

GOVP1200512044

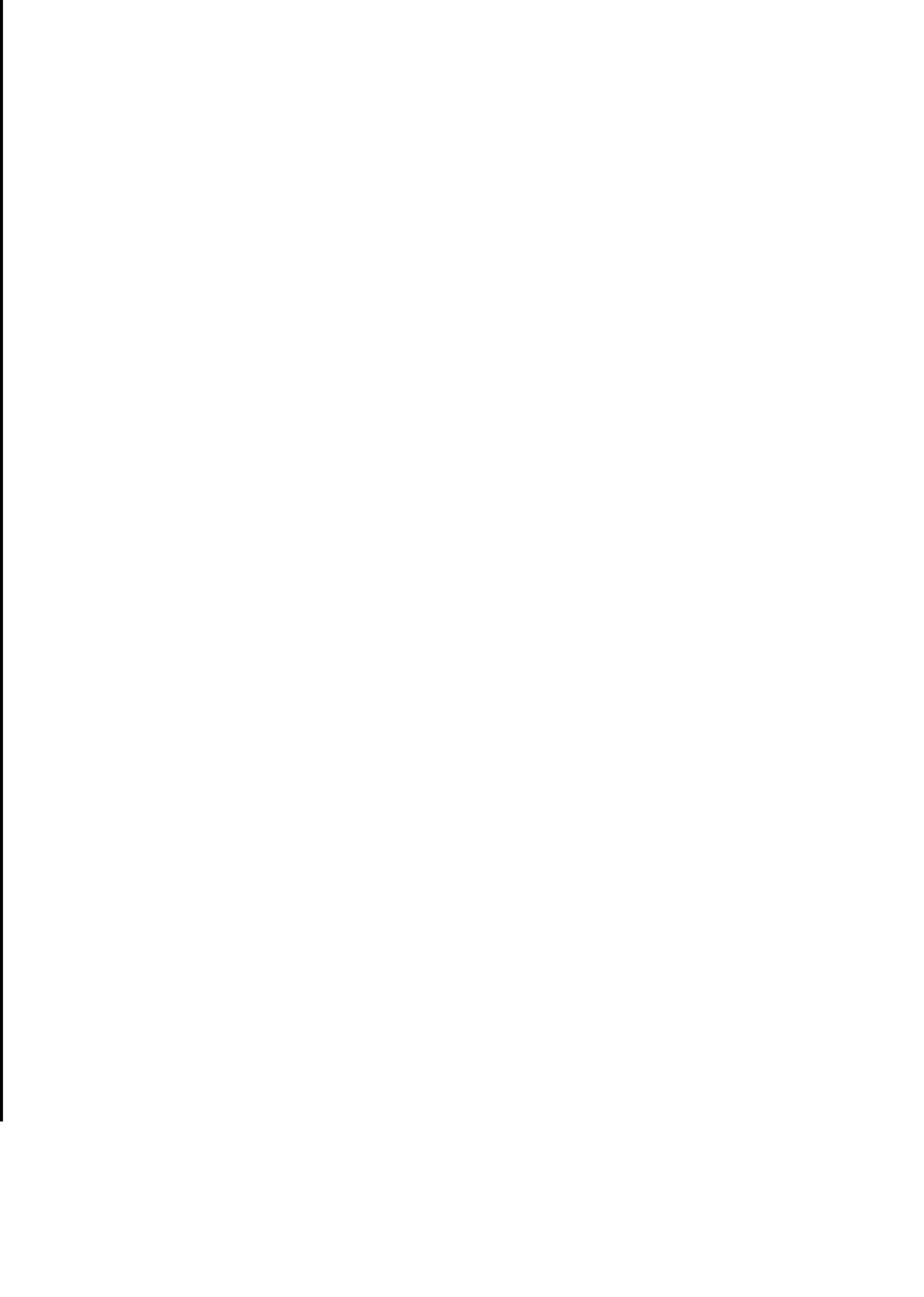
최 종
연구보고서

농촌지역 청정지하수 수질감시/관리시스템 개발

System of Controlling and Guarding Groundwater Quality In Rural Area

연구기관
농업기반공사

농 립 부



제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “농촌지역 청정지하수 수질감시/관리시스템 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2004 년 8 월 15 일

주관연구기관명 : 농업기반공사 농어촌연구원

총괄연구책임자 : 이 기 철

세부연구책임자 : 부 성 안

연 구 원 : 송 성 호

이 규 상

김 정 희

이 주 영

조 시 범

김 진 성

김 진 호

이 명 진

김 경 훈

박 종 철

최 태 범

이 미 선

정 드 리

위탁연구기관명 : 연세대학교

위탁연구책임자 : 우 남 칠

위탁연구기관명 : 광운대학교

위탁연구책임자 : 장 윤 영

위탁연구기관명 : 중앙대학교

위탁연구책임자 : 김 윤 영

참 여 기 업 : (주)하이드로넷

참여기업책임자 : 박 준 기

요 약 문

I. 제목 : 농촌지역 청정지하수 수질감시/관리시스템 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

지하수는 상수도 보급율이 낮은 농어촌지역 많은 농민이 생활용수로 이용하고 있으며 최근에는 청정수원으로 인식되어 국가 자원으로서의 점차 그 가치가 더욱 중대시되고 있다. 이러한 지하수는 산출 특성상 무제한 개발 이용할 수 있는 자원이 아니고 바다로부터 증발되어 강수로 내려 하천을 거쳐 다시 바다로 순환되는 커다란 수문순환계에서 이동하고 있는 중간과정의 산물이며 유입되는 량 중에서 일정 허용량 범위 내에서 이용할 때 영구적인 수자원으로 활용할 수 있다. 즉 지하수는 수질과 수량을 주기적으로 측정하여 허용범위를 알면서 보전·관리하면서 이용해야만 오염이나 고갈 위험 없이 후손에까지 청정한 수자원으로 이용할 수 있는 자원이다.

본 연구의 목적은 그동안 한밭지역 중 지표수 공급이 불리한 지역에 농업용수 보조수원으로서 관정 개발을 주목적으로 시행되어 오던 농림부의 지하수조사개발 사업의 관리체계를 한단계 향상시킬 수 있도록 지하수의 수량과 수질을 보전 관리하는데 필요한 합리적인 지하수 자료 관리체계를 연구 개발하여 제공하는 데에 있다.

농림부에서는 각 지방자치단체에서 시행하여 오던 지하수 자료관리체계 즉, 관정에 대한 주소위치와 소유주를 포함하여 다양한 시추 정보자료를 서식(표)으로 통계자료로 관리해 오던 기존 관리체계를 앞으로는 도면상에서 해당관정의 시추자료와 오염원 위치, 지질 및 지형 정보등을 한눈에 파악할 수 있는 GIS 관리체제로 전환하여 자치단체에 보급하고자 새로운 지하수조사개발 관리시스템을 최근에 개발하였다. GIS 도면에 의한 지하수정보 관리의 유역 내에 위치하는 여러 개의 관정들을 종합 관리가 가능하며 유역 내 전체적인 지하수 함양량과 유역 단위별 총 이용량 파악이 가능하며 각 자치단체에서 신규 관정 개발 신청 및 인허가시 타당성 여부를 판단 할 수 있는 정보파악이 가능하다. 또한 관할 시,군 내의 지하수 정보자료를 수계별로 종합 관리할 수 있으며 관정에 대한 수질오염 현황 자료와 잠재오염원, 하천과 지질, 토양 자료들

이 GIS 도면화 속성 자료로서 관리될 수 있는 체제로 구축되어 있으며 시범 운영기간을 거쳐 가까운 장래에 자치단체로 보급될 예정이다.

본 연구에서는 이러한 새로운 지하수 정보관리 체계에 필요한 정보분석 기능과 수질감시 기능을 추가시켜 관리시스템 기능을 향상시키고 GIS 정보 자료를 효율적으로 활용할 수 있도록 만들고자 하였다. 지하수 잠재오염원과 수질자료를 상호 관련 여부를 종합적으로 분석할 수 있도록 하고 청정한 지하수를 보전하기 위해 필요한 감시지역을 도출하고 그러한 감시 대상지역에는 실시간으로 수질이 감시 될 수 있는 프로그램을 개발하였다. 청정한 수자원 지역은 보호하고, 일부 미약한 오염 지역은 개발이용지역으로 관리하고 심각한 오염지역은 정화처리 대상지역으로 관리할 수 있는 기능을 개발하였다. 또한 이러한 지하수 관리체계를 누구나 자료공유가 가능한 인터넷기반으로 개발하여 동일지역에 기존자료가 있음을 모르고 시행되는 중복조사로 인한 국가 예산 낭비를 방지할 수 있도록 계획 하였다.

국토개발과 지하수자원 보호는 서로 상반되는 개념으로 개발정책 수립시 수질보전과 개발은 서로를 조화시키기가 쉽지 않으며, 특히 결정권을 가진 일선 행정관서 담당자에게는 더욱 그러하다. 지금까지 어떠한 개발에 앞서 지하수수질 보호분야는 검토는 거의 미미하게 검토되어 온 것이 현실로 오염 징후가 파악되어 민원이 발생하는 등 오염사태가 발생된 이후에 지하수에 관한 별도의 환경영향조사가 시행되는 현실이다. 또한 쓰레기 매립장 및 하수종말처리장 등 경제 개발에 따라 신규 건설이 불가피한 시설물 위치선정 시 주민의 지역 이기주의로 인하여 지하수 오염에 가장 심각할 수 있는 유역 상류부의 깊은 산 계곡 같은 곳으로 위치가 선정되는 경우가 있어, 현재 주민들의 민원은 피할 수 있을지 몰라도 장래 우리의 후손이 이용해야 할 지하수 자원을 오염위험에 빠지게 하는 우를 범하게 되는 사례도 발생하고 있다.

본 청정지하수 수질관리시스템에서는 정밀 지하수 환경영향조사시 소요되는 막대한 예산과 소요기간을 투입하지 않고 사전에 토지이용계획 수립단계에서 지하수 오염 예방차원의 예비타당성 검토가 가능하며 청정지역에는 잠재오염 시설물 설치를 지양하고 이용지역으로 설치를 유도하며, 심각한 오염지역에는 정화처리 하기 전에는 지하수 이용을 제한하는 등 농촌지역 국토개발시 합리적인 수자원 보급계획을 수립 할 수 있도록 하였다.

또한 본 연구는 농림부 농촌용수과의 현장애로과제로서 연구결과는 곧바로 농림부

의 지하수조사개발사업의 일환으로 추진되는 지하수 정보관리시스템에 분석기능으로 추가되어 활용될 수 있도록 연구과정 중에 관련분야 담당자와 전문가들로 구성된 연구협의회를 지속적으로 운영하여 연구방향을 활용측면에서 개선시켜가며 추진하였다.

본 연구에서는 농촌지역 청정지역 지하수 수질감시/ 관리시스템 개발을 최종목표로 하여 아래와 같이 분야별 세부 목표를 설정하고 연구하였다.

- 농촌지역 지하수 오염현황 종합분석 기준 수립 보급
- 지하수 개발적지선정/ 지하수 수질보전구역 설정을 위한 전문가 의사결정 시스템 개발
- 농촌지역 지하수-지표수 연계이용 및 종합적 수질관리 방안 수립
- 농촌지역 지하수 수질감시/관리시스템 개발

각각의 세부 연구목표 달성을 위해 세부연구팀이 구성되어 추진되었으며 각각의 세부 연구결과는 종합적으로 지하수 수질 감시시스템으로 다시 통합되었다. 통합된 관리시스템에서는 농촌지역의 지하수 수질현황, 잠재오염원 현황, 지표수 수질현황 등을 조사하고, 기존에 지하수의 오염현황 및 오염가능성을 분석하기 위해 사용하였던 DRASTIC Map과 오염발생량도, 질산성질소 오염지수도 등을 종합적으로 분석하여, 실제 농촌지역에서의 지하수 청정지역, 감시지역, 이용지역, 오염지역으로 구분할 수 있는 GIS 툴을 개발하고, 구분된 지하수 지역에 따라 공무원들이 산업시설의 입지 타당성 등을 판단하는데 도움을 줄 수 있는 ‘농촌지역 청정지하수 수질감시/관리 시스템’ 개발을 최종목표로 연구하였다.

III. 연구개발 내용 및 범위

‘농촌지역 청정지하수 수질감시/관리 시스템’ 개발을 최종목표로 하여 다음과 같이 연구, 개발하였다.

- 농촌지역에서 지하수 오염의 주요 지표가 되는 질산성질소 성분을 중점적으로 고려한 오염취약성도 작성기법 개발
- 비점오염원인 농약, 비료, 산성강우의 지표-토양 내 거동, 지하수내로의 유입 및 강수에 의하여 지표수로 씻겨나가는 유기적인 관계 규명

- 지하수함양을 특성파악을 위하여 산림지역, 논, 밭, 과수등 토지이용도별 전국6개지역에 대한 불교란 시료를 채취하여 지하수 함양을 특성을 실측하고 그 결과를 토대로 함양을특성을 분석하였다.
- 해안지역에서의 해수영향 범위 산출기법 및 해수영향 범위내의 지하수관정에서의 적정양수량 산출모델 개발
- ‘농촌지역 청정지하수 수질감시/관리 시스템’을 효과적으로 운영하기 위해 지하수의 수질을 원격 수집할 수 있는 ‘수질 모니터링 시스템’을 개발
- 상기 연구결과들과 지하수오염현황, 오염원분석 등을 토대로 청정지역, 감시지역, 이용지역, 오염지역 4개지역으로 구분하여 관리할 수 있도록 ‘지하수 수질감시/관리시스템’ 개발

IV. 연구개발 결과 및 활용

본 연구는 그동안 도표식 자료관리 체제로 운영되던 지하수 수량 수질 자료들을 GIS도면상으로 작성하여 위치와 거리개념을 추가시키고 유역별로 지하수 순환 Balance 분석과 수질정보자료를 분석할 수 있는 새로운 관리체제로 정책을 변경하려는 농림부의 지하수관리사업의 시작과 더불어 발주된 현장애로 기획연구과제이다. 수질 및 수량관리가 용이하도록 단순 D/B 관리가 아닌 오염특성과 오염원과의 관련 여부를 분석하고 지하수 수질자료를 분석하여 지하수 수질오염 정도에 따라 4개 권역으로 지역을 구분 관리하는 프로그램을 개발하였다. 이를 위해서는 좀 더 정확한 수문분석 즉 지하수 함양을 파악과 수직 투수계수 파악, 그리고 오염원별로 오염부하량 산출 및 도면화, 지질분포 및 토지이용도에 따른 지하수 함양을 변화 등을 분석할 수 있는 프로그램을 개발하였고 최종적으로 지하수 분포지역을 함양지역, 청정지역과 이용지역, 오염지역으로 구분 관리 할 수 있도록 하였다.

농촌지역 주요 오염원별 지하수 오염가능성을 파악하고자 비점오염원으로서 농약과 비료성분에 대한 조사 분석을 시행하였으며, 또한 해안변 대수층에 대하여는 해수 침투 상황을 파악 분석하여 해수침투 정도를 파악하는 프로그램을 개발하였다. 지하수 개발적지선정/ 지하수 수질보전구역 설정을 위한 전문가 의사결정 시스템을 개발하였으며, 이러한 각각의 분석기능들은 종합적으로 청정구역과 오염구역을 구분하는 종합적 분석시스템으로 분석결과들을 제공토록 개발하였다.

또한 우리나라에서는 처음으로 지역별로 토지이용도에 따라 산간, 논, 밭, 과수원별로 불교란 시료를 심도 80~100cm로 채취하여 수직투수계수와 함양율을 실측 한 바 있다. 여기서의 자료는 그동안 논에서 1일 3 cm 정도가 지하수로 함양된다고 추정하고 용수소요량을 산출해 오던 일반적인 상식론을 더 이상 적용하기가 곤란하다는 결론을 제시하였다. 지하수 함양율은 토양특성에 가장 크게 영향을 받고 있는 것으로 조사되었으며 잠재오염원도 부하 발생량보다는 오염 부하량에 크게 영향을 받고 있었다. 지질분포와 관련되는 무기물 성분, 광산분포와 지하수 수질관련 여부는 금회 연구에서 규명되지 못하였으나, 지하수 수질오염 항목별로 분석할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 또한 오염지역과 청정지역을 구분하고자 할 경우 오염원 분포 지하수 수질오염현황, 잠재오염원을 고려하여 서로의 상관성 분석이 가능토록 하였다.

이러한 통합 지하수 자료관리 체계를 인터넷으로 실시간 통제 및 자료 보완이 가능토록 하였으며, 누구나 원할 경우 자료를 자유로이 이용할 수 있게 되었다. 연구결과는 농림부에서 추진하고 있는 지하수관리시스템에 분석기능으로 추가 될 것이며, 지하수 통합관리 시스템으로 손색이 없는 시스템이다. 자료관리 및 보완과 관련해서는 사용자 매뉴얼을 작성하였으며 초기에는 사용자가 이용 교육을 받아야 운영이 가

능할 것이다. 또한 누구나가 손쉽게 활용할 수 있도록 프로그램이 단순화 시킨 프로그램으로 구성되었다. 대부분의 분석 알고리즘은 교육이 불필요하며 실제 활용 분야 위주로 진행해 왔다. 해안변 대수층의 경우에는 별도로 조석차와 지하수위변화 자료를 이용하여 투수계수와 해수 침투 거리를 산출할 수 있도록 하였다.

시범지구 조사 분석에서는 오염원과 지하수 수질오염 현황과는 크게 상관성이 없어보였고, 밀집된 주거지역과 오염현황은 일치되는 곳도 있었다. 수질분석자료가 장기적으로 누적되지 못하여 아직은 분석 결과에서 오염진행상태를 규명하지 못하였으나 향후 자료가 누적된다면 좀 더 신뢰가능한 분석결과를 얻을 수 있을 것이다.

SUMMARY

Groundwater has been used as a source of drinking water in the rural provinces where has no public water supply and sewage system. It becomes one of the major nation's clean water resources when the surface water has confronted with contamination. Groundwater is not the infinite resources of the clean water. It is one of mid-term in the hydrological cycle which is originated from evaporation in the ocean and moving through the rainfall and surface runoff or rainfall infiltration into the subsurface aquifer, and finally it will return to the ocean. Therefore if we do not abstract less than permissible amounts of groundwater and do not preserve its quality from contamination sources, our future generation will meet the severe water deficit.

The Ministry of Agriculture has developed a new groundwater managing system recently to preserve groundwater properly in quantity and quality. The new system has change the data managing system from previous spreadsheet to new GIS mapping system.

This research project was proposed by the Ministry of Agriculture to upgrade new groundwater managing system. The various analyzing tools were developed through this research project for water quantity and quality data like groundwater recharge model, delineating groundwater contaminated and conservative areas, active monitoring system and sea water intrusion model etc. Optimum abstraction rate would be estimated by proper groundwater monitoring and analyzing system based on regional aquifersystem analysis under the environmentally sustainable restriction. Those analyzing tools developed by this research project would be added to the new groundwater managing system and make it possible to improve

its function. The officer in the regional government even who is not a groundwater expert can be easily delineate groundwater conservative area and also easily find the proper location for newly proposed well and the proper site for new contamination such as landfill.

Following four sub-objectives were established and have developed to fulfill the main aim.

- O. Analyzing tool for the present groundwater contamination in rural area.
- O. Expert decision tools for delineating groundwater preservation area and finding proper location for the new well site.
- O. Optimum water supply management considering both surface-groundwater body and controlling water quality in the rural area.
- O. Developing groundwater quality monitoring system in rural area.

Using GIS tools, spatial data such as well locations, contaminated site, groundwater flow directions, aquifer characteristics, distribution of the soil and geology and so on are drawn by vector data (point, line, polygon) and their attributes such as groundwater level, water quality, conductivity of aquifer are described by raster data (grid and database) on the same base map. The newly developed groundwater quality analyzing system are more powerful than data base system which calculate and analyze spatial and raster data and gives useful output to delineating preservation area and contaminated area. In this study, we use ARC GIS(ver. 8.12) and develop the 'Water Quality Monitoring System to Preserve Clean Groundwater In

Rural Area'(WQMS) The WQMS requires widely distributed data and continuous monitoring data accumulation to get more confidential output such as groundwater recharge rate, recharging area, aquifer conductivity, specific yield, permeability of vadose zone, soil properties, mechanism of nitrate moving, manure adsorption, seawater intrusion in shore, et. al.

The surface area can be identified into 4 groups by WQMS, 'clean area', 'surveillance area', 'usable area', and 'polluted area'. Since the groundwater managing system developed by this research project was based on internet, it is possible that everyone who is interested in the groundwater can be reached freely to the output data file. The output file shows groundwater contaminated area and conservative area. The more detail reports and data are offered in the Online (<http://211.112.132.86>). The amount of future groundwater development and the proper location for new contamination sites and so on. Every tools have developed by this research project would be add and apply for new groundwater managing program implemented by the Ministry of Agriculture.

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	23
Section 1 Objectives	23
Section 2 Background	27
Section 2 Flowchart of the implementation	31
Chapter 2 The present state for technology in & out of the country	32
Section 1 Investigation on present groundwater contamination	32
Section 2 On-going monitoring system for surface water, ground water, and soil in Korea	36
Chapter 3 Methodology and contents	41
Section 1 Methodology	41
Section 2 Field survey and data aquisition	241
Section 3 Development of ground water monitoring system	260
Section 4 Application of the developed system to the test site	268
Chapter 4 Plan versus implementation of the project	287
Chapter 5 Output and application	294
Section 1 Future application	294
Chapter 6 Conclusion	302
References	318

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요	23
제 1 절 연구개발의 목표	23
제 2 절 연구개발의 필요성	27
제 3 절 연구 추진 체계	31
제 2 장 국·내외 기술개발 현황	32
제 1 절 수질오염 현황조사 분야	32
제 2 절 우리나라 지표수-토양-지하수 측정망 운영 현황	36
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	41
제 1 절 업무분석	41
제 2 절 현장조사 및 자료수집	241
제 3 절 지하수 수질 모니터링 시스템 개발	260
제 4 절 시스템 구현 결과	268
제 4 장 계획대비 실적표	287
제 5 장 연구개발 결과의 활용계획	294
제 1 절 활용계획	294
제 6 장 결 론	302
참고문헌	318

표 목 차

표 1-1 미국 전지역의 농약 및 질산성질소 조사 결과.	29
표 2-1 '99 토양측정망 운영현황.	38
표 2-2 전국 지하수 수질측정망의 연도별 수질분석결과중 먹는물 수질기준을 초과 하는 대표 성분과 초과비율. [초과개수/비율(%) : 환경부]	39
표 3-1 DRASTIC 기법에 의한 지하수 오염취약성도 작성 진단항목	44
표 3-2 DRASTIC 모델 지수의 일반적 평가.	45
표 3-3 지하수위의 등급 기준	46
표 3-4 지하수함양율의 등급 기준	47
표 3-5 대수층 매질의 등급 기준	50
표 3-6 토양 매질의 등급 기준	53
표 3-7 지형경사의 등급 기준	55
표 3-8 불포화대 매질의 등급 기준	56
표 3-9 수리전도도의 등급 기준	61
표 3-10 토양 특성	65
표 3-11 SCS방법에 의한 직접유출량 산출에 따른 토양군, CN, AMS 분류기준 ...	81
표 3-12 인구발생부하 원단위	85
표 3-13 업종별 산업폐수 발생농도	86
표 3-14 토지 발생부하원단위	89
표 3-15 축산폐수 발생부하 원단위 구분	90
표 3-16 축산폐수 발생부하 원단위	90
표 3-17 설비에 따른 오염발생부하량 삭감지수	94
표 3-18 토지이용특성에 따른 등급 분류	99
표 3-19 토양의 배수특성에 따른 등급설정과 가중치	100
표 3-20 연구지역내 소육역별 지하수 함양량 분포 정리	103

표 3-21 질산성질소 오염지수 평가의 예	105
표 3-22 질산성질소 농도와 오염지수의 상관성에 관한 통계 분석결과	107
표 3-23 지하수 수질관측정에서의 질산성질소의 농도 분포	113
표 3-24 모의에 사용된 수리 상수들	143
표 3-25 조석 효율을 이용하여 구한 바다와 각 관측정 사이 대수층의 수리 상수들	150
표 3-26 염수 침투를 고려한 각 관측정에서의 최대 적정 양수량.	151
표 3-27 계산된 각 대수층에서의 해수영향권	152
표 3-28 좌표를 기준으로 수질 분석을 위한 샘플링 장소의 현장 수질측정자료, 양 이온 그리고 음이온의 분석결과.	155
표 3-29 각 경작지의 깊이별 토양입경분포	168
표 3-30 측정항목 및 분석방법	177
표 3-31 각 경작지의 깊이별 토양입경분포	182
표 3-32 논과 밭토양 시료의 깊이별 토양 특성	183
표 3-33 칼럼에 시비된 N과 P성분의 총량	184
표 3-34 각 칼럼번호 및 실험 조건	209
표 3-35. Column 조건	212
표 3-36 분석방법	213
표 3-37 토양시료의 특성	214
표 3-38 청정지역 분포도 구분 특성	233
표 3-39 잠재오염원 조사양식.	251
표 3-40 토양시료 채취 지역 정리.	255

그림 목 차

그림 1-1 청정지하수 수질감시/ 관리 시스템	26
그림 1-2 연구 추진 체계도	31
그림 3-1 관정수질분포도 작성 알고리즘	43
그림 3-2 DRASTIC Map 작성 알고리즘 1	62
그림 3-3 DRASTIC Map 작성 알고리즘 2	63
그림 3-4 시간에 따른 토양배수 상태	74
그림 3-5 강우, 관개에 의한 토양시료별 배수량 변화	75
그림 3-6 경기 화성지구와 전북 무주지구의 함양율도	83
그림 3-7 오염발생부하량도 작성 알고리즘	91
그림 3-8 오염발생량 분석 중 설비에 따른 삭감지수 적용 알고리즘	96
그림 3-9 오염지수 산출 단계	97
그림 3-10 연구지역의 위치도	101
그림 3-11 화성시 화남2지구의 토지이용특성도	102
그림 3-12 연구지역의 소유역 및 지하수 관정 분포도	103
그림 3-13 토양특성의 구분과 등급	104
그림 3-14 지하수면 심도의 구분과 등급	104
그림 3-15 연구지역에서 지하수 중 질산성질소의 계절별 분포	105
그림 3-16 6월과 9월의 지하수 중 질산성질소의 농도 비교.	106
그림 3-17 질산성질소 오염지수도 작성 알고리즘	108
그림 3-18 6개 인자를 이용한 화성지역의 대수층 민감성도	111
그림 3-19 지하수 수질조사 관정의 위치	113
그림 3-20 NO ₃ -N 에 의해 오염된 지하수 관정의 위치	114
그림 3-21 NO ₃ -N 에 의해 오염된 지하수의 분포도	114
그림 3-22 화성지역의 질산성질소에 의한 지하수 오염취약성도-축산시설의 영향	116

그림 3-23	축산시설에 의한 질산성질소 오염취약지수와 현장 관측치의 비교-1	116
그림 3-24	화성지역의 질산성질소에 의한 지하수 오염취약성도-생활하수의 영향	118
그림 3-25	생활하수에 의한 질산성질소 오염취약지수와 현장 관측치의 비교-1	118
그림 3-26	질산성질소에 의한 지하수 오염취약성도-면단위 x토지이용에 따른 오염 부하량의 영향	119
그림 3-27	토지이용도를 고려한 오염취약성 지수와 질산성질소 관측치의 비교-면 단위	119
그림 3-28	질산성질소에 의한 지하수 오염취약성도-유형별 토지이용도에 따른 오염부하량의 영향	120
그림 3-29	토지이용도를 고려한 오염취약성 지수와 질산성질소 관측치의 비교-유형별 토지이용 단위	120
그림 3-30	화성지역의 질산성질소에 대한 지하수 오염취약성도-6개 민감성 인자와 3개 오염원 인자의 면단위 종합결과.	122
그림 3-31	면단위 종합 오염취약성지수와 질산성질소	123
그림 3-32	화성지역의 질산성질소에 대한 지하수 오염취약성도 - 6개 민감성 인자와 3개 오염원 인자의 토지이용단위 종합결과.	123
그림 3-33	토지이용특성별 종합 오염취약성지수와 질산성질소 관측치의 비교.	124
그림 3-34	오염취약성 지수와 질산성질소 관측	124
그림 3-35	3개 인자를 이용한 화성지역의 대수층 민감성도.	125
그림 3-36	변형된 질산성질소에 의한 지하수	126
그림 3-37	축산시설에 의한 질산성질소 오염취약지수와 현장 관측치의 비교-2.	127
그림 3-38	변형된 질산성질소에 의한 지하수 오염취약성도 - 생활하수의 영향.	127
그림 3-39	생활하수에 의한 질산성질소 오염취약지수와 현장 관측치의 비교-2.	128
그림 3-40	질산성질소에 의한 지하수	128
그림 3-41	토지이용도를 고려한 오염취약성 지수와 질산성질소 관측치의 비교 - 면단위	129
그림 3-42	지하수 오염취약성도 - 유형별 토지이용 단위	129
그림 3-43	오염취약성 지수와 질산성질소 관측치의 비교 - 유형별 토지이용 단위	130

그림 3-44 3개 민감성 인자와 3개 오염원 인자의 종합 지하수 오염취약성도 - 면 단위	130
그림 3-45 오염취약성 지수와 질산성질소 관측치의 비교.	131
그림 3-46 3개 민감성 인자와 3개 오염원 인자의 종합 지하수 오염취약성도- 토지 이용특성 단위.	131
그림 3-47 토지이용특성별 종합 오염취약성지수와 질산성질소 관측치의 비교. ...	132
그림 3-48 오염취약성 지수와 질산성질소 관측(10mg/L 이상)자료의 비교.	132
그림 3-49 최대 수위강하의 결정	140
그림 3-50 모의 영역 및 경계 조건	142
그림 3-51 양수를 하지 않을 때 수두의 분포	143
그림 3-52 양수를 하지 않을 때 염도 분포	144
그림 3-53 24.52 m ³ /d로 양수하였을 때 수두의 분포	145
그림 3-54 24.52 m ³ /d로 양수하였을 때 염도 분포	145
그림 3-55 49.04 m ³ /d로 양수하였을 때 수두의 분포.	146
그림 3-55 49.04 m ³ /d로 양수하였을 때 염도 분포.	146
그림 3-56 연구 지역의 위치와 관측정의 위치.	147
그림 3-57 조사 지역 내 농업용 관정과 산업용 관정의 모습	148
그림 3-58 식수 공급용 물탱크	148
그림 3-59 각 관정에서의 수위 변화; (a) HS-01; (b) HS-02; (c) HS-03; (d) HS-04(d)	149
그림 3-60 각 관측정의 해변으로부터의 거리와 조석 효율과의 관계	150
그림 3-61 각 관측정의 해변으로부터의 거리와 투수량 계수와의 관계	151
그림 3-62 각 관측정의 해변으로부터의 거리와 제안된 적정 양수량과의 관계	152
그림 3-63 수질 분석을 위한 샘플링 현장	154
그림 3-64 수질 분석을 위한 샘플링 작업 장면.	154
그림 3-65 연구지역의 전기전도도 분포: EC 화용방조재 안쪽에는 담수화가 진행되고 있는 상태를 직접적으로 나타내주고 있는 상태	157
그림 3-66 연구지역의 pH 분포도, 대체적으로 중성의 범위를 보이고 주택 인근에서 산도가 조금 높게 나타남.	157

그림 3-67 연구지역의 산화환원전위 분포도(ORP(mV))	158
그림 3-68 연구지역의 용존산소량의 분포도DO(mg/l), 해수가 침입하는 범위주변으로 낮은 용존산소량을 보이는 경향.	158
그림 3-69 연구지역의 Na(ppm) 분포도	159
그림 3-70 연구지역의 Mg(ppm) 분포도	159
그림 3-71 연구지역의 Ca(ppm) 분포도	160
그림 3-72 연구지역의 Cl(ppm) 분포도	160
그림 3-73 연구지역의 NO ₃ (ppm) 분포도	161
그림 3-74 연구지역의 SO ₄ 분포도	161
그림 3-75 해수침투 지역도 작성 알고리즘	162
그림 3-76 전체 연구수행의 흐름도	165
그림 3-77 무주 시범지역 농경지 개략 및 조사지점.	167
그림 3-78 겨울과 봄철 무주 시범지역 농경지 현장조사	167
그림 3-79 계절에 따른 논과 밭의 깊이별 토양 pH의 분포변화	169
그림 3-80 논과 밭의 계절별 토양중 미생물 활성도 분포 변화	170
그림 3-81 논과 밭의 계절별 토양 중 인성분의 잔류특성	172
그림 3-82 논과 밭의 계절별 토양 중 질소 성분의 잔류특성	173
그림 3-83 식재 조건별 칼럼실험장치의 개략도	175
그림 3-84 식재조건별 비료성분의 거동특성 실험을 위한 칼럼 및 실험장치	175
그림 3-85 외부 온도조건별 비료성분의 거동특성 실험을 위한 실험장치	181
그림 3-86 미국 무성법에 의한 토양삼각분류도(USDA)	182
그림 3-87 식재조건 칼럼실험에서 침출수 중	185
그림 3-88 식재조건 칼럼실험에서 침출수 중 알칼리도의 농도변화	185
그림 3-89 식재조건 칼럼실험에서 침출수 중 ORP의 변화	187
그림 3-90 식재조건 칼럼실험에서 침출수 중 NH ₄ ⁺ -N의 농도변화	187
그림 3-91 식재조건 칼럼실험에서 침출수 중 NO ₃ ⁻ -N의 농도변화	188
그림 3-92 식재조건 칼럼실험에서 침출수 중 TKN의 농도변화	188
그림 3-93 식재조건 칼럼실험에서 침출수 중 PO ₄ ⁻ -P의 농도변화	189
그림 3-94 식재조건 칼럼실험에서 깊이에 따른 뿌리밀도	190

그림 3-95 식재조건 칼럼실험에서 토양 중 뿌리분포	191
그림 3-96 식재조건 칼럼실험에서 발토양 중 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 농도변화.	191
그림 3-97 식재조건 칼럼실험에서 논토양 중 T-P의 농도변화	192
그림 3-98 식재조건 칼럼실험에서 발토양 중 T-P의 농도변화	192
그림 3-99 식재조건 칼럼실험에서 논토양 중 P_2O_5 의 농도변화	193
그림 3-100 식재조건 칼럼실험에서 발토양 중 P_2O_5 의 농도변화	193
그림 3-101 온도조건별 칼럼실험에서 침출수 중 pH의 변화	194
그림 3-102 온도조건별 칼럼실험에서 침출수 중 ORP의 변화	195
그림 3-103 온도조건별 칼럼실험에서 침출수 중 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 농도변화	196
그림 3-104. 온도조건별 칼럼실험에서 침출수 중 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 농도변화	196
그림 3-105 온도조건별 칼럼실험에서 토양 중 ORP변화(30일차)	197
그림 3-106 온도조건별 칼럼실험에서 토양 중 ORP변화(60일차)	198
그림 3-107 온도조건별 칼럼실험에서 토양 중 ORP변화(90일차)	198
그림 3-108 온도조건별 칼럼실험에서 토양 중 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 농도변화(90일차)	199
그림 3-109 온도조건별 칼럼실험에서 토양 중 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 농도변화(30일차)	200
그림 3-110 온도조건별 칼럼실험에서 토양 중 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 농도변화(90일차)	200
그림 3-111 온도조건별 칼럼실험에서 토양 중 DHA의 농도변화(30일차)	201
그림 3-112 온도조건별 칼럼실험에서 토양 중 DHA의 농도변화(60일차)	202
그림 3-113 온도조건별 칼럼실험에서 토양 중 DHA의 농도변화(90일차)	202
그림 3-114 Multi-staged phyto-reactive barrier	208
그림 3-115 Column 개요도	210
그림 3-116 Column 공정 개요도	211
그림 3-117 컬럼 장치 사진	211
그림 3-118 식재유무조건별 일반칼럼을 통과한 유출수의 pH	215
그림 3-119 식재유무조건별 Zeolite칼럼을 통과한 유출수의 pH	216
그림 3-120 식재유무조건별 칼럼을 통과한 유출수의 ORP	217
그림 3-121 식재유무조건별 Zeolite칼럼을 통과한 유출수의 ORP	217
그림 3-122 식재유무조건별 토양칼럼을 통과한 유출수의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$	219
그림 3-123 식재유무조건별 zeolite칼럼을 통과한 유출수의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$	219

그림 3-124 식재유무조건별 토양칼럼을 통과한 유출수의 NO_3^- -N	220
그림 3-125 식재유무조건별 zeolite칼럼을 통과한 유출수의 NO_3^- -N	221
그림 3-126 식재유무조건별 일반칼럼을 통과한 유출수의 NO_2^- -N	222
그림 3-127 식재유무조건별 Zeolite칼럼을 통과한 유출수의 NO_2^- -N	222
그림 3-128 노랑꽃 창포 column에서 유량의 변화	224
그림 3-129. 포플러 나무 column에서 유량의 변화	224
그림 3-130 노랑꽃 창포 Column에서 식물성장의 변화	225
그림 3-131 포플러 나무 column에서 식물성장의 변화	226
그림 3-132 256일 후 노랑꽃 창포 및 포플러 모습	226
그림 3-133 시간별 노랑꽃 창포 식물의 전질소 함유량	227
그림 3-134 시간별 포플러 식물의 전질소 함유량	228
그림 3-135 청정지역 분포도 분석에 필요한 도면.	232
그림 3-136 청정지역 분포도 분석 흐름도	234
그림 3-137 일반 오염항목에 노출된 지역에 대한 분석에서의 연산 및 결과	236
그림 3-138 일반 오염항목에 노출되지 않은 지역에 대한 분석에서의 연산 및 결과	237
그림 3-139 최종 도면 생성을 위한 각 도면의 중첩 연산방식	238
그림 3-140 무주에서 조사된 관정의 분포도	242
그림 3-141 수위측정 대상 관정 분포도	243
그림 3-142 지하수 시료채취 지점과 주요 잠재오염원 분포	244
그림 3-143 관정의 현황 조사 및 시료채취	245
그림 3-144 하천 시료 채취	246
그림 3-145 설천면, 무풍면 일대의 하천 시료채취 지점	247
그림 3-146 일반 수치지형도.	249
그림 3-147 GIS과정 처리 수치지형도.	249
그림 3-148 건물번호 생성	249
그림 3-149 무주의 잠재오염원도(점오염원).	253
그림 3-150 무주의 쓰레기 매립장 분포도.	253
그림 3-151 산업폐수시설과 축산폐수시설.	254

그림 3-152 하천가에 위치한 잠재오염원들.	254
그림 3-153 야적되어 있는 축산 폐기물.	254
그림 3-154 배수실험용 토양시료 채취	257
그림 3-155 시료의 내부 공간 처리	257
그림 3-156 토양수분측정용 토양시료 채취	258
그림 3-157 채취토양의 실험장	259
그림 3-158 채취토양의 실험장 완공	259
그림 3-159 토양실험 전처리 과정	259
그림 3-160 사용할 자료의 종류 및 유형 선택.	268
그림 3-161 수질기준 선택.	268
그림 3-162 관정의 수질 현황표	268
그림 3-163 관정별 기준치 초과 항목수	270
그림 3-164 선택된 관정 지도에서 보기	270
그림 3-165 관정별 기준치 초과 항목수 분포도	270
그림 3-166 수질항목별 기준치 초과 관정수	271
그림 3-167 수질항목별 기준치 초과 관정 분포도	271
그림 3-168 선택된 수질의 분포도.	271
그림 3-169 선택된 수질의 기준치 초과지역 분포도	271
그림 3-170 사용할 도면의 정확성 체크	272
그림 3-171 가중치 유형 선택	272
그림 3-172 수리전도도 범위 및 등급 설정	273
그림 3-173 표토(토양)의 범위 및 등급 설정	273
그림 3-174 대수층 구성물질의 범위 및 등급 설정	273
그림 3-175 비포화대 구성암종의 범위 및 등급 설정	273
그림 3-176 지하수위의 범위 및 등급 설정.	274
그림 3-177 지하수 함양률의 범위 및 등급 설정	274
그림 3-178 지형구배의 범위 및 등급 설정	274
그림 3-179 대수층 구성물질의 분류 설정	274
그림 3-180 비포화대 구성암종의 분류 설정	275

그림 3-181 표토(토양)의 분류 설정	275
그림 3-182 DRASTIC 분석시작	275
그림 3-183 DRASTIC 분석 결과	275
그림 3-184 생성될 결과테이블의 이름 설정.	277
그림 3-185 오염발생부하량 원단위 설정.	277
그림 3-186 오염발생부하량의 삭감 지수 설정.	277
그림 3-187 오염부하량 분석결과	277
그림 3-189 분석된 오염부하량도.	278
그림 3-190 사용할 도면의 정확성 체크.	279
그림 3-191 토지이용 범위 및 등급 설정.	279
그림 3-192 강수의 지하함양률의 범위 및 등급 설정.	279
그림 3-193 토양의 조직 범위 및 등급 설정.	279
그림 3-194 지하수면까지의 깊이 범위 및 등급 결정.	280
그림 3-195 토지이용의 분류.	280
그림 3-196 토양조직의 분류.	280
그림 3-197 질산성질소 오염지수의 분석 시작.	280
그림 3-198 질산성질소 오염지수도 작성 결과.	281
그림 3-199 해수침투 분석 틀.	282
그림 3-200 해수침투 지역도.	282
그림 3-201 청정지하수 분석환경 설정.	283
그림 3-202 청정지하수 분포지역도 작성 결과.	284
그림 3-203 잠재오염원 정보 입력	285
그림 3-204 잠재오염원 사진 선택	285
그림 3-205 분석지역의 설정	285
그림 3-206 사용할 도면설정	285
그림 3-207 관정수질 현황표 엑셀파일로 내보내기	286
그림 6-1 경기도 화성시 청정지하수 분포도	316
그림 6-2 전라북도 무주군 청정지하수 분포도	316

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구개발의 목표

지하수는 상수도 보급율이 낮은 농어촌지역 많은 농민이 생활용수로 이용하고 있으며 최근에는 청정수원으로 인식되어 국가 자원으로서의 점차 그 가치가 더욱 중대시되고 있다. 이러한 지하수는 산출 특성상 무제한 개발 이용할 수 있는 자원이 아니고 바다로부터 증발되어 강수로 내려 하천을 거쳐 다시 바다로 순환되는 커다란 수문순환계에서 이동하고 있는 중간과정의 산물이며 유입되는 량 중에서 일정 허용량 범위 이내에서 이용할 때 영구적인 수자원으로 활용할 수 있다. 즉 지하수는 수질과 수량을 주기적으로 측정하여 허용범위를 알면서 보전·관리하면서 이용해야만 후손에게까지 청정한 수자원으로 이용할 수 있는 자원이다.

본 연구의 목적은 그동안 한발지역 중 지표수 공급이 불리한 지역에 농업용수 보조수원으로서 관정 개발을 주목적으로 시행되어 오던 농림부의 지하수조사개발 사업의 관리체계를 한단계 향상시킬 수 있도록 지하수의 수량과 수질을 보전 관리하는데 필요한 합리적인 지하수 자료 관리체계를 연구 개발하여 제공하는 데에 있다.

농림부에서는 각 지방자치단체에서 시행하여 오던 지하수 자료관리체제 즉, 관정에 대한 주소위치와 소유주를 포함하여 다양한 시추 정보자료를 서식(표)으로 통계자료로 관리해 오던 기존 관리체제를 앞으로는 도면상에서 해당관정의 시추자료와 오염원 위치, 지질 및 지형 정보등을 한눈에 파악할 수 있는 GIS 관리체제로 전환하여 자치단체에 보급하고자 새로운 지하수조사개발 관리시스템을 최근에 개발하였다. GIS 도면에 의한 지하수정보 관리는 유역 내에 위치하는 여러 개의 관정들을 종합 관리가 가능하며 유역 내 전체적인 지하수 함양량과 유역 단위별 총 이용량 파악이 가능하며 각 자치단체에서 신규 관정 개발 신청 및 인허가시 타당성 여부를 판단 할 수 있는 정보파악이 가능하다. 또한 관할 시,군 내의 지하수 정보자료를 수계별로 종합 관리할 수 있으며 관정에 대한 수질오염 현황 자료와 잠재오염원, 하천과 지질, 토양 자료들이 GIS 도면화 속성 자료로서 관리될 수 있는 체제로 구축되어 있으며 시범 운영기간을 거쳐 가까운 장래에 자치단체로 보급될 예정이다.

본 연구에서는 이러한 새로운 지하수 정보관리 체계에 필요한 정보분석 기능과 수질감시 기능을 추가시켜 관리시스템 기능을 향상시키고 GIS 정보 자료를 효율적으로 활용할 수 있도록 만들고자 하였다. 지하수 잠재오염원과 수질자료를 상호 관련 여부를 종합적으로 분석할 수 있도록 하고 청정한 지하수를 보전하기 위해 필요한 감시지역을 도출하고 그러한 감시 대상지역에는 실시간으로 수질이 감시 될 수 있는 프로그램을 개발하였다. 청정한 수자원 지역은 보호하고, 일부 미약한 오염 지역은 개발이용 지역으로 관리하고 심각한 오염지역은 정화처리 대상지역으로 관리할 수 있는 기능을 개발하였다. 또한 이러한 지하수 관리체계를 누구나 자료공유가 가능한 인터넷기반으로 개발하여 동일지역에 기존자료가 있음을 모르고 시행되는 중복조사로 인한 국가 예산 낭비를 방지할 수 있도록 계획 하였다.

국토개발과 지하수자원 보호는 서로 상반되는 개념으로 개발정책 수립시 수질보전과 개발은 서로를 조화시키기가 쉽지 않으며, 특히 결정권을 가진 일선 행정관서 담당자에게는 더욱 그러하다. 지금까지 어떠한 개발에 앞서 지하수수질 보호분야는 검토는 거의 미미하게 검토되어 온 것이 현실로 오염 징후가 파악되어 민원이 발생하는 등 오염사태가 발생된 이후에 지하수에 관한 별도의 환경영향조사가 시행되는 현실이다. 또한 쓰레기 매립장 및 하수종말처리장 등 경제 개발에 따라 신규 건설이 불가피한 시설물 위치선정 시 주민의 지역 이기주의로 인하여 지하수 오염에 가장 심각할 수 있는 유역 상류부의 깊은 산 계곡 같은 곳으로 위치가 선정되는 경우가 있어, 현재 주민들의 민원은 피할 수 있을지 몰라도 장래 우리의 후손이 이용해야 할 지하수 자원을 오염위협에 빠지게 하는 우를 범하게 되는 사례도 발생하고 있다.

본 청정지하수 수질관리시스템에서는 정밀 지하수 환경영향조사시 소요되는 막대한 예산과 소요기간을 투입하지 않고 사전에 토지이용계획 수립단계에서 지하수 오염 예방차원의 예비타당성 검토가 가능하며 청정지역에는 잠재오염 시설물 설치를 지양하고 이용지역으로 설치를 유도하며, 심각한 오염지역에는 정화처리 하기 전에는 지하수 이용을 제한하는 등 농촌지역 국토개발시 합리적인 수자원 보급계획을 수립 할 수 있도록 하였다.

또한 본 연구는 농림부 농촌용수과의 현장애로과제로서 연구결과는 곧바로 농림부의 지하수조사개발사업의 일환으로 추진되는 지하수 정보관리시스템에 분석기능으로 추가되어 활용될 수 있도록 연구과정 중에 관련분야 담당자와 전문가들로 구성된 연

구협의회를 지속적으로 운영하여 연구방향을 활용측면에서 개선시켜가며 추진하였다.

본 연구에서는 농촌지역 청정지역 지하수 수질감시/ 관리시스템 개발을 최종목표로 하여 아래와 같이 분야별 세부 목표를 설정하고 연구하였다.

- 농촌지역 지하수 오염현황 종합분석 기준 수립 보급

- 지하수 개발적지선정/ 지하수 수질보전구역 설정을 위한 전문가 의사결정 시스템 개발

- 농촌지역 지하수-지표수 연계이용 및 종합적 수질관리 방안 수립

- 농촌지역 지하수 수질감시/관리시스템 개발

각각의 세부 연구목표 달성을 위해 세부연구팀이 구성되어 추진되었으며 각각의 세부 연구결과는 종합적으로 지하수 수질 감시시스템으로 다시 통합되었다. 통합된 관리시스템에서는 농촌지역의 지하수 수질현황, 잠재오염원 현황, 지표수 수질현황 등을 조사하고, 기존에 지하수의 오염현황 및 오염가능성을 분석하기 위해 사용하였던 DRASTIC Map과 오염발생량도, 질산성질소 오염지수도 등을 종합적으로 분석하여, 실제 농촌지역에서의 지하수 청정지역, 감시지역, 이용지역, 오염지역으로 구분할 수 있는 GIS 툴을 개발하고, 구분된 지하수 지역에 따라 공무원들이 산업시설의 입지 타당성 등을 판단하는데 도움을 줄 수 있는 ‘농촌지역 청정지하수 수질감시/관리 시스템’ 개발을 최종목표로 연구하였다.(그림1-1)

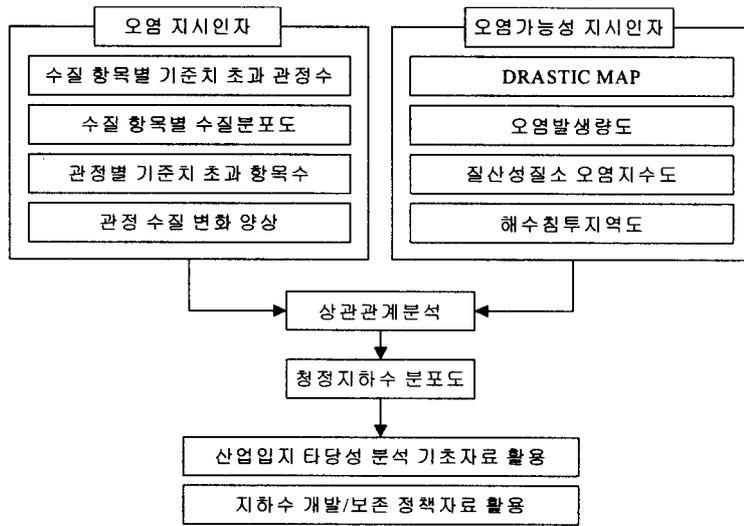


그림 1-1 청정지하수 수질감시/ 관리 시스템

위 시스템의 개발에 있어서, 농촌지역에서 지하수의 오염의 주요 지표가 되는 질산성질소 성분을 중점적으로 고려하기 위해 지하수의 질산성질소 오염취약성도를 작성하는 기법을 개발하며, 기존에 지하수의 오염취약성을 분석하기 위해 주로 사용하였던 DRASTIC 기법을 기초로 국내 현실과 실무에 맞는 오염취약성도를 개발한다.

아울러, 효율적인 수질감시 체계를 구축하기 위해 지하수 수질감시농촌의 비점오염 원인 농약, 비료, 산성강우의 지표-토양 내 거동과 지하수내로의 유입 및 강수에 의하여 지표수로 씻기워 나가는 유기적인 관계를 규명한다.

또한 해안지역에서는 해수의 영향에 대해 고려해야 하는데, 시간과 비용이 많이 드는 정밀조사에 앞서, 해수의 영향범위 및 해수영향 범위내의 지하수 관정에서의 적정 양수량 등을 간단하게 모의할 수 있는 틀을 개발하여 본 연구에 활용한다.

마지막으로 '농촌지역 청정지하수 수질감시/관리 시스템'을 효과적으로 운영하기 위해 지하수의 수질을 원격으로 수집할 수 있는 '수질 모니터링 시스템'을 개발하여 장기간, 안정되게 자료를 축적하여 지하수 수질감시/관리에 활용할 수 있는 체계를 확립한다.

제 2 절 연구개발의 필요성

농촌지역의 기반시설은 아직 미흡한 형편으로 '99년 말 하수관거설비율이 특별시, 광역시를 제외한 도지역은 평균 50.4%이고 읍, 면지역은 이보다 훨씬 낮으며, 상수도 보급율은 읍지역이 74%, 면지역이 25.1%이다. 이처럼 상하수도 시설이 열악한 농촌지역에서는 계곡수또는 지하수를 이용하는 간이상수도를 생활용수로 이용하고 있다. 이처럼 지하수는 농촌 생활·농업용수의 주요 수원이지만, 정확한 오염현황 파악 및 관리체계가 미흡하여 오염/확산이 날로 심화되고 있다.

2000년까지 농촌의 농업용수, 생활용수 부족지역에 용수보급차원에서 추진해오던 지하수조사개발사업은 수질오염이 확인된 공에 대한 적절한 대처방안 부재로 인하여 오염원 규명 및 처리대책 수립보다는 단순 폐공처리하고 있으며, 폐공이 점차 증가하는 추세로서 지속적인 용수보급을 위하여는 수계별 지하수 관리체제로의 전환이 불가피하게 되었다.

최근에는 지자체 도입으로 농어촌의 생활 쓰레기매립장을 자체지역내에서 해결해야 하는 문제와 내집 앞은 안된다는 주민의식으로 쓰레기매립장과 축산단지가 청정한 깊은산 계곡으로 내몰리고 있어 수자원 보호정책에 역행하고 있다.

따라서 지하수 오염현황을 조속히 파악하고, 해당 오염원을 규명하며, 이를 토대로 청정지역, 보전지역, 오염지역등 지역별로 등급화시켜 관리하여야 할 필요성이 크게 대두되었으므로 이에 대한 조사방법과 기준설정은 물론, 지하수관련 자료를 효율적이고 체계적으로 지속관리가 가능한 지하수 수질 감시/관리 시스템을 개발 필요성이 절실하다.

농어촌지역에서 농화학물질에 의한 지하수 오염과 이로 인한 농어촌 주민들의 공공 건강에 대한 위해성으로 인해 지하수환경에서의 이들 오염물질의 거동과 운명에 대한 많은 연구들이 진행되어 왔다. 이러한 연구결과들로부터 농화학 오염물질에 의한 지하수의 오염가능성을 평가할 수 있는 여러 가지의 모델들이 개발되었다. 이 모델들은 단순한 선별(screening) 모델(Laskowski et al., 1982; Rao et al., 1985; Wilkerson and Kim, 1986; Jury et al., 1987)로부터 아주 복잡한 수치모델까지 다양하다. 수치모델로는 CMLS(Nofziger and Hornsby, 1986), MOUSE(Steenhuis et al., 1987),

PRZM(Carsel et al., 1984), LEACHM(Wagnet and Hutson, 1987) 등을 들 수 있는데, 이들은 오염물질의 물리적, 화학적, 생물학적 특성 뿐 아니라 비포화대에서의 오염물질의 이동, 지체 및 지속성 등을 모사하는 등, 오염물질과 오염부지의 양쪽 특성을 모두 고려하도록 되어 있다.

이러한 모델들은 지하수에 대한 오염물질의 위해성을 평가하는데 유용하게 사용될 수 있다. 그러나 이러한 모델들을 행정관리들이나 농업전문가들이 일반적으로 사용하기에는 다음과 같은 지식의 부족으로 한계가 있다:

- (1) 수치모델의 전문성,
- (2) 지하매체에서 오염물질의 이동에 대한 전문적 지식,
- (3) 모델의 모사를 위해 필요한 부지 특성 자료,
- (4) 입력자료와 모사결과물의 정확도와 의미를 파악할 수 있는 방법,
- (5) 선정된 모델이 부지 평가의 목적에 적합한 지를 평가할 수 있는 전문성,
- (6) 모델의 결과물을 적절하게 해석할 수 있는 전문성

그러므로 이러한 모델이 행정관리나 정책수립자들에 의하여 기능적으로 활용되기 위해서는 복잡한 과학에서 도출되는 자료, 모델, 지식들을 의사결정 (decision-making) 단계에서 실용화할 수 있는 실질적인 도구로 변환시켜 주는 도구가 필요하다.

미국의 경우, 1984년 - 1990년 사이에 미국 EPA가 미국 전 지역 지하수에 대하여 농약과 질산성질소에 의한 오염현황을 조사한 바 있는데 (표1-1), 이때 적용한 기준은 먹는물 기준(MCL) 또는 건강권고치(HAS)를 적용하였다. 이들 중 질산염과 농약이 동시에 검출되어 기준을 초과한 경우가 전체 조사 개수의 1.2~2.4%로 나타났으며 국내의 지하수 오염의 심각성은 이보다 더욱 심각할 것으로 예상된다. 그러므로 질산성 질소의 오염에 취약한 지역을 구분하고, 오염원과의 상관관계 등에 대해 분석할 필요가 있다.

표 1-1 미국 전지역의 농약 및 질산성질소 조사 결과.

내용	조사수	농약과 질산염 동시 검출	농약만 검출	비고
우물				
급수용우물	94,600	1.2%	0.6%	농약은 EDB, Lindane, Atrazine
농촌우물	10,500,000	2.4%	0.6%	Alachlor, Simazine 및 Aldicarb 등

(출처: U.S. EPA, 1990)

농촌의 비점오염원으로서 크게 농약과 비료, 산성강우를 들 수 있으며 이러한 비점오염원이 지표로부터 토양 내 거동과 지하수내로의 유입 및 강수에 의하여 지표수로 씻겨 나가는 유기적인 관계를 규명함으로써 효율적인 수질오염 감시체제를 구축할 수 있다.

그러나, 표면적인 지표수 오염에 비하여 시각적으로 차단되어 있어 그 오염도가 인지되지 않는 지하수의 오염문제는 매우 심각하므로 실제적이고 효율적이며 경제적인 범국가적 관리대책 수립이 조속히 필요하다. 우리나라에서 지하수는 그 자체를 하나의 수원으로 활용하기도 하지만 지하수위가 지표에서 얕음 심도에 발달되어 하천으로 흘러들어 지표수로 합류되기 때문에 지하수 오염은 곧 지표수 오염과 상호 연관되어 있다. 따라서 토양내에서 비점오염원인 농약, 비료의 거동을 분석하여 토양내, 지하수내로의 유입가능성에 대해 연구할 필요가 있다.

해안가 주민들은 생활용수 및 농업용수의 공급이 해수의 침투로 인하여 많은 영향을 받고 있으며, 해안가에서의 과도한 지하수의 양수는 지하수면의 하강으로 염수 침투를 유발할 수 있다. 특히 서해에는 조석의 영향을 많이 받으므로 염수 침투가 더 많은 농지에 피해를 주고 있다. 따라서, 해수가 침투하는 대수층의 특성과 약은 해안가 지역에서 지하수를 효과적이고 안정적으로 확보하는데 매우 중요한 분야이다.

해안 지역에 관한 염수 침투에 관한 연구는 많은 학자들에 의해 연구되어 왔다. Ghyben과 Hertzberg는 지하수와 염수 경계면의 위치에 대해 간단한 모형을 제안하였으며 (Fetter, 1994), 그 후 여러 연구자들에 의해 실제적인 접근이 있었다 (Bear, 1972; Meisler et al., 1985; Essaid, 1990). 국내에서도 과잉 양수로 인한 염수 침투가 보고되었으나 이를 방지하기 위한 구체적인 접근 방법은 제안되지 않았다 (한정상,

1998; 부성안과 정교철, 2000). 그리고 제주도 지하수 개발에서 해수침투에 대해서 조사된 거의 모든 경우에도 수질조사 등의 기초조사와 Ghyben-Hertzberg가정을 이용한 분석을 하였다 (김천수, 1992; 최순학, 1992; Lee, 1992). 동해안인 포항 앞바다의 조석의 흐름과 바다의 밀도를 고려한 해수의 침투 시뮬레이션도 이루어진바 있다 (Kim et al., 1996).

해안지역의 농업용수 공급을 위해서는 대수층 위치 및 지층에 맞는 적절한 양수량 조절 및 물수지 등의 정확한 분석, 강우에 따른 계절별 농업용수 사용량을 장기 모니터링을 실시하여야 한다. 하지만, 해수의 영향범위와 적정양수량 등을 정확하게 파악하기 위한 정밀분석을 수행하는데에는 많은 비용과 시간이 필요하므로 정밀분석에 앞서 정밀분석의 필요성을 판단하거나, 개괄적인 해수영향 범위를 분석함으로써 행정관리나 정책수립자들의 정책판단 자료로 활용할 수 있는 연구가 필요하다.

농촌지역 지하수 수질 실시간 감시 관측망 구축을 위해 오염원 분포지역의 지하수 유동방향을 고려하여 매시간 변화하는 수위, EC 관측시설을 설치하고 자동관측하고 이러한 자료를 원격지역에서 실시간 GIS 로 분석할 수 있도록 하여 수질오염을 감시하는 체계를 개발할 필요가 있다. 이러한 감시체제는 특히 계절 변화가 뚜렷한 우리나라의 특성상 조사기간이 최소한 2년동안 장기 관측을 필요로 한다.

제 3 절 연구 추진 체계

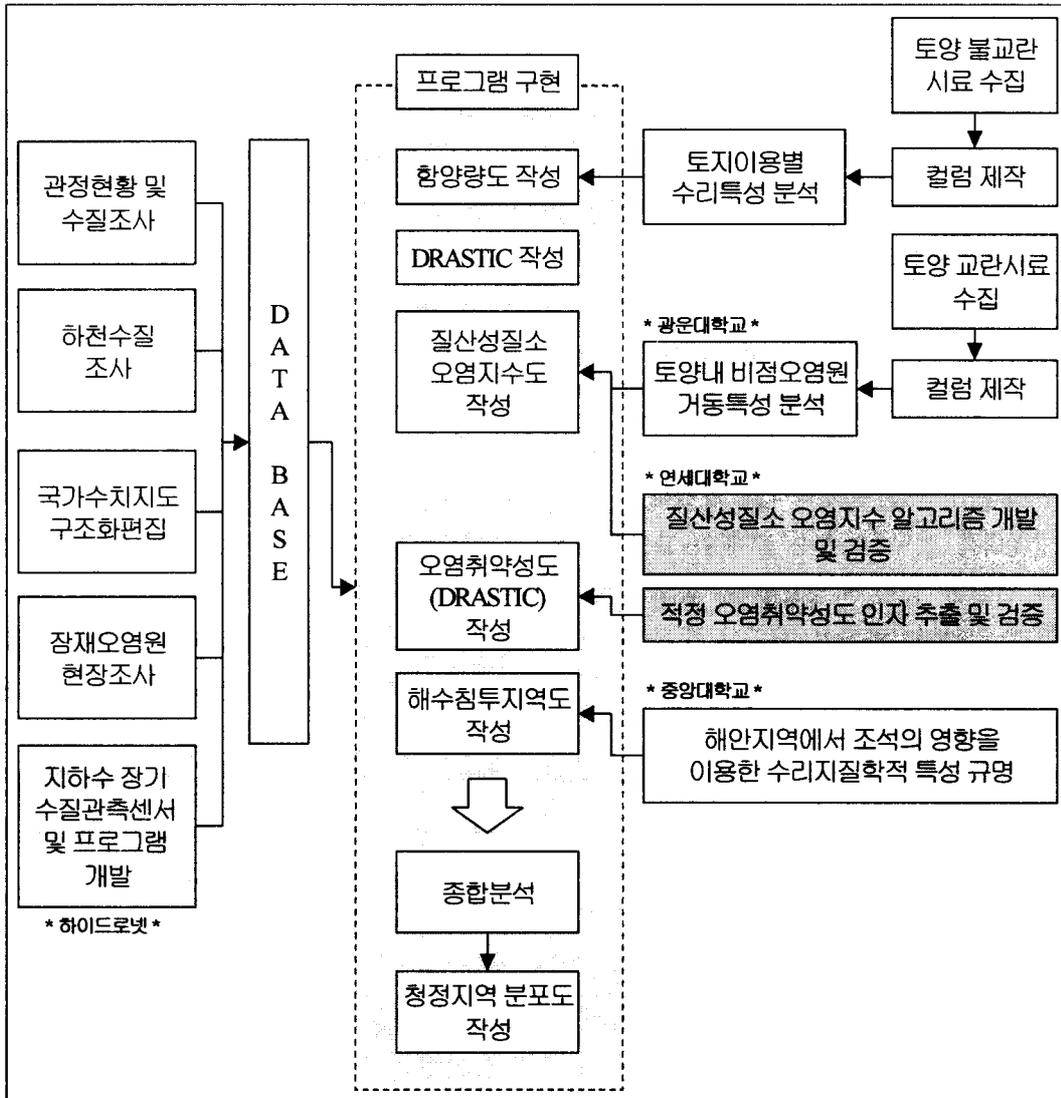


그림 1-2 연구 추진 체계도

제 2 장 국·내외 기술개발 현황

제 1 절 수질오염 현황조사 분야

수질오염 현황조사와 관련한 기술은 첨단기술이 아니고 어떻게 우리나라 지하수 부존특성에 적합한 경제적이고 합리적인 수자원 보호 정책 추진을 위하여 어떤 매질을 대상으로, 어떤 항목을 설정하고, 얼마 주기로 관측할 것인지를 실제 조사 분석과정을 통하여 검토하고 표준화 또는 기준안을 제시하는 것이라 할 수 있다.

조사자료를 GIS DB화하고 이를 분석하는 분야는 응용분야로서 신기술이라 할 수 있으나 프로그램 개발이 필요하여 외국의 기술도입은 필요가 없는 부분이다. 현장조사에서도 비점오염원과 점오염원의 토양 및 지하수와 지표수로의 유동경로 및 체류기간 반응특성 등을 해당지역 토양 및 지하수 특성에 따라 분석 하는 기술로 지하수 유동체계와 환경오염에 대한 전문지식을 필요로 하는 분야로서 체계적이고 정밀한 계획 수립과 추진이 필요하다고 하겠다.

국내외 모두 지표수-지하수-토양오염을 각 전문가별로 별도로 조사 연구하고 있으며 미국은 특히 비점오염원, 점오염원, 특정폐기물, 독성물질, 등 세분화하여 관리하고 있다. 하지만 미국의 경우는 모든 조사자료를 현장자료와 분석 결과를 공개하고 서로가 기술교류가 원만하지만 우리나라는 전문분야별 교류가 적은 편으로 자료교류가 원만치 않은 편이다.

본 연구는 각 분야 전문가와 공동연구로 추진되었으며, 종합분석을 통하여 수문순환계로 연결되어 있는 지표수-지하수-토양 오염현황 조사 및 분석을 종합적으로 체계화하여 수질오염현황 및 감시시스템의 효율을 증대시키고자 계획하였다.

1. 비점오염원

농약 및 화학비료 중 대표적인 환경 유해물질로 취급되는 오염물질들은 토양에 시비 후 토양과 강우유출 등에 의한 수계 중에 장기적으로 잔류성 유기오염물질로 존재하며 생태계를 심각하게 위협하는데 이들 오염물질 들의 특성을 요약하면 다음과 같다.

- 생물학적, 화학적으로 분해가 잘 되지 않고 긴 반감기를 가져 높은 잔류성을 보

인다.

- 먹이사슬을 통해 동식물의 생체내, 특히 지방에 쉽게 축적된다.
- 대기와 해류 등을 통하여 최초 발생지에서 멀리 떨어진 곳까지 장거리 이동하여 인체건강과 환경에 심각한 영향을 나타낸다.

국내의 농약오염사례는 1992년 충북 황강면 상수도 수원지에서 발생한 농약적재 차량의 전복으로 인한 상수원의 오염과 1995년 경북 공검면에서 발생한 농약창고의 화재로 인한 주변 하수구로의 유출사고 등 주로 사고에 의한 농약 대량유출과 그로 인한 주변 하천의 오염발생사건 등이 보고될 뿐, 그 환경적 피해상황의 장기적 모니터링 결과 등의 보고가 이루어진 바 없으며, 장기적 농약살포에 의한 토양 및 지하수의 오염에 의한 인체 및 주변 생태계에 직접적으로 미친 피해에 대한 사례가 보고된 바 없다.

이는 잔류유기오염물질의 오염확산으로 인한 주변 및 원거리의 생체흡수 피해가 가시적으로 단기간에 나타나기 어려우며, 또한 불특정 acceptor의 체계적인 조사가 어렵기 때문인 것으로 판단된다.

2. 국내외의 비점오염원 관리 현황

공공수역으로 유입되는 오염물질은 크게 점오염원과 비점오염원으로 구분되는데, 점오염원에 비하여 비점오염원은 넓은 면적에 분포하는 오염물질로서 강우시 노면배서, 농경지 배출수 등과 같이 불특정한 배출경로를 가지고 있어 정부에서는 배출기준을 정하지 않고 있다.

특히, 오염물질은 강우시 빗물과 함께 유출되기 때문에 일간, 계절간 배출량 변화가 크고, 예측과 정량화가 어려우며, 인위적 조절이 어려운 기상조건, 지질, 지형 등에 영향을 많이 받는 특징을 나타낸다. 그 동안 우리나라에서 수질오염물질에 대한 규제는 주로 하수, 공장폐수 등 점 오염원을 중심으로 관리되어 왔기 때문에 강우시 비점오염원에서 유출되는 대량의 오염물질로 인한 하천 및 호소의 수질은 크게 개선되지 않고 있다.

1993년도 국립환경연구원에서 제출한 우리나라의 비점원 오염에 대한 적절한 관리를 위한 “비점원오염으로부터의 오염물질 유출특성 조사를 위한 방법론적 연구” 보고

서에서는 전체 오염원 중 비점원 오염이 차지하는 기여율이 대개 BOD 12%, T-N 60%, T-P가 약 14%로 인 것으로 보고한 바 있다.

또한 환경부에서는 '비점오염원 조사연구사업(1995년 11월)'을 실시하여 우리나라 국토에서 발생하는 비점오염부하량을 합리적으로 추정하고, 이를 바탕으로 비점오염원물질의 유출특성 및 영향인자 등을 규명하여 비점오염원의 부하원인에 대한 분석 및 토지 이용별 관리방안을 제시한 바 있다.

미국의 경우, 미국환경보호청(EPA)에서 1996년도 전국적인 수질오염의 원인에 대한 조사결과에서 전체 호소면적, 하천연장, 하구면적의 약 40%가 낚시나 수영과 같은 기본적인 수질기준을 달성하지 못하는 것으로 발표하였으며, 그 원인으로서는 호소, 하천, 하구수역의 농업활동 등에 의한 유기화합물등의 오염유출에 따른 비점원오염이 주된 것으로 밝혀져 이의 효과적인 방지와 대책이 수질환경보존사업에서 가장 우선시 되고 있다.

농약이나 화학비료 등과 같은 비점오염원들은 강수에 따라서 표면유출과 지하침투의 형태로 유출되기도 하지만, 논외의 경우는 인위적인 배수에 따른 유출오염도 포함되고 있으며, 특히 우리나라는 강수가 시기적으로 여름철에 집중되어 있고, 동시에 밭은 경사지에 위치하므로 토양유실의 면에서 아주 불리하므로 이들 비점원 오염의 관리는 무엇보다도 중요한 실정이다. 논은 단순히 비점원 오염물질을 배출하는 발생원으로서 뿐만 아니라, 홍수조절, 토양침식 방지, 용수 정화작용 등과 같은 공익적 기능을 가지고 있으므로 비점원오염에 긍정적인 역할도 기대되며, 지형적인 조건으로 보아 항상 밭은 상류, 논은 하류에 위치하고 있어 밭과 논외의 지형 연쇄에 의한 자연정화 기술증진 노력을 현재 외국에서 활발히 시도하고 있다.

3. 점오염원

우리나라에서는 일정기준 이상 오폐수 방류업체로 하여금 수질환경보전법 제 8조와 동 법 시행규칙 제 8조에 의하면, 폐수배출 허용기준을 28개 항목으로 설정하고 있고, 지역별로는 4단계 (청정, 가, 나, 특례지역)로 구분하여 적용하고 있으며, 또한 BOD, COD, SS의 경우는 폐수배출량 2,000m³/일 이상과 미만으로 구분함으로써 지역별, 규모별로 차등 적용하고 있다. 또한 동 법 제 52조의 규정과 하수도법 제 2조 제 5호의 규정에 의하면 폐수배출 허용기준이 개별배출시설에 적용되는 규제기준이라고 볼 때

방류수수질기준이란 하수·폐수 및 분뇨처리시설과 같은 종말처리시설에 적용되는 기준으로 BOD, COD, SS 및 T-N, T-P등 5개 항목을 적용하는 것으로 되어있다.

국내 기술수준은 지표수 분야에서는 많은 연구와 사례조사를 통하여 오염조사기법과 하천 오염현황을 발생 또는 허용부하량 기준으로 도면을 작성하는 기법이 체계화되어 있으나 지하수 분야는 관정위치별로 파이퍼 다이어그램 작성 또는 EC, pH, 특정이온성분 등치선도 작성으로 아직은 체계화된 오염현황도 작성사례가 거의 없다.

본 연구책임자는 '97 ~ 2000년까지 농림기술센터 현장애로과제로 수행한 “농어촌지역 지하수자원의 오염예측도 작성기법에 관한 연구“에서 정 오염원 실제 지하수 오염위험정도를 표준 규격화된 가중치와 등급으로 구분하고 계수화하여 잠재오염원도를 작성하고, 오염현황도 역시 지하수, 토양, 지표수 오염정도를 수질 기준 초과 항목 수와 농도에 따라 가중치와 Rating 방식으로 등급화하여 오염지수를 산정하고 동 오염지수로 수질오염현황도 작성기법을 제시한 바 있다.

동 연구에서는 오염원별 가중치 기준과 발생 오염물질 관리상태 별 등급 기준을 설정한 후 이 두가지 기준값을 곱하여 오염지수를 산출하고 이에 따라 잠재오염원 분포현황도를 작성하고자 하였다. 또한 오염지수별로 5가지 크기의 원모양으로 표시하고, 만약 각 각의 원이 서로 겹치는 경우는 합쳐지도록 하여 해당지역의 총 오염지수를 표시하여 지역별 오염우려의 심각성을 판독할 수 있도록 하였다.

제 2 절 우리나라 지표수-토양-지하수 측정망 운영 현황

1. 농업용수 (지표수) 수질측정망 운영

정부의 음용수나 생활용수 위주의 물관리 정책에 의해 상대적으로 농업용수의 오염이 날로 확산되고 있는 추세이다. 이에 농림부에서는 농업용수 수질관리의 정책적 기초자료 확보 및 전국적인 오염추이 파악을 위해 '90년부터 전국의 주요 농업용수 수리시설을 대상으로 수질중앙측정망을 지정하여 운영해 오고 있다.

