였다. 그러나 시비 후 2개월이 경과되었을 때 계류수를 분석한 결과 이 값은 시비 전의 값과 유사하였는데 이는 산림토양과 계류수에서의 정화기능 때문이라 하였다.

계류수의 정화작용에 대한 연구는 1980년대에도 계속되었는데, 특히 비료 시비로 인한 계류수의 수질변화뿐만 아니라 오수산포 모의실험을 통한 계류수의 정화작용을 연구하였다. 즉, 岩坪五郎 等(1982)은 산림소유역에서 오수를 산포했을 때  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ , pH,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , 유기인, 전질소, P,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ , COD 등 12개 항목에 대하여 수질분석한 결과, 계류수에서는 수소이온농도가 감소하였고  $\text{Cl}^-$ 과  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 이온의 농도는 증가하였다고 보고하였으며, 이때 COD는 계류수질 평가시 중요한 지표인자라고 하였다. 뿐만 아니라 생활하수의 영향이 없는 계류수에서 pH,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  등 6개 항목은 높은 농도를 나타내었으나, COD,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , 유기인,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ , P 등 5개 항목은 낮은 농도를 나타내 계류수에 용존되어 있는 이온 등의 농도에 따라 계류수질을 평가해야 한다고 보고하였다. 또한, 岩坪五郎 等(1982)은 pH가 4.2인 강우수가 산림을 통과하여 계류수로 유입되면 pH6.5가 되고 계류내에서의 N과 P의 농도는 산림내 생물과 산림조건에 따라 변화하며,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  등 3개 이온은 계류주변의 모암에 의한 풍화에 의하여 그 양이 변화한다고 하였다. 한편, 中根周步 等(1983)은 천연산림지역에서의 계류수온

은 여름과 겨울에 따른 변화폭이 매우 적으나 산화가 발생된 지역에서는 여름과 겨울에 최고 10℃나 차이내고, 강우 pH가 4.0 내지 4.2인 강수는 계류수에서 pH6.9 내외로 중화된다고 하였다.

前田 修 等(1984)은 계류수로부터 하천수까지 연결되는 지역에서 유량, 용존산소, 전기전도도, 부유물질, BOD, COD, 전유기탄소(TOC), 용존유기탄소(DOC), APT, DNA, 클로로필-a, 단백질, pH,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , Total-N, Total-P, 전유기탄소와 용존유기탄소의 차인 POC 등 19개 항목에 대하여 측정 분석한 결과 전기전도도, 온도, 부유물질, 전유기탄소, 용존유기탄소, COD 등 6개 항목은 하류로 갈수록 증가하였으며, 용존산소의 감소원인은 수심의 증대, 유속의 감소, 하저의 불안정한 상태로 인한 하상식물의 감소, 유입되는 유기물의 산화에 의한 산소소비가 크기 때문이라고 평가하였다. 특히 용존산소는 대기과 물에서의 산소평형과 긴밀한 관계를 나타내며 물에서의 자정기능을 판단할 수 있는 평가인자로서 계류수에 서식하는 다양한 생물종에 중요한 영향을 미치는 인자임을 강조하였다. 또한 염소이온과 암모늄이온의 증가는 도시지역의 하천에서 발생하는 특이성으로 DOC와 부유물질, pH와 용존산소, COD와 TOC는 유의한 상관관계를 나타내었으며, BOD와 COD의 이송량의 차이는 유기탄소화작용에 의한 하천 내의 생물적 정화작용에 기인한 결과라 하였다.

國府田悅男 等(1984)은 하천이나 호소에서의 부영양화를 판단하는 지표는 용존산소, pH, 탄산이온 및 중탄산이온 등이며, 이를 검증하기 위해 전인, 전질소,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,  $\text{NO}_2^--\text{N}$ ,  $\text{NO}_3^--\text{N}$ , 전이산화탄소, COD, BOD, 전클로로필, 부유물질량, 전기전도도, 대장균군, 일반세균 등 13개 항목을 분석하였는데 용존산소와 탄산이온 혹은 중탄산이온은 유의한 상관관계를 나타내어 계류수에서의 부영양화를 나타내는 지표는 용존산소임을 밝혀 내었다. 또한 遠藤治郎 等(1984)은 산림내 계류수에서 수온, 전기전도도, pH, R<sub>pH</sub>, 탁도,

용존산소, COD,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ , M알칼리도,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  등 17개 항목을 분석하였는데, 산림내 계류수에 용존되어 있는 성분의 함유율은 초지를 통과한 수질에서보다 낮아 산림내 계류수의 질을 높이 평가하였다. 즉, 1980년대 초반까지 일본에서의 계류수질에 대한 연구는 산성우에 대한 산림토양의 완충능력 및 계류수의 중화작용, 그리고 산림지역과 개발된 지역에서 계류수질의 변동특성에 대한 기초적인 이론을 定立하기 위한 연구가 주를 이루었다.

1980년대 후반에 이르러 계류수질 평가시 전기전도도는 계류수에 용존되어 있는 이온의 양을 평가하는 지표로 작용한다는 이론이 강조되었다. 즉, 志水俊夫 等(1987), 志水俊夫와 坪山良夫(1990) 등은 용설기에 계류수질의 변동특성을 파악하기 위해서는 탁도, 전기전도도, 유량, 수온 등 4개 항목이 중요하다고 하면서 전기전도도는 수온에, 탁도는 유출량에 비례하는 결과를 나타내었고 적설의 pH는 6.1 이던 것이 용설유출수에서는 pH6.7 내지 pH7.2로 변화하여 산림토양의 수질정화작용을 설명하였다. 또한, 西屋 敏(1988)은, 전기전도도는 염류농도의 양을 표시하는 지표로서 강수와 계류수에서의 전기전도도는 고도로 유의한 정의 상관관계를 나타내었고, 강수의 전기전도도와 강수량은 부의 상관관계를, 계류수의 전기전도도와 강수량은 정의 상관관계를 나타내는 등 전기전도도를 계류수질평가의 지표인자로 인정하였다. 한편, 이 시기에 廣瀬 顯 等(1988)은 산림내 34개 집수역에서 유출수의 pH,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , total P,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , 전기전도도 등 11개 항목에 대하여 수질분석한 결과 산림내 계류수의 수질은 먹는 물 수질기준에 적합하였다고 하였다. 또한, 梶 利夫(1987)는 강우시 연속 측정으로  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 은 수위상승시에 농도가 증가한다고 하였고, 平田健正과 村岡浩兩(1988)는 4회의 큰 강우시 강우 전부터 강우 후 평수위까지의 이온농도를 분석한 결과, 수위상승 전의 농도로 복귀하는 것은  $\text{SiO}_2$ , 전기전도도,

Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>이온이고, 수위상승 전의 상태로 복귀시 수위상승 전의 농도보다 높은 것은 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>이온이었다고 보고하여 수위와 이온동태와의 관계를 구명하였다.

1990년대에 들어서는 공해물질에 의하여 하천수질오염이 급속도로 확산되었는데, 이러한 공해오염은 산림내 계류수에도 영향을 미친다는 논의가 고조되면서 산림내 계류수질 오염 및 계류수의 정화작용에 대한 연구가 활발히 이루어졌다. 즉, 佐藤冬樹 等(1990)은 공해물질로 오염된 강수가 산림지역에 내렸을 때 계류수에서 전기전도도, pH, 용존산소, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SiO<sub>4</sub> 등 13개 항목을 분석한 결과, 강수의 평균pH는 4.94 이었으나 계류수에서는 약 2~3이 높았으며, 계류수는 산성우의 직접적인 영향으로 일시적으로는 pH가 저하할 수 있으나 수질의 악화는 발생하지 않는 등 계류수의 수질증화작용을 입증하였다. 佐佐木重行 等(1990)도 강수시 계류수에서 Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, P, Na<sup>+</sup>, 그리고 K<sup>+</sup> 등 5개 항목을 분석한 결과 Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> 등 3개 이온은 주변의 암석에 대한 영향이 커 계류 주변의 암석구성 상태에 따라 계류수질이 변화한다고 하였다. 石塚和裕 等(1990; 1991)은 인공산성우를 가하여 산성우에 의한 토양의 반응을 실험한 결과, pH 저하로 인해 알루미늄이온이 용탈되는데, 이때 산에 의하여 pH는 저하하고, Ca<sup>2+</sup>이온 등 양이온은 감소한다고 하였다. 脇孝介 等(1990)도 임외우보다는 활엽수림에서 임내우의 pH는 높았으나, 침엽수에서는 낮아 임상에 따른 임내우 pH의 상이성에 대해 설명하였다. 徳地直子 等(1990)은 물순환 과정에 따라 강수, 수관통과수, 토양수, 계류수에서의 수질분석 결과, 토양수 중의 Cl<sup>-</sup>이온동태로 물순환 과정을 설명하였으며, 中尾登志雄 等(1990)은 산성강하물이 산림토양에 미치는 영향을 토양의 산성화, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>이온의 용탈, Al, Fe, Mn의 과잉, P의 고정 등으로 설명하였다. 또한, 平井敬三 等(1990)은 삼나무지역에서 임외우, 임내우, 수간류 그리고 토양

수에서 pH를 측정된 결과, 수간류에서는 임내우, 임외우에 비해 pH가 낮았고 염기농도가 높았으며,  $\text{NO}_3^-$ -N농도는  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ 이온과 상관관계가 높아 계류수질평가 전에 이들 인자에 대한 연구가 필요하다고 하였다. 뿐만 아니라 加藤正樹 등(1990)은 수간류는 뿌리 부근에 집중되어 있는 이들 토양에 중요한 영향이 있다고 보고하였고, 森貞和仁 등(1990)도 강수와 수간류에서  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ 이온 등 6항목의 농도를 분석한 결과, 침엽수에서 pH는 수간류가 강수보다 낮았으며, 특히  $\text{K}^+$ 이온은 현저한 차이를 보였다고 하였다.

志水俊夫와 坪山良夫(1990)는 인위적 영향이 없는 천연지역의 계류수질을 조사한 결과 계류수에서 검출되는 이온은 계류수가 이동하면서 접촉하는 모암과 토양에 존재하는 이온의 종류에 따라, 물이 이들 암석과 토양에 얼마나 오랫동안 많은 면적을 접촉하느냐에 따라 그 양이 달라진다고 하였다. 즉,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , 전기전도도,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  등 8개 항목은 모두 주변의 암석 및 토양에 기원하는 항목들이었음을 밝혔으며, 전기전도도는 용존이온의 양에 따라 변화한다고 하였다. 또한 佐佐木重行 등(1991)은 산성우가 내리는 지역에서 강수 및 계류수의 pH, 전기전도도,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  등 5개 항목에 대하여 1985년부터 1990년까지 6년간 수질을 분석한 결과 강수의 pH는 평균 4.9 이었으나 산림내 계류수에서는 평균 6.7로 산림토양의 완충능력과 계류수의 중화작용을 설명하였다. 즉, 산성우가 연속해서 내리면 산림토양의 완충능력은 감소하고 이로 인하여 계류수에서의 pH도 낮아지는 등 산성우로 인한 계류수질 변화의 메커니즘을 밝혔다. 이때 계류수의 pH는 지질 및 임지의 상태에 따라 영향을 받으며 복층림이 단층림에서보다 계류수의 pH가 높으나 전질소농도는 이와 반대의 경향을 나타내는데, 특히  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  등 3개 항목은 산성우를 중화시키는 성분으로서 계류수질평가 시 수중에 용존되어 있는 이온의 양과 각 이온이 전기를 운반하는 속도를

감지하는 전기전도도와 함께 유용하게 이용되는 수질평가 항목이라고 하였다. 佐藤冬樹 등(1992)은 일본 북해도지방의 산림소유역에서 pH, 전기전도도,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  등 10개 항목에 대하여 계류수질을 분석한 결과, 이 지역의 강설은 pH가 4.11~5.46이었고 강설 중의 용존성분은  $\text{Na}^+$ 와  $\text{Cl}^-$ 의 농도가 가장 높았으며, 강설 pH와 전기전도도는 약한 상관관계를 나타내었는데 강설 중에 용존성분의 양이 많으면 pH가 저하한다고 하였다.

한편 大類清和 等(1992; 1993; 1994)은 토양을 통과한 토양수와 계류수에서 pH,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{H}^+$  등 12개 항목에 대하여 수질을 분석한 결과, 점토광물질을 많이 함유한 토양을 통과한 토양수는  $\text{Na}^+$ 와  $\text{HCO}_3^-$ 이온이 현저히 증가하였다고 하였다. 또한 pH4.8 이상에서  $\text{Ca}^{2+}$ 이온은  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  등 4개 음이온의 총량과 고도로 유의한 정의 상관관계가 있었고 pH4.8 이하에서는  $\text{Al}^{3+}$ 이온의 용출이 현저하였으며, pH4.8 이상에서  $\text{HCO}_3^-$ 와  $\text{SiO}_2$ 는 pH와 정의 상관관계를 나타내었으나 pH4.8 이하에서  $\text{HCO}_3^-$ 와  $\text{SiO}_2$ 는 pH와 부의 상관관계를 나타내었다고 하였다. 佐佐朋幸과 長谷川浩一(1992), 佐佐朋幸 등(1993) 등은 일본전나무, 삼나무, 너도밤나무, 튜립나무에서 수간류의 pH를 분석한 결과, 침엽수의 수간류가 활엽수보다 pH가 낮았다고 하였다. 한편 圖子光太郎 등(1993)은 토양 pH가 5.5이상에서는 염기포화도가 현저히 높아지고, 5.5이하에서는 양이온치환용량이 증가하는 등 토양수 중의 음이온농도의 증가는 양이온농도의 증가를 가져온다고 하였다. 宗宮 功(1993)은 수역에서의 자정작용 및 토양에서의 수질정화작용의 용어를 정의하면서 산림생태계에서 물질순환과정을 구명하였다. 더욱이 末松剛介 등(1995)은 산림지역에서의 용존물질농도와 유역면적 간의 관계를 분석한 결과, 유역면적이 클수록 계류수에서의 이온농도는 높았고,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,  $\text{K}^+$ 의 순으로 유역면적과 높은 상

관관계를 나타낸다고 하였다. 金子眞司(1995)는 강수, 임내우, 수간류의 순으로 산성도가 높았다고 하였고, 高橋忠幸(1996)은 산성우에 따라 산성완화력이 큰 수종은 왕가래나무, 음나무, 튜립나무, 너도밤나무, 일본사시나무 등이었고, 산성능력을 강화시키는 수종은 오리나무류, 일본목련 등으로 수종에 따라 산성완충능이 다르다고 보고하였다. 河野吉久 등(1996)은 인공 산성우를 이용하여 토양 pH와 전기전도도와의 관계를 구명하였고, Tsugio Ezaki(1996)는 강수(임외우, 임내우, 수간류)와 계류수질을 분석한 결과, 침엽수보다는 활엽수에서 산성완충능이 컸으며, 강수 pH가 낮더라도 계류수에서의 pH는 높아 산림토양에서의 수질정화능을 추정하였다. 相澤州平(1993)은 수간류의 pH가 높은 활엽수를 인공침엽수로 바꾸었을 경우, 수간류의 낮은 pH로 인해 토양이 산성화된다고 하여 활엽수로의 시업이 대기오염물질에 의한 산림토양의 산성화를 억제시킨다고 하였다. 즉, 1990년대에 들어서면서 일본에서의 산림내 계류수질을 평가하기 위한 연구는 산업화와 도시화로 인한 인구증가와 대기오염으로 인한 산성강하물이 강수에 섞여 내렸을 때 이로 인한 산림내 계류수질의 영향, 토양을 통과한 이러한 오염물질들의 정화, 그리고 계류수질 평가인자로서의 전기전도도, 모암 및 지질에 영향하는 계류수에 용존되어 있는 각종 성분 등의 상호 영향관계를 구명하기 위한 연구가 지속적으로 수행되고 있다.

이와 같이 일본에서는 산림내 계류수질에 관한 다양한 연구가 활발하게 수행되고 있고 기왕의 연구결과 산림지역에서 생산되는 물은 사람이 음용하기에 최상의 수질을 나타내고 있으나, 이러한 깨끗한 계류수는 벌채, 임도 개설, 벌채 등을 위한 지존작업 그리고 대기오염으로 인한 산성우 등 인위적인 산림지역에서의 개발로 인하여 계류수질이 오염되고 있으며, 계류수의 오염은 이제 산림 내에서의 작업에서뿐만 아니라 도시지역에서의 인구증가에 따른 산업발전과 대기오염의 증가로 더욱더 오염의 위험이 커지는 등 장

래의 계류수질오염의 위험성을 경고하고 있다.

따라서, 이러한 오염된 물질이 산림토양을 거쳐 어떻게 정화되며, 계류수에서는 어떠한 수질정화기능이 있는지 다양한 연구를 통해 그 메커니즘을 밝히려는 연구가 활발하게 진행되고 있다.

#### 4. 한국의 산원수 관리를 위한 산림관리방법

우리나라 하천과 호소의 수질등급은 I등급에서 V등급으로 나누고 이를 다시 이용목적별 적용대상 즉, 상수원수, 수산용수, 농업용수, 공업용수 그리고 생활환경보전을 고려한 최저한계수질 등으로 구분하고 있고, 하천수질 평가기준 항목으로는 수소이온농도(pH), 생물화학적산소요구량(BOD), 부유물질량(SS), 용존산소 그리고 대장균군수 등 5개 항목과 사람의 건강보호를 위하여 전 수역에 대해 카드뮴, 비소, 시안, 수은, 유기인, 납, 6가크롬, 폴리클로리네이티드비페닐(PCB), 그리고 음이온 계면활성제(ABS) 등 9개 항목을 합한 총 14개 항목에 대하여 평가기준을 정하고 있다. 또한, 호소수질 기준으로는 pH, 화학적산소요구량(COD), 부유물질량, 용존산소, 대장균군수, 총인 그리고 총질소 등 7개 항목과 사람의 건강보호를 위하여 전 수역에 대해 하천수질기준과 동일한 9개 항목 등 총 16개 항목에 대하여 평가기준을 정하고 있다.

산림유역내 계류수는 강우가 정지된 상태나 일정한 강우강도와 강수량 이하에서는 혼탁하게 되지 않고 맑은 상태를 유지한다. 뿐만 아니라 잘 가꾼 산림에서는 연중 계류수가 마르지 않고 맑은 물이 흐르며 하류의 하천이나 호소에 유입됨으로써 하류수의 수질을 좋게 하는 중요한 역할을 한다. 그러나 가뭄에 의하여 계류수량이 급격히 감소하게 되면 계류수질 오염이 확산될 수 있고, 야생동물 등의 분변이나 사체가 계류수에 유입되면 병원균



이나 박테리아의 개체수가 증대하게 된다. 또한, 여름의 집중강우시에는 산지사면이 붕괴되거나 침식되어 발생하는 토사가 계류수에 유입되어 일시적으로 높은 혼탁도를 나타내기도 하며 부영양화의 원인이 되어 계류수질이 급격히 떨어지게 된다. 이러한 산림유역내 계류수의 대부분은 하천 및 호소수질기준에 의한 수질등급상 최상급인 1급수에 충족하는 깨끗한 물로서 먹는 물로 이용하기에 문제가 없고 그 양도 풍부해 극심한 가뭄으로 인한 물 부족에 대처하기 위해 계류수를 자원화해야 한다는 사회적 여론이 일고 있다. 그러나 아직까지 우리 나라에서는 계류수질 평가기준이 정립되어 있지 않아 하천 및 호소수질기준 그리고 먹는 물 수질기준에 입각한 몇몇 항목에 대한 검사로 계류수질을 평가하고 있는 실정이며, 수질평가인자도 통일적으로 정립되어 있지 않아 지역에 따라, 학자에 따라 그리고 연구목적에 따라 다르게 적용하고 있어 통일적이고도 합리적인 계류수질평가기준이 절실히 요구되는 상황이다.

우리 나라에서 산림내 계류수질에 대한 연구는 1970년대 후반에 이르러서야 청정수역에 대한 계류수질에 대하여 관심이 나타났다. 1977년에 이재영은 울릉도에서의 하천수질은 pH 8 이상인 염기성을 나타내는 연수인데, 이는 울릉도가 주로 조면암질화산암으로 구성되어 있고 조면암의 주광물이 장석이므로 장석의 풍화작용에 의해 염기성을 나타내는 등 계류수에 용존되어 있는 이온은 계류 주변 지역의 모암에 영향한다고 하였다. 이후 1980년대에 이르러 홍사환과 정규혁(1982)이 인위적인 오염이 없었던 계방산 지역의 산림소유역을 대상으로 계류수질을 분석하였는데, 계방산 지역의 속사천과 자운천, 그리고 계방천에서의 계류수는 전 조사지점에서 pH는 6.4~6.6, 전기전도도는 20~60  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 용존산소는 9mg/l로 일반적인 산림내 계류수에서의 용존산소의 범위 내에 포함되어 포화상태이었고,  $\text{NO}_3^-$ -N가 미량 검출된 것으로 보아 인위적인 오염이 없었다고 하였다. 즉, pH와 계류수에 용존

되어 있는 용존산소 등으로 하천수질기준에 의한 수질등급을 평가하였다.

이 시기에는 세계적인 산성비에 의한 영향으로 국내에서도 산성우에 의한 연구가 진행되었다. 즉, 우리 나라에서는 1979년에 처음으로 산성우 현상에 대한 연구가 시작되었고, 1980년대 초에 산성우의 산도에 대한 연구가 활성화되었고 현재에 이르기까지 대기오염에 의한 산림피해의 현상과 이로 인한 산림의 영향에 대하여 연구가 진행되어 오고 있다. 이 후 1980년대 중반에 이르러 강우성분을 분석하고 오염물질의 강하현상과 토양에 미치는 영향을 조사하였다. 김준민(1985)은 산성우에 약한 토양은 화강암, 편마암과 같이 석영이 많이 함유된 암석을 모암으로 하는 토양이며, 산성우로 인해 가중되는 토양의 산성화를 역지하기 위하여는 석회시용과 오염물질의 근원적인 저감이 필요하다고 하였다. 또한, 김준호(1985)는 겨울에는 대기온도가 낮은 까닭에 대기중에 부유하고 있는 가용성 물질이 빗방울 속에 적게 용해되므로 강설에 의한 산성우 우려가 적다고 하였다. 한편, 산림내 계류수는 유속이 크며, 수면이 쉽게 교란되므로 용존산소의 양이 많으나 산성우에 영향을 받을 수 있다고 하였다. 한편, 이수옥과 장관순(1987)은 우리나라에 내리는 산성우의 특성을 분석하였고, 호수에서의 수질오염에 대하여도 이해금(1985)은 대기오염물질에 의한 산성비의 영향이 중요한 요인이라고 하였다. 산림내 계류수질과 서식어종과의 관계에 대해서는 전상린(1985)이 최고의 수질(1급수)인 산림내 계류수에 서식하는 어종은 열목어(*Brachymystax lenox*), 산천어(*Oncohynechus masou*), 버들개(*Moroco lagowskii*), 버들치(*Moroco oxycephalus*), 금강모치(*Moroco spp.*), 종개(*Barbatula toni*), 독중개(*Cottus poecilopterus*)라 하여 서식어종으로 계류수질을 파악하였다. 정영호(1985)는 산림내 계류수에 서식하는 식물성플랑크톤의 종류에 대하여 보고하였고, 홍사환(1985)은 산림내 계류수의 오염을 방지해야 한다고 강조하였다.

1980년대 후반에 이르러 산성우로 처리한 수목의 생리적 변화와 토양과의 관계에 대한 연구가 수행되었다. 민일식(1989)은 황산화물보다는 질소산화물이 토양산성화에 크게 영향하고 오염된 지역에서는 2가양이온( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ )의 용탈로 토양입단화가 악화되어 침식 발생률이 높아 계류수질에 나쁜 영향을 미칠 수 있다고 하였다. 즉, 1990년대에 이르기까지는 산성우와 대기오염물질이 산림생태계에 미치는 영향에 대한 연구가 주류를 이루었다.

1990년대에 들어서기까지 산림내 계류수질에 대한 국민들의 관심은 매우 미약하였으며, 오래 전부터 청정지역에서 흐르는 산림내 계류수는 공공재로서 여기고 이의 이용에 있어 계류수질을 좋게 만들어 주는 산림에 대해 대가를 지불할 의사는 적은 분위기였다. 이러한 사회적 무관심은 산림내 계류수질 및 대기오염물질의 증가로 인한 산성우가 계류수질에 어떠한 영향을 미치는가 등 보다 맑고 깨끗한 다량의 물에 대한 연구의 진척에 제약이 되어 왔다. 그러나 1990년대에 들어 전 세계적으로 나타난 기상이변 등은 한 반도에도 나타났으며, 특히 가뭄과 홍수 등은 심각한 사회적 문제를 야기시켰다. 그 중 지역적으로 나타난 가뭄은 수년간 계속되어 사람이 음용하는 물의 부족현상을 가져와 많은 돈을 들여 먹는 샘물을 이용하게 하였으며, 점차로 산림내 계류수에 대한 관심이 늘어나게 되었다. 이와 같은 사회적 관심은 상수원수로 이용하는 청정한 계류수인 원수에 대한 관심으로 이어졌는데, 한국수자원공사(1990)는 계류수를 상수원수로 이용하는 울릉도의 도동, 남양, 현포에서의 상수원수에서 pH, 용존산소, BOD, COD, 부유물질량, 대장균군, 카드뮴, 납, 비소, 수은, 유기인, 6가크롬, 시안 등 13개 항목에 대하여 수질분석한 결과 평균pH는 7.9(7.2~8.6), 평균용존산소는 9.4(8.4~10.4)mg/ℓ, 평균BOD는 2.2(1.6~2.8)mg/ℓ, 평균COD는 2.0(1.0~3.0)mg/ℓ로 하천수질기준 상수원수 2급수를 나타내었다고 하였다. 이들 분석 항목에 대한 결과로 판단할 때 pH와 용존산소의 값으로 판정한 수질등급은 하

천수질기준 상수원수 1급수이었으나, BOD와 COD만으로 판정했을 때는 하천수질기준 상수원수 2급수로 그 수질등급의 차가 발생하여 하천이나 호소수질기준, 그리고 먹는 물 수질기준 등에서 규정하고 있는 기준항목에서 어느 한 가지나 전체적인 항목이 아닌 결과로 수질등급을 판정한다는 것은 동일한 물을 평가할 때 이들 기준에 부합된 결과의 등급을 판정하기가 곤란하다고 하였다. 따라서 올바른 계류수질 평가기준을 정립하기 위한 평가항목을 결정하기 위해서는 이들 기준을 고려함과 동시에 계류수에서 검출될 수 있는 여러 가지 항목에 대한 시험, 연구, 검증이 요구된다고 할 수 있다.

1990년대 중반에 이르러 산림내 계류수질에 대한 연구는 보다 활기를 띠게 되는데, 환경처(1992)에서는 수질오염과 밀접한 관계를 갖고 있는 pH에 따라 수생생물의 생존한계를 밝혀냄으로써 산림내 계류수의 수질오염 정도를 평가할 수 있는 지표를 제시하기도 하였다. 또한, 건국대학교 지리학과(1994)는 울릉도의 남서천, 내수전약수터, 도동약수터, 그리고 저동천 등 약수와 계류수질을 분석한 결과 약수에서 pH는 5.35~5.83의 범위에 있어 산성을 나타내었으나 계류수에서는 6.86~7.73으로 중성인 수질을 나타내었으며, 전기전도도는 계류수에서 90~270  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 울릉도의 계류수는 하천수질기준 수질등급상 1급수에 해당된다고 하였다. 한편, 김경진(1994)은 임도개설 지역에서 유출된 강우수에서 부유물질,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  등 8개 항목을 분석한 결과, 계류수질은 임도개설에 따른 불안정한 사면조성에 의해 토사 및 양분의 이동이 급하게 진행되어 강우량과 강우빈도에 따라 장마 초기에는 높은 이온농도차를 나타내는 등 개발 지역에서의 계류수질은 일반 산림지역과는 다른 이온농도를 나타내었다고 하였다. 이 때까지 계류수질에 대한 연구는 특정한 지역을 대상으로 연구되어졌으나, 이천용과 원형규(1994)는 전국의 산림내 계류수질을 계절별로 pH, 전기전도도, 수온, 용존산소,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  등 11개 항

목에 대해 분석하였는데, 질산태 질소는 도심지역의 산림내 계류수에서보다 오지림의 계류수에서 높았으며,  $SO_4^{2-}$  이온농도는 도심지역이 산악지역보다 높았다는 등 전국적인 계류수질평가를 시도하였다. 또한, 산림내 계류수와 지중수의 수질을 비교 분석하여 계류수와 지중수에 용출되는 화학물질은 모암의 영향이 크다고 함으로써 산림내 계류수와 지중수의 상호 연관성을 밝혔다.

박재현(1995)은 개발을 위한 벌채지역의 계류수에서 BOD, COD, pH, 중금속(Cd, Pb, 유기인, Cu), 색도, 탁도, 냄새, 맛,  $NH_4^+-N$ ,  $NO_3^- -N$ , 일반세균수, 대장균군수 등 15개 항목에 대하여 계류수질을 분석하였는데, 카드뮴, 구리, 유기인, 납 등 중금속은 산림내 개발행위인 벌채작업시 계류수에서는 검출되지 않았다고 하였다. 아울러 벌채작업에 따른 BOD와 COD의 값은 벌채 전보다 미량 증가하는 등 일반적으로 하천이나 호소의 수질오염 평가시 이용되는 BOD와 COD가 산림내 계류수에서도 적용이 가능한 오염평가 지표라고 하였다. 또한, 산림지역내 계류수질 평가인자에 포함될 수 있는 양이온, 음이온, 토양특성인자 그리고 사람의 건강에 영향을 미치는 요인 등에 관하여도 고찰하였다. 또한, 이상훈(1995)은 수질오염의 평가는 통계적으로 유의하게 설명되어야 하며 이를 위해서는 지속적으로 측정 가능한 수질오염측정망이 필요하다고 하였다. 전재홍(1995)은 계류수질평가지표인 전기전도도는 pH값에 밀접한 관계가 있으며, 산성우는 산림토양을 거치면서 중화되어 계류로 유출되는 유출수의 수질은 양호하다는 산림토양의 수질정화기능을 보고하였다. 특히 이규현(1995)은 고산계곡수와 생수, 그리고 상수의 수질을 비교 분석한 결과, 유기물질 농도는  $0.1 \sim 0.3 \text{mg}/\ell$ 로 계류수와 상수가 모두 양호한 수질을 나타내었고 전질소는  $1 \text{mg}/\ell$  이하로 계류수질이 가장 좋았으며, 일반세균수의 증가속도는 계류수가 가장 완만하여 고산계곡수의 개발 가능성에 대하여 평가하였다. 이와 비슷한 시기에 김준현(1995)은 고산계곡수의

수질을 수돗물, 생수 등과 비교했는데, 생수는 잔류염소가 없기 때문에 일단 개봉되면 상온에서 세균이 수돗물보다 빨리 증식할 수 있어 세균번식의 온상이 되어 건강을 위협할 수 있으나, 고산계곡수는 지표수로서 항상 외부에 노출되어 있음에도 불구하고 생수와 같이 세균번식의 우려가 적기 때문에 생수와 경쟁력을 갖출 수 있는 가능성이 있다고 하였다. 이를 위하여 강원도 인제군 백담사 계곡, 양양 월정사 계곡, 인제 필레계곡과 부평계곡, 평창 월정계곡 등 5개 고산 계곡지역을 대상으로 계류수량을 분석한 결과 이들 지역에서 하루에 취수할 수 있는 취수가능량은 40,000톤 이상이므로 지역별로만 개발하여도 수도권 인구가 식수로 이용할 수 있는 충분한 수량을 공급할 수 있다고 하였다. 정용호 등(1996)은 울릉도와 계방산에서의 계류수질을 평가한 결과, 계류수질 평가항목 중 하나인 전기전도도는  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$ , 양이온과 음이온을 합한 이온의 총량, 양이온과 음이온을 합한 이온총량의 평균과 유의한 정의 상관관계를 나타내었고, 전기전도도의 설명에 유의한 영향을 미치는 인자는  $Na^+$ 와  $Mg^{2+}$  등 2개 인자라고 하였다.

한편, 이현호와 전재홍(1996)은 적송과 상수리나무의 수관통과수, 수간류 그리고 강수에서의 pH, 용존산소, 전기전도도를 비교 분석하였다. 이때 적송에서의 수관통과수와 수간류의 pH는 상수리나무보다 높았다고 하였으며, 김동엽 등(1996)은 대기오염물질이 강수, 수관통과수, 수간유하수를 통하여 이동하면서 토양산성화에 영향을 미친다고 하였다. 즉, 대기오염물질이 중국에는 계류수질에 영향을 미친다는 것을 암시하였다. 또한, 김민식(1997)은 임도개설에 따른 산지급류소하천의 수질을 분석한 결과 전기전도도는 임도 개설지역이 미개설지역보다 높다고 하였으며, 용존이온 및 부유물질량의 평가를 통하여 임도개설에 따른 계류수질을 평가하였다.

이와 같이 우리 나라에서의 계류수질에 관한 연구는 일본이나 미국 등

선진 임업국에 비하여 뒤떨어져 있으며, 특히 이 분야에 대한 연구는 일부 연구자들에 의해 산림내 계류수질이 하천수질기준 상수원수 1급수로 평가되거나 사람이 음용수로 이용하기에 특별한 문제가 없다고 하여 개발 가능하다는 등의 연구결과가 보고되고 있을 뿐, 이에 대한 광범위하고 종합적인 계류수질 평가는 미진한 상태에 있다. 즉, 계류수질에 영향을 미치는 물리적, 생물적, 화학적 요인에 대한 평가, 지역적인 산림내 계류수량 및 수질의 평가, 이를 여러 가지 용도로 개발했을 때의 환경에 미치는 영향의 정도, 각 산림소유역별로 수질오염측정망 및 수질오염도 등의 작성, 계류수질 오염 메커니즘의 규명, 인간의 삶의 질을 향상시키기 위한 계류수의 역할에 대한 가치의 정량화 및 이론의 정립, 전국적인 산림내 계류수에 대한 수량 및 수질자료의 데이터베이스화 등 연구되어야 할 분야가 광범위하다.

## 제 3 절 연구방법

### 1. 대표시험유역의 현황

#### 가. 입지환경

대표시험유역은 경기도 포천군 소흘읍 직동리 소재 활엽수천연림(중부임업시험장 광릉시험림 41임반)과 침엽수인공림(중부임업시험장 광릉시험림 31, 33임반) 2개의 유역과 경기도 양주군 회천읍 울정리에 소재한 침활혼효림과 동 혼효림을 개별한 유역을 포함하여 총 4개 유역을 대표시험유역으로 하였다.

광릉 활엽수천연림 유역은 졸참나무, 까치박달, 서어나무 등으로 이루어진 극상림으로서 ha당 임목축적은 약 200m<sup>3</sup>이다. 광릉 침엽수인공림 유역은 1976년에 잣나무, 전나무, 스트로브잣나무를 식재한 인공조림지로서 물푸레나무, 들메나무, 가중나무, 층층나무 등의 활엽수 조림지가 일부 포함되어 있다. 양주의 사방시공지와 개별유역은 서로 인접한 유역으로, 이 2개유역 모두 1964년에 대규모의 산사태가 발생한 곳으로서 1974년에 사방공사를 한 유역이며 1979년에 pashall plume형 수문관측시설을 각각 설치하고 황폐지의 식생 및 토양 회복에 따른 유출량의 변화를 관측하여 왔던 유역이다.

양주 혼효림의 임상을 구성하는 주요 수종은 소나무와 참나무이다. 개별지는 1996년 7월에 개별 실시 후 유출변화를 조사하기 위해 모든 지존물을 유역 밖으로 반출하였다. 각 대표시험유역의 유역환경과 조감도는 표 2-1과 그림 2-1, 2-2에서와 같다.



표 2-1. 대표시험유역의 유역환경

구분	위치	면적 (ha)	표고 (m)	경사 (°)	모암	토성	토심(cm)			
							A층	B층	C층	합계
활엽수 천연림	경기 포천시 소흘면 직동리(광릉시 협림 41임반)	22.0	280-477	5-35	화강 편마암	사질 양토	16.0	31.7	52.0	99.7
침엽수 인공림	경기 포천시 소흘면 직동리(광릉시 협림 31, 33임반)	13.6	160-290	13-35	화강 편마암	사질 양토	14.4	45.0	23.6	83.0
혼효림 (사방지)	경기 양주군 회천읍 울정리	4.2	130-210	25-40	화강암	사토	2.0	42.4	44.4	44.4
개벌지 (사방지)		1.0								

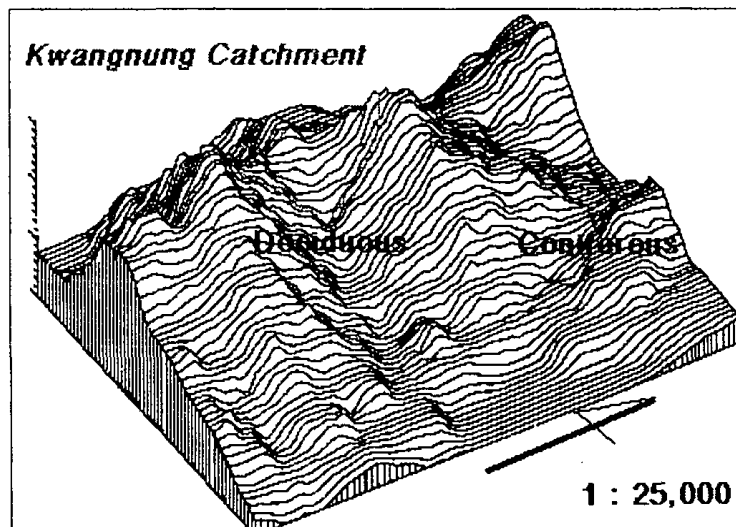


그림 2-1. 활엽수천연림과 침엽수인공림의 조감도

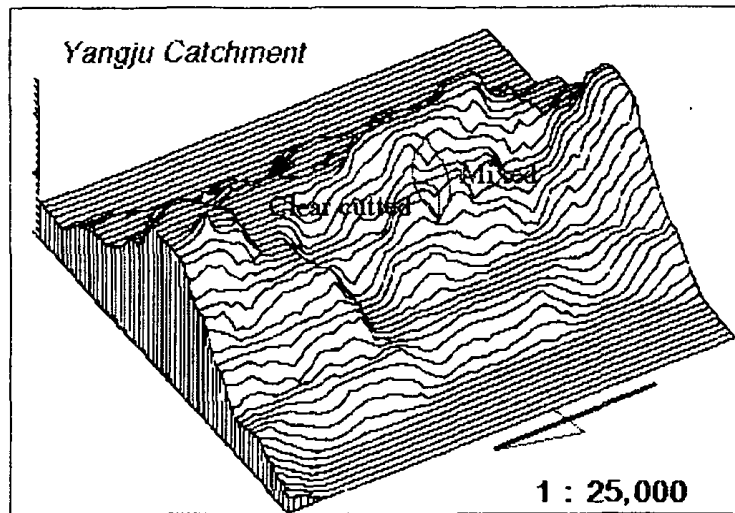


그림 2-2. 혼효림사방지와 개별지의 조감도

그림 2-1과 그림 2-2에서와 같이 유역의 형상은 활엽수천연림과 침엽수 인공림은 부채꼴 형태이며 혼효림(사방시공지)과 개별지는 긴 장방형을 이루고 있다.

#### 나. 식생

산림의 수자원함양기능 및 수질정화기능을 평가 분석할 목적에 따라 강수의 수관차단량, 수관유하수의 수질 등을 조사 분석하기 위하여 1996년 3월부터 광릉 침엽수 유역 잣나무림과 전나무림에 대한 간벌시업을 실시한 후 가로 x 세로 10m x 10m의 방형구에서 식생조사를 수행한 결과, 전나무림 무처리구에서 평균수고는 8.02m, 평균흉고직경은 1.9cm, 평균지하고는 2.2m 이었다. 또한, 전나무림 간벌처리구에서 평균수고는 9.81m, 평균흉고직경은 15.3cm, 평균지하고는 4.6m 이었다. 잣나무림 무처리구에서 평균수고는 10.3m, 평균흉고직경은 14.5cm, 평균지하고는 2.4m 이었다. 또한, 잣나무림

간벌처리구에서 평균수고는 10.6m, 평균흉고직경은 14.9cm, 평균지하고는 4.6m 이었다. 즉, 수종에 따라 수고와 흉고직경, 지하고는 모두 다른 경향을 나타내었다.

## 2. 수관차단손실량의 측정

조사대상 유역에서 산림시업(간벌 및 가지치기)은 1996년 3월부터 5월까지 전나무림은 간벌량 650본/ha, 벌채흉고단면적 5.2m<sup>2</sup>/ha으로, 잣나무림은 간벌량 400본/ha, 벌채흉고단면적 3.5m<sup>2</sup>/ha으로 실시하였으며, 가지치기는 역지 이하에 대하여 실시하였다. 전나무림과 잣나무림의 수관통과우와 수간류를 측정하기 위한 조사구는 시업구와 비시업구로 구분하여 10m x 10m 방형구에 각각 9개의 수관통과우집수기(10cm x 10cm x 100cm), 전나무림, 잣나무림 공히 5개체에 수간류집수기를 설치하였고, 이 양은 데이터로거(CR-10X)를 이용해 자동 기록하였다.

## 3. 시업에 따른 강수침투구조변화 분석

시업에 따른 강수침투구조변화를 파악하기 위해 각 조사구에서 유기물층을 걷어 낸 표토(0~7.5cm)를 2반복으로 채토한 100cc캔 토양에 대하여 실내에서 pF측정기(DIK-9211)를 이용하여 pF2.7에서의 조공극률을 측정하고, 추가적으로 총공극률(%), 가비중(g/cm<sup>3</sup>)을 측정하였다.

## 4. 산림내 계류수질 평가기준 정립

산림내 계류수질 평가기준을 정립하기 위해서는 외국에서의 수질기준과

수질평가 항목을 검토함과 동시에 우리 나라에서 적용하고 있는 하천 및 호소수질환경기준, 먹는 물 수질기준 그리고 먹는 샘물 수질기준을 면밀히 검토하고, 선행 연구들을 종합적으로 고찰함으로써 이들 수질평가기준 중 산림내 계류수에 적용 가능한 평가 항목의 선별 및 적용 범위를 선별해야 한다.

## 5. 수질분석

수관통과우와 수간류의 수질분석시료는 단위강우를 원칙으로 하여 수관통과우와 수간류가 유하하는 호스 끝에 폴리에틸렌병을 고정하여 수집하였다. 또한, 강수량은 유출수량관측시설 내 기기실에 자기우량계를 설치하여 측정하였으며, 수질분석시료는 노지에 보통우량계를 설치하여 단위강우를 측정하였다. 토양수는 시업구와 비시업구 토양의 A층 하단부에 공히 토양수집수장치(Zero-Tension Lysimeter)를 설치하고 단위강우 종료 후 토양수집수장치에 집수된 토양수질을 분석하였다. 유출수량은 전나무림지인 I유역과 잣나무림지인 II유역 하단부에 V노치를 설치하고 자기수위계를 유출수량관측시설 내 기기실에 설치하여 측정하였으며, 계류수질 분석시료는 단위강우 종료 2~3일 후 계류수가 안정되었을 때 300ml 채수·분석하였다.

강우, 수관통과우, 수간류, 토양수, 계류수는 공히 pH, 전기전도도, 양이온( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ), 음이온( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) 등 9개 항목을 분석하였다. 이때 pH(pH meter), 전기전도도(EC meter, CM-11P)는 항목의 특성상 현장에서 시료채취시 즉시 측정하였으며, 실내분석용 시료는 Ice Box에 보관한 후 실험실에 가져와 0.45  $\mu\text{m}$ 의 필터로 2회 여과한 후  $\text{K}^+$ 와  $\text{Na}^+$ 는 Flame Photometer로,  $\text{Ca}^{2+}$ 와  $\text{Mg}^{2+}$ 는 EDTA적정법으로 분석하였다. 또한,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  등은 Ion Chromatography로 분석하였다. 자료의 분석은 산림사업에 따

른 pH, 전기전도도, 강수량 등에 영향을 미치는 인자에 대하여 spss/pc+를 이용해 상관분석 및 다중회귀분석을 실시하였다.

## 6. 산림의 최적관리기법의 적용성 검토 및 개발

산림의 최적관리기법의 적용성을 검토·개발하기 위하여 임상별(침엽수림, 활엽수림, 혼효림)로 산림관리방법을 개발하였다. 특히, 각 임상별로 화성암, 변성암, 퇴적암 등 3개 모암지역에서 II영급 이하, III영급, IV영급 이상으로 구분하여 조사지를 선정, 전국을 대상으로 침엽수림 66개소, 활엽수림 50개소, 혼효림 45개소를 표본구로 선정·조사하였다.

각 조사지에서 표고, 지질, 지형, 방위, 경사 등 입지환경인자를 조사하였고, 토양층위(A, B층)별로 100cc 캔에 채취한 시료를 감압식 토양pF측정기(DIK 9211)를 이용하여 粗大孔隙率(pF1.6)과 粗孔隙率(pF2.7)로 구분하여 측정하였다. 채취한 토양시료는 모래, 미사, 점토로 구분한 함량, 그리고 유기물함량을 분석하였다.

토양조사시 토양형, 퇴적양식, 토심, 각 층위별 토양건밀도를 측정하였으며, 임상, 임령, 임목축적, 수고, 흉고직경, 상층임분 지하고, 상층식생 울폐도, 하층식생 피복도, 수종, 부식층 및 낙엽층의 두께 등 임분환경인자는 10m x 10m 식생조사 표본구에서 각 항목별로 조사하였다. 또한, 산림의 수원함양기능 상태를 평가할 수 있는 것은 토양의 공극상태인데, 특히 표층 토양의 구조는 산림시업에 의해 개선되는데(정용호, 1998), 산림의 수원함양기능 증진량을 평가할 수 있는 지표인 표층토양에서의 조공극률에 영향하는 인자인 입지 및 토양환경인자에 대하여는 spss/pc+를 이용하여 상관분석 및 다중회귀분석을 실시하였다.

## 제 4 절 연구결과 및 고찰

### 1. 산림유역의 수질환경기준 정립

#### (가) 일반적으로 적용 가능한 인자(물리적 인자)

##### 1) 수온

수온은 용존산소량과 물의 수소이온농도(pH)를 변화시킨다. 또한, 수온은 어류의 건강에 중요한 영향을 미치는 수질환경요인으로서 표층수는 위도, 계절, 경도, 광주기, 수심 등에 의해서 수온의 변화가 나타난다. 아울러 기름 및 살충제와 같이 물 속에 잘 용해되는 독성물질의 용해도는 수온이 상승할수록 증가하는 반면 산소의 용해도는 온도가 상승할수록 일반적으로 감소한다(이승휘, 2000).

##### 2) 경도(硬度, mg/ℓ as CaCO<sub>3</sub>)

산림내 계류수는 비교적 유기물질이 많고 용존산소가 높아서 세균 및 미생물의 번식에 알맞고, 강우시 침식토사로 인해 탁도가 높게 될 우려가 있다. 그러나 이 물은 지층을 통하지 않기 때문에 지하수보다 광물질 함량이 적다. 즉, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> 등의 무기염류가 비교적 적은 연수는 음용수, 생활용수, 농업용수, 공업용수 등 각종 용수에 적합하다. 또한 계류수는 산간계곡을 흐르는 동안에 낙엽이나 동물사체 등에 의해서 오염되기는 하지만 그 빈도와 양이 적으므로 물이 흐르는 동안에 계류수의 자정작용에 의해서 정화

된다.

경도의 기준은 우리 나라, 세계보건기구(WHO) 그리고 유럽의 일부 지역에서는 400mg/ℓ로 정한 곳도 있으나 대부분이 300mg/ℓ로 정하고 있는데, 이는 유럽 여러 나라들의 지질 구조가 석회암으로 되어 있어서 빗물에 의해 용출되는 하천수 및 지하수가 많은 양의 칼슘과 마그네슘을 내포하고 있기 때문이다. 그러나 우리 나라에서 먹는 샘물의 경도는 100mg/ℓ 전후이다. 즉, 현재의 먹는 물 수질기준에 정한 경도 기준인 300mg/ℓ는 우리 나라의 먹는 물이 최대한 나타낼 수 있는 정도를 정한 것이므로 일반적으로 나타나는 경도의 수준인 100mg/ℓ이나, 그보다 높은 150~200mg/ℓ로 낮추는 것도 고려할 필요가 있다. 뿐만 아니라 산림내 계류수는 대부분이 연수이므로 그보다 낮은 값으로 정하는 것도 필요하리라 생각된다.

또한, 자연지역의 산림내 계류수 가운데 강원도 영월지역의 경우에는 칼슘 성분이 특히 많이 함유되어 있으나 대부분 우리 나라의 산림내 계류수는 칼슘 성분이 적당히 함유되어 있고 먹는 샘물과 크게 다르지 않으므로 경도는 100mg/ℓ 전후라 생각된다. 대체로 경수는 표토가 두껍고 석회암층이 존재하는 지역에서 많이 생기며 연수는 표토가 얇고 석회암층이 매우 드물거나 없는 지역에 기원한다(吳英敏과 申錫奉, 1991). 즉, 자연의 물을 인간이 사용할 경우에 그 화학적 성질 중에 가장 중요한 것이 물의 경도로서 천연수인 산림내 계류수가 물맛이 좋은 것은 연수이기 때문이다(崔榮博, 1994).

따라서 자연지역의 산림내 계류수에 대한 계류수질 평가기준 항목에는 사람의 건강보호를 위하여 경도항목을 포함하여야 할 것이며, 경도의 기준은 먹는 물 수질기준에 입각한 기준치나 그 보다 낮은 값을 정함이 타당하다고 하겠다. 그러나 경도를 간접적으로 판단할 수 있는 계류수에 포함되어 있는  $Ca^{2+}$  및  $Mg^{2+}$ 의 양이 지역에 따라 다르기 때문에 이에 대한 기준은 지역, 모암 그리고 지질 등을 고려하여 정할 필요가 있을 것으로 생각된다.

### 3) 맛, 냄새, 색도(Taste, Odor, Color)

수원이 지표수, 지하수, 산업폐수로 오염되거나 원수에 미생물이 침입, 번식하면 물에서 이상한 맛, 냄새, 색 등이 나타나고, 이들 항목에 대하여 우리 나라의 먹는 물 수질기준에서는, 색도에 대하여 5도를 넘지 아니할 것, 냄새와 맛은 소독으로 인한 냄새와 맛 이외의 냄새와 맛이 있어서는 아니될 것 등으로 기준을 정하고 있다.

특히, 산림내 계류수에서는 산림에 서식하는 각종 야생동물의 사체 및 분변이 계류에 유입되어 부영양화 [외부로부터 다량의 영양염이 유입됨으로 인해 식물플랑크톤을 포함한 미생물이 번성하고 내부생성유기물의 양이 증가하여 수중생태계의 구조와 기능적 측면에서 물질순환의 분균형이 초래되는 현상] (OECD, 1982; UN, 1993)를 일으킴으로써 맛, 냄새, 색 등이 변할 수 있고, 이렇게 오염된 계류수는 사람이 음용할 수 없는 상태에까지 이를 수 있으며, 이들은 정수처리 과정에서 완전히 제거해야 하는 어려움이 따르게 된다. 따라서 계류수질 평가기준 항목에는 이들 맛, 냄새, 색도 등의 항목을 먹는 물 수질기준을 준용할 필요가 있다.

### 4) 수소이온농도(pH: Hydrogen ion exponent)

수소이온농도는 물의 산 또는 알칼리의 강도를 나타내는 데 유용하며, 수소이온농도의 역수에 상용대수를 취하여 구한 값을 그 용액의 pH라 한다. pH 7.0은 중성을 나타내며, 5.0이하의 강산성, 5.0~5.5는 산성, 5.5~6.0은 약산성, 6.0~6.5는 미산성, 7.0~7.5는 미알칼리성, 7.5~8.0은 약알칼리성, 8.0~8.5는 알칼리성, 8.5 이상은 강알칼리성을 표시하는 데 보통의 자연수는 pH 6.5~7.5의 범위에 있다. 또한 물이 pH7이하인 산성에서는 약



간의 산 또는 알칼리성 물질이 들어가더라도 수질이 잘 변하지만, pH7을 약간 넘는 알칼리성인 자연수는 보다 안정성이 높다(이승휘, 2000).

우리 나라에서는 하천이나 호소수질환경기준 상수원수 1급수의 경우 pH6.5~8.5, 먹는 물 수질기준의 경우 pH5.8~8.5로 정하고 있는 등 수질평가시 중요한 인자로 평가되고 있다. 계류수에서 pH가 낮아지면 인산이온이 용해하기 어렵게 되고, 알루미늄이온( $Al^{3+}$ )이나 망간이온( $Mn^{3+}$ )이 용해하기 쉽게 된다. 예를 들어 연어의 경우는 pH5.6 미만인 경우에는 생존이 어렵게 된다. 뿐만 아니라 산성토양은 생물에 필요한 물질이 결핍해 유해물질을 과잉으로 포함하게 된다. 즉, 토양유기물의 분해, 토양호흡이나 산소활성 등이 격감하는 등 생물의 서식에 영향을 미친다.

따라서 산림내 계류수의 경우 일부 지역에서는 먹는 물로 이용되므로 수소이온농도는 산림내 계류수질 평가항목으로서의 이용이 가능하고 그 범위도 먹는 물 수질기준의 범위가 타당할 것으로 생각된다(吳英敏과 申錫奉, 1991).

##### 5) 전기전도도(電氣傳導度, EC: Electrical Conductivity)

전기전도도는 물 속에 미네랄 등 이온성분, 불순물이 어느 정도 포함되어 있는가를 평가하기 위한 지표인자로 이용된다. 한편, 전기전도도는 주요한 무기성분농도와 긴밀한 상관관계를 나타내고, 염해상습지대에서는 염소이온량을 추정하는데 이용된다. 뿐만 아니라 물의 전기전도도가 과도하게 높으면 이 물을 흡수하여 생육하는 작물은 농도장애를 일으킨다(藤原俊六郎等, 1996).

산림내 계류수는 산림토양을 통과하거나 지하수가 용출되어 흐르는 물이 대부분이므로 우리 나라에서는 하천 및 호소수질환경기준, 먹는 물, 먹는

샘물 수질기준에는 수질평가 항목으로 선정되어 있지 않지만 지하수에서는 그 기준을 정하고 있다. 즉, 전기전도도가 700~1,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이면 공업용수, 400~700  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 은 농업용수, 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이하는 음용수로 사용할 수 있다. 따라서 산림내 계류수의 전기전도도 기준은 지하수에서의 전기전도도의 수질기준을 적용할 필요가 있다. 그러나 일반적인 청정한 산림내 계류수는 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 을 넘지 않으므로 전기전도도의 기준은 최대로 지하수의 음용 가능 전기전도도 기준인 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이하를 정하는 것이 타당하다고 생각된다.

#### 6) 용존산소(DO: Dissolved Oxygen)

용존산소는 물 속의 탄산이온 혹은 중탄산이온에 영향을 주는 인자로 산림내 계류수의 부영양화(富營養化)를 나타내는 지표로 작용한다(國府田悅男等, 1984). 이때 물 속에 녹을 수 있는 용존산소 값은 포화도로서 나타내는데, 물의 용존산소 포화량은 수온과 현장의 용존산소량, 표고를 파악해야 계산이 가능하다. 계산을, 예를 들어 수온이 15.0℃이고 그때 측정된 용존산소 값이 7.50mg/ℓ이면 15.0℃의 포화도 9.76mg/ℓ에서 실제 포화도는  $7.50 / 9.76 = 0.77$  즉, 77%가 된다. 포화도는 오염된 호소와 하천의 저층에서는 0에 가깝고, 플랑크톤이 많은 수역의 표층에서는 100%를 넘는다.

우리 나라에서는 하천 및 호소수질환경기준에서 이 항목을 수질평가 항목으로 설정하고 있으며, 이들 수질기준에서 자연환경보전을 위한 상수원수 1급의 용존산소 기준치를 7.5mg/ℓ 이상으로 정하고 있다. 한편 상수원수 2급과 3급수는 5mg/ℓ 이상으로 정하고 있다. 그러나 먹는 물과 먹는 샘물 수질기준에는 아직 이 항목이 수질평가 항목으로 선정되어 있지 않다. 따라서 계류수질기준에 의한 어류생태계에 영향하지 않는 용존산소 농도는 5mg/ℓ 이상이어야 하나, 산림내 계류수는 하천수질평가기준에 의한 상수원수 1급

수이므로 용존산소의 기준은 하천수질환경기준상 상수원수 1급수인 7.5mg/ℓ 이상의 값을 준용하는 것이 타당하다고 생각된다.

#### 7) 부유물질(SS: Suspended Solids)

우리 나라에서 부유물질량은, 하천수질환경기준에서는 상수원수 1급수와 2급수, 그리고 3급수에서 25mg/ℓ 이하로 규정하고 있고, 호소수질환경기준에서는 상수원수 1급수 1mg/ℓ 이하, 2급수 5mg/ℓ 이하, 3급수 15mg/ℓ 이하로 규정하고 있다. 그러나 먹는 물, 먹는 샘물 수질기준에는 이 항목이 포함되어 있지 않고 공업용수에서는 60mg/ℓ 이하로 규정하고 있다. 따라서 산림내 계류수에서의 부유물질량은 평시에는 미미하나 강우시에는 일시적으로 많아지게 되므로 부유물질량은 계류수가 안정된 상태에서 측정하되, 하천수질환경기준을 준용하는 것이 타당할 것으로 생각된다.

#### 8) 탁도(濁度, Turbidity)

홍수시에는 산림내 계류수도 탁도가 높아질 수 있지만 이는 일시적인 현상이므로 이 때의 탁도 값을 계류수질 평가기준으로 해서는 안될 것이다. 따라서 홍수시가 지나가고 강우가 안정되었을 때나 연중 탁도의 평균값 또는 탁도가 낮아지는 평상시의 탁도에 대하여 계류수질 평가기준을 정할 필요가 있다. 우리나라와 일본의 먹는 물 수질기준에서는 2도를 넘지 아니할 것으로 규정하고 있고, 청정한 계류수의 경우 탁도는 10~20mg/ℓ를 넘지 않으므로(程龍鎬 等, 1996; 1997) 계류수질 평가기준에서의 탁도는 먹는 물 수질기준 값을 적용하는 것이 타당하다고 생각된다.

## 나. 일반적으로 적용 가능한 인자(화학적 인자)

### 1) 칼슘( $\text{Ca}^{2+}$ , Calcium)

산림내 계류수에서 칼슘이나 알칼리도가 낮다는 것은 유역 내에 석회암 지역이 적고 용해염이 적기 때문인데, 이는 강우량이 많고 하천이 짧은 데에도 기인한다고 볼 수 있다. 즉, 계류수에 용존되어 있는 화학 성분으로서 칼슘이나 규산( $\text{SiO}_2$ )이 많으면 암석이나 토양에서 용출되었다고 할 수 있다(崔榮博, 1994). WHO나 캐나다에서의 음용수 기준은  $\text{Ca}^{2+}$ 을  $200\text{mg}/\ell$ 로 정하고 있는데, 청정한 산림내 계류수는 이보다 값이 낮으므로(朴在鉉과 禹保命, 1997), 계류수질 평가기준으로  $\text{Ca}^{2+}$ 의 함량은 최대  $200\text{mg}/\ell$  이하로 정할 필요가 있을 것으로 판단된다.

### 2) 인(P, Phosphorus)

산림내 계류수에서도 인은 오염원으로 작용할 수 있으므로 수량에 따른 인의 적절한 함유 범위의 결정은 계류수질 평가기준 정립시 포함시켜야 할 문제로 생각된다. 그러나 아직까지 산림내 계류수의 경우 인의 평균 용존량이 파악되지 않았거나 그 양이 많지 않으므로 계류수에서의 인의 평균 함량을 파악하는 것이 선행되어야 하며, 먹는 물 수질기준의 범위를 적용하는 것이 타당할 것으로 생각된다.

### 3) 마그네슘( $\text{Mg}^{2+}$ , Magnesium)

우리 나라의 경우 먹는 물과 먹는 샘물 수질기준에는 기준을 정하지 않

고 있으나, WHO와 캐나다의 음용수 기준은 150mg/ℓ 이하로 정하고 있다. 일본의 경우 계류수질 평가항목으로 선정하고 있으며, 우리 나라의 산림내 계류수에서는 그 용존량이 많지 않으므로(朴在鉉과 禹保命, 1997),  $Mg^{2+}$ 는 WHO의 음용수 기준인 최대 150mg/ℓ 이하로 정하는 것이 타당하다고 생각된다. 특히 이 성분은 칼슘과 함께 산림내 계류수 주변의 모암 및 암석 등 지질적 영향이 크고 인체에 중요한 작용을 하므로 계류수질 평가항목에 포함시켜야 할 것이다.

#### 4) 나트륨( $Na^+$ , Sodium)과 칼륨( $K^+$ , Potassium)

WHO에서의 음용수 기준은  $Na^+$ 의 함량을 200mg/ℓ 이하로 정하고 있는데, 일반적인 산림내 계류수에서는 그보다 높지 않으므로 해안지역을 포함한 산림내 계류수에서는 WHO의 음용수 기준인 최대 200mg/ℓ 을 준용할 필요가 있으며,  $K^+$ 는 일반적인 산림내 계류수에서는 100mg/ℓ 을 넘지 않으므로(程龍鎬 等, 1996; 1997), 100mg/ℓ 를 정하는 것이 타당하다고 생각된다.

#### 5) 철(Fe)

자연계에 널리 존재하며 혈액의 영양생리상 불가결한 성분으로써 산림내 계류수 중에 다량 함유되어 있다.

독성은 먹는 물의 0.5~1mg/ℓ 에서 금속 맛을 내며 철이 물 속에 0.3mg/ℓ 이하에서는 보통 맛을 느낄 수 없지만 0.2mg/ℓ 이하에서는 물맛에 좋은 영향을 준다. 또한, 0.3mg/ℓ 이상 함유되었을 때에는 물의 색깔이 적갈색 또는 황갈색을 띠고 0.05~0.1mg/ℓ 이상일 때 물의 탁도 및 색도가 증가될 수 있다.

WHO, 일본, 우리 나라에서 먹는 물의 기준은 0.3mg/ℓ 이하로 정하고 있다. 특히, 철은 소량 음용하였을 때는 인체에 무해하지만 다량 함유되어 있는 물을 장기간 복용하였을 경우에는 인체에 치명적인 해를 끼칠 수 있다. 따라서 철은 철광산 지역이나 일반 암석에서도 쉽게 계류수에 용존될 수 있으므로 계류수질 평가인자로 선정할 필요가 있으며, 물의 맛, 색을 변화시키는 정도인 0.3mg/ℓ 이하로 정하는 것이 타당하다고 생각된다.

#### 6) 망간(Mn)

망간은 자연계에 널리 존재하기에 산림내 계류수에서 쉽게 검출될 수 있는 항목으로써 물에 용존되어 철처럼 색도 등의 장애를 일으킨다. 이는 철에 비해서 제거가 대단히 곤란하고 물을 검게 변화시키는데 깊이 관여한다. 독성은 먹는 물의 0.5~1mg/ℓ 에서 금속 맛을 나타내고 0.05mg/ℓ 이상에서는 산화되어 흑색 또는 흑갈색으로 물을 변색시킨다. 특히 광산지역에서 검출될 가능성이 크므로 광산지역이 위치한 지역내 계류수에서는 수질평가항목으로 선정이 가능할 것으로 생각된다.

망간은 WHO에서의 음용수 기준은 0.1mg/ℓ, 우리 나라와 일본에서는 0.3mg/ℓ 로 정하고 있다. 그러나, 망간은 0.05mg/ℓ 이상에서 물의 색을 변화시키므로, 산림내 계류수에서는 색의 변화가 없어야 하는 점을 감안하여 음용수 기준은 0.05mg/ℓ 이하여야 된다고 생각된다.

#### 7) 알루미늄(Al<sup>3+</sup>)

일반적으로 산림내 표층토에서 쉽게 검출되며 강수시 지표수나 지중수에 용출되어 계류수로 유입될 수 있다. 특히 알루미늄은 최근 동물실험에서 포

유류의 중추 신경계에 영향을 미치고 노인성 치매의 일종인 알츠하이머병과 연관이 있으며, 언어장애를 일으키는 등의 피해를 주는 것으로 알려져 있어 알루미늄이 많이 용존되어 있는 물을 사람이 마셨을 경우 병을 유발할 수 있다. 이에 따라 환경부에서는 1995년부터 알루미늄을 음용수 관리기준에 포함시키고 있으며, 기준치는 0.2mg/ℓ으로 정하고 있다.

뿐만 아니라 WHO의 음용수 기준에서도 알루미늄을 0.2mg/ℓ이하로 정하고 있는데, 알루미늄은 최근의 산성우 등에 의한 산림토양에서의 최종 산물이므로 계류수질 평가기준에는 알루미늄이 포함되어야 할 것이며, WHO의 음용수 기준을 준용하는 것이 타당하다고 생각된다. 그러나 음용수의 정수시 응집제로 이용하는 황산알루미늄을 지나치게 많이 사용하면 수돗물에서 알루미늄의 양이 다량 검출되어 음용할 수 없게 될 수 있다.

#### 8) 염소이온( $\text{Cl}^-$ , Chloride)

계류수에서는 염소이온이 소량 검출되나 오염지역이나 바다가 근접한 지역에서는 다량 검출되므로 이로 인한 오염현상을 파악하는 데 유리한 지표로 이용된다(程龍鎬 等, 1996). 따라서, 염소이온은 계류수질 평가항목으로서 필수적이라 할 수 있다.

우리 나라의 먹는 물, 먹는 샘물, 공업용수 수질기준에는 염소이온을 공히 150mg/ℓ이하, WHO, 캐나다, 미국에서는 250mg/ℓ이하로 규정하고 있는데 이 양이 40mg/ℓ이상 용존되어 있는 물은 심장병과 간장병 환자에게 유해하며 250mg/ℓ이상인 경우에는 물의 짠맛을 느끼게 된다. 따라서 계류수질 평가기준에서의 염소이온은 먹는 물, 먹는 샘물에서와 같이 150mg/ℓ이하로 정하는 것이 타당할 것으로 생각된다.

**9) 암모니아성질소, 아질산성질소, 질산성질소, 황산이온( $\text{NH}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^- \text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ )**

미국과 이스라엘에서는 음료수 중에  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 이 10ppm 이상 포함된 물을 사용한 까닭에 젖먹이 아기가 체내에서  $\text{NO}_3^-$ 가 환원되어  $\text{NO}_2^-$ 로 되고 헤모글로빈이 그  $\text{NO}_2^-$ 에 들러붙어 혈액 중으로 산소를 운반하지 못하는 병인 메드헤모글로빈증에 걸려 사망하는 등 사회적인 문제를 야기하기도 하였다(崔榮博, 1994).

우리 나라의 먹는 물, 먹는 샘물 수질기준에는 공히 암모니아성질소를 0.5mg/ℓ 이하, 질산성질소는 WHO의 음용수 기준에는 10mg/ℓ 이하, 황산이온은 WHO의 음용수 기준 400mg/ℓ 이하이나 우리 나라에서는 200mg/ℓ 이하로 규정하고 있는 점을 고려할 때 우리 나라에서 정한 먹는 물, 먹는 샘물기준에서 정한 양에 준하는 양으로 결정하는 것이 바람직할 것으로 생각된다. 한편 암모니아성질소는, 미국에서는 10mg/ℓ, EC에서는 최대허용치를 11.3mg/ℓ로 규정하고 있기도 하다.

**10) 생물화학적산소요구량(BOD: Bio-Chemical Oxygen Demand)**

우리 나라의 하천수질환경기준에 생물화학적산소요구량의 기준치는 상수원수 1급수에서는 1mg/ℓ 이하, 2급수에서는 연어과 어류가 서식할 수 있는 3mg/ℓ 이하, 3급수에서는 잉어, 붕어 등이 서식할 수 있는 6mg/ℓ 이하로 정하고 있고 호소수질기준과 먹는 물, 먹는 샘물 수질기준에는 이 항목이 선정되어 있지 않으며 공업용수는 60mg/ℓ 이하로 규정하고 있다.



## 11) 화학적산소요구량(COD: Chemical Oxygen Demand)

화학적산소요구량은 생물화학적산소요구량과 마찬가지로 수중의 유기물질을 간접적으로 측정하는 방법으로 유기물질을 강력한 산화제로 화학적 산화시킬 때 소모된 산화제의 양에 상당하는 산소량을 말한다. 즉, 생물화학적산소요구량이 높다는 것은 물 속에 함유된 분해성 유기물 혹은 무기물이 분해되는 과정에서 물 속의 산소를 빼앗아 산소 부족현상이 많이 나타나게 된다는 것이고, 이는 오염물질이 많이 존재하는 물이라는 의미이다. 따라서 분해성 물질에 의하여 빼앗길 수 있는 산소의 총량을 화학적산소요구량이라 한다(김복영, 1997).

일반적으로 폐수의 화학적산소요구량의 값은 그 생물화학적산소요구량의 값보다 높은 데 이는 미생물에 의하여 분해되지 않는 유기물까지 화학적으로 산화시키기 때문이다. 특히, 화학적산소요구량은 해역과 호수 등에서 수질오염의 지표가 되며, 화학적산소요구량의 값이 크다는 것은 수중에 무기성 오염물질이나 비분해성 유기물질이 많이 포함되어 있다는 것을 의미한다. 우리 나라의 호소수질환경기준에 화학적산소요구량의 기준치는 상수원수 1급수에서는  $1\text{mg}/\ell$  이하, 2급수에서는  $3\text{mg}/\ell$  이하, 3급수에서는  $6\text{mg}/\ell$  이하로 정하고 있다.

그러나, 화학적산소요구량은 하천수질환경기준과 먹는 물, 먹는 샘물 수질기준에는 포함되어 있지 않으나 공업용수에는  $70\text{mg}/\ell$  이하로 규정하고 있는 데, 이는 일반적으로 생물화학적산소요구량과 함께 수질오염의 지표로 이용된다. 따라서 생물화학적산소요구량의 측정이 불가능할 경우에는 화학적산소요구량으로 계류수질 오염평가가 가능하다고 생각된다.

## 다. 일반적으로 적용 가능한 인자(생물학적 인자)

### 1) 병원미생물

우리 나라의 먹는 물 수질기준에는 이들 미생물에 관한 기준을 정하고 있는 데, 이에에는 보통 한천배지에서 무리를 형성할 수 있는 일반세균은 1mg 중 100을 넘지 아니할 것, 그람음성의 무아포성의 단간균으로 유당을 분해하여 산과 가스를 만드는 호기성 또는 통성혐기성균인 대장균군은 50mg에서 검출되지 아니할 것으로 규정하고 있다. 한편, 먹는 샘물 수질기준에서는 저온일반세균 100 CFU/ml이하, 중온일반세균 20 CFU/ml이하, 대장균군 음성/250ml, 분원성연쇄상구균 음성/250ml, 녹농균 음성/250ml, 아황산환원혐기성포자형성균 음성/50ml, 살모넬라 음성/250ml, 그리고 쉬겔라 음성/250ml로 규정하고 있다(權肅杓, 1989).

산림내 계류수에는 산림지역에 서식하는 각종 야생동물의 사체 및 분변이 계류에 유입될 수 있으며, 병원성 균을 함유한 야생동물의 사체나 분변이 계류에 유입되었을 경우 계류수를 음용수로 이용하고 있는 산림지역 인근에 거주하고 있는 주민들에게 병을 유발하는 원인으로 작용할 수 있다. 그러나 일반적으로 자연지역 산림내 계류수에서는 이들 병원성 균이 출현하지 않지만(朴在鉉, 1995), 야생동물의 사체 및 분변이 계류에 유입됨으로 병원성 균이 출현할 수도 있다. 따라서 우리 나라에서 정하고 있는 먹는 물 수질기준 항목에서의 일반세균 및 대장균군수 즉, 최근 문제가 되고 있는 약수나 계류수에서 야생동물의 배설물에 오염돼 발생하는 여시니아균은 어린이, 노약자 등에게 고열, 복통, 위장염, 신장질환 등의 증세를 나타나게 하고 녹막염, 신장병 등 합병증을 앓게 할뿐만 아니라 심할 경우 치사율이 50%에 이르는 등 병을 발생시킬 수 있으므로 이에 대하여는 계류수질 평가

기준 항목으로 정할 필요가 있다고 생각된다.

## 2) 생물상으로서의 지표

생물상으로서의 지표인자는 소하천이나 산림소유역에서 계류수질오염을 평가할 수 있는 지표로 작용하는데, 상류 깨끗한 물인 1급수에서 서식하는 생물종은 옆새우, 금강모치, 열목어, 가재, 뽕알락하루살이애벌레, 강도래애벌레, 멧모기애벌레 등이, 중류와 상류의 깨끗한 물인 2급수에서 서식하는 생물종은 플라나리아, 꼬리하루살이애벌레, 뱀잠자리에벌레, 다슬기, 피라미, 각날도래애벌레 등이 있다. 또한, 약간 더러운 물인 3급수에서 서식하는 생물종은 말조개, 붕어, 메기, 우렁이, 미꾸라지, 꼬마하루살이애벌레, 꼬마줄날도래애벌레, 등줄빛살알락하루살이애벌레 등이 있으며, 더러운 물인 4급수에서 서식하는 생물종은 거머리, 물달팽이, 실잠자리에벌레, 원돌이물달팽이 등이 있다. 아주 더러운 물인 4급수 이하에서 서식하는 생물종은 장구벌레, 실지렁이, 깔다구애벌레 등이 있다.

이처럼 물에 서식하는 각종 생물종에 의하여 수질등급을 판정함으로써 수질오염을 평가할 수 있는데, 생물은 수질이 좋고 나쁨에 따라 서식하는 종류가 다르며 살아 있는 종합환경지표라 할 수 있어 이러한 생물을 이용한 수질평가는 생물화학적산소요구량이나 화학적산소요구량 등의 화학적 방법보다도 쉽고 정확할 수 있어 산림내 계류수에서도 적용이 가능할 것으로 생각된다. 그러나 산림내 계류수에 서식하는 생물종과 수질등급에 대한 보다 자세한 관계 규명과 이를 근거로 한 지역적이며 지리적인 계류형태, 수온, 표고, 유속 등 입지환경의 구분에 따른 지표생물종의 선정도 적극적으로 검토할 필요가 있다.

## 라. 산림내 폐탄광지 및 채석장에서 발생 가능한 계류수 오염물질

### 1) 수은폐광지에서 유출될 수 있는 알킬수은 및 무기수은

무기수은은 알킬수은과 마찬가지로 수은광산에서 유출되며 이들로부터 유출되는 수은은 물 속에서 유독성 메틸수은으로 변하게 되는데, 무기수은은 이들 화합물 중에서 염화 제1수은( $Hg_2Cl_2$ )과 염화 제2수은( $HgCl_2$ )이 매우 독성이 크다. 특히, 이들은 인체의 구강, 인후부, 복부에 치명적인 악영향을 미치게 되며, 얼굴을 창백하게 하고 혈압을 떨어지게 할 뿐 아니라 맥박을 갑작스럽게 빠르게 하는 등의 작용을 하게 된다(權肅杓, 1989). 우리나라의 먹는 물 수질기준에는 이러한 알킬수은 및 무기수은을 통틀어 건강상 유해영향 물질인 수은으로 구분해 먹는 물에서는 검출되지 않아야 하고, WHO의 음용수 기준에는  $0.001mg/l$  이하로 정하고 있다. 따라서 수은은 건강상 인체에 치명적 영향을 미치므로 계류수에서는 검출되지 않아야 할 것으로 생각된다.

### 2) 연광산에서 유출될 수 있는 납과 그 화합물

산림내 연폐광지에서 유출될 수 있는 납과 그 화합물은 인체의 골수 등에 헤모글로빈 생성을 방해하며, 안면을 창백하게 하고 맥박수를 갑작스럽게 빠르게 하고 구토를 일으키며 혈변 등을 유발시킨다. 뿐만 아니라 소화기장애, 말초신경장애, 중추신경장애 등 인체에 심각한 증상을 발생시킨다. WHO와 우리나라의 먹는 물 수질기준에서는 이러한 납의 허용한계를  $0.05mg/l$ 를 넘지 않도록 정하고 있다. 일본의 경우 갯내수에서는 건강항목으로서 환경기준치를  $0.1mg/l$ 를 넘지 않도록 정하고 있는데, 산림내 계류수에서는

검출되지 않아야 할 것으로 생각된다.

### 3) 비소 및 그 화합물

이는 산림내 폐광지에서 유출될 수 있는 물질로 5~50mg으로도 급성 중독을 유발하며, 100~130mg이면 사람을 죽음에 이르게 한다. 특히, 인체에서 혈변을 일으키고 혈압을 떨어뜨리며, 경련과 혼수상태를 일으키고 만성적으로는 지각장애, 피부의 청색화, 부종, 구토, 간장비대, 빈혈 등을 유발하여 결국에는 순환기 장애로 사망에 이르게 한다. 일반적으로 오염된 예는 적으나 일본의 경우, 1971년에 미야자끼현 토국구 광산 주변에서 비소에 의한 만성중독 환자가 발생하였으며, 이와네현의 마즈오광산, 시마네현의 광산 등 광산에서 유래한 것이 많다(배재근과 오종민, 1995). WHO, 일본, 우리나라의 먹는 물 수질기준에는 0.05mg/ℓ를 넘지 않도록 규정하고 있으며, 일본의 경우 갭내수에서는 건강항목의 기준치를 0.05mg/ℓ를 넘지 않도록 규정하고 있다. 따라서 폐탄광지나 채석장이 산림유역 내에 있는 경우 계류 수질 평가기준에는 0.05mg/ℓ로 정하는 것이 타당하다고 생각된다.

### 4) 동과 그 화합물

이는 산림내 동폐광지에서 유출될 수 있는데 일반적으로 인체 내에는 100~150mg의 동이 있으며, 사람이 매일 섭취하는 음식물 중에는 약 2~5mg/ℓ이 함유되어 있다. 미량의 동은 인체 내에서 중요한 생리작용에 도움이 되지만 많은 동의 섭취는 식욕을 감퇴시키고 이상발한, 흉부통증, 호흡곤란, 구토, 소화기장애 등을 일으킨다. 구리이온이 물에 약 5~10mg/ℓ이 용존되어 있으면 썩내가 나고 쓴맛을 느끼게 된다. 즉, 동의 섭취가 많아지면

결국 복통, 구토, 설사, 경련을 일으켜 사람을 사망에 이르게 한다. 일반적으로 동폐광지에서 유래한 것이 많다. 일본의 경우, 1965년의 군마현의 조사에 의하면 5,320헥타르에 이르는 광대한 면적이 동으로 오염되어 이들 지역을 흐르는 계류에 악영향을 미쳤다(배재근과 오종민, 1995). WHO, 일본, 우리나라의 먹는 물 수질기준에는 1.0mg/ℓ를 넘지 말도록 규정하고 있고, 일본의 경우 갭내수에서는 생활환경항목으로서 환경기준치는 없으나 배수기준치를 3mg/ℓ를 넘지 않도록 규정하고 있다(地下水問題研究會, 1992). 따라서 계류수질 평가기준으로서의 동은 먹는 물 수질기준의 범위를 준용할 필요가 있을 것으로 판단된다.

#### 5) 시안 화합물

이는 휴폐업 광산에서 유출될 수 있는데 인체에 중독증상은 두통, 현기증, 의식장애, 경련 등을 일으키며, 급성 중독이 되면 체온이 급히 떨어져 사망에 이르게 된다. 치사량은 시안이온(CN<sup>-</sup>)으로서 60~120mg의 미량으로도 사람을 죽음에 이르게 하는 맹독성 물질이다. WHO의 음용수 기준은 0.1mg/ℓ 이하, 일본과 우리 나라의 먹는 물 수질기준에는 검출되어서는 안 되는 유해영향 물질로 구분해 놓고 있다. 이들 유해물질뿐만 아니라 벤젠, 톨루엔, 카바닐 등 유해 중금속이 있으나 이들 물질은 공업지역에서 유출될 수 있으므로 산림내 폐광지나 채석장에서는 쉽게 유출되기는 어려운 물질이다. 또한 납과 그 화합물, 동, 카드뮴, 유기인 등 유해 중금속은 청정한 산림내 계류수에서는 검출되지 않으므로(朴在鉉, 1995), 이러한 유해 중금속에 대한 계류수질 평가는 이들이 발생할 수 있는 폐광지나 채석장이 산림내에 위치하고 특히, 이들 지역으로부터 중금속이 지중 침투하거나 토양표면으로 유출되어 계류수에 유입될 수 있는가에 대한 면밀한 검토를 통하여

계류수질 평가인자에 포함시켜야 할 것이다. 한편, 일본의 경우 갭내수에서는 검출되어서는 안되는 물질로 배수기준치는 1mg/ℓ를 넘지 않도록 규정하고 있다.

#### 마. 세계보건기구(WHO)를 포함한 13개국에서의 먹는 물 수질기준 비교

경도, 수소이온농도, 탁도, 대기오염물질인 황산화물과 질소산화물에 근간한  $SO_4^{2-}$ 와  $NO_3^-$ -N, 해양의 바람이나 인접한 해양에 기원하는  $Cl^-$ , 동물의 사체나 분변 등으로 발생할 수 있는 일반세균과 대장균군, 산림토양에 존재하여 산성우 등이나 폐광지에서 유출되는 산성 폐수에 용해되어 계류수에서 검출될 수 있는 중금속류(Fe, Mn, Cu, Pb, As, Al, Cd, Zn), 산성우 등으로 용탈되어 산림토양이나 수목을 통과하는 임내우(수관통과우, 수간유하수), 토양수에 용출되어 계류수에 유입될 수 있는 영양염류( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ) 등 19개 항목에 대하여 우리나라를 비롯한 세계보건기구(WHO), 일본, 캐나다, 미국 등 13개국에서의 먹는 물 수질기준을 비교한 결과는 표 2-2에서와 같다.

환경기준은 사람의 건강을 보호하고 생활환경을 보전한다는 면에서 유지되는 것이 필요하며, 수질환경기준에서는 건강 항목과 생활환경 항목으로 나누어 설정되어 있다. 수질환경기준의 경우에는 물 이용이라는 측면에서 오염의 원인인 물질과 지표로 되는 성상이 틀리다. 따라서 하나의 물질에 대하여 사람의 건강보호와 생활환경의 보전에 걸친 영역을 통하여 유지되는 것이 필요한 수준이 2개 이상 존재한다고 생각되지만 이 경우에 환경보전상은 안전한 측에서 낮은 수준으로 유지하는 원칙이 필요하다.

따라서 청정한 산림내 계류수에서는 중금속 등이나 영양염류가 세계보건기구에서 정하고 있는 농도만큼 많지는 않으나(朴在鉉, 1995), 산성우 등의 피해나 폐광지 산성폐수가 계류로 유입되는 지역에서는 세계보건기구가 정한

농도나 그 이상 검출될 수 있으므로 산림내 계류수질 평가기준에서의 영양염류 농도는 세계보건기구가 정한 허용기준 농도보다 적거나 유사한 농도로 정할 필요가 있다고 생각된다. 그 한 예가  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$  등으로 이들 인자는 일반적인 산림내 계류수에서 모두 검출되는 영양염류이다. 이들 인자는 우리 나라와 일본을 비롯한 대부분의 나라에서는 먹는 물 수질기준에서 적용하고 있지 않으나, 세계보건기구에서는 각기  $200mg/l$ ,  $200mg/l$ ,  $150mg/l$ 로 정하고 있어 영양염류의 중요성을 인식하고 있음을 파악할 수 있다.



표 2-2. 세계보건기구(WHO), 일본, 캐나다, 미국 등 13개국에서의 먹는 물  
수질기준 비교

항목	한국	WHO	일본	캐나다	미국	서독	스웨덴
경도	300	500	300	81-120	-	-	20-40
pH	5.8-8.5	6.5-8.5	5.8-8.6	6.5-8.3	6.5-8.5	-	-
냄새	無	無	無	4	3	-	-
맛	無	無	無	4	-	-	-
색도	5도	15TCU	5도	5도	15TCU	-	20-40
탁도	2도	15NTU	2도	5JTU	1TU	-	-
SO <sub>4</sub> (mg/ℓ)	200	400	-	500	250	240	100-200
암모니아 성질소 (mg/ℓ)	0.5	-	-	0.5	-	0.6	0.05
아질산성 질소 (mg/ℓ)	-	-	10	10	-	-	-
NO <sub>3</sub> -N (mg/ℓ)	10	10	-	-	10	-	-
Cl(mg/ℓ)	150	250	200	250	250	-	100-300
일반세균	1ml중 100이하	-	1ml중 100이하	-	-	-	-
대장균군	50ml 음성	-	음성	-	1/100ml	-	-
Fe(mg/ℓ)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	1.5
Mn(mg/ℓ)	0.3	0.1	0.3	0.05	0.05	0.1	-
Cu(mg/ℓ)	1	1.0	1.0	1.0	1.0	-	-
Pb(mg/ℓ)	0.05	0.05	0.1	0.05	0.05	0.04	-
As(mg/ℓ)	0.05	0.05	0.05	0.01-0.5	0.05	0.04	-
Ca(mg/ℓ)	-	200	-	200	-	-	100
Al(mg/ℓ)	0.2	0.2	-	-	-	-	0.15
Na(mg/ℓ)	-	200	-	-	-	-	-
Mg(mg/ℓ)	-	150	-	150	-	-	-
Cd(mg/ℓ)	0.01	0.005	0.01	0.01	0.01	0.006	-
Zn(mg/ℓ)	1	5.0	1.0	5.0	5	-	1
CN(mg/ℓ)	無	0.1	無	0.01	-	0.005	-
Hg(mg/ℓ)	無	0.001	無	0.05	0.002	-	0.2-0.4

표 2-2. 계속

항목	프랑스	스위스	벨기에	스페인	이탈리아	소련
경도	-	-	-	-	-	-
pH	-	-	6.5	7.0-9.2	7.0-8.3	-
냄새	-	-	-	-	-	-
맛	-	-	-	-	-	-
색도	-	20	-	5-15	-	-
탁도	5	1	-	5-10	-	-
SO <sub>4</sub> (mg/ℓ)	250	-	250	200-400	100	-
암모니아성 질소 (mg/ℓ)	0.05	-	-	-	-	-
아질산성 질소 (mg/ℓ)	-	20	-	-	-	-
NO <sub>3</sub> -N (mg/ℓ)	-	-	-	-	-	-
Cl(mg/ℓ)	200-600	-	1,000	250-350	35	-
일반세균	-	20-300	0	-	-	10%
대장균군	0	-	0	-	-	-
Fe(mg/ℓ)	0.1	0.1	0.3	0.2-0.3	0.5	0.1
Mn(mg/ℓ)	0.05	-	0.1	(Fe+Mn)1. 5	0.2	-
Cu(mg/ℓ)	0.05	-	1	1.5	-	0.1
Pb(mg/ℓ)	0.05	-	0.05	0.1	0	0.1
As(mg/ℓ)	0.5	-	0.05	0.2	0	0.05
Ca(mg/ℓ)	-	-	-	100-200	160	-
Al(mg/ℓ)	-	-	0.1	-	-	-
Na(mg/ℓ)	-	-	-	-	-	-
Mg(mg/ℓ)	-	-	150	60-100	160	-
Cd(mg/ℓ)	0.005	-	0.01	-	0	0.01
Zn(mg/ℓ)	-	-	5	1.5	0	1.0
CN(mg/ℓ)	0.05	-	0.01	0.01	0	0.1
Hg(mg/ℓ)	0.001	-	-	-	0	0.05

## 2. 산림의 수원함양기능 및 수질정화기능 수량화

### 가. 강수의 전기전도도에 미치는 영향인자 분석

간벌, 가지치기시업을 실시한 광릉시험림 31, 33 임반내 전나무림과 잣나무림 유역에서 1998년 3월 1일부터 집중호우에 의한 산사태로 유출수량 관측시설이 매몰된 8월 4일까지 조사지역에 내린 8개 단위강우에 대하여 pH, 전기전도도, 용존양이온( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ), 용존음이온( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), 강수량, 양·음이온총량, 이온총량, 선행무강우일수 등 14종의 수질 환경인자와의 상관관계를 분석한 결과는 표 2-3과 같다. 단, 각 Table에서 \*는 5% 수준, \*\*는 1% 수준에서 유의함을 의미한다.

표 2-3. 강우의 전기전도도에 영향을 미치는 인자의 상관분석 결과

	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Na}^+$	음이온총량
양이온총량	0.9591**	0.9059**	-
이온총량	-	-	0.7949**

상관분석결과, 강수에 용존되어 있는  $\text{Ca}^{2+}$ 와 양이온총량과의 편상관계수는 0.9591로 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었으며,  $\text{Na}^+$ 와 양이온총량과의 편상관계수는 0.9059로 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었다. 또한, 음이온총량과 이온총량과의 편상관계수는 0.7949로 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었으나, 전기전도도는 13종의 수질 환경인자와 유의하지 않은 상관관계를 나타내었는데, stepwise를 이용한 다중회귀분석 결과, 전기전도도의 설명에 유의한 인자는 없는 것으로 분석되

었다. 이는 生原(1994)이 보고한 것과 같이 강수직후 단위강우 전체를 대상으로 분석하였기 때문에 전기전도도에 영향을 하는 각 용존이온의 영향을 파악할 수 없었던데 기인한 결과로 전기전도도에 미치는 각 용존이온의 영향을 파악하기 위하여는 강수직후로부터 종료시까지 시간별로 강수를 채수 분석할 필요가 있을 것으로 생각된다.

#### 나. 산림시업이 수관통과우의 전기전도도에 미치는 영향인자 분석

##### 1) 전나무림 시업구

전나무림 시업구 수관통과우에서 pH, 전기전도도, 용존양이온( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ), 용존음이온( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), 강수량, 양·음이온총량, 이온총량, 선행무강우일수 등 14종의 수질환경인자와의 상관관계를 분석한 결과는 표 2-4와 같다.

상관분석결과, 전나무림 시업구 수관통과우에서 전기전도도와  $\text{Cl}^-$ 와의 편상관계수는 0.8518로 5% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었으며,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , 음이온총량 등과는 편상관계수가 0.9246, 0.9664, 0.9717로 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었다. 한편  $\text{Ca}^{2+}$ 와 강수량, 양이온총량과의 각각의 편상관계수는 0.8456, 0.8804로 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를,  $\text{Cl}^-$ 는  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , 음이온총량과 5% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었다.  $\text{NO}_3^-$ 는  $\text{SO}_4^{2-}$ , 음이온총량과 각각 5%, 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었는데, stepwise를 이용한 다중회귀분석결과 다중회귀식은, 전나무림 시업구 수관통과우의 전기전도도 =  $3.0791 + 3.2678 \times$  음이온총량( $R^2 = 0.94$ )으로 전나무림 시업구 수관통과우의 전기전도도의 설명에 음이온총량이 영향을 하는 것으로 분석되었다.

표 2-4. 전나무림 시업구 수관통과우의 전기전도도에 영향을 미치는 인자의 상관 분석 결과

	EC	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	강수량
Cl <sup>-</sup>	0.8518*	-	-	-	-	-
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.9246**	-	0.8170*	-	-	-
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.9664**	-	0.8774*	0.8765*	-	-
강수량	-	0.8456*	-	-	-	-
음이온총량	-	0.8804*	-	-	-	0.8102*
양이온총량	0.9717**	-	0.9070*	0.9606**	0.9716**	-

## 2) 전나무림 비시업구

전나무림 비시업구 수관통과우에서 pH, 전기전도도, 용존양이온(Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>), 용존음이온(Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), 강수량, 양·음이온총량, 이온총량, 선행무강우일수 등 14종의 수질환경인자와의 상관관계를 분석한 결과는 표 2-5와 같다.

상관분석결과, 전나무림 비시업구 수관통과우에서 전기전도도와 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 음이온총량과의 각각의 편상관계수는 0.9817, 0.9621로 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었으며, Ca<sup>2+</sup>와 강수량, 양이온총량과의 편상관계수는 각각 0.8646, 0.8327로 1%, 5% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었다. 즉, 강수량이 증가할수록 수관통과우에 용존하는 Ca<sup>2+</sup>는 증가하는 결과를 나타내었는데, 이는 강수량이 증가할수록 전나무의 잎이나 가지와 빗물의 접촉 기회가 많아짐에 따라 전나무의 잎과 가지에서 용탈된 Ca<sup>2+</sup>가 증

가하였기 때문이라 생각된다. 한편,  $\text{Cl}^-$ 와 음이온총량과의 편상관계수는 0.8144로 5% 수준에서 유의한 정의 상관관계를,  $\text{SO}_4^{2-}$ 는 음이온총량과의 편상관계수가 0.9441로 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었는데, stepwise를 이용한 다중회귀분석결과 다중회귀식은, 전나무림 비시업구 수관통과우의 전기전도도 =  $-0.2 + 7.6801 \times \text{SO}_4^{2-}$  ( $R^2 = 0.96$ )으로 전나무림 비시업구 수관통과우에서 전기전도도의 설명에 유의한 인자는  $\text{SO}_4^{2-}$ 인 것으로 분석되었다.

표 2-5. 전나무림 비시업구의 전기전도도에 영향을 미치는 인자의 상관분석 결과.

	EC	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$
$\text{SO}_4^{2-}$	0.9817**	-	-	-
강수량	-	0.8646**	-	-
양이온총량	-	0.8327*	-	-
음이온총량	0.9621**	-	0.8144*	0.9411**

### 3) 잣나무림 시업구

잣나무림 시업구 수관통과우에서 pH, 전기전도도, 용존양이온( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ), 용존음이온( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), 강수량, 양·음이온총량, 이온총량, 선행무강우일수 등 14종의 수질환경인자와의 상관관계를 분석한 결과는 표 2-6과 같다.

표 2-6. 잣나무 시엽구 수관통과우의 전기전도도에 영향하는 인자의 상관분석

	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-	0.8220*	-	-
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-	0.8658*	0.9246**	-
양이온총량	0.9419**	-	-	-
음이온총량	-	0.8870*	0.9812**	0.9772**

상관분석결과, 잣나무림 시엽구 수관통과우에서 Ca<sup>2+</sup>와 양이온총량은 편상관계수가 0.9419로 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었으며, Cl<sup>-</sup>는 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 음이온총량과 5% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었다. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 음이온총량과의 편상관계수는 각각 0.9246, 0.9812로 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었으며, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>와 음이온총량과의 편상관계수는 0.9772로 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었다. 그러나 stepwise를 이용한 다중회귀분석결과 잣나무림 시엽구 수관통과우에서 전기전도도의 설명에 영향하는 인자는 유의하지 않은 것으로 분석되었다.

#### 4) 잣나무림 비시엽구

잣나무림 비시엽구 수관통과우에서 pH, 전기전도도, 용존양이온(Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>), 용존음이온(Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), 강수량, 양·음이온총량, 이온총량, 선행무강우일수 등 14종의 수질환경인자와의 상관관계를 분석한 결과는 표 2-7과 같다.

표 2-7. 잣나무 비시엽구 수관통과우의 전기전도도에 영향을 미치는 인자의 상관 분석 결과

	EC	Ca <sup>2+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	음이온총량
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.8242*	-	-	-	-
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.8179*	-	0.9475**	-	-
양이온총량	-	0.8496*	-	-	-
음이온총량	0.8425*	-	0.9791**	0.9886**	-
이온총량	0.8913*	-	0.9090**	0.9044*	0.9021*

상관분석결과, 잣나무림 비시엽구 수관통과우에서 전기전도도와 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 음이온총량, 이온총량과의 편상관계수는 각각 0.8242, 0.8179, 0.8425, 0.8913으로 5% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었으며, Ca<sup>2+</sup>와 양이온총량과의 편상관계수는 0.8496으로 5% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었다. 한편, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 음이온총량, 이온총량과 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었고, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>는 음이온총량, 이온총량과 5% 수준에서 유의한 정의 상관관계를, 음이온총량은 이온총량과 5% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었는데, stepwise를 이용한 다중회귀분석결과 다중회귀식은, 잣나무림 비시엽구 수관통과우의 전기전도도 = -12.1830 + 2.3151 x 이온총량(R<sup>2</sup> = 0.79)으로 잣나무림 비시엽구 수관통과우의 전기전도도의 설명에 이온총량이 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 이와 같은 결과는 선행연구결과(大類 等, 1994; 朴在鉉과 禹保命, 1997)와 일치하였다.



다. 산림시업이 수간류의 전기전도도에 미치는 영향인자 분석

1) 전나무림 시업구

전나무림 시업구 수간류에서 pH, 전기전도도, 용존양이온( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ), 용존음이온( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), 강수량, 양·음이온총량, 이온총량, 선행무강우일수 등 14종의 수질환경인자와의 상관관계를 분석한 결과는 표 2-8과 같다.

표 2-8. 전나무 시업구 수간류의 전기전도도에 영향하는 인자의 상관분석 결과

	pH	EC	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$
$\text{Ca}^{2+}$	-	0.9337*	-	-	-	-
$\text{K}^+$	-0.9147*	-	0.9082*	-	-	-
$\text{Cl}^-$	-	0.9346*	-	-	-	-
$\text{NO}_3^-$	-	0.9944**	0.9227*	-	0.9467**	-
양이온총량	-	0.9209*	0.9786**	0.8857*	0.8499*	0.9195*
음이온총량	-	0.9018*	-	-	0.9165*	0.9022*

상관분석결과, 전나무림 시업구 수간류에서 pH와  $\text{K}^+$ 와의 편상관계수는 -0.9147로 5% 수준에서 유의한 부의 상관관계를 나타내었다. 그러나 권우택 등(1996)은 pH저하에 관계하는 주요음이온은  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ 이고 pH를 높이는 주요 양이온은  $\text{NH}_4^+$ 와  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  등이라고 하였는데, 이 연구에서는  $\text{K}^+$ 만이 pH의 증감에 관계하는 것으로 분석되었다. 이는 타 용존이온보다  $\text{K}^+$

의 용탈속도가 빠르는데(똥 等, 1996) 기인한 결과라 생각되며, 김종갑 등 (1998)의 연구와도 유사한 결과이었다.

전기전도도는  $Ca^{2+}$ ,  $Cl^{-}$ ,  $NO_3^{-}$ , 양이온총량, 음이온총량 등과 각각 5%, 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었다.  $Ca^{2+}$ 는  $K^{+}$ ,  $NO_3^{-}$ , 양이온총량과 각각 5%, 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었으며,  $K^{+}$ 는 양이온총량과 5% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었다.  $Cl^{-}$ 와  $NO_3^{-}$ , 양이온총량, 음이온총량과의 편상관계수는 각각 0.9467, 0.8499, 0.9165로 5%, 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었고,  $NO_3^{-}$ 는 양이온총량, 음이온총량과 5% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었는데, stepwise를 이용한 다중회귀분석결과 다중회귀식은, 전나무림 시엽구 수간류의 전기전도도 =  $-1.2750 + 6.0452 \times NO_3^{-}$  ( $R^2 = 0.99$ )로 잣나무림 시엽구 수간류에서 전기전도도의 설명에 유의한 영향을 미치는 인자는  $NO_3^{-}$ 이었다.

## 2) 전나무림 비시엽구

전나무림 비시엽구 수간류에서 pH, 전기전도도, 용존양이온( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^{+}$ ,  $Na^{+}$ ), 용존음이온( $Cl^{-}$ ,  $NO_3^{-}$ ,  $SO_4^{2-}$ ), 강수량, 양·음이온총량, 이온총량, 선행무강우일수 등 14종의 수질환경인자와의 상관관계를 분석한 결과는 표 2-9와 같다.

상관분석결과, 전나무림 비시엽구 수간류에서 pH와 전기전도도,  $Cl^{-}$ ,  $NO_3^{-}$ ,  $SO_4^{2-}$ , 음이온총량, 이온총량 등과의 편상관계수는 각각 -0.8618, -0.8081, -0.8508, -0.8898, -0.8719, -0.8213으로 5% 수준에서 유의한 부의 상관관계를 나타내었으며, 전기전도도는  $Cl^{-}$ ,  $NO_3^{-}$ ,  $SO_4^{2-}$ , 음이온총량, 이온총량과 각각 1% 수준에서 고도로 유의한 정의 상관관계를 나타내었다.

표 2-9. 전나무 비시업구 수간류의 전기전도도에 영향하는 인자의 상관분석 결과

	pH	EC	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	강수량	음이온 총량
EC	-0.8618*	-	-	-	-	-	-	-
Cl <sup>-</sup>	-0.8081*	0.9803**	-	-	-	-	-	-
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.8508*	0.9900**	-	0.9545**	-	-	-	-
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-0.8898*	0.9921**	-	0.9530**	0.9950**	-	-	-
강수량	-	-	0.8044*	-	-	-	-	-
음이온총량	-	-	0.9469**	-	-	-	0.8079*	-
음이온총량	-0.8719*	0.9948**	-	0.9613**	0.9982**	0.9988**	-	-
이온총량	-0.8213*	0.9672**	-	0.9409**	0.9749**	0.9625**	-	0.9697**

Ca<sup>2+</sup>는 강수량, 양이온총량과 각각 5%, 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었고, Cl<sup>-</sup>은 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 음이온총량, 이온총량과 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었다. 또한, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 음이온총량, 이온총량과, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>는 음이온총량, 이온총량과 각각 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었다. 한편, 강수량은 양이온총량과, 음이온총량은 이온총량과 각각 5%, 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내어 강수량이 증가할수록 수목의 수간에서 용탈되는 Ca<sup>2+</sup> 등 양이온은 수간류에 더 많이 용존하는 것으로 분석되었다. 전나무림 비시업구 수간류에서 전기전도도에 유의한 상관관계를 나타낸 인자에 대하여 stepwise를 이용한 다중회귀분석결과 다중회귀식은, 전나무림 비시업구 수간류의 전기전도도 = 2.6528 +

$1.0464 \times \text{음이온총량} + 10.7788 \times \text{Cl}^- (R^2 = 0.99)$ 으로 잣나무림 비시업구 수간류에서 전기전도도의 설명에 영향을 미치는 인자는 음이온총량과  $\text{Cl}^-$  등 2개 인자이었다.

### 3) 잣나무림 시업구

잣나무림 시업구 수간류에서 pH, 전기전도도, 용존양이온( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ), 용존음이온( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), 강수량, 양·음이온총량, 이온총량, 선행무강우일수 등 14종의 수질환경인자와의 상관관계를 분석한 결과는 표 2-10과 같다.

표 2-10. 잣나무 시업구 수간류의 전기전도도에 영향을 미치는 인자의 상관분석 결과

	EC	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	음이온총량
$\text{Cl}^-$	0.9424**	-	-	-	-	-
$\text{NO}_3^-$	0.9786**	-	0.9465**	-	-	-
$\text{SO}_4^{2-}$	0.9671**	-	0.9582**	0.9913**	-	-
양이온총량	-	0.8868*	-	-	-	-
음이온총량	0.9758**	-	0.9624**	0.9970**	0.9979**	-
이온총량	0.9468**	-	0.8144*	0.9281**	0.9003*	0.9104**

상관분석결과, 잣나무림 시업구 수간류에서 전기전도도는  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , 음이온총량, 이온총량과 각각 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를

나타내었으며,  $\text{Ca}^{2+}$ 는 양이온총량과 5% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었다.  $\text{Cl}^-$ 은  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , 음이온총량과 1% 수준, 이온총량과는 5% 수준에서 유의한 정의 상관관계를,  $\text{NO}_3^-$ 는  $\text{SO}_4^{2-}$ , 음이온총량, 이온총량과 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를,  $\text{SO}_4^{2-}$ 는 음이온총량, 이온총량과 각각 5%, 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었는데, 이는 전나무림 시엽구, 비시엽구와 유사한 결과이었다. 그러나 잣나무림 시엽구 수간류에서 전기전도도는 강수량, 선행무강우일수 등의 인자와 유의하지 않은 결과를 나타내었는데, 이는 수종별 특성에 기인한 결과로(西尾 等, 1988) 생각된다. stepwise를 이용한 다중회귀분석결과 다중회귀식은, 잣나무림 시엽구에서 수간류의 전기전도도 =  $18.9426 + 5.2275 \times \text{NO}_3^-$  ( $R^2 = 0.96$ )으로 잣나무림 시엽구 수간류의 전기전도도의 설명에 영향하는 인자는  $\text{NO}_3^-$ 이었다.

#### 4) 잣나무림 비시엽구

잣나무림 비시엽구 수간류에서 pH, 전기전도도, 용존양이온( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ), 용존음이온( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), 강수량, 양·음이온총량, 이온총량, 선행무강우일수 등 14종의 수질환경인자와의 상관관계를 분석한 결과는 표 2-11과 같다.

상관분석결과, 잣나무림 비시엽구 수간류에서 pH와  $\text{K}^+$ 의 편상관계수는 -0.8452로 5% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었으며, 전기전도도는  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , 양이온총량, 음이온총량과 각각 5%, 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었고,  $\text{Ca}^{2+}$ 는  $\text{NO}_3^-$ , 양이온총량과 각각 5%, 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를,  $\text{K}^+$ 는 강수량과 5% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내 生原(1994)이 보고한 결과와 일치하였으며,  $\text{Cl}^-$ 은  $\text{NO}_3^-$ , 음이온총량과 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를,  $\text{NO}_3^-$ 는 양이온총량, 음이

온총량과 각각 5%, 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었다.

표 2-11. 잣나무 비시업구 수간류의 전기전도도에 영향을 미치는 인자의 상관분석 결과

	pH	EC	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Ca <sup>2+</sup>	-	0.9324*	-	-	-	-
K <sup>+</sup>	-0.8452*	-	-	-	-	-
Cl <sup>-</sup>	-	0.9307*	-	-	-	-
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-	0.9769**	0.8701*	-	0.9757**	-
강우량	-	-	-	0.8383*	-	-
양이온총량	-	0.9304*	0.9971**	-	-	0.8672*
음이온총량	-	0.9088*	-	-	0.9751**	0.9617**

이와 같은 결과를 stepwise를 이용하여 다중회귀분석한 결과 다중회귀식은, 잣나무림 비시업구 수간류의 전기전도도 =  $-6.1070 + 5.6103 \times \text{NO}_3^- + 10.2819 \times \text{K}^+$  ( $R^2 = 0.98$ )으로 잣나무림 비시업구 수간류에서 전기전도도의 설명에 영향을 미치는 인자는 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, K<sup>+</sup> 등 2개 인자이었다.

#### 라. 산림시업이 토양수의 전기전도도에 미치는 영향인자 분석

##### 1) 전나무림 시업구

전나무림 시업구 토양수에서 pH, 전기전도도, 용존양이온(Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>,

Na<sup>+</sup>), 용존음이온(Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), 강수량, 양·음이온총량, 이온총량, 선행무강우일수 등 14종의 수질환경인자와의 상관관계를 분석한 결과는 표 2-12와 같다.

표 2-12. 전나무 시업구 토양수의 전기전도도에 영향하는 인자의 상관분석 결과

	EC	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	강수량
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-	0.9444**	-	-	-
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.8973*	-	-	-	-
강수량	-	0.9433**	-	0.9765**	-
양이온총량	-	0.9736**	-	0.9513**	0.9282**
음이온총량	-	-	-0.7906*	-	-
이온총량	-	0.8041*	-	-	-

상관분석결과, 전나무림 시업구 토양수에서 Ca<sup>2+</sup>는 양이온총량, 이온총량과 각각 5%, 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었으며, Mg<sup>2+</sup>는 강수량과 5% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었다. Cl<sup>-</sup>은 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 음이온총량과 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>는 음이온총량과 5% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었으며, 양이온총량은 이온총량과 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었다. 그러나 stepwise를 이용한 다중회귀분석결과 전나무림 시업구 토양수에서 전기전도도의 설명에 영향하는 인자는 유의하지 않은 결과를 나타내어 강수의 전기전도도의 설명에 영향하는 인자 분석 결과와 유사한 결과이었다.

## 2) 전나무림 비시업구

전나무림 비시업구 토양수에서 pH, 전기전도도, 용존양이온( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ), 용존음이온( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), 강수량, 양·음이온총량, 이온총량, 선행무강우일수 등 14종의 수질환경인자와의 상관관계를 분석한 결과는 표 2-13과 같다.

표 2-13. 전나무 비시업구 토양수의 전기전도도에 영향을 미치는 인자의 상관분석 결과

	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	양이온총량
$\text{SO}_4^{2-}$	-	-	0.9208**	-	-
강수량	-	0.8596*	-	-	-
양이온총량	0.9602**	-	-	-	-
음이온총량	-	-	0.9684**	0.9006*	-
이온총량	0.8777*	-	-	-	0.9646**

상관분석결과, 전나무림 비시업구 토양수에서 전기전도도와  $\text{SO}_4^{2-}$ 와의 편상관계수는 0.8973으로 5% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었다.  $\text{Ca}^{2+}$ 는  $\text{NO}_3^-$ , 강수량, 양이온총량, 이온총량과 각각 5%, 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를,  $\text{K}^+$ 는 음이온총량과 5% 수준에서 유의한 부의 상관관계를 나타내었다.  $\text{NO}_3^-$ 는 강수량, 양이온총량과 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었는데, 이는 강수량 증가에 따른 토양수에서  $\text{NO}_3^-$ 는 유출이 증가하였기 때문(大類等, 1992)이라 생각된다. 한편, 강수량은 양이온총량과 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었는데, 이와 같은 결과도  $\text{NO}_3^-$ 와 같이 토양수에서의 용탈이 증가한데 기인한 결과라 생각된다. 이와 같은



결과를 stepwise를 이용한 다중회귀분석결과 다중회귀식은, 전나무림 비시업구 토양수의 전기전도도 =  $-67.5842 + 13.4207 \times \text{SO}_4^{2-}$  ( $R^2 = 0.81$ )로 전나무림 비시업구 토양수에서 전기전도도의 설명에 영향하는 인자는  $\text{SO}_4^{2-}$ 이었다.

### 3) 잣나무림 시업구

잣나무림 시업구 토양수에서 pH, 전기전도도, 용존양이온( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ), 용존음이온( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), 강수량, 양·음이온총량, 이온총량, 선행무강우일수 등 14종의 수질환경인자와의 상관관계를 분석한 결과는 표 2-14와 같다.

표 2-14. 잣나무 시업구 토양수의 전기전도도에 영향하는 인자의 상관분석 결과

	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	양이온 총량
$\text{Na}^+$	0.8150*	-	-	-	-	-
$\text{Cl}^-$	-	0.8106*	-	-	-	-
$\text{NO}_3^-$	-	-	-	0.9038*	-	-
강수량	-	-	-	-	0.8256*	-
양이온총량	0.9680**	-	0.9171**	-	-	-
음이온총량	-	-	-	0.8336*	-	-
이온총량	-	-	-	-	-	0.8096*

상관분석결과, 잣나무림 시업구 토양수에서  $Ca^{2+}$ 는  $Na^+$ , 양이온총량과 각각 5%, 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었으며,  $Mg^{2+}$ 는  $Cl^-$ 과,  $Na^+$ 는 양이온총량과 각각 5%, 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었다.  $Cl^-$ 은  $NO_3^-$ , 음이온총량과 5% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었으며,  $SO_4^{2-}$ 는 강수량과 5% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었는데, 이는 강수량이 증가할수록 토양수에서 용출되는  $SO_4^{2-}$ 는 증가한다는 大類 等(1992)의 연구결과와 일치하는 결과이었다.

이와 같은 결과를 stepwise를 이용하여 다중회귀분석한 결과 다중회귀식은, 잣나무림 시업구 토양수에서 전기전도도 =  $59.3537 - 1.0188 \times$  선행무강우일수( $R^2 = 0.57$ )로 잣나무림 시업구 토양수의 전기전도도 설명에 유의하게 영향하는 인자는 선행무강우일수이었다.

#### 4) 잣나무림 비시업구

잣나무림 비시업구 토양수에서 pH, 전기전도도, 용존양이온( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ), 용존음이온( $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ), 강수량, 양·음이온총량, 이온총량, 선행무강우일수 등 14종의 수질환경인자와의 상관관계를 분석한 결과는 표 2-15와 같다.

상관분석결과, 잣나무림 비시업구 토양수에서 pH와 전기전도도와의 편상관계수가 -0.9606으로 1% 수준에서 유의한 부의 상관관계를 나타내었으며,  $Ca^{2+}$ 는  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ 와 5% 수준에서 유의한 부와 정의 상관관계를 나타내었다.  $Mg^{2+}$ 는  $NO_3^-$ , 이온총량과 각각 5%, 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를,  $NO_3^-$ 는 음이온총량, 이온총량과 5% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었다. 이와 같은 결과를 stepwise를 이용하여 다중회귀분석한 결과 다중회귀식은, 잣나무림 비시업구 토양수에서 전기전도도 =  $-33.3946 + pH -$

0.1831 x 음이온총량( $R^2 = 0.99$ )으로 잣나무림 비시업구 토양수에서 전기전도도의 설명에 유의한 영향을 미치는 인자는 pH, 음이온총량 등 2개 인자이었다.

표 2-15. 잣나무림 비시업구 토양수의 전기전도도에 영향하는 인자의 상관분석 결과

	EC	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	강수량
Ca <sup>2+</sup>	0.8090*	-	-	-	-	-
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-	-	0.9422**	-	-	-
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-	-	0.9587**	0.8912*	-	-
강수량	-0.9114**	0.9062**	-	-	-	-
양이온총량	0.8414*	0.9618**	-	-	-	0.9580**
음이온총량	-	-	0.9852**	0.9729**	0.9701**	-

#### 마. 산림시업이 계류수의 전기전도도에 미치는 영향인자 분석

##### 1) 전나무림 계류수

전나무림 시업구와 비시업구가 유역내에 포함되어 있는 전나무림 계류수에서 pH, 전기전도도, 용존양이온(Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>), 용존음이온(Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), 강수량, 양·음이온총량, 이온총량, 선행무강우일수 등 14종의 수질환경인자와의 상관관계를 분석한 결과는 표 2-16과 같다.

상관분석결과, 전나무림 계류수에서 전기전도도는 Ca<sup>2+</sup>, 양이온총량과 각

각 5% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었으나, 강수량과는 1% 수준에서 유의한 부의 상관관계를 나타내었다. 또한,  $Ca^{2+}$ 는 강수량, 양이온총량과 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었다.  $Cl^-$ 은  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ , 음이온총량 등과 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를,  $NO_3^-$ 는  $SO_4^{2-}$ , 음이온총량과 각각 5%, 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었다.  $SO_4^{2-}$ 는 음이온총량과 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를, 강수량은 양이온총량과 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었다. 이와 같은 결과를 stepwise를 이용하여 다중회귀분석한 결과 다중회귀식은, 전나무림 계류수에서 전기전도도 =  $46.4258 - 0.0794 \times \text{강수량} - 2.0913 \times Na^+$  ( $R^2 = 0.94$ )으로 전나무림 계류수에서 전기전도도의 설명에 유의한 영향을 미치는 인자는 강수량,  $Na^+$  등 2개 인자이었다.

표 2-16. 전나무림 계류수의 전기전도도에 영향하는 인자의 상관분석 결과

	pH	$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$	$NO_3^-$
EC	-0.9606**	-	-	-
$Cl^-$	-	-0.8092*	-	-
$NO_3^-$	-	-	0.8713*	-
$SO_4^{2-}$	-	0.8025*	-	-
음이온총량	-	-	-	0.8176*
이온총량	-	-	0.9645**	0.8896*

## 2) 잣나무림 계류수

잣나무림 시업구와 비시업구가 유역내에 포함되어 있는 잣나무림 계류수에서 pH, 전기전도도, 용존양이온( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ), 용존음이온( $Cl^-$ ,

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), 강수량, 양·음이온총량, 이온총량, 선행무강우일수 등 14종의 수질환경인자와의 상관관계를 분석한 결과는 표 2-17과 같다.

표 2-17. 잣나무림 계류수의 전기전도도에 영향하는 인자의 상관분석 결과

	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	강수량
Cl <sup>-</sup>	-	-0.8373*	-	-	-	-
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-	-0.8306*	-	0.9399**	-	-
강수량	0.8712*	-	-	-	-	-
양이온총량	0.9120**	-	-	-	-	0.8957*
음이온총량	-	-	0.8242*	0.9885**	0.9705**	-

상관분석결과, 잣나무림 계류수에서 Ca<sup>2+</sup>는 강수량, 양이온총량과 각각 5%, 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었으나, Mg<sup>2+</sup>는 Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>와 5% 수준에서 유의한 부의 상관관계를 나타내었다. 그러나 Cl<sup>-</sup>은 음이온총량과 5% 수준에서 유의한 정의 상관관계를, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 음이온총량과 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었으며, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>는 음이온총량과 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었다. 또한, 강수량은 양이온총량과 5% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었는데, 이는 산림유출수의 이온량은 유출수량에 의해 지배된다는 宗宮(1993)의 연구결과와 유사한 결과이었다. 이와 같은 결과를 stepwise를 이용해 다중회귀분석한 결과 다중회귀식은, 잣나무림 계류수에서 전기전도도 = 37.1353 + 0.8124 x 이온총량 - 3.4900 x Na<sup>+</sup>(R<sup>2</sup> = 0.87)로 잣나무림 계류수에서 전기전도도의 설명에 유의한 영향을 미치는 인자는 이온총량, Na<sup>+</sup> 등 2개 인자이었다.

바. 강우와 전나무림과 잣나무림에서 시엽구 및 비시엽구의 임내우(수관통과우, 수간류)·토양수, 계류수를 통합했을 때 전기전도도 영향인자 분석

이 연구에서 강우, 전나무림과 잣나무림에서 시엽구와 비시엽구의 임내우(수관통과우, 수간류)·토양수, 계류수를 통합했을 때 pH, 전기전도도, 양이온( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ), 음이온( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), 강수량, 양·음이온총량, 이온총량 그리고 선행무강우일수 등 14종의 인자에 대한 상호간의 관계를 spss/pc+를 이용하여 상관분석한 결과는 표 2-18과 같다.

Spss/pc+를 이용한 상관분석결과, pH와 전기전도도는 편상관계수가 -0.2855로 1% 수준에서 유의한 부의 상관관계를 나타내었는데, 이는 전기전도도의 상승으로 인한 pH저하의 결과로 치환성 양이온인  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  등의 용탈이 많아지고, 강우의 경우 낮은 pH 범위에서  $\text{SO}_4^{2-}$ 와  $\text{NO}_3^-$  등 강수성분농도가 증가하면  $\text{H}^+$  농도도 증가하는데, 높은 pH 범위에서의 강수성분농도 증가는 중화성분 등에 의한 결과가 많고 강수의 산성도를 낮추어 중~알칼리성으로 유도하는 작용을 한다는 결과에 기인하는 결과(河野 等, 1996; 金明姬 等, 1997; 김종갑 등, 1998)로 전기전도도는 pH와 부의 상관관계를 나타낸다는 선행연구결과(地下水問題硏究會, 1992; 玄海男 等, 1994; 이충규 등, 1998)와 일치하는 결과이었다. 이와 같은 결과는 pH와  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , 음이온총량, 이온총량과의 편상관계수가 각각 -0.1735, -0.2489, -0.3518, -0.3483, -0.3474, -0.3128로 5%, 1% 수준에서 유의한 부의 상관관계를 나타낸 결과로서 입증된다고 생각된다. 또한, 권우택 등(1996)은, pH의 지배인자는 음이온으로서  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  등 3개 인자와 양이온으로서  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  등 4개 인자가 영향한다고 하였으나, 이 연구에서는  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  등은 pH와 상관관계가 유의하지 않은 결과를 나타내었는데,

이는 타 이온의 영향이 크데 기인한 결과 때문이라 생각된다.

한편, pH와 강수량은 편상관계수가 0.3230으로 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었는데, 이는 강수량이 증가할수록 용존이온농도의 희석효과 및 완충작용을 일으키는 치환성이온의 용탈이 증가하였기 때문으로 김종갑 등(1998), 平井 等(1990), 류성규 등(1996)이 보고한, 강수의 pH와 높은 상관관계를 갖는 인자는 강수량이었다는 연구결과와 일치하는 결과이었다.

전기전도도와  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$  등의 양이온과는 편상관계수가 각각 0.1676, 0.4603, 0.1506으로 5%, 1% 수준에서 유의한 정의 상관관계를 나타내었으며,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$  등의 음이온과는 편상관계수가 각각 0.8892, 0.9305, 0.9344로 1% 수준에서 고도로 유의한 정의 상관관계를 나타내었다. 또한, 전기전도도와 양이온총량, 음이온총량, 이온총량과는 편상관계수가 각각 0.3123, 0.9441, 0.9250으로 1% 수준에서 고도로 유의한 정의 상관관계를 나타내었는데, 이는 전기전도도가 용존물질의 양을 파악하는 지표(大類 等, 1994; 류성규 등, 1996; 朴在鉉과 禹保命, 1997; 李憲浩, 1997) 임을 의미하는 결과이다. 한편, 전기전도도와 강수량은 편상관계수가 -0.2945로 1% 수준에서 유의한 부의 상관관계를 나타내어 강수량의 증가에 따라 전기전도도의 감소 즉, 용존물질농도는 낮아지는 결과를 나타내었다. 따라서 이와 같은 결과로 판단할 때 강수에 용존되어 있는 성분농도와 강수량은 대기에서 강우과정을 경과한 토양이나 수역 등 지상으로 강하하는 오염물질의 총량을 산출하는데 중요한 인자이며(권우택 등, 1996; 김희강 등, 1996), 강수량의 증가에 따른 유출수량의 증가로 전기전도도는 감소하였다는 선행연구결과(片山 等, 1986; 大類 等, 1992; 1995)와 일치하는 결과이었다. 그러나 Brooks 등(1994)은, 전기전도도는 용존물질의 증가를 나타낸다는 점 이외에 수질에서의 의미는 적다고 하였는데, 이 연구에서는 전기전도도가 각 용존이온 이외에 pH, 강수량과도 유의한 상관관계를 나타내어 강우, 임내우

(수관통과우, 수간류), 토양수, 계류수에서 전기전도도는 이온동태 뿐만 아니라 pH 등 현행 하천수질환경기준 및 먹는 물 수질기준의 지표인자를 설명할 수 있는 인자이므로 향후 산림내 계류수질 평가기준 설정시 중요한 평가항목으로 선정이 가능할 것으로 생각된다.

한편, 선행연구결과(朴在鉉과 禹保命, 1997) 강우, 수관통과우, 토양수, 계류수에서 전기전도도의 설명에 유의한 영향을 미치는 인자인 선행무강우일수는  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$  등 치환성이온, 강수량, 양이온총량과 편상관계수는 각각 0.2650, 0.2977, 0.6082, 0.2449로 1% 수준에서 유의한 正의 상관관계를 나타내었으나, pH, 전기전도도,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$  등 음이온, 음이온총량 등과는 유의하지 않은 상관관계를 나타내었는데, 이는 양이온의 영향이 큰데 기인한 결과라 생각된다. 또한, 강우, 전나무림과 잣나무림의 시업구 및 비시업구의 임내우(수관통과우, 수간류)·토양수, 계류수에서 전기전도도에 유의한 상관관계를 나타낸 양이온( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ), 음이온( $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ), 양·음이온총량, 이온총량, 강수량, 선행무강우일수 등 12종의 인자에 대하여 stepwise를 이용한 다중회귀분석결과, 강우, 전나무림과 잣나무림에서 시업구 및 비시업구의 임내우(수관통과우, 수간류)·토양수, 계류수의 전기전도도 설명에 유의한 영향을 미치는 인자는 양·음이온총량,  $Na^+$ ,  $Cl^-$ , pH 등 5개 인자이었으며, 중상관계수는 0.95로 1% 수준에서 유의하였다. 이를 다중회귀식으로 나타내면,  $전기전도도 = 1.9660 \times 음이온총량 + 0.4681 \times 양이온총량 - 3.1520 \times Na^+ + 3.3781 \times Cl^- + 4.5621 \times pH (R^2 = 0.90)$ 이었다. 이와 같은 결과는 강우, 전나무와 잣나무림에서 시업구 및 비시업구의 임내우(수관통과우, 수간류)·토양수, 계류수에서 강수량과 선행무강우일수, 양이온( $Na^+$ ), 음이온( $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ), 양·음이온총량, pH 등이 수질에 중요한 영향관계가 있음을 의미한다(平井 等, 1990; 宗宮, 1993; Brooks 등, 1994; 朴在鉉과 禹保命, 1997; 程龍鎬 等, 1997).



표 2-18. 전나무림과 잣나무림에서 시업구와 비시업구의 임내우(수관동과우, 수간류), 도암수, 계류수들  
 통합했을 때의 상관분석 결과

	pH	EC	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	강우량	양이온 총량	음이온 총량	이온 총량
EC	-0.2955***												
Ca <sup>++</sup>	-	0.1879*											
Mg <sup>++</sup>	-0.1735*	0.4603***	0.2365***										
K <sup>+</sup>	-	0.1508*	-	-									
Na <sup>+</sup>	-	-	-	-									
Cl <sup>-</sup>	-0.2499***	0.8882***	-	0.4712***	-	-							
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.3518***	0.8905***	0.1421**	0.4514***	-	-	0.8040***						
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-0.3483***	0.8344***	-	0.4882***	0.1504**	-	0.8818***	0.8543***					
강우량	0.3230***	-0.2845***	-0.4489***	-0.1857**	-	-0.2739**	-0.3288***	-0.3854***	-0.3432***				
양이온 총량	-	0.3123***	0.8904***	0.3589***	0.3289**	-	0.2180**	0.2758***	0.2944***	0.3421***			
음이온 총량	-0.3474***	0.8441***	-	0.4722***	0.1322*	-	0.8185***	0.8853***	0.8882***	-0.3575***	0.2853***		
이온 총량	-0.2129***	0.8269***	0.3504***	0.5209***	0.2112**	-	0.8785***	0.8610***	0.8612***	-0.2172***	0.5215***	0.8812***	
선행부 강우일	-	-	0.2850**	-	-	0.2877**	-	-	-	0.8082***	0.2449**	-	-

## 사. 산림의 수자원함양기능 수량화 및 영향인자 규명

### 1) 임황

임내우(수관통과우, 수간류)와 토양수를 채취한 전나무림과 잣나무림의 시업구와 비시업구에서 임분특성은 표 2-19와 같고, 시업 후 2년 6개월이 경과되었을 때의 울폐도는 그림 2-3과 같다.

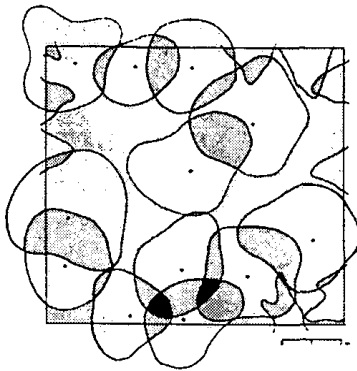
표 2-19. 전나무림과 잣나무림의 임분 특성

구 분	수고(m)		흉고직경(cm)		근주 면적 (m <sup>2</sup> )	임목수
	시업전	시업후	시업전	시업후		
전나무 시업구	7.0	9.8	10.1	15.3	0.2	12
전나무 비시업구		8.0		10.6		
잣나무 시업구	7.9	10.9	12.4	15.9	0.2	9
잣나무 비시업구		10.3		14.5		

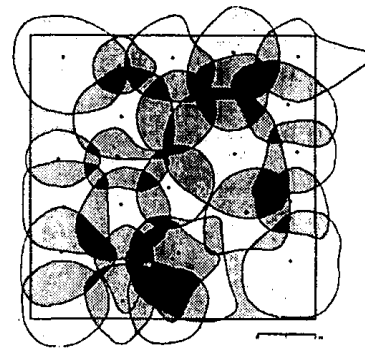
시업 후 약 2년 6개월이 경과된 1998년 9월 현재, 전나무림과 잣나무림에서 임목의 평균수고는 간벌 및 가지치기 전의 평균수고 7.0, 7.9m 보다 시업구에서는 각각 2.8, 3.0m 더 성장하였으며, 비시업구에서는 각각 1.0, 2.4m 성장하여 전나무림, 잣나무림 모두 시업구가 비시업구보다 임목의 성장이 큰 것으로 나타났다. 또한, 전나무림과 잣나무림의 평균흉고성장량은 산림시업 전 각각의 평균흉고성장량 10.1, 12.4m 보다 시업구에서는 5.2, 3.5cm, 비시업구에서는 0.5, 2.1cm가 더 성장하여 간벌 및 가지치기 한 시

업구가 비시업구보다 더 생장한 것으로 나타났다.

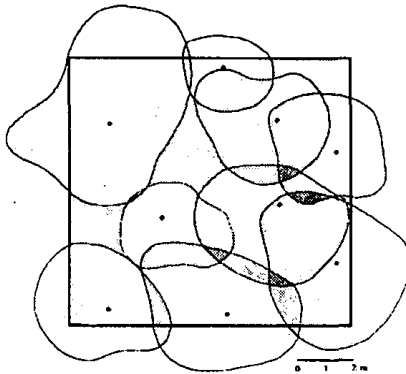
또한 시업후 2년 6개월이 경과된 시점에서 조사구 내의 울폐도는, 전나무림에서 비시업구는 96.8%이었으나 시업구는 80.4%이었으며, 잣나무림에서는 비시업구가 89.5%이었으나 시업구는 81.5%로 전나무림, 잣나무림 모두 시업구가 비시업구 보다 각각 16.4%, 8% 감소하였다.



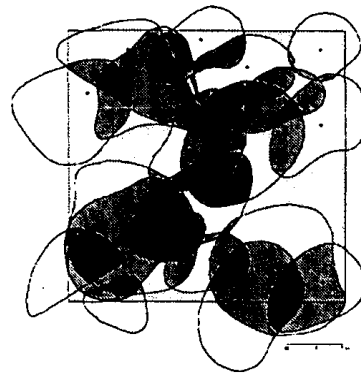
전나무림 시업구



전나무림 비시업구



잣나무림 시업구



잣나무림 비시업구

그림 2-3. 전나무림, 잣나무림 시업구, 비시업구의 울폐도

## 2) 토양의 물리적 특성

산림시업에 따라 산림토양의 강수침투구조는 개선되는 것으로 나타났는데, 시업 후 2년 6개월이 경과된 시점에서 표층토양에서의 조공극률(pF2.7)은 전나무림 시업구가 비시업구 보다 5.4% 높게 나타났으며, 잣나무림에서도 시업구가 비시업구 보다 1% 높은 결과를 나타내었다. 또한, 총공극률은 전나무림 시업구가 비시업구 보다 약 1.5% 높게 나타났으며, 잣나무림 시업구는 비시업구 보다 약 0.6% 높은 결과를 나타내었다.

토양의 가비중은 산림시업으로 인해 감소되었는데, 전나무림 시업구는 비시업구 보다 0.039g/cm<sup>3</sup> 낮았으며, 잣나무림 시업구는 비시업구 보다 0.016g/cm<sup>3</sup> 낮았다. 그러나 전나무림과 잣나무림에서 시업구 및 비시업구 표층토양(0~7.5cm)의 가비중은 선행연구결과(박재현, 1996) 보다 높은 값을 나타내었는데, 이는 광릉시험림 내 조사지역이 화강편마암 등 모암의 노출률이 높는데 기인한 결과라 생각된다. 전나무림과 잣나무림에서 시업구와 비시업구 표층 토양의 조공극률, 총공극률, 가비중은 표 2-20과 같다.

표 2-20. 전나무림, 잣나무림 표층토양의 조공극률(pF2.7, %), 총공극률(%), 토양가비중(g/cm<sup>3</sup>)

구 분	조공극률 (pF2.7, %)	총공극률(%)	토양가비중 (g/cm <sup>3</sup> )
전나무 시업구	42.4	64.7	0.936
전나무 비시업구	37.0	63.2	0.975
잣나무 시업구	45.4	66.6	0.886
잣나무 비시업구	44.4	66.0	0.902

### 3. 최적 산림관리기법의 적용성 검토 및 체계화(임상별 수원함양기능 분석)

#### 가. 표층토양에서의 조공극률에 영향을 미치는 인자의 상관분석

토양의 조공극률에 영향을 미치는 인자를 분석하기 위해 입지 및 토양환경인자 16종, 임분환경인자 7종 등 총 23종에 대하여 spss/pc+를 이용한 상관분석을 실시하였으며, 그 결과는 표 2-21과 같다.

상관분석 결과, 표층토양에서의 조공극률과 조대공극률은 편상관계수가 0.318로 1% 수준에서 유의한 正의 상관관계를 나타내, 표층토양에서의 조공극률은 조대공극률에 영향 관계가 높은 것으로 분석되었다. 또한, 표층토양에서의 조공극률은 상층식생 울폐도와 편상관계수가 0.313으로 5% 수준에서 유의한 正의 상관관계를 나타내었는데, 이는 小柏 등(1991)의 연구결과를 뒷받침하는 결과이었다. 한편, 상층식생 울폐도와 하층식생 피복도와의 편상관계수는 -0.483으로 1% 수준에서 유의한 負의 상관관계를 나타내어 하층식생 피복도는 상층식생 울폐도에 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 이는 산림의 수원함양기능 증진, 즉 표층토양에서의 조공극률을 증진시키기 위해서는 상층식생 울폐도를 조절할 필요가 있다는 선행 연구결과(小柏 등, 1991; 金泰助 등, 1993)와 유사한 결과라 생각된다.

표 2-21. 표층토양에서의 조공극률에 영향을 미치는 인자의 상관분석

Distributions	Surface soil		B horizon soil		Slope	Tree age	Crown-Cover rate	Under vegetation coverage
	pF2,7	pF1,6	pF2,7	pF1,6				
Macropore porosity(pF1,6) of surface soil(%)	0,318**	1,000	-	1,000	-	-	-	-
Slope(°)	0,455**	-	-	-	1,000	-	-	-
Crown-Cover rate(%)	0,313*	-	-	-	-	-	1,000	-0,483**
Depth of F layer	0,254*	-	-	-	-	-	-	-
Ratio of clay(%)	-0,303*	-	-	-	-	-	-	-
Organic matter contents	0,377**	0,288*	-	-	0,334**	-	0,364**	-
Growing stock(m <sup>3</sup> )	0,672**	0,262*	-	-	-	-	0,365**	-
Surface soil hardness(mm)	-0,707**	-0,283*	-	-	-0,446**	-	-0,378**	-
A horizon soil hardness(mm)	-0,574**	-	-	-	-0,435**	-	-	-
B horizon soil hardness(mm)	-0,458**	-	-	-	-0,329**	-	-	-
Mesopore porosity(pF2,7) of B horizon soil(%)	-	-	1,000	0,354**	-	-	-	-
D, B, H.(cm)	-	-	0,244*	-	-	0,592**	-	-
A horizon soil depth(cm)	-	-	0,283*	-	-	-	0,389**	-
Tree height(m)	-	-	-	-	-	0,358**	0,336**	-
Clear length of over story(m)	-	-	-	-	-	0,369**	-	-
B horizon soil depth(cm)	-	-	-	-	-	-0,279*	-	-
Under vegetation coverage(%)	-	-	-	-	-	-	-0,483**	1,000

Note : \* means statistically significant at 5% level and \*\* means statistically significant at 1% level.

표 2-21. 계속

Distributions	D. B. H.	Tree Height	Clear length of over story	Depth of L layer	Ratio of sand(%)	Ratio of silt(%)	Ratio of clay(%)	Organic matter contents
Tree height(m)	0.518**	1.000	-	-	-	-	-	-
Clear length of over story(m)	0.376***	0.808***	1.000	-	-	-	-	-
Organic matter contents	0.278*	0.365***	-	-	-	-	-	1.000
Growing stock(m <sup>3</sup> )	0.283*	0.413***	-	-	-	-	-	-
Surface soil hardness(mm)	-0.260*	-0.408***	-	-	-	-	0.299*	-0.309***
B horizon soil hardness(mm)	-0.307*	-	-	-	-	-	0.362***	-0.262*
A horizon soil depth(cm)	0.256*	0.336***	0.254*	0.348***	-0.312*	0.297*	-	0.381***
Ratio of silt(%)	-	-	-0.270*	-	-0.912***	1.000	-	-
Ratio of clay(%)	-	-	-	-	-0.412***	-	1.000	-
A horizon soil hardness(mm)	-	-	-	-	-	-	0.336***	-
B horizon soil depth(cm)	-	-	-	-	-	-	-	-

Distributions	Growing stock	Surface soil hardness	A horizon soil hardness	A horizon soil depth
Surface soil hardness(mm)	-0.629***	-	-	-
A horizon of soil hardness(mm)	-0.413***	0.657***	1.000	-
B horizon of soil hardness(mm)	-	0.397***	0.645***	-
A horizon of soil depth(cm)	-	-0.344***	-	1.000
B horizon of soil depth(cm)	-	-	-	0.264*

Note : \* means statistically significant at 5% level and \*\*\* means statistically significant at 1% level.

표층토양에서의 조공극률과 식물 조직이 분명한 유기물층인 F층의 두께와는 편상관계수가 0.254로 5% 수준에서 유의한 正의 상관관계를 나타내었는데, 이는 낙엽의 부식이 활발할수록 F층의 두께가 깊어지며 토양으로 유기물 공급이 원활해져 토양의 공극구조가 잘 발달된다는 의미를 갖는 것으로(정용호, 1998), 표층토양에서의 조공극률을 증진시키기 위해서는 토양미생물의 활동에 적당한 환경을 만들어 낙엽부식을 촉진시킬 필요가 있는 것으로 생각된다. 또한, 표층토양에서의 조공극률과 점토함량비 그리고 토양의 유기물함량비는 각각 편상관계수가 -0.303, 0.377로 5%, 1% 수준에서 유의한 負와 正의 상관관계를 나타내어 토양 중 점토함량이 많을수록 토양의 공극량이 감소하고, 유기물함량비가 많을수록 토양의 공극구조가 양호한 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 F층의 두께와 표층토양에서의 조공극률과의 상관관계가 1% 수준에서 유의한 正의 상관관계를 나타낸 결과와 일치하는 것으로 생각된다.

표층토양에서의 조공극률과 임목축적과의 편상관계수는 0.672로 1% 수준에서 유의한 正의 상관관계를 나타내어 임목축적이 높을수록 산림의 수원함양기능이 높아지는 것으로 분석되었다. 이는 그림 2-4의 직선회귀 분석결과를 뒷받침하는 결과인 것으로 생각된다. 한편, 표층토양에서의 조공극률과 표층토양의 견밀도, A층 토양의 견밀도, B층 토양의 견밀도는 각각 편상관계수가 -0.707, -0.574, -0.458로 1% 수준에서 유의한 負의 상관관계를 나타내어 표층 및 A층, B층 토양의 견밀도가 높아질수록 산림의 수원함양기능에는 불리하게 작용하는 것으로 분석되었다. 이와 같은 결과는 토양의 견밀도가 증가함으로 인해 강수에 의한 침식토량이 증가함과 동시에 토양의 공극률이 저하된다는 선행 연구결과(朴在鉉, 1995; 禹保命 등, 1995; 禹保命 등, 1998)와 유사한 결과이었다.

표층토양의 조공극률을 설명할 수 있는 인자로서 조대공극률과 토양의



유기물함량비, 임목축적, 표층토양의 견밀도는 각기 편상관계수가 0.288, 0.262, -0.283으로 5% 수준에서 유의한 正과 負의 상관관계를 나타냄으로써 표층토양의 조공극률과 마찬가지로 표층토양에서 조대공극률도 토양의 유기물함량비, 임목축적, 표층토양의 견밀도와 밀접한 관계를 갖는 것으로 분석되었다. 한편, B층 토양에서의 조공극률은 흉고직경, A층 토양깊이와 각각 편상관계수는 0.244, 0.283으로 5% 수준에서 유의한 正의 상관관계를 나타내어 표층토양에서의 조공극률과의 관계와 유사한 결과를 나타내었다.

상층식생 울폐도는 토양의 유기물함량비와 임목축적과의 편상관계수가 각각 0.364, 0.365로 1% 수준에서 유의한 正의 상관관계를 나타내었고, 표층토양 견밀도와는 편상관계수가 -0.378로 1% 수준에서 負의 상관관계를 나타내어 표층토양의 높은 견밀도는 임목축적 뿐만 아니라 산림의 수원함양기능 증대에 負의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 상층식생 울폐도와 하층식생 피복도와의 편상관계수는 -0.483으로 1% 수준에서 유의한 負의 상관관계를 나타내어 그림 2-5와 2-6의 직선회귀 분석결과와 유사한 결과를 나타내었다. 임분내 임목의 흉고직경과 수고, 상층임분 지하고, 토양의 유기물함량비, 임목축적, A층 토심 등과의 편상관계수는 각각 0.518, 0.376, 0.278, 0.283, 0.256으로 1%, 5% 수준에서 유의한 正의 상관관계를, 표층토양견밀도, B층 토양 견밀도와는 각기 편상관계수가 -0.260, -0.307로 5% 수준에서 유의한 負의 상관관계를 나타내었다.

수고는 상층임분 지하고, 토양의 유기물함량비, 임목축적, A층 토심 등과 편상관계수가 각각 0.808, 0.365, 0.413, 0.336으로 1% 수준에서 유의한 正의 상관관계를 나타내었다. 또한, 표층토양 견밀도와는 편상관계수가 -0.408로 1% 수준에서 유의한 負의 상관관계를 나타내어 상기의 결과와 유사한 결과를 나타내었다. 아울러 상층임분 지하고도 A층 토심과 편상관계수는 0.254로 5% 수준에서 유의한 正의 상관관계를 나타내어 유기물 등 영양

분이 풍부한 A층 토심의 증대는 임목의 성장이나 산림의 수원함양기능 증대에 플러스적인 영향(小柏 등, 1991)이 있는 것으로 분석되었다. 즉, 점토함량비의 표층토양건밀도와 B층 토양 건밀도와의 편상관계수는 각각 0.299, 0.362로 5%, 1% 수준에서 유의한 正의 상관관계를, 토양의 유기물함량비와 표층토양건밀도, B층 토양 건밀도와의 편상관계수는 각각 -0.309, -0.262로 1%, 5% 수준에서 유의한 負의 상관관계를, A층 토심과는 편상관계수가 0.381로 1% 수준에서 유의한 正의 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 이는 토양 중 점토함량이 증가할수록 토양건밀도가 상승하고, 강수 후 건조시 토양이 딱딱해져 공극구조 발달에 좋지 않은 영향(竹下, 1988; 朴在鉉, 1995)을 미치는 것으로 분석되었다.

한편, 임목축적과 표층토양건밀도, A층 토양 건밀도와의 편상관계수는 각각 -0.629, -0.413으로 1% 수준에서 유의한 負의 상관관계를 나타내어 토양의 건밀도가 증대할수록 수목의 성장과 산림의 수원함양기능 증대에 불리하게 작용하는 것으로 분석되었다. 표층토양 건밀도와 A층, B층 토양 건밀도는 편상관계수가 각기 0.657, 0.397로 1% 수준에서 유의한 正의 상관관계를, A층 토양의 건밀도에 대한 B층 토양건밀도의 편상관계수는 0.645로 1% 수준에서 유의한 正의 상관관계를 나타내었다. 이와 같은 결과로 볼 때 표층토양의 건밀도는 A층 및 B층 토양에 유기적으로 영향하는 것으로 판단되며 강수 침투 및 저류구조 개선 내지 유지·보전을 위하여 표층토양의 관리가 중요한 것으로 사료된다. 이는 침엽수림, 활엽수림, 혼효림 모두 적용되는 관계이었다.

#### 나. 표층토양에서의 조공극률에 영향하는 인자의 다중회귀분석

표층토양에서의 조공극률에 영향한다고 판단되는 인자의 상관분석결과

유의한 영향을 미친 인자는 표층토양의 조대공극률, 경사도, 상층식생 율폐도, F층의 두께, 점토함량비, 토양의 유기물함량비, 임목축적, 표층토양건밀도, A층, B층 토양의 건밀도 등이었으며, B층 토양의 조공극률 형성에 영향을 미치는 인자로는 흉고직경, A층 토심이였다. 이상의 인자와 토양의 조공극률 형성에 영향을 미치는 선행 연구결과인(竹下, 1988; 小栢 등, 1991) 입지 및 토양환경인자, 임분환경인자 총 23종에 대하여 stepwise를 이용한 다중회귀분석결과는 표 2-22와 같다.

표 2-22. 표층토양에서의 조공극률에 영향을 미치는 인자의 다중회귀분석

Variables	Regression coefficient	Standard error	Beta	t	Significance
(Constant)	34.176	2.868		11.915	0.000**
Surface soil hardness(mm)	-0.595	0.137	-0.395	-4.338	0.000**
Clear length of over story	-0.693	0.140	-0.330	-4.935	0.000**
Growing stock(m <sup>3</sup> )	2.914E-02	0.006	0.378	4.522	0.000**
B horizon soil hardness(mm)	-0.336	0.124	-0.195	-2.715	0.009*
Organic matter contents	0.595	0.219	0.190	2.711	0.009*
$R^2 = 0.80$					

Note : \* means statistically significant at 5% level and \*\* means statistically significant at 1% level.

산림의 수원함양기능의 지표가 되는 표층토양에서의 조공극률(竹下, 1988; 金泰勛 등, 1993; 정용호 1998)에 영향을 미치는 인자는 stepwise를 이용

한 다중회귀 분석결과, 표층토양의 견밀도, 상층임분 지하고, 임목축적, B층 토양의 견밀도, 토양의 유기물함량비 등 5개 인자이었으며, 이를 다중회귀식으로 표시하면, 산림의 수원함양기능의 지표가 되는 표층토양에서의 조공극률(pF2.7, %) = 34.176 - 0.595 x 표층토양의 견밀도 - 0.693 x 상층임분 지하고 + 2.914E-02 x 임목축적 - 0.336 x B층 토양의 견밀도 + 0.595 x 토양의 유기물함량비( $R^2=0.80$ )이었으며, 1% 수준에서 고도로 유의하였다.

따라서 산림의 수원함양기능의 지표가 되는 표층토양에서의 조공극률(pF2.7, %)을 증대시키기 위해서는 표층토양의 견밀도가 높아지지 않도록 해 주거나(竹下, 1988; 小栢 등, 1991), 임목축적을 증진시키기 위한 산림시업(吳斗泳, 1986)이 필요할 것으로 생각된다. 또한, 표층토양, A층, B층 토양의 견밀도는 상호 유기적으로 작용하므로 앞서 언급한 표층토양의 견밀도가 높아지지 않도록 표층토양의 유기물이 유실되지 않도록 하는 산림시업 방법을 강구해야 할 것으로 판단된다.

### 1) 표층토양에서의 조공극률과 임목축적과의 관계

산림의 수원함양기능 증진을 위해서는 표층토양에서의 조공극률이 증대되어야 하는데(小栢 등, 1991), 상관분석 결과 표층토양에서의 조공극률과 1% 수준에서 유의한 正의 상관관계를 나타낸 임목축적과의 관계를 직선회귀 분석한 결과는 그림 2-4와 같다. 직선회귀 분석결과 표층토양의 조공극률에 대한 임목축적과의 관계는, 표층토양에서의 조공극률(%) = 0.0546 x 임목축적 + 17.155( $R^2 = 0.47$ )이었다. 그러나 결정계수( $R^2$ )는 비교적 낮은 값을 나타내었다.

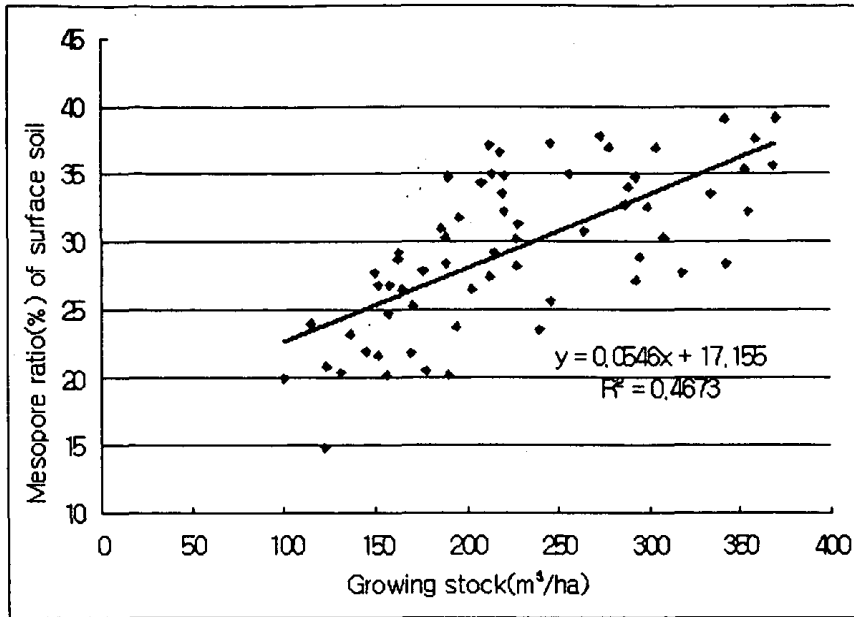


그림 2-4. 표층토양에서의 조공극률과 임목축적과의 관계

## 2) 표층토양에서의 조공극률과 상·하층식생과의 관계

상관분석 결과 표층토양의 조공극률과 5% 수준에서 유의한 正의 상관관계를 나타낸 상층식생 율폐도와의 관계로 산림시업 기준을 정하려고 할 때 통계적으로 결정계수가 가장 높게 되는 부분을 기준으로 정하는 것이 중요한데(小柏 등, 1991; 정용호, 1998), 표층토양의 조공극률과 상층식생 율폐도를 직선회귀 분석한 결과(그림 2-5), 상층식생 율폐도를 40%이상~80%이하로 하였을 경우 결정계수는 0.65로 가장 높은 값을 나타내었다. 즉, 金泰勛 등(1993)은 제·간벌을 위하여는 상층식생 율폐도를 85% 이하로 유지하여야 한다고 하였는데, 총 조사지역에서 결정계수( $R^2$ )는 상층식생 율폐도를 구분하지 않았을 경우에는 0.05이었고, 상층식생 율폐도를 85% 이하로만 하였을 경우에는 0.09이었으며, 상층식생 율폐도를 50%이상~80%이하로 하였

을 경우에는 0.01이었으나, 상층식생 울폐도를 40%이상~80%이하로 하였을 경우에는 0.65로 가장 높은 값을 나타내었다. 이를 직선회귀식으로 나타내면, 표층토양에서의 조공극률(%) = 0.2401 x 상층식생 울폐도(40~80%로 하였을 경우) + 16.071( $R^2 = 0.65$ )이었다. 따라서 산림의 수원함양기능 증진을 위한 산림사업시 제·간벌은 상층식생 울폐도가 80%를 넘게 되었을 때 실시해야 할 것으로 생각되며, 이는 小栢 등(1991)의 연구결과와 유사한 결과이었다.

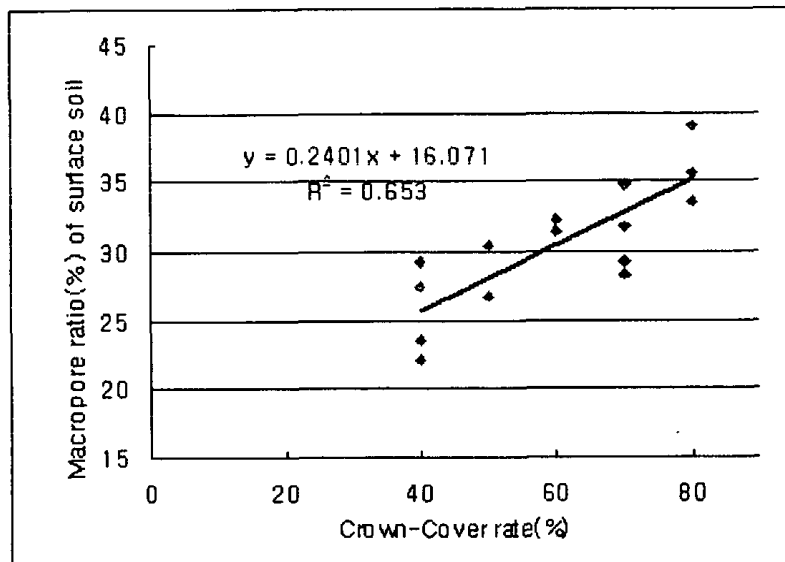


그림 2-5. 표층토양에서의 조공극률과 상층식생과의 관계

표층토양의 조공극률에 대한 하층식생 피복도와의 관계를 직선회귀 분석한 결과(그림 2-6) 직선회귀식은, 표층토양에서의 조공극률(%) = 0.2039 x 하층식생 피복도(20% ~ 80%) + 18.566( $R^2 = 0.332$ )으로 나타났다. 이때 하층식생 피복도는 하층식생이 미약한 상태와 전체가 완전히 피복되어 증발산에 의하여 수원함양기능이 저해(太田, 1991)되는 울폐도인 20% 이하와 80%

이상인 부분을 제외한 결과로, 결정계수( $R^2$ )는 0.33으로 비교적 낮은 값을 나타내었는데, 이는 표층토양 조공극 형성에는 하층식생 피복도 뿐만 아니라 상층식생 울폐도 등 다른 임분환경 인자들이 복합적으로 영향하는 데 기인하기 때문이라 생각된다.

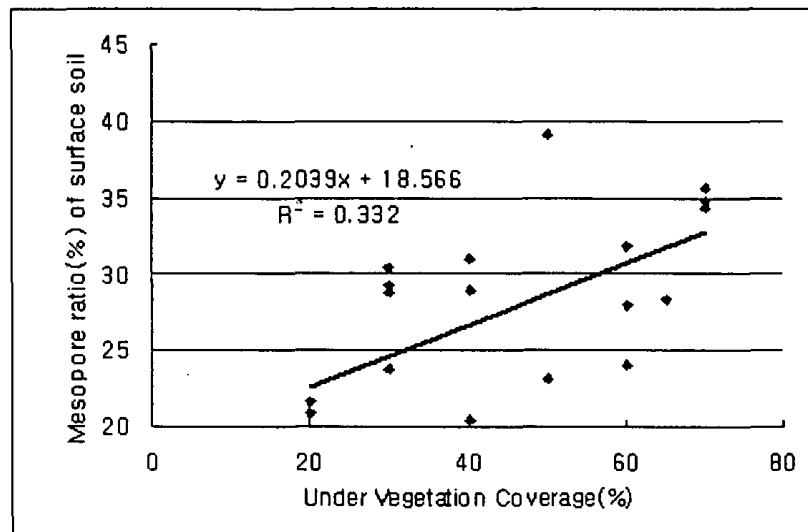


그림 2-6. 표층토양에서의 조공극률과 하층식생과의 관계

### 3) 표층토양에서의 조공극률과 토양 유기물함량비, 견밀도와 유기물 함량비와의 관계

상관분석 결과 표층토양에서의 조공극률과 1% 수준에서 유의한 正의 상관관계를 나타낸 토양의 유기물함량비와의 관계를 직선회귀 분석하였다(그림 2-7). 직선회귀식은, 표층토양에서의 조공극률(%) = 1.8437 x 토양의 유기물함량비(%) + 22.195( $R^2 = 0.42$ )로 나타나 토양의 유기물함량비가 높아 질수록 공극 발달이 좋아져 토양의 강수침투 및 저류구조가 개선되는 것(정용호, 1998)으로 분석되었다.

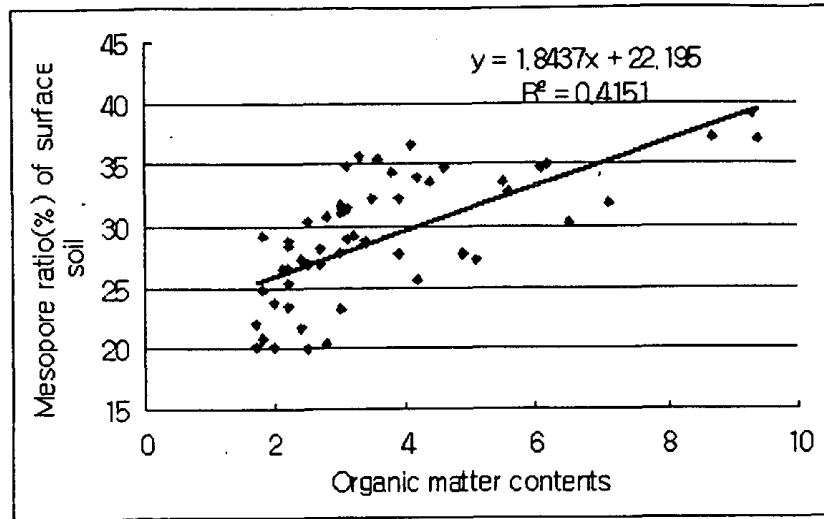


그림 2-7. 표층토양에서의 조공극률과 토양 유기물함량비와의 관계

#### 4) 표층토양에서의 조공극률과 표층토양 견밀도와의 관계

상관분석 결과 표층토양에서의 조공극률과 1% 수준에서 유의한 負의 상관관계를 나타낸 표층토양 견밀도와의 관계를 직선회귀 분석하였다(그림 2-8). 직선회귀식은, 표층토양에서의 조공극률(%) =  $-1.1004 \times$  표층토양견 밀도(mm) + 37.518( $R^2 = 0.55$ )로 나타났는데, 이와 같은 결과는 표층토양의 견밀도가 높아질수록 산림의 수원함양기능에는 불리하게 작용함을 의미하는 것이다. 즉, 상관분석 결과 A층, B층 토양견밀도와 표층토양에서의 조공극률(%)과는 1% 수준에서 유의한 負의 상관관계를 나타내었는데, 이와 같은 결과도 표층토양 견밀도와 표층토양에서의 조공극률(%)과의 관계와 같은 관계를 의미하는 것이다. 따라서 침엽수림의 수원함양기능을 증대시키기 위한 산림사업은 표층토양의 견밀도가 높아지지 않도록 하는 사업 방법(森林水資源問題檢討委員會, 1991; 朴在鉉, 1995; 禹保命 등, 1995; 禹保命 등, 1998)이 강구되어야 할 것으로 생각된다.



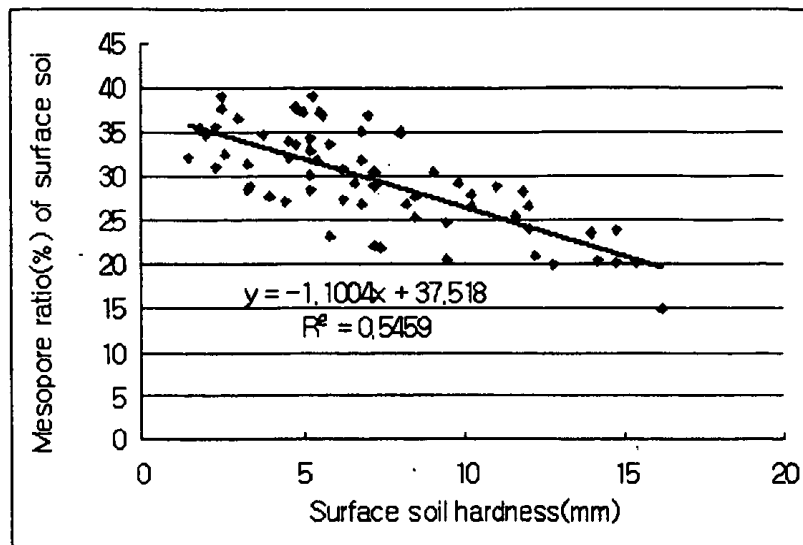


그림 2-8. 표층토양에서의 조공극률과 표층토양 견밀도와의 관계

이와 같은 관계로부터 임상별 최적 산림관리기법을 적용할 때는 침엽수림, 활엽수림, 혼효림으로 구분하여 각각의 시업기준을 적용할 필요가 있다. 각각의 관계를 상관분석 및 다중회귀분석을 실시하여 분석한 결과를 정리하면 다음과 같다.

#### 가) 침엽수림 시업지침

(1) 표층토양에서의 조공극률과 표층토양 조대공극률, 경사도, 상층식생 울폐도, F층 두께, 토양의 유기물함량비, 임목축적 등 6개 인자가 正의 상관관계를, 점토함량비, 표층토양견밀도, A층, B층 토양견밀도 등 4개 인자가 각각 5%, 1% 수준에서 유의한 負의 상관관계를 나타내었다.

(2) Stepwise를 이용한 다중회귀분석결과 산림의 수원함양기능 증대에

영향하는 표층토양에서의 조공극률에 영향을 미치는 인자는 표층토양의 견밀도, 상층임분 지하고, 임목축적, B층 토양의 견밀도, 토양의 유기물함량비 등 5개 인자이었다.

(3) 직선회귀분석결과 표층토양에서의 조공극률과 임목축적과는, 표층토양에서의 조공극률 =  $0.0546 \times \text{임목축적} + 17.155$  ( $R^2 = 0.47$ )의 관계로 산림의 수원함양기능 증대는 임목축적과 밀접한 관계가 있는 것으로 분석되었다.

(4) 직선회귀분석결과 표층토양에서의 조공극률과 상층식생 울폐도는, 표층토양에서의 조공극률 =  $0.2401 \times \text{상층식생 울폐도}$  (40~80%로 하였을 경우) +  $16.071$  ( $R^2 = 0.65$ )의 관계로 산림의 수원함양기능 증대는 상층식생 울폐도와 밀접한 관계가 있는 것으로 분석되었다.

(5) 따라서 침엽수림의 수원함양기능 증진을 위한 시업은 표층토양의 조공극 발달이 촉진되도록 상층식생 울폐도가 80%를 넘게 되었을 때 실시해야 할 것으로 판단된다.

#### 나) 활엽수림 시업지침

(1) 표층토양에서의 조공극률과는 수고, 하층식생 피복도, 토양의 유기물함량비 3개 인자가 유의한 正의 상관관계를, 표층토양의 견밀도가 1% 수준에서 유의한 負의 상관관계를 나타내었다.

(2) 직선회귀분석결과 표층토양에서의 조공극률과 하층식생 피복도와는,

표층토양에서의 조공극률(%) =  $0.1934 \times$  하층식생 피복도(30%~80%로 하였을 경우) +  $28.642(R^2 = 0.23)$ 의 관계로 활엽수림의 수원함양기능 증대는 하층식생 피복도와 밀접한 관계가 있는 것으로 분석되었다.

(3) 직선회귀분석결과 표층토양에서의 조공극률(%)과 표층토양 견밀도와는, 표층토양에서의 조공극률(%) =  $-2.6164 \times$  표층토양 견밀도(mm) +  $61.961(R^2 = 0.81)$ 의 관계로 표층토양의 견밀도가 높아질수록 활엽수림의 수원함양기능에는 불리하게 작용하는 것으로 분석되었다.

(4) 직선회귀분석결과 표층토양에서의 조공극률(%)과 토양의 유기물함량비와는, 표층토양에서의 조공극률(%) =  $2.1321 \times$  토양의 유기물함량비(%) +  $27.245(R^2 = 0.43)$ 의 관계로 활엽수림의 수원함양기능 증대는 토양의 유기물함량비와 밀접한 관계가 있는 것으로 분석되었다.

(5) Stepwise를 이용한 다중회귀분석결과 활엽수림의 수원함양기능 증대에 영향을 미치는 표층토양에서의 조공극률에 영향을 미치는 인자는 표층토양의 견밀도와 토양의 유기물함량비 2개 인자이었다.

(6) 따라서 활엽수림의 수원함양기능 증진을 위한 시업은 표층토양의 조공극 발달이 촉진되도록 하층식생 피복도가 30%에서 80%를 유지하도록 실시해야 할 것으로 판단된다.

#### 다) 혼효림 시업지침

(1) 표층토양에서의 조공극률과는 B층 토양에서의 조공극률, 하층식생

피복도, 표층 토양의 유기물함량비, F층 두께 4개 인자가 유의한 正의 상관 관계를, 표층토양의 견밀도, 10cm 깊이의 토양견밀도가 각각 5%, 1% 수준에서 유의한 負의 상관관계를 나타내었다.

(2) Stepwise를 이용한 다중회귀분석결과 산림의 수원함양기능 증대에 영향을 주는 표층토양에서의 조공극률에 영향을 주는 인자는 B층 토양에서의 조공극률, 표층 토양의 유기물함량비 2개 인자이었다.

(3) 표층토양에서의 조공극률(%) =  $2.5187 \times$  하층식생 피복도(30% ~ 80%로 하였을 경우) - 42.644( $R^2 = 0.39$ )의 관계로 산림의 수원함양기능 증대는 하층식생 피복도와 밀접한 관계가 있는 것으로 분석되었다.

(4) 직선회귀분석결과 표층토양에서의 조공극률(%) =  $-0.2172 \times$  표층토양견밀도(mm) + 13.11( $R^2 = 0.31$ )로 표층토양의 견밀도가 높아질수록 산림의 수원함양기능에는 불리하게 작용하는 것으로 분석되었다. 따라서 산림의 수원함양기능을 증대시키기 위한 산림사업은 표층토양의 견밀도가 높아지지 않도록 하는 사업 방법이 강구되어야 할 것으로 판단된다.

(5) 직선회귀분석결과 표층토양에서의 조공극률(%)과 표층 토양의 유기물함량비와는, 표층토양에서의 조공극률(%) =  $0.185 \times$  표층 토양의 유기물함량비(%) - 2.4933( $R^2 = 0.54$ )이었으며, 표층토양에서의 조공극률(%) =  $0.0465 \times$  F층 두께 - 0.4034( $R^2 = 0.13$ )의 관계로 산림의 수원함양기능 증대는 표층 토양의 유기물함량비 및 F층 두께와 밀접한 관계가 있는 것으로 분석되었다.

(6) 아울러 산림의 수원함양기능 및 수질정화기능을 증대시키기 위한 산림관리 즉, 간벌 및 가지치기 등 시업은 강도간벌을 하되 이는 수종 및 임상 그리고 지역의 특성(임황 등)에 맞도록 하는 방안이 검토되어야 할 것이다.

## 제 5 절 종합결론 및 제언

산림유역의 수질환경기준을 정립하기 위해 임업선진국(미국, 일본, 영국 등) 및 우리 나라의 먹는 물, 하천·호소수질평가기준을 검토하였고, 기 선정된 계류수질평가기준 항목 검토 및 선정된 항목의 타당성 및 범위를 검토하였다.

또한, 유역환경 및 산림상태에 따른 유역별 산림의 수자원함양기능 및 수질정화기능을 수량화하기 위하여 산림관리상태와 유역 수문·수질환경과의 상관성 및 다중회귀분석을 실시하였으며, 각 유역의 산림상태별, 시업별로 구분하여 연구대상 유역의 수문, 수질상황 변화를 분석하고 각 산림소유역에서 강수, 임내우(수관통과우, 수간유하수), 토양수, 계류수질을 조사 분석함으로써 산림의 수자원함양기능 및 수질정화기능을 수량화하고 영향인자를 구명하였다.

또한, 산림의 수자원함양 및 수질정화기능을 증진시키기 위한 최적 산림관리기법의 개발을 위하여 시험유역에서 산림시업(간벌 및 가지치기)을 통하여 산림의 수자원함양 및 수질정화기능을 평가할 수 있는 유역환경 및 수문·수질조사를 실시하였다. 아울러 산림의 수자원함양 및 수질정화기능을 증진시키기 위한 최적 산림관리기법의 개발 및 적용성을 검토하기 위하여 전국의 산림(침엽수림, 활엽수림, 혼효림)을 대상으로 효과적인 산림시업방법을 개발하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 산림유역의 수질환경기준에 있어서 일반적으로 적용가능한 물리적 인자는 수온, 경도(硬度), 맛, 냄새, 색도, 수소이온농도(pH), 전기전도도(電氣傳導度; EC), 용존산소(DO), 부유물질(SS) 및 탁도(濁度) 등이었으며,

화학적 인자는 칼슘( $\text{Ca}^{2+}$ ), 인(P), 마그네슘( $\text{Mg}^{2+}$ ), 나트륨( $\text{Na}^+$ )과 칼륨( $\text{K}^+$ ), 철(Fe), 망간(Mn), 알루미늄( $\text{Al}^{3+}$ ), 염소이온( $\text{Cl}^-$ ), 암모니아성질소, 아질산성질소, 질산성질소, 황산이온, 생물화학적산소요구량(BOD), 화학적 산소요구량(COD) 등이었다. 이밖에 생물학적 인자로서 옆새우, 금강모치 등의 지표 생물과 병원미생물 등을 이용하여 계류수질 오염평가가 가능하였다

2. 청정한 산림내 계류수에서는 중금속 등이나 영양염류가 세계보건기구에서 정하고 있는 농도만큼 많지는 않으나, 산성우 등의 피해나 폐광지 산성폐수가 계류로 유입되는 지역에서는 세계보건기구가 정한 농도나 그 이상 검출될 수 있으므로 산림내 계류수질 평가기준에서의 영양염류농도는 세계보건기구가 정한 허용기준 농도보다 적거나 유사한 농도로 정할 필요가 있다.

3. 강우, 임내우(수관통과우, 수간류), 토양수, 계류수에서 pH, 전기전도도, 양이온( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ), 음이온( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), 강수량, 양·음이온총량, 이온총량 그리고 선행무강우일수 등 14종의 인자에 대한 상호간의 관계를 spss/pc+를 이용하여 상관분석한 결과, 전기전도도가 각 용존이온 이외에 pH, 강수량과도 유의한 상관관계를 나타내어 강우, 임내우(수관통과우, 수간류), 토양수, 계류수에서 전기전도도는 이온동태 뿐만 아니라 pH 등 현행 하천수질환경기준 및 먹는 물 수질기준의 지표인자를 설명할 수 있는 인자이므로 향후 산림내 계류수질 평가기준 설정시 중요한 평가항목으로 선정이 가능할 것으로 생각된다.

4. 강우, 임내우(수관통과우, 수간류), 토양수, 계류수에서 전기전도도에 유의한 상관관계를 나타낸 양이온( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ), 음이온( $\text{Cl}^-$ ,

$\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), 양·음이온총량, 이온총량, 강수량, 선행무강우일수 등 12종의 인자에 대하여 stepwise를 이용한 다중회귀분석한 결과, 임내우, 토양수, 계류수에서 강수량과 선행무강우일수, 양이온( $\text{Na}^+$ ), 음이온( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), 양·음이온총량, pH 등이 수질에 중요한 영향관계가 있는 것으로 분석되었다.

5. 토양의 조공극률에 영향을 미치는 인자를 분석하기 위해 임지 및 토양환경 인자 16종, 임분환경인자 7종 등 총 23종에 대하여 spss/pc+를 이용한 상관 분석한 결과, 표층토양에서의 조공극률은 상층식생 울폐도와 正의 상관관계를 나타내어, 산림의 수원함양기능 증진, 즉 표층토양에서의 조공극률을 증진시키기 위해서는 상층식생 울폐도를 조절할 필요가 있는 것으로 분석되었다.

6. 산림의 수원함양기능의 지표가 되는 표층토양에서의 조공극률에 영향을 미치는 인자는 stepwise를 이용한 다중회귀 분석결과, 표층토양의 견밀도, 상층임분 지하고, 임목축적, B층 토양의 견밀도, 토양의 유기물함량비 등 5개 인자이었다. 따라서 표층토양에서의 조공극률(pF2.7, %)을 증대시키기 위해서는 표층토양의 견밀도가 높아지지 않도록 해 주거나, 임목축적을 증진시키기 위한 산림시업이 필요할 것으로 생각된다. 또한, 표층토양, A층, B층 토양의 견밀도는 상호 유기적으로 작용하므로 앞서 언급한 표층토양의 견밀도가 높아지지 않도록 표층토양의 유기물이 유실되지 않도록 하는 산림시업 방법을 강구해야 할 것으로 판단된다.

7. 임상별 최적 산림관리기법을 적용할 때는 침엽수림, 활엽수림, 혼효림으로 구분하여 각각의 시업기준을 적용할 필요가 있다. 각각의 관계를 상관분석 및 다중회귀분석을 실시하여 분석한 결과를 정리하면 다음과 같다.



가. 침엽수림의 수원함양기능 증진을 위한 시업은 표층토양의 조공극 발달이 촉진되도록 상층식생 울폐도가 80%를 넘게 되었을 때 실시해야 할 것으로 판단된다.

나. 활엽수림의 수원함양기능 증진을 위한 시업은 표층토양의 조공극 발달이 촉진되도록 하층식생 피복도가 30%에서 80%를 유지하도록 실시해야 할 것으로 판단된다.

다. 혼효림의 수원함양기능 증진을 위한 시업은 활엽수림과 동일하게 표층토양의 조공극 발달이 촉진되도록 하층식생 피복도가 30%에서 80%를 유지하도록 실시해야 할 것으로 판단된다.

8. 이상의 결과를 종합해 볼 때, 산림의 수원함양기능 증대는 상층식생 울폐도 및 하층식생 피복도와 밀접한 관계가 있는 것으로 분석되었으며, 표층토양의 견밀도가 높아질수록 산림의 수원함양기능에는 불리하게 작용하는 것으로 분석되었다. 또한, 산림의 수원함양기능 증대는 표층 토양의 유기물 함량비 및 F층 두께와 밀접한 관계가 있는 것으로 분석되었다.

따라서 산림의 수원함양기능을 증대시키기 위한 산림시업은 표층토양의 견밀도가 높아지지 않도록 하는 시업 방법이 강구되어야 할 것으로 판단된다. 아울러 산림의 수원함양기능 및 수질정화기능을 증대시키기 위한 산림 관리 즉, 간벌 및 가지치기 등 시업은 강도간벌을 하되 이는 수종 및 임상 그리고 지역의 특성(임황 등)에 맞도록 하는 방안이 검토되어야 할 것이다.

# 제3장 산림수문 환경 모니터링을 위한 원거리 무인 자동관측시스템 개발

## 제1절 서 설

### 1. 연구배경

산림은 생명의 근원이며, 안전하고 깨끗한 물의 공급원으로서 인식되어 왔으며, 대기의 강하물이나 산성우 등에 용존되어 있는 오염물질을 정화시키는 기능을 가지고 있다. 주요 하천의 상류유역을 중심으로 전국토의 약 65%를 산림이 점유하고 있는 우리나라도 예외가 아니며, 대기오염의 급속한 진행과 산림환경의 파괴로 인해 하류지역의 수질오염이 사회적인 문제로 대두되고 있다.

최근 급증하고 있는 상류 산지유역에 대한 인위적인 개발과 이에 따른 산림의 파괴는 과거로부터 안전하고 깨끗한 물로서 인식되어 오던 산원수(山原水)에 대한 심각한 수질오염문제를 일으켜, 하류지역의 인간생활 및 자연생태계에 미치는 악영향이 매우 클 것으로 예상되고 있다. 또한 산지유역에 대한 개발은 개발로 인한 훼손 및 수질오염에 대해 고려하지 않고 이용목적 및 개발편의에만 국한하여 진행되었기 때문에 향후 심각한 산원수 오염의 원인이 될 수 있으며, 상류에서 수질오염은 하류로 갈수록 그 파급효과가 매우 심각할 것으로 우려된다.

물은 수계의 발원지에서부터 바다로 유출되기 전까지 전 구간에서 저장, 유하(流下), 취수, 배수가 수없이 반복되는 하나의 역동적인 체계를 이루고

있다. 하천의 수질은 오염되지 않는 원수와 폐수의 상호작용에 의해서 결정되어 수량과 불가분의 관계를 가지고 있다. 따라서 원수(源水)로서 산지계류수의 중요성이 더욱 커지고 있으며, 산지유역의 물 순환 각 과정 중에서 산성우의 동태, 수량과 용질의 집중이 토양수로 형성되는 과정, 계류수질의 형성과정, 산지 계류수 이온의 동태 등에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있다.

국내에서는 산림내 물 순환 과정인 임외우, 임내우, 토양수, 계류수 등에 대해 장기적으로 일정한 기간을 두고 수집된 샘플에 대해서 물질분석과 수질분석을 독립적으로 실시하고 있다. 또한 산지유역으로부터 범용성 있는 수량과 물질의 종합적 유출모델의 개발과 동시에 산림의 수질 정확도를 계량화하기 위해서는 산원수 수질이 형성되는 과정에 대해 물 순환 소과정별로 지속적인 모니터링과 각종 수문·수질자료의 축적이 필수적이다.

국내의 대부분 산림유역 시험지는 유역면적이 좁은 소유역에 위치하고 있으며, 유량관측시설은 삼각웨어를 통과하는 월류 수심의 높이를 자기수위계로 측정하여 유량으로 환산하는 시스템을 구비하고 있다. 수위의 기록은 자기수위계(종이테이프 레코드)를 사용하여 측정자료를 수집하였으며, 수위계의 종류 및 기기는 측정범위가 1m내외의 개수로형 수위계나 10m범위의 지하수용 수위계를 사용하였다. 강우는 수문관측실 지붕이나 그 주변에 Tipping bucket형 자기우량계를 설치하여 관측하고 있으며, 보통우량계를 병행하여 관측하는 지역, 또는 일부지역은 보통우량계만으로 관측하고 있었다. 기존의 자기기록기(종이테이프 레코더)는 기록용지를 보통 1개월마다 교체하여야 하며, 설치 및 회수에 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 또 기록용지의 시간간격이 넓으므로 특히 홍수시의 정확한 유량계산 및 유출해석에는 많은 문제점이 있다. 또 관측데이터를 회수한 후 유출해석 및 분석을 위하여 컴퓨터 등에 다시 입력하여야 하는 등 오차가 발생할 소지가 많으

며, 분석에 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 기존의 산지유역의 수문·수질자료의 측정에는 데이터로거 등과 같은 수질·수량 측정 기기를 사용하고 있으나, 일부 수질 측정 항목은 물이끼나 오염물의 부착 등의 영향으로 인하여 데이터로거를 사용한 장기간의 무인 관측이 불가능하였다. 또한 대부분의 산지유역은 원거리에 있어 접근이 용이하지 않으며, 또한 정기적으로 산지 계류 수질의 측정을 장기간 관측하는 것은 많은 인력과 비용이 소요되는 등 이들 자료의 축적이 매우 어려운 실정이다.

산림 수문 환경의 중요성의 부각으로 인해 산림의 수자원함양 및 수질정화기능에 대한 연구가 많이 진행되고 있으나, 기존의 산림 수문 및 수질의 관측방법은 관측자료의 정리와 분석에 많은 시간이 소요되는 것이 사실이다. 이와 같은 국내외의 수문 관측시설에 대한 배경을 살펴볼 때, 산림 수문 및 수질에 대하여 장기간 무인 자동 관측이 가능한 시스템의 필요성이 높아지고 있다.

## 2. 연구목적

본 연구의 목적은 원거리에서 수문 현상의 관측과 자료의 전송을 가능하게 하는 무인자동관측 및 관측자료의 전송시스템을 개발하여 산림지의 수문 및 수질환경의 변화를 체계적으로 장기관측이 가능하도록 하며, 산지 유역의 수질 및 수질정화능 등의 관측이나 산원 수자원 관리를 위하여, 지속적이고 장기적인 산지 수문 환경 모니터링이 가능한 원거리 자동 관측 시스템을 개발하기 위하여 수행하였다.

## 3. 연구실적

## 가. 연구내용

산림수문환경 모니터링 시스템 개발을 위한 연구는 총 5개년에 걸쳐 시행하였으며 각 시행 년도별 연구추진 계획 및 내용은 다음과 같다.

- 1차년도 : 산지유역의 수문·수질 무인자동관측 및 관측자료의 원거리 전송시스템 설계
- 2차년도 : 산지유역의 수문·수질 무인자동관측 및 관측자료의 원거리 무선 전송시스템 제작 및 시험
- 3차년도 : 제작한 관측시스템과 전송시스템의 현장 시험운영과 수정 보완
- 4차년도 : 장기적 수문·수질의 예측을 위한 산림수문환경모니터링시스템 개발
- 5차년도 : 산림수문환경모니터링 시스템의 적용성 검토 및 향후 운영 방안 수립

### 1) 1차년도(1996~1997)

- 기존의 수문환경 모니터링 방법의 실태 및 문제점 검토
- 산지유역의 수문·수질 무인자동관측 및 관측자료의 원거리 무선 전송시스템 설계
- 대표 시험유역의 수문·수질현상의 장기관측
- 외부 신호 관측을 위한 센서부, 신호 입력 변환부 및 메인 CPU보드 설계
- 관측자료의 무선 송수신 시스템 설계

## 2) 2차년도(1997~1998)

- 산지유역의 수문·수질 무인 자동관측 및 관측자료의 원거리 무선 전송시스템 제작 및 시험
- 외부 신호 관측을 위한 센서부 제작 및 회로 모듈별 시험
- 관측용 센서의 현장 설치 및 시험
- 관측 신호 입력 변환부(A/D변환 및 채널구성), 메인 CPU보드(CPU, Memory, I/O채널), 무선 송수신 시스템의 제작
- 데이터 측정 저장관리 및 전송 소프트웨어 개발
- 관측자료의 원거리 전송 소프트웨어 개발

## 3) 3차년도(1998~1999)

- 제작한 관측시스템과 전송시스템의 현장 시험운영과 수정보완
- 수문데이터 측정 및 관리 소프트웨어 개발
- 관측자료의 원거리 전송소프트웨어 개발
- 개발 시스템의 시험운영 및 문제점 수정
- 전송자료의 처리 및 분석 소프트웨어의 개발 및 수정보완
- 개발한 시스템의 실제 현장 운영시의 문제점 수정보완

## 4) 4차년도(1999~2000)

- 기존 수문관측자료에 의한 개발한 관측 시스템의 검증
- 관측시스템을 활용한 산지 수질의 감시 및 예보시스템 개발

- 관측시스템을 활용한 홍수 및 갈수 유량의 감시시스템 개발

#### 5) 5차년도(2000~2001)

- 산지유역의 수질 감시시스템의 현장 적용성 분석 및 수정 보완
- 산지유역의 홍수 및 갈수 유량 감시시스템의 현장 적용성 분석 및 수정 보완
- 관측 및 전송시스템의 타지역 확대 활용기술 개발
- 관측 및 전송시스템의 향후 운용방안 수립

#### 나. 연구실적

##### 1) 대표시험유역의 수문관측 실시

시험대상지인 팔공산 지역의 산림유역시험지에서 자기우량계와 자기수위계를 설치하여 강우량과 유출수위 등을 연구개시년도(1997년) 4월부터 5차년도인 2001년 10월 현재까지 장기 관측하여 수문·수질 자료를 관측하고 있다. 동시에 집중호우 시나 특정한 단위강우에 대하여 강우량과 유출수량을 관측하여 단기유출에 대한 수문자료도 지속적으로 관측하고 있다.

##### 2) 관측시스템 및 감시시스템 개발

원거리에서 수문 현상의 관측과 자료의 전송을 가능하게 하는 무인자동 관측 및 관측자료의 전송시스템을 개발하였으며, 산림지의 수문 및 수질환경의 변화를 체계적으로 장기관측이 가능하도록 하여 산지 유역의 수질 및

수질정화능 등의 관측이나 산원 수자원 관리를 위하여, 지속적이고 장기적인 산지 수문 환경 모니터링이 가능한 원거리 자동 관측 시스템을 개발하였다.

시험대상지인 팔공산 지역의 산림유역시험지에서 자기우량계와 자기수위계를 설치하여 관측한 강우량과 유출수위 등의 자료와 개발한 관측시스템의 데이터를 비교 분석하여 개발한 관측시스템에 의한 수문자료를 비교, 검증하였다. 또한 단위강우를 대상으로 시험지의 계류수를 채취하여 관측시스템의 수질 데이터의 비교 검증을 실시하였으며, 수질의 변화를 측정하여 감시시스템의 현장 적용성을 분석하였다.

본 연구를 통하여 지속적으로 산지 수문환경모니터링을 할 수 있는 원격자동관측 시스템을 개발하고, 이것을 현장에 설치하여 시험 운영해본 결과 장기적이고 안정적인 수문·수질자료의 측정을 할 수 있게되었다.

### 3) 관측 및 전송시스템의 타지역 확대 활용기술 개발

개발한 관측 및 전송시스템은 무선데이터 전송시스템을 활용하여 시험지의 유량 측정값을 실시간 전송할 수 있으며, 관측데이터는 인터넷을 이용하여 인증된 사용자가 홈페이지 형식의 데이터 베이스에서 수질 및 산림 기상 등 측정값의 검색 및 출력이 가능하도록 개량된 데이터 베이스 시스템을 개발하였다.

이러한 시스템을 활용하여 각 개별 관측소를 중심으로 인터넷으로 연결된 전국적인 관측망을 형성할 수 있어 타지역의 관측데이터를 쉽게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.



#### 4. 기대효과

##### 가. 기술적 측면의 기대효과

- 산지유역 수문·수질자료 수집의 질적 향상
- 원거리 산지유역에서의 산림수문환경 모니터링 및 신속한 자료입수 가능
- 산지유역 수문·수질자료 관리기법의 고도화
- 산지유역의 수문·수질상황의 감시 및 예보체제 구축
- 의사결정 및 정책수립을 위한 효율적인 기법제공
- 산원수의 장기적이며 정밀한 수질변화 예측가능
- 산지유역의 쾌적한 물 환경 보전 유지체제 구축가능

##### 나. 경제 산업적 측면의 기대효과

- 산지유역의 수문·수질자료의 신속한 제공으로 환경오염 방지기능
- 산지유역의 수문·수질관측의 자동화로 비용절감 효과 및 전국적인 자동관측망 구축가능
- 상수원 수질의 질적 향상으로 수질정화비용 절감효과
- 산림의 효용성 유지 및 보존능력의 극대화

##### 다. 활용방안

- 정밀하고 신속한 산림기상재해 및 수질오염 예보시스템으로 활용
- 산림관리계획 및 정책수립의 중요정책자료로 활용

전국적인 환경모니터링 체계구축에 활용  
상수원 보호구역의 관리계획 수립시 활용가능  
깨끗하고 안전한 물을 공급하기 위한 중장기 계획에 활용

## 제2절 관측시스템 개요

### 1. 관측시스템 구성

산지계류수질의 모니터링을 위한 원거리 무인자동관측시스템의 구성 모식도는 그림 3-1에 나타내었다. 시스템의 구성은 각종 기상센서, 강우량 센서 등의 신호를 처리하는 신호처리부, 원격데이터의 전송 및 제어용 무선데이터 통신부, 그리고 태양전지 및 배터리 등으로 구성된 전원제어부, 계류수 측정용 전동식 센서 등으로 구성된 전동식 센서부로 구성되어 있다.

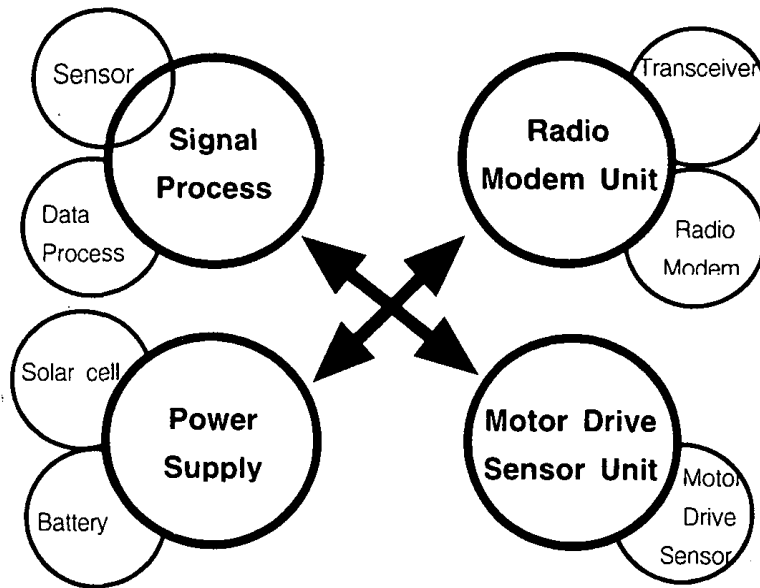


그림 3-1. 관측시스템 구성 모식도

신호처리부는 온도, 계류수의 수질 등을 측정하는 센서입력부와, 4개의 아날로그 신호의 처리가 가능한 주기판을 사용하여 설계하였으며, 주기판

상호간의 통신에는 RS485를 사용하여 데이터를 전송하도록 하였다. 이 주기로 pH, EC 센서 등의 신호를 측정 및 저장한 후 무선데이터 통신부를 통하여 전송하는 시스템으로 제작하였다.

전원공급부는 상용 전원의 공급이 불가능한 산림지에서 사용이 가능하도록 태양전지와 배터리를 사용하여 제작하였다.

전동식센서부는 센서어셈블리를 직류모터로 상하 이동시켜 초음파 센서에 의해 정확한 수위를 검출하도록 하였으며, 수위측정 후 pH, EC 등의 측정이 종료되면 센서어셈블리를 상부로 이동시켜서 물이끼나 부유물에 의한 센서의 파손이나 측정오차를 줄이도록 하였다.

본 관측시스템의 측정항목은 계류수 수질인자로서 pH, EC, 수위, 수온 등을 선정하였으며, 산림 기상 인자로는 강우량, 기온, 습도, 풍향, 풍속 등을 선정하였다. 그림 3-2에는 개발한 관측시스템의 구성을 나타내었다.

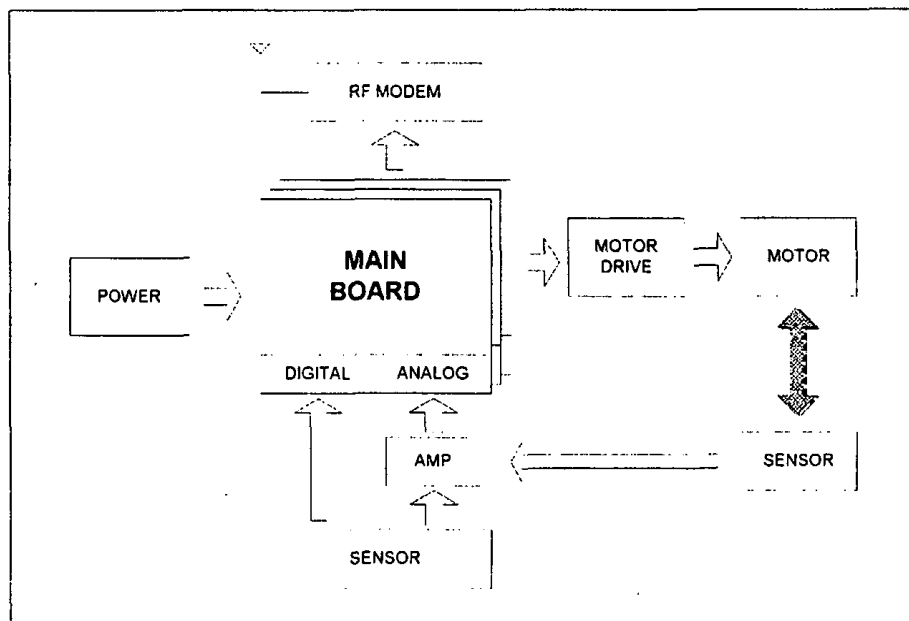


그림 3-2. 관측시스템 구성도

무선데이터 통신부는 안정적인 데이터의 전송과 제작의 편의를 위하여 1200bps FSK 방식으로 무선모뎀을 설계하였다. 무선데이터 통신부를 통하여 제어국으로 전송된 데이터는 서버에 저장되도록 하고, 인터넷을 사용하여 데이터의 검색이나 기기의 제어가 가능하도록 하였다. 그림 3-3에는 관측 및 무선데이터 전송 시스템 구성도를 나타내었다.

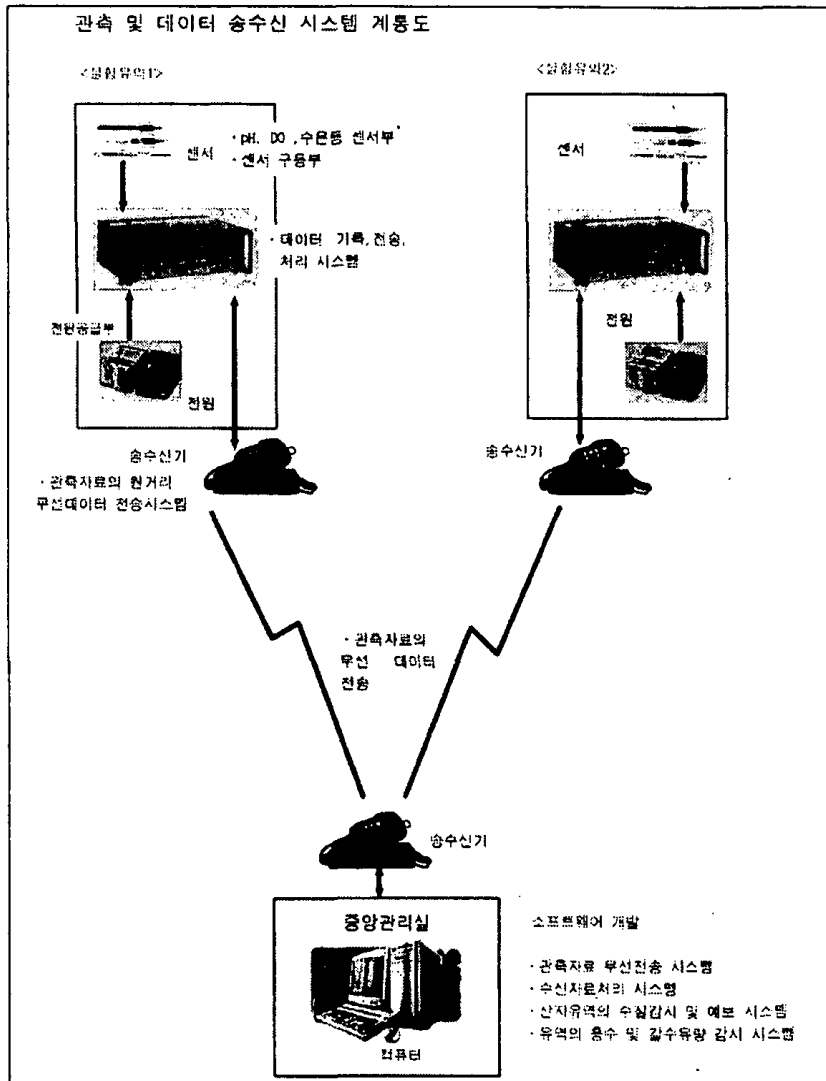


그림 3-3. 관측 및 무선데이터 전송시스템 구성도

## 2. 관측시스템 구조

### 가. 센서 및 신호변환부

신호변환부는 산림 기상 상황으로는 강우량, 기온, 습도, 풍향, 풍속 등과, 계류수의 온도 및 pH, 전기전도도(EC), 등 수질을 측정하는 센서와 이 센서에서 출력된 신호를 처리하는 신호변환부로 구성되어 있다. 이 신호변환부는 4개의 아날로그 신호의 처리가 가능한 주기판에 포함되어 있으며, 이런 주기판을 3개 사용하여 총 12개의 센서를 사용할 수 있도록 하였다. 이 주기판은 개별적으로 기상상태 및 pH, EC 센서 등의 신호를 측정하고, 저장한 후 무선데이터 통신부를 통하여 전송한다.

개발한 관측시스템의 신호변환부의 특징은 다음과 같다.

- 각 신호 모듈의 특성에 따라 적합한 입력 신호 증폭기 및 필터 등의 구성이 가능하도록 개발하였다.

- 온도센서는 반도체 온도센서의 출력신호를 노이즈필터로 불필요한 성분을 제거하여 A/D컨버터에 적절한 신호크기로 변환시킨 후 입력하도록 개발하였다.

- 온도센서는 시스템의 구성에 따라 기온, 수온, 지온, 기압, 습도 및 기기의 온도 등을 감지하는데 사용할 수 있다.

- 습도센서는 기존에 시판되는 습도센서 모듈을 사용하여 적절히 증폭한 후 입력한다.

- 풍향과 풍속은 포토커플러를 사용하여 절연된 디지털 입력을 통해 측정한다.

- pH는 입력에 고입력 저항의 앰프인 CA3160을 사용하여 증폭한 후 log

앰프를 사용하여 pH에 비례하는 신호가 출력되도록 개발하였다.

- 전기전도도는 교류 4전극형식으로 전기저항을 측정하도록 하였다.

그림 3-4에는 신호변환부의 구성을 나타내었다.

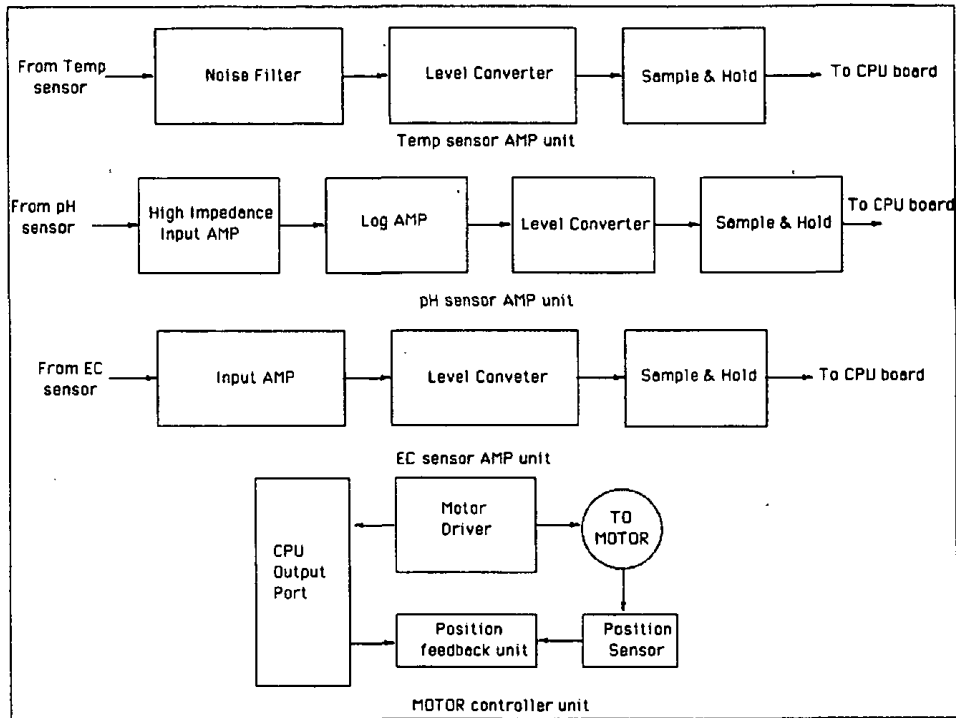


그림 3-4. 신호변환부 구성

## 나. 신호처리부

신호처리부가 포함된 주기판(그림 3-5)은 1개의 기판에 최대 4개의 아날로그 신호 입력과 12bit(4bit × 3Port)의 디지털 입력이 가능하도록 설계하였다. 아날로그 신호는 Analog MUX, Buffer Amp, Sample/Hold, A/D변환부를 통하여 디지털 신호로 변환하여 2Mbyte 램(RAM)에 저장된다. 이들 신호

는 각 신호입력 변환부나 디지털 입력부가 각기 다른 기능을 가질 수 있도록 입력 채널별로 별도의 프로그램 롬(EPROM)을 사용하여 샘플링시간 등의 동작을 지정할 수 있다. 전원은 상용전원의 공급이 불가능한 산림지에서 사용이 가능하도록 태양전지와 배터리를 사용하여 제작하였다.

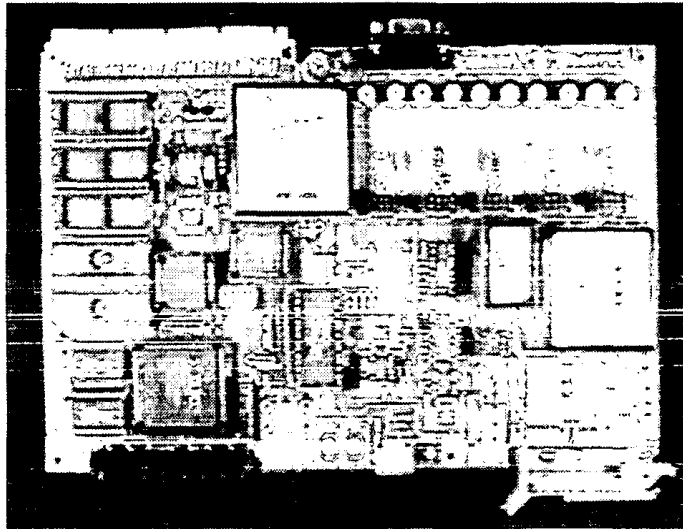


그림 3-5. 신호처리부가 포함된 주기판 사진

#### 다. 전동식 센서

그림 3-6에 나타낸 전동식센서부는 센서어셈블리를 직류모터로 상하 이동시켜 초음파 센서에 의해 정확한 수위를 검출하며, 수위측정 후 pH, EC 등의 측정이 종료되면 센서어셈블리를 상부로 이동시켜서 물이끼나 부유물에 의한 센서의 파손이나 측정오차를 줄이도록 하였다. 측정항목은 계류수의 pH, EC, 수위, 수온 등이다.





그림 3-6. V형 웨어의 벽면에 부착한 전동식센서부 사진

#### 라. 무선데이터 전송부

무선데이터 통신부는 안정적인 데이터의 전송과 제작의 편의를 위해 1200bps FSK 방식으로 무선모뎀을 제작하였다. 무선데이터 통신부를 통하여 제어국으로 전송된 데이터는 서버에 저장되며, 인터넷을 사용하여 데이터의 검색이나 기기의 제어를 할 수 있도록 하였다.

#### 마. 관측데이터베이스

개발한 관측 및 전송시스템은 무선데이터 전송시스템을 활용하여 시험지

의 유량 측정값이 실시간 전송할 수 있으며, 인터넷을 이용한 관측 값의 장거리 전송이 가능하므로 관측지에서 가까운 연구소 등에 무선데이터 전송 시스템을 설치하여 전국적인 확대 활용이 가능한 시스템을 개발하였다.

또한 관측데이터는 인터넷을 이용하여 인증된 사용자가 홈페이지 형식의 데이터 베이스에서 수질 및 산림 기상 등 측정값의 검색 및 출력이 가능하도록 개량된 데이터 베이스 시스템을 개발하였다.

이러한 시스템을 활용하여 각 개별 관측소를 중심으로 인터넷으로 연결된 전국적인 관측망을 형성할 수 있어 타지역의 관측데이터를 쉽게 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 그림 3-7에는 인터넷으로 연결된 각 관측망의 구성을 나타내었다.

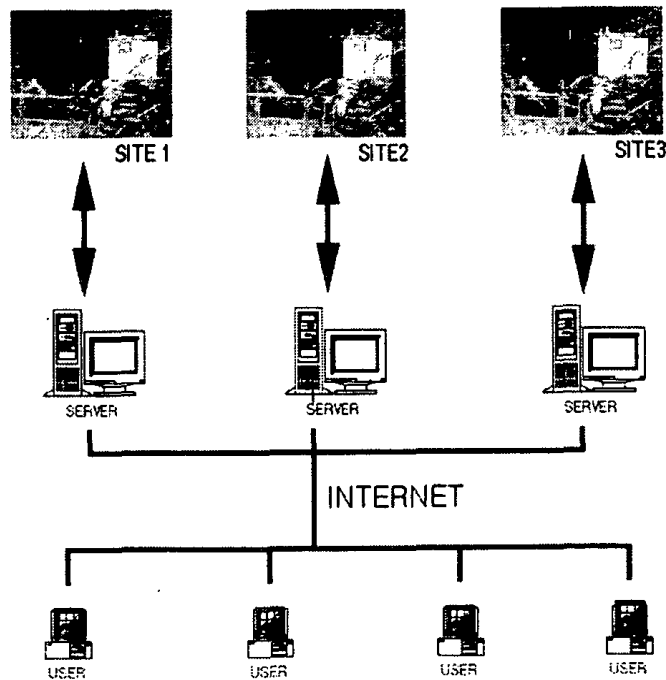


그림 3-7. 관측망 연결 모식도

### 제3절 관측시스템 H/W개발

#### 1. 센서부 및 신호변환부

##### 가. 온도

우리 생활에 있어 온도는 가장 기본이 되는 물리량이며, 대부분의 물리량은 온도에 따라 변화하기 때문에, 수질 및 기상인자의 측정값 보정에 온도 값이 필요하므로 우선적으로 측정해야 하는 인자로 판단된다.

온도의 확인, 기록 및 제어가 가능한 전기신호로 변환하기 위하여 열팽창, 전기저항의 변화, 열전기력 등 여러 가지 방식을 사용한 온도센서가 개발되어 온도제어가 필요한 여러 기기에 사용하고있다.

일반적으로 사용되는 온도센서로는 서미스터(Thermistor), 백금 축온 저항체(pt), 열전대(CA) 등이 있으며, 온도센서의 종류별 특성을 표 3-1에 표시하였다.

표 3-1. 온도센서의 종류별 특성

SENSOR	Sensor Gain	Operating Temperature Range	Price	connection
Thermistor	4%/°C 10mV/°C	-100 ~ +350°C	Low	2 wire
Pt	0.4%/°C 1~2mV/°C	-260 ~ +1000°C	High	3 or 4 wire
Thermocouple	40µV/°C	-200 ~ +1200°C	Low	2 wire

본 연구에서는 백금 측온 저항체 중 표 3-2와 같은 특성을 가지고 있으며, 상온에서 정밀한 온도 측정이 가능한 백금 측온 100 $\Omega$ 형의 온도센서를 채택하였다. 백금 측온 저항체는 도체의 전기저항이 온도에 의해 변하는 성질을 이용한 것으로 온도변화에 대한 저항 변화의 관계를 미리 조사해 두면, 저항치를 측정함으로써 온도를 측정할 수 있다.

표 3-2. 온도센서의 특성 Pt100

Parameter	Value
Sensor	Pt100
Resistance 0 $^{\circ}$ C	100 $\Omega$
Operating Temperature Range	0 ~ 350 $^{\circ}$ C
Resistance Tolerance	$\pm 0.06\Omega$
Temperature Tolerance	$\pm (0.15 + 0.002t)$
Operating Current	2mA

백금 측온 저항체는 일반적으로  $\phi 0.05\text{mm}$  정도의 고순도 백금 선을 0 $^{\circ}$ C에서 저항 값이 100 $\Omega$ 이 되도록 마이카 틀에 감고, 스테인리스 등으로 감싼 형태이다.

백금 측온 저항체로 온도를 검출하는 방법으로는 보통 휘이트스톤브릿지 방식 또는 정전류를 흘릴 때 생기는 단자전압을 읽는 방법을 취하는데, 백금선의 저항치가 낮아 도선의 저항에 의한 오차를 최소화하기 위하여 3선식 방식을 사용하였다. 그림 3-8은 본 연구에서 제작한 3선식 백금 측온 저항체(Pt100)의 기본 측정 회로이며, 그림 3-9는 수온측정용으로 제작한 온도센서의 모습이다.

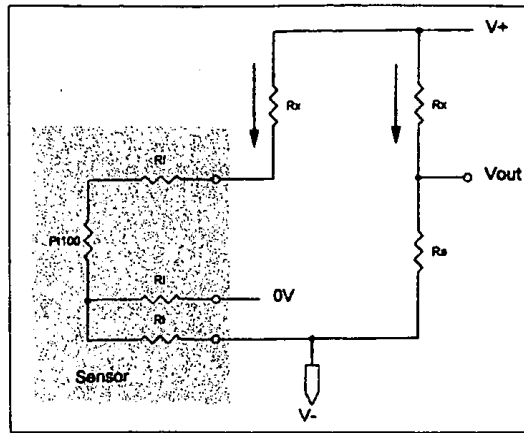


그림 3-8. 온도센서 기본 측정회로



그림 3-9. 개발한 수온측정용 온도센서(Pt100)

전류를 센서로 흘린 상태에서 측온 저항체의 저항이 온도에 따라 변하게 되면 그 변화분에 비례하여  $V_{out}$  전압으로 나타나게 된다. 이러한 원리를 구현한 회로를 그림 3-10에 나타내었다. 본 연구에서는 수온 및 기온을 측정하기 위하여 OP-07 OP-AMP(TI)를 사용하여 정전류 회로 및 증폭부를 설계하였다.

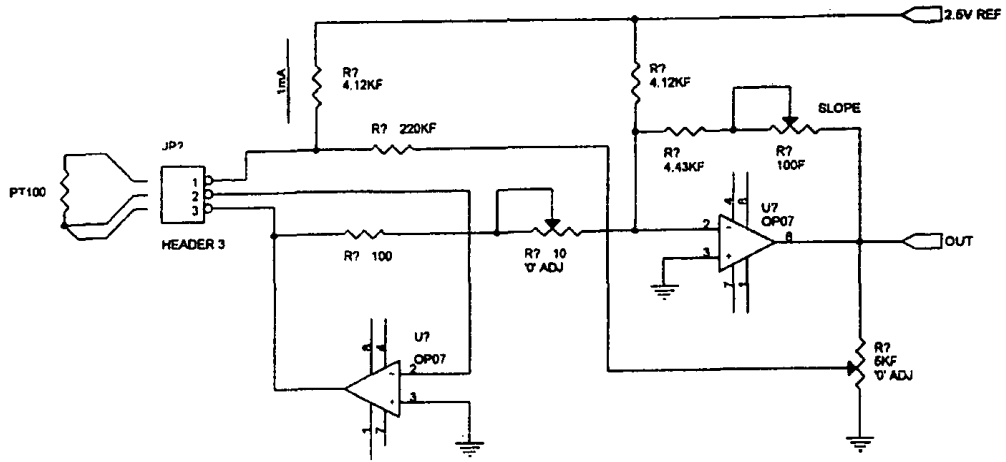


그림 3-10. 온도센서 측정회로

## 나. 습도

습도는 기후 환경 조건 가운데 온도와 함께 가장 일반적인 인자이며, 인간 생활이나 산림 생태계뿐만 아니라, 기기의 신뢰성에도 직접적인 영향을 주는 인자이다. 대기를 구성하는 다른 기체들과 달리 수증기의 함유량은 변화가 심하며, 대기 1kg에 수증기는 적게는 0g, 많을 때는 35g 까지 포함되기도 한다. 이 수증기는 온도변화에 따라 응결 또는 승화하여 수적이거나 빙정이 되며, 이 때에 다량의 잠열을 발생하여 복잡한 기상 변화의 원인이 된다.

습도를 나타내는 방법으로는 증기압, 상대습도, 절대습도, 비습, 혼합비, 늦점온도, 실효습도 등이 있으며, 일반적으로 습도는 상대습도를 사용한다. 그러나 아직까지 고정밀도의 신뢰성 있는 센서가 개발되지 않아 장기간의 측정이나 고정밀도의 측정은 곤란하다. 다른 대부분의 물리량은 ppm

단위 이상 측정이 가능하지만, 습도의 경우는 최고 수준의 측정 정도가  $\pm 0.1\%$  정도로 알려져 있다.

현재까지 개발된 습도센서는 기계적인 성질을 이용한 센서, 건습구식 센서, 전자파의 흡수를 이용하는 센서, 임피던스 또는 용량의 변화를 이용한 센서 그리고 열전도를 이용한 센서 등이 있다.

일반적으로 습도는 상대습도를 사용해서 표시하는 것이 보통이며, 너무 낮거나 높은 상태의 습도에서는 오차가 커지므로, 상대습도의 측정은 20~100%의 범위를 측정하도록 제작하였다. 그림 3-11은 관측시스템에 사용한 습도센서(IDA-5001-1 : Heathkit)의 외형이다.

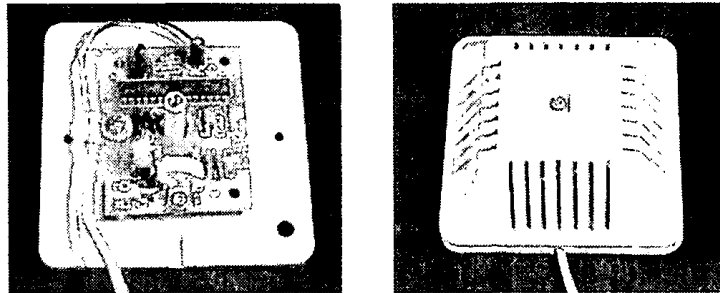


그림 3-11. 관측시스템에 사용한 습도센서

본 연구에 사용한 IDA-5001-1 습도센서는 내부에서 V-F(Voltage-Frequency) 컨버터를 통하여 출력되므로 별도의 아날로그 회로 없이 CPLD(Complex Programmable Logic Device)의 내부 카운터로 직접 카운트 할 수 있도록 하였다.

#### 다. 풍향, 풍속

바람은 태양의 복사에너지에 의해 변화하는 기압, 온도, 계절의 변화 등의 여러 인자의 작용에 의해 발생하며, 지향된 크기로서의 공기 이동은 풍향과 풍속으로 결정된다.

정확한 풍향은 자세하게 구분된 방위각으로 나타낼 수 있다. 풍향의 측정은 일반적으로 풍향계나 풍향자루(Windsack)를 이용하는 간단한 방법으로 이루어진다.

풍속은 단위 시간당 공기의 이동 거리를 나타내는 것으로 단위로는 m/s, km/h 또는 영국의 단위로 mile/h(mph), knot/h(kn) 등이 있다.

본 연구에서는 풍향 및 풍속 센서로 Heathkit에서 제작한 ADVANCED WEATHER COMPUTER에 포함된 풍향 및 풍속 센서(MODEL IDA-5001-4)를 사용하였다. 그림 3-12에 나타난 풍향·풍속센서는 LED 와 Photo TR, Encoder Disc로 구성되어 있으며, 풍향센서는 내부의 Absolute Encoder Disk를 이용하여 16방위를 측정할 수 있도록 되어 있으며, 풍속센서는 Wind Cup이 1회 전 할 때마다 1개의 펄스를 출력한다.

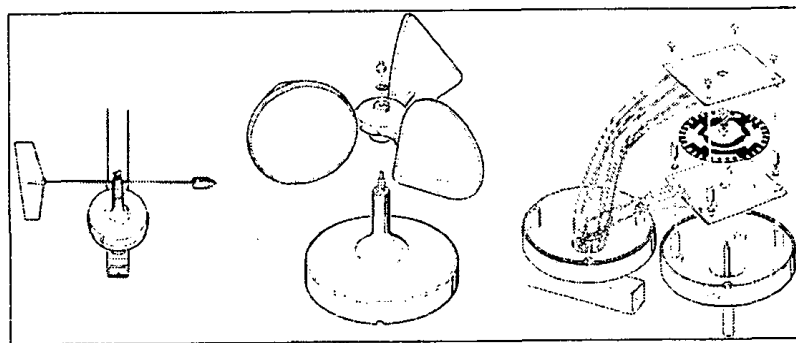


그림 3-12. 풍향 및 풍속센서 및 구조



IDA-5001-4 풍향·풍속센서는 디지털 출력형이므로 별도의 아날로그 회로 없이 CPU에 바로 입력된다

#### 라. 강수량

강수량은 모든 강수가 물로 전환되어 유출, 침투, 증발 또는 그와 같은 현상으로 손실되기 전에 지면을 덮는 물의 두께를 mm와 cm단위로 표시한 것이다.  $1\text{m}^2$ 의 면적에서 1리터의 물은 1mm의 두께를 가진다, 강수량 측정의 시간간격은 1일이며, 강수강도는 단위시간당의 강수량으로 계산한다. Hellmann이 고안한 우량계는 우량계 위의 제트작용에 의한 오차를 줄이기 위하여 입구면적이  $200\text{cm}^2$ 이나(독일), 우리나라의 경우 일반적으로 사용하는 우량계는 지름은 약 20cm이다.

우량계는 보통우량계와 자기우량계가 있으며, 전도식 자기우량계는 0.5mm 강우마다 1개의 펄스를 출력하도록 되어있다. 강수량의 측정은 이 펄스의 시간 간격을 기록하여 측정한다. 그림 3-13은 본 연구에 사용한 전도형 자기우량계의 모습이다.

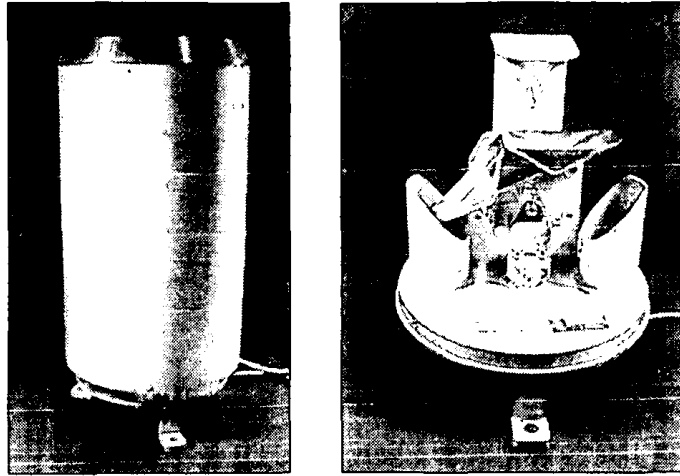


그림 3-13. 전도형 우량계

전도형 자기우량계는 내부 리드스위치의 동작을 CPLD(Complex Programmable Logic Device)를 통하여 CPU로 입력하도록 되어있다. CPU에서는 1회 출력(0.5mm 강우)시마다 내부 RTC(Real Time Clock)의 시간을 기록하여 1회 출력 사이의 시간간격을 계산함으로써 강우량을 측정할 수 있다.

#### 마. 수소이온 농도 (pH)

pH(Potential of Hydrogen)의 측정은 다양한 방법이 사용되고 있으며, 전기적인 방법으로 유리전극, 안티몬전극, ISFET 등의 센서를 사용하여 측정한다.

일반적으로 사용되는 유리전극에 의한 측정은 유리박막의 양측에 pH가 다른 용액을 둘 때, 양측의 pH 차에 비례한 전기력(1pH당 약 60mV)이 발생하는 성질을 이용한 것이다. 이 유리전극의 내측에 pH가 일정한 내부액(통상 pH7)을 넣어두고 이 유리전극을 시료액에 담그면 전압이 발생하며, 이

전압을 고입력 저항의 전위차계로 측정하여 pH를 구한다. 그림 3-14에 제작한 pH 센서를 나타내었다.

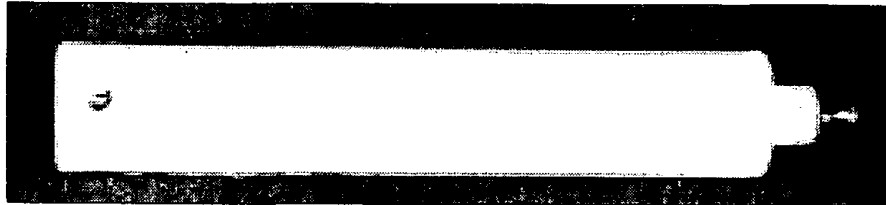


그림 3-14. 개발한 pH 센서

그림 3-15는 본 연구에 사용된 pH센서의 기본 측정 회로이다. 고 입력 저항 특성을 가지도록 하기 위해 FET 입력형 OP-AMP(CA3160, HARRIS)와 LF421 OP-AMP를 이용하여 앰프를 구성하였다.

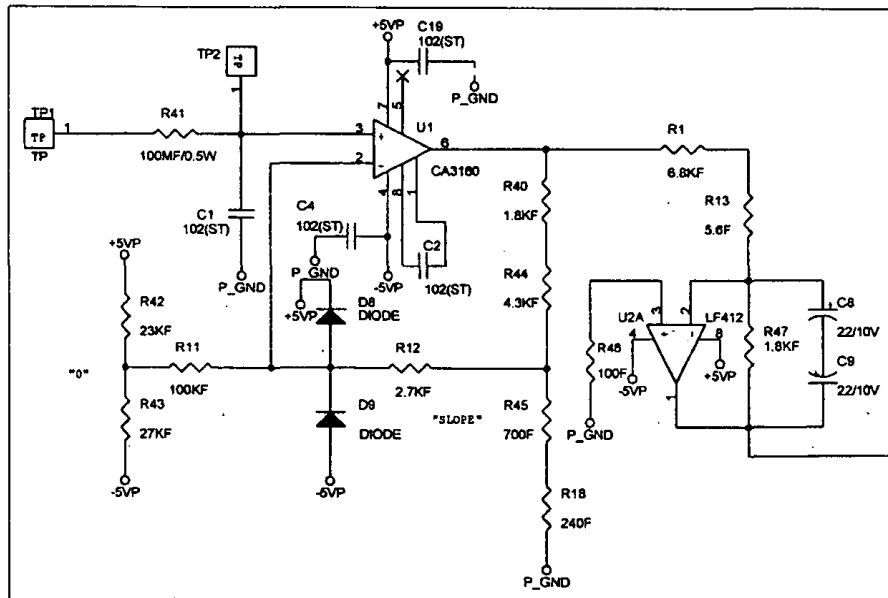


그림 3-15. pH 측정회로

pH센서에서 출력되는 전압은 pH값에 따라 수~수십mV의 전압이 발생되지만 전류는 적게 흐르므로 입력부에는 고 입력저항의 특성을 가진 OP-AMP를 사용하였다. CA3160 OP-AMP는 pH측정기 등에 많이 사용되는 OP-AMP로서 입력저항이 1.5TΩ이다. 입력부는 C-R로 구성된 LPF(LowPass Filter)로 구성하여 정전기나 기타 잡음에 의한 오동작이나 IC의 파손을 방지한다.

CA3160은 비반전 증폭기(Noninverting AMP)로 구성하였으며, R40, R44, R45, R16, R12는 비반전 증폭기의 증폭율(Gain) 조정용으로, R11, R42, R43은 OP-AMP의 offset 조정(무입력시 출력 0V조정)용으로 사용하였다. CA3160에서 출력된 신호는 LF412 OP-AMP로 LPF를 구성하여 60Hz 성분을 제거하고 DC성분만 출력하였다. 표 3-3은 관측시스템에 사용된 CA3160의 특성이다.

표 3-3. CA3160의 일반적인 특성

Input Impedance	Noise (at 1kHz)	CMRR (at 25°C)	Input Current	Input Offset Voltage Drift
1.5TΩ	72nV/√Hz	90dB	5pA	0.1μV/Mon

#### 바. 전기전도도 (EC)

전기전도도(Conductivity)는 2장의 금속사이에서 시료액에 의하여 형성되는 저항의 측정값이다. 단면적 1cm<sup>2</sup>, 길이 1cm의 저항을 비저항(Ω·cm<sup>-1</sup>)이라 하고 그 역수를 비전도도(S·cm<sup>-1</sup>)로 정의하고있다.

EC의 측정만으로 특정 물질의 농도를 아는 것은 불가능하지만 물 속에 녹아 있는 염류의 대체적인 양을 파악할 수 있다. 따라서 EC는 수질 모니터

의 중요한 측정 항목의 하나이다.

전기전도도의 측정법 중 비전해질의 전도도 측정은 간단한 직류전원에 의한 브릿지회로를 쓰면 가능하며, 전해질의 측정에는 인덕턴스나 캐패시턴스의 영향을 피하기 위하여 전기용량보상법(교류 2전극법)이나 교류 4전극법 또는 용액을 넣어 트랜스 결합하고 있는 전자 코일에 2차 유기전압을 측정하는 전자유도법 등의 방법이 사용된다. 본 연구에서는 일반적인 산림계류수의 전기전도도 값인 수~수십  $\mu\text{S}$ 를 측정하기에 적합한 교류 4전극법을 사용하였다. 그림 3-16에는 개발한 EC 센서를 나타내었다.

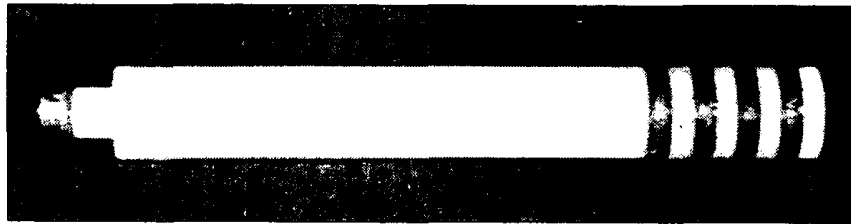


그림 3-16. 개발한 EC센서

EC의 측정은 약 1kHz의 구형파를 사용한 4전극법으로 측정하도록 하였다. 발전기에서 출력한 1kHz의 신호는 서미스터 온도센서로 증폭기의 증폭도(Gain)를 조정하여 온도에 따른 측정값을 보정하도록 설계하였다. 증폭기에서 출력된 신호는 센서의 4단자 가운데 중앙의 2단자에서 입력받은 전압을 증폭하여 발전기의 증폭도를 조정하여 EC값이 변해도 항상 일정한 전류가 흐르도록 조절하였다. 센서의 4번째 단자를 통하여 입력된 전압을 증폭해서 원래 발전기의 신호로 동기 검파를 하여 외부 영향에 의한 측정값의 오차를 상쇄시키고, 저역필터(LPF)를 사용하여 DC성분만을 측정값으로 출력하도록 하였다. 그림 3-17에는 전기전도도 측정부의 블록도를, 제작한 EC

측정회로는 그림 3-18에 나타내었다.

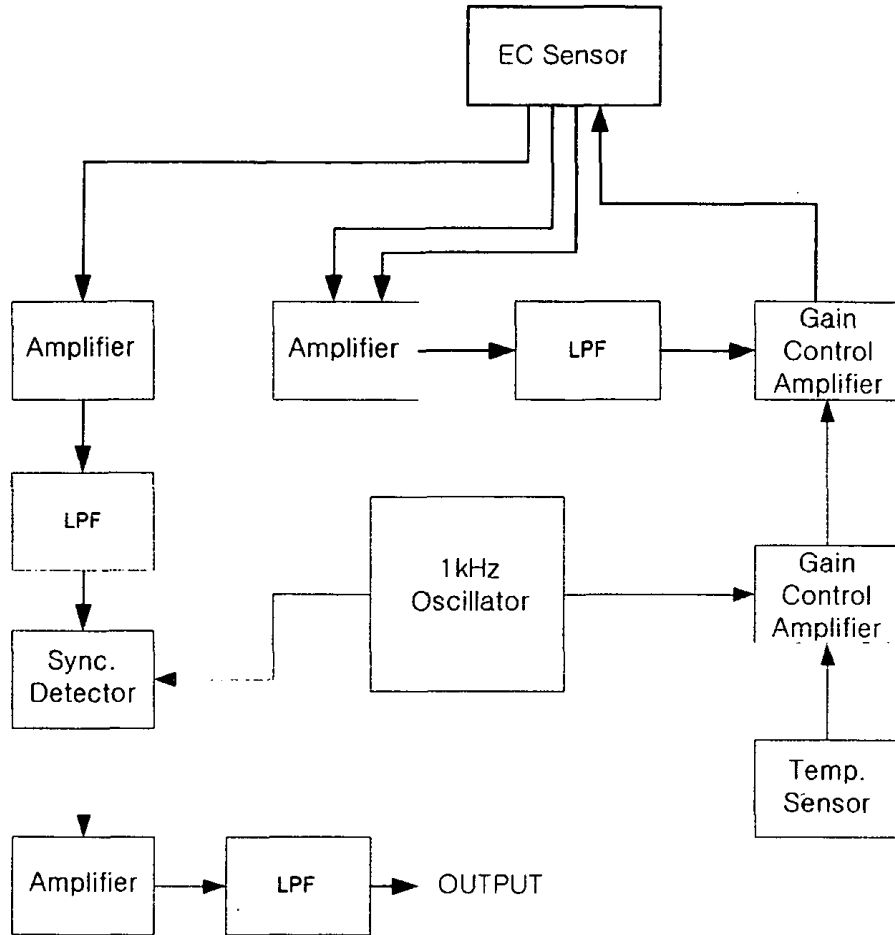


그림 3-17. 전기전도도 측정부 블록다이어그램

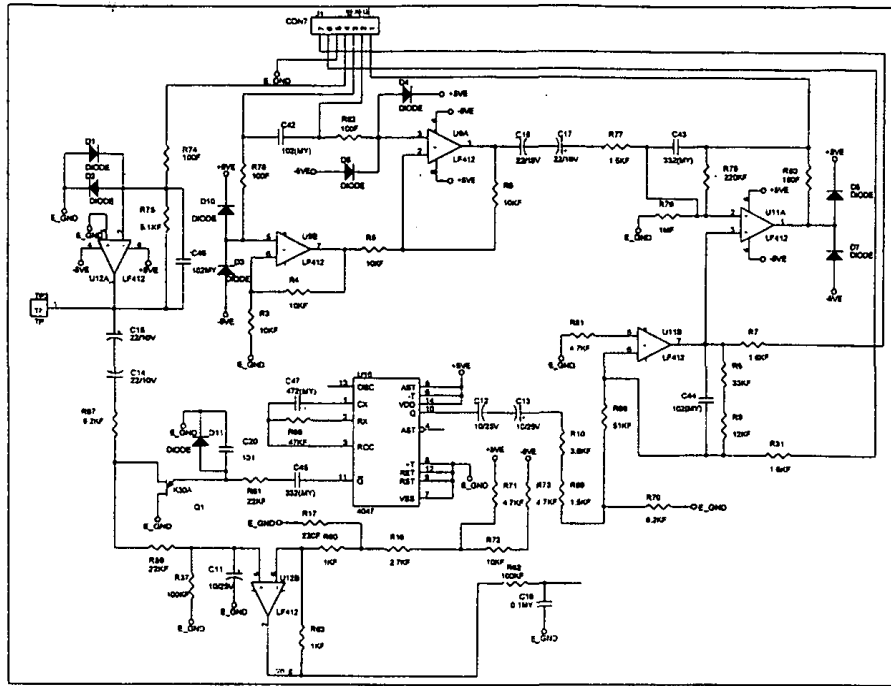


그림 3-18. 전기전도도 측정부 회로도

## 2. 신호처리부

주기관은 1개의 기판에 최대 4개의 아날로그 신호 입력과 12bit(4bit x 3Port) 디지털 입력 가운데 선택적으로 택할 수 있도록 설계하였다. 아날로그 신호는 Analog MUX, Buffer Amp, Sample/Hold, A/D변환부를 통하여 디지털 신호로 변환하여 2Mbyte 램(RAM)에 저장된다. 이들 신호는 각 신호입력 변환부나 디지털 입력부가 각기 다른 기능을 가질 수 있도록 입력 채널별로 별도의 프로그램 롬(EPROM)을 사용하여 샘플링시간 등의 동작을 지정할 수 있다. 또한 각 입력부 및 제어부는 다른 측정부와 통신하면서 순차적인 측정도 가능하도록 하였다. 본 시험지 계류수질 측정은 그림 3-19에 나타난 순서대로 측정한다.

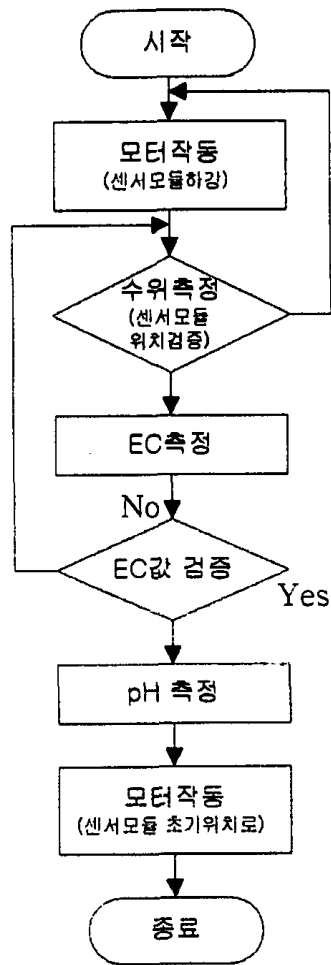


그림 3-19. 측정 순서도

### 가. 측정보드 CPU부

CPU로는 ATMEL사의 89C51을 사용하였다. 이 CPU는 플래쉬롬(Flash ROM)을 사용하고 있으므로 기기의 유지보수가 용이하고, 소비전력이 적으며, 고속동작이 가능한 점 등 많은 장점을 가지고 있다. 램(RAM)으로는 일반적인 1Mbyte S-RAM을 2개 사용하여 측정데이터나 오프셋(offset)값 등을 저장하



도록 하였다. 프로그램 롬은 총 5개가 있으며, 이 가운데 1개는 주프로그램 및 공용서브루틴을 나머지는 각 입력채널의 제어용 프로그램을 저장하는데 사용하였다.