2000년 현재 450지점을 지정·관리하고 있으며, 2001년에는 50지점을 추가로 지정하여 500지점을 운영 할 예정이다. 그 밖에 농림부에서는 농업용수 수질개선을 위해 수질개선사업을 실시하고 있다.

○ 조사목적

- 전국 농업용수원(담수호, 저수지, 양수장)에 대한 수질오염 현황과 오염 추이를 종합적으로 파악하고자 함
- 농업용수 수질관리 및 정책수립에 필요한 기초자료를 확보하고자 함

○ 조사회수 및 시기

- 자료조사 및 환경조사 : 연 1회
- 수질조사 : 연 2회(관개기, 비관개기)

○ 조사대상

(단위 : 지점)

구분	계	대구	인천	울산	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남
계	450(436)	4	4	4	52(48)	26	31	68(60)	60	71(69)	72	58
저수지	424	4	4	4	45	26	31	55	59	68	72	56
담수호	21(7)	-	-	-	6(2)	-	-	12(4)	-	3(1)	-	-
양수장	5	-	-	-	1	-	-	1	1	-	-	2

* ()는 시설 개소수임

* 시설관리자의 위치에 따라 구분하였음

○ 조사결과

- 2000년 조사결과 수질등급별 현황

; 농업용수수질기준 초과율 : 130개소(29.8%)

시설수	I	II	III	IV	V	등급외
436개소	-	25	200	81	56	74
(100%)	(-)	(5.7%)	(45.9%)	(18.6%)	(12.8%)	(17.0%)

; 부영양화도에 의한 수질현황

시설수	극빈영양	빈중영양	중영양	중부영양	부영양
431개소	5	23	159	192	52
(100%)	(1.2%)	(5.3%)	(36.9%)	(44.5%)	(12.1%)

; 주요염원 현황

시설수	생활하수	축산폐수	산업폐수	토지유출	가두리양식
436개소	190	118	6	118	4
(100%)	(43.6%)	(27.0%)	(1.4%)	(27.0%)	(1.0%)

2. 토양오염 관측망 운영

환경부에서는 1996.1.6일부터 토양환경보전법이 시행됨에 따라 토양환경보전법 제5조(토양오염도 측정 등)의 규정에 의거 전국 토양에 대한 오염실태 및 추이 등을 종합적으로 파악하여 토양오염의 사전 예방, 오염토양의 정화·복원 등 토양환경 보전정책의 기초자료로 활용하기 위하여 토지용도를 중심으로 설치된 전국망과 오염원을 중심으로 한 지역망으로 이원화하여 토양측정망을 운영하고 있다.

본 토양환경보전법에 의하면 조사항목은 전국망 및 지역망 공히 토양산도(pH), 중

금속 6종(카드뮴, 구리, 비소, 납, 수은, 크롬), 일반항목 5개(유류, 유기인, PCB, 시안, 페놀)등 총 12개 항목에 대하여 조사하되, 토지용도 및 오염원의 종류에 따라 조사항목을 구분하여 실시하고 있다.

동 연구에서는 지하수오염예측도와 관련하여 지구별 토양오염현황을 환경부에서 시행중인 토양측정망 운영자료를 이용하여 토양오염도를 작성하는 기준을 제시하였다.

표 2-1 '99 토양측정망 운영현황.

구 분		전 국 망	지 역 망
설치지점		토지용도별 중심(12개)	토양오염원 중심(16개)
측정주기		매년 1회	매년 1회
조사항목		12개(중금속 6, 일반 5, pH)	12개(중금속 6, 일반 5, PH)
운영실적	계획	1,500지점	3,000지점
	실적	1,499지점	2,996지점
주 관		환경부(환경관리청)	시·도지사

※ 자료출처 : 환경부

토양환경보전법에서는 토양 관측망 운영결과에 따라 우려기준 가, 나 지구와 대책 기준 가, 나지구로 구분 관리하고 있는바 본 지하수오염예측도에서 토양오염현황도는 그러한 4가지 구분 기준을 도면에 표시하고자 한다.

4. 지하수 관측망 운영

환경부의 전국 지하수관측망 자료에 의하면 질산성 질소는 약 760여개의 측정망 중 12.2~17.2% 정도가 기준치(50mg/l)를 초과하였다. 1996년 농촌진흥청 : 전국165개 시설재배지에서 사용하는 지하수수질을 검사한 결과 약 24.2%(40개소) 정도가 기준치를 초과하였다.

1993년~ 1994년 농어촌진흥공사 : 농어촌 소규모 자연부락 167개 마을을 임의추출하여 간이급수시설 수질검사 결과 65%가 음용 부적합 하였다. 1997년 전라북도 : 도

내 아파트 단지와 마을 3,222개소의 지하수를 대상으로 수질검사한 결과 37.3%(1,202개소)가 음용수 수질기준에 부적합 하였다.

표 2-2 전국 지하수 수질측정망의 연도별 수질분석결과중 먹는물 수질기준을 초과하는 대표 성분과 초과비율. [초과개수/비율(%) : 환경부]

연도	내용	총갯수	질산성질소	COD		TCE	PCE
				2급수(1-3)	3급수(3이상)		
'95	1 차	762	94 12.3	-	-	14 1.8	2 0.3
	2 차	762	105 13.8	-	-	16 2.1	8 1.05
'96	1 차	769	132 17.2	269 35	66 7.6	21 2.7	6 0.8
	2 차	763	103 13.5	268 35.1	70 9.2	13 1.7	2 0.3
'97	1 차	752	102 13.6	317 42.1	45 6.0	19 2.5	9 1.2
	2 차	746	91 12.2	352 47.2	59 7.9	24 3.2	7 1.0
초과범위(%)			12.2~17.2	35.0~47.1	6.0~9.2	1.7~3.2	0.3~1.2

지자체 도입이후 급속한 농촌 경제개발로 현재 추진중인 지하수 기본조사가 완료된 연후에 지하수 수질 보전관리 계획을 수립하려 한다면 오염이 확산되고 시기적으로 늦다. → 수질보전관리 대책이 시급하다.

기초조사가 미흡한 현시점에서 우선 표준화된 조사감시기법으로 농촌지역 청정지역 지하수 수질감시/ 관리시스템 구축이 시급하다.

수문학상으로 지하수는 지표수와 동일 순환계에 있으므로 지표수와 지하수를 연계 하여 용수구역별로 관리할 수 있는 D/B 시스템을 구축하고 오염현황과 잠재오염원을 조사하여 그 결과에 따라 수질감시/관리시스템을 구축 운영함으로써 실시간 수질감시

체제를 확립한다.

용수구역내 지하수를 오염현황에 따라 등급화하여 관리함으로써 향후 개발 적지와 수질보전구역을 구분 관리하여 농촌용수 공급공급체계의 효율성과 경제성을 높이고 지자체 및 행정기관에 보급하여 정책결정수단으로 활용토록 한다.

미국이나 캐나다의 경우는 지하수 대수층의 구조와 특성에 관한 지하수 수문지질도 조사사업과 지하수 오염취약성도 조사사업, 농약과 비료에 의한 지하수 오염현황 조사사업, 지하수 오염조사사업, 잠재오염원조사사업이 완료된 상태로 특정오염원 즉, 저장탱크, 세탁소, 주유소, 군수공장, 청정지하수 부존지역 등 점오염원별로 감시가 필요한 지역에 소유주가 자체 지하수 수질감시망을 설치 운영토록 권장하고 있으며 수질관측 자료는 연방환경청 또는 지자체 수질담당에 제출토록 하고 있으며 이를 이행치 않을 경우 국가에서 수질관측망을 설치 운영하고 소유주에게 소요예산 및 정화처리 비용까지도 부담시키고 있다.

우리나라는 각종 지하수 조사사업이 완료되지 않은 상태로 아직은 지방정부나 관정 또는 토지 소유주가 경제적인 부담을 할 수 있을 정도가 아니며 수질감시/관리시스템 사업이 시작된지도 10여년이 지났으나 아직은 해당지점별 자료관리 정도의 수준으로서 체계적인 용수구역별 수질감시망은 거의 전무한 상태라 할 수 있다.

본 연구에서는 용수구역별 대수층 관리를 위한 지표수-토양-지하수 종합적인 연계 수문분석을 토대로한 지하수 수질감시/관리시스템을 개발하고자 한다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 업무분석

1. 시스템에서 필요한 기능

본 연구에서는 현재 농촌지역의 지하수의 수질상황을 파악하여, 청정지역, 오염가능 지역, 오염지역으로 구분하여 관리할 수 있는 시스템을 개발하고자 한다. 이를 위해서는 관정의 자료를 이용해 수질을 분석할 수 있는 기능과 각종 인자들을 이용해 지하수의 수질과 주변의 점·비점오염원과의 관계를 규명함으로써 지하수 관리 방안을 도출할 수 있는 기능들을 필요로 한다. 이러한 관점에서 본 연구에서 필요로 하는 시스템의 기능들은 다음과 같다.

- 관정수질분포도 작성 기능
- DRASTIC Map 작성 기능
- 지하수 함양량도 작성 기능
- 오염 발생부하량 및 발생량도 작성 기능
- 질산성지소 오염지수도 작성 기능
- 해수침투지역도 작성 기능
- 청정지역 분포도 작성 기능
- 지하수관리등급에 의한 시설입지 타당성 분석
- 기타 시·군 관계자를 위한 편리 기능

2. 시스템에서 필요한 기능별 환경분석 및 알고리즘 작성

가. 관정수질분포도 작성 기능

현재의 지하수 수질현황을 파악하기 위한 기능으로, 관정의 일반정보와 정밀 수질 분석 결과와 현장 수질분석 결과 그리고 본 연구에서 개발된 자동관측망 자료 등의 자료를 이용해 지하수의 수질현황을 파악하는데 필요한 도면들을 생성한다.

관정수질분포도 작성 기능에서는 수질항목별 기준초과 관정개수를 분석할 수 있어

서, 분석대상 지역에서 관정들이 주로 어떠한 성분에 의해 수질이 오염되었는지를 파악할 수 있어야 한다. 그럼으로써 공무원, 정책분석가들이 지하수 수질정책에 있어 우선 고려해야 하는 수질항목을 선별할 수 있도록 도움을 줄 수 있어야 한다. 또한 관정별로 기준치를 초과한 항목의 수를 제공함으로써, 분석대상 지역에서 어느 관정의 수질이 상대적으로 가장 악화되어 있는지를 파악할 수 있도록 하여야 개발하여야 한다. 관정별로 파악된 초과 항목수는 분포도로 표현되어 공간적으로 어느 지역에서 주로 초과 항목들이 많이 발생하였는지를 보여주어야 하며, 항목별로 수질분포도를 작성하여 지역적인 수질분포를 가늠할 수 있어야 한다. 아울러 항목별 수질초과 여부를 공간적으로 파악하기 위해 관정별 수질초과 여부를 분포도로 표현할 수 있는 기능을 개발하여야 한다. 마지막으로 관심지역의 관정에 대한 상세한 수질변화 양상을 파악하기 위해, 시간에 따른 수질변화를 지하수위, 강우량 자료와 비교하여 볼 수 있는 틀을 개발하여야 한다.

위의 모든 기능의 분석단계에서는 지하수의 특성을 고려하기 위해, 암반, 충적 등 관정의 형태와 건기, 우기, 연월일 등 자료수집 시기 그리고 먹는물, 생활용수, 공업용수 기준 등 사용목적별 수질기준 등이 종합적으로 고려될 수 있도록 기능을 설계하여야 한다.

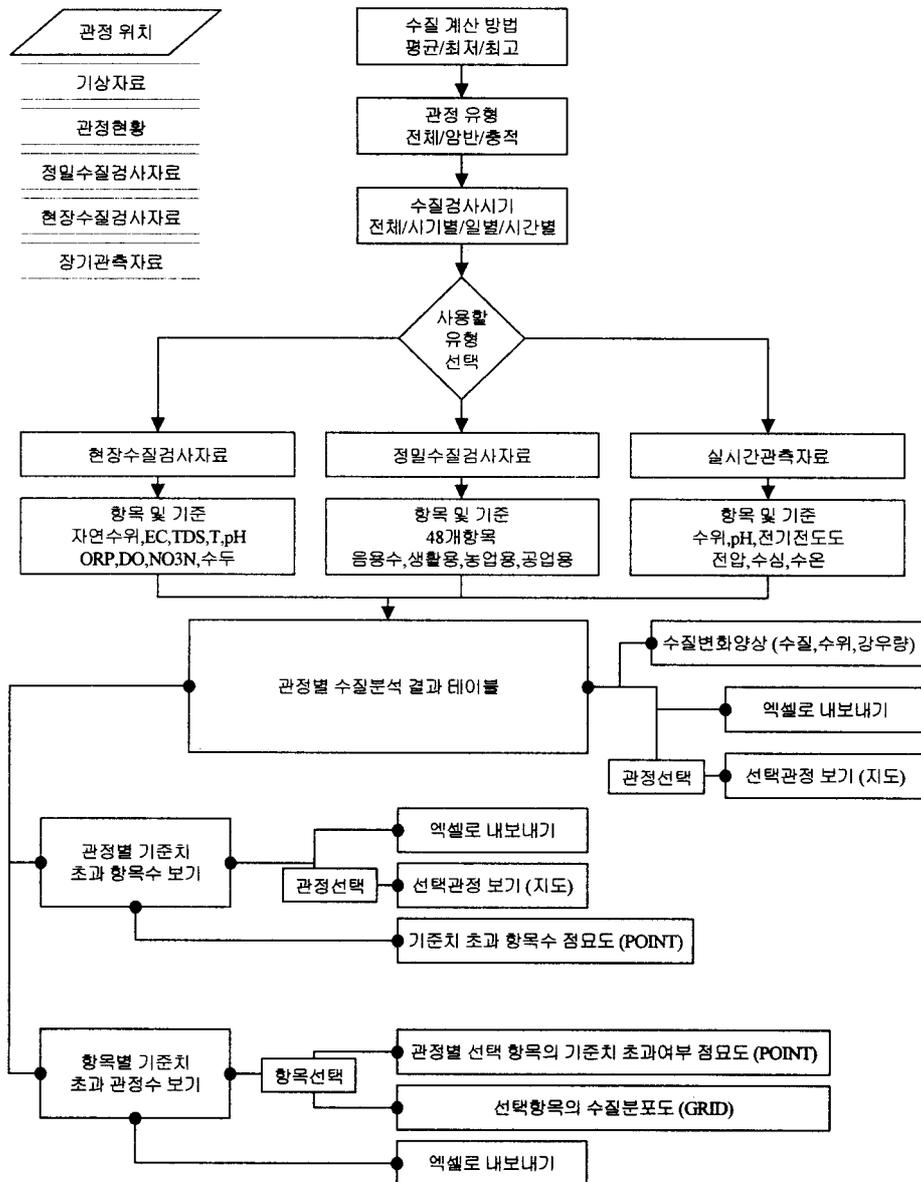


그림 3-1 관정수질분포도 작성 알고리즘

나. DRASTIC Map 작성 기능

본 연구에서는 지하수의 수질 분석결과를 잠재오염원들과 연관성이 있는지 살펴보기 위해, 지하수 오염가능성도를 작성하여 활용한다. 지하수 수질이 특정 기준을 초과하거나 현저히 나쁘게 나왔을 경우, 오염취약성과 비교하여 분석한다. 지하수 오염가능성 평가기법으로 DRASTIC, AQUIPRO, SEEPAGE, PESTANS 등이 있는데, 본 연구에서는 미국환경청(EPA)과 미국 지하수협회(NGWA)의 전신인 미국정화협회(NWWA)에 의해 개발되어 현재 널리 사용되고 있는 DRASTIC 기법을 기본 오염취약성 평가기법으로 선정하였다.

DRASTIC모델은 7가지 인자 (지하수위 깊이, 순수 충전량, 대수층 매질, 토양 매질, 지형경사율, 불포화대 매질, 대수층의 수리전도도)를 사용하며, 다음과 같은 몇 가지 기본 가정에 근거를 두고 있다.

- ① 오염원은 지표에 위치한다.
- ② 오염물질의 지하유입은 강수량에 의존한다.
- ③ 오염물질은 물과 같은 유동성을 갖는다.
- ④ 평가지역은 120,000평(100 에이커) 이상이어야 한다.

표 3-1 DRASTIC 기법에 의한 지하수 오염취약성도 작성 진단항목

지하수 오염 영향 인자	일반지하수가 중치	농약 및 살충제 살포지역 가중치
지하수위 (Depth to Water)	5	5
지하수함양율 (Net Recharge)	4	4
대수층 매질 (Aquifer Media)	3	3
지표토양 구성매질 (Soil Media)	2	5
지형 경사 (Topography)	1	3
불포화대 영향 (Impact of the Vadose Zone Media)	5	4
수리전도도 (Hydraulic Conductivity)	3	2

지하수 오염 가능성을 의미하는 DRASTIC 지수는 각 인자의 등급과 가중치를 곱한 숫자의 합으로서, 다음과 같이 구해진다:

$$\text{DRASTIC지수} = \text{DrDw} + \text{RrRw} + \text{ArSw} + \text{SrSw} + \text{TrTw} + \text{IrIw} + \text{CrCw}$$

(r : 등급(rating), w : 가중치(weight))

일반적인 평가방법에 의한 DRASTIC 모델 지수는 최고 226, 최저 23이고 농약을 사용하는 농업지역에 대한 평가방법에 있어서의 DRASTIC 모델 지수는 최고 256, 최저 23이다. 일단 DRASTIC 모델의 지수가 결정되면, 지하수 오염에 상대적으로 더 민감한 지역을 확인하는 것이 가능하다. DRASTIC 모델의 지수가 높을수록 지하수의 오염 가능성이 상대적으로 크고, 반대로 지수가 낮을수록 오염 가능성이 상대적으로 적은 것을 의미하며, 평가결과는 상대적인 평가만을 의미하지 절대평가를 지시하는 것은 아니다.

표 3-2 DRASTIC 모델 지수의 일반적 평가.

일반지하수 오염취약 지수 범위	65 - 223
비료 및 농약 오염취약 지수 범위	88 - 251
오염취약지구	일반적인 분류 지수 > 150

1) 지하수위(D)

표 3-3 지하수위의 등급 기준

분석 대상 인자	가중치	구분	등급	지수
지하수위 (Depth to Water)	5	0 - 1.52m	10	50
		1.5 - 4.57m	9	45
		4.57 - 9.14m	7	35
		9.14 - 15.24m	5	25
		15.24 - 22.86m	3	15
		22.86 - 30.48m	2	10
		30.48m 이상	1	5

오염취약성 분류 기준은 오염원 지표면에 위치한다고 가정하고 지하수위가 깊을수록 지표면의 오염원으로부터 대수층까지의 거리가 멀어지므로 오염 위험성이 작은 것으로 분류하게 된다. 표토와 충적층의 특성은 별도로 고려하고 여기서는 지하수위 즉 오염물질의 이동거리에 따른 오염확산 위험 가능성을 분석하며 자유면 충적 대수층에서 좀더 적합한 분석기법이라 할 수 있다.

지하수위는 오염물질이 지표로부터 대수층까지 이동하는 거리와 시간을 좌우하게 되는 인자이다. 오염물질이 이동하는 시간은 지층 매질과의 접촉하는 시간을 뜻하기 때문에 지하수 오염위험성 측면에서 지하수면의 깊이는 단순한 산술적인 깊이뿐 아니라 토양에서부터 대수층 심도까지의 지층 매질의 수리전도도에도 크게 영향을 받는다. 지하수위가 특히 중시되는 이유는 토양층을 이동하는 동안 오염성분은 대기중의 산소에 의하여 산화작용을 받기 때문이다. 일반적으로 지하수위가 깊어 오염물질이 이동하는 시간이 길어지게 되면 산화작용 등으로 오염물질이 자연정화되는 반응시간이 길어진다고 볼 수 있다.

지하수 오염취약성도 작성기법에서 지하수위 깊이에 따라 등급을 정한 기준은 오염 대수층에서 깊이에 따라 오염정도가 달라지는 실제 측정자료들을 토대로 깊이별로 분류하여 설정하였다.

일반적으로 피압대수층은 상부에 불투수층이 분포하기 때문에 자유면 대수층보다도

훨씬 오염위협으로부터 강하다고 볼 수 있다. 피압대수층에서는 지하수위를 상부 불투수층 하단 심도까지를 간주하면 된다. 왜냐하면 본 오염취약성도에서의 지하수위는 실제 지하수위라기 보다는 오염물질이 이동해야 하는 지표로부터 대수층 상단까지의 심도를 뜻하는 것으로 지하수 수두압을 뜻하는 것은 아니기 때문이다.

2) 함양률(R)

표 3-4 지하수함양율의 등급 기준

분석 대상 인자	가중치	구분	등급	지수
지하수 함양율 (Net Recharge)	4	0 - 5.08 Cm	1	4
		5.08 - 10.16 Cm	3	12
		10.16 - 17.78 Cm	6	24
		17.78 - 25.40 Cm	8	32
		25.4 Cm 이상	9	36

지하수의 기원은 당초 강수기원이라고 할 수 있는데, 강수가 지표에 떨어져 토양층을 통하여 지하대수층으로 침출되어 지하수를 이루게 된다. 강수의 지하수함양량은 지표 단위면적당 표토를 통하여 대수층까지 침출되는 강수량을 뜻한다. 지표의 오염원으로부터 용해된 오염물질은 이러한 강수에 녹아 지하수위까지는 수직 연직방향으로 이동하게 되며 지하수위에 도달하면 거의 수평방향으로 오염물질을 이동시키게 된다. 따라서 불포화대와 포화대 구간에서는 함양되는 강수량의 많고 적음에 따라 용해된 오염물질의 확산 유동되는 정도가 좌우된다고 볼 수 있다. 이러한 영향으로 강수의 함양량은 오염물질을 용해형태로 또는 고체 부유물질로 대수층까지 이동시키는 운반 역할을 한다고 볼 수 있으며 이러한 이유로 함양량이 많을수록 오염 위험성도 커진다고 볼 수 있다.

이처럼 함양량이 증가할수록 오염물질의 유입량도 비례적으로 증가 하다가 함양량이 일정기준 이상이 되면 반대로 감소하게 되는데, 이는 많은 물이 함양되면서 오염물질 농도를 희석하는 현상을 유발하는 정도의 함양율을 뜻하며 이 시점부터는 함양량이 증가할수록 오염물질의 농도는 감소하게 된다. 본 DRASTIC 기법을 개발하는

과정에서 이처럼 일정 함양량까지는 오염물질의 대수층 내 유입량도 함께 증가하다가 일정량 이상부터는 오염물질이 회석현상으로 인하여 오염속도가 줄어드는 현상을 확인할 수 있었다. 하지만 실제 현장자료를 여러 함양량별로 취득 분석하여 회석현상을 함양량 별로 체계적인 등급으로 규명하지는 못하였다.

특히 강수의 함양량이란 지표에 떨어진 강수량 중에서 지하로 침출되어 지하수위까지 도달하는 지하수량을 말한다. 강우가 지상에 도달하기까지 낙하 도중의 증발, 식물 등에 의한 차단 등에 의해 강우 일부는 손실되고 나머지는 지상에 도달하게 된다. 지상에 도달한 강우량의 일부는 흙의 표면을 통하여 침투하고, 그 초과분은 흙의 표면으로 흘러 직접유출되어 하천을 형성하게 된다. 함양량은 연간 평균량은 뜻하며 지역별 변화량이나 강수 빈도와 강도와 강우일수는 고려하지 않는다. 강수의 함양량 단위는 Inch 혹은 m 단위를 사용할 수 있다. 일반적으로 충전량이 크면 클수록 지하수 오염 가능성은 커진다.

앞에서 언급한 바와 같이 DRASTIC 기법에서 여러 가지 인자중 함양율이 지역별 구분없이 가장 포괄적인 값을 사용하기 때문에 등급범위도 크게 나뉘어져 있으며 통계자료나 조사지역내 기상자료를 이용 수문분석기법으로 산출하여 일괄적으로 적용하면 된다.

순수충전량을 분석하기 위해서는 지하수 관측자료를 활용하는 방법, 수문곡선을 이용한 분석, SCS (Soil Conservation Service) 방법, 지표 구성물질의 수리특성을 분석하는 방법 및 물수지분석법 등이 있다. 그러나 순수 충전량에 대한 구체적이고 보다 정확한 평가를 하기 위해서는 첫째, 충전량이 토지이용 현황, 경사, 토양 침식율 등의 다른 인자에 의해서도 영향을 받기 때문에 이들 요소들을 모두 고려하는 물수지 방정식 (water balance equation) 모델링 기법을 이용하는 것이 더욱 정확하다. 둘째, 관계용수 (irrigation), 인위적인 충전량 (artificial recharge), 쓰레기 침출수 (waste water) 등을 적용해야 하고 셋째, 충전량 발생 분포, 밀도, 지속기간 등을 고려해야 한다.

일반적으로 실측자료 없이 개괄적인 수문분석기법으로 함양율을 산출코자 할 경우는:

$$\text{함양량} = \text{강수량} - \text{지표유출량} - \text{증발산량} \quad (3-1)$$

식에 의거 계산한다. 이처럼 수문통계 자료를 이용하고자 하는 경우에는 각 항목 산출에 특별한 주의가 요구된다. 왜냐하면 함양량은 토양의 함수율, 지형 경사도, 토지이용도 등에 의하여 크게 좌우되기 때문이다. 따라서 이러한 영향요소까지도 고려할 수 있는 정밀 수문분석기법으로 산출된 자료를 이용하는 것이 바람직하다.

지하수 함양량은 자유면대수층인 경우와 피압대수층의 경우로 각 각 다르게 적용해야 한다. 왜냐하면 자유면 대수층으로 함양되는 강수는 그대로 지하 대수층까지 도달할 수 있지만, 피압대수층인 경우는 피압면 상부 불투수층 때문에 함양되는 강수는 극히 일부만이 대수층까지 도달하기 때문이다. 또한 피압대수층의 함양지역은 해당 지역에서 멀리 떨어져 있는 경우가 대부분이며 피압대수층 상부의 불투수층이 지역에 따라서 반피압층 또는 일부지역에서는 자유면 대수층과 연결되어 있는 형태도 있으므로 지역별 대수층의 상태를 고려하여 함양을 적용에 신중하도록 해야 한다.

강수에 의한 함양량 이외에도 농업용 관개용수, 인공함양, 하수도로부터의 함양량도 고려하도록 한다. 이러한 요소들도 연간 함양량으로 산출하면 비교적 많은 량이 된다. 예를 들어 논밭의 관개용수도 연간으로 산출하면 평균 관개지역에 대하여 10.1 cm 정도로 조사된 바 있다. 특히 비료나 살충제에 의한 오염취약성 분석시에는 관개용수에 의한 함양량이 가장 중요하다고 할 수 있다. 따라서 취약성도를 작성하고자 하는 기술자는 이러한 현장에서의 여러가지 수문학적 영향 요소들을 고려할 수 있는 전문기술자라야 한다.

지하수 수문학적으로 함양지역과 용출지역은 별도로 고려해야 한다. 왜냐하면 함양 지역에서는 통상적으로 강수가 지표로부터 지하수위가 있는 곳까지 위에서 아래로 이동하지만, 샘이나 용출하천에서는 지하수가 아래에서 피압되어 위로 흐를수도 있기 때문이다.

함양지역과 용출지역에서 지하수 동수구배는 급변하는 지역이라 할 수 있으며, 주변관정에서 양수를 하고 있는 경우에도 동수구배는 급경사일 수 있다. 피압된 수위가 매우 높은 지역에서는 지하수위가 역류되는 현상도 간혹 있으며 이러한 경우 취약성 분석 전문가는 함양율에 의한 가중치를 작게 잡아야 한다. 동수구배가 작은 지역에서는 주변관정에서의 양수영향에 따라 동수구배가 급변하게 되므로 이러한 지역에 대한 함양율에 대한 가중치 설정시에도 이러한 수문학적 유동을 적절히 고려하여 분석할 수 있어야 한다.

3) 대수층 매질특성 (A)

표 3-5 대수층 매질의 등급 기준

분석 대상 인자	가중치	구'분	등급	지수
대수층 매질 (Aquifer Media)	3	괴상 세일	1 - 3	3 - 9
		변성/화강암	2 - 5	6 - 15
		풍화된 변성/화강암	3 - 5	9 - 15
		빙퇴석류	4 - 6	12- 18
		층상사암, 석회암 세일복합체	5 - 9	15- 27
		괴상 사암	4 - 9	12- 27
		모래 자갈(집괴암)	4 - 9	12- 27
		현무암	2 - 10	6 - 30
		Karst 석회암지대	9 - 10	27- 30

특히 거리는 유동시간에 영향을 미치게 되는데 유동시간은 자연정화 작용 즉, 흡착, 화학반응, 확산작용 등에 영향을 미치게 된다. 이러한 관점에서 대수층 매질 특성을 오염물질의 확산 가능성 판단자료로 활용하게 된다.

대수층 매질 특성이 주는 또 다른 영향으로 지표에서 오염원과 접촉하는 부위의 암석 특성에 따라 오염물질이 대수층 내로 유입 오염되는 정도를 크게 좌우하게 된다. 오염원으로부터 오염물질이 침출되어 지하수로 유입하는 과정은 지하수 유로가 되는 단층과 같은 균열부나 서로 연결된 공극율에 따라 달라지게 된다. 일반적으로 대수층 매질 입자 크기가 크면 클수록 또한 공극율이 크면 클수록 지하수 오염확산에 대하여 크게 취약하고 반면에 대수층내에서 자연 정화 능력이 약한 것으로 알려져 있다.

본 오염취약성도에 적용하기 위하여 대수층 매질을 다음과 같이 분류하였다. 처음에 기술된 암석이 오염에 가장 강한 암석이며 후자로 갈수록 오염에 취약한 매질이다.

- (1) 괴상 셰일 : 단위층 두께가 두터운 셰일, 이암, 이질암과 같이 거의 지하수를 유통시킬 수 있는 균열이 없어 오염위험도가 낮은 암석류. 오염 취약성은 균열 정도에 의해 좌우된다.
- (2) 변성암/화성암 : 고결된 변성암이나 화성암 으로 이루어진 기반암으로서 매우 낮은 1차 공극율을 갖고 있으며 지하수 유동은 주로 암반내 균열부를 통하여만 이루어지는 암반. 일반적으로 비양수량이 매우 낮으며 오염취약성은 자연히 균열부 발달정도에 따라 비례한다.
- (3) 풍화된 변성암/화성암 : 주로 고결된 기반암으로 부터 풍화 생성된 미고결 Regolith 혹은 Saprolite층으로 1 차공극을 갖고 있는 층이다. 오염 취약성은 점토성분의 함량에 따라 달라 지게 되는데 점토 성분 함량이 많을수록 오염 취약 성은 낮다.
- (4) 빙퇴석 : 미고결 또는 반고결층으로 자갈, 모래, 점토질 입자, 이암질 입자로 구성되었으며 분급정도가 낮으며 층으로 구별되지도 않은 층으로 매우 낮은 수리전도도를 갖고 있으며 비양수량도 적다. 비록 낮은 수리전도도를 갖고 있음에도 빙퇴석 지대에 개발한 관정의 지하수 위는 매우 낮은경우가 많으며 지하수 오염물질에 의한 오염도 쉽게 일어나는 특성이 있다. 빙퇴석의 균열 발달정도도 역시 오염확산에 영향을 준다.
- (5) 층상 사암, 석회암, 셰일 : 통상 1차 공극이 발달한 얇은 퇴적암으로 여러겹 반복된 암석이다. 균열 발달정도가 오염확산에 영 향을 주는 요소이다
- (6) 괴상 사암 : 고결된 사암으로 구성된 기반암으로 1, 2차 공극이 모두 발달되 어 있으며 층상사암이나 석회암 층보다 두터운 것이 일반적이다. 오염취약성은 1차 공극과 균열 발달 정도에 따라 다르다.
- (7) 괴상 석회암 : 고결된 석회암 또는 백운암으로 구성된 기반암으로 층상 사암 이나 층상 석회암, 셰일보다도 두터운 특징을 가지고 있다. 오 염취약성은 균열부 발달 정도와 석회암 공동 정도에 따라 다

르다.

- (8) 자갈, 사층 : 자갈이나 모래입자가 혼합된 미고결층로 세립 점토질 입자 함량이 다양하게 나타난다. 자갈과 모래 입자가 대부분이고 점토질 입자 함량이 적은 것을 깨끗 (“Clean”) 하다고 표현한다. 일반적으로 깨끗할수록 또한 구성입자 크기가 클수록 오염에 취약하다.
- (9) 현무암 : 고결된 화산암으로 구성된 기반암으로 성층면이 발달되어 있고 균열부와 다공상 구조가 발달되어 있다. 용암 유동형태에 따르는 균열부의 연결정도에 따라 오염취약성이 다르다.
- (10) Karst 지형 석회암 : 고결된 석회암질 기반암 지대로 곳곳에 석회암 동굴이 발달되어 있는 지형이다. 이러한 지형은 석회암 지대에서 특징적으로 나타난다.

대수층 오염취약성 분석 전문가는 조사지역내 지역별로 대수층이 여러개인 경우 각 대수층 별로 분석해야 하며, 다층 구조의 대수층인 경우는 어떤 층을 대상으로 분석할 것인지를 결정해야 한다. 이 경우 대개는 상부 대수층을 대상으로 한다. DRASTIC 에서 대수층 매질 등급은 어떤 암질에 대해 정해진 한가지 수치가 결정된 것이 아니라 일정 범위를 부여하고 있으며, 이는 분석전문가가 대수층의 현장 상태에 따라 판단하여 해당 범위내에서 적절한 등급 수치를 부여해야 한다. 대수층에 관한 자료가 없는 경우에는 가장 일반적인 값을 부여할 수도 있다. 분석전문가는 해당 범위 내에서 등급을 부여할 경우 대수층 매질특성에 따른 오염물질 유입통로 역할, 즉 고결 암반층일 경우에는 균열대의 분포상태와 모양을 고려하여 등급을 결정하도록 하고 퇴적층이나 퇴적암일 경우는 구성입자의 크기와 분급도, 미립물질의 함유정도에 따라 전문가가 판단하여 등급을 부여해야 한다.

4) 지표토양 구성물질(S)

일반적으로 토양에서의 오염가능성은 ① 점토의 유형, ② 점토의 팽창/수축 정도, ③ 토양의 입자 등에 따라서 많은 영향을 받는다. 점토의 팽창/수축도가 적으면 적을수록, 또한 입자크기가 작을수록 오염가능성은 적어진다.

일반적으로 토양 중의 유기물질 (예: undecayed plant, animal tissue, charcoal and

vairous humic compounds)의 양은 특히 농약 (살충제)의 감소에 중요한 요소로 작용하고 있고, 유기물질의 양은 심도가 깊어질수록 감소한다. 토양 내 유기물질은 주로 표토에 많으며 심도가 깊어지면 급격히 함량이 줄어든다. 토양분포에 대한 자료는 토양도에 자세하게 조사되어 있으므로 이를 참조하면 된다. 또한 토양 매질의 두께, 입자크기, 토양의 pH, 토양의 투과율, 액성 한계, 탄성 지수 등도 고려해야 한다.

표 3-6 토양 매질의 등급 기준

분석 대상 인자	가중치	구 분	등급	지수
지표토양 구성매질 (Soil Media)	2	표피층 두께 25 Cm 미만	10	20
		자갈층	10	20
		모래층	9	18
		토탄층	8	16
		수축성, 응집성 점토층	7	14
		사질양토	6	12
		양토	5	10
		점토질 양토	4	8
		이질 양토	3	6
		Muck	2	4
		저수축, 저응집성 점토	1	2

현재 DRASTIC 모델은 유기물 함량을 고려하지 않고 있지만 보다 좋은 평가를 위해서는 이러한 정보를 사용할 수 있다.

지하수오염과 관련하여 토양을 구분하면 다음과 같다.

- (1) 표피층 : 분포된 토양층 두께가 얇으면 오염물질에 대한 자연정화능력이 거의 없어 지하수 오염위험도는 상당히 높다. 토양분포가 얇다는 기준은 두께 25cm 미만으로 정하였다.
- (2) 자갈층 : 크기 2 mm 이상 모래입자에서 자갈까지로 구성되어 있으며 점토 입자도 포함되어 있으나 투수율은 자갈층의 좌우되어 상당히 높고 오염위험이 매우 높은 것으로 분류된다.

- (3) 모래층 : 모래입자 크기는 1/16~2 mm까지로 구성되어 있으며 점토 입자가 거의 없어 투수율이 높고 오염위험이 큰 것으로 분류된다.
- (4) 토탄층 : 퇴적된 과거 식물층이 일부 석탄화 변성과정을 거쳐 식물의 형태 흔적이 남아있는 토양으로서 유기물질이 많아 자연정화능력이 크지만 공극율과 투수율이 높아 오염위험이 큰 것으로 분류된다.
- (5) 수축성, 응집성 점토층 : 몬몰리노나이트나 스멕타이트질 점토로서 물을 흡수할 경우 부피가 팽창하는 층구조를 갖고 있다. 건조시 수축되어 생긴 균열이 습윤되면 팽창하여 다시 막히게 되지만 건조시 균열을 통하여 오염물질이 지하로 침출된다.
- (6) 사질양토 : 토양분류 삼각 다이어그램에서 보면 25~50%의 실트, 7~27%의 점토질, 0~50%의 모래성분을 갖는 토양으로 분류된다. 오염위험은 아직은 적은편이라 할 수 있다.
- (7) 양토 : 토양분류 삼각 다이어그램에서 보면 25~50%의 실트, 7~27%의 점토질, 0~50%의 모래성분을 갖는 토양으로 분류된다. 오염위험은 아직은 적은편이라 할 수 있다.
- (8) 점토질 양토 : 토양분류 삼각 다이어그램에서 보면 50~85%의 실트, 12~27%의 점토질, 0~50%의 모래성분을 갖는 토양으로 분류된다. 오염위험은 비교적 적은편이라 할 수 있다.
- (9) Muck : 미립의 검은색 유기물질 집합체로 일반적으로 광물질과 재성분이 많고 약간의 부패하다 남은 식물 조직이 남아있으며 투수율이 상당히 낮다. 유기물질 함량에 따라 오염위험도가 좌우된다고 볼 수 있다.
- (10) 이질 양토 : 토양분류 삼각다이어그램에서 보면 15~55%의 실트, 27~40%의 점토질, 20~45%의 모래성분을 갖는 토양으로 분류된다. 점토 성분이 많아 오염위험은 상당히 적은편이라 할 수 있다.
- (11) 저수축, 저응집성 점토 : 일라이트나 카올리나이트 질 점토로서 물을 흡수할 경우 부피가 팽창이나 건조시 수축되는 비율이 작아 결과적으로 투수율이 작아 오염위험이 매우 낮은 점토

오염 취약성도에서 분석되는 다른 인자도 마찬가지로이지만 토양특성별 등급을 결정할 때 상기의 토양명 구분에 따라 그대로 기계적인 적용을 하는 것이 아니라 토양층별로 제시된 침출율 즉, 오염물질이 토양을 통하여 대수층 내 지하수까지 침출되는 정도를 상대적인 비교 값으로 결정하여야 한다.

5) 지형경사(T)

표 3-7 지형경사의 등급 기준

분석 대상 인자	가중치	구 분	등급	지수
지형 경사 (Topography)	1	0 - 2	10	10
		2 - 6	9	9
		6 - 12	5	5
		12 - 18	3	3
		18 이상	1	1

지형경사는 해당지역 토양심도까지도 영향을 미치고 따라서 오염물질 자연정화능력에도 영향을 미친다. 어떤 지역의 지형경사를 단순화시켜 고려하면 동 지역의 지하수 유속과 유향도 대략 짐작할 수 있다. 경사가 심한 사면은 지하수의 속도가 빠르다.

경사도 0~2 % 의 사면경사 범위지역에서는 오염물질 또는 강수의 지표유출 속도가 매우 낮아 체류시간이 길고 따라서 오염물질이 지하로 침투할 가능성이 많은 지역이다. 반대로 18 % 이상의 경사에서는 유출율이 높기 때문에 오염원이 토양으로 흡수될 가능성은 감소하게 된다. 반대로 가파른 사면분포 지역은 심한 침식작용과 오염물질의 빠른 유출로 지표수의 오염 가능성은 상대적으로 커진다.

미국의 경우 지형경사도는 토양조사소와 지질조사소에서 조사작성된 도면을 기준으로 한다. 최근 발간되는 토양도에는 지형경사도 범위까지도 도면에 나타내는 자세한 지도가 발간되고 있다. DRASTIC 분석가는 토양도와 지형경사도를 중첩시켜 분석하는 것이 유리한데, 이는 토양통 경계부들이 지형 경계부와도 관련이 있기 때문이다. 지형경사는 지형도상에서 직접 구할 수도 있으며, 지형 경사는 수직높이를 수평거리로 나눈 백분율 값이다. 거리는 지도에서 길이를 측정하는 자를 이용하고, 지도의 축

적을 계산하면 산출할 수 있다. 이 경우 DRASTIC 분석가는 등고선의 간격을 지도에서 반드시 확인해야 한다. 이 등고선의 간격은 축적별 지도마다 다른 것이 보통이다.

6) 불포화대 매질영향(I)

표 3-8 불포화대 매질의 등급 기준

분석 대상 인자	가중치	구분	등급	지수
불포화대 영향 (Impact of the Vadose Zone Media)	5	피압대수층	1	5
		점토 Silt/Clay	3	15
		이암	3	15
		석회암	6	30
		사암	6	30
		층상석회암, 사암, 점토암, 이암	6	30
		다량 점토질이 혼합된 모래, 자갈층	6	30
		변성암/화강암	4	20
		모래 및 자갈	8	40
		현무암	9	45
		Karst 지대, 석회암	10	50

오염물질 거동에 영향을 미치는 생물에 의한 분해작용, 부영양화 작용, 물리적인 여과작용, 화학적 반응, 증발작용과 확산작용이 모두 불포화대에서 일어나는 현상들이다. 생물에 의한 분해작용과 증발작용은 깊이가 증가할 수록 감소한다. 불포화대의 분포 두께도 크게 영향을 미치는데 이는 오염물질의 경로로서 유동거리를 좌우하기 때문이며 따라서 자연정화에 필요한 시간과 접촉기간이 두께에 따라 달라지기 때문이다.

불포화대에서 균열대 부존 여부는 오염물질의 지하 침출에 막대한 영향을 미친다. 또한 비포화에 최상부의 매질특성은 상부토양 발달에 영향을 미친다.

본 오염취약성도에 적용하기 위하여 불포화대 매질을 다음과 같이 분류하였다. 처음에 기술된 암석이 오염에 가장 강한 암석이며 후자로 갈수록 오염에 취약한 매질이다.

- (1) 피압층 : 이 매질은 피압 대수층을 평가할 때 선택된다. 피압층은 불투수층으로서 지표의 물 이 대수층으로 유입되는 것을 막아주는 역할을 한다.
- (2) silt/clay : silt와 clay 크기의 입자들이 퇴적되어 물의 유동을 늦추고 방해하는 벽의 역할을 하는 층을 말한다. 점토성분 함유가 높은 경우는 오염의 잠재성이 낮다. 수축 팽창성이 큰 점토 또는 silt질 함량이 증가하면 상대적으로 오염 잠재성이 증가된다.
- (3) 변성암/화성암 : 화성과 변성 기원의 암석으로서 일차 공극이 크게 발달하지 않은 것이 일반적이기 때문에 물과 오염물질의 유동은 주로 균열대를 통하여 일어난다. 따라서 파쇄 발달정도 따라 잠재적 오염 위험도 좌우된다
- (4) shale : 두꺼운 점토질이 암석으로 고화된 층으로 균열대가 약간 발달한 것이 일반적이다. 통상적으로 오염 위험도는 낮으나 균열대 발달정도가 증가하면 오염위험도 커지는 양상을 보인다.
- (5) 석회암 : 고화된 피상의 석회암 또는 백운암으로 층상석회암이나 사암 세일 보다는 성층면 발달이 적은 암석이다. 오염물질의 유동은 주로 균열대를 통하여 일어난다. 따라서 파쇄 발달정도 따라 잠재적 오염 위험도 좌우된다
- (6) 사암 : 사암은 고화된 암석으로서 일차, 이차 공극이 발달하였으면서 층상석회암, 층상사암, 층상세일처럼 얇은 간격은 아니지만 두터운 성층면도 갖고 있다. 오염물질의 유동은 주로 1차 공극율과 균열대를 통하여 일어난다.
- (7) 층상 석회암, 층상사암, 층상세일 : 1차 공극을 갖는 매우얇은 퇴적층이 반복되는 퇴적암이다. 그러나 오염 위험도를 결정하는 요인은 파쇄된 균열대 발달 정도이다.
- (8) silt와 clay가 풍부한 모래와 자갈층 : 세립의 입자를 많이 포함하는 미고결 모래 자갈층. 이 퇴적층은 점토분이 많아 투수성도가 매우 낮다. 이러한 퇴적

층은 일반적으로 “dirty”한 퇴적층이라 부르고, 점토분이 많은 “clean” 사암과 역암보다 낮은 잠재오염도를 갖는다.

(9) 모래, 자갈 : 소량의 세립자를 포함하는 고결되지 않은 모래와 자갈 혼합물이다. 입자의 크기와 분급도가 가장 중요한 요인이다. 분급이 불량하고 입자가 세밀한 퇴적층은 오염잠재도가 낮고, 입자가 크고 분급이 양호한 퇴적층은 높은 잠재 오염성을 보인다.

(10) 현무암 : 고화된 화산분출암으로 성층면을 갖고 있고 기포에 의한 공극과 파쇄대를 포함하는 화성암층이다. 이것은 특수한 변성/화성암의 일종이다. 오염 위험도는 용암유동체 내의 기포에 의한 공극 연결상태와 균열대에 영향을 받는다. 오염 위험도는 상당히 높은 편으로 이는 파쇄대에 일단 들어온 오염물질이 자연정화될 수 있는 기회가 거의 없기 때문이다.

(11) 카르스트 지대의 석회암 : 석회암지대에 강수와 지하수에 의해 용해되어 동굴이나 공동이 발달한 지대. 이러한 지형은 특수한 경우로서 암석내에 공동 발달로 오염 위험도가 매우 높은 석회암지대이다.

불포화대의 매질별 등급 산출은 먼저 대수층의 피압 여부를 판단하여야 한다. 피압 대수층의 정의는 앞에서 기술한 지하수위 부분에서 언급한 바와 같다. 자유면대수층과 반피압 대수층이 동시에 분포하는 경우, 분석가는 오염등급 분석시 여러 특성 중 오염물질 확산에 가장 취약한 매질을 선정하여 등급을 산정해야 한다. 정의한 바와 같이 불포화대란 토양층 하부로부터 지하수위 상부까지 분포한 모든 불포화 매질을 포함한다. 불포화대 매질에 관한 자료는 지하수 수문 조사보고서 또는 지질 보고서, 논문, 관정개발 자료 등 기존자료로 부터 얻을 수 있다. 일반적으로 여러층이 복합적으로 분포하는 경우 상대적으로 가장 두터운 심도를 갖는 층이 가장 영향이 큰 대수층이라 할 수 있다. 그러나 오염잠재도 또한 고려되어야 한다.

매우 두꺼운 석회암으로 구성된 대수층 상부에 모래와 자갈층이 피복되어 있고 지하수위가 석회암 상단에 있는 경우 불포화대 매질은 모래, 자갈층 이라고 말할 수 있

다. 그러나 모래, 자갈층 두께가 얇고, 지하수위 깊이가 석회암층 상단에서 하부로 깊다면, 석회암이 불포화대 매질로 선택되어야 한다. 또 다른 예로는 석회암 대수층 상부에 silt/clay 층이 피복되고 그 위에 모래/자갈층이 같은 두께로 또는 더 두껍게 싸여 있는 대수층이 있다면, silt/clay 층은 불투수층으로 오염물질이 석회암 대수층으로 이동하는 것을 제한하는 역할을 하기 때문에 silt/clay 층을 대상으로 등급을 분석해야 한다. 지하수위가 지표에서 매우 낮은 특수한 경우도 있다. 이 경우 불포화대 지역은 지하수위 이하에 포함되어 이론상으로는 불포화대가 없다고 할 수 있으나 이 경우에도 분석자는 불포화대 매질을 선정하고 등급을 산정해야 전체적인 DRASTIC 도면을 작성할 수 있다.

피압대수층의 경우, 불포화대는 토양층 하부에서 피압대수층 상부까지의 모든 매질을 포함한다. 이러한 경우 대부분 불포화대는 포화된 지하수위 상부까지도 포함되기 때문에 엄밀하게 불포화대는 아니다. 피압대수층을 평가할 때 사용자는 반드시 '피압 불투수층 (confining layer)'까지를 불포화대 등급 대상 매질로 선택하여야 한다. 이는 지하수 오염과 관련하여 분석하기 때문이며 이 경우 피압 불투수층이 오염 위험 분석에 가장 큰 영향을 미치는 매질이기 때문에 사용자는 이 불투수층을 불포화대로 선택해야 한다. 피압 불투수층이 분포하는 경우는 상부에 있는 다른 어떠한 매질의 분포에 상관없이 불포화대 매질로서 등급을 산출하는 대상은 '피압불투수층'으로 선택하여야 한다.

모든 피압대수층의 경우에 DRASTIC 기법에서는 등급을 "1"로 산정한다. 자유면 대수층인 경우는 불포화대를 이루고 있는 지층의 정확한 특성을 등급에 반영하기 위하여 가능한 모든 기존 보고서 자료를 수집 참조하여야 한다. 등급 적용은 기 언급된 대수층 매질의 등급기준과 유사하다.

고결된 암반층 매질에 대한 등급 산정은 2차 공극이라 칭하는 파쇄대, 층상구조와 용해동굴 등의 발달정도에 따라 산정토록 한다. 본 지침에서 표준 대표값으로 제시한 등급의 사용은 균열대가 중간정도로 발달한 경우와 기존 조사자료가 없어 조사 근거 없이 적용할 경우에 사용토록 한다. 예를 들어 Karst 지대 석회암지역에서 용해동굴이 발견되고 지표의 오염물질이 빠르게 지하로 유입되는 것으로 판단되면 불포화대 매질은 Karst 석회암 지대를 선택하고 등급은 10을 산정토록 한다. 하지만 동일한 Karst 지대 석회암지역에서 용해동굴이 발견되지 않고 공동의 연결상태도 나쁜 것으

로 조사된 경우라면 불포화대 매질은 Karst 석회암으로 선정하되 등급은 9~8 (공동의 연결상태나 발달 정도에 따라)로 낮추어 적용한다. 석회암지대라지만 Karst 지형보다는 백운암에 가깝고 파쇄대 발달 정도도 낮은 경우에는 일반 석회암으로 등급을 산정하는 것이 바람직하다. 이 경우 일반 석회암으로 불포화대 매질을 선택하고 표준 등급은 6 이나 파쇄정도에 따라 더 작은 값을 적용하여 선정할 수 있다.

미고결 충적층 매질에서 퇴적층에 대한 등급 구분을 위하여 크게 3가지로 지층을 분류하였다. 모래 자갈층, 다량의 점토질을 함유한 모래자갈층, 미립질 입자가 상대적으로 우세한 점토층 또는 silt/clay층으로 나눌 수 있다. 각 매질에 대한 등급은 다음과 같다.

모래 자갈층이란 약간의 세립 입자가 포함되었지만 대부분이 모래와 자갈로 구성된 층에 사용한다 (등급 6~9). 다량의 점토질 입자가 혼재한 모래 자갈층이나 여전히 모래 자갈층이 우세한 편으로 지층 입자는 모래 자갈층이고 Matrix는 세립질인 경우에 적용된다 (등급 4~8). 점토층 또는 silt/clay층이란 우세한 매질이 세립 점토 입자인 경우로 소량의 모래와 자갈을 함유하는 층에 적용한다 (등급 2~5). 결국 이러한 세가지 지층의 등급 범위는 전체 등급 범위를 포함하는 범위이다.

이처럼 분석가는 미고결 충적층의 구성입자 크기, 분급 정도, 세립질의 함유량, 균질성등을 반영하는 등급을 선정해야 한다. 예를 들어 분급도가 양호한 모래 자갈층으로 미립 점토입자 함유량이 적으면 9등급을 적용하고, 반면 세립의 입자가 다량 혼재한 모래 자갈층은 7등급을 적용한다. 빙하퇴적층은 별도의 기준으로 분류한다.

7) 대수층 수리전도도(C)

표 3-9 수리전도도의 등급 기준

분석 대상 인자	가중치	구 분	등급	지수
수리전도도 (Hydraulic Conductivity)	3	$4.72 \times 10^{-7} - 4.72 \times 10^{-5}$	1	3
		$4.72 \times 10^{-5} - 1.42 \times 10^{-4}$	2	6
		$1.42 \times 10^{-4} - 3.3 \times 10^{-4}$	4	12
		$3.3 \times 10^{-4} - 4.72 \times 10^{-4}$	6	18
		$4.72 \times 10^{-7} - 9.44 \times 10^{-4}$	8	24
		9.44 x 10 ⁻⁴ 이상	10	30

수리전도도는 대수층의 층리면, 균열부, 입자 사이 공극율과 연결상태에 따라 변한다. 수리전도도가 높은 지역은 높은 오염 잠재도를 갖는다.

수리전도도 값은 대수층 시험자료를 분석하여 계산할 수 있다. 기존 지하수조사 보고서, 관련 연구 논문등에서 조사지역의 수리전도도를 수집하여 활용토록 한다. 만일 기존자료나 조사계획이 없는 경우는 지하수 관련 참고서에 수록된 지층별, 암석별 평균 수리전도도 대표 값 범위에서 현장상황과 유사한 조건의 수리전도도 값을 추출하고 지하수 전문가의 자문을 받도록 하여야 한다.

본 연구에서는 위와 같은 DRASTIC의 인자들을 GIS User Interface를 개발해 각 인자별 가중치를 유동적으로 부여하며, 기 구축되어 있는 데이터베이스로부터 자료들을 불러와 각각의 인자들에서 필요로 하는 자료형태로 변환하여 최종적으로 오염취약성도를 작성하는 툴을 개발한다.

위의 각 인자에 대한 입력자료 및 입력자료 생성에 필요한 자료의 형태를 고려해, 시스템에서 DRASTIC Map을 작성하는 툴을 개발하기 위한 알고리즘은 다음과 같다 (그림 3-2, 3-3).

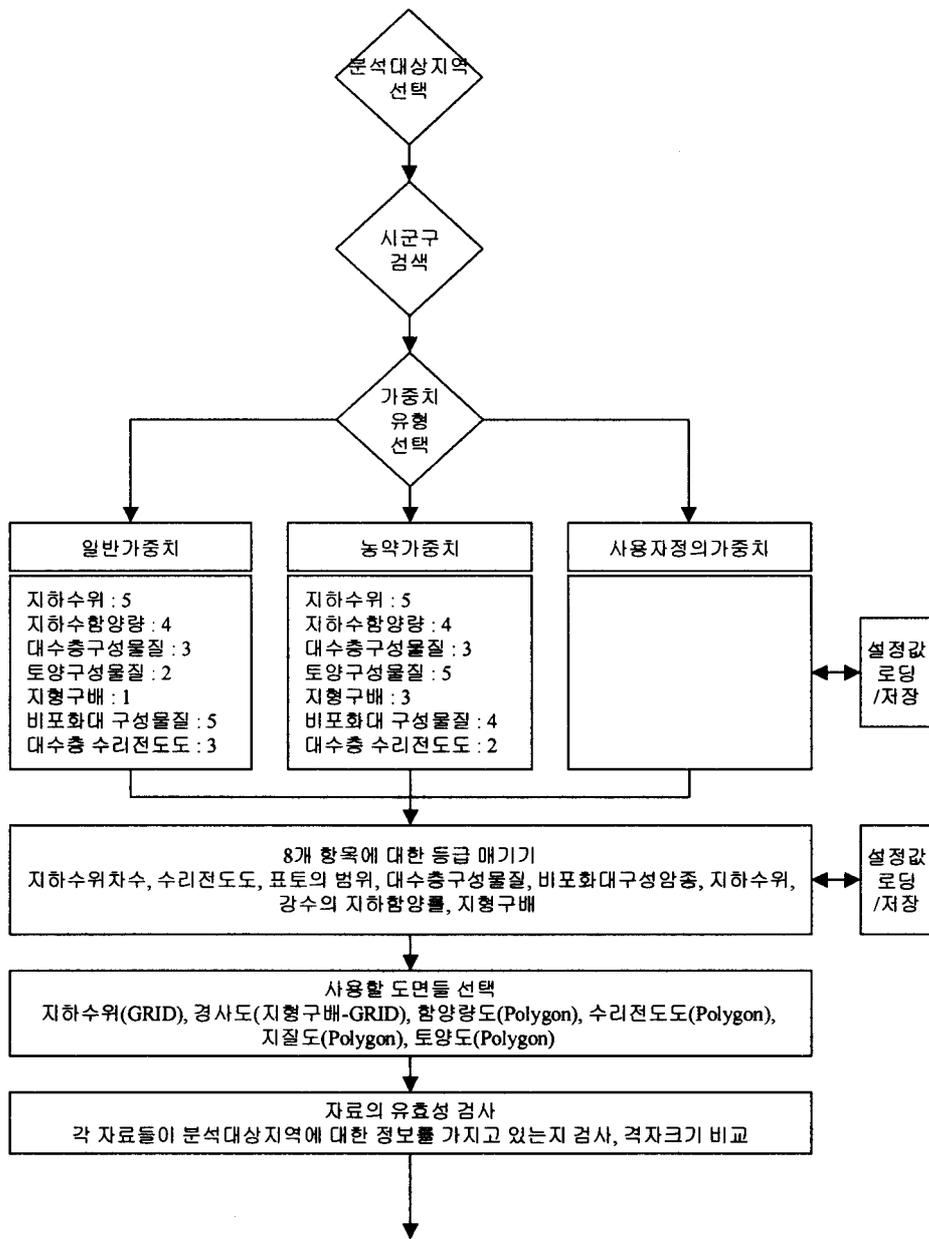


그림 3-2 DRASTIC Map 작성 알고리즘 1

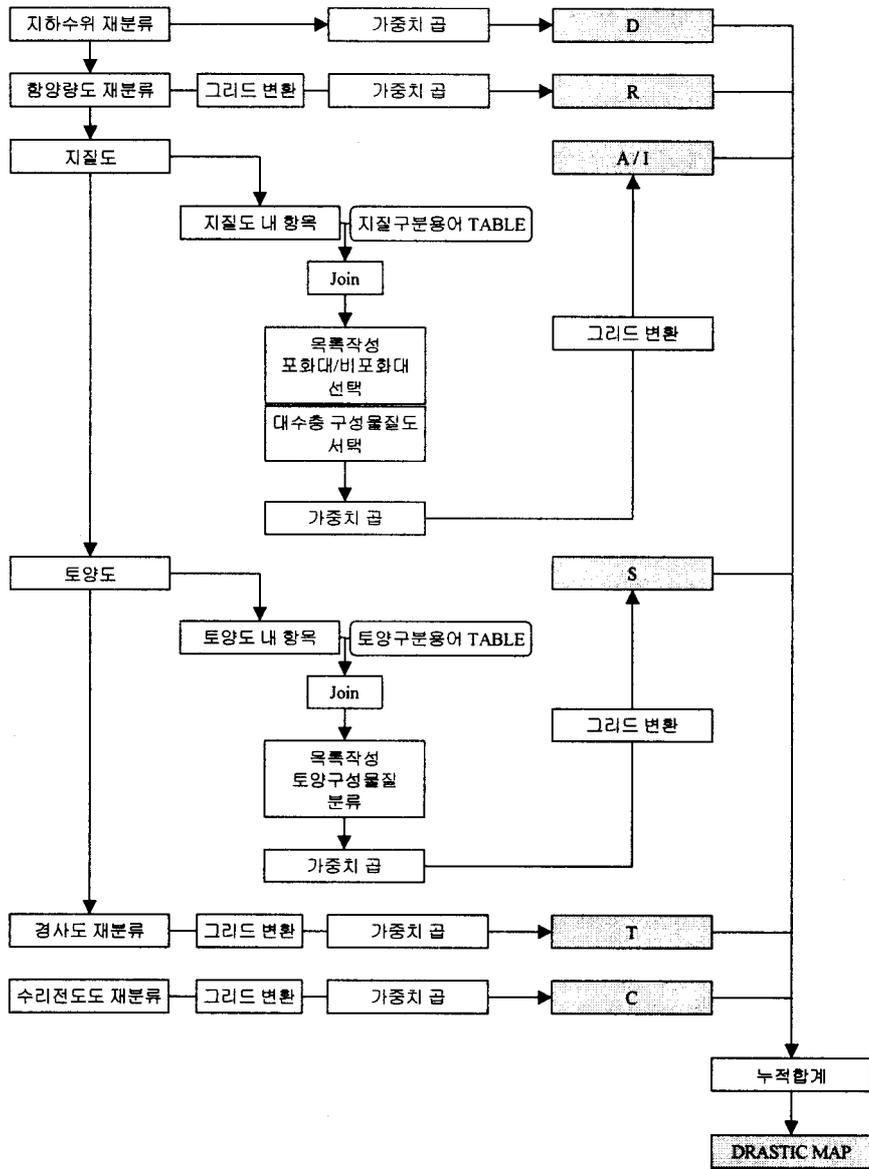


그림 3-3 DRASTIC Map 작성 알고리즘 2

다. 지하수 함양량도 작성 기능

1) 연구 배경

비가 오면 일부는 지표면을 따라 흘러가 지표수로 유입되고 일부는 지하로 침투되는데 그중에서는 식생에 의해 흡수되는 것, 대기중으로 증발되는 것, 토양공극에 그대로 머무르는 것 그리고 대수층으로 내려가 지하수를 이루는 것이 있다. 특정구역에서 대수층(포화대)까지 내려가 지하수를 이루는 비의 양을 지하수함양량이라 전체강우량에 대한 지하수함양량의 비를 지하수함양율이라 한다.

지하수함양율은 각 지역의 토양특성, 지형경사, 식생특성, 암반종류(분포지질), 기후(기온, 강수, 일조 등)에 따라 증발산량, 지표유출양상이 다르므로 차이가 난다. 그리고 동일한 지역에서 대해서도 시간에 따른 기후변동으로 인하여 매년 지하수함양율은 다르다. 예를 들면 전년도 강우양상이 연중다우인 경우 선행강우량이 많아 불포화대(토양층)의 수분함량이 거의 대부분의 기간동안 높으므로 강우의 상당부분이 지하로 침투되어 포화대인 대수층에 이르게 되어 함양율은 높게 산출되나, 같은 지역에서 그 이듬해 비가 거의 안 오다가 태풍 등에 의해 단기간 집중호우만 내렸을 경우 선행강우가 없으므로 불포화대(토양층)은 늘 건조한 상태에 있다가 짧은 시간동안의 폭우(또는 강도 높은 강우)가 내리면 전년도에 비해 이 때 내린 강수량이 많아도 대부분 지표에서 바로 하천으로 흘러들어가고 지하로 침투되어 지하수로 함양되는 양은 적어 지하수함양율은 전년도에 비해 낮다. 그러므로 특정시기동안의 현장조사로부터 산출한 지하수함양율은 조사기간동안의 함양율일 뿐 조사지역의 전반적인 함양율이라고 볼 수는 없다. 그 지역의 전반적인 지하수함양율을 구하려면 평년기후자료(10년간 기후자료) 또는 10년 이상 장기간 기후자료를 이용하여 조사지역의 수리지질특성에 맞는 지하수함양율을 추정하거나 수년간 현장조사를 하여 그 지역의 평균함양량을 구하는 것이 타당하다. 본 연구에는 경기 화성과 전북 무주 이외에도 충남 유구, 충북 오성 및 충남 전의, 전북 김제, 전남 나주, 경남 김해에서 각각 논, 밭, 과수원, 임야의 불교란시료를 채취하여 직접 투수계수와 유효공극율을 측정하여 비교하였고, 경기 화성 및 전북 무주지구에 대하여 SCS방법을 이용하여 각 소유역별로 함양량을 산출하였다.

2) 국내토양의 토양종류, 토지이용별 투수계수 및 유효공극율

전국 7개소에서 토지이용별로 토양시료를 채취하여 연구원에 설치, 실험하였다(3장 2절 참조). 주 연구지역인 경기 화성지구와 전북 무주지구 외, 충북 오송(전의), 충남 유구, 전북 김제, 전남 나주, 경남 김해 지역에서 각각 논, 밭, 과수, 임야로 이용되는 대표토양을 직경 20cm, 길이 100cm의 투명아크릴관으로 불교란시료를 채취하여 직접 투수계수와 유효공극율을 측정하고, 지표하 100cm까지 심도별로 시료를 채취하여 토성, 단위중량, 공극율 등을 분석하여 비교하였다 (표-10).

표 3-10 토양 특성

구분	시료명	토양특성 (1 : 5,000 정밀토양도 도폭설명서)					
		토양명	토양종류	경사	지형	모재	배수
전북 김제시	김제-과수	지산	양토	2~7%	곡간지	곡간층적층	약간불량
	김제-논	반산-용지		2~7%			
	김제-밭	김제	미사질양토	0~2%	평탄지	하해혼성층적층	약간불량
경남 김해시	김해-과수	신답	사양토	0~2%	평탄지	하성층적층	양호
	김해-논	부용	미사질식양토	0~1%	평탄지	하해혼성층적층	약간불량
	김해-밭	석토	자갈이있는양토	7~15%	산록	산성암붕적층	양호
전북 무주군	무주-과수	(임야)					
	무주-논	석천	양토	0~2%	하성평탄지	하성층적층	약간불량
	무주-밭	지곡	자갈이있는사양토	7~15%	선상지및곡간지	붕적층	양호
충북 연기군 청원군	오송(전의)-논	낙동	양질세사토	0~2%	평탄지	하성층적층	매우양호
	오송(전의)-밭	낙동	양질세사토	0~2%	평탄지	하성층적층	매우양호
충남 공주시	유구-과수	(임야)					
	유구-논	월곡	사양토	2~7%	곡간지	곡간층적층	약간양호
	유구-밭	수암	자갈이있는양토	7~15%	산록경사지	붕적층	양호
경기 화성시	화성-과수	상주	사양토	2~7%	곡간및선상지	곡간층적붕적층	양호
	화성-논	옥천	양토	2~7%	곡간지	곡간층적층	불량
	화성-밭	오산	자갈이있는양토	30~60%	구릉지	결정편암잔적층	양호

표-10 (계속)

구분	시료명	심도 (m)	실내실험결과			
			통일흙분류 (U.S.C.)	비중 (G _s)	함수비 (W _n ,%)	습윤단위중량 (v _t , gf/cm ³)
전북 김제시	김제-임야	0~0.5	CL	2.674	30.3	1.561
		0.5~1.0	CL	2.697	30.6	1.639
	김제-과수	0~0.5	SM	2.658	24.231105	1.957454
	김제-논	0~0.5	CL	2.669	31.307129	1.833174
	김제-밭	0~1.0	SM	2.674	21.726007	1.963
경남 김해시	김해-과수	0~0.5	SM	2.657	35.927198	1.822436
		0.5~1.0	SC	2.674	26.656953	1.902436
	김해-논	0~0.5	CL	2.669	23.998333	1.99884
	김해-밭	0~0.5	SM	2.652	14.570518	1.602531
전남 나주시	나주-과수	0~0.5	ML	2.659	18.726429	1.941235
	나주-논	0~0.5	CL	2.677	28.115466	1.904496
	나주-밭	0~0.5	SM	2.67	22.816596	1.924636
전북 무주군	무주-임야	0~0.5	SM	2.668	20.6	1.902
		0.5~1.0	SM	2.654	13.4	2.159
	무주-과수	0~1.0	ML	2.67	19.408986	1.829983
	무주-논	0~1.0	SM	2.661	28.558873	1.86
	무주-밭	0~0.5	SM	2.674	44.8	1.73957
		0.5~1.0	SP-SM	2.678	12.100691	1.738

표-10 (계속)

구분	시료명	심도 (m)	실내실험결과			
			통일흙분류 (U.S.C.)	비중 (G _s)	함수비 (W _n ,%)	습윤단위중량 (v _t , gf/cm ³)
충북 연기군 청원군	오송(전의)-임야	0~0.5	SM	2.665	11.2	2.059
		0.5~1.0	SM	2.659	14.7	1.771
	오송(전의)-과수	0~0.5	SM	2.669	17.115536	1.914255
	오송(전의)-논	0~0.5	ML	2.66	22.919269	1.960942
		0.5~1.0	SM	2.658	10.453032	1.560085
	오송(전의)-밭	0~0.5	SM	2.671	15.269472	1.687486
충남 공주시	유구-임야	0~0.5	ML	2.663	24.6	1.759
		0.5~1.0	SM	2.677	9.1	2.024
	유구-과수	0~1.0	SM	2.671	20.114327	2.001166
	유구-논	0~1.0	GP-GM	2.673	5.5215003	1.841064
	유구-밭	0~1.0	SM	2.676	13.470455	1.713602
경기 화성시	화성-임야	0~0.5	SM	2.669	21.6	1.572
		0.5~1.0	SM	2.669	14.6	1.763
	화성-과수	0~0.5	CL	2.675	21.05076	1.860283
	화성-논	0~0.5	SM	2.663	17.761987	1.968809
		0.5~1.0	SM	2.671	29.247725	1.919216
	화성-밭	0~0.5	SM	2.668	18.446994	1.893368

표-10 (계속)

구분	시료명	심도 (m)	실내실험결과			
			간극비 (e_0)	공극률 ($n = e/(1+e)$)	포화도 (S, %)	투수계수 (K, cm/sec)
전북 김제시	김제-임야	0~0.5	1.232		65.8	4.3E-07
		0.5~1.0	1.149		71.8	6.9E-07
	김제-과수	0~0.5	0.686917	0.407203	93.76135	2.97E-08
	김제-논	0~0.5	0.911759	0.476922	91.64563	1.32E-07
	김제-밭	0~1.0	0.658153	0.396919	88.27033	4.22E-07
경남 김해시	김해-과수	0~0.5	0.981735	0.495392	97.23453	3.01E-06
		0.5~1.0	0.780247	0.43828	91.35653	2.34E-07
	김해-논	0~0.5	0.655718	0.396032	97.68153	1.84E-08
	김해-밭	0~0.5	0.896007	0.472576	43.1258	0.000667
전남 나주시	나주-과수	0~0.5	0.626252	0.385089	79.51051	7.64E-07
	나주-논	0~0.5	0.800818	0.444697	93.98523	7.38E-07
	나주-밭	0~0.5	0.703804	0.413078	86.55859	1.69E-05
전북 무주군	무주-임야	0~0.5	0.692		79.5	0.000046
		0.5~1.0	0.394		90.2	0.0000244
	무주-과수	0~1.0	0.742213	0.426017	69.82092	4.21E-07
	무주-논	0~1.0	0.839221	0.456292	90.55438	5.28E-07
	무주-밭	0~0.5	1.22581	0.550725	97.72735	4.32E-06
		0.5~1.0	0.727305	0.421064	44.55578	0.000125

표-10 (계속)

구분	시료명	심도 (m)	실내실험결과			
			간극비 (e_0)	공극률 ($n = e/(1+e)$)	포화도 (S, %)	투수계수 (K, cm/sec)
충북 연기군 청원군	오송(전의)-임야	0~0.5	0.439		67.9	7.6E-05
		0.5~1.0	0.722		54.2	0.0000554
	오송(전의)-과수	0~0.5	0.632914	0.387598	72.17623	1.13E-06
	오송(전의)-논	0~0.5	0.667389	0.40026	91.34895	2.27E-07
		0.5~1.0	0.881847	0.468607	31.50679	0.00243
	오송(전의)-밭	0~0.5	0.824518	0.45191	49.46498	2.45E-06
충남 공주시	유구-임야	0~0.5	0.886		73.8	1.0E-05
		0.5~1.0	0.442		54.9	4.7E-05
	유구-과수	0~1.0	0.603192	0.376245	89.06839	1.11E-06
	유구-논	0~1.0	0.532043	0.347277	27.74017	0.000464
	유구-밭	0~1.0	0.77198	0.43566	46.69411	0.00039
경기 화성시	화성-임야	0~0.5	1.066		54.2	7.6E-05
		0.5~1.0	0.735		53.0	8.7E-05
	화성-과수	0~0.5	0.740653	0.425503	76.02854	6.81E-07
	화성-논	0~0.5	0.592842	0.372191	79.78541	9.66E-06
		0.5~1.0	0.798759	0.444061	97.80257	3.16E-05
	화성-밭	0~0.5	0.669071	0.400864	73.55954	3.95E-05

표-10 (계속)

구분	시료명	Column(불교란상태) 실험결과				
		Column내 시료높이 (h, m)	시료부피 (V, m ³)	유효공극률 (n _e)	투수계수(K)	
					(cm/sec)	(m/day)
전북 김제시	김제-임야	0.9	0.0442		0.000028353	0.024
	김제-과수	0.83	0.0407	0.0543	0.000231604	0.200
	김제-논	0.92	0.0452			
	김제-밭	0.78	0.0383	0.0599	0.001687227	1.458
경남 김해시	김해-과수	0.88	0.0432	0.1109	0.000240585	0.208
	김해-논	0.88	0.0432			
	김해-밭	0.84	0.0412	0.1047	0.002985265	2.579
전남 나주시	나주-과수	0.87	0.0427		0.000007698	0.007
	나주-논	0.9	0.0442			
	나주-밭	0.88	0.0432		0.000033062	0.029
전북 무주군	무주-임야	0.88	0.0432	0.0561	0.000218709	0.189
	무주-과수	0.88	0.0432	0.0326	0.000036648	0.032
	무주-논	0.77	0.0378	0.0614	0.001027852	0.888
	무주-밭	0.86	0.0422	0.0943	0.010171458	8.788

표-10 (계속)

구분	시료명	Column(불교란상태) 실험결과				
		Column내 시료높이 (h, m)	시료부피 (V, m ³)	유효공극률 (n _e)	투수계수(K)	
					(cm/sec)	(m/day)
충북 연기군 청원군	오송(전의)-임야	0.89	0.0437	0.1077	0.000532779	0.460
	오송(전의)-과수	0.86	0.0422	0.0841	0.000172492	0.149
	오송(전의)-논	0.85	0.0417	0.0312	0.000077882	0.067
	오송(전의)-밭	0.91	0.0447	0.1387	0.001577184	1.363
충남 공주시	유구-임야	0.88	0.0432	0.0465	0.001236803	1.069
	유구-과수	0.82	0.0403	0.0867	0.000136980	0.118
	유구-논	0.74	0.0363	0.0633	0.001281729	1.107
	유구-밭	0.75	0.0368	0.1427	0.006524397	5.637
경기 화성시	화성-임야	0.87	0.0427	0.1130	0.000133544	0.115
	화성-과수	0.82	0.0403	0.0535	0.000112210	0.097
	화성-논	0.88	0.0432		0.000007271	0.006
	화성-밭	0.86	0.0422	0.0427	0.000066218	0.057

표-10 (계속)

구분	시료명	강수량(mm)	급수량(mm)	배수량(mm)	함양율(%)
전북 김제시	김제-임야	22	20.4	6.1	14.4%
	김제-과수	121.5	40.7	80.5	49.6%
	김제-논	121.5	305.6	12.9	3.0%
	김제-밭	121.5	61.1	67.2	36.8%
경남 김해시	김해-과수	121.5	40.7	17.0	10.5%
	김해-논	121.5	672.3	489.2	61.6%
	김해-밭	121.5	61.1	108.1	59.2%
전남 나주시	나주-과수	121.5	40.7	84.2	51.9%
	나주-논	121.5	305.6	17.3	4.1%
	나주-밭	121.5	61.1	28.1	15.4%
전북 무주군	무주-임야	22	20.4	14.3	33.8%
	무주-과수	121.5	40.7	15.4	9.5%
	무주-논	121.5	672.3	509.6	64.2%
	무주-밭	121.5	61.1	118.3	64.8%
충북 연기군 청원군	오송(전의)-임야	22	20.4	31.4	74.1%
	오송(전의)-과수	121.5	40.7	38.9	24.0%
	오송(전의)-논	121.5	672.3	407.6	51.3%
	오송(전의)-밭	121.5	61.1	57.1	31.3%
충남 공주시	유구-임야	22	20.4	26.5	62.4%
	유구-과수	121.5	40.7	75.7	46.7%
	유구-논	121.5	672.3	414.1	52.2%
	유구-밭	121.5	61.1	95.2	52.1%
경기 화성시	화성-임야	22	20.4	19.5	46.0%
	화성-과수	121.5	40.7	68.6	42.3%
	화성-논	121.5	672.3	455.1	57.3%
	화성-밭	121.5	61.1	83.4	45.7%

7개소에서 임야, 과수, 논, 밭 4가지 유형의 토지이용별로 채취한 26개 시료에 대하여 1:5,000 정밀토양도에서의 배수상태를 보면 오송(전의)지구의 논과 밭은 매우 양호하고 김해지구 과수와 밭, 무주지구 밭, 유구지구 밭, 그리고 화성지구의 과수와 밭은 양호한 것으로 조사되어 있다. 실내토질시험결과 배수상태가 '매우 양호'였던 오송(전의)지구 논,의 투수계수가 2.43×10^{-3} cm/sec으로 가장 높았으며 그 외 배수상태가 '양호'였던 김해지구 밭, 무주지구 밭, 유구지구 밭의 투수계수가 수 10^{-4} cm/sec로 높았다. 배수상태가 '약간 양호'였던 유구지구 논,의 투수계수도 4.64×10^{-4} cm/sec로 높았고, 김제지구 과수와 김해지구 논은 투수계수가 제일 낮았다. 대체로 정밀토양도에서 기술된 배수상태와 실제 실내실험에서의 투수계수는 관련이 있다. 배수상태와 투수계수가 높은 시료들의 유효공극률 또한 다른 시료들에 비해 높았다. 실제로 1m의 불교란시료를 대상으로 유효공극률을 측정하기 위해 시료를 완전 포화시킨 후 시간에 따라 배수되는 양을 측정한 결과 김해-과수, 김해-밭, 무주-밭, 오송(전의)-밭, 유구-밭, 화성-임야의 유효공극률이 0.1내외로 매우 높았다. 투수계수가 매우 낮았던 김제-과수 (2.97×10^{-8} cm/sec), 김해-논 (1.84×10^{-8} cm/sec)은 유효공극률에서 상이한 면을 보였다. 김제-논, 김해-논, 나주-논 3점의 시료는 100여일이 경과되어도 완전포화상태에 도달하지 못할 정도로 토양의 투수상태가 매우 불량하였으며, 나주-과수, 화성-논은 실제로 투수계수를 실험한 결과 각각 7.70×10^{-6} cm/sec, 7.27×10^{-6} cm/sec로 매우 낮았으며, 김제-임야, 나주-밭, 무주-과수, 오송(전의)-논, 화성-밭 5점 시료는 불교란상태에서 직접 실험한 결과 구한 투수계수가 수 10^{-5} cm/sec로 실내실험과 차이를 보이고 있다. 이는 실험방법상의 차이에 기인한 것으로 사료되는데 불교란상태에서의 실험에서는 측벽을 따라 다량의 물이 하부로 내려가는 것을 최소화하기 위하여 시료 최상부 둘레에 점토로 틈을 매워 현장상황에 가장 근접할 수 있도록 하였다. 실내투수시험에서 투수계수가 제일 낮았던 김제-과수 (2.97×10^{-8} cm/sec)는 불교란투수시험에서 2.32×10^{-4} cm/sec으로 상당히 높아 배수상태가 '양호'한 토양들과 거의 비슷하였다. 시간에 따른 배수상태를 보면 (그림 3-4) 대부분의 토양은 50시간 전후로 거의 다 배수되며 150~200시간 경과되면 거의 모든 토양에서 완전배수가 되었다고 볼 수 있다. 그러나 오송(전의)-임야 및 유구-과수에서처럼 500여시간이 경과되어도 지속적으로 배수되는 토양이 있는데 이는 토양수분보유특성에 기인하는 것으로 사료되며 이들 관계를 규명하기 위하여는 보다 더 심도있는 연구가 진행되어야 할 것이다.