어드레스 디코더, 각종 출력신호, 제어신호는 XILINK사의 XC9572를, 그리고 입출력 제어신호는 XILINK사의 XC9532를 사용하여 제작하였다.

추가 확장을 위하여 2개의 1Mbyte EEPROM(Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory)를 추가하였으며, 또한 RS485 통신을 위하여 NS사의 DS75176을 사용하였다. 2개의 주소 설정용 디프스위치(Dip SW), 1개의 보안용 키스위치(Key SW), 8개의 상태표시용 LED 그리고 노트북 등의 연결을 위하여 1개의 RS-232를 위해 MAXIM사의 MAX232를 사용하였다. 전원에 의한 오동작을 최소화하기 위하여 NEMIC-LAMBDA사의 DC-DC 컨버터인 PP15-12-5를 사용하였다. 표 3-4에는 연구에 사용한 AT89C51과 XC9500의 특징을 나타내었다.

표 3-4. 연구에 사용한 CPU 와 PLD의 특징

AT89C51	XC9500 Series
8-Bit Microcontroller with 4KB Flash	In System Programmable CPLD Family
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Compatible with MCS-51 Products</li> <li>○ 4K Byte In-System Reprogrammable Flash Memory</li> <li>○ Fully Static Operation: 0Hz-24Mhz</li> <li>○ 128 x 8 Bit Internal RAM</li> <li>○ Two 16-Bit Timer/Counters</li> <li>○ Six Interrupt Sources</li> <li>○ Programmable Serial Channel</li> <li>○ Low Power Idle and Power Down Modes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 5nS Pin to Pin Logic Delays on all Pin</li> <li>○ fCNT to 125Mhz</li> <li>○ 36 to 288 Macrocells with 800 to 6400 usable Gates</li> <li>○ 5V In-System Programmable</li> <li>○ Extensive IEEE Std 1149.1 Boundary - Scan(JTAG) Support</li> <li>○ User Programmable Ground Pin</li> </ul>

그림 3-20에는 연구에서 사용한 CPU부 블록다이어그램을 표시하였다. 통  
 신용으로 사용된 RS-485는 IEEE 규격으로 32개의 주기판의 연결이 가능하  
 며, 모터제어부, 전원제어부 그리고 별도의 외부확장을 제외한 주기판은 프  
 로토콜이나 제작의 편의를 위하여 최대 16개(4bit)로 제한하였다.

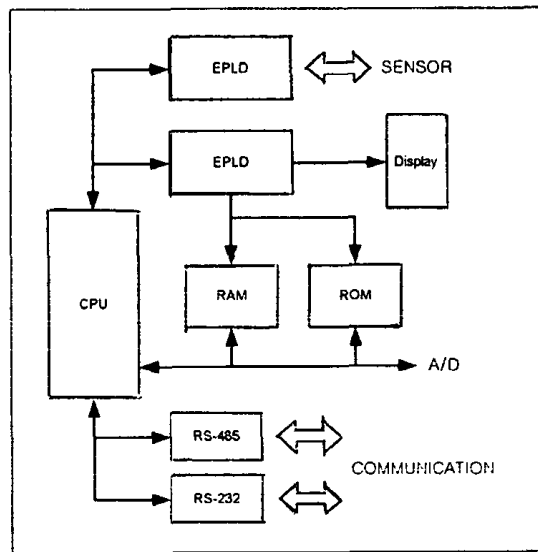


그림 3-20. CPU부 블록다이어그램

제작한 메인 CPU부는 4개의 아날로그 신호 입력부나 3개의 디지털 입력  
 중 선택적으로 제작이 가능하여 관측지의 관측항목의 추가나 변경이 용이하  
 여 산림지의 수문환경 관측에 적합한 것으로 판단된다. 그림 3-21은 제작한  
 CPU보드의 사진이다.

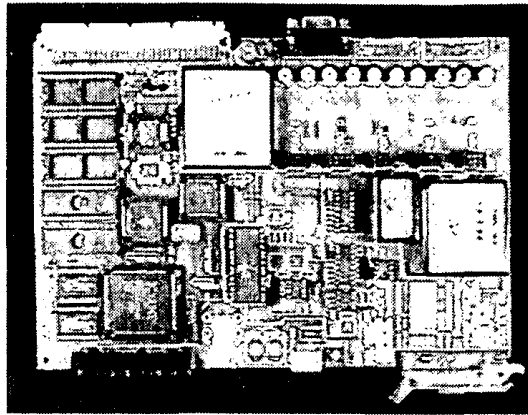


그림 3-21. 제작한 CPU부 사진

표 3-5에는 제작한 CPU 보드의 사양을 나타내었다.

표 3-5. 신호처리부의 사양

Item	Specifications
Processor	AT89C51
Memory	RAM : 2Mbyte ROM : 1Mbyte
Clock Speed	11.0592MHz
Communications	RS-485 (Internal Bus) RS-232C (DB9 Connector)
Peripheral connections	4 x 2ch Analog Input Amp or 3 x 4bit Digital Isolate Input
A/D	12Bit A/D (AD574)
Display	8 LED Status Display
Configure Option	4Bit Address Select 1Bit Keylock
Electrical Requirements	DC 12V
Size	160 x 234 mm

그림 3-22와 그림 3-23에는 본 연구에서 제작한 CPU 및 주변회로를 나타내었다.

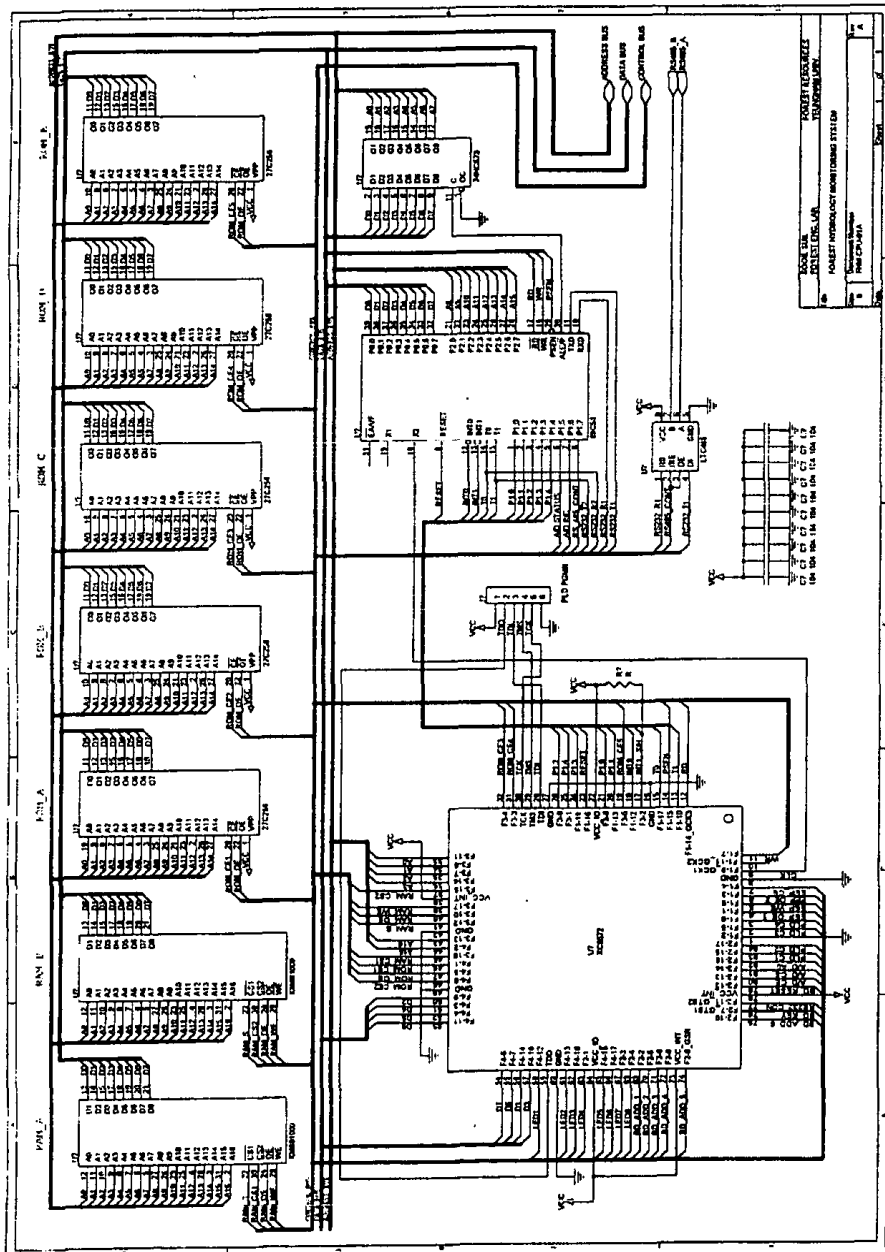


그림 3-22. CPU부 회로도

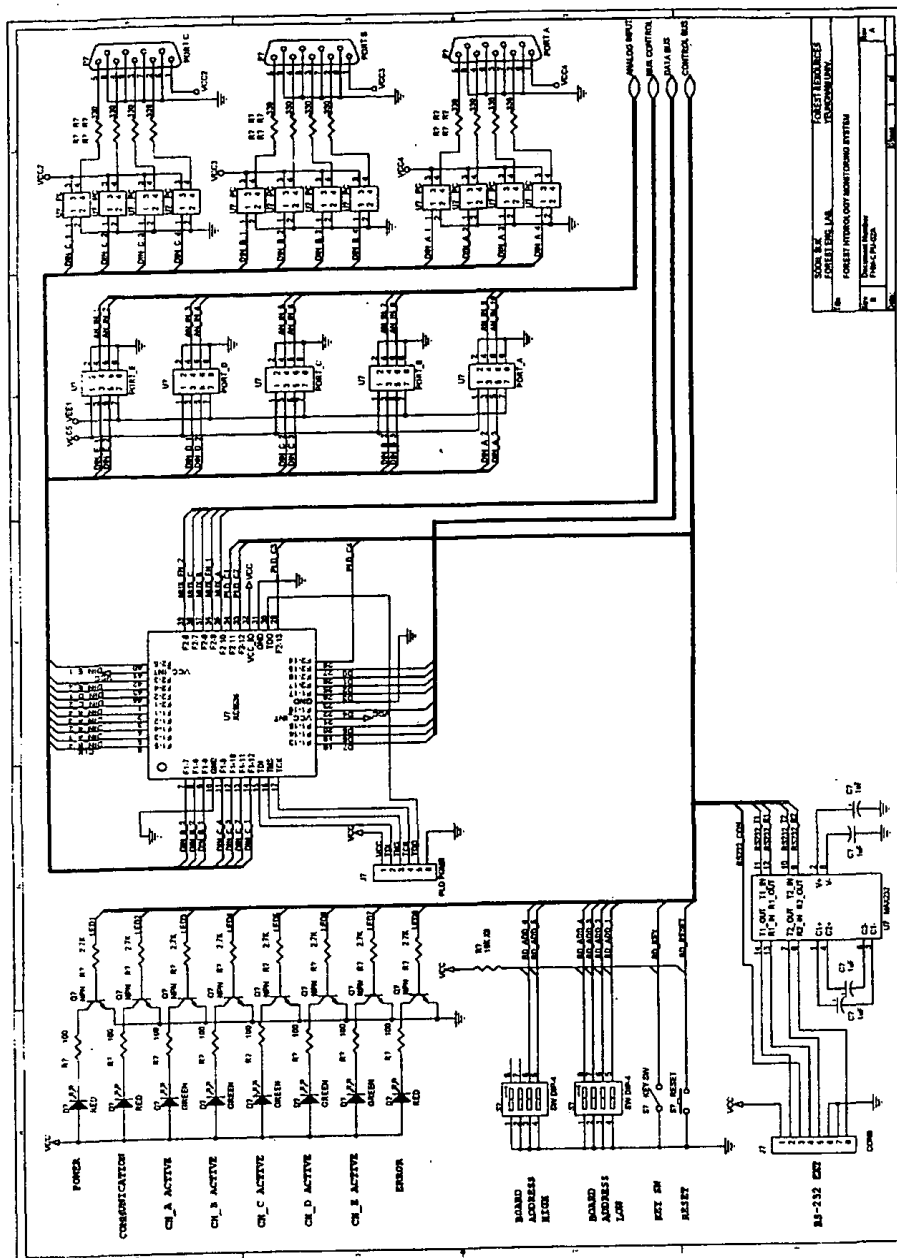


그림 3-23. CPU부 주변 회로도

## 나. 아날로그 입력 신호변환부

각종 센서로부터 출력된 아날로그 신호를 CPU로 읽어들이기 위하여 Analog Device의 AD574 A/D 컨버터를 사용하였다. AD574는 12비트(bit)의 분해능을 가지고 있으며, 또한 저 소비전력형의 A/D컨버터이다. 변환시간이  $25\mu s$ 이고 5V 단일전원으로 동작하며, 최대소비전력이 100mW이다. 입력방식은 Unipolar 방식을 사용하였다. 아날로그신호 전환을 위하여 MC4051 아날로그 멀티플렉서를, 버퍼앰프(Buffer AMP)로 PMI사의 OP177을, S/H (Sample and Hold)로 SHC298을 사용하였으며, 전원에 의한 오동작을 최소화하기 위해 DC-DC 컨버터인 PP10-12-1212(NEMIC-LAMBDA)를 사용하였다.

그림 3-24에는 연구에 사용된 아날로그 입력 신호변환부의 블록다이어그램을 나타내었다.

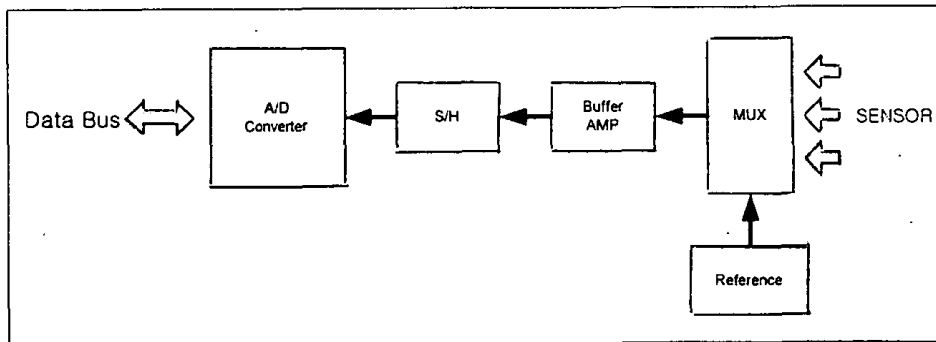


그림 3-24. 아날로그 입력신호 변환부 블록다이어그램

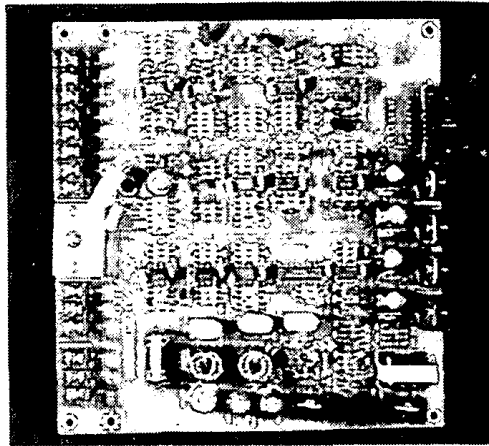


그림 3-25. 시험 제작한 pH, EC 및 온도측정부 사진

관측시스템의 기상 관측 항목인 기온, 습도, 강우량, 풍향, 풍속은 디지털 입력이 사용되므로 메인CPU보드에 내장하였으며, 전동식센서부와 함께 사용되는 온도, pH, EC는 센서와 거리를 짧게 하기 위하여 별도의 보드로 제작하였다. 제작한 신호변환부의 사진을 그림 3-25에 나타내었다.

개발한 pH, EC, 온도 신호변환부의 실내 성능 시험을 수행하여 평가한 결과를 표 3-6에 표시하였다.

표 3-6. pH, EC, 온도측정부의 시험결과

	Test Condition	Resolution	Accuracy (Max)	Reference	Unit
pH	pH4 - pH7 /pH0.5 @20℃	0.1	±0.1	METTLER DELTA350	pH
EC	5uS - 30uS /3 @20℃	1	±1	YSI Model 30	uS
Temperature	10℃ - 30℃ /3	0.1	±0.2	YSI Model 30	℃

표 3-6을 살펴보면 pH, EC, 온도는 각각 최대  $\pm 0.1\text{pH}$ ,  $\pm 1\mu\text{S}$ ,  $\pm 0.2^\circ\text{C}$  이내에서 측정이 되어 산림수질의 모니터링에 적합한 것으로 판단된다.

본 연구에서 사용한 아날로그 입력부 회로는 그림 3-26에 나타내었다. 또한 신호처리부에 전기를 공급하는 전원부의 회로도를 그림 3-27에 나타내었다.



그림 3-26. 아날로그 입력부 회로도

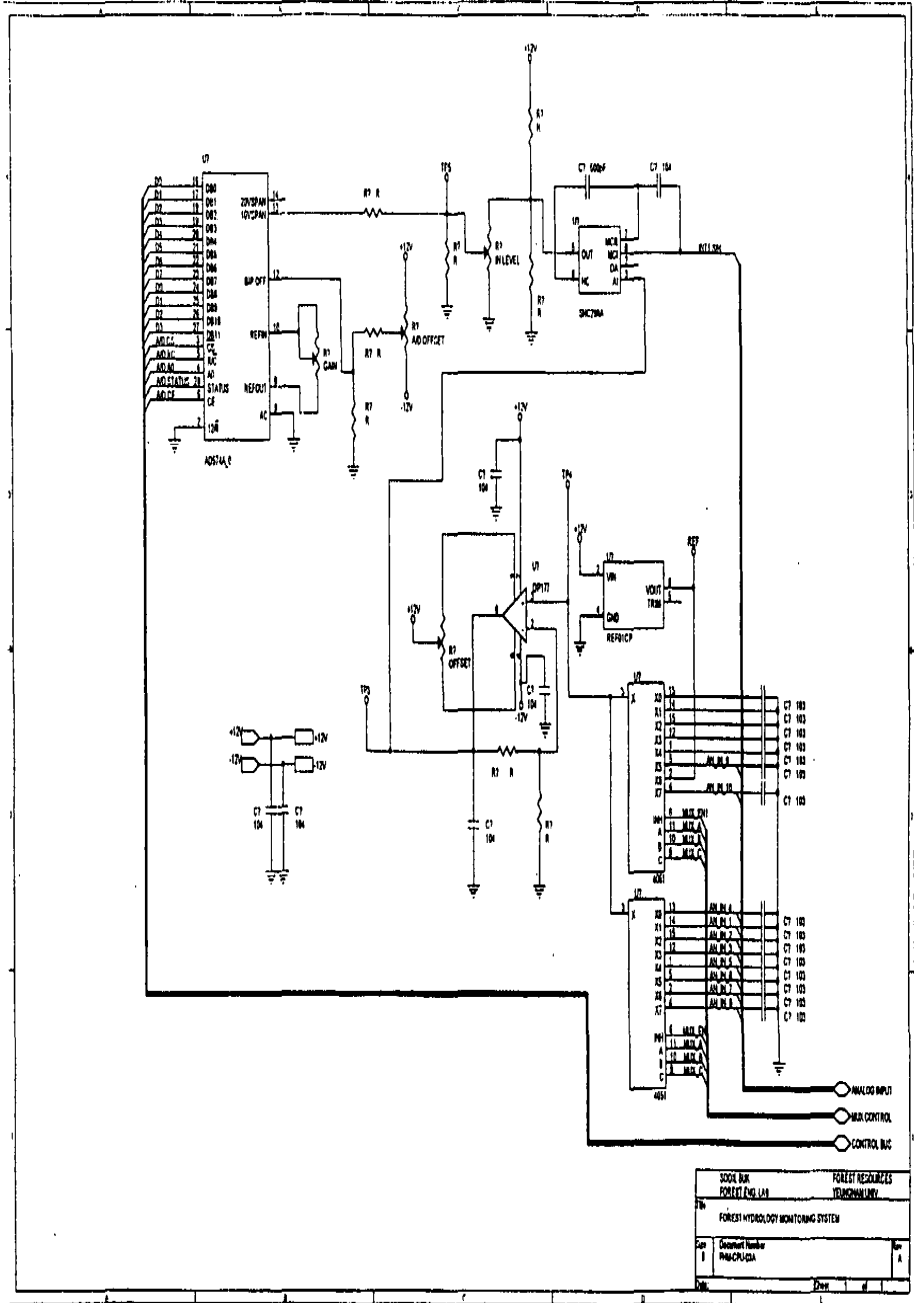
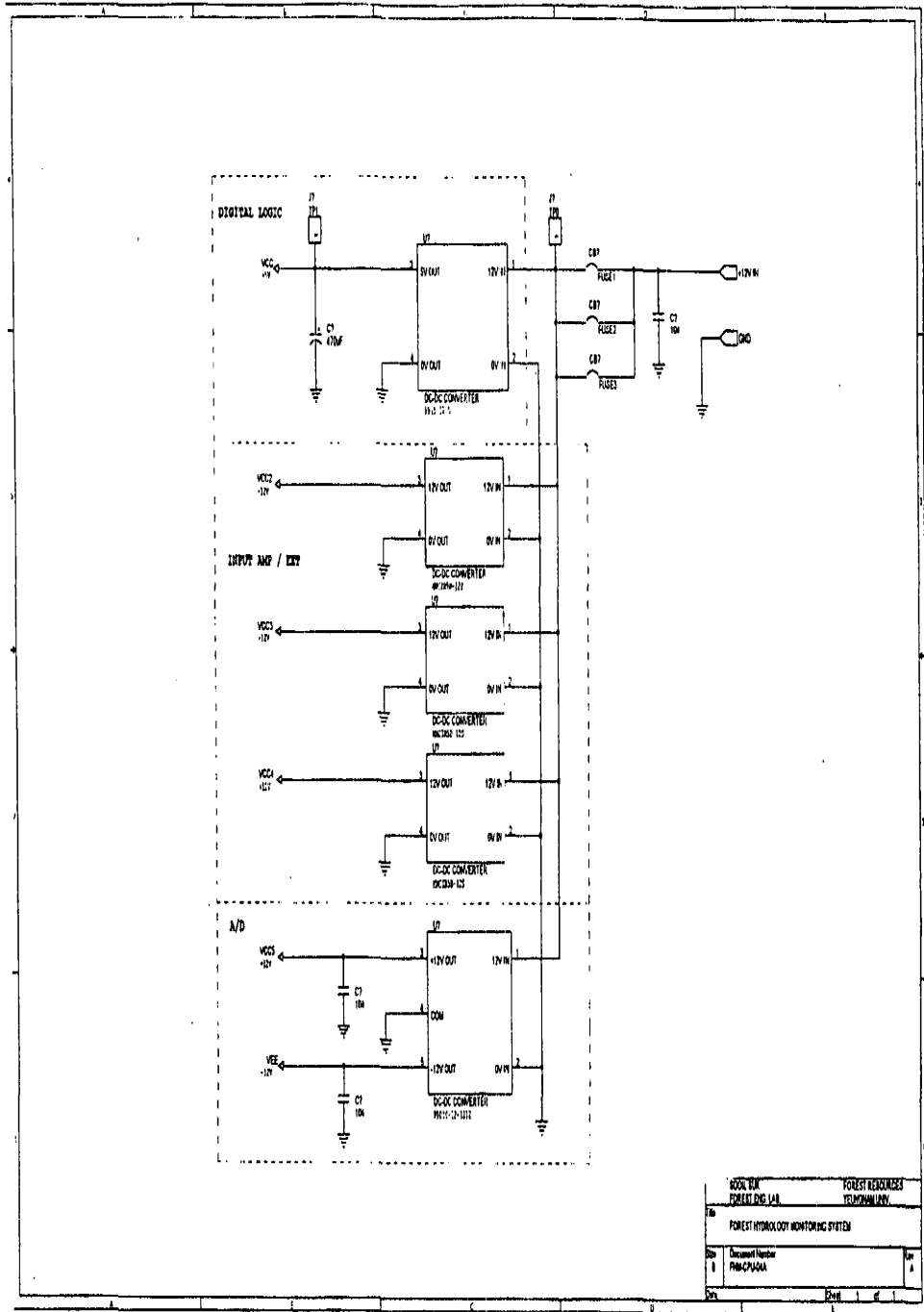


그림 3-27. 전원부 회로도



### 3. 전동식센서부

수위측정부는 수위측정 유닛을 상하로 구동하는 부분과 수면의 위치를 측정하는 부분으로 구성되어 있다. 전동식센서부는 측정 시에만 센서가 수면 아래로 이동하므로, 데이터 로거와 같이 센서가 물에 잠겨있는 구조일 때 흔히 발생하는 물이끼나 오물 등의 영향으로 발생하는 오차를 줄일 수 있을 뿐 아니라, 여름철 폭우나 동결시 센서가 파손되는 것을 방지할 수 있다.

초음파 수위측정부는 초음파 송신부와 수신부로 구성되어 있으며, 송신한 초음파가 되돌아오는 시간을 타이머로 측정하여 센서를 정확하게 수면 아래에 위치시키는 역할과 수위를 측정하는 역할을 한다. 전동식 센서유닛 제어부에 내장되어 있는 초음파 수위측정부는 전동식 센서유닛의 이동거리를 측정하여 수위를 측정하도록 하였으며, 동시에 내장된 2개의 뜨게식 수위검출 센서와 함께 작동하여 측정 데이터를 보정하도록 하였다.

모터는 JAPAN SERVO사의 DC12V 15W급, 회전수 3600RPM인 DME44SA와 JAPAN SERVO사의 1:15의 감속비를 가진 감속기어를 함께 사용하였으며, 엔코더는 OMRON사의 1회전/100펄스 출력이 가능한 E6A2-CW3C를 사용하였다. 본 연구에서 설계한 전동식센서부의 설계 사양을 표 3-7에 나타내었다.

표 3-7. 전동식센서부의 설계사양

Speed	Motor		Gear Ratio	Ball Screw	Resolution	Encoder
	Supply Voltage	RPM				
1.2m/min	12V/15W	3600	1:15	5mm/1Turn	0.05mm	100 P/r

그림 3-28은 연구에 사용된 모터 및 엔코더이며, 그림 3-28에는 전동식 센서부에 장착된 모습을 나타내었다. 그림 3-29는 본 연구에서 제작한 뜨게 식 수위센서이다.

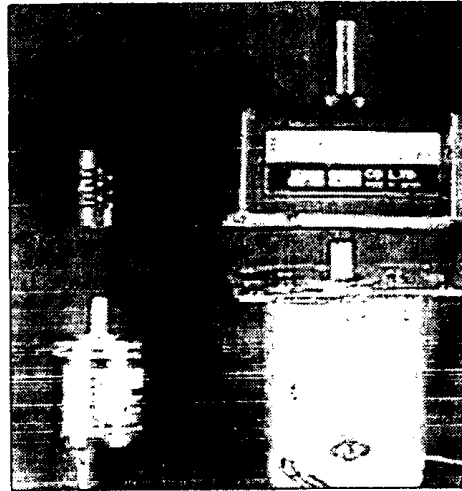


그림 3-28. 엔코더와 모터의 사진

그림 3-29는 연구에 사용된 전동식센서부 모터 장착 부분 사진이다. 전동식센서부는 주요부분에 알루미늄을 사용하여 모터의 부하를 줄였으며, 금속부분은 도금 처리하여 녹을 방지하였다. 외부 케이스는 스테인리스 소재를 사용하였으며, 강우에 의해 기계·전자부품이 손상되는 것을 방지하였다. 연구에 사용된 주요 센서의 보호용 덮개 또는 센서의 소재는 PE를 사용하였으며, 센서 외피는 2mm 이상의 두께를 가지도록 하여 파손을 방지하였다.

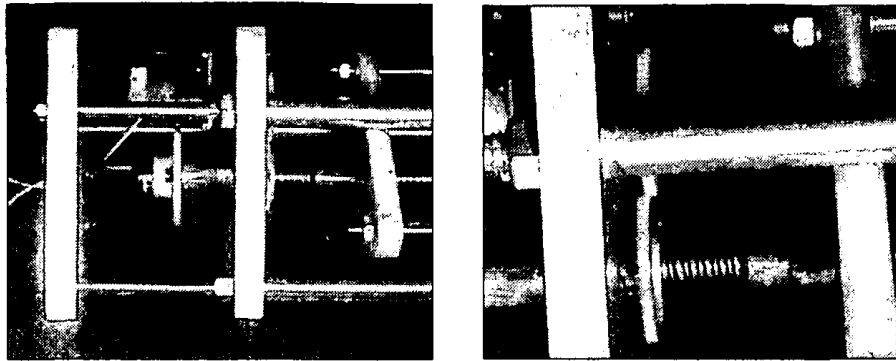


그림 3-29. 모터와, 엔코더를 부착한 사진

그림 3-30은 연구에 사용된 뜨게식 수위센서이다. 뜨게식 수위센서는 상측, 하측 2개를 사용하여 센서가 특정 수위이상 잠기는 것을 막아 센서의 파손을 방지하도록 하였다.

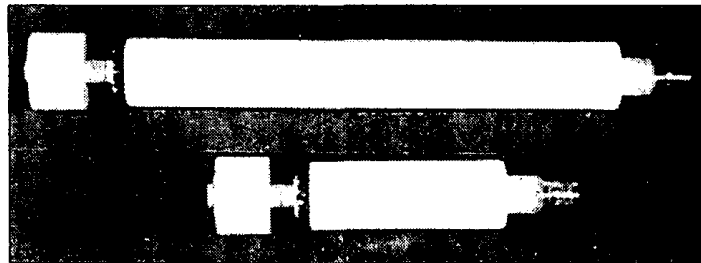


그림 3-30. 뜨게식 수위센서

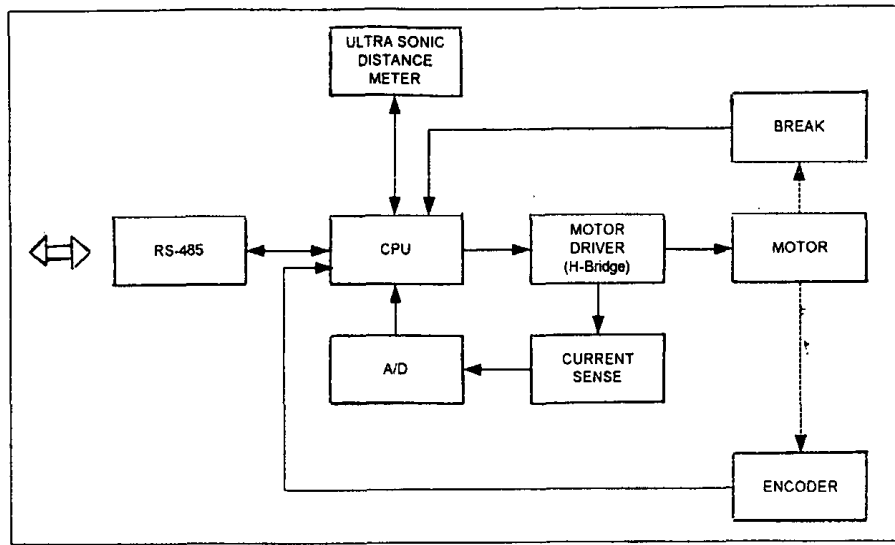


그림 3-31. 전동식센서부 블록다이어그램

그림 3-31은 연구에 사용된 전동식센서부 블록다이어그램을 나타내었다. 상세한 회로도에는 그림 3-32에 나타내었다. DC모터는 일반적으로 사용하는 H-브리지 방식을 사용하여 정·역전 제어를 하도록 설계하였다. 모터제어용으로 AT89C2051 CPU를 사용하였으며, 모터의 소비전류를 측정하여 속도제어 및 오동작을 방지하도록 하였으며, 엔코더(E6A2-CW3C : OMRON)를 사용하여 모터의 회전수 및 이동거리를 측정한다. 또한 모터 제어부는 RS-485 통신포트를 사용하여 다른 측정부와 통신이 가능하도록 설계하였다.

그림 3-32. 전동식 센서부 회로도

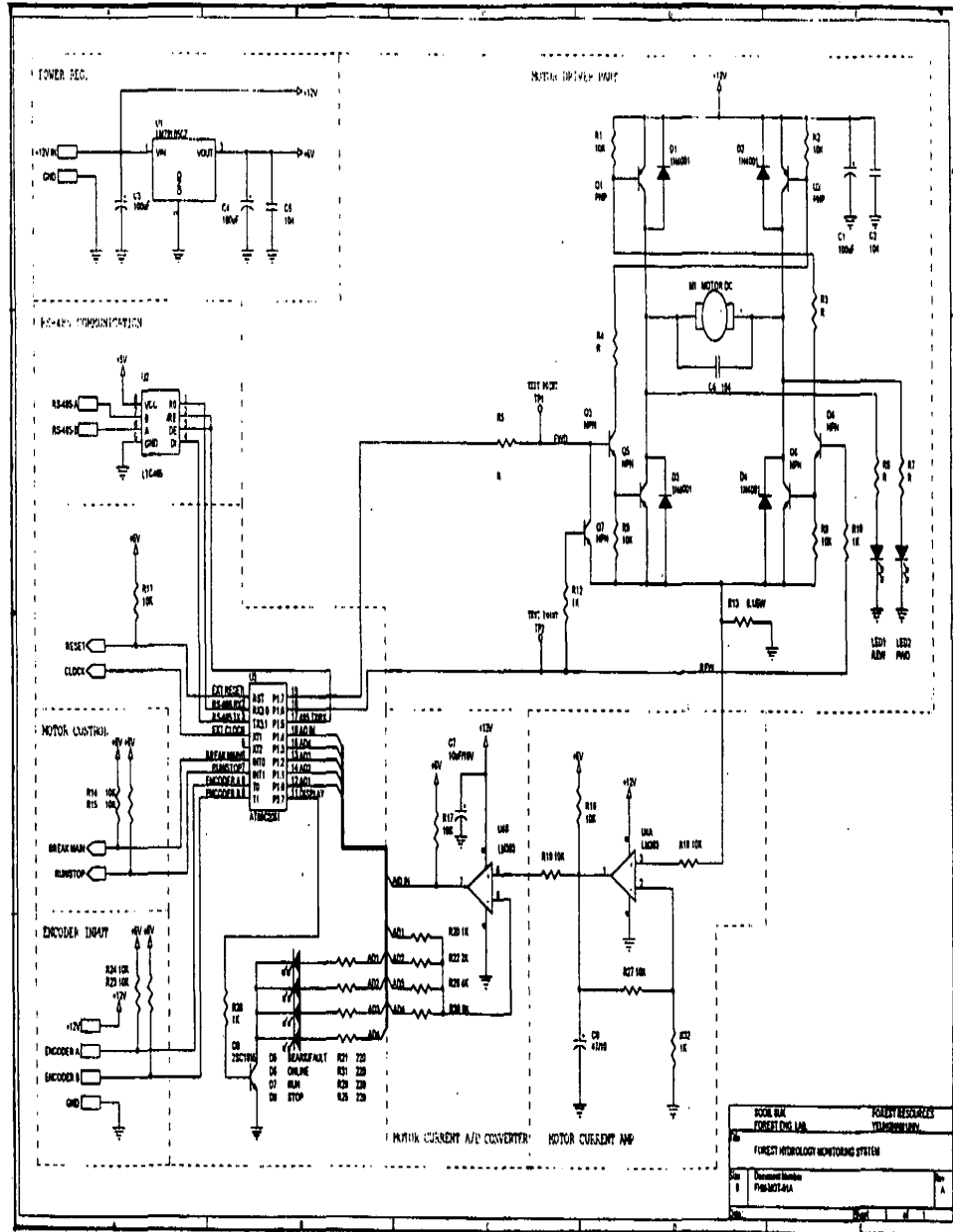


그림 3-33은 연구에 사용된 초음파 센서의 사진이다. 초음파 센서는 Nicera사의 초음파 송·수신 센서(PT40-16)를 사용하였으며, 40kHz의 초음파를 송신하여 송신된 음파가 되돌아오는 시간을 측정하여 거리를 측정할 수 있다. 그림 3-34에는 초음파 송수신부의 블록다이어그램을 나타내었다.

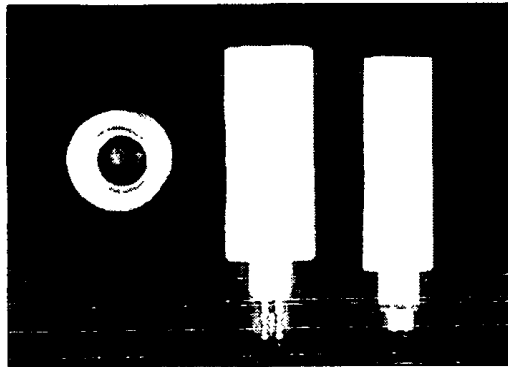


그림 3-33. 초음파송수신 센서

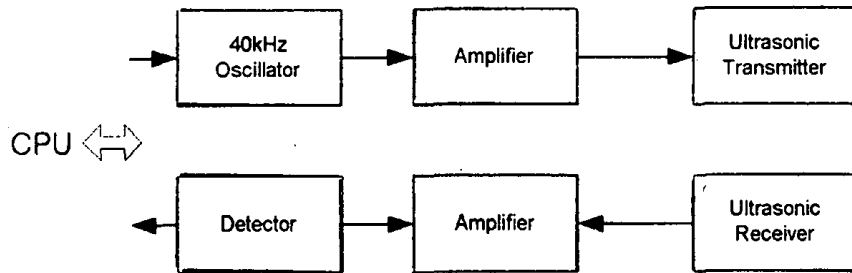


그림 3-34. 초음파 송수신부 블록다이어그램

전동식센서부는 유량관측용 웨어시설의 벽면에 수직이동이 가능한 서보 모터(Servo Motor)에 수위, 수질 및 수온센서를 부착하여 마이크로 프로세



서로 제어 및 측정이 이루어지므로, 센서부를 상하로 이동시켜 정확한 수면의 위치를 측정함과 동시에 측정 센서의 위치를 항상 일정한 수심으로 유지할 수 있어서 장기간 관측에 적합하다고 판단된다. 또한 담수상태에서는 측정센서에 물이끼 등의 흡착을 줄이기 위하여 한번 측정한 후에는 센서부를 수면 위로 이동시켜 뒀으므로 폭우 등에 의해 센서가 파손되는 것을 방지할 수 있도록 하였다. 그림 3-35에는 전동식 센서부에 장착된 센서의 사진을 나타내었다.

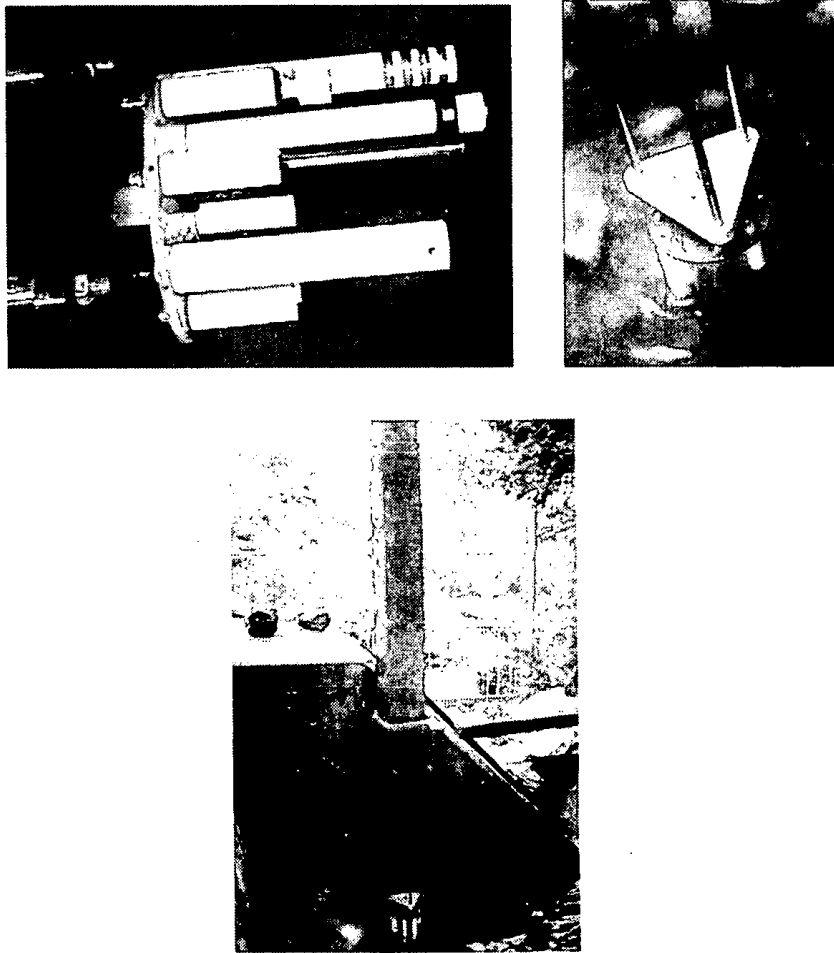


그림 3-35. 전동식센서부 사진

전동식센서부의 사양은 표 3-8과 같다.

표 3-8. 전동식센서부의 사양

Item	Specifications
Sensor	pH, EC, Temp, Level H·L, Ultra Sonic
SPEED	1.2m/min
Stroke Length	950mm
Motor	12V 15W 3600RPM
Driver	Micro Processor controlled H-Bridge
Accuracy	0.5mm at 25°C Test in Lab
Electrical Requirements	12V 15W

그림 3-36에는 Shaft와 Ball Screw, 그림 3-37에는 전동식센서부 케이스, 그림 3-38에는 전동식센서부 하부 지지대 설계도, 그림 3-39에는 전동식센서부 상부 지지대 설계도, 그림 3-40에는 전동식센서부 구동부 설계도, 그림 3-41에는 센서부 설계도를 나타내었다.

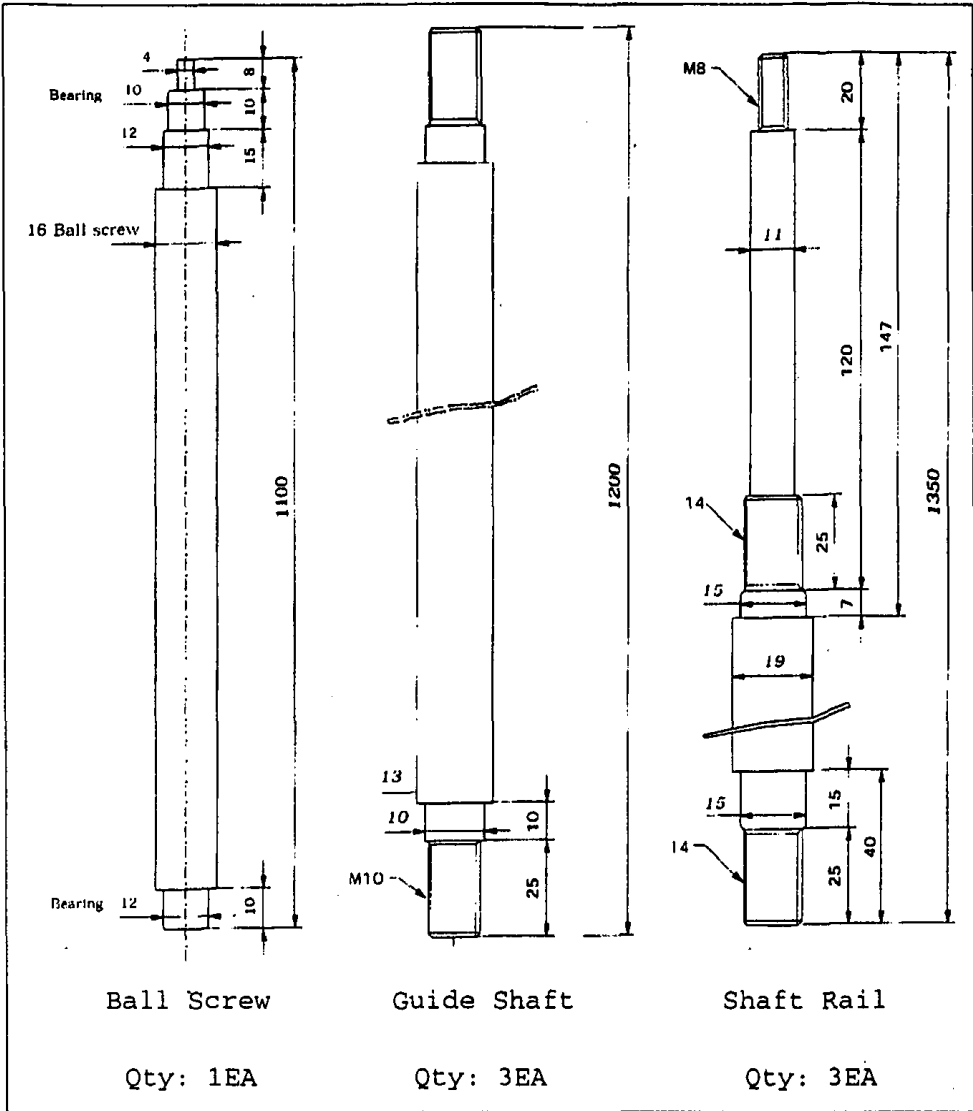


그림 3-36. Shaft와 Ball Screw

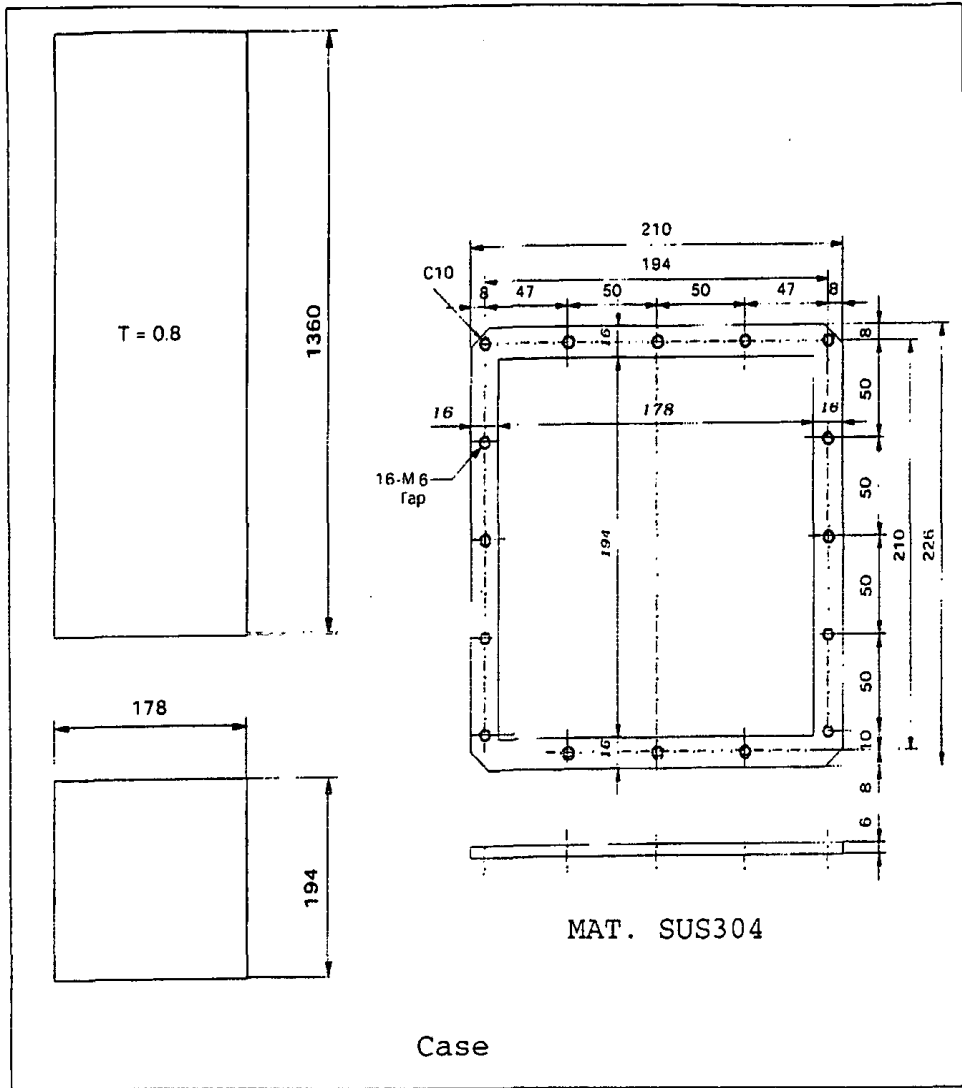


그림 3-37. 전동식센서부 케이스



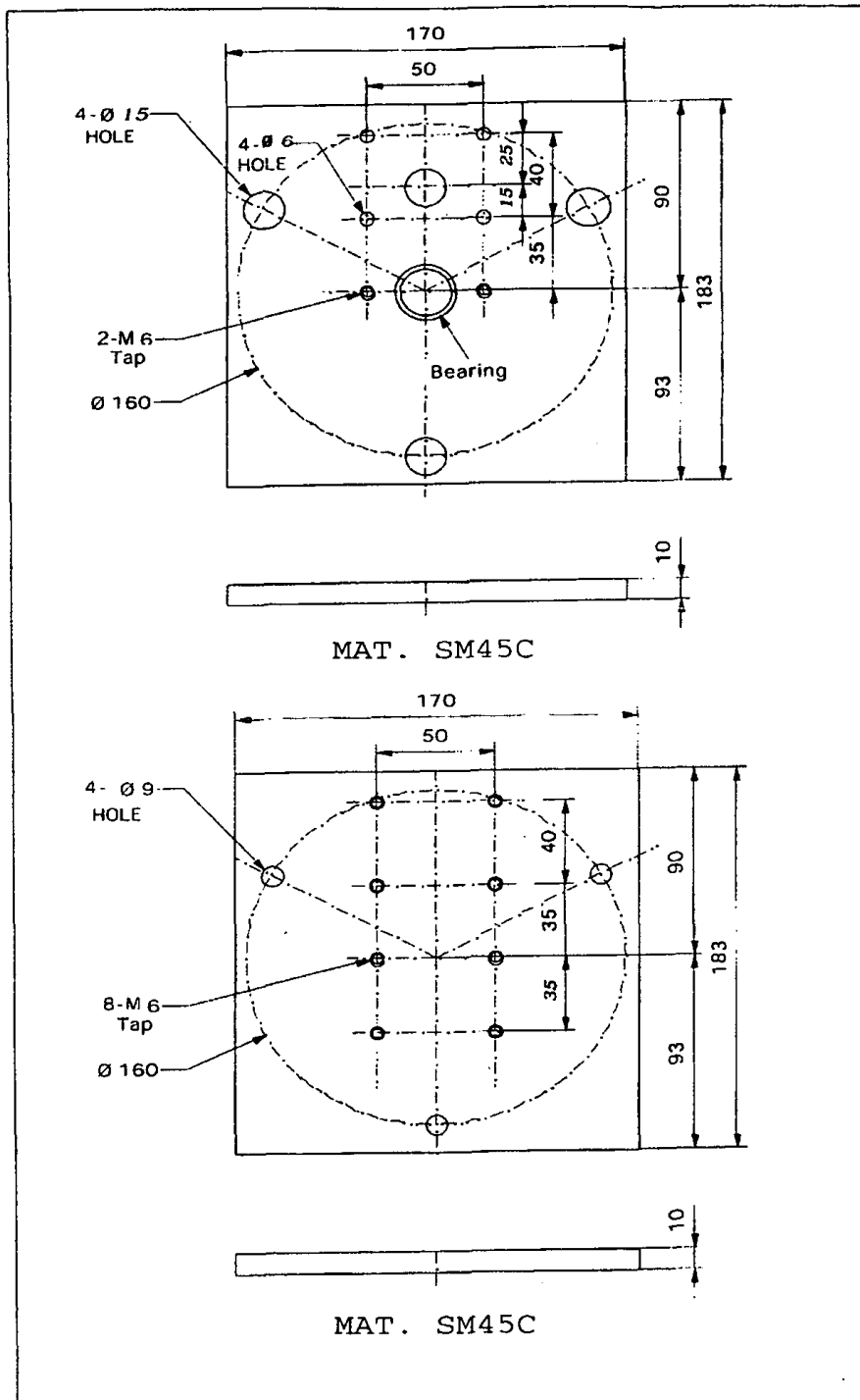


그림 3-39. 전동식센서부 상부 지지대 설계도

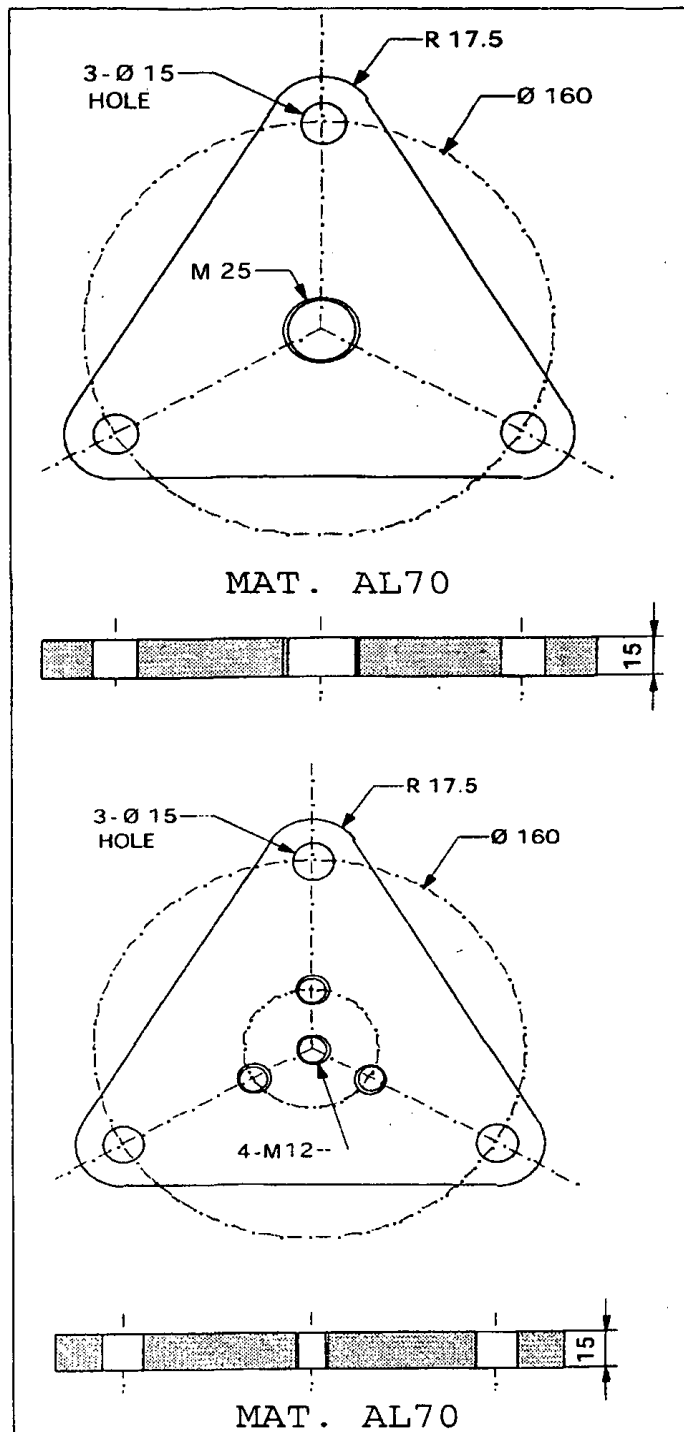


그림 3-40. 전동식센서부 구동부설계도

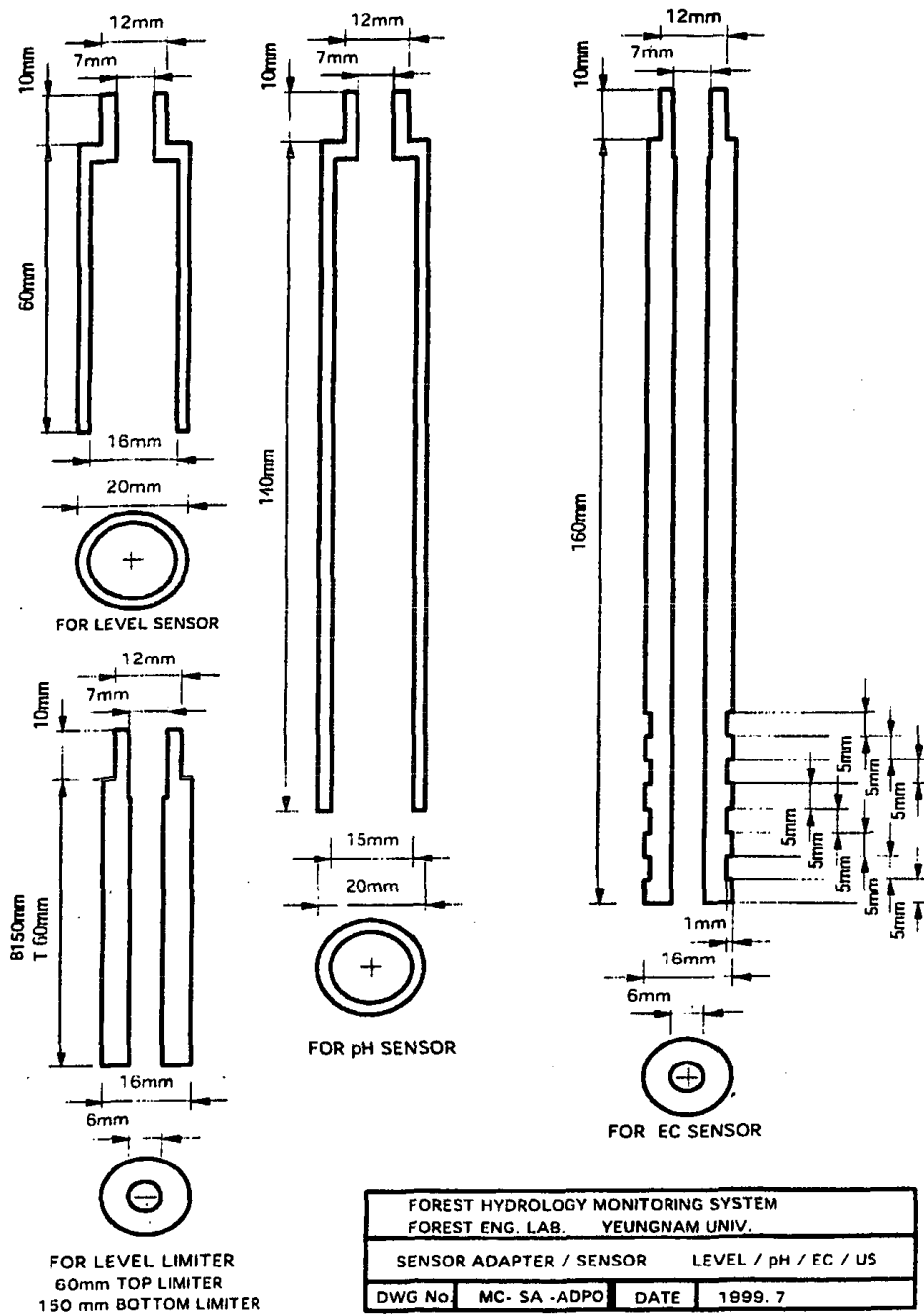


그림 3-41. 센서부 설계도



#### 4. 무선데이터 전송부

본 측정기의 설계에는 내부통신용으로 RS485를 사용하였다. 이 통신방법은 잡음에 강하며 또한 한 개의 통신선으로 송수신을 겸하고 있기 때문에 본 측정기와 같이 각 측정부가 유기적으로 통신을 해야하는 경우에 매우 유리하다. 또한 이러한 방법은 외부에서 테스트 기기나 노트북 등을 활용하여 선로의 상황을 직접 모니터링 할 수 있으므로 기기의 직접적인 테스트가 가능한 것이 특징이다.

각 측정부로부터 보내온 데이터는 데이터 저장 및 전송부에서 관측시스템에 내장된 2Mbyte 메모리에 저장하며, 무선데이터 전송부에서 요청이 있으면 저장된 데이터를 전송하도록 설계하였다. 기록된 데이터는 데이터 전송 후에도 지워지지 않도록 하였으며 또한 무선전송 시스템의 이상 등의 상황이 발생하면 관측지에서 노트북 등을 활용하여 기억된 데이터의 출력이 가능하도록 하였다. 그림 3-42에는 무선데이터 전송부의 블록다이어그램을 나타내었다. 그림 3-43에는 개발한 무선데이터 전송부의 사진을 나타내었다.

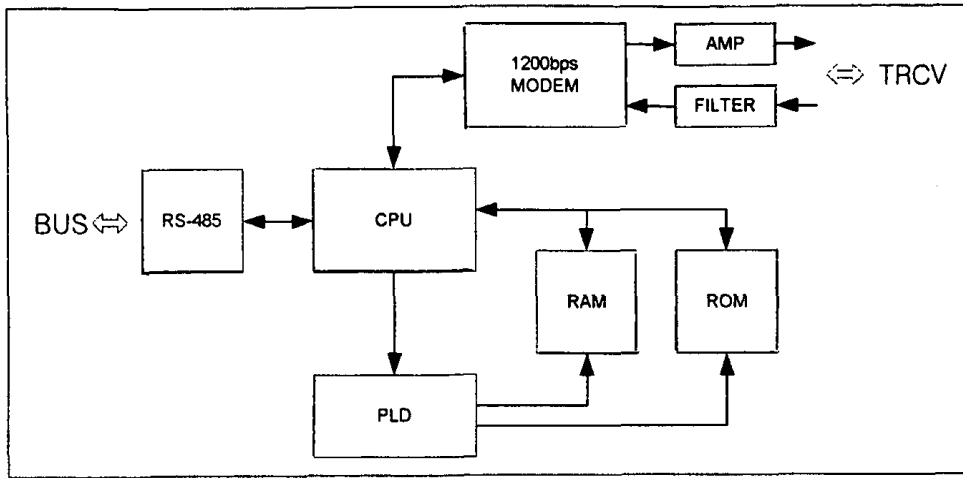


그림 3-42. 무선데이터 전송부 블록다이어그램

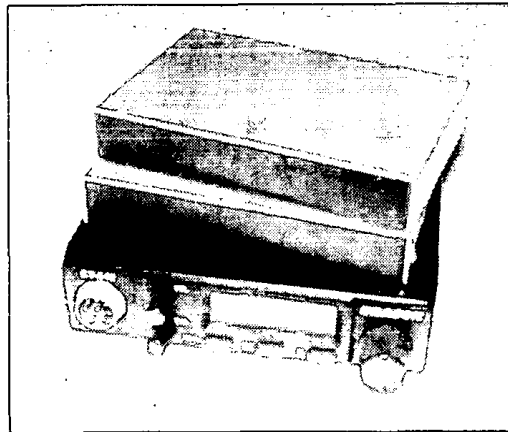


그림 3-43. 개발한 무선데이터 전송부

## 제4절 관측시스템 S/W 개발

### 1. 데이터 처리 소프트웨어

수문데이터의 측정 및 관리 소프트웨어는 개발 완료한 시스템에 내장되어 관측 및 시스템의 운영을 담당한다. 관측시스템은 다양한 기후조건 및 상황에서도 관측이 가능하여야 하고 관리 및 운영에 편리하여야 한다. 소프트웨어의 주요 개발 내용은 다음과 같다.

○ 운영소프트웨어는 다양한 상황에 대하여 적절한 대응이 가능하도록 하고, 편리성, 운영성과 정확성을 고려하여 개발하였다.

○ 측정 소프트웨어는 측정 항목별로 별도의 프로그램으로 작성하였다. 따라서 일부 측정부에서 이상이 발생하더라도 주변의 다른 측정부에는 영향을 미치지 않도록 하였다.

○ 관리 소프트웨어는 각 측정부의 측정 시작, 측정종료 그리고 시스템 차원의 에러에 대응할 수 있도록 프로그램을 구성하였다.

○ 무선전송시스템과 함께 데이터 전송 및 2차적인 기록을 추가할 수 있도록 하였다.

○ 관측시스템이 설치된 현장에서 노트북PC 등을 활용하여 시스템의 점검 및 설정이 가능하도록 하였으며, 무선전송시스템이 작동불능일 경우 현장에서 최대 3개월까지 저장된 데이터를 출력이 가능하도록 하였다.

○ 각 시스템의 정상작동 유무를 판단하여 기지국에 통보하도록 하여 전체 시스템의 효율적인 운영 및 관리가 가능하도록 하였다.

○ 원거리에서 각 부분별로 관측기기 및 프로그램의 제어를 가능하도록

하여 시스템의 관리가 용이하게 하였다.

○ 제어국의 원격 관리소프트웨어는 인터넷상에서 데이터베이스와 통합 운영되어 측정시스템 및 데이터베이스의 종합적인 관리가 가능하도록 개발하였다.

○ 제어국의 관리소프트웨어는 리눅스 서버시스템을 활용하여 개발·운영하며, 시스템 각 부분의 설정을 인터넷을 통한 원격조작으로 관리 및 모니터링이 가능하도록 하였다.

그림 3-44에는 데이터처리 소프트웨어의 블록다이어그램을 나타내었으며, 표 3-9에는 측정항목의 소프트웨어 기능을 나타내었다.

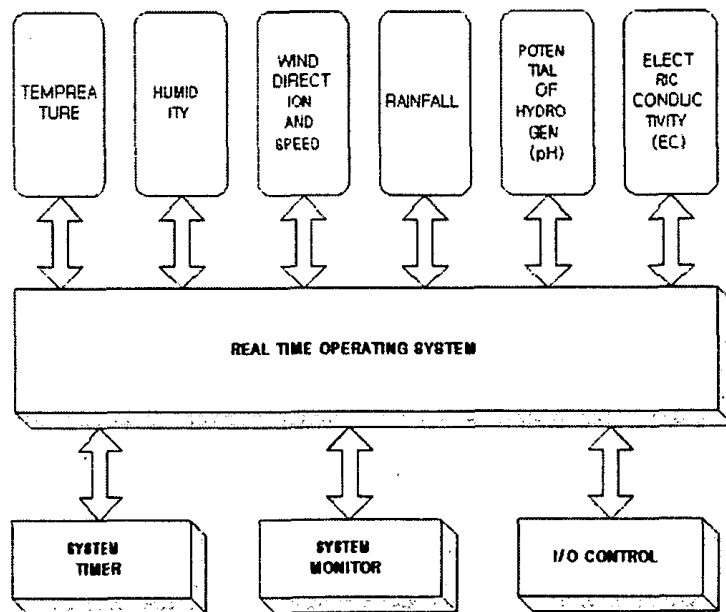


그림 3-44. 데이터 처리 소프트웨어의 블록다이어그램

표 3-9. 측정항목의 소프트웨어 기능

측정항목	기 능	비 고
온도/습도	1분/5분/15분/30분/1시간 선택 설정, 5회 연속측정 평균값 저장	산술평균값
강우량	센서 출력 시간간격저장	최저 1분
풍향/풍속	1분/5분/15분/30분/1시간 선택 설정, 최대·평균 풍속저장, 최대빈도 풍향저장	1분간 측정
수위	15분/30분/1시간 선택 설정 수위 평균치 저장	1회 측정
pH	15분/30분/1시간 선택설정	
EC	15분/30분/1시간 선택설정	

## 2. 무선데이터 전송 소프트웨어

관측자료의 원거리 전송 소프트웨어는 2차년도에 개발 완료한 관측시스템의 저장된 데이터를 제어국으로 전송하는 무선전송 시스템의 운용 소프트웨어이다. 관측자료의 원거리 전송부는 2차년도의 문제점을 보완하여 원거리 전송소프트웨어와 함께 새로운 전송시스템을 제작하였다. 주요 수행 내용은 다음과 같다. 표 3-10에는 암호화된 전송데이터의 구조를 나타내었다.

○ 원거리 전송 소프트웨어는 관측자료 전송시 발생할 수 있는 에러를 찾아내어 데이터의 재전송을 가능하도록 하여 데이터의 신뢰성이 높도록 하였다.

○ 전송 데이터를 암호화하여 보안성을 높였다.

표 3-10. 암호화전 전송 데이터 구조

데이터 종류	데이터 구조	비고
명령문	헤더 - 명령어 - 검사코드	2 byte
데이터	헤더 - 데이터수 - 데이터 - 검사코드	1회 최대 256byte
상태	헤더 - 상태코드 - 검사코드	32byte

### 3. 관측데이터베이스 소프트웨어

전송자료의 처리 및 분석 소프트웨어는 리눅스를 기반으로 PC서버 시스템에서 운영되고 있으며, 데이터베이스구축 및 처리, 통계분석 소프트웨어는 리눅스 기반의 웹서버 소프트웨어인 아파치와 함께 작동하므로 인터넷을 활용한 직접적인 데이터의 검색이 가능하도록 하여 시스템의 활용성을 높이도록 하였다.

○ 인터넷 기반의 서버시스템은 운용시스템으로의 접근이 용이하여 전송 자료의 다양한 활용과 다양한 시스템 운영이 가능하도록 하였다.

○ 인터넷 기반의 서버 시스템에 보안기능인 사용자 인증 기능을 추가하였다.

○ 향후 산지수질의 감시·예보시스템, 홍수·갈수유량 감시 시스템 및 타 지역 확대 활용 등이 가능하도록 하였다.

○ 전송자료의 처리 및 분석 소프트웨어의 개발은 원거리 전송 소프트웨어와 함께 제작하였다.

그림 3-45에는 홈페이지의 사용자 인증화면을, 그림 3-46에는 홈페이지

의 데이터 표시화면의 예를 나타내었다.

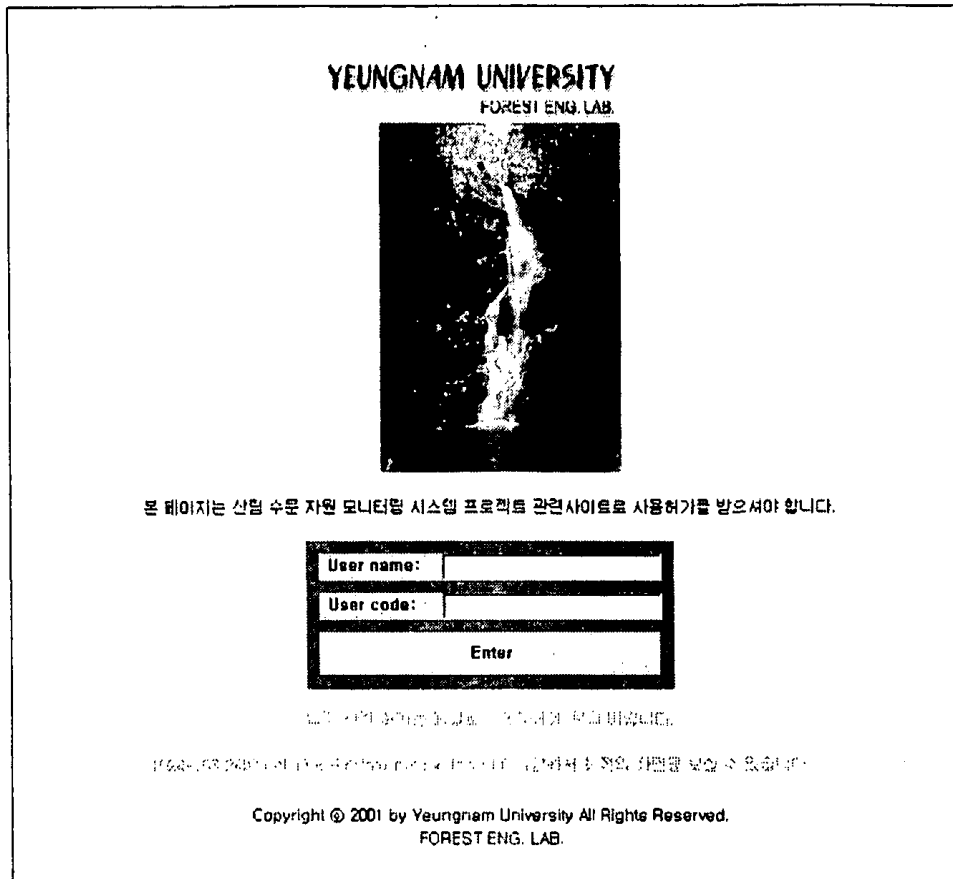


그림 3-45. 홈페이지의 사용자 인증화면

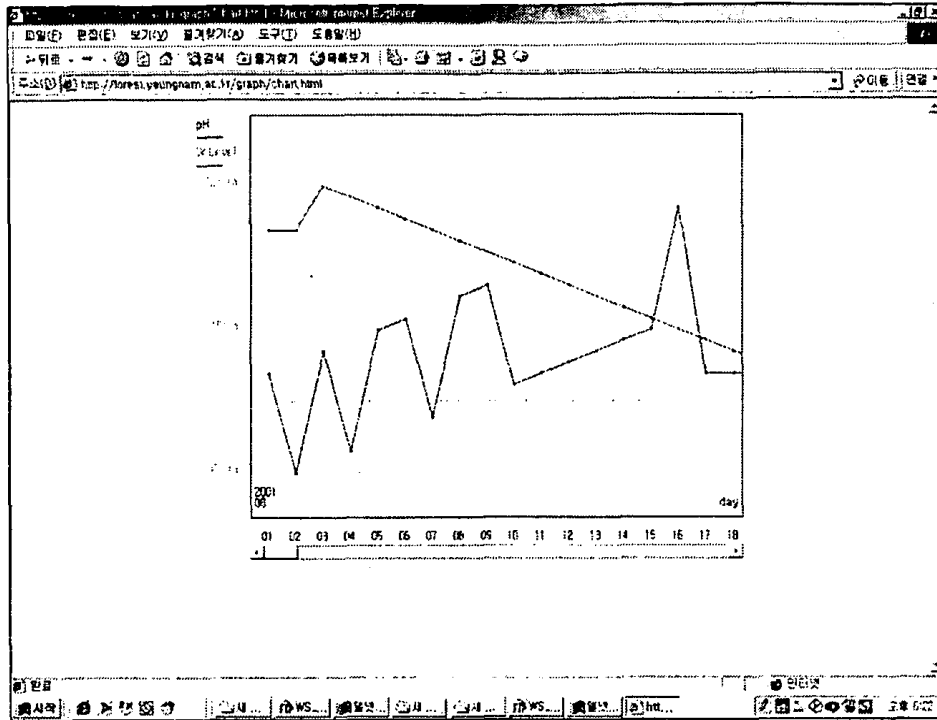


그림 3-46. 홈페이지의 데이터 표시 화면

#### 4. 관측데이터 응용 소프트웨어

개발한 관측시스템을 활용하여 시험지에서 관측한 유량 및 강우량 측정 값을 이용하여 계산한 값과 기준값을 비교한 후 유량의 이상 유무를 무선전송시스템을 이용하여 전송한다.

지정된 시간 간격으로 자동 측정된 유량은 앞서 관측한 강우량 자료와 함께 연산하여 그 값이 관측시스템에 설정된 경보 설정치를 벗어나면 자동으로 제어국으로 홍수 및 갈수량의 이상을 송신한다. 그림 3-47에는 홍수 및 갈수량의 감시시스템의 모식도를 나타내었다.



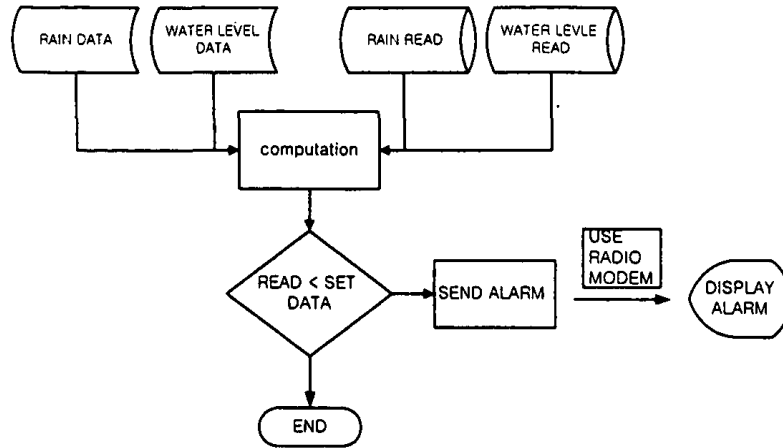


그림 3-47. 홍수 및 갈수 유량의 감시시스템 모식도

개발한 관측시스템은 무선데이터 전송시스템을 이용하여 실시간으로 데이터의 전송이 가능하므로, 제어국에 저장된 데이터를 이용하여 산지수질의 감시 및 예보시스템으로 활용할 수 있도록 하였다. 실시간으로 관측한 데이터는 앞서 관측된 데이터와 연산하여 그 출력값이 관측시스템에 저장된 경보 설정치를 벗어나면 자동으로 제어국에 수질의 이상을 송신한다. 그림 3-48에는 수질감시 및 예보시스템을 모식도로 나타내었다.

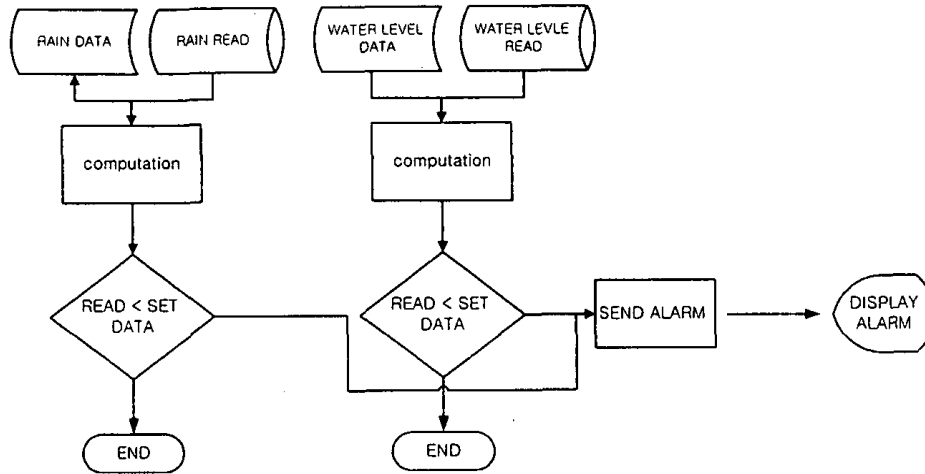


그림 3-48. 수질감시 및 예보시스템 모식도

## 제5절 시험 관측 결과

### 1. 시험지 개황

관측시스템 설치를 위한 야외 시험구역은 팔공산의 일개 소유역을 선정하였다. 이 구역은 구역면적 20여 ha의 아주 작은 소유역이며, 96년 10월부터 강우량 및 유량관측을 실시하고 있다. 현재의 관측시스템은 기존의 전도형 자기우량계와 지하수위 측정용 자기수위계를 설치하여 운용하고 있으며, 기타 기상관측은 실시하지 않고 있다. 본 구역을 시험구역으로 선정한 이유는 본 과제 수행기관인 영남대학교에서 비교적 가까운 곳에 위치하여 연구수행상 편리하며, 또한 임상의 구성이 혼효림이어서 산림의 수문학적 기능을 도출하는데 적합한 구역일 뿐만 아니라 규모가 작은 소유역이어서 물 유출에 미치는 산림의 영향을 정량적으로 산출하는데 유리하기 때문이다. 한

편, 시험지 유지관리 측면에서도 시설이 도립공원 내에 있어서 일반인의 출입이 통제하고 있으며, 또한 수문관측시설 주위는 철책으로 완벽하게 보호하고 있어서 수문관측 및 자료수집의 정확성을 높일 수 있는 장점이 있다. 그리고 타 지역의 확대 및 활용성 테스트를 위해 경상시 용성면 소재의 영남대학교 부속연습림내 제2의 시험유역을 1개소 추가 선정하였다.

### 가. 현장 시험지 개황

본 연구의 현장 시험은 팔공산 지역인 경상북도 경상시 와촌면 대한리 (동경  $128^{\circ} 44' 00'' \sim 128^{\circ} 44' 30''$ , 북위  $35^{\circ} 59' 00'' \sim 35^{\circ} 59' 30''$ ) 소재 수문관측시설이 위치한 1개 소유역에서 실시하였다. 본 유역 시험지의 식생분포는 소나무, 참나무류 등 침활혼효의 천연림이며, 연평균 강수량은 1132mm이며, 우리 나라의 연평균 강수량인 1247mm보다 적은 것으로 나타났다.



그림 3-49. 시험지의 위치



그림 3-50. 시험지 사진

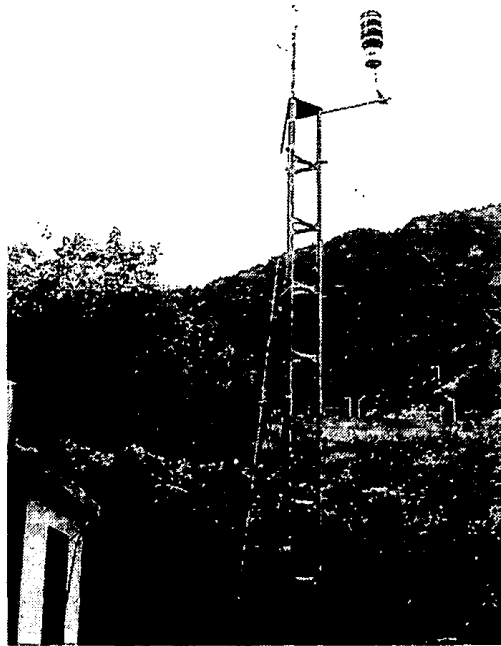


그림 3-51. 타워에 설치된 안테나 및 센서 사진

그림 3-49에는 연구시험지의 위치를, 그림 3-50에는 연구시험지의 사진을, 그림 3-51은 현장 시험운영중인 관측시스템의 모습을 나타내었다. 제작한 전동식센서부는 웨어의 상단에 부착하였으며, 노치와 가까운 곳에 설치하여 웨어의 월류 수위와의 오차를 줄였다. 우량계 및 기온, 습도센서는 지붕 및 벽면에, 풍량계 및 풍속계, 무선데이터 송수신용 안테나는 약 6m 높이의 타워에 설치하였으며, 3개의 지지선으로 고정하였다. 또한 낙뢰로 인한 피해를 방지하기 위해 3개의 어스를 안테나, 전동식센서부, 제작한 관측기에 설치하였다.

## 2. 센서부의 특성 시험 및 단위강우 관측 결과

개발한 시스템의 성능 평가를 위하여 실내 시험과 수문관측시설이 위치한 1개 소유역의 야외시험지를 대상으로 pH 및 기온을 대상으로 센서 및 측정부 대한 시험을 실시하였다. 실내 시험은 관측 항목 중 pH, EC, 온도에 대하여 실시하였으며, 관측시험지의 관측 값으로 추정되는 범위인 pH4 부터 pH7, 5 $\mu$ S 에서 30 $\mu$ S, 10 $^{\circ}$ C 에서 30 $^{\circ}$ C에 대하여 시험을 실시하였다. pH 및 온도는 개발한 시스템의 출력값과 Mettler Delta 350, Mettler MP-120, YSI30의 출력값을 비교하여 제작한 시스템의 성능을 평가하였다.

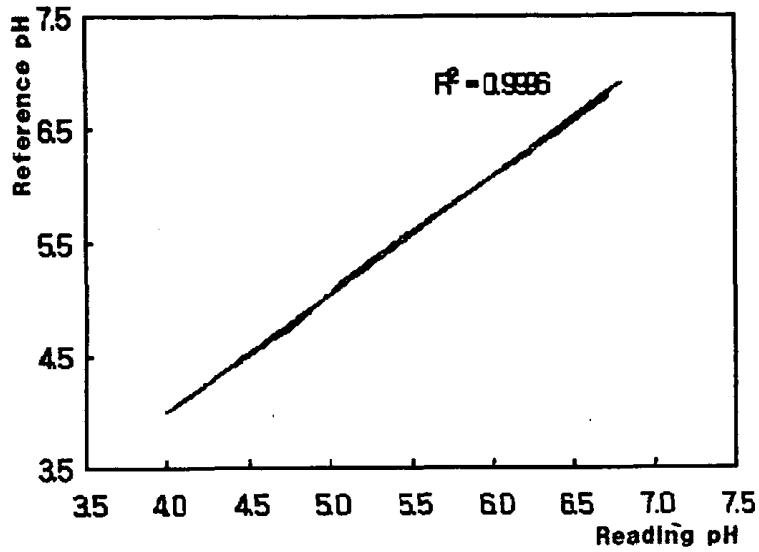


그림 3-52. pH 시험결과 (시험온도 15℃)

pH측정부의 시험결과는 그림 3-52와 같으며, 측정값의 분해능 (Resolution)이 0.1pH 와 정확도(Accuracy)가 최대  $\pm 0.1\text{pH}$ 의 범위에서 측정되어 본 연구의 목적에 적합한 정밀도를 가진다고 판단된다.

EC측정부의 시험결과 측정값은 분해능이 1uS 와 정확도가  $\pm 1\text{uS}$ 의 범위에서 측정되었으며, 시험 결과는 그림 3-53과 같다. EC측정부의 시험결과는 본 연구의 목적에 적합한 정밀도를 가진다고 판단된다.

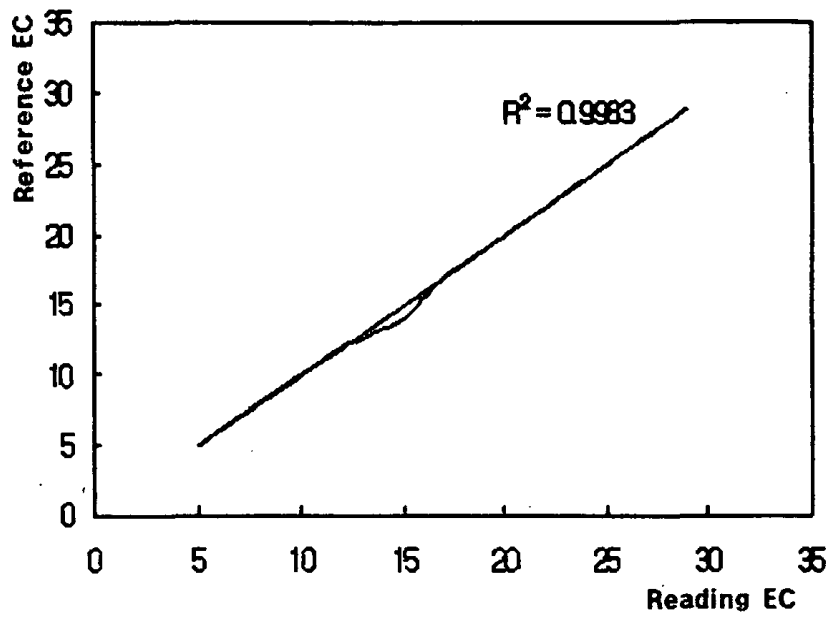


그림 3-53. EC 시험결과 (시험온도 15℃)

온도측정부의 시험결과는 그림 3-54와 같으며, 측정값의 분해능이 0.1℃와 정확도가 최대 ±0.2℃의 범위에서 측정되어, 본 연구의 목적에 적합한 정밀도를 가진다고 판단된다.

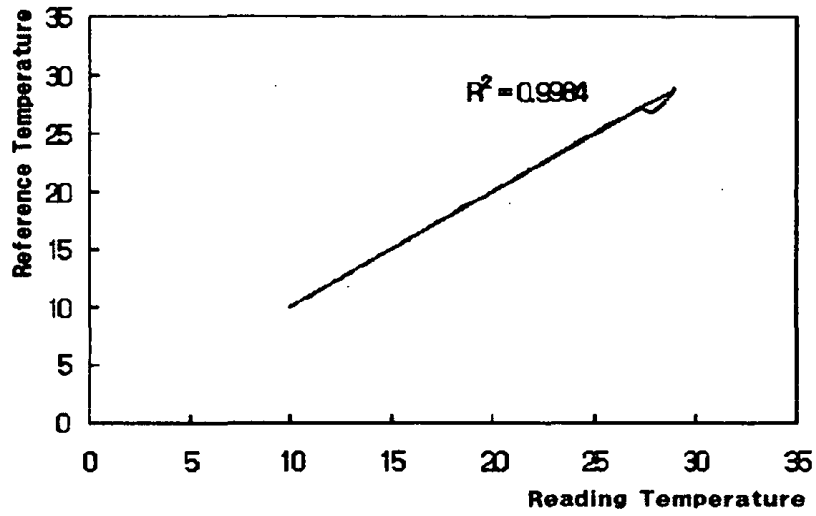


그림 3-54. 온도측정부 시험결과

시험대상지인 팔공산 지역의 산림유역시험지에서 자기우량계와 자기수위계에서 관측한 자료를 활용하여 개발한 관측시스템을 검증한 관측 자료의 예를 그림 3-55, 그림 3-56에 나타내었다.

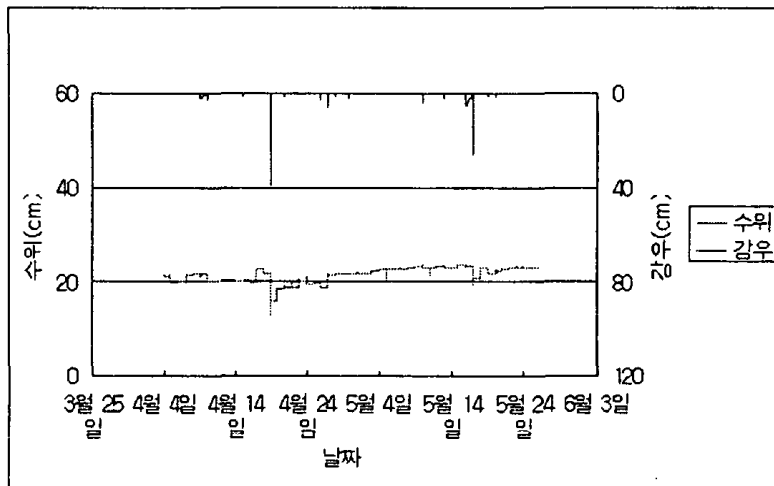


그림 3-55. 관측한 강우-수위곡선



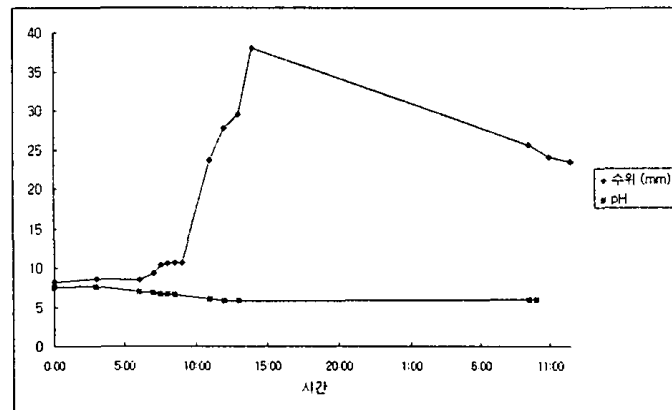
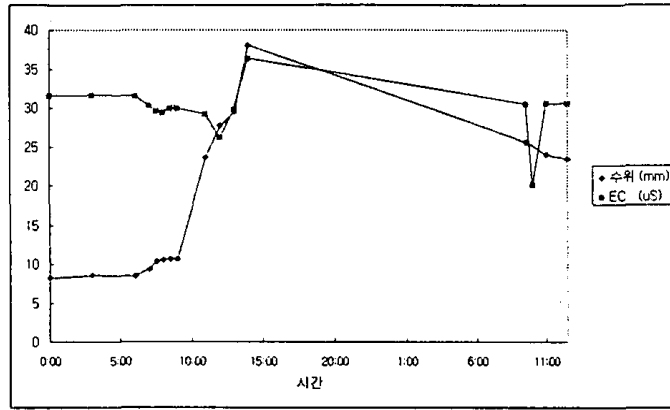
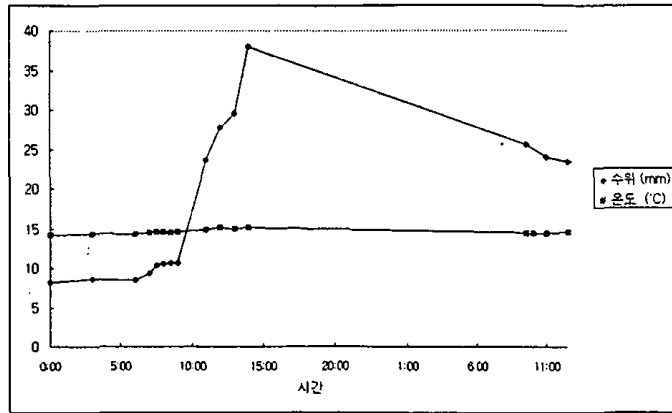


그림 3-56. 시험구역에 있어서 홍수유출시의 유출수량과 수질인자와의 관계

개발한 관측시스템을 이용하여 관측한 결과 원거리에서 산림지 계류수의 수문·수질 및 기상에 대해 장기적이고 안정적인 측정이 가능할 것으로 평가되었다.

### 3. 장기강우 시험 관측 결과

수문관측시스템을 이용하여 장기간의 유출수량과 강수량의 관계를 구하여 그림 3-57에 나타내었다. 홍수유출시의 유출수량과 수질인자(EC, 수온, DO, pH, 탁도)와의 관계를 구하여 그림 3-58에 나타냈다.

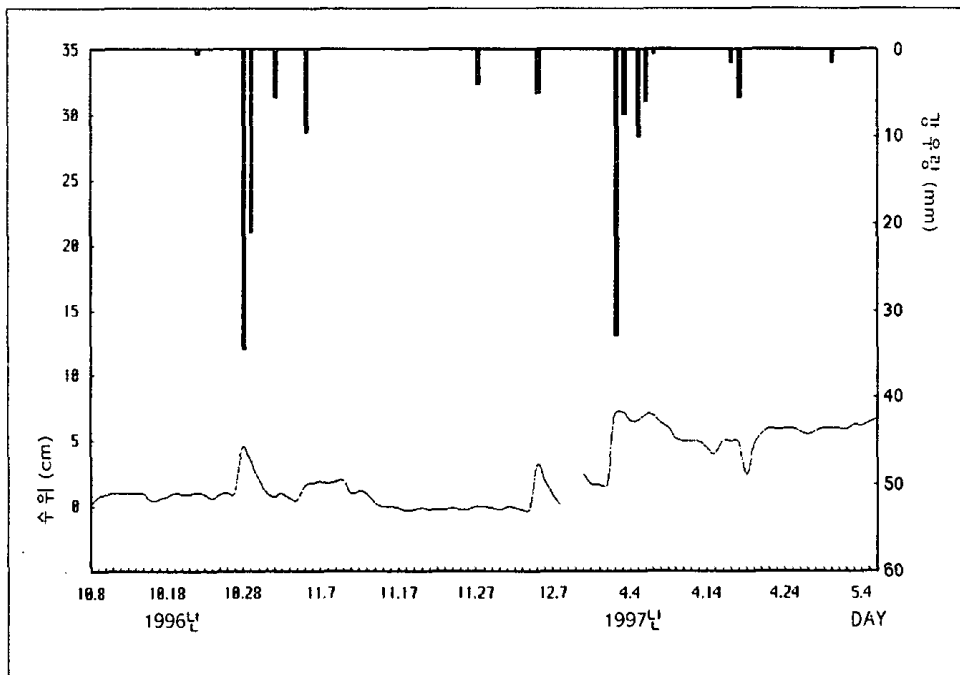


그림 3-57. 시험유역의 장기유출수량과 강수량의 관계

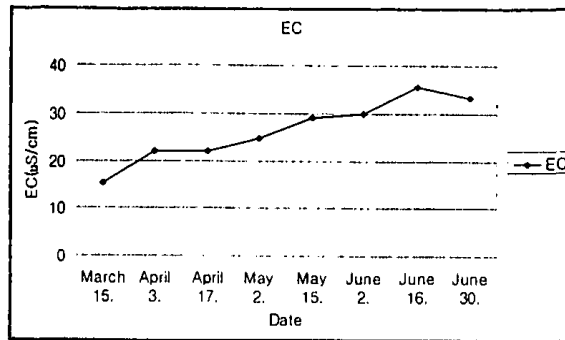
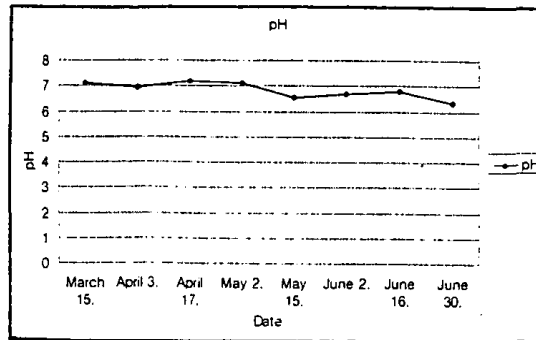


그림 3-58. 관측한 pH, EC

## 제6절 개발시스템 응용

### 1. 홍수 및 갈수 유량 감시 시스템

개발한 관측시스템을 활용하여 시험지에서 관측한 유량 및 강우량 측정 값을 이용하여 계산한 값과 기준값을 비교한 후 유량의 이상 유무를 무선 전송시스템을 이용하여 전송한다.

지정된 시간 간격으로 자동 측정된 유량은 앞서 관측한 강우량 자료와 함께 연산하여 그 값이 관측시스템에 설정된 경보 설정치를 벗어나면 자동으로 제어국으로 홍수 및 갈수량의 이상을 송신한다. 그림 3-59에는 홍수

및 갈수유량의 감시시스템의 설정화면을 그림 3-60에는 경고 출력 모습을 나타내었다.

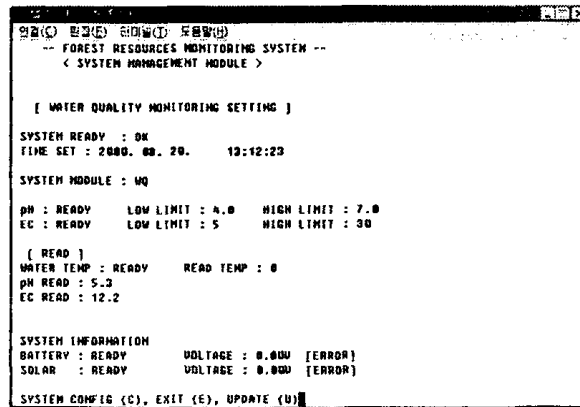


그림 3-59. 홍수 및 갈수 유량의 예보 설정화면

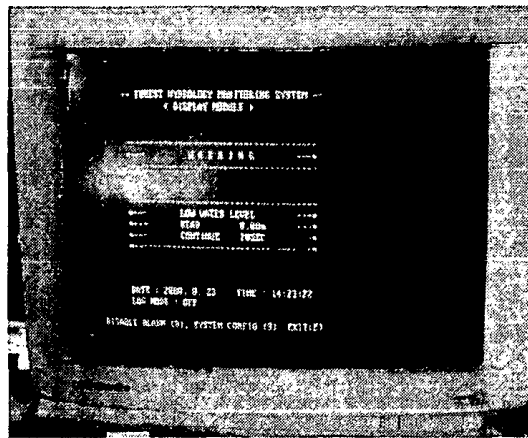


그림 3-60. 홍수 및 갈수유량의 예보 화면

## 2. 산지수질의 감시 및 예보시스템

개발한 관측시스템은 무선데이터 전송시스템을 이용하여 실시간으로 데

이터의 전송이 가능하므로, 제어국에 저장된 데이터를 이용하여 산지수질의 감시 및 예보시스템으로 활용할 수 있도록 하였다. 실시간으로 관측한 데이터는 앞서 관측된 데이터와 연산하여 그 출력값이 관측시스템에 저장된 경보 설정치를 벗어나면 자동으로 제어국에 수질의 이상을 송신한다. 그림 3-61에는 수질감시 및 예보시스템의 설정화면을, 그림 3-62에는 경보 화면의 출력모습을 나타내었다.

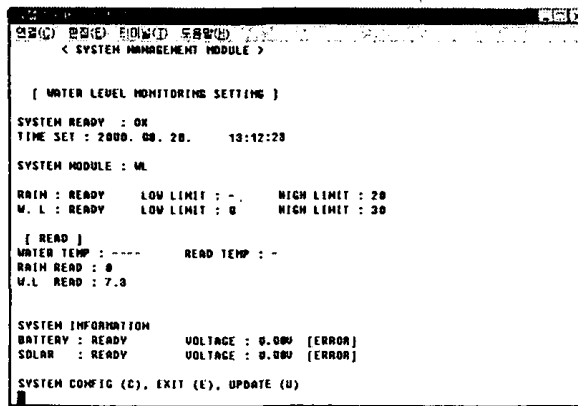


그림 3-61. 수질 감시 및 예보시스템 설정화면

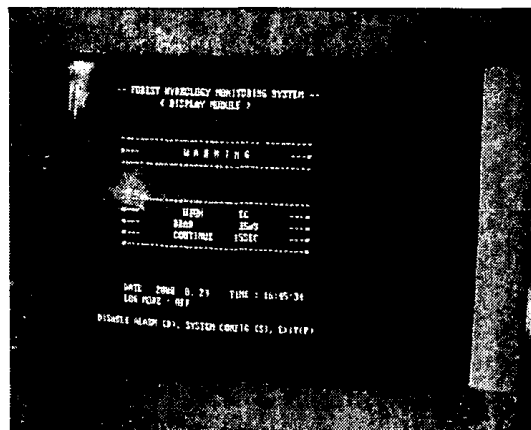


그림 3-62. 수질 감시 시스템 예보화면

### 3. 관측시스템의 타지역 확대 활용 기술

개발한 관측 및 전송시스템은 무선데이터 전송시스템을 활용하여 시험지의 유량 측정값이 실시간 전송할 수 있으며, 인터넷을 이용한 관측 값의 장거리 전송이 가능하므로 관측지에서 가까운 연구소 등에 무선데이터 전송 시스템을 설치하여 전국적인 확대 활용이 가능한 시스템을 개발하였다.

또한 관측데이터는 인터넷을 이용하여 인증된 사용자가 홈페이지 형식의 데이터 베이스에서 수질 및 산림 기상 등 측정값의 검색 및 출력이 가능하도록 개량된 데이터 베이스 시스템을 개발하였다.

이러한 시스템을 활용하여 각 개별 관측소를 중심으로 인터넷으로 연결된 전국적인 관측망을 형성할 수 있어 타지역의 관측데이터를 쉽게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 제7절 종합결론 및 제언

산림수문환경 모니터링 시스템 구축 분야의 주요 연구 결과는 다음과 같다. 산지유역 수문·수질환경 관측 및 원거리에서 실시간 모니터링을 목적으로 관측시스템을 개발하였으며, 개발한 관측시스템은 특징은 다음과 같다.

○ 산지 유역의 수질 및 수질 정화능 등의 관측이나 산원 수자원 관리를 위하여, 산림지의 수문 및 수질환경의 변화를 체계적으로 장기관측이 가능하도록 하고, 지속적이고 장기적인 산지 수문 환경 모니터링이 가능하도록 산림수문환경 모니터링 시스템을 구축하였다.

○ 무인자동관측항목은 기상인자로는 강우량, 유출량, 풍향 및 풍속, 기온, 습도를 계류수의 수질인자로는 pH, EC, 수온 등을 측정할 수 있으며, 측정 센서의 추가 및 변경이 가능하도록 하였다.

○ 개발한 관측시스템은 크게 신호처리부, 전동식센서부, 전원제어부, 무선데이터통신부로 구성하였으며, 신호처리부는 CPU로 AT89C51을 사용하였고, 2Mbyte의 RAM과 1Mbyte의 ROM 및 2개의 CPLD로 구성되어 있으며, 12bit A/D 컨버터와 MUX를 내장하고 있다. 외부통신용으로 RS485와 RS232입력단자, 8ch의 아날로그 입력(2×4port) 또는 4port의 절연된 디지털 입력 단자를 가지고 있다. 또한 시스템 구성을 위한 스위치 및 표시기를 가지고 있다. 각 센서에서 출력된 신호를 디지털 값으로 변환하고 입력할 수 있도록 하였으며, 전동식센서부에서는 계류수의 수위 및 수질 측정을 위해 센서를 일정한 수심으로 이동시킬 수 있도록 하였다. 전원제어부에서는 산림지에서 사용이 용이하도록 태양전지와 배터리로 구성되어 전원을 공급할 수 있도록 하였으며, 무선데이터통신부에서는 측정된 데이터를 일정 시간간격으로 무선모뎀을 통해 전송할 수 있도록 하였다.

○ 관측시스템 구성은 각 기능별로 완전한 독립구조의 모듈형태로 구성되어, 측정 센서의 교체, 추가 등의 변경이 용이하도록 하였다. 또 이러한 독립적인 구성으로 센서 또는 측정항목의 추가 개발이나 이용이 용이하도록 하였다.

○ 모터에 의해 구동되는 웨어부착형 전동식 센서유닛은 초음파센서와 뜨게식 센서를 이용하여 수면의 높이를 정확히 측정할 수 있도록 하였으며, 전동식 센서유닛은 항상 일정한 측정수심을 유지할 수 있어 측정 오차를 줄일 수 있었다. 또한 센서가 항상 물 속에 잠겨있는 구조에서 흔히 발생하는 물이끼 등의 영향으로 발생하는 오차를 줄일 수 있을 뿐 아니라, 계류수의 결빙 및 급류에 의한 센서의 파손을 방지할 수 있다고 생각된다.

○ 관측데이터는 인터넷을 이용하여 익스플로러 등의 소프트웨어만으로 검색 및 사용이 가능하도록 하였다. 이러한 기능은 많은 관측기기가 인터넷으로 연결되고 있는 기술의 발전방향과도 일치한다고 할 수 있다.

○ 시험대상지인 팔공산 지역의 산림유역시험지에서 자기우량계와 자기수위계를 설치하여 관측한 강우량과 유출수위 등의 자료와 개발한 관측시스템의 데이터를 비교 분석하여 개발한 관측시스템에 의한 수문자료를 비교·검증하였다. 또한 단위강우를 대상으로 시험지의 계류수를 채취하여 관측시스템의 수질 데이터의 비교 검증을 실시하였으며, 수질의 변화를 측정하여 감시시스템의 현장 적용성을 분석하였다.

○ 관측시스템을 현장에 설치하여 시험 운영해 본 결과 장기적이고 안정적인 수문 및 수질인자의 측정이 가능할 것으로 평가되었으며, 지속적인 자료수집과 모니터링이 가능할 것으로 평가되었다.

○ 개발한 시스템을 활용하여 각 개별 관측소를 중심으로 인터넷으로 연결된 전국적인 관측망을 형성할 수 있어 타지역의 관측데이터를 쉽게 활용할 수 있을 것으로 판단되며, 향후 관리 소프트웨어의 기능 개선, 각종 환경관련 센서의 추가 개발을 통해 다양한 지역의 산림에서 지속적이고 광범위한 환경모니터링이 가능하도록 하고자 한다.



# 제 4 장 산지유역의 수질변동 예측을 위한 산원수 수질 해석 모형의 개발

## 제1절 서 설

### 1. 연구의 필요성

사회 경제의 고도 성장에 수반되어 환경보전과 함께 맑은 물의 요구가 급증하고 있다. 삼림은 토양 내에 많은 공극이 있어서 물을 보유하며 정화하는 기능을 가지고 있어서 이러한 삼림을 '푸른 댐'이라고 하여 이에 대한 관심이 높아지고 있다. 최근 연구의 경향은 삼림의 연구를 평가하기 위하여 소유역을 대상으로 산지 사면에서의 물의 흐름 과정을 규명하는데 집중하고 있다. 수자원에 미치는 삼림의 영향은 삼림자체의 단일 영향에 의한 것이 아니며 기상, 지형의 지형적 요인과 복합적으로 작용하고 있으므로 그 정량적 평가를 하기 위하여는 지역적 특성 파악이 요구되고 있다. 삼림이 수자원에 미치는 기능의 파악은 조그만 유역을 대상으로 물의 흐름 과정을 파악하는데 역점을 두어 그 메커니즘을 밝히고, 또한 살아있는 나무의 뿌리와 토양과의 관련을 파악하여 생태계의 보전과 함께 산림수문자료의 수집에 의한 수자원 보호와 확보에 주력하는데 큰 역할을 한다.

### 2. 연구 목적

연구목적은 산림유역에서의 수질형성 과정에 대한 조사·분석을 통하여

산림유역의 수질형성과정을 해석하고 이를 바탕으로 주요 수질결정 물질의 산림유역내 공간분포의 구명 및 해석에 있다. 최근의 연구 경향은 산림의 기능에 대한 평가를 하기 위하여 조그만 유역을 대상으로 산지사면에서의 물의 흐름 과정을 파악하는데 역점을 두고 있다. 산림의 기능의 정량화의 단계로써 산지 사면에서의 물의 이동의 메커니즘을 밝히며, 또한 살아 있는 생명체인 나무, 특히 수관이 물의 흐름에 미치는 영향을 파악하여 생태계의 보전과 함께 적극적인 수자원 보호와 확보에 기여하고자 한다. 산지 사면에서의 수분 이동을 파악하므로써 산림의 수자원에 미치는 영향을 정량적으로 파악하게 된다. 물과 식물과 토양의 상호 관련하여 물의 순환의 맥락 속에서 평가되므로 산림 수문에 대한 연구를 수행하고자 한다. 이에 대한 연구는 앞으로 환경문제 해결에 가장 핵심이 될 것이며, 이를 위해서는 토양내의 물의 흐름의 파악과 산원수 수질에 관여하는 물질의 공간적 해석을 명확히 하고자 한다.

## 제2절 연구동향

### 1. 수질 모델링

수질을 예측하기 위하여 수질모델은 우리에게 가상의 상황을 요약하여 보여주는 중요한 수단이 된다. 수질모델을 사용하기 앞서 우선적으로 생각해야 하는 것은 달성하고자 하는 구체적인 목표이다. 이 목표는 대상 호소가 안고 있는 각종 문제점을 고려하여 설정되어야 한다. 경우에 따라서는 호수 전반에 걸친 연평균 농도만이 필요할 수 있으나 각 지점에 대한 일별 변화특성을 자세하게 계산해야 할 필요가 있을 경우도 존재한다(서동일,

1999).

따라서, 수질모델은 모델을 구성하는 사람의 현상에 대한 이해정도나 가정 그리고 문제를 적절하게 다루는 데 필요한 여러 가지 제약조건(자료의 확보 가능성 등)에 따라 다양한 형태로 존재한다. 그러므로 상황에 따라 간단한 모형을 구성하여 적용하는 것이 더욱 바람직할 수 있으며 수질모델의 역할은 이러한 작업에서 더 큰 진가를 발휘하는 경우가 많다. 수질모델링은 현장의 수질변화 현상과 각종 수질관리기법, 그리고 컴퓨터에 관한 전문지식 등이 요구되는 종합적인 학문 분야이다(서동일, 1999).

## 2. 비점 오염원 수질 모델링

오염원은 그 관점에 따라 많은 분류방법이 있겠지만 그 중의 하나로서 점 오염원(point source)와 비점 오염원(Nonpoint source)으로 분류할 수 있다. 이들의 방법 또한 다양하겠으나, 일반적으로 식별 가능한 명확한 경로를 통하여 유입하며, 그 양을 판정할 수 있는 오염원을 점 오염원으로, 그 외의 오염원을 비점 오염원으로 정의할 수 있을 것이다(전경수, 1997).

즉, 비점 오염원은 주로 토지 상에 또는 대기 중에 분포되어 있으며, 간헐적으로 유입하기 때문에 그 양과 유입경로를 판별하기 어렵다. 비점 오염원에 의한 오염문제는 1970년대 중반까지만 해도 일반에게 거의 인식되지 않았으나, 비료와 농약 등 토양오염 물질과 도시화 및 자동차의 증가 등에 따른 각종 대기오염 물질의 증가로 비점 오염원이 생태계에 미치는 폐해가 심각해지고 있으며, 우리 나라의 경우도 예외는 아니다. 이에 따라 비점 오염원이 환경에 미치는 영향의 평가, 악영향을 감소시키기 위한 조절 대책의 수립 등을 위한 투자와 연구가 많은 국가에서 이미 활발하게 진행되고 있다(전경수, 1997).

반면에, 국내의 경우에는 이에 대한 관심 및 체계적인 연구가 상대적으로 미흡하며, 특히 도시 지역 우수 유출수에 대한 관점은 수량의 조절 문제에 주로 편중되어 비점 오염원에 의한 수질의 문제는 소홀히 다루어지고 있는 현실이다(전경수, 1997).

비점 오염원이 수체에 미치는 영향의 평가 또는 그 조절방안의 수립 등을 위한 유용한 수단으로서 수학적 모형이 널리 사용되고 있다. 물론 비점 오염원과 관련된 모든 수질문제가 모형의 적용을 필요로 하는 것은 아니나, 특히 비점 오염원의 공간적 분포 또는 유출수량과 수질의 시간적, 공간적 특성 파악, 비점 오염원이 유출되는 수체, 즉 하천, 호소 등의 수질을 분석하기 위한 입력자료 제공, 비점 오염원의 조절을 위한 여러 대안들(용량, 위치 등)의 효과 분석, 빈도해석에 의한 농도, 부하량 등 수질변수들의 재현기간 결정, 비용/편익 분석을 위한 입력자료 제공 등과 같은 목적으로 유용하게 쓰일 수 있다(Donigian과 Huber, 1991).

비점 오염원 수질모의방법으로는 일정농도법 및 단위부하량 방법, 통계적 방법, 회귀분석에 의한 접근방법, 축적 및 쓸림의 개념에 따른 모의방법 등이 있으며, 대표적인 비점 오염원 수질모의모형으로는 HSPF, CREAMS, ANSWERS, AGNPS, PRZM, SWRRB 등이 있다. 이들은 모두 1980년대 개발된 유역 모형으로서 유역내 오염부하량을 산정할 뿐만 아니라 수질 모의도 가능하다(전경수, 1997).

## 가. 도시지역에 대한 비점 오염원 모형의 종류

### 1) STORM 모형

STORM 모형은 시간(hour) 단위의 연속 모의를 위한 계산모형으로서, 유

출량 및 수질계산 방법은 매우 간단하다. 유출량의 계산에는 유출계수법, SCS 방법 또는 이들의 조합형이 사용될 수 있으며, 수질계산에 있어서는 축적 및 쓸림 모형이 사용된다. 축적량은 선형적으로, 쓸림 과정은 지수함수로서 각각 모의하며, 한 번에 6개의 오염물질에 대한 계산이 가능하다. 범용토양유실방정식을 사용하여 침식을 모의할 수 있다(HEC, 1977).

STORM 모형의 유출량 계산방법은 매우 간단하기 때문에 필요한 입력자료가 많지 않은 대신, 관측 수문곡선에 잘 맞는 매개변수 값들을 추정하는데 어려움이 따른다. 이는 수질계산에 있어서도 마찬가지로서, STORM 모형의 수질계산 과정은 초기의 SWMM 모형을 거의 답습한 것으로서, 관측 오염도 곡선과 모형의 계산결과를 잘 일치시키기가 쉽지 않은 것으로 알려져 있다 (Abbott, 1977).

그러나 STORM 모형은 그 사용이 간편하기 때문에, 아직도 많은 사람들이 STORM 프로그램을 각자의 사용목적에 맞게 변형하여 널리 사용하고 있으며 (Donigan and Huber, 1991), 현재 STORM 모형의 전 처리 과정을 포함한 소프트웨어인 ProStorm(Dodson, 1991) 등이 가용하여 개인용 컴퓨터를 통한 사용이 가능하다.