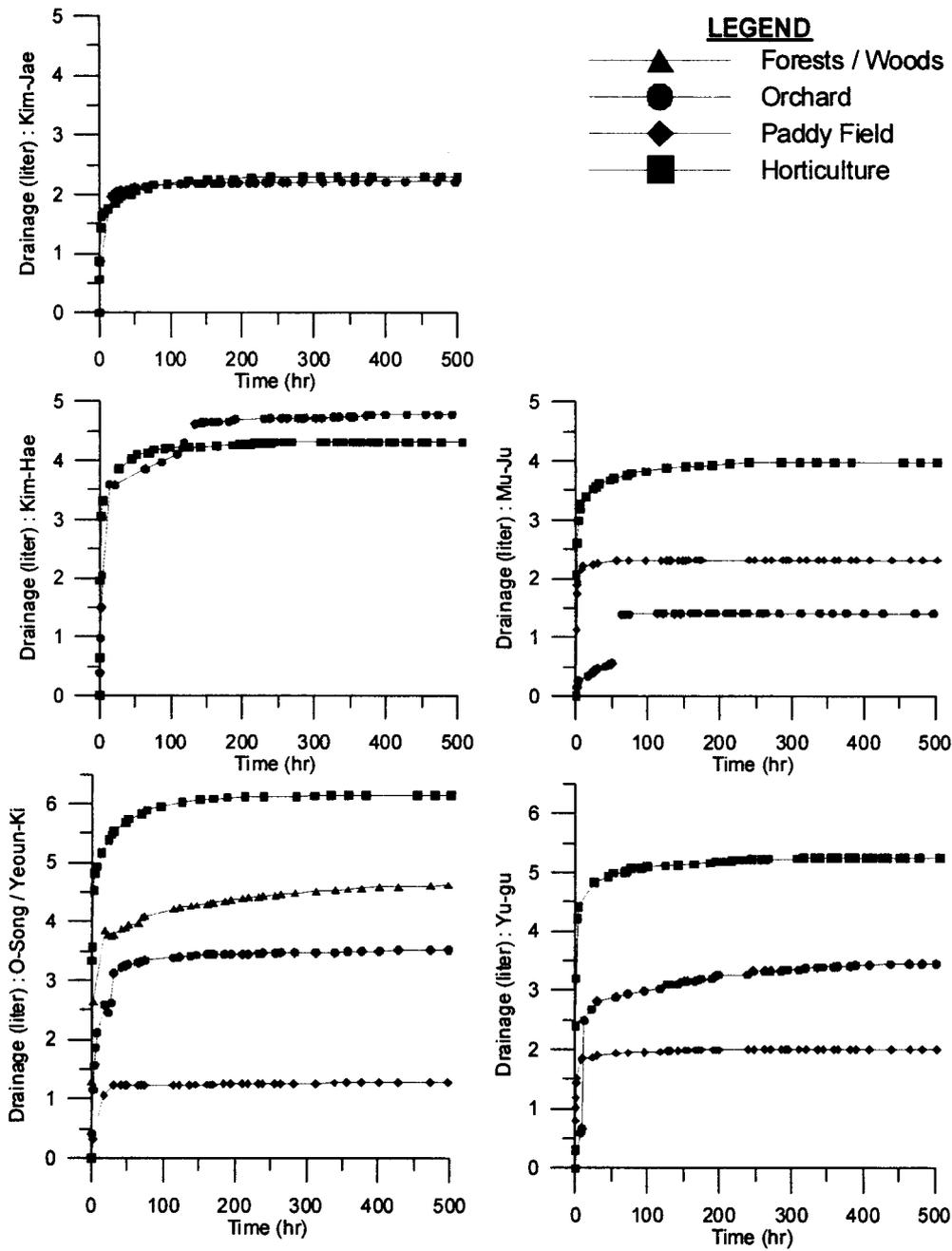


그림 3-4 시간에 따른 토양배수상태 (유효공극률 추정)

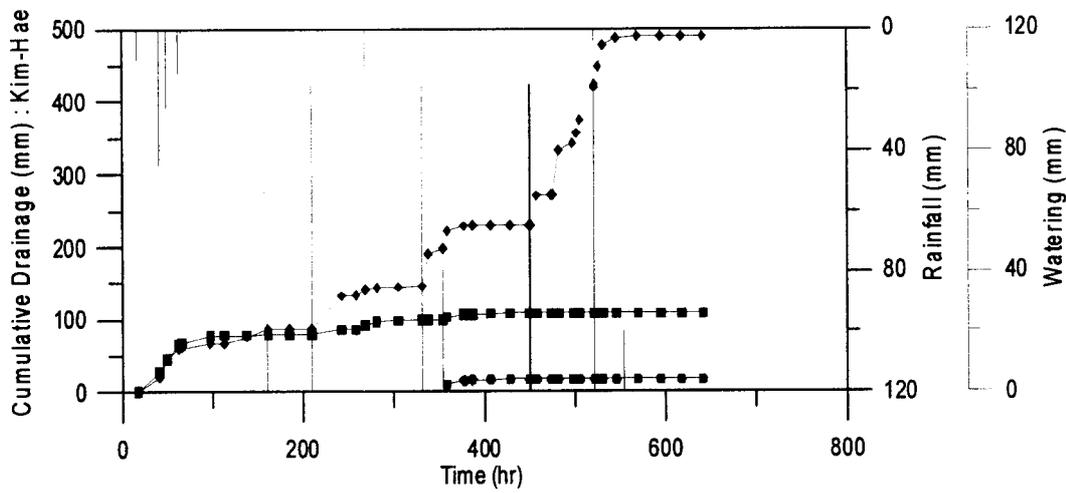
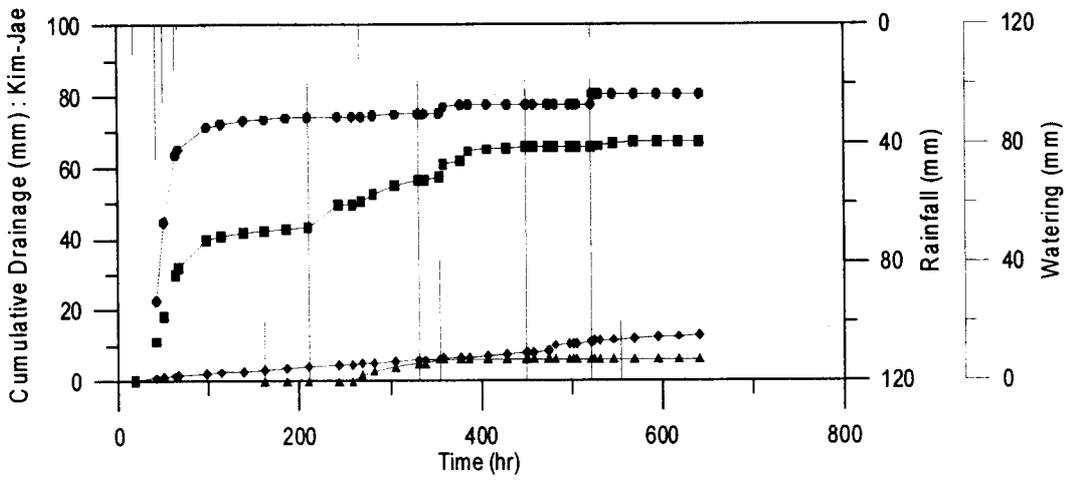
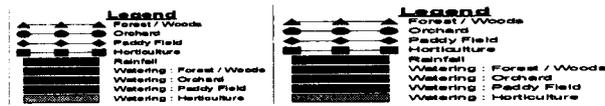


그림 3-5 강우, 관개에 의한 토양시료별 배수량 변화



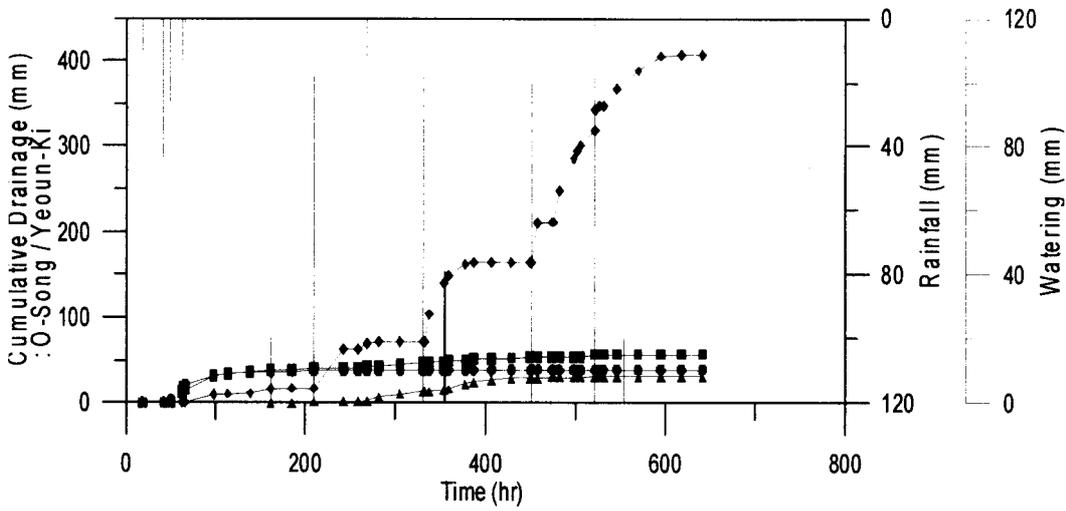
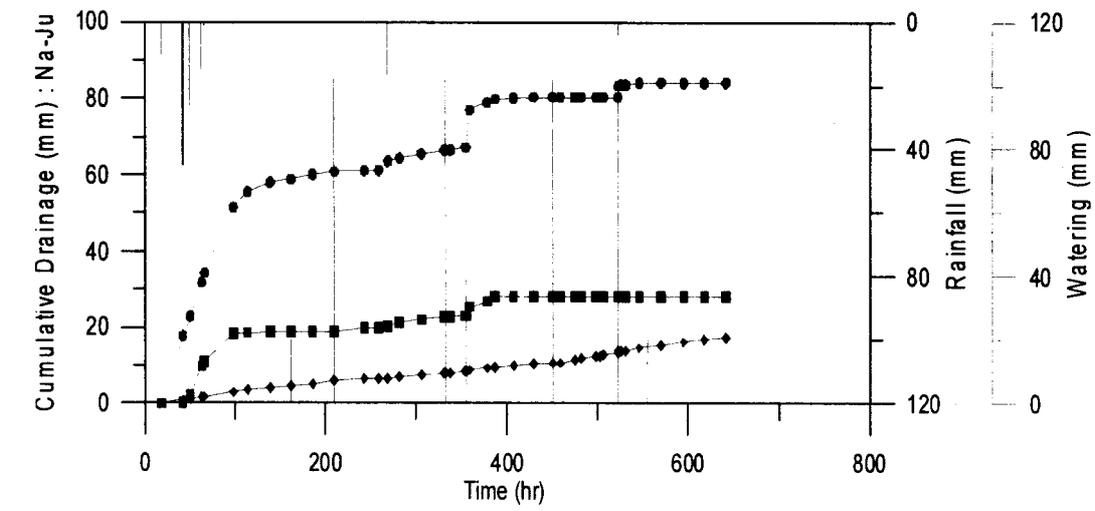


그림 3-5 (계속)

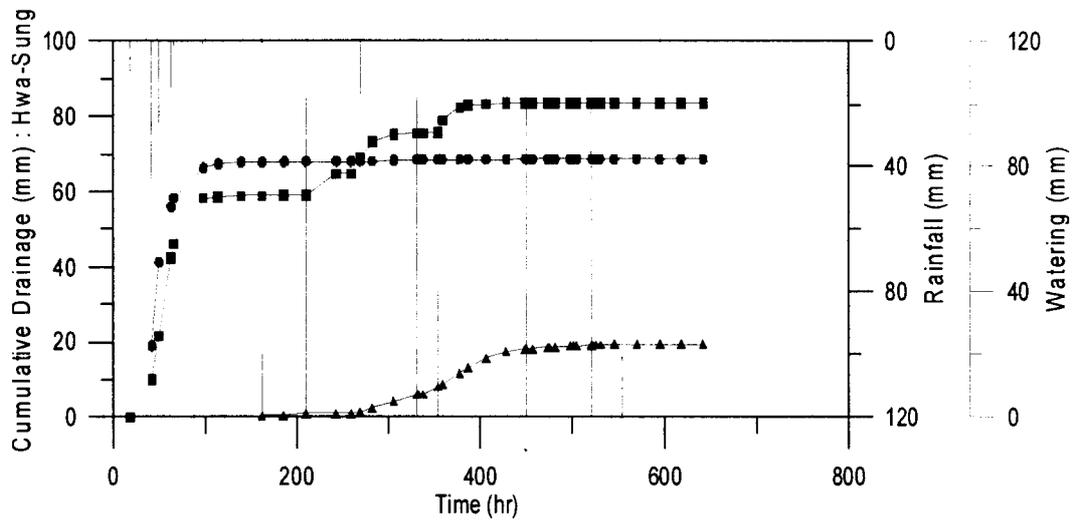
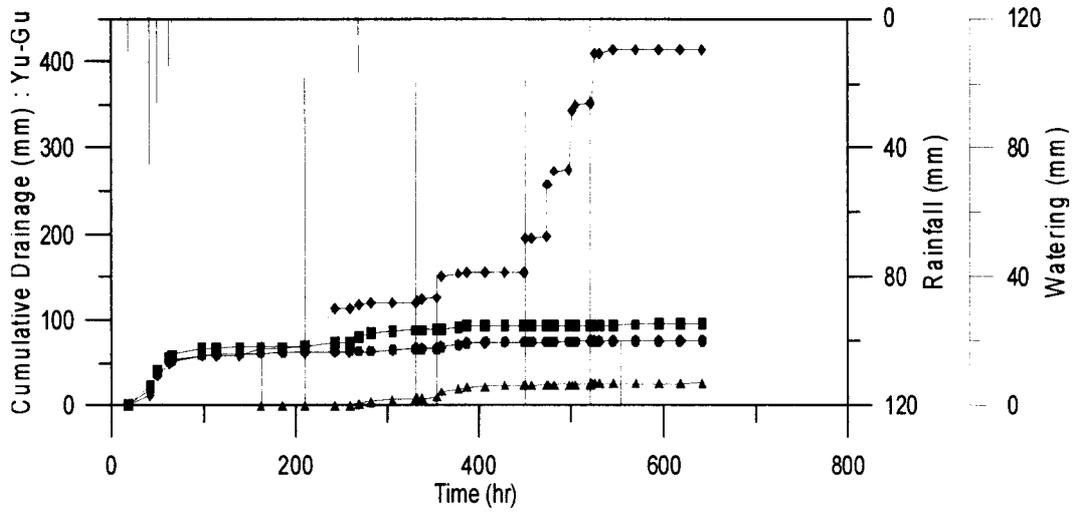


그림 3-5 (계속)

국내 비고결층 지하수(충적지하수)는 대체로 지하수면이 1~2m내외이므로, 시간에 따른 배수상태를 보면 결국 대부분의 토양은 강우에 의해 지하로 유입되는 물이 2일 내로 대수층에 거의 유입된다고 볼 수 있다. 그러나 토양수분보유특성에 따라 지속적으로 3주가 경과되어도 계속 대수층으로 토양수를 배수할 경우(오송(전의)-임야 및 유구-과수)가 있으므로 지하수함양율을 단순히 누적강수량에 대한 지하수 수위변동으로부터 산출하는 데에는 토양특성을 충분히 고려하여야 한다

실제로 불교란시료를 1개월가량 자연상태에 노출시키고 논에는 벼, 밭에는 과 등의 작물을 심고 그 외 과수, 임야는 채취상태(잡초서식)에서 토양상태에 따라 물을 주입(관개)을 하고 강우와 관개에 의한 배수량의 시간에 따른 변화를 그림 3-5에 도시하였다. 이들 강수량 및 관개량으로부터 함양율을 산출한 결과 토양배수상태 및 실내 투수시험에서 매우양호하였던 오송(전의)-논, 오송(전의)-밭의 함양율은 다른 시료에 비해 현저히 높지는 않았다. 실측시험에서는 오송(전의)임야 > 무주-밭, 무주-논 > 유구-임야 > 김해-밭 > 유구-논, 유구-밭 순으로 높았으며 이들 시료들의 함양율은 50% 이상이었다. 유효공극률실측시험에서 투수계수가 너무 낮아 시험이 불가능하였던 김제-논, 나주-논은 300여mm를 주입하였으나 함양율이 3%, 4%로 매우 낮았으며 실제로 비가 온 후에는 빗물이 거의 토양으로 내려가지 못하고 증발산(특히 증발)에 의해 수위(토양 위 수위)가 낮아졌다. 두 시료는 거의 지하침투가 일어나지 않았으며 완전포화시키기 위해 아래에서 위로 물을 주입하였을 때에도 거의 변화를 보이지 않았다. 김해-논과 화성-논은 시험 전 태양광에 직접 노출된 관개로 표면으로부터 20여 cm 깊이까지 균열(건열)이 발달되어 관개에 의한 배수량이 많아 함양율이 과장되었으나 실제로 여름에 논토양의 표면상태에 따라 논에서의 함양율이 매우 높을 수도 있음을 간접적으로 유추할 수 있다.

이렇듯 지하수함양율은 단순히 토성, 배수상태, 투수계수 등으로만 산출, 추정하기는 어려우며 토양의 물리적인 특성을 충분히 고려하고 이와 더불어 식생에 대한 증발산을 고려하여야 할 것이다. 현장에서 상세한 조사자료 없이 기존 자료들을 활용하여 토성, 토지이용, 식생 등의 영향을 고려하여 함양율을 추정하는 방법을 미국 토양보존국에서 개발하였으나 이를 우리나라에 지형, 지질, 토양 특성에 바로 활용하는데에는 다소 어려움이 있지만 현재까지 수정된 모델이 개발되어 있지 않은 관계로 조사자료가 충분하지 않을 경우 많이 활용하고 있는 실정이다.

3) SCS방법에 의한 지하수함양을 추정

미국 토양보존국(U.S. Soil Conservation Service)에서 개발한 SCS방법은 직접유출량의 크기에 직접적으로 영향을 미치는 인자로서 유역을 형성하고 있는 토양의 종류, 토지이용상태, 식생피복의 처리상태 및 토양의 수문학적 조건 등을 고려하여 이들 인자들이 직접유출에 미치는 복합적인 영향을 양적으로 표시하는 것으로서 강수가 있기 이전의 선행토양함수조건도 고려하였다. SCS방법으로 직접유출량을 산출하고 이로부터 다시 함양량을 산출하였다.

(1) 수문학적 토양군의 분류

한 유역의 토양특성은 강수로 인한 유출과정이 직접적인 영향을 미친다. 토양은 성질에 따라 침투능이 상이하므로 총유량 중 직접유출량의 크기도 다를 수 밖에 없다. 그런데 토양의 성질을 양적으로 표시하는 것이 어려움에 따라 SCS는 유출에 영향을 미치는 토양의 종류나 토지이용 및 관리상태 등을 기초로 하여 수문학적인 토양피복군(Hydrological soil group)을 4가지 그룹으로 분류하였으며 토지이용과 피복상태, 수문토양군별로 유출곡선지수를 정리하여 제시하였다. 토양은 성질과 종류에 따라 크게 A, B, C, D 4가지의 형태로 나뉘어 질 수 있는데 이들 토양에 대한 침투능은 A, B, C, D 순으로 작아지며 유출률은 반대로 커지는 관계가 있다 (표 3-11(가), 윤용남, 1998).

(2) 유역의 토지이용상태, 식생피복처리상태 및 토양의 수문학적 조건

총우량과 직접유출량간의 관계는 유역의 토양종류 뿐만 아니라 유역의 토지이용상태와 처리상태에 따라서도 크게 좌우된다. SCS는 주로 농경지역에 대해 토지이용상태, 식생피복처리상태 및 토양의 수문학적 조건 등에 부합하는 토양-피복형 유출곡선지수(CN, Runoff Curve Numver)를 4가지 토양군별로 부여하여, 토양형과 피복상태 및 불투수율에 따라 총우량에 대한 직접유출량의 잠재력을 표시하는 유출곡선지수(runoff curve number, CN)를 구할 수 있다 (표 3-11(나), 윤용남, 1998).

(3) 유역의 선행토양함수조건

총강수량과 직접유출량간의 관계분석에 있어서 5일 혹은 30일 선행강수량은 한 유

역의 선행토양함수조건을 대변하는 지표로 흔히 사용된다. 즉 동일한 강수가 내린 경우 선행강수량이 많으면 유역 토양의 습윤도가 높으므로 유출률 즉 직접유출량이 상대적으로 많아질 것이나 선행강수량이 적을 경우에는 침투손실이 커지므로 직접유출량이 적어진다.

SCS에서 기준으로 삼고 있는 선행토양함수조건(Antecedent Soil Moisture Condition, AMC)은 1년을 성수기(growing season)와 비성수기(dormant season)로 나누고, 5일 선행강수량의 크기에 따라 유역의 선행토양함수조건(Antecedent Soil Moisture Condition, AMC)을 AMC-I, AMC-II, AMC-III 3가지로 구분하였다 (표 3-11(다), 윤용남, 1998).

(4) 총우량-직접유출량 관계 모형

SCS는 총우량과 직접유출량 간의 관계를 다음과 같은 식으로 표시하였다.

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (3-2)$$

여기서 P : 호우별 총우량 (mm)

I_a : 강수 초기의 손실우량 (mm)

S : 유역의 최대잠재보유수량(Potential Maximum Retention, mm)

Q : 직접유출량 (mm)

또한 SCS는 초기손실 I_a 는 유출이 시작되기 전에 생기는 차단, 침투, 지면저류 등을 포함하며 최대잠재보유수량 S와는 아래식으로 가정하였다.

$$I_a = 0.2S \quad (3-3)$$

위의 두 식으로 부터 총우량(P)-직접유출량(Q) 관계를 구할 수 있다.

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P - 0.2S) + S} = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (3-4)$$

여기서 유역의 최대잠재보유수량 S는 토양이나 토지이용 및 식생피복처리상태 등 수문학적 토양-피복형(hydrologic soil-cover complexes)의 성질을 대변하는 것으로서 한 유역의 유출능력을 표시하는 유출곡선지수 CN과는 다음과 같은 관계가 있다.

$$CN = \frac{25400}{S + 254} \quad \text{혹은} \quad S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3-5)$$

그러므로 구해진 유출곡선지수 CN을 구하여 윗식에 대입함으로써 최대잠재보유수량 S를 구할 수 있다. 그러나 최대잠재보유수량 S는 선행토양함수조건(AMC)에 따라 상이한 값을 가지며 위에서 구한 Q는 AMC-II의 조건에서의 유출곡선지수 CN으로부터 구한 값이므로, 각 선행토양함수조건 AMC-I, AMC-II, AMC-III에 아래의 식으로 유출곡선지수 CN을 구함으로써 각 조건에 맞는 총우량(P)-직접유출량(Q) 관계로부터 직접유출량 Q를 구하여야 한다.

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)} \quad (3-6)$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)} \quad (3-7)$$

표 3-11 SCS방법에 의한 직접유출량 산출에 따른 토양군, CN, AMS 분류기준
(가) 토양의 성질 및 종류에 따른 토양형의 분류

토양형	토양의 성질	토양 종류
TypeA	- 낮은 유출률 - 침투율이 대단히 크며 자갈이 있는 부양질 - 배수 매우 양호	모래, 자갈, 사토, 양질사토, 양질세사토, 세사양토
TypeB	- 침투율이 대체로 크고, 돌 및 자갈이 섞인 사질토 - 배수 대체로 양호	미사질양토, 양토
TypeC	- 침투율이 대체로 작고, 세사질 토양층 - 배수 대체로 불량	사질식양토
TypeD	- 높은 유출률, 침투율이 대단히 작고, 점토질 종류의 토양으로 거의 불투성 - 배수 대단히 불량	식양토, 미사질식양토, 사질식토, 미사질식토, 식토

SCS방법으로 경기 화성지구와 전북 무주지구 각 구역에서의 직접유출량을 산출한 후 전체 강수량에서 직접유출량을 제외하여 함양량을 구하였다. SCS방법은 직접유출이 시작되기 전 차단, 침투, 지면저류 등을 고려하였으며 식생, 피복상태, 토지이용 등이 CN을 산정하는데 충분히 고려되었으므로, 전체 강수량에서 본 방법으로 산출한 직접유출량을 제외한 값을 그대로 함양량으로 보아도 큰 무리가 없을 것으로 사료된다. 두 조사지역에 대한 증발산 실측자료가 부족한 관계로 본 연구의 함양을 산정에서는 증발산을 직접 다루지 않았다.

표 3-11 (계속)

(나) 농경지역 및 삼림지역의 토양-피복형별 유출곡선지수, CN
(AMC-II, $I_a=0.2S$ 일 때; 윤용남, 1998)

토지이용상태	식생피복처리상태	토양의 수문학적 조건	토양형			
			A	B	C	D
휴경지	경사경작	—	77	86	91	94
이랑경작지	경사경작	배수나쁨	72	81	88	91
	경사경작	배수 좋음	67	78	85	89
	등고선경작	배수나쁨	70	79	84	88
	등고선경작	배수 좋음	65	75	82	86
	등고선, 테라스경작	배수나쁨	66	74	80	82
	등고선, 테라스경작	배수 좋음	62	71	78	81
조밀경작지	경사경작	배수나쁨	65	76	84	88
	경사경작	배수 좋음	63	75	83	87
	등고선경작	배수나쁨	63	74	82	85
	등고선경작	배수 좋음	61	73	81	84
	등고선, 테라스경작	배수나쁨	61	72	79	82
	등고선, 테라스경작	배수 좋음	59	70	78	81
콩과식물 또는 윤번초지	경사경작	배수나쁨	66	77	85	89
	경사경작	배수 좋음	58	72	81	85
	등고선경작	배수나쁨	64	75	83	85
	등고선경작	배수 좋음	55	69	78	83
	등고선, 테라스경작	배수나쁨	63	73	80	83
	등고선, 테라스경작	배수 좋음	51	67	76	80
목초지 또는 목장		배수나쁨	68	79	86	89
		배수보통	49	69	79	84
		배수 좋음	39	61	74	80
	등고선경작	배수나쁨	47	67	81	88
	등고선경작	배수보통	25	59	85	83
	등고선경작	배수 좋음	6	35	70	79
		배수 좋음	30	58	71	78
초지		배수나쁨	45	6	77	88
		배수보통	36	60	73	79
		배수 좋음	25	55	70	77
관목숲	매우 듅성듅성	—	56	75	89	91
농가		—	59	74	82	86

표 3-11 (계속)

(다) 선행토양함수조건의 분류 (윤용남, 1998)

AMC Group	5일선행강수량, P_5 (mm)		구 분
	비성수기	성수기	
AMC-I	$P_5 < 12.70$	$P_5 < 35.56$	유역의 토양은 대체로 건조상태에 있어서 유출률이 대단히 낮은 상태
AMC-II	$12.70 < P_5 < 27.94$	$35.56 < P_5 < 53.34$	유출률이 보통인 상태
AMC-III	$27.94 < P_5$	$53.34 < P_5$	유역의 토양이 수분으로 거의 포화되어 있어서 유출률이 대단히 높은 상태

경기 화성지구를 7개의 유역으로 나누어 각 유역별로 함양율을 산출한 결과 그림 3-6(가)에서 보는 바와 같이 매송-비봉유역은 36%로 가장 낮고 팔탄-봉담-정남유역은 60~96%로 가장 높다. 전북 무주지구는 6개의 유역으로 나누어 각 유역의 함양율을 산출하였는데 적상유역(적상면)과 무풍유역(무풍면)이 가장 높고, 설천유역(설천면)

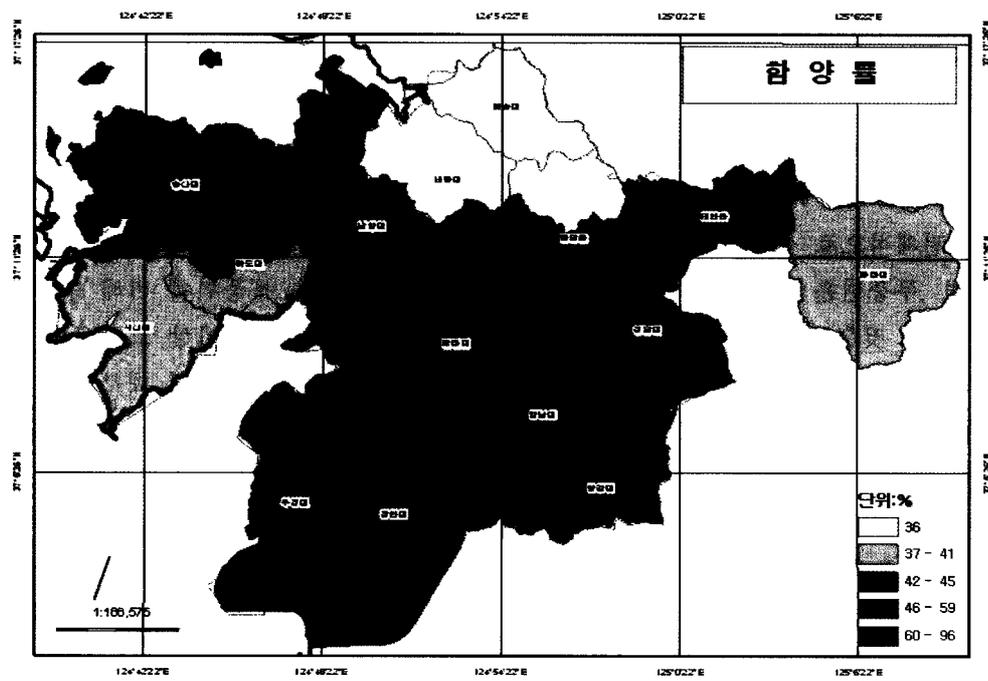


그림 3-6 경기 화성지구와 전북 무주지구의 함양율도
(가) 경기 화성지구

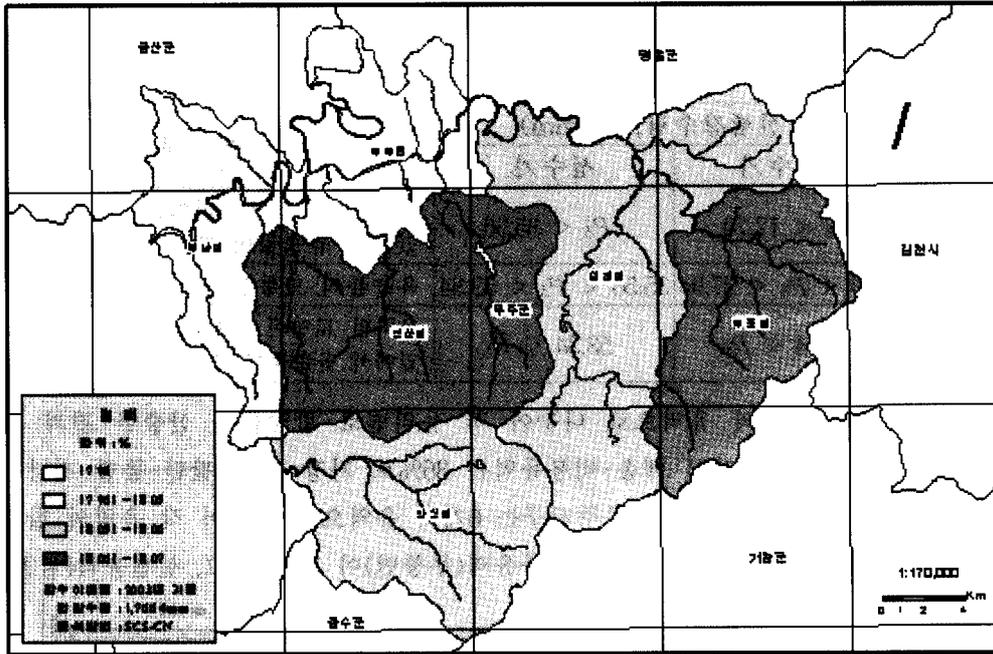


그림 3-6 (계속) (나) 전북 무주지구

> 안성유역(안성면) > 부남유역(부남면) > 무주유역(무주읍) 순으로 무주읍이 가장 낮았다. 그러나 화성지구와는 달리 편차가 크지 않고 대부분 17%~18%내외였다. 무주지구는 전체적으로 산악지역에 해당하며 경사가 비교적 급하다 산림이 우거진 설천면, 적상면, 무풍면은 함양율이 높으나 이 중 설천면이 적상면, 무풍면에 비해 함양율이 다소 낮은 것은 지형경사가 더 급하고 지역의 절반이상이 700m이상 고지대로 다른 두 지역에 비해 지표유출이 더 많을 것으로 사료된다. 그리고 적상면 대부분은 퇴적암류가 분포되어 있어 투수계수가 다른 지역에 비해 더 높아 함양율이 가장 높은 것으로 추정된다. 함양율이 높은 지역은 토지이용 등에 관계없이 수질보전구역으로 지정, 관리되어야 한다. 경기 화성지구의 팔탄면, 봉담면, 정남면, 그리고 전북 무주지구의 적상면, 무풍면은 관련 지자체 등에서 보다 정밀한 조사를 통해 수질보호, 보전구역으로서 철저히 관리되어야 지역주민들이 맑고 깨끗하고 풍부한 수자원을 오래도록 공급받을 수 있다. 함양지역에 대한 감시/보전지구로의 선정은 DRASTIC 작성 및 질산성질소도 작성 시 주요인자로 고려되므로 이에 대하여는 앞서 3장 나와 마에 상술되어 있다.

라. 오염발생부하량 및 부하량도 작성 기능

오염발생부하량도는 환경부에서 지정한 오염발생부하량 산정방법을 기본모델로 하여 작성한다. 이 방법에 따르면, 잠재오염원은 토지, 생활하수시설, 산업폐수시설, 축산폐수시설, 양식장시설의 5가지로 분류되며, 각 잠재오염원별 특성에 따른 오염발생부하량은 다음과 같다.

1) 생활하수 발생부하량

생활하수 발생부하량은 인구수에 발생부하 원단위를 적용하여 산출하고 있으며, 추가적으로 시가화지역인지, 비시가화 지역인지를 고려하게 된다.

$$L_D = \Sigma P_D \lambda_D \quad (3-10)$$

P_D : 구역내 인구

λ_D : 인구발생부하 원단위

표 3-12 인구발생부하 원단위

구 분	속성코드	단 위	산출치 및 적용치		
			BOD	T-N	T-P
시가화수거식발생부하기본원단위	λ'_{ce}	g/일/인	65	15	1.63
시가화수세식발생부하기본원단위	$\lambda'_{ce'}$	g/일/인	65	15	1.63
비시가화수거식발생부하기본원단위	$\lambda'_{c'e}$	g/일/인	54	15	1.63
비시가화수세식발생부하기본원단위	$\lambda'_{c'e'}$	g/일/인	54	15	1.63

2) 산업폐수 발생부하량

산업폐수 발생부하량은 산업폐수량에 업종별 발생농도를 적용하여 산출한다.

$$L_I = \Sigma Q_i \lambda_i \quad (3-11)$$

Q_i : 업종별 산업폐수량(m³/일)

λ_i : 업종별 발생농도 (g/m³)

표 3-13 업종별 산업폐수 발생농도

(g/m³)

표준산업분류	발생농도		
	BOD	T-N	T-P
육지동물 가공, 처리시설	1,170	60.0	11.0
수생동물 가공, 처리시설	1,090	56.4	10.4
과실 및 채소가공, 저장 처리시설	560	32.5	6.6
동식물성 유지제도시설	1,230	62.8	11.4
낙농품 제조, 가공시설	1,100	56.9	10.5
아이스크림 및 식용빙과류 제조시설	1,100	56.9	10.5
곡물가공시설	560	32.5	6.6
전분 및 당류제도시설	2,230	107.9	18.5
동물 사료제도시설	560	32.5	6.6
빵, 곡분과자 제조시설	2,050	99.7	17.2
설탕 제조시설	370	24.0	5.3
코코아제품 및 설탕과자제도시설	370	24.0	5.3
곡수 및 유사식품 제조시설	2,050	99.7	17.2
조미료 및 식품첨가물 제조시설	1,920	93.9	16.3
커피, 차류 및 조제수프등 제조시설	560	32.5	6.6
두부 및 유사식품 제조시설	730	40.2	7.8
인삼식품 제조시설	560	32.5	6.6
건강식품 제조시설	560	32.5	6.6
해조류 가공, 저장시설	1,090	56.4	10.4
달리 분류되지 않은 식료품 제조시설	560	32.5	6.6
주정제도시설	25,136	1,140.9	181.2
소주, 탁주, 청주, 과실주제도시설	407	25.6	5.6
맥아 및 맥주 제조시설	1,415	71.1	12.7
비알콜성 음료품 제조시설	444	27.3	5.8
담배 제조시설	532	38.7	1.4
제사, 방직 및 직조시설	1,198	21.0	4.4
섬유표백, 염색 및 가공시설	631	37.8	16.4
기타 섬유제품 제조가공시설	356	73.0	13.3
가죽, 모피가공 및 제품제도시설	2,000	125.5	20.1
신발제도시설	203	16.4	4.1
제재, 목재 가공 및 톱크 제조시설	107	1.1	0.0
펄프, 종이 및 종이제품 제조시설	737	19.5	2.9
출판, 인쇄시설	950	35.0	9.0
석유정제시설	136	14.4	0.6

표준산업분류	발생농도		
	BOD	T-N	T-P
유탄유 및 그리스 제조시설	69	17.9	1.0
달리 분류되지 않은 석유정제시설	416	44.1	1.9
가스제조시설	825	189.9	0.1
소다회, 가성소다 및 알카리 제조시설	9,920	14.7	0.7
산업용화학물질제조시설	383	143.5	1.3
유연제, 식물성 염료액기스 제조시설	550	32.1	6.6
염료 및 기타 착색제 제조시설	2,551	354.7	2.6
석탄화학물 제조시설	5,362	594.6	2.0
산업용화학물질제조시설	1,132	86.8	2.2
달리 분류되지 아니한 기초화학물 제조시설	945	186.0	8.3
비료 제조시설	809	376.3	1,130.0
합성고무 제조시설	139	21.4	6.3
합성수지 제조시설	604	55.1	10.7
재생섬유소 및 그 유도체 제조시설	629	161.0	0.0
살균, 살충제 및 농업용 화학제품 제조시설	5,002	156.7	1,002.0
도료, 잉크 및 유사제품 제조시설	1,562	13.3	10.4
의약품, 의료용 화합물 및 생약제제 제조시설	1,088	20.4	7.5
비누 제조시설	795	0.0	0.0
계면활성제 및 합성세제 제조시설	5,433	11.9	0.5
치약 제조시설	816	149.0	9.0
화장품 제조시설	501	98.1	2.3
왁스 및 표면광택제 제조시설	40	10.4	0.6
달리 분류되지 아니한 비누, 세정광택제, 화장품제조시설	1,561	154.4	8.5
방향유 및 관련제품 제조시설	410	43.9	8.0
접착제 및 젤라틴 제조시설	406	27.7	7.3
화약 및 불꽃제품 제조시설	50	48.0	0.1
비감광성 기록매체 제조시설	350	26.6	0.2
사진용 화합물 및 감광재료 제조	203	1.7	1.4
가공염, 정제염 제조 및 고잡회수 처리시설	101	2.4	0.0
달리 분류되지 아니한 기타화학제품 제조시설	1,793	80.4	4.0
화학섬유 제조시설	705	46.4	8.3
고무제품 제조시설	249	33.4	38.9
플라스틱 제품 제조시설	481	110.7	267.4
유리 및 유리제품 제조시설	208	0.0	0.0
도자기 제조시설	83	0.0	0.0
요업제품 제조시설(도자기, 유리 제외)	79	0.0	0.0
시멘트, 석회, 플라스터 제조시설	19	0.0	0.0
시멘트, 석회 및 프라스터제품 제조시설	64	0.0	0.0
석제품 제조시설	80	0.0	0.0
달리 분류되지 않는 비금속광물 제조시설	22	0.0	0.0
제철시설	69	0.0	0.0
합금철강 제조시설	49	51.9	4.3
제강시설	35	37.3	3.1
달리 분류되지 아니한 제철 및 제강시설	16	28.4	1.4
열간압연, 압출 및 인발제품 제조시설	24	23.5	0.6
냉간압연, 압출 및 인발제품 제조시설	25	51.8	8.2
철강선 제조시설	24	40.6	2.0
강관 제조시설	68	162.2	3.1
달리 분류되지 아니한 철강, 압연, 압출, 연신 및 제관시설	39	66.8	0.2

표준산업분류	발생농도		
	BOD	T-N	T-P
달리 분류되지 아니한 기타 철강산업시설	42	34.3	29.9
구리 제련 및 정련시설	28	32.0	1.9
알루미늄 제련 및 정련시설	8	40.0	0.1
납 제련 및 정련시설	239	110.5	5.8
아연 제련 및 정련시설	63	53.5	1.6
달리 분류되지 아니한 비철금속 제련 및 정련시설	10	0.0	1.2
구리 압연 및 압출시설	35	67.5	1.2
알루미늄 압연 및 압출시설	27	29.6	0.9
달리 분류되지 아니한 비철금속 압연 및 압출시설	30	118.5	6.8
기타 비철금속 산업시설	73	46.8	6.5
금속 주조시설	22	73.2	0.0
조립제품 제조시설	885	38.5	43.4
절연선 및 케이블 제조시설	48	36.3	3.8
축전지 및 일차전지 제조시설	17	30.6	1.7
전구 및 조명장치 제조시설	16	2.5	0.1
영상, 음향 및 통신장비 제조시설	26	50.5	6.3
가구 제조시설	30	44.0	66.0
약기 제조시설	175	16.5	0.0
운동 및 경기용구 제조시설	81	58.0	9.2
달리 분류되지 않은 장난감, 장식품 및 일용품제조시설	67	2.9	3.3
화력발전시설	8	2.1	1.5
먹는 샘물제조시설	15	3.3	0.1
자동식사진처리	294	2.5	2.0
수산물판매장(면적 700m2이상)	1,126	54.6	10.1
병원시설(80병상이상)	137	21.6	3.3
폐수처리업의 폐수처리시설	47	8.1	0.1
세탁시설(용적2m2이상 또는 용수 1톤이상)	198	9.3	1.7
석탄광업시설(채탄능력 8000톤/월 이상)	22	0.0	0.0
금속광업시설	54	5.9	0.8
토사석채취, 가공시설	87	0.0	0.0
달리 분류되지않은 광업 및 채석업	35	0.0	0.0
산업시설의 폐가스, 분진, 세정, 응축시설	15	3.3	0.1
산업시설의 정수시설	15	3.3	0.1
이화학시험시설(면적 100m2이상)	104	13.3	0.3
도금시설	67	2.9	3.3
운수장비 수선 및 세차 또는 세척시설	58	51.6	8.8
위의 모든 분류에 속하지 아니하는 시설	30	2.3	0.3

자료 : 1. 국립환경연구원, 1997-1998, 폐수배출시설 표준원단위 조사연구(1,2)

3) 토지 발생부하량

토지 발생부하량은 토지지목별 면적에 발생부하 원단위를 적용하여 산출한다.

$$L_N = \sum A_{N_i} \lambda_{N_i} \quad (3-12)$$

A_N : 토지이용별 면적

λ_N : 토지 발생부하 원단위

표 3-14 토지 발생부하원단위

(단위 : kg/day/km²)

지목	BOD	T-N	T-P
전*	1.59	9.44	0.24
답*	2.30	6.56	0.61
임야*	0.93	2.20	0.14
대지*	85.90	13.69	2.10
기타**	0.960	0.759	0.027

자료 : * 환경부, 비점오염원 조사연구(1995)

** 환경처, 수환경정책자료집(1994)

4) 축산폐수 발생부하량

축산폐수 발생부하량은 축산두수에 발생부하 원단위를 적용하여 산출한다.

$$L_L = \sum P_L \lambda_L \quad (3-13)$$

P_L : 축산사육두수

λ_L : 축산 발생부하 원단위

표 3-15 축산폐수 발생부하 원단위 구분

구분	속성코드	단위	산출식
분발생부하량원단위	L_f	g/두/일	-
노발생부하량원단위	L_u	g/두/일	-
총폐수발생부하량원단위	L_G	g/두/일	$L_G = L_f + L_u$
폐수화분부하비	β_1	-	-
폐수발생부하량원단위	L_W	g/두/일	$L_W = \beta_1 L_f + L_u$
고형물발생부하량원단위	L_S	g/두/일	$L_S = (1 - \beta_1)L_f$

표 3-16 축산폐수 발생부하 원단위

구분	단위	젖소	한우	말	돼지	산양	사슴	개	가금	
β_1	-	0.15	0.05	0.05	0.20	0	0	0.05	0	
BOD	L_G	g/두/일	556.20	528.00	259.20	109.00	16.72	16.72	36.33	5.23
	L_f	g/두/일	516.60	484.80	241.20	96.00	11.52	11.52	32.00	5.23
	L_u	g/두/일	39.60	43.20	18.00	13.00	5.20	5.20	4.33	0
	L_W	g/두/일	117.09	67.44	30.06	32.20	5.20	5.20	5.93	0
	L_S	g/두/일	439.11	460.56	229.14	76.80	11.52	11.52	30.40	5.23
TN	L_G	g/두/일	161.82	116.80	77.60	27.70	9.49	9.49	9.23	1.09
	L_f	g/두/일	115.62	80.80	53.60	16.00	2.56	2.56	5.33	1.09
	L_u	g/두/일	46.20	36.00	24.00	11.70	6.93	6.93	3.90	0
	L_W	g/두/일	63.54	40.04	26.68	14.90	6.93	6.93	4.17	0
	L_S	g/두/일	98.28	76.76	50.92	12.80	2.56	2.56	5.07	1.09
TP	L_G	g/두/일	56.65	36.14	23.98	12.24	1.43	1.43	4.08	0.41
	L_f	g/두/일	54.12	34.34	22.78	11.20	1.09	1.09	3.73	0.41
	L_u	g/두/일	2.53	1.80	1.20	1.04	0.35	0.35	0.35	0
	L_W	g/두/일	10.65	3.52	2.34	3.28	0.35	0.35	0.53	0
	L_S	g/두/일	46.00	32.62	21.64	8.96	1.09	1.09	3.55	0.41

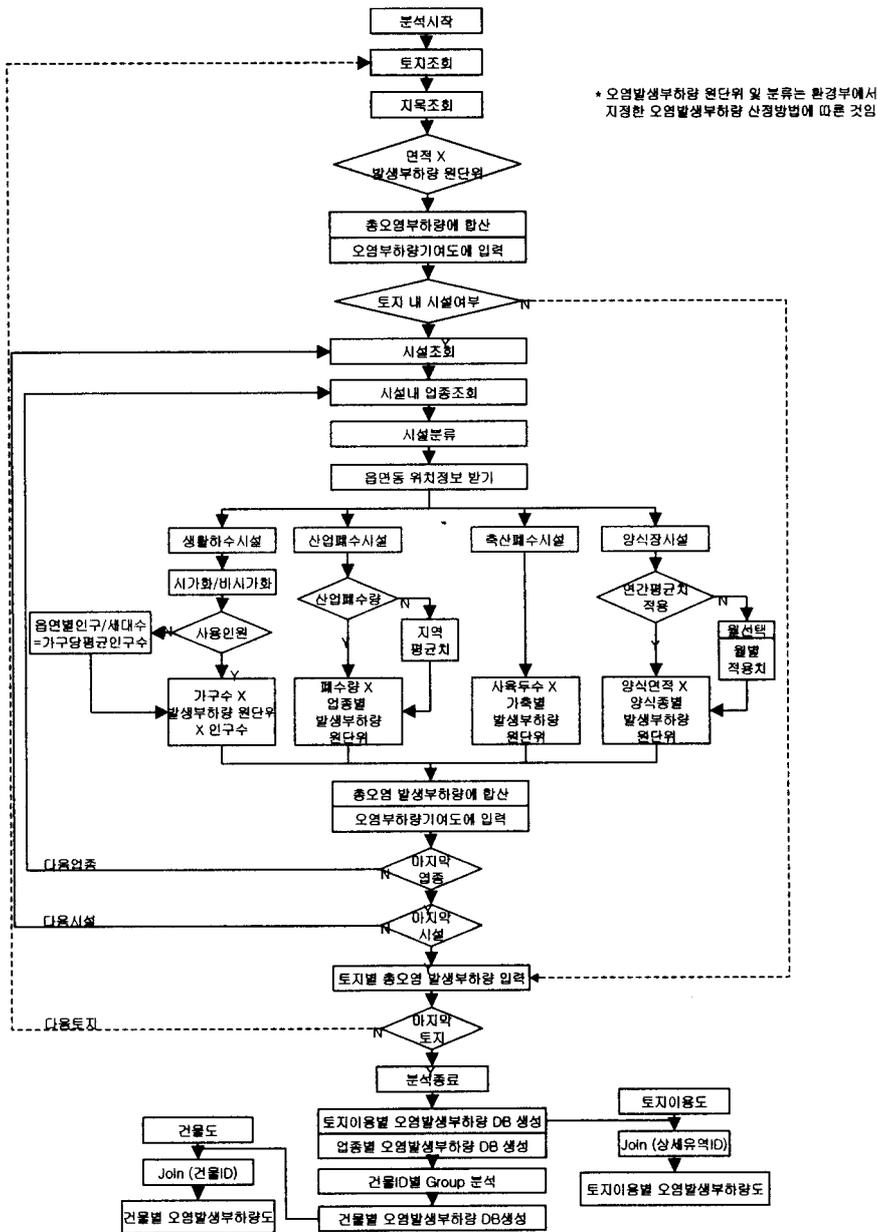


그림 3-7 오염발생부하량도 작성 알고리즘

본 연구에서는 위와 같이 환경부에서 지정한 업종·특성별 오염발생부하량 산정방법을 고려하여 시스템을 개발하는 한편, 구역과 토지이용을 경계조건으로 사용하여 오염발생부하량을 계산한다. 잠재오염원이 대수층에 미치는 영향을 지형과 토지이용에 따라 달리 나타낸다는 가정하에 구역과 토지이용을 고려한 것이다.

따라서, 본 연구에서는 구역내의 동일한 토지이용내에 존재하는 잠재오염원들의 오염발생부하량을 합산하여, 구역내 토지이용별 오염발생부하량을 계산할 수 있도록 구현하며, 건물·업종별 오염발생부하량을 계산할 수 있도록 한다.

점오염원별 오염발생부하량 분포를 볼 때에는 건물별 오염발생부하량 DB를 건물도와 조인하여 그 분포와 버퍼링 등을 수행할 수 있으며, 토지이용별 오염발생부하량 DB를 토지이용도와 연결하여 구역내의 토지이용별 오염발생부하량 분포를 살펴볼 수 있다. 업종별 오염발생부하량 DB는 건물의 상세한 오염발생부하량 내역을 살펴보는 데 사용한다.

오염발생부하량 분석 알고리즘을 구현하기 위해서는 토지이용도, 건물도, 구역도, 건물속성(잠재오염원), 토지, 생활하수시설, 산업폐수시설 등 각각의 오염발생부하량 원단위, 가구당 평균인구수, 산업폐수량 지역 평균치가 필요하다. 분석결과는 분석결과 MDB를 별도로 구축하여, 분석때마다 테이블을 생성하도록 한다.

토지이용도는 구역도와 중첩분석하여 구역경계가 반영된 토지이용도를 사용하며, 분석과정에서 생활하수시설의 분석요소인 사용인원수가 미기록 되어 있을 경우에는 면단위별로 입력되어 있는 인구통계자료를 이용하여 인구수를 분석하게 되어 있으나, 이 보다는 자료입력단계에서 미리 면별 가구당 평균인구수를 입력하는 것이 분석의 효율성면에서 바람직하다. 산업폐수량 역시 분석과정 중 미기재로 인해 다시 계산하는 것보다는 입력단계에서 고려되어 입력하는 것이 바람직하다.

건물의 속성은 공통되는 정보를 기준으로 생활하수시설, 산업폐수시설, 축산폐수시설, 양식장시설에서 각각 고려되어야할 속성을 감안하여, 업종상세ID로 관계를 맺도록 하였다.

7) 오염발생량

오염발생량 역시 앞서의 오염발생부하량과 유사한 단계를 거쳐 계산된다. 다만, 분석 과정중에 상하수도 시설 및 정화처리시설의 설치여부, 축사의 강우시 분뇨유출 여부 등 환경부에서 지정하지는 않았지만, 현지조사를 통해 조사된 오염원의 발생을 현격히 줄일 수 있는 시설의 여부에 따라, 당초 계산되어진 오염발생부하량에 삭감지수를 곱하여 오염발생량을 계산하도록 한다.

상하수도 시설 및 정화처리시설이 갖추어져 있는 지역의 시설은 기 분석된 오염발생부하량에 정화처리시설의 운영상태에 따른 지수를 적용하였다. 특히 축산폐수시설은 강우시 분뇨유출 여부, 바닥재처리상태, 천장시설 여부, 분뇨창고 여부에 따라 오염발생부하량에 각 경우에 해당하는 지수를 적용하였다.

표 3-17 설비에 따른 오염발생부하량 삭감지수

적용대상	항 목	상 태		적용지수
모든 시설	정화처리시설	시설	효율양호	0.00
			일부처리	0.25
			처리미흡	0.50
			운영중지	1.00
			알수없음	0.50
	미시설	1.00		
축산 폐수 시설	강우시분뇨유출	유출	1.00	
		미유출	0.00	
	바닥재처리상태	불투수처리	0.00	
		일부처리	0.50	
		미처리	1.00	
	천장시설	시설	0.00	
		일부처리	0.50	
		미처리	1.00	
	분뇨창고	설치	0.00	
		미설치	1.00	

모든 시설에 있어서 정화처리시설이 설비되어 있고 처리효율이 양호할 경우에는 오염원에서 제외하였다. 이는 세탁소, 사진관 등과 같은 특성을 가진 잠재오염원을 오염원에서 제외하기 위함이다. 세탁소와 사진관과 같은 잠재오염원은 오염물질의 발생은 명확하나 오염물질의 처리과정이 철저하게 제도화되고, 혹 이를 어긴다 하더라도 확인하기가 곤란하다. 아울러 상하수도 시설이 완비되어 있는 시가지지역에 대해서는 오염배출량을 분석하는데 많은 어려움이 있다. 따라서 이러한 시설을 오염원으로 분류하지 않았다. 이러한 시설을 오염원에서 제외하기 위해 정화처리시설의 지수를 적용하였다. 정화처리시설의 지수는 모든 건물에서 반드시 기입되는 항목이며, 설치되어 있는 경우 효율양호, 일부처리, 처리미흡, 운영중지, 알수없음의 5등급으로 나누어 분

석하였다. 정화처리시설의 효율이 양호한 경우 오염발생부하량은 있으나 배출량은 없는 것으로 분석하였으며, 이 지수는 앞서 설명한 세탁소, 사진관 등과 같은 잠재오염원에 설정할 수 있는 지수이다. 정화처리시설이 미설치되어 있을 경우에는 오염발생부하량이 모두 배출되는 것으로 분석하였다.

축산폐수시설에 적용되는 지수항목으로는 강수시분뇨유출 여부, 바닥재 처리 여부, 천장시설 여부, 분뇨창고 설비 여부가 있다. 각 시설이 모두 설비되어 있고, 양호한 것으로 판단되는 축산폐수시설에 대해서는 오염배출부하량을 0으로 하여 오염원에서 제외하였다. 각 시설 중 한가지라도 만족하지 않을 경우에는 만족하지 않는 항목의 지수들 중 가장 최대값을 적용하여 분석하였다.

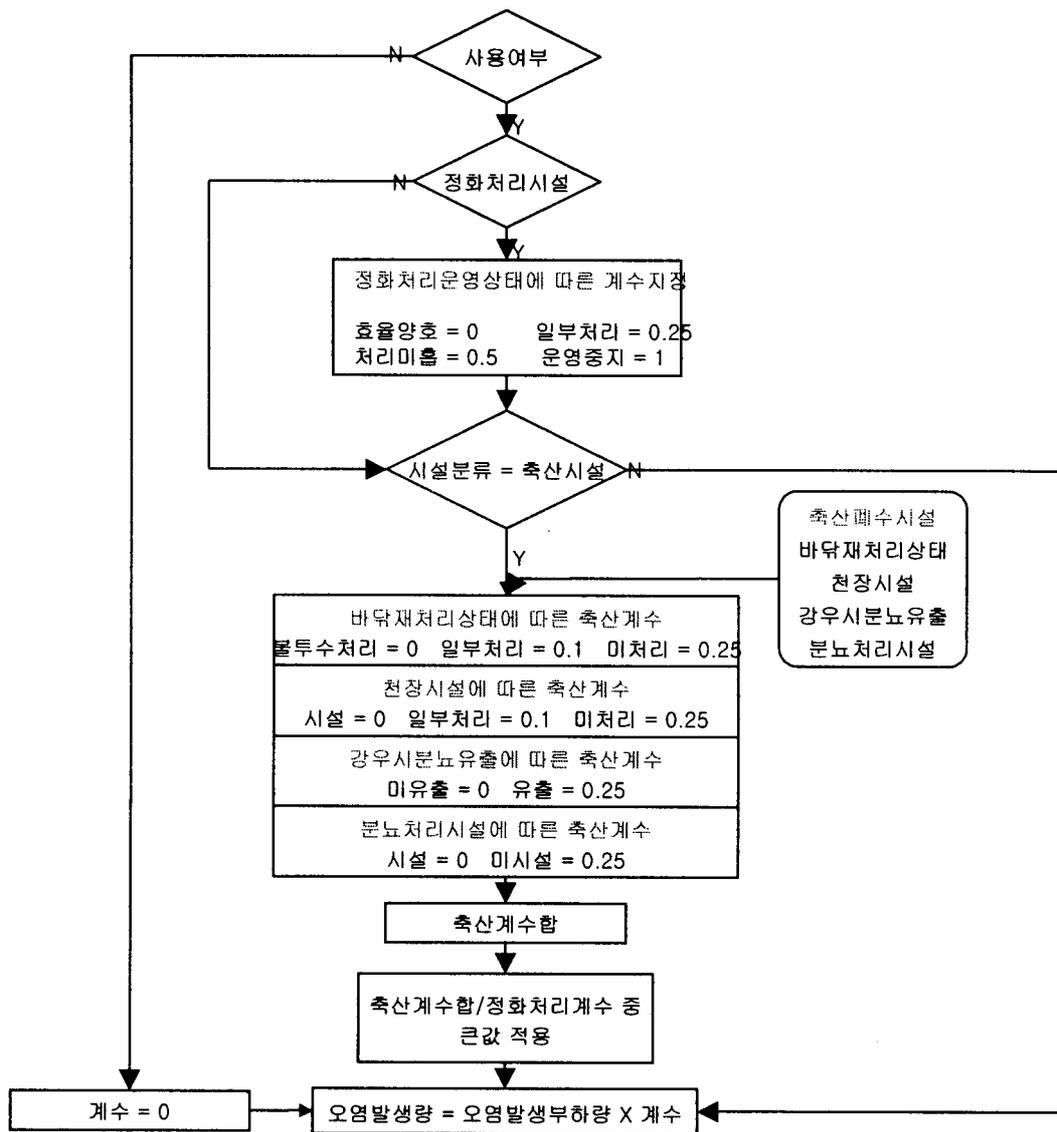


그림 3-8 오염발생량 분석 중 설비에 따른 삭감지수 적용 알고리즘

마. 질산성질소 오염지수도 작성 기능

1) 오염지수 개발의 개념모형과 단계

질산성질소에 의한 지하수 오염가능성을 예측평가하기 위한 오염지수(pollution index)를 산출하기 위하여 다음과 같은 단계별 분석을 실시하였다.

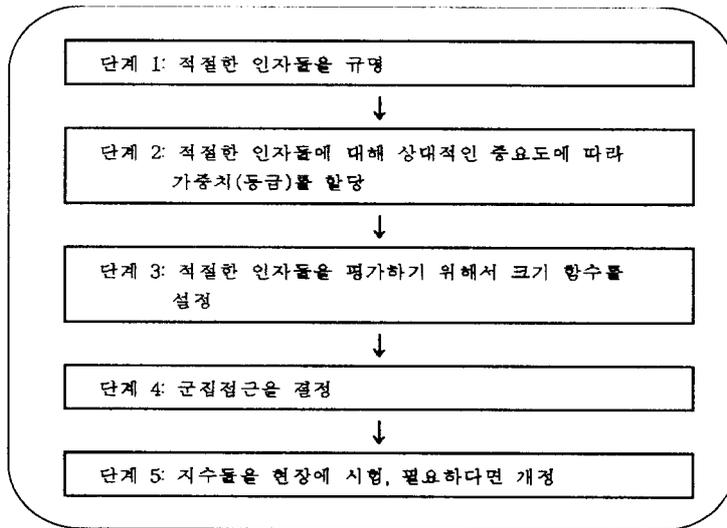


그림 3-9 오염지수 산출 단계

1단계 : 인자 규명 - 중요한 인자들을 서술:

환경의 특성, 오염취약성, 오염원의 형태에 따른 잠재성의 지시자로서 이
용될 수 있는 것

2단계 : 가중치 부여

상대적으로 중요한 가중치를 부여하거나 등급을 부여

3단계 : 인자 평가를 위한 함수의 설정

기준에 보고된 접근법을 기초로 할 수 있으며 또는 일반적인 균집과정과
델파이 접근법과 같은 기법을 근간으로 할 수 있음.

4단계 : 총합 접근 방식에 의한 수치화

가중치가 부여된 자료의 균집들을 마지막 수치지수로 전환

5단계 : 현장 적용과 검증 - 마지막 단계는 현장 검증.

복합적으로 수집된 자료들과 통계적인 실험 결과들을 단순화, 비교 검증

2) 지하수의 질산성질소 농도에 영향을 주는 인자

질산성질소에 관련된 대표적 영향인자를 나열하면 다음과 같다

- ① 비료 시비강도
- ② 비료를 시비하는 시기
- ③ 질소 비료의 효율성(use efficiency)
- ④ 강우형태와 관개방법
- ⑤ 토양 종류
- ⑥ 지하수면까지 깊이와 대수층 종류
- ⑦ 관정 깊이
- ⑧ 화학적 환경 (chemical environments)

전술한 8개의 인자들은 질산성 질소가 지하수로 유입될 가능성을 보여주는 수리지 질학적, 물리적, 생화학적 인자들의 복합적인 함수이다. 그러나 현장에서 이러한 인자들 모두를 직접 획득할 수 없는 경우가 대부분이다. 따라서 이 중 4개의 중요한 인자들을 선정하여 순화된 모델 개발을 하고, 이 모델의 적용성을 검토, 수정, 보완하고자 한다.

이러한 측면에서 선정된 4가지의 최종 인자는 다음과 같다

- ① 질소비료의 시비
- ② 강우 또는 관개에 의한 함양
- ③ 토양의 조직
- ④ 지하수면까지 깊이

이들 4가지 인자를 모델개발의 요인으로 선정한 이유는 다음과 같이 요약할 수 있다:

- ① 질산성 질소의 침출을 조정하는 매우 중요한 역할

- ② 농업활동에 의한 지하수의 오염을 산정할 수 있는 가장 보편적인 인자
- ③ 서로 다른 지점을 비교 평가하는데 이용가능
- ④ 지하수질 관측의 필요를 최소화
- ⑤ 자료를 얻기 쉬우며 이용과 평가가 쉽다
- ⑥ 자료들은 서로 상호 교환이 쉽다
- ⑦ 직접 및 간접적으로 다른 인자들과 연관되어 있다
(작물인자, 작물형태, 그리고 물리적, 생물학적, 화학적 인자들).
- ⑧ 최소한의 자료를 이용하여 가장 빨리 위해성을 평가할 수 있다.

3) 인자별 가중치 설정

① 질소비료의 시비강도에 대한 등급 설정

질산성 질소의 시비강도는 최종 인자 중의 하나임. 그러나, 현실적으로 질산성 질소의 시비강도를 정량적으로 알 수 없으므로, 조사지역의 토지이용도 인자로 대체하였다.

: 토양군은 다음과 같이 세부구분으로 나누어 인자의 등급을 설정하였다

- (1) 농경지, (2)거주지/산업지, (3) 산림지, (4) 하천, (5) 조석에 의한 영향 위치

표 3-18 토지이용특성에 따른 등급 분류

범 위	등급
농경지	10
거주지/산업지	7
산림지	5
하천	3
조석에 의한 영향	1

질소비료의 시비가 주로 행해지는 농경지에서 질산성 질소에 의한 오염이 가장 심할 것으로 예상하여 가중치 10을 할당하였으며, 거주지/산업지에 해당하는 지역은 가정에서 쓴 생활하수나 공장에서 나오는 폐수에 의한 영향을 고려하여 가중치 7을 할

당하였고, 산림지에서는 토양미생물에 의한 질소생성과정을 고려하여 중간값인 가중치 5를 할당하였으며, 하천지역은 시비된 질소비료가 지하수체와 토양매질을 통과하며 회석된 후 유입되는 것을 고려하여 가중치 3을 할당하였고, 조석에 의해 영향을 받고 있는 지역은 가중치 1을 할당하였다.

② 지하수 함양량의 등급 설정

연구지역의 지하수 함양량은 선행 연구된 농촌지하수관리조사보고서에서 계산된 자료를 이용하였다(농어촌지하수관리조사보고서, 2001). 지하수 함양량의 산정 방법은 다음의 세 가지 방법을 사용하였다.

- 5대강 유역별 강우함양계수에 의한 지하수함양량 산정
- 해안유역의 회귀방정식에 의한 지하수함양량 산정
- 물수지분석에 의한 지하수함양량 산정

③ 토양특성에 따른 등급 설정

토양의 특성은 물의 유출, 투수성 및 내부배수와 관련된다. 따라서 정밀토양도(농촌진흥청, 1973)의 배수상태에 의하여 다음과 같이 구분하였으며, 아래의 표와 같이 등급을 설정하여 가중치를 부여하였다.

- 불량(Poorly drained)
- 약간불량(Imperfectly drained)
- 약간양호(Moderately well drained)
- 양호(Well drained)
- 매우양호(Somewhat excessively drained)

표 3-19 토양의 배수특성에 따른 등급설정과 가중치

범 위	등급
매우 잘 배수되는 토양 (Sand to Loam sand)	10
매우 잘 배수되거나 적당히 배수되는 토양 (Loam to Loam silt loam)	6
배수가 안되는 토양 (Silt clay to Clay soils)	2

④ 지하수면의 심도에 따른 등급 설정

지하수면의 심도에 따른 등급은 대수층의 민감도를 평가하는 DRASTIC Method (Aller et al., 1987)의 등급과 가중치를 기준으로 설정하였다.

3) 현장 연구지역에 대한 적용

① 연구 지역

경기도 화성시 화남2지구. 서해안과 접해있으며, 북측은 시화호를 경계로 하고, 남측은 남양호를 경계로 한다. 연구지역에는 226개의 조사관정이 분포하며, 지하수관정의 위치와 관련 상세정보는 농촌지하수 관리조사보고서로부터 선별 취합하였다. 4개의 인자(토지이용 현황, 강우로부터 함양, 토양의 종류, 지하수면까지 깊이)에 대한 등급 구분 실시하였다.

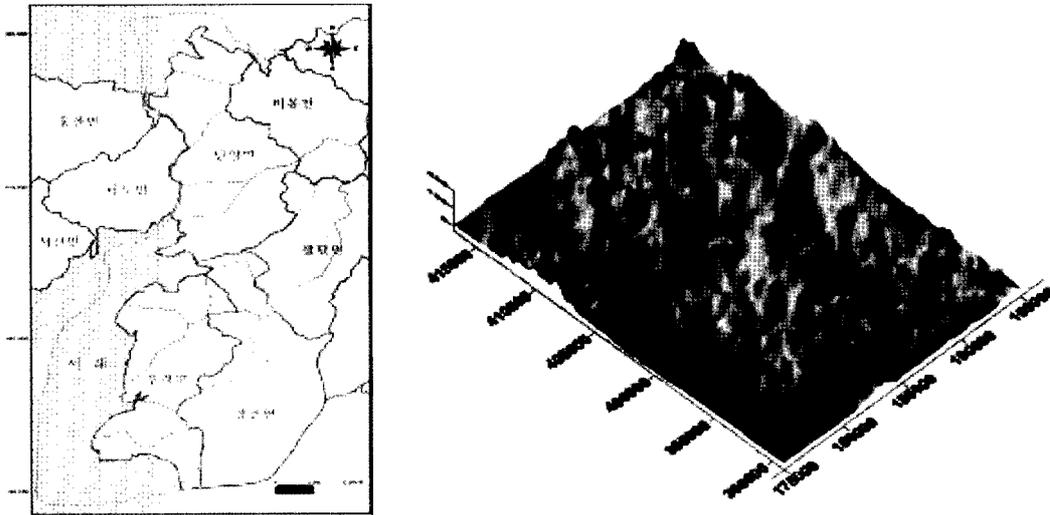


그림 3-10 연구지역의 위치도

② 연구지역의 지형

- 서해안의 리아스식 해변에 위치하며, 대부분 200m 보다 낮은 구릉을 형성하고 있음.

- 북부지역에는 비교적 산계의 발달이 뚜렷하며,
- 남부의 편암 분포지역은 구릉성 평야지역을 형성.
- 중앙부의 남양화강암 분포지역은 넓은 충적평야를 이루고 있음.

③ 질소비료의 시비강도에 대한 등급 설정

이 지역에서는 전체면적 중 농경지가 39.4%로 주를 이루고 있으며, 밭이 농경지면적 중 66%를 차지하고 있다. 이외에도 임야가 41%, 과수원이 0.15%를 차지한다.



그림 3-11 화성시 화남2지구의 토지이용특성도

④ 지하수 함양량의 등급설정

연구지역의 지하수 함양량은 선행 연구된 농촌지하수관리조사보고서에서 계산된 자료를 이용하였다 (농어촌지하수관리조사보고서, 2001).

표 3-20 연구지역내 소유역별 지하수 함양량
분포 정리

소유역	유역 면적 (ha)	평균 강수량 (mm)	한강유역	해안지역	물수지 분석	평균 함양량
H-01	849	1,547.20	1,589.42	659.73	2,943.71	1,730.95
H-02	1,194	1,397.17	2,018.55	951.43	3,738.48	2,236.15
H-03	1,941	1,375.65	3,230.87	1,603.06	5,983.78	3,605.90
H-04	656	1,324.43	1,051.28	500.16	1,947.04	1,166.16
H-05	5,463	1,404.14	9,315.64	4,898.57	17,253.17	10,485.79
H-06	1,333	1,453.11	2,343.76	1,070.85	4,340.79	2,585.13
H-07	1,079	1,493.90	1,950.29	853.40	3,612.07	2,138.59
H-08	966	1,466.76	1,714.43	757.82	3,175.24	1,882.50
H-09	2,832	1,531.98	5,249.67	2,404.97	9,722.73	5,792.46
H-10	778	1,477.19	1,390.59	600.68	2,575.47	1,522.25
H-11	946	1,489.70	1,705.20	740.99	3,158.14	1,868.11
계	18,057		31,559.7	15,031.66	58,450.62	35,013.99
평균	1,641.55	1,451.01	2,869.06	1,366.52	5,313.69	3,025.73

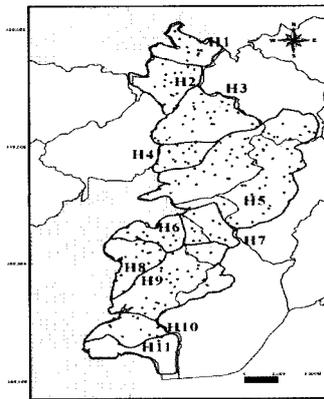


그림 3-12 연구지역의
소유역 및 지하수 관정
분포도

⑤ 토양특성과 지하수면의 심도에 따른 등급 설정

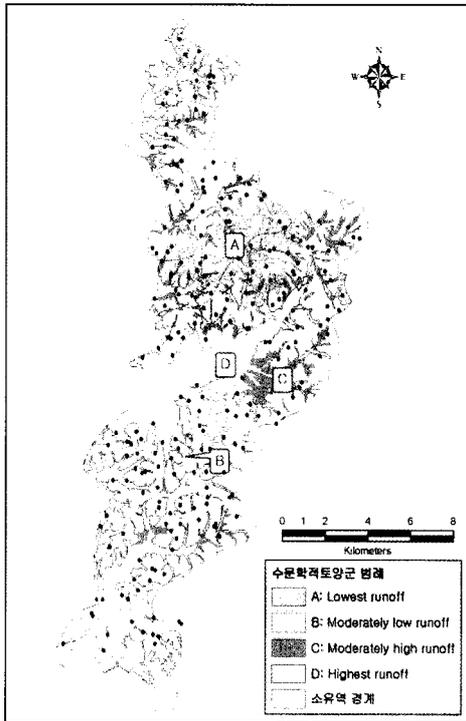


그림 3-13 토양특성의 구분과 등급

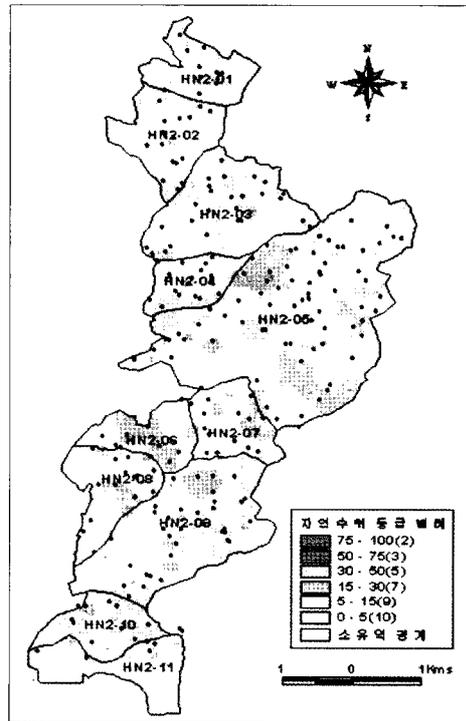


그림 3-14 지하수면 심도의 구분과 등급

4) 연구지역에 대한 질산성질소의 오염지수(Nitrate Pollution Index) 산출

전술한 바와 같이 지하수에 대한 4가지의 질산성질소 오염인자를 사용하여 오염가능성을 지시하는 오염지수(pollution index)를 각 관측공에 대하여 산정하였다. 다음의 표는 산정하는 예를 보여준다.

표 3-21 질산성질소 오염지수 평가의 예

관정 번호	X좌표	Y좌표	토지 이용도	함양량	토양의 종류	지하수면 까지의 깊이	질산성질소 농도 (9월)	질산성질소 농도 (6월)	질산성질소 오염지수
400084	182862.0738	419812.2466	5	8	6	10	4.1	3.6	120.0
200133	183770.9697	419257.5291	5	8	6	9	0.1	0.1	116.5
700072	183148.1771	419159.8508	10	8	2	9	14.0	13.2	125.5
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
400081	183596.0678	418461.6110	10	8	2	10	12.9	13.4	129.0

6) 도출된 질산성질소의 오염지수와 실제 현장 오염도의 상관성 분석

지하수 중의 질산성질소 농도는 6월과 9월의 시간적, 공간적 분포에서 거의 변화가 나타나지 않는다. 이러한 특성은, 이 지역에서의 지하수에 포함된 질산성질소의 오염현상이 단기적으로 나타나는 현상이 아니라 지속적으로 유지되는 현상임을 지시한다.

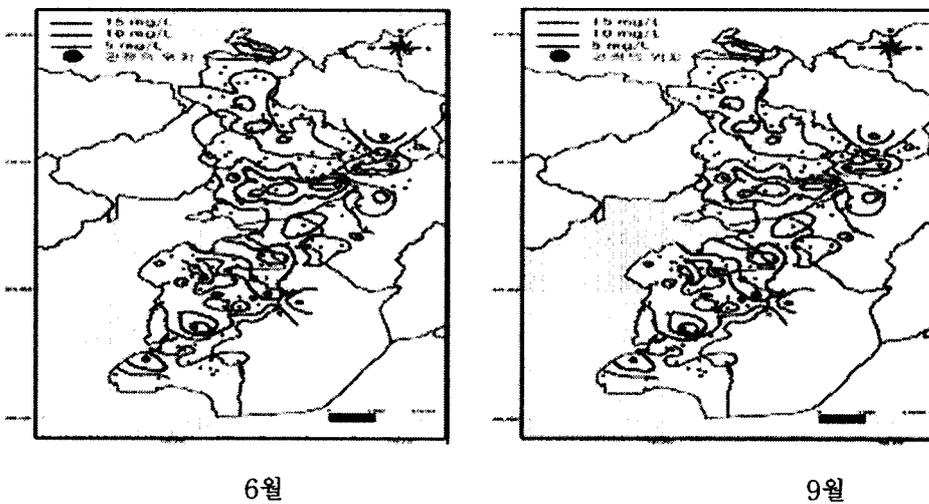


그림 3-15 연구지역에서 지하수 중 질산성질소의 계절별 분포.

질산성질소의 농도가 10mg/L 이상으로 높게 나타나는 지역에서는 토지이용 내지 축산시설의 존재 유무등과의 관련성에 대한 정밀조사가 필요한 것으로 판단된다. 또한, 6월과 9월의 질산성질소 농도가 크게 차이를 보이는 관정들은 강수, 지하수 이용, 시비 등 시기적으로 변화를 보이는 현상에 의해 영향을 받는 것으로 해석된다.

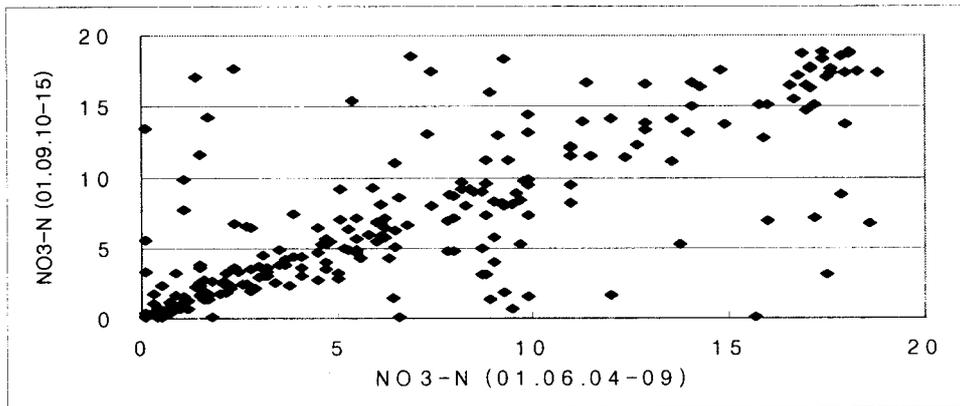


그림 3-16 6월과 9월의 지하수 중 질산성질소의 농도 비교.

7) 오염지수와 실측 농도 사이의 상관관계 분석

여기서는, 두 종류의 통계 모델을 적용하였다:

- (1) the Pearson Product Moment Correlation Coefficient,
- (2) the Spearman Rank Correlation Coefficient.

Pearson Product Moment Correlation Coefficient(r)은 두 변수(x, y) 사이에 선형관계 사이의 크기를 나타낸다(Mendenhall and Sincich, 1984). 이 경우 x 는 오염지수가 되며 y 는 질산성질소의 농도이다. 두 변수의 상관성을 보여주는 상관계수(r) 값은 항상 -1에서 1사이의 값을 갖게 된다. 주의할 것은, 질산성 질소 오염지수는 경험치이며, 그 결과는 질적인 자료에 수치값을 부과한 것으로 정성적인 의미를 정량적으로 표현한 것이다. 따라서 그 결과의 해석에서도 정성적인 의미의 해석을 초과할 수 없다.

다수의 인자를 사용할 경우, 비선형관계(non-parametric relations)가 생길 수 있으

므로, 비모수 통계분석(nonparametric statistical test)이 오염지수와 지하수내의 질산성 질소사이의 관계를 평가하는데 이용될 수도 있다. 현장시험에서 이용되는 non-parametric 방법은 Spearman Rank Correlation Coefficient (rs)이며, 관계식은 다음과 같다.

$$r_s = \frac{\sum (r_i - R)(S_i - S)}{(\sum (R_i - R)^2 \sum (S_i - S)^2)^{1/2}} \quad (3-14)$$

피어슨 계수와 스피어만 계수는 0.39와 0.38로서 99% 신뢰도 수준에서 계산된 오염지수와 실제 지하수의 질산성질소의 농도 사이에 통계적으로 의미있는 상관성이 있음을 보여주었다.

표 3-22 질산성질소 농도와 오염지수의 상관성에 관한 통계 분석결과

피어슨 상관계수 N=226			
항목	질산성질소의 농도	질산성질소의 농도	질산성질소 오염지수
correlation coefficient	1.000	0.393*	1.000
significant level (1-tail)	0.000	0.000	0.000
스피어만 상관계수 N=226			
항목	질산성질소의 농도	질산성질소의 농도	질산성질소 오염지수
correlation coefficient	1.000	0.374*	1.000
significant level (1-tail)	0.000	0.000	0.000
피어슨 상관계수/확률 N=226			
항목	질산성질소의 농도	질산성질소의 농도	질산성질소 오염지수
correlation coefficient	1.000	0.394*	1.000
significant level (1-tail)	0.000	0.000	0.000
스피어만 상관계수 N=226			
항목	질산성질소의 농도	질산성질소의 농도	질산성질소 오염지수
correlation coefficient	1.000	0.385	1.000
significant level (1-tail)	0.000	0.000	0.000

* Correlation is significant at the 0.01 level

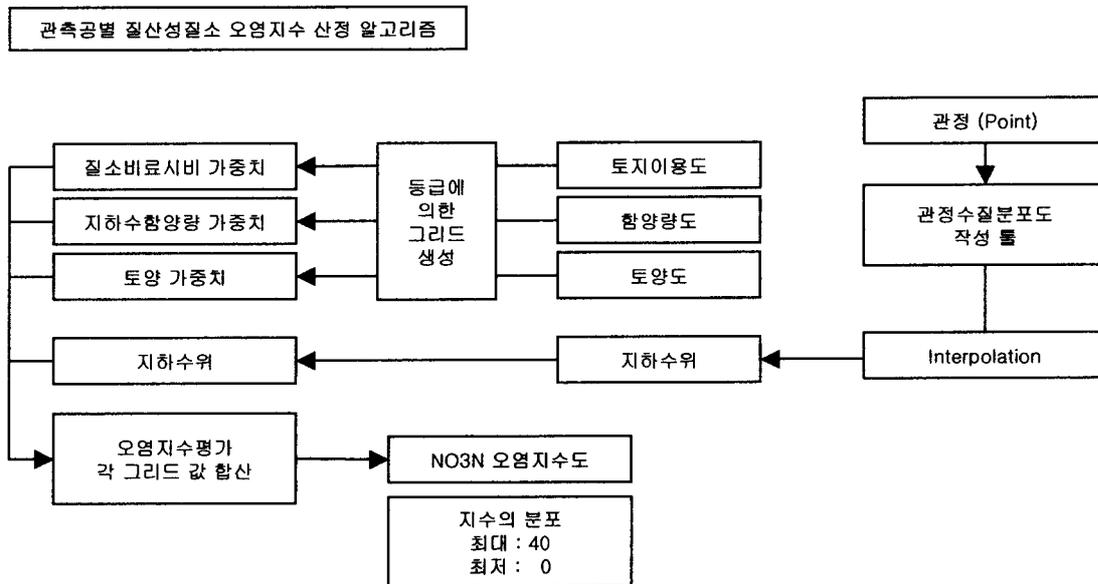
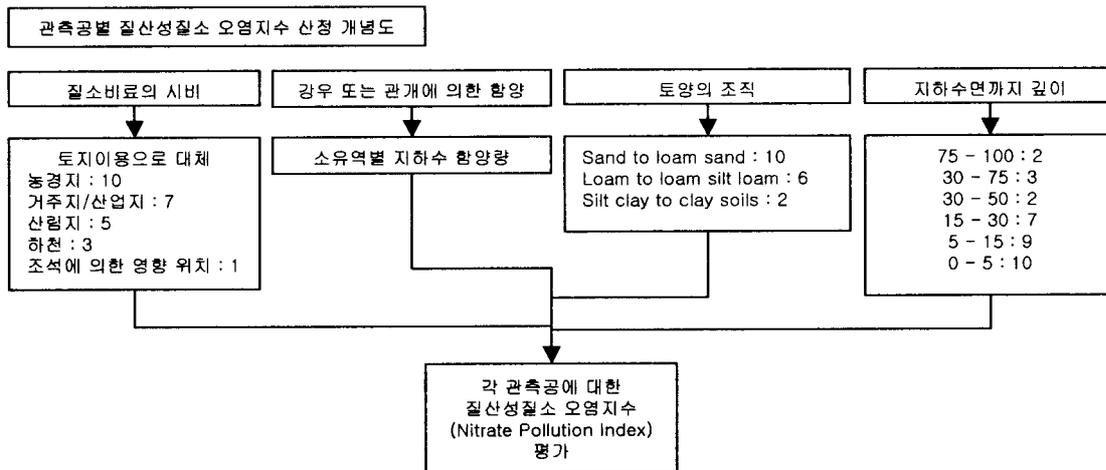


그림 3-17 질산성질소 오염지수도 작성 알고리즘

바. 대수층의 오염취약성 분석에 의한 의사결정 모델

1) 오염취약성 평가 방법과 인자

전술한 통계적 모형에 의한 지하수오염가능성 평가기법은 점 자료를 이용한 평가기법으로 이를 GIS data base를 이용하면 2차원 평면으로 확장할 수도 있다. 이와 유사한 기법으로, 2차원 평면적인 지역적 지하수 수질관리를 위해 외국에서 개발되어 사용 중인 방법으로 대수층 민감도(Sensitivity Map)와 오염취약성도(Pollution Vulnerability Map) 작성을 이용한 기법을 들 수 있다. 대수층의 오염취약성(vulnerability)은 특정오염물질에 대한 지하수의 오염가능성과 오염에 대한 위해성을 나타내는 지시자로 사용되며, 지질매체의 자연적인 오염에 대한 민감도(sensitivity)에 지역적인 오염원의 유입강도가 더해져서 평가된다. 따라서, 오염취약성은 오염물질이 지하수환경에서 거동하는 특성에 의해 동일한 지역에서도 다르게 표현될 수 있기 때문에, 일반적으로 특정한 오염물질을 목표로 하여 대수층과 지하수의 오염가능성과 위해성을 평가하는데 이용된다. 이 도면에서는 오염취약성지수(vulnerability index)가 2차원으로 표현되므로, 지역적인 지하수질의 오염예방과 관리에 중요하고도 활용가능성이 높은 정보를 제공하게 된다.

이 연구는 궁극적으로 농어촌지역 지하수의 질산성질소에 의한 오염방지를 위하여 수행되었으므로, 전술한 통계적 모델이나, 이번 장에서 다룬 오염취약성을 평가하는 단계에서도 모두 질산성질소의 오염원과 오염현상을 연구대상으로 한정하여 수행하였다.

이 연구에서 수행한 대수층의 민감도(sensitivity) 분석을 위한 방법으로는 Aller et al.(1987)이 제시한 DRASTIC method를 적용하였다. DRASTIC 은 각각의 문자가 의미하는 바와 같이 7개의 인자로 구성된 대수층의 민감성 평가지수 산출방법이다. 각 문자의 의미는 다음과 같다:

D: 지하수면의 심도

R: (순수)함양량

A: 대수층 매체의 종류

S: 토양매체의 특성

T: 지표면의 경사도

I: 비포화대 매질의 영향

C: 대수층 매체의 수리전도도

이상의 7가지 인자에 대한 기초 자료가 충분히 확보된다면, Aller et al. 이 제시한 바에 따라서 DRASTIC Map을 작성하여 대수층의 상대적인 민감성을 평가할 수 있다. 그러나, 현실적으로 우리나라의 농어촌지역 행정관서에서 이들에 대한 충분한 자료를 얻는 것은 거의 불가능하다. 따라서, 지하수 오염취약성의 전 단계인 민감성분석을 위한 자료 역시 최대한 가용자료를 활용하는 선에서 연구결과를 도출하는 것이, 추후 이 결과의 활용성을 확보하는데 중요하다고 판단하였다. 다행히도, 이 연구에서 조사대상으로 선정된 경기도 화성시에 대해서는 농업기반공사에서 3년여의 정밀조사를 수행하였으며, 그 결과 많은 기초 자료를 산출하였다. 따라서 이 연구에서는 이미 산출된 기초 자료와 부족한 부분에 대한 현장조사 결과를 수집하여 대수층 민감도를 작성하였다.

대수층의 민감도(Sensitivity Map)는 비포화대 매질의 영향(I)을 제외한 나머지 6개 인자를 활용하여 작성하였다. 비포화대의 매질에 관한 자료는 기존 자료에서 명확한 구분으로 획득이 불가능하였다. 이 민감성도를 작성하는데 활용된 나머지 6개 인자의 등급과 가중치는 Aller et al.,(1987)의 자료를 인용하였으며, 이들은 다음과 같이 수집하였다:

D: 층적층 지하수 관정과 우물에서 얻어진 수위 자료를 이용하였다. 자료는 ArcView에서 Interpolation grid 방법에서 IDW method를 이용하여 획득하였다.

R: 농업기반공사 보고서(2003)의 순수 충전량(mm/년)을 이용하여 100 ~ 180 범위와 180 ~ 250 mm/year 범위 두 구간을 이용하였다.

A: 대수층 매질 특성은 농업기반공사 보고서(2003)의 지질도를 이용하여 4개의 분류로 구분하였다.

S: 1: 25000 축적의 토양도에 나타난 토양 특성을 이용하여 구분하였다.

T: 조사지역의 DEM 자료로부터 지형경사를 추출하여 이용하였다.

C: 농업기반공사 보고서(2003)에 제시된 양수시험 및 slug test 자료를 이용하였다.

2) 6개 인자를 이용한 대수층 민감도와 오염취약성도의 작성

그림 16에 보이는 민감성도는 전술한 바와 같은 6개 인자를 이용하여 작성한 도면으로, 수리지질학적 조건에 의한 지역적인 대수층의 오염에 대한 민감성을 보여준다. 대수층 민감성도는 사용되는 각 인자의 영향을 정량화하여 표현하는 방법이므로, 그 결과는 정량화된 민감성 지수(sensitivity indices)로서 숫자의 형태로 나타난다. 그러나 이 지수는 절대값의 의미보다는 상대적인 구분을 위한 도구로서의 의미가 중요하다. 따라서 일반적으로 대수층 민감도의 구분은 오염물질이 유입되었을 경우 쉽게 주변으로 확산될 수 있는 정도를 매우 높음(very high), 높음(high), 중간(moderate), 낮음(low), 매우 낮음(very low)의 5단계로 구분한다. 이 연구에서도 민감성의 구분은 전술한 5단계 상대평가를 따랐으며, 민감성 지수의 숫자가 얼마인가 보다는 이를 이용하여 구분된 상대적인 민감도가 어느 정도인가가 실제적인 농어촌 지하수의 오염예방과 수질관리의 핵심정보가 되어야 한다.

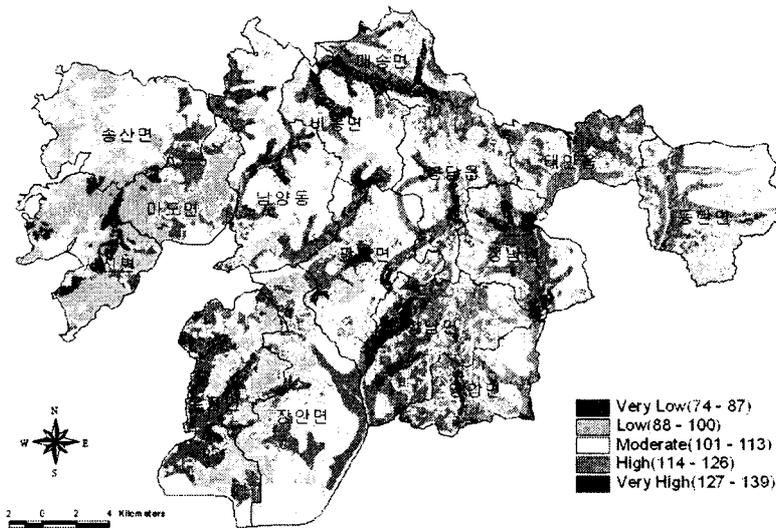


그림 3-18 6개 인자를 이용한 화성지역의 대수층 민감성도

그러나, 이러한 민감성도는 오염원의 존재여부와 오염물질의 분산여부 및 거동특성에 의해서 실제적인 대수층의 오염에 대한 위해성은 다르게 나타날 수 있다. 즉, 같은 민감도를 보이는 지역들 간에도 오염원이 존재하는가 아닌가에 따라서 지하수의 오염에 대한 취약성이 크게 달라질 수 있기 때문이다. 따라서 실제 오염원의 존재여부와 대수층의 민감성을 조합하여 오염취약성을 평가함으로써 지하수의 오염에 대한 가능성과 위해성을 예측하고, 이에 대한 수질관리 대책을 수립하게 된다.

이 연구에서 추구하는 농어촌 지역에서의 질산성질소에 의한 오염문제는 질산성질소의 배출원으로 축사와 축산폐수의 방류, 생활하수 및 오폐수의 방류와 질소를 포함하는 비료의 시비 등을 들 수 있다. 따라서 앞에 설명한 민감성도에 세 종류 오염원의 지역적 특성을 조합하면 이들에 의한 지하수의 질산성질소 오염취약성도를 작성할 수 있다.

이렇게 작성된 오염취약성도의 적합성 여부는 현재 시점에서는 확인 내지 검증이 불가능하다. 이는 대수층의 민감성도와 오염발생원을 종합한 오염취약성도가 실제적인 지하수 오염발생 상태를 보여주는 것이 아니라, 오염발생 가능성만을 제시하는 것이기 때문이다. 오염취약성의 의미는 오염물질이 지표환경에 유입되는 경우 지하수로 그 오염물질이 유입되어 오염시킬 가능성을 예측하여 지하수의 오염예방과 보전을 위해 오염원인자를 관리하기 위한 도구이다. 따라서 오염취약성은 앞으로 일어날 수 있는 오염현상을 현재 시점에서 오염원인자를 관리하므로 오염발생 자체를 방지하려는 개념이다.

전술한 방법으로 제작된 오염취약성도의 타당성을 검증하는 것은 이론적으로는 불가능하지만 현재의 지하수 오염도를 조사하여 오염취약지구와의 연계성 내지 상관성을 분석한다면, 이들의 적용가능성에 대한 간접적인 평가는 가능할 것이다. 따라서, 이 연구에서는 화성시 지역을 대상으로 하여, 충적층과 자유면 대수층에 설치된 491개의 지하수 관정에 한하여 지하수 중의 질산성질소 농도(표 3-27)를 조사하고, 이들의 분포를 오염취약성도와 비교하였다. 지하수 조사관정의 위치와 조사된 오염도는 다음 그림 3-24, 25 와 같다:

표 3-23 지하수 수질관측정에서의 질산성질소의 농도 분포

NO3-N Concentration(mg/L)	갯수	%
<4	153	31.2
4~10	169	34.4
10~20	112	22.8
20~30	35	7.1
≥30	22	4.5
합 계	491	

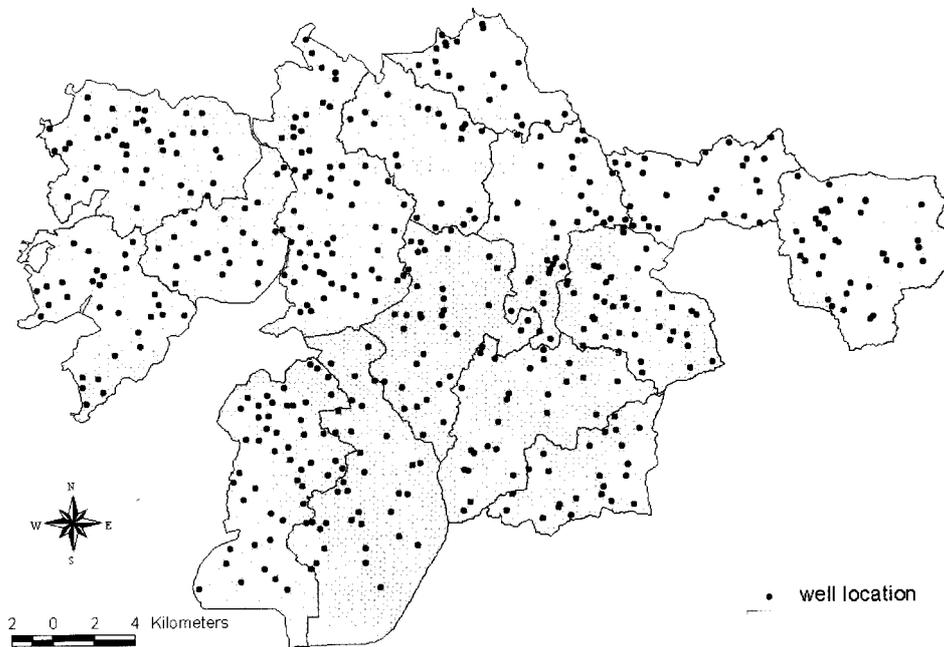


그림 3-19 지하수 수질조사 관정의 위치

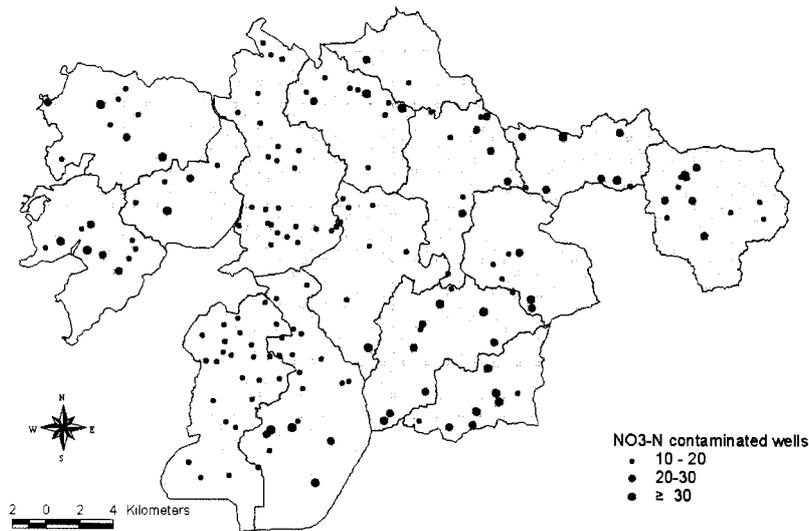


그림 3-20 NO₃-N 에 의해 오염된 지하수 관정의 위치
(단위: mg/L)

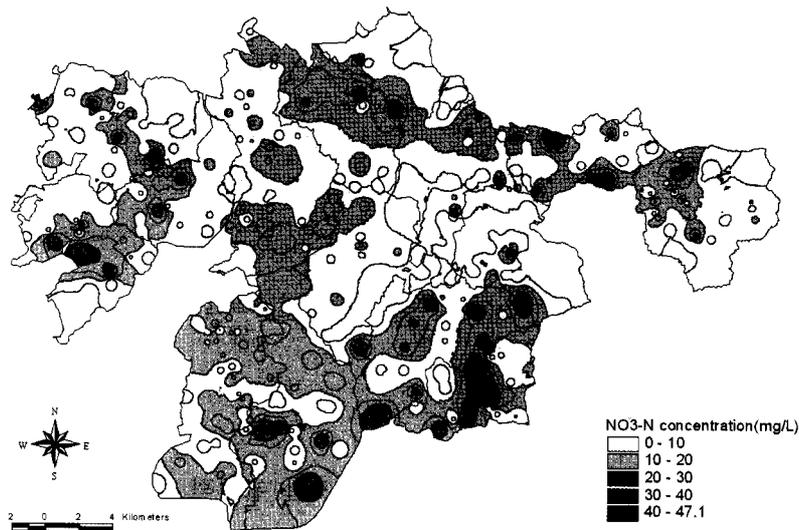


그림 3-21 NO₃-N 에 의해 오염된 지하수의 분포도
(단위: mg/L)

오염취약성도 작성을 위해서 활용한 세 가지의 질산성질소 오염원인자들에 관한 자료는 다음과 같이 조사하였다:

- i) 축산시설과 축산폐수 인자: 농업기반공사 보고서(2003) 중 읍면별 가축의 T-N 원단위 부하량을 이용함. 5개의 등간격으로 range를 나누고 1,3,5,7,10으로 rating을 줌
- ii) 생활하수 및 오폐수 발생인자: 농업기반공사 보고서(2003) 중 읍면별 인구의 T-N 원단위 부하량을 이용함. 5개의 등간격으로 range를 나누고 1,3,5,7,10으로 rating을 줌
- iii) 질소시비 관련 인자: 환경부(2001; 영산강 수계 물관리 종합 대책) 자료에서 제시된 토지이용특성에 관한 원단위 부하량 (전, 답, 임야, 대지 및 기타로 구분)에 대한 T-N 값과 농업기반공사에서 제작한 화성지역 토지이용도를 이용하여 나타냄.

전술한 자료를 이용하여 대수층의 민감도와 독립적인 오염원별 부하량을 평가하여 조합한 오염취약성도를 작성하였다. 민감성 지수와 마찬가지로 취약성 지수(vulnerability indices)도 정량화된 숫자의 형태로 표현된다. 그러나, 취약성의 실제적인 의미는 특정한 지역에서 오염에 대한 상대적인 취약성을 제시하는 것이 주요 목적이므로, 이 정보를 사용하는 사용자는 취약성 지수의 절대값 보다는 상대적인 구분이 더욱 중요한 정보임을 인식하여야 한다. 따라서 지역적인 수질관리를 위해서 오염취약성은 아주 높음(very high), 높음(high), 중간(moderate), 낮음(low), 아주 낮음(very low) 의 5단계로 구분하였다. 이와 같은 방법으로 제작된 오염취약성도는 연구지역인 화성지역에서 지하수가 질산성질소에 의해 오염될 가능성을 구체적인 오염발생원에 대해서 제시할 수 있으며, 이러한 정보는 역으로 사전에 오염방지를 위한 관리체계의 수립과 시행에 필요한 핵심정보를 제공하게 된다.

먼저, 축산시설을 면단위로 구분하여 위에 보이는 대수층 민감성도에 중첩시켜 오염취약성도를 작성하였다 (그림 3-23). 진한 적색으로 표시되는 지역은 다른 지역에 비하여 축산폐수에 의해 지하수의 질산성질소 오염가능성이 높게 나타나는 지역이며, 초록색 지역은 축산시설에 의한 오염가능성은 상대적으로 낮게 나타나는 지역이다. 또한 질산성질소 관측값과 오염취약지수의 관계를 분석하였다. 이들 두 인자 간에는

특별한 상관관계가 보이지 않으나, 질산성질소 농도가 높은 (약 20mg/L 이상) 부분에서 상관성이 보인다.

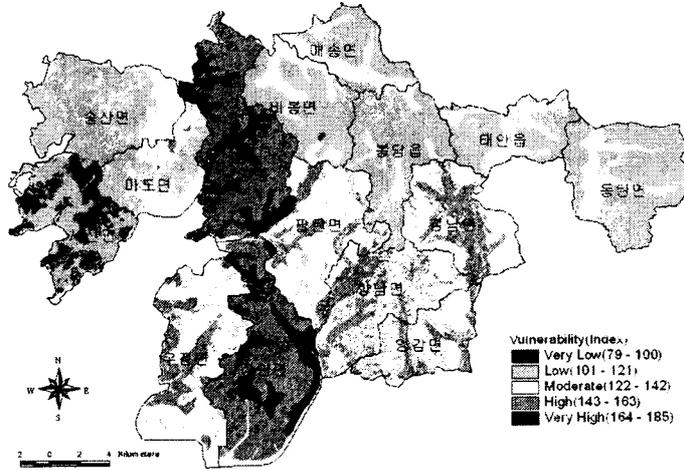


그림 3-22 화성지역의 질산성질소에 의한 지하수 오염취약성도-축산시설의 영향

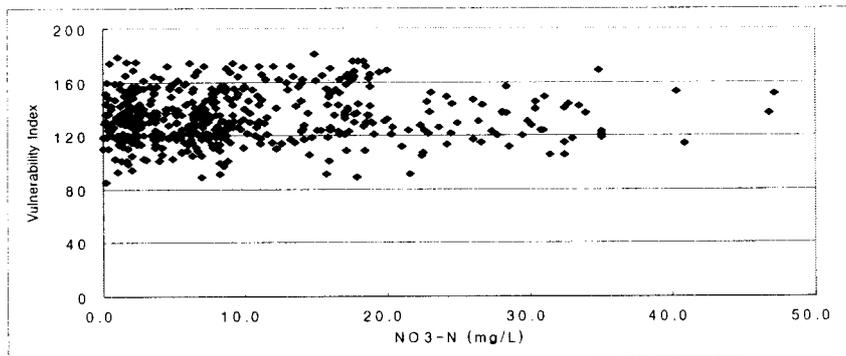


그림 3-23 축산시설에 의한 질산성질소 오염취약지수와 현장 관측치의 비교-1

동일한 방법으로 화성시의 행정자료 중에서 생활하수 배출량을 면단위로 구분하여 오염취약성도를 작성하고 오염지수와 질산성질소의 농도를 비교하였으며 (그림 3-25, 26), 토지이용도를 면단위로 구분하여 작성한 오염취약성도(그림 3-31)와 토지이용특성(전, 답, 임야, 대지, 기타)에 따라서 세분화하여 작성한 오염취약성도(그림 3-33)과 이들의 오염취약지수와 질산성질소 농도의 비교도(그림 3-32, 33)를 표시하였다.

축산시설에 의한 오염취약성에 대한 영향(그림 3-27)은 이러한 시설들이 밀집한 장안면과 남양동에서 높게 나타나며, 우정면의 서측과 정남면, 양감면, 향남면에서 약간 높게 나타난다. 생활하수 및 오폐수에 의한 지하수의 오염취약성(그림 3-29)은 인구가 밀집되어 있는 태안읍이 가장 영향을 많이 받고 있으며 우정면의 일부지역에서도 동일한 영향이 나타난다. 이러한 지역에서는 하수처리 시스템에 대한 관리가 생활하수에 의한 지하수 오염을 방지하는 중요한 역할을 하게 된다.

질산성질소의 잠재적인 오염배출원으로 작용하는 비료의 시비에 의한 지하수의 오염취약성을 평가하기 위해서는 전 지역에 대한 정확한 시비자료가 필요하다. 그러나 실제로 각 농업의 특성에 따라서 비료의 종류의 시비 기간 및 강도 등이 모두 다르게 나타나고 있어, 현재 가용한 자료에서는 이러한 변화를 정확히 도면에 표현할 수 없다. 따라서, 지하수 오염방지와 수질관리를 위해서는 현재 가용한 자료를 사용하여 관리기법을 도출해야 하기 때문에, 토지의 가해지는 질소함유 시비량과 강도를 지시하는 인자로서 토지이용도의 특성으로 대체하였다. 토지이용 특성은 기존에 작성된 화성지역의 토지이용도를 활용하였으며, 이 도면에서는 토지이용특성을 전, 답, 임야, 기타(암석지, 하천범람지, 하해범람지, 간석지)로 구분하였다. 이를 활용하여 토지이용 특성에 적용되는 질소비료에 대한 원단위 부하량을 적용함으로 지하수 중의 질산성질소에 대한 오염부하로 표시하였다.

토지이용도를 면단위로 하여 도시한 결과(그림 3-31)는 양감면과 매송면에서 오염취약성이 높게 나타났으며, 태안읍과 우정면 일부지역이 다음으로 높게 나타났다. 그러나, 토지이용특성별로 세분화된 도면에 의한 취약성(그림 3-33)은 화성시 전 지역에서 질소비료를 많이 사용하는 특정한 지역들이 면 단위 이하로 보다 세분화되어 표현된다. 따라서, 단순히 행정적인 관리측면에서 면단위의 취약성을 평가하는 것 보다는, 실질적인 질소비료를 시비하는 토지와 이들이 포함된 지역에 대한 취약성을 평가할 수 있는 후자의 방법과 결과가 실질적인 지하수 오염예방과 관리측면에서는 현실적인

정보를 제공한다고 할 수 있다.

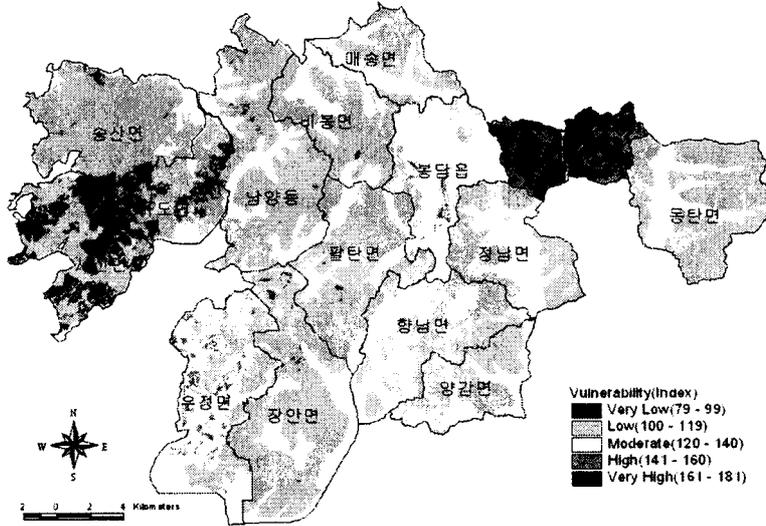


그림 3-24 화성지역의 질산성질소에 의한 지하수
오염취약성도-생활하수의 영향

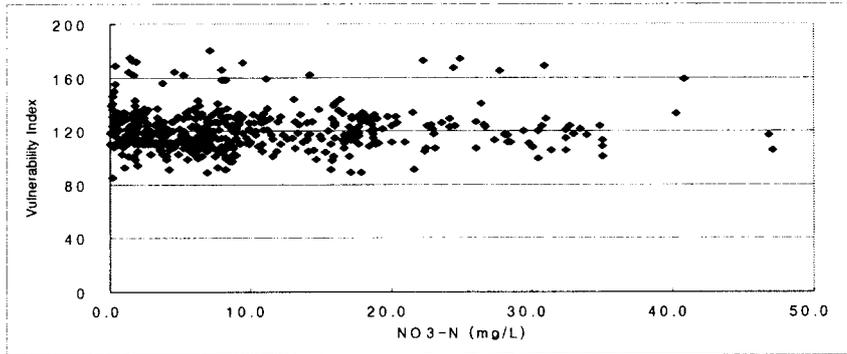


그림 3-25 생활하수에 의한 질산성질소 오염취약지수와 현장
관측치의 비교-1

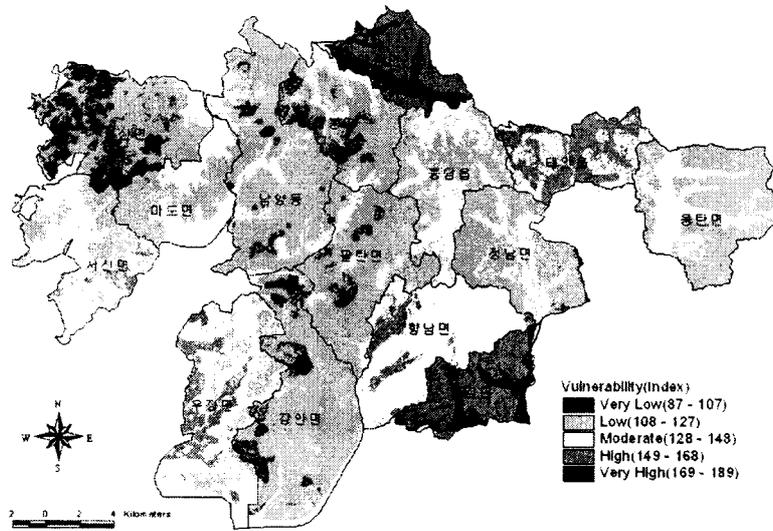


그림 3-26 질산성질소에 의한 지하수 오염취약성도-면단위
x토지이용에 따른 오염부하량의 영향

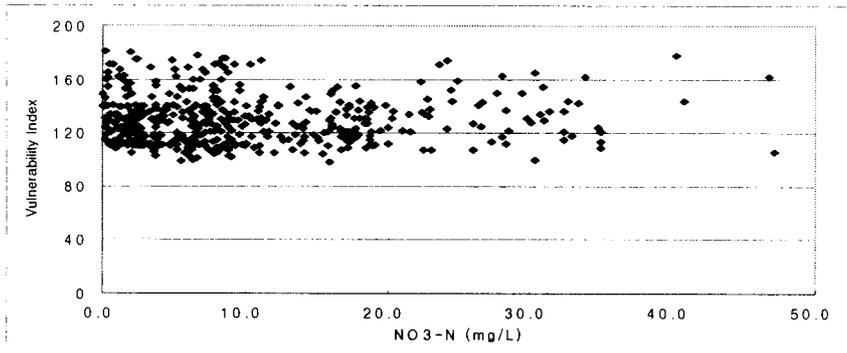


그림 3-27 토지이용도를 고려한 오염취약성 지수와 질산성질소
관측치의 비교-면단위

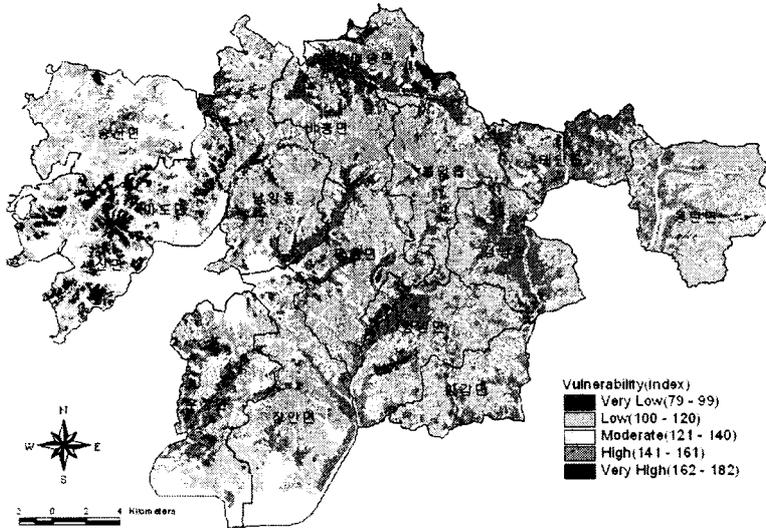


그림 3-28 질산성질소에 의한 지하수 오염취약성도-유형별 토지이용도에 따른 오염부하량의 영향

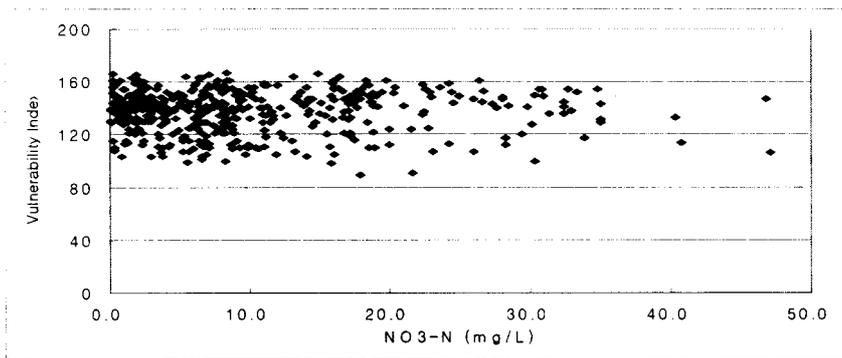


그림 3-29 토지이용도를 고려한 오염취약성 지수와 질산성질소 관측치의 비교-유형별 토지이용 단위

이러한 결과는 각 오염배출원의 영향을 종합적으로 분석한 도면(그림 3-35, 39)에서도 잘 나타나고 있다. 6개의 민감성 인자와 3개의 질산성질소 오염원 인자를 활용하여 면단위로 전체 질산성질소 오염에 대한 취약성을 표시한 도면(그림 3-35)에서는 장안면, 남양동, 양감면이 전반적으로 오염위약성이 높은 편이고, 정남면, 향남면, 우정면, 팔탄면의 일부 지역에서 비교적 높은 취약성이 나타난다. 그러나 토지이용특성을 세부적으로 고려한 오염취약성도(그림 3-37)는 이보다 더욱 세분화된 오염취약지역을 표시하고 있다. 즉, 남양동은 전 지역이 가장 오염취약성이 높은 지역으로 나타나서, 화성시에서 질산성질소에 의한 지하수 오염예방을 위해서는 최우선으로 오염원과 수질에 대한 관리대책이 필요한 지역으로 표시되고, 그 다음으로는 장안면이 높게 나타나며, 양감면, 정남면, 우정면, 팔탄면의 일부지역들에서 취약성이 높은 지역이 확인된다. 따라서 질산성질소에 의한 지하수 오염취약성을 표현하는 도면으로는 그림 30이 현재 가용한 자료를 최대한 이용하여 나타낼 수 있는 최선의 도면이라고 판단되며, 이를 이용하여 지역적인 관리체계의 수립이 시행된다면 효율성을 확보할 수 있을 것으로 예상된다.

면단위의 오염취약성 자료와 실제 지하수질 관측자료 중 질산성질소의 농도를 비교해 본 결과(그림 3-36), 전체 자료를 모두 도시한 경우에는 명확한 경향성이나 상관성이 나타나지 않으나, 질산성질소가 20mg/L 이상인 자료만을 비교해 본 결과(그림 3-39), 오염취약성 지수와 질산성질소의 농도 간에는 비례적인 상관관계가 있음을 알 수 있다. 이러한 관계는 오염취약성이 높게 표현되는 지역에서 지표에 질산성질소의 오염원이 존재한다면, 지하수의 오염이 실제로 높게 나타날 수 있음을 지시한다.

그러나 그림 18-19에 따라서 NO₃-N 에 의해 오염된 관정의 분포를 보면, NO₃-N 이 20 mg/L 이상으로 오염된 관정들의 위치는 그림 3-35, 3-37에서 보이는 오염취약지역과 일치하지 않는 것을 알 수 있다. 즉, 오염취약지역으로 예상되지 않는 지역에서도 질산성질소에 의한 지하수 오염이 상당히 높은 정도로 진행되고 있음을 의미한다.

오염취약성이 높은 지역에서 실제 지하수 오염도가 낮게 나타나고, 오염취약성이 낮게 평가되는 지역에서 실제 오염도가 높게 나타나는 현상이 오염취약성도가 잘 못 만들어진 것을 의미하는 것은 아니다. 전술하였듯이 오염취약성도는 오염물질이 지표 환경에 유입되는 경우 지하수로 그 오염물질이 유입되어 오염시킬 가능성을 예측하여

지하수의 오염예방과 보전을 위해 오염원인자를 관리하기 위한 도구이다. 따라서 오염취약성은 앞으로 일어날 수 있는 오염현상을 현재 시점에서 오염원인자를 관리하므로 오염발생 자체를 방지하려는 개념이다. 그러나 지하수 수질관측치는 현재 시점의 오염도를 나타내고, 이는 과거 시점에 발생한 오염원인자에 의한 결과로서 나타나는 것이므로, 현재 시점의 관측치와 오염취약성 지수가 상관성을 반드시 나타내어야 한다고 단언할 수 없다.

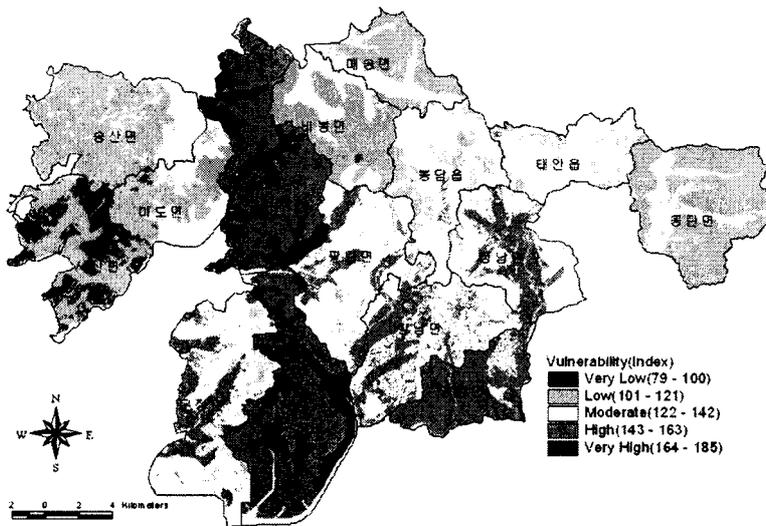


그림 3-30 화성지역의 질산성질소에 대한 지하수 오염취약성도-6개 민감성 인자와 3개 오염원 인자의 면단위 종합결과.

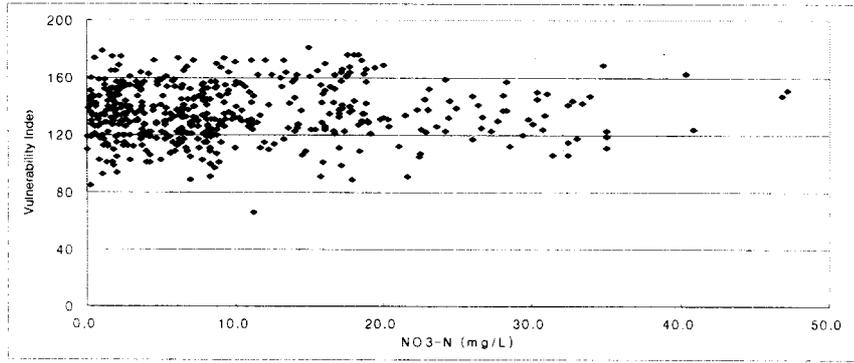


그림 3-31 면단위 종합 오염취약성지수와 질산성질소 관측치의 비교.

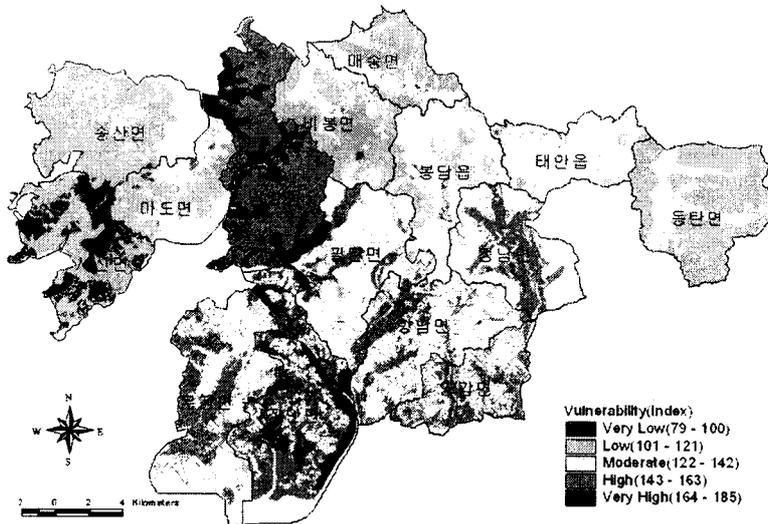


그림 3-32 화성지역의 질산성질소에 대한 지하수 오염취약성도 - 6개 민감성 인자와 3개 오염원 인자의 토지이용단위 종합결과.

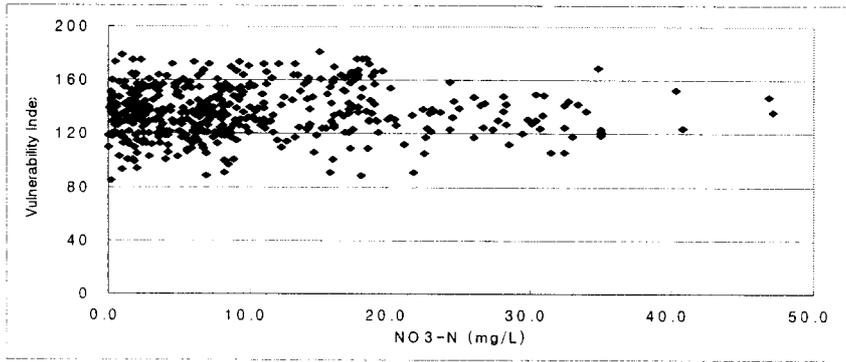


그림 3-33 토지이용특성별 종합 오염취약성지수와 질산성질소 관측치의 비교.

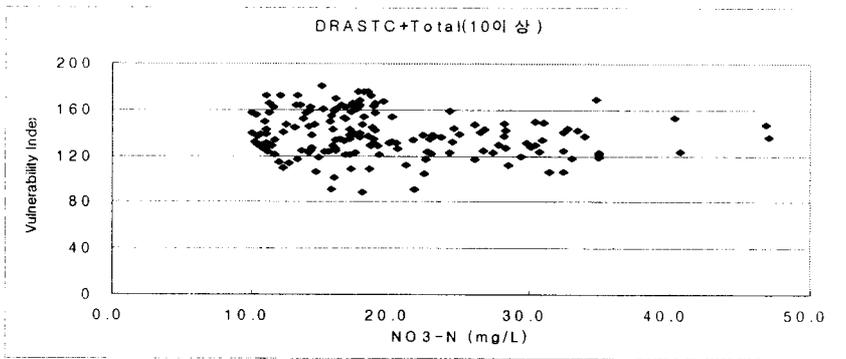


그림 3-34 오염취약성 지수와 질산성질소 관측 (10mg/L 이상)자료의 비교.

그림 30, 32 에 의하면, 면단위로 산출된 오염취약성 지수이든, 토지이용특성별로 산출된 오염취약성 지수이든 두 가지 경우 모두에서 오염취약성 지수와 질산성질소의 오염농도(관측치)와 상관성이 나타나지 않는다. 그러나, 질산성질소의 관측자료를 먹 는물 오염기준농도인 10mg/L 이상의 자료만을 도시해보면(그림 3-39), 10-20 mg/L 사이에 군집형태로 분산되어 나타나는 부분과, 20mg/L 이상의 농도에서 선형관계를 보여주는 부분이 분리됨을 볼 수 있다. 이러한 현상은 질산성질소의 오염농도가 아주

높게 나타나는 지역은 오염취약성도에서 예상되는 취약지역에서 나타남을 의미한다. 따라서 작성된 오염취약성도로부터 오염취약지역으로 구분되는 지역에서는 앞으로 지하수 오염발생 가능성이 타 지역에 비하여 상대적으로 높음을 보여준다.

3) 3개 인자를 이용한 대수층 민감도와 오염취약성도의 작성

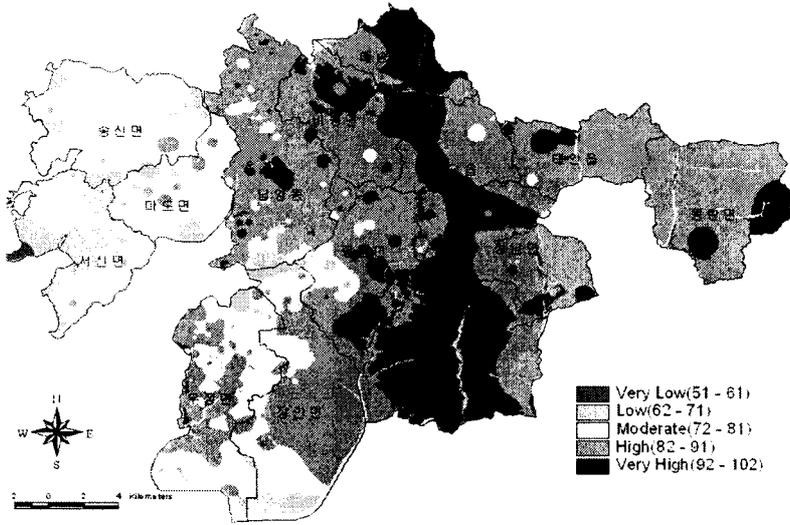


그림 3-35 3개 인자를 이용한 화성지역의 대수층 민감성도.

대수층의 민감도를 작성하는데 사용된 6개 인자 중, 제3장 2절의 통계분석 모델에서 제시된 바와 동일한 4가지 인자(지하수면의 심도, 지하수 함양량, 토양매체의 특성, 오염원 특성)를 가지고 지하수 오염취약성도를 작성하여 결과를 비교하고자 하였다. 이를 위해 먼저 대수층의 민감도 인자인 3가지와 오염원인자를 구분하여 민감도와 오염취약성도를 작성하였다.

3가지 민감성 인자들(지하수면의 심도, 지하수 함양량, 토양매체의 특성)만으로 작성한 민감도는 그림 33과 같다. 위와 같이 작성된 대수층의 민감성도면에 전술한 바와 같이 세 가지 질산성질소 오염인자들을 도면에 작성하여 개별적으로 (그림 3-41, 43, 45, 47), 그리고 마지막에는 종합하여 (그림 3-49, 44) 오염취약성도를 도시하였다.

또한 오염취약성 지수와 관측된 지하수 질산성질소 농도값을 비교하여 보았다 (그림 3-42, 44, 46, 48, 50, 52, 53). 질소비료의 시비강도에 관한 인자는 토지이용특성을 활용하였으며, 역시 이 경우에도 토지이용도를 면단위로 작성하여 중첩하는 경우와, 토지이용특성별로 세분하여 취약성도를 작성하였다. 또한 오염취약지수와 질산성질소의 관측값을 비교하였다.

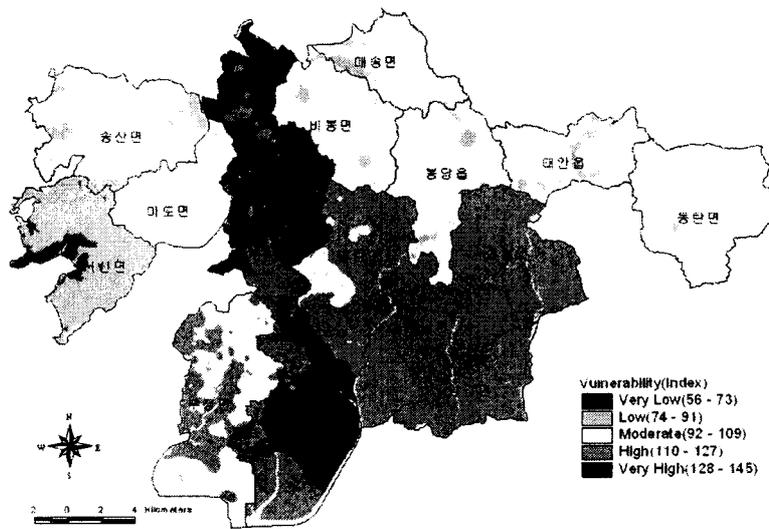


그림 3-36 변형된 질산성질소에 의한 지하수
오염취약성도 - 축산시설의 영향

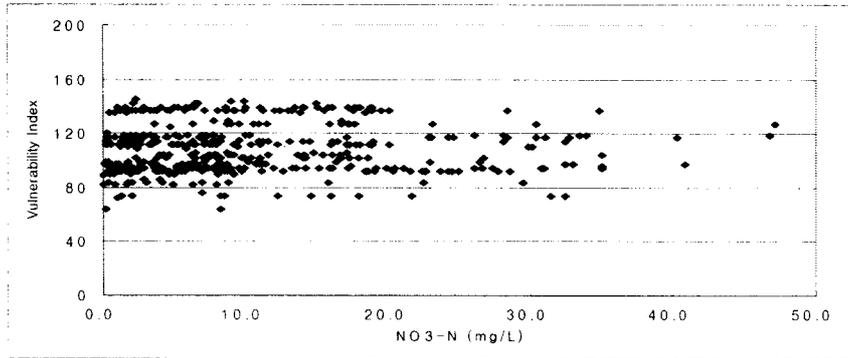


그림 3-37 축산시설에 의한 질산성질소 오염취약지수와 현장 관측치의 비교-2.

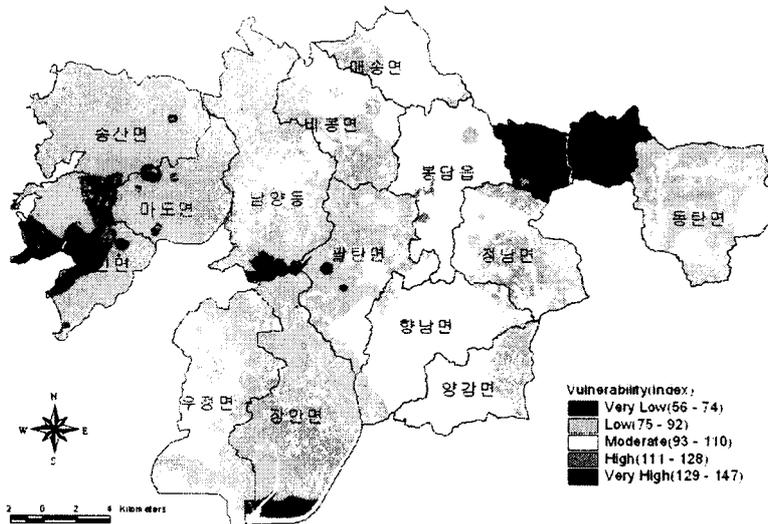


그림 3-38 변형된 질산성질소에 의한 지하수 오염취약성도 - 생활하수의 영향.

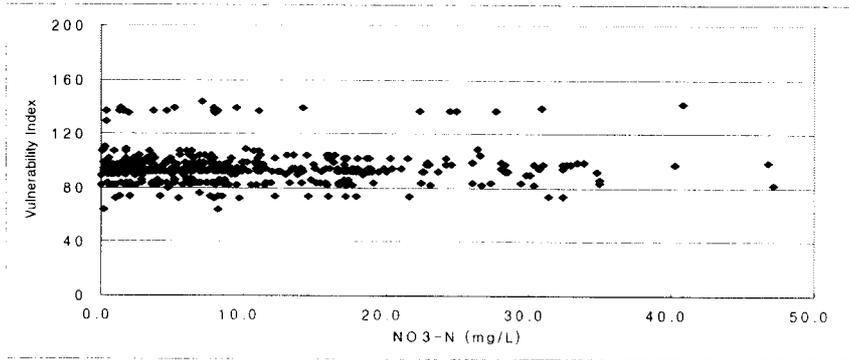


그림 3-39 생활하수에 의한 질산성질소 오염취약지수와 현장 관측치의 비교-2.

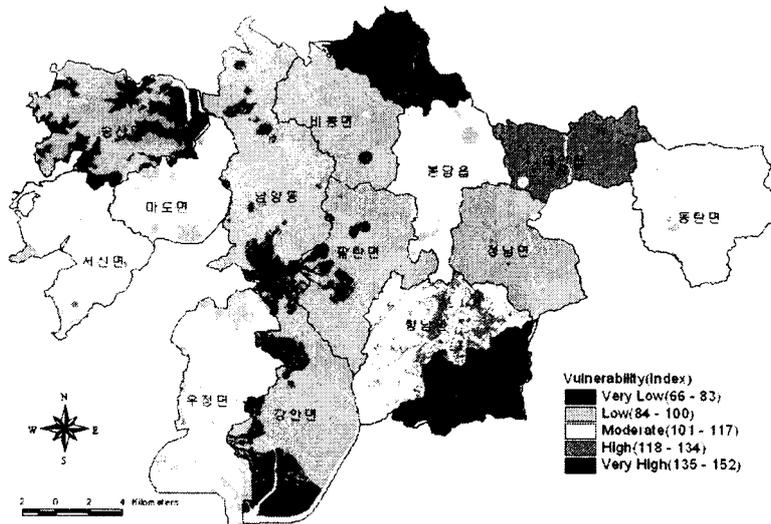


그림 3-40 질산성질소에 의한 지하수 오염취약성도 - 면단위.

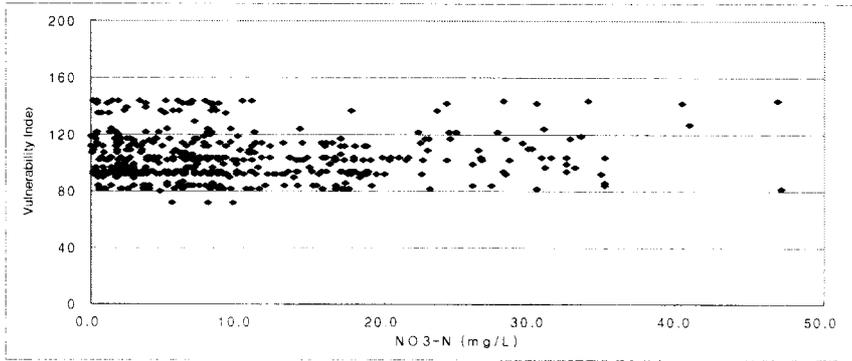


그림 3-41 토지이용도를 고려한 오염취약성 지수와 질산성질소 관측치의 비교 - 면단위

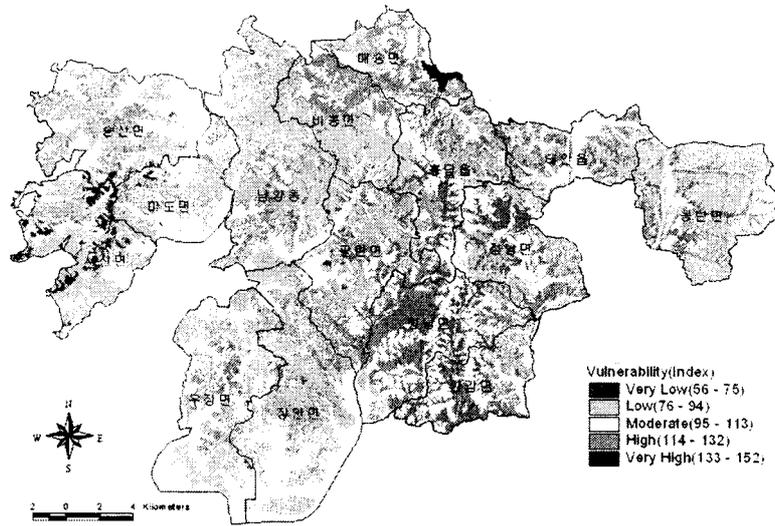


그림 3-42 지하수 오염취약성도 - 유형별 토지이용 단위

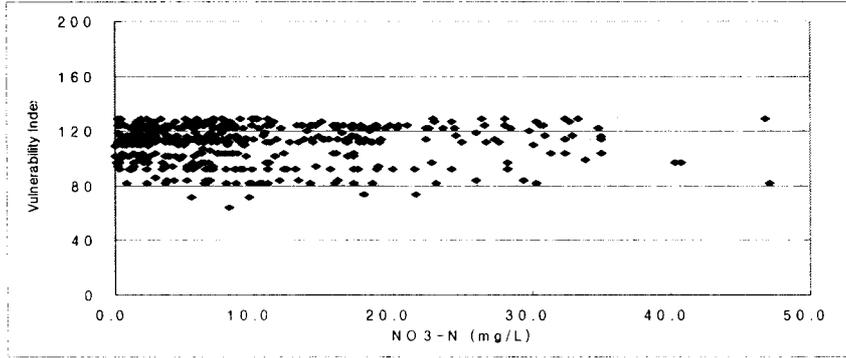


그림 3-43 오염취약성 지수와 질산성질소 관측치의 비교 -
유형별 토지이용 단위

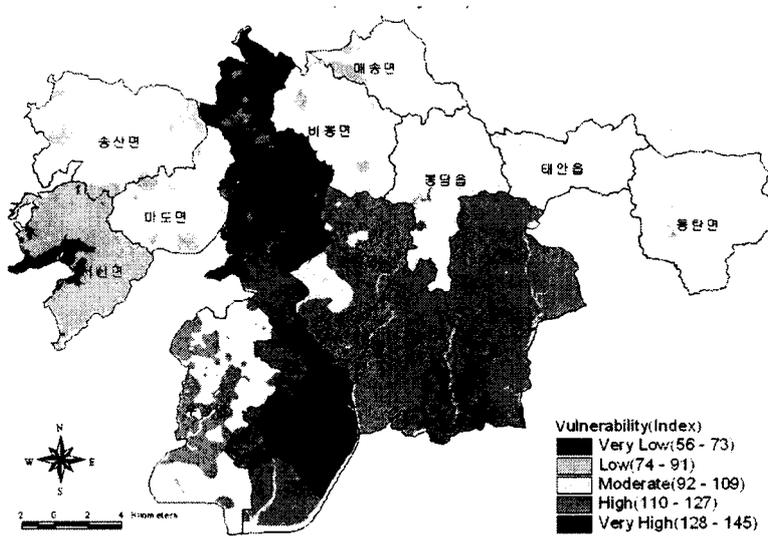


그림 3-44 3개 민감성 인자와 3개 오염원 인자의 종합
지하수 오염취약성도 - 면단위

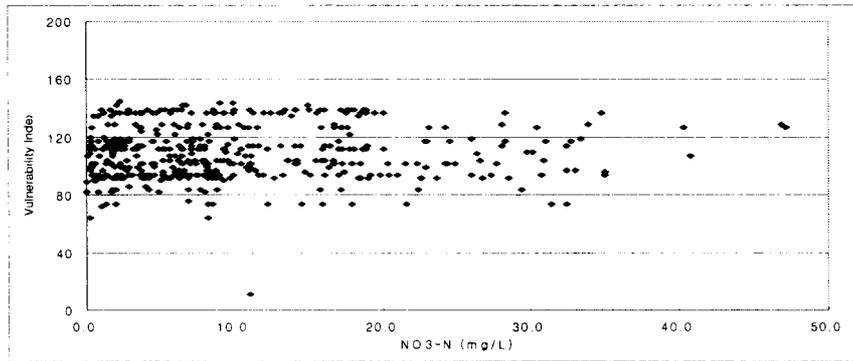


그림 3-45 오염취약성 지수와 질산성질소 관측치의 비교.