## 2) SWMM 모형

SWMM 모형은 모형의 입출력 등 전체적인 조절을 담당하는 EXECUTIVE 블록(block), 흐름, 수질계산 및 저류/처리 분석 등을 수행하는 RUNOFF, TRANSPORT, EXTRAN 및 STORAGE/TREATMENT 등 4개의 실행블록 및 모형의 입출력과 계산결과의 통계적 분석을 위한 5개의 보조블록으로 구성되어 있다.

SWMM 모형은 단일 소유역에 배수로망이 없는 아주 간단한 경우에서부터 많은 소유역과 수로 및 관로들이 포함된 매우 복잡한 경우에 이르기까지 모

의가 가능하며, 각 경우마다 필요한 입력자료의 양도 크게 달라진다. 최소한의 입력 자료로서 유역면적, 불투수성, 경사, 조도, 요지 저류 용량, 침투 특성 등이 필요하다.

SWMM 모형의 유량계산은 매우 상세하고 관측치와 잘 일치하는 결과를 주는 반면, 수질 계산 모형은 실제의 물리적, 화학적, 생물학적 과정을 제대로 나타내지는 못하고 있으나, 이는 다른 모형들의 경우에도 공통적으로 해당되는 사항이다. 소형컴퓨터용 버전이 가용하며 특히 최근 WINDOWS용 버전(Lahiou et al., 1995)이 제공되기 시작하였으나 그래픽 처리 등은 미흡하다. 또한 XPSWMM, FTI/SWMM 등 SWMM 모형의 전 후처리용 상용 소프트웨어들이 개발되어 있다.

SWMM 모형은 미국 Metcalf and Eddy사, Water Resource Engineers사 및 Florida 대학의 공동연구로 1971년 최초 개발되었다. 이후 수년간은 EPA의 지원으로 Florida 대학에서, 그 이후로 현대까지는 EPA에서 관리해 오고 있다. SWMM은 많은 사람들이 쉽게 접근하여 사용할 수 있는 공용 소프트웨어로서, 특히 사용자 그룹의 학술회의를 자주 개최한 데 힘입어 계속적으로 수정, 보완, 개선되어 왔으며 현재 가용한 최신 버전은 버전 4이다(Huber and Dickinson, 1988; Roesner et al., 1988). 국내에서도 신현석과 윤용남(1993) 및 이종태와 강태호(1997) 등에 의하여 적용된 바 있다.

### 3) HSPF(Hydrologic Simulation Program-FORTRAN)

HSPF는 유역의 수문계산과 통상적 오염원 외에도 독성 유기물에 관한 수질을 모의하는 종합적인 유역 수문모형이다. 1966년 Stanford Watershed 수문모형에서 시작하여, 이후 비점 오염원 모형에 관한 EPA의 많은 연구 결과가 계속적으로 모형에 포함되어 왔다. 하도에서의 1차원 수질 모의과정을

포함하고 있으며 이밖에도 지표면과 토양에서의 오염원 유출과정과 퇴적물 내 화학적 상호반응 및 점 오염원까지를 포함하는 유일한 통합모형이다. 이러한 통합적 기능으로 비 도시 지역에 관한 수문/수질 모형으로 널리 사용되어 왔으나 도시(불투수) 지역에 대해서도 SWMM과 유사한 방법으로 모의를 수행한다. EPA의 사용자 지침서(Bicknell et al., 1993)는 물론, 모형의 보정을 위한 전문가 시스템인 HSPEXP(Lumb et al., 1994)가 미국 지질 조사국에서 개발되어 가용한 상태이다.

#### 나. 비도시지역에 대한 비점 오염원모형의 종류

비도시지역은 논, 밭, 산림이 주요한 비점오염원으로 작용하는 특징을 가지며, 이러한 토지이용으로부터의 오염부하를 다루는 비점오염모형은 단순한 원단위법부터 복잡한 수문모형을 이용한 방법에 이르기까지 그 연구의 목적이나 수준에 따라 다양하다. 비도시지역에 대한 일반적인 비점오염모형들을 그 수준에 따라 분류하여 설명하면 다음과 같다.

##### 1) 원단위법

원단위를 간단히 정의하면 단위시간당 단위토지면적당 배출되는 오염물질량을 말하며, 단위는 일반적으로 비점오염부하량(kilograms)/면적(hectare)/시간(year혹은 day)으로 나타낸다.

원단위를 구하기 위해서 일년 내내 비점오염원을 실측조사 할 수 없기 때문에, 시료채취한 기간에 대해 계산한 값을 연간으로 환산하여 사용하는 것이 보편화되어 있다. 우리나라의 경우도 장기간의 연속자료를 이용하기 보다는 수회의 강우-유출-오염농도 측정자료를 이용해 이를 연간의 강우량

이나 유출량과 연결시켜 연간 비점오염원 원단위를 산정하고 있다.

원단위의 산정 과정이 제시하는 바와 같이, 관심의 대상이 되는 임의의 시간대에 대하여 연간 오염원 원단위를 그대로 적용하는 것은 마치 강우가 일년 내내 균일하게 발생한다고 가정하는 것과 같다. 그럼에도 불구하고, 원단위를 사용한 비점원 오염부하량 산정에 관한 기존의 많은 연구(김성근, 1983; 이수길, 1991; 김병찬, 1995; 김성준, 1996; 이요상, 1996; 박승우 등, 1997 등)는 원단위를 년간 일정한 것으로 간주하여 적용하였다.

이를 극복하기 위해서는 강우-유출량의 함수로 원단위를 조정하는 방법과 계절과 시기에 따라 원단위를 달리하는 방법 등이 있으나, 이를 위하여는 많은 기본 자료의 축적이 필요하다.

## 2) USLE를 이용한 방법

연간 또는 계절간 총량을 계산하는 USLE (Universal Soil Loss Equation)는 투수층에서의 토양침식을 계산하는 데 가장 많이 이용되고 있는 식이다. 임의의 유역에서 강우에 의한 토양침식량을 계산하기 위해서는 우선 USLE를 사용하여 잠재 침식량을 구한 다음 여기에 유달률(delivery ratio)을 곱해서 구한다. 유달률은 USLE를 사용하여 계산된 값과 유역하단에서 실측된 양의 비를 나타낸다. 토양침식량 외에 오염부하량을 계산하기 위해서는 침식량에 부하비(potency factor)를 곱하여 구한다. 여기서 부하비는 토양의 오염물질 함량비와 토양입자에의 고정비를 곱한 값이다. 즉, USLE를 이용한 방법은 모든 수질 부하량이 침식량에 비례한다는 가정을 포함한다.

USLE는 기작들을 수학적 식으로 세밀하게 표현하는 대신에 토양 침식에 영향을 주는 5가지 인자들을 단순히 곱한 형태로 나타낸 식으로, 경험적 모



형이다. 앞에서 언급한 바와 같이 USLE는 연간 토양 침식량 총량을 산정하기 위하여 개발된 식으로서 개별적인 강우사상에 대한 단기 예측에 사용될 경우 그 오차가 증가한다(Novotny and Olem, 1994). 또한 강우에 의한 침식 인자가 모든 강우사상에 대하여 양의 값을 갖기 때문에 초과우량(excess rain)이 발생하지 않을 정도의 강우에 대해서도 침식과 토양유실이 발생하는 것으로 계산된다.

### 3) 수문학적 모형

복잡한 수문 모의 방법을 이용한 모형으로서, 강우-유출 모의 후에 이를 침식, 오염물 축적과 유출, 기타 수질변화요소를 고려한 것이다. 복잡한 수문학적 모형과 앞에서 언급한 단순한 원단위법과의 차이는 수문 모형에서는 오염물질의 발생과 이동과정을 수문학적인 상호작용에 의해 파악하는데 있다. 대부분의 수문학적 모형은 다음과 같은 요소로 구성되어 있다(Novotny and Olem, 1994). 1)유효우량(net rainfall)으로 전환-계산되는 표면유출(surface runoff) 발생 요소, 2)불포화 토양층으로부터 포화된 지하수층으로의 물의 이동을 모사하는 토양과 지하수 요소, 3)불투수 표면으로부터의 오염물질 축적·제거·유실, 4)토양침식 요소, 5)토양에서의 오염물질 흡착, 6)유출과 오염물질의 유출 추적, 7)합류식 하수관거에서의 오염물질 축적과 이동

이러한 수문학적 모형에는 단일 강우사상에 의한 수문응답을 모사하는 모형과 일정 기간 동안의 유출과 오염물질을 연속 모사하는 동적모형이 있다.

### 3. 분포형 수문모형

#### 가. 분포형 수문모형의 개념적 성격

비점오염원 관리는 상당 부분 수문모형에 의존적이다. 실험과 제한된 양의 측정 자료를 이용하여 관리대안을 평가한다는 것은 현실적으로 불가능하며, 종종 모형화 연구가 관리대안 결정의 입력자료로서 유일하게 실현가능한 수단이 된다(Yoon, 1996).

그러나, 현재까지 널리 사용되고 있는 수문모형은 유역내의 모든 수문학적 현상이 동일하다는 가정 하에 유역 전체를 하나의 모의요소로 정의하는 집중형 모형으로서 그 기반을 경험식에 의존하고 있다. 이는 유역내 공간적 분포를 무시함으로써 유역내에서 발생하는 토지이용변화가 수문응답에 미치는 영향을 평가하기가 어렵고, 수문과정에 대한 공간적 변이에 대한 정보를 제공할 수 없다. 특히 비점 오염 부하량 산정이라는 수질오염의 측면에서 볼 때 공간적 분포를 무시하는 수문 모형을 사용하는 것은 실제로 불가능하다.

이를 극복하기 위해서는 물리적 과정에 대한 이해를 바탕으로 대상 유역을 작은 요소들로 구분하여 모의할 수 있는 물리적 기반의 분산형 구조를 가진 수문모형을 사용해야 한다. 이러한 분산형 모형은 유역 내의 국지적인 인자들을 모의할 수 있고, 따라서 토지이용 변화 등의 국지적인 변화를 모형에서 나타내 줄 수 있다. 최근에는 지리정보시스템과 원격탐사의 발전으로 인해 이들을 수문모형에 접목시키려는 연구가 활발히 진행되고 있고 이에 따라 각 모의단위격자별로 현실에 보다 정확한 입력자료를 얻을 수 있게 되었다. 또한 지리정보시스템의 도입으로 수문모형에서 필요한 입력자료를

얻는 방법에 있어서 기존의 데이터 수집 방법에 비해 체계적이고, 모의 결과의 정확성도 향상시킬 수 있다.

그러나, 현재까지 개발된 분산형 수문모형은 대부분 실험적 성격을 지니고 있으며, 현실적으로 자료 취득이 어려운 토양내 수문과정에 대해서도 지나치게 물리적인 수식에 집착하고 있어 그 실용성이 의문시 된다.

따라서, 모형의 실용성을 높이기 위해서는 지하수의 높이나 수리전도도 등의 토양내 수문과정과 같이 정확한 자료를 얻기 어려운 몇몇 유역 인자들에 대하여 집중형 구조를 채택하여 모형을 단순화하는 것이 필요하다. 즉, 소유역내에서 각 모의 단위격자의 값을 정확히 찾아내는 것이 현실적으로 힘든 변수들을 집중형 구조로 변환하여 유역내의 적은 정보를 통해 현실의 세계를 모의할 수 있는 소유역 유출 모형이 필요한 것이다.

현재 개념적 분포형 모형인 TOPMODEL이 이러한 요구를 적절히 만족시킬 수 있는 모형으로 판단된다. TOPMODEL은 수치 고도 모형을 통해 각 모의 요소 내의 고도를 결정하게 되고 이를 바탕으로 지형지수(topological index)를 산정하는 등, 소유역내에서도 정보를 얻기 용이한 모의 요소인 고도, 기울기, 지형지수 등의 지형정보는 분산형으로 개발되었지만 소유역에서 정보를 얻기 어려운 모의 요소인 강우 침투율이나 증발산량 등의 정보는 집중형 모형으로 개발되었다.

#### 나. TOPMODEL에 관한 선행연구 고찰

TOPMODEL은 1979년 Beven과 Kirby에 의해 고안된 이후 많은 지역에 대하여 적용 되고 있으며 그 타당성이 입증되고 있다(Beven et al., 1979; Beven et al., 1983; Beven et al., 1984; Hornberger et al., 1985; Durand et al., 1992; Clapp et al., 1992; Wolock et al., 1995).

Beven에 의한 초기의 연구들은 유출기여면적(runoff-contributing areas)의 동적인 변화 양상에 역점을 두어 설명하였고, 또 그러한 동적 변화가 유역의 지형학적 구조와 어떠한 관계에 있는지에 대하여 중점을 두었다(Beven et al., 1979; Beven et al., 1983).

이후에 Beven은 토양, 지질, 유역 크기 등 유역의 환경이 서로 다른 다양한 지역을 대상으로 모형의 신뢰성을 평가하였다. 즉, 2-4주의 현장 측정치에 의해 보정을 한 후, 지형자료, 강우량 및 증발량 자료로부터 미래 1년 이상의 기간에 대해 모의하고 이후에 비교한 결과, 모형의 신뢰성을 인정할 수 있었다(Beven et al., 1984).

Hornberger는 약 5km<sup>2</sup>의 크기를 갖는 산림지역의 유역에 대하여 여러 매개변수들의 민감도 분석을 실시함으로써, 상대적으로 민감한 매개변수들만을 이용하여 모형의 기본 구조를 간단히 개조하고, 그 결과가 기존의 모형과 신뢰수준이 비슷하다는 결과를 얻은 바 있다(Hornberger et al., 1985).

Durand은 대상 유역을 다양한 기후 조건에 대하여 모의한 결과 결정계수 0.80-0.94로 설명력이 높다는 결과를 보인 바 있으며, 측정 유출유량과 예측치 사이의 약간의 불일치는 오랜 가뭄뒤에 온 홍수 기간에 나타났을 뿐이라고 하였다(Durand et al., 1992).

Clapp은 TOPMODEL이 가지는 공간 정보로서의 특징을 보여주기 위하여 vector-based programming language를 이용 모형의 원시 코드를 재구성함으로써, 토양 포화 부족량의 공간적 분포를 가시화한 바 있다(Clapp et al., 1992).

국내에서는 시스템공학연구소에서 GIS(Geographic Information System) 기법을 이용, 데이터베이스를 구조화하고 사용자 작업환경을 작성하여 TOPMODEL과 통합함으로써, 연중 유역관리를 할 수 있는 R<sup>2</sup>-A(Rainfall-Runoff Analysis System) 시스템을 개발한 사례가 있다(과학

기술처, 1996).

송대성(1997)은 수치고도모형 구축시 등고선의 디지털링 간격과 모의 단위 격자의 크기가 TOPMODEL에 미치는 영향을 민감도 분석을 통하여 연구한 바 있다.

그러나, 현재까지 TOPMODEL내에서 계산 가능한 유출 현상의 공간 정보화는 시도되지 않고 있으며, 이는 모형의 응용 범위가 수질오염이라는 환경분야에는 아직 적용되지 않고 있음을 시사한다.

#### 4. 산림내 질소순환

##### 가. 유기질 질소의 분해

산림토양 속의 질소는 궁극적으로 공기 중의 질소 기체에 기원하는데, 공기 중의 질소 기체가 물리적 혹은 생물학적 과정을 거쳐 형태가 변화하면서 대기, 식물, 토양을 거쳐서 순환하는 과정을 질소순환(窒素循環, nitrogen cycle)이라고 한다. 이 중에서 산림토양 속에서 일어나는 질소의 변화를 요약하면 다음과 같다.

낙엽이나 죽은 가지 혹은 동물의 배설물이나 시체내에 함유되어 있는 단백질과 아미노산 등 유기질 질소(organic nitrogen)는 토양에 서식하는 사물기생성(saprophytic) 박테리아나 곰팡이에 의해 분해되어 암모늄으로 되는데, 이 과정을 암모늄작용(ammonification)이라고 한다. 이렇게 해서 생긴  $\text{NH}_4^+$ 은  $\text{NO}_3^-$ (질산태 이온)으로 산화되는데, 이 과정을 질산화작용(窒酸化作用, nitrification)이라고 한다. 질산화작용은 두 단계로 이루어진다.

첫 단계는  $\text{NH}_4^+$ 이 아질산이온( $\text{NO}_2^-$ )으로 되는데, *Nitrosomonas* 박테리아가 관여하며, 두 번째 단계는  $\text{NH}_4^+$ 가  $\text{NO}_3^-$ 로 되는데, *Nitrobacter* 박테리아

가 담당한다. 질산화작용을 담당하는 박테리아는 경작토양과 같은 중성토양에서는 활동이 왕성하여 작물이  $\text{NO}_3^-$ 의 형태로 질소를 흡수하며, 식물뿌리가 흡수하지 못한  $\text{NO}_3^-$ 는 물에 녹아서 유실된다.

산림토양의 경우에는 질산화작용이 거의 일어나지 않기 때문에 질소가  $\text{NH}_4^+$ 의 형태로 존재하며, 수목뿌리는  $\text{NH}_4^+$ 의 형태로 질소를 흡수하게 된다. 질산화작용이 억제되는 이유는, 첫째로 낙엽의 지속적인 분해시 발생하는 humic acid가 산림토양을 산성화시키는 경향이 있어서 산림토양의 pH는 보통 5.0전후로 유지되어 박테리아의 활동을 억제하며, 둘째로 식생천이가 진전되어 극상에 가까울수록 타닌, 페놀 화합물과 같은 타감물질(他感物質, allelopathic chemicals; 한 생물이 생산한 물질이 다른 생물의 생장을 억제하는 화합물)이 축적되어 질산화박테리아의 활동을 억제하기 때문이다 (Rice, 1984).

특히 침엽수림의 경우, 토양 pH가 더 낮고 위도가 높을수록, 그리고 해발고가 높은 산림일수록 질산화작용이 억제되는 경향이 있다. 그러나 산림토양에서 질산화작용이 억제된다 하더라도 수목의 뿌리는 균근(菌根, mycorrhiza)의 도움으로 암모늄태 질소를 직접 흡수할 수 있으며,  $\text{NH}_4^+$ 은 토양의 양이온 치환능력에 의해 음성전기를 띤 토양입자에 부착되어 보존되기 때문에 경작지의  $\text{NO}_3^-$ 과 같이 물에 녹아 유실되지 않는 장점이 있다.

질산태 질소( $\text{NO}_3^-$ )는 토양이 혐기성으로 산소공급이 안될 때 환원되어  $\text{N}_2$  가스 혹은  $\text{NO}_x$  화합물( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ )로 되어 대기권으로 다시 돌아가는데, 이러한 과정을 탈질작용(denitrification)이라고 하며, 오랫동안 침수된 (waterlogged) 토양이나 산소공급이 안되는 답압토양(compacted soil)에서 *Pseudomonas* 박테리아에 의해 일어난다.

## 나. 산림 생태계내 질소의 분포와 순환

산림 생태계내 총 질소의 함량은 많으나, 토양내에 식물이 이용할 수 있는 무기태 질소의 함량은 경작토양과 비교하여 적은 편이다. 미국 북캐롤라이나주의 성숙한 활엽수림의 경우, 산림내 총질소의 1.8%만이 토양중에 함유되어 있고, 동북부 뉴잉글랜드 지방의 활엽수림의 경우에는 전체 질소의 0.5%에 불과한 질소가 토양에 존재하고, 90%의 질소는 유기물층에, 그리고 9.5%는 식생에 존재하고 있어 대부분의 질소가 유기물층에 축적되어 있음을 알 수 있다(Bormann et al., 1977). 따라서, 유기물층의 질소는 끊임없이 분해되어 수목에 필요한 무기태 질소로 전환되어야 한다.

산림 생태계내 무기영양소의 분포와 순환에 대하여 가장 모범적인 연구가 수행된 곳이 미국 동북부 지방의 허버드 브룩(Hubbard Brook)이다. 여기서 55년생 활엽수림(단풍나무, 자작나무, 너도밤나무)에서 낙엽분해로 연간 1ha당 약 70kg의 질소가 토양에 공급되며, 질소고정으로 14kg, 그리고 강우로 7kg의 질소가 추가되는 반면에, 식생이 흡수하는 질소는 연간 80kg이며, 유수로 밖으로 유출되는 양은 4kg 가량 되어 질소의 공급량이 소모량보다 많다. 따라서, 산림 생태계는 자체적으로 충분한 질소를 순환시키면서 오히려 연간 16kg의 질소가 증가하고 있다(Bormann et al., 1977; Likens et al., 1977).

## 다. 산림의 질소 요구량

농작물은 생장이 빠른 만큼 많은 양의 질소를 요구한다. 예를 들면, 콩은 연간 ha당 300kg의 질소를 요구하며(Hardy and Havelka, 1976), 옥수수

와 알팔파도 175~200kg을 흡수한다. 산림수목은 생장이 농작물보다 느린 만큼 적은 양의 질소를 요구하며, 실제로 산림토양에 매년 시비하는 것은 경제적으로 어렵다. 산림에서 연간 필요로 하는 질소량(nitrogen requirement)은 산림의 종류와 성장속도에 따라 다르지만, 유럽활엽수림의 경우 연간 1ha당 30~60kg의 질소를 필요로 한다(Baker, 1950). 미국 동북부 지방 55년생 활엽수림의 경우, 연간 120kg의 질소를 생장에 소모하지만, 80kg은 토양에서 흡수하고, 나머지 40kg은 수목내에서 저장된 질소를 재분배하여 성숙조직에서부터 조달한다. 20년생 테다소나무의 경우, 연간 70kg의 질소를 생장에 소모하지만, 그 중에서 38kg은 토양에서 흡수하고, 32kg은 수목 자체의 질소를 재분배하여 이동시킨다(Switzer et al., 1968).



## 제3절 연구방법

### 1. 조사 구역 개황

#### 가. 중부 지방의 수문 및 기상 개황

그림 4-1, 그림 4-2에 주요 기상자료를 나타내었다. 연평균기온은 11.06 °C이고 일평균기온이 -10 °C - 26 °C의 분포를 보였다. -10 °C - 0 °C 인 날수가 62일, 0 °C - 10 °C 인 날수는 104일, 10 °C - 20 °C인 날수는 101일, 20 °C 이상인 날수는 99일이었다. 연평균풍속은 1.34 m/s 이며 0.4 - 5.2 m/s 의 분포를 보였다. 1 m/s 이하의 날수는 151일, 1 - 2 m/s인 날수는 165일, 2 - 3 m/s인 날수는 36일, 3 m/s 이상은 14일로, 풍속 2 m/s 이하의 바람이 주종을 이루고 있음을 알 수 있었다. 상대습도의 연평균은 71.80%이고, 50% 이하인 날수는 51일, 50 - 70 %인 날수는 97일, 70 - 90 %인 날수는 105일, 90 % 이상인 날수는 26일이었다. 상대습도 50 % 이하는 4, 5월에 집중적으로 나타나고 있으며, 상대습도 90% 이상은 6, 7, 8월에 자주 나타나고 있었다. 4, 5월의 낮은 습도에 의하여 증발산이 많이 유발될 수 있다고 생각된다. 연평균 일조시간은 5.63 hr이며, 3 hr이하는 104일, 3 - 5 hr은 59일, 5 - 7 hr는 43일, 7 - 9 hr은 83일, 9 hr 이상은 77일이었다. 8월의 일조시간이 낮았다. 대기압은 연평균 1,014.96 mb이었으며 7, 8월이 가장 낮은 경향이었다.

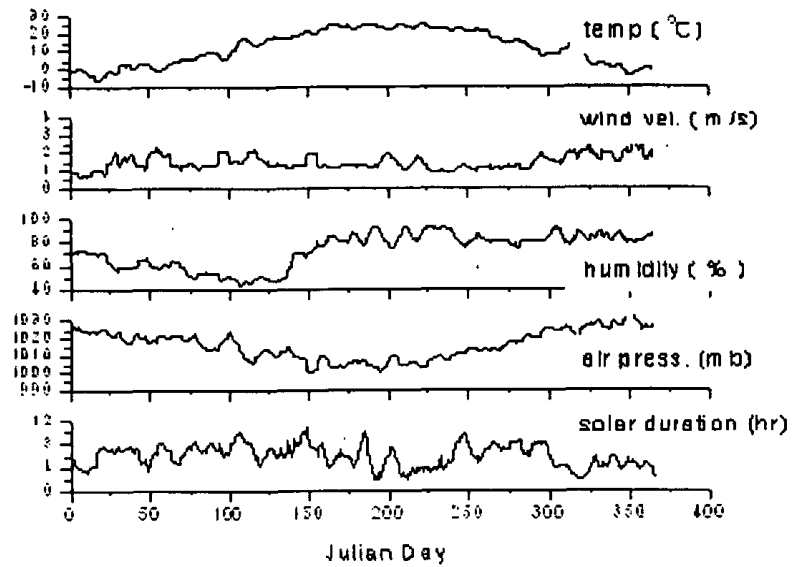


그림 4-1. 중부 지역 기상 자료

연간 증발산량의 분포는 표 4-1과 같다.

표 4-1. Penman-Monteith model.에 의한 중부 지방 증발산량

\	Jan.	Feb.	Mar.	April	May	June	Jul.	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Total
Penman-Monteith	19.6	27.8	47.8	81.7	106.4	65.2	65.4	46.4	56.9	34.1	20.9	12.6	584.5

증발산량은 연중 고르게 증발되는 것이 아니라, 건조한 공기 중의 공기, 햇빛, 바람, 온도들의 영향을 받아 하루에 소비되는 증발산량은 그림 4-2와 같이 하루 하루 다르게 나타난다. 중부 지방의 산림에 내리는 비의 1,215 mm 중에서 590 mm가 증발산되었다. 가장 많이 증발산된 양으로 하루에 4 mm 이상 증발산되는 경우도 있고, 특히 4월과 5월은 각각 82 mm/월, 107 mm/월 증발되었다.

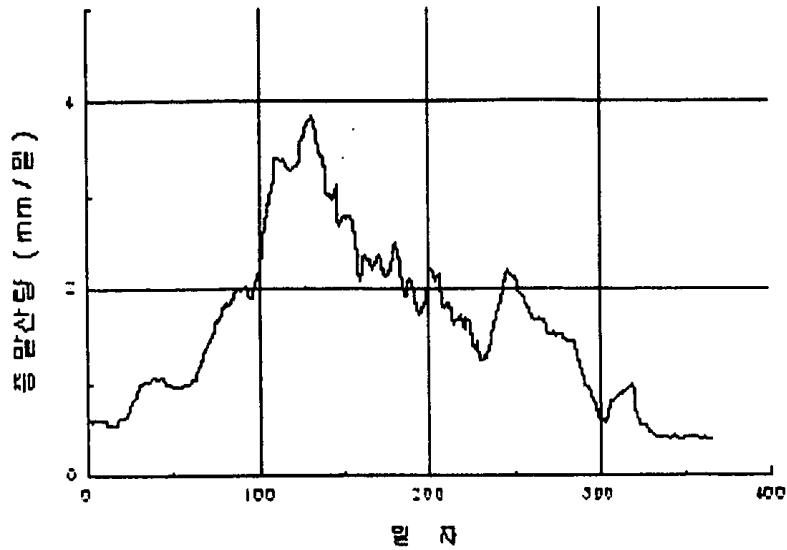


그림 4-2. 중부 지방 산림에서의 일 증발산량

충주기상대의 22년 평균 강수량은 1161.1 mm이며, 시험구역의 1993년도  
 의 년강수량은 1215.4 mm으로 4.7% 많이 내렸으나 시험구역의 산악기후를  
 고려하면 평균적인 강수량으로 생각된다. 무강우 일수는 264일이었고, 수관  
 차단에 의하여 거의 유출에 영향을 미치지 않는 강우인 10 mm이하는 66일,  
 10 - 30 mm는 25일, 30 mm이상은 11일이었고 일최대치는 111.5 mm이었다.  
 시험구역의 유출은 토층이 얇은 관계로 인하여 강우에 민감하게 나타나고  
 지중수가 연속적으로 내려오지 않는다. 즉 물이 흐르지 않는 날이 많이 나  
 타났다. 일평균유출은 1.71mm이며, 일강우 111.5 mm일 때에 최고 46.13mm  
 의 유출이 있었다. 0.1 mm이하의 일유출이 65일, 0.1 - 2 mm이하는 240일,  
 2 - 4 mm는 31일, 4 mm이상은 30일이었다. 시험구역의 총유출량은 625.1 mm  
 로써 유역내 토양수분 변동량이 없다고 가정하면 증발산량은 590.3 mm로 계  
 산되었다.

표 4-2. 중부지역 강수 및 유출

\		Jan.	Feb.	Mar.	April	May	June	Jul.	Aug.	Sept	Oct.	Nov.	Dec.	Total
Prec mm	ChungJu <sup>*</sup>	22.3	26.8	45.5	78.1	89.4	137.2	280.0	229.7	138.1	49.5	38.5	26.0	1161.1
	Wolak Experiment	7.0	62.8	32.2	53.5	102.5	151.0	252.5	301.0	136.5	39.5	62.5	14.4	1215.4
Runoff mm		12.7	45.7	15.2	15.6	77.5	32.6	144.4	192.6	49.1	3.2	17.2	19.3	625.1

표 4-2에서 보는 바와 같이, 우리나라 중부 지역의 유출율은 연강수량의 51.5%이고, 유역수수지로 증발산량을 계산하면 연간 48.5%에 이르고 있다. 월악유역의 토층이 얇은 관계로 오랫동안 저류되지 못하고 곧바로 유출되는 성향이라고 생각된다. 다른 산림 유역에 비하여 유출율이 높은 편이다.

#### 나. 월악산 시험유역

본 연구의 조사지는 충주의 남동쪽에 위치한 한수면 송계리의 월악산 지역 ( N36°52' E128°05' )에 설정하였다. 지역적 특성에 따른 산림의 기능 평가의 일환으로 3.5ha의 삼림 소유역을 대상으로 산지 사면에서의 물의 흐름 과정을 파악하는데 역점을 두어 중부 산림 지역인 충북 대학교 부속 연습림 (월악산)내에 고정 조사지를 설치하여 수로를 흐르는 경시적 유출을 조사하였다. 설정된 조사 유역은 평균 경사도가 28°이며 상부 주계곡의 경사도는 35°인 급한 경사 지대이며, 상부유역과 주계곡은 너비 5m 정도의 암반이 노출되어 전체 유역 면적의 14.2%가 암반 노출지이다. 유역 좌하단에 수고 7-8m의 소나무가 밀생하고 여타 지역은 소나무, 진달래, 참나무류가 산생하는 척악 임지이다. 명확한 암반층을 형성하고 있어서 유역 외부로 누수가

없으리라고 생각되는 산림유역이다. 토심이 1m 이상 되는 곳은 유역의 좌측 하단뿐이며, 토심 50cm 이상이 되는 면적은 약 20%이다(그림 4-3). 급한 경사, 얇은 토층 및 암반 노출지가 많아서 강우에 대하여 빠른 유출 특성을 보이는 지역이다. 이 시험유역에서는 장기간 비가 오지 않아 토양이 건조할 때는 물이 흐르지 않는다. 유수량 측정을 위하여 폭 1.2m, 길이 1.8m, 높이 0.9m의 철제 유량 탱크를 설치하고 90° 각도의 V자 노치를 부착하여 수위를 계측 기록하였다. 수위유량 관계식은  $Q (\text{m}^3/\text{sec}) = CH^{2.5}$ 를 이용하였다. 강우는 0.5 mm마다 1회 전도하는 전접식 강우계를 시험 유역 입구에 위치한 연습림 사무실 옥상에 설치하여 측정하였다.

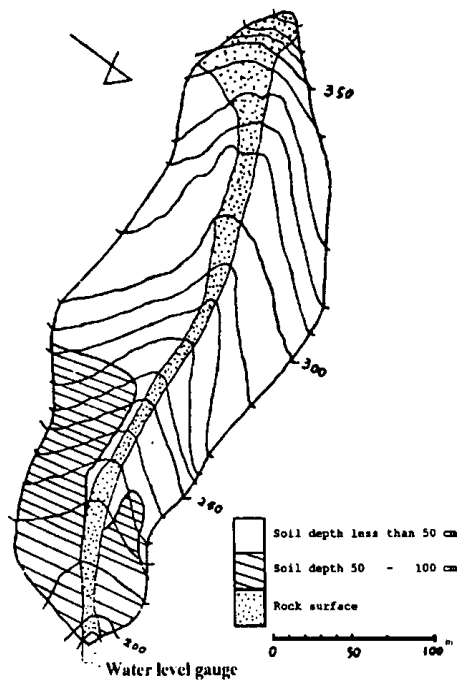


그림 4-3. 월악 시험 유역

#### 다. 연풍 시험유역

연풍 시험유역(N36°45'E127°58')은 월악 시험유역과 월악산 영봉을 경계로 남쪽으로 20 km 떨어져 연풍면 입석리에 위치해 있다. 속리산 국립공원과 인접하여 경관이 수려하며 자연림 상태로 잘 보존되어 있다. 유역 전반에 걸쳐서 수고 15 m의 소나무가 산생하고, 참나무류가 혼효되어 있는 산지이다. 연풍 시험 유역의 집수면적은 320 ha이며 평균 경사도가 25°이며 상부 주계곡의 경사도는 32°인 급한 경사 지대이다. 유량관측은 사방댐의 부댐에 90° v-notch를 설치하여 유량을 관측하였다. 강우량은 0.5 mm 전도식 강우량계를 시험 유역 입구의 수위계실에 설치하여 측정하였다. 이 시험유역에서는 유출이 그친적이 없는 상시 유출 유역이다. 수문 기상조건은 월악산 시험유역과 비슷하다고 생각되며, 연간 증발산량에 대하여는 같다고 생각된다.

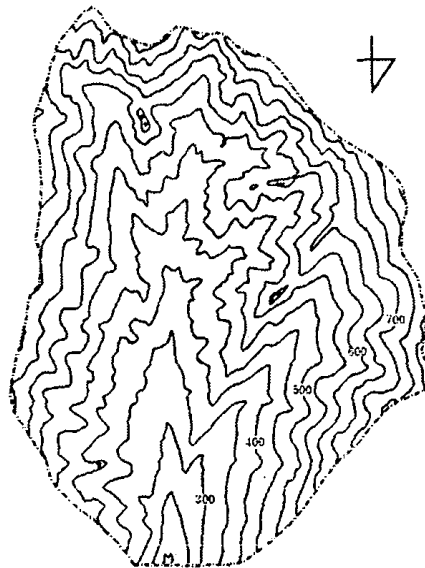


그림 4-4. 연풍 시험유역

### 라. 수위 - 유량 관계

월악산 시험 유역의 수위 측정시설은 규격화한 철제 탱크에 설치하였으므로 수위-유출 관계는 기존의 식을 이용하였다. 철제 탱크의 폭은 1.2 m, V-notch까지의 깊이는 0.4 m이다. 유량  $Q = CH^{2.5}$ 의 함수로 하였다. 계수 C는 수위와 탱크 규격의 함수이다.

연풍 시험유역의 유량 측정시설은 규격화되지 않아 실측하여 수위-유량 곡선을 작성하였다. 수위계를 설치하여 기저선 Base Line이 바뀌지 않도록 기계 설치 위치를 고정하여 측정하였다. 표 4-3과 그림 4-5는 27회의 수위와 유량의 실측자료와 그 자료를 바탕으로 하여 작성한 수위-유량 곡선을 보여주고 있다.

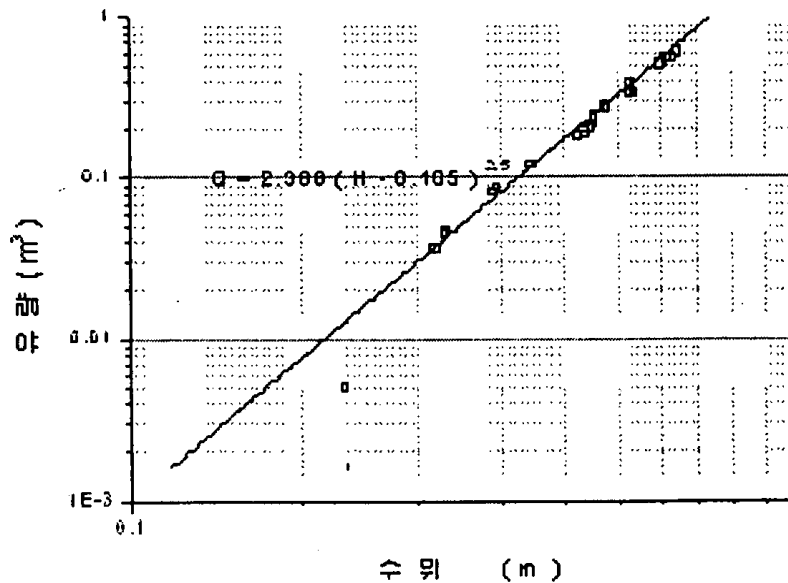


그림 4-5. 연풍 수위 유량 곡선

표 4-3. 연풍 수위 - 유량 자료

번호	수위 H	유량 Q	$Y=Q^{0.4}$	$H^2$	$H*Y$
1	0.212	0.005	0.12011	0.04494	0.02546
2	0.577	0.337	0.64722	0.33293	0.37345
3	0.573	0.388	0.68475	0.32833	0.39236
4	0.573	0.339	0.64875	0.32833	0.37174
5	0.570	0.333	0.64414	0.32490	0.36716
6	0.503	0.238	0.56316	0.25301	0.28327
7	0.501	0.216	0.54173	0.25100	0.27141
8	0.498	0.203	0.52844	0.24800	0.26316
9	0.486	0.197	0.52214	0.23620	0.25376
10	0.486	0.185	0.50918	0.23620	0.24746
11	0.476	0.182	0.50586	0.22658	0.24079
12	0.406	0.121	0.42965	0.16484	0.17444
13	0.359	0.085	0.37305	0.12888	0.13393
14	0.354	0.081	0.36593	0.12532	0.12954
15	0.290	0.037	0.26747	0.08410	0.07757
16	0.289	0.036	0.26456	0.08352	0.07646
17	0.300	0.046	0.29181	0.09000	0.08754
18	0.301	0.047	0.29433	0.09060	0.08859
19	0.299	0.045	0.28926	0.08940	0.08649
20	0.299	0.045	0.28926	0.08940	0.08649
21	0.675	0.609	0.82006	0.45563	0.55354
22	0.663	0.559	0.79244	0.43957	0.52539
23	0.647	0.555	0.79016	0.41861	0.51124
24	0.641	0.521	0.77043	0.41088	0.49385
25	0.633	0.513	0.76568	0.40069	0.48468
26	0.523	0.277	0.59840	0.27353	0.31296
27	0.523	0.272	0.59406	0.27353	0.31069
계	12.657		13.91203	6.42892	7.22342



## 2. 수질 형성과정 조사

본 연구에서는 산림유역의 수질 형성과정을 분석하기 위하여 강수로부터 계류수로 이행하는 산림유역내 물순환과정을 따라서, 수질특성 성분의 추적 을 실시하였다.

이를 위하여 강수 및 계류수의 시료를 측정하였으며, 계류수의 경우는 각 시험유역 마다 유역 출구 및 유역내 1개소 등 총 2개소씩 측정지점을 선정하여 수질시료 채수를 실시하였으며, 월악산 시험유역의 경우는 시험유역 내 조사와 아울러 인근 인위적 교란이 많이 발생한 지역의 수질조사를 병행 하여 자연 산림지와 인위적 환경교란지역간의 수질변화를 분석하였다.

산림유역의 수질 형성과정을 분석하기 위한 강우 및 계류수의 수질분석 시료는 단위강우를 원칙으로 하여 측정하였다. 강우의 수질분석시료는 노지에 보통우량계를 설치하여 단위강우를 수집하였으며, 계류수질 분석시료는 단위강우 발생기간 내에 채수·분석하였다.

수질조사 항목은 총 11개 항목으로 이 중 전기전도도, 용존산소, pH, 탁도의 4개 항목은 수질자동측정장치를 이용하여 현장에서 곧바로 측정하였으며, 아질산성 질소 및 질산성 질소, 암모니아성 질소의 3개 항목과 인산, 양이온( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ )과 음이온( $\text{Cl}^-$ )은 이온크로마토그래피법(Ion Chromatography)으로 실험실에서 측정하였다.

### 3. 수질해석모형의 구성

#### 가. 산지 강우-유출모형의 구성

산지의 강우 유출 현상을 파악하기 위하여는 3차원의 개념을 이용한 모델이어야 한다. 유역의 지형을 고려하여 3차원의 양상을 묘사하는 기존 모델로서는 TOPMODEL, TOPOG 등을 들 수 있다. TOPMODEL 과 TOPOG는 지형지수(Topographic Index)를 이용한 비슷한 개념 모델이지만, 실제 지형의 영향을 잘 반영하는 장점이 있다. 이들은 지형과 지표면에서 지하로 갈수록 투수속도가 낮아지는 것을 결합하여 유출의 주요한 요소인 가변역(variable contributing source)을 나타내었다. 개념모델이기는 하지만 이에 사용하는 파라미터를 실제로 측정할 수 있기에 물리적인 근간을 둔 모델이라고 불리기도 한다. TOPMODEL의 기본 개념을 따라 강우-유출 현상을 모델링하였다.

일반적으로 강우-유출 모델은 토양내의 수수지(water balance)를 다루는 부분과 유역 출구까지 물이 이동되는 부분으로 구성되어 있다. 토양내의 수수지 부분은 모델의 특성을 결정짓는 가장 주요한 부분이다. 물의 이동에는 수계까지 도달하는 단계와 수계에 도달한 후 유역 출구까지 이동되는 단계로 구분된다. TOPMODEL은 사면 이동 요소는 없고, 수계망을 따라 이동하는 요소가 중요시된다. 물론 토양 수분의 포화 영역이 확장되어 수계망을 늘려나가는 것을 고려하였다.

#### 1) TOPMODEL의 특징과 기본 가정

TOPMODEL의 기본적인 특징을 나열하면 다음과 같다. 첫째, 지하수두의 결정에 가장 큰 영향을 미치면서 비교적 취득이 용이한 지표면의 포화투수

계수와 표고로부터 지표를 산출하고 이를 사용하여 물의 흐름을 간단하게 다룰 수 있다. 둘째, 토양의 포화부족량(saturation deficit)을 산출하여 포화초과유출을 모의한다. 셋째, 강우강도나 분포형태, 토양함수량에 따라 다양하게 변화하는 포화기여면적의 분포를 제공한다. 넷째, 침투와 기저유출에 의해 지하수면이 동적으로 변화하고 이것이 다시 기저유출에 미치는 영향을 평가할 수 있다. 다섯째, 공간적으로 서로 다른 위치에 있는 격자들 간의 상호 작용을 고려하지 않고, 각 격자와 유역의 출구점간의 일대일 관계로 해석한다(그림 4-6 참고).

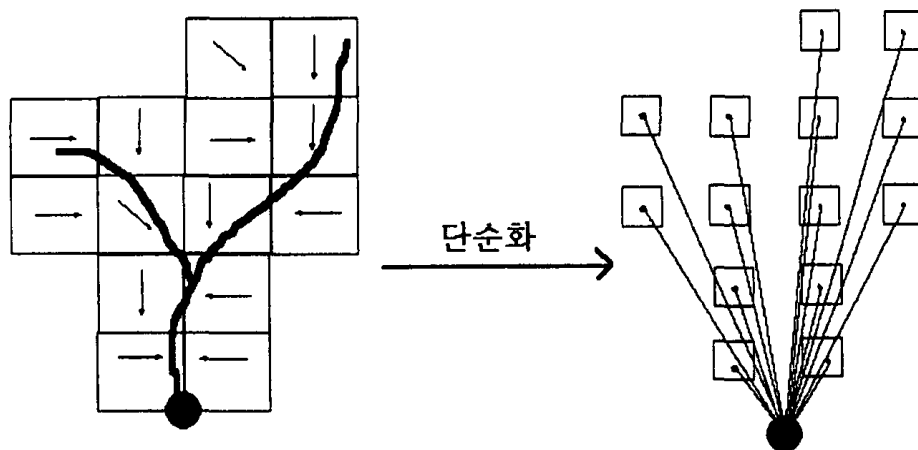


그림 4-6. 유역내 격자와 최종출구점과의 관계

TOPMODEL의 근간을 이루는 기본식은 연속방정식과 Darcy's law에서 출발하며 다음과 같은 몇 가지 가정을 통하여 모형식이 전개된다. 첫째, 모의 단위 격자내의 지하수의 거동형태는 모의 단위 격자의 지형적인 특성을 통해 나타내어진 지형지수에 따라 좌우되고, 같은 지형지수를 가진 지역은 수문학적으로 같은 거동형태를 갖게 된다. 둘째, 포화수리전도도는 토양의 깊

이가 증가함에 따라 지수적으로 감소한다. 셋째, 지하수위의 경사는 지표면의 경사와 평행하다. 넷째, 불포화지역의 물의 흐름은 수직방향으로만 발생한다.

## 2) 유출이론

초과강수량(직접유출량)과 기저유출량을 결정하기 위해서 그림 4-7와 같은 수문과정의 상호관계를 가정하였다. 강우(P : rainfall)가 발생할 경우 먼저 근저류부(Root Zone)를 채운다. 근저류부의 저류 부족량(SDRZ : Root Zone Storage Deficit)가 음의 값을 갖게 되면, 즉 강우량이 근저류부를 다 채우고 나면, 남은 강우량은 불포화층(Unsaturated Zone)으로 이동하여 불포화지역의 저류량(SUZ : Unsaturated Zone Storage)을 형성한다. 만약 SUZ가 국지적 포화부족량(SD : local Saturation deficit)을 초과한다면, 즉 불포화층이 완전히 포화된다면 포화초과유출(EX)이 발생한다. 불포화층에서는 수직방향의 흐름만이 존재한다고 가정하여, 저류량의 일부는 침투과정을 통하여 지하수층으로 이동한다. 이 구조에는 대부분의 산림 토양의 침투능이 대형공극 등의 발달로 강우강도보다 충분히 높기 때문에 침투초과유출의 영향은 고려하지 않는다.

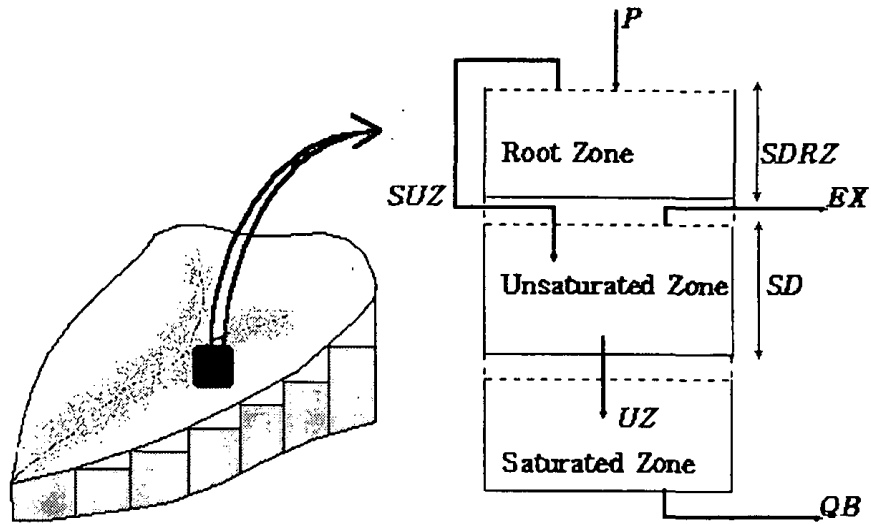


그림 4-7. 유역내 임의의 지점에서의 유출 흐름도  
(출처: 과학기술처(1996) 의 232쪽 그림을 재구성함)

### 3) 침투초과유출 및 기저유출

토양층내의 포화 투수 계수는 지표면으로부터 깊어짐에 따라 감소된다.

$$K_s(z) = K_0 \exp(-fz) \quad (\text{식 4-1})$$

단,  $z$ 는 토양층의 깊이이다.  $K_0$ 는 지표면에서의 포화투수계수,  $f$ 는 감소계수이다. 지표면 포화투수와 감소계수는 유역 전체에서 같다고 가정하였다. 토양층내 포화투수계수는 지표면에서 깊어질수록 토양내 공극이 줄어들고, 가비중이 높아지면서 포화투수계수가 낮아지는 것을 반영한다.

지하수면은 지표면과 평행하다고 가정하였다. 지점에 따라 암반과 지표

면이 일치하지 않는 곳이 있지만 경사가 급하고 토층이 얇은 곳은 지표면과 암반이 일치하는 경우가 많다. 따라서 임의 지점  $i$ 에서 지하 수면을 형성하면서 사면을 따라 흐르는 물은 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} q_i &= T_i(z_i) \tan \beta_i \\ &= T_0 \tan \beta_i \exp(-fz_i) \end{aligned} \quad (\text{식 4-2})$$

단,  $\tan \beta$  는 지점  $i$ 에서 지표면의 경사각,  $T_i(z_i)$ 는 지점  $i$ 에서 통수량 ( transmissivity ),  $T_0$ 는 토층 표면까지 포화될 때의 통수량이며 유역 전체에서 동일하다고 가정,  $q_i$  는 단위 폭당 유출량이다.

$$Z_i = \bar{z} - \frac{1}{f} \left[ \ln \frac{a_i}{\tan \beta_i} - \lambda^* \right] \quad (\text{식 4-3})$$

$\ln \frac{a_i}{\tan \beta_i}$  는 지형지수(topographic index)라고 하며,  $f$ 와 함께 지하수면을 산정할 수 있게 된다. 만약  $z_i \leq 0$  이면 지표면까지 포화한 상태가 되며, 비가 오면 곧 바로 직접 유출로 배출된다. 유역내에서 국소적으로 침투초과 유출을 고려한 시도도 있었으나 모델 파라미터의 결정시  $K_0$ 의 값이 크게 나오므로 침투 초과유출은 TOPMODEL에서는 무시되고 있다(Sivapalan et al, 1987).

식 4-3을 이용하여 지표면까지 포화된 부분을 추정할 수 있다. 평균지하수면의 높이  $\bar{z}$ 는 시간에 따라 변하며, 다음 식에 의하여 각 시간마다 구

할 수 있다.

$$\bar{z}^{t+1} = \bar{z}^t - \frac{(Q'_V - Q'_B)}{A} \Delta t \quad (\text{식 4-4})$$

$Q'_V$ 는 시간 간격  $\Delta t$ 에 따라서 불포화 영역에서 포화영역으로 공급되는 양(recharge rate)이다.  $Q'_B$ 는 지중수 양에서 수로로 유출되는 양이며,  $A$ 는 유역 전체 면적이다.

$Q'_B$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q'_B = AT_0 \exp[\lambda^*] \exp[-f \bar{z}^t] = Q_0 \exp[-f \bar{z}^t] \quad (\text{식 4-5})$$

$Q'_V$ 는 강우시 수직적인 수로 경사(hydraulic gradient)에 의하여 불포화 영역을 통하여 포화영역으로 공급되며, 유역을 DEM으로 만든 격자등으로 세분한 것의 합계로써 나타낼 수 있다.

$$Q'_V = \sum a_i K_0 \exp[-f \bar{z}_i^t] \quad (\text{식 4-6})$$

단,  $a_i$ 는 각 격자의 면적이다.

#### 4) 증발산(evapotranspiration)

TOPMODEL에서는 최소한의 자료를 통하여 실제 발생하는 증발산량을 산정

할 수 있도록 되어 있다. 즉, 잠재증발산량(  $E_p$  )과 근저류부(root zone)의 저류량을 통해 실제증발산량을 산정한다. 근저류부에서의 실제증발산량(  $E_a$  )은 다음과 같다.

$$E_a = E_p \left( 1 - \frac{SDRZ}{SRMAX} \right) \quad (\text{식 4-7})$$

여기서, SDRZ와 SRMAX는 각각 근저류부에서의 포화부족량과 최대 저류부족량을 나타낸다.

잠재증발산량의 추정은 다음과 같은 sine함수를 통하여 이루어진다.

$$E_p = E_{\min} + 0.5 \times (E_{\max} - E_{\min}) \times [1 + \sin \{2\pi \times (J/365) - \pi/2\}] \quad (\text{식 4-8})$$

여기서,  $E_{\min}$ 은 겨울철의 최소 일 평균 잠재증발산량이고,  $E_{\max}$ 는 여름철의 최대 일 평균 잠재증발산량이며, J는 Julian day로서 1월 1일 이후의 경과일수를 나타낸다.

## 5) 지형지수 산출

지형지수(topographic index)는  $\ln(a/\tan\beta)$ 로서, a는 단위 등고선 길이 당 상부사면(上部斜面: upslope) 면적을 가리키고,  $\tan\beta$ 는 경사구배를 나타낸다. 지형지수의 공간적 분포를 계산하기 위하여, Wolock and McCabe Jr.(1995)은 단일방향흐름법(SFD : Single Flow Direction algorithm)과 다



방향흐름법(MFD : Multiple Flow Direction algorithm)을 소개한 바 있다. 일유하방향법은 수치고도모형(DEM : Digital Elevation Model)에서 주변과의 고도차이가 가장 심한 곳, 즉 가장 가파른 하부사면(下部斜面: downslope)으로 물이 흐른다는 가정하에 지형지수값을 결정하는 알고리즘을 말하고, 다방향흐름법은 자신보다 낮은 모든 방향으로 물이 흐른다는 가정하에 지형지수값을 결정하는 알고리즘을 말한다.

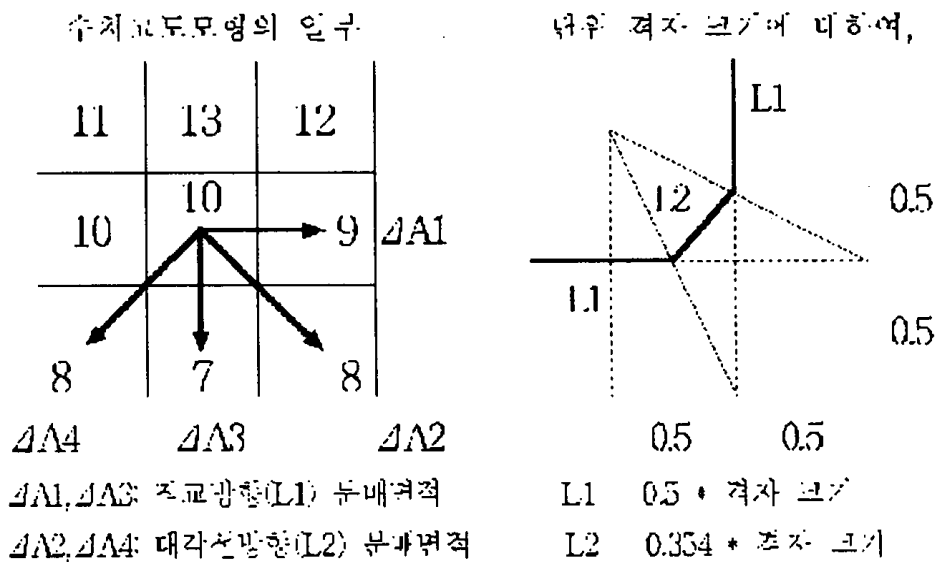


그림 4-8. 다방향흐름법에 의한 흐름 분할(출처: Quinn et al., 1991)

Moore(1995)는 단일방향흐름법은 유하방향의 단순한 일방적 결정 때문에, 수문학적으로 유의미한 지형지수값을 이끌어내는 데 있어서 다방향흐름법보다 열등하다고 결론지었다. 또한, Wolock and McCabe Jr. (1995)은 수문학적 특성치들의 공간적 분포를 모의하려 할 경우 다방향흐름법을 권장하고 있다. 본 연구에서는 격자구조의 모의구조를 취하였고, 전체 수문응답 뿐

아니라 수문학적 특성치의 공간적 분포가 중요시되는 특징을 지니고 있기 때문에 다방향흐름법을 채택하였다.

#### 나. 산림유역내 질소의 공간적 분포와 순환 모형

산림유역내에 존재하는 많은 무기영양소 중 질소 화합물은 식물체 뿐만 아니라 모든 생물에게 필요한 영양분 중 특히 필수적인 원소로서 체구성 성분인 단백질을 이루는 아미노산뿐만이 아니라 유전적인 특성을 후손에게 전해주는 DNA에도 포함돼 있다. 그만큼 질소는 대량으로 존재하면서도 중요한 원소중 하나다.

산림유역에서 질소화합물 들은 산림토양내에 대량으로 존재하며, 식물에 이용되기도 하며, 강우-유출현상에 수반하여 계류 및 하천으로 유출되기도 한다. 특히, 질소화합물은 인 등의 무기영양소와 함께 과도하게 유출되는 경우, 하천의 질산, 아질산에 의한 오염, 호수나 해양의 부영양화에 의한 조류의 이상번식 또는 적조 등의 수질오염을 일으키는 주 원인이 되기도 한다.

특히, 주요 상수원을 산림지역내에 건설된 다목적 댐의 저수량에 의존하는 우리나라의 수자원 현실을 고려하였을 때, 상수원 취수용 저수지의 수질 오염 및 부영양화를 방지하기 위해서는 상수원 지역의 대부분을 차지하는 산림유역에서의 질소를 비롯한 무기영양소들의 분포 및 이동·유출현상에 파악과 분석이 필수적이라 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 부영양화의 주원인중의 하나인 질소화합물을 대상으로 산림유역내에서의 공간적 분포 및 순환 특성을 해석할 수 있는 수질 모형을 제작하였다.

## 1) 산림유역의 지형특성과 질소의 공간적 분포

기후 변화와 산림 수확 등과 같은 교란에 대한 계류수의 화학반응을 예측하기 위해서는 유역내 주요 유출지역에 있어서의 수질오염물질 농도의 공간 분포에 영향을 미치는 인자에 대한 정량화가 필요하다. 이중 지형의 경사는 특히 가파른 상류 유역에 있어서 유역내의 수문학적 유출 경로와 지표 토양 수분 및 지표하 토양 수분 분포에 중요하게 작용한다(Hewlett and Hibbert, 1963; Dunne and Black, 1970; Beven and Kirkby, 1979; Siebert et al., 1997). 따라서, 지형은 토양 수분조건과 지표·지표하 유출성분의 경로와 수질조건을 결정하는데 있어 매우 중요한 역할을 한다.

어떤 특정한 유역내의 서로 다른 위치가 계류수의 수질에 어떠한 영향을 미치는가에 대해서, Creed 등(1996)은 유역내에 질소가 축적되는 지역이 발생되며, 이러한 지역에서 유출되는 질소량이 계류내의 전체 질소유출량 중 상당부분을 차지한다고 하였다.

따라서, 본 연구에서는 수치지형도를 이용한 지형인자 분석을 통하여 물에 용존되어 이동·유출되는 질소화합물의 공간적 분포를 재현하였다.

## 2) 유역내 용질의 공간적 분포지수

수치지형도의 각 격자별 지형 지수의 표준적인 형태는 다음과 같다.

$$TI = \ln\left(\frac{a}{\tan\beta}\right) \quad (\text{식 4-9})$$

여기서,  $a$ 는 단위 등고선 길이당 상부사면 기여면적이고,  $\beta$ 는 해당지역

의 경사각이다. 이 지형지수는 TOPMODEL에서 지형인자와 수문학적 특성을 결합시키는데 중요하게 사용되는 인자로서, 지형적인 특성을 바탕으로 해당 지점의 수문학적 유출경로와 토양수분조건을 대표한다. 특히, 이 지형지수는 습윤상태를 결정하는 두 가지 중요인자, 즉 중력에 의한 물의 이동과 증발흐름에 기여하는 상부사면 면적을 통합하며, 그 결과로서 유역에서 어떤 지점에 대한 잠재적인 습윤가능성의 이론적인 추정을 가능하게 한다(Quinn et al., 1995).

한편, Welsch 등(2001)은 유역내 임의지점에서의 무기 용질의 농도는 해당 지점으로 배수하는 상부사면내의 농도의 함수로서 나타낼 수 있다는 가정하에 수치지형도 분석을 통하여 유역내 임의지점에 배수하는 상부사면의 특성을 대표하는 두가지의 새로운 인자로서 다음과 같은 T11과 T12 factor를 제안하였다.

$$T11 = \frac{\sum TI_i}{n} \quad (\text{식 4-10})$$

$$T12 = \frac{\sum \frac{TI_i}{d_i}}{\frac{1}{d_i}} \quad (\text{식 4-11})$$

식 4-10에서  $TI_i$ 는 수치지형도상의  $i$ 번째 격자의 지형지수이고,  $n$ 은 상부사면 격자들의 갯수이다. 즉, T11은 해당 격자로 배수되는 모든 상부사면 셀의 평균 지형지수를 나타낸다.

한편, 식 4-11에서  $d_i$ 는  $i$ 번째 상부사면 격자 셀에서 출구 셀까지의 수평거리를 말하며, T12는 모든 상부사면 격자의 거리 가중 평균이다.

### 3) 용질농도와 지형지수와의 관계

각 용질 농도( $\text{NO}_3^-$ 와 DOC)와 지형 지수(TI, TI1, TI2) 사이의 선형관계의 크기(강도)를 결정하기 위하여 선형 회귀선(linear regression line)의 경사(slope)는 다음에 따라 계산되었다.

$$b = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (\text{식 4-12})$$

여기서,  $n$ 은 샘플의 수이며,  $y$ 는 특정 용질 농도,  $x$ 는 지형지수 값이다 (Devore, 1995). 이 용질농도와 지형지수 관계의 강도는 강수량과 온도에 영향받으며, Welsch 등(2001)은 이 선형관계 강도를 분석하기 위하여 이전에 내린 강수량보다 샘플링 시기에 보다 가까운 때에 내린 선행 강수량에 가중을 두는 5일 가중 선행강수지수를 제안하였다. 5일 가중 선행강수지수는 다음과 같이 정의된다.

$$5dayAPI = \frac{\sum \frac{p_i}{t_i}}{\sum \frac{1}{t_i}} \quad (\text{식 4-13})$$

여기서,  $p_i$ 는  $i$ 번째 시간 동안에 내린 강수량이고,  $t_i$ 는 강수에서 샘플링까지의 시간이다. 이 지수에서의 강수량은 샘플링 직전까지 내린 강수량을 모두 포함한다.

## 제4절 연구결과 및 고찰

### 1. 월악산 및 연풍 시험구역의 강우 및 유출

#### 가. 월악산 시험구역의 강수량, 토양수분 및 유출량

그림 4-9와 그림 4-10은 각각 1999년도와 2000년도에 월악 시험구역에서 관측된 강수량, 토양수분 및 수위변화를 보여주고 있다. 그림 4-9에서 보는 바와 같이 1999년도에 월악시험구역에서 관측된 단위 강수 중 가장 많은 단위강수량을 보였던 것은 126mm 이었으며, 토양수분함량은 연중 12.6%에서 33.7%의 변화를 보였다.

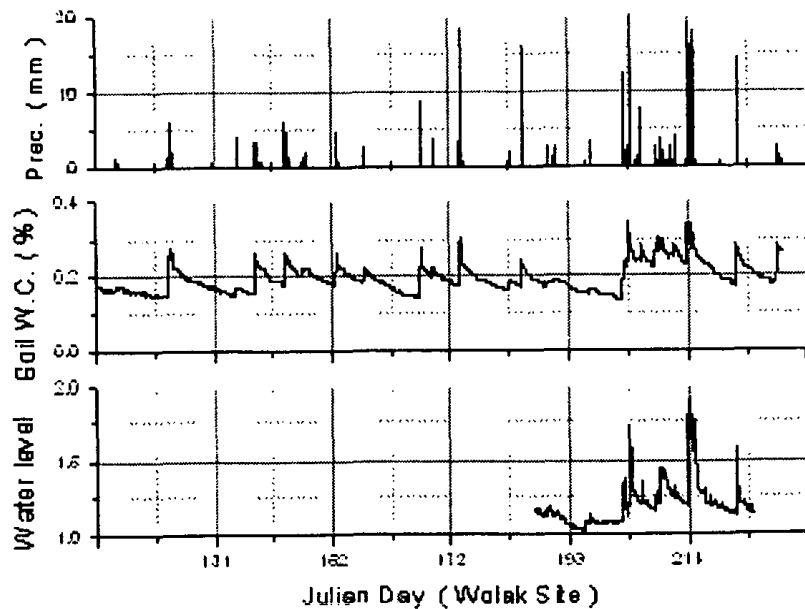


그림 4-9. 강수량, 토양수분, 수위(월악 시험 구역, 1999)

한편, 2000년도에는 111mm의 단위강우량이 최대이었으며, 토양수분함량은 최저 16.2%에서 최고 68.8%로서 전년도에 비하여 변화폭이 컸던 것으로 조사되었다.

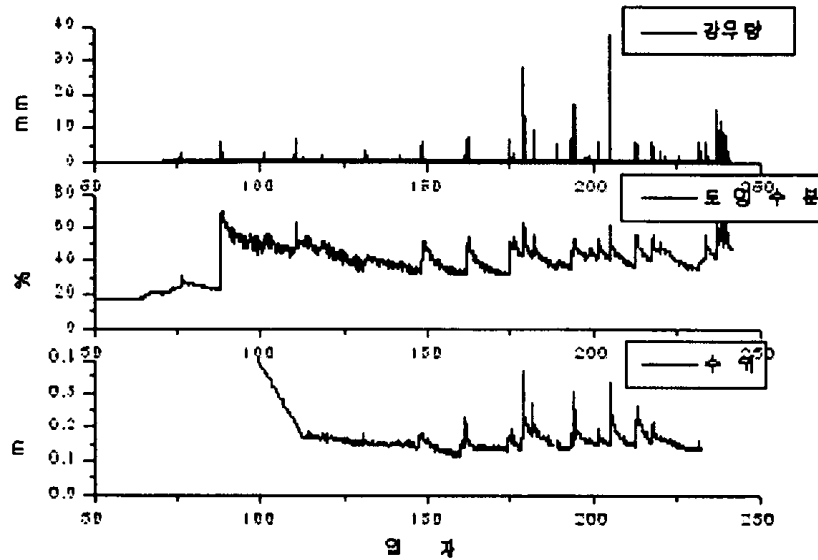


그림 4-10. 강수량, 토양수분, 수위(월악 시험 구역, 2000)

#### 나. 연풍 시험구역의 강수량과 유량

그림 4-11에서 그림 4-13까지는 연풍 시험구역에서 1997년부터 1999년까지 관측된 강수량과 수위를 보여주고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 3년 중 최대 단위강우량은 1999년의 111.5mm이었다.

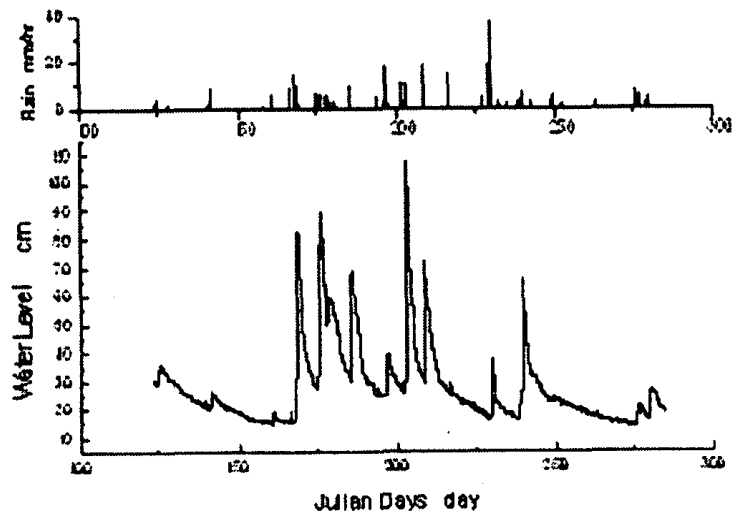


그림 4-11. 연풍 시험구역의 강수량과 유량(1997)

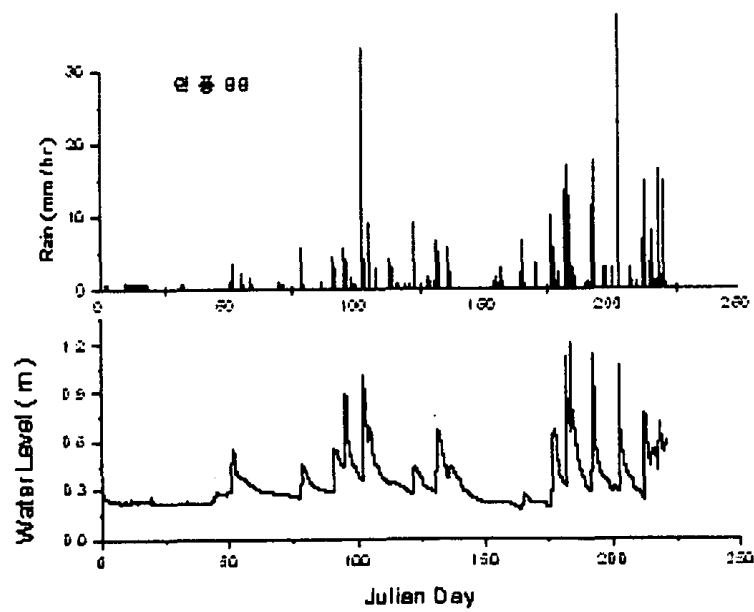


그림 4-12. 연풍 시험구역의 강수량과 유량(1998)



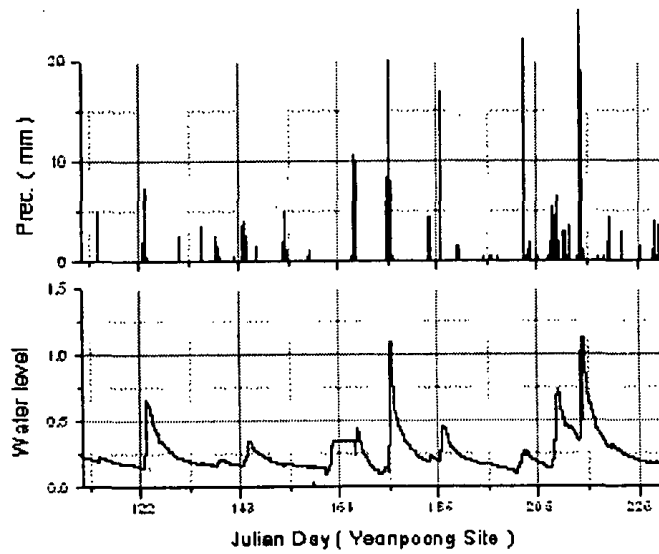


그림 4-13. 연풍 시험구역의 강수량과 수위(1999)

## 2. 수질 특성

### 가. 월악산 시험 구역의 수질 특성

그림 4-14 및 4-15는 월악산 시험구역에서 관측된 유출량과 전기전도도 (EC) 및 줄리안데이와 전기전도도와의 관계를 보여주고 있다. 전기전도도는 물 속에 미네랄 등 이온성분, 불순물이 어느 정도 포함되어 있는가를 평가하기 위한 지표인자로 이용된다. 한편, 전기전도도는 주요한 무기성분농도와 긴밀한 상관관계를 나타내고, 염해상습지대에서는 염소이온량을 추정하는데 이용된다.

그림 4-14 및 4-15에서 보는 바와 같이 자연상태의 월악산 시험구역에서 관측된 전기전도도와 인근 교란지역에서 관측된 전기전도도를 비교한 결과, 두 지역 모두 청정한 산림내 계류수의 전기전도도 한계인  $200\mu\text{S}$ 를 초과하

지 않았으나, 자연 상태의 월악산 시험구역에서의 전기전도도는  $18\mu\text{S}$ 에서  $40\mu\text{S}$ 의 범위로서 인근 교란지역의 전기전도도  $30\mu\text{S}$ 에서  $70\mu\text{S}$ 의 범위에 비하여 상대적으로 적은 양의 물질이온이 배출되는 것을 알 수 있었다.

그림 4-14 및 4-15에서 전기전도도는 수위가 증가함에 따라 다소 감소하는 경향을 보이고 있으며 하절기로 갈수록 더욱 심한 차이를 볼 수 있다.

한편, 수온은 자연상태가 높게 나타났으며 계절간에도 이러한 경향이 유지되었다. 월악 시험구역의 수온은  $23.50\pm 0.21^\circ\text{C}$ 이고 교란지역은  $21.48\pm 0.24^\circ\text{C}$ 이었다. 또한, 월악 시험구역의 pH는  $6.94\pm 0.05$ 이며, 교란 지역의 pH는  $7.17\pm 0.02$ 로 시험구역의 평균 pH가 낮게 나타났으나 표준편차는 컸다. 유량이 낮을 때 pH가 높은 것은 이 구역이 석회암에서 기인한 토층을 포함하기 때문으로 생각한다. 또한 집수면적의 차이에 의하여 월악산 시험구역은 강수의 영향을 쉽게 받는데 반하여 상대적으로 집수면적이 큰 인위적 교란지역은 강수의 영향이 두드러지지 않고 있다고 생각한다.

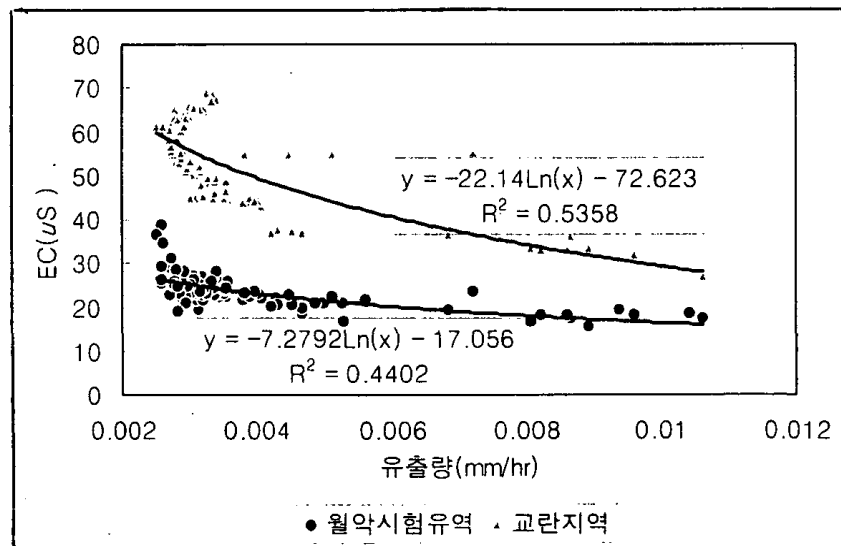


그림 4-14. 수위와 전기전도도 비교

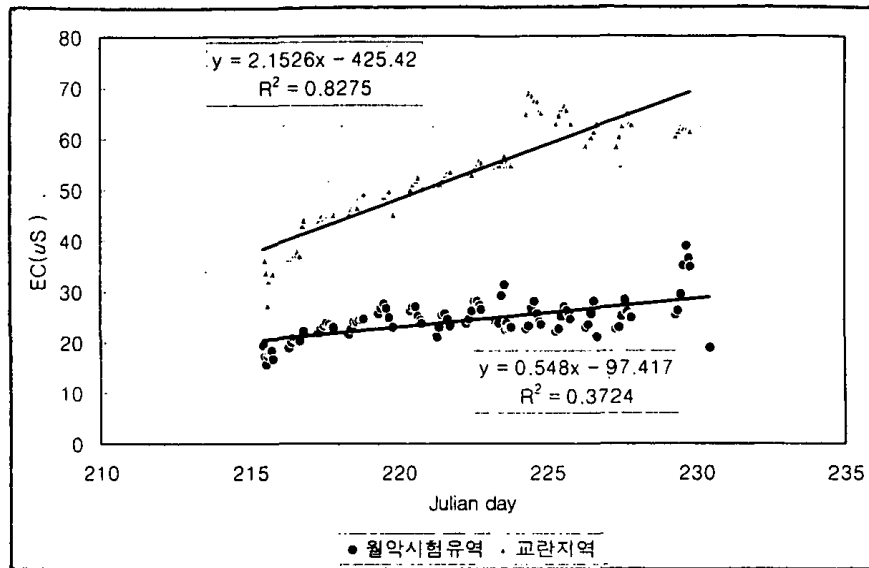


그림 4-15. 줄리안 데이와 전기전도도 비교

표 4-4. 월악 강우의 수질(1998)

DATE	JUL	pH	EC	N021	N022	N031	N032	NH41	NH42
WARA0606	157	5.57	48.1	0.012	0.03	0.80	3.60	0.60	0.90
WARA0613	164	6.37	26.3	0.004	0.04	0.23	1.00	0.14	0.18
WARA0614	165	4.40	10.0	0.001	0.00	0.12	0.62	0.63	0.79
WARA0629	180	5.55	3.7	0.002	0.00	0.05	0.22	0.01	0.02
WARA0712	193	6.95	19.4	0.004	0.01	0.16	0.72	0.00	-
WARA0719	200	5.67	9.5	0.001	0.01	0.16	0.68	0.75	0.97
WARA0801	213	5.10	8.5	0.004	0.00	0.15	0.62	0.35	0.46
WARA0808	220	5.13	10.8	0.005	0.01	0.12	0.50	0.55	0.72

표 4-4. 계속

DATE	JUL	P	K	Ca1	Ca2	Mg1	Mg2	CL1	CL2	Col	Turb
WARA0606	157	0.07	3.9	5	2	9	35	0.0	0	-	-
WARA0613	164	0.32	3.7	5	2	11	40	0.0	0	0	0
WARA0614	165	0.07	0.0	5	2	10	45	0.0	0.0	0	0
WARA0629	180	0.11	0.0	20	8	8	35	0.0	0.0	0	0
WARA0712	193	0.04	3.1	0	0	8	30	0.0	0	0	0
WARA0719	200	0.04	0.0	5	2	9	40	0.0	0.0	0	0
WARA0801	213	0.09	0.0	0	0	10	40	0.0	0	0	0
WARA0808	220	0.12	0.1	0	0	10	45	0.1	0	20	0

표 4-4는 월악산 시험유역의 1998년도의 강우의 수질 관련 인자들을 나타내고 있다. 총 8회의 강우 사상에 대하여 pH, 전기전도도,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  등의 측정값을 제시하고 있다.

표 4-4에서 보는 바와 같이, 총 8회의 강우 사상에 대하여, pH는 4.40~6.95의 범위에 있는 것으로 나타났으며, 전기전도도는 3.7~48.1  $\mu\text{S}$ 의 범위를 가지는 것으로 나타났다. 또한, 아질산염1(NO21)은 0.001~0.012mg/L, 아질산염2(NO22)는 0~0.004mg/L, 질산염1(NO31)은 0.05~0.80mg/L, 질산염2(NO32)는 0.22~3.60mg/L, 암모늄1(NH41)은 0~0.75mg/L, 암모늄2(NH42)는 0.02~0.97mg/L, 인(P)은 0.04~0.32mg/L, 칼륨(K)은 0~3.9mg/L, 칼슘1(Ca1)은 0~20mg/L, 칼슘2(Ca2)는 0~8mg/L, 마그네슘1(Mg1)은 8~11mg/L, 마그네슘2(Mg2)는 30~45mg/L의 범위에 있는 것으로 나타났다. 한편, 염소1(CL1)과 염소2(CL2)는 거의 검출되지 않았고, Col은 한 차례 20의 값을 보였으며, 탁도(turbidity)는 1개의 결측을 제외하고 모두 0이었다.

표 4-5는 월악산 시험유역의 1998년의 유출수의 수질과 관련된 인자들을 나타내고 있다. 측정인자들은 강우 수질과 같은 인자들을 대상으로 하였다.

표 4-5. 월악 유출수 수질(1998)

DATE	JUL	pH	EC	NO21	NO22	NO31	NO32	NH41	NH42
WAR00523	143	7.28	29.8	0.006	0.02	0.09	0.34	0.04	0.05
WAR00614	165	5.63	11.7	0.007	0.02	0.17	0.82	0.00	0.00
WAR00629	180	6.66	27.0	0.000	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
WAR00704	185	6.30	23.7	0.006	0.02	0.02	0.14	0.17	0.21
WAR00712	193	6.49	23.5	0.001	0.00	0.02	0.12	0.06	0.07
WAR00719	200	6.52	25.3	0.000	0.00	0.03	0.12	0.01	0.01
WAR00801	213	6.13	22.8	0.000	0.01	0.11	0.48	0.00	0.03
WAR00808	220	5.03	24.9	0.000	0.00	0.08	0.32	0.05	0.06
WBRO0529	149	6.44	56.6	0.004	0.00	0.75	3.30	0.06	0.06
WBRO0606	157	7.04	57.5	0.002	0.90	0.90	4.00	0.01	0.01

DATE	JUL	P	K	Ca1	Ca2	Mg1	Mg2	CL1	CL2	Col	Turb
WAR00523	143	-	0.0	-	-	-	-	-	-	35	0
WAR00614	165	0.00	0.0	0	0	14	50	0.0	0.0	0	0
WAR00629	180	0.28	0.0	15	6	7	25	0	0	25	0
WAR00704	185	0.08	0.1	0	0	10	35	0.0	0.0	0	0
WAR00712	193	0.09	0.0	0	2	6	20	0	0	15	0
WAR00719	200	0.16	0.0	5	2	11	45	0.0	0.0	0	0
WAR00801	213	0.24	0.0	0	0	10	40	0	0	35	0
WAR00808	220	0.13	0.0	-	-	9	40	0	0	0	2
WBRO0529	149	-	0.0	-	-	-	-	-	-	0	0
WBRO0606	157	-	0.0	-	-	-	-	-	-	0	0

표 4-5에서 보는 바와 같이, 월악산 시험구역에서 수집한 총 10회의 유출수의 수질에 있어, pH는 5.03~7.28의 범위에 있는 것으로 나타났으며, 전기전도도는 11.7에서 57.5  $\mu$ S의 범위를 보이는 것으로 나타났다. 또한, 아질산염1(NO21)은 0~0.007mg/L, 아질산염2(NO22)는 0~0.90mg/L, 질산염1(NO31)은 0~0.90mg/L, 질산염2(NO32)는 0~4.00mg/L, 암모늄1(NH41)은 0~0.17mg/L, 암모늄2(NH42)는 0~0.21mg/L, 인(P)은 0~0.28mg/L, 칼륨(K)은 0~0.1mg/L, 칼슘1(Ca1)은 0~15mg/L, 칼슘2(Ca2)는 0~6mg/L, 마그네슘1(Mg1)은 6~14mg/L, 마그네슘2(Mg2)는 20~50mg/L, Col은 0~35의 범위를 보였다. 한편, 월악산 시험구역의 강우의 수질에서와 마찬가지로 유출수에서도 염소1(Cl1)과 염소2(Cl2)는 검출되지 않았다. 그리고 탁도는 한 차례 2의 값을 나타내었고 나머지는 모두 0인 것으로 나타났다.

표 4-6은 월악산 시험구역의 1998년의 지하수의 수질과 관련한 인자들을 나타내고 있다.

표 4-6에서 보는 바와 같이, 월악산 시험구역에 수집한 총 5회의 지하수의 수질에 있어, pH는 5.96~7.88의 범위에 있는 것으로 나타났으며, 전기전도도는 31.4에서 130.8  $\mu$ S의 범위를 보이는 것으로 나타났다. 또한, 아질산염1(NO21)은 0~0.003mg/L, 질산염1(NO31)은 0.06~0.21mg/L, 질산염2(NO32)는 0.24~0.92mg/L, 암모늄1(NH41)은 0~0.45mg/L, 암모늄2(NH42)는 0.05~0.59mg/L, 인(P)은 0.22~0.88mg/L, 칼륨(K)은 0~1.2mg/L, 칼슘1(Ca1)은 5~35mg/L, 칼슘2(Ca2)는 2~14mg/L, 마그네슘1(Mg1)은 6~11mg/L, 마그네슘2(Mg2)는 25~40mg/L, 염소1(Cl1)은 0~0.6mg/L, 염소2(Cl2)는 0~9의 범위를 보였다. 한편, 아질산염2(NO22)는 검출되지 않았다.

표 4-6. 월악 지하수의 수질(1998)

DATE	JUL	pH	EC	NO21	NO22	NO31	NO32	NH41	NH42
WAGR0529	149	6.84	101.4	0.003	0.00	0.16	0.66	0.20	0.27
WAGR0606	157	7.88	127.1	0.000	0.00	0.18	0.84	0.05	0.05
WAGR0614	165	6.43	32.9	0.000	0.00	0.06	0.24	0.00	-
WAGR0625	176	7.62	130.8	0.000	0.00	0.11	0.50	0.45	0.59
WAGR0808	220	5.96	31.4	0.000	0.00	0.21	0.92	0.03	0.05

DATE	JUL	P	K	Ca1	Ca2	Mg1	Mg2	CL1	CL2	Col	Turb
WAGR0529	149	-	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-
WAGR0606	157	0.34	0.0	25	12	6	25	0.6	9	-	-
WAGR0614	165	0.32	1.2	5	4	11	45	0.1	0.0	-	-
WAGR0625	176	0.88	0.0	35	14	9	40	0.0	0	-	-
WAGR0808	220	0.22	0.0	5	2	9	40	0.0	0	-	-

나. 연풍 시험구역의 강우 및 유출수의 수질 비교

표 4-7은 연풍 시험구역의 강우와 유출수의 수질을 비교한 것이다. 표 4-7에서 보는 바와 같이 연풍 시험구역의 강우의 pH는 5.35~5.79의 범위에 있었으며, 전기전도도는 14.29~21.65 $\mu$ S의 범위에 있는 것으로 나타났다. 아질산태 질소(NO2-N)는 0.0023~0.0051mg/L, 질산태 질소(NO3-N)은 0.18~0.24mg/L, 암모니아태 질소(NH4-N)는 0.58~1.30mg/L, PO4는 0.89~2.99mg/L, 칼륨(K)은 0.20~0.46mg/L, 칼슘(Ca)은 5.26~10.30mg/L, 마그네

슘(Mg)은 8.55~9.25mg/L, 염소(Cl)는 0~0.12mg/L의 범위에 있는 것으로 나타났다.

연풍 시험구역의 유출수의 pH는 6.76~6.86의 범위에 있었으며, 전기전도도는 37.92~51.10  $\mu$ S의 범위에 있는 것으로 나타났다. 아질산태 질소(NO<sub>2</sub>-N)는 0.0012~0.0026mg/L, 질산태 질소(NO<sub>3</sub>-N)은 0.32~0.60mg/L, 암모니아태 질소(NH<sub>4</sub>-N)는 0.03~0.07mg/L, PO<sub>4</sub>는 0.35~2.19mg/L, 칼륨(K)은 0.17~0.29mg/L, 칼슘(Ca)은 5.46~10.90mg/L, 마그네슘(Mg)은 9.63~10.21mg/L, 염소(Cl)는 0.20~0.76mg/L의 범위에 있는 것으로 나타났다.

이온의 연간 유입량은 아질산태 질소가 0.04kg/ha/yr로 가장 낮았으며, 마그네슘이 106.80kg/ha/yr로 가장 높았다. 유출수에 의한 이온의 연간유출량은 역시 아질산태 질소가 0.01kg/ha/yr로 가장 낮았으며, 마그네슘이 53.57kg/ha/yr로 가장 높았다.

24회의 강우, 유출수를 대비한 결과 지중을 통하여 유출수로 전환하는 동안 강우의 산도는 시험구역이 석회암 지대이기 때문에 중성화가 되고, 유출수중에 많은 양료가 침출되어 EC가 높아지는 것을 알 수 있었다. 질소종에서 NO<sub>2</sub>-N 및 NH<sub>4</sub>-N은 감소되고, NO<sub>2</sub>-N은 증가하였다. 강우중 벌레의 침전에 의하여 NH<sub>4</sub>-N이 아주 높은 값을 보이는 것도 있었으나 자료에서 이를 배제하지 않았다. 인산, 카리, 칼슘 등은 감소하는 경향이 있었으나, 염소 이온의 증가는 두드러졌다. 이온의 연간 유출량은 유출의 농도에 연유출량을 곱하여 계산하였다. 유역에 들어오는 이온보다도 유출수에 의해 많이 나가는 이온은 Cl이었다.



표 4-7. 연풍 강우 및 유출수의 비교

	연풍 강우		연풍 유출수	
	mg/l	kg/ha/year	mg/l	kg/ha/year
pH	5.57±0.22		6.81±0.05	
EC	17.97±3.68		44.51±6.59	
NO <sub>2</sub> -N	0.0037±0.0014	0.04	0.0019±0.0007	0.01
NO <sub>3</sub> -N	0.21±0.03	2.52	0.46±0.14	2.48
NH <sub>4</sub> -N	0.94±0.36	11.28	0.05±0.02	0.27
PO <sub>4</sub>	1.94±1.05	23.28	1.27±0.92	15.81
K	0.33±0.13	3.96	0.23±0.06	1.24
Ca	7.78±2.52	93.36	8.18±2.72	44.17
Mg	8.90±0.35	106.80	9.92±0.29	53.57
Cl	0.06±0.06	0.72	0.48±0.28	2.59

표 4-8는 연풍 시험유역의 강우의 수질과 관련한 인자들을 나타내고 있다. 표 4-8에서 보는 바와 같이, 총 11회의 강우 사상에 대하여, pH는 4.73~6.84의 범위에 있는 것으로 나타났으며, 전기전도도는 5.2~62.7 $\mu$ S의 범위를 가지는 것으로 나타났다. 또한, 아질산염1(NO<sub>2</sub>)은 0~0.033mg/L, 아질산염2(NO<sub>2</sub>)는 0~0.96mg/L, 질산염1(NO<sub>3</sub>)은 0.05~0.35mg/L, 질산염2(NO<sub>3</sub>)는 0.26~1.54mg/L, 암모늄1(NH<sub>4</sub>)은 0.03~4.4mg/L, 암모늄2(NH<sub>4</sub>)는 0.05~5.1mg/L, 인(P)은 0.04~1.55mg/L, 칼륨(K)은 0~10.4mg/L, 칼슘1(Ca<sub>1</sub>)은 0~15mg/L, 칼슘2(Ca<sub>2</sub>)는 0~8mg/L, 마그네슘1(Mg<sub>1</sub>)은 7~10mg/L, 마그네슘2(Mg<sub>2</sub>)는 20~45mg/L, 염소2(Cl<sub>2</sub>)는 0~9.0mg/L, Cl<sub>1</sub>은 0~20, 탁도는 0~28의 범위를 보이는 것으로 나타났다. 한편, 염소1(Cl<sub>1</sub>)은 거의 검출되지 않았다.

표 4-9은 연풍 시험유역의 유출수의 수질과 관련한 인자들을 나타내고

있다. 표 4-9에서 보는 바와 같이, 시험유역에서 수집된 총 13회의 유출수에 대하여, pH는 6.56~7.14의 범위에 있는 것으로 나타났으며, 전기전도도는 35.3~130.0  $\mu$ S의 범위를 가지는 것으로 나타났다. 또한, 아질산염1(N021)은 0~0.005mg/L, 아질산염2(N022)는 0~0.02mg/L, 질산염1(N031)은 0.10~2.20mg/L, 질산염2(N032)는 0.48~9.60mg/L, 암모늄1(NH41)은 0~0.23mg/L, 암모늄2(NH42)는 0~0.3mg/L, 인(P)은 0.04~0.70mg/L, 칼륨(K)은 0~12.0mg/L, 칼슘1(Ca1)은 0~30mg/L, 칼슘2(Ca2)는 0~12mg/L, 마그네슘1(Mg1)은 9~12mg/L, 마그네슘2(Mg2)는 35~50mg/L, 염소1(Cl1)은 0~2.7mg/L, 염소2(Cl2)는 0~23mg/L, Col은 0~15, 탁도는 0~10의 범위를 보이는 것으로 나타났다.

표 4-8. 연풍 강우의 수질

DATE	JUL	pH	EC	N021	N022	N031	N032	NH41	NH42
YPRA0615	166	5.90	6.7	0.000	0.00	0.11	0.50	0.13	0.16
YPRA0622	173	6.84	62.7	0.033	0.12	0.15	0.64	4.4	-
YPRA0629	180	5.43	5.2	0.001	0.00	0.05	0.26	0.55	0.70
YPRA0704	185	5.82	14.2	0.004	0.01	0.13	0.56	1.01	1.31
YPRA0710	191	6.12	22.4	0.004	0.03	0.35	1.54	1.0	1.30
YPRA0710	191	6.52	36.8	0.000	0.00	0.34	1.54	0.03	0.05
YPRA0711	192	4.87	19.6	0.006	0.02	0.25	1.18	1.0	1.30
YPRA0715	196	6.64	38.5	0.015	0.96	0.20	0.88	4.0	5.1
YPRA0719	200	4.92	10.3	0.000	0.00	0.20	0.94	0.35	0.45
YPRA0722	203	4.73	15.6	0.003	0.02	0.22	1.02	0.63	0.80
YPRA0802	214	5.63	8.5	0.004	0.01	0.19	0.84	0.51	0.67
YPRA0808	220	4.98	8.6	0.000	0.00	0.17	0.74	0.33	0.43

표 4-8. 연풍 강우의 수질(계속)

DATE	JUL P	K	Ca1	Ca2	Mg1	Mg2	CL1	CL2	Col	Turb	
YPRA0615	166	0.08	0.0	15	6	10	40	0.0	0.0	0	0
YPRA0622	173	1.55	-	0	0	9	45	0	0	0	28
YPRA0629	180	0.10	0.0	15	6	10	40	0.0	1.0	0	0
YPRA0704	185	0.30	1.9	10	4	9	35	0	0	0	0
YPRA0710	191	0.14	4.1	15	8	7	20	0	0	20	0
YPRA0710	191	0.86	0.0	15	4	9	40	0.0	0.0	10	0
YPRA0711	192	0.14	3.0	15	6	7	20	0.6	9.0	0	2
YPRA0715	196	1.30	10.4	0	0	9	40	0	0	10	2
YPRA0719	200	0.05	0.0	0	0	9	35	0.0	0.0	0	0
YPRA0722	203	0.04	0.0	0	0	9	40	0	0	0	0
YPRA0802	214	0.13	0.0	0	0	10	45	0	0	0	0
YPRA0808	220	0.19	0.0	-	-	10	45	0.0	1	0	0

표 4-9. 연풍 유출수의 수질

DATE	JUL	pH	EC	N021	N022	N031	N032	NH41	NH42
YPRO0523	143	7.14	40.6	0.001	0.00	0.44	1.94	0.04	0.06
YPRO0529	149	6.95	38.8	0.000	0.00	0.21	0.94	0.00	0.00
YPRO0606	157	6.73	38.5	0.001	0.00	0.13	0.60	0.01	0.02
YPRO0606	157	6.88	130.0	0.005	0.01	2.20	9.60	0.23	0.28
YPRO0615	166	6.78	37.9	0.001	0.00	0.41	1.82	0.01	0.03
YPRO0622	173	6.74	40.6	0.002	0.00	0.35	1.52	0.00	0.00
YPRO0629	180	7.11	38.8	0.010	0.02	0.55	2.50	0.03	0.05
YPRO0704	185	6.57	35.3	0.004	0.02	0.24	1.10	0.2	0.3
YPRO0711	192	6.56	36.3	0.001	0.00	0.44	1.94	0.02	0.03
YPRO0715	196	6.85	36.6	0.000	0.00	0.34	1.52	0.01	0.03
YPRO0719	200	6.83	36.9	0.000	0.00	0.31	1.40	0.00	0.00
YPRO0722	203	6.89	37.0	0.000	0.00	0.10	0.48	0.00	0.00
YPRO0802	214	6.71	38.0	0.000	0.00	0.38	1.72	0.03	0.04
YPRO0808	220	6.63	37.9	0.001	0.01	0.38	1.70	0.05	0.07

표 4-9. 연풍 유출수의 수질(계속)

DATE	JUL	P	K	Ca1	Ca2	Mg1	Mg2	CL1	CL2	Col	Turb
YPRO0523	143	-	0.1	-	-	-	-	-	-	0	10
YPRO0529	149	-	0.0	-	-	-	-	-	-	15	6
YPRO0606	157	0.70	0.0	10	4	9	40	0.0	0	0	0
YPRO0606	157	0.16	2.9	30	12	12	50	2.3	23	0	0
YPRO0615	166	0.21	0.0	5	4	9	35	0.0	0.0	0	0
YPRO0622	173	0.14	1.2	15	6	10	45	0.7	5	10	0
YPRO0629	180	0.33	0.0	10	4	11	45	2.7	23	0	0
YPRO0704	185	0.09	12.0	10	4	10	40	0.0	0.0	0	0
YPRO0711	192	0.04	-	0	0	9	35	0.0	1	0	0
YPRO0715	196	0.08	0.0	10	4	9	40	0.0	0.0	15	0
YPRO0719	200	0.24	0.1	0	2	10	40	0.0	0	0	2
YPRO0722	203	0.16	0.1	0	0	9	40	0.0	0	0	0
YPRO0802	214	0.42	0.1	0	0	11	45	0.1	0	0	0
YPRO0808	220	-	0.0	-	-	10	45	0.0	0	10	0

일반적으로 유량에 관계없이 그 농도가 일정한 이온은  $Cl^-$ , T-P,  $NH_4^+-N$ , org-N,  $K^+$  등이 있고, 유량이 증가함에 따라 농도가 감소하는 이온은  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $SiO_2$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$  등이 있으며, 유량이 증가함에 따라 농도가 증가하는 이온은  $NO_3^- -N$ , org-N 등이 있다(宗宮 功, 1990).

그림 4-16에서 그림 4-24는 월악산 시험유역과 연풍 시험유역에서 1998년 동안에 수집한 강우 자료와 유출수 자료의 수질을 구성하는 전기전도도, pH, 이온 물질 등의 인자들간의 회귀분석을 실시하여 각 인자들간의 상관관

계를 나타내고 있다. 각 인자들간의 상관관계 중  $R^2$  값이 0.6 이상인 것들만 제시하였다.

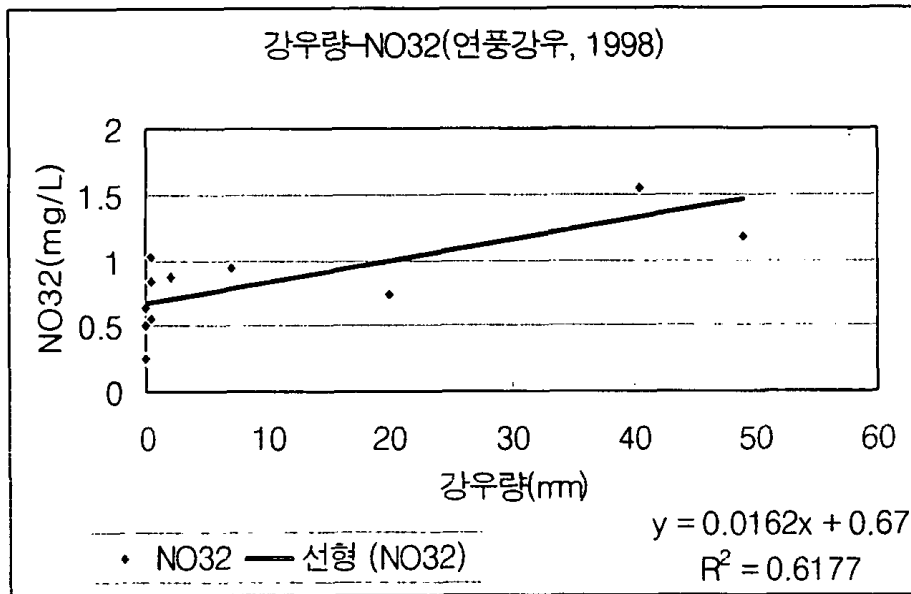


그림 4-16. 강우량과 질산염 이온(NO31)의 관계(연풍강우, 1998)

그림 4-16에서 보는 바와 같이, 1998년의 연풍 시험구역의 강우에서 강우량과 질산염 이온의 회귀분석결과  $R^2=0.6177$ 로써 다소 낮은 상관관계를 나타내고 있으며, 강우량이 증가함에 따라 질산염 이온의 농도도 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 선행연구결과(宗官 功, 1990)와도 일치한다.

그림 4-17에서 보는 바와 같이, 1998년의 연풍 시험구역의 강우에서 pH와 인 이온의 경우에는  $R^2=0.6545$ 이었으며, pH값이 증가함에 따라 인 이온의 농도 역시 증가하는 것으로 나타났다.

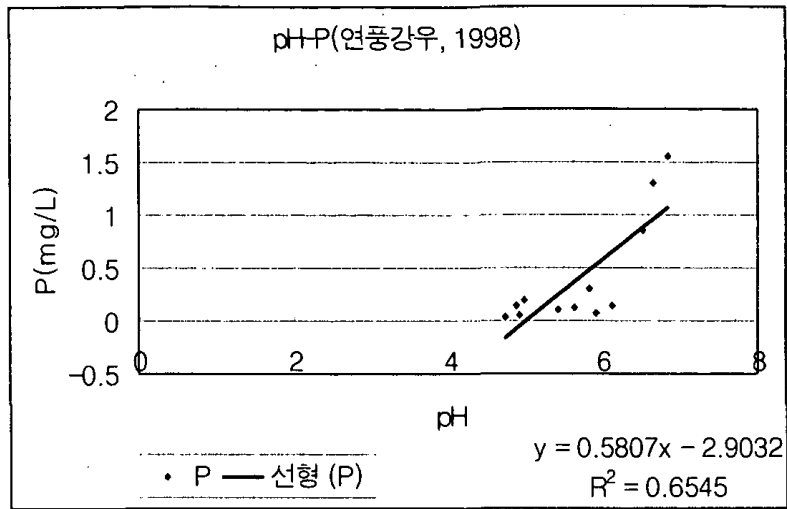


그림 4-17. pH와 인 이온(P)의 관계(연풍강우, 1998)

그림 4-18에서 보는 바와 같이, 1998년의 연풍 시험구역의 강우에서 전기전도도와 아질산염 이온의 경우,  $R^2=0.7328$ 이었으며, 전기전도도가 증가함에 따라 아질산염 이온의 농도 역시 증가하는 것으로 나타났다.

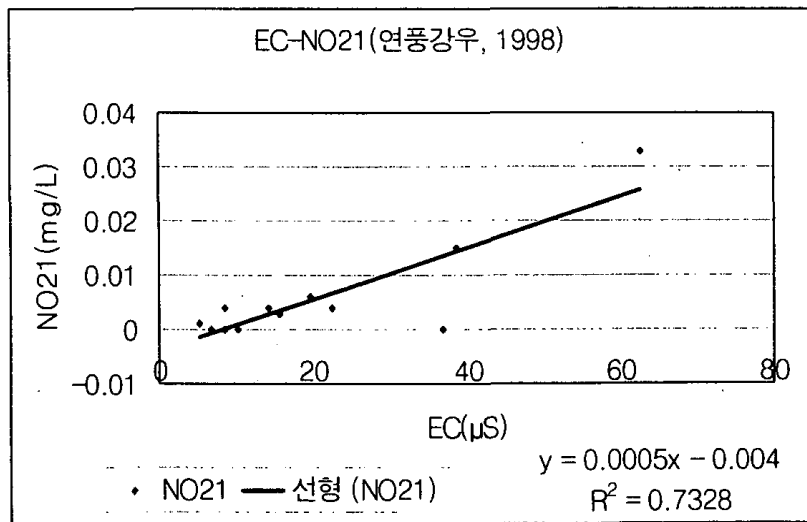


그림 4-18. 전기전도도와 아질산염 이온(NO21)의 관계(연풍강우, 1998)

그림 4-19에서 보는 바와 같이, 1998년의 연풍 시험구역의 강우에서 전기전도도와 인 이온의 관계의 경우,  $R^2=0.8655$ 로 높게 나타나, 전기전도도와 인 이온이 유의한 상관관계를 가지고 있는 것으로 보인다. 즉, 전기전도도가 증가함에 따라 인 이온의 농도 역시 증가하는 것으로 나타났다.

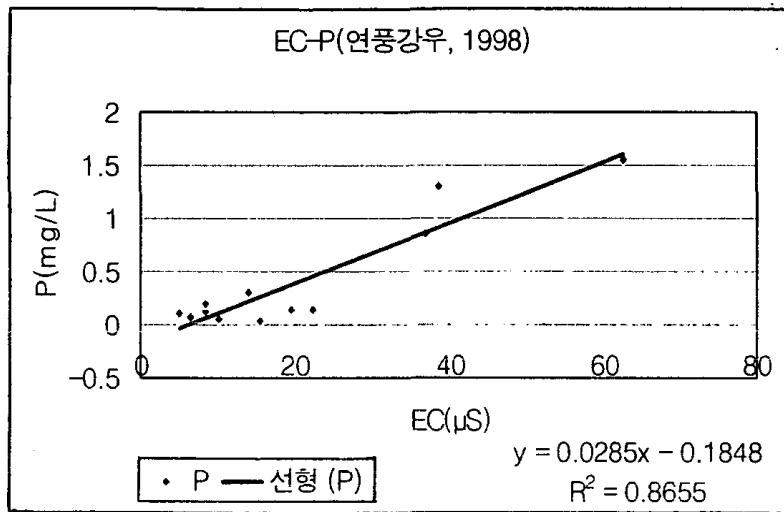


그림 4-19. 전기전도도와 인 이온(P)의 관계(연풍강우, 1998)

그림 4-20에서 보는 바와 같이, 1998년의 연풍 시험구역의 유출수에서 전기전도도와 질산염 이온의 관계의 경우,  $R^2=0.9455$ 로 다소 높게 나타나, 전기전도도와 질산염 이온의 농도 역시 높은 상관관계를 갖는 것으로 판단된다. 즉, 전기전도도가 증가함에 따라 질산염 이온의 농도 역시 증가하는 것으로 나타났다.



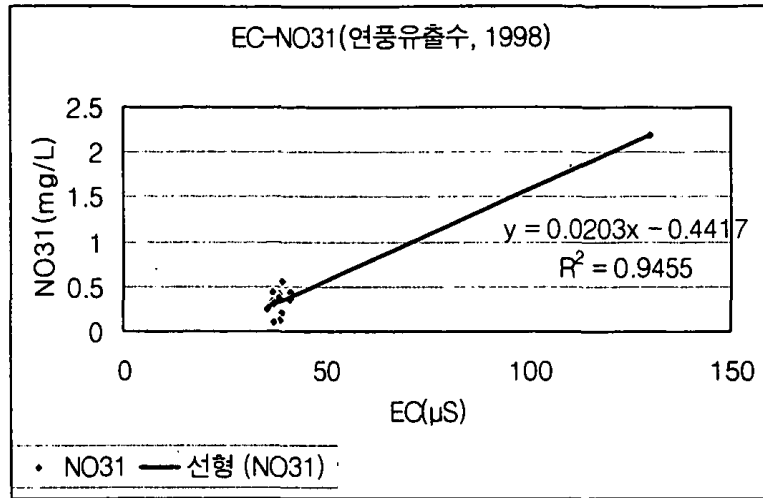


그림 4-20. 전기전도도와 질산염 이온(NO31)의 관계(연풍유출수, 1998)

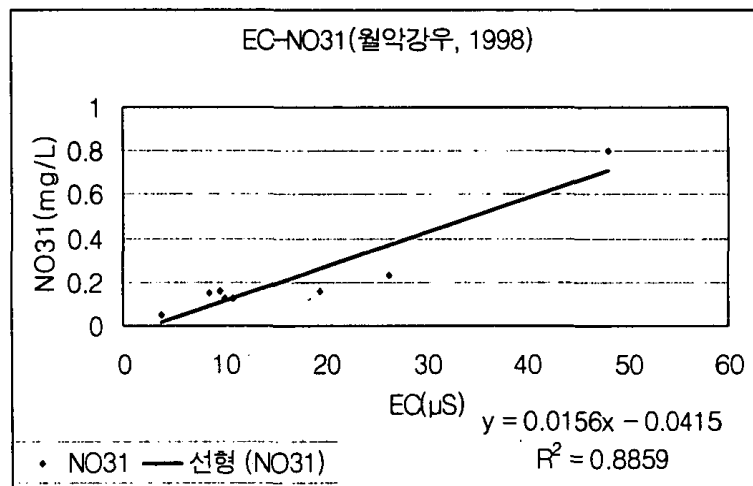


그림 4-21. 전기전도도와 질산염 이온(NO31)의 관계(월악강우, 1998)

그림 4-21에서 보는 바와 같이, 1998년의 월악산 시험유역의 강우에서 전기전도도와 인 이온의 관계의 경우,  $R^2=0.8859$ 로 높게 나타나, 역시 높은 상관관계를 갖는 것으로 나타났다.

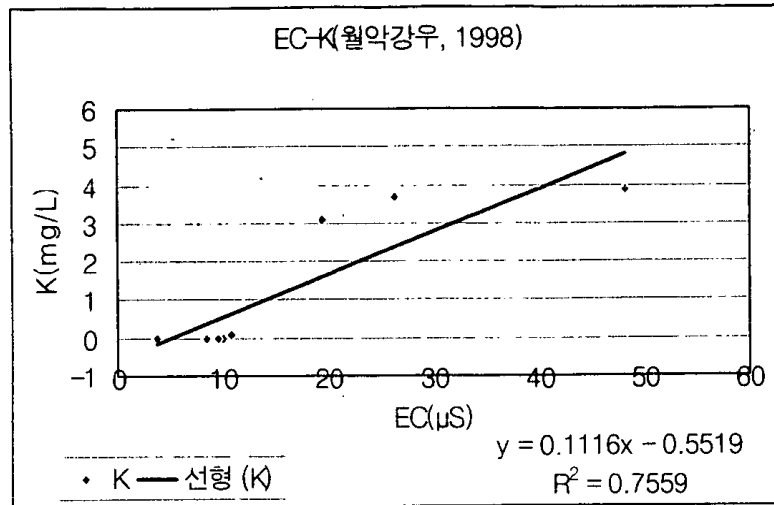


그림 4-22. 전기전도도와 칼륨 이온(K)의 관계(월악강우, 1998)

그림 4-22에서 보는 바와 같이, 1998년의 월악산 시험유역의 강우에서 전기전도도와 칼륨 이온의 관계의 경우,  $R^2=0.7559$ 로 나타났으며, 역시 전기전도도가 증가함에 따라 칼륨이온의 농도도 증가하는 것으로 나타났다.

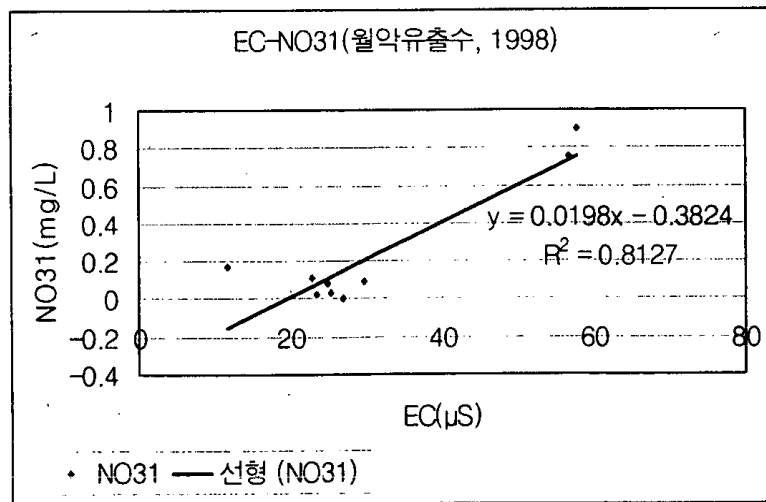


그림 4-23. 전기전도도와 질산염 이온(NO31)의 관계(월악유출수, 1998)

그림 4-23에서 보는 바와 같이, 1998년의 월악산 시험구역의 유출수에서 전기전도도와 질산염 이온의 관계의 경우,  $R^2=0.8127$ 로 나타났으며, 역시 전기전도도가 증가함에 따라 질산염 이온의 농도도 증가하는 것으로 나타났다.

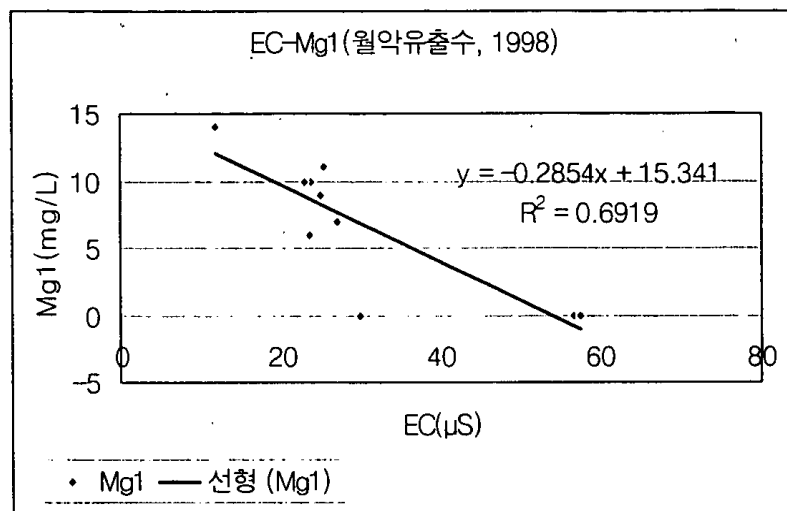


그림 4-24. 전기전도도와 마그네슘 이온(Mg1)의 관계(월악유출수, 1998)

그림 4-24에서 보는 바와 같이, 1998년의 월악산 시험구역의 유출수에서 전기전도도와 마그네슘 이온의 관계의 경우,  $R^2=0.6919$ 로 부의 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 즉, 마그네슘 이온의 경우, 전기전도도가 증가함에 따라 그 농도가 감소하는 것으로 나타났다.

다. 용존산소, pH, 전기전도도, 수온(연풍 시험 구역, 1999)

그림 4-25는 연풍 시험구역의 1999년의 용존산소, pH, 전기전도도, 수온을 나타내고 있다.

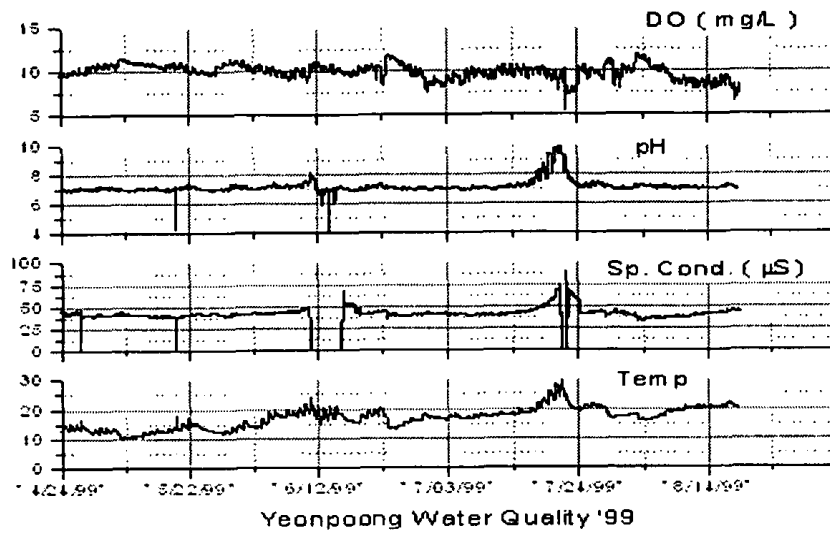


그림 4-25. 연풍 시험구역의 수질

그림 4-25에서 보는 바와 같이, 용존산소는 1.1~11.84mg/L의 범위에 있었으며, 평균값은 8.06mg/L이었다. pH는 3.86~9.83의 범위에 있었으며, 평균값은 7.05이었다. 또한, 전기전도도는 0~89.12 $\mu$ S의 범위를 보였으며, 평균값은 40.47 $\mu$ S이었다. 수온의 경우 1.58~29.43 $^{\circ}$ C의 범위에 있었으며, 평균값은 14.06 $^{\circ}$ C인 것으로 나타났다.

### 3. 강우-유출모형의 적용

#### 가. 모형 입력자료의 구성

TOPMODEL의 입력자료는 크게 고도자료와 강우자료 두 가지로 나눌 수 있다. 고도자료는 격자모형(grid model)의 형태로 저장된 수치고도모형(Digital Elevation Model ; DEM)을 이용하였으며, 이때 DEM의 해상도(resolution)는 10m이다. 그림 4-26과 그림 4-27에 월악산 시험유역 및 연풍 시험유역에 대한 수치고도(digital elevation)를 나타내었다. 월악산 시험유역의 고도는 최저 187m, 최고 390m의 범위를 가지며, 연풍 시험유역의 고도는 최저 251m, 최고 845m의 범위를 가진다.

강우량 자료는 월악산 시험유역과 연풍 시험유역에서 1998년도에 관측된 시간 강우량 자료를 이용하였다.

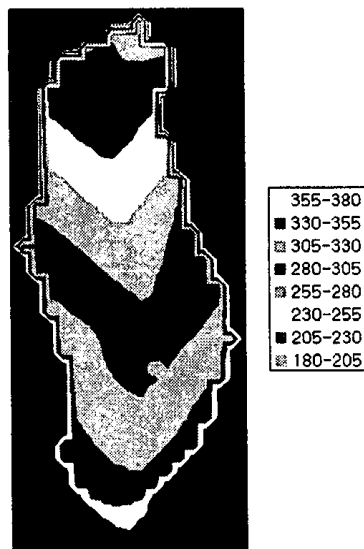


그림 4-26. 월악산 시험유역의 수치지형도

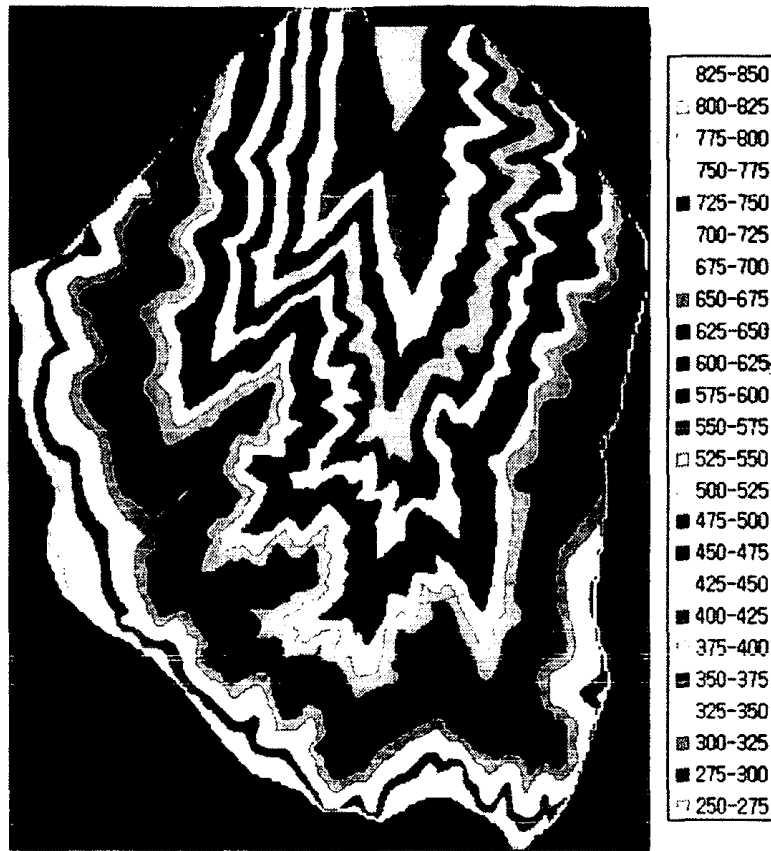


그림 4-27. 연풍 시험구역의 수치지형도

#### 나. TOPMODEL의 적용

TOPMODEL에서 요구하는 매개변수에 대한 설명이 표 4-10에 나타나 있다. 현재까지 TOPMODEL을 각종 구역에 적용한 연구 사례를 종합하여 그 매개변수의 값 또는 범위를 표 4-11에 정리하였다.

모형의 보정이란 프로그램화된 모형이 어느 정도의 정확한 기준을 만족시키면서 발생한 호우로 인한 구역의 유출을 재연할 수 있도록 모형의 매개변수를 조정하는 과정이라고 할 수 있으며, 이는 결국 모형이 포함하고

있는 매개변수의 최적화(parameter optimization)를 의미한다(이명우, 1989). 본 연구에서는 매개변수의 최적화를 위해서 다음과 같은 목적함수를 구성하였다. 즉,

$$F = \sum_t (QOBS_t - Q_t)^2 \text{ Minimized} \quad (\text{식 4-14})$$

여기서, F는 목적함수를 나타내고, QOBS<sub>t</sub>, Q<sub>t</sub>는 각각 시각 t에 있어서의 관측 유량 및 모의 유량이다.

본 연구에서는 유출에 큰 영향을 미치는 주요 매개변수로서 SZM, T0, TD, SRMAX를 선택하여 목적함수 F값을 비교하였다.

표 4-10. TOPMODEL에서 요구되는 매개변수와 그 단위

매개변수	설명	단위
EVMAX	여름철 최대 일평균 잠재 증발산량	m
EVMIN	겨울철 최소 일평균 잠재 증발산량	m
SZM	깊이에 따른 토양 투수계수의 변이를 반영	m
T0	유역 평균 전달계수	ln(m <sup>2</sup> /hr)
TD	단위 포화부족량에 대한 지체시간	hr
SRMAX	근저류부 최대저류부족량	m
Q0	하천의 초기 유량	m/hr
SRO	근저류부 저류 부족량 초기값	m

표 4-11. TOPMODEL에서 사용되는 매개변수값의 범위

유역	SZM	TD	SRMAX	Q0
1)	0.00666	1720	-	0.000524
2)	0.01039	12	-	0.000006
3)	0.00922	50	-	0.00565
4)	0.03437	41	-	0.0007
5)	0.00126-0.0033	-	-	0.00033-0.0058
6)	0.0095-0.033	-	-	0.0005-0.0098
7)	0.013-0.0216	-	-	0.0005-0.0026
8)	0.004-0.018	3-3000	0.01-1	-
9)	-	-	0.08	-
10)	-	-	0.07	-
11)	0.01413	-	0.36	-
12)	0.01091	-	0.16	-

- 1) 1983, Crimple Beck, Yorkshire, England - 유역면적 8 km<sup>2</sup>
- 2) 1983, White Oak Run, Shenandoah N.P., Virginia, U.S.A. - 유역면적 5 km<sup>2</sup>
- 3) 1983, North Fork Rivanna, Virginia, U.S.A. - 유역면적 456 km<sup>2</sup>
- 4) 1993, Davidson River, North California, U.S.A. - 유역면적 105 km<sup>2</sup>
- 5) 1984, Crimple Beck - 최대 표고차 135m, 연평균 강우량 800mm
- 6) 1984, Hodge Beck, North York Moors National Park - 유역면적 36 km<sup>2</sup>, 최대 표고차 358m, 연평균 강우량 900mm
- 7) 1984, Wye, Central Wales - 유역면적 10.55 km<sup>2</sup>, 최대 표고차 400m
- 8) 1985, White Oak Run - 최대 표고차 600m, 산림 유역
- 9) 1992, Les Cloutasses - 유역면적 0.81 km<sup>2</sup>
- 10) 1992, La Sapine - 유역면적 0.565 km<sup>2</sup>, 최대 표고차 300m
- 11) 1992, Walker Branch West Fork, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. - 유역면적 0.38 km<sup>2</sup>, 연평균 강우량 1400mm
- 12) 1992, Center Seven Creek, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. - 유역면적 0.17 km<sup>2</sup>, 연평균 강우량 1400mm

출처 : 1)-4):Beven and Wood(1983), 5)-7):Beven, Kirby, Schofield, and Tagg(1984), 8):Hornberger, Beven, Cosby and Sappington(1985), 9)-10):Durand, Robson, and Neal(1992), 11)-12):Clapp, Timmins, and Huston(1992)



### 1) 시험구역의 지형지수 분포

그림 4-28은 월악산 시험구역의 지형지수 분포를 나타내고 있다.

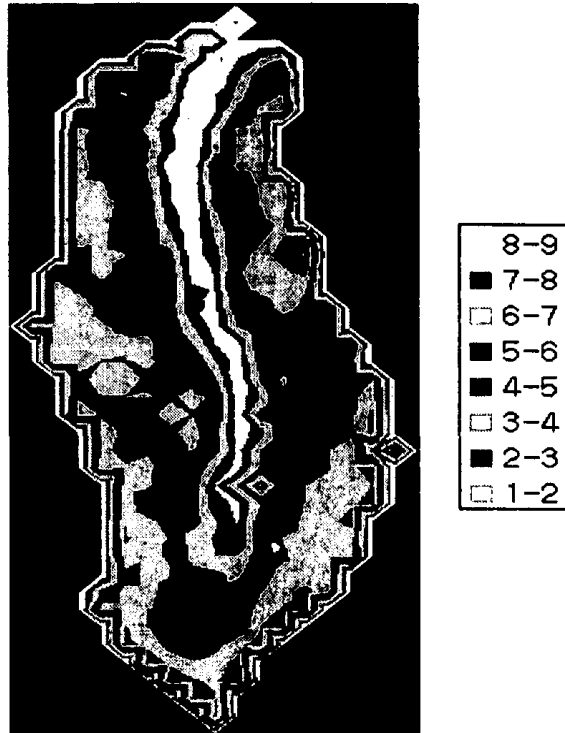


그림 4-28. 월악산 시험구역의 지형지수 분포

그림 4-28에서 보는 바와 같이, 월악산 시험구역의 지형지수는 최소 1.34에서 최대 9.38의 범위를 보였으며, 구역의 계곡부를 따라 하류에서 최대값을 나타내었다. 월악산 시험구역의 지형지수의 평균은 4.63이었다.

그림 4-29는 월악산 시험구역의 지형지수 분포를 각 지수급별 총 구역면적에 대한 해당 지수급의 분포면적비로 나타낸 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이, 지형지수 4의 값의 분포면적이 가장 많은 것으로 나타났다. 또한,

일반적으로 분포면적비의 곡선은 부드러운 모양을 나타내는데, 월악산 시험구역의 경우 부드럽게 연결되는 모양이 되지 못하였다. 이것은 구역면적이 작기 때문인 것으로 판단된다.

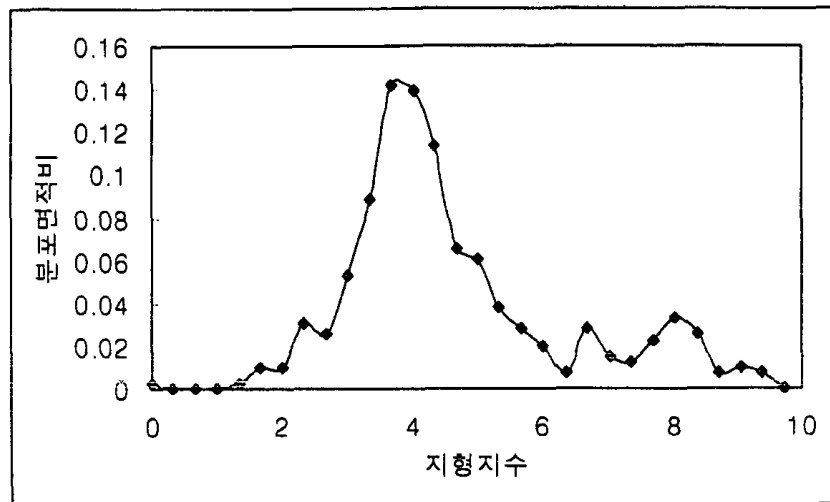


그림 4-29. 월악산 시험구역의 지형지수 분포면적비

그림 4-30은 연풍 시험구역의 지형지수 분포를 나타내고 있다.

그림 4-30에서 보는 바와 같이, 연풍 시험구역의 지형지수는 최소 1.19에서 최대 16.63의 범위를 보였으며, 구역의 계곡부를 따라 하류에서 최대 값을 보였다. 지형지수의 평균값은 4.93이었다.

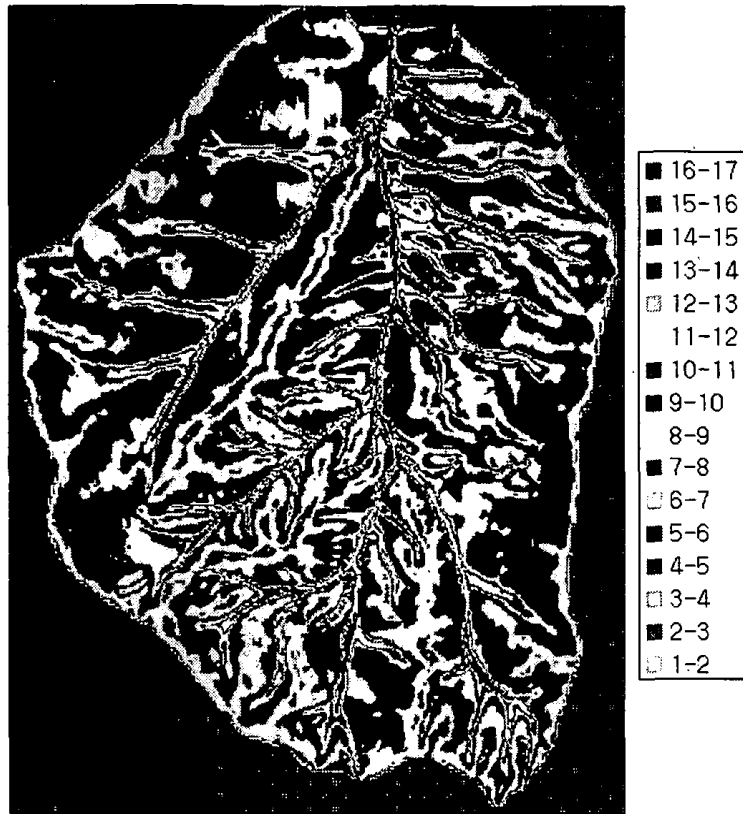


그림 4-30. 연풍 시험구역의 지형지수 분포

그림 4-31은 연풍 시험구역의 지형지수 분포를 각 지수급별 총 유역면적에 대한 해당 지수급의 분포면적비로 나타낸 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 지형지수 4에서 4.5 사이 값의 분포면적이 가장 많은 것으로 나타났다. 그림 4-29의 월악산 시험구역의 지형지수 분포면적비의 곡선이 부드럽지 못한 반면, 그림 4-31의 연풍 시험구역의 지형지수 분포면적비 곡선은 부드럽게 나타났다. 이것은 연풍 시험구역의 유역면적이 월악산 시험구역보다 더 크기 때문인 것으로 판단된다.

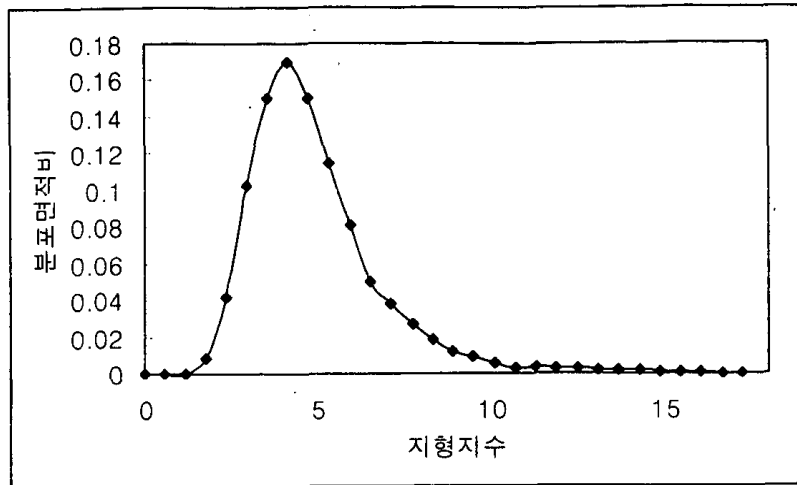


그림 4-31. 연풍 시험구역의 지형지수 분포면적비

## 2) 연풍 시험구역에 대한 모의결과

그림 4-32는 연풍 시험구역의 유출 모의 결과를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 연풍 시험구역의 모의 수문곡선이 실측 수문곡선과 잘 일치하고 있었으며, 첨두유량과 유출용적에 있어서도 매우 우수한 모의 결과를 보여주고 있었다. 한편, 모형의 매개변수 최적화를 위한 목적함수 F 값은 0.82로 비교적 높게 나타났다.

그림 4-33은 연풍 시험구역의 실측유량과 모의유량과의 관계를 1:1의 선을 기준으로 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 실측유량과 모의 유량이 비교적 잘 일치하고 있는 것으로 나타났으나, 수위가 높은 곳에서는 모의유량이 다소 낮게 나타나는 것을 볼 수 있다.

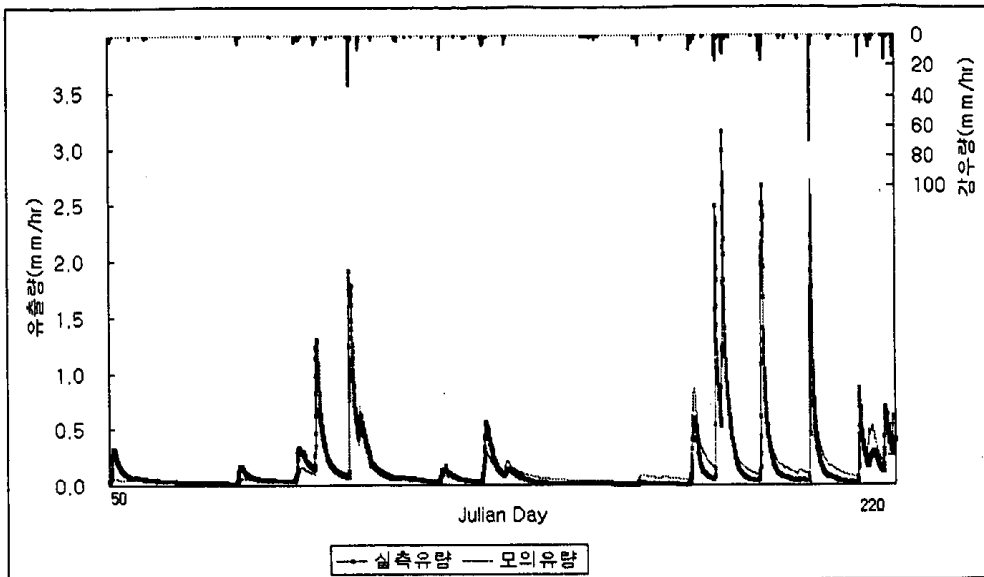


그림 4-32. 연풍 시험구역의 유출 모의 결과

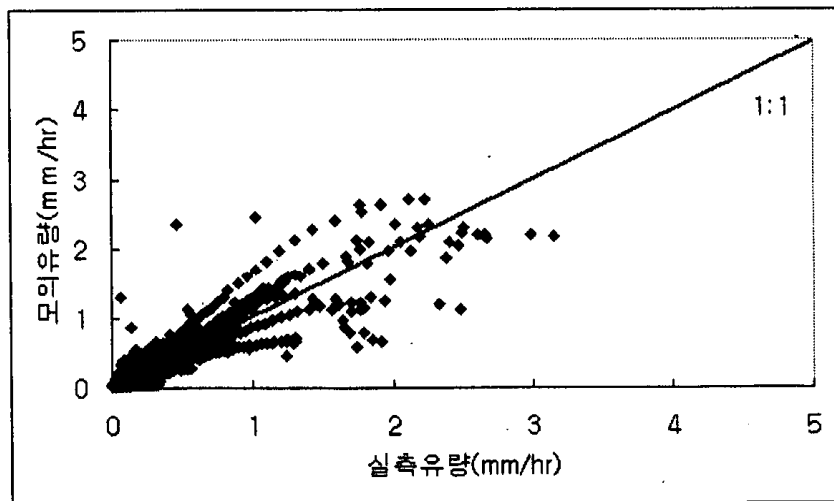


그림 4-33. 연풍 시험구역의 실측유량과 모의유량과의 관계

그림 4-34는 월악산 시험유역의 유출 모의 결과를 나타내고 있다.

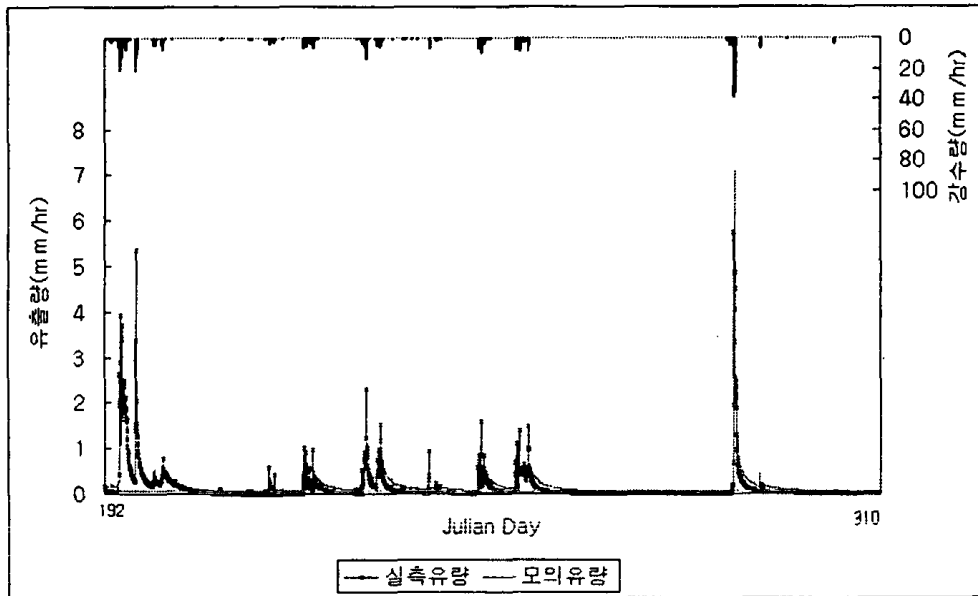


그림 4-34. 월악산 시험유역의 유출 모의 결과

그림 4-34에서 보는 바와 같이 월악산 시험유역의 모의 수문곡선이 실측 수문곡선과 잘 일치하고 있었으며, 첨두유량과 유출용적에 있어서도 매우 우수한 모의 결과를 보여주고 있었다. 한편, 모형의 매개변수 최적화를 위한 목적함수 F 값은 0.83이었다.

그림 4-35는 월악산 시험유역의 실측유량과 모의유량과의 관계를 1:1 선을 기준으로 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 실측유량과 모의 유량이 비교적 잘 일치하고 있는 것으로 나타났으나, 연풍 시험유역과 마찬가지로 수위가 높은 곳에서는 모의유량이 다소 낮게 나타나는 것을 볼 수 있다.

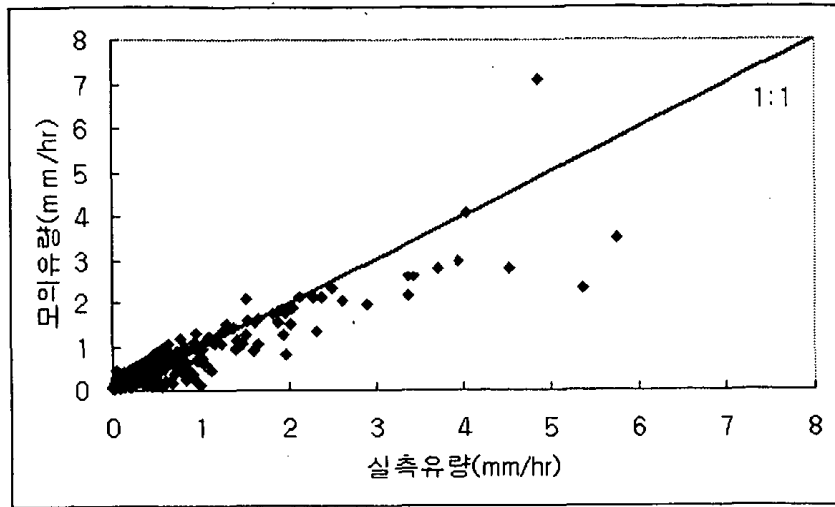


그림 4-35. 월악산 시험구역의 실측유량과 모의유량과의 관계

#### 4. 수질해석모형의 적용

##### 가. 산림구역내 용질의 공간적 분포지수 산정

산림구역내 공간적 분포지수의 산정을 위해 이 연구에서는 월악산 시험구역과 연풍 시험구역 중 구역면적이 큰 연풍 시험구역을 대상으로 하였으며, TI1 분포지수와 TI2 분포지수의 두 개의 공간적 분포지수를 산정하였다.

##### 1) TI1 분포지수

그림 4-36은 TI1 분포지수의 공간적 분포를 나타내고 있다.

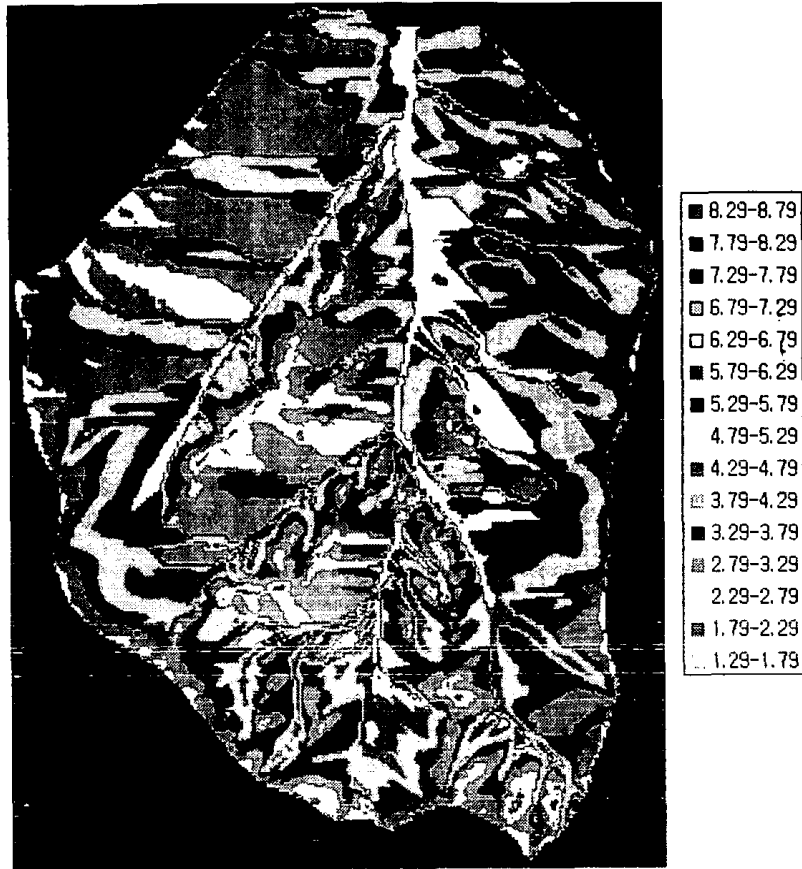


그림 4-36. TI1 분포지수의 공간적 분포

그림 4-36에서 보는 바와 같이, 연풍 시험구역의 TI1 분포지수는 최소 1.29에서 최대 9.02의 범위를 보였으며, 평균값은 3.47이었다.

그림 4-37은 TI1 분포지수의 분포를 각 지수급별 총 구역면적에 대한 해당 지수급의 분포면적비로 나타낸 결과이다.



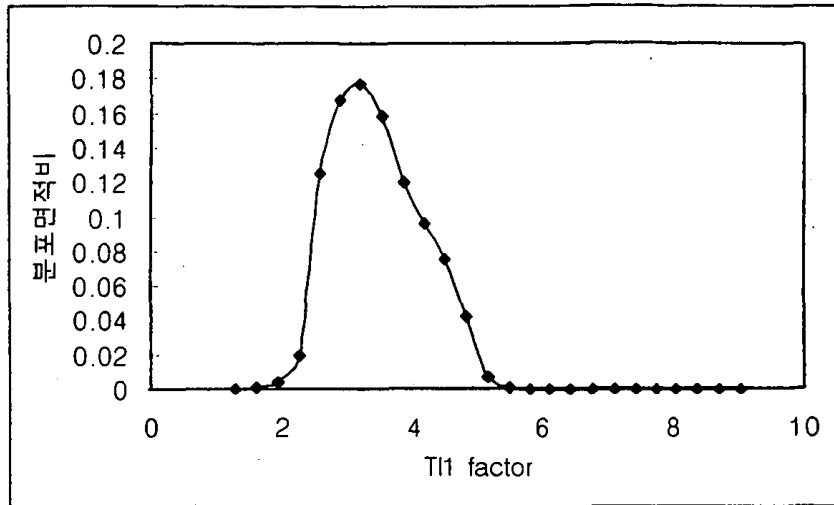


그림 4-37. TI1 분포지수의 분포면적비

그림 4-37에서 보는 바와 같이 TI1 분포지수 3에서 3.5 사이 값의 분포 면적이 가장 많은 것으로 나타났다.

## 2) TI2 분포지수

그림 4-38은 TI2 분포지수의 공간적 분포를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 연풍 시험구역의 TI2 분포지수는 최소 1.45에서 최대 6.74의 범위를 보였으며, 평균값은 3.35이었다.

그림 4-39는 TI2 분포지수의 분포를 각 지수급별 총 유역면적에 대한 해당 지수급의 분포면적비로 나타낸 결과이다.

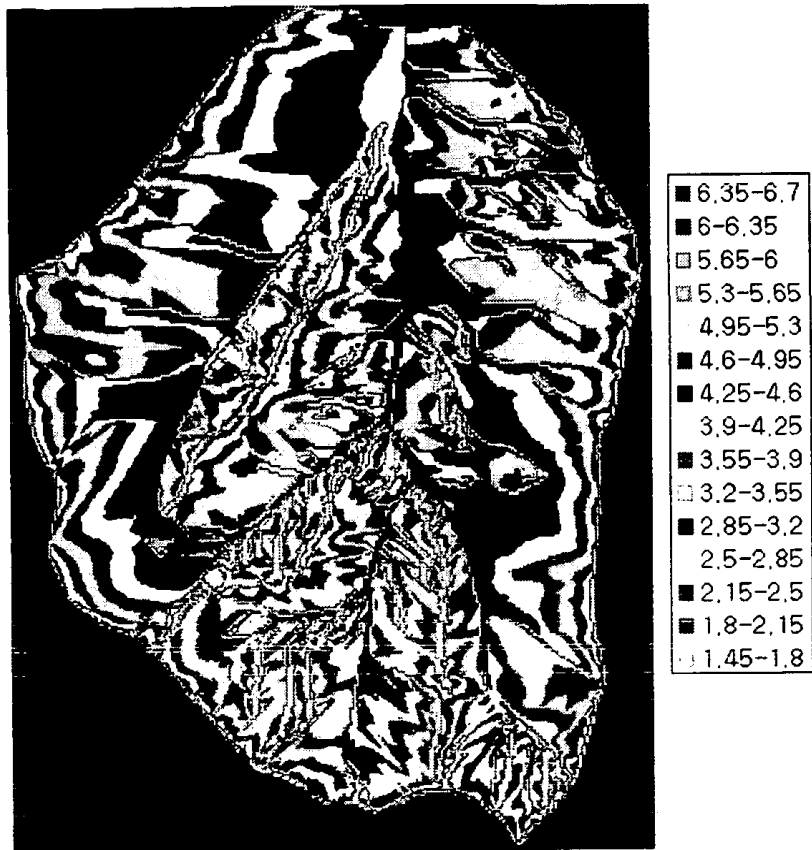


그림 4-38. T12 분포지수의 공간적 분포

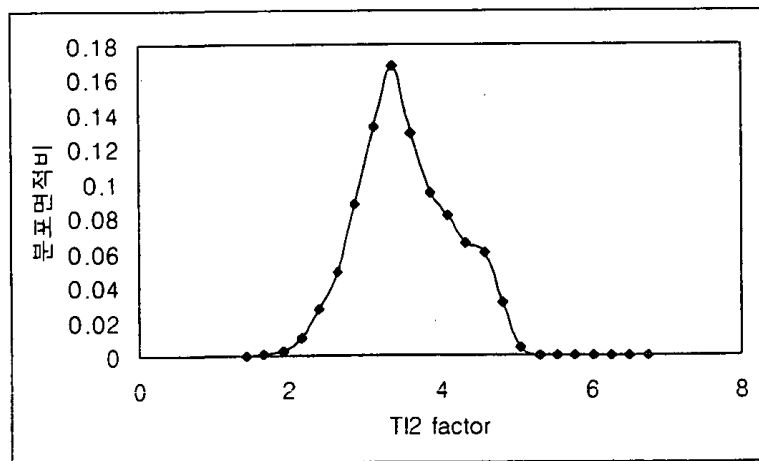


그림 4-39. T12 분포지수의 면적분포비

그림 4-39에서 보는 바와 같이, T11 분포지수와 마찬가지로 T12 분포지수 3에서 3.5 사이 값의 분포면적이 가장 많은 것으로 나타났다.

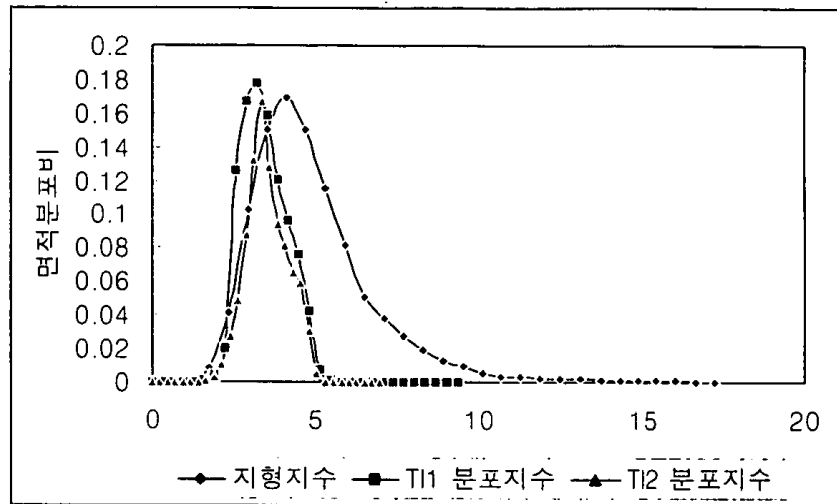


그림 4-40. 지형지수 및 T11, T12 분포지수의 면적분포비 비교

그림 4-40은 연풍 시험구역의 지형지수 및 T11, T12 분포지수의 면적분포비를 비교한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, T11 분포지수와 T12 분포지수 면적분포비의 폭은 지형지수의 면적분포비의 폭보다 작은 것으로 나타났으며, 가장 많은 면적분포를 가지고 있는 지수의 값이 더 작은 것으로 나타났다.

#### 나. 용질농도와 지형지수와의 관계

##### 1) 용질농도 조사구의 특성

표 4-12는 연풍 시험구역의 4개 용질농도 조사구의 지형지수(TI), T11

분포지수 및 TI2 분포지수를 나타내고 있다. 표에서 보는 바와 같이, 4개 용질농도 조사구에 대해, 각 조사구별로 지형지수(TI)의 값이 가장 높았으며, 조사구 3과 4를 제외하고 TI2 분포지수의 값이 가장 낮은 것으로 나타났다. 4개의 용질농도 조사구에 대해 지형지수(TI)는 9.820~15.808의 범위를 보였으며, 평균값은 12.965이었다. TI1 분포지수는 3.966~5.213의 범위에 있었으며, 평균값은 4.695이었다. TI2 분포지수는 4.084~5.054의 범위에 있었으며, 평균값은 4.633이었다.

또한, 각 조사구별 3개 지수의 평균값은 조사구 1(S1)은 8.692, 조사구 2(S2)는 6.475, 조사구 3(S3)은 6.950, 조사구 4(S4)는 7.607이었으며, 조사구 1의 3개 지수의 평균값이 가장 큰 것으로 나타났다.

표 4-12. 용질농도 조사구의 지형지수(TI), TI1 분포지수 및 TI2 분포지수

지수	조사구				평균
	S1	S2	S3	S4	
지형지수	15.808	9.820	12.800	13.430	12.965
TI1 분포지수	5.213	5.099	3.966	4.502	4.695
TI2 분포지수	5.054	4.505	4.084	4.890	4.633
평균	8.692	6.475	6.950	7.607	-

## 2) 용질농도와 5 day API

표 4-13은 연풍 시험구역의 4개 용질농도 조사구에서 용질을 채취한 시기 및 용질의 농도를 나타내고 있다.

표 4-13. 용질농도 조사구에서의 농도( $\mu\text{mol/L}$ ) 및 채취시기

조사구 시기	S1	S2	S3	S4	평균
05월 29일	15.1622	13.0072	10.0813	11.2910	12.3854
06월 15일	29.3566	25.3951	21.2275	26.1466	25.5314
06월 22일	26.5176	21.6787	17.1138	21.5435	21.7134
06월 29일	40.3250	34.0666	30.2438	34.5600	34.7988
07월 04일	17.7430	14.6541	10.0355	14.9100	14.3356
07월 11일	31.2922	27.2532	24.1138	29.3560	28.0038
07월 19일	22.5820	19.2012	16.0488	19.6780	19.3775
08월 02일	27.7436	23.5369	18.1788	22.5543	23.0034
08월 08일	27.4210	23.5369	19.5500	25.8080	24.0790
평균	26.4604	22.4811	18.5103	22.8719	-

표 4-13에서 보는 바와 같이, 용질농도는  $10.0355 \sim 40.3250 \mu\text{mol/L}$ 의 범위에 있었으며, 조사구 3에서 7월 4일에 채취한 용질의 농도가 가장 낮았으며, 조사구 1에서 6월 29일에 채취한 용질의 농도가 가장 높은 것으로 나타났다.

조사구 1(S1)에서의 용질농도는  $15.1622 \sim 40.3250 \mu\text{mol/L}$ 의 범위를 보였으며, 평균농도는  $26.4604 \mu\text{mol/L}$ 이었다. 조사구 2(S2)에서의 용질농도는  $13.0072 \sim 34.0666 \mu\text{mol/L}$ 의 범위에 있었으며, 평균농도는  $22.4811 \mu\text{mol/L}$ 이

었다. 조사구 3(S3)에서의 용질농도는 10.0355~30.2438  $\mu\text{mol/L}$ 의 범위에 있었으며, 평균농도는 18.5103  $\mu\text{mol/L}$ 이었다. 조사구 4(S4)에서의 용질농도는 11.2910~34.5600  $\mu\text{mol/L}$ 의 범위에 있었으며, 평균농도는 22.8719  $\mu\text{mol/L}$ 이었다. 조사구 1에서의 평균농도가 가장 높았으며 조사구 3에서의 평균농도가 가장 낮은 것으로 나타났다.

또한, 용질의 채취 시기별 농도는 5월 29일의 경우 10.0813~15.1622  $\mu\text{mol/L}$ 의 범위를 보였으며, 평균농도는 12.3854  $\mu\text{mol/L}$ 이었다. 6월 15일에는 21.2275~29.3566  $\mu\text{mol/L}$ , 평균농도는 25.5314  $\mu\text{mol/L}$ , 6월 22일에는 17.1138~26.5176  $\mu\text{mol/L}$ , 평균농도는 21.7134  $\mu\text{mol/L}$ , 6월 29일에는 30.2438~40.3250  $\mu\text{mol/L}$ , 평균농도는 34.7988  $\mu\text{mol/L}$ , 7월 4일에는 10.0355~17.7430  $\mu\text{mol/L}$ , 평균농도는 14.3356  $\mu\text{mol/L}$ , 7월 11일에는 24.1138~31.2922  $\mu\text{mol/L}$ , 평균농도는 28.0038  $\mu\text{mol/L}$ , 7월 19일에는 16.0488~22.5820  $\mu\text{mol/L}$ , 평균농도는 19.3775  $\mu\text{mol/L}$ , 8월 2일에는 18.1788~27.7436  $\mu\text{mol/L}$ , 평균농도는 23.0034  $\mu\text{mol/L}$ , 8월 8일에는 19.5500~27.4210  $\mu\text{mol/L}$ , 평균농도는 24.0790  $\mu\text{mol/L}$ 이었다.

표 4-14. 5 day API와 조사구 1에서의 용질( $\text{NO}_3^-$ ) 농도

	5 day API (mm/hr)	Nitrate ( $\mu\text{mol/L}$ )
5월 29일	0.12	15.1622
6월 15일	2.19	29.3566
6월 22일	1.56	26.5176
6월 29일	1.92	40.3250
7월 04일	1.91	17.7430
7월 11일	3.33	31.2922
7월 19일	0.76	22.5820
8월 02일	3.61	27.7436
8월 08일	3.46	27.4210
평균	2.10	26.4604

표 4-14는 5 day API와 연풍 시험구역의 출구지점에 설치되어 있는 조사구 1(S1)에서 채취된 용질( $\text{NO}_3^-$ )의 농도와와의 관계를 나타내고 있다. 표에서 보는 바와 같이, 조사구 1에서 채취된 용질의 농도는  $15.1622 \sim 40.3250 \mu\text{mol/L}$ 의 범위에 있었으며, 평균농도는  $26.4604 \mu\text{mol/L}$ 이었다. 5 day API는  $0.12 \sim 3.61 \text{mm/hr}$ 의 범위에 있었으며, 평균값은  $2.10 \text{mm/hr}$ 이었다.

그림 4-41은 5 day API와 조사구 1(S1)에서의 용질 농도와의 상관관계를 일차회귀식으로 나타낸 그림이다.

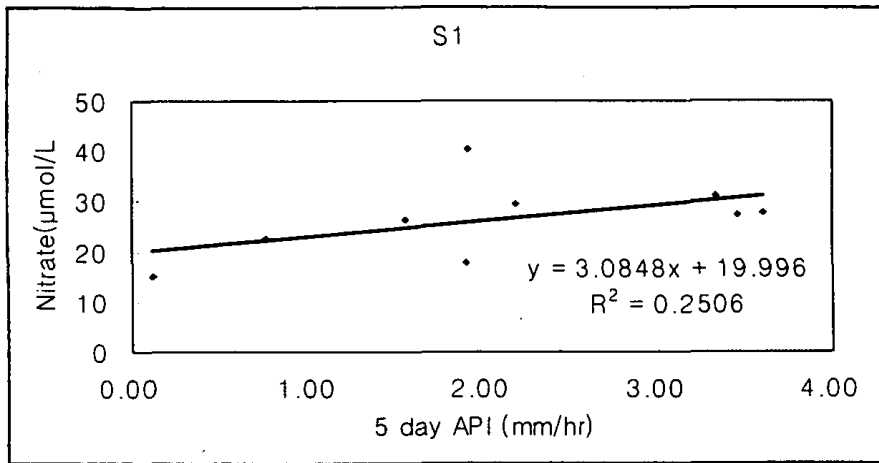


그림 4-41. 5 day API와 조사구 1의 용질 농도와의 관계

그림 4-41에서 보는 바와 같이, 5 day API와 연풍 시험구역의 출구 지점에 설치된 조사구 1에서의 용질 농도와의 상관계수는 0.2506로, 다소 작은 값을 나타내었으며, 회귀식은 다음과 같이 표시된다.

$$y = 3.0848x + 19.996 \quad (\text{식 4-15})$$

여기서,  $x$ 는 5 day API( $\text{mm/hr}$ ),  $y$ 는 용질 농도( $\mu\text{mol/L}$ )이다.

### 3) 용질농도와 지형지수(TI, TI1, TI2)의 관계

각 용질 농도( $\text{NO}_3^-$ )와 지형 지수(TI, TI1, TI2) 사이의 선형관계의 크기(강도)를 결정하기 위하여 강우 사상별 선형 회귀선(linear regression line)의 경사(slope)를 계산한 결과와 강우 사상별 5 day API(mm/hr)는 표 4-15에 제시되어 있다.

표 4-15에서 보는 바와 같이, 용질농도-지형지수(TI) 선형회귀선의 경사  $b_{TI}$ 는 0.3189~1.0240의 범위에 있었으며, 평균값은 0.6670, 표준편차는 0.1925, 변이계수는 28.8548이었다. 용질농도-TI1 분포지수 선형회귀선의 경사  $b_{TI1}$ 은 3.5797~6.2734의 범위에 있었으며, 평균값은 4.8794, 표준편차는 0.9707, 변이계수는 19.8932이었다. 용질농도-TI2 분포지수 선형회귀선의 경사  $b_{TI2}$ 는 3.6955~8.6618의 범위에 있었으며, 평균은 7.0506, 표준편차는 1.4948, 변이계수는 21.2015이었다. 변이계수는 자료의 범위 폭을 나타내는 것으로서, 그 값이 크면 클수록 자료의 범위가 넓다는 것을 의미한다. 표에서  $b_{TI}$ ,  $b_{TI1}$ ,  $b_{TI2}$ 의 변이계수를 비교하면  $b_{TI1}$ 의 변이계수가 가장 작으며, 자료의 범위가 가장 작은 것으로 나타났다.



표 4-15. 용질농도-지형지수 선형회귀선의 경사와 5 day API

강우사상 \ b	$b_{T1}$	$b_{T11}$	$b_{T12}$	5 day API (mm/hr)
YPRO0529	0.3189	3.5797	3.6955	0.12
YPRO0615	0.6752	4.9441	7.3950	2.19
YPRO0622	0.7931	5.8592	8.0363	1.56
YPRO0629	1.0240	5.9321	8.6618	1.92
YPRO0704	0.5304	4.9165	6.9555	1.91
YPRO0711	0.7125	3.9741	7.0647	3.33
YPRO0719	0.5684	3.9564	5.8399	0.76
YPRO0802	0.6799	6.2734	7.9511	3.61
YPRO0808	0.7003	4.4791	7.8554	3.46
평균	0.6670	4.8794	7.0506	2.10
표준편차	0.1925	0.9707	1.4948	1.21
변이계수	28.8548	19.8932	21.2015	57.77

한편, 표 4-15에서 보는 바와 같이, 5 day API는 0.12~3.61mm/hr의 범위  
위에 있었으며, 평균값은 2.10mm/hr, 표준편차는 1.21이고, 변이계수는  
57.77이었다.

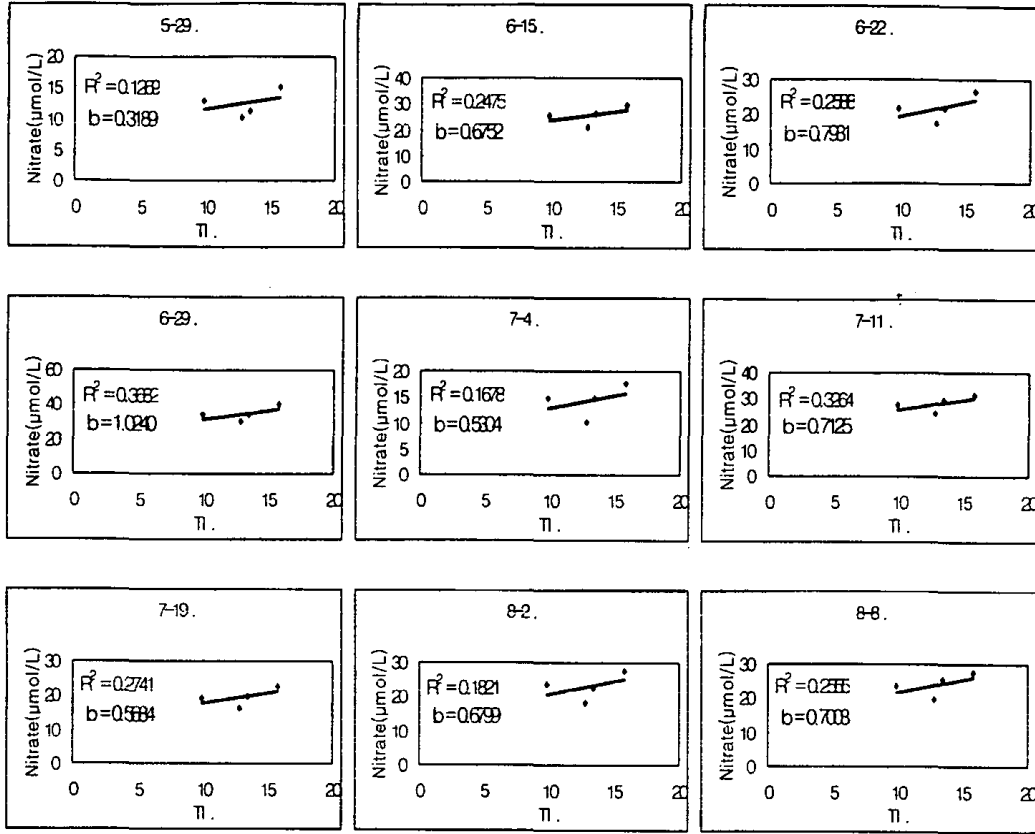


그림 4-42. 용질( $\text{NO}_3^-$ ) 농도-지형지수(TI) 관계

그림 4-42는 연풍 시험유역에서 총 9회의 강우 사상에 대해 각 조사구에서 채취한 용질( $\text{NO}_3^-$ ) 농도와 지형지수(TI) 사이의 관계를 각각의 강우사상별로 나타내고 있다.

그림에서 보는 바와 같이, 총 9회의 강우 사상에 대하여 용질농도-지형지수 관계의 선형회귀선의 경사를 나타내는  $b(b_{TI})$ 값은 평균 0.6670의 값을 나타내었다. 또한, 각 강우 사상에 대하여 용질 농도와 TI 사이의 회귀분석을 실시한 결과, 상관계수  $R^2$  값은 0.1269~0.3682의 범위를 보여 다소 낮은 값을 나타내었으며, 매우 낮은 상관관계를 나타내고 있는 것으로 판단되

며, 평균값은 0.2453이었다.

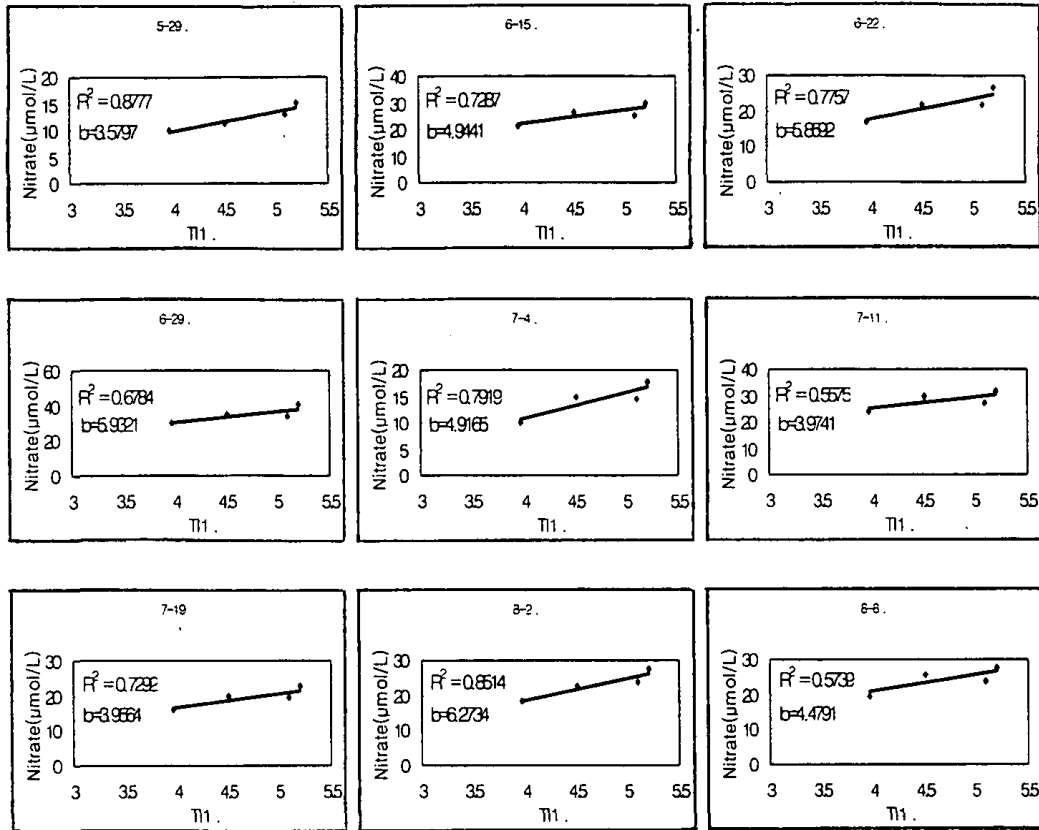


그림 4-43. 용질( $\text{NO}_3^-$ ) 농도-지형지수(TI1) 관계

그림 4-43은 연풍 시험유역에서의 총 9회의 강우 사상에 대하여 각 조사구에서 채취한 용질( $\text{NO}_3^-$ ) 농도와 TI1 분포지수 사이의 관계를 나타내고 있는 것이다.

그림 4-43에서 보는 바와 같이, 총 9회의 강우 사상에 대하여 용질농도-TI1 분포지수 관계의 선형회귀선의 경사를 나타내는  $b(b_{\text{TI1}})$ 값은 평균 4.8794의 값을 나타내었다. 또한, 각 강우 사상에 대하여 용질 농도와 TI1 분포지수 사이의 회귀분석을 실시한 결과, 상관계수  $R^2$  값은 0.5575~

0.8777의 범위를 보여 다소 높은 값을 갖는 것으로 나타나 비교적 높은 상관관계가 있는 것으로 판단되며, 평균값은 0.7294이었다.

그림 4-44는 연풍 시험구역의 총 9회의 강우사상에 대하여 각 조사구에서 채취한 용질( $\text{NO}_3^-$ ) 농도와 TI2 분포지수 사이의 관계를 나타내고 있는 것이다.

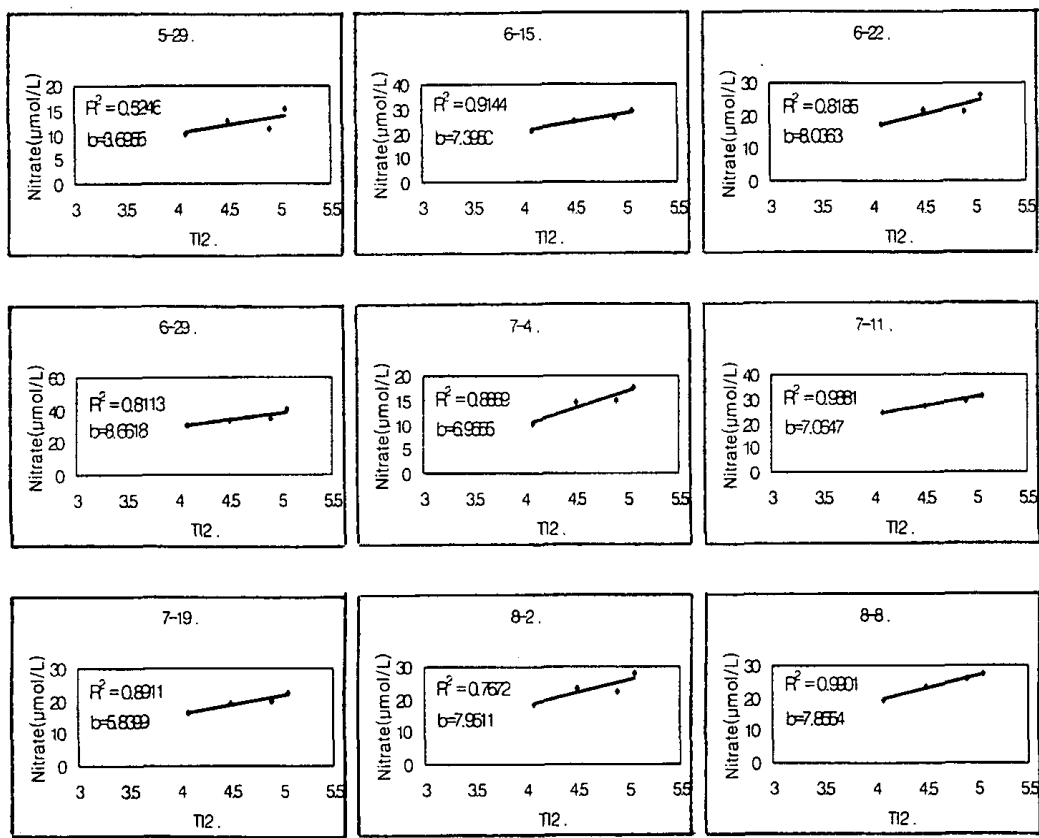


그림 4-44. 용질( $\text{NO}_3^-$ ) 농도-지형지수(TI2) 관계

그림 4-44에서 보는 바와 같이, 총 9회의 강우 사상에 대하여 용질농도-TI2 분포지수 관계의 선형회귀선의 경사를 나타내는  $b(b_{\text{TI2}})$ 값은 평균 7.0506의 값을 나타내어  $b_{\text{TI}}$  값과  $b_{\text{TI1}}$  값보다 큰 값을 보였다. 또한, 각 강

우 사상에 대하여 용질 농도와 TI2 분포지수 사이의 회귀분석을 실시한 결과, 상관계수  $R^2$  값은 0.5246~0.9901의 범위를 보였으며, 평균값은 0.8438로, 높은 상관관계를 가지는 것으로 판단된다.

그림 4-45에서 4-47은 연풍 시험구역에서 총 9회의 강우 사상에 대하여 채취한 용질의 농도와 지형지수 관계의 선형회귀선의 기울기와 5 day API의 관계를 나타내고 있다. 그림 4-45에서 그림 47에서 보는 바와 같이 지형지수 및 TI1 분포지수, TI2 분포지수 각각에 대하여 용질농도와의 관계의 기울기와 5 day API에 대해 회귀분석을 실시한 결과,  $R^2$  값은 0.28~0.7779의 범위를 보였으며, 용질농도-TI2 분포지수 사이의 관계의 선형회귀선의 경우에서  $R^2$ 값이 가장 높았으며, 상관관계가 비교적 큰 것으로 나타났다. 세 가지 경우 모두 5 day API가 증가함에 따라 용질농도-지형지수 관계의 선형회귀선의 기울기(slope)가 로그함수적으로 증가하는 것으로 나타났다.

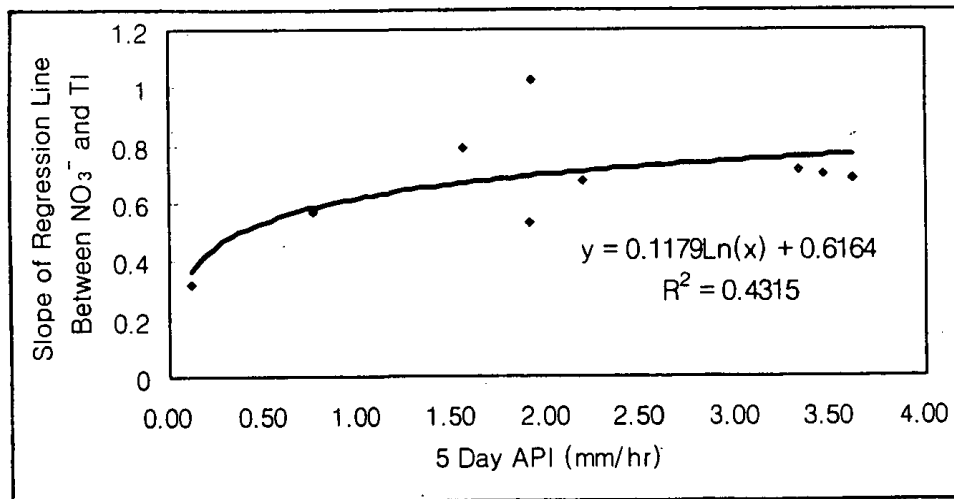


그림 4-45. 5 day API와 용질(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) 농도-지형지수 선형회귀선의 기울기( $b_{TI}$ )의 관계

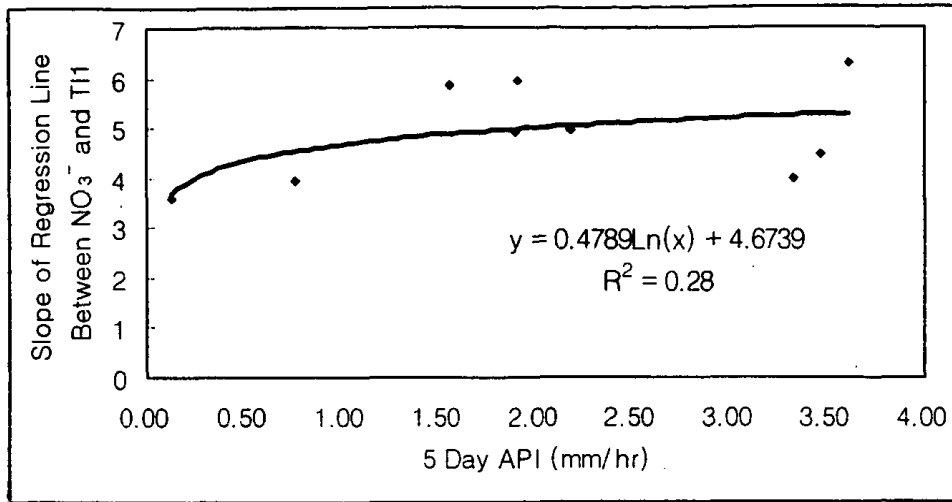


그림 4-46. 5 day API와 용질( $\text{NO}_3^-$ ) 농도-TI1 분포지수 선형회귀선의 기울기( $b_{\text{TI1}}$ )의 관계

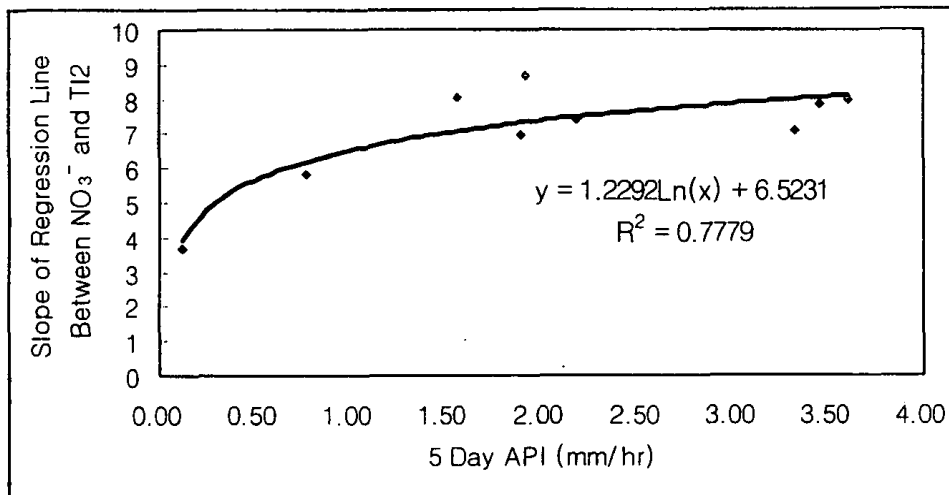


그림 4-47. 5 day API와 용질( $\text{NO}_3^-$ ) 농도-TI2 분포지수 선형회귀선의 기울기( $b_{\text{TI2}}$ )의 관계

#### 4) 모형의 적용을 통한 용질 농도의 공간적 분포 산정

식 4-15와 5 day API의 값을 이용하여 유역 출구 지점에 설치된 조사구 1(S1)의 용질 농도 값을 추정하고, 이 값과 지형지수, 그리고 용질농도-지형지수 관계의 선형회귀선의 경사의 추정된 b값을 이용하여 지형지수와 용질농도의 관계를 나타내는 일차식을 도출하였다. 이 과정에서 지형지수는 TI, TI1 분포지수, TI2 분포지수를 사용하였으며, 용질농도-지형지수 관계의 선형회귀선의 경사 값은 5 day API와의 관계(그림 4-45, 4-46, 4-47)에서 추정한 값을 이용하였다. 각 경사값은 조사구 1(S1)에서 채취된 용질의 농도가 가장 큰 값을 나타내었던 7월 11일( $31.2922 \mu\text{mol/L}$ )의 자료를 이용하였다.

식 4-15를 이용한 조사구 1(S1)에서의 7월 11일의 용질 농도 값은  $30.2693 \mu\text{mol/L}$ 이고, 5 day API와 용질 농도-지형지수 관계의 선형회귀선의 경사와의 관계에서 추정한 b값은 지형지수(TI), TI1 분포지수, TI2 분포지수에 대해 각각 0.7582, 5.2500, 8.0019이었다.

용질 농도와 지형지수의 관계를 일차식으로 나타낼 수 있으므로(그림 4-42, 4-43, 4-44), 이를 바탕으로 하고 추정된 용질 농도 값과 b값을 이용하여 다음과 같이 각 지형지수와 용질농도의 관계를 나타내는 일차식을 나타낼 수 있다.

$$y = 18.2830 + 0.7582 TI \quad (\text{식 4-16})$$

$$y = 2.9008 + 5.2500 TI1 \quad (\text{식 4-17})$$

$$y = -10.1723 + 8.0019 TI2 \quad (\text{식 4-18})$$

여기서,  $y$ 는 용질 농도( $\mu\text{mol/L}$ ),  $T_1$ ,  $T_{11}$ ,  $T_{12}$ 는 각각 지형지수,  $T_{11}$  분포지수,  $T_{12}$  분포지수의 값이다.

식 4-16부터 식 4-18에서  $y$ 절편의 값과 기울기는 식 4-15에 의해 추정된 용질 농도 값과 추정된  $b$ 값( $b_{T_1}$ ,  $b_{T_{11}}$ ,  $b_{T_{12}}$ )에 따라 다양한 값을 가질 수 있으며, 그에 따라 여러 가지 형태의 식이 도출될 수 있으나, 공간적 분포를 산정하는 데 있어서는 차이가 없다. 이 연구에서는 조사구 1(S1)에서 채취된 용질 농도 값 중 가장 큰 용질 농도 값을 보였던 7월 11일의 경우에 대해서 계산하였다.

식 4-18을 이용한 용질 농도의 공간적 분포는 용질 농도 값이 음(-)의 값을 나타내는 경우가 있었으며, 따라서 이 연구에서는  $T_{12}$  분포지수를 제외한 지형지수와  $T_{11}$  분포지수의 두 가지 지형지수에 대해서만 용질 농도의 공간적 분포를 산정하였다.

그림 4-48은 식 4-17과 그림 4-36의  $T_{11}$  분포지수의 공간적 분포를 결합하여 연풍 시험구역에서의 용질( $\text{NO}_3^-$ )농도의 공간적 분포를 나타낸 것이다.

그림 4-48에서 보는 바와 같이, 연풍 시험구역의 용질( $\text{NO}_3^-$ )의 농도는  $T_{11}$  분포지수의 공간적 분포 경향에 따라 구역내의 공간적 분포를 보이고 있다. 또한, 모의된 용질 농도 값은 조사구에서 관측된 용질 농도 값과 거의 비슷하게 나타나 모형의 적용성이 비교적 우수한 것으로 나타났다.



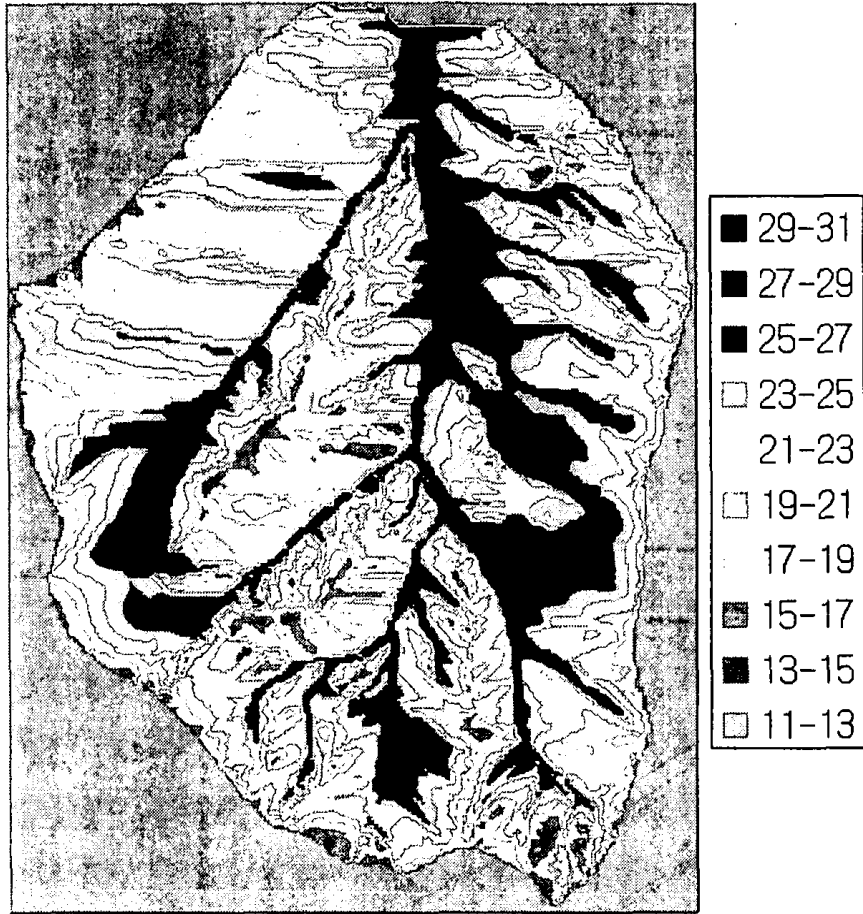


그림 4-48. 연풍 시험구역의 용질( $\text{NO}_3^-$ ) 농도의 공간적 분포(TI 이용)

## 제5절 종합결론 및 제언

산림유역의 수질형성과정을 해석하고 이를 바탕으로 주요 수질결정 물질의 산림유역내 공간적 분포 및 이동특성을 구명하고자 우리나라 중부 산림지대에 위치한 월악산 시험유역과 연풍 시험유역을 대상으로 수질형성과정에 대한 조사·분석을 실시하였다.

이를 위하여 강수 및 계류수의 시료를 측정하였으며, 계류수의 경우는 각 시험유역 마다 유역 출구 및 유역내 1개소 등 총 2개소씩 측정지점을 선정하여 수질시료 채수를 실시하였으며, 월악산 시험유역의 경우는 시험유역내 조사와 아울러 인근 인위적 교란이 많이 발생한 지역의 수질조사를 병행하여 자연 산림지와 인위적 환경교란지역간의 수질변화를 분석하였다.

수질조사 항목은 총 11개 항목으로 이 중 전기전도도, 용존산소, pH, 탁도의 4개 항목은 수질자동측정장치를 이용하여 현장에서 곧바로 측정하였으며, 아질산성 질소 및 질산성 질소, 암모니아성 질소의 3개 항목과 인산, 양이온( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ )과 음이온( $Cl^-$ )은 이온크로마토그래피법(Ion Chromatography)으로 실험실에서 측정하였다.

또한, 산지의 강우 유출 현상을 파악하기 위하여는 3차원의 공간적 개념을 이용한 TOPMODEL을 바탕으로 산지의 강우 유출 현상을 모델링 하였으며, 유역내 용질농도와 지형지수와의 관계를 이용하여 부영양화의 주원인중의 하나인 질소화합물을 대상으로 산림유역내에서의 공간적 분포 및 순환 특성을 해석할 수 있는 수질모형을 제작하였다.

자연 상태의 월악시험 유역과 인근 인위적 교란이 많은 지역의 수질을 비교하였다. 자연상태에 비하여 많은 물질 이온이 배출되는 것으로 조사되었으며, 하절기에 갈수록 더욱 심한 차이를 볼 수 있었다. 월악 시험유역의

pH는  $6.94 \pm 0.05$ 이며, 교란 지역의 pH는  $7.17 \pm 0.02$ 로 시험구역의 평균 pH가 낮게 나타났으며 표준편차는 컸다.

24회의 강우, 유출수 대비한 결과 지중을 통하여 유출수로 전환하는 동안 강우의 산도는 시험구역이 석회암 지대이기 때문에 중성화가 되고, 유출수중에 많은 양료가 침출되어 EC가 높아지는 것을 알 수 있었다. 질소중에서  $\text{NO}_2\text{-N}$  및  $\text{NH}_4\text{-N}$ 은 감소되고,  $\text{NO}_2\text{-N}$ 은 증가하였다. 인산, 칼리, 칼슘 등은 감소하는 경향이 있었으나, 염소 이온의 증가는 두드러졌다. 이온의 연간 유출량은 유출의 농도에 연유출량을 곱하여 계산하였다. 유역에 들어오는 이온보다도 유출수에 의해 많이 나가는 이온은 Cl이었다.

TOPMODEL을 이용한 산림구역의 강우-유출 모의결과, 월악산 시험구역과 연풍 시험구역에서 모두 우수한 모의결과를 보였으며, 따라서, TOPMODEL의 기본 가정인 지형지수의 공간적 분포를 이용한 수문 반응의 시뮬레이션이 가능하였다.

산림구역에서의 수질형성 물질의 공간적 분포와 거동을 해석하기 위한 산림구역의 수질해석모형은 TOPMODEL의 지형지수를 바탕으로 용질농도와 지형지수 및 T11 분포지수와 T12 분포지수의 유역내 공간적인 용질농도와의 관계를 도출하였다. 3가지 지수값에 대한 공간적 용질농도의 관계분석 결과, 본 연구의 주요 대상인 질산염의 유역내 공간적 분포는 T11 분포지수의 공간적 분포와 유의한 것으로 분석되었다. 이에 따라 TOPMODEL 및 T11 분포지수를 이용한 유역내 용질농도의 공간적 분포와 거동을 해석할 수 있는 수질해석 모형을 제작하였다.

본 연구에서 개발된 수질해석모형은 비교적 자료의 취득이 용이한 지형정보를 바탕으로 지형지수 및 T11 분포지수를 유역내 용질농도와 공간분포 해석에 이용함으로써, 상대적으로 자료 수집에 어려움이 많은 산림구역에서의 물질분포 및 거동을 손쉽게 해석할 수 있는 방법으로서 활용가능하다.

# 제 5 장 산지개발에 따른 산원수 환경영향 평가기법 및 산원수자원의 종합적 관리시스템 개발

## 제 1 절 서 설

### 1. 연구의 배경 및 목적

최근 급증하고 있는 상류 산지유역에 대한 인위적인 개발과 이에 따른 산림의 파괴는 과거로부터 안전하고 깨끗한 물로서 인식되어 오던 산원수(山源水)에 대한 심각한 수질오염문제를 야기시킴으로 인해, 하류지역의 인간생활 및 자연생태계에 미치는 악영향이 매우 클 것으로 예상되고 있다. 그러나 현재까지 1차적 상수원 지역인 산지유역에 대한 개발은 개발로 인한 자연훼손 및 수질오염에 대해 고려하지 않고 이용목적 및 개발편의에만 국한하여 진행되어 왔기 때문에, 향후 심각한 산원수 오염의 원인이 될 수 있으며, 이러한 상류 1차유역에서부터의 수질오염은 하류로 갈수록 그 파급효과가 매우 심각할 것으로 우려된다.

현재까지 주요 상수원 지역인 산지유역에 있어서는 산림지가 청정수역이라는 기본적인 인식하에 별다른 수질관리대책의 수립이 없이 인간의 간섭 및 개발행위를 최소화하는 소극적인 방법이 주도되어 왔다. 그러나, 국민활동영역의 확대 및 휴양공간의 창출 등에 따라 증대되는 산원수 오염의 위험성을 저감하기 위한 새로운 방법의 도입 및 적극적인 대책의 수립이 시급히

요구된다.

또한, 급증하는 산지유역의 개발욕구에 대처하여 수질오염의 위험성에 직면하고 있는 산원수의 수질을 보전하고 산지유역의 쾌적한 물환경을 유지·관리하기 위해서는 산지유역의 장기적인 수문환경변화에 대한 예측기술의 개발 및 종합적 수자원관리시스템의 구축이 필수적인 과제이며, 이를 위한 연구가 반드시 수행되어야 할 것이다.

따라서, 이 연구는 국민활동영역의 확대 및 휴양공간의 창출 등 점증하는 산지유역의 개발욕구에 대처하여 산지유역에 대한 개발이 산원수 환경에 미치는 영향에 대한 체계적인 평가 및 평가기법의 고도화 및 산원수자원(山源水資源)의 종합적 관리시스템(Integrated Management System of Forest Water Resource) 개발을 목표로 한다.

## 2. 연구의 내용 및 범위

본 연구과제의 연구개발목표와 내용은 다음과 같다.

### ● 연구개발목표

• 산지개발이 산원수환경에 미치는 영향평가 및 환경변화 예측기법의 개발 및 산원수자원의 종합적 관리시스템 개발

### ● 연구내용

- 산지개발이 산원수환경에 미치는 영향요인 평가
- 산지개발에 따른 산지유역 물환경변화 예측모델 개발
- 산원수자원관리를 위한 GIS 기술 활용
- 효과적인 산원수자원 관리를 위한 종합적 관리시스템 개발

## 제 2 절 연구동향

### 1. 지리정보체계의 기술개발 및 응용현황

사람은 살아가면서 많은 정보를 필요로 하며 이러한 정보들로서는 경제, 기후, 문화, 공간정보 등 다양한 종류들을 포함하고 있다. 이 가운데 공간정보란 인간의 삶을 영위하기 위한 지표공간에 관련된 정보를 말하며, 이는 지형분석과 지하자원의 개발, 환경영향평가, 適地선정, 재해분석 및 관리, 교통망 계획, 도시 및 지역계획 등 지표상에 존재하는 사상에 대한 정보와 사상간에 관련된 정보로 나누어 생각해 볼 수 있다.

공간정보는 예로부터 중요하게 다루어져 왔으며, 이의 활용분야도 급격히 넓어지고 있는 추세를 보이고 있음에 따라 인류는 오래 전부터 공간자료의 획득과 분석·저장방법을 개발해 왔다.

이 가운데 자료의 획득은 주로 측량과 측지를 통하여 이루어져 왔으며, 최근에 들어와서는 과학기술의 발달에 힘입어 항공사진, GPS(Global Positioning System) 그리고 인공위성사진 등이 많이 이용되고 있다.

최근에 들어와 전산기의 발전과 이용가능한 지리정보의 축적으로 인해 자료의 분석과 저장을 위한 지리정보시스템이 많이 활용되게 되었다(유근배, 1993).

미국에서는 '50년대에 워싱턴 대학으로부터 시작하여, '60년대 들어와서는 도시정보시스템이 출현하였으며, Census Bureau에서 Geocoding System을 도입하여 주소로부터 위치를 추적할 수 있게되므로써 지자체에 대한 GIS도입의 계기가 되었다. 이후 '70년대에 들어와 지도화를 위한 정보처리방법이 도입(SYMAP 등)되어 수평방향의 개발이 활성화되었다. '80년대에 들어와서

는 ESRI, Intergraph, Synercom, Computervision사 등의 GIS 전문회사가 등장함으로써 80%이상의 정책결정시 GIS자료가 활용되었고, USGS와 Census Bureau의 GIS자료 공급이 활성화되었다. 이에 따라 DLG(Digital Line Graph)를 통해서 1:24,000 - 1:2,000,000 도면을 사용하여 도로망, 철도, 전기·전화선 및 각종 수송망 등이 정리되었고, 1:100,000 지형도에 근거하여 도로·철도 등 미국에서 가장 자세한 망의 자료를 포함하고있는 TIGER(Topologically Integrated Geographical Encoding and Referencing) System은 5-25 m의 오차율을 보이는 정확도를 유지하고 있다.

캐나다에서는 Tomlinson이 1960년 지도관리를 위하여 제안한 세계최초의 GIS로서 CGIS(Canadian Geographic Information System)를 가지고 있다. 이는 농지의 재생회복을 위한 자료의 해석용으로 사용되었으며, 1971년부터 본격 가동하여 현재에도 사용 중에 있다. 이는 TIGER 다음으로 전세계적으로 그 공용성을 인정받고 있다.

일본에서는 1974년부터 국토수치정보 작성을 위하여 1:25,000이나 1:200,000의 지형도에서 수집된 자료를 중심으로 Mesh체계로 정보체계를 구성하였다. 그러나, 1 km<sup>2</sup>의 Mesh로는 불충분하여 1975년부터는 UIS(Urban Information System)를 개발하였고 1980년대에 들어서면서는 건설성 국토지리원내 지도정보실 및 사진측량 기술개발실 등을 신설하여 일본산 GIS의 도입을 추진하였다. 1985년부터는 UISII 계획을 실시 중이다.

## 2. 산림수문 및 분포형 모형

### 가. 산림수문특성

산림수문학은 1940년대 Horton의 접근 방식에 영향을 받은 Charles

Hursh(Coweeta 산림수문연구소 창설)에 의해 크게 발전하였다. Hursh는 초기에 주로 산지 이용이 유출에 미치는 영향이나 토양 속의 투수 현상, 침식 방지 등을 연구하였다. Hursh는 미국 동북부의 Appalachians산맥에 위치한 산림수문 시험유역 내에서는 Horton이 이론적으로 주장했던 침투 초과 지표 유출(浸透超過地上流, Infiltration-excess overland flow)이 거의 발생하지 않는다는 결론을 얻었다. 그의 연구결과는 Hewlett에게 큰 영향을 미쳤다(禹保命 等, 1997).

Hibbert(1967)는 비가 오면 지중수가 사면 아래로 이동하여 溪岸地域(Riparian area)이 포화되고 이 지역에서 飽和 地表 越流, Saturated overland flow)가 발생한다는 變動流出域(Variable source area)의 가설을 제시하였다.

Betson과 Marius(1969)도 역시 산지유역에서 계안을 중심으로 한 변동유출역을 확인하였으며, Tischendorf(1969)는 미국 Piedmont의 남동부에 위치한 산지유역에서 폭우시마다 경사지에서의 유출상황을 관찰한 결과, 폭우로 인해 유역출구에서 상당한 정도의 홍수가 유발되었음에도 불구하고 단 한번도 지표 유출이 발견되지 않았던 것으로 보고하였다. Cline도 Pennsylvania 중동부의 산지유역에서 10개의 폭우시 관찰을 통하여 동일한 결과를 보고한 바 있다(Chorley, 1978).

1961년 Hewlett이 변동유출역 이론을 제시한 후 많은 연구자들이 홍수유출 발생기작을 발표하였다. Pearce와 Rowe(1980)는 각 연구자들이 발표한 발생기작을 정리한 결과, 습윤한 상류 산림유역에서는 部分的 地表 流出, 飽和 地表 越流, 地表下 流出의 3가지 중요한 유출발생 기작이 있다고 하였으며 이 모든 과정은 Hewlett의 변동유출역 이론으로 설명할 수 있다고 하였다. 유역 내에서 유출 발생에 기여하는 지역은 계절과 강우에 따라 확대되거나 축소되는데 이러한 반응은 先行土壤含水量(Antecedent soil



moisture), 토양의 물리적 성질, 地下水位의 높이 그리고 강우량에 의해 좌우된다.

토양의 水理傳導度는 침투 초과 지표 유출의 발생에 중요한 영향을 미친다. 地表下 流出은 토양의 투수성이 높은 지역에서 발생하는 경향이 있는 반면 토양의 포화는 중간 정도의 투수성을 나타내는 지역에서 발생할 확률이 높다. 토심이 얇은 경우 토양이 쉽게 포화되며 토양의 침투능은 식생이 빈약한 지역에서 낮은 경향을 보인다. 식생이 빈약한 지역은 쉽게 지표유출이 발생하며 따라서 토양 침식이 자주 발생한다. 한편, 地表下 流出에 의한 홍수유출은 대공극류, 도관류 및 토양기질류로 구성된다(禹保命 等, 1997).

大孔隙流(Macro pore flow)는 틈새가 많은 점토질 토양, 뿌리나 소동물에 의해 만들어진 통로가 많은 토양에서 주로 발생하며 전체 토양체를 바로 통과하므로 지하수위의 빠른 상승과 밀접한 관계가 있다. 대공극류와 마찬가지로 導管流(Pipe flow)는 유출속도에 있어서 지상류와 같거나 경우에 따라서는 초과할 정도로 매우 빠르다. 도관류와 대공극류간의 정확한 경계 구분은 사실상 어려우나 일반적으로 도관류는 대공극보다 지름이 큰 경우를 말한다. 도관은 침식에 의해서 확대되기 때문에 대공극류에 비해 높은 연결성을 나타낸다. 土壤基質流(Soil matrix flow)는 토양의 기질을 통한 유출로서 만약 토양 상층부의 수리전도도가 높다면 지표하 홍수량의 발생에 지대한 영향을 미칠 것이다. 또한 토양이 깊어짐에 따라서 수리전도도가 작아진다는 사실은 투수층의 하부에 포화대가 형성되어 경계면을 따라 地表下 流出水가 발생할 확률을 높여준다(禹保命 等, 1997).

자연사면에서의 雨水移動에 대한 연구에서 太田과 阿部(1985)는 구릉지에서는 사면 토층의 큰 수분부족량으로 인하여 지표유출의 발생역이 매우 적고, 사면토층내에 대량의 우수가 일시적으로 저류되므로서 직접유출량이 적어진다고 하였다.

이 밖에 일본에서는 산림토양이 물 순환에 미치는 영향을 해명하고자 토층내에서의 불포화 수분이동에 관한 다수의 연구결과가 발표되어 왔으며, 이러한 연구를 지역적으로 편재하지 않고 전국적으로 수행하고 있다(太田, 1983; 太田 等, 1983a, b; 太田과 阿部, 1985; 谷誠, 1985).

한편, 산림유역에서의 물수지와 차단량에 대한 연구로 村井(1970)은 일본에서의 산림의 연간 차단량이 강우의 15~20%에 이른다고 하였으며, 산림유역에서의 수수지와 유출량을 고려하여 수관통과우량, 수간유하우량 및 차단량의 경시적 변화를 파악하였다.

Sambasivo Rao(1987)는 Cashaw tree에서 강우중 31%가遮斷되고 그 나머지만이 임내에 도달하였으며 저류능이 0.8mm, 통과계수가 0.391이었다고 보고했다. 또한 樹幹의 구조상 물이 들어가기 어려워 수간유하량은 강우의 0.7%였다고 하였고, 0.5mm 이하의 강우에서 차단율이 최대였다고 하였다.

服部(1985)는 삼나무 임분에서 Rutter의 모형을 일부 수정하여 降雨遮斷을 추정하였다. 에너지收支의 관점에서 분석된 강우차단의 추정증발과 실측된 수관차단손실량이 만족스러운 일치율을 보였다. 樹冠遮斷에는 飽和 未拾量과 풍속이 밀접한 관계가 있어 양 인자가 크게 되면 수관차단손실량도 증가한다고 하였다. 강우중과 강우후의 차단증발강도는 각각 0.25, 0.16mm/hr로 강우의 평균 증발강도는 0.19mm/hr로 추정하였다.

Lloyd 등(1988)은 아마존의 열대우림에서 遮斷에 의한 증발을 Rutter와 Gash의 분석모형으로 추정해 비교하였다. 임분 위에서 자동 관측된 기상자료가 쓰였는데 두 모형 다 측정된 차단량과 크게 다르지 않았고 차단량은 강우량의 약 8.9%였다.

국내에서의 차단손실량에 대한 연구는 주로 수종간의 차이에 대해서 집중되어 왔는데 金景河(1987)는 임관밀도 74%인 리기테다소나무림과 70%인

신갈나무림에서의 강우차단율이 각각 16.2%와 14.1%였으며, 회귀분석에 의한 수관저류능은 침엽수림에서 2.2mm, 활엽수림에서 2.1mm라고 보고하였으며, 柳澤圭와 李天龍(1980)은 6월부터 11월까지 6개월동안 임관밀도 64%인 침엽수림과 81%인 활엽수림 및 83%인 혼효림에서의 차단율은 각각 19%, 26%, 28%였다고 보고하였다. 또한, 禹保命 等(1992)은 30년생인 소나무림과 테다소나무림에서의 수관차단율은 각각 27.0%, 24.3%로 나타났다고 보고하였으며, 金景河(1993)는 임분구조인자와 기상자료를 이용하여 차단손실량을 연속적으로 구하는 전산모형을 개발한 바 있다.

#### 나. 분포형 모형

유역에서의 유출과정을 표현하는 대부분의 수문모형은 유역의 강우-유출 반응을 나타내는 수학적 모형이며, 이론적 모형과 개념적 모형 및 경험적 모형으로 구분된다. 개념적 수문모형은 물의 순환과정중 과정변수의 공간적 변화의 고려여부에 따라 집중형 수문모형과 분포형 수문모형으로 분류된다. 집중형 수문모형은 유역을 동질의 배수역으로 보아 과정 변수의 공간적 변화가 없는 것으로 가정하므로써 사용이 간편하여 홍수 유출해석 등에 널리 이용되고 있으나, 정교함과 정확성이 떨어진다. 반면에 분포형 수문모형은 집중형 수문모형에 비하여 시·공간적인 변화를 효과적으로 고려할 수 있어 비교적 정확한 유출해석을 할 수 있을 것으로 기대된다(조홍제와 조인률, 1998).

따라서, 분포형 수문모형은 식생 및 토양, 지형 등의 유역내 수문특성의 다양한 분포와 수문학적 반응과의 관계를 보다 더 현실적으로 표현 할 수 있기 때문에 山林流域의 수문현상 파악 및 수문량 예측에 효과적으로 사용될 수 있다. 이러한 분포형 수문모형의 대표적인 모형으로는 SHE모형과

SHETRAN모형 등이 있다(Abbott et al., 1986; 高德九, 1989; Lukey et al., 1995; 禹保命 等 1997).

영국 수문연구소 등에 의해 개발된 SHE모형은 각 수문과정을 별도의 성분모형에 의해 모의발생시킬 수 있도록 개발되었으며, 여기에 더하여 각 성분모형에 좀 더 물리적으로 의미를 갖는 이론들을 도입하고, 유역내 수문환경의 다양한 분포를 보다 더 현실적으로 표현할 수 있도록 유역을 세밀히 분할하는 완전 분포형 모형이 되게 하였다.

한편, SHETRAN모형은 SHE모형을 기반으로 개발된 유역내의 물, 토사 및 오염물질의 이동을 파악할 수 있는 분포형 모형으로서, 물리적, 공간 분포형 모형중 가장 진보된 것으로 알려져 있다. SHETRAN모형은 유역의 수문순환, 지표 유출에 의한 토사이동 및 오염물질의 지표와 지중을 통한 이동을 고려한다. 각 과정은 질량 및 에너지 보전에 대한 편미분 방정식의 유한차분법 혹은 독립적인 연구결과를 바탕으로 한 경험식으로 표현되며, 유역특성 및 강우의 유입과 수문학적 반응의 공간적 분포가 세밀하게 재현된다.

그러나, SHE모형 및 SHETRAN모형에는 많은 양의 반복계산을 요하는 수치해석기법들이 채택되고, 다시 이 계산과정이 무수한 분할요소별로, 그리고 세분된 각 시간대에 대해 연속적으로 반복되므로 계산의 양이 방대하다. 또한, 사용되는 변수도 실로 엄청나게 증가하여 초대용량에 초고속의 계산이 가능한 대형전산기나 초대형 전자계산기의 도입이 필연적이다. 따라서, 모형운용에 소요되는 시간과 비용이 막대하다는 문제점이 있었다. 이에 따라, 유역의 복잡한 수문현상을 반영하면서도 손쉽게 경제적으로 운용할 수 있는 모형의 필요성이 대두되었다.

Beven과 Kirkby(1979)에 의해서 제안된 TOPMODEL은 이러한 필요성을 바탕으로 개발된 모형으로서, 실용적이고 현실적용이 쉬운 연속 모의 모형이면서도 이론적인 수문과정을 바탕으로 유역내 지표 및 지표하의 유출발생에

대한 변동유출역의 예측을 포함한 유역의 수문학적 동태를 파악할 수 있는 모형이다(Beven, 1997).

Beven과 Wood(1983)는 분포형 수문모형인 TOPMODEL을 이용하여 하천유출에 대한 지형특성의 영향을 분석하였으며, Beven(1986)은 지형특성, 토양특성, 선행강수 등의 효과를 고려한 유효강우의 홍수빈도해석에 TOPMODEL을 적용하였다. Zhang과 Montgomery(1994)는 수치지도의 정도 및 분할된 격자의 크기에 따른 지형지표인자 및 침투유출량의 변화를 검토하였고, Wolock와 Curtis(1994)는 지도의 축척 및 해상도에 따른 침투유출량의 변화를 분석하였다.

한편, Iorgulescu와 Jordan(1994)은 스위스 산지 소유역에서의 홍수유출 해석에 TOPMODEL의 적용가능성을 검토하였다. 그리고 Franchini 등(1996)은 TOPMODEL의 물리적 해석 및 이론근거와 민감도를 면밀히 분석하였으며, Blazkova와 Beven(1997)은 관측자료가 적은 유역에 대해 추계학적 강우모형과 TOPMODEL을 이용한 홍수빈도해석을 실시하였고, Holko와 Lepisto (1997)는 TOPMODEL을 이용하여 산지유역에 대한 수문학적 유출특성을 모의한 바 있다.

TOPMODEL과 관련된 국내 연구는 지형정보시스템인 GRASS와 Arc/Info를 이용한 소양강 댐의 홍수유출모의(한국수자원공사, 1993), 강우예보의 시공간 특성을 고려한 홍수예보모형의 개발(김현준, 1995, 1996), 지형정보시스템 상에서의 지형지수 산정에 관한 연구(김상현, 1996), 인공배수유역에서의 TOPMODEL적용에 관한 연구(김상현, 1997, 1998), 국제수문개발계획 유역의 강우-유출해석에 관한 연구(조홍제 등, 1997, 조홍제와 조인률, 1998) 등이 있으며, 정용호 등(2000)은 TOPMODEL을 이용하여 산림정비 전·후의 홍수유출해석을 통하여 산림사업의 홍수저감효과를 분석한 바 있다.

### 3. 토사유출모형

물에 의한 토양침식량(soil erosion)은 산지나 평지로부터 발생한 토양의 손실량을 말하며, 토사생산량(sediment yield)은 유수에 의하여 유역의 어떤 한 점을 통과하여 유역 밖으로 빠져나간 토사의 양을 말한다. 그러므로 침식된 토양이 모두 토사생산량이 되는 것은 아니므로 토사생산량과 토사침식량이 언제나 일치할 수는 없다.

토양침식률은 일반적으로 단위 면적당, 단위 시간당 발생하는 질량이나 무게로 표현한다. 일반적으로 기복이 별로 없는 지역에서는 연 0.0045t/ha, 기복이 심한 지역에서는 연 0.45t/ha의 침식이 발생하며, 농경지의 경우 연 45~450t/ha의 침식이 발생한다고 알려져 있다(UNESCO, 1982). 중국 하천의 자료를 이용한 결과 지구전체 연간 토양침식률은  $51.2 \times 10^9$ t으로 추정되었으며 타 지역에 대한 연구결과에 의하면 약  $15 \sim 20 \times 10^9$ t으로 추정된다(UNESCO, 1982).

유역에서 발생하는 토양침식은 대부분 대상 유역내에 영향을 미치거나 때로는 인근 타유역에 영향을 미치기도 한다. 토양의 재혼합, 토양의 타유역으로의 유출, 토양구조의 파괴, 유기물이나 영양분의 손실 등으로 토양침식은 토양의 습윤도를 저하시켜 토양성격이 건조화되며 이로 인한 직접적인 영향은 농작물 생산성이 감소되고 이에 따른 퇴비나 비료구매를 위한 경비 지출 증가 등을 들 수 있다.

토양침식의 위험도를 산정하고 침식조절기법을 결정하기 위해서는 침식 조절기법과 자연상태에서의 토양이 얼마나 빨리 침식되는가 하는 정량적 산정이 필요하게 된다. 따라서 각종 조건에 따른 토사유출량의 예측이 요구되며 대부분의 토사유출량의 산정모형은 토사유출에 영향을 주는 가장 중요한 인자만을 선택하여 현장과 실험실에서 관측하고 계측한 각종 자료를 토대로

통계적 기법을 이용하여 토사유출량을 예측하는 경험적 grey-box type에 속한다. 최근 침식 과정에 대한 역학적 이해도가 높아져 white-box 또는 physically-based model의 개발에 많은 노력이 가해지고 있는 실정이다.

토사유출량을 산정하는 여러 모형 중 USLE는 미국의 록키산맥 동부의 실험지점에서 합성된 10,000년 이상의 기간에 대한 100만개 이상의 자료를 기초로 개발된 기법으로 1970년대 미국내 판상침식 및 세류침식의 산정에 많이 활용되면서 이 식은 신뢰도가 높은 공식으로 인정되었으며, RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation)는 USLE를 보완하고 컴퓨터 프로그램을 이용하여 계산할 수 있도록 하였다. 또한 USLE에서는 없었던 연구자료의 분석을 추가 보완하였으나 USLE의 식의 형태는 계속 유지하도록 하였으며 계수 산정기법을 수정하고 특정조건을 나타낼 수 있는 항들을 새로이 추가하였다.

한편, Morgan과 Finney(1984)는 지형학자와 농공학자의 연구결과를 이용하여 USLE와 같은 단순성을 유지하면서 사면과 같은 field 규모에 대한 토사침식량 산정모형을 개발하였다. 모형은 물에 의한 침식상과 퇴적상으로 구분하였다. 토양침식은 빗방울의 충격에 의한 토립자의 토사체로부터의 이탈과정과 박리된 토립자의 물에 의한 이송과정으로 구분하였다.

Beasley 등(1980)은 Meyer와 Wischmeier(1969)의 모형을 수정하여 ANSWERS(Areal Source Watershed Environment Responsem Simulation)라는 작은 유역에서 단일 호우기간 중 또는 강우직후의 수문학 및 침식특성을 모의할 수 있는 모형을 개발하였다. 이 모형이 개발될 당시에는 침식예측모형으로써 거의 완벽하다는 평가를 받기도 하였으나 이후 수많은 physically-based 모형이 더 개선, 발전되어 검토중에 있는 모형도 많이 있다.

## 제 3 절 연구방법

### 1 시험유역의 현황 및 자료

#### 가. 시험유역의 현황 및 특성

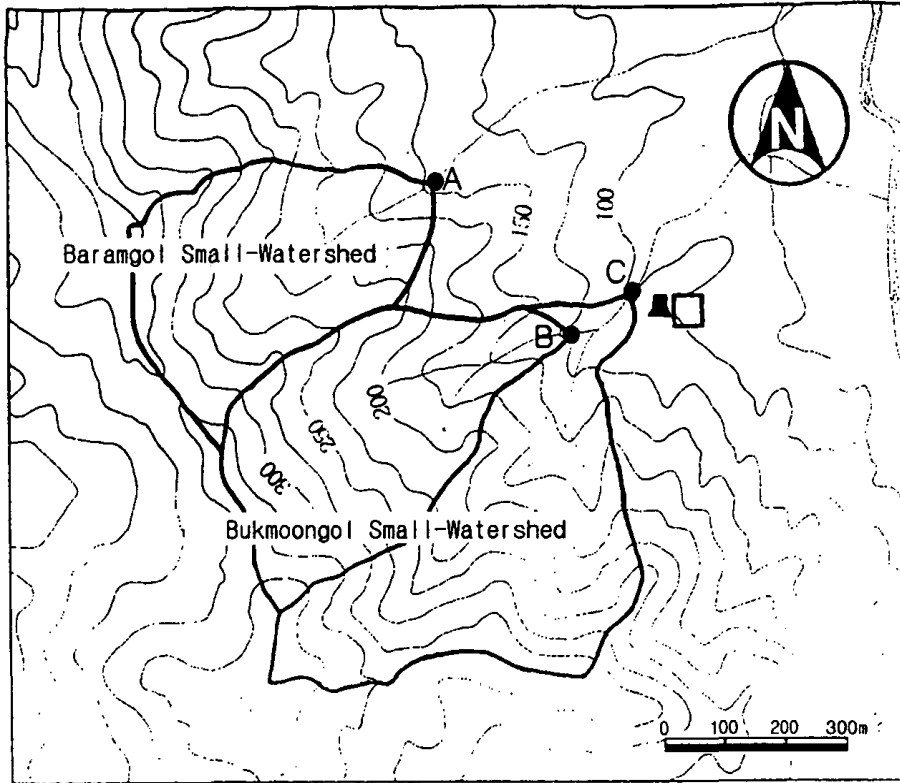
##### 1) 추산 시험유역의 地相因子

##### 가) 위 치

이 연구의 시험유역은 전라남도 광양시 옥룡면 추산리 소재 서울대학교 농업생명과학대학 부속 남부연습림 추산시험장내에 위치한 2개소의 山林流域(북위  $35^{\circ}01'30'' \sim 35^{\circ}03'00''$ , 동경  $127^{\circ}36'00'' \sim 127^{\circ}37'30''$ )으로서 두 유역의 출구에는 山林小流域 流出水量 觀測施設을 설치하였다(그림 5-1).

시험유역은 2개의 山林小流域으로 구성되며, 각 시험유역의 명칭은 현지 주민들이 호칭하는 바에 의하여 하나는 북문골 소유역, 다른 하나는 바람골 소유역이라고 하였다. 북문골 소유역은 연습림 6임반의 11개 소반에 해당하는 곳으로써 완경사 내지 중경사의 山林小流域이며, 바람골 소유역은 연습림 6임반의 5개 소반에 해당하는 곳으로서 대부분 중경사지이다. 최근 10년간 이 지역의 연강수량은 우리나라 연강수량  $1,274\text{mm}$  보다 많은  $1,664.1\text{mm}$  이었다.





- Stream Gauging Station
- [ A : Baramgol Station
- B : Bukmoongol 1st Station
- C : Bukmoongol 2nd Station ]
- ▲ Rain gauge
- Chosan Experimental Station

그림 5-1. 추산시험구역의 지형도 및 시설위치도

### 나) 地 形

시험구역의 지형요인은 표 5-1에서 보는 바와 같다. 구역지황은 1/5,000 지형도를 이용하여 도상에서 조사하였으며, 이를 현지에서 대조 확인하였다.

표 5-1. 추산 시험구역의 지형인자

Topographic factors	Unit	Watershed	
		Bukmoongol	Baramgol
Basin area	ha	15.0	14.6
Altitude	m	120 ~ 341	140 ~ 359
Main stream length	m	850	650
Circumference length	m	1,590	1,505
Mean gradient of main stream	%	25.3	20.3
Mean gradient of relief	%	29.1	31.0
Mean basin width	m	171.9	180.2
Compactness factor	m	0.8616	0.8971
Drainage density	m/ha	56.8	44.5

각 구역의 면적은 북문골 시험구역이 15.0ha, 바람골 시험구역은 14.6ha로서 비슷하며, 시험구역의 표고는 두 구역이 비슷한 고도인 120m에서 359m의 범위를 나타내고 있다. 유로 길이는 북문골 시험구역이 850m, 바람골 시험구역은 650m로 북문골 시험구역의 유로 길이가 약간 길며, 유로 평균 물매는 북문골 시험구역이 25.3%, 바람골 시험구역이 20.3%로 북문골 시험구역의 유로 물매가 다소 크다.

구역의 평균 경사는 바람골 시험구역이 31.0%로 구역 평균 경사가 29.1%인 북문골 시험구역과 비슷하였으며, 구역의 평균 폭은 바람골 시험구역이 180.2m, 북문골 시험구역이 171.9m이다. 밀집도는 두 구역이 비슷해 각각 0.8069, 0.8209 이며, 수계밀도는 북문골 시험구역이 56.8m/ha, 바람골 시험구역이 44.5m/ha이다.

## 다) 植 生

바람골 시험유역은 식생분포에 있어서 소나무, 리기다소나무, 곰솔, 물푸레나무, 은수원사시나무 등의 침활혼효 인공식재림이며 침엽수림과 활엽수림의 면적은 각각 유역면적의 95%와 5%이다. 이 시험유역의 영급 구조는 전체 임분이 III 영급으로서 동령림을 형성하고 있다.

북문골 시험유역은 식생분포에 있어서 소나무, 리기다소나무, 곰솔, 잣나무, 테다소나무, 밤나무 등으로 구성된 침활혼효 인공식재림으로써, I 영급에서 VIII 영급까지의 영급 분포를 보여주지만 주로 III 영급으로 구성되어 있다. 전체면적의 약 30%에 임령이 18년생의 활엽수인 밤나무가 식재되어 있다.

북문골 시험유역에서 조사된 상층 식생은 주로 삼나무, 소나무, 리기다소나무, 곰솔, 잣나무, 테다소나무, 잣나무, 밤나무 등으로서, I 영급에서 VIII 영급까지의 영급 분포를 보여주지만 주로 III 영급으로 구성되어 있다. 상층식생의 임목밀도는 1,100~2,500본/ha이었으며, 평균 흉고직경은 14~24cm, 평균 수고는 8~14m의 범위를 나타내었다. 또한 상층 수관의 울폐도는 83.7~99.9%의 범위를 보였다.

북문골 시험유역에서의 출현한 중층식생으로는 졸참나무, 옷나무, 개암나무, 광나무, 곰솔 등 총 31수종이었으며, 중층식생의 평균 수고는 100~120cm이었다.

북문골 시험유역에서 출현한 하층 식생으로는 애기나리, 모시물통이, 강아지풀, 김의털, 고사리, 우산나물 등 총 41종이었으며, 피도는 90% 이상이었다.

바람골 시험유역에서 조사된 상층 식생은 주로 소나무, 리기다소나무, 곰솔, 리기테다소나무, 화백, 물푸레나무, 은사시나무 등으로서, 주로 III

영급으로 구성되어 있다. 상층식생의 임목밀도는 1,000~1,500본/ha이었으며, 평균 흉고직경은 10~22cm, 평균 수고는 9~13m의 범위를 나타내었다. 또한 상층 수관의 울폐도는 96.0~100.0%의 범위를 보였다.

바람골 시험유역에서 출현한 중층식생으로는 졸참나무, 국수나무, 옻나무, 때죽나무, 난티잎개암나무, 땅비싸리 등 총 28수종이었으며, 중층식생의 평균 수고는 100~400cm이었다.

바람골 시험유역에서 출현한 하층 식생으로는 애기나리, 대사초, 노루귀, 오이풀, 강아지풀, 고사리 등 총 40종이었으며, 피도는 75% 이상이었다.

#### 라) 地質 및 土壤

시험유역의 지질계통은 대부분이 화강암의 기암으로 되어 있으며, 편마암지대가 산재되어 있다. 시험유역의 주요 토양은 사양토와 식양토로서 북문골 시험유역에서는 대부분이 사양토이고 유역출구쪽의 면적 약 5% 만이 식양토인 반면, 바람골 시험유역에서는 유역 면적의 남동쪽 약 53%가 보수력이 큰 식양토이고 나머지가 사양토로서 북문골 시험유역에 비하여 식양토의 비율이 대단히 높았다.

시험유역의 각 토양단면의 깊이는, 북문골 시험유역의 경우는 O층이 평균 5.9cm(2~10cm), A층이 24.1cm(3~45cm)로 조사되었으며, 바람골 시험유역의 경우는 O층이 평균 3.4cm(2~8cm), A층이 23.3cm(10~44 cm)로 조사되어 북문골 시험유역의 경우에 O층의 깊이가 다소 더 깊은 것으로 나타났다. 또한, 토심의 깊이도 북문골 시험유역이 바람골 시험유역에 비해 더 깊은 것으로 조사되었다. 토양단면별 토양경도는 북문골 시험유역이 A층 10.4mm, B층 16.6mm로 조사되었으며, 바람골 시험유역에서는 A층 13.1mm,

B층 17.7mm로 조사되어 북문골 시험구역의 토양단면별 토양경도가 바람골 시험구역에 비해 더 작은 것으로 조사되었다.

## 2) 명성 시험구역의 地相因子

### 가) 위치 및 지형

이 연구의 시험구역은 그림 5-2에서 보는 바와 같이 경기도 양평군 단월면 명성 2리 지역의 산지구역으로서, 지리적으로는 유역출구가 경기도와 강원도의 접경지역이며, 동경 127° 37' 28"~127° 39' 01", 북위 35° 32' 43"~35° 37' 42"에 위치한다.

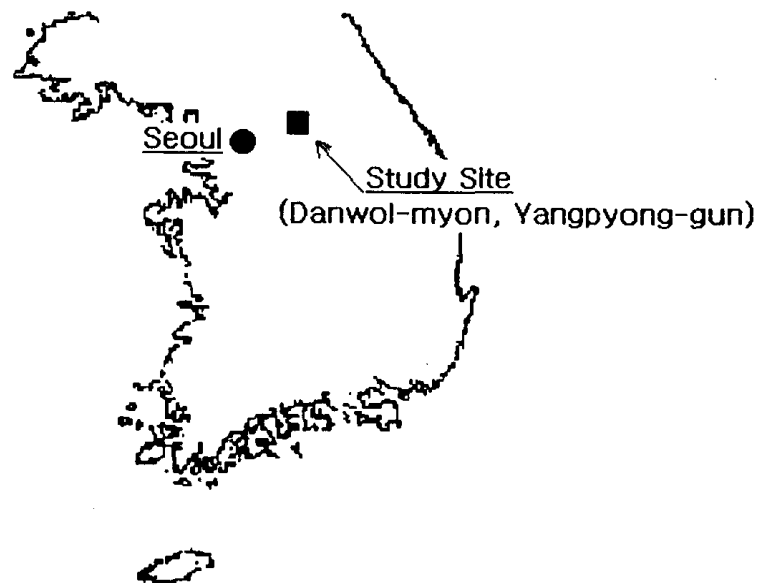


그림 5-2. 명성 시험구역의 위치도

이 유역은 그림 5-3에서 보는 바와 같이 해발고도 유역의 남서쪽 및 남동쪽 끝에 위치한 651.8m, 657.6m(小理山)의 두 봉우리로부터 북쪽으로 약 3km 연장되고, 이어서 북동쪽으로 약 1km 더 연장되어, 총 4km의 길이에 폭이 약 1.5km로, 길고 좁은 유역을 형성하고 있으며, 총면적은 약 519 ha에 달한다.

해발고도 분포는 최저 150m에서 최고 657.6m의 범위에 있으며, 평균 해발고도는 322m로서 산지유역의 특성을 가지고 있다. 한편, 유역을 하류, 중류, 상류로 구분하여 그 횡단면 형상을 조사한 결과는 그림 5-4에서와 같다. 그림 5-4에서 보는 바와 같이 유역 하류지역(그림 5-3의 A-A'지점 횡단면)은 최저 165m에서 최고 357m의 해발고도를 가지며, 산지 경사는 동사면이 약 10%, 서사면은 6%로서 비교적 완만한 지형을 가지고 있다. 그러나, 중류지역으로 갈수록 유역의 폭이 좁아지고 산지 경사도 급해져서 중류지역(그림 5-3의 B-B'지점 횡단면)의 경우에는 해발고도가 최저 200m에서 최고 462m의 범위를 가지며, 산지경사도 동사면은 약 15%, 서사면은 약 20%로서 비교적 험준한 지형을 가진다. 이러한 산지경사는 상류지역(그림 5-3의 C-C' 지점 횡단면)의 경우에도 크게 다르지 않으나, 상류지역의 경우에는 동사면의 지형이 비교적 복잡한 경향을 보이고 있다.

또한, 명성 시험유역 주계류의 해발고도 변화를 조사한 결과는 그림 5-5에서와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 주계류의 최저 해발고도는 150m, 최고 해발고도는 499m이며, 총 수로연장은 6.9km이었다. 한편, 평균 수로경사는 약 5.0%이었으나, 하류지역의 평균 수로경사는 약 1.5%, 중류지역의 평균 수로경사는 약 2.8%, 상류지역의 평균 수로경사는 약 12%로서, 상류로 갈수록 수로의 경사가 심해지는 것으로 조사되었다.

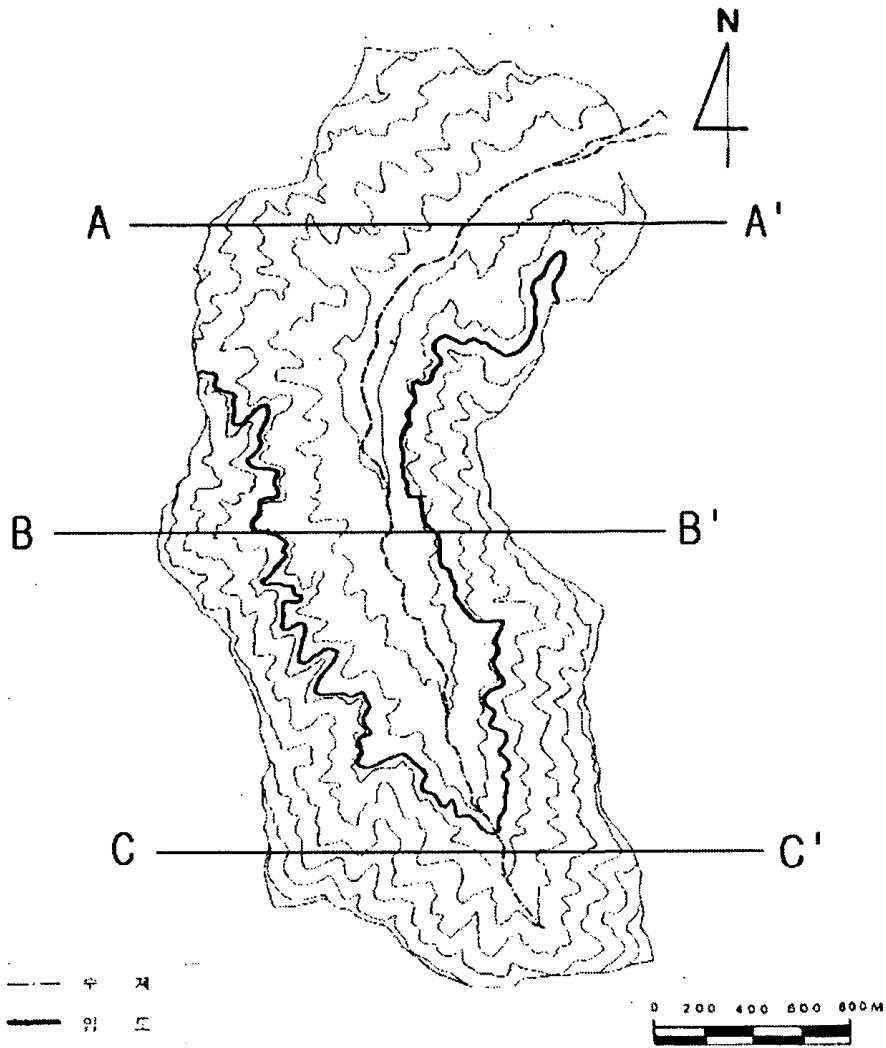


그림 5-3. 명성 시험구역의 지형도

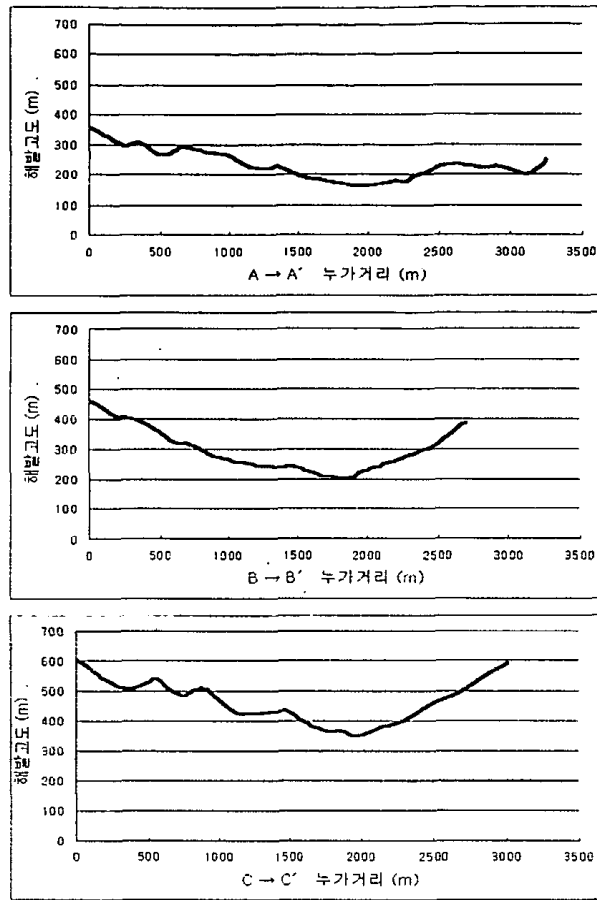


그림 5-4. 명성 시험구역의 상·중·하류지역의 횡단면 형상

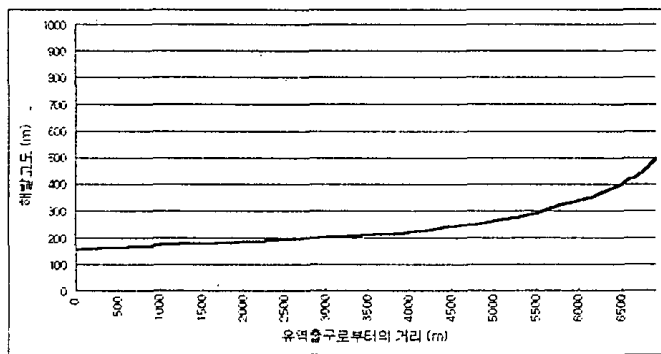
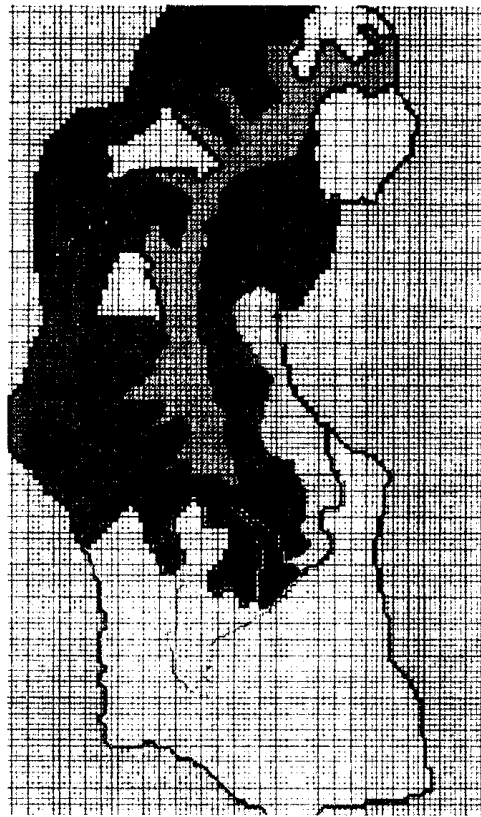


그림 5-5. 명성 대표시험구역 주계류의 해발고도 변화



## 나) 임상

본 유역은 천연활엽수림 임지에 1973년 이후 일부 면적에 잣나무와 낙엽송 등을 조림하여 현재는 잣나무, 낙엽송, 자작나무, 소나무, 현사시나무의 인공림과 참나무류의 천연림이 혼재해 있는 상태이며, 유역면적의 대부분이 국유림이고 이밖에 일부 사유림 및 사유지와 하천부지가 포함되어 있다.