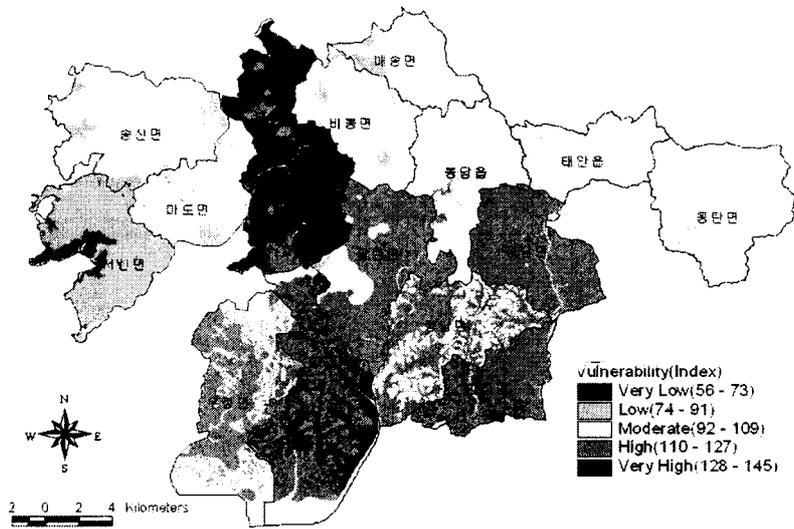


그림 3-46 3개 민감성 인자와 3개 오염원 인자의 종합 지하수 오염취약성도- 토지이용특성 단위.

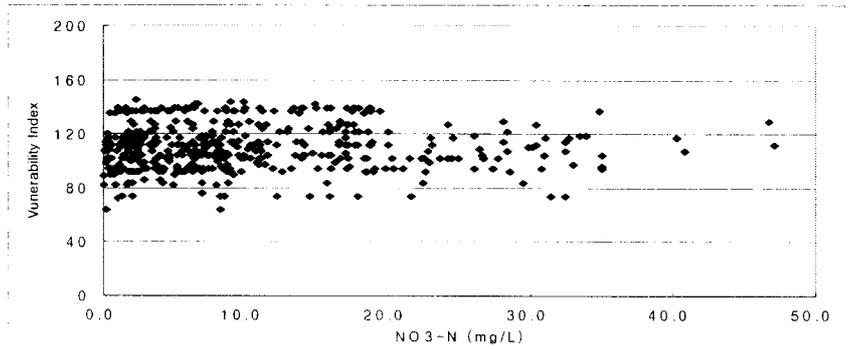


그림 3-47 토지이용특성별 종합 오염취약성지수와 질산성질소 관측치의 비교.

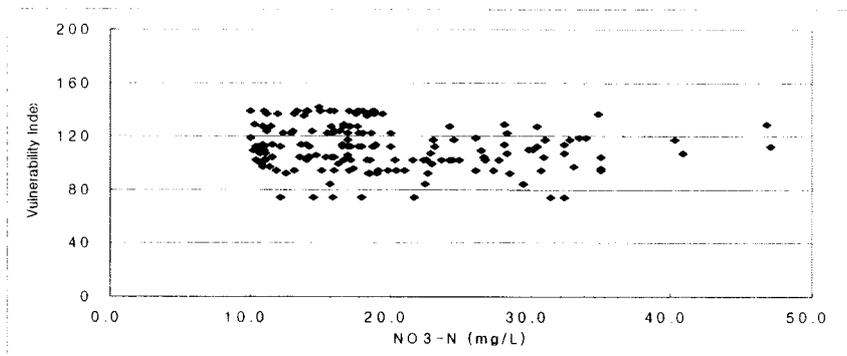


그림 3-48 오염취약성 지수와 질산성질소 관측(10mg/L 이상)자료의 비교.

3개의 민감성 인자만을 사용하므로, 6개의 민감성 인자를 기본으로 하는 오염취약성도에 비하여 오염취약성 결과도(그림 3-41, 42)는 비교적 세부적인 위치 파악 면에서 정밀도가 낮게 나타난다. 그러나 전반적으로 측사에 의한 영향이나 생활하수의 영향, 토지이용도의 영향 등이 미래에 나타날 수 있는 오염방지와 관리대책을 지역적으로 수립/시행하는 데에는 큰 차이가 없을 것으로 평가된다.

또한 그림 45 에 의하면, 오염취약성 지수와 질산성질소의 오염농도(관측치)와 상관

성이 나타나지 않는다. 그러나, 이 경우에도 질산성질소의 관측자료를 먹는물 오염기준농도인 10mg/L 이상의 자료만을 도시해보면(그림 3-53), 10-20 mg/L 사이에 군집형태로 분산되어 나타나는 부분과, 20mg/L 이상의 농도에서 선형관계를 보여주는 부분이 분리됨을 볼 수 있다.

이상의 각 인자별 오염취약성과 대수층의 민감도를 현재 관측된 지하수의 질산성질소 농도를 기준으로 한 지하수 오염도(그림 3-27, 28)와 종합적으로 비교하면 다음과 같은 사항들이 정리될 수 있다:

① 축산시설이 널리 분포된 장안면과 남양동 지역에서는 오염도가 상대적으로 낮지만 숫자적으로는 훨씬 더 많은 수의 오염된 지하수관정이 나타난다.

② 양감면 일대와 태안읍 서부와 봉담읍 북부 지역에 나타나는 높은 질산성질소 지하수오염도는 토지이용특성에 영향을 받은 것으로 평가된다.

③ 서신면, 마도면 일부지역에 나타나는 질산성질소에 의한 지하수의 높은 오염도는 현재 가용한 오염원인자에 대한 자료에서는 오염가능성을 정확하게 예측할 수 없다. 이러한 지역에 대해서는 보다 정밀한 현장조사가 필요하다.

④ 6개의 민감성 인자와 3개의 질산성질소의 오염원인자를 활용한 취약성도에 의하면, 남양동, 장안면, 양감면 등이 우선 관리지역으로 나타나며, 정남면, 향남면, 팔탄면 등이 다음 순서의 관리대책 지역으로 평가된다.

⑤ 3개의 민감성 인자와 3개의 질산성질소의 오염원인자를 활용한 취약성도에 의하면, 남양동, 장안면, 양감면 등이 우선 관리지역으로 나타나며, 정남면, 향남면, 팔탄면, 우정면 등이 다음 순서의 관리대책 지역으로 평가된다.

⑥ 따라서, 지하수의 수질보호와 관리대책 수립을 위한 우선지역 선정을 위해서는 6개의 민감성 인자를 활용한 경우와 3개의 민감성 인자를 활용한 경우에 차이가 없다. 따라서, 기존에 가용한 자료를 활용하고 자료수집과 분석의 효율성을 제고하며 실질적인 행정관리에 용이성을 고려할 때, 3가지 민감성 인자만을 활용한 오염취약성 평가로도 충분히 그 목적을 달성할 수 있으리라 판단된다.

4) 종합 요약 및 결론

농어촌지역에서 청정수자원인 지하수의 질산성질소 오염예방과 수질관리를 위한 의사결정 시스템은 농어촌지역 지하수가 당면하게 될 다양한 잠재오염원의 설치와 배출이 지하수에 미치는 영향을 고려하여, 이들의 위치 또는 입지의 선정 시 또는 행정적이 시설관리나 대책 시행에서 우선순위를 설정하는 것이 목표이다. 우선순위가 결정되면, 각각의 오염현상과 오염지역에 대해서는 법적/제도적인 관리 틀 안에서 적절한 대책이 시행될 것이다. 따라서 지하수 오염예방에서 가장 중요한 것은, 앞으로 오염발생 가능성이 높은 지역을 예상하고, 이들 지역에서의 지하수 중요성을 고려하여 오염방지 및 관리대책을 수립 시행하는 것이라 할 수 있다.

가) 농어촌지역의 지하수 수질특성과 시공간적 변화

무주지역을 대상으로 연구한 결과, 농어촌지역에서는 지하수와 지표수가 직접적인 연관성을 가지고 상호반응하는 관계로 존재한다. 지표수는 강수에 의해 직접적인 반응이 나타나는 반면, 지하수는 강수에 의한 영향이 일정시간 지체되어 나타난다. 이러한 현상은 지하수의 수질에서 계절별 변화요인으로 나타난다.

특히 지하수의 수질은 기반암의 구성에 따라서 크게 영향을 받으므로, 지하수를 사용하는 지역의 지질매체의 구성 광물성분에 대한 정확한 이해가 지하수질을 보호하고 청정수자원으로 지속적 개발가능성을 확보하는데 중요한 요소가 된다.

주변의 인위적 오염원(농지, 축사, 생활하수)등에 노출되어 있는 농어촌지역의 지표수는 하천으로 오염물질의 직접적인 유입 뿐만 아니라 오염된 지하수가 배출되면서 하천수의 오염이 진행되고 악화될 수 있다. 따라서 지표 오염원에 대한 관리는 지하수자원의 오염방지 뿐 아니라, 나아가 지표수자원의 수질보호에도 중요하다.

나) 통계적 방법에 의한 의사결정 모델 개발

지하수 오염발생가능성을 예측하기 위하여, 이 연구에서는 경기도 화성시 일대를 대상으로 하여 통계적인 방법을 통한 모델개발을 검토하였다. 통계적인 연구에서는 지하수에 나타나는 질산성질소에 관련된 대표적 영향인자들 중에서 현장에서 쉽게 획득 가능한 자료들을 선정하여 모델을 개발하였다. 이에 다음의 4가지 인자가 선정되었다:

- ① 질소비료의 시비 ,
- ② 강우 또는 관개에 의한 함양 ,
- ③ 토양의 조직,
- ④ 지하수면까지 깊이

이들 4가지 인자를 모델개발의 요인으로 선정한 이유는 다음과 같다:

- ① 질산성 질소의 침출을 조정하는 매우 중요한 역할
- ② 농업활동에 의한 지하수의 오염을 산정할 수 있는 가장 보편적인 인자
- ③ 서로 다른 지점을 비교 평가하는데 이용가능
- ④ 지하수질 관측의 필요를 최소화
- ⑤ 자료를 얻기 쉬우며 이용과 평가가 쉽다
- ⑥ 자료들은 서로 상호 교환이 쉽다
- ⑦ 직접 및 간접적으로 다른 인자들과 연관되어 있다
(작물인자, 작물형태, 그리고 물리적, 생물학적, 화학적 인자들).
- ⑧ 최소한의 자료를 이용하여 가장 빨리 위해성을 평가할 수 있다.

지하수에 대한 4가지의 질산성질소 오염인자를 사용하여 오염가능성을 지시하는 오염지수(pollution index)를 각 관측공에 대하여 산정하였으며, 이들 오염지수와 실제 질산성질소의 관측값 간의 상관성을, (1) 선형관계성을 검토하기 위한 Pearson Product Moment Correlation Coefficient(r)와 (2) 비선형관계(non-parametric relations)를 검토하기 위한 비모수 통계분석(nonparametric statistical test) 방법으로 Spearman Rank Correlation Coefficient (rs)를 분석하였다. 그 결과, 피어슨 계수와 스피어만 계수는 0.39와 0.38로서 99% 신뢰도 수준에서 계산된 오염지수와 실제 지하수의 질산성질소의 농도 사이에 통계적으로 의미있는 상관성이 있음을 보여주었다. 즉, 전술한 단계에서 선정된 4개 인자로 산출된 오염지수가 현재 지하수의 질산성질소 농도 분포를 간접적이지만 지시자로서 사용될 수 있음을 의미한다.

따라서 전술한 4개 항목에 대한 자료가 존재하는 지역에서는 그 지점에 대한 지하수 오염가능성을 지수로 산출할 수 있고, 이에 근거하여 다른 지역과의 상대적인 오염가능성에 대한 비교와 그에 따른 오염원인 시설 내지 행위에 대한 관리방안의 시행 내지 우선순위의 결정 등을 수행할 수 있다.

다) 오염취약성 분석에 의한 의사결정 모델

오염취약성 분석을 위하여 Aller et al.(1987)이 제시한 DRASTIC Method를 기준으로 하여 대수층 민감성을 작성하였다. 연구지역(화성시)에서 쉽게 획득할 수 없는 비포화대 매질의 영향을 제거한 나머지 6개의 인자(DRASTIC)로 민감도를 작성하였고, 질산성질소의 오염원인자로서 축산시설과 폐수발생, 생활하수 및 오폐수의 발생, 질소비료 시비강도를 대체하는 토지이용도 등의 3개 오염원인 인자를 조합하여 오염취약성을 작성하였다.

나아가 다른 지역에서의 적용성을 높이기 위해 통계모델에서 제시된 3개 민감성인자(지하수 심도, 함양량, 토양매체의 특성)만으로 민감성을 작성한 후, 질산성질소 오염원인자를 조합하여 또 다른 오염취약성을 작성하였고, 이들의 결과를 6개 민감성인자를 활용한 오염취약성과 비교, 검토하였다. 이렇게 작성된 개별 오염취약성과 종합 오염취약성은 실제 연구지역(화성시)의 지하수 중 질산성질소 농도값의 분포와 비교하였다. 이러한 분석과 비교결과 지역적인 관리의 우선순위와 각 지역에서의 중요한 오염원인자를 규명할 수 있었다. 이들을 정리하면 다음과 같다:

① 축산시설이 널리 분포된 장안면과 남양동 지역에서는 오염도가 상대적으로 낮지만 숫자적으로는 훨씬 더 많은 수의 오염된 지하수관정이 나타난다.

② 양감면 일대와 태안읍 서부와 봉담읍 북부 지역에 나타나는 높은 질산성질소 지하수오염도는 토지이용특성에 영향을 받은 것으로 평가된다.

③ 6개의 민감성 인자와 3개의 질산성질소의 오염원인자를 활용한 취약성과 3개의 민감성 인자와 3개의 질산성질소의 오염원인자를 활용한 취약성의 결과는 동일하다. 즉, 남양동, 장안면, 양감면 등이 우선 관리지역으로 나타나며, 정남면, 향남면, 팔탄면 등이 다음 순서의 관리대책 지역으로 평가된다.

④ 따라서, 지하수의 수질보호와 관리대책 수립을 위한 우선지역 선정을 위해서는 6개의 민감성 인자를 활용한 경우와 3개의 민감성 인자를 활용한 경우에 차이가 없다. 따라서, 기존에 가용한 자료를 활용하고 자료수집과 분석의 효율성을 제고하며 실질적인 행정관리에 용이성을 고려할 때, 3가지 민감성 인자만을 활용한 오염취약성 평가로도 충분히 그 목적을 달성할 수 있으리라 판단된다.

⑤ 단, 서신면, 마도면 일부지역에 나타나는 질산성질소에 의한 지하수의 높은 오염도는 현재 가용한 오염원인자에 대한 자료에서는 오염가능성을 정확하게 예측할 수

없다. 이러한 지역에 대해서는 보다 정밀한 현장조사가 필요하다.

결론적으로, 농어촌지역에서 청정지하수의 수질을 관리하고 질산성질소에 의한 오염예방을 위해서는,

- ① 지역의 자연적인 수질변화 요인인 수리지질학적 특성을 이해하고,
- ② 명백한 지표 오염원인자인 축산시설과 폐수방출, 생활하수와 오폐수 방출 및 비료의 시비정도에 대한 체계적인 관리가 중요하며,
- ③ 오염지수 내지 오염취약성을 평가함으로 오염가능성을 예측함으로,
- ④ 오염발생 이전에 방지와 관리대책을 수립하고 적극적으로 시행하여야 한다.

사. 해수침투 지역도 작성 기능

1) 해안지역 지하수 시스템 분석

지하수 시스템 분석을 위해서 양수 시험, 순간수위변화 시험 등의 수리 시험을 통해 대수층의 특성을 나타내는 여러 수리상수를 구하는 방법이 많이 사용되고 있으나 일반적으로 이 수리상수들은 관심 영역의 크기에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있으며 (Domenico and Schwartz, 1998), 이에 따라 염수와 실제 지하수를 이용하는 곳의 지하수와 관계를 규명하기 위해서는 지하수를 이용하고 있는 곳과 바다 사이에 있는 대수층을 대표할 수 있는 적절한 수리상수를 구하는 것이 중요하다. 이 같은 크기를 갖는 시스템의 수리상수는 별도의 수리 시험을 시행하지 않고 다음과 같이 조석 효율(Tidal Efficiency, TE)을 통해 추정할 수 있으며 이에 대한 이론적 배경은 다음과 같다. 조석 효율은 tide stage (H) 변화와 수두 (h) 변화의 비로 정의되며 해수의 수위 변화 자료와 지하수위의 장기 모니터링 자료가 있을 때 다음과 같은 식으로 구할 수 있다 (Batu, 1998).

$$TE = \frac{\Delta h}{\Delta H} \quad (3-14)$$

이러한 조석 효율로 인해 대수층의 수직 압력이 변하게 되는데 이로 인해 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$TE = \frac{dh}{dH} = \frac{dp}{\gamma H} = \frac{\frac{dp}{d\sigma}}{1 + \frac{dp}{d\sigma}} = \frac{\frac{\alpha}{n\beta}}{1 + \frac{\alpha}{n\beta}} \quad (3-15)$$

이때, p 는 물에 의한 압력, σ 는 매질의 응축압력, n 는 공극율, α 는 매질의 수직 비압축성, β 는 물의 비압축성이다. 기압 효율 (Barometric Efficiency, BE)는 식 (3-16)으로 주어진다. (Batu, 1998).

$$BE = \frac{\Delta h}{\Delta \left(\frac{P_a}{\gamma} \right)} \quad (3-16)$$

이때, P_a 는 대기압, γ 는 물의 단위 중량이다. 대기압의 변화가 그대로 피압층과 대수층에 전해진다고 가정하면 다음과 같은 식이 성립한다.

$$dp_a = dp + d\sigma \quad (3-17)$$

$$dp = dp_a + \gamma dh \quad (3-18)$$

식 (3-16), (3-17)를 식 (3-18)에 대입하면

$$BE = \frac{dh}{\frac{dp_a}{\gamma}} = - \frac{1}{\frac{dp}{d\sigma} + 1} \quad (3-19)$$

가 되며 a 와 β 의 정의로부터 식 (3-19)은 식 (3-20)로 바뀔 수 있다.

$$BE = - \frac{1}{1 + \frac{a}{n\beta}} \quad (3-20)$$

이때 (-)부호는 대기압이 증가하면 우물의 수위가 감소하는 것을 뜻한다. 이것을 통해 다음과 같이 저류 계수와 기압 효율의 관계를 끌어낼 수 있다.

$$S = \frac{\gamma n \beta b}{BE} \quad (3-21)$$

이때, b 는 대수층의 두께이다. 식 (3-20)와 (3-21)로부터 다음과 같은 기압 효율과 조석 효율의 관계를 유도할 수 있다.

$$TE = 1 - BE = 1 - \frac{\gamma n \beta b}{S} \quad (3-22)$$

이로부터 조석효율로부터 저류 계수를 추정할 수 있으며 이는 식 (3-23)로 표현된다.

$$S = \frac{\gamma n \beta b}{1 - TE} \quad (3-23)$$

조석 변화의 진폭을 H_0 , 조석 주기를 t_0 라 한다면, 해변으로부터 x 거리 떨어진 곳의 조석 요동(tidal fluctuation)의 진폭 H_x 와 time lag t_r 는 다음과 같이 주어진다 (Jacob, 1950).

$$H_x = H_0 \exp(-x\sqrt{\pi S/t_0 T}) \quad (3-24)$$

식 (3-23), (3-24)으로부터 투수량 계수 (T)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = \frac{\pi S}{t_0} \left(\frac{-x}{\ln(H_x/H_0)} \right)^2 \quad (3-25)$$

이와 같은 방법으로 저류 계수와 투수량 계수를 추정하는 것은 비록 여러 가정이 들어가지만 양수 시험 등을 이용하여 추정하는 방법보다 사용자의 주관적인 판단이 개입된 여지가 적다는 점에서 잇점이 있을 수 있다.

2) 염수침투를 고려한 적정 양수량 제안

Ghyben-Hertzberg 이론에 의하면 담수와 염수의 경계면은 다음과 같은 식으로부터 유추될 수 있다 (Fetter, 1994).

$$z = \frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} h \quad (3-26)$$

단, z 는 해수면으로부터 담수와 염수의 경계면까지의 거리, h 는 해수면으로부터 지하수면까지의 높이, ρ_w 는 담수의 밀도, ρ_s 는 염수의 밀도이다. 이 관계를 통하여 염수가 우물의 스크린에 영향을 미치지 않는 최대 수위강하(maximum drawdown, s_{max})가 정해지면 (그림 3-49) Theis equation에 의해 최대 적정 양수량 (Q_{max})를 제안할 수 있다.

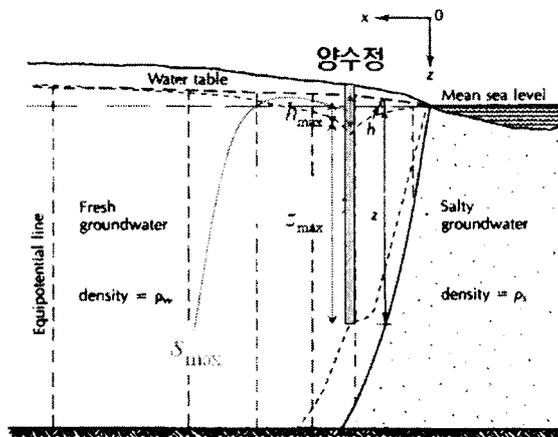


그림 3-49 최대 수위강하의 결정

$$Q_{\max} = \frac{4\pi T s_{\max}}{W(u)} \quad (3-27)$$

단, T 는 투수량 계수, $W(u)$ 는 우물함수이다.

3) 수치모형을 통한 적정 양수량 제안 모형의 검증

제안된 염수 침투를 고려한 적정 양수량 제안 모형을 검증하기 위해 수치 시험을 실시하였다. 염수 침투를 고려할 수 있는 수치 모형은 크게 sharp-interface saltwater intrusion model과 miscible transport model로 나뉠 수 있으며 이 중 sharp-interface saltwater intrusion model은 단독 포텐셜 이론 (single-potential theory)을 기반으로 염수와 담수의 경계면을 찾아내는 수치 모형이다. 이 모델은 3차원 모의 영역을 2차원으로 줄이기 위해 유동방정식을 수직방향으로 적분하는 듀핏 가정 (Dupuit assumption)을 사용하며 지배방정식이 시간에 따른 변화와 대수층의 복잡성을 반영하지 못한다는 단점이 있다. 또한 경계면의 위치를 추정하기 위해 Ghyben-Hertzberg 가정을 사용하여 본 연구에서 Ghyben-Hertzberg 가정을 기반으로 제안된 적정 양수량 제안 모형을 검증하기에는 무리가 있다. 따라서 본 연구에서는 지하수 유동 방정식과 용질 이동 방정식을 연동하여 계산하는 miscible transport model을 사용하여 제안된 모형을 검증하였다. 사용한 수치 모형은 miscible transport model 중 하나인 FEMWATER로, 이는 3차원 모형이며 용질 이동과 이에 따른 밀도류의 모의가 가능하며 불포화대의 지하수 유동 모의가 가능하다.

FEMWATER의 지배방정식은 다음 식들과 같이 주어진다.

$$\frac{\rho_0}{\rho} F \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot \left(K \cdot \left(\nabla h + \frac{\rho_0}{\rho} \nabla z \right) \right) + \frac{\rho^*}{\rho_0} q \quad (3-28)$$

$$\begin{aligned} \theta \frac{\partial C}{\partial t} + \rho_b \frac{\partial S}{\partial t} + V \cdot \nabla C - \nabla \cdot (\theta D \cdot \nabla C) = & - \left(\alpha \rho_0 g \frac{\partial h}{\partial t} + \lambda \right) (\theta C + \rho_b S) \\ - (\theta K_w C + \rho_b K_s S) + m - \frac{\rho^*}{\rho} q C_m + & \left[F \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\rho_0}{\rho} V \cdot \nabla \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right) - \frac{\partial \theta}{\partial t} \right] C \end{aligned} \quad (3-29)$$

식 (3-28)와 (3-29)는 각각 지하수 유동 방정식과 용질 이동 방정식으로 식 (14)의 수두 관련값을 식 (3-29)에 지하수 속도 관련값으로 공유하고 식 (3-29)의 농도 관련값을 식 (3-28)의 밀도 관련값으로 공유함으로써 서로 연동한다.

이상적인 수치적 접근을 위해 $1500 \times 1000 \times 60m$ 의 모의 영역을 설정하고 (그림 50), 모의 영역을 node 2824개, element 4585개로 유한요소화하였다. 모의를 위하여 지하수 유동 조건으로 지하수 상류 지역에는 15m의 고정수두조건을, 지하수 하류 지역에는 염수의 농도를 고려하여 $\epsilon(10-z)m$ 의 고정수두조건을 주었다. 이 때 ϵ 은 밀도 차이 비율 (dimensionless)이다. 또한 용질 이동 조건으로 해변으로 설정한 지하수 하류 지역에 농도 1700mg/l의 염수를 가정하였다. 그리고 모의 영역 내에 양수정을 설치하여 양수가 염수 침투에 미치는 영향을 살펴볼 수 있게 하였다. 양수정의 좌표는 $x=1000m$, $y=500$ 이며 스크린 구간은 $+9 - 5m$ 이다.

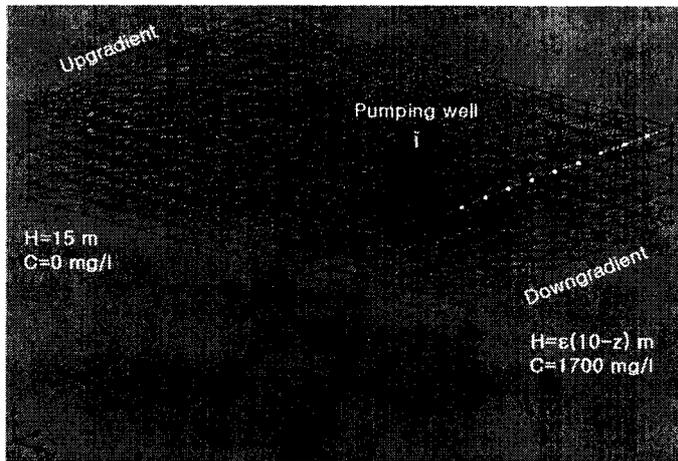


그림 3-50 모의 영역 및 경계 조건

모의 영역의 투수량 계수와 저류 계수는 경기도 화성군 일대에서 조석효율을 이용하여 구한 값을 사용하였으며 그 외 모의에 사용된 수리 상수들은 참고 자료를 참조하여 표 1과 같이 설정하였다.

표 3-24 모의에 사용된 수리 상수들

수리 상수	사용한 값
투수량계수	9.13×10^{-5} (m ² /sec)
저류계수	1.96×10^{-5} (dimensionless)
Bulk density	1.49×10^3 (Kg/m ³)
Longitudinal dispersivity	28.0 (m)
Transverse dispersivity	2.8 (m)
밀도 차이 비율	0.025 (dimensionless)

그림 3-51은 양수정에서 양수가 없을 때 수두의 분포를 보여준다.

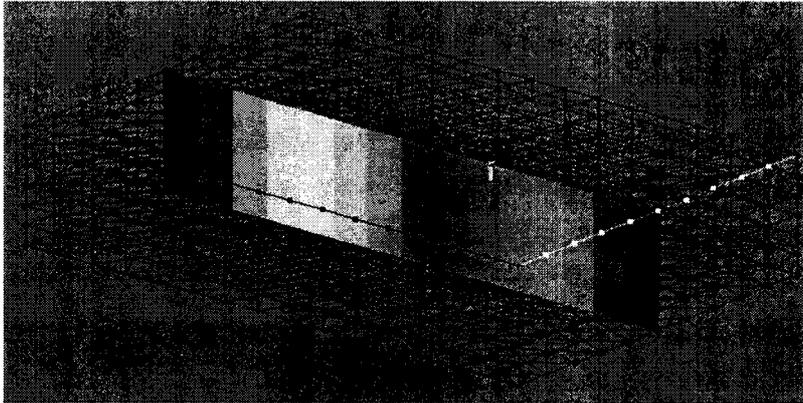


그림 3-51 양수를 하지 않을 때 수두의 분포

지하수 상류 지역으로부터 바다로 지하수가 흘러가는 양상을 보여주며 해안 부근에서 염수의 영향으로 상부는 지하수가 바다로 빠져나가는 흐름이 하부는 염수가 육지 쪽으로 들어오는 흐름이 있는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 양수가 없을 때 염도 분포로 확인할 수 있다 (그림 3-52).

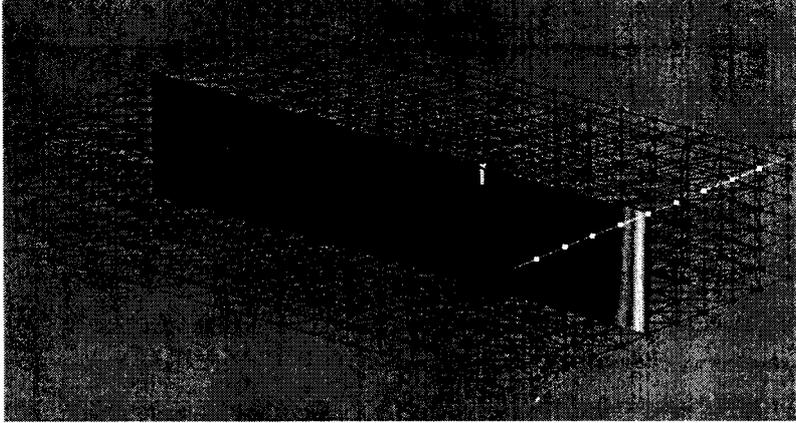


그림 3-52 양수를 하지 않을 때 염도 분포

염도 분포를 통하여 해안 부근의 하부를 통해 염수가 육지 쪽으로 밀려들어오는 것을 알 수 있다.

제안된 염수 침투를 고려한 적정 양수량 제안 모형의 검증을 위해 양수정에서 양수를 시행하였다. 이 때 양수량은 하루동안 양수를 한다고 가정하고 양수 전 양수정에서의 수위, 양수정의 스크린 구간, 대수층의 수리적 특성 등을 고려하여 양수정에 염수가 침투하지 않도록 적정 양수량 제안 모형을 통해 계산하였고 계산된 양수량은 $24.52 \text{ m}^3/\text{d}$ 였다. 그림 3-57와 3-58은 각각 $24.52 \text{ m}^3/\text{d}$ 의 양수량으로 양수하였을 때 모의된 수두의 분포와 염도의 분포를 보여준다.

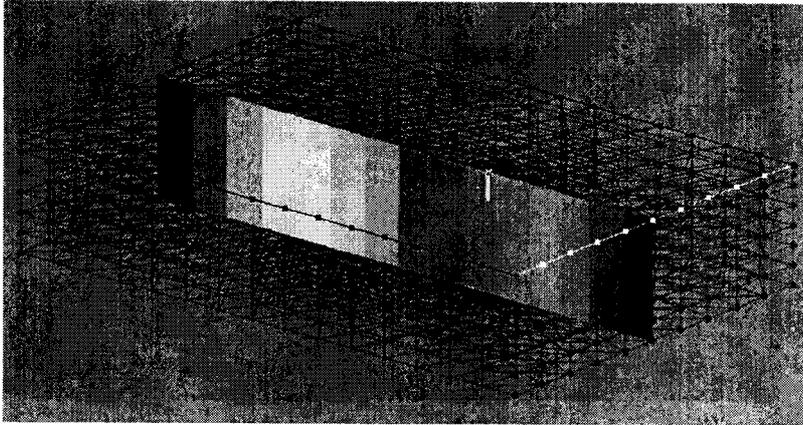


그림 3-53 24.52 m³/d로 양수하였을 때 수두의 분포

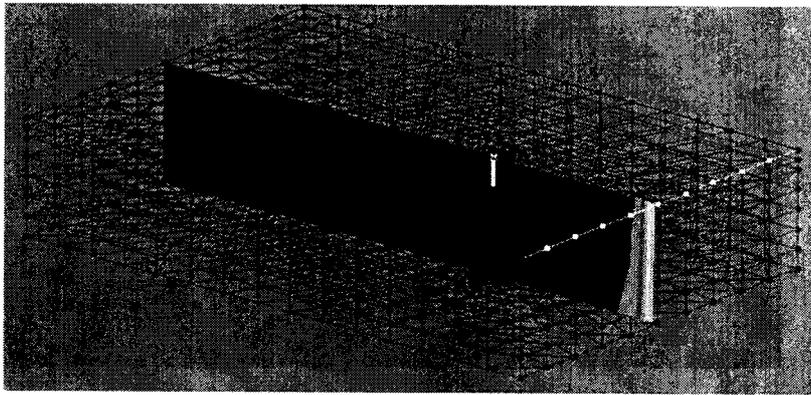


그림 3-54 24.52 m³/d로 양수하였을 때 염도 분포

그림 3-51와 3-52에서 확인할 수 있듯이 양수의 영향으로 양수를 하지 않았을 때에 비해 양수정 주위의 염도가 높아졌으나 아직 양수정으로는 염수가 침입하지 않았음을 알 수 있다. 그림 3-53과 3-54은 제안된 적정 양수량의 2배인 49.04 m³/d로 양수하였을 때 수두의 분포와 염도 분포를 보여준다.

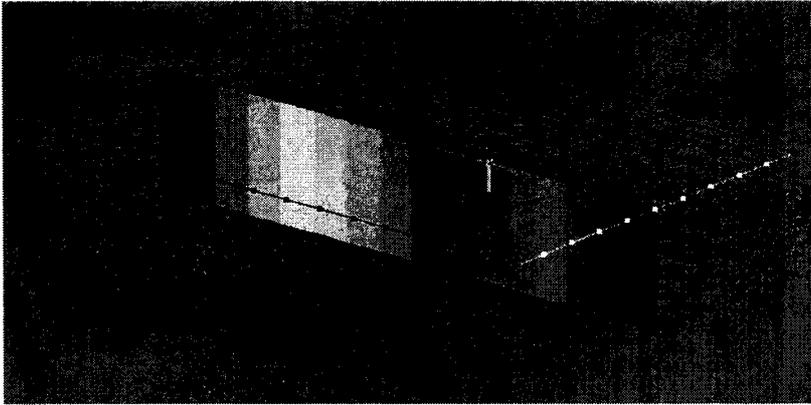


그림 3-55 49.04 m³/d로 양수하였을 때 수두의 분포.

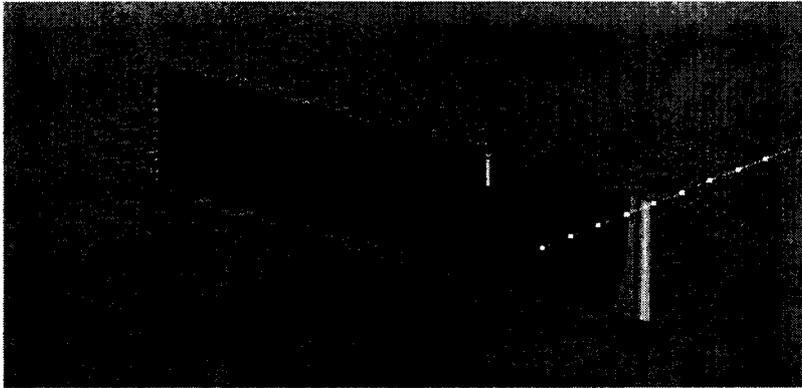


그림 3-55 49.04 m³/d로 양수하였을 때 염도 분포.

49.04 m³/d로 양수하였을 때 비록 낮은 농도이긴 하지만 염수가 양수정 안으로 유입됨을 알 수 있다.

이러한 수치 모의의 결과를 통해 제안된 적정 양수량 제안 모형이 수치적으로는 적절함을 검증할 수 있었다.

4) 조석효율을 이용한 해수영향권 구분

해수의 영향을 덜 받을수록 해수의 조석에 의해 지하수위가 변하는 정도를 나타내

는 조석효율 (TE)은 작아지게 된다. 이 조석효율과 식 (3-29)을 이용하여 해수영향권을 유추할 수 있고 이를 통해 해수 영향을 고려한 권역 구분을 할 수 있다. 식 (3-29)은 식 (3-30)과 같이 변형될 수 있으며 대상 지역 대수층의 투수량계수를 알고 있다면 해변으로부터 어느 정도 거리까지 해수의 영향이 미치는지 추정할 수 있다.

$$x = -\frac{\ln(H_x/H_0)}{\sqrt{\pi S/t_0 T}} = -\frac{\ln TE}{\sqrt{\pi S/t_0 T}} \quad (3-30)$$

5) 현장 적용

경기도 화성시 우정면 매항리 일대를 연구 지역으로 설정하여 제안된 모형들을 적용하였다. 그림 9는 연구 지역의 위치를 보여준다. 본 지역은 우리나라의 서해안에 위치하고 있어 조석 현상이 심하게 나타나고 있으며 그로 인해 매항리 앞 바다의 해수면은 4.2~9 m의 비교적 큰 해수변화폭을 보여준다.

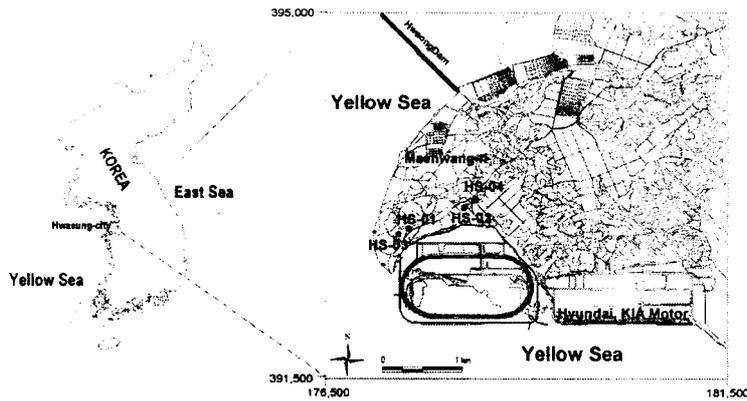


그림 3-56 연구 지역의 위치와 관측정의 위치.



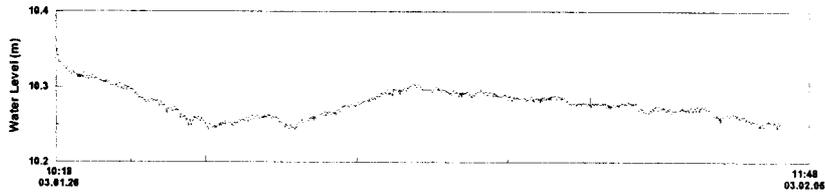
그림 3-57 조사 지역 내 농업용 관정과 산업용 관정의 모습

조사 지역 내에는 우리 나라의 일반적인 농촌 지역과 마찬가지로 관개 용수 공급을 위해 많은 농업용 양수정이 설치되어 있으며 아울러 인근 식당가의 허드렛 물이나 소규모 공장의 공업 용수 공급을 위해 산업용 양수정이 분포되어 있어 (그림 3-58), 과도한 양수에 의한 염수 침투로 식수를 외부로부터 공급받고 있다 (그림 3-58).

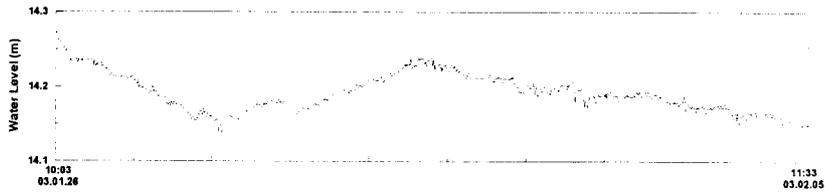


그림 3-58 식수 공급용 물탱크

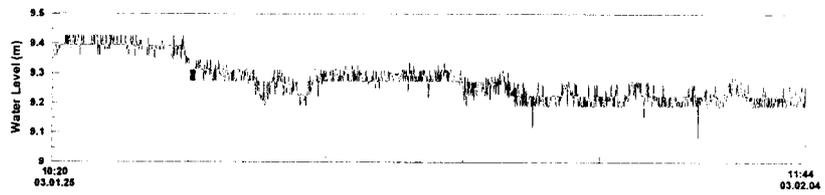
조사 지역 내 양수에 의한 염수 침투 효과를 정량적으로 분석하기 위하여 그림 그림 3-63와 같이 4개의 관측정을 설정하였으며 관측정을 통하여 시간에 따른 지하수위의 변화를 관측하였다 (그림 3-59).



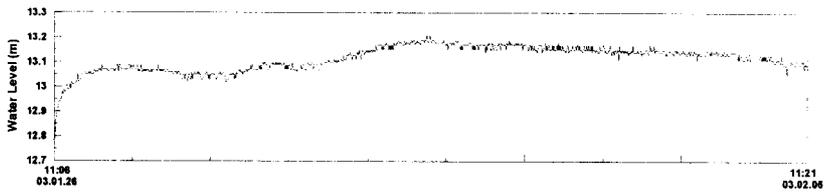
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3-59 각 관정에서의 수위 변화; (a) HS-01; (b) HS-02; (c) HS-03; (d) HS-04

해수 침투의 영향 정도에 따른 권역 구분의 기준을 마련하기 위하여 설치한 4개의 관측정에서 장기 수위 관측을 실시하여 각 관정의 조석 효율을 구하여 보았다. 그림 12는 장기 수위 관측의 결과를 보여준다. 조수간만에 의한 해수면 높이 변동의 진폭과 지하수위 변동의 진폭의 비로 정의되는 조석효율을 구하여 보았다. 그 결과,

HS-01 관정의 조석 효율은 4.245×10^{-3} , HS-02 관정은 7.547×10^{-3} , HS-03 관정은 1.425×10^{-2} , HS-04 관정은 2.736×10^{-2} 으로 각 관정의 해안으로부터의 거리와 함께 도시하여 본 결과 (그림 3-59), 바다로부터 거리가 멀어질수록 관정의 조석 효율이 증가하는 경향을 보여주어 조석 효율을 기준으로 해수 침투의 영향 정도를 판단할 수 있으며 이를 권역 구분의 기준으로 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

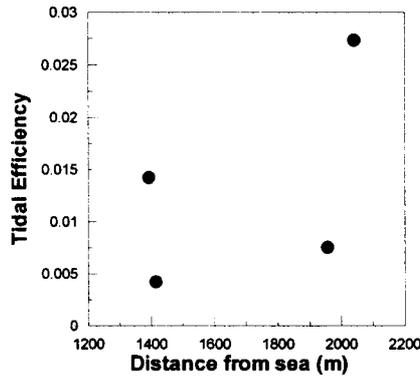


그림 3-60 각 관측정의
해변으로부터의 거리와 조석
효율과의 관계

식 3-59 와 3-61을 이용하여 조사 지역 내 바다와 각 관측정 사이 대수층의 수리 상수들을 구하여 보았다 (표 2).

표 3-25 조석 효율을 이용하여 구한 바다와 각 관측정 사이 대수층의 수리 상수들.

관정 이름	추정한 저류계수 (dimensionless)	추정한 투수량계수 (m ² /sec)
HS-01	1.96×10^{-5}	9.13×10^{-5}
HS-02	3.98×10^{-5}	4.43×10^{-4}
HS-03	2.68×10^{-5}	1.99×10^{-4}
HS-04	4.73×10^{-5}	1.06×10^{-3}

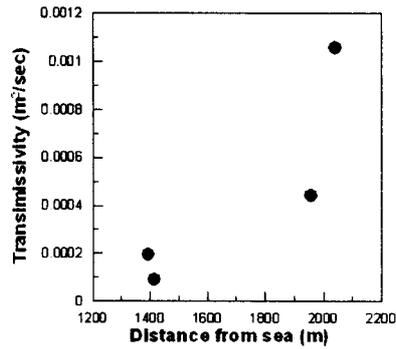


그림 3-61 각 관측정의
해변으로부터의 거리와
투수량 계수와 관계

추정한 투수량 계수는 바다로부터 거리가 멀어질수록 증가하는 양상을 보여주며 (그림 14), 이는 해변으로부터 거리가 멀어질수록 투수도가 낮은 개펄의 영향이 상대적으로 감소하면 생기는 현상으로 추정된다.

각 관측정의 스크린 깊이를 고려하여 식 3-62을 이용해 1시간 양수시 최대 수위 강하량을 구하였으며 이를 가지고 식 3-63을 통해 최대 적정 양수량을 구하였다 (표 3-30).

표 3-26 염수 침투를 고려한 각 관측정에서의 최대 적정 양수량.

관정 이름	최대 수위 강하량 (cm)	최대 적정 양수량 (m ³ /d)
HS-01	14.38	86.15
HS-02	13.66	377.43
HS-03	8.85	112.44
HS-04	12.45	789.29

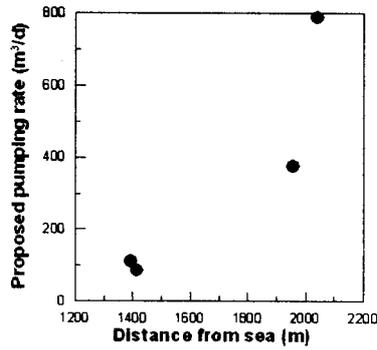


그림 3-62 각 관측정의
해변으로부터의 거리와
제안된 적정 양수량과의
관계

그림 3-68는 각 관측정의 해변으로부터의 거리와 제안된 적정 양수량과의 관계를 보여주며 제안된 적정 양수량은 바다로부터 거리가 멀수록 커지는 경향을 보여준다.

표 3-29의 추정된 투수량계수와 저류계수를 이용하여 식 3-66를 통해 해수의 영향권을 추정하였다. 이 때 해수의 영향 유무는 조석 효율 10^{-4} 을 기준으로 판단하였다. 표 3-30은 각 관측정이 속해있는 대수층에서 추정된 해수의 영향 거리를 보여준다.

표 3-27 계산된 각 대수층에서의 해수영향권

관정 이름	해변으로부터 해수의 영향 거리 (m)
HS-01	2384
HS-02	3687
HS-03	3011
HS-04	5221

추정된 해변으로부터 해수의 영향 거리는 해수영향권 구분에 이용할 수 있다.

6) 화용방조제 주변의 수질 분석

(1) 시료채취 및 분석

연구지역의 수질 측정을 위해 바닷물과 연구지역의 기설관정을 중심으로 수질 측정을 위한 샘플링을 하였다. 화용방조제가 설치된 후 해수의 영향을 받지 않은 지역 주변의 지하수 수질의 조성과 분포를 관찰하기 위하여 200년 1월 22일에 지하수 시료를 채취하였다. 해안주변 수질의 개략적인 상태를 확인하기 위하여 농업용수, 생활용수, 공업용수 등 연구전지역의 지하수를 채취하여 분석하였다. 총 20개 관정 중에서 20개의 시료를 채취하였다. 채취된 시료는 0.45 μ m필터로 여과한 후에, 양이온은 ICP-AES를 이용하여 분석하였으며, 음이온은 IC-DX500을 이용하여 분석하였다. 시료채취시에 현장에서 pH, EC, ORP, DO를 측정하였다.

(2) 해안 주변의 수질

2004년 1월에 채취된 시료의 분석값은 대부분은 농업용수로 사용되는 관정으로 심부로 갈수록 해수의 영향을 많이 받게 되므로 10m내외의 천부관정으로 이루어져있다. 일부 심부 관정을 제외하고 대체로 비슷한 성분 조성을 나타내었다. 전체적으로 양이온은 $Na > Ca > Mg > Si > K$ 의 조성을 갖으며, 음이온은 $Cl > NO_3 > SO_4$ 을 보였다. 오염을 나타내는 NO_3 는 주택 주변 천부관정에서 허용기준치 이상으로 높게 나타났다. 천부관정보다 심부관정과 계속 양수지역에서 전체적인 이온성분이 높은분포를 보여 강우의 영향과 해수의 밀도에 영향을 지배적으로 받는 특성을 반영하고 있음을 확인할 수 있다. Si는 오랜 시간동안의 암석과의 접촉을 나타낸다.

일부지역에서는 NO_3 가 높게 나타나는데 이는 농촌지역 생활하수의 유입에 의한 영향이다. 전체적으로 생활하수나 오폐수의 유입에 의하여 해안지역 농촌 지하수의 수질조성이 강한 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다.



그림 3-63 수질 분석을 위한 샘플링 현장



그림 3-64 수질 분석을 위한 샘플링 작업 장면.

표 3-28 좌표를 기준으로 수질 분석을 위한 샘플링 장소의 현장 수질측정자료, 양이온 그리고 음이온의 분석결과.

SITE	TM(X-axis)	TM(Y-axis)	pH	ORP(mv)	EC ($\mu S/cm$)	DO(mg/l)
S-1	177601.5	393147.9	6.97	173	1255	5.24
S-2	177563.6	393123.1	6.61	106	1625	7.14
S-3	177476.1	393287.7	6.71	152	546	4.92
S-4	177698.1	393281.1	6.78	139	1266	3.34
S-5	177429.1	393437.8	7.27	172	310	7.96
S-6	177457.8	393479.6	6.94	147	402	6.77
S-7	177972.3	393300.7	6.71	127	3390	3.38
S-8	178403.3	393479.6	6.9	58	370	1.34
S-9	178403.3	393526.6	7.03	168	175.1	6.93
S-10	178441.1	393563.2	7.25	128	181.6	5.79
S-11	178938.7	394344.1	6.82	166	1132	5.99
S-12	179204.3	395059.7	8.17	174	609	7.41
S-13	179261.2	395045.4	8.21	184	409	6.33
S-14	179971.6	395314.4	7.37	182	524	4.44
S-15	179979.4	395473.7	7.34	164	517	6.13
S-16	180027.8	395541.9	7.43	156	289	5.21
S-17	180302.0	395870.7	6.31	136	1228	6.36
S-18	180432.6	395783.2	6.77	133	284	6.75
S-19	180953.6	395664.3	7.22	197	593	8.5
S-20	177252.9	392551.5	7.24	126	50700	9.24

SITE	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn
S-1	56.473	27.760	0.117	14.427	2.585	146.144	0.000	0.000	0.000	0.000
S-2	82.325	34.417	0.146	14.083	3.176	187.976	0.000	0.000	0.000	0.000
S-3	23.958	19.287	0.013	15.328	1.665	40.598	0.000	0.000	0.000	0.000
S-4	100.036	11.030	0.121	8.125	2.399	126.140	0.000	0.019	0.032	3.251
S-5	17.538	7.277	0.000	13.536	1.860	15.708	0.000	0.000	0.000	0.000
S-6	17.925	7.464	0.000	13.494	1.953	17.018	0.000	0.000	0.000	0.057
S-7	392.907	90.283	0.104	6.335	30.969	129.842	0.000	0.000	0.000	0.503
S-8	36.855	5.499	0.000	0.749	2.128	17.596	0.000	0.204	0.000	0.000
S-9	16.679	1.483	0.000	12.708	1.747	6.471	0.000	0.000	0.053	0.317
S-10	21.180	1.737	0.000	14.137	0.959	4.599	0.000	0.000	0.000	0.529
S-11	88.637	30.243	0.047	10.851	2.533	96.168	0.000	0.000	0.000	0.021
S-12	18.143	22.419	0.030	4.953	1.882	57.918	0.000	0.000	0.000	0.000
S-13	14.982	9.706	0.012	7.684	1.099	37.776	0.000	0.000	0.000	0.184
S-14	40.522	12.450	0.000	12.007	1.395	25.490	0.000	0.000	0.000	0.000

S-15	40.651	12.400	0.000	12.005	1.426	25.421	0.000	0.000	0.000	0.000
S-16	21.579	5.238	0.000	12.703	1.024	12.120	0.000	0.000	0.000	0.000
S-17	92.957	26.727	0.042	13.036	6.069	71.190	0.000	0.410	0.000	0.000
S-18	17.103	6.442	0.000	14.858	1.240	15.095	0.000	0.000	0.000	2.712
S-19	34.963	14.954	0.003	14.023	2.022	41.059	0.000	0.000	0.000	0.000
바닷물	9965.13	1154.61	0.228	0.361	403.516	380.873	0.000	0.000	0.000	0.000

SITE	F-	Cl-	NO3-	SO42-
S-1	N.D	191.73	26.92	128.48
S-2	N.D	263.12	72.05	160.05
S-3	N.D	86.02	35.64	7.55
S-4	N.D	265.21	3.66	54.45
S-5	N.D	45.65	13.36	0.51
S-6	N.D	41.8	31.79	0.35
S-7	0.55	677.6	16.64	91.08
S-8	N.D	77.99	N.D	1.52
S-9	N.D	21.16	11.4	0.8
S-10	N.D	17.91	0.51	2.04
S-11	N.D	164.34	55.44	48.4
S-12	N.D	73.04	9.43	18.9
S-13	N.D	21.16	17.7	9.23
S-14	N.D	91.3	11.97	3.91
S-15	N.D	92.29	11.9	3.9
S-16	N.D	35.53	15.32	1
S-17	N.D	213.95	116.82	9.48
S-18	N.D	28.38	31.46	1.1
S-19	N.D	87.45	58.3	5.56
바닷물	N.D	14028.74	N.D	2076.36

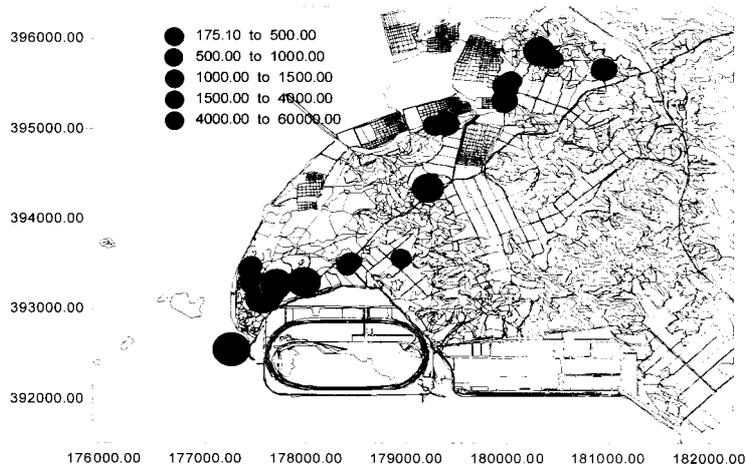


그림 3-65 연구지역의 전기전도도 분포: EC ($\mu S/cm$)
 화옹방조제 안쪽에는 담수화가 진행되고 있는 상태를
 직접적으로 나타내주고 있는 상태

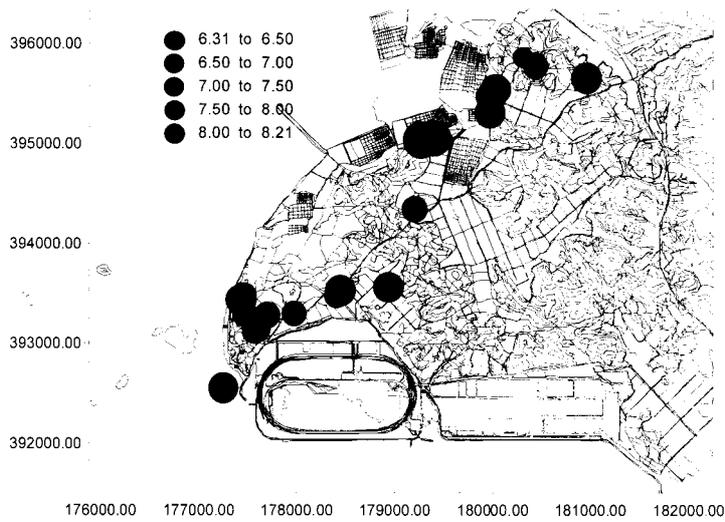


그림 3-66 연구지역의 pH 분포도, 대체적으로 중성의
 범위를 보이고 주택 인근에서 산도가 조금 높게 나타남.

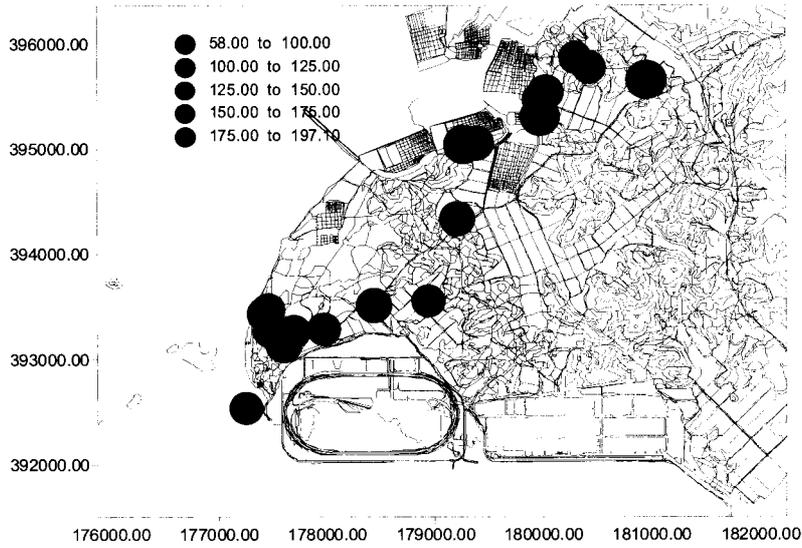


그림 3-67 연구지역의 산화환원전위 분포도(ORP(mV))

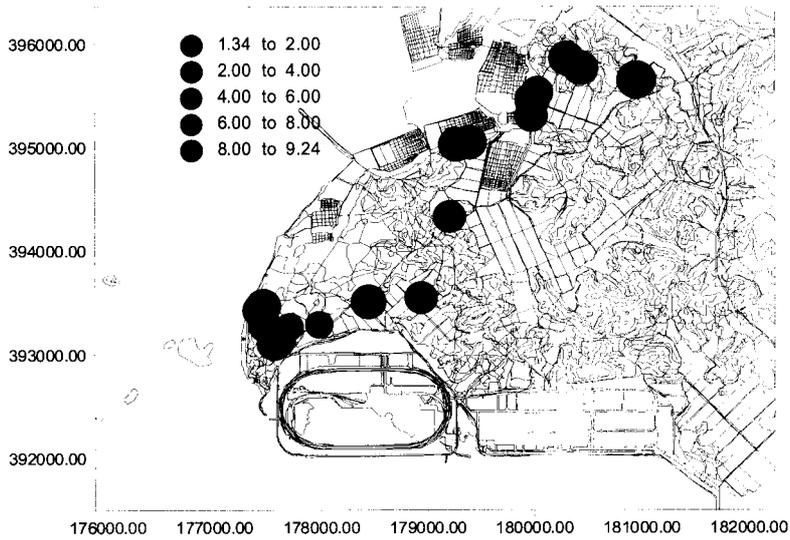


그림 3-68 연구지역의 용존산소량의 분포도DO(mg/l),
해수가 침입하는 범위주변으로 낮은 용존산소량을 보이는
경향.

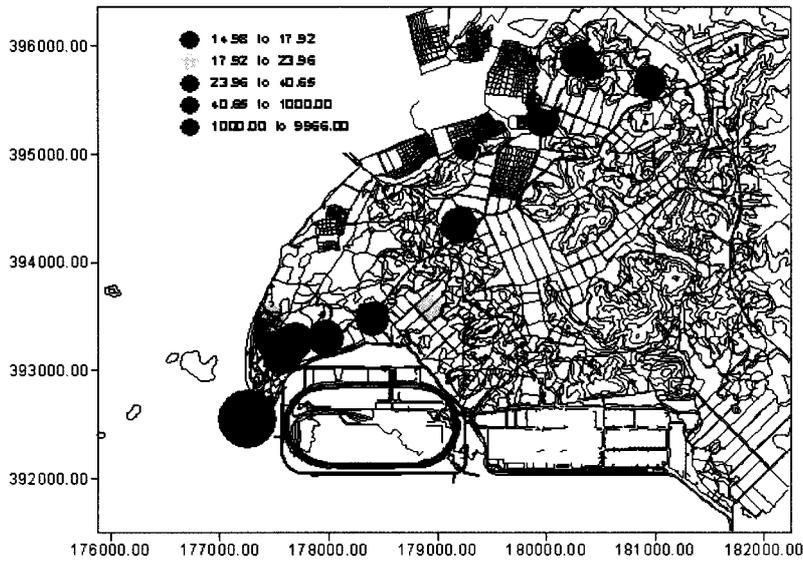


그림 3-69 연구지역의 Na(ppm) 분포도

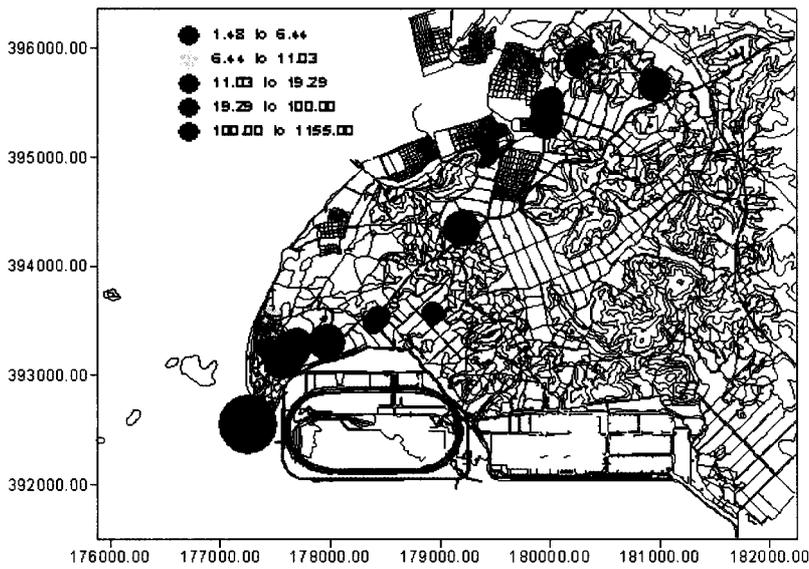


그림 3-70 연구지역의 Mg(ppm) 분포도

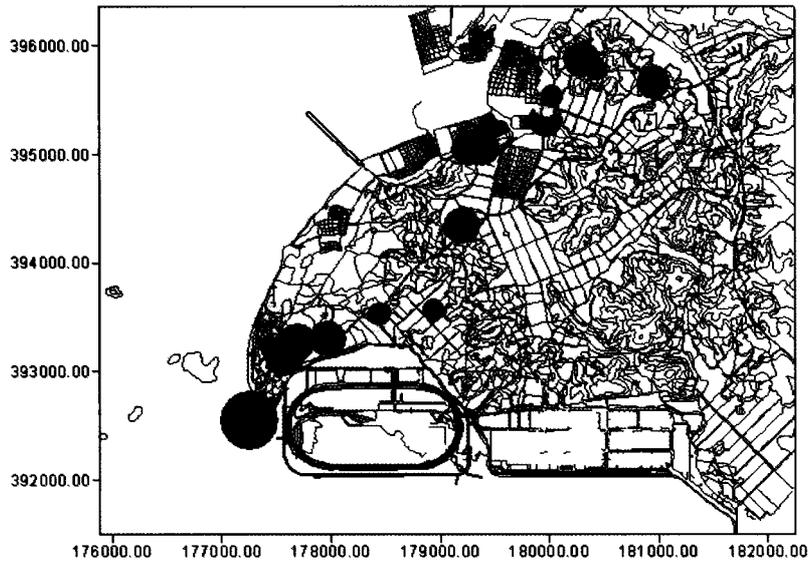


그림 3-71 연구지역의 Ca(ppm) 분포도

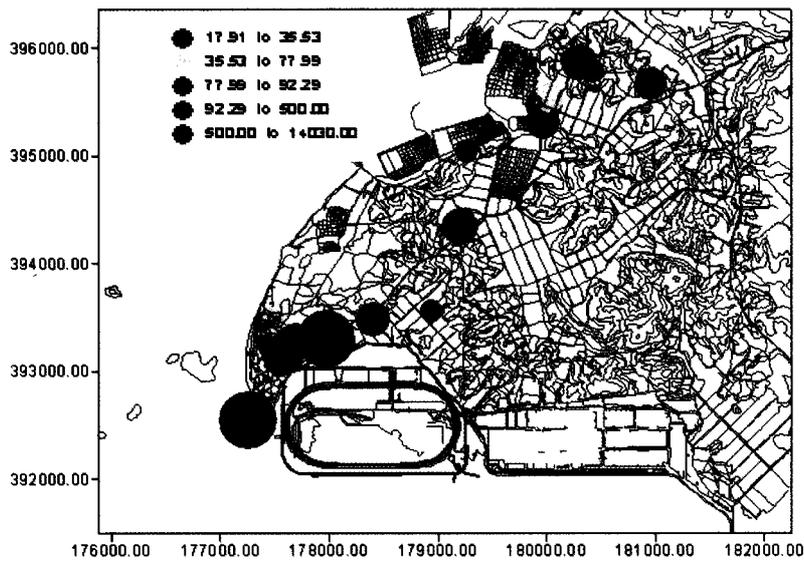


그림 3-72 연구지역의 Cl(ppm) 분포도

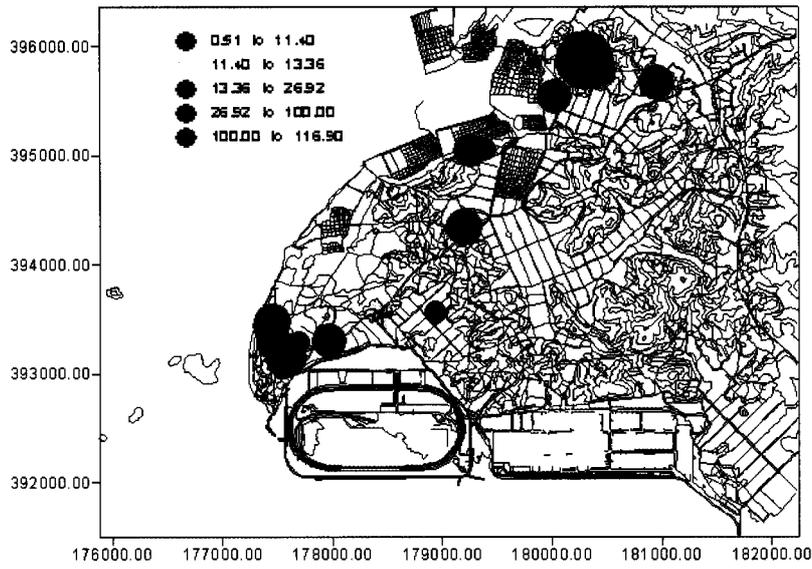


그림 3-73 연구지역의 NO₃(ppm) 분포도

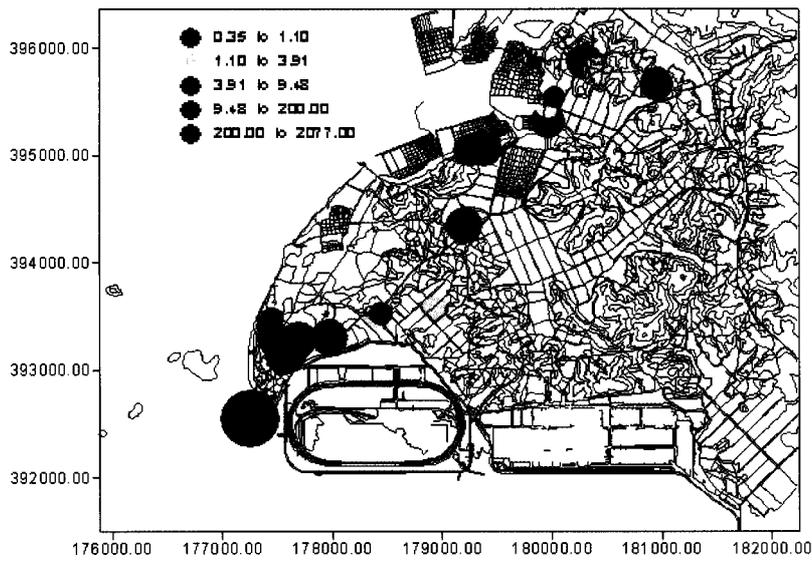
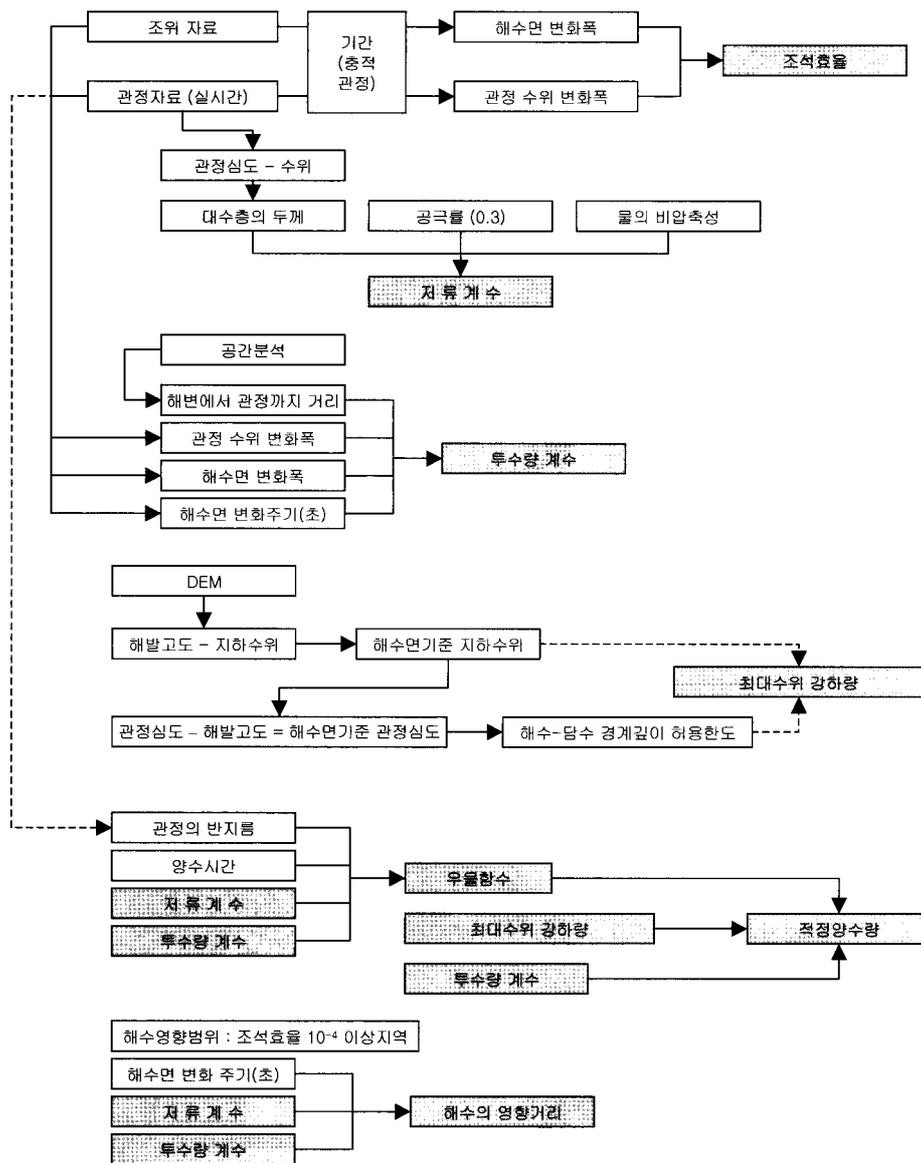


그림 3-74 연구지역의 SO₄ 분포도



* 조석효율 10^{-4} 는 위성자료의 분석결과 해수 10m의 진폭에 지하수위 1mm의 진폭을 의미함.

그림 3-75 해수침투 지역도 작성 알고리즘

아. 농경지 불포화대내 비료성분 거동 분석

1) 연구의 필요성 및 범위

지하수 수질오염의 주요 원인은 점오염원과 비점오염원으로 크게 구분된다. 각각의 오염원은 강우와 지표수의 지하수로의 이동경로인 토양을 오염시킴으로서 지하수를 오염시킨다. 본 연구에서는 비점오염원에 대한 특성을 특정지역을 대상으로 정밀파악하고, 특히 농경지 비점오염원의 주요 오염물질로 알려진 비료성분을 대상으로 여러 가지 환경조건에 따른 불포화지대에서의 오염확산 경로를 알아봄으로써 적절한 대처 방안을 모색하고자 하였으며, 마지막으로 외국의 비점오염원 관리기술을 조사하여 국내에 적합한 관리기술을 선정하여 실제적인 칼럼실험을 통해서 적용가능성을 알아보 고자 하였다. 이와같은 결과를 활용하여 본 과제에서는 연구지역의 질산성질소 오염 지수도를 생성하였다.

지금까지 우리나라에서는 점오염원에 대해서는 적극적인 처리대책이 추진되고 있으나, 비점오염원에 대해서는 구체적인 대책을 추진하지 않아 효율적인 수질관리정책 수립에 있어 사각지대로 존재하고 있다. 앞에서 살펴본 바와 같이 우리나라에서 비점 오염원의 기여율은 일부 오염물의 경우 총 배출량의 절반 이상을 차지하고 있으며, 점오염원처리를 위한 환경기초시설의 완비와 토지이용의 고도화에 따라 비점오염원의 기여율은 더욱 비중이 증가하리라 전망된다. 따라서 효율적인 수질관리를 위해서는 비점오염원 관리기반의 구축, 비점오염원 처리대책의 강구, 비점오염원과 점오염원의 연계운영 등 비점오염원에 대한 적극적인 관리대책이 필요하다.

특히 농약의 과다사용(施用)은 토양·수질 및 농산물 오염, 생태계 파괴를 유발시키며, 화학비료 과다사용(施用)은 토양의 산성화, 염류집적, 이화학적 악화 및 부영양화로 인한 수질오염, 지하수 오염을 유발시킨다. 또한 대규모의 축산단지에서는 축산 분뇨 유출로 지표수의 부영양화, 오염, 악취 및 해충발생으로 인한 환경파괴가 점차적으로 확산 및 가속화되고 있는 실정이다.

밭의 경우 시비한 질소의 10~30%가 작물에 흡수되지 않고 유실 또는 용탈될 뿐만 아니라, NO₃⁻으로 인한 식수오염의 우려마저 있는 것으로 알려져 있다. 최근에 토양에 시비된 비료로부터 용출된 암모니아나 칼슘이온과 같은 양이온이나^{1~3)} 질산성 질소와 같은 음이온의 지하 유입으로 인한 지하수 오염경로에 관한 연구가⁴⁾ 활발하게 이뤄지고 있다. 질소의 경우에 토양으로 유입된 유기태 질소나 암모니아성 질소성

분은 무기화 작용에 의해 $\text{NO}_3\text{-N}$ 로 전환되어 Cl- 과 유사한 속도로 지하 이동에 의해 지하수계의 오염원이 되는 것으로 알려져 있다. $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 지하이동은 기상조건에 따라 크게 영향을 받는데, 강수량 또는 관개량이 많은 시기나 지역일수록 그 정도가 크게 증가하여 토양 하층부에서의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도가 현저히 높아지는 것으로 알려져 있다.5) 이에 반해 비교적 토양매질에 흡착력이 강한 인산염의 경우는 오염확산이 주로 토양입자의 유실에 의한 것으로 추정되고 있으나 토양의 인산 흡착용량의 제한으로 인하여 과잉으로 유입된 인산은 특히 강우나 관개수에 의하여 쉽게 용탈되어 장거리 이동이 가능한 것으로 알려져 있다.

과다사용(施用)된 비료의 성분들은 생화학적, 물리화학적 전환과정을 거치면서 작물에 흡수되거나 토양 교질물에 흡착 고정되기도 하지만 일부는 일시적인 집중강우에 의해 유거(流去)되거나 관수(灌水)에 의해 용탈되어 하천이나 지하수로 유입, 부영양화를 유발시켜 농업에 의한 수질오염 문제를 야기하고 있다. 이러한 문제점을 경감시키기 위해서는 비료성분들이 토양내 환경조건에 따라 어떻게 전환 및 행동하는가, 그리고 어떤 형태로 얼마나 용탈되는가 하는 연구가 수행되어야 할 것이다.

토양 내에서 이들 비료 성분들의 행동에는 많은 요인들이 작용하며, 특히 물의 이동과 함께 일어나므로 이에 대한 연구는 많은 어려움이 뒤따른다. 외국의 경우 column 실험을 통하여 비료 성분들의 행동을 수식화하였으며, 비료 성분들의 이동 및 전환에 관한 연구들을 기초로 수리모형을 개발하여 이를 검증하는 모의 실험을 수행하는 등 최근에 이르기까지 비료 성분의 전환 및 용탈에 관한 많은 연구가 보고되고 있다6~11). 우리나라에서도 질소 및 인산비료 성분의 이동에 관한 연구가 수행되어 왔으나 대부분이 질소에 국한되어 왔으며, 작물에 의해 다량 요구되는 인산과 칼륨에 대한 양분이동 실험은 질소에 비해 미흡한 실정이다12~14).

따라서 본 연구에서는 먼저 농경지 주요 비점오염원인 비료성분의 현장 실태조사를 특정 지역을 대상으로 농경지와 계절별로 수행하고, 우리나라의 농경지에서 주로 시비되고 있는 복합비료와 요소비료를 사용하여 오염 주성분인 N(Nitrogen)과 P(Phosphorus)의 토양 내에서의 거동 특성과 주요 영향인자에 대해 column 실험을 통하여 알아보았으며, 현장조건을 모사하기 위하여 M 지역의 논과 밭 토양을 채운 토양칼럼에 복합비료와 요소비료를 그 지역 평균 시비량 조건에서 적용하여 수분이동에 따른 경작지별 비료성분중 N(Nitrogen)과 P(Phosphorus)의 용탈 특성을 잔류특성

과 함께 알아보았다. 마지막으로 외국의 농경지 비점오염원 관리기술을 조사하여 국내에 적합한 공법을 파악하고자 하였으며 적용가능한 비점오염원 확산 방지공법을 제안하여 실험을 통하여 그 적용효과를 알아보려고 하였다.

전체적인 연구과제의 흐름을 그림 3-76에 나타내었다.

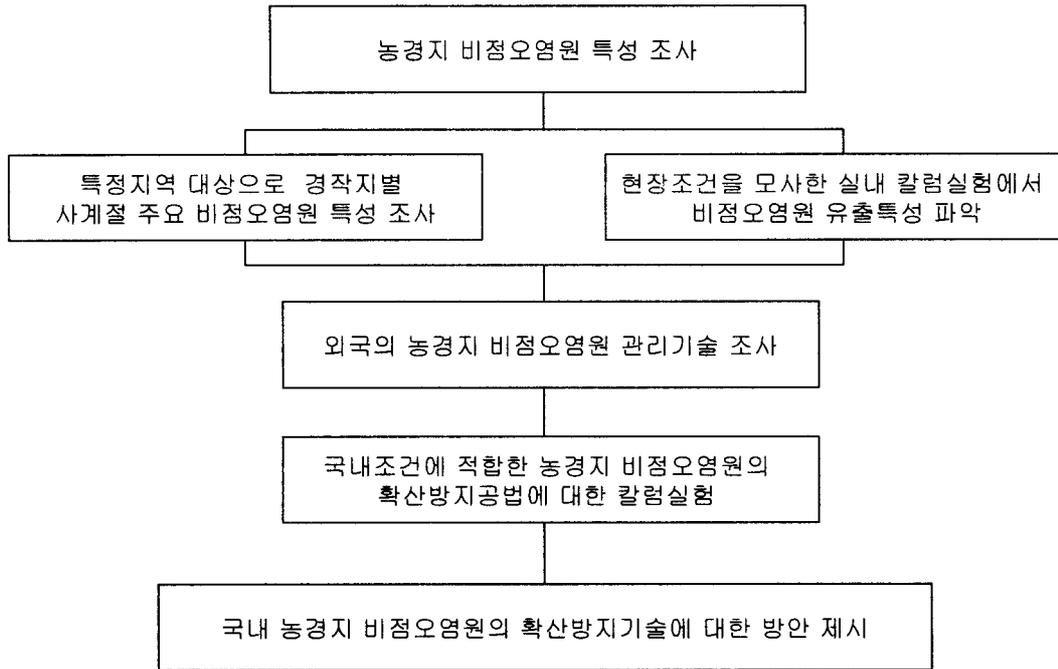


그림 3-76 전체 연구수행의 흐름도

(2) 무주지역 농경지 비점오염원의 거동조사

(가) 현장조사방법

무주지역의 현장조사는 계절별로 비점오염원의 거동을 알아보기 위하여 봄, 여름, 가을, 겨울, 계절별 선정된 무주지역의 논과 밭 경작지를 방문하여 경작지 내 토양과 주변토양에서 시료를 여러 군데에서 깊이별로 채취하여 계절별 경작지별 비료성분의 분포특성을 조사하였다.

토양시료는 각 경작지별 5군데 지점에서 표토, 10, 20, 30 cm 깊이에서 채취하였으며 주변토양을 채취하여 상대적인 농경지의 비료성분의 분포를 측정하였다. 그림 2-11은 조사 현장의 개략도와 시료채취지점을 나타낸 그림이고, 그림 2-12는 겨울과 봄철에 실시한 현장조사 모습을 나타낸 사진이다. 현장은 무주읍에 위치한 농경지중 한곳을 선택하여 동일 지점에서 계절별로 조사하였으며 주변에 개울과 농가가 가까이 위치하고 있으며 밭에서는 고추와 마늘을 재배하며 논 토양에서는 겨울철에 2모작을 운영하고 있었다. 겨울철 조사시기의 외부온도는 약 0-10°C의 온도범위를 나타내었으며 봄철의 경우에는 약 15~20°C의 온도분포를 나타내었다. 겨울철 조사 시기에는 논 의 경우에 아직 모를 심기전이어서 물을 대지 않은 상태였으나 토양중에 수분 함유량이 많은 편이었으며 봄철에는 밭의 경우에 마늘을 경작하고 있었으며 논 의 경우에는 모를 심기 바로 직전이었다. 논에는 2모작이 진행중이었다.

현장에서 핸드 오거를 사용하여 깊이별 채취한 토양은 냉장보관하여 실험실로 옮긴 후 경작지별 토양특성과 비료성분을 측정하였다. 분석은 국내 공정시험법과 미국 EPA Method를 기준하여 이루어졌다. 먼저 논과 밭의 심도별 토양입경분포를 측정하여 표 2-12에 나타내었다. 논과 밭 모두 대부분 양토와 사토로 토양이 이루어져 있으며 표토에 가까울수록 토양의 입경분포가 상대적으로 작은 상태를 보여주고 있다.

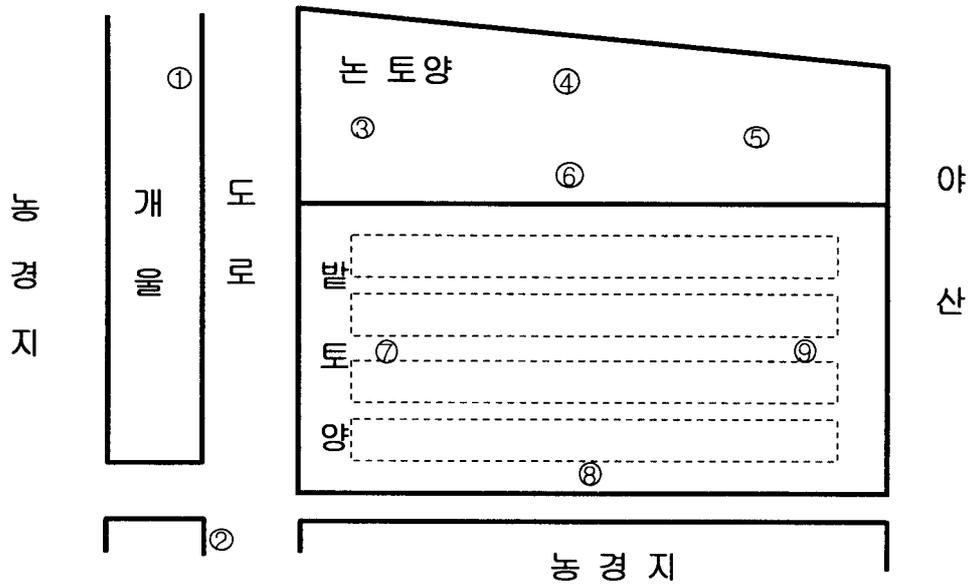


그림 3-77 무주 시범지역 농경지 개략 및 조사지점.

가) 겨울철 현장조사



나) 봄철 현장조사



그림 3-78 겨울과 봄철 무주 시범지역 농경지 현장조사

표 3-29 각 경작지의 깊이별 토양입경분포

심도(cm)	s.g (g/cm ³)	토양입경분포(%)				
		sand	silt	clay	soil	
논	0-10	2.45	60.0	13.1	26.9	Sand clay loam(사질식양토)
	10-20	2.55	78.0	11.1	10.9	Sand loam(사양토)
	20-30	2.65	84.0	9.2	6.8	Loamy sand(양질사토)
밭	0-10	2.45	70.8	14.7	14.5	Sand loam(사양토)
	10-20	2.55	82.9	11.2	5.9	Loamy sand(양질사토)
	20-30	2.65	84.0	10.2	5.8	Loamy sand(양질사토)

계절에 따른 논과 밭의 깊이별 토양 pH의 분포변화와 유기물 함량변화를 각각 그림 3-77과 그림 3-78에 나타내었다. 토양 pH의 경우에 논과 밭의 경작지나 계절별 변화는 적게 나타났으며 6~7사이의 일반적인 토양 pH를 나타내었다. 깊이별 분포에도 밭의 경우에 표토 부근에서 다소 낮은 경향을 나타낸 것 외에는 큰 차이를 나타내지 않았다. 그러나 주변토의 경우에 7~8의 다소 높은 pH 값을 나타내었다. 토양 유기물의 경우에 논과 밭 모두 표토에 가까울수록 높은 유기물 함량을 나타내었으며 이는 표토에 유입된 식물 잔류체와 같은 생체의 분해산물의 집적이 표토에 높게 나타나는 일반적인 토양의 양상과 일치하였다. 논과 밭의 유기물 함량 차이는 작게 나타났으며 계절의 영향을 보면 봄에 비하여 겨울에 유기물의 함량이 높게 나타났다. 이는 강우 등에 의한 침출효과와 비교적 높은 온도에서의 미생물 분해의 증가가 그 원인으로 추정된다.

토양 중 미생물 활성도(DHA)의 분포를 계절별로 조사한 결과를 각각 그림 3-80에 나타내었다. 미생물의 활성도는 표토에 가까울수록 높은 값을 보여주었으며 이는 미생물 활동에 필요한 산소공급과 유기물 함량이 표토에 가까울수록 양호하기 때문이다. 논과 밭의 미생물의 활성도는 뚜렷한 차이를 나타내지 않았는데 이는 조사 시기에 토양의 수분 함량조건이 비슷하기 때문인 것으로 판단되며 논에 물을 대는 시기 이후에는 미생물의 활성도에 큰 차이가 있을 것으로 예상된다. 토양의 양이온 흡착능력은 겨울에 측정하였는데 논과 밭의 뚜렷한 차이는 나타나지 않았으며 토양 깊이의

증가에 따라 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 조사범위의 토양층내에서 토양 성분의 차이가 크지 않기 때문인 것으로 생각된다.

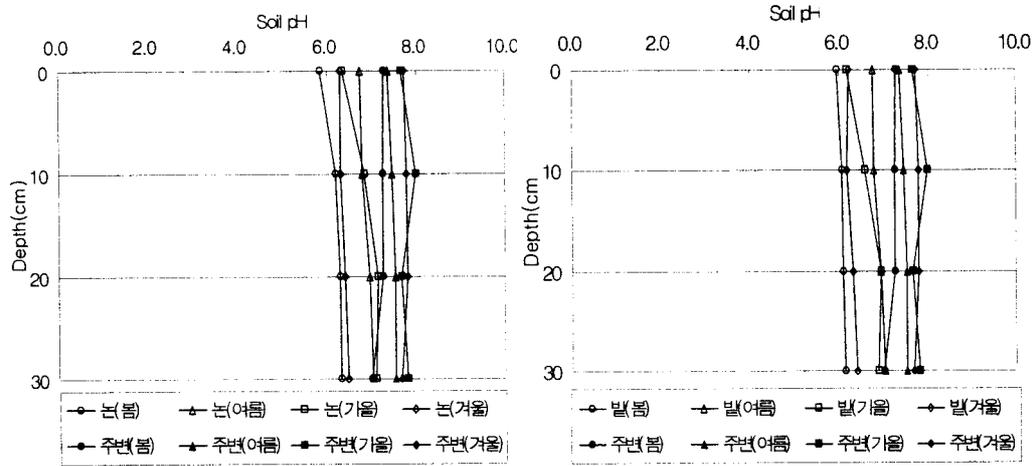


그림 3-79 계절에 따른 논과 밭의 깊이별 토양 pH의 분포변화

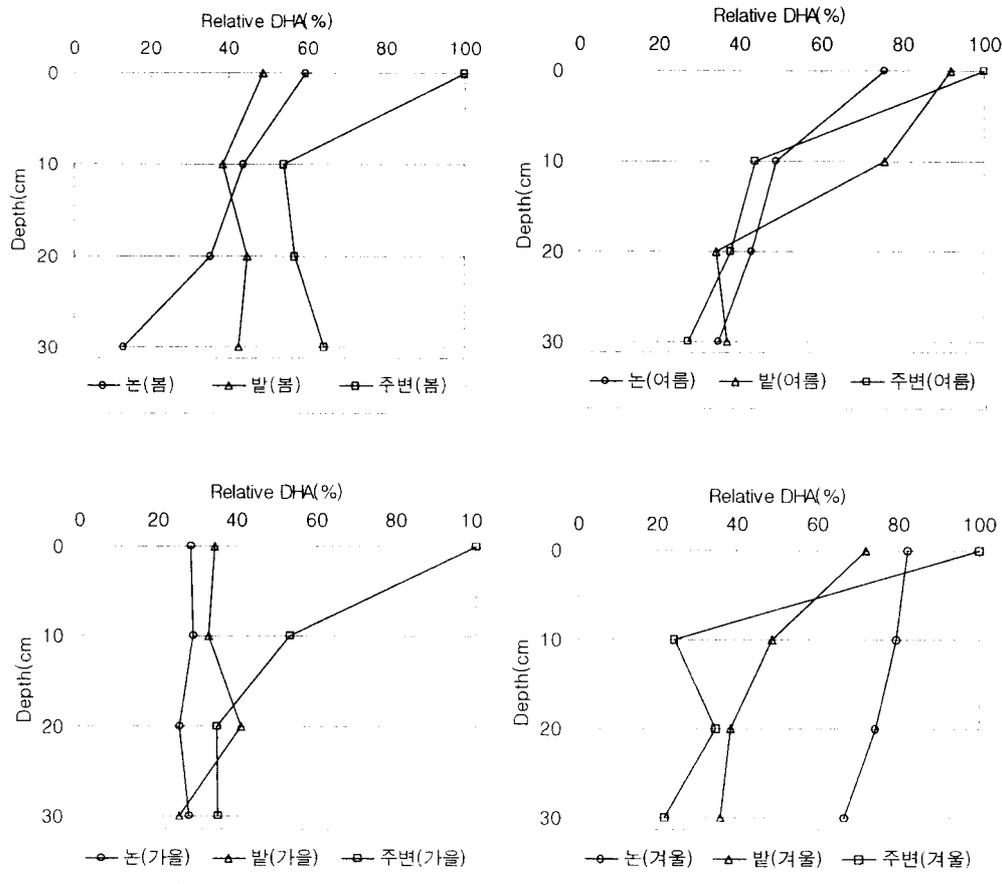


그림 3-80 논과 밭의 계절별 토양중 미생물 활성도 분포 변화

논과 밭의 계절별 토양 중 인성분의 잔류특성을 알아보았다 (그림 3-81). 무주지역에서 사용되는 비료의 주 성분 가운데 하나인 인 성분은 수계의 주 오염원 중의 하나로 토양중에 잔류되어 있는 인 성분의 분포를 파악하는 것은 매우 중요하다. 조사항목으로 채택한 성분은 총인(TP), 유효인산(P2O5), 그리고 인산염 (PO4-)이다. 먼저 주변토양과 비교하여 논과 밭의 인 성분의 토양 함유량을 보면 계절에 상관없이 경작지 중에 인 성분이 특히 표토층에 가까울수록 매우 높게 분포되어 있음을 알 수 있었

다. 총인의 경우에 매우 높은 농도 값을 나타내었으며 이중 식물흡수가 가능한 유효 인산의 경우는 재배식물을 수확한 후 긴 기간이 경과한 후에도 매우 높은 양이 존재함을 알 수 있는데 봄에 비하여 겨울에 그 크기가 높게 나타났으며 깊이별 차이도 봄에 비하여 적게 나타났다. 이는 인 성분의 토양수분 이동과 동반한 지중 이동 가능성을 의미한다고 볼 수 있다. 논과 밭의 비교에서는 큰 차이가 나타나지 않았다. 비교적 이동성이 높은 PO_4^{3-} 의 경우는 유효인산에 비하여 상대적으로 낮은 값을 나타내었으며 계절과 논과 밭의 구별에 따른 정도 차이는 크게 나타나지 않았다.

토양 중 NH_4^+ 와 NO_3^- 등의 잔류 질소 농도분포를 알아본 결과, 인 성분에 비하여 잔류 농도가 매우 낮게 나타났다. 이는 질소 이온의 경우에 인 성분에 비하여 토양에 고정되는 정도가 매우 낮고 수계의 흐름에 의하여 장거리 이동이 가능하기 때문이다. 여기서 주목되는 사항은 토양중의 질소 성분중 NO_3^- 형태의 질소 성분이 NH_4^+ 형태의 질소 성분과 비교하여 특히 밭의 경우에 보다 높게 측정된 사실이다. 일반적으로 비료성분 중의 질소 성분은 주로 NH_4^+ 형태로 존재하며 토양중에 나타난 NO_3^- 형태의 질소 성분은 주로 토양 미생물의 생물학적 산화 (nitrification)에 의한 부산물로 볼 수 있다. 따라서 본 농경지에서도 토양중에 장기간 잔류하는 NH_4^+ 형태의 질소 성분이 미생물의 활동여건이 좋은 표토층에서 NH_4^+ 에 비하여 이동성이 좋은 NO_3^- 형태로 전환되고 있음을 알 수 있었으며 토양중 수분함량이 적어 통기성이 더 좋은 밭 토양에서 이러한 전환이 크게 나타남을 알 수 있었다. 이러한 생물학적 반응은 토양의 통기성뿐 아니라 주변온도에도 크게 영향을 받는데 높은 온도조건에서 더 왕성하게 진행된다. 그러나 본 연구결과에서는 겨울과 봄의 차이는 적게 나타났다.

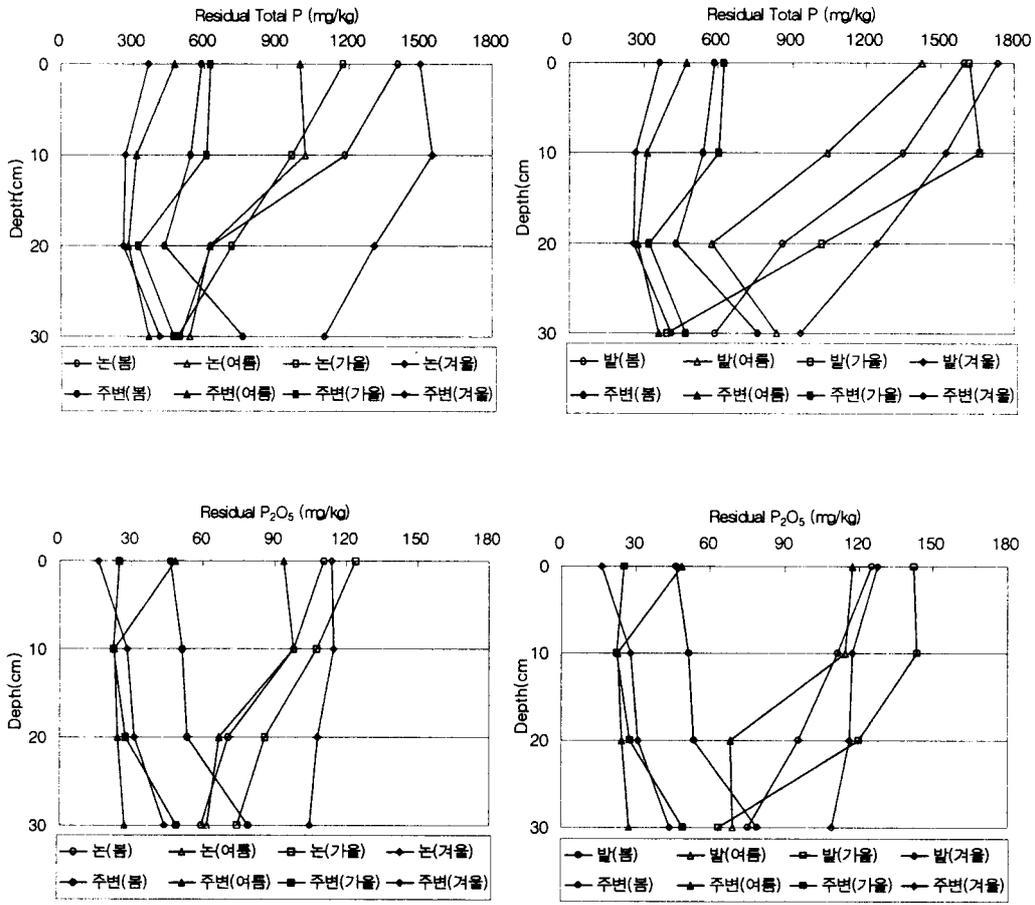


그림 3-81 논과 밭의 계절별 토양 중 인성분의 잔류특성

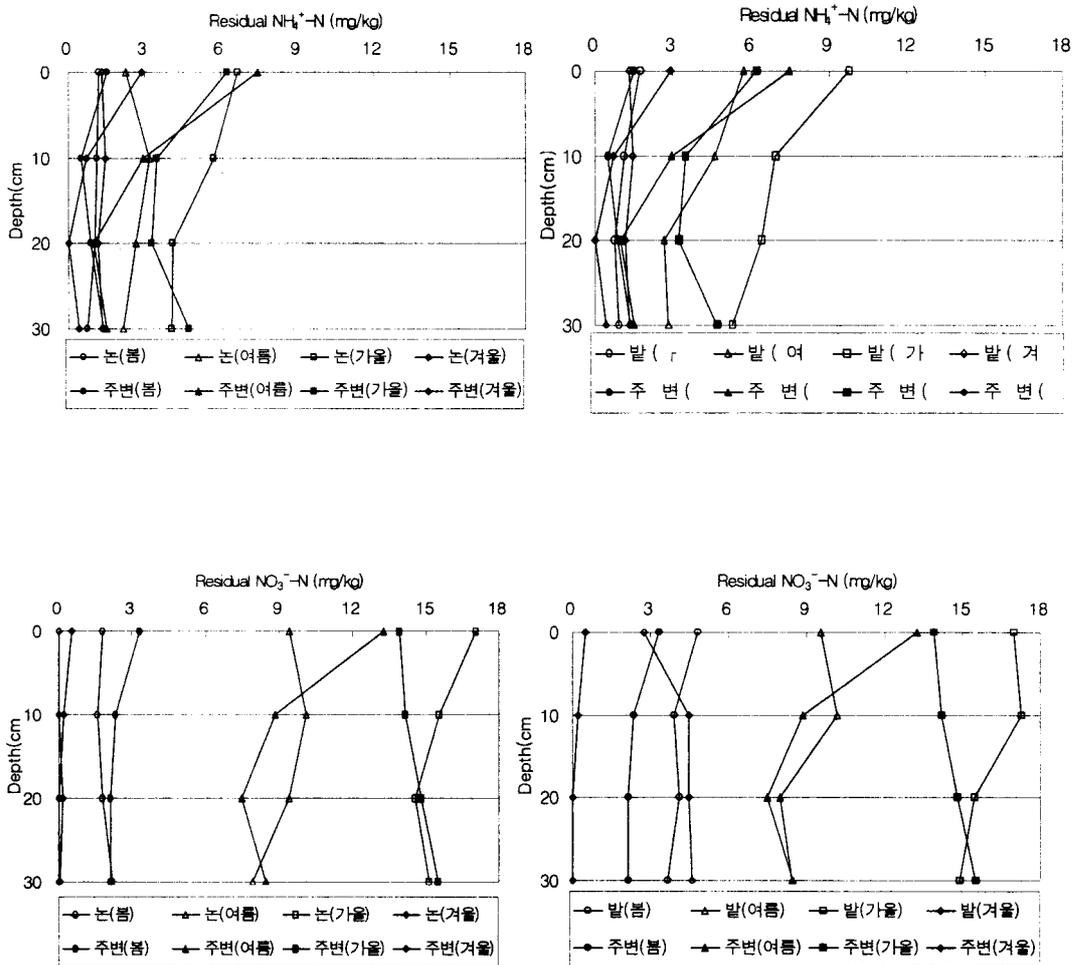


그림 3-82 논과 밭의 계절별 토양 중 질소 성분의 잔류특성

3) 불포화대에서 비료성분의 거동특성 연구

가) 식생 유무(有無)에 따른 N과 P의 거동 특성

(1) 실험장치 및 운전방법

식재의 유무(有無)에 따른 토양 및 침출수 중의 비료성분 이동에 관한 실험을 하기 위하여 그림 3-1과 같이 지름 100mm × 높이 500mm의 칼럼을 제작하였다. 칼럼내 토양시료는 현장에서 깊이별로 채취한 토양을 칼럼 당 3.6kg씩 충전하였으며 현장 토양조건과 동일한 다짐을 유지하였다.

이 때 토양의 최대 침출속도는 1.3ml/min, bulk density는 1.54g/cm³이었으며 pore volume은 850ml이었다. 총 12개의 칼럼을 제작하여 논과 밭토양에 대하여 6개씩 구분하였으며 2개조로 실험을 하였다. 각 조의 실험조건은 논외의 경우 3개의 칼럼에 파종이 20일 된 모를 심었으며, 다른 3개의 칼럼에는 control 조건으로 모를 식재하지 않았다. 밭외의 경우에는 3개의 칼럼에 파종이 20일 된 고추 모종을 심었으며 나머지 3개의 칼럼에는 고추 모종을 식재하지 않았다. 또한 현장조건과의 유사성을 위하여 높이와 직경이 각각 1000mm인 대형수조를 제작하여 일반 토양을 채운 후 그 안에 칼럼을 설치하였다.

비료의 주입량은 M지역의 평균 시비량(복합비료 86g/평, 요소비료 50g/평)으로 시비하였다. 인공강우는 초순수 증류수(pH 7.1±0.05)를 하였으며, 논토양 수분 주입조건은 현장에서와 같이 표토에서 5cm이상 일정한 수위를 유지할 수 있도록 주입하였다. 밭토양의 경우 전라북도 M지역의 여름 최대 일일 강수량인 211ml/day로 공급하였다. 칼럼을 통하여 유출되는 침출수의 비료 거동특성을 파악하기 위해 침출수를 주기적으로 채취하여 분석하였으며, 토양내 비료 거동특성의 경우 1개월 간격으로 논토양과 밭토양에 대하여 식재칼럼과 control칼럼을 각각 1개씩 꺼내어 토양 깊이에 따라 N, P의 분석을 시행하였다.

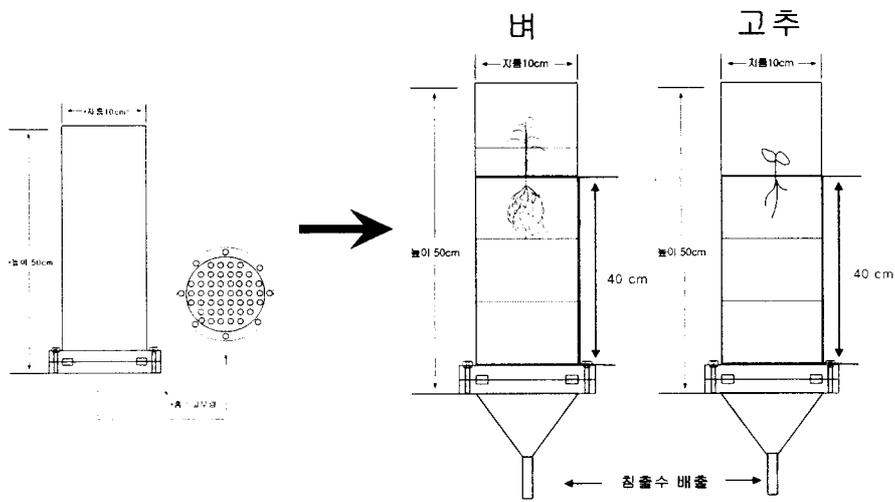


그림 3-83 식재 조건별 칼럼실험장치의 개략도



그림 3-84 식재조건별 비료성분의 거동특성 실험을 위한 칼럼 및 실험장치

(2) 실험재료 및 분석

(가) 토양시료

실험대상 시료는 전라북도 M지역에 위치한 농경지 토양으로부터 채취한 논토양과 밭토양을 선정하였다. 채취 토양중 입경이 큰 입자 및 협잡물을 제거한 후, 3일간 풍건 시켰으며 토양의 균일성을 위하여 4mm(눈금간격)체를 통과한 토양만을 실험에 사용하였다. 특히 분석용 토양은 #10체(2mm)를 통과시킨 토양을 사용하였다.

(나) 실험에 사용된 비료

본 연구에서 사용된 비료는 전라북도 M지역의 농경지에서 대부분 사용되고 있는 비료로 M사의 복합비료와 요소비료를 선정하였다. 비료의 주성분은 N : P : K로 조성되었으며, 선정된 비료중 복합비료는 N : P : K의 조성 비율이 21 : 17 : 17(%)로 되어 있었다. 요소($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$)비료의 경우에는 P와 K의 성분이 존재하지 않았으며, 46%이상이 N성분으로 조성되어 있었다.

(다) 토양시료의 기초특성

대상 오염물질의 거동 특성을 알아보기 위하여 토양의 영향인자로서 pH, 유기물 함량(organic matter content), 입도분포(particle size distribution), 양이온 교환능력(cation exchange capacity, CEC), 탈수소화 반응(dehydrogenase activity, DHA)등을 분석하였으며, 침출수 시료의 경우 NH_4^+-N , NO_3^{--}N , PO_4^{--}P 를 미국 standard methods에 따라 UV-1601(Shimadzu Co.)를 이용하여 측정하였다. 토양시료의 기초특성 항목은 표 3-1에 요약 정리하였다.

표 3-30 측정항목 및 분석방법

Measurement Objects	Methods
pH	토양오염공정시험법 (1 : 5)
유기물 함량 (Organic matter)	KS F 2104
입도 분포 (Particle size distribution)	US Department of agriculture
양이온 교환능력 (Cation exchange capacity, CEC : Sodium acetate)	EPA method 9081
탈수소화 반응 (Dehydrogenase activity, DHA)	INT(iodonitrotetrazolium) assay
NH ₄ ⁺ -N	Methods of soil analysis (SSSA and ASA)
NO ₃ ⁻ -N	Methods of soil analysis (SSSA and ASA)
총 인 (Total phosphorus, T-P)	Vanado molybdate 법
유효인산(P ₂ O ₅)	Bray No.1 method
PO ₄ ⁻ -P	Methods of soil analysis (SSSA and ASA)

① 토양 pH

토양 pH는 국내토양오염공정시험법에 따라 풍건시킨 분석용 토양시료 10g을 100ml 비이커에 취하고 증류수 50ml를 넣어 1시간동안 교반시킨 후 상정액을 측정하였다.

② 토양 유기물 함량

일반적인 측정원리는 토양 내에 잔존하는 유기성물질이 열과 미생물에 의하여 분해되는 양을 측정하는 것으로 보통 강열감량법이 사용된다(33). 본 연구에서는 자연 건조된 토양시료 10g을 증발접시에 취하여 110℃에서 10시간 이상 건조시켜 수분을 제거한 후 데시케이터에 옮겨 실온까지 방냉하였다. 자연 건조된 시료를 약 2g정도 취하여 도가니에 담아 무게측정 후 600℃~700℃의 전기로에 온도를 유지하고 3시간동안 강열한 다음 데시케이터에서 방냉한 무게를 측정하였다.

③ CEC(Cation Exchange Capacity)

토양 양이온 교환능력(cation exchange capacity)은 토양의 지력을 평가하는 지표로서 널리 이용되며, 토양이 가지는 양이온(Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_3^+ , K^+ , Na^+ , H^+ 등)에 대하여 최대한 교환할 수 있는 양이온의 양을 나타낸 것이다(33). 본 연구에서는 토양시료를 polypropylene tube에 넣고 토양내 이온교환이 가능한 양이온들을 sodium acetate solution을 주입하여 sodium으로 이온 교환시킨 다음 원심분리기로 고액 분리한 상태에서 isopropyl alcohol을 주입하여 토양시료를 세척한다. 여기에 이온교환능력이 sodium보다 더 좋은 ammonium이온으로 교환시키기 위해 ammonium acetate solution을 첨가하여 흡착된 sodium을 ammonium으로 이온 교환시킨다. 이온 교환된 sodium의 농도를 ICP(inductively coupled plasma-optical emission spectroscopy, perkin elmer ICP-OES 2000DV)로 정량하여 CEC를 측정하였다.

④ DHA(Dehydrogenase activity)

본 연구에서 토양내 미생물의 활성도를 측정하는 여러 가지 방법 중 INT(iodonitrotetrazolium) assay 방법을 이용하여 측정하였다. 토양 3g에 0.1% INT용액 1ml와 멸균수 2.5ml주입하고 37℃에서 24시간동안 미생물을 배양하였으며 methanol 5ml을 첨가하여 미생물들이 더 이상 번식하지 않게 고정시킨 후

INT-formazan 상징액을 추출하였다. 여과지를 이용하여 여과시킨 후 U.V. spectrophotometer(U.V-1601, Shimadzu Co.)를 이용하여 485nm 파장에서 INT-formazan을 비색정량하였다.

⑤ NH_4^+-N

토양 중에 존재하고 있는 암모니아성 질소는 수용성 상태 및 교환상태, 고정상태로 구분할 수 있다. 보통 토양 중의 암모니아성 질소는 수용성과 교환상의 합량으로 측정하고 있다. 교환상의 NH_4^+-N 는 일반적으로 중성염 용액인 염화칼륨 또는 염화나트륨 등의 용액이 이용된다. 이들 용액을 토양에 가하여 진동혼합하면, 토양에 흡착되어 있는 암모니아성 질소가 교환 침출된다³³). 본 실험에서는 토양시료중의 교환상 NH_4^+-N 를 추출하기 위해서 $\text{KCl}(2\text{M})$ 을 사용하였으며 추출된 여액은 미국 standard methods에 따라 U.V. spectrophotometer(파장 630nm)로 NH_4^+-N 을 비색정량하였다.

⑥ NO_3^--N

본 연구에서는 토양 시료중의 NO_3^--N 를 교환, 침출시키기 위해 $\text{KCl}(2\text{M})$ 을 사용하였으며 환원산성 조건으로 만들기 위하여 $\text{NaCl}(30\%)$ 과 황산(4+1)을 첨가하였다. Brucine-sulfnilic acid용액을 첨가하여 질산이온이 부르신과 반응된 황색의 화합물을 U.V. spectrophotometer(파장 410nm)를 이용하여 NO_3^--N 을 비색정량하였다.

⑦ T-P(Total phosphorus)

본 실험에서는 분석용 토양 1g에 질산 5ml를 넣어 낮은 온도(110°C , 10min)로 토양 내의 유기물을 분해한 후, 과염소산 10ml를 넣어 높은 온도(220°C , 7hr)에서 구성 광물중 무기물(&중금속)을 분해하였고 규소성분의 광물입자만 남도록 하였다. 여기에 증류수를 넣어 여과 후 발색시약을 첨가하여 U.V. spectrophotometer(파장 440nm)로 T-P를 비색정량하였다.

⑧ P2O5(유효인산)

본 연구에서는 분석용 토양시료에 Bray No.1 침출액을 이용하여 토양내 식물이 섭취할 수 있는 유효인산을 추출하였고 여과 후 H3BO3(2.4%)용액과 발색제를 첨가하여 청색의 여액으로 발색시켜 U.V. spectrophotometer(파장 720nm)로 P2O5을 비색정량하였다(35).

⑨ PO4--P

본 연구에서는 토양 시료를 KCl(2M)로 여과하여 쉽게 용출될 수 있는 인산이온을 몰리브덴산암모늄-아스코르빈산 혼합액을 첨가하여 발색시킨 후 U.V. spectrophotometer (파장 880nm)로 PO4--P을 비색정량하였다(33).

나) 온도조건에 따른 N과 P의 거동 특성

(1) 실험장치 및 운전방법

농경지 토양의 외부 온도변화에 따른 비료성분의 이동특성을 알아보기 위해 그림 3-3과 같이 지름 50mm × 높이 400mm로 칼럼을 제작하였다. 칼럼내 토양시료는 현장에서 깊이별로 채취한 토양을 각 칼럼 당 약 500g씩 충전하였다. 실험 온도는 M지역의 평균 토양온도인 겨울(4℃), 봄·가을(14℃), 여름(26℃) 온도 조건을 모사하였으며, 각각의 일정온도 유지를 위해 incubator를 설치하였다. 각 온도조건에 따라 incubator내에 설치한 토양칼럼은 3개월동안 실험하였다. 1개월마다 칼럼내의 비료성분 이동특성을 알아보기 위하여 동일조건의 칼럼을 3개씩 준비하였으며 일정한 주기를 선택하여 칼럼에서 유출되는 침출수를 채취 후 수질특성을 분석하였다.

각 토양칼럼의 특성으로 pore volume은 약 300mL이었으며 bulk density는 1.54g/cm³이었다. 실험조건은 현장조건과 동일한 비료 시비량(혼합비료 86g/평, 요소비료 50g/평)을 적용하였으며 수분 주입조건은 토양 표토로부터 5cm이상 유지하였다. 이 때 토양칼럼의 최대 침출속도는 1.3ml/min이었다.

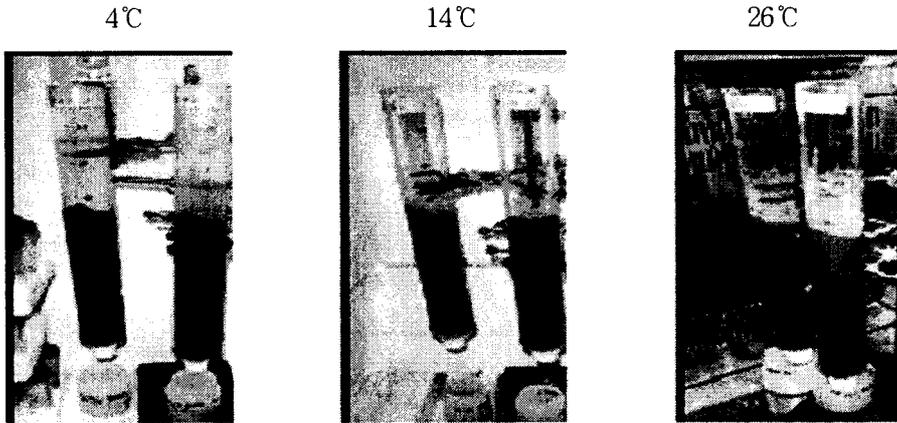


그림 3-85 외부 온도조건별 비료성분의 거동특성 실험을 위한
실험장치
(겨울 평균 토양온도) (봄·가을 평균 토양온도) (여름 평균 토양온도)

(3) N과 P의 거동 실험 결과

가) 토양시료의 기초특성

본 연구에서 사용한 경작지 토양의 기초특성 중 particle density는 2.45~2.65g/cm³으로 일반적인 토양의 particle density(평균2.6~2.75g/cm³)²⁴보다 비교적 낮게 측정되었다. Soil texture의 경우 논토양의 표토부분(0~10cm)에서 상대적으로 높은 clay의 함량(26.9%)이 나타났으며 이는 미국 농무성법(USDA)^{24, 36}의 토양삼각 분류도에 의하여 sand clay loam(그림 3-4)으로 분류됨을 알 수 있었다. 대부분의 실험 토양은 loamy sand와 sand loam으로 분류되었다 (표 3-2).

논토양과 밭토양의 pH는 6.1~6.7로 중성부근의 약산성을 나타내었으며, 유기물과 CEC는 clay성분이 많은 논토양에서 다소 높게 나타남을 알 수 있었다. 또한 논토양 보다는 통기성이 상대적으로 좋은 밭토양에서 깊은 심도에서 NH₄⁺-N는 감소하고 NO₃⁻-N는 비교적 높게 나타남을 보였다. 이 때 DHA를 측정한 결과 미생물에 의한 영향이라는 것을 알 수 있었다.

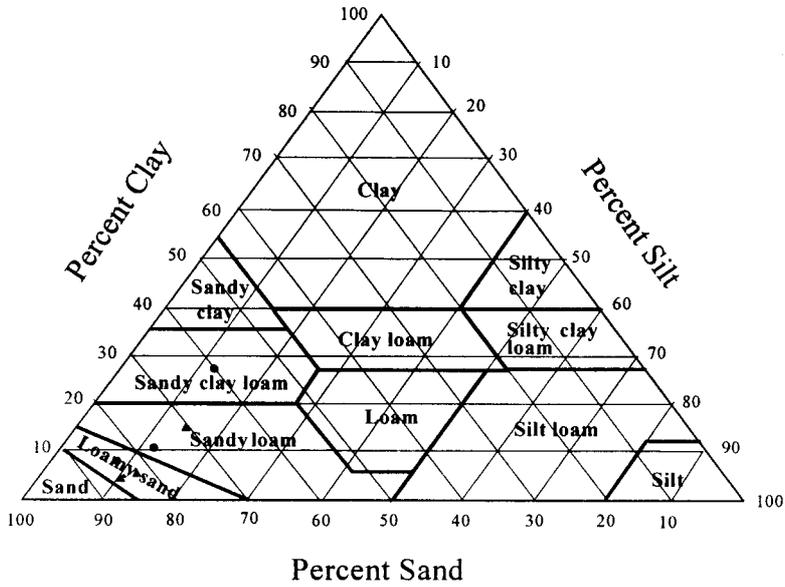


그림 3-86 미국 무성법에 의한 토양삼각분류도(USDA)

표 3-31 각 경작지의 깊이별 토양입경분포

Depth(cm)		s.g (g/cm ³)	Soil texture(%)			
			Sand	Silt	Clay	Soil
Rice paddy field soil	0~10	2.45	60.0	12.1	26.9	Sand clay loam
	10~20	2.55	78.0	11.1	10.9	Sand loam
	20~30	2.65	84.0	9.2	6.8	Loamy sand
Field soil	0~10	2.45	70.8	14.7	14.5	Sand loam
	10~20	2.55	82.9	11.2	5.9	Loamy sand
	20~30	2.65	84.0	10.2	5.8	Loamy sand

표 3-32 논과 밭토양 시료의 깊이별 토양 특성

Depth(cm)	Rice paddy field soil			Field soil		
	0~10	10~20	20~30	0~10	10~20	20~30
pH	6.7	6.5	6.2	6.1	6.2	6.2
O.M (%)	9.2	5.6	3.8	7.3	3.2	2.8
CEC (meq/soil 100g)	33	24	22	31	16	15
DHA ($\mu\text{g/g} \cdot \text{soil}$)	531	312	119	545	306	164
T-P (mg/kg)	1,987	1,163	411	1,963	479	348
P2O5 (mg/kg)	123	110	64	127	57	53
PO4--P (mg/kg)	0.36	0.20	0.15	0.84	0.15	0.14
NH4+-N (mg/kg)	0.97	0.22	0.08	0.406	0.07	0.05
NO3--N (mg/kg)	0.882	0.871	0.591	0.854	2.102	1.622

나) 식생 유무(有無)에 따른 N과 P 거동 특성

(1) 논과 밭 토양의 비료 시비별 침출수 용출특성

칼럼에 시비한 N과 P성분의 총량은 표 3-4에 나타내었다. NH4+-N는 복합비료의 특성상 주성분이 무기성 성분인 N : P : K의 비율이 21 : 17 : 17(%)로 구성(30)되어 있어서 유기질소질 비료인 요소비료에 비하여 2배정도 많이 나타난 것으로 판단되며, PO4--P 경우 P성분이 포함되지 않은 요소비료에서는 검출되지 않았다. 또한 요소비료는 유기질소 함량이 68.5%로 무기질소 성분이 많이 포함되어 있는 복합비료에 비하여 약 3배정도 높게 나타났다.

표 3-33 칼럼에 시비된 N과 P성분의 총량

단위(mg/L)

비료시비량	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TKN	PO ₄ ⁻ -P	유기질소량(%)
복합비료1g당	480	2.6	616	379	22
요소비료1g당	233	5.6	681	0	65.8

(2) 논과 밭 토양의 시간별 침출수 용출특성

시간 변화에 따른 침출수의 용출 특성은 pH가 감소됨에 따라 알칼리도도 감소함을 알 수 있었으며(그림 3-88), 알칼리도의 경우 식재하지 않은 토양에 비하여 식물을 식재한 토양의 침출수에서 낮게 나타남을 알 수 있었다. 이러한 영향은 칼럼에 시비된 비료의 성분 중 NH₄⁺-N의 질산화 과정과 뿌리에서 분비된 저분자 유기산 및 부분적 부식에 의해 H⁺이온이 증가되어 pH가 약 알칼리성에서 중성부근의 약산성으로 감소함에 따라 염기성 성분에 의한 H⁺이온의 완충 작용도 감소된 것으로 판단된다(그림 3-89).

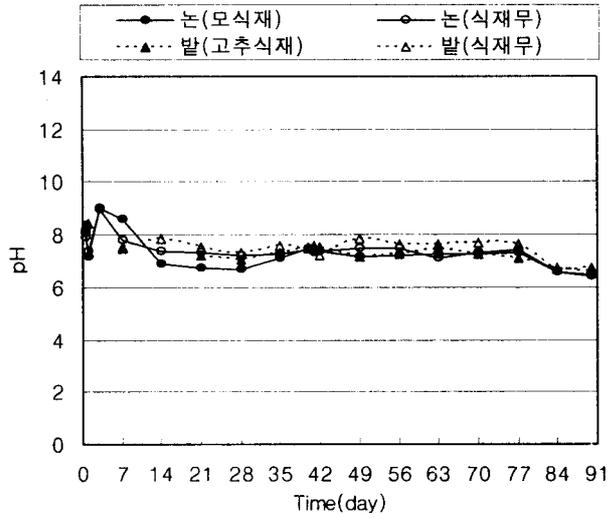


그림 3-87 식재조건 칼럼실험에서 침출수 중 pH의 변화

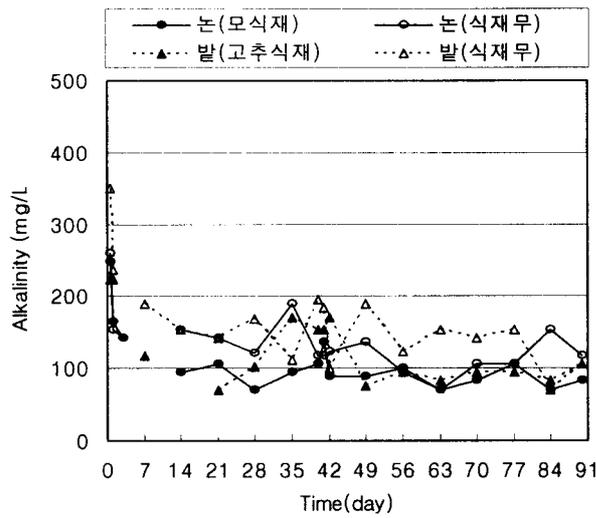


그림 3-88 식재조건 칼럼실험에서 침출수 중 알칼리도의 농도변화

침출수의 ORP는 모든 조건에서 점차 감소하였으며, 50일 이후부터 안정된 값을 유지하는 것으로 나타났다. 이러한 원인은 토양 내에 충분한 산소 공급이 이루어지지

않은 조건에서 식물뿌리의 성장으로 인하여 뿌리 근권에 존재하는 호기성 미생물의 증식에 따라 호흡량이 증가된 것으로 판단된다(그림 3-89).

그림 3-114에 제시한 바와 같이 침출수 중 식재 유무(有無)에 따른 질소와 인의 거동은 NH_4^+-N 의 경우 모든 칼럼에 대하여 1mg/L 이하의 매우 낮은 값을 나타냈으며, NO_3^--N 는 NH_4^+-N 의 생물학적 질산화 반응에 의해 상대적으로 높게 측정되었다(그림 3-115). 특히 물을 채워서 칼럼실험을 실시한 논토양 보다는 미생물의 활성화에 중요한 인자인 통기성이 상대적으로 좋은 발토양에서 생물학적 질산화의 반응이 활발하였으며 초기부터 63일째까지 식재하지 않은 구에 비하여 식물을 식재한 구에서의 반응이 활발하였다. 이는 뿌리의 성장에 따른 뿌리 근권 주변의 유기물이 증가되어 미생물의 활발한 활동으로 생물학적 질산화 반응이 식재 무(無)보다는 식재 유(有)에서 더 높게 증가된 것으로 판단된다. TKN의 경우(그림 3-90)에 식재 무(無)에 비하여 식재 유(有)에서의 농도가 낮게 측정되었으며, 이는 왕성하게 발달한 식물 뿌리에 의하여 요구되는 유기질소가 흡수된 것으로 판단된다. 인 성분의 경우(그림 3-11)도 TKN의 경우와 같이 식재 무(無)에서와 달리 식재 유(有)에서 식물이 필요한 인 성분의 흡수와 섭취가 이루어졌다고 판단된다.

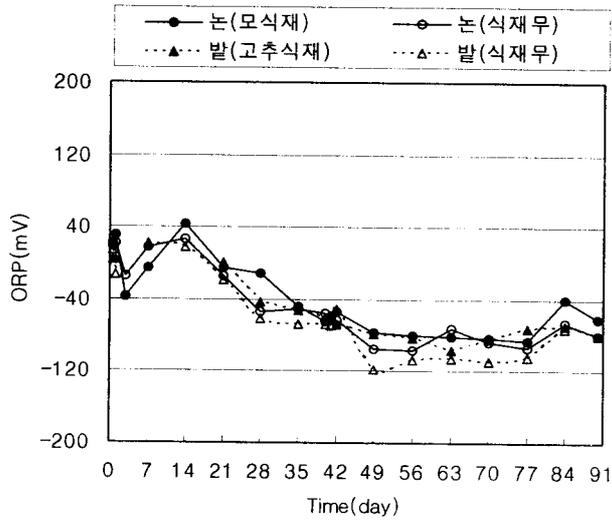


그림 3-89 식재조건 칼럼실험에서 침출수 중 ORP의 변화

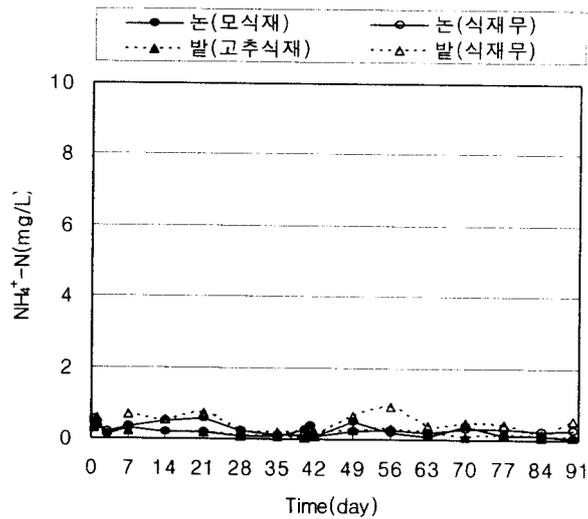


그림 3-90 식재조건 칼럼실험에서 침출수 중 NH_4^+-N 의 농도변화

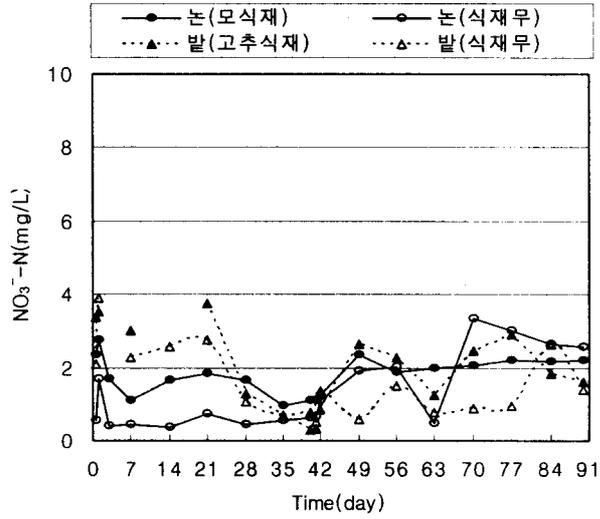


그림 3-91 식재조건 칼럼실험에서 침출수 중 NO₃⁻-N의 농도변화

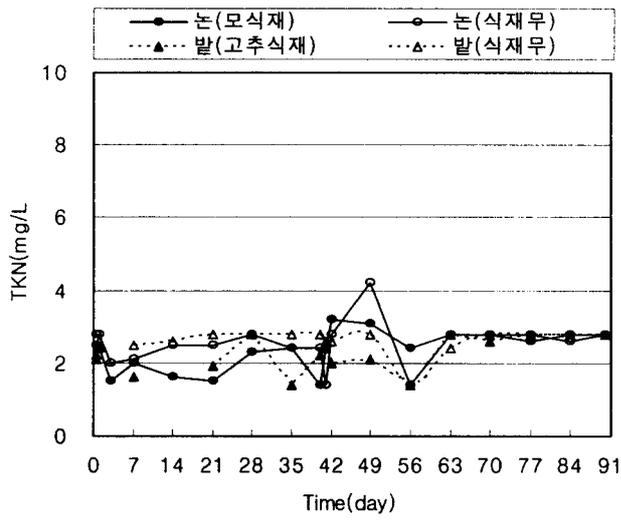


그림 3-92 식재조건 칼럼실험에서 침출수 중 TKN의 농도변화

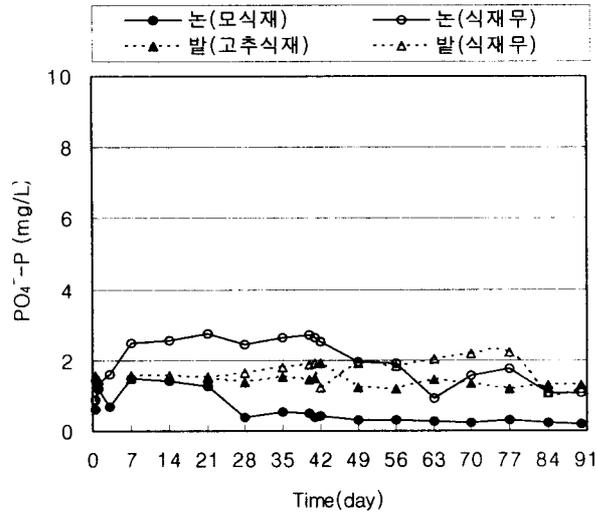


그림 3-93 식재조건 칼럼실험에서 침출수 중 PO₄⁻-P의 농도변화

(다) 논과 밭 토양의 깊이별 N, P 거동특성

그림 3-94는 논토양과 밭토양의 식물뿌리 밀도를 깊이별로 나타낸 것이다. 뿌리의 분포는 논토양과 밭토양 모두 표토에서 3.14~22g/kg으로 전체의 64~87%농도를 나타내었으며, 시간경과에 따라 뿌리분포가 증가하는 것을 알 수 있었다. 칼럼 내에서 뿌리의 발달된 형태는 그림 3-13에 제시한 바와 같다. 모를 심은 논토양은 많은 잔뿌리가 칼럼 내의 토양 전체로 고루 퍼져 있었으며 고추를 심은 밭토양의 경우 굵은 뿌리가 주를 이루었다. 따라서 모를 심은 논토양의 경우에 고추를 심은 밭토양의 경우보다 N과 P, 영양분의 흡수능력이 더 큰 것으로 추정된다.

90일째 밭 식재 유무(有無)에서 NH₄⁺-N(그림 3-112)는 깊이가 깊어질수록 현저하게 감소하는데 단, 표토(Surface soil)보다는 clay성분의 함량이 높은 것으로 알려진 top soil에서 더 높게 나타났다. T-P는 시간경과와 식재 유무(有無)에 따른 영향없이 논토양과 밭토양에서 각각 1,011~1,291mg/L, 1,164~1,534mg/L정도로 논토양에 비하여 밭토양의 T-P의 농도가 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 논토양에 비해 밭

토양에 다량의 인을 함유하고 있는 복합비료를 2배정도 더 시비하였기 때문인 것으로 판단된다. 수분과 함께 쉽게 용출될 수 있는 P2O5의 경우에는 토양내 T-P의 농도와 비례하는 것으로 나타났다.

DHA(dehydrogenase activity)경우에 시간경과에 따른 DHA값을 측정한 결과, 논토양의 경우에는 식재 무(無)와 식재 유(有)의 농도가 각각 61~123, 67~184mg/L이었으며, 밭토양의 경우에는 식재 무(無)와 식재 유(有)가 각각 64~153, 62~159mg/L의 농도로 나타나 식재 무(無)보다는 식재 유(有)에서 상대적으로 높은 값을 나타내었다. 이와 같은 결과는 식물뿌리 영향(통기성 향상, 분비물 증가)에 의한 미생물의 활성도가 증가한 것으로 판단된다. 따라서 식재 무(無)의 경우에는 통기성이 양호한 밭토양의 DHA값이 높게 나타난 반면에 식재 유(有)의 경우에는 식물의 뿌리분포가 높은 논토양의 경우에 더 높게 나타났다. 이는 미생물 활성중에 미치는 뿌리의 영향이 상당히 큰 것으로 판단된다. 즉 식물 뿌리성장에 따라 뿌리로부터 유기물 농도의 증가로 인해 미생물 활성도가 증가된 것으로 판단된다.

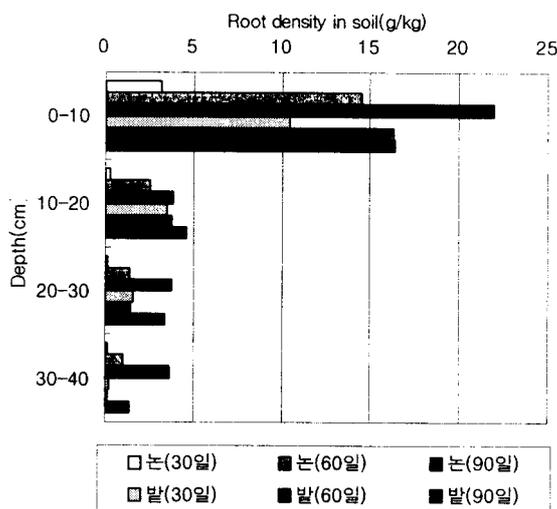


그림 3-94 식재조건 칼럼실험에서 깊이에 따른 뿌리밀도

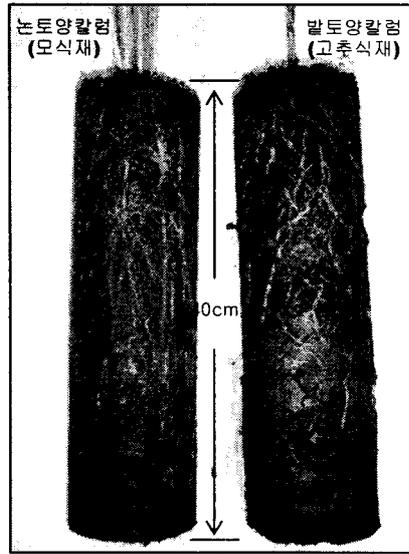


그림 3-95 식재조건
칼럼실험에서 토양 중 뿌리분포

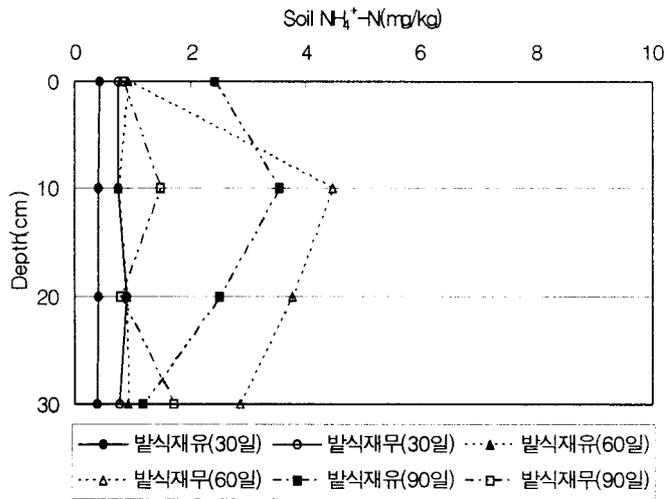


그림 3-96 식재조건 칼럼실험에서 밭토양 중
NH₄⁺-N의 농도변화.

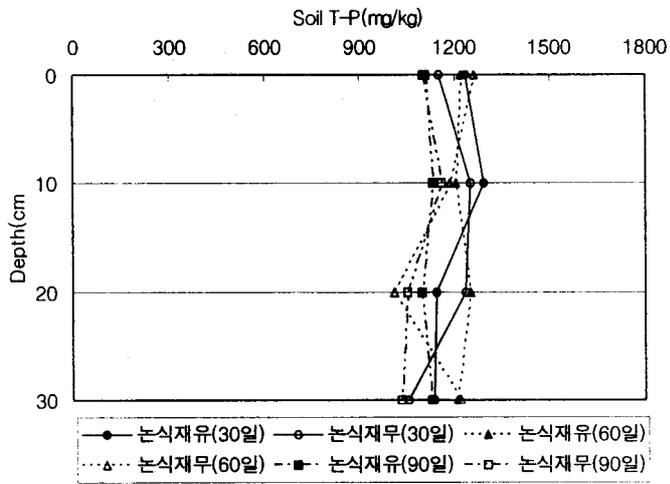


그림 3-97 식재조건 칼럼실험에서 논토양 중 T-P의 농도변화

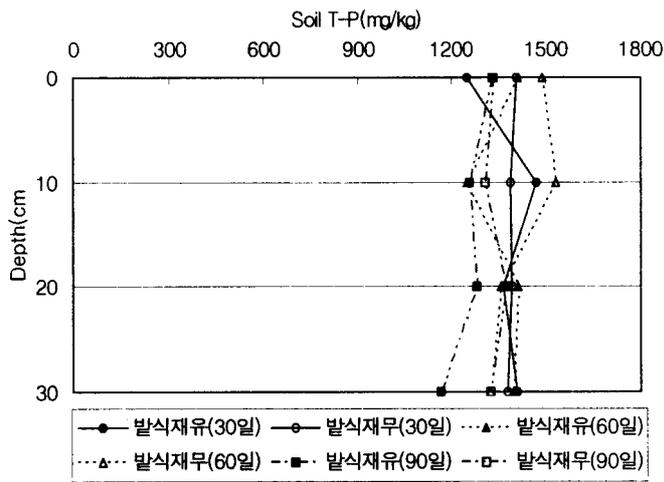


그림 3-98 식재조건 칼럼실험에서 밭토양 중 T-P의 농도변화

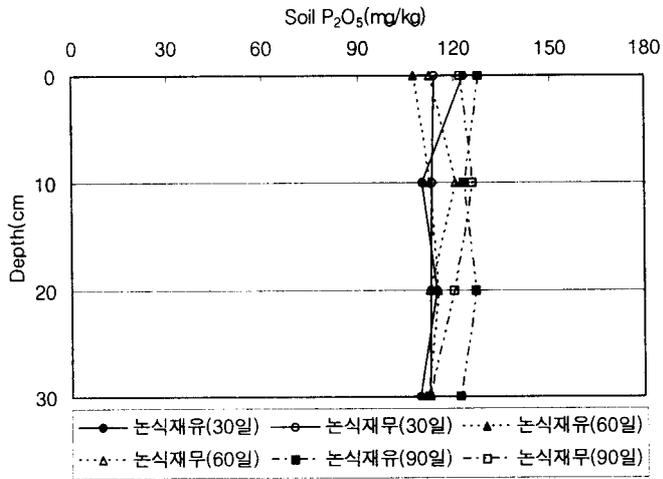


그림 3-99 식재조건 칼럼실험에서 논토양 중 P2O5의 농도변화

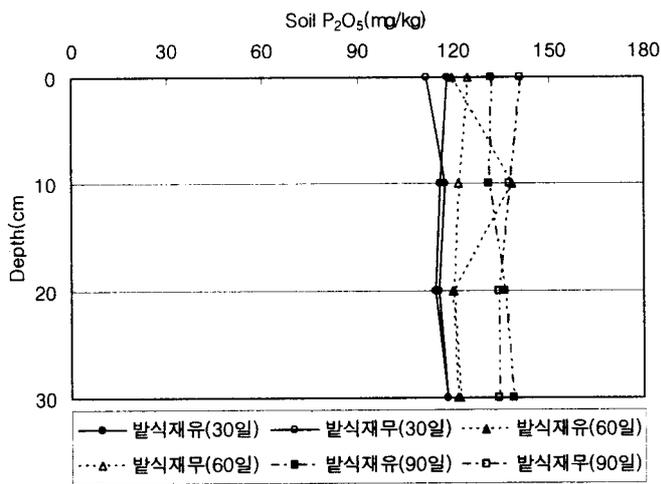


그림 3-100 식재조건 칼럼실험에서 발토양 중 P2O5의 농도변화

3. 온도에 따른 N, P 거동 특성

(가) 논 토양의 시간별 침출수 용출특성

온도조건별(4℃, 14℃, 26℃) 토양중 N, P 거동 특성을 실험한 결과 시간별 침출수 pH는 모든 온도 조건에서 초기(1일~7일)에 6.8의 최소값과 9.2의 최대값으로 알칼리 pH를 나타내었으며 시간이 경과함에 따라 중성부근 pH가 약산성으로 감소함을 알 수 있었다(그림 3-19). 토양 침출수의 ORP 변화는 초기 4℃와 14℃, 26℃에서 13.7~64.7mV값으로 산화상태의 범위를 나타내었으며 40일째 이후부터 시간경과에 따라 (-)7.8~(-)79.5mV값으로 환원상태로 변화됨을 알 수 있었다(그림 3-101).

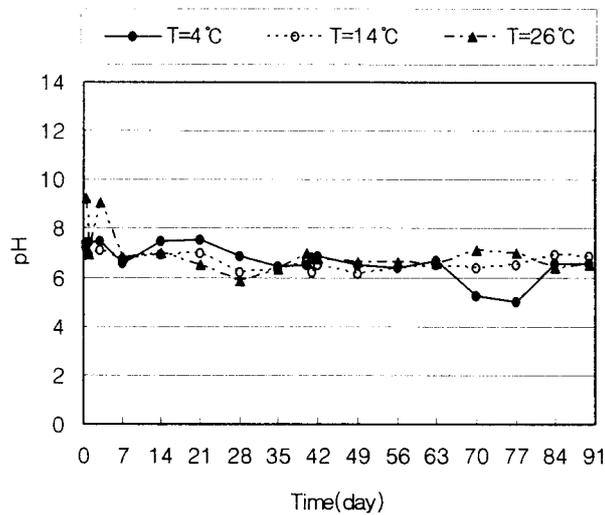


그림 3-101 온도조건별 칼럼실험에서 침출수 중 pH의 변화

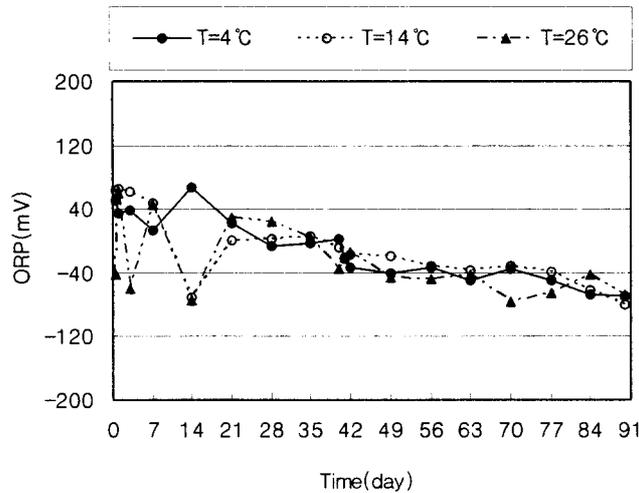


그림 3-102 온도조건별 칼럼실험에서 침출수 중 ORP의 변화

현장조건에 의해 농토양에 대한 요소비료의 2차 시비(39일째)로 인해 49일째 26°C의 온도 조건에서 NH₄⁺-N 농도가 2.24mg/L로 높게 나타났다(그림 3-102). 조 등에 의하면 요소의 분해 정도는 10°C 이상에서 분해가 빠르며 그 중 30°C에서 2~3일 동안 대부분이 NH₄⁺으로 변화된다. 또한 시용량, 온도, 수분, 토성, 지력, 반응 등에 따라 달라지며 일반적으로 겨울철(2~3주), 이른 봄(7~10일), 초여름(2~3일), 한여름(1일)에 거의 분해된다고 보고된 바 있다. 따라서 14°C와 26°C의 토양 침출수 내의 요소는 대부분 분해되어 NH₄⁺으로 변화된 것으로 예측되며 미생물의 활발한 영향에 따라 질산화가 이루어져 NO₃⁻-N로 산화 및 휘산되어 그 이후 시간경과에 따른 농도변화는 나타나지 않은 것으로 판단된다. NO₃⁻-N는 4°C의 온도조건에서 초기부터 시간경과에 따른 변화를 보이지 않았으며 26°C의 경우 2.54~3.7mg/L로 높은 농도를 나타내었다. 이는 낮은 온도조건인 4°C에서 토양내 미생물의 활동이 거의 나타나지 않은 것으로 판단되며 높은 온도조건인 26°C에서 미생물 활동에 적합한 온도에 의해 질산화 현상이 빠르게 진행된 것으로 판단된다.

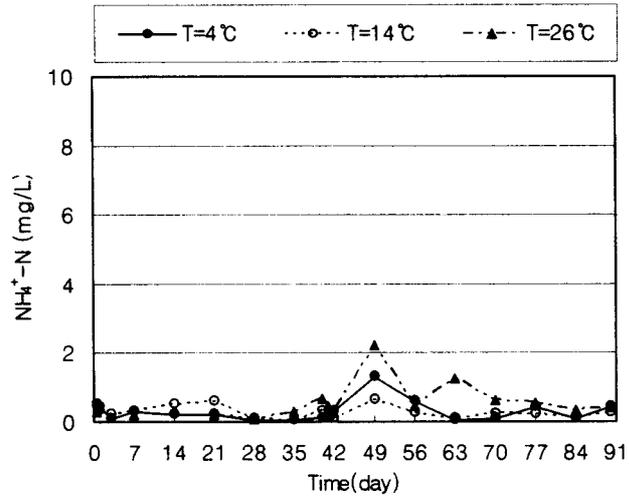


그림 3-103 온도조건별 칼럼실험에서 침출수 중 NH_4^+-N 의 농도변화

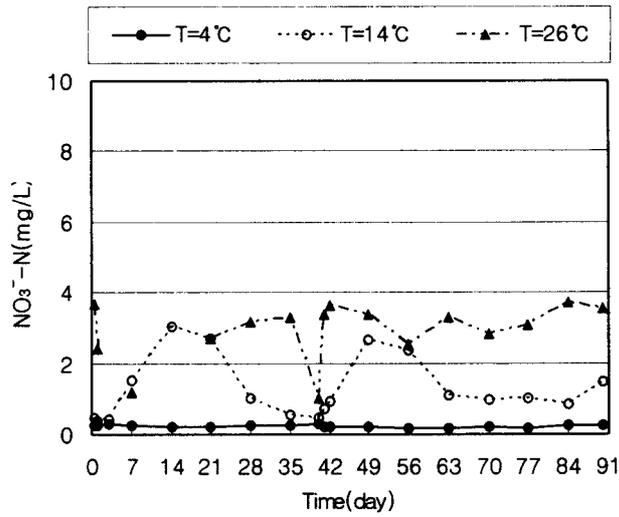


그림 3-104. 온도조건별 칼럼실험에서 침출수 중 NO_3^--N 의 농도변화

(나) 논 토양의 깊이별 N, P 거동특성

토양중 pH에 대한 온도의 영향은 없었으며 시간변화에 따른 pH변화도 30일째와 60일째에서 각각 5.7~6.3의 약산성으로 거의 변화가 없었는데 단, 90일째에서는 6.5~6.8로 중성 부근의 약산성으로 다소 증가하여 나타났다. 토양 ORP는 시간별(30일, 60일, 90일째) 큰 차이는 나타나지 않았으며 14°C와 26°C의 온도조건에서 친온성(중온성) 미생물(Mesophilic microbes)36)의 성장과 활동으로 4°C온도 조건의 토양보다 낮은 환원상태범위를 나타낸 것으로 추정된다.