- |                 |             |             |
|-----------------|-------------|-------------|
| □ 잣나무·자작나무·낙엽송림 | ■ 잣나무림      | ■ 현사시나무림    |
| □ 낙엽송림          | ■ 참나무류·소나무림 | □ 낙엽송림·잣나무림 |
| ■ 농경지·하천부지·농가   | ■ 소나무림      |             |

그림 5-6. 명성 시험유역의 임상분포 및 토지이용도

그림 5-6은 본 대표시험유역의 임상분포 및 토지이용도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 유역의 남쪽은 대부분 잣나무, 자작나무, 낙엽송의 인공식재림이 대부분이며 유역의 중류지역 주계류 가까이는 대부분 잣나무의 인공식재림이 분포하고 있다. 유역의 북서쪽에는 참나무림과 소나무림의 천연림이 분포하고 있으며, 유역 중상류 계류변 일부지역에 현사시나무림이 조성되어 있다. 농경지는 대부분 주계류를 중심으로 좁고 긴 띠모양으로 분포하고 있다.

## 나. 수문자료 조사

### 1) 추산 시험유역

#### 가) 강우량

강우량의 측정은 북문골 시험유역 유출수량관측시설에서 동쪽으로 약 150m 떨어진 곳에 자기우량계 1대와 보조용으로 표준우량계 1대를 설치하였다(그림 5-1 참고). 표준우량계는 24시간 단위로 매일 오전 10시에 측정하였으며, 우량계는 수수구의 45° 연장선상에 방해물이 없도록 설치하였다.

강우량은 자기우량계에 측정되어 있는 강우의 변화를 측정하여 매시간별 강우강도 및 강우량 자료를 수집하고, 이를 분석에 사용하였다.

#### 나) 유출량

유출량의 측정은 각 시험유역의 출구에 설치된 예연 구형웨어(Sharp-crested rectangular weirs)에서 자기수위계로서 웨어의 월류수심을 측정하

였다(그림 5-1 참고). 웨어가 설치된 콘크리트 댐의 두께는 100cm이고, 길이는 1,020cm이다. 콘크리트 댐의 중앙부에는 가로 1,000mm, 세로 1,000mm의 유출구 1개가 설치되어 있으며, 양 옆으로 가로 1,000mm, 세로 500mm의 유출구 2개가 설치되어 있으며, 실측실험을 통한 수위-유량곡선을 이용하여 관측된 수위를 유량으로 환산하였다.

## 2) 명성 시험구역

### 가) 강우량

본 시험구역에서의 강우량의 측정은 명성 시험구역내 중앙부에 위치한 공지에 자기우량계(tipping bucket recording rain gauge) 1대를 설치하여 시간별 강우량을 측정하였다(그림 5-7 참고).

### 나) 유출량

명성 대표시험구역내 주계류의 상류 및 중류 2개 지점에 자기수위계를 설치 완료하여, 수위변동을 연속으로 측정하였다(그림 5-7 참고).

주계류의 상류 관측지점은 해당 구역면적이 약 45.6 ha로서 본 대표시험구역중 임도개설이나 산림벌채 등의 시업이 행해지지 않은 곳으로 대부분 자작나무, 낙엽송 등의 조림지로 구성되어 있다. 자기수위계는 본 구역의 출구에 있는 임도의 암거에 시설하여 유출수량 측정지점의 계류단면적이 균일하게 나오도록 설치하였다.

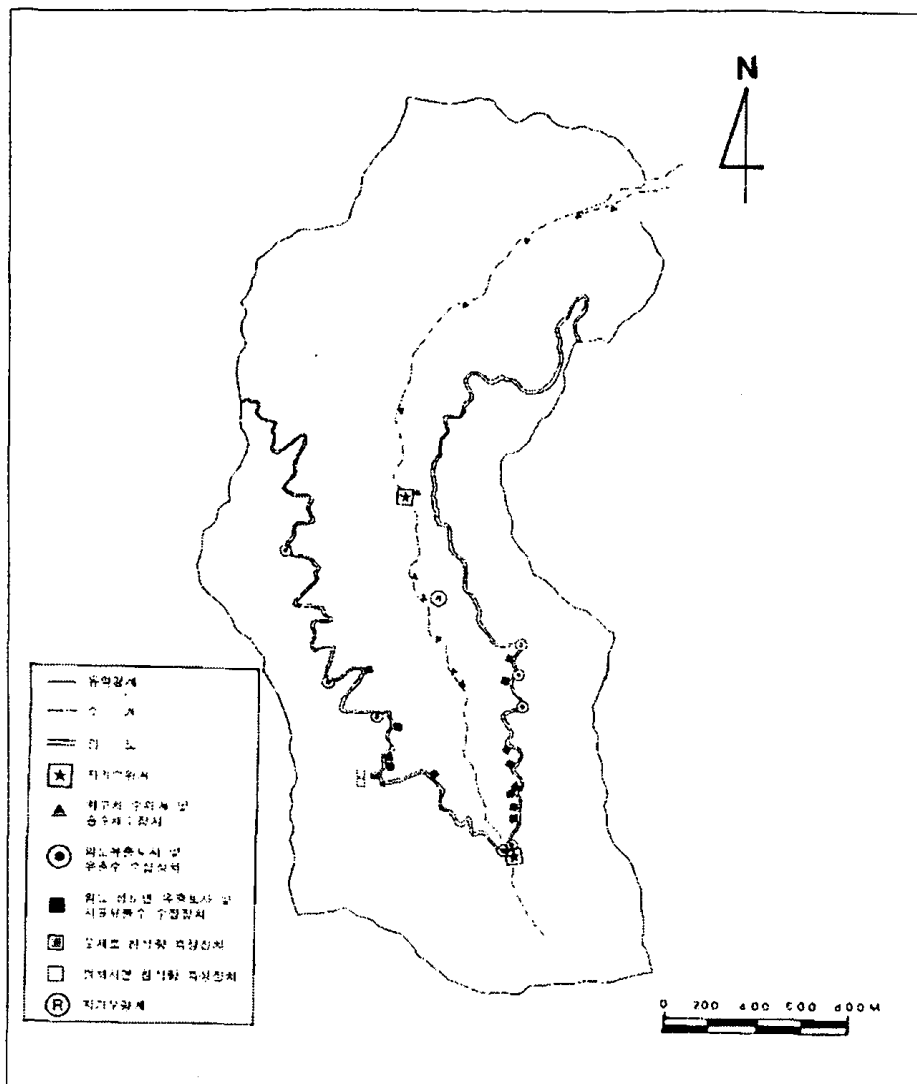


그림 5-7. 명성 시험유역 시설위치도.

한편, 주계류의 중류 관측지점은 상부관측지점으로부터 주계류를 따라 약 1.7 km 하류에 위치하고 있으며, 해당 유역면적은 약 297.2 ha로서 상부 관측유역의 약 6.5 배에 달한다. 이 유역면적내에는 약 5.1 km의 임도가 개설되어 있으며, 논, 밭 축산농가 등이 다수 산재해 있다. 자기수위계는 통

수단면적이 균일한 교량에 설치하여 정확한 수위관측을 가능하게 하였다.

자기수위계는 원통형 드럼에 기록지를 부착하여 부표에 의한 도르래 작용으로 기록하게 되어 있다. 기록지는 30일용이며, 수위계의 시계드럼은 기계식 A-R 형 시계이다.

#### 다. 토사유출자료 조사

임도개설과 같은 산지개발은 산림의 벌채로 인해 무임목지를 발생시키고 산림토양을 교란·파괴시켜 산지의 물환경에 많은 악영향을 미치는 것으로 여겨진다.

임도의 경우 산지개발의 전형이라 할 수 있는 불투수 혹은 난투수 지표면을 형성하게 되고, 또한 절토 및 성토 등으로 기존 산지지형을 변화시킬 뿐만 아니라, 배수 유역과 교차하는 도로는 일반적으로 특정 지점에 유량을 집중시킴으로써, 자연적인 유출경로를 변경시키고 유속을 증가시키게 된다(그림 5-8). 지역적인 조건에 따라, 이러한 변화는 홍수, 토양 침식, 수로 변경 및 하류 하천의 하상퇴적물 증가 등의 원인이 될 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 신설임도가 개설된 명성 시험유역을 대상으로 임도개설로 인한 물환경변화 및 영향요인에 대한 조사를 실시하였다.

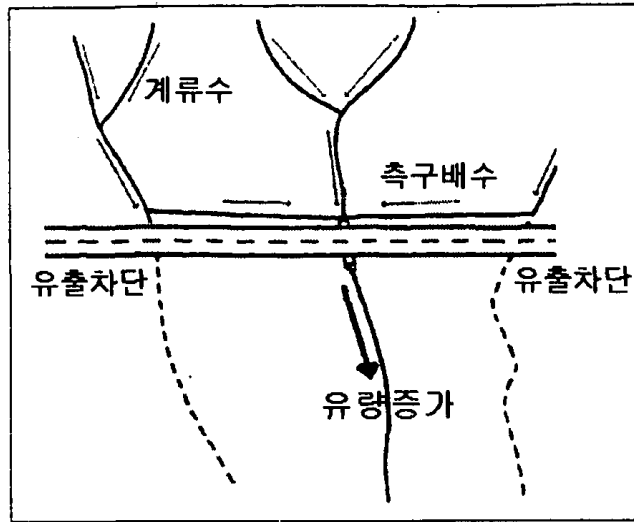


그림 5-8. 임도 개설로 인한 산지사면 유출경로의 변화

### 1) 임도 유출토사량 및 유출수량 조사

명성 시험유역내에 총 7개소의 임도 유출토사량 및 유출수량 조사구를 설치하였다. 각 조사구는 임도노면, 절토면, 절토면 상부산지 등으로 구성 되어 있으며, 강우는 측구를 통하여 집수·배수된다(그림 5-9 참고).

각 조사구에서는 임도의 유출토사량 및 유출수량을 측정하기 위하여 임도 측구의 유수가 암거로 유출되기 직전의 측구지점에 그림 5-10과 같이 철제 인공수로를 설치하고 유출수량 분리수집 장치를 시설하여 유출수의 약 5%를 집수가능하도록 장치하였다. 집수된 유출수는 1차적으로 집수통에 집수되며, 이 때 유출수에 포함된 토사가 집수통내에 퇴적되게 된다. 그리고 집수통을 월류하는 유출수는 전도식 유량계(tipping bucket gauge)를 이용하여 그 양을 측정하였으며, 집수통내에 퇴적된 토사는 강우종료 후 수거하여 건조 후 중량을 측정하였다.

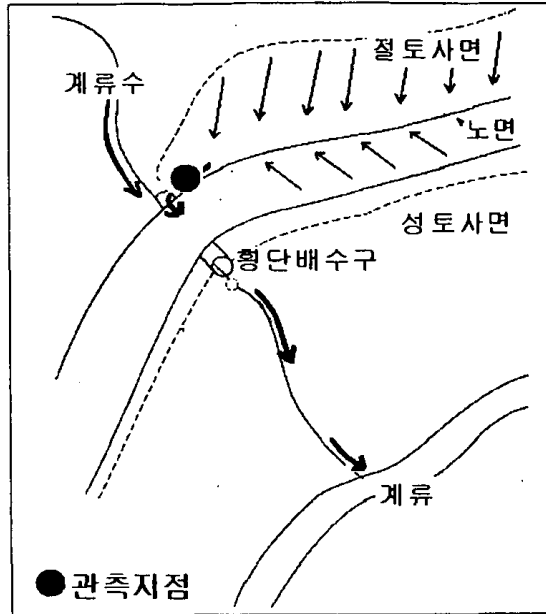


그림 5-9. 임도 유출토사량 및 유출수량 조사지점의 모식도

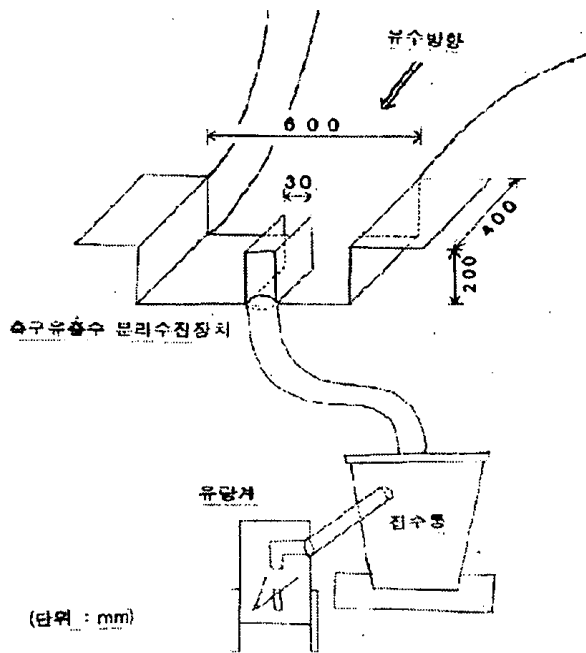


그림 5-10. 임도 유출토사 및 유출수 수집장치의 모형도

표 5-2는 각 임도 유출토사 및 유출수량 조사구의 입지인자를 보여주고 있다. 표 5-2에서 보는 바와 같이 각 조사구의 집수면적은 평균 약 0.57 ha이었으며, 조사구내 임도길이는 평균 약 150 m 이었다.

표 5-2. 각 임도 유출토사 및 유출수량 조사구의 입지인자

조사구	면적 (ha)	방 위	임도 길이 (m)	노면 경사 (%)	절토면 경사	평균 절토고 (m)	주요수종	영 급
1	0.75	NW80°	80	6.0	75°	4.0	소나무	II
2	0.68	SW80°	140	5.1	55°	5.0	"	"
3	1.13	NW70°	200	3.7	50°	4.0	자작나무, 낙엽송	I
4	0.25	NW40°	250	3.2	50°	2.0	"	"
5	0.08	NW10°	48	3.6	65°	2.7	"	"
6	0.20	NE30°	120	5.1	63°	3.5	낙엽송	IV
7	0.51	NW20°	140	4.0	62°	3.6	잣나무	II

## 2) 임도 성토면 유출토사 및 지표유출수량 조사

임도 성토비탈의 지표유출 발생량 및 토사침식량을 조사하기 위하여 연구대상지내에 1996년 11월에 준공된 신설임도를 대상으로 표 5-3에서 보는 바와 같은 임도 성토비탈 조사구를 총 13개소 설치하였다. 조사구는 임도의 노면으로부터 성토비탈을 따라 5~6m 하단까지의 비탈을 조사대상으로 설정하였으며, 특히 조사구내로 임도 노면으로부터의 우수유입이 없도록 임도 노면의 횡단물매가 측구쪽으로 시공된 구간을 선정하여 설치하였다. 조사구의 설치는 1997년 4월에 완료하였다. 총 13개 성토비탈 조사구의 평균면적



은 약  $12.0\text{m}^2$ ( $9.4\sim 15.4\text{m}^2$ )이었으며, 평균 경사는 약  $37^\circ$  ( $30^\circ \sim 45^\circ$ ), 평균 비탈길이는  $4.7\text{m}$ ( $3.5\sim 6.9\text{m}$ )이었다. 한편, 조사구의 토성분포는 모두 사양토로서 큰 차이를 보이지 않았다.

표 5-3. 임도 성토면 유출토사 및 지표유출수량 조사구의 입지인자.

조사구	면적( $100\text{cm}^2$ )	경사( $^\circ$ )	방위
1	1,180.8	35	NW66
2	1,281.5	36	NW80
3	1,349.0	43	SW45
4	943.3	31	NW50
5	1,069.3	33	NW48
6	1,069.2	43	SW80
7	1,120.0	40	NW75
8	1,538.7	44	NW85
9	1,015.1	37	NE40
10	1,212.3	37	NE80
11	1,561.8	36	NE70
12	1,115.4	33	SE80
13	1,087.3	36	NE5
합 계	15,543.7		

그림 5-11은 임도 성토면 유출토사 및 지표유출수 수집장치를 나타낸 것이다. 그림 5-11에서와 같이 임도 성토면 유출토사 및 지표유출수 수집장치는 임도 성토 비탈면에 길이  $3,500\text{ mm}$ , 지름  $100\text{ mm}$ 의 반원형 지표유출수 수집장치를 시설하고, 여기에 모인 지표유출수 및 유출토사량은 집수통에 집수된다. 대부분의 유출토사는 첫번째 집수통에 퇴적·수집되고 강우 후에 이를 수거하여 건조 후 중량을 측정하였다. 지표유출수가 첫번째 집수통의 용량을 초과하는 경우 월류수는 월류수 분리수집장치를 거쳐 두번째 집수통

에 수집되게 된다. 이 때 월류수 분리수집장치는 첫번째 집수통의 월류수중 약 1/4을 두 번째 집수통으로 집수시키는 기능을 가지고 있다.

지표유출수량은 강우 후 첫번째 집수통 및 두번째 집수통에 모인 수량의 용적을 측정하여 단위면적당 지표유출수량을 계산하였다.

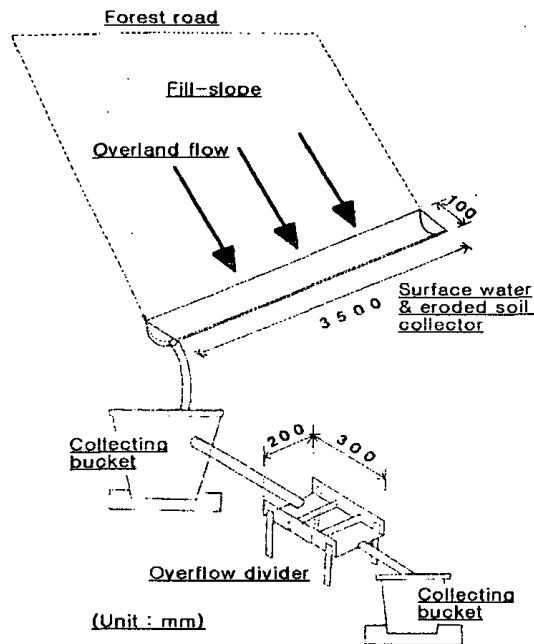


그림 5-11. 임도 성토면 유출토사 및 지표유출수 수집장치의 모형도

한편, 연구대상 임도 노선의 성토비탈 표면에는 비탈안정녹화를 위하여 Tall fescue와 Orchard grass 등의 외래 초종을 이용한 줄씨뿌리기 공법을 1996년 10월에 시공한 바 있다. 이 연구에서는 임도 성토비탈의 토사안정에 대한 식생녹화의 효과를 분석하기 위하여 성토비탈의 식생피복도를 측정하였다. 이를 위하여 각 임도 성토비탈 조사구내 비탈을 상, 중, 하로 구분하고 특별히 제작한 격자틀을 사용하여 각각의 식생피복도를 측정한 후 조사

구내의 평균적인 식생피복도를 측정하였으며, 성토비탈에서의 지표유출수량 및 침식토사량의 측정시기와 일치되도록 관측하였다. 식생피복도는 비탈 토양이 나출되지 않고 식생에 의해 피복되어 있는 정도를 측정하였다.

## 2.. 산지개발에 따른 산원수 환경변화 예측 및 평가기법 및 산원수자원의 종합적 관리시스템

### 가. 강우-유출모형의 구성

#### 1) 모형의 기본개념

山林流域 降雨-流出模型의 개발을 위하여 본 연구에서는 분포형 수문모형으로서 유역의 지형에 따른 포화층에서의 흐름과 유출기여면적을 고려하여 유출현상을 재현하는 TOPMODEL의 개념을 근간으로 하였다.

TOPMODEL은 1979년 Kirkby와 Beven(1979)에 의해 개발된 지형적 기반 모형(TOPographically based MODEL)으로서 數值地形圖(Digital Elevation Model: DEM) 및 지리정보시스템의 발전과 더불어 그 발전 가능성이 더욱 커져왔다.

이 TOPMODEL은 강우의 시공간적 변화성, 불균일한 지표조건, 토양깊이에 따른 수리학적 특성 차이 등으로 인해 매우 복잡한 수문현상을 나타내는 유출현상을 개념적으로 단순화하였다. 이를 위하여 TOPMODEL은 ① 포화층의 흐름은 定常狀態(Steady state)이고, ② 유역내 특정지점의 飽和層 動水傾斜는 그 지점의 지표면 경사와 동일하며, ③ 토양단면내의 깊이에 따른 飽和 透水係數(Saturated hydraulic conductivity)의 변화는 지수감소 곡선을 갖는다는 3가지의 기본 가정사항을 가지고 있다.

즉, 첫째 가정은, 유역 내에서의 포화 성향이 정상상태의 가정 하에 나타내어 질 수 있음을 의미한다. 이는 유역 내의 잠재적 포화성향의 공간적 분포를 식 5-1과 같은 地形指數로 나타냄으로서 유역내 임의의 지점에서의 포화현상이 발생할 수 있는 정도를 나타낼 수 있다(Kirkby, 1975). 이러한 地形指數는 일반적으로 數値地形圖 상의 개별 격자마다 각각 계산된다.

$$\lambda_i = \ln(a_i / \tan \beta_i) \quad (\text{식 5-1})$$

여기서,  $\lambda$ 는 유역내  $i$  지점의 地形指數(Topographic index),  $a_i(\text{m}^2/\text{m})$ 는 유역내  $i$  지점의 等高線 길이( $C_i$ ) 당 累積 集水面積( $A_i$ )을 말하는 것으로서, 유역내 임의 지점의 等高線 길이( $C_i$ )는 數値地形圖를 이용한 분석시 수치지형도내 해당 격자(Grid)와 하부흐름방향에 인접한 격자와의 접선길이를 이용한다. 단일 흐름방향 알고리즘의 경우 통상적으로 격자폭을 그 값으로 사용한다. 그리고, 유역내 임의 지점의 누적 집수면적( $A_i$ )은 수치지형도내 해당 격자로 배수하는 모든 격자의 누적면적으로 계산한다. 따라서, 유역 출구에 위치한 격자의 경우 누적 집수면적( $A_i$ )은 유역 전체 면적이 된다. 한편,  $\beta_i(^{\circ})$ 는 유역내  $i$  지점의 지표면 경사를 나타내며, 數値地形圖를 이용한 분석시 해당 격자와 하부 흐름방향에 인접한 격자와의 경사도로서 계산한다.

이 地形指數는 유역의 수문학적 상사성을 표현하는 지수로써 사용된다. 동일한 지수 값을 가지는 모든 지점은 수문학적 특성이 같은 것으로 가정된다. 따라서, 집수면적내의 모든 지점에 대해서 地形指數를 계산하는 것이 필요할 뿐만 아니라, 地形指數의 서로 다른 값에 대하여 집수면적내의 분포도 특성을 파악하는 것이 필요하다.

둘째 가정은, 유역내 地下水面의 動水傾斜가 지표면 경사로서 표현될 수

있음을 의미한다. 위 두 가정으로부터, 상대적으로 상부 경사 지역으로부터의 넓은 배수 면적과 완만한 경사를 가진 지역은 높은 地形指數 값을 가지게 되며, 이는 곧 높은 포화 성향을 나타낸다. 따라서, 높은 地形指數 값을 가지는 지역은 잠재적인 地表下 혹은 地表 流出의 寄與面積을 암시한다. 집수면적이 습윤해지거나 건조해짐에 따라 그러한 면적이 늘어나거나 줄어드는 것은 地形指數의 패턴에 의해 표시된다(Beven, 1997).

셋째 가정은, 토양 깊이에 따른 飽和 透水係數가 지표면으로부터 지하수면까지의 거리에 지수함수적으로 감소함을 나타낸다. 이 가정은 토양 투수계수 자료와 等方 가정하에서의 투수함수 유도를 통해 검증되어졌다(Beven, 1984).

TOPMODEL의 특징 가운데 하나는 모형의 구조가 비교적 간단하고 지역의 특성에 따라 손쉽게 수정·개발하여 사용이 가능하도록 강우에 대한 유출현상에 영향을 미치는 제반 요소를 block화하여 제공하고 있다. 따라서 전세계적으로 매우 다양한 형태의 모형이 존재하지만, 그 기본적인 골격은 地形指數의 분포, 土壤 水分의 변화 및 地表 流出 등으로 구성되어 있다.

## 2) 모형의 구성

강우-유출현상은 매우 복잡하기 때문에 縮約없이 표현할 수는 없다. 축약은 대상 현상계를 보다 단순화된 구조의 모형으로 나타내는 것이며, 사용 목적에 따라 여러가지 형태의 모형을 구성할 수 있다. 유출 모형의 기본 목적은 유출 현상을 모의 발생하거나 예측하는 것이다. 보통, 치수 목적에는 시간 단위 정도의 단일 사상 모형이 사용되며, 이수 목적에는 일 단위 이상의 연속 모형이 사용된다(金顯榮과 朴承禹 1988).

TOPMODEL에 있어서도 불균일한 지표조건 및 토양깊이에 따른 수리학적

특성 차이 등으로 인해 매우 복잡한 수문현상을 나타내는 유출현상을 전술한 바와 같은 몇가지 가정하에 축약하여 개념적으로 단순화하였다.

이러한 TOPMODEL에 있어서 주요한 유출성분은 그림 5-12의 (A)에서 보는 바와 같이 크게 Horton의 地表流出 및 飽和 地表 越流로 구성되는 地表流出 성분과 포화층으로부터의 地表下 流出 성분의 2가지로서 구성되어 있다. 즉, TOPMODEL에서는 포화층에서의 흐름과 유출기여면적을 고려하여 유역의 유출현상을 재현해낸다.

그러나, 산림유역의 경우, 산림토양은 근계가 발달하고 토양구조가 잘 형성되어 大孔隙이 풍부하여 토양의 통기성, 침투성, 투수성, 수분보유력 등이 매우 크기 때문에, Horton의 침투이론에 의한 지표 유출은 발생하기 어려우며, 대부분의 강우는 토양면의 포화로 인한 飽和 地表 越流나 地表下 流出의 형태로 유출되게 된다(Freeze, 1972; Hewlett, 1984; 高德九, 1989).

또한, 산림유역의 중요한 수문학적 특징으로서 간과할 수 없는 것이 불포화상태로 비교적 속도가 빠른 早期 地表下 流出 成分이다. 산림지역에서는 강우가 지표하로 빠르게 침투됨으로서 초과강우량에 의한 지표 유출 발생량이 거의 없으며, 대부분의 강우는 지표하로 빠르게 침투되어 불포화상태로 비교적 속도가 빠른 早期 地表下 流出(Prompt subsurface runoff)을 형성한다(太田, 1983; 太田 等, 1983a, b; 太田과 阿部, 1985; 谷誠, 1985; Pinol *et al.*, 1997). 따라서, 산림지역에서의 이러한 특성을 고려하여 본 연구에서는 早期 地表下 流出 발생을 고려하여 그림 5-12의 (B)에서와 같이 산림 유역으로부터의 유출성분을 크게 飽和 地表 越流(Saturated overland flow), 早期 地表下 流出(Prompt subsurface runoff) 및 地表下 流出(Subsurface flow)의 3가지 성분으로 산림유역의 유출현상을 모형화하였다.

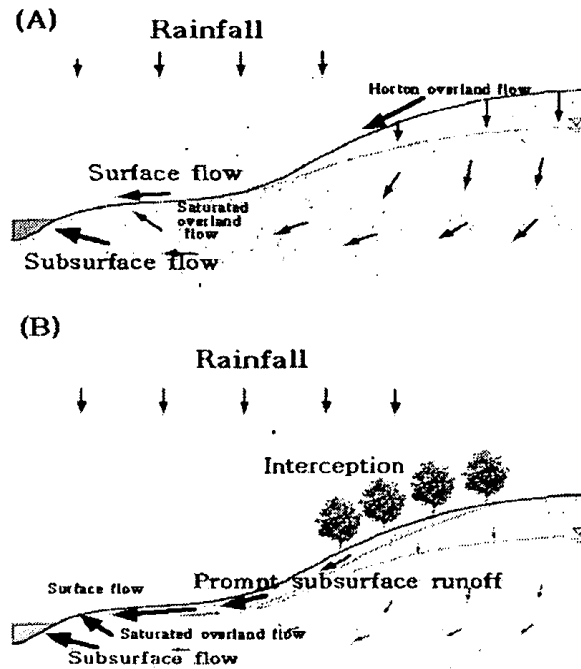


그림 5-12. 사면유출 개념도

(A) TOPMODEL, (B) 산림유역 강우유출모형

한편, 식생이 잘 발달된 산지유역의 경우 식생에 의한 遮斷 (Interception)이 전체 물수지에 미치는 영향은 결코 간과될 수 없으며, 특히 연속적으로 수문 현상을 모의발생시키는 데 있어서는 계속해서 변화하는 遮斷과 그의 증발에 대한 고려가 반드시 선행되어야 한다. 또한, 산지유역의 경우 낙엽이나 초생식물에 의해 지표면에 광범위하게 형성된 落葉落枝層 (Litter layer)이 遮斷에서 차지하는 비중과 전체 물순환에 미치는 영향에 대한 관심이 일고 있는 가운데 산지 落葉落枝層에 의한 차단 현상은 점차 주목받는 연구대상이 되고 있다(高德九, 1989).

TOPMODEL에서는 별도로 차단 현상을 재현하는 모형이 구성되어 있지 않

으며, 모형 구조상 뿌리帶(根群域; Root zone)의 最大貯留高 및 初期土壤水分未含量(Soil moisture deficit)으로서 강우의 초기손실을 재현하고 있으나, 모형구조상 뿌리帶로의 유입량은 Horton의 지표 유출을 발생시키는 超過降雨量이 제외된 강우량으로서 사실상 지표면 상부의 식생 및 落葉落枝層에 의한 차단현상을 재현해내지 못하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 TOPMODEL의 개념을 바탕으로 산림유역의 유출특성에 적합하도록 遮斷副模型과 早期地表下流出(Prompt subsurface runoff) 성분 등을 추가·보완하여 그림 5-13에서 보는 바와 같은 降雨-流出模型을 구성하였다.

山林流域 降雨-流出模型은 크게 數值地形圖를 이용한 地形指數의 산정 과정과 유출 과정의 2개 과정으로 구성되며, 유출 과정을 遮斷域(Interception zone), 뿌리帶(Root zone), 不飽和帶(Unsaturated zone), 飽和帶(Saturated zone)의 4개 권역으로 구분하였다. 유역의 최종 유출량은 불포화층으로부터의 飽和地表越流 및 早期地表下流出과 포화층으로부터의 地表下流出로 구성되며, 증발산량은 遮斷域 및 뿌리帶 2개 권역에서의 발생량을 합산하였다.



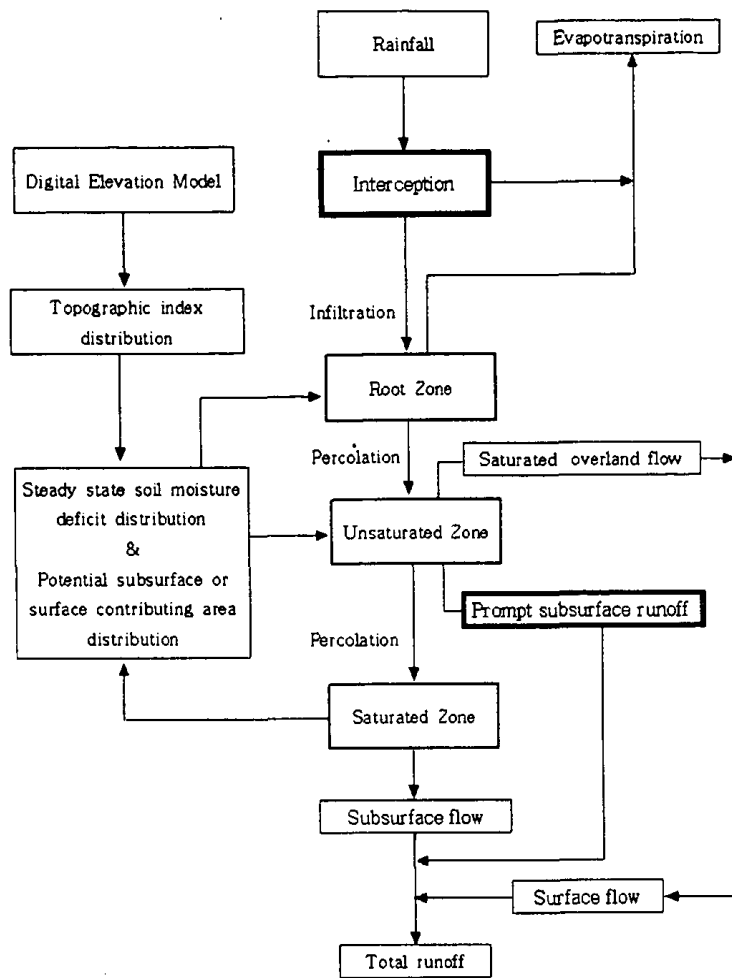


그림 5-13. 산림유역 강우유출모형의 개념적 모식도

### 가) 지형지수

본 山林流域 降雨-流出模型은 TOPMODEL의 기본 가정을 바탕으로 하고 있으므로 TOPMODEL과 동일하게 유역의 수문과정을 재현해내는 중요한 도구로써 地形指數를 사용한다. 즉, 수치지형도내 각 격자들이 가지는 地形指數의 값 및 그 공간적 분포를 이용하여 각 격자내 토양 수분 함량의 변화 및 계

산시간에 따른 가변적인 유출 기여면적의 변화를 계산한다.

數値地形圖를 이용하여 地形指數의 공간적 분포를 계산하기 위한 알고리즘은 그림 5-14와 같이 그 흐름 분할(flow apportioning)방법에 따라 크게 단일방향 흐름(Single Flow Direction; SFD) 알고리즘과 다방향 흐름(Multiple Flow Direction; MFD) 알고리즘으로 나누어진다(Quinn *et al.*, 1991).

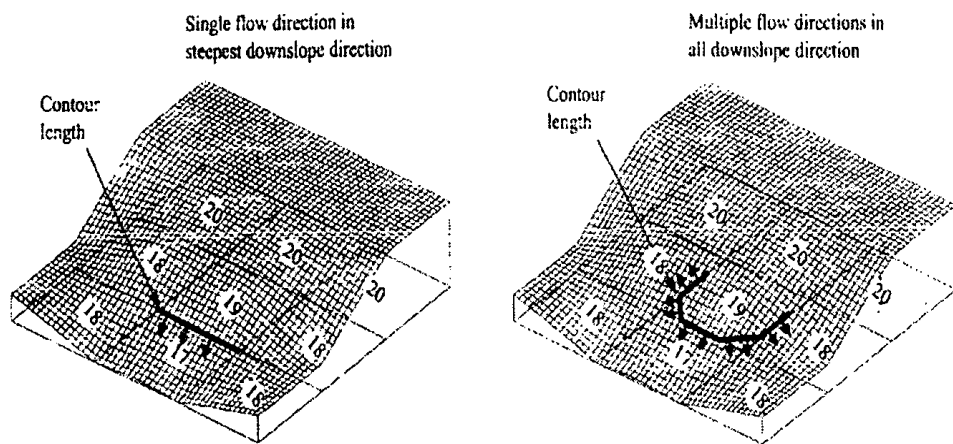


그림 5-14. 지형지수를 계산하기 위한 단일방향흐름 알고리즘과  
다방향흐름 알고리즘

단일방향 흐름 알고리즘은 Jenson과 Dominique(1988)가 발표한 단일방향 흐름 추적법에 기초하는데, 이는 모든 지점에서 흐름이 각 지점으로부터 가장 경사가 급한 방향으로 향한다고 가정한다. 지형정보시스템의 수문 해석 프로그램의 대부분이 이 알고리즘을 적용하고 있다. 이 알고리즘은 地形指數 산정에 있어 오차를 줄이기 위해 산봉우리와 같이 흐름이 분산되는 발산점과 저수지와 같은 흐름이 수렴하는 수렴점 및 댐과 같이 평평하거나 급경사에서 완경사로 변하는 선상지와 같은 평지점에 대한 전처리가 요구된다.

특히, 단일방향 흐름 알고리즘은 지형상 아주 경사가 급한 계곡이나 배수 지역 등에 적합하며, 상대적으로 완경사 지역에 대해서는 흐름 분할을 묘사하는데 문제점이 존재한다.

다방향 흐름 알고리즘은 Quinn 등(1991)이 제안한 흐름 분산법에 근거하고 있으며, 이는 모든 지점에서의 흐름이 한 지점으로부터 그보다 고도가 낮은 모든 방향으로 형성된다고 가정한다. 최근 발표된 TOPMODEL 연구의 대다수가 이 알고리즘을 활용하고 있다.

다방향 흐름 알고리즘은 그 특성상 흐름이 분산되는 지형에 아주 적합하며 경사가 급한 지형에 대해서는 단일방향 흐름 알고리즘보다 그 적용성이 낮다. 그러나, 단일방향 흐름 알고리즘은 다방향 흐름 알고리즘에 비해 그 적용성을 반영하기 위한 대상 지형의 형태가 제한되어있다. Moore(1995)는 두 알고리즘으로부터 계산된 地形指數의 분포를 비교한 결과, 다방향 흐름 알고리즘이 단일방향 흐름 알고리즘보다 유역의 완경사 지역에 대해 더욱 실제에 가까운 등고선 길이 당 상부사면 누적면적 값의 분포를 나타낸다고 보고했다.

본 연구에서는 數値地形圖를 이용한 地形指數의 산정 알고리즘으로서 다방향 흐름 알고리즘을 기본 방법으로 사용하였다. 그림 5-15는 다방향 흐름 알고리즘에서 유역내  $i$  지점의 등고선 길이 및 지표면 경사를 계산하는 일 예를 보여주고 있다. 전술한 식 5-1에서와 같이 地形指數는 유역내  $i$  지점의 등고선 길이( $C_i$ ) 당 누적 집수면적( $A_i$ )과 유역내  $i$  지점의 지표면 경사( $\beta$ )의 탄젠트(Tangent) 값의 비에 대한 대수식으로 표현된다. 數値地形圖를 이용한 다방향 흐름 알고리즘에서 유역내  $i$  지점의 등고선 길이는 수치 지형도내 해당 격자(Grid)를 정방형이 아닌 팔각형 격자로서 가정하고 하부 흐름방향이 형성된 인접한 모든 격자와의 접선길이를 이용한다.

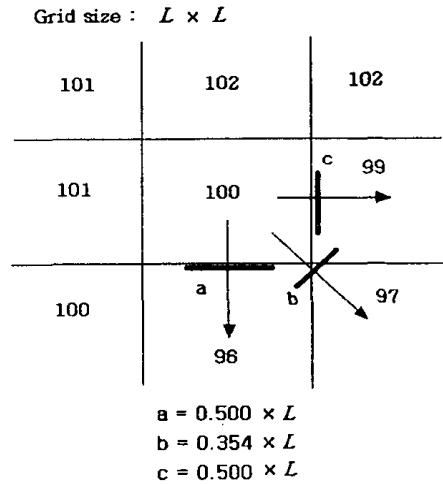


그림 5-15. 다방향흐름 알고리즘의 계산방법

즉, 그림 5-15에서 보는 바와 같이 격자 폭이  $L$ 인 수치지형도상에서 수치고도 100의 값을 가지는 중앙 격자의 경우, 그 보다 고도가 낮은 3개 격자 방향으로 흐름이 형성되며, 이때 중앙 격자의 등고선 길이  $C_i$ 는  $a+b+c = (0.5 + 0.354 + 0.5) \times L = 1.354 \times L$  이 된다. 그리고, 유역내  $i$  지점의 누적 집수면적( $A_i$ )은 수치지형도내 해당 격자의 면적 및 해당 격자로 배수하는 모든 상부 격자의 누적면적으로 계산한다.

한편,  $\beta_i(^{\circ})$ 는 유역내  $i$  지점의 지표면 경사를 나타내며, 다방향 흐름 알고리즘의 경우, 흐름이 형성되는 모든 방향의 경사를 합산하여 계산한다. 즉, 그림 5-15의 경우에는 흐름이 형성되는  $a, b, c$  3방향의 경사를 합산한다.

數値地形圖의 개별 격자에 대한 다방향 흐름 알고리즘을 이용한 地形指數의 계산과정은 종합하면 식 5-2와 같다.

$$\ln(a_i / \tan \beta_i) = \ln \left[ \frac{A_i}{\sum_{j=1}^n C_{ij}} \frac{1}{\sum_{j=1}^n \tan \beta_{ij}} \right] \quad (\text{식 5-2})$$

여기서  $\beta_{ij}$ 는  $i$  격자에 대하여 흐름방향의 결정으로 인해 계산되는 인접 격자 사이의 경사도이고,  $C_{ij}$ 는 흐름방향으로의 격자간 접선 길이로서 주방향 흐름일 때는 단위 격자 폭의 50%로, 대각방향 흐름일 때는 35.4%로 계산한다.

#### 나) 차단량

강우 차단량이란 강우량중에서 식물의 줄기나 잎에 의하여 遮斷되어 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, 강우 지속시간이 늘어남에 따라 그 양은 줄어든다(임상준, 2000).

또한, 산림유역의 경우 낙엽이나 초생식물에 의해 지표면에 광범위하게 형성된 落葉落枝層이 차단에서 차지하는 비중과 전체 물순환에 미치는 영향이 매우 높은 것으로 알려져 있다(Chorley, 1978; Dunne, 1978, William and Cordery, 1996).

차단 손실량을 예측하기 위한 모형은 1919년 Horton이 遮斷貯留量과 증발량으로 구분하여 개념적 모형을 제시한 이후, 많은 연구자에 의해 개발되었으며, 크게 靜的 모형과 動的 모형으로 구분할 수 있다. 정적 모형은 차

단손실량을 강우나 임분구조인자를 이용하여 경험식으로 나타내고 있는 반면, 동적 모형은 임목내의 물수지와 물리방정식을 이용하여 차단손실량을 산정한다(Massman, 1983). 대표적인 동적 차단손실모형은 물리적 개념모형인 Rutter 모형과 분석적 개념모형인 Gash 모형을 들 수 있다(Rutter and Morton, 1977; Gash *et al.*, 1980).

본 연구에서는 차단 손실을 재현하기 위하여 Rutter 모형을 기초로 하여 그림 5-16과 같은 遮斷 副模型을 작성하였다.

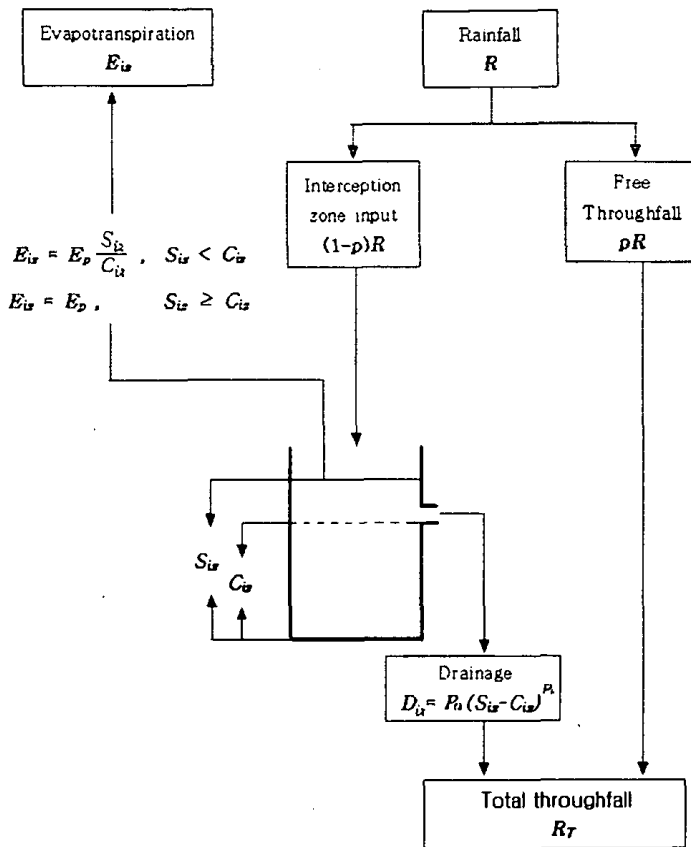


그림 5-16. 차단부모형의 개념적 모식도

차단 부모형의 구성성분은 크게 流入量과 貯留量, 排水量, 그리고 蒸發量으로 구분할 수 있으며, 산림유역의 물순환 과정중 상층수관 및 하층식생에 의한 植生 遮斷과 落葉落枝層에 의한 차단현상을 재현 대상으로 하였다.

물수지 방정식을 기초로 시간 경과에 따른 遮斷貯留量의 변화는 식 5-3과 같이 정의할 수 있다.

$$Siz^{(t+\Delta t)} = Siz^t + Iiz^{\Delta t} - Diz^{\Delta t} - Eiz^{\Delta t} \quad (\text{식 5-3})$$

여기서,  $Siz^t$ 는 시간 t일 때의 遮斷貯留量(mm),  $Diz^{\Delta t}$ 는  $\Delta t$  시간 동안의 배수량(mm),  $Eiz^{\Delta t}$ 는  $\Delta t$  시간 동안의 증발량(mm),  $Siz^{t+\Delta t}$ 는  $\Delta t$  시간 경과후의 遮斷貯留量(mm)을 말한다.

한편,  $Iiz^{\Delta t}$ 는  $\Delta t$  시간 동안의 遮斷域(Interception zone)으로의 유입량(mm)을 말하며, 식 5-4로부터 계산된다.

$$Iiz^{\Delta t} = R^{\Delta t}(1 - p) \quad (\text{식 5-4})$$

여기서,  $R^{\Delta t}$ 는  $\Delta t$  시간 동안의 강우량으로서  $\Delta t$ 가 1시간 간격일 경우 시간강우량(mm/hr)이 되며,  $p$ 는 直接通過率(Free throughfall rate)로서 강우량에 대하여 遮斷域에 유입되지 않고 바로 토양내 뿌리帶로 유입되는 양의 비를 말한다.

또한, 遮斷域으로부터의 배수량  $Diz^{\Delta t}$ 는 멱함수(Power equation)를 이용한 비선형 회귀분석을 통하여 강우시 시간 경과에 따른 수관으로부터의 배수량과 수관저류량과의 관계를 밝힌 Domingo 등(1998)의 연구를 토대로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Diz^{\Delta t} &= P_a \cdot [Siz^t + Iiz^{\Delta t} - Ciz]^{P_b}, & \text{if } [Siz^t + Iiz^{\Delta t}] > Ciz \\
 Diz^{\Delta t} &= 0, & \text{if } [Siz^t + Iiz^{\Delta t}] \leq Ciz
 \end{aligned}
 \tag{식 5-5}$$

여기서,  $P_a$ 와  $P_b$ 는 멱함수형 회귀식의 회귀계수이며,  $Ciz$ 는 遮斷域으로부터 배수량이 발생하기 위한 最少 遮斷貯留量(mm)으로서 일반적인 최대 저류량(Maximum storage capacity)과는 다르다.

한편, 遮斷貯留量으로부터의 증발량  $Eiz^{\Delta t}$ 는 遮斷貯留量과 遮斷貯留量에서 배수량이 발생하기 위한 最少 遮斷貯留量과의 상호비교를 통하여 식 5-6과 같이 유역 증발산량으로부터 계산한다.

$$\begin{aligned}
 Eiz^{\Delta t} &= E_a^{\Delta t} \frac{Siz'^{t+\Delta t}}{Ciz}, & \text{if } Siz'^{t+\Delta t} < Ciz \\
 Eiz^{\Delta t} &= E_a^{\Delta t}, & \text{if } Siz'^{t+\Delta t} \geq Ciz
 \end{aligned}
 \tag{식 5-6}$$

여기서,  $Siz'^{t+\Delta t} = Siz^t + Iiz^{\Delta t} - Diz^{\Delta t}$ ,  $E_a^{\Delta t}$ 는  $\Delta t$  시간 동안의 유역 증발산량(mm)을 나타낸다.

본 연구에 있어서 降雨-流出模型의 遮斷 副模型으로부터의 최종적인 유출량인 通過雨量(Throughfall)  $R_T^{\Delta t}$ 는 식 5-7과 같다.

$$R_T^{\Delta t} = Diz^{\Delta t} + pR^{\Delta t}
 \tag{식 5-7}$$



## 다) 지하수위

강우에 의한 유출현상은 강우의 시공간적 변화성, 불균일한 지표조건, 토양깊이에 따른 수리학적 특성 차이 등으로 인해 매우 복잡한 수문현상을 나타낸다. 이들 모든 자연현상을 수학적으로 정확히 표현한다는 것은 불가능한 일이므로 대부분의 수문모형에서는 유출현상을 개념적으로 단순화하여 수문현상의 재현을 시도하고 있다.

따라서, TOPMODEL에서도 유역의 유출발생기작을 그림 5-17에서와 같이 유역의 지형과 토양에 따른 포화층에서의 흐름과 유출기여면적의 변화로서 단순화하여 유역의 유출현상을 재현하고 있다.

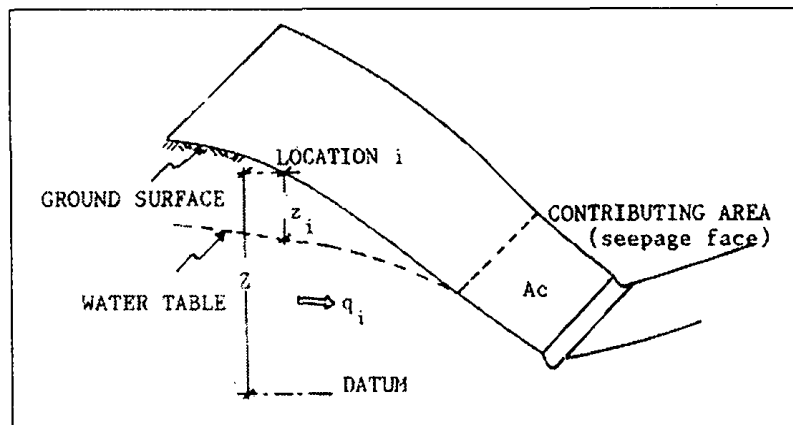


그림 5-17. TOPMODEL의 유출발생기작 모식도

$A_c$  : contributing area to the surface runoff,

$q_i$  : subsurface flow corresponding to an area drained per unit contour length;

$z_i$  : the depth into soil profile of the water table at the location  $i$ ,

$Z$  : bottom of the saturated zone

TOPMODEL에서는 토양단면내의 飽和 透水係數가 지표면으로부터 지하수면까지의 거리에 지수함수적으로 감소한다는 가정하에 깊이에 따른 토양의 飽和 透水係數의 변화를 식 5-8과 같이 정의한다.

$$K_s(z) = K_0 \exp(-fz) \quad (\text{식 5-8})$$

여기서  $z$ 는 지표면으로부터의 깊이(m)를 나타내고,  $K_0$ 는 지표면에서의 透水係數(m/hr), 그리고,  $f$ 는 토양 깊이에 따른 飽和 透水係數의 減少常數(1/m)를 의미한다.  $K_0$ 와  $f$ 는 계산과정에서 전체 유역에서 일정한 값을 가지는 것으로 가정한다.

한편, 유역내 지하수면의 등수경사가 지표면 경사로서 표현될 수 있다는 가정하에 유역내 임의 지점(유역 수치지형도내  $i$ 번째 격자)에서의 깊이  $z_i$ 인 지하수위와 하방 흐름(Downslope flow)은 Darcy's Law를 이용하여 다음 식 5-9와 같이 나타낼 수 있다(Sivapalan *et al.*, 1987).

$$q_i = T_i(z_i) \tan \beta_i \quad (\text{식 5-9})$$

여기서  $\tan \beta_i$ 는  $i$  지점의 지표면 경사이고,  $T_i(z_i)$ 는  $i$  지점의 전도계수(Transmissivity),  $q_i$ 는 단위폭당 유출량을 말한다.

전도계수  $T_i(z_i)$ 의 값은 식 5-8을 토양 깊이에 따라 적분함으로써 얻어진다.

$$T_i(z_i) = \int_{z_i}^Z K_s(x) dx = \frac{K_0}{f} [\exp(-fz_i) - \exp(-fZ)] \quad (\text{식 5-10})$$

$$= \frac{1}{f} [K_s(z_i) - K_s(Z)]$$

여기서  $Z$ 는 飽和帶의 바닥 깊이를 말하는 것으로서, 일반적으로 이 깊이에서의 飽和 透水係數는 깊이  $z_i$ 에서의 포화투수계수에 비교해서 무시할 수 있을 정도의 작은 값을 가진다. 따라서 식 5-10을 이용하여 식 5-9를 다음과 같이 식 5-11로 나타낼 수 있다.

$$q_i = \frac{K_0}{f} \tan \beta_i \exp(-fz_i) = T_0 \tan \beta_i \exp(-fz_i) \quad (\text{식 5-11})$$

여기서  $T_0 = K_0/f$ 로서 포화된 토양의 전도계수(Transmissivity)를 말하며,  $K_0$  및  $f$ 와 같이 전 영역에서 동일한 값을 가지는 것으로 가정한다.

한편, 유역 내에서의 포화 성향은 정상상태(Steady-state)라는 가정 하에서, 식 5-11은 식 5-12와 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha_i U = T_0 \tan \beta_i \exp(-fz_i) \quad (\text{식 5-12})$$

이때,  $U$ 는 공간적으로 일정한 지하수 함양율(Recharge rate to the water table)을 말하며,  $\alpha_i$ 는  $i$  지점의 단위 등고선 길이당 누적 침수면적을 나타낸다.

식 5-12는  $z_i$ 에 대하여 풀면 식 5-13과 같다.

$$z_i = \frac{1}{f} \ln\left(\frac{\alpha_i U}{T_0 \tan \beta_i}\right) \quad (\text{식 5-13})$$

이를 유역 전체 면적(A)에 대하여 합산하면 변수  $z_i$ 의 평균  $\bar{z}$ 는 다음과 같으며,

$$\bar{z} = \frac{1}{A} \int_A z_i dA = \frac{1}{fA} \int_A \left[ -\ln\left(\frac{\alpha_i}{T_0 \tan \beta_i}\right) - \ln U \right] dA \quad (\text{식 5-14})$$

식 5-12와 식 5-14로부터  $\bar{z}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{z} = \frac{1}{f} \left[ -\frac{1}{A} \int_A \ln\left(\frac{\alpha_i}{T_0 \tan \beta_i}\right) dA + f z_i + \ln\left(\frac{\alpha_i}{T_0 \tan \beta_i}\right) \right] \quad (\text{식 5-15})$$

여기서,

$$\lambda = \frac{1}{A} \int_A \ln\left(\frac{\alpha_i}{T_0 \tan \beta_i}\right) dA \quad (\text{식 5-16})$$

라 하면, 식 5-15는

$$f(\bar{z} - z_i) = \left[ \ln\left(\frac{\alpha_i}{T_0 \tan \beta_i}\right) - \lambda \right] \quad (\text{식 5-17})$$

따라서,

$$z_i = \bar{z} - \frac{1}{f} \left[ \ln \left( \frac{\alpha_i}{T_0 \tan \beta_i} \right) - \lambda \right] \quad (\text{식 5-18})$$

이 된다.

한편, 포화된 토양의 전도계수  $T_0$ 는 전 유역에서 동일한 값을 가지는 것으로 가정하였기 때문에 식 5-16은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{1}{A} \int_A \ln \left( \frac{\alpha_i}{T_0 \tan \beta_i} \right) dA = E \left[ \ln \frac{\alpha_i}{T_0 \tan \beta_i} \right] \\ &= E \left[ \ln \frac{\alpha_i}{\tan \beta_i} \right] - \ln T_0 \end{aligned} \quad (\text{식 5-19})$$

여기서 기호  $E$ 는 전 유역면적에 대한 평균값을 의미한다.

식 5-19에서 地形指數의 유역 평균값을  $\bar{\lambda}$  라 하면,

$$\lambda = \bar{\lambda} - \ln T_0 \quad (\text{식 5-20a})$$

$$\bar{\lambda} = E \left[ \ln \frac{\alpha_i}{\tan \beta_i} \right] \quad (\text{식 5-20b})$$

이 되고, 이를 식 5-18에 대입하면,

$$z_i = \bar{z} - \frac{1}{f} \left[ \ln\left(\frac{\alpha_i}{\tan \beta_i}\right) - (\lambda + \ln T_0) \right] = \bar{z} - \frac{1}{f} \left[ \ln\left(\frac{\alpha_i}{\tan \beta_i}\right) - \bar{\lambda} \right]$$

(식 5-21)

이 되며,  $m = 1/f$  라 하면, 유역 수치지형도내  $i$  격자의 지하수위  $z_i$ 는 최종적으로 식 5-22와 같이 나타낼 수 있으며, 이렇게 계산된 지하수위  $z_i$ 는 유역내 임의 지점의 상대적인 貯留未洽量(Storage deficit)을 의미한다. 즉,  $z_i$ 의 값이 0이 되는 지점은 飽和超過越流의 기여면적(Contributing area)을 형성한다.

$$z_i = \bar{z} - m \left[ \ln\left(\frac{\alpha_i}{\tan \beta_i}\right) - \bar{\lambda} \right]$$

(식 5-22)

이때,  $m$ 은 토양 깊이에 따른 飽和透水係數減少常數를 나타내는 매개변수이다.

### 라) 유출량

산림유역의 경우, 산림토양은 근계가 발달하고 토양구조가 잘 형성되어 대공극이 풍부하므로 토양의 통기성, 침투성, 투수성, 수분보유력 등이 매우 크기 때문에, 초과 강우에 의한 Horton의 지표 유출은 발생하기 어려우며, 대부분의 강우는 토양면의 포화로 인한 飽和地表越流나 地表下流出의 형태로 유출되게 된다. 이에 따라, 본 모형에서는 산림유역에서의 유출 성분을 飽和地表越流, 早期地表下流出 및 地表下流出의 3개 성분으로 구분하여 유역의 최종 유출량을 재현하였다.

그림 5-18은 토양내의 물의 거동에 관계되는 뿌리帶(Root zone), 不飽和帶(Unsaturated zone), 飽和帶(Saturated zone)의 3개 권역에서 저류량의 변화 및 유출량과 증발산량의 산정과정에 대한 모식도를 보여주고 있다.

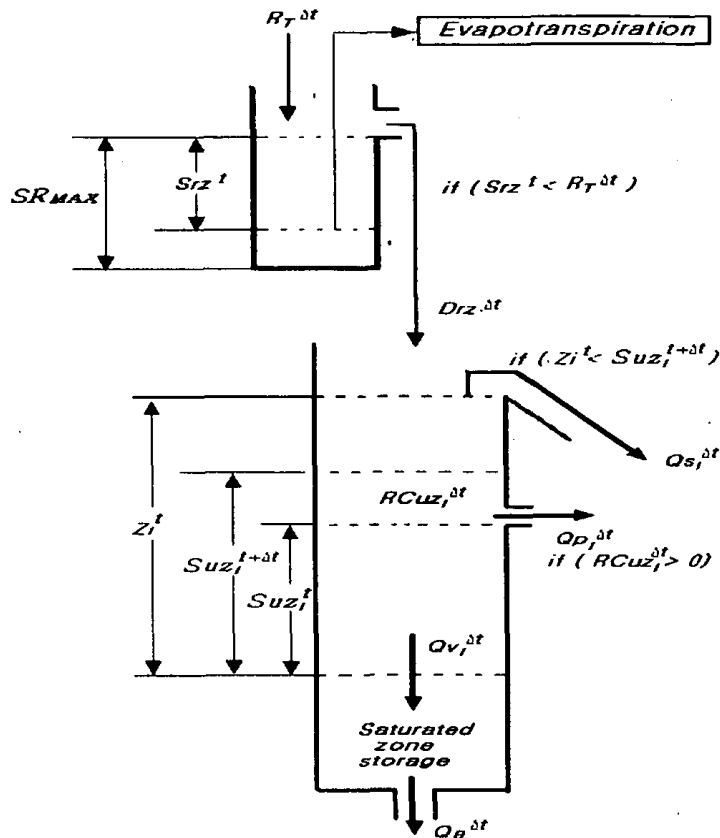


그림 5-18. 임의지점 I에서의 유출, 저류, 증발산 발생기작

$R_T^{\Delta t}$  : Throughfall from the interception zone over the time interval  $\Delta t$ ;  $SR_{MAX}$  : Root zone storage capacity;  $Srz^t$  : Root zone storage deficit;  $Drz^{\Delta t}$  : Drainage from the root zone over the time interval  $\Delta t$ ;  $Suz_i^t$  : Unsaturated zone storage at the time  $t$ ;  $Suz_i^{t+\Delta t}$  : Unsaturated zone storage after the time interval  $\Delta t$ ;  $RCuz_i^{\Delta t}$  : Unsaturated zone storage recharge over the time interval  $\Delta t$ ;  $z_i^t$  : Depth into the soil profile of the water table at the time  $t$ ;  $Q_{Si}^{\Delta t}$  : Saturated overland flow over the time interval  $\Delta t$ ;  $Q_{Pi}^{\Delta t}$  : Prompt subsurface flow over the time interval  $\Delta t$ ;  $Q_{Vi}^{\Delta t}$  : Saturated zone storage recharge over the time interval  $\Delta t$ ;  $Q_B^{\Delta t}$  : Subsurface flow over the time interval  $\Delta t$

### (1) 조기 지표하 유출 및 포화 초과 월류

대부분의 산림지역에서는 초과강우량에 의한 지표유출 발생량이 거의 없으며, 대부분의 강우는 지표하로 빠르게 침투되어 불포화상태로 비교적 속도가 빠른 早期 地表下 流出을 형성한다(太田, 1983; 太田 等, 1983a, b; 太田과 阿部, 1985; 谷誠, 1985). 따라서, 산림지역에서의 이러한 특성을 고려하여 早期 地表下 流出 발생을 본 모형에 고려하였다(Pinol *et al.*, 1997).

본 모형에서는 강우의 토양내 거동을 그림 5-18에서와 같이 뿌리帶, 不飽和帶, 飽和帶의 3단계로서 구분하였으며, 早期 地表下 流出량은 不飽和帶에서, 飽和 超過 越流는 不飽和帶가 완전 포화되었을 때 발생하는 것으로 구성하였다. 한편, 뿌리帶와 飽和帶는 유역을 통합하여 물수지를 계산하나, 不飽和帶의 경우는 수치지형도상의 각 격자별로 개별적인 물수지 계산을 실시한다. 따라서, 不飽和帶로부터의 유출 및 배수 성분인 飽和 超過 越流, 早期 地表下 流出 및 飽和帶 저류 함양량은 각 격자마다 개별적으로 계산되어, 최종적인 유출량 계산시 합산된다.

遮斷域(Interception zone)을 통과하여 토양으로 침투한 우량은 최초 뿌리帶로 유입된다. 뿌리帶에서의 물수지를 연속방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$Sr_z^{t+\Delta t} = Sr_z^t + Dr_z^{\Delta t} + Er_z^{\Delta t} - R_T^{\Delta t} \quad (\text{식 5-23})$$

여기서  $Dr_z^{\Delta t}$ 는  $\Delta t$  시간 동안의 뿌리帶 배수량,  $Er_z^{\Delta t}$ 는  $\Delta t$  시간 동안의 뿌리帶로부터의 증발량,  $R_T^{\Delta t}$ 는  $\Delta t$  시간 동안의 뿌리帶 유입량, 즉



遮斷域으로부터의 통과우량을 말하며,  $Srz^t$ 는 t 시간일 때 뿌리帶의 貯留未洽量(Storage deficit)으로서, 증발수가 발생하기 전까지의 地表土壤水分未洽量(Soil moisture deficit)을 의미한다. 따라서,  $Srz$ 는 유입에 의해 감소하며, 유출에 의해 증가하는 양이 된다.

$\Delta t$  시간 동안의 不飽和帶 유입량  $Drz^{\Delta t}$ 는 뿌리帶에서의 물수지식으로 다음과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} Drz^{\Delta t} &= -(Srz^t - R_T^{\Delta t}) & \text{if } (Srz^t - R_T^{\Delta t}) < 0 \\ Drz^{\Delta t} &= 0 & \text{if } (Srz^t - R_T^{\Delta t}) \geq 0 \end{aligned} \quad (\text{식 5-24})$$

한편, 뿌리帶로부터의 증발량  $Erz^{\Delta t}$ 는 뿌리帶의 貯留未洽량과 뿌리帶의 최대저류량과의 상호비교를 통하여 식 5-25와 같이 유역 증발산량으로부터 계산한다.

$$\begin{aligned} Erz^{\Delta t} &= E_a^{\Delta t} \left(1 - \frac{Srz^{t+\Delta t}}{SR_{MAX}}\right), & \text{if } (SR_{MAX} - Srz^{t+\Delta t}) < E_a^{\Delta t} \\ Erz^{\Delta t} &= SR_{MAX} - Srz^{t+\Delta t}, & \text{if } (SR_{MAX} - Srz^{t+\Delta t}) \geq E_a^{\Delta t} \end{aligned} \quad (\text{식 5-25})$$

여기서,  $Srz^{t+\Delta t} = Srz^t + Drz^{\Delta t} - R_T^{\Delta t}$ , 이고  $E_a^{\Delta t}$ 는  $\Delta t$  시간 동안의 유역 증발산량  $E_a^{\Delta t}$ (mm)에서 遮斷域으로부터의 증발산량  $E_{iz}^{\Delta t}$ (mm)을 뺀 값이다. 한편,  $SR_{MAX}$ 는 뿌리층의 최대 저류용량을 의미하는 매개변수이다.

유역내  $i$  지점의 不飽和帶에서의 저류량 변화를 연속방정식으로 나타내면 식 5-26과 같다.

$$Suz_i^{t+\Delta t} = Suz_i^t + Drz_i^{\Delta t} - Q_{Si}^{\Delta t} - Q_{Pi}^{\Delta t} - Q_{Vi}^{\Delta t} \quad (\text{식 5-26})$$

여기서,  $Suz_i^t$ 는 t 시간일 때의 不飽和帶 貯留量,  $Drz_i^{\Delta t}$ 는  $\Delta t$  시간 동안의 不飽和帶 流入量으로 뿌리帶로부터의 배수량을 나타내며,  $Q_{Si}^{\Delta t}$ 는  $\Delta t$  시간 동안의 飽和 地表 越流,  $Q_{Pi}^{\Delta t}$ 는  $\Delta t$  시간 동안의 早期 地表下 流出,  $Q_{Vi}^{\Delta t}$ 는  $\Delta t$  시간 동안의 飽和帶 貯留 涵養量을 말한다.

그리고,  $\Delta t$  시간동안의 飽和 地表 越流  $Q_{Si}^{\Delta t}$ 는 不飽和帶 流入量  $Drz_i^{\Delta t}$ 로 인하여 i 지점이 완전 포화되었을 때 발생하며 그 양은 식 5-27에서와 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} Q_{Si}^{\Delta t} &= Suz_i^{t+\Delta t} - z_i^t && \text{if } Suz_i^{t+\Delta t} > z_i^t \\ Q_{Si}^{\Delta t} &= 0 && \text{if } Suz_i^{t+\Delta t} \leq z_i^t \end{aligned} \quad (\text{식 5-27})$$

여기서  $Suz_i^{t+\Delta t} = Suz_i^t + Drz_i^{\Delta t}$ 이며  $z_i^t$  t 시간일 때 식 5-22로 계산된 i 지점의 지하수위이다.

$\Delta t$  시간동안의 早期 地表下 流出  $Q_{Pi}^{\Delta t}$ 는 不飽和帶로의 流入量에 의해 발생하는 不飽和帶 貯留 涵養量  $RCuz_i^{\Delta t}$ 으로부터 식 5-28과 같이 계산된다.

$$Q_{Pi}^{\Delta t} = RCuz_i^{\Delta t} \cdot C_P \quad (\text{식 5-28})$$

여기서  $RCuz_i^{\Delta t} = Suz_i^t + Drz^{\Delta t} - Q_{Si}^{\Delta t}$  이며,  $C_p$ 는 早期 地表下 流出의 발생을 나타내는 매개변수이다.

한편,  $\Delta t$  시간동안의 飽和帶 貯留 涵養量  $Q_{Vi}^{\Delta t}$ 는 다음 식 5-29로써 표현된다.

$$Q_{Vi}^{\Delta t} = \frac{Suz_i^t + Drz^{\Delta t} - Q_{Si}^{\Delta t} - Q_{Pi}^{\Delta t}}{z_i^t Td} \quad (\text{식 5-29})$$

여기서  $Td$ 는 포화대 저류 함양에 관계하는 시간 지체상수를 나타내는 매개변수이다.

이러한 뿌리帶 및 不飽和帶에서의 유입과 유출, 저류변화는 유역 수치지형도상의 개별 격자들이 유역 출구에서의 유출량에 독립적으로 기여한다는 기본 가정에 따라, 개별 격자들에 대하여 각각 계산한다.

## (2) 지표하 유출

유역 평균 지하수위의 시간 경과에 따른 변화를 연속방정식으로 나타내면 식 5-30과 같다.

$$\bar{z}^{(t+\Delta t)} = \bar{z}^t - \frac{Q_V^t - Q_B^t}{A} \Delta t \quad (\text{식 5-30})$$

여기서,  $Q_V^t \Delta t$ 는  $\Delta t$  시간 동안의 飽和帶 貯留 涵養量(Saturated zone storage recharge)을 나타내며, 식 5-27에 의해 개별 격자들에서 계산된 결

과를 합산한 것이다.  $Q'_B \Delta t$ 는  $\Delta t$  시간 동안의 地表下 流出量을 나타내며,  $A$ 는 전체 유역면적이다.

전체 유역에서의 地表下 流出量은 식 5-11로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q'_B = \int_L Q'_{B_i} dL = \int_L T_0 \tan \beta \exp\left(-\frac{z'_i}{m}\right) dL \quad (\text{식 5-31})$$

이때,  $L$ 은 모든 수로길이의 2배를 말한다. 또한, 식 5-31은 식 5-22로부터 다음 식 5-32와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} Q'_B &= \int_L T_0 \tan \beta \exp\left(-\frac{\bar{z}'_i}{m} - \bar{\lambda} + \ln \frac{\alpha}{\tan \beta}\right) dL \\ &= T_0 \exp\left(-\frac{\bar{z}'_i}{m}\right) \exp(-\bar{\lambda}) \int_L \alpha dL \end{aligned} \quad (\text{식 5-32})$$

여기서,  $\int_L \alpha dL = A$  (Total area of watershed) 이므로, 전체 유역에서의 地表下 流出量은 최종적으로

$$Q'_B = AT_0 \exp(-\bar{\lambda}) \exp\left(-\frac{\bar{z}'_i}{m}\right) = Q_0 \exp\left(-\frac{\bar{z}'_i}{m}\right) \quad (\text{식 5-33})$$

이 되며, 이때,  $Q_0 = AT_0 \exp(-\bar{\lambda})$  이다.

한편, 강우-유출사상의 재현을 위한 유역 평균 지하수위의 초기값  $\bar{z}^1$ 은 식 5-34를 이용하여 계산한다(Franchini *et al.*, 1996).

$$\bar{z}^1 = -m \ln\left(\frac{Q_{ob}^1}{Q_0}\right) \quad (\text{식 5-34})$$

여기서  $Q_{ob}^1$ 는 강우가 발생하기 전의 초기 하천유량을 말한다.

#### 마) 유역 증발산량

본 연구에서 증발산량의 계산은 Penman 식을 사용하여 潛在 日蒸發散量 (mm/day)을 계산한 후, 해당일의 일조시간을 고려하여 sine curve에 의한 시계열 자료(mm/hr)로 변환하여 사용하였다.

Penman 식에 의한 잠재 증발산량은 自由水面蒸發을 가정하고 있기 때문에 대상지역의 증발산량 보다 많은 값을 보이는 경향이 크다. 이에 따라, 식 5-35와 같이 蒸發散比를 이용하여 유역 증발산량은 산정하였다.

$$E_a = K_e \cdot E_p \quad (\text{식 5-35})$$

여기서  $E_a$ 는 유역 증발산량,  $E_p$ 는 Penman 식에 의한 잠재 증발산량이며,  $K_e$ 는 蒸發散比로서 유역 증발산량의 크기를 표현하는 매개변수이다.

본 모형에서 증발산량은 遮斷域과 뿌리帶에서 발생하며, 遮斷域에서의 증발산 발생이 뿌리帶 보다 우선하는 것으로 구성하였다.

## 나. 임도배수량 및 토사유출량 예측모형의 구성

### 1) 임도에 의한 차단(Interception by road)

임도는 지표유출과 지표하 유출의 경로를 변경시키는 것으로 알려져 있다(Wemple et al., 1996). 임도의 암거(횡단배수로)는 경우에 따라 계류로 직접 연결될 수 있고, 계류 배수망을 효과적으로 확장시킬 수 있는 수로화된 흐름을 만들어 낸다. 임도 암거에서의 유량은 임도 노면으로부터의 유출과 임도 절토사면에 의한 지중 경로의 차단이라는 두 가지 원인으로 인해 생성된다. 유량이 임도 측구와 암거에 도달하게 되면, 다양한 방향으로 방향을 전환할 수 있다. Wemple 등(1996)은 북서 태평양에서의 시험연구로부터 관측된 세 가지 경우, 즉, 계류수로로 직접 경로를 정하는 암거, 임도와 계류를 연결하는 구곡으로 경로를 정하는 암거 그리고 흐름의 하류방향으로 재분배되는 암거에 대해 설명하였다.

여기에서는 임도에 의한 포화지표하유출(saturated subsurface throughflow)과 지표유출(overland flow)의 경로 재설정을 모의하며, 또한, 부가적인 침투초과유출이 임도 노면과 관련된 작은 침투능에 의해 발생함을 보이고자 한다(Luce와 Cundy, 1994).

임도에 의해 차단되는 포화지표하유출량은 임도 절토깊이(절토고: road cut depth)와 현재 포화 부족량(current saturation deficit)의 함수이다. 절토깊이가 포화깊이보다 작으면, 임도에 의해서 차단되는 포화지표하유출은 발생하지 않는다. 절토깊이가 포화깊이보다 크게 되면, 절토깊이 위에서 발생된 모든 지표하유출은 식 5-36에 의해 계산한다.

$$q_{road} = \Gamma^* \left[ \exp\left(\frac{-S_{road-cut}}{m_s}\right) - \exp\left(\frac{-D}{m_s}\right) \right] \quad (\text{식 5-36})$$

여기서,  $q_{road}$ 는 절토사면에서 복류하는 유량이고,  $S_{road-cut}$ 는 절토사면의 높이,  $s$ 는 토양수분부족량,  $m_s$ 는 포화투수계수 감소함수의 감소상수,  $D$ 는 지하수위의 깊이이다.

## 2) 초과강우량

침투는 Green-Ampt 모형(Green과 Ampt, 1911)을 사용하여 계산하였다. 이것은 시험구역에서의 침투과정에 대한 단순화된 설명이며, 균질의 토양단면과 깊이에 따른 초기 토양수분의 균등한 분포를 가정한다. 토양에서의 수분의 이동은 초기 토양수분에서 변하지 않는(정지해 있는) 구역과 완전히 포화된 구역을 분리하는 습윤선단(wetting front)을 전진시키는 형태에 있는 것으로 가정하며, 토양수분의 측면 확산은 무시되었다. 이러한 가정 하에서는, 수분단면(water profile)은 뚜렷한(별개의) 습윤선단 가까이의 하부에 테두리를 두른 직사각형 모형을 취하게 된다.

Mein과 Larson(1973), Swartzendruber(1974)는 Green-Ampt 모형을 사용하여 일정한 강도의 강우 유입 조건을 가진 ponded infiltration을 설명하였다. Morel-Seytoux와 Khanji(1974)는 공기의 이동과  $h_f$ 의 특징에 대한 물리적 해석을 설명하는 모형을 제시하였다. Chu(1978)는 이 모형을 다양한 강도의 강우에 적용하였다.

침투는 2단계의 과정으로 진행된다. 강우사상의 시작시점에서, 물(수분)의 공급률(강우강도와 유입량의 합)  $I$ 가 침투능(infiltration capacity)는  $I_c$ 보다 작을 때, 모든 강우는 침투된다. 실제적인 침투율(infiltration

rate)는 물(수분) 공급률과 같다. 강우가 계속됨에 따라 수분을 흡수하는 토양의 능력은 감소하게 된다. 이 능력이  $\theta$ 와 같아지게 되면, 물은 토양 표면에 고이게 된다. 고임현상이 발생한 후에는, 침투율은 물 공급률보다 작고, 침투능과 같아지게 된다. 토양층의 침투능은 식 5-37과 같이 정의된다.

$$I_c = K_s \frac{(Z_f + h_f + h)}{Z_f} \quad (\text{식 5-37})$$

이고,

$$Z_f = \frac{I}{\theta_s - \theta_i} \quad (\text{식 5-38})$$

이다. 여기서,  $I_c$ 는 침투능(infiltration capacity),  $h_f$ 는 습윤선단 모세관압력수두(wetting front capillary pressure head),  $K_s$ 는 자연포화상태에서의 수리전도도(hydraulic conductivity),  $Z_f$ 는 습윤선단의 깊이(depth of wetting front),  $h$ 는 토양 위의 고임깊이(ponding depth)에 의한 압력수두,  $I$ 는 이전 시간단계에서의 누적 침투깊이(cumulative infiltrated depth),  $\theta_s$ 와  $\theta_i$ 는 각각 포화수분함량과 초기수분함량이다.

응고된 토양의 경우에는, 침투에 대한 응고효과의 양을 측정해야 한다. Hillel과 Gardner(1970)는 Green and Ampt의 법칙을 사용하여 안정한 지각(crust)를 통한 침투의 문제에 대한 해결책을 제시하였다. 그들은 지각과 토양사이의 경계면에서 일정한 수분함량을 가정하였다. 이 가정은 토양의 수리지항에 관련되어 있는 지각의 수리지항의 작은 값들에 대해 큰 오차를 유발하지 않는다(Ahuja, 1974).



Brakensiek와 Rawls(1983)는 조화평균을 이용하여 지각(crust)과 subcrust soil의 두 가지 층의 토양의 효과적인 수리전도도를 결정하는 공식을 제시하였다.

$$K_e = \frac{Z_f}{[(Z_f - Z_c)/K_s] + (Z_c/K_c)} \quad (\text{식 5-39})$$

여기서,  $K_e$ ,  $K_s$ ,  $K_c$ 는 각각 효과적인 포화수리전도도, 토양(subcrust)의 포화수리전도도, 지각의 포화수리전도도이고,  $Z_c$ 는 지각의 두께이다.

이에 따라 침투능은 다음과 같이 계산된다.

습윤선단이 subsoil layer에 도달하기 전에는

$$Z_f \leq Z_c, \quad I_c = K_c \frac{(Z_f + h_f + h)}{Z_f} \quad (\text{식 5-40})$$

이고, 습윤선단이 subsoil layer에 도달하였을 때는 침투능은 다음의 식 5-41을 이용하여 계산된다.

$$Z_f > Z_c, \quad I_c = K_e \frac{(Z_f + h_f + h)}{Z_f} \quad (\text{식 5-41})$$

습윤선단의 깊이는 지각과 subsoil에서의 초기 수분함량과 포화 수분함량의 서로 다른 값으로 식 5-38을 사용하여 계산된다. 그렇게 하게 되면, 모델 적용 시작시점에서 지각과 subcrust soil, 불포화 지각에서의 균질한 습윤선단 모세관 압력수두를 가정하게 되고, 매개변수는 시간에 따라 일정

하다.

토양수분 특성은 다음의 두 가지 방법을 사용하여 각각의 층에 대해  $h_f$ 를 추정하기 위하여 사용되어 왔다. 첫 번째 방법은 Brakensiek(1977)에 의해 개발된 공식에 근거한 것으로서 식 5-42와 같이 표현된다.

$$h_f = 0.76P_b \quad (\text{식 5-42})$$

여기서  $P_b$ 는 bubbling pressure이고 Brooks와 Corey(1964)의 토양과 지각 특성에 적용한 도해과정에 의해 결정되었다. 두 번째 방법은 토양흡인력 수리전도도(soil suction hydraulic conductivity) 관계를 이용한다. Bouwer(1964)는 다음의 관계를 이용하여 측정할 수 있는 토양 특성에 대한 연관된  $h_f$ 의 관계를 제시하였다.

$$h_f = \int_0^{\psi_i} kr(\psi) d\psi \quad (\text{식 5-43})$$

여기서,  $\psi$ 는 압력수두(pressure head),  $\psi_i$ 는 초기압력수두(initial pressure head),  $kr(\psi)$ 는 상대수리전도도( $K(\psi)/K_s$ : relative hydraulic conductivity)이다. Mein과 Larson(1973)은 그들의 모형에서 위의 식을 구체화하였다. Mein과 Farrell(1974)는 식 (36)은  $h_f$ 를 결정하는 적절한 접근법이라는 것을 보여주었다. Neuman(1976)은 식 5-43으로부터 다음과 같은 침투의 초기단계에 대한 공식을 유도하였다.

$$h_f = \frac{1}{2} \int_0^{\psi_i} \left( 1 + \frac{\theta - \theta_i}{\theta_s - \theta_i} \right) kr(\psi) d\psi \quad (\text{식 5-44})$$

여기서,  $\theta$ 는 수분함량이다.

### 3) 토사유출

Carson과 Kirkby(1972), Band(1985), Mathier 등(1989), Huang과 Bradford(1993), Mathier와 Roy(1996)는 유출(혹은 강우 강도)와 사면 경사에 토양 유실을 관련시키기 위하여 power regression equation을 사용하였다. 유출율의 영향으로부터 경사 영향을 구별하기 위하여 아래의 식이 사용되었다. 그것은 유량과 유속에 물리적으로 관련될 수 있기 때문에 비의 영향을 받는 흐름 침식율만이 사용되었다. 유출율과 사면 경사에 대한 계수에 있어서 Band(1985)는  $m$ 과  $n$  계수에 대해 각각 2.02와 0.84라 하였고, Mathier 등(1989)은 각각 1.5와 0.9의 값을 제시하였다. 일정한 유출율에 대해(유출율이 일정할 때), 세류간 침식(interrill erosion)은 사면 경사의 제곱근에 따라 대략적으로 증가한다.

$$Q_s = k Q_w^m (\tan \alpha)^n \quad (\text{식 5-45})$$

여기서,

$Q_s$ 는 침식률( $\text{g m}^{-2} \text{min}^{-1}$ ),  $Q_w$ 는 유출율( $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ ),  $k$ ,  $m$ ,  $n$ 은 회귀 계수(regression coefficient),  $\tan \alpha$ 는 사면의 경사(tangent of slope)이다.

## 다. 수치지형도를 이용한 지형인자의 추출 및 분석

### 1) 지형추출

대부분의 수치지형도는 하계망과 능선이 분리되어 있지 않은 고도행렬로 이루어져 있다 따라서, 고도행렬로부터 필요로 하는 지형자료를 추출하는 방법이 필요하다.

본 연구에서는 수치지형도를 이용하여 추출한 지형인자로서 경사도와 사면방향도, 능선과 하천수로, 분수계 등이었으며, 이를 위하여 이용한 방법은 다음과 같다.

#### 가) 경사도와 사면방향도

수치고도 모델을 이용하기 전에는 지형학자들이 지형을 설명하고 비교할 때 정성적이고 반계량적인 방법을 사용하였다(Evans, 1980). 계량적 분석은 정보의 수집에 많은 시간과 노력을 투자해야 하며, 그 외에도 많은 어려움이 뒤따른다. 일단 고도자료가 수집되고 이것을 고도행렬이나 TIN으로 변환시키면 여러 가지 과정을 통해서 지형의 속성을 지도화시킬 수 있다.

경사는 수평면에 접하는 면으로 정의할 수 있으며, 경사는 고도의 변화율인 기울기와 최대 고도변화율이 일어나는 방향의 두 가지 요소를 가지고 있다(Evans, 1980). 고도의 변화면이나 측고선을 미분하여 얻는 1차 도함수는 기울기나 경사방향을, 2차 도함수는 사면의 요철형태를 나타낸다. 기울기는 일반적으로 퍼센트 혹은 각도로 측정되고 사면방향은 방위각으로 측정된다. 반면에 오목한 정도는 단위거리당 각도 즉, 100미터당 각도로 측정된다.

측고선의 1차 미분함수는 흔히 고도행렬위에 격자를 중심으로 3×3격자 크기의 윈도우(window)를 씌우고 계산하는데, 고도행렬 위에서 윈도우를 연속적으로 이동시키면서 계산을 진행한다(그림 5-19).

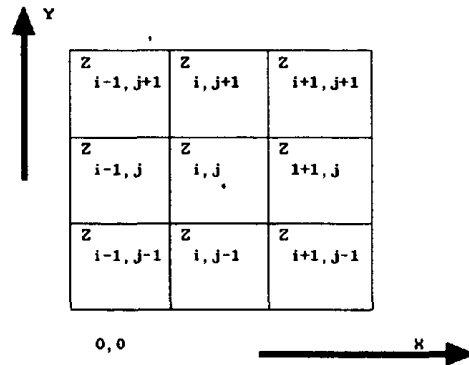


그림 5-19. 윈도우(window or kernel)

기울기는 다음 식으로 구한다.

$$\tan G = [(\delta Z / \delta X)^2 + (\delta Z / \delta Y)^2]^{1/2} \quad (\text{식 5-46})$$

여기서 Z는 고도이고, X, Y는 좌표축이다.

경사방향은 다음과 같이 정의된다.

$$\tan A = \frac{-\delta Z / \delta Y}{\delta Z / \delta X} \quad (-\pi < A < \pi) \quad (\text{식 5-47})$$

오목사면(convexity)과 볼록사면(concavity)은 유사하게 정의되는데, Evans(1980)는 윈도우 내에 있는 자료에 맞춘 매개변수 5개를 가지는 3차식으

로부터 기울기, 사면방향, 오목사면, 볼록사면을 추정했다. 이 때, 계산을 신속하게 수행하기 위해 최소자승법을 사용하지 않고 2차 계수를 계산하였다. 또한, 정차(finite differences)를 사용하여 기울기와 경사방향을 계산할 수 있는데, 점  $i, j$ 에서 X축 방향의 기울기 정차는

$$[\delta Z / \delta X]_{i,j} = (Z_{i+1,j} - Z_{i-1,j}) / \sqrt{2} \delta x \quad (\text{식 5-48})$$

이다. 이 때  $\delta x$ 는 격자중심 사이의 거리이다. 비교를 위해서는 대각선을 따라  $\sqrt{2}$ 를  $\delta X$ 에 곱한다. 이 계산방법은 격자의 고도오차가 경사의 오차를 증폭시키는 단점을 가진다. 수치분석으로 더 좋은 계산방법이 있는데, 동서방향의 기울기는,

$$[\delta Z / \delta X]_{i,j} = [(Z_{i+1,j+1} + 2Z_{i+1,j} + Z_{i+1,j-1}) - Z_{i-1,j+1} + 2Z_{i-1,j} + Z_{i-1,j-1}] / 8\delta X \quad (\text{식 5-49})$$

와 같이 정의되고,  
남북방향의 기울기는

$$[\delta Z / \delta Y]_{i,j} = [(Z_{i+1,j+1} + 2Z_{i,j+1} + Z_{i-1,j+1}) - Z_{i+1,j-1} + 2Z_{i,j-1} + Z_{i-1,j-1}] / 8\delta Y \quad (\text{식 5-50})$$

으로 계산된다.

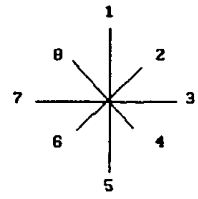
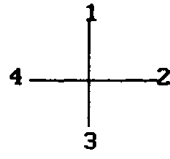
## 나) 능선과 하천유로의 추적

능선을 찾아내기 위해서는 불룩한 지점을, 하천유로를 탐지하기 위해서는 오목한 지점을 모두 찾아내야 한다. Peucker와 Douglas(1975)는 이 작업을 위해 네 개의 격자로 된 윈도를 고도행렬 위로 이동시켜 나가는 단순한 알고리즘을 고안했다. 하천유로를 찾기 위해서는 최고의 고도를 가진 격자를, 능선을 추정하기 위해서는 가장 낮은 고도의 격자를 차례로 표시해 나간다. 이와 같은 작업후에 표시되지 않고 남아 있는 격자들은 각각 하천유로나 능선을 나타내며, 다음 단계는 표시되지 않은 격자들을 선의 형태로 연결하는 것이다.

이러한 단순한 알고리즘이 잘 작동되더라도 이것은 하천지형학의 원리에 바탕을 두고 있는 것은 아니다. Mark(1984)는 지형학적 원리를 염두에 두고 DEM에서 유로를 모의해 낼 수 있는 알고리즘을 연구했다. 그의 알고리즘은 '곡면의 한 점과 최하점 사이의 최단거리가 가장 급한 하향선이다'라는 Cauchy 정리에 기초를 둔 것이다. 만약 고도면을 비용면(cost surface)으로 대체시키면 가장 급한 하향선이 최소비용로를 나타낸다.

이와 같은 형태의 알고리즘을 그림 5-20으로 설명하면 다음과 같다. 유로의 방향을 4개 또는 8개로 정하고 각 방향에 번호를 부여한다(그림 5-20a). 하계망의 출구와 유로가 시작되는 격자의 위치를 지정해야 한다. 그림 5-20b)에서 출구는 0으로 나타나 있다. 출구를 나타내는 격자를 제외하고 각 격자의 고도는 3×3 윈도 내에 있는 8개 격자의 고도와 비교되고 8개 가운데 가장 낮은 고도를 가지는 격자의 방향이 표시된다(그림 5-20c). 그림 5-20c를 바탕으로 방향을 화살표로 연결하여 하계망을 그린다(그림 5-20d).

10	9	11	12
8	7	6	7
5	4	3	4
5	0	1	5



(a) 고도행렬

(b) 4방향,

8방향

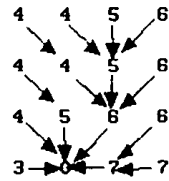
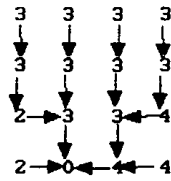
4방향을 기초로 얻은 유로방향:

3	3	3	3
3	3	3	3
2	3	3	4
2	0	4	4

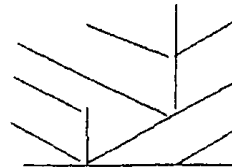
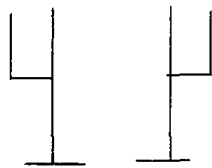
8방향을 기초로 얻은 유로방향:

4	4	5	6
4	4	5	6
4	5	6	6
3	0	7	7

(c) 유로방향



(d) 유로방향



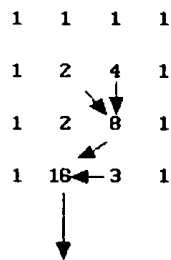
(e) 하계망

그림 5-20. 고도행렬과 하계망

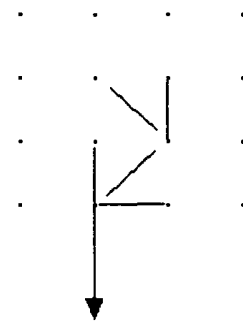


유량은 유로가 지나가는 격자의 수와 면적을 통해 추정할 수 있다. 실제 세계에서는 유량이 적으면 유로를 형성하지 못하고 지표유출(overland flow)의 형태로 흐르기 때문에, 어떤 임계치를 넘어설 때부터 유로를 형성한다고 간주할 수 있다. 단순한 형태로 이 과정을 그림 5-20c에서 출발하여 살펴보자. 축적되는 유량을 계산하기 위해서 각 셀을 0으로 놓고 시작하여, 1을 유로를 따라 각 셀에서 더해나가면 그림 5-21a가 된다. 유로의 유량 임계치를 2라고 가정하면 유로는 그림 5-21b로 나타난다. 이렇게 계산된 유로는 유량에 따라 색채나 농담으로 표현할 수 있다.

1	2	1	1
1	2	4	1
1	2	8	1
1	16	3	1



(a) 그림 3-17(b)의 8방향도에서 유로를 따라 셀을 더한 것으로 유량을 나타낸다.



(b) 유량과 유로

그림 5-21. 유량과 유로

### 다) 분수계의 결정

데이터베이스에서 하나의 하천유역을 분리해 내기 위해서는 유역의 분수계(divide)를 구성하는 경계선을 찾아야 한다. 이 작업을 위해 Mark 등(1984)은 다음과 같은 알고리즘을 제안하였다. 즉, 각각의 격자에 대해서 기울기와 사면방향을 계산하고, 대화식으로 유역의 출구를 확인한다. 유역은 유역의 출구보다 상류에 있는 모든 격자로 정의된다. 출구에서부터 3×3 윈도를 씌우고, 어떤 격자의 사면방향이 윈도의 중심점을 향하고 그 격자를 중심점보다 상류지역인 것으로 간주한다. 각 격자의 사면방향 윈도 내에서 그림 5-19와 같이 추정된다.

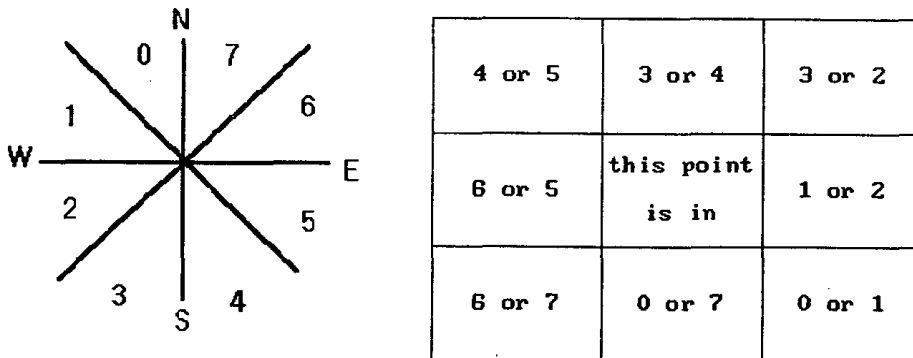


그림 5-22. 방향 등급의 결정(a)과 유역내 화소의 확인

알고리즘을 출구에서 시작하여 DEM의 전반에 반복적으로 적용한다. 이미 유역 내에 있다고 확인된 격자(그림 5-22에서 'in')에 윈도 중심을 설정하고 8개의 이웃 격자를 순차적으로 검사한다. 만약 이웃한 격자가 이미 유역 내에 있다는 것이 확인된 것이라면 그것은 무시된다. 상류에 있는 타 격자를 윈도의 새로운 중심으로 설정하며, 알고리즘은 능선이나 DEM의 가장자리

에 도달할 때까지 수치고도 모델을 훑어 나간다. 전체 분지의 윤곽이 확인 될 때까지 이 과정이 반복되는데 모든 격자는 한 번씩 검사되며 분수계 밖에 있는 격자는 검사에서 제외된다.

## 2) 유사이송지수

### 가) 유사이송지수

유사이송지수(Sediment Transport Index; STI)는 계산 및 이용이 간편하고 적은 자료로도 효과적인 결과를 도출할 수 있는 장점을 가지고 있어서 침식예측모형에서 많이 이용되고 있다(Moore and Burch, 1986a, 1986b; Moore et al., 1988; Moore and Wilson, 1992). 이것은 다음으로부터 계산된다.

$$T_s = (A_s/22.13)^m * (\sin \beta / 0.0896)^n \quad (\text{식 5-51})$$

여기서,  $T_s$ 는 유사이송능(sediment transport capacity),  $A_s$ 는 단위 등고선 길이 당 상부사면 기여면적,  $\sin \beta$ 는 경사도,  $m$ 과  $n$ 은 사면길이에 의존하는 상수이다. 유사이송지수는 다양한 해상도를 가진 수치지형도(Zhang and Montgomery, 1994)와 다양한 하천유로의 추적방법(Quinn et al., 1991; Quinn et al., 1995)을 적용하여 시험되어 왔다.

침식 예측 모형에 있어서, 사면(경사도와 길이)은 침식 과정을 진행시키는데 있어 지배적인 역할을 하는 것으로 오랫동안 인식되어 왔다(McGregor, 1957; Desmet and Govers, 1996). 식 5-51의 첫 번째 부분인  $A_s$ 는 얼마나

많은 양의 물이 상류 지역으로부터 모이는가를 결정하고, 따라서 지표유출의 기여면적을 의미한다. 반면, 두 번째 부분은 사면 인자를 계산하며, 지표유출이 하부사면으로 이동하는 속도를 결정하는데, 여기서 sine 값은 하부사면방향으로의 중력에 의한 가속력을 나타낸다(McCullagh, 1978). 유사이송지수가 높은 지역은 높은 침식 위험 지역에 해당하는 반면, 지수가 낮은 지역은 퇴적지역을 나타내고, 따라서 낮은 침식위험 지역으로 고려된다.

## 나) 유사이송지수의 도출

Julien과 Simons(1985)는 대부분의 토사 이동 방정식은 다음의 형태로 표현된다고 하였다.

$$q_s = \Phi 2q^m (\sin \beta)^n i^\delta (1 - \tau_0 / \tau)^\epsilon \quad (\text{식 5-52})$$

여기서,  $i$ 는 강우강도,  $\Phi$ ,  $n$ ,  $m$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$ 는 실험적 혹은 물리적 기반 계수이다. 처음 세 가지 항목들( $\sin \beta$ ,  $q$ ,  $i$ )은 흐름에 의한 잠재적인 침식 혹은 이동을 나타낸다. 그리고 그것은 침식에 대한 토양의 저항성을 반영하는 마지막 항(전단 응력(shear stress) 항)에 의해 감소된다. 강우강도 항은 많은 토사 이동 방정식에서 역시 무시된다(즉,  $\delta=0$ ).

초과 강우량(rainfall excess)이 유역에 대해 균등하게 발생된다고 가정한다면,  $q=A_s i_e$ 이 된다. 여기서,  $A_s$  = 등고선(혹은 세류)의 단위 폭 당 상부사면 기여면적 혹은 특정 집수(유역) 면적( $m^2 m^{-1}$ )이고,  $i_e$ 는 초과 강우량 비율( $m s^{-1}$ )이다.

한편, 규모가 큰 유출과 침식에 대해, 유출토사의 발생량이 토사를 이동시키는 흐름의 능력에 의해서만 제한되는 지역의 경우, 침식 패턴에 지배적

인 영향을 미칠 수 있다. WEPP 이론에 있어서 이 이송제한이론은  $q_s = T_c^*$  일 때에 발생하며, Manning 공식을 이용하여 지표유출의 수리특성을 난류로 나타낼 수 있다. WEPP 이론에서는 토사가 누구(rill)에 흐름이 집중되는 지역으로부터 이동한다고 가정한다. 따라서, 누구의 동수반경과 누구의 횡단면적 사이의 관계를 근사시킴으로서(Moore and Burch, 1986), 누구에서의 토사이송능력을  $q$ (누구의 단위 폭 당 유량이 아니라 유역의 단위 폭 당 유량)와 경사각  $\beta$ 의 형태로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_c = k_t (\rho g)^{1.5} (R_s n U^2)^{0.56} q^{0.56} (\sin \beta)^{1.22} \text{ 이고 } q = i_c A_s \text{ (식 5-53a)}$$

$$T_c = k_t (\rho g)^{1.5} (R_s i_c n U^2)^{0.56} A_s^{0.56} (\sin \beta)^{1.22} \text{ (식 5-53b)}$$

여기서,  $n$ 은 Manning의 조도 계수이고  $R_s$ 는 누구량( $m/rill$ )이다. 식 5-53을 무차원의 형태로 나타내면 무차원의 유사이동능(sediment transport capacity)  $T_c^*$ 는  $A_s = 22.13 m^2 m^{-1}$ ,  $\tan \beta = 0.09$ (USLE의 LS 인자와 비교하였을 때)일 때 1이 된다. 따라서,

$$T_c^* = (A_s / 22.13)^{0.56} (\sin \beta / 0.0896)^{1.22} \text{ (식 5-54)}$$

와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 0.56과 1.22는 slope-length와 slope-angle와 slope-angle 요소에 해당하고,  $m$ 과  $n$ 은 각각 USLE에서의 LS 인자를 나타내며, 일반적인 형태로서 식 5-55와 같이 사용된다.

$$T_c^* = (A_s / 22.13)^m (\sin \beta / 0.0896)^n S \text{ (식 5-55)}$$

여기서,  $m=0.6(0.4\sim0.6)$ ,  $n=1.3(1.2\sim1.3)$ 은 자연 경관에서의 토양침식에 대한 수문의 영향을 3차원 지형으로 지도화하기 위해 사용될 수 있다.  $A_s$  항은 단지 2차원의 수렴하지 않고, 발산하지 않는 사면에 대해서만 적용할 수 있는 USLE와 RUSLE의  $\lambda$ 항과 달라서, 토양 침식에 대한 수렴하는 지형과 발산하는 지형의 영향에 대한 특성을 설명할 수 있다.

#### 라. 산지개발에 따른 산원수 환경영향기법 및 산원수자원의 종합적 관리시스템의 구조

본 연구에서 개발한 산지개발에 따른 산원수 환경영향기법 및 산원수자원의 종합적 관리시스템의 구조는 그림 5-23과 같다.

그림 5-23에서 보는 바와 같이 본 시스템은 크게 수치지형도를 이용한 지형정보의 처리부분과 수문 및 환경자료와 지형자료를 이용하여 유역 수문 환경 변화를 모의발생·재현하는 부분으로 구분된다. 지형정보의 처리부분에서는 해당지역의 등고선 지형도에 근거한 수치지형도를 이용하여 사면방향 및 경사와 흐름방향, 소유역 구분 등을 수행하며, 이를 바탕으로 해당 유역내의 지형지수 및 습윤지수와 유사이송지수, 척약지수 등의 공간적 분포도를 작성한다.

한편, 유역 수문환경의 재현부분은 유역 환경자료와 관측된 수문자료 및 지형정보 등을 이용하여 유역의 강우-유출현상 및 토사유출현상을 모의·재현하며, 이를 바탕으로 유역내의 수자원 환경변화의 정도를 분석한다.

본 시스템은 특히, 산림지역에 있어서의 임도개설 등 각종 개발사업에 대한 환경자료를 이용하여 사업시행으로 인한 수자원량 및 토사유출량 변화 등의 수문환경변화를 평가할 수 있도록 하여, 개발사업으로 인한 변화를 사후 평가하거나, 사전 예측할 수 있도록 작성하였다.

본 시스템의 결과물은 해당유역에 대한 수문환경변화의 공간분포도를 출력할 수 있으며, 이를 통해 임도 개설 및 각종 산지개발사업 계획 입안 및 사후 평가에 유용하게 이용될 수 있는 자료를 제공한다.

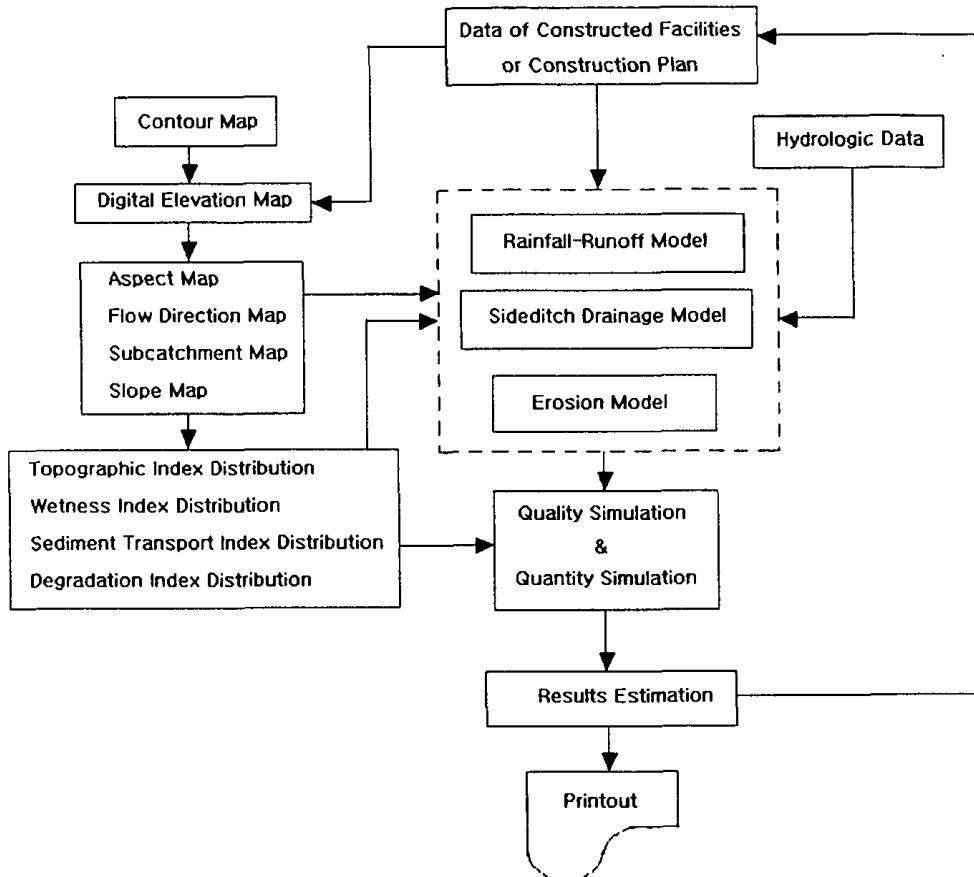


그림 5-23. 산지개발에 따른 산원수 환경영향 평가기법 및 산원수자원의 종합적 관리시스템 흐름도

## 제 4 절 결과 및 고찰

### 1. 산림유역의 강우-유출량

#### 가. 降雨量

표 5-4는 추산 시험유역에서 1991년 5월부터 1999년 10월까지 측정된 강수량 자료이다.

표 5-4. 추산 시험유역의 월강수량

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Total
1991	-	-	-	-	36.7	262.9	515.9	240.0	176.4	2.7	18.9	42.1	1,295.6
1992	17.8	42.1	65.9	126.7	158.0	28.4	215.0	131.4	279.8	32.4	9.5	36.4	1,143.4
1993	13.1	34.2	58.3	33.0	138.7	299.3	235.1	633.9	28.9	36.2	82.9	18.7	1,612.3
1994	36.6	31.6	28.6	96.1	174.3	31.3	59.6	423.3	29.7	136.1	67.2	17.0	1,131.4
1995	30.5	22.5	49.4	160.2	131.5	110.6	313.2	201.1	52.7	53.7	12.9	0.4	1,138.7
1996	31.3	3.7	157.5	90.0	40.5	274.0	211.5	79.0	38.0	39.9	71.0	10.5	1,046.9
1997	8.0	17.0	44.0	47.0	167.0	284.5	311.5	318.5	60.0	12.5	164.5	58.0	1,492.5
1998	29.0	38.0	81.5	191.5	151.5	420.5	247.5	528.5	235.0	50.0	17.5	2.0	1,992.5
1999	55.0	40	143.5	98.5	61.0	5.0	519.0	353.5	275.5	88.5	-	-	1,639.5
Avg.	27.7	28.64	78.59	105.3 8	117.6 9	190.7	292.0	323.2	130.6 7	50.2	55.6	23.1	1423.47
1981 ~ 1990	26.8	47.0	61.7	108.6	125.7	285.5	288.4	359.4	222.2	70.7	52.8	15.3	1,664.1



시험기간의 강수량은 102개월에 걸쳐 총 12,492.8mm이었다. 각 연도별 연강수량을 평년치 (1981년~1990년)와 비교한 결과, 1991년도와 1993년도, 1999년도는 평년치와 유사한 결과를 나타냈지만, 1992년도(평년치의 68.7%), 1994년도(평년치의 68.0%) 및 1995년도(평년치의 68.4%)는 적은 강수량을 보였으며, 특히 1996년도는 평년치의 약 62.9%에 불과하여 관측년도 중 가장 적은 강수량을 보였다. 한편, 1998년도에는 연강수량이 1,992.5mm에 달하였던 것으로 관측되어 가장 많은 연강수량을 보였다.

또한, 관측기간동안 각 월별로 월강수량을 평균한 결과, 3월과 12월을 제외하고는 대부분 평년치보다 적었으며, 특히 9월의 경우는 평년치의 45%에 불과한 적은 강수량을 나타내었다. 따라서, 관측기간동안의 연강수량은 평년치보다 401.7mm가 적은 1,262.4mm에 불과하여, 1990년대에 들어와 연구지역의 연강수량이 크게 감소하였다는 것을 알 수 있었다.

그러나, 1998년도의 경우에는 6월과 8월의 강수량이 평년치보다 매우 많았던 것으로 나타났으며, 특히 8월의 경우에는 국지적인 집중형 강우의 발생으로 인하여 인근 지리산 및 백운산 지역에 피해가 우심하였다. 한편, 1999년도의 경우에는 6월의 월강수량이 5.0mm에 불과하여 연구대상지에 한발이 심하게 발생하였던 것으로 나타났으며, 이에 반하여 7월의 월강수량은 519.0mm로서 평년치의 두배에 가까운 강수량이 집중하였던 것으로 나타났

## 나. 流出量

표 5-5는 북문골 시험유역 및 바람골 시험유역 유출수량 관측시설에서 1991년 5월 11일부터 1999년 10월 31일까지 관측된 월강수량 월유출량 및 월유출률을 나타낸 것이다.

이 연구에서 측정기간중 두 시험구역의 총유입량을 보면, 북문골 시험구역에서는 1,870,893.8m<sup>3</sup>이고, 바람골 시험구역에서는 1,823,524.4m<sup>3</sup>으로 측정되었다. 두 구역에서의 유출량을 보면 북문골이 측정기간중 929,727.1m<sup>3</sup>으로 유입량에 대한 유출량의 비인 유출률이 49.7%였고, 바람골 시험구역은 유출량이 649,266.4m<sup>3</sup>으로 유출률은 35.6%로 나타나 북문골 시험구역의 유출률이 바람골 시험구역 보다 다소 높게 나타났다.

북문골 시험구역의 유출률이 바람골 시험구역에 비하여 다소 높게 나타나는 것은 두 시험구역간의 식생분포, 임목축적 및 토성 등의 구역환경인자의 차이에 기인하는 것으로 추정된다(禹保命 等, 1993, 1994, 1995, 1996, 1998, 1999).

두 구역에서의 유출률은 朴成宇(1970)가 보고한 우리나라의 유출률 56%와 金景河(1987), 柳澤圭와 李天龍(1980), 李宗學 等(1989)이 보고한 사방지에서의 유출률 71.3%에 비해 적은 유출률을 보이고 있다.