NH₄⁺-N의 경우 온도가 낮은 조건일수록 토양중 NH₄⁺-N가 높게 나타났고, 특히 4°C의 경우 NH₄⁺-N가 가장 높게 나타났다. 이는 온도가 높은 조건에서 미생물의 활성이 증가하여 NH₄⁺-N의 질산화 반응이 더 크게 진행된 결과로 사료된다.

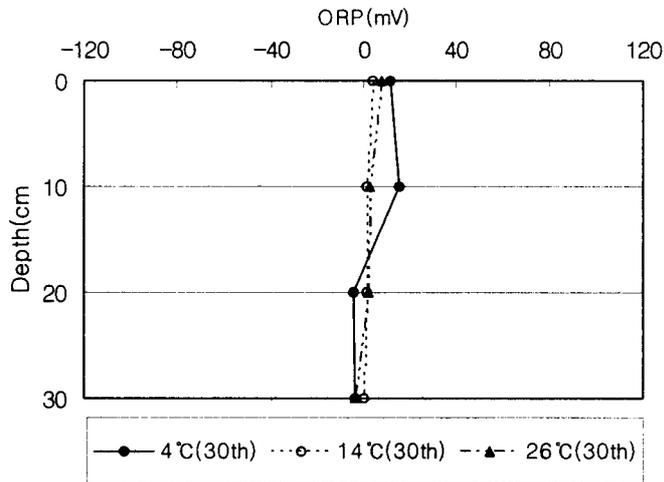


그림 3-105 온도조건별 칼럼실험에서 토양 중 ORP변화(30일차)

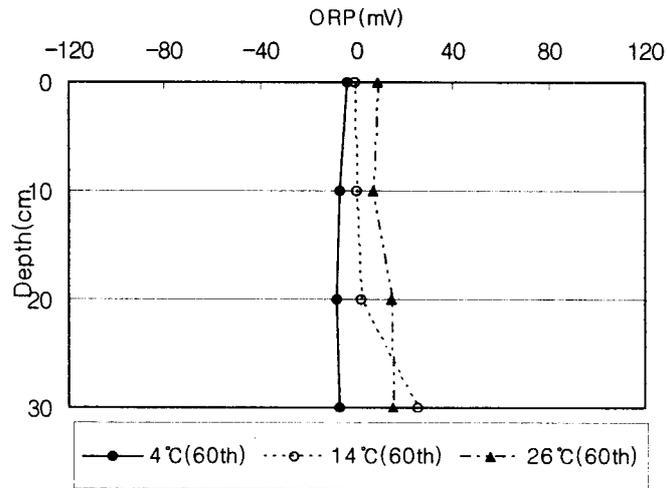


그림 3-106. 온도조건별 칼럼실험에서 토양 중 ORP변화(60일차)

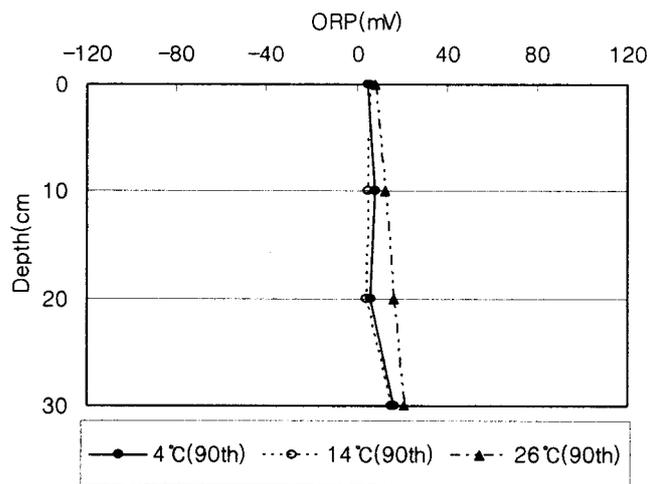


그림 3-107. 온도조건별 칼럼실험에서 토양 중 ORP변화(90일차)

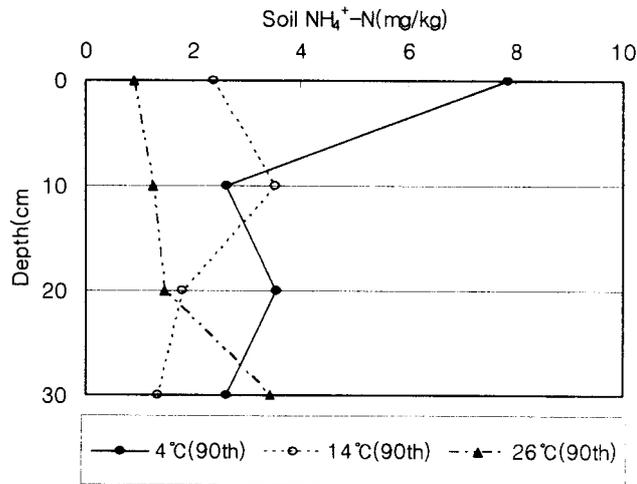


그림 3-108 온도조건별 칼럼실험에서 토양 중 NH₄⁺-N의 농도변화(90일차)

NO₃⁻-N의 경우 이와 같은 결과로 30일째와 90일째에서 깊이에 따른 농도차이는 없었지만 온도에 따른 영향은 26°C에서 NO₃⁻-N 농도범위가 각각 2.40~4.05mg/kg, 11.4~12.5mg/kg으로 4°C와 14°C에 비하여 높게 나타난 결과로 유추할 수 있다. Nyle C. Brady(Tenth Edition)24)에 의하면 토양의 온도는 물리적, 생물학적, 화학적 진행과정에 영향을 주고 온도가 낮은 토양에서는 화학적 반응과 생물학적 반응이 매우 천천히 일어나며, 생물학적 체제는 대부분이 휴지(standstill)상태가 일어날 수 있다. 질소 및 인, 황 같은 영양물질의 이용이 제한적일 수 있으며, 고등식물에 의하여 영양물질이온과 물의 이동 및 흡수가 낮은 온도조건에서는 불리한 영향을 받는다고 보고된 바 있다.

T-P는 30일, 60일 그리고 90일째에 온도의 영향없이 각각 최저 1,090mg/kg, 1,138mg/kg 그리고 1,047mg/kg과 최고 1,260mg/kg, 1,261mg/kg 그리고 1,332mg/kg으로 나타났으며, P₂O₅의 경우에는 각각 최저 106mg/kg, 120mg/kg 그리고 122mg/kg과 최고 133mg/kg, 141mg/kg 그리고 141mg/kg으로 나타났다. PO₄⁻-P의 경우 모두 1.2mg/kg이하의 농도로 나타났다. P에 대하여 온도에 따른 미생물의 영향과 시간경과에 따른 농도변화 및 추이는 발생되지 않았다.

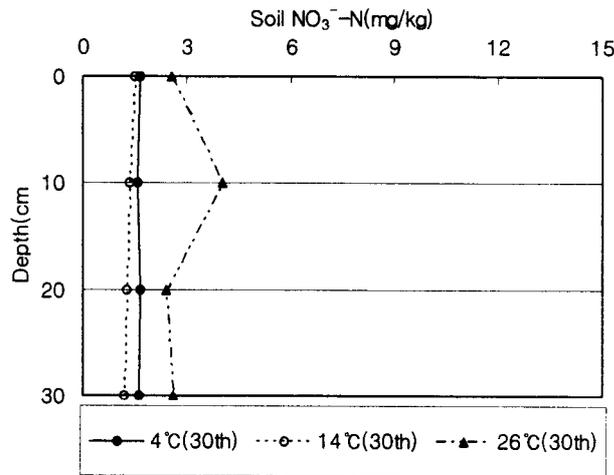


그림 3-109 온도조건별 칼럼실험에서 토양 중 NO₃⁻-N의 농도변화(30일차)

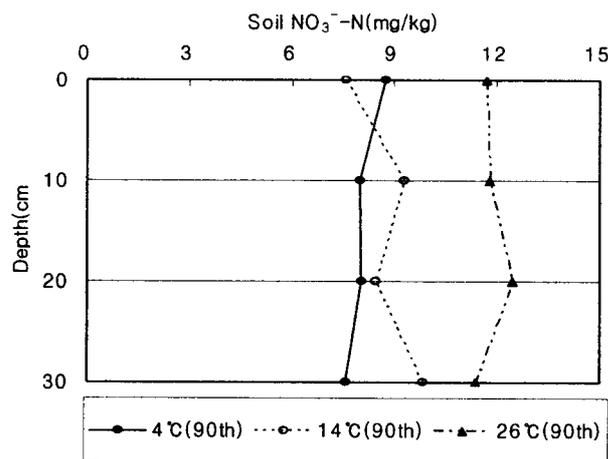


그림 3-110 온도조건별 칼럼실험에서 토양 중 NO₃⁻-N의 농도변화(90일차)

DHA는 초기 30일차에서 각각 4°C의 경우는 76~108 μ g/g-soil와 14°C의 경우 105~140 μ g/g-soil, 26°C의 경우 95~176 μ g/g-soil으로 온도에 따라 미생물 활성도가 높아지

는 것을 알 수 있었고 60일째 이후에서는 모두 DHA가 감소하는 경향을 보였다. 이러한 영향으로 보아 온도에 따른 미생물 활성도는 미생물의 성장과 관련이 깊은 것으로 판단된다. 초기 30일째는 미생물의 번식이 최대인 대수성장단계(log growth phase)이며, 60일째와 90일째의 경우에는 미생물의 번식률과 개체수가 감소하는 감소성장단계(declining growth phase)와 내생성장단계(endogenous growth phase)로 판단된다.

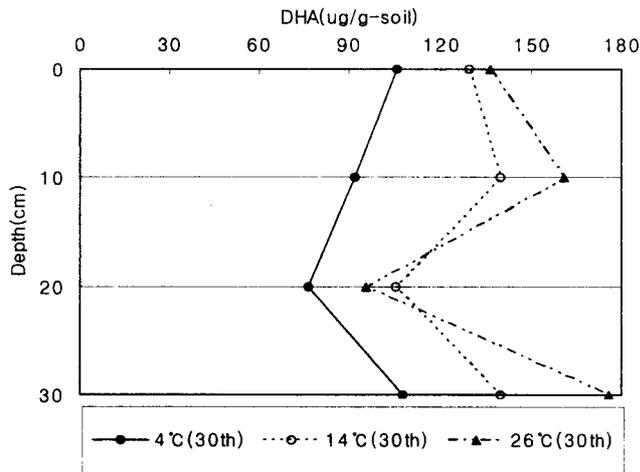


그림 3-111 온도조건별 칼럼실험에서 토양 중 DHA의 농도변화(30일차)

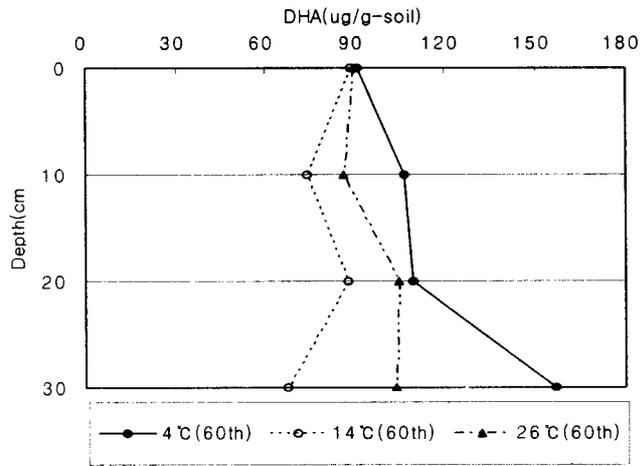


그림 3-112 온도조건별 칼럼실험에서 토양 중 DHA의 농도변화(60일차)

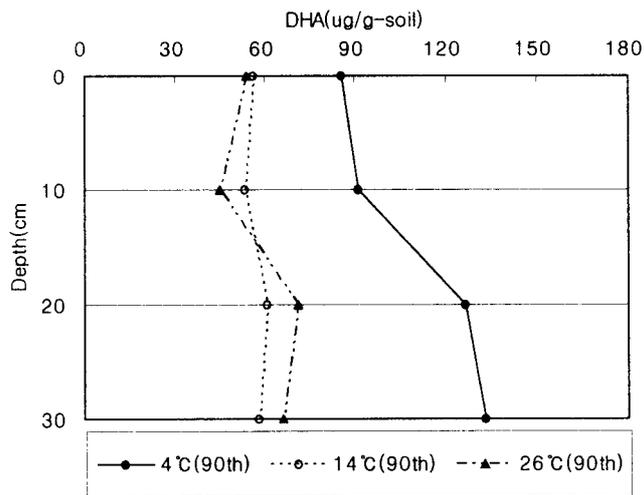


그림 3-113 온도조건별 칼럼실험에서 토양 중 DHA의 농도변화(90일차)

(4) 실험요약

본 연구에서는 농경지내 비점오염원의 거동특성으로 N, P에 대하여 식생 유무(有無) 및 온도에 따른 거동 특성을 파악하였으며, 시간변화에 따라 유출되는 침출수와 토양 깊이별 N, P를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

가. 식재 유무(有無)별 N, P 거동 특성결과 침출수 중 질소와 인의 거동은 NH_4^+-N 의 경우 모든 칼럼에 대하여 1mg/L 이하의 매우 낮은 값을 나타냈으며, NO_3^--N 는 NH_4^+-N 의 생물학적 질산화 반응에 의해 상대적으로 높게 측정되었다. 특히 물을 채워서 칼럼실험을 실시한 논토양 보다는 미생물의 활성화에 중요한 인자인 통기성이 상대적으로 좋은 밭토양에서 생물학적 질산화의 반응이 활발하였고 식재 무(無)에 비하여 식물을 식재한 식재 유(有)에서 반응이 활발하였다. 이는 뿌리의 성장에 따른 뿌리 근권 주변의 유기물이 증가되어 미생물의 활발한 활동으로 생물학적 질산화 반응이 식재 무(無)보다는 식재 유(有)에서 더 높게 증가된 것으로 판단된다.

나. TKN의 경우 식재 무(無)에 비하여 식재 유(有)에서의 농도가 낮게 측정되었으며, 왕성하게 발달한 식물 뿌리에 의하여 요구되는 유기질소가 흡수된 것으로 판단된다. 인 성분의 경우도 TKN의 경우와 같이 식재 무(無)보다는 식재 유(有)에서 식물이 필요한 인 성분의 흡수와 섭취가 이루어졌다고 판단된다.

다. 알칼리도의 경우 식재하지 않은 토양에 비하여 식물을 식재한 토양의 침출수가 보다 낮음을 알 수 있었다. 이러한 영향은 칼럼에 시비된 비료의 성분 중 NH_4^+-N 의 질산화 과정과 뿌리에서 분비된 저분자 유기산 및 부분적 부식에 의해 H^+ 이온이 증가되어 pH가 약 알칼리성에서 중성부근의 약산성으로 감소하였고 염기성의 H^+ 이온 완충 작용도 감소된 것으로 판단된다.

라. 토양내 식재 유무(有無)에 따른 질소와 인의 거동은 90일째 밭 식재 유무(有無)에서 NH_4^+-N 는 깊이가 깊어질수록 현저하게 감소하는데 단, 표토(surface soil)보다는 clay성분의 함량이 높은 것으로 알려진 top soil에서 더 높게 나타났다.

마. T-P는 시간경과와 식재 유무(有無)에 따른 영향없이 논토양에 비하여 밭토양의 T-P의 농도가 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 논토양에 비해 밭토양에 다량의 인을 함유하고 있는 복합비료를 2배정도 더 시비하였기 때문인 것으로 판단되며 수분

과 함께 쉽게 용출될 수 있는 P2O5의 경우에는 토양내 T-P의 농도와 비례하는 것으로 나타났다. 또한 논토양과 밭토양에서 식물뿌리의 발달된 형태로 볼 때 모를 심은 논토양은 많은 잔뿌리가 칼럼 내의 토양 전체로 고루 퍼져 있었으며 고추를 심은 밭토양의 경우 굵은 뿌리가 주를 이루었다. 따라서 모를 심은 논토양의 경우에 고추를 심은 밭토양의 경우 보다 N과 P, 영양분의 흡수능력이 더 큰 것으로 추정된다.

바. 온도조건별 N, P 거동 특성결과 침출수 중 질소의 거동은 현장조건에 의해 논토양에 대한 요소비료의 2차 시비(39일째)로 인해 49일째 26℃의 온도 조건에서 NH₄⁺-N 농도가 높게 나타났다. NO₃⁻-N는 4℃의 온도조건에서 초기부터 시간경과에 따른 변화를 보이지 않았으며 26℃의 경우 높은 농도를 나타내었다. 이는 낮은 온도 조건인 4℃에서 토양내 미생물의 활동이 거의 나타나지 않은 것으로 판단되며 높은 온도조건인 26℃에서 미생물 활동에 적합한 온도에 의해 질산화 현상이 빠르게 진행된 것으로 판단된다.

사. 토양내 온도에 따른 질소와 인의 거동은 온도가 낮은 조건일수록 토양내 NH₄⁺-N가 높게 나타났고, NO₃⁻-N의 경우 높은 온도인 26℃에서 4℃와 14℃에 비하여 높게 나타났는데 이는 온도가 높은 조건에서 미생물의 활성이 증가하여 NH₄⁺-N의 질산화 반응이 더 크게 진행된 결과로 사료된다.

아. ORP의 경우도 14℃와 26℃의 온도 조건에서 친온성(중온성) 미생물(mesophilic microbes)의 성장과 활동으로 4℃온도 조건의 토양보다 낮은 환원상태범위를 나타낸 것으로 추정된다. 본 실험에서는 P에 대하여 온도에 따른 미생물의 영향과 시간경과에 따른 농도변화 및 추이는 발생되지 않았다.

4) 농경지 비점오염원 관리기술

(1) 연구 배경

지금까지 조사된 농경지 비점오염원의 주 오염물질은 경작지에 농축된 비료성분이나 무분별하게 나대지에 방치된 축산 폐기물 등에서 연유된 영양염류가 주 성분인 것으로 알려져 있으며 하천이나, 호소 등 상수원의 부영양화에 직접적으로 기여하는 것으로 보고되고 있다. 이들 영양염류중 질소와 인은 대부분의 비점오염원에서 높은 농

도로 발견되고 있으며 특히 질소의 경우에 이동성이 높아 수계 부영양화의 원인자뿐만 아니라 청색증 등 기타 질병까지 발생시키는 것으로 알려져 있다.

따라서 본 연구에서는 비점오염원 정화대상으로 암모니아성 질소를 대상으로 적절한 비점오염원 관리기술의 개발을 목표로 하였으며 이를 위해 식생효과와 흡착물질을 겸비한 친화적 방지기술을 제안하여 농경지에서 실질적으로 적용 가능한 공법을 제안하고자 하였다. 기존의 일반적인 비점오염원 관리기술에서와 같이 운전인력의 투입을 최소화하고 공정의 단순성을 극대화하여 비점오염원의 확산이 우려되는 일반적인 농경지에서 쉽게 적용이 가능하도록 하였다.

구체적인 연구의 목적은 암모니아성 질소로 오염된 지하수의 지중 정화를 위하여 흡착매질인 zeolite에 의한 흡착효과와 식물상 정화 효과를 복합 적용한 hybrid시스템을 평가하고자 하였다. Zeolite는 이온교환능력에 의한 양이온성 물질과 중금속에 대한 흡착제거효과가 높은 것으로 알려져 있으나 시간이 지나면서 zeolite 표면에 양이온농도의 증가로 인하여 zeolite의 이온교환능력이 크게 줄어드는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 zeolite를 흡착매질로 채운 반응벽체 공법에 정화식물을 혼합 적용함으로써 식물 근권의 오염정화 효과에 의해 zeolite의 오염부하 저감과 오염물의 정화 속도 향상의 두 가지 시너지 효과를 알아보하고자 하였다. 또한 흡착매질로 zeolite를 사용하고 정화식물로는 포플러와 노랑꽃창포를 사용하여 Permeable Reactive Barrier를 모사한 칼럼 장치를 설계하였다. 여러 가지 공정조건에서 암모니아성 질소($\text{NH}_4^{+}-\text{N}$)의 제거 특성을 분석하여 최적의 공정 조건을 알아보았다.

본 연구에서는 기존의 Permeable Reactive Barrier 공법과 Phytoremediation의 기술적인 특성을 파악하고 이들 공법을 혼합 적용한 칼럼 장치를 제작하여 정화 식물별, 식재 유무별, 지하수중 암모니아성 질소($\text{NH}_4^{+}-\text{N}$)의 제거 특성을 알아보았다. 또한 지하수 오염대의 수리학적인 흐름을 이용하고 반응벽체에서 지하수 예측결과 지하수 오염대가 명확하지 않고 오염물의 지중 내 확산이 상대적으로 심하여 독자적으로 적용할 수 없는 단점을 보완하기 위해 Phyto Reactive Barrier의 영향인자에 대해 알아보았다.

Column test는 실험실에서 연구가 가능한 식물로 우선 초본류 식물에 대해 적용성을 알아보고 장기적으로는 목본류 식물에 대해 적용하여 현장에 바로 적용할 수 있는지 선정실험을 하고자 하였다. Column test에서 선정한 식물로는 초본류 식물로 노랑

꽃 창포(붓꽃과)와 목본류 식물로는 포플러나무를 선정하였으며 최종적으로 제올라이트와 혼합 적용한 Phyto Reactive Barrier의 암모니아성 질소(NH_4^{+-}N) 제거효과를 알아보고 Phyto Reactive Barrier의 기본 설계인자를 도출하여 현장에서 적용할 수 있는 핵심기술을 확보하고자 하였다.

(3) 식물상 반응벽체 공법

(가) 공법의 원리

본 기술은 영양염류로 오염된 부지에서 오염물의 이동확산을 방지하기 위한 환경복원공법으로서 무기물 및 유기물 개별적 정화능력뿐만 아니라 반응매체에 따라 이들 오염물의 동시 제거도 가능한 환경 친화적 복원기술이다. 본 연구에서 제안한 최종적인 공법의 안은 오염원으로부터 오염물의 이동방향 하부지점에 지하 트렌치를 설치하고 지하수와 같은 이동매체중의 오염물을 효과적으로 제거할 수 있는 반응매체를 담지함과 동시에 지상에 정화식물을 식재하여 반응매체와의 상호 보완적인 작용에 의하여 반응벽체의 정화능력 극대화과 동시에 정화비용을 최소화하고자 하였다. 또한 지상에 초본류를 사용한 식생여과대를 조성하여 유출수중의 오염물의 여과와 침전기능을 함께 얻을 수 있도록 하였다.

본 연구에서 제안한 식물상 반응벽체 공법은 크게 네 단계로 이루어져 있으며 각 단계의 구성 및 기능을 설명하면 다음과 같다.

Stage I

Stage I은 비교적 뿌리의 심도가 작은 (1m 내외) 초본류 식재구간으로서 강우 등의 지표상 유출수(run-off)에 의한 오염 토사의 유실과 용존 오염물의 이동을 방지 또는 저감을 목적으로 하고 있으며 식물근권 미생물에 의한 biosorption과 뿌리 흡수 두가지 효과에 의한 오염물의 안정화 및 제거가 가능하도록 설계되어 있다.

Stage II

Stage II에서는 뿌리의 심도가 보다 깊은 목본류를 식재하여 지하수 층 부근까지 뿌리를 접근시켜 모세관 효과에 의한 오염지하수의 pumping 효과와 이때 용존 오염물의 식물상 여과(phytofiltration)가 가능하도록 설계되어 있으며 지상으로부터의 공가 주입관을 통해 aeration 효과에 의한 근권미생물의 산화활동 활성화와 용존 산소에 의한 직접적 산화에 의해 비소 등과 같은 중금속의 산화수 증가에 의한 독성 감소와 Stage III에서의 흡착성능을 향상시키며 또한 유기성 오염물의 생물학적 분해와 암모니아 이온의 질산화 반응을 촉진한다. 이때 적용되는 목본류는 내성이 강하고 성장이 빠른 포플라 계통으로서 최대 뿌리깊이가 4-5m 내외에 이르도록 설계하여 지하수 오염제어가 직접적으로 가능하도록 설계되어 있다.

Stage III

Stage III에서는 Stage II에서 흡착성능을 향상시킨 산화 무기이온의 효과적인 흡착 제거가 이루어질 수 있도록 흡착성능이 우수한 제올라이트 계통의 흡착 매질만 담지되어 있는 단계로서 대부분의 중금속 이온이나 phosphorus 등의 무기이온이 이곳에서 여과되도록 구성되어 있다.

Stage IV

Stage IV는 식물상 정화벽의 최종 단계로서 역시 뿌리 심도가 깊은 목본류를 식재하여 혐기성(anaerobic) 조건을 유지하면서 biochemical reduction에 의한 6가 크롬 등의 중금속 환원제거와 Stage II에서 일차 질산화된 질소성분의 탈질 제거효과를 얻을 수 있도록 설계하였다. 또한 호기성 조건에서 산화분해속도가 느린 염소계 또는 TNT 등의 니트로계 유기화합물의 잔류성분의 환원제거가 이루어질수 있는 효과를 얻을 수 있도록 설계하였다.

본 기술은 특히 폐광산 지역이나 농경지 또는 축산지역과 같은 비점오염원에서 발생하는 오염물의 이동확산을 전문인력의 투입없이 최소의 에너지 비용으로 효과적으로 제어하고자 할 때 가장 바람직한 형태의 기술로서 기술의 단순성에 비해 적용가능한 오염대상 (중금속, 유기물, 무기영양이온 등) 범위가 넓으며 기존의 PRB 기술에서 나타나는 오염부하량의 변화에 따른 성능감소와 잦은 매질교체에 따른 비용상승 등의

문제점과 phytoremediation 기술에서 나타나는 성능 한계와 제한된 적용조건을 크게 확장한 공법이라 할 수 있다.

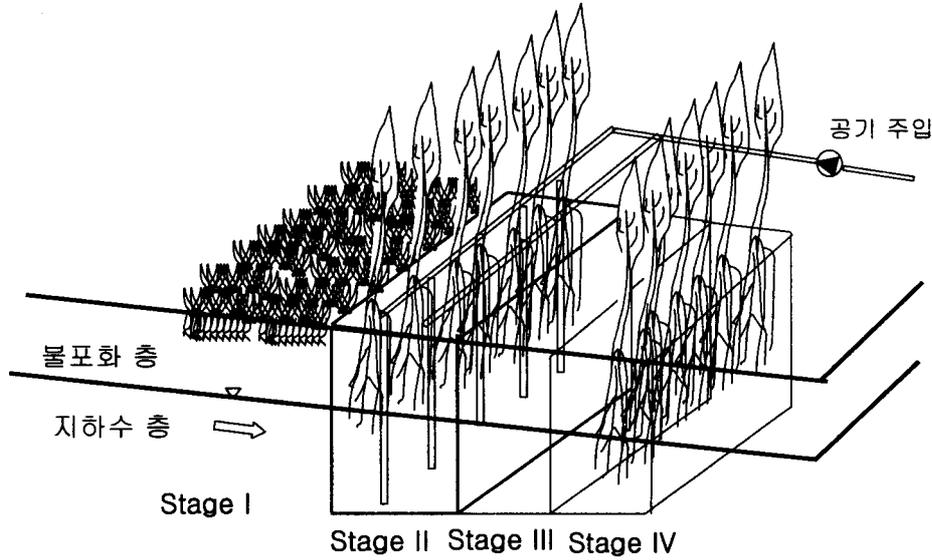


그림 3-114 Multi-staged phyto-reactive barrier

(4) 연구내용 및 방법

(가) 연구내용

본 연구에서는 식물상 반응벽체를 모사한 칼럼을 제작 설치하여 수중의 암모니아성 질소제거(NH_4^+-N) 효과를 알아보려고 하였으며, 칼럼실험은 PRB 현장조건을 모사하여 두개의 이중 칼럼을 설치하였으며 1차 칼럼에는 흙을 채우고 2차 칼럼에는 제올라이트를 담지한 후 각 칼럼에 식물을 식재한 경우와 식재하지 않은 경우를 조성하여 암모니아로 인공 오염된 지하수를 자연구배조건으로 통과시켜 각 칼럼에서의 지하수 정상변화를 알아보았다.

PRB의 식물상 혼합적용 효과를 알아보기 위하여 두 종류의 식물을 선정하여 각 칼럼에 적용하였는데 먼저 초본류인 노랑꽃창포를 식재한 실험은 높이 40cm, 지름 20cm, 총 0.012566m³ (12.566L) 규모의 원기둥 PVC 칼럼을 사용하였으며 목본류인 포플러나무를 적용한 실험은 높이 70cm, 지름 20cm 총 0.021991m³ (21.991L) 규모의 원기둥 PVC column을 사용하였다. 실험은 폭 2m, 길이 3m, 높이 2.5m 규모로 제작된 비닐하우스에서 수행하였으며, 실험은 2003년 7월 12일에 개시하였다.

오염 지하수 중 암모니아성 질소 제거에 미치는 PRB와 식물 적용 각각의 효과와 혼합적용효과를 동시에 알아보기 위하여 두개의 칼럼을 직렬로 연결하여 한 조로 구성하였으며, 다음의 4가지 경우 1. (일반토양)-(제올라이트+식물), 2. (일반토양+식물)-(제올라이트), 3. (일반토양+식물)-(제올라이트+식물) 그리고 4. (일반토양)-(제올라이트)로 column 조를 준비하였으며 토양의 유실을 막기 위해 유입 및 유출구에 스크린을 설치하였고 각각의 column 하단에는 수질 sampling port를 설치하여 유출수의 수질을 실시간으로 측정하였다.

표 3-34 각 칼럼번호 및 실험 조건

1-1	일반토양	1-2	Zeolite
2-1	일반토양	2-2	Zeolite + 식물
3-1	일반토양 +식물	3-2	Zeolite
4-1	일반토양 +식물	4-2	Zeolite + 식물

Column내에 채운 일반토양은 인근 야산에서 채취된 토양을 4mm 이하의 입경으로 분류하여 사용하였으며, 제올라이트가 채워져 있는 column의 경우는 상부 15cm만 일반토양으로 채웠다.

식물을 위한 수분 주입은 없었으며 칼럼내의 지하수 수위는 칼럼 지하수 유입구 높이로 일정하게 유지하였다. 자연적인 지하수 흐름속도를 유지하기 위하여 칼럼 최종 유출구와 유입구의 높이 차를 두어 자연구배에 의해 지하수가 흐를 수 있도록 장치하였으며 이때 초기 유량은 7.57×10⁻⁵cm/sec 로 나타났다.

암모니아성 질소(인공폐수)의 1차 칼럼 유입농도는 30mg/L로 일정하게 유지하였으며, 실험은 2003년 7월 12일에 개시하여 그 후 약 350일간 진행한 상태이다. 각 처리구의 유출수를 초기에는 3일 간격으로 sampling 하여 수질을 분석하였으나 일정기간 이후에는 암모니아성 질소 (NH_4^{+-}N) 농도변화를 관찰하면서 sampling 시간을 조절하면서 시간별 각 처리구에서 암모니아성 질소 농도와 토양조건변화 및 기타 주요 지하수 수질 특성변화를 알아보았다. 각 측정항목의 결과 치는 3회 반복 실험하여 평균값으로 나타내었다.

그림 3-115는 각 칼럼 조의 조건을 나타낸 개요도를 나타낸 것이고 그림 4-5는 전체적인 장치공정도를 나타낸 것이다. 그림 3-116은 식물이 식재된 토양 및 제올라이트 칼럼을 나타낸 현장 사진이다. 각 토양 및 제올라이트가 담지된 칼럼의 초기 조건을 표 3-35에 나타내었다.

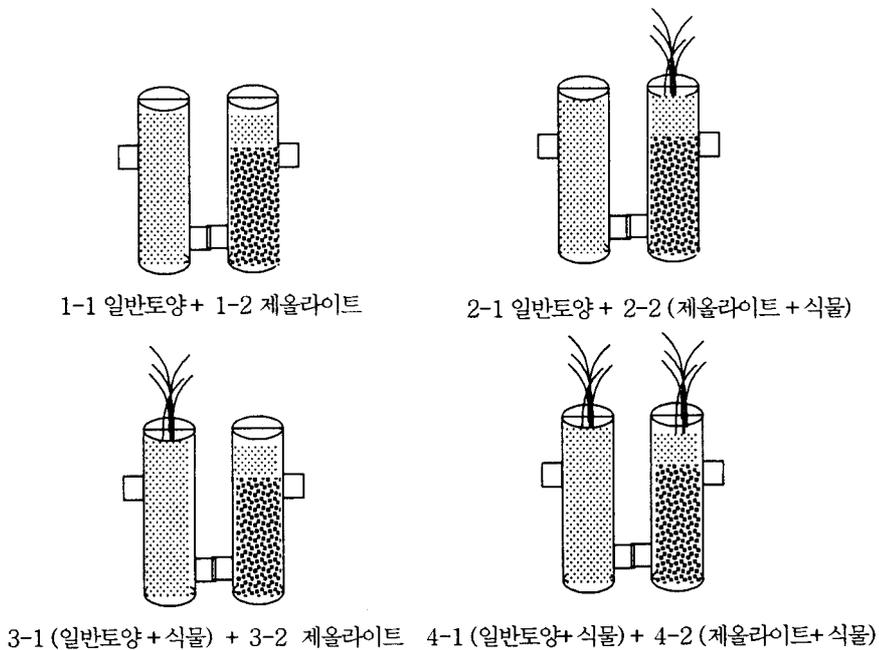


그림 3-115 Column 개요도

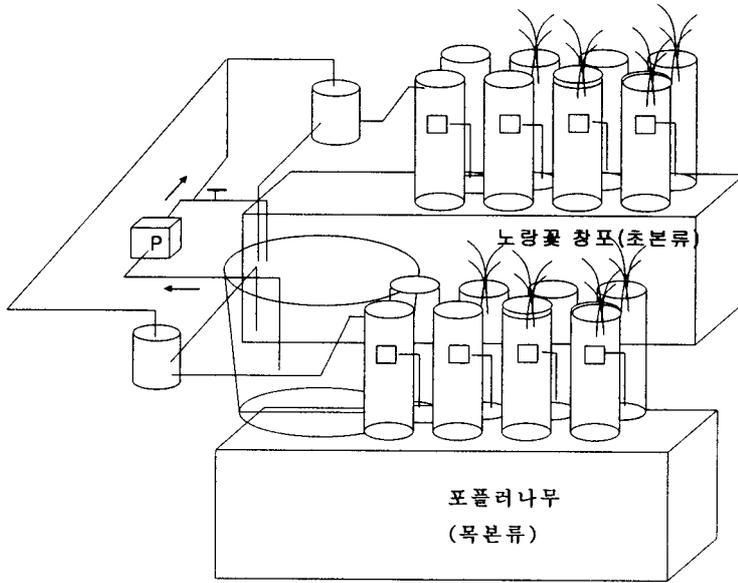


그림 3-116 Column 공정 개요도

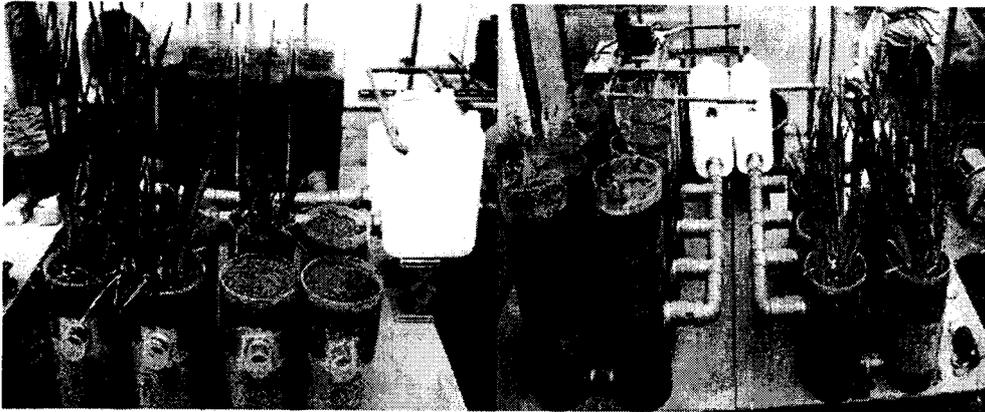


그림 3-117 컬럼 장치 사진

표 3-35. Column 조건

Packing Material	Zeolite / soil
Packing Amount(g)	8,850 / 11,300
Column Volume(ml)	9,420
Column 통과시간(min)	18,576
공극률(%)	48/51
1 Pore Volume(ml)	4,240/4,820

(나) 실험재료

본 실험에서 사용된 zeolite는 국내 경상북도 포항 구룡포에서 생산되는 zeolite(왕표 화학)를 사용하였으며 zeolite는 sieving한 후, 1-3mm 크기의 시료를 초순수를 이용하여 세척, 건조하고 상온에서 보관하였다. 암모니아성 질소오염 인공 지하수는 일반 수돗물에 NH₄Cl를 용해하여 제조하였다.

Phytoremediation 적용에 있어 식물의 선별은 매우 중요하다. 대상식물이 가져야 할 조건은 강한 자생력과 넓고 깊은 뿌리분포 그리고 성장속도가 빠르며 오염원에 대한 강한 내성을 가진 초본류와 목본류로 나뉘서 선별기준에 부합되는 초본류의 노랑꽃창포와 목본류의 포플러를 최종 선별하였다.

(다) 분석방법

대상 시료의 물리적·화학적 특성을 알아보기 위하여 표 4-10과 같은 측정 항목을 분석하였다. 수질시료의 경우 NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, NO₂⁻-N의 농도는 수질오염공정시험법에 따라 UV-1601(Shimadzu Co.)을 이용하여 측정하였다.

표 3-36 분석방법

Measurement Object	Method
pH	수질오염공정시험법
Organic matter	KS F 2104
CEC (Cation exchang capacity : Sodium acetate)	EPA method 9080
DHA (Dehydrogenase activity)	INT(iodonitrotetrazolium) assay
NH ₄ ⁺ -N	수질오염공정시험법 흡광광도법(인도페놀법)
NO ₃ ⁻ -N	수질오염공정시험법 흡광광도법(브루신법)
NO ₂ ⁻ -N	수질오염공정시험법 흡광광도법(디아조법)
식물의 전질소 함량	켈달법(Kjeldahl method)

(5) 실험결과 및 고찰

(가) 토양의 물리·화학적 특성

본 실험에 사용된 일반토양의 특성은 표 4-11에서 보는 바와 같다. 실험에 사용된 토양은 인근 야산에서 채취한 사양토를 사용하였으며 채취한 토양을 4mm 이하 입경으로 분류하여 실험에 사용하였다.

토양의 CEC는 44meq/100g의 값을 나타내어 점토의 76-100meq/100g보다 낮았으며 본 실험에 사용된 토양을 여러 광물질의 CEC값으로 평가할 경우 illite로 분류된다. 입자크기별 분포는 미국 농림성법에 의해 입경을 측정된 결과 sand 73%정도를 차지하는 사양토(sandy loam)로 분류되었다.

표 3-37 토양시료의 특성

pH(1:5)	6.2
organic matter content(%)	9.14
DHA(ug/g)	52.7
specific gravity	2.6
particle distribution(%)	Sand 73, Silt 20.2, Clay 6.8 Sandy loam

(나) 선정된 식재유무에 따른 PRB의 처리 특성 결과

여러 가지 현장 적용 방법을 고려하여 토양과 제올라이트를 각각 1차와 2차 칼럼에 담지한 두개의 칼럼을 한조로 구성하고 각 칼럼에 초본류인 노랑꽃창포(A)와 목본류인 포플러(B)를 식재한 조건과 식재하지 않은 조건에서 각 칼럼의 지하수중 NH₄⁺-N의 제거효과를 알아본 결과는 다음과 같다.

먼저 시간 경과에 따른 pH의 변화를 보면 그림 4-7에 나타낸 바와 같이 1차 토양 칼럼을 통과한 지하수의 pH 범위는 원수보다는 전체적으로 낮았으며 노랑꽃 창포를 식재한 컬럼에서 식재하지 않은 컬럼보다 pH가 다소 낮게 나타남을 알 수 있었다. 포플러를 식재한 컬럼(B)의 경우도 원수보다 pH가 낮았으나 식재하지 않은 토양칼럼과 비교하였을 때는 별 차이가 없었다.

비교적 빠르게 성장하는 노랑꽃 창포를 식재한 토양 칼럼에서 pH의 저감이 가장 두드러졌는데, 대부분의 토양칼럼에서 토양의 pH 완충작용과 토양미생물의 NH_4^+-N 의 질산화 과정으로 인한 H^+ 이온 증가 및 부분적 토양 유기물의 호기성 분해에 따른 이산화탄소의 발생 등에 의해 pH가 다소 낮아진 것으로 판단되는데 특히 식물성장에 따른 토양내 식물뿌리 분포가 발달된 노랑꽃 창포 식재 토양칼럼에서 식물뿌리로부터 분비되는 저분자의 많은 유기산 생성과 왕성한 미생물 분해활동 등에 의해 다른 컬럼에서보다는 다소 낮은 pH를 보여주었기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 1차 칼럼을 통과한 유출수의 pH는 전반적으로 6-7의 범위 값을 안정되게 나타내었다.

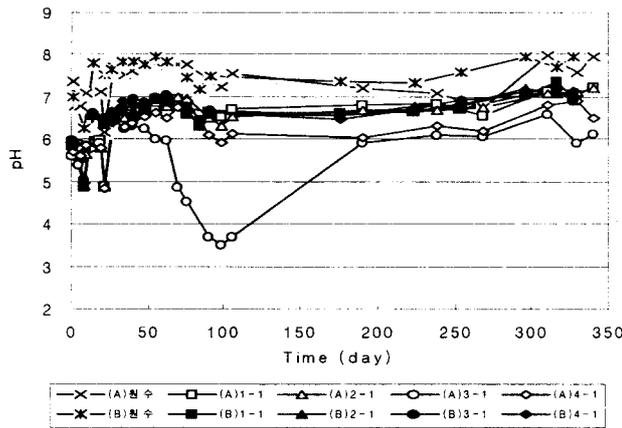


그림 3-118 식재유무조건별 일반칼럼을 통과한 유출수의 pH

그림 3-118에 나타낸 바와 같이 zeolite를 채운 이차칼럼을 통과한 유출수의 pH는 일차칼럼을 통과한 유출수의 pH에 비하여 특히 실험초기에 전체적으로 크게 증가하

였다가 다시 6.5-7.5의 범위로 안정화되었다. 이차칼럼을 통과한 유출수의 pH는 노랑 꽃 창포를 식재한 칼럼조에서 비교적 낮게 나타나 다른 칼럼에 비하여 acidity가 다소 높음을 알 수 있었다. 이와 같은 운전초기에서 제올라이트 칼럼을 통과한 유출수의 pH가 일시적으로 크게 상승한 것은 제올라이트의 암모니아 성분의 회분식 흡착실험 결과에서 보여 주었듯이 제올라이트내 CaO 성분의 초기 용출에 의한 일시적인 pH 상승으로 볼 수 있으며 그 이 후 다시 안정한 pH 값을 유지하였는데 이는 Koon and Kaufman(1975)의 연구에서 보여준 암모니아성 질소(NH₄⁺-N)의 흡착제거에 적절한 pH 범위와 일치하였다.

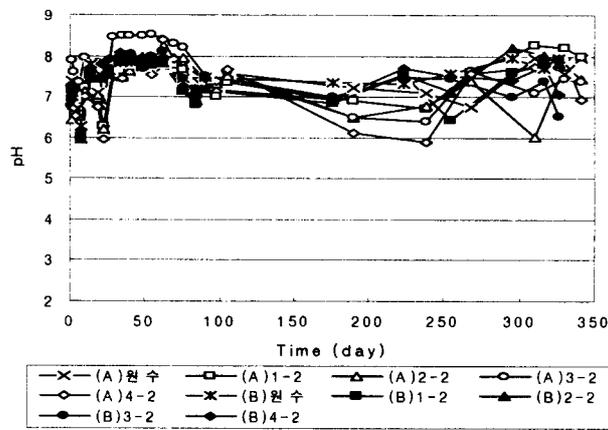


그림 3-119 식재유무조건별 Zeolite칼럼을 통과한 유출 pH

각 칼럼을 통과한 유출수의 ORP를 측정하여 토양내의 산화환원상태를 간접적으로 알아 보았다. 그림 3-137에서 보듯이 일차칼럼을 통과한 유출수의 ORP를 고려할 때 일차 토양칼럼에서는 식물 식재유무에 상관없이 대부분 산화상태를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 일차 칼럼내에 비교적 충분한 산소공급이 이루어지는 것으로 볼 수 있다. 그러나 그림 3-119에서와 같이 이차 칼럼을 통과한 유출수의 ORP는 (-)값을 나타내 다소 환원분위기임을 알 수 있으며 이는 일차 칼럼을 통과하며 인공 오염수중에 있는 용존산소의 농도가 크게 낮아졌으며 이차 칼럼을 통과하면서 역시 미생물 분

해활동에 의한 산소소모가 이루어졌기 때문인 것으로 판단된다. 특히 일차 칼럼에서는 노랑꽃 창포를 식재한 칼럼에서 ORP가 다소 높았는데 이는 뿌리의 성장에 따른 토양의 공기투과도 증가 및 일부 뿌리를 통한 산소전달이 주요 원인일 것으로 판단된다.

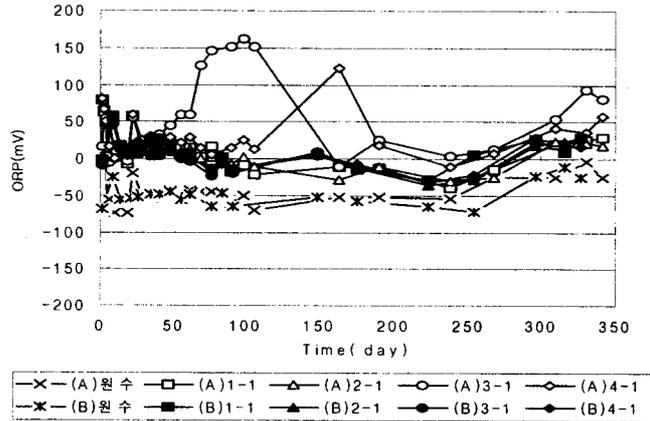


그림 3-120 식재유무조건별 칼럼을 통과한 유출수의 ORP

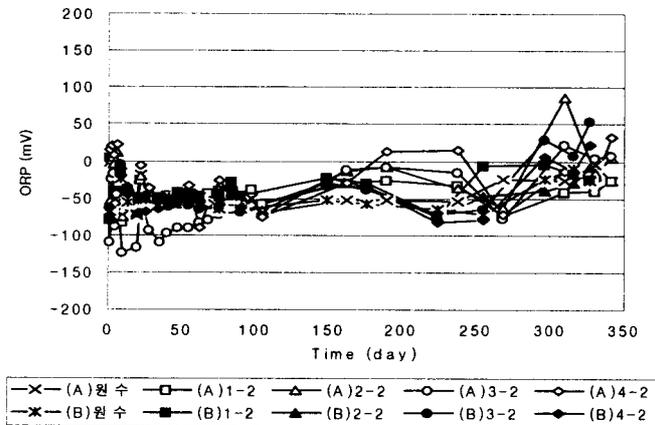


그림 3-121 식재유무조건별 Zeolite칼럼을 통과한 유출수의 ORP

그림 3-120과 3-121는 1차 토양칼럼과 2차 제올라이트 칼럼을 각각 통과한 유출수 중의 암모니아성 질소(NH_4^+-N)의 농도를 시간에 따라 측정한 결과를 보여주고 있다. 일차 토양칼럼에서는 식재 유무에 큰 차이 없이 비교적 짧은 시간 내에 암모니아성 질소의 유출농도가 증가하면서 파과곡선에 다다르고 있음을 알 수 있다.

식재하지 않은 토양칼럼과 성장이 아직 어린 단계에 있는 포플라를 식재한 경우에는 약 120일이 경과하여 파과점을 통과한데 반해 비교적 충분한 성장에 이른 노랑꽃창포가 식재된 토양칼럼에서는 250일이 경과하여도 아직 원수의 암모니아성 질소 농도보다 낮은 값을 나타내어 파과지점에 도달하지 않았음을 알 수 있었다.

이와 같은 토양내에서의 암모니아성 질소의 거동에 미치는 식물뿌리의 영향은 우선 토양에 이온교환태로 존재하는 암모니아성 질소의 뿌리흡수와 뿌리 근권 미생물에 의한 질산화 과정에서 생성된 암모니아성 질소에 비하여 보다 흡수가 용이한 질산성 질소의 뿌리 흡수 등으로 토양내의 잔류 암모니아성 질소의 농도가 보다 낮아진 것으로 추정되며 그 밖에 근권주변에 뿌리 분비물의 전환체인 표면이 negative charge를 나타내는 유기성 콜로이드의 증가에 따른 CEC의 증가 등도 부분적으로 기여하여 파과점에 도달하는데 더 오랜 시간이 걸리는 것으로 판단된다.

그림 3-122에서와 같이 2차 zeolite 칼럼을 통과한 유출수중의 NH_4^+-N 의 농도 측정결과를 보면 식재 유무의 상관없이 대부분의 칼럼에서 비교적 낮은 암모니아성 질소 농도를 나타내 토양칼럼에서와는 다르게 제올라이트의 암모니아성 질소에 대한 높은 흡착능력을 보여주고 있다. 본 연구의 실험기간동안에는 제올라이트의 높은 암모니아성 질소의 흡착능력으로 식물의 식재효과가 뚜렷하게 나타나지는 않았지만 1차 칼럼에서와 같이 노랑꽃창포를 식재한 제올라이트 칼럼에서 보다 낮은 암모니아성 질소의 농도를 보여주었다.

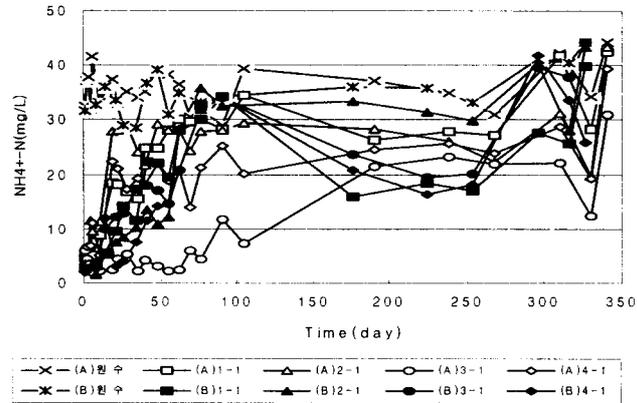


그림 3-122 식재유무조건별 토양칼럼을 통과한 유출수 NH_4^+-N

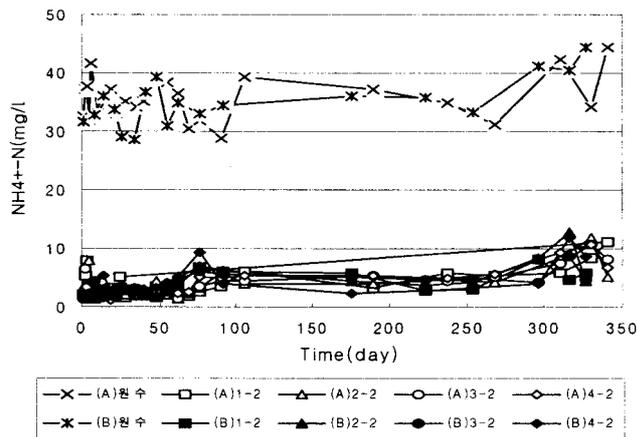


그림 3-123. 식재유무조건별 zeolite칼럼을 통과한 유출수의 NH_4^+-N

그림 3-122와 3-123는 토양칼럼과 제올라이트 칼럼을 통과한 유출수중의 NO_3--N 농도를 나타낸 결과로서 NH_4+-N 의 농도에 비하여 매우 낮은 농도 값을 나타내었으며 생물학적 질산화 반응에 의해 생성된 NO_3--N 가 많지 않음을 보여주고 있다. 1차

토양칼럼에서 노랑꽃 창포를 식재한 경우에 비교적 높은 질산성 질소 농도를 보여준 것은 역시 근권의 영향에 의한 미생물의 활동과 연관이 있는 것으로 보이며 2차 제올라이트 칼럼에서 질산성 질소의 농도가 1차 토양칼럼에 비하여 다소 작게 나타난 것은 ORP 측정결과에서도 보여준 바와 같이 일부 탈질 반응에 의한 질산성 질소의 농도감소로 추정된다. 또한 식물을 식재한 2차 제올라이트 칼럼의 경우에 낮은 질산성 질소 농도는 부분적인 탈질반응과 함께 식물 흡수에 의한 감소효과도 있는 것으로 추정된다.

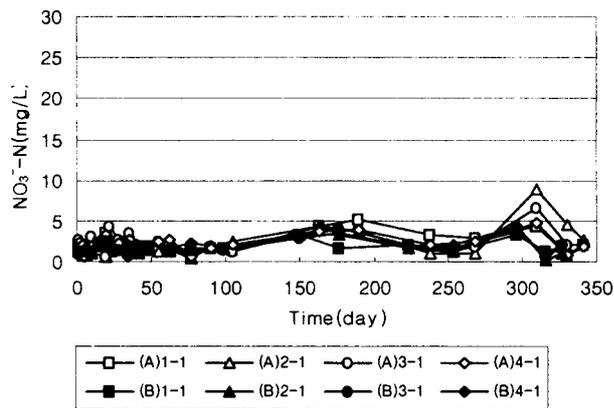


그림 3-124 식재유무조건별 토양칼럼을 통과한 유출수의 NO₃⁻-N

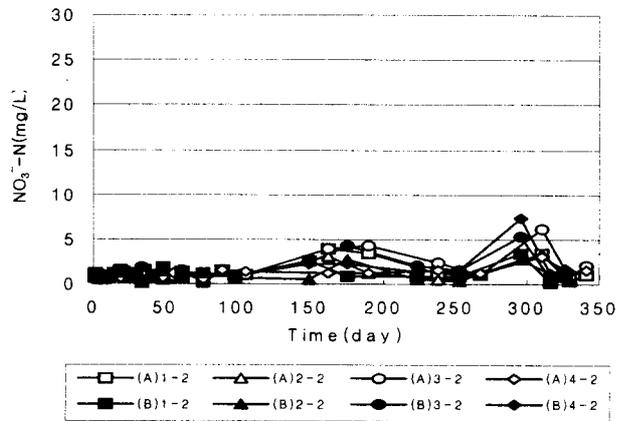


그림 3-125 식재유무조건별 zeolite칼럼을 통과한 유출수의 NO₃⁻-N

그림 3-124과 3-125에 나타난 바와 같이 모든 칼럼조건에서 유출수 중의 NO₂⁻-N의 농도는 매우 낮게 나타났는데 이는 NH₄⁺-N의 생물학적 질산화 반응의 중간 부산물인 NO₂⁻-N가 호기적 조건이 충분한 자연조건에서 불안정한 상태로 존재하므로 쉽게 NO₃⁻-N로 전환되었기 때문이다. 따라서 본 연구조건에서도 NO₂⁻-N의 유출수중 존재 가능성은 매우 작은 것으로 나타났다.

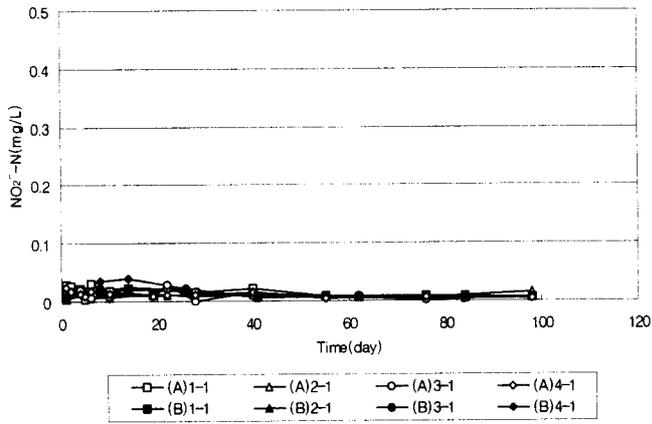


그림 3-126 식재유무조건별 일반칼럼을 통과한 유출수의 NO₂--N

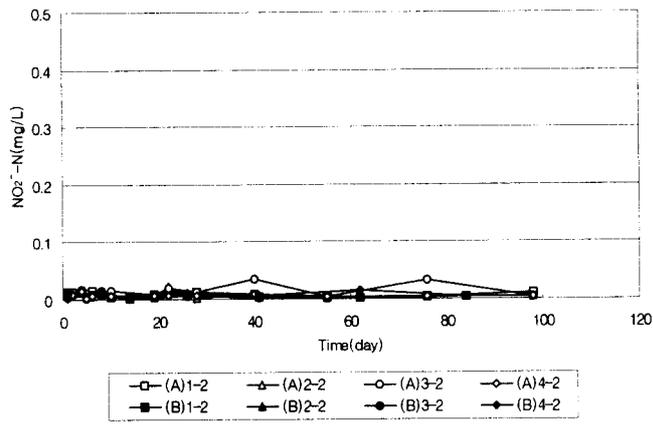


그림 3-127 식재유무조건별 Zeolite칼럼을 통과한 유출수의 NO₂--N

(다) 시간에 따른 유량의 변화

식물을 식재한 칼럼과 식재하지 않은 칼럼에서의 유량변화를 노랑꽃 창포와 포플라에 대해서 각각 그림 3-128과 3-129에 나타내었다. 칼럼을 통과하는 유량에 미치는 식물식재의 영향은 크게 두 가지로 설명할 수 있다. 첫째 식물의 수분 흡수에 의한 칼럼내 부분적인 (-) 수두압 발생과 이에 따른 같은 수두구배조건에서의 유량 감소를 들 수 있으며, 둘째로는 칼럼내 식물뿌리의 성장침투에 의한 통로 증가 및 뿌리로부터 분비되는 유기물의 aggregation 작용에 의한 공극크기 증가 등 투수계수 증가효과를 생각할 수 있다. 또한 제올라이트와 같은 인위적인 담체 투입과 시간에 따른 공간 압축 등의 투수계수 감소문제를 식물 뿌리분포에 의한 지지효과로 저감시킬 수도 있다.

본 실험결과를 보면 노랑꽃 창포를 식재한 경우에 뿌리 발달에 의해 투수계수 증가로 초기에 식재 칼럼에서 유량의 값이 크게 나타났으나 여름철인 8, 9월에는 잎을 통한 수분증발의 증가로 식재하지 않은 칼럼과 큰 차이를 보여주지 않았으나 다시 11, 12, 1, 2월 등 동절기에는 식재한 경우에 높은 유량을 얻을 수 있었다. 성장이 아직 초기 단계인 포플라식재 칼럼에서는 노랑꽃 창포를 식재한 경우와 같은 뚜렷한 결과는 보여주지 않았으나 시간이 지나면서 점차 식재의 효과가 나타남을 알 수 있었다.

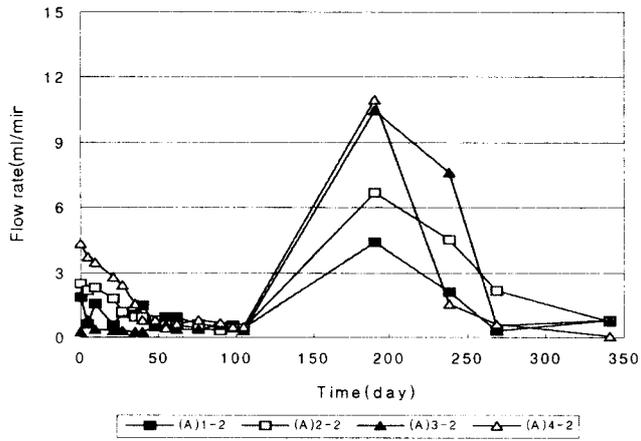


그림 3-128 노랑꽃 창포 column에서 유량의 변화

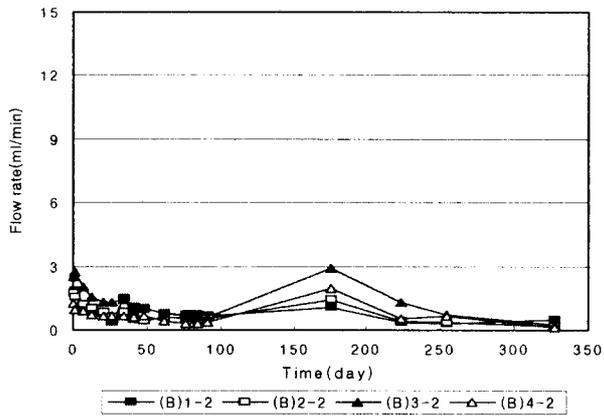


그림 3-129. 포플러 나무 column에서 유량의 변화

(라) 시간별 식물성장 변화

노랑꽃 창포의 경우, 초기에 줄기의 길이가 80cm 정도이고 뿌리의 길이가 15cm 정도였다. 60일이 지나서는 줄기의 길이가 1m이상이 되었고 뿌리의 길이는 25cm 정도로 성장하였다. 그러나 그 이후로는 뚜렷한 성장은 나타나지 않았다.

포플러나무의 경우 초기에 식물길이가 15cm 정도였고 뿌리는 없었다. 80일이 경과한 후에는 110-175cm의 성장을 보였으며 뿌리의 길이도 20cm 정도로 성장하였다. 그 이후 식물성장의 속도가 둔화되었으며 특히 11월 이후에는 성장속도가 크게 둔화되었다. 문헌에 의하면 포플러나무는 1년에 2m이상 성장한다고 알려져 있다.

그림 3-132는 231일 후 노랑꽃 창포 및 포플라의 현장 모습이다.

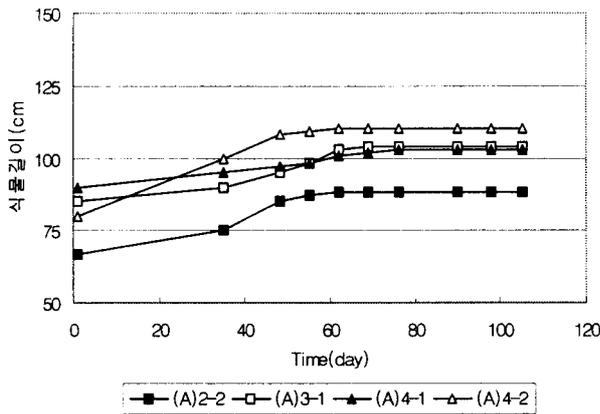


그림 3-130 노랑꽃 창포 Column에서 식물성장의 변화

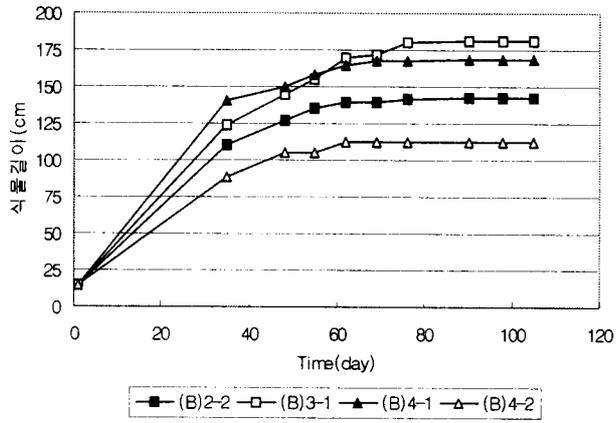


그림 3-131 포플러 나무 column에서 식물성장의 변화

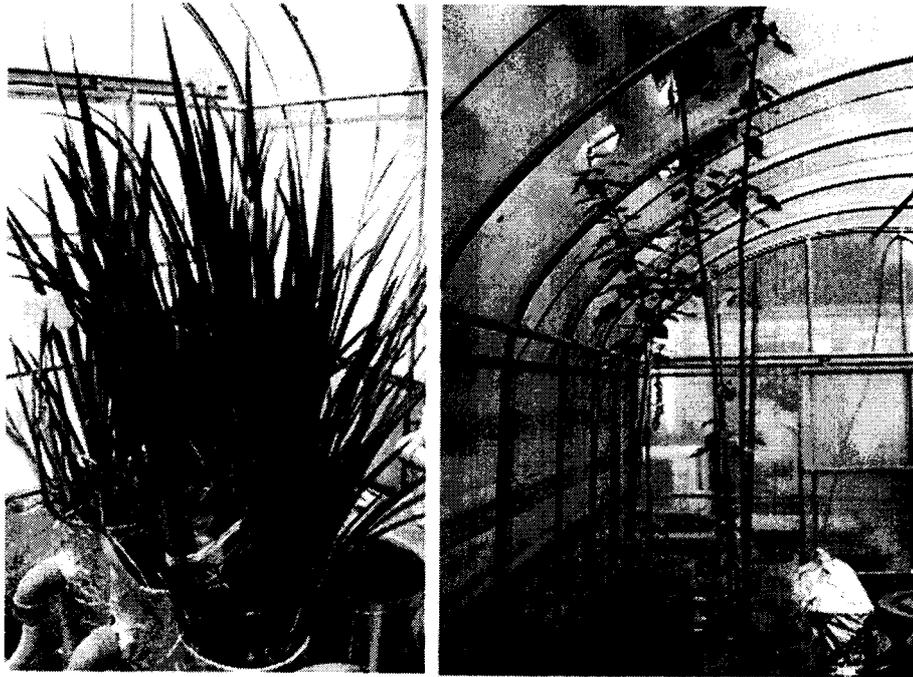


그림 3-132 256일 후 노랑꽃 창포 및 포플러 모습

(마) 시간별 식물체내 전 질소 함량 변화

식물의 전질소 함량은 질소 성분의 식물 뿌리의 흡수를 통해 점차 증가하는데 노랑꽃 창포의 경우 뿌리의 길이가 길고 밀도가 커서 많은 전질소 함량을 보유하고 있었다. 특히, (A)3-1칼럼의 경우 다른 칼럼보다 2배의 전질소 함량을 가지고 있었는데 이는 다른 토양칼럼에서와 달리 (A)3-1칼럼은 10ppm 미만의 낮은 암모니아성 질소 농도를 나타낸 것과 깊은 관련이 있는 것으로 보인다. 하지만 포플러나무의 경우 뿌리의 길이는 길지만 뿌리의 밀도가 작기 때문에 낮은 전질소 함량을 보유하고 있어서 암모니아성 질소 농도가 높게 나타났다. 그 이유로는 포플러나무의 흡수 능력이 낮아서라기보다는 아직 포플러의 성장이 충분하지 않아 흡수량이 적었기 때문인 것으로 판단된다.

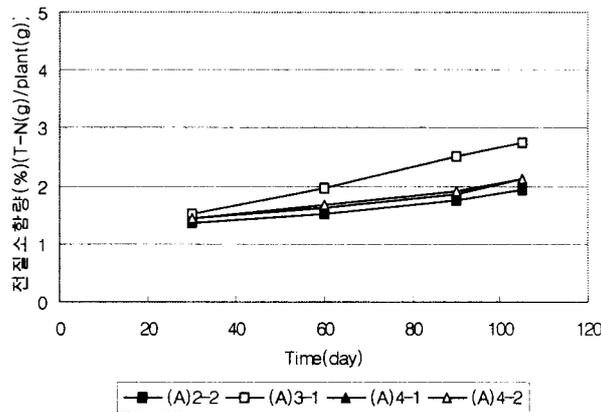


그림3-133 시간별 노랑꽃 창포 식물의 전질소 함유량

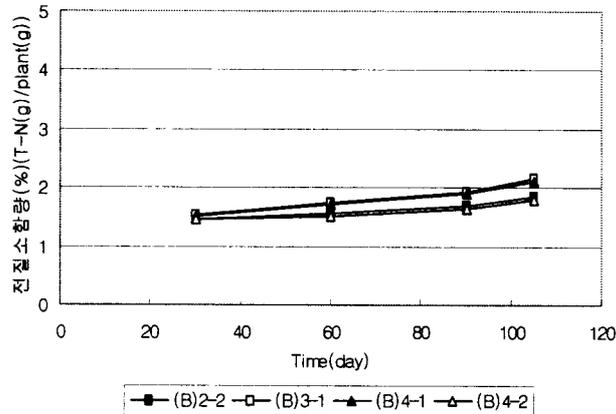


그림 3-134 시간별 포플러 식물의 전질소 함유량

(6) 실험결론

가. 암모니아성 질소 인공 오염지하수를 대상으로 PRB를 모사한 토양 및 제올라이트 칼럼을 설치하여 식물 식재여부에 따른 암모니아성 질소 성분의 제거양상을 알아 보았다.

나. 인공 오염수의 칼럼 통과 유량은 고정된 자연 수두구배를 유지하여 지하수 흐름을 모사하였으며, 정화식물로는 노랑꽃 창포와 포플라를 선별하여 각 칼럼에 적용 하였다.

다. 토양을 담지한 1차 칼럼에서 암모니아성 질소의 파괴점은 약 120일 후에 노랑꽃 창포를 식재한 칼럼을 제외하고는 대부분의 칼럼에서 나타났으며 노랑꽃 창포의 식물뿌리가 발달된 토양칼럼에서는 유출수중의 암모니아성 질소 농도가 원수보다 낮게 나타나 식물 식재의 뚜렷한 긍정적 효과를 얻을 수 있었다. 이는 식물뿌리를 통한 이온교환태로 토양 표면에 흡착되어있는 암모니아성 질소의 직접 흡수와, 근권 미생물의 활발한 질산화 과정으로 보다 흡수하기 쉬운 질산성 질소의 전환과 일부 직접 뿌리흡수 효과 및 뿌리 분미물의 다량 배출에 의한 유기성 콜로이드 성분의 증가에 의한 암모니아성 질소 성분의 흡착능력 증대 등이 그 원인인 것으로 사료된다. 그러나 포플라의 경우는 아직 초기 성장단계에 있어 충분한 뿌리 성장이 이루어지지 않아

식재효과가 적게 나타났으며 보다 장기적인 운전을 통하여 포플라 식재효과에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

라. 제올라이트를 담지한 2차 칼럼에서는 제올라이트의 암모니아성 질소에 대한 높은 흡착 능력으로 인하여 모든 칼럼에서 낮은 유출 농도를 보여주었으며 따라서 뚜렷한 식물상 혼합 효과의 결과를 얻지는 못했다.

마. 제올라이트 첨가에 의한 수중의 pH 상승을 식물 식재를 통하여 효과적으로 완충시킬 수 있었으며 이는 기존의 제올라이트 층에서의 여러 가지 pH 상승에 따른 침전물 생성과 fouling 문제점들을 보완해줄 수 있을 것으로 판단된다.

바. 또한 기존의 PRB에서 제올라이트 층 앞단에 식물상 층을 설치하여 제올라이트의 오염 부하량을 줄여줌으로써 제올라이트의 운전 수명을 증가시킬 수 있음을 확인하였으며, 또한 제올라이트 표면에 이온교환태로 존재하는 암모니아성 질소의 식물 뿌리의 직접 흡수로 제올라이트의 사용용량을 향상시킬 수 있음을 관찰하였다.

사. 또한 식물상 칼럼에서 보여준 바와 같은 뿌리 분비물이 풍부한 근권 부근에서의 상대적으로 높은 미생물 활동은 일반적인 지하수 조건에서 미생물의 에너지원으로 요구되는 유기물의 결핍을 보충해 주어 토양미생물의 활발한 활동을 촉진시킬 수 있는 효과도 얻을 수 있음을 확인하였다.

아. 식물을 식재한 칼럼에서 보여준 투수성 향상효과와 담체층의 구조 유지 등의 효과는 시간이 경과함에 따라 침전물질의 축적으로 PRB내의 투수성 감소 문제를 보완해줄 수 있음을 보여주었다.

자. 제올라이트 칼럼에 식재한 노랑꽃 창포 및 포플라의 양호한 성장은 제올라이트가 충전된 기존의 PRB 내의 환경이 식물이 성장하는데 충분한 조건을 가지고 있음을 알 수 있었다.

차. 현재 256일간 운전한 결과 각 칼럼조별 처리한 총 오염수(30mg/L)의 양은 553 L였으며 모든 칼럼조가 현재까지 파과점을 통과하지 않은 상태이다. 회분식 흡착실험에서 얻어진 결과를 기준으로 제올라이트의 암모니아성 질소의 최대 흡착 양을 100mg/g, 칼럼 내 주입된 제올라이트 양(9,000g) 및 30mg/L 오염농도와 칼럼을 통과하는 평균 유속(3.0mL/min)을 기준으로 제올라이트 칼럼 층의 최대 처리 유량 및 예상 파과시간을 계산해보면, 먼저 최대 처리유량의 경우는 30m³(30,000L)이고 파과시간은 19년이 소요된다. 실제적으로는 chaneling 등의 효과에 의해 훨씬 짧은 시간에

파과점에 이를 것으로 예상되나 본 실험에서는 파과점에 도달하는데 상당히 많은 기간이 소요될 것으로 예상된다.

5) 결 론

농경지 비점오염원의 특성과 비료성분의 유출특성 그리고 국내외 관리기술에 대한 조사 및 관리공법개발에 대한 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

먼저 문헌과 현장조사를 통하여 우리나라 농경지의 주요 비점오염원가운데 토양에 잔류되어 있는 비료성분이 가장 기여도가 높은 것으로 나타났으며, 특히 수계의 부영양화를 발생시키는 N과 P 성분이 주요 오염원인 것으로 판단된다. 이들 성분의 오염도는 지역별 특성과 시비조건, 토지이용도에 따라 다르며 논과 밭의 경우를 비교하여 볼 때 논에 비해 밭의 경우에 비교적 토양 투수성이 낮아 오염성분의 지하수 유입정도가 상대적으로 낮을 것으로 판단되며 그러나 지표상에 물을 보유하고 있는 시기가 길어 강우 유출등에 의한 지표상의 유출이 클 것으로 사료된다. 이와 반면에 밭의 경우는 비교적 토양의 투수성이 양호하므로 강우시 지표상의 유출뿐만 아니라 지하로의 유출도 클 것으로 판단된다.