표 5-5. 추산 시험유역의 월강수량 및 월유출량

Month	Rainfall (mm)	Bukmoongol		Barangol	
		Runoff (mm/month)	Runoff rates (%)	Runoff (mm/month)	Runoff rates (%)
1991					
May	36.7	16.4	44.7	16.1	44.0
June	262.9	77.0	29.3	67.8	25.8
July	515.9	221.3	42.9	250.7	48.6
August	240.0	144.7	60.3	121.7	50.7
September	176.4	146.4	83.0	118.0	66.9
October	2.7	30.4	1,126.6	33.9	1256.2
December	18.9	34.0	179.9	34.2	180.7
November	42.1	32.5	77.2	19.6	46.6
Sub-total	1,295.6	702.7	54.3	662	51.1
1992					
January	17.8	33.6	188.8	24.4	136.9
February	42.1	19.4	46.0	21.0	49.8
March	65.9	16.9	25.7	19.0	28.8
April	126.7	29.5	23.3	26.4	20.8
May	158.0	67.2	42.5	49.9	31.6
June	28.4	18.4	64.8	22.8	80.4
July	215.0	52.7	24.5	24.9	11.6
August	131.4	40.2	30.6	22.1	16.8
September	279.8	100.7	36.0	49.8	17.8
October	32.4	64.8	199.9	24.8	76.6
December	9.5	23.2	243.8	23.5	246.9
November	36.4	28.2	77.5	38.6	106.1
Sub-total	1,143.4	494.8	43.3	347.2	30.4
1993					
January	13.1	5.2	39.5	11.3	86.4
February	34.2	3.8	11.0	10.1	29.4
March	58.3	9.2	15.8	11.8	20.2
April	33.0	8.2	24.8	8.7	26.4
May	138.7	19.8	14.3	19.0	13.7
June	299.3	49.1	16.4	51.8	17.3
July	235.1	87.9	37.4	73.8	31.4
August	633.9	262.4	41.4	251.7	39.7
September	28.9	33.4	115.7	88.4	306.0
October	36.2	15.6	43.2	46.1	127.3
December	82.9	9.8	11.8	6.8	8.2
November	18.7	4.1	21.7	9.6	51.5
Sub-total	1,612.3	508.5	31.5	589.1	36.2

표 5-5. 계속

Month	Rainfall (mm)	Bukmoongol		Baramgol	
		Runoff (mm/month)	Runoff rates (%)	Runoff (mm/month)	Runoff rates (%)
1994					
January	36.6	9.4	25.6	5.2	14.1
February	31.6	9.5	30.2	8.1	25.7
March	28.6	11.0	38.4	7.8	27.2
April	96.1	19.0	19.8	11.4	11.9
May	174.3	22.0	12.6	16.7	9.6
June	31.3	10.5	33.5	9.9	31.7
July	59.6	11.1	18.7	9.5	16.0
August	423.3	132.1	31.2	142.2	33.6
September	29.7	22.4	75.5	26.2	88.1
October	136.1	37.7	27.7	36.2	26.6
December	67.2	27.5	40.9	14.4	21.4
November	17.0	19.1	112.5	11.9	70.2
Sub-total	1,131.4	331.3	29.3	299.5	26.5
1995					
January	30.5	15.4	50.6	11.9	39.1
February	22.5	17.3	76.9	10.8	47.9
March	49.4	26.9	54.4	16.7	33.9
April	160.2	47.7	29.8	33.0	20.6
May	131.5	51.2	38.9	31.4	23.9
June	110.6	39.8	36.0	42.9	38.8
July	313.2	141.3	45.1	134.4	42.9
August	201.1	88.9	44.2	73.0	36.3
September	52.7	41.2	78.1	50.2	95.3
October	53.7	24.2	45.1	26.4	49.2
December	12.9	12.5	96.9	6.8	52.9
November	0.4	10.2	2,543.8	5.3	1,316.4
Sub-total	1,138.7	516.6	45.3	442.8	38.9
1996					
January	31.3	9.9	31.7	10.5	33.4
February	3.7	10.0	269.8	9.5	257.6
March	157.5	48.2	30.6	40.5	25.7
April	90.0	23.9	26.6	37.6	41.8
May	40.5	19.0	46.9	37.8	93.4
June	274.0	129.1	47.1	88.8	32.4
July	211.5	149.3	70.6	144.0	68.1
August	79.0	17.5	22.1	28.5	36.1
September	38.0	7.3	19.3	4.3	11.2
October	39.9	4.9	12.2	9.1	22.8
November	71.0	36.6	51.6	20.5	28.9
December	10.5	18.8	178.9	12.8	121.5
Sub-total	1,046.9	474.5	45.3	443.9	42.4

표 5-5. 계속

Month	Rainfall (mm)	Bukmoongol		Baramgol	
		Runoff (mm/month)	Runoff rates (%)	Runoff (mm/month)	Runoff rates (%)
1997					
January	8.0	4.7	58.6	4.8	59.4
February	17.0	4.2	24.8	4.6	26.9
March	44.0	29.8	67.8	29.1	66.1
April	47.0	11.2	23.9	9.8	20.9
May	167.0	25.4	15.2	62.5	37.4
June	284.5	63.4	22.3	53.2	18.7
July	311.5	224.0	71.9	136.7	43.9
August	318.5	208.0	65.3	176.1	55.3
September	60.0	45.7	76.2	55.7	92.9
October	12.5	26.2	209.6	31.4	251.0
December	164.5	42.8	26.0	10.9	6.6
November	58.0	46.4	80.0	16.3	28.1
Sub-total	1,492.5	731.8	49.0	591.1	39.6
1998					
January	29.0	26.1	90.1	10.4	35.7
February	38.0	22.2	58.4	3.5	9.1
March	81.5	31.8	39.0	2.6	3.2
April	191.5	64.9	33.9	32.4	16.9
May	151.5	59.1	39.0	37.1	24.5
June	420.5	164.0	39.0	98.8	23.5
July	247.5	158.9	64.2	35.1	14.2
August	528.5	502.1	95.0	283.8	53.7
September	235.0	79.0	33.6	33.4	14.2
October	50.0	117.7	235.4	10.6	21.1
November	17.5	56.2	321.3	2.5	14.2
December	2.0	42.2	2110.2	1.7	87.4
Sub-total	1,992.5	1,324.2	66.5	551.9	27.7
1999					
January	55.0	40.5	73.6	1.3	2.4
February	40.0	12.6	31.5	1.0	2.4
March	143.5	74.9	52.2	11.5	8.0
April	98.5	39.4	40.0	23.5	23.9
May	61.0	11.6	19.0	3.8	6.3
June	5.0	24.2	483.2	1.8	36.7
July	519.0	397.0	76.5	267.3	51.5
August	353.5	262.3	74.2	120.5	34.1
September	275.5	205.0	74.4	79.9	29.0
October	88.5	57.0	64.4	16.7	18.9
Sub-total	1,639.5	1,124.5	68.6	527.3	32.2
Total	12,492.8	6208.9	49.7	4454.8	35.6

## 2. 산지개발로 인한 토사유출

### 가. 임도 토사유출

#### 1) 임도 측구 배수량

연구기간 동안 관측된 강우사상 중에서 뚜렷한 임도 측구 배수량이 관측된 9개 강우사상을 분석 대상으로 선정하였다.

표 5-6에서 보는 바와 같이, 뚜렷한 임도 측구 배수량이 관측된 9차례의 강우사상을 대상으로 임도 측구를 통한 배수량을 측정한 결과, 단위면적당 최대 303.0mm(임도 측구 배수량 조사구 1번 : 1998년 7월 5일 총강우량 317mm 호우발생시)의 배수량이 관측되었으며, 최소 33.2mm(임도 측구 배수량 조사구 2번 : 1999년 7월 11일 총강우량 71.5mm 호우발생시)의 배수량이 관측되었다. 연구기간동안 측구의 배수량은 단위면적당 평균 124.9mm의 배수량이 발생하는 것으로 나타났다.

조사구 별 배수량의 경우, 조사구 1번의 배수량은 단위면적당 35.2mm~303.0mm의 범위에 있었으며, 단위면적당 평균은 140.5mm이었다. 조사구 2번의 배수량은 단위면적당 33.2mm~216.5mm의 범위에 있었으며, 단위면적당 평균 109.4mm의 값을 나타냈다. 조사구 3번의 배수량은 단위면적당 41.3mm~250.1mm의 범위에 있었으며, 단위면적당 평균 124.7mm의 값을 나타냈다.

그림 5-24에서 그림 5-26까지는 각 조사구별로 강우량과 임도 측구 배수량의 비교를 나타내고 있다. 그림 5-24에서 그림 5-26까지에서 볼 수 있듯이 임도 측구 배수량 조사구 1, 2, 3 모두 강우량이 많을수록 임도 측구에서의 배수량도 많이 발생하는 것으로 나타났다.

표 5-6. 명성 시험유역 임도측구 토사유출량 측정시험지에서 발생한 배수량

Storm Number	Rainfall (mm)	Drainage(mm)		
		Plot 1	Plot 2	Plot 3
97년 6월 28일	95.5	79.8	92.0	61.9
97년 7월 8일	222.0	164.8	144.3	209.7
97년 7월 24일	118.0	66.0	55.3	72.9
97년 8월 8일	245.0	219.1	169.1	174.0
97년 9월 0일	69.0	35.2	41.2	41.3
98년 7월 5일	317.0	303.0	216.5	250.1
98년 8월 2일	272.0	248.2	137.2	182.2
99년 7월 11일	71.5	59.3	33.2	51.5
99년 7월 25일	107.5	89.5	96.0	78.8
합계	1517.5	1264.9	984.8	1122.3

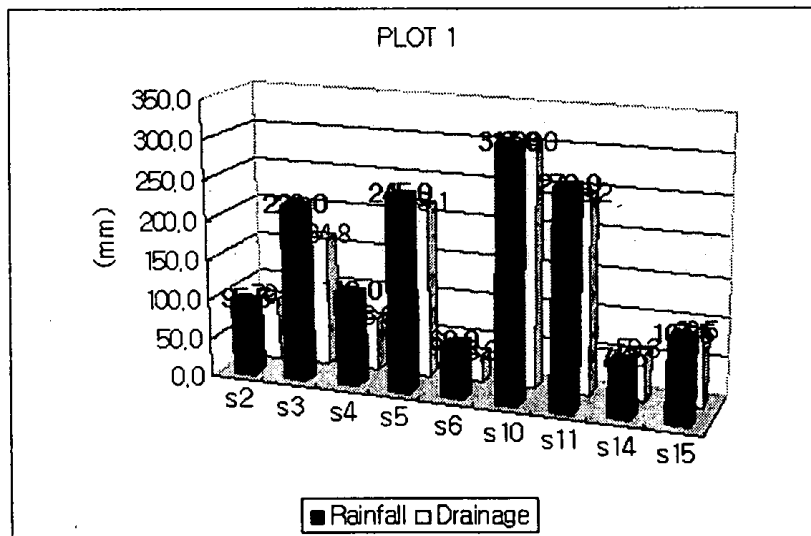


그림 5-24. 임도 측구시험지 1에서의 강수량과 배수량 비교

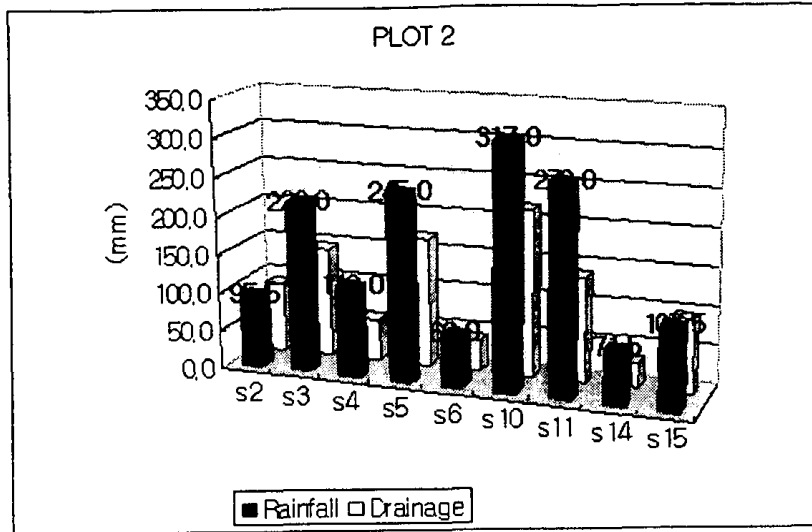


그림 5-25. 임도 측구시험지 2에서의 강수량과 배수량 비교

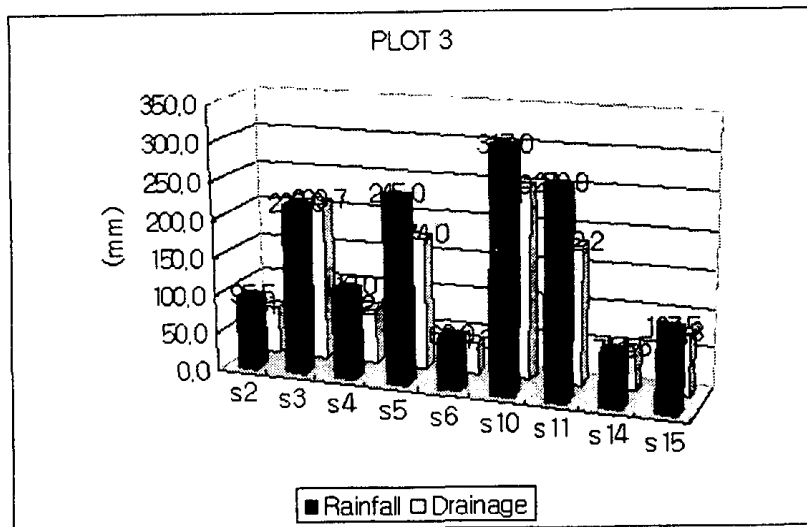


그림 5-26. 임도 측구시험지 3에서의 강수량과 배수량 비교

그림 5-27은 시험구역의 각 임도 측구 배수량 조사구에서 관측된 측구 배수량과 시험구역의 9개 강우사상의 강우량을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 조사구 2번에서의 측구 배수량이 다른 조사구에 비해 적게 나타나고



있음을 알 수 있다. 또한 조사구 1번의 측구 배수량이 다른 조사구에 비해 다소 높게 나타나고 있음을 알 수 있다.

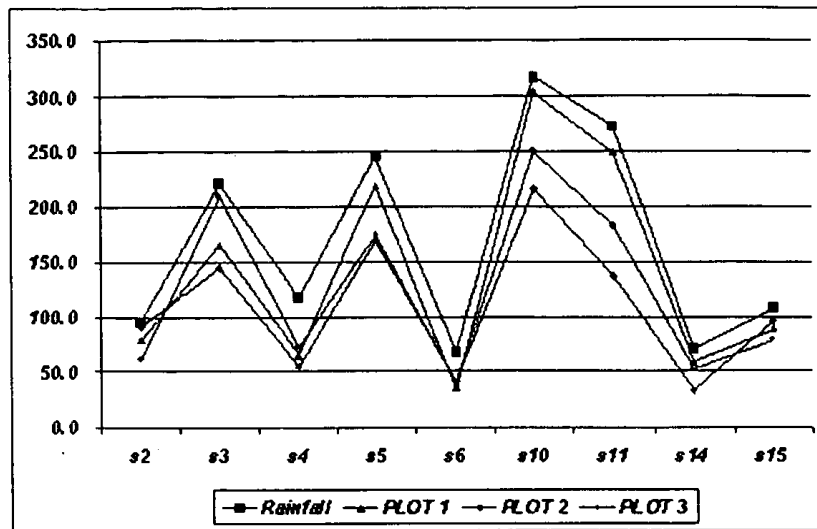


그림 5-27. 명성 시험유역 임도측구 유출토사량 측정시험지에서 측정된 강수량과 배수량 비교

## 2) 임도 측구 토사유출량

연구기간동안 관측된 11차례의 호우사상을 대상으로 측구를 통한 토사유출량을 측정된 결과, 관측기간동안에 조사구 연장 1,028m에서 총 17.01톤의 토사가 유출된 것으로 조사되어, 임도연장 100m 당 평균 1.65톤의 토사가 침식·유출된 것으로 조사되었다(표 5-7).

그림 5-28는 운재료를 제외한 임도 토사유출량 조사구의 토사유출량과 강우량과의 관계를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 강우량과 임도 토사유출량과는 비례관계를 가지고 있으며, 강우량이 증가할수록 임도 토사유출량의 증가량이 더욱 많아지고 있음을 알 수 있다.

표 5-7. 임도 및 운재로 토사유출량 조사구의 관측 결과 (단위 : kg/10m)

일 시	선 행									
	강우량 (mm)	측구 1	측구 2	측구 3	측구 4	측구 5	측구 6	측구 7	운재로	합계
97년6월6일	141.0	11.275	9.113	6.007	0.013	0.083	-	3.561	26.383	56.435
97년6월28일	109.5	7.019	3.687	10.906	0.065	0.196	0.522	0.493	9.938	32.826
97년7월8일	222.0	34.781	32.143	12.500	0.156	2.250	2.250	8.504	35.000	127.584
97년7월24일	119.5	42.279	26.425	14.223	1.104	-	11.667	3.143	24.800	123.641
97년8월8일	185.0	39.996	50.846	26.357	2.698	23.150	17.541	2.615	134.675	297.878
97년9월6일	133.0	33.475	12.738	6.642	0.973	23.584	38.068	2.286	62.098	179.864
97년9월28일	67.0	0.891	2.149	1.206	0.044	8.114	7.457	0.489	1.617	21.967
98년5월16일	47.5	0.459	1.068	0.114	-	0.166	-	0.184	143.600	145.591
98년6월6일	43.5	-	0.418	-	0.102	1.136	-	0.046	-	1.702
98년7월5일	341.0	62.729	86.158	13.164	0.011	3.184	2.462	1.886	653.005	822.599
98년8월2일	272.0	55.322	141.392	12.210	0.284	2.844	8.161	7.870	32.740	260.823

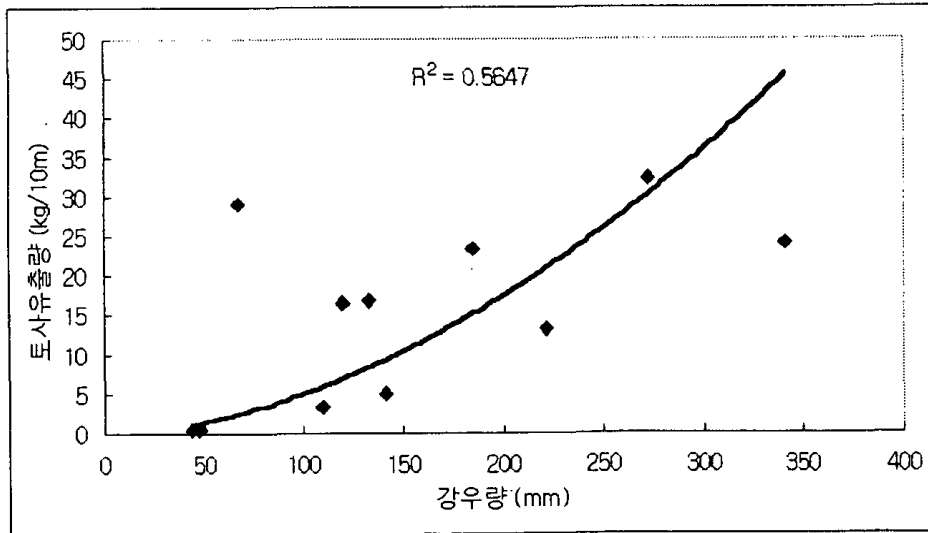


그림 5-28. 강우량과 임도 토사유출량과의 관계

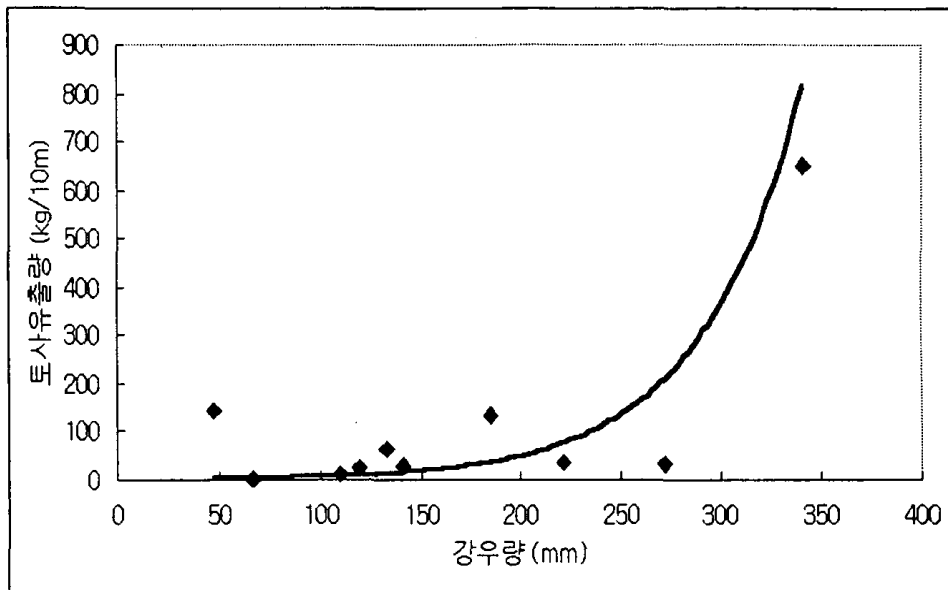


그림 5-29. 강우량과 운재로 토사유출량과의 관계

그림 5-29는 강우량과 운재로 토사유출량과의 관계를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 운재로의 경우는 강우량이 증가함에 따라 토사유출량이 기하급수적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 운재로가 임도에 비해, 경사가 급하고 측구 및 노면이 잘 정비되어 있지 못하기 때문으로 여겨진다.

### 3) 임도 및 운재작업로 유출토사량에 미치는 영향인자 분석

명성 시험유역내에 개설된 신설임도를 대상으로 총 7개소의 임도 유출토사량 조사구와 1개소의 운재작업로 유출토사량 조사구를 설치하고 관측을 수행하였다.

임도 및 운재작업로 유출토사량과 임도 및 운재작업로의 구조 인자 및

강우인자와의 상관관계를 분석한 결과 표 5-8에서 보는 바와 같이 임도 및 운재작업로 유출토사량은 기간강우량과 가장 높은 상관관계를 보였으며, 이 밖에 평균절토고와 평균노면경사와 유의한 상관관계를 가지는 것으로 분석되었다.

표 5-8. 임도 및 운재작업로 유출토사량과 임도 및 운재작업로의 구조 인자 및 강우인자와의 상관관계

	도로연장	평균 노면경사	평균절토 면경사	평균 절토고	기간 강우량	시간별 최대 강우강도
임도 및 운재작업로 유출토사량	-0.15357	0.32202	0.13953	0.29722	0.36987	0.12145
Significance	0.1738	0.0036**	0.2170	0.0074**	0.0007**	0.2832

따라서, 임도 및 운재작업로 유출토사량은 기간강우량이 많을수록 증가하는 것으로 나타났으며, 구간내의 평균절토고가 높고, 평균노면경사가 클수록 증가하는 것으로 분석되었다.

단위 도로연장당 임도 및 운재작업로 유출토사량과 임도 및 운재작업로의 구조 인자 및 강우인자와의 상관관계를 분석한 결과 표 5-9에서 보는 바와 같이 단위 도로연장당 임도 및 운재작업로 유출토사량은 평균노면경사와 가장 높은 상관관계를 보였으며, 이밖에 기간강우량 및 평균절토고, 평균절토면경사와 유의한 정의 상관관계를 가지는 것으로 분석되었다. 한편, 도로연장과는 부의 상관관계를 보이고 있는 것으로 분석되었다. 따라서, 단위 도로연장당 임도 및 운재작업로 유출토사량은 구간내 평균노면경사가 클수록 증가하는 것으로 나타났으며, 또한 기간강우량이 많고 구간내의 평균절토고가 높을수록, 또한 평균절토면경사가 클수록 증가하는 것으로 분석되었

다.

표 5-9. 단위면적당 임도 및 운재작업로 유출토사량과 임도 및 운재  
작업로의 구조 인자 및 강우인자와의 상관관계

	도로연장	평균 노면 경사	평균절토 면경사	평균 절토고	기간강 우량	시간별 최대 강우강도
단위임도연장당 임도 및 운재작업로 유출토사량	-0.23770	0.44177	0.26840	0.14150	0.29031	0.07615
Significance	0.0337**	0.0001**	0.0161**	0.2106	0.0090**	0.5020

#### 나. 임도 성토면 지표유출발생량 및 토사침식량

관측은 1997년 6월부터 9월 및 1998년 5월부터 8월까지 하절기를 중심으로 2년에 걸쳐 실시하였으며, 이 기간동안 1997년 5회, 1998년 5회로 총 10회 관측을 수행하였다(표 5-10). 관측기간중 기간강우량은 최소 43.5mm(1998년 5월 17일~6월 6일), 최대 341.0mm(1998년 6월 7일~7월 5일)의 분포를 보였으며, 최대일우량은 155.0mm/day(1998년 6월 25일 06시~26일 05시)이었다.

한편, 경과년수에 따라 임도 성토비탈에서 비탈형상 및 강우인자와 식생 피복도 등의 환경인자가 토양침식량에 미치는 영향을 파악하기 위하여 상관 분석을 실시하였으며, 각각 인자의 토사침식량에 대한 설명여부를 측정하기 위하여 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석에서는 각 인자들을 독립변수, 토사침식량을 종속변수로 보고 stepwise방법을 이용하여 다중회귀분석을 하였으며, 통계처리를 위하여 SAS(Statistical Analysis System) 프로그램을 사

용하였다.

표 5-10. 임도 성토면 지표유출발생량 및 토사침식량 측정 강우사상

Date	Rainfall(mm)		
	Max. 1 hour	Max. 1 day	Total
June 28, 1997	17.0	84.5	95.5
July 8, 1997	24.5	153.5	221.0
July 24, 1997	23.0	108.5	119.5
Aug. 8, 1997	31.5	94.5	185.0
Sept. 6, 1997	42.5	60.0	133.0
May 9, 1998	17.0	57.5	60.0
May 16, 1998	8.0	25.5	47.5
June 6, 1998	6.0	34.0	44.5
July 5, 1998	34.0	155.0	341.0
Aug. 2, 1998	18.5	79.0	272.5

#### 1) 임도 성토비탈에서의 지표유출수량 및 토사침식량

연구기간동안 총 13개 임도 성토비탈 조사구에서 측정된 관측시기별 평균 지표유출수량 및 토사침식량은 표 5-11에서와 같다.

관측시기별로 분석한 13개 임도 성토비탈 조사구에서의 평균 지표유출 발생량은 표 5-11에서 보는 바와 같이 임도 개설후 1년이 경과되지 않은 1997년의 경우에는 관측시기별로 최소 9.4mm에서 최대 29.6mm 였던 것으로 조사되었다. 이를 이용하여 기간강우량 중 지표유출 발생율을 산출한 결과 최소 9.8%에서 최대 21.8%의 범위를 가지는 것으로 분석되었다. 그러나, 임도 개설후 1년이 경과한 1998년의 경우에는 기간강우량에 대한 지표유출 발생율이 최소 2.1%에서 최대 6.7%로 크게 감소하였던 것으로 나타났다. 특히, 1998년의 경우에는 기간강우량 341mm의 집중호우가 발생하였음에도 불구하고 지표유출수량은 전년도에 비해 크게 감소하였던 것으로 분석되었다.

이는 개설직후 답압되고 교란되어 있던 성토비탈이 개설후 1년이 경과한 후에 지표토양의 침투능이 어느 정도 회복되었기 때문인 것으로 판단되었다.

표 5-11. 임도 성토비탈 조사구에서 측정된 관측시기별 평균 지표유출 수량 및 토사침식량

Date	Total rainfall(mm)	Surface runoff		Amount of Soil erosion (g/m <sup>2</sup> )
		Amount(mm)	Amount/Total rainfall (%)	
June 28, 1997	95.5	9.4	9.8	108.5
July 8, 1997	221.0	23.1	10.5	441.8
July 24, 1997	119.5	25.5	21.3	289.6
Aug. 8, 1997	185.0	29.6	16.0	703.3
Sept. 6, 1997	133.0	29.0	21.8	373.3
Total	754.0	116.6	15.5	1,916.5
May 9, 1998	60.0	2.6	4.3	0.1
May 16, 1998	47.5	3.2	6.7	0.1
June 6, 1998	44.5	2.0	4.5	1.0
July 5, 1998	341.0	7.1	2.1	2.6
Aug. 2, 1998	272.5	7.2	2.6	2.2
Total	765.5	22.1	2.9	6.0

임도 성토비탈 조사구에서의 토사침식량 관측결과에 있어서도 1997년도의 경우 단위면적당 토사침식량이 관측시기별로 최소 108.5g/m<sup>2</sup>에서 최대 703.3g/m<sup>2</sup>로서 많은 토사침식량을 보인 반면, 1998년도의 경우에는 최소 0.1g/m<sup>2</sup>에서 최대 2.6g/m<sup>2</sup>으로 토사침식이 거의 발생되지 않았던 것으로 나타났다.

특히, 1997년도의 총 토사침식량은 6월말에서 9월초까지 약 3개월 동안에 1,916.5g/m<sup>2</sup>으로서 ha당 약 19ton의 토사가 침식되었던 것으로 나타나,

임지를 인공초지 및 나지로 전환하였을 경우 강우집중기인 5월에서 11월간에 인공초지 및 나지에서의 토양침식량이 각각 6.31ton/ha, 10.18ton/ha에 달하였다는 村井(1972)의 연구결과에 비하여 약 2배의 토양침식량이 발생하였던 것으로 분석되었다. 그러나, 1998년도에는 토사침식이 거의 발생되지 않음으로 인하여, 임도 성토비탈의 경우 임도 개설후 1차년도의 토사침식현상이 극심한 것으로 조사되었다.

이는 개설후 1차년도의 임도 성토비탈의 경우, 시공작업으로 인하여 불안정화된 토사가 다량 존재하여 비교적 약한 강우에도 토사입자의 분리·이탈현상이 쉽게 발생되며 또한, 교란된 지표 침투구조로 인하여 대량으로 발생된 지표유출수에 의해 이동·유출되기 때문인 것으로 판단된다. 반면에 개설후 2차년도에는 성토비탈의 불안정 토사가 전년도에 이미 상당부분 침식·유출되었고, 지표침투구조가 안정화되어 상대적으로 지표유출수의 발생량이 적어 토사침식량이 크게 감소하였던 것으로 분석되었다.

## 2) 임도 성토비탈의 식생피복도 변화

관측시기별 13개 임도 성토비탈 조사구의 평균 식생피복도는 그림 5-30에서와 같다. 그림 5-30에서 보는 바와 같이 전체 조사구내의 평균 식생피복도는 조사기간동안 평균 약 40%에서 약 60%의 범위를 보였던 것으로 나타났다. 조사구가 설치된 임도 성토비탈에는 1996년 가을에 Tall fescue와 Orchard grass를 이용한 비탈방향으로 20cm의 간격의 줄씨뿌리기공법이 시공된 바 있는데, 초기생장이 왕성한 외래초종의 특성상 1997년 봄에 대부분의 풀씨가 발아하여 연구개시초에 이미 약 40%의 식생피복도를 보였던 것으로 사료된다.



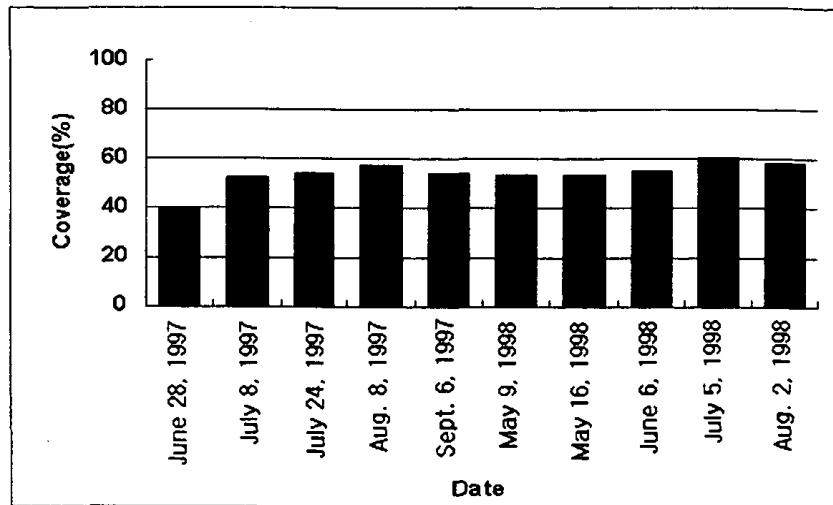


그림 5-30. 임도 성토사면에서의 피복도 변화

한편, 연평균 식생피복도에 있어서 1997년에는 52%, 1998년에는 56%로서 1997년에 비해 1998년에 평균 식생피복도가 약 4% 증가한 것으로 나타났는데, 이는 외래초종이 주로 파종지점에 국한되어 생육하고 비탈 전체로 확산되지 못하기 때문인 것으로 조사되었다.

한편, 각 조사구별 식생피복도는 관측시기에 따라 최저 6%에서 최고 95%의 범위를 보였다.

### 3) 임도 성토비탈의 토사침식량과 환경인자와의 관계

#### 가) 임도 성토비탈의 토사침식량과 환경인자와의 상관관계

분석에 사용한 임도 성토비탈의 환경인자로는, 강우인자로서 기간강우량(mm), 최대일우량(mm/day), 최대시우량(mm/hr), 임도 구조인자로서 성토비탈의 길이(m), 경사도(°), 그리고 식생피복도(%) 및 성토비탈에서의 지표

유출수량(mm) 및 성토비탈에서의 기간강수량 대비 지표유출수 발생율(%) 등 총 8개 인자였다.

1997년도에 관측된 임도 성토비탈의 토사침식량과 환경인자와의 상관관계를 분석한 결과는 표 5-12와 같다.

표 5-12. 임도 성토비탈의 토사침식량과 환경인자와의 상관관계(1997)

Variables	Amount of surface runoff	Vegetation coverage	Slope length	Slope degree	Total rainfall	Max. 1 hour rainfall
Amount of soil erosion	0.2615**	-0.3905***	0.2281*	0.2361*	0.3420***	0.2834***

Significance : \*\*\* ( $\geq 99\%$ ), \*\* ( $99 > S. \geq 95\%$ ), \* ( $95 > S. \geq 90\%$ )

1997년도 관측자료를 이용하여 분석한 결과, 임도 성토비탈의 토사침식량과 유의한 상관관계를 보이는 환경인자로는 임도 성토비탈에서의 지표유출수량, 식생피복도, 성토비탈의 길이, 성토비탈의 경사도 및 기간강수량과 최대시우량이었다. 특히, 식생피복도 및 기간강수량은 임도 성토비탈의 토사침식량과 고도의 상관관계를 가지고 있는 것으로 분석되었다.

한편, 1998년도 관측자료를 이용하여 임도 성토비탈의 토사침식량과 환경인자와의 상관관계를 분석한 결과, 1998년도에는 표 5-13에서 보는 바와 같이 식생피복도가 임도 성토비탈의 토사침식량과 고도로 유의한 상관관계를 보였으며, 이밖에는 성토비탈의 경사도만이 유의한 상관관계를 가지는 것으로 분석되었다.

표 5-13. 임도 성토비탈의 토사침식량과 환경인자와의 상관관계(1998)

Variables	Vegetation coverage	Slope degree
Amount of soil erosion	-0.7123 ***	0.6559 **

Significance : \*\*\* ( $\geq 99\%$ ), \*\* ( $99 > S. \geq 95\%$ )

1997년도 및 1998년도의 임도 성토비탈의 토사침식량과 환경인자와의 상관관계를 분석한 결과, 1997년도에는 기간강우량과 성토비탈의 길이, 성토비탈에서의 지표유출수량 등이 토사침식량과 상관관계를 보였으나, 1998년도에는 상관관계를 가지지 않는 것으로 나타났다. 특히, 1998년도의 경우, 기간강우량과 성토비탈에서의 지표유출수량이 토사침식량과 상관관계를 가지지 않는 것으로 나타난 것은, 임도 개설당시 성토비탈의 조성단계에서 지표침투조건이 교란되었던 상황에서 임도 개설후 1년이 경과한 1998년도에는 성토비탈이 안정화되어 지표 침투능이 상당히 회복되고 이로인해 지표유출수량이 현저히 감소하였기 때문으로 사료된다. 이는 지표유출수량의 관측결과 1998년도의 기간강우량 대비 지표유출수량 발생율이 1997년도에 비해 1/5 이하로 줄어들었던 것에서도 확인할 수 있었다.

#### 나) 임도 성토비탈 토사침식량에 대한 환경인자의 기여도

임도 성토비탈 토사침식량에 영향을 미치는 환경인자를 밝히기 위하여 stepwise method를 이용하여 다중회귀분석한 결과는 표 5-14 및 표 5-15에 서와 같다. 일반적으로 다중회귀분석을 위한 기본식으로는 직선회귀식을 사용하고 있으나, 이 연구에서는 토사침식량이 환경인자들과 직선비례관계를

이루는 것으로 가정하지 않고, 식 5-56과 같은 지수함수적인 비례 혹은 반 비례관계를 가지는 것으로 상정하여 다중회귀분석을 실시하였다. 이는 범용 토양유실방정식(Universal Soil Loss Equation) 등과 같은 기존 토양침식 및 토양유실 모델에서 토사침식과 각 환경인자들간의 관계를 대수함수(logarithm) 및 지수함수(exponential function)로 설정하여 산출하고 있음에 근거한 것이다(Ward and Elliot, 1995; Schwab et al., 1996).

$$Y = e^{(a + bX_1 + cX_2 + \dots + nX_n)} \text{ or } \ln Y = a + bX_1 + cX_2 + \dots + nX_n$$

(식 5-56)

$Y$  : Amount of soil erosion on the fill-slope of forest road

$e$  : exponent(Euler's number)

$a, b, c, \dots, n$  : Regression coefficients

$X_1, X_2, \dots, X_n$  : Environmental variables

표 5-14. 임도 성토비탈의 토사침식량과 환경인자와의 다중회귀분석(1997)

Variables	Regression coefficient	Partial R <sup>2</sup>	Model R <sup>2</sup>	F	Significance
Constant	4.3914				
Vegetation coverage	-0.0407	0.3065	0.3065	56.079	0.0000
Surface runoff	0.0726	0.3355	0.6420	95.862	0.0000
Total rainfall	0.0081	0.0644	0.7064	3.845	0.0549
Slope degree	0.0651	0.0374	0.7438	1.675	0.2009

$$Y = e^{(4.3914 - 0.0407X_1 + 0.0726X_2 + 0.0081X_3 + 0.0651X_4)} \quad (\text{식 5-57})$$

$Y$  : Amount of soil erosion on the fill-slope of forest road( $\text{g}/\text{m}^2$ ),

$e$  : exponent(Euler's number)

$X_1$  : Vegetation coverage of the fill-slope(%),

$X_2$  : Amount of surface runoff from the fill-slope(mm),

$X_3$  : Total rainfall(mm),

$X_4$  : Slope degree of the fill-slope( $^\circ$ )

표 5-14에서 보는 바와 같이 1997년도의 경우, 임도 성토비탈의 토사침식량에 영향을 미치는 중요한 인자는 식생피복도, 성토비탈에서의 지표유출수량, 기간강우량, 성토비탈의 경사도 등 4개 인자이었으며, 중상관계수는 0.7438로서 고도로 유의하였다. 즉, 식생피복도가 높을수록, 그리고 지표유출수량 및 기간강우량, 비탈의 경사도가 적을수록 토사침식량이 감소하는 것으로 나타났다. 이를 다중회귀식으로 나타낸 결과는 식 5-57에서와 같다.

한편, 표 5-15에서 보는 바와 같이 1998년도에는 식생피복도만이 임도 성토비탈의 토사침식량에 영향을 미치는 중요 인자이었으며, 중상관계수는 0.6972이었다. 이를 다중회귀식으로 나타내면 식 5-58에서와 같았다.

표 5-15. 임도 성토비탈의 토사침식량과 환경인자와의 다중회귀분석(1998)

Variables	Regression coefficient	Partial R <sup>2</sup>	Model R <sup>2</sup>	F	Significance
Constant	3.8152				
Vegetation coverage	-0.0730	0.6972	0.6972	25.330	0.0004

$$Y = e^{(3.8152 - 0.0073X)} \quad (\text{식 5-58})$$

Y : Amount of soil erosion on the fill-slope of forest road(g/m<sup>2</sup>),

X : Vegetation coverage of the fill-slope(%),

e : exponent(Euler's number)

이상의 결과를 종합해볼 때 식생피복도는 1997년도 및 1998년도 분석결과 모두에서 중요 인자로서 선정되어 임도 성토비탈에서의 토사침식량 억제를 위한 효과적인 조절인자인 것으로 나타났다. 그러나, 1998년도의 분석결과에서는 1997년도와는 달리 성토비탈에서의 지표유출수량 및 기간강우량과 성토비탈의 경사도 등이 성토비탈의 토사침식량에 중요한 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났는데, 이는 임도 개설공사 직후인 1997년도의 경우 성토비탈이 매우 낮은 침투율을 가짐으로 인하여 지하로 침투되지 못하는 초과강우량의 발생이 많았고, 이 초과강우량이 경사가 급한 성토비탈을 유하하며 지표토양을 대량으로 침식시켰으나(Vanvliet and Hall, 1995; Ziegler and Giambelluca, 1997), 1998년도에는 상대적으로 성토비탈이 안정화되고 지표 침투능이 증대되어 초과강우량의 발생이 적음으로 인해 토사침식에 큰 영향을 주지 못했기 때문인 것으로 사료되었다.

### 3. 강우-유출모형의 적용

#### 가. 지형지수 분포

地形指數의 공간적 분포를 계산하기 위한 시험구역의 數值地形圖를 작성하기 위하여 시험구역의 축척 1/5000 지형도를 스캐너로 컴퓨터에 입력한 후, ARC/VIEW 프로그램을 이용하여 이를 래스터(raster) 자료 형태로 변환하여 격자구조의 數值地形圖를 완성하였다. 격자크기는 격자크기에 따른 地形指數의 분포 변화를 분석하기 위하여 5m, 10m, 20m 크기의 數值地形圖를 각각 작성하였다.

북문골 시험구역 및 바람골 시험구역의 地形指數 분포는 각각 그림 5-31 및 그림 5-32에서 보는 바와 같다. 地形指數의 계산에 사용된 數值地形圖는 5m 격자크기이었으며, 地形指數의 산정 알고리즘은 다방향 흐름 알고리즘이었다.

그림 5-31에서 보는 바와 같이 북문골 시험구역의 경우, 地形指數는 최소 1.463에서 최대 18.556의 범위를 보였으며, 구역의 계곡부를 따라 구역 출구에서 최대값을 보였다. 한편, 그림 5-32에서와 바와 같이 바람골 시험구역의 地形指數 분포는 최소 1.643에서 최대 12.210의 범위를 보였으며, 구역의 계곡부를 따라 구역 출구에서 최대값을 보였다.

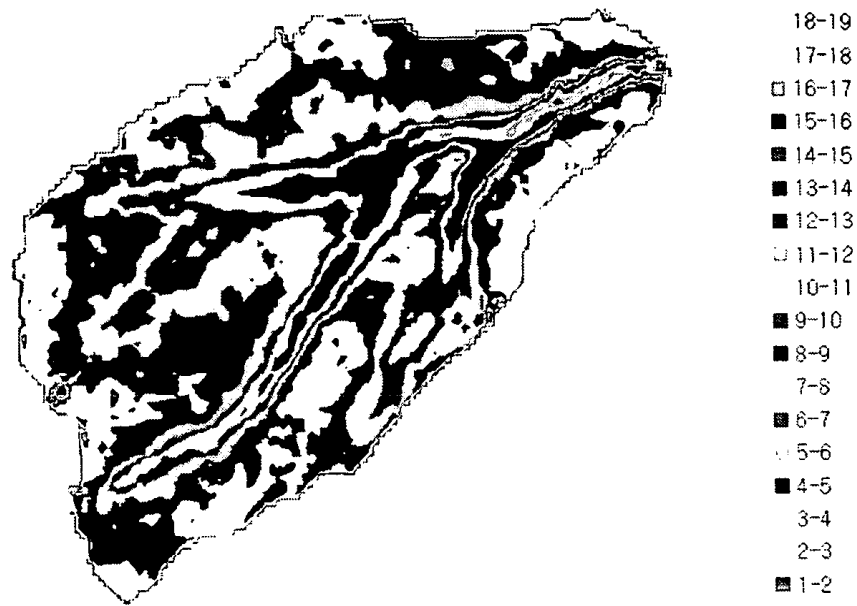


그림 5-31. 북문골 시험구역의 지형지수 분포

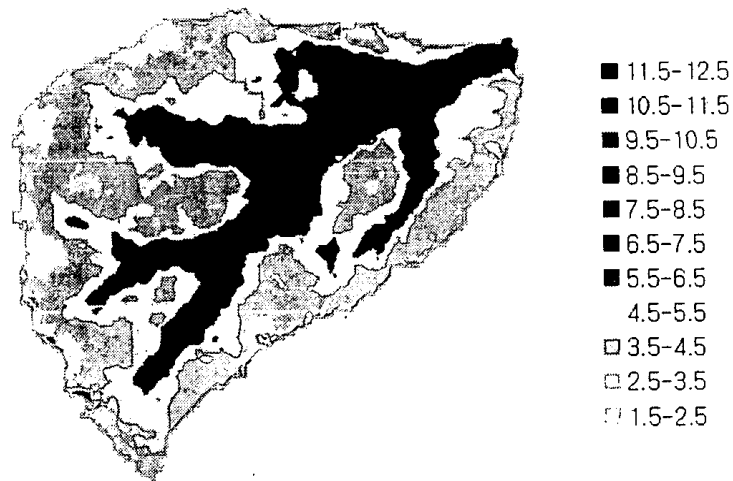


그림 5-32. 바람골 시험구역의 지형지수 분포

地形指數의 높은 값은 유역에 강우발생시 먼저 포화되는 경향을 나타내



는 것으로서, 따라서 잠재적인 지표하 혹은 지표 유출 기여면적을 암시한다 (Beven, 1997). 그림 5-31 및 그림 5-32에서 보는 바와 같이 두 시험유역에서도 강우시 포화유출을 발생시키는 잠재적인 유출 기여면적이 유역의 계곡부를 중심으로 유역 상류까지 길게 형성되어 있음을 알 수 있다.

그림 5-33와 그림 5-34는 각각 북문골 시험유역 및 바람골 시험유역의 地形指數 분포를 각 지수급별 총 유역면적에 대한 해당 지수급의 분포면적 비로 나타낸 결과이다. 두 시험유역 모두 地形指數 4에서 4.5 사이 값의 분포면적이 가장 많은 것으로 나타났으나, 바람골 시험유역에 비해 북문골 시험유역에서 地形指數 4에서 4.5 사이 값의 분포면적이 더욱 많은 것으로 나타났다.

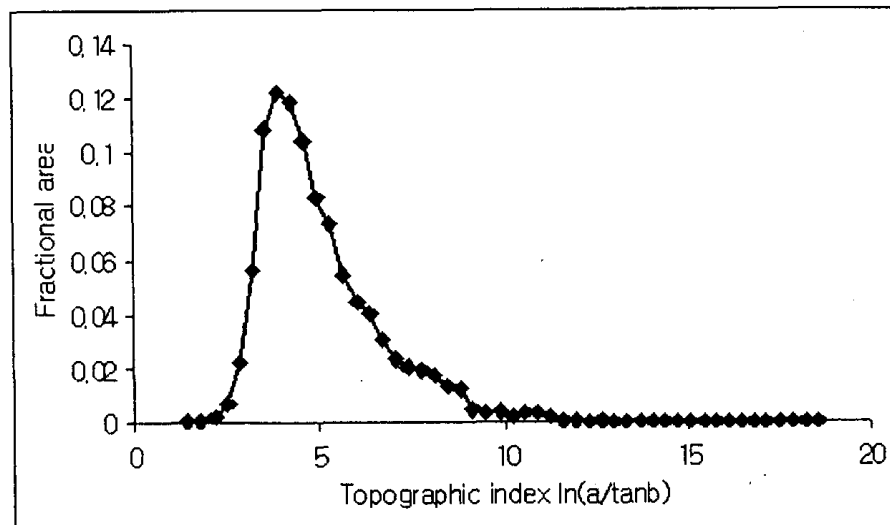


그림 5-33. 북문골 시험유역의 지형지수 분포곡선

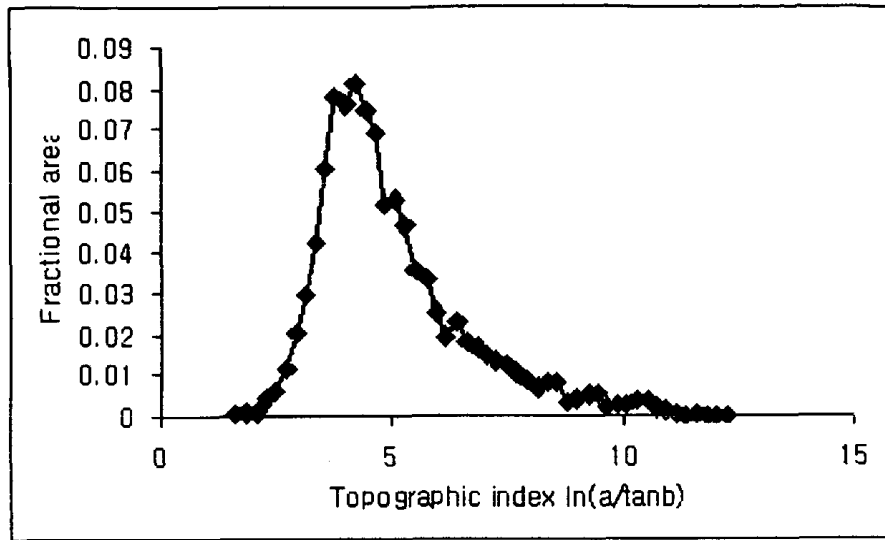


그림 5-34. 바람골 시험유역의 지형지수 분포곡선

#### 나. 매개변수의 보정

모형의 보정을 위하여 표 5-16 및 표 5-17에서 보는 바와 같이 북문골 시험유역과 바람골 시험유역의 1992년부터 1998년까지 7년간의 강우-유출자료중 단순 호우사상으로 일강우량 30mm 이상이고 유출량의 증가가 뚜렷한 강우-유출사상을 모형 매개변수의 보정용 강우-유출자료로 선정하였다.

선정된 강우-유출사상중 최소 강우량을 보인 것은 북문골 시험유역의 경우, 1996년 7월 21일의 34.0mm, 바람골 시험유역은 1995년 8월 12일의 32.0mm이었다. 한편, 최대 강우량을 보인 것은 두 시험유역에서 모두 1998년 6월 24일 발생한 호우사상으로서 북문골 시험유역은 283.0mm이었으며, 바람골 시험유역은 복합 호우사상의 제외로 북문골 시험유역 보다 적은 264.0mm이었다.

### 1) 목적함수 및 분석자료

모형의 정확성을 평가하기 위한 목적함수로는 Nash와 Sutcliffe(1970)가 제안한 무차원 계수로 식 5-59와 같은 模型 效率性 係數(CME, Coefficient of Model Efficiency)를 이용하였다. 模型 效率性 係數는 예측 수문곡선이 실측 수문곡선과 잘 일치할수록 1에 가까워지는 단순한 성질을 가지고 있다. 이 값이 음수이면, 실측값의 평균을 사용하는 것이 이 모형에 의해서 예측된 값보다 좋다고 한다. 이 계수는 무차원 양으로서 자료의 크기에 관계없는 절대적 기준이다.

$$CME = \frac{\sum_{i=1}^n [Q_o(t) - Q_a]_i^2 - \sum_{i=1}^n [Q_o(t) - Q_c(t)]_i^2}{\sum_{i=1}^n [Q_o(t) - Q_a]_i^2} \quad (\text{식 5-59})$$

여기서,  $Q_o$ 는 실측유량,  $Q_c$ 는 예측유량,  $Q_a$ 는 실측치의 평균유량이다.

표 5-16. 매개변수 보정을 위한북문골 시험유역의 강우-유출사상

Storm Number	DATE	Rainfall (mm)	Runoff (mm)	Peak flow (mm/hr)
BM-S1	8 April, 1992	80.1	13.457	0.293
BM-S2	6 May, 1992	134.4	53.269	2.032
BM-S3	16 July, 1992	69.6	20.470	1.139
BM-S4	11 August, 1992	70.8	8.307	1.606
BM-S5	23 September, 1992	160.4	81.455	3.220
BM-S6	12 May, 1993	86.3	7.902	0.137
BM-S7	1 June, 1993	115.6	12.857	1.038
BM-S8	12 June, 1993	73.8	12.446	0.139
BM-S9	28 June, 1993	81.0	9.234	0.437
BM-S10	12 July, 1993	111.8	29.907	1.75
BM-S1	17 August, 1993	158.8	36.623	1.295
BM-S12	11 August, 1993	102.7	32.558	1.889
BM-S13	20 August, 1993	164.2	49.609	4.947
BM-S14	20 May, 1995	93.0	20.480	0.620
BM-S15	23 July, 1995	203.5	108.668	8.524
BM-S16	15 October, 1995	46.0	3.624	0.125
BM-S17	14 March, 1996	56.0	5.810	0.518
BM-S18	16 March, 1996	36.0	5.726	0.320
BM-S19	24 June, 1996	118.5	81.042	2.771
BM-S20	4 July, 1996	125.0	75.322	3.230
BM-S21	21 July, 1996	34.0	10.418	0.342
BM-S22	7 May, 1997	83.0	10.326	0.516
BM-S23	11 May, 1997	61.5	10.984	0.352
BM-S24	24 June, 1997	220.5	54.095	4.027
BM-S25	30 June, 1997	112.0	70.124	1.716
BM-S26	6 July, 1997	68.0	58.841	1.563
BM-S27	15 July, 1997	87.5	68.081	1.822

표 5-16. 계속

Storm Number	DATE	Rainfall (mm)	Runoff (mm)	Peak flow (mm/hr)
BM-S28	2 August, 1997	238.0	125.666	3.769
BM-S29	8 August, 1997	70.0	47.685	0.850
BM-S30	25 November, 1997	87.5	11.446	1.417
BM-S31	6 December, 1997	50.0	14.795	0.466
BM-S32	22 April, 1998	51.0	24.631	0.410
BM-S33	1 May, 1998	94.0	43.677	1.154
BM-S34	24 June, 1998	286.0	157.783	8.244
BM-S35	21 July, 1998	44.0	22.566	0.544
BM-S36	31 July, 1998	224.5	182.005	4.472
BM-S37	12 August, 1998	152.5	110.299	5.294
BM-S38	28 September, 1998	214.5	75.522	5.109

표 5-17. 매개변수 보정을 위한 바람골 시험구역의 강우-유출사상

Storm Number	DATE	Rainfall (mm)	Runoff (mm)	Peak flow (mm/hr)
BR-S1	6 May, 1992	120.4	20.115	0.674
BR-S2	16 July, 1992	69.6	8.787	0.304
BR-S3	23 September, 1992	160.4	27.694	1.046
BR-S4	1 June, 1993	115.6	11.891	0.827
BR-S5	28 June, 1993	77.5	9.285	0.372
BR-S6	12 July, 1993	111.8	26.228	1.296
BR-S7	1 August, 1993	65.4	20.907	0.711
BR-S8	7 August, 1993	107.3	25.617	0.986
BR-S9	9 August, 1993	51.5	19.070	0.766
BR-S10	11 August, 1993	102.7	35.035	2.311

표 5-17. 계속

Storm Number	DATE	Rainfall (mm)	Runoff (mm)	Peak flow (mm/hr)
BR-S11	20 August, 1993	164.2	47.482	4.855
BR-S12	25 August, 1993	75.9	40.570	0.854
BR-S13	20 May, 1995	93.0	16.446	0.389
BR-S14	23 July, 1995	203.5	115.657	6.935
BR-S15	9 August, 1995	36.5	5.288	0.342
BR-S16	12 August, 1995	32.0	6.601	0.111
BR-S17	19 August, 1995	68.5	14.375	1.531
BR-S18	17 June, 1996	56.0	7.888	0.187
BR-S19	24 June, 1996	134.0	50.166	0.983
BR-S20	4 July, 1996	125.0	68.295	2.294
BR-S21	11 July, 1996	45.5	22.808	0.317
BR-S22	21 July, 1996	34.0	11.154	0.335
BR-S23	24 June, 1997	220.5	45.328	2.157
BR-S24	30 June, 1997	112.0	36.114	1.037
BR-S25	5 July, 1997	78.5	25.109	0.698
BR-S26	11 July, 1997	46.0	17.796	0.382
BR-S27	15 July, 1997	87.5	32.914	0.947
BR-S28	2 August, 1997	243.0	100.904	2.472
BR-S29	8 August, 1997	70.0	38.991	0.500
BR-S30	25 November, 1997	87.5	29.541	0.788
BR-S31	24 June, 1998	264.0	94.768	5.555
BR-S32	14 July, 1998	98.0	37.018	0.285
BR-S33	21 July, 1998	44.0	18.257	0.574
BR-S34	31 July, 1998	224.5	131.314	2.566
BR-S35	12 August, 1998	152.5	72.766	3.796
BR-S36	16 August, 1998	127.0	78.117	3.846

## 2) 매개변수의 초기 입력치

본 연구에서 매개변수의 보정을 위하여 사용한 Monte Carlo 模擬 방법은 모의발생시 기본변수의 확률분포에 따라 발생하는 무작위 변수 값의 집합을 사용하는 방법이다. 따라서, 매개변수의 보정에 있어서 매개변수 모의발생의 범위를 결정하는 것은 매우 중요한 요소가 된다.

본 연구에서는 Monte Carlo 模擬 방법에 의한 각 매개변수의 모의발생 범위를 결정하기 위하여 선행연구자료를 검토하여 각 매개변수의 모의발생 범위를 결정하였다. 표 5-18은 많은 다양한 선행연구에서 제시한 TOPMODEL의 주요 매개변수인 토양 깊이에 따른 飽和 透水係數 減少函數의 減少常數  $m$ 과 飽和 傳導係數의 유역평균값  $T_0$ 의 값을 보여주고 있다.

표 5-18에서 Area는 해당 시험유역의 면적, DTM  $\Delta X$ 는 地形指數 분석에 사용한 數值地形圖의 격자크기,  $\bar{\lambda}$ 는 해당 시험유역의 地形指數 평균값을 나타낸다.

표 5-18에서 보는 바와 같이 많은 선행연구에서 제시한 토양 깊이에 따른 飽和 透水係數 減少函數의 減少常數  $m$ 의 값은 최소 0.003에서 최대 0.25의 범위를 보였던 것으로 나타났으며, 飽和 傳導係數의 유역평균값  $T_0$ 는 0.0007에서 최대 8.27의 값들이 제시되었다.

표 5-18. TOPMODEL 매개변수의 선행연구 결과

Area (km <sup>2</sup> )	DTM Δx (m)	$\bar{\lambda}$	$m$ (m)	$T_0$ (m <sup>2</sup> /h)	Reference
0.0063	5	5.1	0.077	1.8	Seibert <i>et al.</i> , 1997
0.0075	2	5.0	0.0053	1.31	Lamb, 1996
0.015	2.5	5.62	0.0035	7	Molicova <i>et al.</i> , 1997
0.34	5	5.942	0.041	2.75	Ambroise <i>et al.</i> , 1996b
0.036	10	6.9	0.022	2.18	Iorgulescu and Jordan, 1994
0.36	15	6.21	0.0112	0.338	Gallart <i>et al.</i> , 1994
0.64	30	4.37	0.016	1.39	Troch <i>et al.</i> , 1993
1	10	7.87	0.004-0.25	0.01-0.3	Fisher and Beven, 1996
1.85	10	7.4	0.031	0.64	Iorgulescu and Jordan, 1994
2.1	20	6.74	0.003	6	Ostendorf, 1996; Ostendorf <i>et al.</i> , 1996
3.4	50	6.8	0.013-0.018	3	Robson <i>et al.</i> , 1992;
3.9	30-90	6.56-8.41	0.05-0.06	0.0009-0.0038	Wolock and McCabe, 1995
4.2	10	8.29	0.01	2.0	Ostendorf and Mandershied, 1997
5	*	5.32	0.0104	0.0012	Beven and Wood, 1983
5	30	6.04-6.08	0.027	0.0007-0.0012	Wolock and McCabe, 1995
6.85	100	7.78	0.018	0.97	Robson <i>et al.</i> , 1993
7.70	100	7.7	0.008	0.89	Robson <i>et al.</i> , 1993
7.2	30	4.03	0.016	0.76	Troch <i>et al.</i> , 1993
8	*	7.73	0.0067	1.197	Beven and Wood, 1983
8.4	20-120	6.40-6.96	0.025	1.05-1.5	Saulnier <i>et al.</i> , 1997
10.5	50	7.6	0.0093	8.27	Quinn and Beven, 1993
105	*	6.58	0.0344	0.504	Beven and Wood, 1983

飽和帶 貯留 涵養의 時間遲滯 常數  $T_d$ 의 초기 입력범위로서 Beven(1997) 등은 1 ~ 100hr의 값을 제시하였으며, 遮斷域의 배수량 회귀계수  $P_a$ 와  $P_b$ , 및 遮斷域의 배수량 발생에 필요한 最少 遮斷貯留量  $C_{iz}$ , 遮斷域 直接通過率  $p$  등은 Domingo 등(1998)의 연구결과를 참조하였으며, 早期 地表下 流出



係數  $C_p$ 는 Pinol 등(1997)의 연구결과를 참조하여 Monte Carlo 模擬 방법의 매개변수 모의 발생 범위를 결정하였다. 표 5-19는 선행 연구자료를 이용하여 결정한 각 매개변수의 Monte Carlo 模擬의 모의발생 범위를 보여주고 있다. 균등 분포 난수 발생을 통한 모의 매개변수의 조합은 10만회 이상 실시하였다.

표 5-19. 매개변수의 모의발생 범위

Parameter		Range
$m$	Parameter controlling the decline of saturated hydraulic conductivity with depth (m)	0.003 ~ 0.25
$T_0$	Watershed mean value of transmissivity at saturation of the soil ( $m^2/hr$ )	0.0007 ~ 8.27
$T_d$	Time delay factor of saturated zone storage recharge (hr)	1 ~ 100
$SR_{MAX}$	Maximum storage of root zone (m)	0.01 ~ 0.20
$Srzi$	Initial value of root zone storage deficit (m)	0 ~ $SR_{MAX}$
$P_a$	Coefficient of Drainage from interception storage	0.001 ~ 1.0
$P_b$	Coefficient of Drainage from interception storage	1.0 ~ 4.3
$Ciz$	Minimum interception storage for generation of drainage from interception storage (mm)	0.0~10.0
$p$	Free throughfall rate in interception zone	0 ~ 0.4
$C_p$	Coefficient for prompt subsurface runoff	0 ~ 0.6126
$K_e$	Evapotranspiration ratio	0.6 ~ 1.0

### 3) 보정결과 및 모형의 효율성

#### 가) 보정결과

표 5-20과 표 5-21은 북문골 시험구역 및 바람골 시험구역에서 매개변수의 보정을 위해 분석한 각각 38회 및 36회의 강우-유출사상에 대하여 각 강우-유출사상별로 보정된 매개변수들의 평균값과 분포를 보여주고 있다.

매개변수의 보정은 표 5-19에서 제시한 각 매개변수의 범위를 이용하여 균등분포 난수조합을 발생시켜 모형에 입력하는 Monte Carlo 模擬 방법을 사용하였으며, 각 강우-유출사상별로 최고 모의 효율성 계수 값을 보이는 매개변수의 조합을 각 강우-유출사상별 최적 매개변수로 선정하였다.

북문골 시험구역 및 바람골 시험구역에서의 분석결과, 모형의 매개변수 중 기존 TOPMODEL에서 도입한 매개변수인 토양 깊이에 따른 飽和 透水係數 減少函數의 減少常數  $m$ , 飽和 傳導係數의 구역평균값  $T_0$ , 飽和帶 貯留 涵養의 時間遲滯 常數  $T_d$ , 뿌리帶의 最大 貯留量  $SR_{MAX}$ 의 값은 선행연구결과와 유사하였다.

Ambroise 등(1996a)은  $0.34\text{km}^2$ 의 면적을 가지는 프랑스의 Ringelback 구역에서 TOPMODEL을 시험한 결과, 토양 깊이에 따른 飽和 透水係數 減少函數의 減少常數  $m$ 의 값이 0.041 이라고 하여 본 연구결과와 유사하였다. 또한,  $0.36\text{km}^2$ 의 면적을 가지는 스페인의 Cal Parisa 구역에서 TOPMODEL을 적용한 Gallart 등(1994)은  $m$ 이 0.0112의 값을 가진다고 하여 역시 본 연구결과와 유사하였던 것으로 나타났다. 이외에도 Lamb(1996), Troch 등(1993), Fisher와 Beven(1996), Pinol 등(1997)의 연구결과도 본 연구결과와 유사하였다.

표 5-20. 북문골 시험구역의 강우사상별 최적 매개변수

Parameter		Average	Min.	Max.	SD	CV
$m$	Parameter controlling the decline of saturated hydraulic conductivity with depth (m)	0.0317	0.0060	0.0774	0.0208	65.7
$T_0$	Watershed mean value of transmissivity at saturation of the soil ( $m^2/hr$ )	0.7285	0.1750	1.4747	0.2926	40.2
$T_d$	Time delay factor of saturated zone storage recharge (hr)	8.3165	4.3543	13.8794	1.9124	23.0
$SR_{MAX}$	Maximum storage of root zone (m)	0.0660	0.0363	0.1193	0.0135	20.4
$Sr_z1$	Initial value of root zone storage deficit (m)	0.0102	0.0	0.0476	0.009	87.8
$P_a$	Coefficient of Drainage from interception storage	0.2559	0.0076	1.0000	0.2501	38.7
$P_b$	Coefficient of Drainage from interception storage	1.5817	1.0000	2.0000	0.2791	18.8
$C_{iz}$	Minimum interception storage for generation of drainage from interception storage (mm)	0.9	0.4	1.4	0.2	22.7
$p$	Free throughfall rate in interception zone	0.0642	0.0122	0.0810	0.0144	42.2
$C_p$	Coefficient for prompt subsurface runoff	0.0950	0.0284	0.2506	0.0696	55.7
$K_e$	Evapotranspiration ratio	0.8108	0.5000	1.0000	0.2083	27.0

\* SD : Standard Deviation, \* CV : Coefficient of Variance

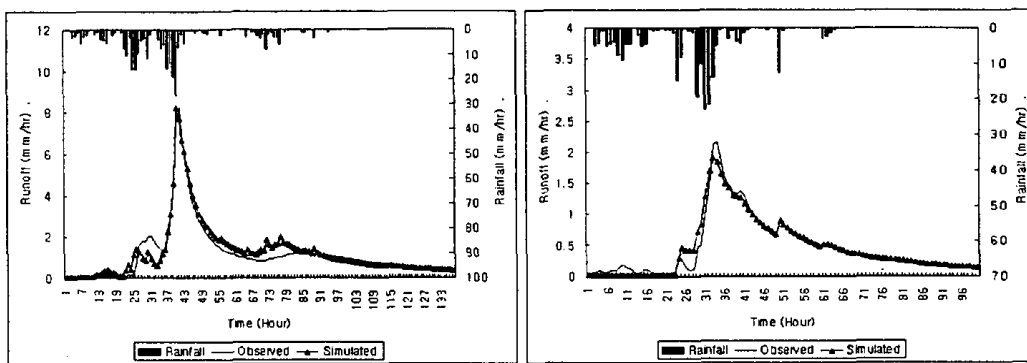
표 5-21. 바람골 시험유역의 강우사상별 최적 매개변수

Parameter		Average	Min.	Max.	SD	CV
$m$	Parameter controlling the decline of saturated hydraulic conductivity with depth (m)	0.0439	0.0145	0.1078	0.0235	53.6
$T_0$	Watershed mean value of transmissivity at saturation of the soil ( $m^2/hr$ )	0.7445	0.0205	1.8179	0.5674	76.2
$Td$	Time delay factor of saturated zone storage recharge (hr)	8.0386	1.7849	16.7726	4.2115	59.8
$SR_{MAX}$	Maximum storage of root zone (m)	0.0650	0.0011	0.1191	0.0338	61.4
$P_a$	Coefficient of Drainage from interception storage	0.3408	0.0234	1.0000	0.3230	73.3
$Srzi$	Initial value of root zone storage deficit (m)	0.0099	0.0002	0.0300	0.0082	82.73
$P_b$	Coefficient of Drainage from interception storage	1.5649	1.0000	2.0000	0.2717	23.3
$Ciz$	Minimum interception storage for generation of drainage from interception storage (mm)	0.5	0.0	2.7	0.5	99.8
$p$	Free throughfall rate in interception zone	0.0344	0.0023	0.2369	0.0472	137.1
$C_p$	Coefficient for prompt subsurface runoff	0.0737	0.0019	0.2492	0.0679	92.2
$K_e$	Evapotranspiration ratio	0.8561	0.5024	1.0000	0.1795	20.3

\* SD : Standard Deviation, \* CV : Coefficient of Variance

그림 5-35는 매개변수의 보정에 사용한 강우-유출사상중 강우량 200mm 이상의 폭우사상에 대한 모의 수문곡선과 실측 수문곡선을 보여주고 있다. 수문곡선의 모의에 사용된 매개변수들의 값은 표 5-20과 표 5-21에 수록된

값의 범위안에 있으며, 각 강우-유출사상별로 최적화된 서로 다른 매개변수의 조합을 이용하였다. 그림 5-35에서 바와 같이 북문골 시험구역과 바람골 시험구역에서 모두 모의 수문곡선이 실측 수문곡선과 잘 일치하고 있었으며, 첨두유량 및 유출용적에 있어서도 매우 우수한 모의 결과를 보여주고 있었다.



(북문골 시험구역, 1998. 6. 24)      (바람골 시험구역, 1998. 6. 24)

그림 5-35. 강우-유출모형의 보정 결과

## 나) 모형의 효율성

### (1) 북문골 시험구역

1992년부터 1998년까지의 북문골 시험구역에서 관측된 총 38개의 강우-유출사상을 대상으로 강우-유출사상별 최적 매개변수의 보정을 통한 모형의 효율성을 분석한 결과는 표 5-22에서와 같다.

模型 效率性 係數의 계산은 식 5-59를 이용하였으며, 관측 수문곡선과 모의 수문곡선의 비교를 위하여 식 5-60, 식 5-61과 같이 모의치와 관측치

의 첨두유량 오차율(Percent Error for Peakflow: PEP), 모의치와 관측치의 유출용적 오차율(Percent Error for Volume: PEV)을 계산하였다. 한편, 모의치와 관측치의 지체시간(Lag time)의 오차율(Percent Error for  $T_p$ ; PETP)은 山林小流域의 지체시간이 대부분 한시간 이내로서 지체시간의 오차율을 계산하면 과대치가 나올 우려가 높기 때문에 본 연구에서는 식 5-62와 같이 관측치의 첨두시각(Peak time)을 기준으로 모의치의 첨두시각과 단순 비교(Error for Peak Time: EPT)를 실시하였다.

$$PEP(\%) = \frac{Q_{cp} - Q_{op}}{Q_{op}} \times 100 \quad (\text{식 5-60})$$

$$PEV(\%) = \frac{V_c - V_0}{V_0} \times 100 \quad (\text{식 5-61})$$

$$EPT(\text{hr}) = T_{pc} - T_{po} \quad (\text{식 5-62})$$

여기서  $Q_{cp}$ 와  $Q_{op}$ 는 모의 및 관측 첨두유량이고  $V_c$ 와  $V_0$ 는 모의 및 관측 유출용적이며  $T_{pc}$ 와  $T_{po}$ 는 모의 및 관측 첨두시각이다.

표 5-22. 북문골 시험구역의 모의효율성

Storm No.	Rainfall(mm)	CME	PEV(%)	PEP(%)	EPT(hr)
BM-S1	80.1	0.92	0.19	-6.95	-3
BM-S2	134.4	0.99	0.92	-5.21	-1
BM-S3	69.6	0.96	-1.34	-2.35	-1
BM-S4	70.8	0.99	3.04	-2.58	0
BM-S5	160.4	0.97	12.55	9.14	0
BM-S6	86.3	0.94	-0.40	4.66	0
BM-S7	115.6	0.97	-1.67	10.76	0
BM-S8	73.8	0.93	0.37	0.90	-1
BM-S9	81.0	0.96	0.26	8.23	-1
BM-S10	111.8	0.97	-0.88	-2.81	-1
BM-S11	158.8	0.99	0.08	-3.29	0
BM-S12	102.7	0.98	-0.09	11.76	-1
BM-S13	164.2	0.99	-0.21	7.84	-1
BM-S14	93.0	0.99	-0.03	1.98	0
BM-S15	203.5	0.99	1.49	-4.49	0
BM-S16	46.0	0.91	0.05	-0.38	-1
BM-S17	56.0	0.99	-3.02	-1.17	0
BM-S18	36.0	0.91	0.23	4.70	-1
BM-S19	118.5	0.99	0.66	5.23	-1
BM-S20	125.0	0.92	4.55	7.71	-1
BM-S21	34.0	0.95	0.34	2.97	0
BM-S22	83.0	0.94	-0.66	-6.21	-1
BM-S23	61.5	0.96	0.25	-2.11	-1
BM-S24	220.5	0.95	4.39	-8.59	0
BM-S25	112.0	0.96	0.61	-9.21	-1
BM-S26	68.0	0.99	-0.59	-1.64	0
BM-S27	87.5	0.99	0.18	-2.48	-1
BM-S28	238.0	0.95	11.35	13.51	1
BM-S29	70.0	0.98	0.42	4.94	-1
BM-S30	87.5	0.98	-0.89	-2.75	-1
BM-S31	50.0	0.96	0.24	9.67	-1
BM-S32	51.0	0.98	0.95	2.77	0
BM-S33	94.0	0.97	1.18	4.48	-1
BM-S34	286.0	0.93	8.07	-0.51	-1
BM-S35	44.0	0.98	-0.05	4.16	-1
BM-S36	224.5	0.94	1.16	-2.32	0
BM-S37	152.5	0.99	2.05	-0.14	1
BM-S38	214.5	0.94	11.12	-11.28	0
Average	112.3	0.96	1.50	1.02	-0.58

표 5-22에서 보는 바와 같이 북문골 시험구역의 경우, 1992년부터 1998년까지 총 38개 강우-유출사상에 대하여 模型 效率性 係數(CME) 값의 범위가 최저 0.91에서 최고 0.99로 매우 우수한 모형 효율성을 보였으며, 평균 模型 效率性 係數는 0.96, 표준편차는 0.03이었다. 따라서, 선행연구결과에서 추출한 각 매개변수의 예상 범위가 타당하였던 것으로 분석되었다.

또한, 실측 유량과 모의 유량을 비교한 결과, 유량오차의 범위는 -3.02 ~ 12.55%이었고 모의 유량이 실측유량에 비해 다소 많게 모의되는 것으로 분석되었다. 또한, 총 38개 강우-유출사상중 유량오차가  $\pm 5\%$ 를 넘는 경우는 4회였으며, 유량오차의 표준편차는 3.56%이었다.

한편, 실측 침투유량과 모의 침투유량과의 오차율은 -11.28 ~ 13.51%의 범위를 보였으며, 침투유량 오차율의 표준편차는 6.14% 였다. 침투시각에 있어서도 대부분 1시간 이내의 차이를 보였다.

## (2) 바람골 시험구역

표 5-23은 1992년부터 1998년까지의 바람골 시험구역에서 관측된 총 36개의 강우-유출사상을 대상으로 강우-유출사상별 최적 매개변수의 보정을 통한 모형 효율성 분석을 실시한 결과이다. 模型 效率性 係數의 계산 및 모의치와 관측치의 침투유량 오차율, 유출용적 오차율, 침투시각 오차 계산 방법은 북문골 시험구역에서와 동일하였다.

표 5-23에서 보는 바와 같이 바람골 시험구역의 경우, 1992년부터 1998년까지 총 36개 강우-유출사상에 대하여 模型 效率性 係數(CME) 값의 범위는 최저 0.91에서 최고 0.99이었고 평균 0.96으로서 북문골 시험구역에서와 동일하게 매우 우수한 모형 효율성을 보였으며, 模型 效率性 係數의 표준편차는 0.03이었다. 따라서 북문골 시험구역의 경우와 동일하게, 선행연구결



과에서 추출한 각 매개변수의 예상 범위가 타당하였던 것으로 분석되었다.

또한, 실측 유량과 모의 유량을 비교한 결과, 유량오차의 범위는 -0.97 ~ 13.72%이었고 모의 유량이 실측 유량에 비해 다소 많게 모의되는 것으로 분석되었다. 총 36개 강우-유출사상중 유량오차가  $\pm 5\%$ 를 넘는 경우는 그림 5-31에서 보는 바와 같이 2회였으며, 유량오차의 표준편차는 2.81%로서 북문골 시험유역에 비해 작은 값을 보였다.

한편, 실측 침투유량과 모의 침투유량과의 오차율은 -17.72 ~ 16.10%의 범위를 보여 북문골 시험유역에 비해 다소 오차의 폭이 큰 것으로 분석되었으며, 침투유량 오차율의 표준편차는 8.03%이었다. 침투시각에 있어서는 대부분 1시간 이내의 차이를 보였다.

표 5-23. 바람골 시험유역의 모의효율성

Storm No.	Rainfall(mm)	CME	PEV(%)	PEP(%)	EPT(hr)
BR-S1	120.4	0.95	-0.37	-17.72	4
BR-S2	69.6	0.97	-0.96	-0.27	0
BR-S3	160.4	0.99	-0.80	3.51	-1
BR-S4	115.6	0.97	-0.78	12.07	0
BR-S5	77.5	0.92	-0.85	16.10	1
BR-S6	111.8	0.99	-0.47	-5.46	0
BR-S7	65.4	0.96	0.96	-6.54	0
BR-S8	107.3	0.97	0.11	-2.43	0
BR-S9	51.5	0.93	0.49	13.77	-1
BR-S10	102.7	0.97	0.23	-2.09	0
BR-S11	164.2	0.99	0.20	10.90	0
BR-S12	75.9	0.99	0.12	-0.33	0
BR-S13	93.0	0.96	-0.08	-6.52	0
BR-S14	203.5	0.99	3.14	1.36	0
BR-S15	36.5	0.96	0.57	-2.90	0
BR-S16	32.0	0.91	-0.24	-5.89	0
BR-S17	68.5	0.97	0.09	-5.95	0
BR-S18	56.0	0.74	-0.19	7.77	0
BR-S19	134.0	0.95	-0.97	10.26	-1
BR-S20	125.0	0.94	4.34	2.65	-1
BR-S21	45.5	0.97	-0.34	-3.28	-1
BR-S22	34.0	0.97	-0.02	-0.45	0
BR-S23	220.5	0.96	1.11	-11.24	-1
BR-S24	112.0	0.98	-0.31	-0.23	-1
BR-S25	78.5	0.98	-0.17	0.70	0
BR-S26	46.0	0.94	0.64	3.81	0
BR-S27	87.5	0.99	-0.05	2.50	0
BR-S28	243.0	0.94	7.63	7.70	1
BR-S29	70.0	0.97	-0.24	-1.70	-1
BR-S30	87.5	0.98	-0.43	5.44	1
BR-S31	264.0	0.98	-0.81	10.09	0
BR-S32	98.0	0.95	-0.80	-6.00	0
BR-S33	44.0	0.98	-0.21	1.33	0
BR-S34	224.5	0.99	0.30	0.55	0
BR-S35	152.5	0.95	13.72	-2.00	-1
BR-S36	127.0	0.97	3.73	0.45	0
Average	108.5	0.96	0.79	0.83	-0.06

#### 다. 매개변수의 민감도 분석

민감도 분석은 검정과정에 의해서 매개변수를 결정하는 유용한 수단이 된다. 덜 민감한 매개변수가 부정확한 값을 가진 상수라고 할 때에 이 매개변수에 의한 결과치의 편기량은 심각하지 않다. 매우 민감한 매개변수를 조정하는 것이 매개변수 값을 약간만 변화하여 적합시켜도 좋은 결과치를 얻기가 쉽다.

매개변수의 변화에 따른 유출량 및 침투유량의 변화율을 비교하기 위하여 민감도를 다음과 같이 정의하였다.

$$S_{qi} = \frac{\partial Q/Q_m}{\partial P_i/P_{im}} \quad , \quad S_{pi} = \frac{\partial Q_p/Q_{pm}}{\partial P_i/P_{im}} \quad (\text{식 5-63})$$

여기서  $S_{qi}$ 는 유출량에 대한  $i$ 번째 매개변수의 민감도,  $Q$ 는 모의 유출량,  $Q_m$ 는 기준 유출량,  $P_i$ 는  $i$ 번째 매개변수의 값,  $P_{im}$ 는  $i$ 번째 매개변수의 기준값이며,  $S_{pi}$ 는 침투유량에 대한  $i$ 번째 매개변수의 민감도,  $Q_p$ 는 모의 침투유량이고  $Q_{pm}$ 은 기준 침투유량이다. 식 5-63은 민감도가 클수록 매개변수의 변화에 따른 유출량 및 침투유량의 변화가 큰 것을 나타낸다.

매개변수의 민감도 분석에 사용한 강우-유출사상은 1997년 7월 15일에 북문골 시험유역에서 발생한 강우량 87.5mm의 강우-유출사상을 대상으로 하였다.

매개변수는 각 변수의 기준치에 대하여 0~20%까지 5%씩 가감하여 유출량 및 침투유량에 대한 매개변수의 민감도를 분석하였으며, 그 결과는 표 5-24 및 표 5-25과 같다.

표 5-24. 유출용적에 대한 매개변수의 민감도

Parameter	Parameter error (%)							
	-20	-15	-10	-5	5	10	15	20
$m$	4.61	3.42	2.28	1.15	-1.13	-2.25	-3.35	-4.43
$T_0$	0.13	0.07	0.04	0.03	-0.02	-0.06	-0.08	-0.13
$T_d$	0.05	0.04	0.03	0.01	-0.02	-0.03	-0.05	-0.07
$P_a$	-1.20	-0.87	-0.55	-0.27	0.25	0.47	0.69	0.87
$P_b$	5.04	4.04	2.94	1.58	-1.77	-3.98	-6.57	-9.55
$Ciz$	0.18	0.14	0.09	0.05	-0.05	-0.09	-0.14	-0.19
$p$	-0.06	-0.05	-0.03	-0.02	0.02	0.03	0.05	0.06
$C_p$	-0.31	-0.23	-0.16	-0.08	0.08	0.16	0.24	0.32
$K_e$	1.69	1.26	0.83	0.41	-0.41	-0.82	-1.23	-1.64

표 5-24에서 보는 바와 같이 모형의 매개변수중 유출량 변화에 민감한 매개변수로는 토양 깊이에 따른 飽和 透水係數 減少函數의 減少常數  $m$ 과 차단역의 배수량 회귀계수  $P_b$ 이었으며, 이외의 매개변수들은 유출량 변화에 덜 민감한 것으로 분석되었다. 매개변수중 그 값이 감소함에 따라 유출량도 감소하는 매개변수로는 차단역의 배수량 회귀계수  $P_a$ 와 차단역의 직접통과율  $p$ , 早期 地表下 流出係數  $C_p$  등이었으며, 이외의 매개변수들은 그 값이 감소함에 따라 반대로 유출량이 증가하는 경향을 보였다.

한편, 침투유량에 대한 매개변수의 민감도 분석 결과는 표 5-25에서와 같다.

표 5-25. 침투유량에 대한 매개변수의 민감도

Parameter	Parameter error (%)							
	-20	-15	-10	-5	5	10	15	20
$m$	15.95	13.21	8.74	4.23	-4.04	-7.24	-8.50	-9.62
$T_0$	6.90	6.96	4.70	2.31	-2.17	-4.23	-4.15	-4.13
$T_d$	1.35	1.10	0.79	0.38	-0.40	-0.88	-1.35	-1.80
$P_a$	-12.04	-9.51	-6.16	-2.98	2.85	5.58	8.18	10.66
$P_b$	21.72	15.67	9.61	4.42	-4.21	-9.38	-14.18	-20.46
$Ciz$	-1.35	-1.01	-0.67	-0.34	0.34	0.68	1.02	1.36
$p$	0.36	0.27	0.18	0.09	-0.09	-0.18	-0.27	-0.36
$C_p$	-5.13	-3.86	-2.58	-1.29	1.29	2.59	3.89	5.19
$K_e$	0.15	0.11	0.07	0.04	-0.04	-0.07	-0.11	-0.15

표 5-25에서 보는 바와 같이 모형의 매개변수중 침투유량 변화에 민감한 매개변수로는 토양 깊이에 따른 飽和 透水係數 減少函數의 減少常數  $m$ 과 차단역의 배수량 회귀계수  $P_a$ ,  $P_b$ 이었으며, 이외의 매개변수들은 유출량 변화에 덜 민감한 것으로 분석되었다. 특히, 차단역의 배수량 회귀계수  $P_b$ 의 변화에 침투유량이 매우 민감하게 반응하는데, 이는 모형에 입력되는 시간강우량에서 遮斷貯留量을 직접적으로 결정하는 매개변수  $P_b$ 의 특성 때문인 것으로 판단된다. 매개변수중에서 그 값이 감소함에 따라 침투유량도 감소하는 매개변수는 유출량에 대한 민감도 분석결과와 동일하였다.

민감도 분석결과를 종합해 볼 때, 본 모형에서는 토양 깊이에 따른 飽和 透水係數 減少函數의 減少常數  $m$ 과 차단역의 배수량 회귀계수  $P_a$ ,  $P_b$ 가 유출량 및 침투유량의 정확한 모의에 매우 중요한 인자임을 알 수 있었다.

#### 라. 최적 매개변수

표 5-26은 복문골 시험유역 및 바람골 시험유역에서 시험한 본 모형의

유역별 최적 매개변수를 보여주고 있다.

표 5-26에서 보는 바와 같이 북문골 시험유역에서 토양 깊이에 따른 飽和 透水係數 減少函數의 減少常數  $m$ 의 최적 값은 0.0269이었으며, 飽和 傳導係數의 유역평균값  $T_0$ 의 최적값은 0.7242, 飽和帶 貯留 涵養의 時間遲滯 常數  $Td$ 의 최적값은 6.4513, 뿌리帶의 最大 貯留量  $SR_{MAX}$ 의 최적값은 0.0548의 값을 보였다. 또한, 차단역의 배수량 회귀계수  $P_a$ 와  $P_b$ 의 최적값은 각각 0.0179와 1.7101의 값을 보였으며, 차단역의 배수량 발생에 필요한 最少 遮斷貯留量  $Ciz$ 의 최적값은 1.1, 차단역 직접통과율  $p$ 의 최적값은 0.067, 早期 地表下 流出係數  $C_p$ 의 최적값은 0.03, 증발산비  $K_e$ 의 최적값은 1.0의 값을 보였다.

또한, 바람골 시험유역에서 토양 깊이에 따른 飽和 透水係數 減少函數의 減少常數  $m$ 의 최적 값은 0.0454이었으며, 飽和 傳導係數의 유역평균값  $T_0$ 의 최적값은 0.8379, 飽和帶 貯留 涵養의 時間遲滯 常數  $Td$ 의 최적값은 5.7033, 뿌리帶의 最大 貯留量  $SR_{MAX}$ 의 최적값은 0.0556의 값을 보였다.

표 5-26. 추산시험유역의 최적 매개변수

Parameter	Experimental watershed	
	Bukmoongol	Baramgol
$m$ Parameter controlling the decline of saturated hydraulic conductivity with depth (m)	0.0269	0.0454
$T_0$ Watershed mean value of transmissivity at saturation of the soil ( $m^2/hr$ )	0.7242	0.8379
$T_d$ Time delay factor of saturated zone storage recharge (hr)	6.4513	5.7033
$SR_{MAX}$ Maximum storage of root zone (m)	0.0548	0.0556
$Srzi$ Initial value of root zone storage deficit (m)	Eq. (49)	Eq. (50)
$P_a$ Coefficient of Drainage from interception storage	0.0179	0.0540
$P_b$ Coefficient of Drainage from interception storage	1.7101	1.3922
$Ciz$ Minimum interception storage for generation of drainage from interception storage (mm)	1.1	0.6
$p$ Free throughfall rate in interception zone	0.067	0.075
$C_p$ Coefficient for prompt subsurface runoff	0.030	0.018
$K_e$ Evapotranspiration ratio	1.0	1.0

$$Srzi_M = -0.00016 - 0.00382 \ln(Q_{obM}^I), \quad (Q_{obM}^I < 0.95898) : \text{Bukmoongol} \quad (60)$$

$$Srzi_R = 0.00561 - 0.00408 \ln(Q_{obR}^I) : \text{Baramgol} \quad (61)$$

where,  $Srzi_M$  and  $Srzi_R$  are  $Srzi$  parameters for Bukmoongol and Baramgol experimental watershed, respectively, and,  $Q_{obM}^I$  AND  $Q_{obR}^I$  are initial values of observed runoff (mm/hr) of Bukmoongol and Baramgol experimental watershed, respectively.

또한, 차단역의 배수량 회귀계수  $P_a$ 와  $P_b$ 의 최적값은 각각 0.054와

1.3922의 값을 보였으며, 차단역의 배수량 발생에 필요한 最少 遮斷貯留量  $C_{iz}$ 의 최적값은 0.6, 차단역 직접통과율  $p$ 의 최적값은 0.075, 早期 地表下 流出係數  $C_p$ 의 최적값은 0.018, 증발산비  $K_e$ 의 최적값은 1.0의 값을 보였다.

한편, 복문골 시험유역 및 바람골 시험유역에서 뿌리대의 초기 저류 미흡량  $Sr_{z1}$ 은 식 (60) 및 식 (61)와 같이 관측유량의 초기값  $Q_{ob}^1$ 과 대수관계를 가지는 것으로 나타났다.

그림 5-36와 그림 5-37은 복문골 시험유역과 바람골 시험유역에서 본 모형의 보정에 사용하였던 1992년부터 1998년까지의 강우-유출사상에 대해 유역별 최적 매개변수를 이용하여 모형의 재현성을 분석한 결과이다. 그림 5-36은 복문골 시험유역의 총 38개 매개변수 보정자료(강우-유출사상)의 시유량별 관측치와 모의치의 상관관계를 보여주고 있으며, 그림 5-37은 바람골 시험유역의 총 36개 매개변수 보정자료(강우-유출사상)의 시유량별 관측치와 모의치의 상관관계를 보여주고 있다.

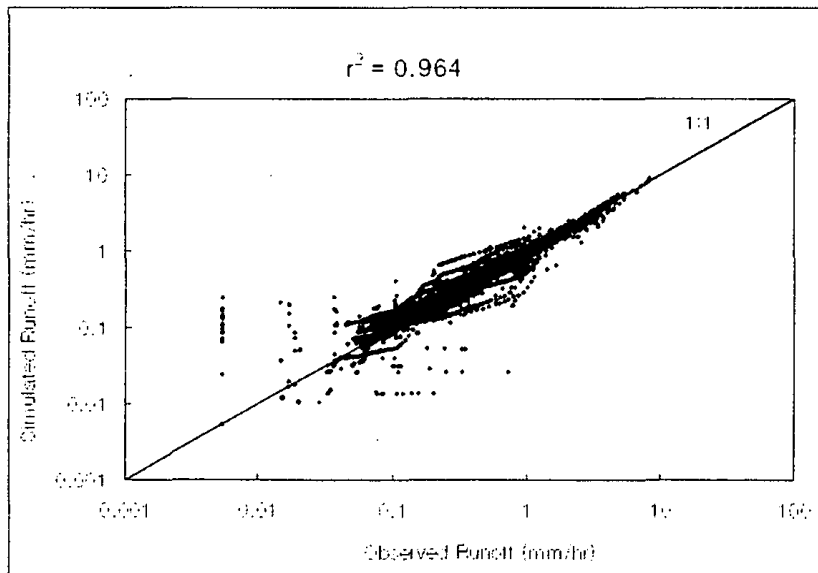


그림 5-36. 강우-유출모형의 재현성 분석결과(복문골 시험유역)



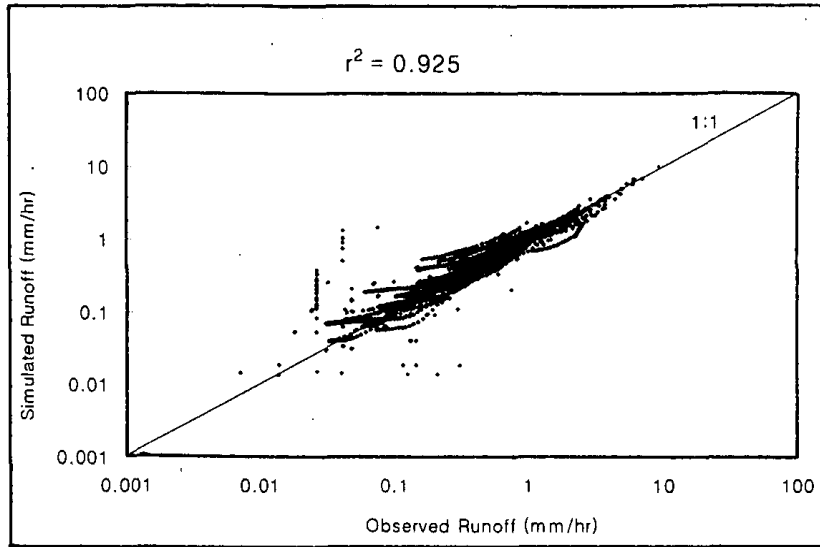


그림 5-37. 강우-유출모형의 재현성 분석결과(바람골 시험구역)

그림 5-36 및 그림 5-37에서 보는 바와 같이 북문골 시험구역과 바람골 시험구역에서 관측유량과 모의유량과의 상관계수( $r^2$ )는 각각 0.964 및 0.925로서 상관관계가 우수한 것으로 분석되었다.

#### 마. 모형의 검정

##### 1) 북문골 시험구역

모형의 검정을 위하여 매개변수 추정에 이용되지 않은 자료를 이용하여 모형의 일관성을 검토하였다. 북문골 시험구역에서 모형의 검정에 사용된 강우-유출자료는 표 5-32에서 보는 바와 같이 1999년도에 발생한 6개 강우-유출사상이었다.

표 5-26에서와 같은 북문골 시험구역의 최적 매개변수를 이용하여 6개 강우-유출사상에 대한 검정을 실시한 결과는 표 5-33과 같다.

표 5-32. 모형의 검정을 위해 사용된 강우-유출사상(북문골 시험유역)

Storm Number	DATE	Rainfall (mm)	Runoff (mm)	Peak flow (mm/hr)
BM-S39	9 April, 1999	92.5	28.629	1.510
BM-S40	26 July, 1999	191	89.635	5.492
BM-S41	25 August, 1999	44.5	23.922	0.744
BM-S42	30 August, 1999	72.5	39.623	1.157
BM-S43	5 September, 1999	70.5	39.929	2.239
BM-S44	19 September, 1999	142.0	100.571	1.52

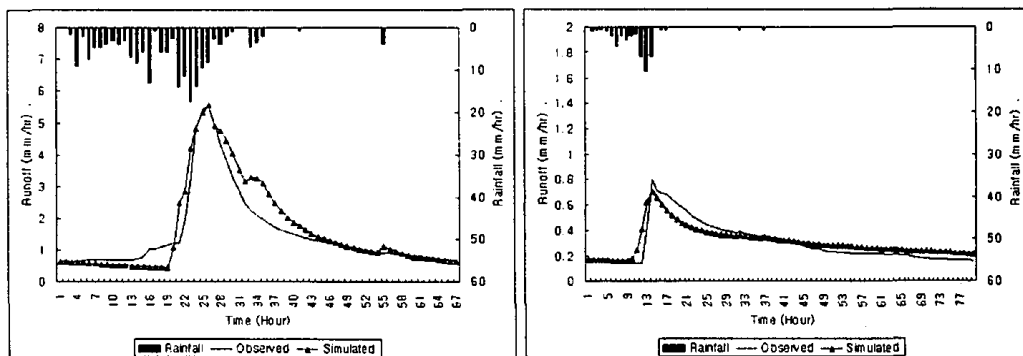
표 5-33. 최적 매개변수를 이용한 강우-유출모형의 검정결과(북문골 시험유역)

Storm No.	Rainfall(mm)	CME	PEV(%)	PEP(%)	EPT(hr)
BM-S39	92.5	0.71	14.97	-4.60	-1
BM-S40	191.0	0.86	-3.11	2.05	1
BM-S41	44.5	0.83	4.43	-12.19	0
BM-S42	72.5	0.87	10.11	-5.91	-8
BM-S43	70.5	0.95	3.51	-1.45	0
BM-S44	142.0	0.92	-0.61	18.25	0
Average	102.17	0.86	4.88	-0.64	-1.33

표 5-33에서 보는 바와 같이 북문골 시험유역의 경우 모형 효율성 계수(CME)는 0.71에서 0.95의 범위를 보였으며, 평균은 0.85이었다. 또한, 모의치와 관측치간의 유출용적 오차율(PEV)은 -3.11~14.97%의 유출용적 오차율을 보였으며, 첨두유량이 다소 적게 모의되는 것으로 분석되었다. 한편, 첨

두유량의 모의치와 관측치간의 오차는 -12.19~18.25%로서 유출용적에 비해 다소 오차가 큰 것으로 나타났다. 침투시각에 대해서는 8시간의 차이를 보인 BM-S42(1999년 8월 30일 발생) 사상에서 큰 차이를 보였으나 다른 5개 강우-유출사상은 1시간 이내의 작은 차이를 보였다. BM-S42 강우-유출사상의 경우는 연속적인 강우로 인한 수문곡선의 2차적인 상승분을 모형에서 충분히 모의해 내지 못했기 때문이었다.

그림 5-38은 본 모형의 검정자료로 이용한 북문골 시험구역의 3개 강우-유출사상에 대하여 본 모형에 의해 예측된 모의 수문곡선과 관측 수문곡선을 보여주고 있다. 그림 5-38에서 보는 바와 같이 본 모형에 의한 모의 예측 결과가 관측 수문곡선과 잘 일치하고 있는 것으로 나타났다.



(1999. 7. 26)

(1999. 8. 25)

그림 5-38. 최적 매개변수를 이용한 모의치와 실측치의 비교  
(북문골 시험구역)

## 2) 바람골 시험구역

바람골 시험구역에서 모형의 검정에 사용된 강우-유출자료는 표 5-34에

서 보는 바와 같이 1999년도에 발생한 5개 강우-유출사상이었으며, 표 5-26에서 제시하였던 바람골 시험구역의 최적 매개변수를 이용하여 검정을 실시한 결과는 표 5-35와 같다.

표 5-34. 모형의 검정을 위해 사용된 강우-유출사상(바람골 시험구역)

Storm Number	DATE	Rainfall (mm)	Runoff (mm)	Peak flow (mm/hr)
BR-S37	26 July, 1999	191.0	50.104	3.923
BR-S38	29 July, 1999	304.0	262.623	12.277
BR-S39	3 August, 1999	92.0	88.333	2.741
BR-S40	25, August, 1999	86.0	27.465	2.459
BR-S41	30 August, 1999	72.5	17.225	0.367

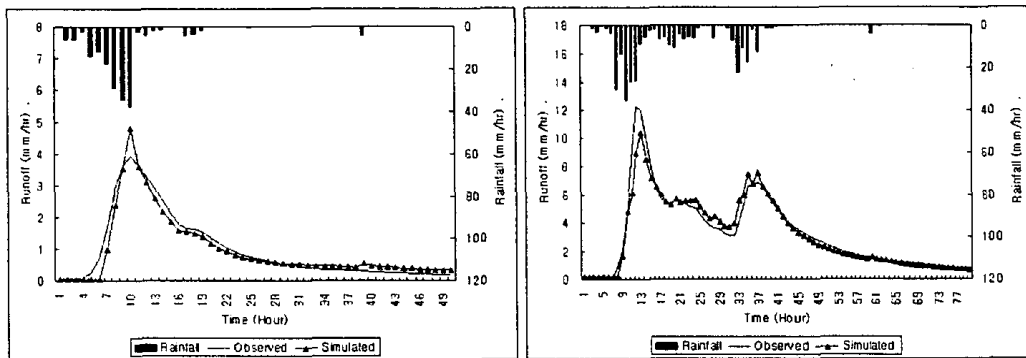
표 5-35. 최적 매개변수를 이용한 강우-유출모형의 검정결과(바람골 시험구역)

Storm No.	Rainfall(mm)	CME	PEV(%)	PEP(%)	EPT(hr)
BR-S37	191.5	0.91	7.62	15.56	0
BR-S38	304.0	0.89	5.55	-9.28	0
BR-S39	92.0	0.81	0.39	10.78	-3
BR-S40	86.0	0.86	3.52	0.39	0
BR-S41	70.5	0.86	3.08	19.49	0
Average	148.8	0.87	4.03	7.39	-0.60

표 5-35에서 보는 바와 같이 바람골 시험구역의 경우, 模型 效率性 係數 (CME)는 0.81에서 0.91의 범위를 보였으며, 평균은 0.86으로 북문골 시험구역과 유사하였으며, 모의치와 관측치간의 유출용적 오차율(PEV)은 5개 강우

-유출사상 모두 7.62% 이내의 양호한 오차율을 보였다. 한편, 침투유량의 모의치와 관측치간의 오차는 -9.28~17.49%로서 유출용적에 비해 다소 오차가 큰 것으로 나타났으며, 관측 침투유량에 비해 모의된 침투유량이 다소 적었던 것으로 나타났다. 모의치 및 관측치의 침투시각은 -3~0hr의 오차를 보였다.

그림 5-39는 본 모형의 검정자료로 이용한 바람골 시험구역의 4개 강우-유출사상에 대하여 본 모형에 의해 예측된 모의 수문곡선과 관측 수문곡선을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 바람골 시험구역의 경우에도 본 모형에 의한 모의 예측 결과가 관측 수문곡선과 잘 일치하고 있는 것으로 나타났다.



(1999. 7. 26)

(1999. 7. 29)

그림 5-39. 최적 매개변수를 이용한 모의치와 실측치의 비교  
(바람골 시험구역)

#### 4. 임도배수량 및 토사유출량 예측모형의 적용

##### 가. 임도 배수량 해석을 위한 강우-유출모형 매개변수의 보정

###### 1) 지형지수 분포

임도 배수량 및 토사유출모형의 적용을 위한 명성 시험유역내 상류유역의 지형지수 분포는 그림 5-40에서 보는 바와 같다. 지형지수의 계산에 사용된 수치지형도는 10m 격자크기이었으며, 지형지수의 산정 알고리즘은 다방향 흐름 알고리즘이었다.

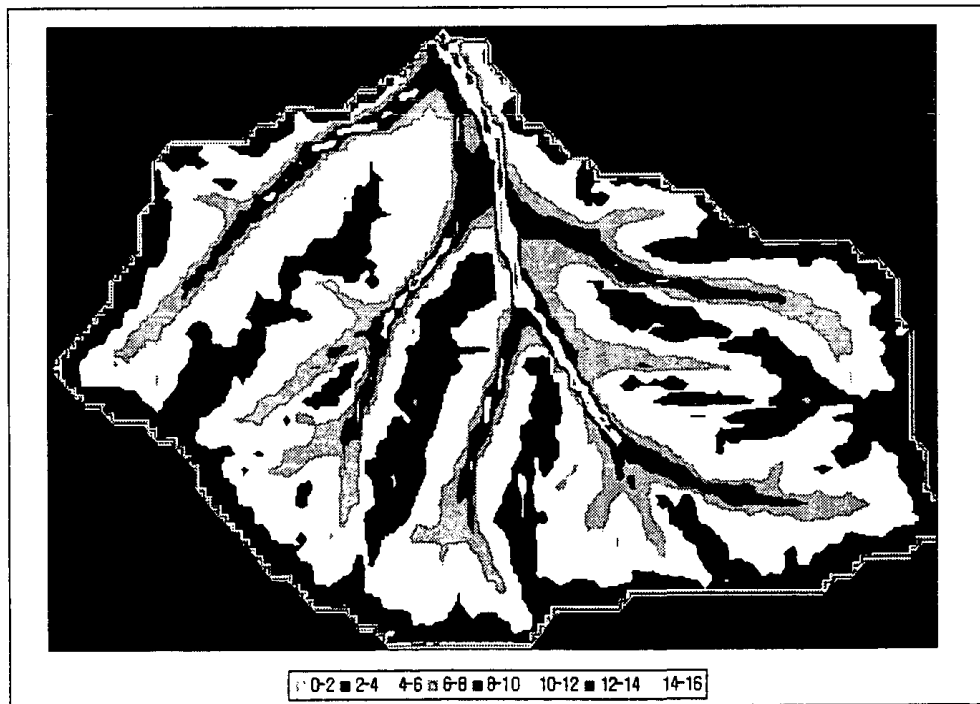


그림 5-40. 양평 시험유역 상류유역의 지형지수 분포

그림 5-40에서 보는 바와 같이 명성 상류시험구역의 지형지수는 최소 1.465에서 최대의 14.304범위를 보였고, 평균 4.872의 값을 나타내었으며, 구역의 계곡부를 따라 구역 출구에서 최대값을 보였다.

명성 상류시험구역의 지형지수 분포를 각 지수급별 총 구역면적에 대한 해당 지수급의 분포면적비로 나타낸 결과, 지형지수는 4에서 4.5사이 값의 분포면적이 가장 많은 것으로 나타났다.

## 2) 매개변수의 보정

### 가) 강우-유출자료의 선정

모형의 보정을 위하여 표 5-36에서 보는 바와 같이 명성 상류시험구역에서 관측한 강우-유출자료 중 15개 강우-유출사상을 모형 매개변수의 보정용 강우-유출자료로 선정하였다. 선정된 강우-유출사상 중 최소 강우량을 보인 것은 1998년 5월 16일의 33.0mm이었고, 최대 강우량을 보인 것은 1997년 7월 5일 발생한 강우사상으로서 317.0mm이었다.

모형의 보정을 위한 목적함수로는 Nash와 Sutcliffe(1970)가 제안한 무차원 계수로 모형 효율성 계수(CME, Coefficient of Model Efficiency)를 이용하였으며, 매개변수의 보정을 위하여 균등 분포 난수 발생을 통한 Monte Carlo 모의 방법을 사용하였다.

표 5-36. 매개변수 보정을 위한 강우-유출사상(명성 상류 시험구역)

Storm Number	Date	Rainfall (mm)	Runoff (mm)	Peak flow (mm/hr)
S1	6 June, 1997	104.5	7.768	0.15172
S2	28 June, 1997	95.5	12.940	0.18989
S3	8 July, 1997	222.0	115.229	4.13712
S4	24 July, 1997	118.0	54.195	1.60456
S5	8 August, 1997	245.0	109.533	2.28702
S6	6 September, 1997	69.0	46.088	1.54385
S7	28 September, 1997	38.5	18.421	0.44972
S8	16 May, 1998	33.0	10.245	0.17155
S9	6 June, 1998	43.5	9.695	0.08595
S10	5 July, 1998	317.0	190.195	3.17842
S11	2 August, 1998	272.0	77.762	0.46522
S12	19 May, 1999	51.5	5.990	0.14017
S13	25 June, 1999	49.0	5.872	0.13846
S14	11 July, 1999	71.5	16.346	0.16043
S15	25 July, 1999	107.5	29.990	0.44502

#### 나) 모형의 보정

표 5-37은 명성 상류시험구역에서 매개변수의 보정을 위해 분석한 총 15회의 강우-유출사상에 대하여 각 강우-유출사상별로 보정된 매개변수들의 평균값과 분포를 보여주고 있다.

매개변수의 보정은 표 5-36에서 제시한 각 매개변수의 범위를 이용하여 균등분포 난수조합을 발생시켜 모형에 입력하는 Monte Carlo 모의 방법을 사용하였으며, 각 강우-유출사상별로 최고 모의 효율성 계수 값을 보이는 매개변수의 조합을 각 강우-유출사상별 최적 매개변수로 선정하였다.



표 5-37. 명성 상류 시험구역의 사상별 최적 매개변수 분포

Parameter		Average	Min.	Max.	SD
$m$	Parameter controlling the decline of saturated hydraulic conductivity with depth (m)	0.0425	0.0203	0.0600	0.0139
$T_0$	Watershed mean value of transmissivity at saturation of the soil ( $m^2/hr$ )	0.6423	0.3107	0.9115	0.1860
$T_d$	Time delay factor of saturated zone storage recharge (hr)	6.2502	4.1266	8.4146	1.0807
$SR_{MAX}$	Maximum storage of root zone (m)	0.0064	0.0004	0.0535	0.0159
$Srzi$	Initial value of root zone storage deficit (m)	0.0013	0.0002	0.0117	0.0030
$P_a$	Coefficient of Drainage from interception storage	0.0165	0.0027	0.0276	0.0064
$P_b$	Coefficient of Drainage from interception storage	1.3057	0.9476	1.8160	0.2518
$Ciz$	Minimum interception storage for generation of drainage from interception storage (mm)	0.0011	0.0008	0.0017	0.0002
$p$	Free throughfall rate in interception zone	0.0445	0.0164	0.0861	0.0194
$C_p$	Coefficient for prompt subsurface runoff	0.2600	0.0004	1.2498	0.3354

\* SD : Standard Deviation

표 5-37에서 보는 바와 같이 시험구역에서 토양 깊이에 따른 포화 투수 계수 감소함수의 감소상수  $m$ 은 평균 0.0425의 값을 보였으며, 포화 전도계수의 구역평균값  $T_0$ 는 0.6423, 포화대 저류 함양의 시간지체 상수  $T_d$ 는 6.2502, 뿌리대의 최대 저류량  $SR_{MAX}$ 는 0.0064의 값을 보였다. 또한, 차단역

의 배수량 회귀계수  $P_a$ 와  $P_b$ 는 각각 0.0165와 1.3057의 값을 보였으며, 차단역의 배수량 발생에 필요한 최소 차단저류량  $C_{iz}$ 는 0.0011, 차단역 직접 통과율  $p$ 는 0.0445, 조기 지표하 유출계수  $C_p$ 는 0.2600의 값을 보였다.

#### 나. 측구 배수량 해석

표 5-38에서 표 5-40까지는 이 연구에서 개발된 임도 측구 배수량 예측 모형으로 모의한 각 조사구 별로 관측된 측구배수량과 모의된 측구배수량, 그리고 관측값 모의값의 오차율을 나타낸 것이다. 모의된 측구배수량 값은 시험구역의 매개변수들을 고정시킨 후에 모의를 통해 얻어진 값을 나타내고 있다.

표 5-38. 임도 측구 토사유출량 측정시험지 1에서 관측된 측구배수량과 모의치와의 비교

Storm Number	Observed Drainage (m <sup>3</sup> )	Simulated Drainage (m <sup>3</sup> )	Percent error (%)
970628	69.6	89.8	28.99
970708	143.7	217.1	51.05
970724	57.6	66.7	15.83
970808	191.1	210.8	10.29
980705	264.3	232.9	-11.89
980802	216.4	109.3	-49.51
990711	51.7	63.9	23.56
990725	78.0	92.5	18.62
Average	134.05	135.38	10.87

표 5-38에서 보는 바와 같이, 임도 측구 배수량 조사구 1에서 연구기간 동안의 8개 강우사상에서 관측된 측구배수량 값은  $51.7\text{m}^3 \sim 264.3\text{m}^3$ 의 범위에 있었으며, 평균값은  $134.05\text{m}^3$ 이었다. 모의된 측구배수량 값은  $63.9\text{m}^3 \sim 232.9\text{m}^3$ 의 범위에 있었으며, 평균값은  $135.37\text{m}^3$ 이었다. 또한, 관측값과 모의값의 오차율을 계산한 결과,  $-49.51 \sim 51.05\%$ 의 범위를 보였으며, 평균오차는  $10.86\%$ 으로, 모의값이 관측값보다 다소 높게 나타났다.

표 5-39. 임도 측구 토사유출량 측정시험지 2에서 관측된 측구배수량과 모의치와의 비교

Storm Number	Observed Drainage ( $\text{m}^3$ )	Simulated Drainage ( $\text{m}^3$ )	Percent error (%)
970628	170.5	141.7	-16.87
970708	267.5	339.2	26.82
970724	102.4	103.1	0.66
970808	313.4	328.4	4.80
980705	401.2	362.7	-9.61
980802	254.2	167.1	-34.26
990711	61.5	100.1	62.83
990725	177.9	145.2	-18.35
Average	218.57	210.94	2.00

표 5-39에서 보는 바와 같이, 임도 측구 배수량 조사구 2에서 연구기간 동안의 8개 강우사상에서 관측된 측구배수량 값은  $61.5\text{m}^3 \sim 401.2\text{m}^3$ 의 범위에 있었으며, 평균값은  $218.57\text{m}^3$ 이었다. 모의된 측구배수량 값은  $100.1\text{m}^3 \sim 362.7\text{m}^3$ 의 범위에 있었으며, 평균값은  $210.93\text{m}^3$ 이었다. 또한, 관측값과 모의값의 오차율을 계산한 결과,  $-34.26 \sim 62.83\%$ 의 범위를 보였으며, 평균오차는

율은 2.00%이었다.

한편, 표 5-40에서 보는 바와 같이, 임도 측구 배수량 조사구 3에서 연 구기간동안의 8개 강우사상에서 관측된 측구배수량 값은 59.5m<sup>3</sup>~288.9m<sup>3</sup>의 범위에 있는 것으로 나타났으며, 평균값은 156.07m<sup>3</sup>이었다. 모의된 측구배 수량 값은 49.6m<sup>3</sup>~180.3m<sup>3</sup>의 범위에 있었으며, 평균값은 104.82m<sup>3</sup>이었다. 또한, 관측값과 모의값의 오차율을 계산한 결과, -60.22~-1.95%의 범위를 보였으며, 평균오차율은 -28.18%으로, 모의값이 관측값보다 다소 작게 나타 났다.

표 5-40. 임도 측구 토사유출량 측정시험지 3에서 관측된 측구배수량과 모 의치와의 비교

Storm Number	Observed Drainage (m <sup>3</sup> )	Simulated Drainage (m <sup>3</sup> )	Percent error (%)
970628	71.4	70.0	-1.95
970708	242.2	168.4	-30.46
970724	84.2	51.4	-38.91
970808	200.9	163.3	-18.73
980705	288.9	180.3	-37.60
980802	210.5	83.7	-60.22
990711	59.5	49.6	-16.62
990725	91.0	71.9	-20.96
Average	156.07	104.83	-28.18

그림 5-41에서 그림 5-42는 임도 측구 배수량 조사구 1, 2, 3에서의 실 측배수량 값과 모의배수량 값을 1:1 선을 이용하여 나타내고 있다.

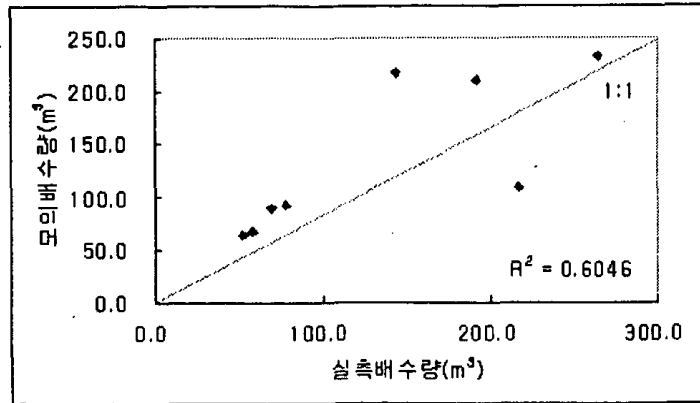


그림 5-41. 임도 측구 배수량 조사구 1의 실측배수량과 모의배수량의 관계

그림 5-41에서 보는 바와 같이, 임도 측구 배수량 조사구 1에서는 모의 배수량 값이 다소 높게 나타나고 있었으며, 상관계수  $R^2=0.6046$ 의 값을 나타내었다.

한편, 임도 측구 배수량 조사구 2에서는 그림 5-42에서 보는 바와 같이, 모의배수량 값과 실측배수량 값이 비교적 일치하는 것으로 나타났으나 다소 높게 모의되는 것으로 나타났다. 상관계수  $R^2=0.8128$ 로서 모의배수량 값과 실측배수량 사이에 비교적 높은 상관관계를 가지는 것으로 판단된다.

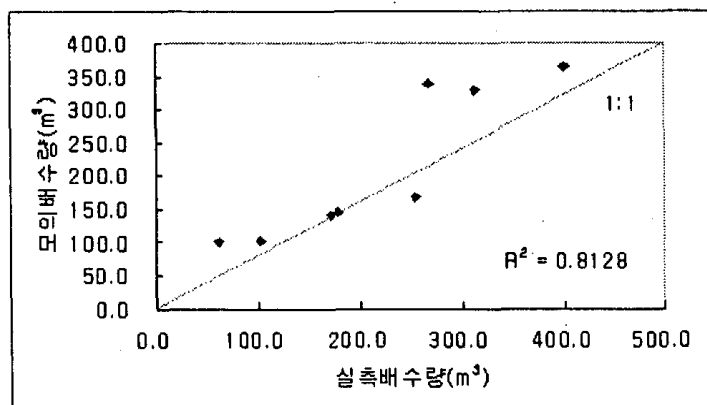


그림 5-42. 임도 측구 배수량 조사구 2의 실측배수량과 모의배수량의 관계

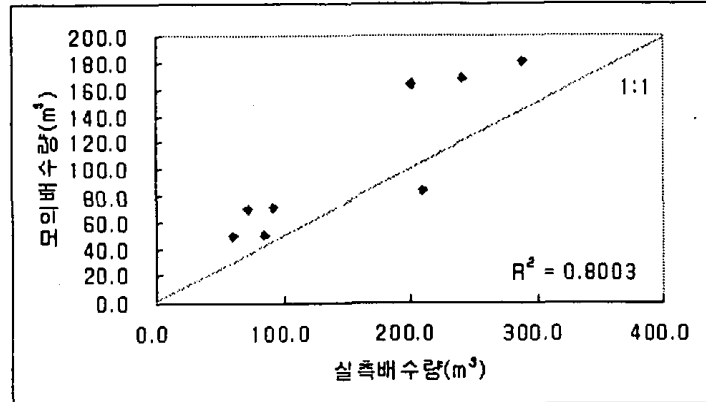


그림 5-43. 임도 축구 배수량 조사구 2의 실측배수량과 모의배수량의 관계

그림 5-43에서 보는 바와 같이, 임도 축구 배수량 조사구 3에서는 모의 배수량 값이 실측배수량 값에 비해 다소 높게 나타났으며, 상관계수  $R^2=0.8003$ 으로서 모의배수량 값과 실측배수량 사이에 비교적 높은 상관관계를 가지는 것으로 판단된다.

#### 다. 토사유출량 분석

본 연구에서 개발한 토사유출모형을 이용하여 연구기간동안 관측된 11차례의 호우사상을 대상으로 각 축구별 토사유출량을 모의 발생한 결과, 그림 5-44에서 보는 바와 같이 실측 토사유출량과 모의 토사유출량과는 상관계수 0.8357로서 비교적 우수한 모의 결과를 보였다.

모의 발생에 사용한 축구 유출수량은 축구 배수량 모형을 이용하여 초당 유출수량을 재현하였으며, 모형결과의 검정은 총량 검정을 실시하였다.

그 결과, 임도 토사유출수량은 임도의 지표유출수량 및 임도 경사에 비례하는 것으로 분석되었으며, 토사유출모형의 매개변수  $k$ ,  $m$ ,  $n$ 은 각각

7.288, 0.204, 2.826으로서 임도 토사유출량은 임도상의 지표유출수량보다는 임도경사에 더욱 크게 영향받는 것으로 나타났다.

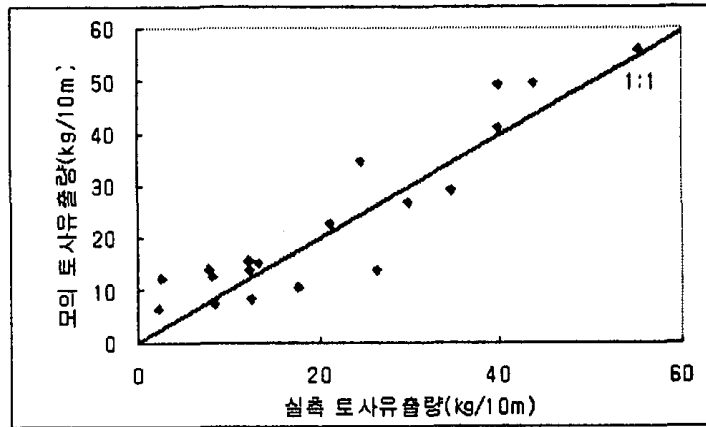


그림 5-44. 실측 토사유출량과 모의 토사유출량 비교( $R^2 = 0.8357$ )

## 5. 산지개발에 따른 산원수 환경영향 평가기법 및 산원수자원의 종합적 관리시스템의 적용

명성 시험유역 중류 수위관측지점의 집수유역(면적 약 320ha)을 대상으로 산지개발에 따른 산원수 환경영향 평가기법 및 산원수자원의 종합적 관리시스템의 적용성 분석을 실시하였다. 본 시험유역에는 제 3절 연구방법의 시험유역 현황에서 전술한 바와 같이 주요 산지개발형태중의 하나인 임도가 1996년 상반기에 개설되었다.

### 가. 임도개설로 인한 수계변화 및 영향

#### 1) 임도개설로 인한 수계변화

산림 지역에 임도를 개설할 때 수문지형학적으로 우선적으로 고려되어야 할 사항은 임도가 산지사면의 수문학적 연속성을 분리시키는 일종의 댐의 역할을 하게 된다는 것이다. 임도는 산지사면의 절취 및 불투수성 혹은 난투수성 노체를 형성함으로써 산지사면의 토양층이 보유하고 있던 수문학적 기능에 많은 변화를 가하며, 이로 인해 개설전에는 동일하거나 일련의 연속성상에서 유지되던 사면의 수문학적 특성이 임도 상부와 하부로 분리 단절되기 쉽다.

임도를 개설하는데 있어서 임도의 배수 및 기존 산지로부터의 유출수의 배수를 위하여 임도에 측구 및 횡단배수로를 설치하게 된다. 이러한 측구와 횡단배수로는 원활한 배수의 효과를 이룰 수는 있지만, 기존 산림지의 유출 경로를 차단, 또는 우회시켜 한 곳으로 집중시키게 되어 산림지역의 수계를 변화시키게 되고, 계류상의 일정지점에 유출수를 집중시키게 되는 작용을



한다.

그림 5-45는 명성 시험유역 중상류지역의 격자크기 10×10m의 수치지형도를 이용하여 작성한 소유역 구분도이다. 그림에서 각 소유역의 출구는 임도의 횡단배수구로서, 임도가 개설된 지점의 상부 산림지역의 유출경로는 횡단배수구로 집중된다.

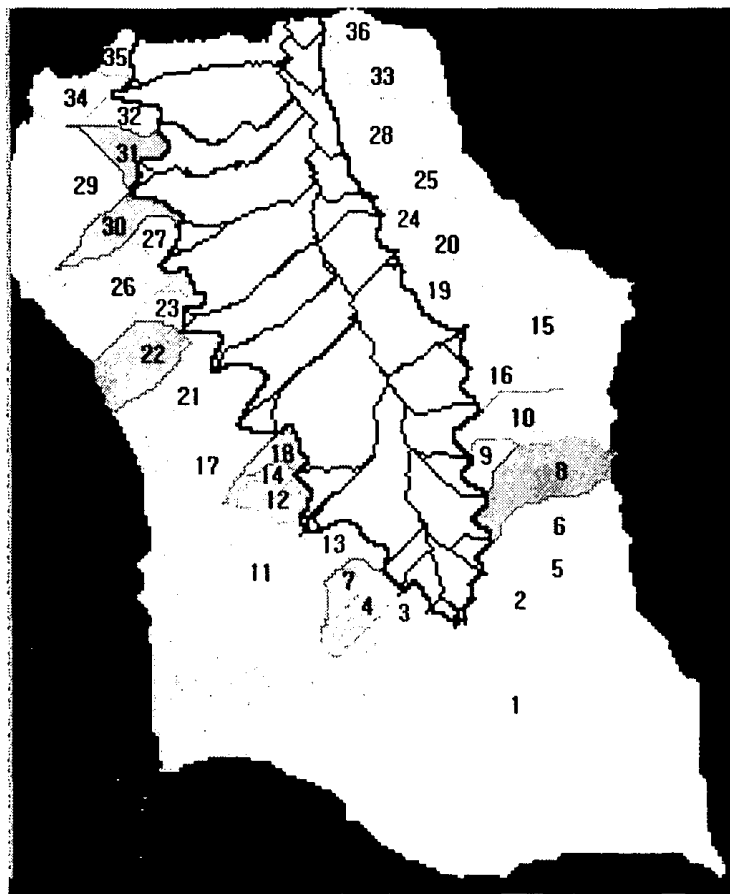


그림 5-45. 명성 시험유역 중상류지역의 소유역 구분도

그림에서 보는 바와 같이 명성 시험유역 중상류지역의 임도 개설높이 이상의 지역은 총 36개의 소유역으로 구분되며, 그 하부 산지사면과는 유출경

로를 달리하게 된다.

## 2) 수계변화로 인한 유량증대 영향

그림 5-46은 임도 횡단배수구 설치지점의 임도개설전 집수구역 면적을 보여주고 있다. 그림에서 검은색 부분은 임도 횡단배수구 설치지점의 집수구역에는 속하지 않으나, 임도 개설로 인해 정상적인 하향 유출경로가 차단되어 임도 측구로 배수되는 지역이다. 이들 지역에서의 유출량은 측구 경사에 따라 임도 횡단배수구로 집수되어 임도 밖으로 유출된다. 따라서, 측구로 배수되는 능선부분이 임도 횡단배수구 설치지점의 집수면적에 포함되고 이에 따라 각 횡단배수구 설치지점의 집수면적이 확대된다.

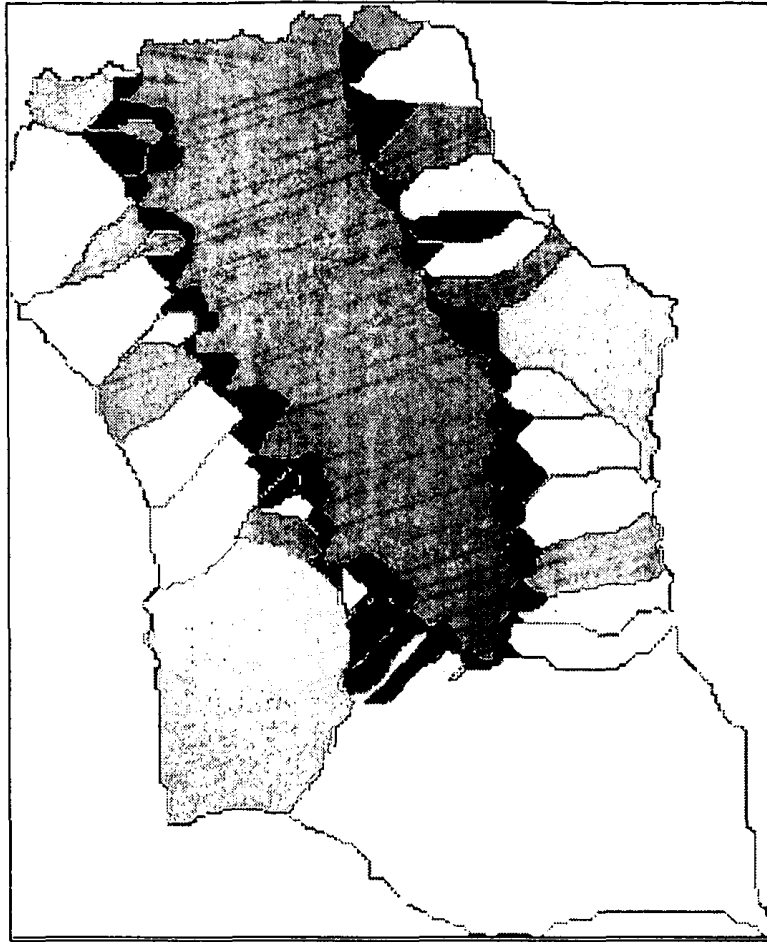


그림 5-46. 임도 횡단배수구 설치 지점의 임도개설전 집수구역

그림 5-46 및 5-47에서 보는 바와 같이 임도가 개설됨으로 인해 임도 횡단배수구와 횡단배수구 사이의 능선부가 임도로 인해 하부 사면과 단절됨으로써 이들 능선부분의 유출수가 임도 측구를 통해 횡단배수구 지점으로 집중되고 이에 따라, 횡단배수구 설치지점의 계류는 개설전에 비해 증가된 집수면적을 가지게 된다. 분석결과, 각 횡단배수구 지점의 집수면적은 임도개설전에 비해 임도개설후 평균 약 16%, 최대 약 290%까지 증가하였던 것으로 나타났다.

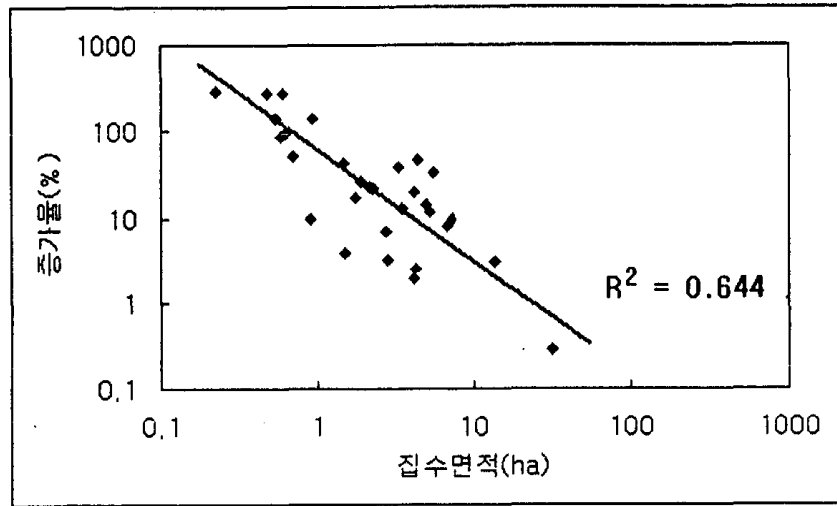


그림 5-47. 임도 횡단배수구별 집수면적에 따른 개설후 집수면적 증가율

그림 5-48은 집수구역의 확대에 의해 유량증가가 현저할 것으로 예상되는 수로를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 상부 집수면적이 현저히 증가하여 급격한 유량증가가 우려되는 계류구간은 총 10개이었다. 이들 계류구간은 현저한 유량증가로 인해 계안 및 계상의 침식이 우려되는 지역이다.

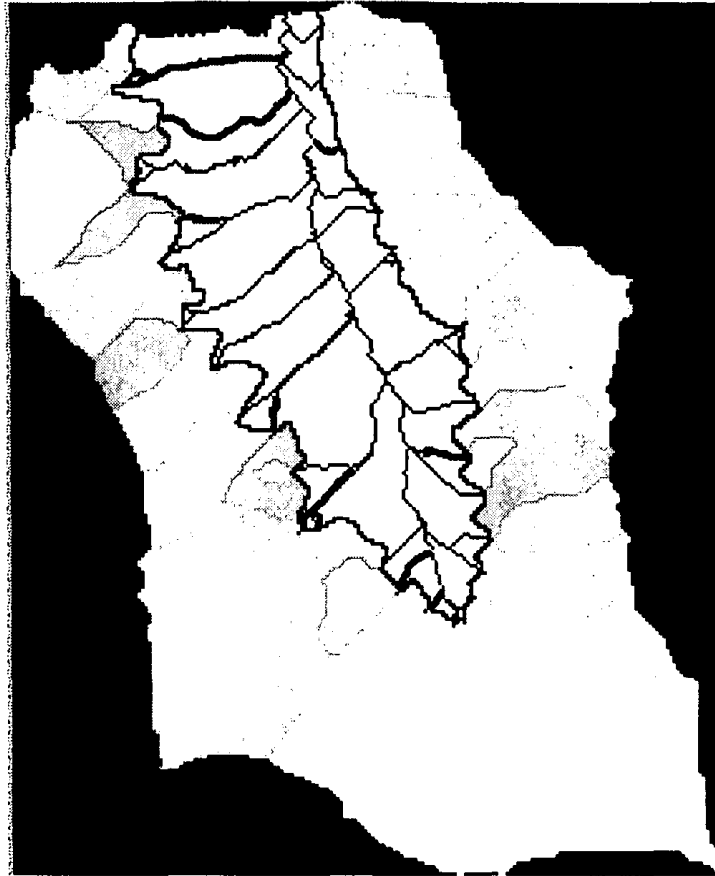


그림 5-48. 집수구역 확대에 의한 유량증대로 침식성이 증대되는 수로구간(그림내 적색부분)

#### 나. 유역 습윤특성의 변화

산지사면은 대공극이 풍부하여 통기성, 침투성 및 투수성이 큰 산림토양으로 인하여 대부분의 강우는 지중으로 침투되어 불포화상태로 비교적 속도가 빠른 지표하 유출의 형태로 유출된다. (Freeze, 1972; Hewlett, 1984; 高德九, 1989).

그러나, 임도 건설은 산림표토의 제거 및 사면 절취와 노반 및 노체 등

의 토양층을 형성함으로 인해 산지사면의 주요 유출경로인 지표하 유출현상을 차단하게 되며, 아울러 상부사면으로부터 하부사면으로의 토양수분의 이동이 곤란하게 된다.

일반적으로 유역의 공간적인 습윤상태의 분포는 지형지수(또는 습윤지수)를 이용하여 나타낸다(Beven and Kirkby, 1979). 그림 5-49는 명성 시험유역에서 임도가 개설되어 있지 않다고 가정하였을 때의 지형지수의 공간적 분포를 보여주고 있다.

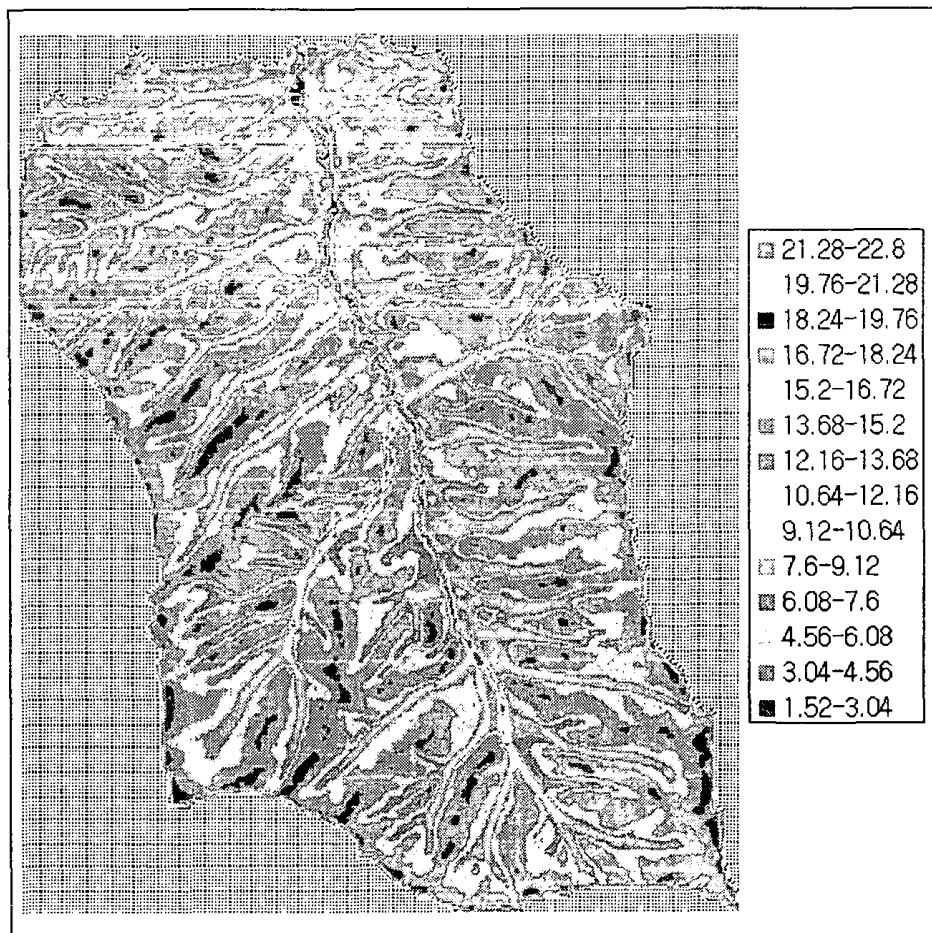


그림 5-49. 임도를 고려하지 않은 지형지수 분포(명성 시험유역)

이때 지형지수는 최소 1.52에서 최대 21.29의 범위를 보였으며, 유역 평균 지형지수는 4.98이었다. 그림 5-49에서 보는 바와 같이 명성 시험유역은 좁고 긴 주계류를 중심으로 수지상의 수계배열을 보이고 있으며, 지형지수의 높은 값도 이러한 수계 조직과 일치하고 있다.

한편, 그림 5-50은 임도를 고려하였을 때의 지형지수의 공간적 분포를 보여주고 있다. 지형지수의 계산시 임도는 토양수분 및 지하수의 이동이 불가능한 것으로 가정하였다. 그림 5-50에서 보는 바와 같이 임도가 개설되어 있는 경우의 지형지수 분포는 임도를 고려하지 않았을 때의 지형지수 분포와 대부분 일치하고 있는 것으로 나타났으나, 중상류지역의 주계류 부분에서 다소 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이러한 차이는 임도를 고려하지 않았을 때에 지형지수 7.6~9.12의 값을 가진 격자들에서 더욱 두드러졌다.

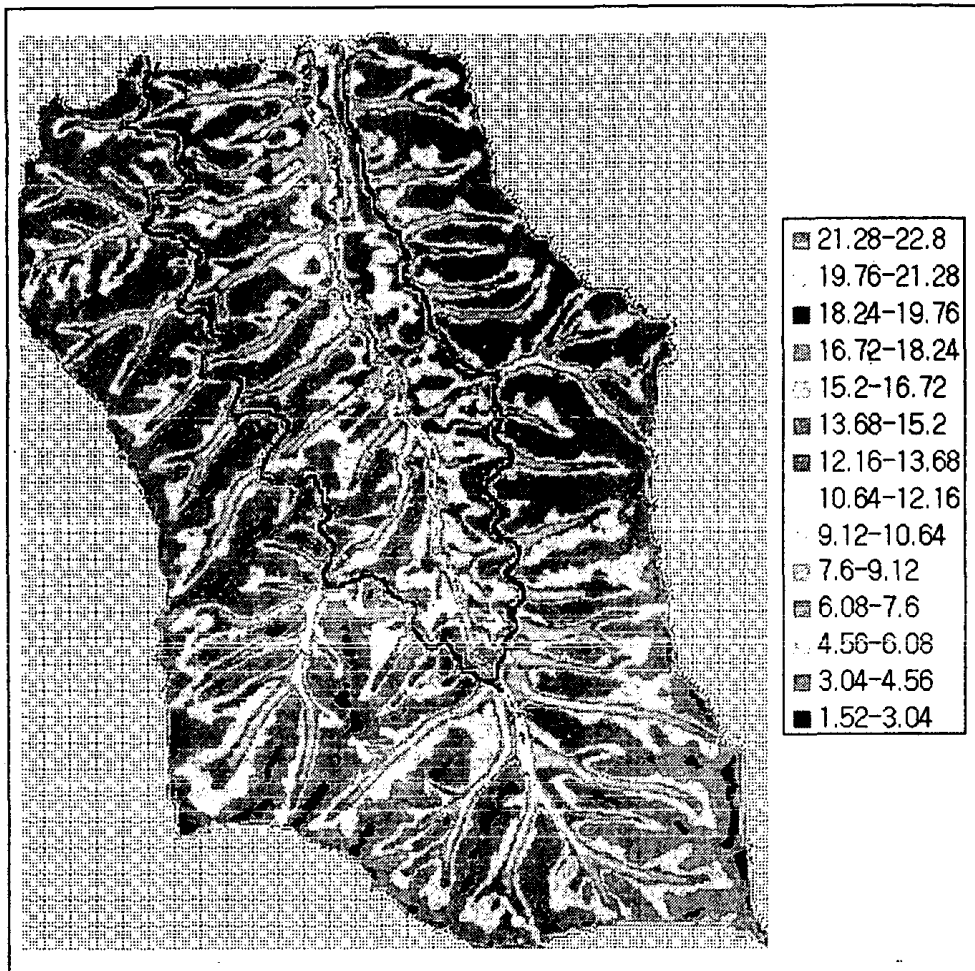


그림 5-50. 임도를 고려한 지형지수 분포(명성 시험구역)

그림 5-51은 명성 시험구역의 지형지수 분포면적비가 임도 개설 유무에 따라 변화됨을 보여주고 있다.

그림 5-51에서 보는 바와 같이 명성 시험구역의 지형지수 분포는 임도 개설유무에 따른 현저한 변화는 나타나지 않았으나, 지형지수 7~9 범위에 서는 임도 개설로 인해 다소 감소한 것으로 분석되었다.



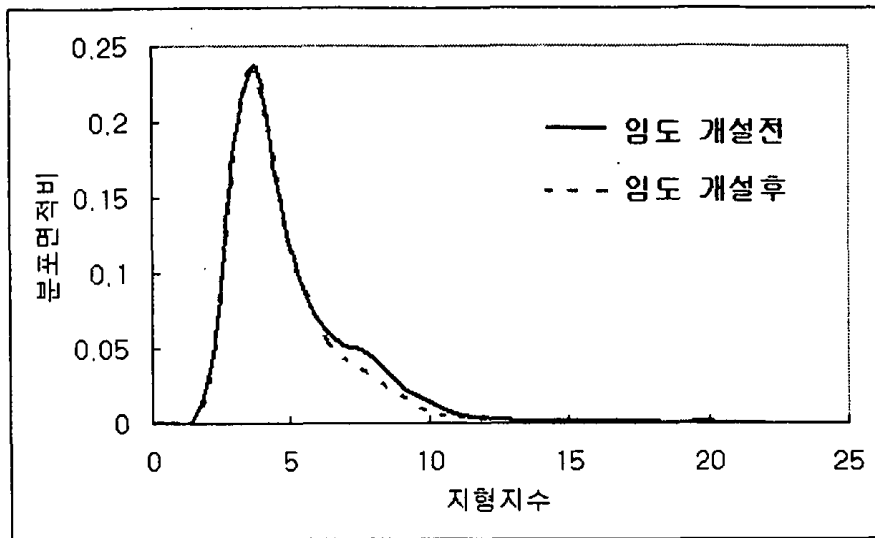


그림 5-51. 임도 개설 전·후의 지형지수 분포 면적비 변화  
(명성 시험구역)

임도의 개설 유무에 따른 지형지수의 공간분포 차이를 명확히 하기 위하여 그림 5-52와 같이 수치지형도 상에서 임도 개설 유무에 따라 지형지수값에 차이를 보이는 격자들을 나타내었다.

그림 5-52에서 보는 바와 같이 임도 개설에 따라 수치지형도상에서 임도 하부에 위치한 격자들의 습윤도가 감소하는 것으로 분석되었으며, 주로 임도 하부에 연접한 계곡부에 위치하는 격자들의 감소폭이 더욱 큰 것으로 분석되어 임도 개설로 인해 임도하부 계곡부를 중심으로 건조도가 증가할 것으로 분석되었다. 한편, 임도와 접한 상부 산지사면에서는 지형지수 값이 증가하여 습윤도가 증가되는 것으로 분석되었다.

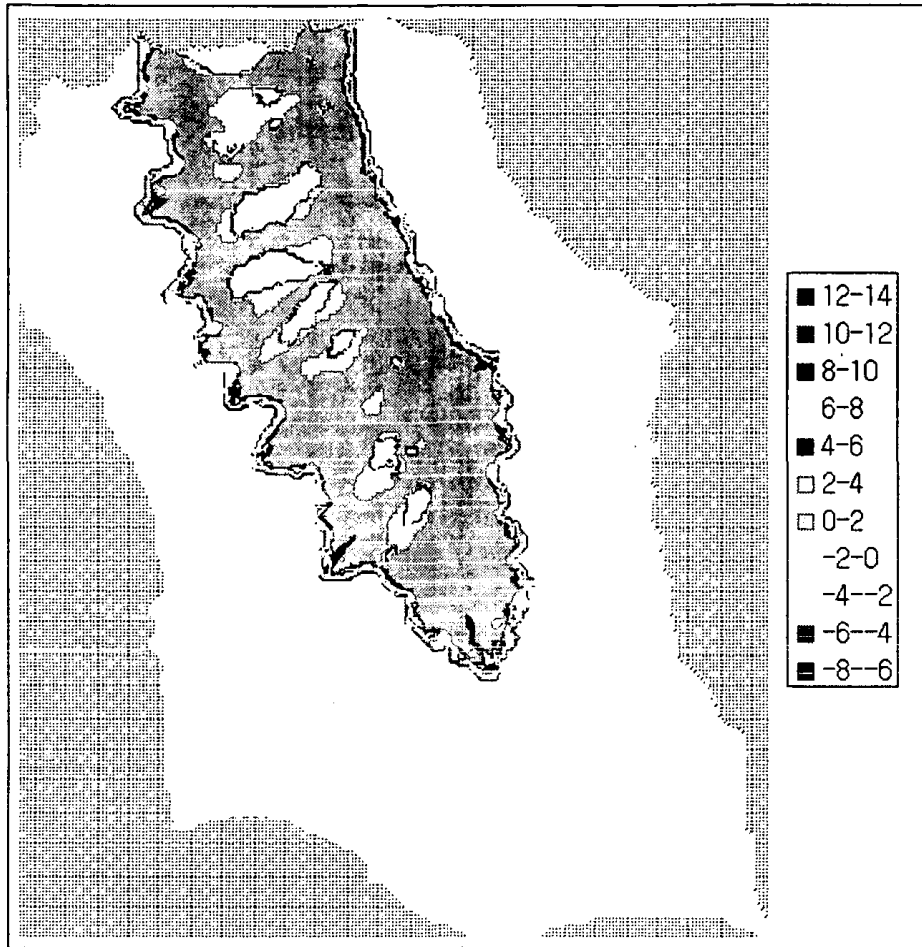


그림 5-52. 임도 개설로 인한 지형지수의 변화 분포  
(범례에서 - 부호는 임도개설로 인한 지형지수 증가를 의미함)

그림 5-53은 명성 시험유역 증상류지역의 임도 개설전과 임도개설후의 강우에 따라 예상되는 유역 포화지역의 증가경향을 지형지수의 값을 이용하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 임도 개설후 임도 하부 유역의 포화도가 상대적으로 다소 감소하는 것으로 분석되었다.

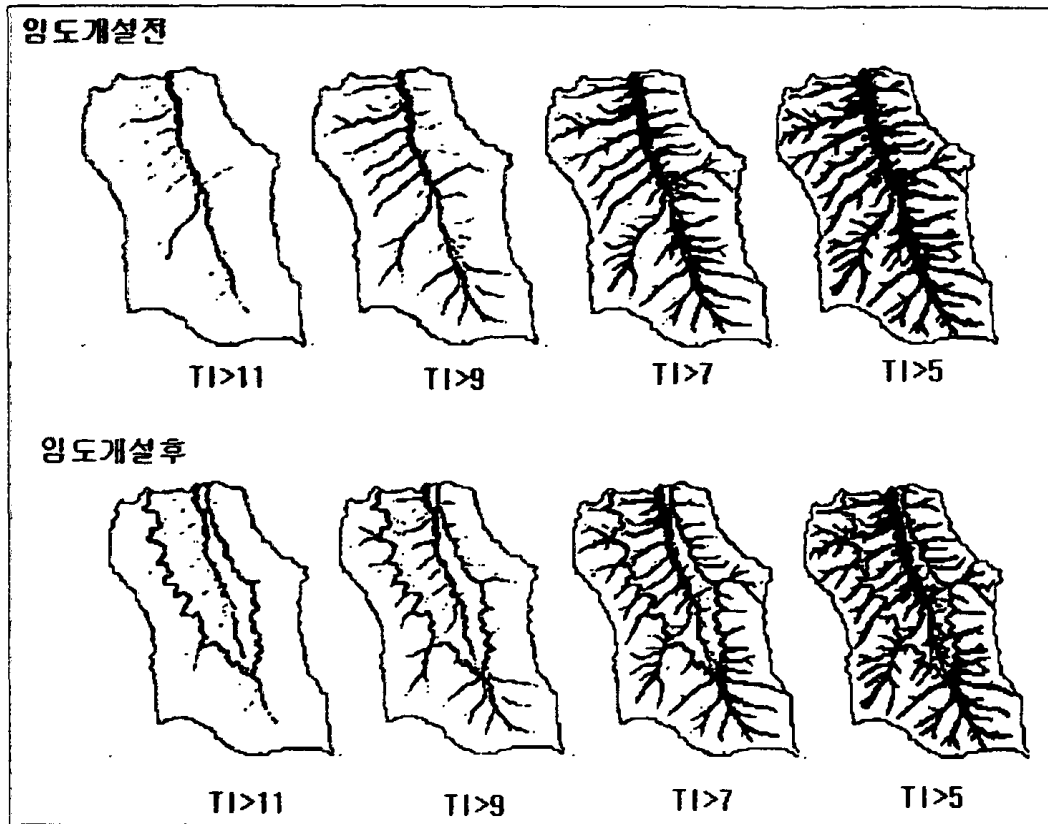


그림 5-53. 임도개설 전후의 지형지수(TI)에 따른 잠재 포화성향분포

### 다. 임도개설로 인한 유출량 변화

#### 1) 유출량 모의분석

본 연구에서 개발한 강우-유출모형을 이용하여 명성 시험유역 중류 수위 관측지점에서 관측된 수문곡선을 모의·재현하였다. 이 모의과정에는 임도로 인한 유출수량 증가를 고려하기 위하여 측구 배수량 예측모형을 함께 적용하여 임도 노면의 초과강우량과 절토사면으로부터의 복류수량을 분석하였다.

그림 5-54에서 그림 5-56은 1997년~1999년의 기간동안 최대 강우량을 보인 강우 사상에 대하여 모의된 수문곡선과 관측된 수문곡선을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 모의 예측 결과가 관측 수문곡선과 비교적 잘 일치하고 있는 것으로 나타났다.

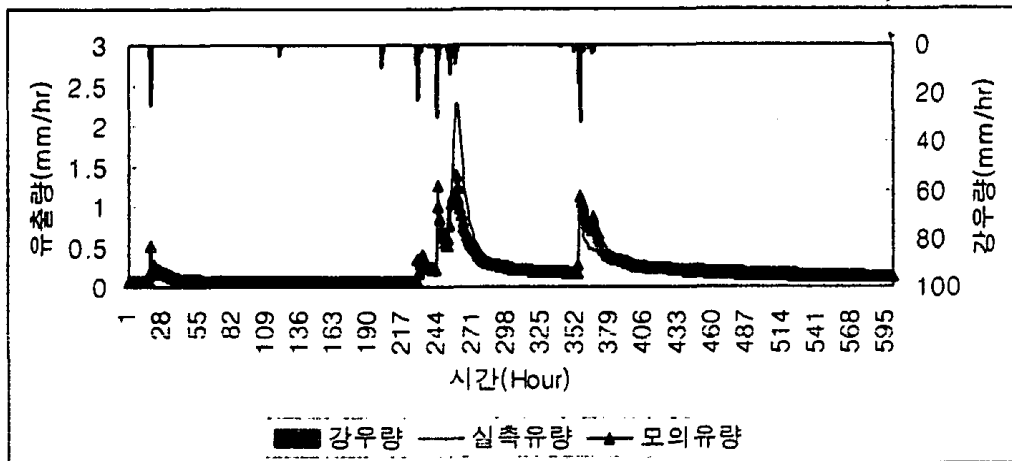


그림 5-54. 1997년 8월 8일의 강우 사상(245.0mm)에 대한 실측유량과 모의 유량의 비교

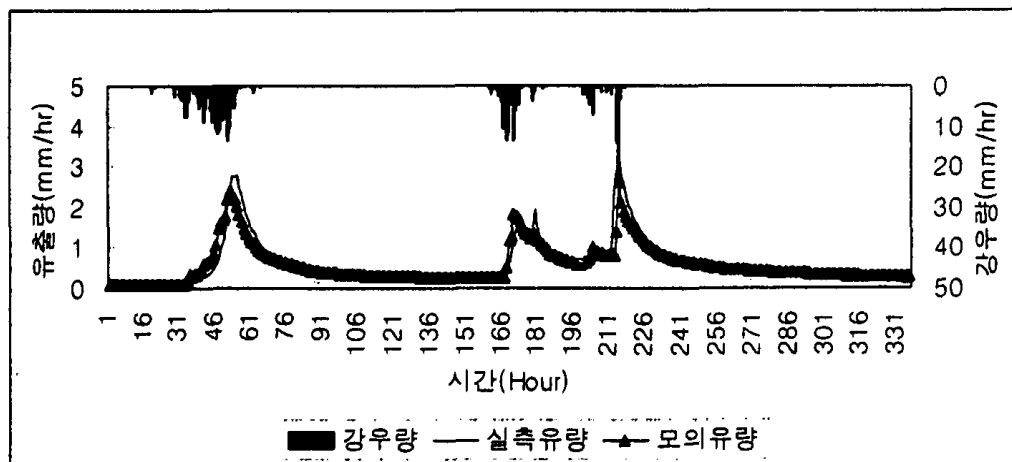


그림 5-55. 1998년 7월 5일의 강우 사상(317.0mm)에 대한 실측유량과 모의 유량의 비교

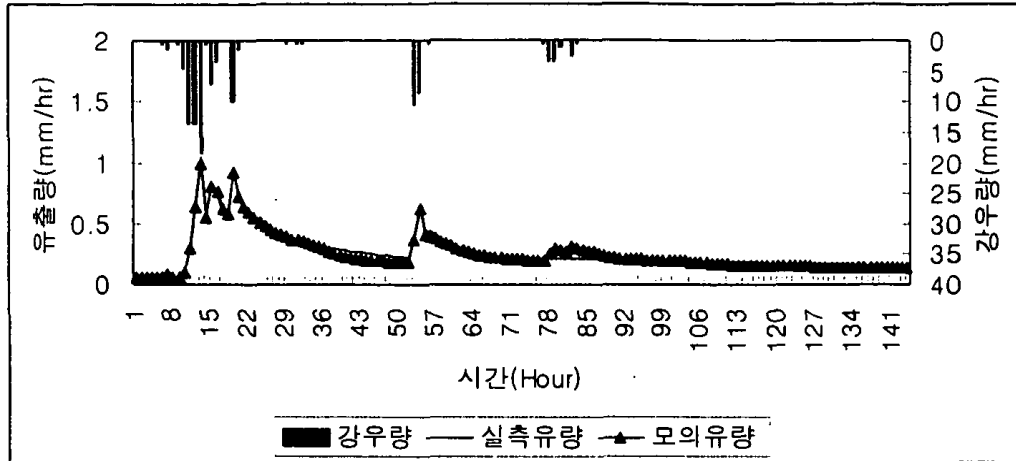


그림 5-56. 1999년 7월 25일의 강우 사상(107.5mm)에 대한 실측유량과 모의 유량의 비교

## 2) 임도개설유역의 유출해석

그림 5-57에서 5-59는 연구기간 동안 각 연도에서 최대 강우량을 보인 강우사상에 대하여 시험유역에서의 유출의 구성요소인 기저유출과 지표하유출, 임도지표유출을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 시험유역에서의 유출은 기저유출과 지표하 유출이 많은 부분을 차지하고 있고, 절토사면 복류수량과 노면초과강우량의 합으로 표현되는 임도지표유출은 총 유량의 약 5% 정도인 것으로 분석되었다.

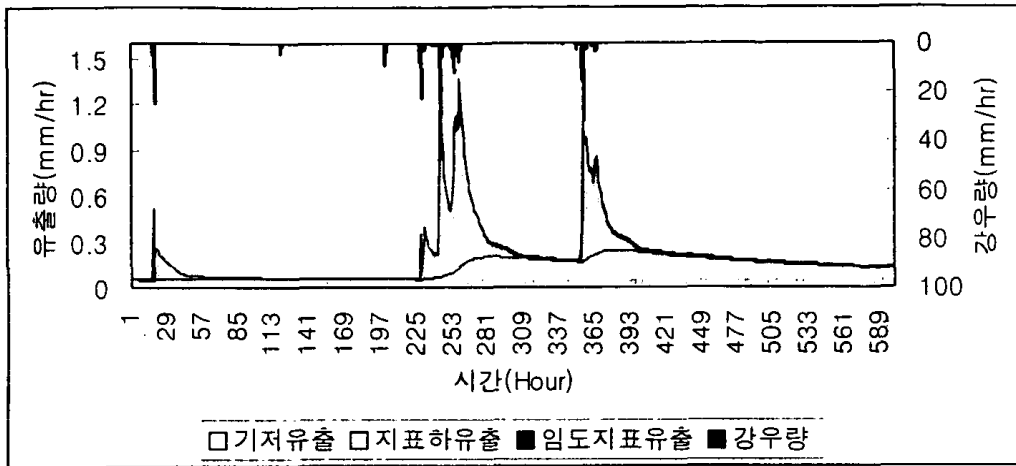


그림 5-57. 1997년 8월 8일의 강우 사상(245.0mm)에 대한 기저유출, 지표하 유출, 임도지표유출의 비교

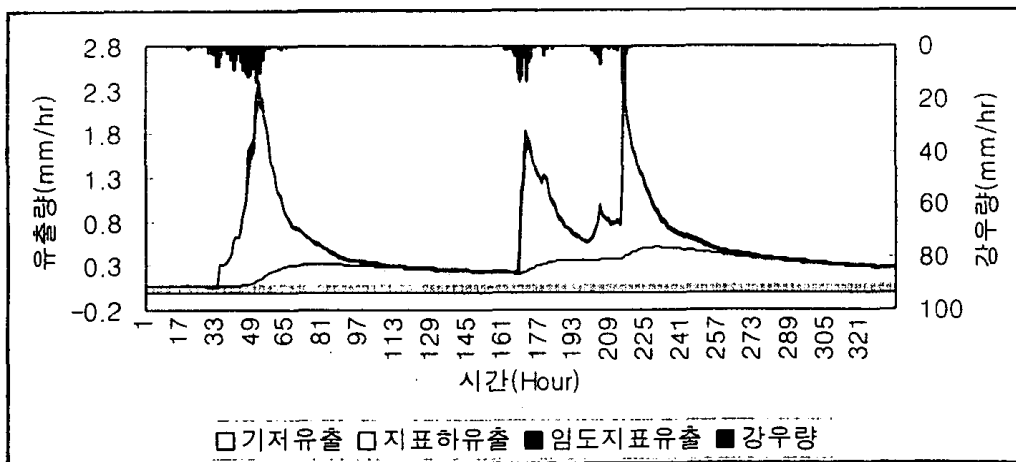


그림 5-58. 1998년 7월 5일의 강우 사상(317.0mm)에 대한 기저유출, 지표하 유출, 임도지표유출의 비교

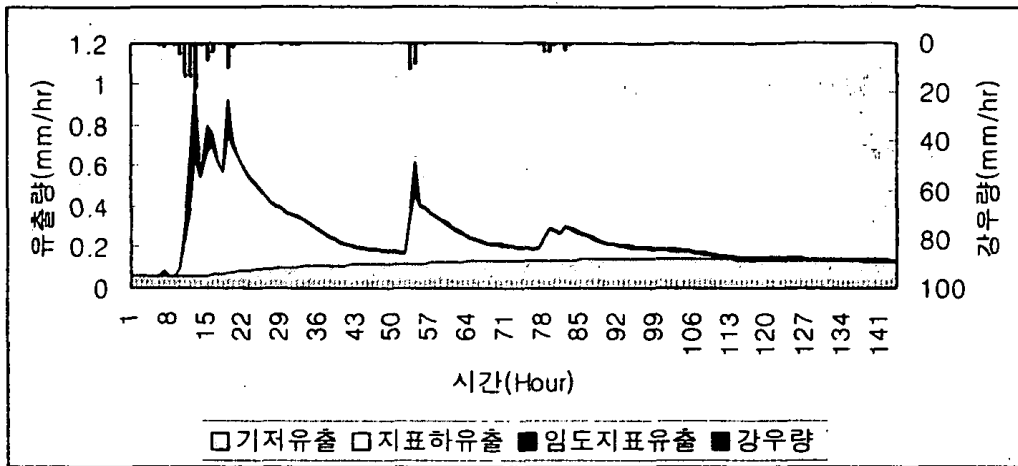


그림 5-59. 1999년 7월 25일의 강우 사상(107.5mm)에 대한 기저유출, 지표하유출, 침도지표유출의 비교

표 5-41은 1997~1999년의 총 14개 강우 사상에 대하여 실측유량과 모의 유량, 기저유출, 지표하유출, 절토사면복류수량, 노면초과강우량의 관계를 나타내고 있다. 표에서 보는 바와 같이, 모의 유량은 기저유출, 지표하유출, 절토사면복류수량, 노면초과강우량의 합과 같음을 알 수 있다.

표에서 보는 바와 같이, 총 14개 강우 사상에 대하여, 강우량은 1998년 5월 16일에 33.0mm로 가장 낮았으며, 1998년 7월 5일에 317.0mm로 가장 높았다. 총강우량은 1798.5mm이었으며, 평균 강우량은 128.5mm이었다. 실측유량은 8.81~190.20mm의 범위에 있었으며, 평균은 54.71mm이었다. 모의 유량은 8.53~191.51mm의 범위에 있었으며, 평균은 56.38mm이었다. 기저유출은 2.30~98.15mm의 범위에 있었으며, 평균은 31.37mm이었다. 지표하유출은 3.08~82.66mm, 평균은 21.34mm, 절토사면복류수량은 0.18~7.79mm, 평균은 2.46mm, 노면초과강우량은 0.02~2.92mm, 평균은 1.22mm이었다.

표 5-41. 강우 사상별 실측유량과 모의유량, 기저유출, 지표하유출, 절토사면  
면복류수량, 노면초과강우량 (단위: mm)

	강우량	실측 유량	모의 유량	기저유출	지표하유출	절토사면 복류수량	노면초과 강우량
970606	104.5	23.89	24.80	14.81	8.09	1.15	0.75
970628	95.5	19.45	18.15	6.13	10.34	0.48	1.20
970708	222.0	115.23	122.69	67.97	46.60	5.34	2.78
970724	118.0	54.20	61.60	34.62	23.44	2.72	0.82
970808	245.0	109.53	123.71	75.88	39.23	5.92	2.68
980516	33.0	10.25	10.28	4.96	4.56	0.39	0.37
980606	43.5	10.58	10.35	6.74	3.08	0.52	0.02
980705	317.0	190.20	191.51	98.15	82.66	7.79	2.92
980802	272.0	132.19	127.52	79.15	40.95	6.12	1.30
990519	51.5	8.81	8.53	2.30	5.17	0.18	0.87
990603	68.5	20.13	22.11	15.14	5.31	1.17	0.49
990625	49.0	9.44	9.13	3.60	4.42	0.28	0.83
990711	71.5	23.51	21.63	12.53	7.29	0.97	0.84
990725	107.5	38.48	37.32	17.17	17.59	1.34	1.21
합계	1798.5	765.88	789.32	439.15	298.72	34.37	17.08
평균	128.5	54.71	56.38	31.37	21.34	2.46	1.22

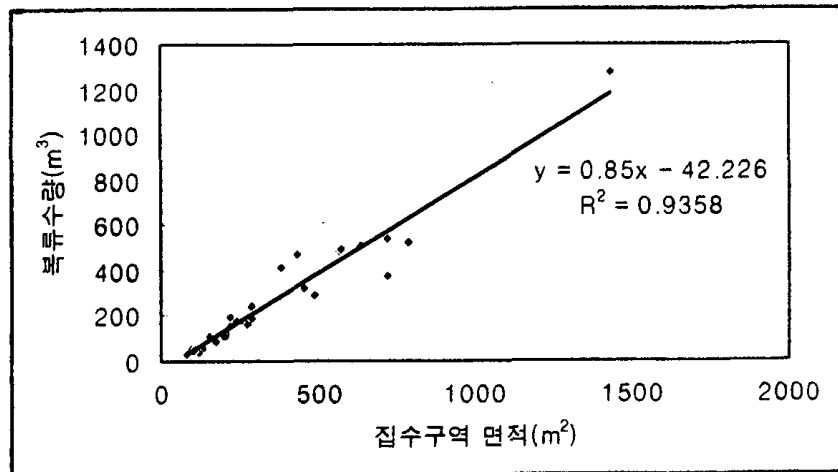


그림 5-60. 임도 상부 각 소유역별 집수구역 면적과 복류수량과의 관계

그림 5-60은 절토사면 복류수량과 상부 집수면적과의 관계를 보여주고



있다. 그림에서 보는 바와 같이 절토사면 복류수량은 상부 집수면적과 상관관계가 높은 것으로 분석되었다.

한편, 그림 5-61은 임도 노면길이에 따른 침투초과우량의 발생량을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 임도길이가 길수록 침투초과우량이 비례적으로 증가되는 것으로 분석되었다.

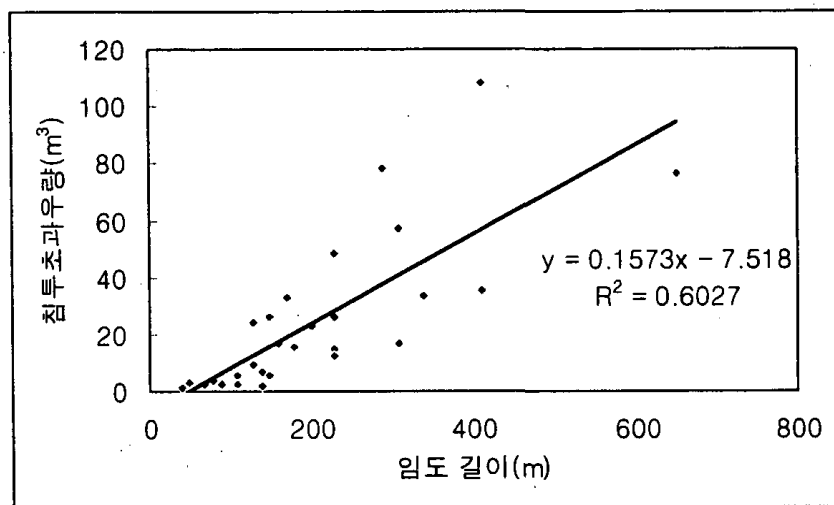


그림 5-61. 임도 노면길이에 따른 침투초과우량 발생

### 3) 임도개설로 인한 소유역별 유량증가 영향

표 5-42는 임도 개설 유무에 따른 유량변화를 보여주고 있다. 분석에 사용한 강우사상은 총 107.5mm의 단위강우량을 보인 1999년 7월 25일의 강우사상이었다. 표 5-42에서 보는 바와 같이 소유역별 유출량 증가율은 최대 53.4%까지 증가하는 것으로 분석되어, 일부 계류구간에서는 임도 개설로 인해 급격한 유량증가현상이 발생한 것으로 나타났다. 한편, 최종 유출량은 임도 개설전에 비해 약 5% 정도 증가하는 것으로 분석되었다.

표 5-42. 임도개설 유무에 따른 유량증가(1999년 7월 25일)

소유역	유출량(㎥)		증가율(%)
	임도개설전	임도개설후	
1	24,962.7	25,069.6	0.4
2	1,543.9	1,603.2	3.8
3	637.4	760.6	19.3
4	704.9	740.2	5.0
5	1,522.7	1,613.9	6.0
6	1,635.2	1,635.2	0.0
7	419.4	419.4	0.0
8	1,786.8	1,934.6	8.3
9	273.7	370.6	35.4
10	1,451.3	1,596.5	10.0
11	10,587.8	10,621.1	0.3
12	619.3	717.4	15.8
13	451.1	673.0	49.2
14	123.3	123.3	0.0
15	4,928.6	5,021.1	1.9
16	790.8	902.6	14.1
17	2,255.4	2,327.3	3.2
18	289.5	444.1	53.4
19	1,426.0	1,636.3	14.8
20	962.8	1,008.4	4.7
21	2,047.2	2,441.1	19.2
22	1,365.7	1,365.7	0.0
23	281.5	312.9	11.2
24	778.7	860.8	10.6
25	1,463.4	1,496.4	2.3
26	2,501.7	2,699.3	7.9
27	276.1	363.4	31.6
28	1,942.4	2,199.4	13.2
29	3,446.0	3,446.0	0.0
30	773.6	914.2	18.2
31	608.0	787.3	29.5
32	305.4	434.7	42.3
33	1,838.1	1,935.6	5.3
34	869.9	940.1	8.1
35	209.2	283.5	35.5
36	459.0	484.8	5.6

그림 5-62는 해당 지점의 집수면적 증가율을 이용하여 임도개설로 인한 유량증가율을 예측할 수 있음을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 집수면적 증가율과 유출수량 증가율은 매우 높은 상관관계를 가지고 있으며, 집수면적의 증가율이 증가될수록 유출수량이 급격히 증가되는 것으로 분석되었다.

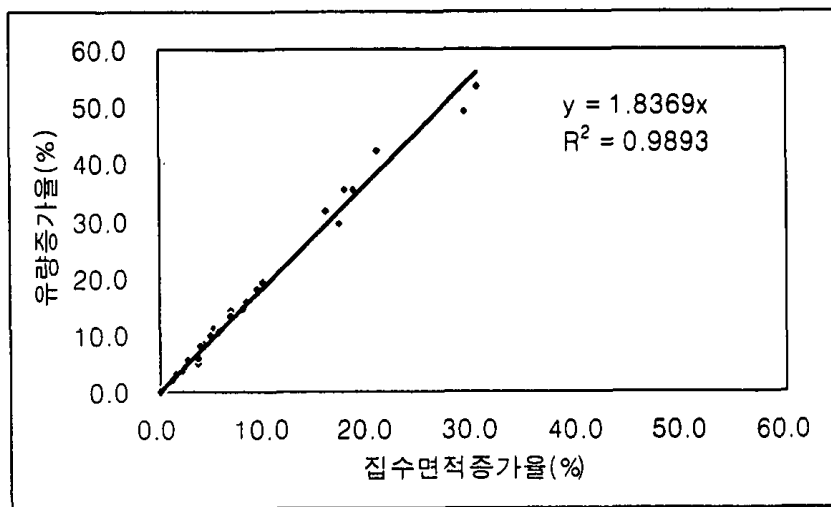


그림 5-62. 집수면적증가율에 따른 유량증가율(1999년 7월 25일)

그림 5-63은 각 소유역을 노드로 하여 소유역별 유량증가율을 표현한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 총 36개 소유역중 임도개설로 인해 30%이상의 유량증가가 예상되는 소유역은 총 6개소였으며, 20~30% 정도의 유량증가가 예상되는 소유역은 1개소, 10~20% 유량증가가 예상되는 소유역은 8개소였다.

그림에서 보는 바와 같이 유출량이 증대되는 소유역의 하류 계곡부는 임도개설로 인한 단기간의 유량증대로 인하여 침식성이 증대될 우려가 있다. 따라서, 임도 개설시 각 소유역별 유량증가를 고려하여 임도 하부 계곡부에

대한 적절한 이수대책을 수립할 필요가 있다.

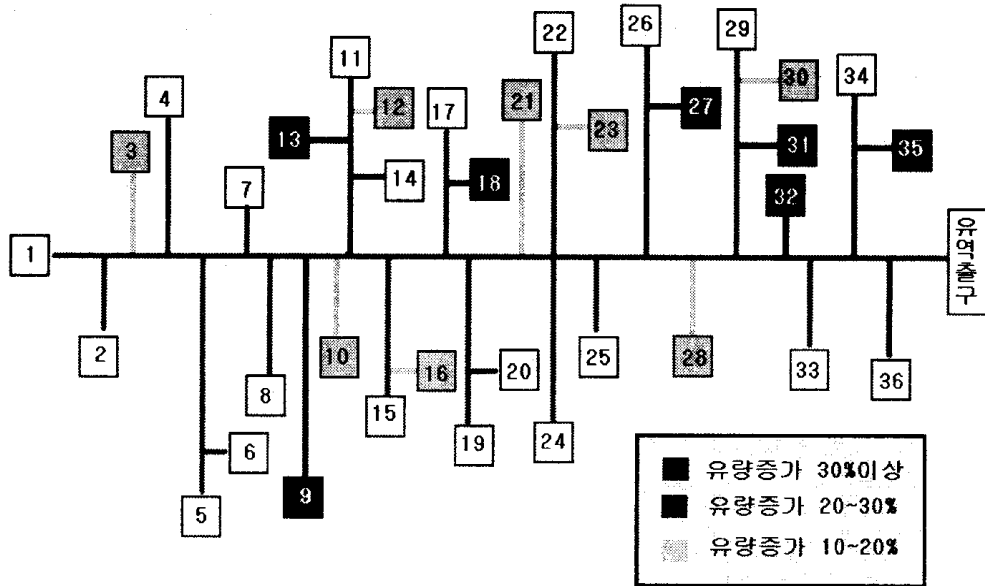


그림 5-63. 임도개설로 인한 수계별 유량증가율(1999년 7월 25일)

라. 임도개설로 인한 토사유출량 증대

표 5-43은 1999년 7월 25일의 강우사상을 대상으로 본 시스템의 측구 배수량 예측모형 및 토사유출량 모형을 이용하여 각 소유역별 토사유출량을 모의·재현한 결과이다.

각 소유역별 토사유출량은 해당 소유역에 포함되어 있는 임도구간의 토사유출량을 소유역별 토사유출량으로 하였다. 기존 산림지역의 경우 토사유출발생량은 임도 토사유출량에 비해 극히 미비하여 분석에서 제외하였다.

표에서 보는 바와 같이 1999년 7월 25일의 단위강우사상에 대한 소유역 내 임도 단위길이당 토사유출량은 최저 1.5kg/10m에서 최대 21.9kg/10m였으며 평균 10.9kg/10m이었다.

표 5-43. 소유역별 토사유출량(1999년 7월 25일)

소유역	토사유출량	
	임도길이 10m길이당 토사유출량(kg/10m)	소유역별 총 토사유출량(kg)
1	2.4	38.3
2	14.9	134.2
3	4.9	97.5
4	3.9	31.4
5	6.5	91.2
8	5.5	126.6
9	1.5	24.9
10	18.3	420.1
11	12.9	64.7
12	6.5	104.7
13	9.3	383.3
15	11.9	167.0
16	17.4	313.7
17	12.6	138.7
18	4.3	123.5
19	8.8	298.8
20	16.0	111.7
21	8.1	524.7
23	10.4	52.0
24	21.9	285.2
25	16.4	82.1
26	14.1	438.6
27	3.8	57.4
28	8.5	348.2
30	17.2	394.9
31	13.0	401.6
32	14.0	321.6
33	19.0	284.3
34	9.2	100.8
35	7.2	93.4
36	16.7	66.9

그림 5-64는 각 소유역을 노드로 하여 각 소유역별 토사유출 발생량을

표현한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 임도길이 10m당 20kg 이상의 유출 토사가 발생하는 소유역은 1개 소유역이었으며, 15~20kg/10m의 발생율을 가지는 소유역은 7개소, 10~15kg/10m는 8개소, 5~10kg/10m는 9개소로서 총 36개 소유역중 11개 소유역을 제외한 25개 소유역에서 임도길이 10m당 5kg 이상의 유출토사 발생율을 보였다.

토사유출 발생율이 높은 소유역은 해당 임도구간에 대한 적절한 침식방지대책 및 유사방지 대책이 수립되어야 할 것이며, 아울러 해당 소유역 하부의 계곡부에 있어서도 효과적인 유사저지 대책이 마련되어야 할 것이다.

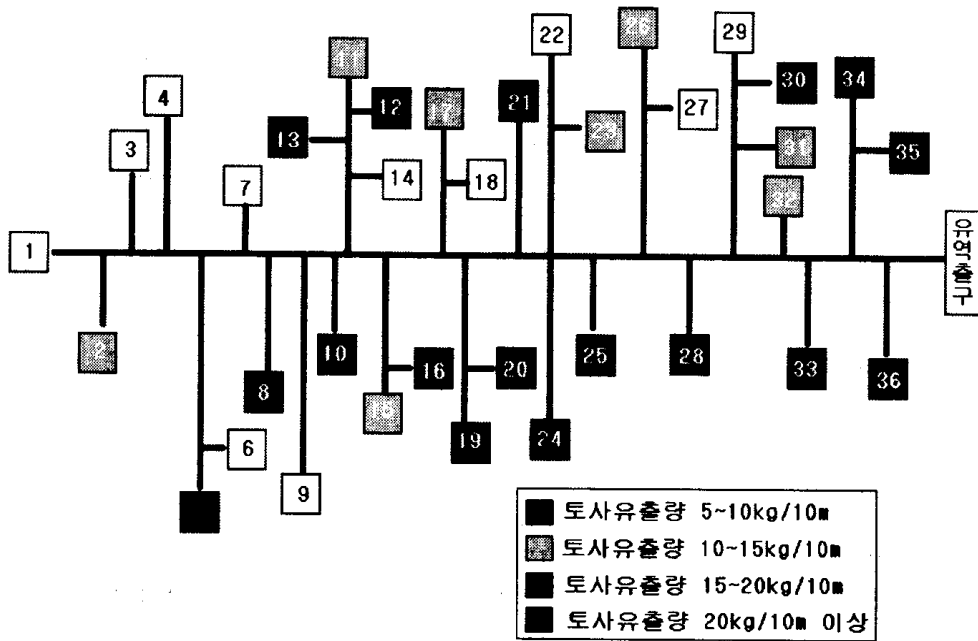


그림 5-64. 소유역별 토사유출량(1999년 7월 25일)

마. 지형정보 분석을 통한 침식위험도 분석

1) 유사이송지수의 공간적 분포

그림 5-65는 명성 시험유역 중상류지역의 유사이송지수(Sediment Transport Index)의 공간적 분포를 보여주고 있다. 유사이송지수는 4.3 이상일 경우 유사이송 위험도가 높은 것으로 고려되고 있다.

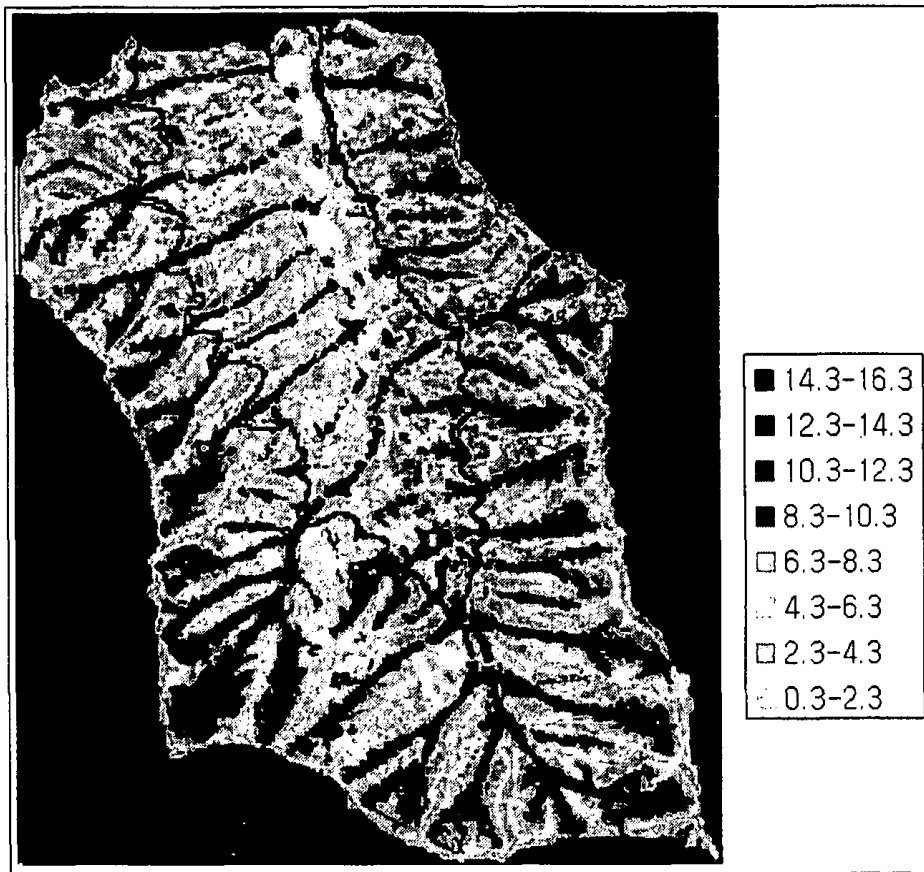


그림 5-65. 명성 시험유역의 유사이송지수 분포도

그림 5-65에서 보는 바와 같이 적색(질은색)으로 나타나는 지역이 유사이송지수가 높은 지역이다. 본 시험유역에서는 고도가 높은 상부 능선쪽으로 갈수록 유사이송지수가 높아지는 것으로 분석되었으며, 특히 계곡부에서의 유사이송지수가 매우 높은 것으로 나타났다. 이는 유사이송지수를 분석하는 데 있어서 해당지점의 상부 집수면적과 사면 경사가 중요한 인자로서 작용하기 때문으로, 본 시험유역은 급한 경사를 가진 최상부 상류지역이기 때문에 유사이송지수가 매우 높은 값을 보이는 것으로 분석되었다.

특히, 그림에서 대부분의 임도가 유사이송지수가 높은 지역을 통과함을 알 수 있다. 따라서, 임도 개설로 인해 토양 침식 및 유사발생 위험도가 매우 높을 것으로 우려되어 적절한 토양침식 및 유사발생 저지 대책이 요구된다.

## 2) 척약지수의 공간적 분포

척약지수(Degradation Index)는 토양침식 및 유사발생으로 인하여 토양의 생산력이 감소하고 황폐화될 수 있는 잠재 위험성을 표현하는 지수이다.

척약지수는 지형지수의 계산과정에서 손쉽게 얻을 수 있는 지수로서 다음 식과 같이 단위등고선 길이당 상부사면 집수면적( $A_s$ )과 사면경사( $\tan\beta$ )로서 계산된다.

$$DI = \ln(A_s \times \tan\beta) \quad (\text{식 5-64})$$

본 연구의 대상지역인 명성 시험유역의 중상류지역에 대한 척약지수를 산출한 결과는 그림 5-66에서와 같다.

그림에서 보는 바와 같이 본 시험유역에서는 주로 계곡부를 중심으로 척



악지수의 높은 값이 분포하고 있다. 즉, 본 시험유역은 계곡부를 따라 능선까지 토사침식 및 유사발생에 취약한 특징을 가지고 있으며, 이러한 특징으로 인해 임도개설에 의한 유량증대로 인해 쉽게 황폐화될 위험성이 높은 것으로 분석되어 적절한 대책마련이 요구된다.

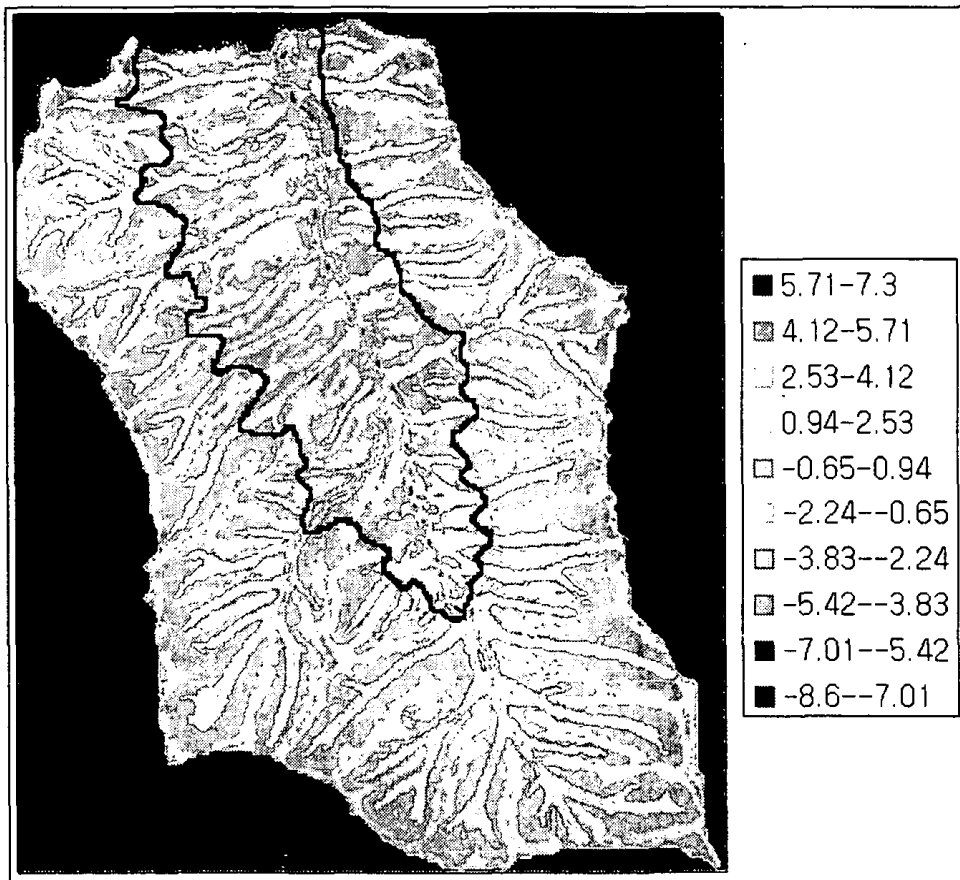


그림 5-66. 명성 시험유역 중상류지역의 척악지수 분포

## 제 5 절 종합결론 및 제언

본 연구는 국민활동영역의 확대 및 휴양공간의 창출 등 점증하는 산지구역의 개발욕구에 대처하여 산지구역에 대한 개발이 산원수 환경에 미치는 영향에 대한 체계적인 평가 및 평가기법의 고도화와 산원수자원(山源水資源)의 종합적 관리시스템 개발을 목표로 하였다.

이를 위하여 산림의 이수기능에 대한 정량적인 평가와 아울러 산림 및 산림토양을 포함하는 독특한 유출발생 기작을 가지는 山林流域에서의 유출 과정에 대한 수문학적인 해석방법들의 도입의 필요성에 따라, 본 연구에서는 산지개발에 따른 산원수 환경영향 평가기법을 개발하고, 시험구역의 실측자료와 모의발생치를 비교하여 모형의 적용성을 검증하는 연구를 수행하였다.

산지개발에 따른 산원수 환경영향 평가기법을 개발하기 위하여 본 연구에서는 分布型 水文模型으로서 구역의 지형에 따른 포화층에서의 흐름과 유출기여면적을 고려하여 유출현상을 재현하는 TOPMODEL의 개념을 바탕으로 산림구역의 유출특성에 적합하도록 키가 큰 수목과 밀집된 하층식생 및 낙엽낙지층에 의한 遮斷(Interception) 성분과 산림토양의 높은 투수성을 반영한 早期 地表下 流出(Prompt subsurface runoff) 성분 등을 추가·보완하여 山林流域 降雨-流出模型을 개발하였으며, 이에 아울러 임도 등 산지개발에 의한 지중수 차단 및 초과강우량과 토사침식량발생 성분 등을 추가하여 산지개발에 따른 산원수 환경영향 평가기법을 개발하였다.

본 연구에서 개발한 산지개발에 따른 산원수 환경영향기법 및 산원수자원의 종합적 관리시스템은 크게 수치지형도를 이용한 지형정보의 처리부분과 수문 및 환경자료와 지형자료를 이용하여 구역 수문환경 변화를 모의발

생·재현하여 개발사업의 수문학적 영향을 예측·평가하는 부분으로 구분된다. 지형정보의 처리부분에서는 해당지역의 등고선 지형도에 근거한 수치지형도를 이용하여 사면방향 및 경사와 흐름방향, 소유역 구분 등의 공간자료 분석을 수행하며, 이를 바탕으로 해당 유역내의 지형지수 및 습윤지수와 유사성지수, 척약지수 등의 공간적 분포도를 작성한다.

한편, 유역 수문환경의 재현부분은 유역 환경자료와 관측된 수문자료 및 지형정보 등을 이용하여 유역의 강우-유출현상 및 토사유출현상을 모의·재현하며, 이를 바탕으로 유역내의 수자원 환경변화의 정도를 분석한다.

본 시스템은 특히, 산림지역에 있어서의 임도개설 등 각종 개발사업에 대한 환경자료를 이용하여 사업시행으로 인한 수자원량 및 토사유출량 변화 등의 수문환경변화를 평가할 수 있도록 하여, 개발사업으로 인한 변화를 사후 평가하거나, 사전 예측할 수 있도록 작성하였다.

본 연구를 통하여 개발된 기법의 적용 및 시험을 위한 유역은 전라남도 광양시 광양읍 추산리 서울대학교 남부연습림내에 위치한 북문골 시험유역과 바람골 시험유역 및 경기도 양평군 단월면 명성리 시험유역을 선정하였다. 관측된 강우-유출자료 및 토사유출량, 임도 배수량 자료를 이용하여 본 시스템의 세부모형인 강우-유출모형, 임도배수량예측모형, 토사유출량 모형의 검정을 실시한 결과, 모두 우수한 모의효율성을 보였으며, 모의치와 관측치간에 양호한 모의결과를 보였다.

명성 시험유역의 중상류지역을 대상으로 관리시스템의 적용성을 검토한 결과, 본 시스템은 임도개설로 인한 유역내 유량 및 토사유출량 변화 등 수문환경변화를 공간적으로 분석·평가할 수 있었으며, 이를 바탕으로 산지 개발사업 계획 및 사후평가, 산원수자원의 효율적인 관리 등의 의사결정에 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- 高德九. 1989. 小流域의 長期流出 豫測을 위한 模擬發生 水文模型의 開發. 서울대학교 大學院 博士學位論文. 132pp.
- 國立環境研究院. 1993. 非点汚染源으로 부터의 汚染物質 流出特性 調査를 爲한 方法論的 研究. 國立環境研究院. 55pp.
- 國立環境研究院. 1994. 非点汚染源 流出負荷量 調査指針. 125pp.
- 權肅杓. 1989. 음료수의 수질. 自然保護 12(6):20-22.
- 권우택, 김선태, 나춘기, 박기학, 이남훈, 이주삼, 홍지형, 황갑성. 1996. 산성비 조사법. 東和技術. 511pp.
- 吉田 裕道, 전재승 1987. 센서회로 디자인 북. 기전연구소. pp.282 - pp.286
- 金景河. 1987. 森林에서 林冠에 의한 降雨遮斷損失에 關한 研究. 서울대학교 大學院 碩士學位論文. 47pp.
- 金景河. 1993. 山林의 降雨遮斷損失量 推定 電算模型 開發에 關한 研究. 서울대학교 博士學位論文. 117pp.
- 김계현. 1998. GIS를 통한 수질오염관리. 한국수자원학회지 vol.31(1). pp.49 - pp.57
- 金明姬, 閔一植, 宋錫煥. 1997. 錦山 廢炭鑛地域의 汚染이 河川水에 미치는 影響. 韓國林學會誌 86(4):435-442.
- 金福榮 外 7人. 1989. 農業環境化學. 429pp.
- 김복영. 1997. 농업용수 오염과 농작물의 피해대책. 농지개량 160:26-32.
- 김상현. 1996. 지리정보시스템을 이용한 유역에서의 지형지수 산정. 산국수 자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제 29권 제 4호 pp.199-208.
- 김상현. 1997. 인공배수유역에서의 TOPMODEL의 적용. 한국수자원학회 논문집, 제 30권 제 5호, pp.539-548.

- 김상현. 1998. 확장 TOPMODEL의 영역화 민감도 분석. 한국수자원학회논문  
집, 한국수자원학회, 제 30권 제 5호 pp.539-548.Kirkby, M.J. and D.R.  
Weyman. 1974. Measurements of contributing area in very small  
drainage basins. Seminar
- 김승희, 이공인, 유병기, 손정익. 1997. 양액재배 기계장치에 관한 연구 :  
양액혼입 및 공급자동화시스템 개발. 농업기계화시험연구보고서 1996.  
pp.384 - pp.380
- 김영섭, 서애숙, 조명희. 1998. 원격탐사개론. 동아기술. pp.15 - pp.37
- 김재기. 1998. 인공산성비 살포에 의한 산림토양 토심별 산도, 전기전도도  
및 주요이온의 동태분석. 영남대 석사학위논문. pp.5 - pp.6
- 김재수. 1991. 임내 사면에서의 근계 흡수 모델. 충북대 농과연 9(1):  
91-101.
- 김재수. 1993. 중부 급경사 산림 소유역내의 지중수 변화. 충북대 농과연  
11(1): 140-151.
- 김재수. 1999. 중부 산림 지역의 증발산량 추정. 한림지 88(1): 86-92.
- 金座官. 1995. 水質汚染概論. 東和技術 353pp.
- 김태진. 1998. 농수산용 Multi-Biossensor의 국산화를 통한 축산폐수 및  
연안양식장의 Real Time 수질 Monitoring 기술 개발. 연차보고서  
첨단기술개발사업 1997. pp.163
- 김태철. 1996. 최근의 가뭄동향과 효과적 수자원 개발. 세계 물의 날 기념  
동북아 대 심포지엄 "동북아의 물 2000년 농어촌용수 개발과 관리". 농  
어촌진흥공사. 141-170.
- 金泰勛, 李天龍, 金景河, 程龍鎬. 1993. 水源涵養機能增進을 위한 施業技  
術. 林業研究院 1993年度 試驗研究報告書(4- I ):493-501.

- 金顯榮, 朴承禹. 1988. 灌溉用貯水池의 日別流入量과 放流量의 模擬發生.  
韓國農工學會誌 30(1) : 50-62.
- 김현영. 1998. 배수개선 홍수분석 시스템 개발. 농림부. pp.223 - pp.236
- 김현준. 1995. 1996. 강우예보의 시공간 특성을 고려한 홍수예보모형의  
개발. 한국건설기술연구원 연구보고서.
- 농림부농림수산기술관리센터. 1998. 산원수자원의 종합적 관리시스템의  
개발. 연차보고서 첨단기술개발사업 1997 pp293
- 류순호. 1998. 센서네트워크에 의한 과수원 관비 최적화 시스템 개발.  
연차보고서 첨단기술개발사업 1997. pp.66
- 박석환. 1997. 환경생태학. 신광문화사. 342pp.
- 朴成宇. 1970. 우리나라 可用水資源에 對한 水文學的 考察. 韓國水文學會誌  
3(1):8-19.
- 박세현. 1996. 온라인 컴퓨터 건조제어기. 농림수산부. pp.11 - pp.35
- 朴在鉉, 禹保命. 1997. 山林流域內 降水로부터 溪流水質에 미치는 影響因子  
分析 - pH, 溶存酸素, 電氣傳導度 -. 韓國林學會誌 86(4):489-501.
- 朴在鉉. 1995. 白雲山 成熟闊葉樹林 皆伐收穫地에서 伐出直後의 環境變化와  
運材路 浸蝕에 關한 研究. 서울大學校 大學院 博士學位論文. 137pp.
- 朴在鉉. 1995. 山林流域에 있어서 溪流水質 評價基準 定立에 關한 考察  
( I ). 자연보존 92:23-38.
- 朴在鉉. 1996. 山林流域에 있어서 溪流水質 評價基準 定立에 關한 考察  
( II ). 자연보존 95:38-52.
- 朴在鉉. 1997. 山林流域에 있어서 溪流水質 評價基準 定立에 關한 考察  
( III ). 자연보존 97:33-42.
- 박종관. 1997. 물환경 조사법. 187p.

- 박종화. 1996. 수문해석을 위한 광역유역내의 토양 및 식생정보 추출 방법에 관한 연구-주로 리모트센싱을 활용하여-. 한국농공학회지 vol.38(2). pp.123 - pp.132
- 박중춘. 1997. 공정육모 온실의 표준모델 및 자동화 시스템 개발과 활용기술연구. 농림부. pp.149 - pp.198
- 배재근, 오종민. 1995. 土壤汚染學. 372p.
- 백규석. 1997. 우리나라 하천의 수질현황 및 문제점. 한국수자원학회지. pp.11 - pp.15
- 社団法人 日本計量器機工業連合會. 1997. 流量計側 A to Z. 테크하우스. pp.121 - pp.141
- 서동일. 1999. 호수의 수질 모델링. 한국수자원학회지. 제32권 제1호, pp. 50-54.
- 서병아, 김승, 정상만. 1990. 유출시험유역의 설계. KICT. pp.11 - pp.36
- 성문기술. 1995. 水質汚染公定試驗方法. 성문기술. 439pp.
- 세운. 1985. DC모터의 제어회로설계. 도서출판 세운. pp.101 - pp.114
- 新井正, 박종관. 1996. 물환경 조사법. 청문사. pp.41 - pp.103
- 신현석, 윤용남. 1993. SWMM 모형을 이용한 도시 유역의 유출 및 NPS 오염 물 배출 모의. 한국수문학회지. 제26권 제3호, pp. 125-135.
- 양인기. 1971. 지상기상관측법 pp.103 - pp.138
- 오길근, 류관희, 홍순호, 김효중. 1995. 원칩 마이크로 컴퓨터를 이용한 양액 자동 조제 장치의 개발. 한국농업기계학회지 vol.20(4) pp.383 - pp.389
- 吳斗泳. 1986. 昭陽江 多目的댐 流域內 森林의 理水效果 推定. 高麗大學校 博士學位 論文. 54p.
- 吳英敏, 申錫奉. 1991. 水質管理. 신광문화사. 311pp.

- 禹保命 外 18人. 1997. 山林工學. 光一文化社 454pp.
- 禹保命, 金慶勳, 朴在鉉, 崔炯太. 1998. 伐採地內 運材路의 土壤物理性 및 植生の 回復過程. 韓國環境復元綠化技術學會誌 1(1):18-27.
- 禹保命, 金樂培, 李亮根, 崔炯太. 1994. 森林 環境이 水資源涵養機能에 미치는 影響에 關한 研究(III) - 秋山 山林水文環境試驗場의 4年次 觀測 結果 - . 서울大 演習林報告 30 : 1-14.
- 禹保命, 朴在鉉, 全起成, 鄭道鉉. 1995. 熟林木伐採地에서 降雨水의 表面流出水量과 山地浸蝕에 미치는 環境要因의 影響. 韓國林學會誌 84(2):226-238.
- 禹保命, 李銓雄, 金樂培. 1992. 森林 環境이 水資源涵養機能에 미치는 影響에 關한 研究(I) - 秋山 山林水文環境試驗場의 設置 및 觀測結果-. 서울大學校 農業生命科學大學 演習林研究報告. No. 28 : 13-48.
- 禹保命, 鄭道鉉, 朴在鉉, 閔弘振, 崔炯太, 成吉平. 1993. 森林 環境이 水資源涵養機能에 미치는 影響에 關한 研究(II) - 秋山 山林水文環境試驗場의 3年次 觀測 結果 - . 서울大 演習林報告 29 : 52-64.
- 우보명, 최형태, 김경훈, 박정호. 1998. 森林環境이 水資源涵養機能에 미치는 影響에 關한 研究(VI) - 秋山 山林水文環境試驗場의 8年次 觀測 結果 - . 서울大學校 演習林研究報告 34 : 1-15.
- 禹保命, 崔炯太, 文利滿. 1996. 森林環境이 水資源涵養機能에 미치는 影響에 關한 研究(V) - 秋山 山林水文環境試驗場의 6年次 觀測 結果 - . 서울大學校 演習林研究報告 32 : 1-16.
- 禹保命, 崔炯太, 鄭炳連. 1995. 森林環境이 水資源涵養機能에 미치는 影響에 關한 研究(IV) - 秋山 山林水文環境試驗場의 5年次 觀測 結果 - . 서울大 演習林研究報告 31 : 33-42.



- 禹保命, 崔炯太, 河起鎬. 1999. 森林環境이 水資源涵養機能에 미치는 影響에 關한 研究(VII) - 秋山 山林水文環境試驗場의 9年次 觀測 結果 - . 서울大學校 演習林研究報告 35 : 50-66.
- 禹保命. 1993. 新製 砂防工學. 鄉文社. 53-55.
- 柳澤圭, 李天龍. 1980. 林相別 流水流土量 調査. 林業試驗場 試驗研究報告書. 307-329.
- 柳澤圭. 1986. 森林에 있어서 물 收支에 關한 試驗研究. 江原大學校 博士學位 論文. 28p.
- 尹淳康, 柳順昊. 1993. 土壤 중 窒酸態窒素의 行動과 地下水質. 한국환경농학회지 12(3):281-297.
- 윤제용. 1997. COD기준 맹목적 일본추종의 산물. 환경운동 44:76-77.
- 이경준. 1993. 수목생리학. 서울대학교 출판부. 504pp.
- 李圭星, 李盛弘, 李辰河, 黃相容. 1994. 水質汚染概論. 螢雪出版社. 363pp.
- 이규성. 1998. 수문모형 및 수자원 관리를 위한 원격탐사 기술. 한국수자원학회지. vol31(1), pp.58 - pp.69.
- 이병헌. 1997. 담수양어시설의 설계 및 종합관리 시스템의 개발. 농림부. pp.334 - pp.381
- 이성재, 서명훈, 심상연. 1998. 온실환경제어 관리 네트워크 소프트웨어 개발 : 온실 환경계측 제어 시스템 개발. 시험연구보고서 1997. pp.246 - pp.348
- 이승래. 1993. 센서응용기술. 세화출판사. pp.301 - pp.315
- 이승휘. 2000. 자원이 되는 물고기가 살 수 있는 하천. 韓國水資源學會誌 33(6):41-53.
- 이원규, 최경, 오민영. 1988. 산화에 의한 토양 및 식생의 변화. 임업연구원 연구보고 37:35-49.

- 이정일. 1996. 온실 원격제어 및 자동화 시스템 개발. 연차보고서  
현장애로기술개발사업 1995. pp.103 - pp.104
- 이종태, 강태호. 1997. 도시 배수구역의 유출-수질 특성인자의 민감도 분석. 한국수자원학회논문집. 제30권 제1호, pp. 83-93.
- 李宗學, 金泰勛, 李元圭, 崔敬, 李天龍, 朱鎮順. 1989. 山林의 流出調節에 關한 研究. 林業研究院 研究報告 38:98-111.
- 李天龍, 程龍鎬, 廉陸哲, 李鳳洙. 1994. 水源涵養機能增進 施業技術 開發. 1994年度 林業研究報告書(4- I ):538-548.
- 李天龍. 1992. 山林環境土壤學. 普成文化社. 349pp.
- 임상준. 2000. 농업구역의 논 관개회귀수량 추정 모형의 개발. 서울대학교 대학원 박사학위논문. 118pp.
- 전경수. 1997. 비점 오염원 수질 모델링. 한국수자원학회지. 제30권 제4호, pp. 46-54.
- 田祥麟. 1989. 水質調查指標生物로서 淡水魚類의 妥當性에 대하여. 自然保護 12(3):12-13.
- 전재홍. 1995. 산지물순환소과정에서 산도, 전기전도도, 용존 산소 및 수량 측정에 의한 수질변화의 분석. 영남대 석사학위논문. : pp.3 - pp.10.
- 鄭文植, 鄭文鎬, 李鎮憲, 金榮奎. 1995. 環境化學. pp. 184-185.
- 정선희, 김상현. 1999. TOPMODEL 투수량계수 감소함수 일반화과정의 적용에 관한 연구. 한국수자원학회논문집 제 32권 제 6호 pp.637~647.
- 정순주. 1996. 양액재배 보급확대를 위한 자동양액 관리기기, 장치, 시스템의 국산화 개발. 연차보고서 현장애로기술개발사업 1995. pp.99 - pp.100
- 程龍鎬, 元亨圭, 金景河, 朴在鉉, 柳鼎煥. 1997. 電氣傳導도가 山林流域內 溪流水와 土壤水質에 미치는 影響. 山林科學論文集 55:125-137.

- 程龍鎬, 元亨圭, 朴在鉉, 李天龍, 李鳳洙. 1996. 鬱陵島와 桂芳山에서 山林  
內 溪流水質의 理化學的 特性. 山林科學論文集 53:173-185.
- 정용호, 이현호, 박재현, 최형태, 김경하, 윤호중. 2000. 영월댐  
유역에서의 산림정비에 의한 홍수저감효과 분석. 영월댐  
조사결과보고서② : 홍수. 영월댐 공동조사단. 247-272.
- 정용호. 1998. 녹색댐의 수원함양기능증진을 위한 방안1. 산림 384:68-81.
- 정재운, 김영봉, 우정인, 김민희, 김정순. 1998. 계측공학. 보성각. pp.309  
- pp.383
- 정팔진, 곽동희, 권영호. 1997. 먹는 물의 세균학적 안전성 평가. 大韓環境  
工學會誌 19(4):521-528.
- 조흥제, 조인률, 김정식. 1997. TOPMODEL을 이용한 강우-유출해석에 관한  
연구. 한국수자원학회논문집, 제 30권 제 5호, pp.515-526.
- 조흥제, 조인률. 1998. 분포형 유출모형을 이용한 홍수유출해석.  
한국수자원학회논문집, 제 31권 제 2호 pp.199-208.
- 중앙기상대 기상연구소. 1990. 제주지역 농업기상 정보시스템의 개발 및  
이용. 과학기술처. pp.103 - pp.127
- 重野實, 월간자동인식기술. 1996. 무선LAN기술강좌. 성안당. pp.25 - pp.68
- 崔榮吉, 韓明洙, 安泰永, 郭魯泰. 1995. 담수의 부영양화. 신광문화사.  
278pp.
- 崔榮博. 1994. 자연의 물 인간의 물. 집문당. 342pp.
- 최종욱, 정권, 김동일. 1997. GIS를 이용한 하천 오염도 예측. 보건  
환경연구원보 vol.33. pp.309 - pp.318
- 한국건설기술연구원 (1993). 수문모형 평가에 관한 연구 - 강우 - 유출  
모형을 중심으로 -. 건기연 92 - WR - 111 - 2, 한국건설기술연구원.

- 한국수자원공사. 1993. 21세기를 바라보는 수자원 전망. 한국수자원공사. 150pp.
- 한국수자원공사. 1993. 지리정보시스템을 이용한 수자원 관리 및 계획에 관한 연구. 한국수자원공사. 180p.
- 한슬시스템. 1998. 양액 재배 모니터링시스템. <http://www.hansl.com>
- 玄根洙, 朴昌緒, 鄭碩在, 林尙奎, 嚴基泰. 1991. 우리나라 土壤의 土性別 陽이온 置換容量. 韓國土壤肥料學會誌 24(1):10-16.
- 홍병호, 임병국. 1995. 센서 일렉트로닉스. 대광서림. pp.530 - pp.547
- 洪思澳. 1985. 溪流水의 汚染과 對策. 자연보존 50:8-11.
- 洪思換, 鄭奎赫. 1982. 桂芳山 溪流의 理化學的 水質調査. 韓國自然保存協會 20:171-179.
- 高橋忠幸. 1996. 主な落葉闊葉樹樹幹流の酸性度とヤマナラシ樹幹流による土壤酸性化抑制機能. 岩手林技年報 6:17-27.
- 谷誠. 1985. 山地溪流の流出特性を考慮した一次元鉛直不飽和浸透流の解析. 日林誌 67(11): 449-460.
- 廣瀬 顯, 岩坪五郎, 堤 利夫. 1988. 森林流出水の水質についての廣域的考察 (1). 京都大學農學部演習林報告 60:162-173.
- 國府田悅男, 荒川健司, 秋田 求 等. 1984. 上郷池における炭酸・重炭酸イオン及び溶存酸素濃度の經時變化とその相關性. 筑波の環境研究 8:86-90.
- 金子眞司. 1995. 溪流水のpH測定について. 森林總合研究所關西支所年報 第37號:p.22.
- 德地直子, 逸 明子, 岩坪五郎. 1991. 山地小流域における降水と流出水の水質. 京都大學農學部演習林報告 63:60-68.
- 德地直子, 黒田幸夫, 岩坪五郎. 1990. 森林生態界における溶存物質濃度・量の鉛直的變化( I ) -鹽化物イオン濃度の變動と土壤水の動き-. 日林論 101:257-258.

- 圖子光太郎, 生原喜久雄, 相場芳憲, 小林健吾. 1993. 森林土壌の交換性イオンの特性が土壌溶液の動態に及ぼす影響. 日本林學會誌 75(3):176-184.
- 末松剛介, 井倉洋二, 丸谷知己. 1995. 森林地帯における溶存物質濃度と流域面積との関係. 九州大學農學部 學藝雜誌 49:149-155.
- 服部重昭. 1985. 樹冠遮斷のエネルギー収支特性. 日本林學會誌 67:358-365.
- 堤 利夫. 1973. 生態學講座 5b. 共立出版, 東京, pp.1-60.
- 堤 利夫. 1987. 森林の水収支と水質への影響, 水資源の保全-琵琶湖流域をめぐる諸問題-. 人文書院. pp.78-96.
- 宗宮 功. 1990. 自然の淨化機構. 技報堂出版株式會社. 252pp.
- 川添 強, 吉本 衛. 1975. 林地肥培が溪流の水質に及ぼす影響(1)-航空施肥後1年間の水質變化. 日林講 86:456-457.
- 村井 宏. 1970. 森林植生による降水のしや斷について研究. 日林試 研究報告 232:25-64.
- 太田猛彦, 塚本良則, 城戸 毅. 1983a. 丘陵性自然斜面における雨水移動の實證的研究(II) - 斜面内地中流の實態. 日林誌 67(10):383-390.
- 太田岳史, 福島義宏, 鈴木雅一. 1983b. 一次元鉛直不飽和浸透流を用いた雨水流出特性の検討. 日林誌 65(4):125-134.
- 太田岳史, 阿部 實. 1985. 一次元鉛直不飽和浸透流を用いた雨水流出特性の検討(III) - 斜面流出モデルの三期層斜面への適用結果. 日林誌 67(3):99-102.
- 太田岳史. 1983. 一次元鉛直不飽和浸透流を用いた雨水流出特性の検討(II) - 初期水分條件を直接流出特性. 日林誌 65(12):448-457.
- 平田健正, 村岡浩兩. 1988. 溪流水質から見た森林の淨化機能に関する研究(第3報)-溶存物質 流出機構. 國公年報 116:53-74.

- 平井敬三, 加藤正樹, 岩川雄幸, 吉田桂子. 1990. 樹幹流が林地土壌に與える影響(II)-スギヒ・ノキ林における林外雨, 林内雨, 樹幹流, 土壌水のpH-. 日林論 101:243-245.
- 河野吉久, 松村秀幸, 小林卓也. 1996. 人工酸性雨暴露に併う土壌理化學性の變化とスギ, ヒノキ根の生育. 大氣環境學會誌 31(5):203-212.
- Abbott, J. 1977. Guidelines for calibration and application of STORM. Training Document No. 8, Hydrologic Engrg. Center, U.S. Army Corps of Engrs., Davis, CA.
- Abbott, M.B., J.C. Bathurst, J.A. Couge, P.E. O'Connell and J. Rasmussen. 1986. An introduction to the European Hydrological System : SHE, 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. J. of Hydrol. 87:45-59.
- Ambroise B., J. Freer and K. Beven. 1996a. Application of a generalized TOPMODEL to the small Regelbach catchment, Vosges, France. Water Resour. Res., Vol. 32, No. 7, pp.2147~2159.
- Ambroise B., J. Freer and K. Beven. 1996b. Toward a generalization of the TOPMODEL concepts : Topographic indices of hydrological similarity. Water Resour. Res., Vol. 32, No. 7, pp.2143~2145.
- Bache, B.W. 1980. The sensitivity of soils. in "Effects of acid rain precipitation on terrestrial ecosystems" Plenum Press. New York. pp.569-572.
- Baker, F.S. 1950. Principles of Silviculture. McGraw-Hill. New York.
- Band, L., and Mackay, D.S. 1998. Extraction and representation of nested catchment areas from digital elevation models in lake-dominated topography. Water Resources Research, Vol. 34, No. 4, pp. 897-901.

- Beven, K. J., and A. M. Binley. 1992. The Future of Distributed Models : Model Calibration and Uncertainty Prediction. Hydrological Processes, Vol.6, pp. 279-293.
- Beven, K.J, P. Quinn, R. Romanowicz, J. Freer, J. Fisher, and R. Lamb. 1994. TOPMODEL and GRIDATB: A users guide to the distribution versions(94.03). CRES Technical Report TR110/94, Lancaster University, Lancaster, UK.
- Beven, K.J. 1984. Infiltration into a class of vertically non-uniform soils. Hydrological Science Journal, Vol. 29, pp. 425-434.
- Beven, K.J. 1986. Runoff production and flood frequency in catchment of order n. An alternative approach, in scale problems in hydrology, Edited by Gupta, V.K., I. Rodriguez-Iturbe and E.F. Wood, Reidel, Norwell, Mass.
- Beven, K.J. 1989. Changing ideas in hydrology: The case of physically based models. Journal of Hydrology 105 : 157-172.
- Beven, K.J. 1997. Topmodel: A critique, in Beven, K.J. (Eds), Distributed hydrological modelling: Applications of the TOPMODEL Concept, Jhon Wiley & Sons Ltd, England. pp.1-19.
- Beven, K.J. and E.F. Wood. 1983. Catchment geomorphology and the dynamics of runoff contributing areas. J. Hydrol., Vol. 65, pp.139-158.
- Beven, K.J. and M.J. Kirkby. 1979. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. Hydrol. Sci. Bull., Vol. 24, No. 1, pp.43-69.

- Beven, K.J., R. Lamb, P. Quinn, R. Rominowicz and J. Freer. 1995. TOPMODEL, Computer Model of Watershed Hydrology, edited by V. P. Singh, Water Resour. Publications, pp.627~668.
- Bicknell, B.R., J.C. Imhoff. J.A. Kittle., Jr. A.S. Donigian., Jr. and R.C. Johanson. 1993. Hydrologic Simulation Program - FORTRAN (HSPF): User's manual for Release 10. EPA/600/R-93-174. Office of Research and Development, U.S. Envir. Protection Agency, Athens, GA.
- Blazkova, S. and K. Beven. 1997. Flood frequency prediction for data limited catchments in the Czech Republic using a stichastic rainfall model and TOPMODEL. J. Hydrol., Vol. 195, pp.256-278.
- Bockheim, J.G., J.E. Leide, and R.B. Corey. 198-. Effects of acidic precipitation on a forested entisols. I. Laboratory leaching studies. Soil Society of American Journal.(Unpublish-
- Brown, G.W. 1991. Forestry and water quality. Oregon State University. 142p.
- Brown, G.W. and J.T. Krygier. 1970. Effects of clear-cutting on stream temperature. Water Resources Research 6(4):1133-1139.
- Brown, G.W., W.R. Bentley and J.C. Gardon. 1982. Developing harvesting systems for the future:Linking strategies, biology, and design. Forest Products Journal 32(6):35-38.
- Brown, L. C., and T. O. Barnwell. 1987. The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS : Documentation and User Manual. Report EPA/600/3-87/007, U.S. EPA, Athens, Georgia.



- Brown, T.C. and D. Binkley. 1994. Effect of management on water quality in North American forests. United States Department of Agriculture Forest Service. General Technical Report RM-248:1-27.
- Carter, L.J. 1979. Uncontrolled of SO<sub>2</sub> emissions bring acid rain. Science 204:1179-1182.
- Chang, J.-H., Y.-K. Tung, and J.-C. Yang. 1994. Monte Carlo Simulation for Correlated Variables with Marginal Distributions. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.120(3), pp.313-331.
- Charirat, S. and J.W. Delleur. 1993. Effects of the topographic index distribution on the predicted runoff using GRASS : American Water Resources Association. Symposium on Geographic Information Systems in Water Resources, Mobile Alabama, USA. pp. 110.
- Chorley, R.J. 1978. The hillslope hydrological cycle, Chapter 1 of Hillslope Hydrology, M.J. Kirkby (ed). Wiley-Interscience Publication.
- Clapp, R B, S.P. Timmins and M.A. Huston. 1992. Visualising the surface hydrodynamics of a forested watershed, in Proceeding. IX International Conference on Computational Methods in Water Resources Denver, USA. pp. 210.
- Costa-Cabral, M. and Burges, S.T. 1994. Digital elevation model networks(DEMON) : A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. Water Resources Research, Vol. 30, No. 6, pp. 1681-1692.

- Creed, I.F., L.E. Band, N.W. Foster, I.K. Morrison, J.A. Nicolson, R.S. Semkin and D.S. Jeffries. 1996. Regulation of nitrate-N release from temperate forests: a test of the N flushing hypothesis. *Water Resources Research* 32: 3337-3354.
- Dancer, W.S. 1975. Leaching losses of ammonium and nitrate in reclamation of sand spoils in corn well. *Journal of Environmental Quality* 4:499-504.
- Dawdy, D. R., and T. O'Donnell. 1965. Mathematical Models of Catchment Behavior. *J. of the Hydraul. Div., Proceedings of the ASCE*, pp. 123-136.
- Devore, J.L. 1995. *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*, 4th edn. Duxbury Press, Belmont, MA. 510pp.
- Dick, W.A., J.V. Bonta, F. Haghiri, and J.R. Page. 1983. Stream water quality of two small watersheds as affected by surface coal mining. *Journal of Environmental Quality* 12(3):351-358.
- Dodson. 1991. ProStorm: User's manual and program reference. Document No. 91/007, Dodson & Associate, Inc., Houston, Texas.
- Dongian, A.S., Jr. and W.C. Huber. 1991. Modeling nonpoint source water quality in urban and non-urban areas. EPA/600/3-91-039, U.S. Envir. Protection Agency, Athens, GA.
- Dunne, T. 1978. Field studies of hillslope flow processes, in *Hillslope Hydrology*, M.J. Kirkby (ed). Wiley-Interscience Publication. 227-294.
- Dunne, T. and R.D. Black. 1970. Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed. *Water Resources Research* 6 (5) : 1296-1311.

- Fisher, J. and Beven, K. J. 1996. Modelling of streamflow at Slapton Wood using TOPMODEL within an uncertainty estimation framework. *Field Studies*, 8, 577-584.
- Flinn, D.W., L.J. Bren and P. Hopmans. 1979. Soluble nutrient inputs from rain and outputs in stream water from small forested catchments. *Austrian Journal of Forest* 42(1):39-49.
- Franchini, M., J. Wendling, O. Charles and T. Ezio. 1996. Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL. *J. Hydrol.*, Vol. 175, pp.293-338.
- Gallart, F., Llorens, P., and Lartron, J. 1994. Studying the role of old agricultural terraces on runoff generation in a small Mediterranean mountainous basin. *J. of Hydrol.*, 159, 291-303.
- Gardner, R.H., D.D. Huff, R.V. O'Neill, J.B. Mankin, J. Garney, and J. Jones. 1980. Application of Error Analysis to a Marsh Hydrology Model. *Water Resources Research*, Vol.16(4), pp. 659-664.
- Gary D. Christian, 이용근, 박정학, 이동수, 팽기정, 한강완. 1997. 분석화학. 희중당. pp.301 - pp.335
- Gash, J.H.C., I.R. Wright and C.R. Lloyd. 1980. Comparative estimates of interception loss from some coniferous forests in Great Britain. *J. Hydrol.*, 48:89-105.
- Hardy, R.W.F. and U.D. Havelka. 1976. "Photosynthate as a major factor limiting nitrogen fixation by field-grown legumes with emphasis on soybeans" in *Symbiotic Nitrogen Fixation in Plants*, P.S. Nutman, ed. Cambridge Univ. Press. London and New York. pp. 421-439.

- HEC. 1977. Storage, Treatment, Overflow, Runoff Model, STORM, User's Manual. Generalized Computer Program 723-S8-L7520, Hydrologic Engrg. Center, U.S. Army Corps of Engrs., Davis, CA.
- Hewlett, J.D. 1984. Forest, flood and erosion : A watershed experiment in the south eastern Piedmont. *For. Sci.* 30:424-434.
- Hewlett, J.D. and A.R. Hibbert. 1967. Factors affecting on the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In *International Symposium on Forest Hydrology*. Sopper WE, Lull HW (eds), pp. 275-271.
- Hibbert, A.R. 1967. Forest treatment effects on water yield. In: W.E. Sopper and H.W.Lull. (Editors), *Int. Sympo. For. Hydrol.*, Pergamon, Oxford. 527-542.
- Holko, I. and A. Lepisto. 1997. Modelling the hydrological behaviour of a mountain catchment using TOPMODEL. *J. Hydrol.*, Vol. 196, pp.361-377.
- Hollen, B.F., Owens, J.R., and Sewell, J.I. 1992. Water quality in a stream receiving dairy feedlot effluent. *Journal of Environmental Quality* 11:5-9.
- Holmgren, P.B., and Rose, C.W. 1994. "Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid-based elevation models: An empirical evaluation." *Hydrological Process*, Vol 8, pp. 327-334.
- Huber, W.C. and R.E. Dickinson. 1988. Storm Water Management Model Version 4, User's Manual. EPA/600/3-88/001a. Envir. Protection Agency, Athens. GA.

- Hutchins, M.G., H.S. Wheater, M.B. Beck, and B. Reynolds. 1995. The role of natural tracers in the understanding of catchment hydrochemistry within a conceptual hydrological framework.
- Iorgulescu, I. and A. Musy. 1997. Generalization of TOPMODEL for a power law transmissivity profile. *Hydrol. Proce.*, Vol. 11, pp.1353~1355.
- Iorgulescu, I. and J.P. Jordan. 1994. Validation of TOPMODEL in a small Swiss catchment. *J. Hydrol.*, Vol. 159, pp.255-273.
- Jenson, S.K., and J.O. Dominique. 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 54, pp. 1593-1600.
- Krajewski, W. F., V. Lakshmi, K. P. Georgakakos, and S. C. Jain. 1991. A Monte Carlo Study of Rainfall Sampling Effect on a Distributed Catchment Model. *Water Resources Research*, Vol.27(1), pp. 119-128.
- Lahiou, M. S.H. Chounhury, Y. Wu, and B. K. 1995. SWMM Windows Interface user's manual. EPA-823-B-95-008, U.S. Envir. Protection Agency, Washington, DC.
- Lamb, R. 1996. Distributed hydrological prediction using generalised TOPMODEL concepts. PhD Thesis, Lancaster University, Lancaster.
- Likens, G.E., F.H. Barmann and N.M. Johnson. 1969. Nitrification : Importance to nutrient losses from a cutover forested ecosystem. *Science* 163:1205-1206.

- Likens, G.E., F.H. Bormann, R.S. Pierce, J.S. Eaton, and N.M. Johnson. 1977. Biogeochemistry of a Forested Ecosystem. Springer-Verlag. Berlin and New York. p. 146.
- Lloyd, C.R., J.H.C. Gash, W.J. Shuttleworth and F. A. de O. Marques. 1988. The measurement and modelling of rainfall interception by Amazonian rain forest. Agric. For. Meteorol. 43:277-294.
- Lukey, B.T., J. Sheffield, J.C. Bathurst, J. Lavabre, N. Mathys and C. Martin. 1995. Simulating the effect of vegetation cover on the sediment yield of mediterranean catchments using SHETRAN. Phys. Chem. Earth. Vol. 20, No. 3-4, pp. 427-432.
- Lumb, A.M., R.B. McCammon and J.L. Kittle, Jr. 1994. Users manual for an expert system (HSPEXP) for calibration of the Hydrologic Simulation Program -Fortran. Water-Resources Investigations Rep. 94-4168, U.S. Geological Survey, Reston. VA.
- M.G. Anderson and T.P. Burt. 1990. Process Studies in Hillslope Hydrology. pp.1 - pp.36
- Malmer, N. 1976. Acid precipitation : Chemical changes in the soil. Ambio. 5:231-235.
- Massman, W.J. 1983. The derivation and validation of a new model for the interception of rainfall by forests. Agri. Meteo. 28:261-286.
- McCuen, Richard H. 1974. A Sensitivity and Error Analysis of Procedures Used for Estimating Evaporation. Water Resources Bulletin, Vol.10(3), pp. 486-497.

- Megahan, W.F. 1975. Sedimentation in relation to logging activities in the mountains of central Idaho. U.S Department of Agriculture. pp:74-82.
- Molicova, H., M. Grimaldi, M. Bonnel, and P. Hurbert. 1997. Using TOPMODEL towards identifying and modelling the hydrological patterns within a headwater, humid, tropical catchment. Hydrol. Process., 11, 1169-1196.
- Moore, I.D. 1995. Hydrologic modelling and GIS. GIS and environmental modelling : Progress and research issues, GIS World Inc., Fort Collins, Colorado.
- Morgan, M.D. 1990. Streams in the New Jersey Pinelands directly reflect changes in atmospheric deposition chemistry. Journal of Environmental Quality 19:296-302.
- Nash, J.E., and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. I. A discussion for principles. J. Hydrol., Vol. 10, pp.282-290.
- Ned H.C Hwang and Robert J. Houghtalen. 1998. Hydraulic Engineering Systems. Prentice Hall. pp.157 - pp.234
- O'Loughlin E.M. 1986. Saturation regions in catchments and their relation to soil and topographic analysis. Water Resour. Res., Vol. 22, pp.794~804.
- Ostendorf, B. 1996. The influence of hydrological processes on spatial and temporal pattern of CO<sub>2</sub> soil efflux from an arctic tundra environment. Arctic Alp. Res., 28, 316-325.

- Ostendorf, B., P. F. Quinn, K. J. Beven, and J. D. Tenhunen. 1996. Hydrological controls on ecosystem gas exchange in an Arctic landscape, in Reynolds, J. R. and Tenhunen, J. D. (Eds), Landscape Function and Disturbance in Arctic Tundra, Ecological Studies 120. Springer-Verlag, Berlin. 369-386.
- Pearce, A.J. and L.K. Rowe. 1980. Nighttime, wet canopy evaporation rates and the water balance of an evergreen mixed forest. Water Resources Research 16(5):955-959.
- Penman, H.L. 1948. Natural Evapotranspiration from Open Water, Bare Soil, and Grass. Proc. Roy. Soc. London. A193. pp.120-146.
- Pinol, J., Beven, K. J., and Freer, J. 1997. Modelling the hydrological response of Mediterranean catchments, Prades, Catalonia. The use of distributed models as aids to hypothesis testing. Hydrol. Process., 11, 1287-1306.
- Quinn, P. F. and K. J. Beven. 1993. Spatial and temporal predictions of soil moisture dynamics, runoff variable source areas and evapotranspiration for Plynlimon, mid-Wales. Hydrol. Process., 7, 425-448.
- Quinn, P.F., K.J. Beven and R. Lamb. 1995. The  $\ln(a/\tan b)$  INDEX : How to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework. Hydrological Process, Vol. 9, pp.161-182.
- Quinn, P.F., K.J. Beven, P. Chevallier and O. Planchon. 1991. The prediction of hillslope flowpaths for distributed modelling using digital terrain models. Hydrological Process, Vol. 5, pp.59-80.



- Rice, E.L. 1984. *Alleopathy*, 2nd ed. Academic Press. Orlando, Florida.
- Robson, A., K. J. Beven, and C. Neal. 1992. Towards identifying sources of subsurface flow: a comparison of components identified by a physically based runoff model and those determined by mixing techniques. *Hydrol. Process.*, 6, 199-214.
- Robson, A., P. G. Whitehead, and R. C. Johnson. 1993. An application of a physically based semi-distributed model to the Balquhider catchments. *J. Hydrol.*, 145, 357-370.
- Rogers, C. C. M., K. J. Beven, E. M. Morris, and M. G. Anderson. 1985. Sensitivity Analysis, Calibration and Predictive Uncertainty of the Institute of Hydrology Distributed Model. *Journal of Hydrology*, Vol.81, pp. 179 - 191.
- Romanowicz, R., K.J. Beven and R.V. Moore. 1993. TOPMODEL as an application module, within WIS, in K Kovar and H P Nachtnebel (Eds.) *HydroGIS 93 : Application of Geographical Information Systems in Hydrology and Water Resources*. IAHS Publication. No. 211.
- Rutter, A.J. and A.J. Morton. 1977. A predictive model of rainfall interception in forests III-sensitivity of the model to stand parameters and meteorological variables. *J. Applied Ecology*, 14:567-588.
- Salomonson, V. V., R. Ambaruch, A. Rango, and J. P. Ormsby. 1975. Remote Sensing Requirements as Suggested by Watershed Model Sensitivity Analysis. *Proceedings, Tenth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, Michigan, Vol.2, pp. 1273-1284.

- Sambasiva Rao, A. 1987. Interception losses of rainfall from Cashew tree. *J. Hydrol.* 90:293-301.
- Siebert, J., K.H. Bishop and L. Nyberg. 1997. A test of TOPMODEL's ability to predict spatially distributed groundwater levels. *Hydrological Processes*, Vol. 11, pp.1131-1144.
- Sivapalan, M., K.J. Beven and E.F. Wood. 1987. On hydrologic similarity: 2, A scaled model of storm runoff production. *Water Resour. Res.*, Vol. 23(12), pp.2266-2278.
- Smith, R. E., and R. H. B. Hebbert. 1979. A Monte Carlo Analysis of the Hydrologic Effects of Spatial Variability of Infiltration. *Water Resources Research*, Vol.15(2), pp.419-429.
- Sorooshian, S., V.K. Gupta and J.L. Fulton. 1983. Evaluation of maximum likelihood parameter estimation techniques for conceptual rainfall-runoff models: Influence of calibration data variability and length on model credibility. *Water Resources Research* 19 (1) : 251-259.
- Stuart, N and C. Stocks. 1993. Hydrological modeling within GIS : an integrated approach in *HydroGIS 93 : Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources*. IAHS Publication No. 211 : 319-329.
- Switzer, G.L., L.E. Nelson, and W.H. Smith. 1968. "The mineral cycle in forest lands", in *Forest Fertilization: Theory and Practice*. Tenn. Valley Auth. Muscle Shoals, Alabama. pp. 1-9.

- Takasao, T., and K. Takara. 1998. Evaluation of Rainfall-Runoff Models from the Stochastic Viewpoint. *Journal of Hydrology*, Vol.102, pp.381-406.
- The Engineering Staff of Analog Devices, Inc. 1986. *Analog-Digital Conversion Handbook*. Prentice Hall. pp.22 - pp.65
- Tischendorf, W.G. 1969. Tracing storm flow to varying source areas in a small forested watershed in the southeastern Piedmont. Ph.D. Dissertation. Univ. of Georgia, Athens, Georgia.
- Troch, P. A., M. Mancini, C. Paniconi, and E. F. Wood. 1993. Evaluation of a distributed catchment scale water balance model. *Wat. Resour. Res.*, 29, 1805-1817.
- Tsugio Ezaki. 1996. Changes in pH values on the runoff water of the rainfall by forest. *Northeast Asian Forests in 21st Century in '96 International Symposium on Forest Science*, The Institute of Forest Science, Kangwon National University, October 24, 1996, pp.37-46.
- Tung, Y.-K., and B. C. Yen. 1993. Some Recent Progress in Uncertainty Analysis for Hydraulic Design. *Reliability and Uncertainty Analyses in Hydraulic Design*, Edited by B. C. Yen and Y.-K. Tung, ASCE, New York, pp. 17-34.
- Ulrich, B. 1978. Production and consumption of hydrogen ions in the ecosphere. In: "Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems", T.C. Hutchinson and M. Havas, Plenum, N.Y. pp.255-282.
- W. Weischet, 김종규. 1997. 일반기후학개론. 도서출판 한울. pp.173 - pp.187

- Weihua, Z. and D.R. Montgomery. 1994. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. *Water Resources Research* 30 (4) : 1019-1028.
- Welsch, D.L., C.N. Kroll, J.J. McDonnell and D.A. Burns. 2001. Topographic controls on the chemistry of subsurface stormflow. *Hydrol. Process.* 15: 1925-1938.
- Whitehead, P.G., S. Bird., M. Hornung., J. Cosby., C. Neal., and P. Paricos. 1988. Stream acidification trends in the welsh uplands-a modelling study of the Llyn Brianne catchments. *Journal of Hydrology* 101:191-212.
- Wigmosta, M.S. and D.P. Lettenmaier. 1999. A comparison of simplified method for routing topographically driven subsurface flow. *Water Resour. Res.*, Vol. 135, No. 1, pp.255-264.
- Willems, W.J. 1987. The environmental protection policy in the Netherlands towards agricultural impacts on soil and groundwater. *European Conf. Impact of Groundwater on Water Resources.*
- William Stallings. 1997. *Data and Computer Communications.*
- William, M.O. and I. Cordery. 1996. Estimation of interception capacity of the forest floor. *J. Hydrol.* 180:283-299.
- Wolock, D. M. and G. J. McCabe. 1995. Comparison of single and multiple flow direction algorithms for computing topographic parameters in TOPMODEL. *Wat. Resour. Res.*, 31, 1315-1324.
- Wolock, D.M. 1993. Simulation the Variable Source Area concept of Streamflow Generation with the Watershed Model TOPMODEL. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report.

Wolock, D.M. and V.P. Curtis. 1994. Effects of digital elevation model map scale and data resolution on a topography-base watershed model. *Water Resour. Res.*, Vol. 30, pp.3041-3052.

Wolock, D.M., G.M. Hornberger and T.J. Musgrove. 1990. Topographic effects on flow path & surface water chemistry of the Llyn Brianne catchments in Wales. *Journal of Hydrology*, 115 : 243-259.

Zhang, W. and D.R. Montgomery. 1994. Digital elevation model grid size, landscape representation and hydrologic simulations. *Water Resour. Res.*, Vol. 30, pp. 1019-1028.