토양중 비료성분의 유출특성을 연구한 실험에서 지하수로의 유입정도는 비교적 이동성이 좋은 질소성분의 경우가 큰 것으로 나타났으며, 질소성분의 형태는 토양의 산화환원분위기에 의해 좌우되는 것으로 나타났다. 이러한 산화환원 분위기는 지질 특성과 유기물 함량 그리고 온도 등에 의존하는 것으로 나타났다. 인의 경우는 비교적 흡착성이 좋아 토양이나 콜로이드 표면에 흡착되어 지하로의 확산은 작으나 지표상 유출수중에 포함된 입자들의 이동과 함께 넓은 범위로 확산되는 것으로 나타났다.

농경지 비점원 오염의 확산을 방지하기 위한 여러 가지 기술들이 소개되어 있으나 농경지의 경우에 주어진 환경특성상 에너지와 관리가 많이 소요되는 장치형 시설보다는 자연형 시설이 더 유리한 것으로 판단되며 여기에는 저류형 또는 식생형 시설이

포함될 수 있으며 유출량과 수질을 동시에 조절할 수 있는 저류형과 식생형이 혼합된 관리 시스템이 바람직한 것으로 사료된다.

본 연구에서 시범적으로 실험실에서 적용한 식생과 흙착매질의 혼합 시스템을 이용한 유출수중의 암모니아성 질소의 제거기술은 높은 제거효율로 비추어 볼 때 현장 적용 가능성이 높은 것으로 사료되며, 특히 농경지 지역과 같이 인력이나 장치투입이 어려운 지역에 적합한 기술로 판단된다. 그러나 본 시스템에 대한 보다 정확한 평가를 위해서는 장기적인 실험이 필요한 것으로 판단된다.

지금까지 우리나라에서는 점오염원에 대해서는 적극적인 처리대책이 추진되고 있으나, 비점오염원에 대해서는 구체적인 대책을 추진하지 않아 효율적인 수질관리정책수립에 있어 사각지대로 존재하고 있다. 앞에서 살펴본 바와 같이 우리나라에서 비점오염원의 기여율은 일부 오염물의 경우 총 배출량의 절반 이상을 차지하고 있으며, 점오염원처리를 위한 환경기초시설의 완비와 토지이용의 고도화에 따라 비점오염원의 기여율은 더욱 비중이 증가하리라 전망된다. 따라서 효율적인 수질관리를 위해서는 비점오염원 관리기반의 구조, 비점오염원 처리대책의 강구, 비점오염원과 점오염원의 연계운영 등 비점오염원에 대한 적극적인 관리대책이 필요하다.

농경지 비점원오염 관리를 위해서는 비점오염원 대량발생지역의 수질관리강화를 위해 토지이용별 비점오염원 관리기준이 마련되어야 한다. 이를 위해 일정규모 이상의 비점오염원은 점오염원으로 간주하여 방류수 수질기준을 적용하는 등 적극적인 처리방안도 강구하여야 한다. 상수보호구역으로 지정된 지역에서는 비점오염원의 현지 처리기법을 도입하고, 비점오염원과 점오염원 처리효율을 비교하여 경제적인 오염원 저감방안을 모색하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

자. 청정지역 분포도 분석 기능

1) 청정지역 분포도 분석 알고리즘 작성

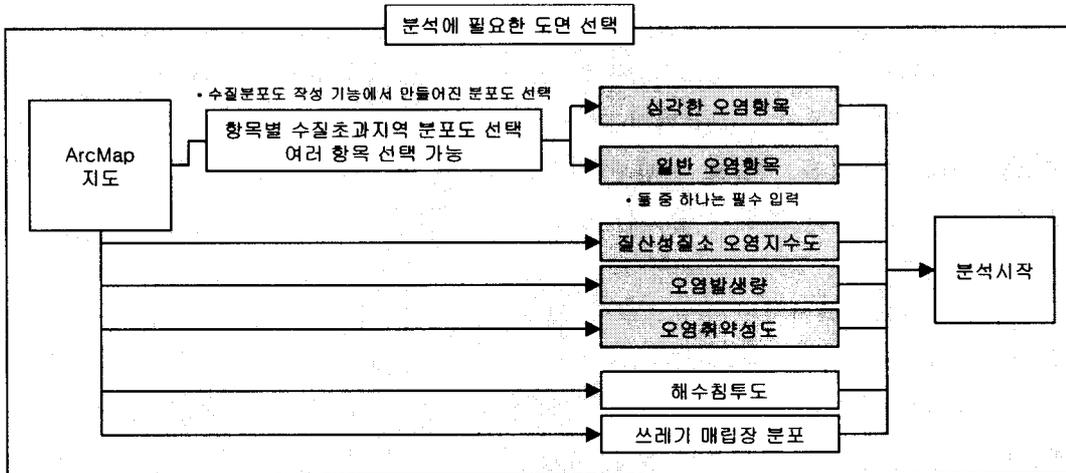


그림 3-135 청정지역 분포도 분석에 필요한 도면.

청정지하수 분포지역을 분석하기 위해 사용되는 인자들은 다음과 같다.

- 심각한 오염항목들
- 일반 오염항목들
- 질산성질소 오염지수도
- 오염발생량도
- 오염취약성도
- 해수침투도
- 쓰레기 매립장 분포도

위의 모든 도면들은 그리드 주제도를 선택하도록 되어 있다. 심각한 오염항목과 일반 오염항목의 분포도는 관정분포도 작성 기능에서 개발된 틀을 이용해 작성된 결과물이다. 관정분포도 작성 기능에서 수질 항목별로 분포도를 작성하게 되면, 각 기준에 따라 기준을 초과하는 지역은 1, 기준을 초과하지 않는 지역은 0으로 구분하는 분포도가 작성되는데, 이를 이용하는 것이다. 심각한 오염항목인지 아니면 일반 오염항목

인지에 대한 판단은 분석가가 수행하여, 지도에 로딩되어 있는 그리드 주제도를 중
 각 분류에 입력하게 된다.

위에서 선택된 주제도들을 이용해 지하수의 수질, 오염취약성 등을 고려한 청정지
 역, 감시지역, 이용지역, 오염지역으로 구분되는 청정지역 분포도를 작성하게 된다. 청
 정지역은 심각한 오염항목, 일반 오염항목에 노출되어 있지 않아 청정한 지하수 수질
 을 유지하고 있으며, 주변에 잠재오염원이 존재하지 않아 오염발생량이 적고, 오염취
 약성이 높지 않은 지역으로 청정한 지하수 수질을 유지하기 양호한 지역이다. 감시지
 역은 청정지역과 동일하게 청정한 지하수 수질을 유지하고 있지만, 주변에 잠재오염
 원이 존재하거나, 질산성질소 지수, 오염취약성 등이 높게 나타나 향후 수질이 악화될
 가능성이 있는 지역으로 감시가 필요한 지역이다. 이용지역은 다수의 일반 오염항목
 들에 노출되어 있거나, 해수의 영향을 어느 정도 받고 있는 지역으로 지하수 수질은
 떨어지지만 농업, 공업용수 등으로 활용이 가능하고 일반적인 정화처리를 통해 생활
 용수 등으로 활용이 가능한 지역이다. 오염지역은 심각한 오염항목들에 노출되어 있
 거나, 많은 일반 오염항목들에 노출되어 있는 지역으로 지하수 수질이 현저히 낮아
 고도의 정화처리 과정을 통해서만 활용이 가능한 지역이다.

위의 청정지역 분포도 구분 특성을 정리해보면 표 3-38과 같다.

표 3-38 청정지역 분포도 구분 특성

지역구분	심각한 오염 항목	일반 오염 항목	오염 발생량 (상위...%)	질산성질소 지수 (...이상 지역)	오염취약성 (...이상 지역)	해수침투		쓰레기 매립장		
						고농도	일반	위생	비위생	
									안정	비안정
청정지역	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
감시지역	X	X	○	○	○	X	X	○	○	X
이용지역	X	○	○	○	-	X	○	X	X	X
오염지역	○	5항목 이상	○		-	○	X	X	X	○

* ... 으로 표현된 부분은 분석가가 분석시에 값을 변경할 수 있는 부분이다.

위와 같은 청정지역 분포도 구분 특성에 따른 단계별 분석 흐름을 살펴보면 다음과

같다.

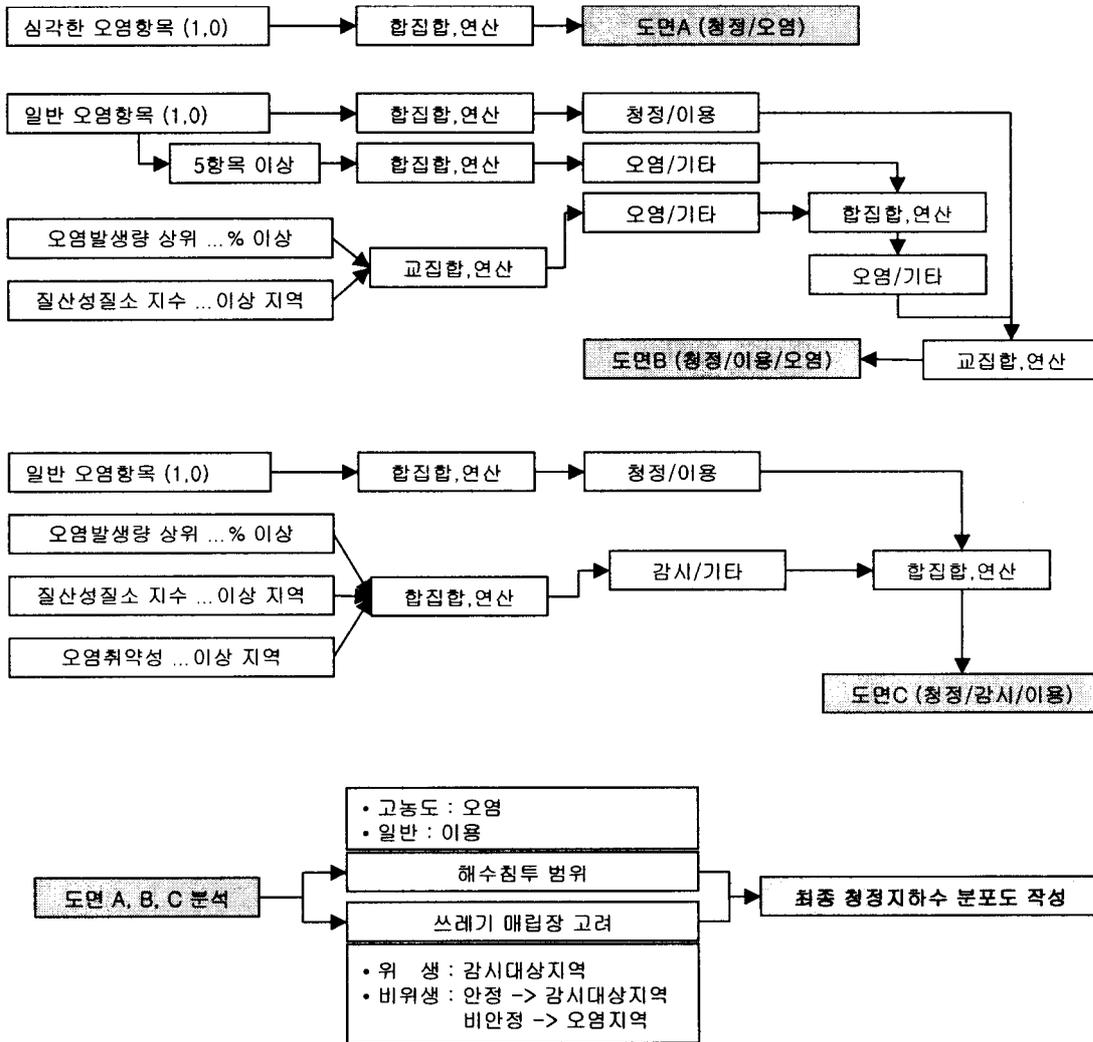


그림 3-136 청정지역 분포도 분석 흐름도

먼저 심각한 오염항목으로 분류된 항목들의 결과를 합집합하여, 심각한 오염항목에 노출된 모든 지역을 오염지역으로 지정한다. 그 외 지역은 청정지역으로 분류된다.

다음으로는 일반 오염항목으로 분류된 항목들을 이용하여 분석을 수행하는데, 일반 오염항목에 대해 분석할 때는 크게 두 번의 분석을 수행하게 된다. 첫 번째는 일반 오염항목에 노출된 지역을 대상으로 하는 분석이고, 두 번째는 일반 오염항목에 노출되지 않은 지역을 대상으로 하는 분석이다.

일반 오염항목에 노출된 지역을 대상으로 하는 분석에서는 일반오염 항목에 노출된 지역을 기본적으로 이용지역으로 선정한 후, 그 지역 내에서 일반 오염항목의 고려대상 항목이 5개 이상일 경우에는 5개 이상에 노출된 지역을 오염지역으로 지정한다. 또한 지정된 값에 따라 오염발생량 상위 몇% 지역이면서, 질산성질소 지수가 높게 나타난 지역을 오염지역으로 분류한다. 일반 오염항목에 의해 오염지역으로 선정된 지역과 오염발생량, 질산성질소 지수에 의해 오염지역으로 선정된 지역을 합집합하여, 최종적으로 일반 오염항목에 노출된 지역내에서의 이용지역과 오염지역을 분류하게 된다. 이 단계에서는 결과적으로 일반 오염항목에 노출된 지역내에서만 하위분류가 발생하고, 일반 오염항목에 노출되지 않은 지역은 청정지하수 지역으로 유지된다.

일반 오염항목에 노출되지 않은 지역을 대상으로 하는 분석에서는 일반오염 항목에 노출되지 않은 지역을 청정지역으로 선정한 후, 그 지역 내에서 오염발생량이 높거나 질산성질소 지수가 높거나 오염취약성이 높은 지역을 감시대상으로 선정하여 청정지역 내에서 감시지역을 분류해낸다. 현재는 청정한 수질을 유지하고 있어 청정지역으로 분류되지만, 오염발생량이 높거나 질산성질소 지수가 높거나 또는 오염취약성이 높아 수질이 악화될 수 있는 전제조건이 충분한 지역을 감시대상으로 선정하게 되는 것이다. 이 단계에서는 일반 오염항목에 노출되지 않은 지역에 대해서만 하위분류가 발생하며, 일반 오염항목에 노출된 지역은 이용지역으로 유지된다.

다음으로는 심각한 오염항목, 일반 오염항목 등을 단계에 따라 분석하여 단계별로 생성된 도면들을 종합적으로 분석하는 단계이다. 이 단계에서는 앞서 각 도면에서 생성된 도면을 중첩분석하여, 동일한 지역에서 가장 나쁜값을 반영하게 된다. 즉, 심각한 오염항목에 대한 분석에서 오염지역으로 분류된 지역은 일반 오염항목의 여러 분석과정에서 이용 또는 감시 지역으로 분류되었다 하더라도 이 단계에서 오염지역으로 분류되게 된다.

이렇게 각 단계별 생성된 도면들을 중첩분석한 후 생성된 도면은 최종적으로 해수 침투 여부, 쓰레기 매립지 분포 상황을 반영하여 청정지역 분포도로 생성된다. 해수침투 지역은 고농도 해수침투 지역과 일반농도 해수침투 지역으로 나누어 고농도 해수침투 지역은 오염지역으로 일반 해수침투 지역은 이용으로 분류하여 높은 도면을 이용한다. 쓰레기 매립장은 매립방법에 따라 위생 매립장은 감시대상으로 분류하고, 비위생 매립장은 안정에 정도에 따라 감시대상과 오염지역으로 분류한 도면을 이용한다. 해수침투와 쓰레기 매립지의 고려는 앞서 각 단계별로 생성된 도면들을 중첩시키는 것과 마찬가지로 가장 나쁜 결과값을 최종적으로 반영하게 된다.

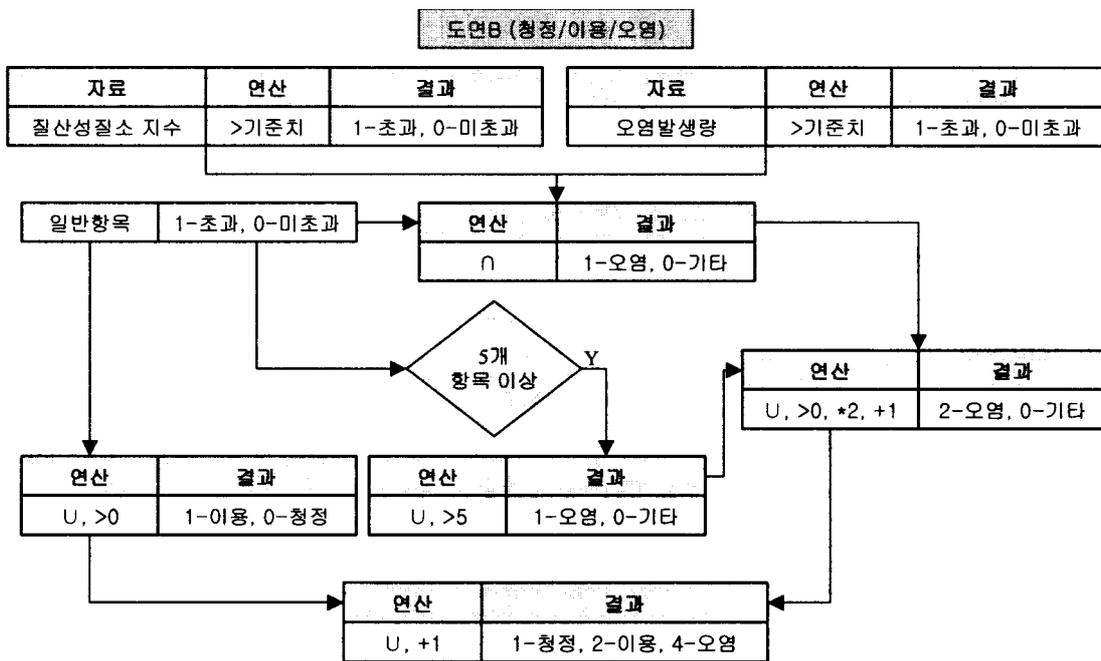


그림 3-137 일반 오염항목에 노출된 지역에 대한 분석에서의 연산 및 결과

도면C (청정/감시/이용)

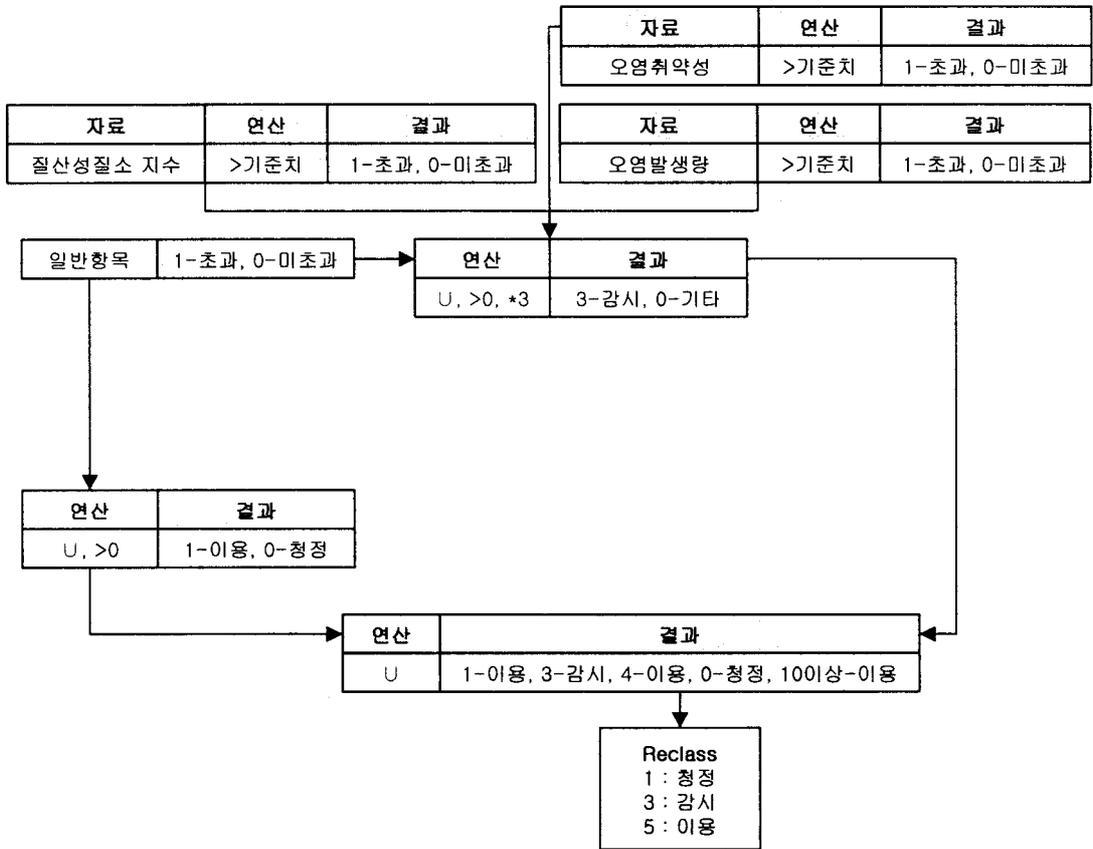


그림 3-138 일반 오염항목에 노출되지 않은 지역에 대한 분석에서의 연산 및 결과

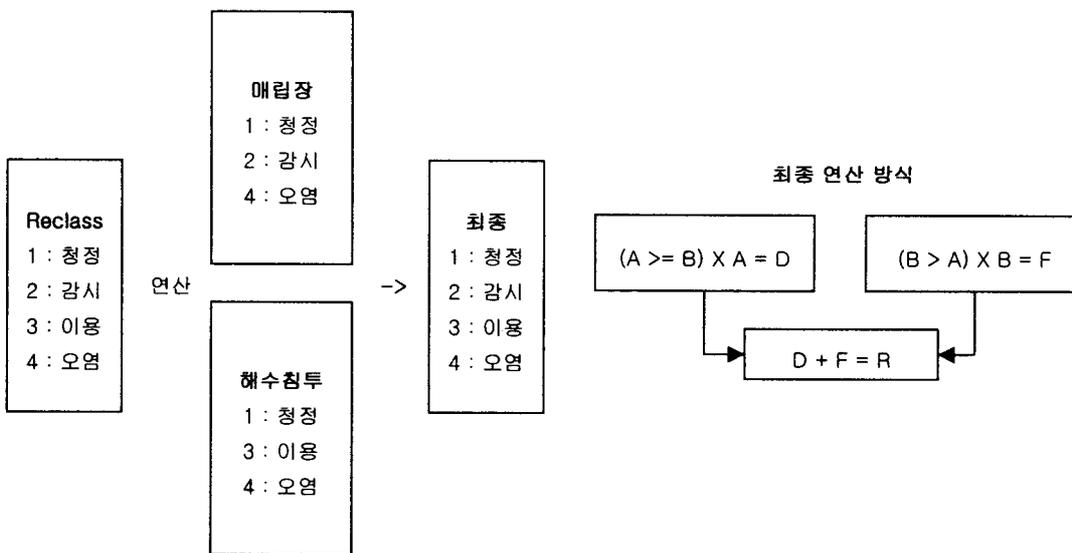
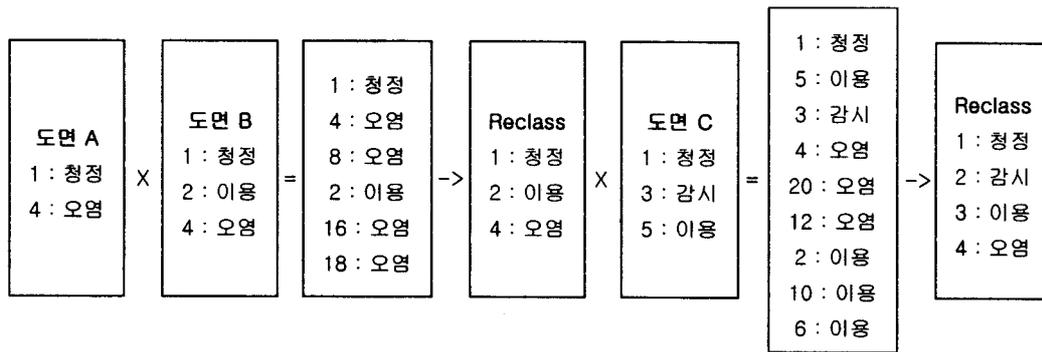


그림 3-139 최종 도면 생성을 위한 각 도면의 중첩 연산방식

2) 알고리즘에 대한 프로그램적 검증

위의 청정지역 분포도 작성 방법의 분석에서 작성된 알고리즘을 이용하여, 일련의 과정을 자동적으로 수행하는 툴을 개발하였다. 그리고 이 툴이 올바른 연산을 수행하고, 예상되는 결과물을 생산하는지 확인하기 위해 다음과 같은 자료를 생산하여, 모의 분석을 통해 프로그램적인 알고리즘을 검증하였다.

굵은 선으로 표현된 테이블이 초기 입력되는 그리드 자료들을 지시하며, 각 표의 셀은 그리드의 셀을 의미한다. 화살표는 각 단계에서 아래와 같은 초기 입력자료들이 입력되었을 때 생성되어야 하는 그리드의 결과를 보여주고 있다.

심각한 오염원(납)

A

1	1	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

--->

4	4	1	1	1
1	1	1	1	1
1	1	1	1	1
1	1	1	1	1
1	1	1	1	1

일반 오염원 (항목1, 항목2, 항목3, 항목4, 항목5)

1	1	0	0	0
1	1	0	0	0
0	1	1	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

1	0	0	0	0
1	1	0	0	0
0	1	1	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

0	0	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	1	0	0
0	1	0	0	0
0	0	0	0	0

1	0	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	1	0	0
0	1	0	0	0
0	0	0	0	0

1	0	0	0	0
1	0	1	0	0
0	1	1	0	0
1	0	0	0	0
0	0	0	0	0

5항목 종합 일반오염원 분석 질산성질소+오염발생량

B

0	0	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	1	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

1	1	0	0	0
1	1	1	0	0
0	1	1	0	0
1	1	0	0	0
0	0	0	0	0

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

--->

2	2	1	1	1
4	2	2	1	1
1	4	4	1	1
2	2	1	1	1
1	1	1	1	1

질산성질소

오염지수

오염발생량

쓰레기 매립장

오염취약성

해수침투

1	1	0	0	0
1	1	31	0	0
0	1	30	29	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

1	1	6	7	8
1	9	6	7	9
2	1	10	9	7
3	7	8	8	7
6	7	7	8	7

1	1	2	1	1
1	1	1	1	1
1	1	1	1	1
1	1	1	1	1
1	1	4	1	1

10	30	70	152	25
10	10	150	151	30
10	10	20	80	48
10	70	40	90	151
10	50	50	30	20

4	0	0	0	0
4	3	0	0	0
4	3	0	0	0
4	0	0	0	0
4	0	0	0	0

질소+취약성+발생량

일반오염원분석

C

0	0	0	3	3
0	3	3	3	3
0	0	3	3	0
0	0	3	3	3
0	0	0	3	0

1	1	0	0	0
1	1	1	0	0
0	1	1	0	0
1	1	0	0	0
0	0	0	0	0

->

1	1	0	3	3
1	4	4	3	3
0	1	4	3	0
1	1	3	3	3
0	0	0	3	0

->

5	5	1	3	3
5	5	5	3	3
1	5	5	3	1
5	5	3	3	3
5	1	1	3	1

A

B

C

R1

4	4	1	1	1
1	1	1	1	1
1	1	1	1	1
1	1	1	1	1
1	1	1	1	1

2	2	1	1	1
4	2	2	1	1
1	4	4	1	1
2	2	1	1	1
1	1	1	1	1

5	5	1	3	3
5	5	5	3	3
1	5	5	3	1
5	5	3	3	3
5	1	1	3	1

-->

4	4	1	2	2
4	3	3	2	2
1	4	4	2	1
3	3	2	2	2
3	1	1	2	1

R1

쓰레기 매립장

R2

4	4	1	2	2
4	3	3	2	2
1	4	4	2	1
3	3	2	2	2
3	1	1	2	1

1	1	2	1	1
1	1	1	1	1
1	1	1	1	1
1	1	1	1	1
1	1	4	1	1

-->

4	4	2	2	2
4	3	3	2	2
1	4	4	2	1
3	3	2	2	2
3	1	4	2	1

R2

해수침투

최종결과물

4	4	2	2	2
4	3	3	2	2
1	4	4	2	1
3	3	2	2	2
3	1	4	2	1

4	1	1	1	1
4	3	1	1	1
4	3	1	1	1
4	1	1	1	1
4	1	1	1	1

-->

4	4	2	2	2
4	3	3	2	2
4	4	4	2	1
4	3	2	2	2
4	1	4	2	1

제 2 절 현장조사 및 자료수집

본 과제에서는 청정지하수 지역을 구분하는데, 지하수 수질항목별 분포도, 오염 발생부하량 및 부하량도, 질산성질소 오염지수도, 해수침투지역도, DRASTIC Map 등을 사용한다. 이러한 도면들은 관정분포도와 속성자료, 지질도, 토양도, 잠재오염원도 등 다양한 주제도와 속성자료들을 종합적으로 분석하여 생성되는 자료들이다.

지질도, 토양도, 토지이용도 등은 타 사업을 통해 기 구축되어진 자료들을 활용하여 본 연구의 목적에 맞게 수정하여 사용하였으며, 수치고도모형(DEM), 경사도, 건물도, 도로망도, 하천도 등은 국가수치지형도를 구조화 편집하여 제작하였다.

하지만, 관정의 위치와 속성자료, 잠재오염원의 분포와 속성자료 등은 타 연구의 결과물을 최대한 활용하였으나, 그 자료양과 자료의 형태가 본 연구의 목적과는 부합하지 않는 부분이 많아, 현장조사를 통해 본 연구에 맞는 자료를 수집하여 데이터베이스화하는 과정이 필요하였다. 이에 본 연구에서는 관정현황 및 수질, 하천수질, 잠재오염원 현장, 토양시료의 4가지 분야에서 현장조사 및 자료수집을 수행하였다.

1. 관정현황 및 수질 조사

가. 조사 배경

본 연구를 위해서는 관정의 분포도와 정밀, 현장간이 지하수 수질자료 등이 반드시 필요하다. 이 자료를 분석해 청정지역 분포도의 근간이 되는 항목별 수질분포도, 수질초과지역도, 관정별 기준초과 항목수 분포도를 제작하고, 성분별 기준초과 관정수를 분석할 수 있다.

나. 조사방법 및 조사결과

지하수 관정현황 조사를 위해 우선적으로 참고를 한 것은 건설교통부에서 구축한 두레박자료이다. 두레박 자료는 무주군청의 상하수도 관리사업소로부터 협조를 받아 획득하였다. 하지만, 두레박 자료는 테이블 형태의 자료로 도면자료가 존재하지 않고 있다. 일부 자료에서 위치정보가 경위도 좌표 형태로 입력되어 있기는 하나 실제와 상이한 것이 비일비재하다. 따라서, 본 연구에서는 두레박에 신고된 주소를 기반으로

관정의 현재위치를 조사하였다. 획득한 두레박 자료를 읍·면별로 분류한 후 읍·면 사무소에 직접 방문하여 지적도를 열람하고, 두레박 자료에 나와 있는 주소지를 기록하였다. 무주군은 아직 지적도가 전산화되어 있지 않기 때문에 GIS적인 주소매핑이 불가능하다.

다음으로는 지적도를 통해 확인된 주소지를 찾아가 관정의 실제 유무를 확인하였다. 이러한 과정에서 동일 주소지 내에 관정이 두개 이상 존재하거나, 주소지에서 관정을 찾을 수 없을 때는 마을주민, 특히 이장님과의 인터뷰 조사를 통해 관정의 유무를 확인하고 추가적인 관정에 대한 자료도 수집하였다.

위와 같은 조사과정을 통해 두레박 자료 중 실제 확인된 관정과 조사과정 중 추가로 조사된 관정을 합한 총 223개의 위치를 1:5,000 국가수치지형도를 이용해 관정분포 현황도로 작성하였다.

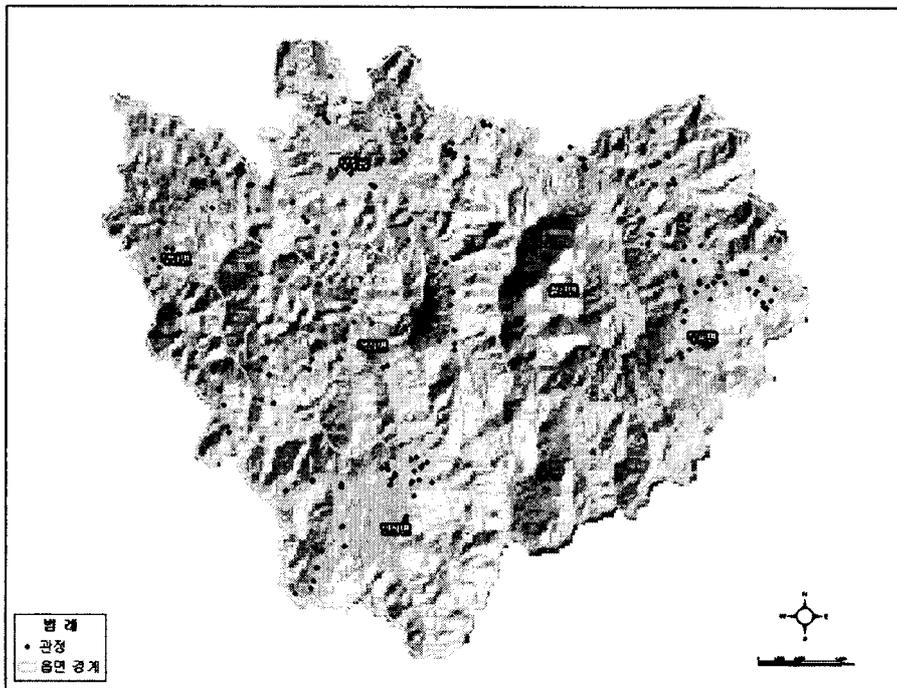


그림 3-140 무주에서 조사된 관정의 분포도

조사된 관정들 중 연구지역인 무주지역의 등수위선을 작성하기 위해 수위 측정 대상 관정을 선별하여 일제조사를 통해 수위자료를 수집하였다. 수위측정 대상 관정은 대형관정을 대상으로 수위를 측정할 수 있는지 여부와 지역적, 지형적인 요소를 고려하여 선별하였다.

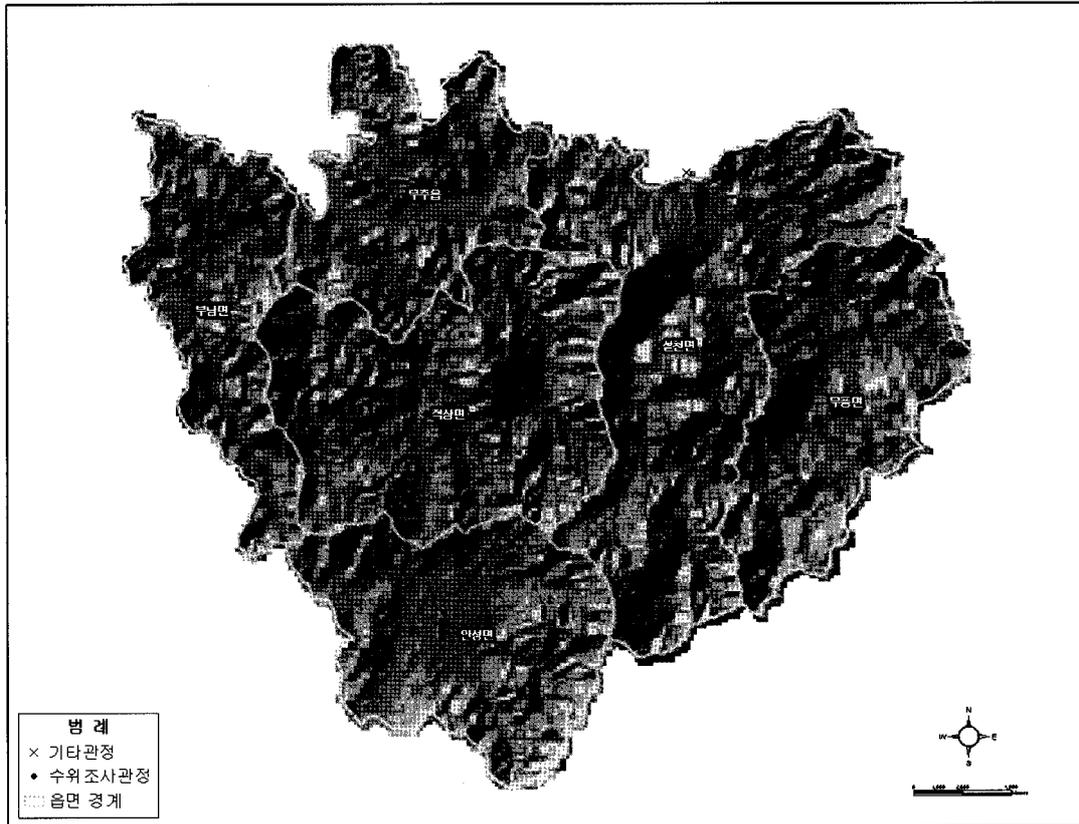


그림 3-141 수위측정 대상 관정 분포도

관정의 수질조사는 첫 번째로는 잠재오염원과 지하수 수질의 관계를 살펴보기 위해 잠재오염원이 위치한 집수구역의 상, 하류에서 채취하는 것을 원칙으로 하였다. 하지만, 기 설치되어 있는 관정을 대상으로 한 시료채취의 한계성이 있어, 관정이 원하는 지역과 위치에 존재하지 않아 조사원칙을 충족하지 못한 경우가 많았다. 특히, 무주지

역은 양질의 계곡수가 풍부하여 상류부에서 관정을 개발하는 경우가 많고, 농촌지역의 주요 잠재오염원인 축산폐수시설들이 급경사의 지형적인 요인으로 하천의 양안에 위치한 경우가 많아 잠재오염원과의 관계를 고려한 관정을 찾아 시료를 채취하는 데에 많은 한계가 있었다.

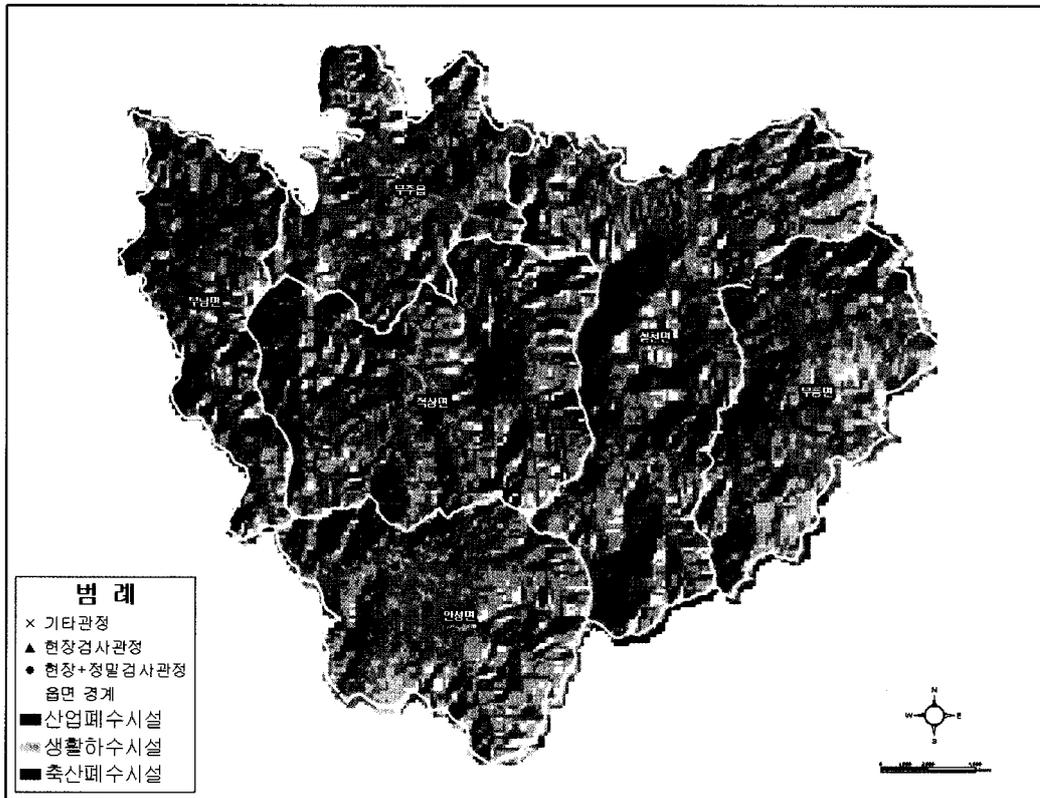


그림 3-142 지하수 시료채취 지점과 주요 잠재오염원 분포

지하수 수질은 현장에서 YSI를 이용하여 수온, 전기전도도, 염도, DO%, DO, pH를 측정하였으며, 채취된 시료는 음용수 수질기준에 의거 분석을 의뢰하였다.

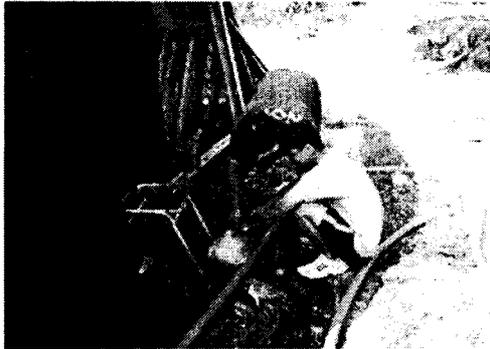
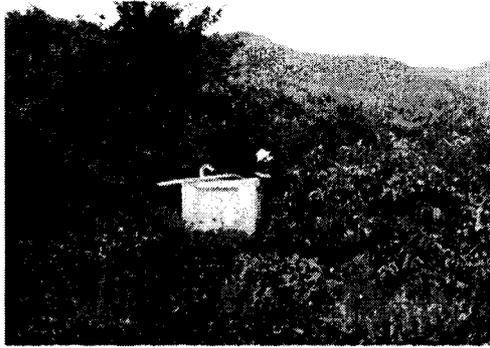
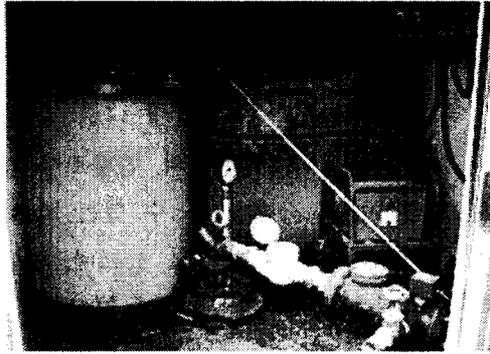
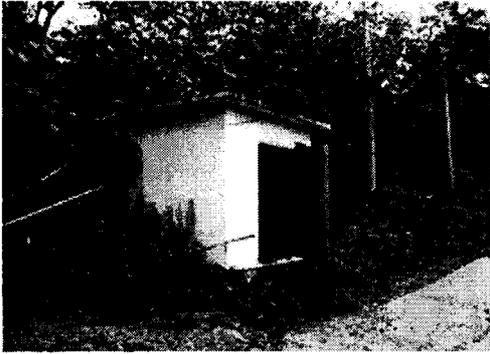


그림 3-143 관정의 현황 조사 및 시료채취

2. 하천수질현황 조사

가. 조사배경

지하수와 지표수는 오염에 대한 직접적인 상관관계에 있기 때문에 현장조사를 연동하여 실시하였다. 지하수의 현황조사 및 수질조사와 연관된 하천수질 조사는 지하수의 오염확산과 저감을 볼 수 있는 자료가 될 것이다. 더우기 많은 마을에서 지표수인 계곡수를 식수로 이용하고 있으며, 가뭄이 들거나 식수이용량이 증가할 경우에는 지하수 사용을 병행하는 경향이 있어 하천 수질 조사를 수행할 필요성이 있다.

나. 조사방법 및 조사결과

하천수질현황 조사는 연구지역의 주요 하천인 남대천을 기준으로 1차 지류의 상류와 하류부에서는 정밀 수질 분석을 위한 시료채취와 YSI를 이용한 현장수질 측정을 병행하였다. 1차 지류로 유입되는 2차 지류에서는 현장수질 측정만을 수행하였다. 또한 과거 오염원이 있었던 지역에서는 마을 주민과의 인터뷰 조사를 통해, 오염원이 존재했던 지역과 가장 근접한 하천의 시료를 채취하고 현장수질을 측정하였다.

YSI를 이용한 현장수질 측정에서는 관정에서와 마찬가지로 수온, 전기전도도, 염도, DO%, DO, pH를 측정하였으며, 정밀 수질분석을 위해 채취한 시료는 음용수 기준으로 분석을 의뢰하였다. 조사된 하천수질 측정지점은 1:5,000 수치지형도를 이용하여 도면화 하였다.

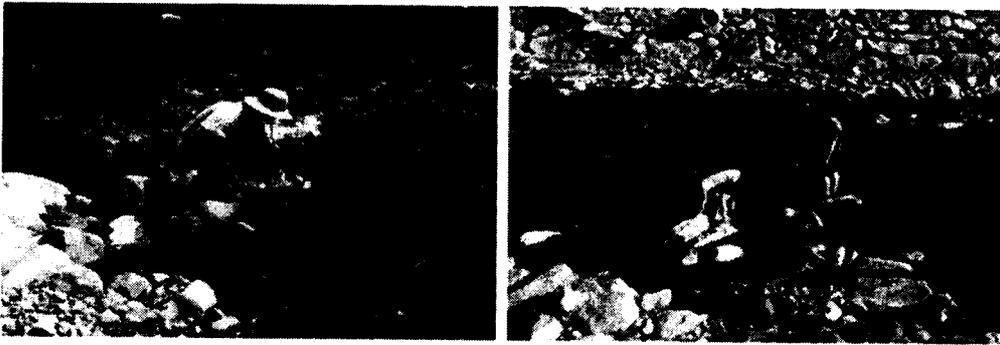


그림 3-144 하천 시료 채취

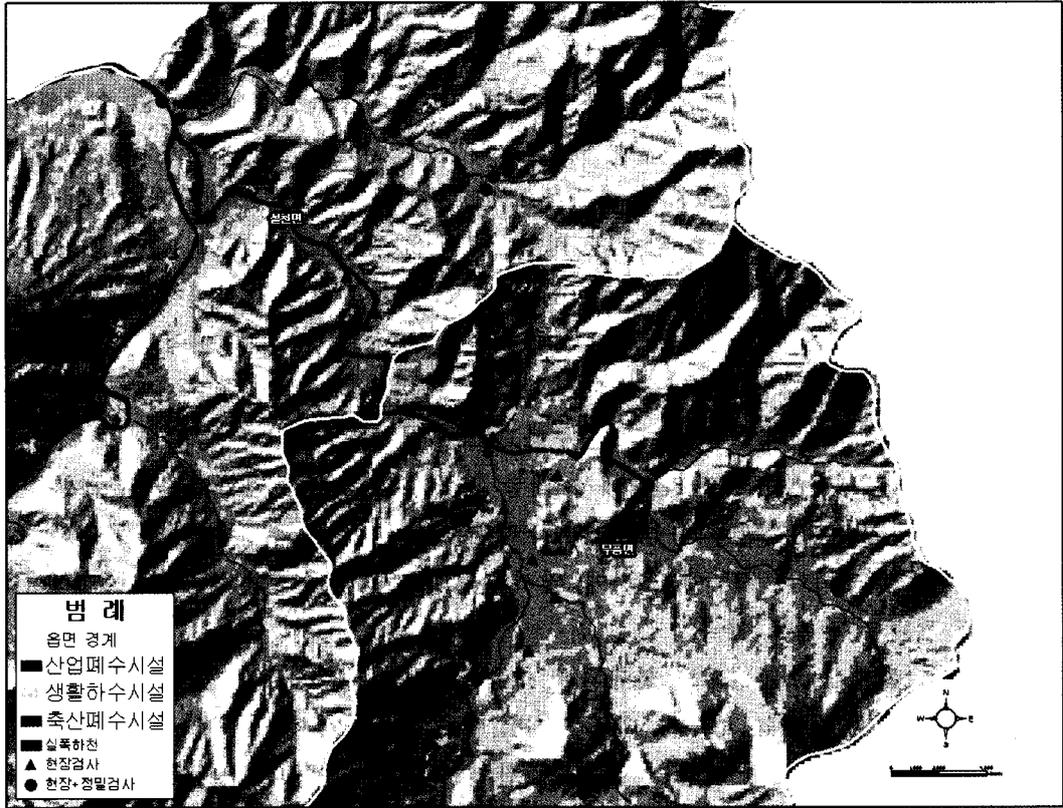


그림 3-145 설천면, 무풍면 일대의 하천 시료채취 지점

3. 잠재오염원 현장조사

가. 조사이유

현재는 음용가능하고 농업용수로 가능하지만 인접한 잠재오염원이 존재할 경우 해당지역의 지하수는 오염될 가능성에 노출되어 있어, 잠재오염원과 주변 지하수 수질에 대한 지속적인 관리와 감시가 필요하다. 이에 본 연구에서는 청정한 지역으로 분석되고 분류되었지만, 잠재오염원이 존재하는 지역에 대해서는 위와 같은 이유로 감시대상 지역으로 선정하였다. 따라서 잠재오염원에 대한 기 구축자료가 없는 무주지역에 대해 현장조사를 수행하였다.

나. 조사방법

잠재오염원은 크게 점오염원과 비점오염원으로 구분 지을 수 있다. 점오염원(point source)은 오염원이 고정되어 한점에서 오염물질이 집중적으로 배출되는 오염원을 말하며, 공장, 생활하수, 분뇨처리장, 축사 등이 있다. 비점오염원(Non-point source)은 오염원이 넓은 공간에 펼쳐져서 분포하고 있으며, 오염물질을 희석, 확산하면서 넓은 지역으로 배출하는 오염원을 말한다. 비점오염원으로는 논, 밭, 임야, 대지 등이 있다.

GIS에서 점오염원을 주제도로 작성할 때는 포인트 속성으로 작성하는 것이 일반적이었다. 이는 점오염원 조사의 용이성과 조사결과의 전산화의 용이성을 고려한 것이다. 아울러 일반적인 점오염원 조사에서는 생활하수시설을 제외한 주유소, 공장, 축사, 쓰레기매립장 등을 점오염원으로 간주하고 조사하였다. 이러한 방법을 주로 사용한 까닭은 분류된 기준에 따라 현장에서 대상 점오염원의 GPS 자료와 속성정보를 취득한 후 GPS 자료의 맵핑과 속성정보의 구축만으로 잠재오염원도를 쉽게 구축할 수 있다는 장점 때문이다. 때문에 조사에 앞서 현장조사를 위한 별도의 도면을 작성하지 않아도 된다는 장점도 있다.

하지만, 실제 점오염원으로 분류되는 주유소, 공장, 축사, 가옥 등은 공간적으로 넓은 면적에 펼쳐져 있는 경우가 대부분이며, 이는 하천주변에 위치한 잠재오염원 분석, 관정의 포획구간내에 존재하는 잠재오염원 분석, 청정지하수 권역에 영향을 미치는 잠재오염원 분석 등에서 부정확한 결과를 초래하는 원인이 될 수 있다. 특히, 모든 가옥들과 구조물은 잠재오염원으로서 간주되어야 한다는 판단에 생활하수시설을 고려할 필요성이 있었다.

이에 본 연구에서는 건물도를 이용해 잠재오염원도를 작성하는 실험적인 연구를 수행하였다.

이를 위해서는 잠재오염원의 현장조사에 있어 기존 연구와는 달리 현장조사 도면이 필요하였다. 현장조사 도면은 건물도, 하천, 도로망도, 대/소유역도, 행정구역도를 사용하여 제작하였으며, 건물도, 하천, 도로망도는 국립지리정보원의 1:5,000 국가수치지형도를 구조화 편집하여 생성하였으며, 대/소유역도는 무주지역의 지형분석을 통해 생성하였다.

국가수치지형도로부터 건물에 해당하는 레이어를 추출하여, 폴리곤 형태의 건물도를 작성하고, 잠재오염원의 속성정보를 오염발생부하량, 부하량 분석에 맞도록 체계화

하여 잠재오염원 분포도를 작성하였다. 잠재오염원의 속성정보 설계에 있어서는 한 개의 건물에 다양한 분류의 잠재오염원이 존재할 수 있음을 고려하여, 이를 표현하고 분석에 활용할 수 있도록 설계하였다.

현장조사 도면의 제작을 위해 가장 먼저 국가수치지형도를 구조화 편집하여 제작된 건물도에 ID를 부여하였다. 행정구역별로 [행정구역명 + 번호]의 형태로 이루어진 ID를 GIS에서 공간분석을 통해 부여하였다. 다음으로는 각 건물의 속성정보로 들어갈 대/소유역 정보를 입력하였다. 대/소유역 정보의 입력은 행정구역도와 마찬가지로 GIS를 활용하여 부여하였다. 이렇게 생성된 건물도에 각 건물의 ID를 Label로 표시하고, 도로망도, 하계망도 등을 추가적으로 디스플레이하여 조사도면을 준비하였다. 또한 현장조사를 실시하면서 지역주민과의 지속적인 토론회를 통하여 연구지역내의 과거의 오염원 위치를 파악하였다.

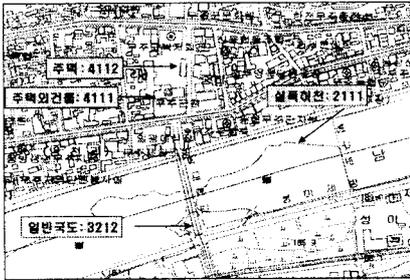


그림 3-146 일반 수치지형도.



그림 3-147 GIS과정 처리 수치지형도.



그림 3-148 건물번호 생성

점 오염원의 속성정보는 생활하수시설, 축산폐수시설, 산업폐수시설, 양식장시설, 쓰레기매립장으로 구분하였으며, 이는 환경부의 오염발생부하량 계산 방식에서 사용하는 분류방법을 따른 것이다. 이러한 분류기준과 본 연구의 오염발생부하량 및 오염부하량 분석 알고리즘을 함께 고려하여 잠재오염원의 조사양식을 작성하였다(표3-59).

조사의 효율성을 위해 조사양식은 축산폐수시설, 산업폐수시설, 양식장시설은 각 시설별로 한 장씩 작성하며, 나머지 잠재오염원 분포도(건물도)에 있는 구조물들은 생활하수시설로 간주하였다.

생활하수시설은 시가지역, 비시가지역을 구분하고, 농촌지역의 특성상 폐가가 많이 존재하는 점을 고려해 사용중, 폐가를 구분하여 한 장의 양식에 동일한 내용으로 건물ID만을 나열하였다. 즉, 비시가지역+사용중+수세식, 비시가지역+사용중+수거식, 비시가지역+사용중+수거식, 비시가지역+폐가+수거식 등으로 고정된 내용의 양식에 이에 해당하는 건물들을 나열하는 방식으로 조사를 수행하였다. 사용인원은 무주군의 읍·면별 가구당 평균 인구수를 일률적으로 적용하였다. 마지막으로 시가화 지역에서의 생활하수시설 집중현상으로 주변지역에 비해 오염부하량이 극단적으로 높게 나타나는 것을 막기 위해 정화처리시설이 존재하고 운영상태는 일부처리에 해당하는 것으로 기입하였다. 정화처리시설의 여부와 운영상태 등은 오염발생부하량에서 오염부하량을 계산할 때 저감 요소로 고려되는 인자들 중 하나이다.

쓰레기 매립장은 무주군청으로부터 쓰레기 매립장 현황을 협조받아 과거에 매립되어 안정화 단계에 있는 시설부터 현재 사용되고 있는 시설 모두를 현지조사 하였다.

비점오염원은 토지이용도를 활용하였다.

표 3-39 잠재오염원 조사양식.

일반 정보			
대분류조사ID	GIS 입력	하위분류조사ID	GIS 입력
소유역ID	GIS 입력	상세유역ID	GIS 입력
조사일자	GIS 입력	사용여부	1.사용중 0.미사용
사용시작		사용종료	
건물ID	GIS 입력		
업종상세ID	(예:건물ID-1,건물ID-2)		
시설분류	1.생활하수시설 2.산업폐수시설 3.축산폐수시설 4.양식장시설		

위치 정보			
시도	GIS 입력	시군구	GIS 입력
읍면동	GIS 입력	동리	GIS 입력
주소			
상호		사용자	
연락처		정화처리시설	1.있음 0.없음
정화처리운영상태	1.효율양호 2.일부처리 3.처리미흡 4.운영중지		

업종별 기록 항목				
축산폐수시설	젖소		한우	
	말		돼지	
	산양		사슴	
	개		가금	
	기타	(숫자만 기입, 나머지는 상세설명 이용)		
	강우시분뇨유출	1.유출 0.미유출	분뇨처리시설	1.시설 0.미시설
	바닥재처리상태	1.불투수처리 2.일부처리 0.미처리		
바닥재	(예:톱밥)			
생활하수시설	천장시설	1.시설 2.일부처리 0.미처리		
	사용인원		시가화구분	1.시가화 2.비시가화
산업폐수시설	수거형태	수세식/수거식		
	시설면적	m ²	폐수방류량	m ³ /일
양식장시설	업종코드	(업종코드표 참고)		
	<input type="checkbox"/> 잉어 <input type="checkbox"/> 송어 <input type="checkbox"/> 대하 <input type="checkbox"/> 미꾸라지 <input type="checkbox"/> 기타 시설면적	m ²		
상세설명	(기재사항외의 내용을 기술하세요)			

다. 조사결과

건물도를 이용한 현지조사 결과 1:5,000 국가수치지형도에 있는 건물 하나 하나를 가옥으로 간주하는 것은 무리가 있으며, 비닐하우스 등의 시설물을 건물로 표현하여 생활하수시설이 과장되는 어려움이 있었다. 무주지역의 가옥들은 하나의 가옥에서 본채, 창고, 사랑채 등 여러개의 건물을 가지는 구조를 가지고 있기 때문에, 가옥수보다 건물의 수가 많아서 생활하수시설이 과장되고, 더불어 가구당 평균 인구수에 의한 전체 인구수도 과장되는 문제가 있었다. 하지만, 이러한 문제는 무주지역에서 동일하게 나타났기 때문에, 상대적인 값을 비교하는 오염발생부하량 및 오염부하량의 분석에는 큰 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

건물도를 이용한 잠재오염원의 현장조사 측면에서의 결과를 살펴보면 다음과 같다.

조사초기에 무주지역 중 한 개의 대유역을 사례지역으로 지정하여 시범적으로 조사를 수행하였다. 사례지역에서는 건물도에 나타나 있는 모든 시설물들을 가옥별로 그룹화하는 작업을 병행하였는데, 조사량과 조사시간이 너무 많이 소모되어 사례지역 연구 후 이 방법은 배제하였다. 또한 조사도면(건물도)을 들고 다니며, 각각의 건물에 대해 조사하고, 도면에 없는 시설물들을 입력하는 작업을 수행하였다. 그리고 그 결과를 이용해 오염부하량을 분석하였다.

한편으로는 기존의 조사방법을 변형한 방법을 통해 자료를 수집하였다. 이 방법에서는 기존 방법과 마찬가지로 별도의 조사도면을 제작하지 않고 축산폐수시설, 산업폐수시설 등을 조사한 후 그 조사된 결과를 포인트 도면으로 작성하여, 건물도면과 매핑을 시켰다. 조사된 잠재오염원을 건물도와 매핑시킨 후 잠재오염원에는 존재하지만 건물도에는 나타나 있지 않은 시설물에 대해서는 추가를 하였다. 그리고 매핑되지 않은 나머지 건물들은 모두 생활하수시설로 간주하였다. 잠재오염원과 건물의 매핑에서는 축산폐수시설, 산업폐수시설 등 대부분의 잠재오염원들이 대부분이 특징적인 모양과 크기를 가지고 있어 큰 어려움이 없었다.

각각의 조사방법에 따라 제작된 오염발생부하량 및 오염부하량도를 비교한 결과 지역적인 분포 양상에서 큰 차이가 나타나지 않았다. 따라서 기존의 조사방법을 변형한 방법이 매우 효율적으로 건물도를 이용한 잠재오염원 분포도를 작성할 수 있는 방법으로 판단되어, 사례지역 이외 지역에서는 이 방법에 따라 조사를 수행하였다.

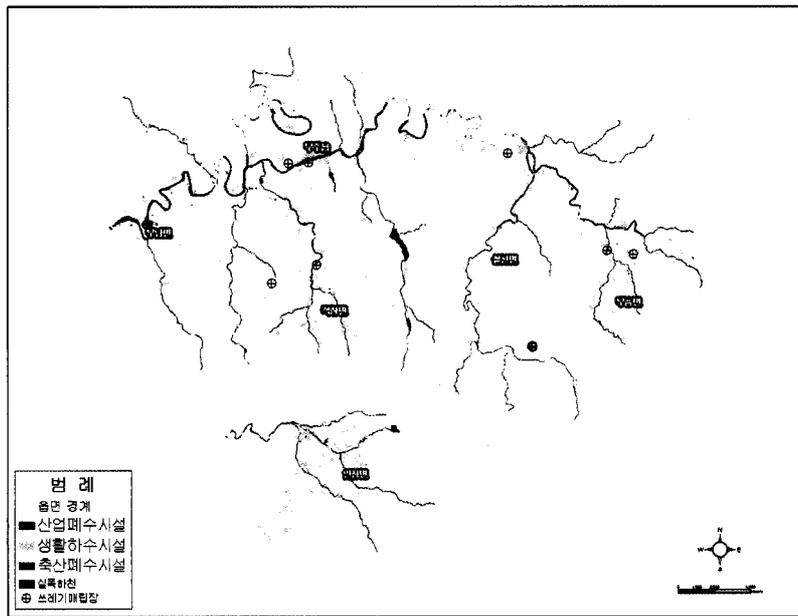
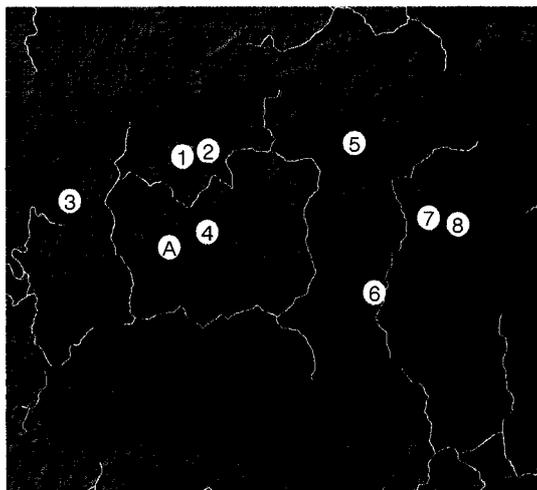


그림 3-149 무주의 잠재오염원도(점오염원).



쓰레기매립장 현황

ID	이름	현재상태	향후
1	차산	사용중	이적
2	당산	주차장	-
3	부남대소1	나대지	-
	부남대소2	공원	-
4	적상	표고버섯재배지	-
5	설천	참깨밭	이적
6	구천동	사용중	이적
	덕유산	사용중	이적
	리조트	이적중	이적
7	철목	묘목하우스	이적
8	무풍	나대지	-
A	무주군 위생매립지 (건설중)		

그림 3-150 무주의 쓰레기 매립장 분포도.

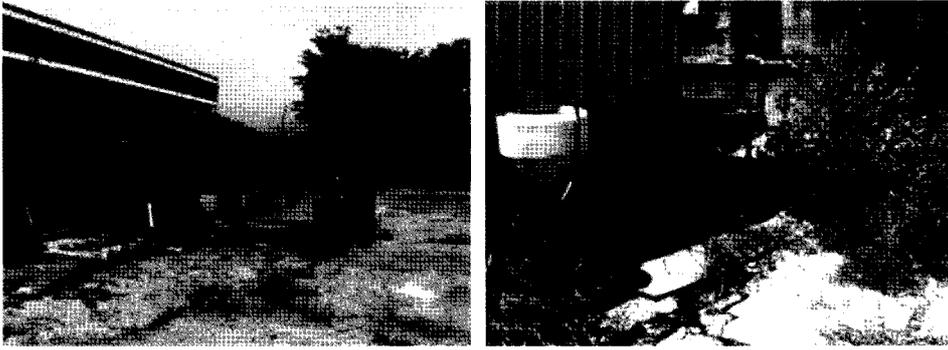


그림 3-151 산업폐수시설과 축산폐수시설.



그림 3-152 하천가에 위치한 잠재오염원들.

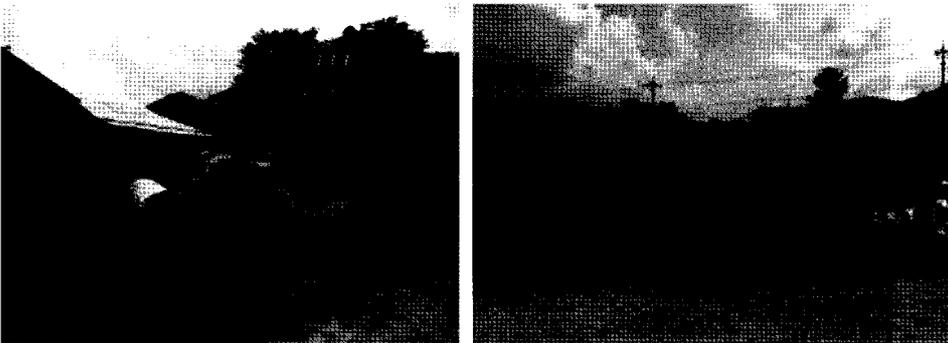


그림 3-153 야적되어 있는 축산 폐기물.

4. 토양시료 수집

가. 조사이유

지하수의 오염은 직, 간접적으로 토양의 영향을 받게된다. 강우 및 지표수는 토양을 통하여 침출되거나 확산의 과정을 거쳐서 지하수에 영향을 주게된다. 또한 토양에서의 오염물질의 확산을 알면, 지하수에서의 오염물질의 확산을 추정할 수 있다. 본 과제에서는 강우 강도에 따른 토양 침출율을 분석하고, 토양에서의 오염물질의 확산을 추정하였다.

나. 조사방법

토양시료는 본 연구의 연구지역인 경기 화성과 전북 무주 이외에도 충남 유구, 충북 오성 및 충남 전의, 전북 김제, 전남 나주, 경남 김해에서 추가로 채취하였다. 이는 연구지역 이외의 평야 및 산지의 토양을 폭넓게 채취하여 실험의 다양성을 향상시키기 위함이다. 토양시료 채취 수는 한 지역에서 논, 밭, 과수원 토양을 각각 1점씩 채취하여 7지역에서 총 21개의 토양시료를 채취하였다. 추가 적으로 임야토양을 경기화성, 전북 무주, 충남유구, 충북 오성, 전북 김제에서 추가적으로 채취하여 총 7개 지역에서 26개의 토양시료를 채취하였다.

표 3-40 토양시료 채취 지역 정리.

지역	논	밭	과수원	임야
경기 화성	○	○	○	○
충북 오성 및 충남 전의	○	○	○	○
충남 유구	○	○	○	○
전북 김제	○	○	○	○
전북 무주	○	○	○	○
전남 나주	○	○	○	
경남 김해	○	○	○	

각 시료채취 지점에서는 강수에 따른 침출물 및 농약의 거동을 분석하기 위한 배수실험용 토양시료와 토양 내 수분함양 및 공극률을 분석하기 위한 토양수분측정용 시료, 두 가지 형태로 시료를 채취하였다. 배수실험용 토양시료와 토양수분측정용 토양시료 모두 불교란 시료를 채취하였다.

배수실험용 토양시료는 수직길이 100cm, 직경 20cm의 아크릴 관을 사용하였다. 시료 채취 방법은 아크릴관을 중심으로 주변지역의 토양을 제거하며, 약 10~15cm 심도마다 아크릴관을 타격하여 관안으로 토양을 주입하는 방법을 사용하였다(그림 2). 아크릴관에 심도 80~90cm까지의 토양이 채취되면, 아크릴관 상부의 남은 공간에 내부캡과 폴리에틸렌과 토양을 사용하여 아크릴관 안의 토양이 이동 중에 움직이는 것을 최소화하였으며(그림 3), 아크릴관의 상부와 하부는 캡과 랩, 청테이프로 밀봉처리 하였다(그림 4).

배수실험용 토양시료를 80~90cm 심도까지만 채취한 사유는 첫 번째 시료 채취지점이었던 전북 무주에서의 논에서 시료채취시, 토양수와 토양특성상(사질토) 100cm의 심도를 모두 만족할 수가 없었다(그림 5). 이후에 시료채취에 드는 시간과 노력을 효율적으로 관리하기 위해 최초 채취하였던 토양시료와 동일한 심도까지만 시료들을 채취하였다.

다. 조사지점

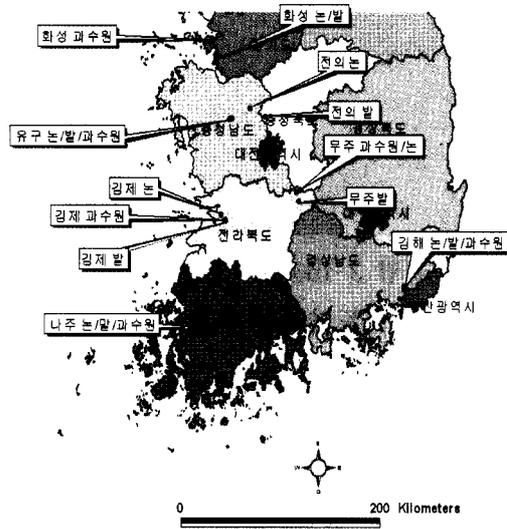


그림 3-154 배수실험용 토양시료 채취



그림 3-155 시료의 내부 공간 처리



그림 3-156 토양수분측정용
토양시료 채취

토양수분측정용 토양시료는 수직길이 50cm의 동관을 사용하였다(그림 3-183). 토양수분측정용 토양시료는 매 지점마다 1개씩의 시료를 채취하는 것을 원칙으로 하되, 상부와 하부의 토양특성이 확연히 다른 곳에서는 상세한 정보를 얻기 위해 2개의 시료(0~50cm, 50~100cm 심도의 시료)를 채취하였다. 채취된 토양수분측정용 시료는 캡과 랩, 청테이프로 밀봉처리 하였다.

라. 토양시료의 시험장 설치 및 분석

채취한 토양시료 중에서 배수실험용 토양시료의 토양 내 수분함양 및 공극률을 분석하기 위한 토양수분측정용 시료는 농업기반공사 농어촌 연구원내의 환경 분석실에 의뢰를 하였다. 또한 침출물 및 농약의 거동을 분석하기 위한 배수실험용 토양시료는 농업기반공사 농어촌 연구소내의 실험 장치를 설치하였다.

실험장치는 실외에 설치되었으며, 가로 90cm, 세로 250cm, 높이 115cm으로 2개를 제작하였다. 각각의 실험장치는 스테인리스강레이스와 합판을 사용하여 제작되었으며, 하나의 실험장치는 2열로 채취한 토양시료를 설치하였다. 토양시료는 배수구에 연결하여 설치하였으며 이음공간은 실리콘으로 처리하였다. 토양시료의 상부에는 자연 상태에서의 경사를 이용하였으며, 물고임 현상을 막기 위해서 Overflow용 구멍을 만들었다. 이러한 처리 이후에 토양시료의 온도를 지열과 동일과 동일하게 하는 작업으로, 각 실험대를 합판으로 막고 빈 공간에는 쌀겨를 삽입하여, 온도를 일정하게 유지하도

록 하였다.

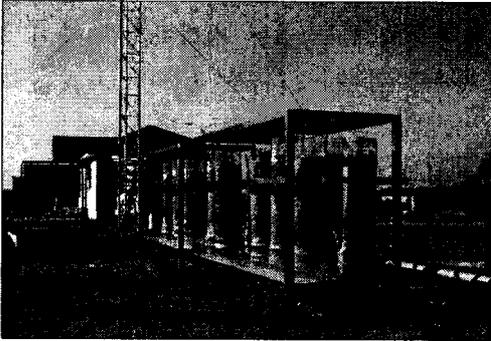


그림 3-157 채취토양의 실험장



그림 3-158 채취토양의 실험장 완공



그림 3-159 토양실험 전처리 과정

제 3 절 지하수 수질 모니터링 시스템 개발

1. 지하수 수질 모니터링 시스템 개발 이유

관정에 대한 수질정보를 실시간으로 연속적으로 얻는 것은 지하수의 유동과 확산을 파악하는데 중요한 역할을 한다. 이러한 지하수 수질 모니터링을 지속적으로 시행하려면 많은 인력, 비용과 시간이 필요하다. 이러한 문제를 해결하는 방법으로 관정 지하수 수질 모니터링 시스템을 개발하여 사용하는 것이 대안으로 채택되었다.

지하수 수질 정보시스템은 디지털 방식의 다 항목 수질측정기에 의하여 수위, 수온, 수소이온농도, 전압, 수심에 해당하는 수질정보를 연속 수집하여 시간에 따라 변화하는 항목 별 데이터의 변동 추이 및 여러 항목간의 연관 관계를 집중감시 할 수 있도록 한다. 또한 여러 개소에 분산 설치된 수질 측정기와 중앙의 컴퓨터를 네트워크로 연결하여 여러 가지 수질 항목의 데이터를 수집 및 분석 함으로서 한 개소뿐 아니라 여러 개수의 동일 항목간, 다른 항목간의 연관관계 등을 종합 분석 함으로서 수질 변동추이를 다각적으로 판단 할 수 있게 하고자 한다.

2. 관정 지하수 수질 모니터링 센서 및 통신관리 프로그램 개발

가. 시스템 사양

- 1) Main CPU : MC68EC000FU12/FU16
- 2) Memory :
 - 가) Data Memory : Flash 512Kbyte, SRAM 512Kbyte
 - 나) Program Memory : Flash 256Kbyte
- 3) Watch-Dog Timer : Access Time 약 1.8초
 - 가) 시스템 이상 발생시 자동 복구
- 4) Display : LCD 20Char X 2Line
- 5) 조작키 입력 : One-Touch방식 10Key
- 6) 통신: 2CH
 - 가) CH1 (측정기 연결) : RS-232 or RS-485 or SDI-12 선택 가능
 - 나) CH2 (CDMA, PC 연결) : RS-232
- 7) Real Time Clock : DS12C887A

8) 사용 전원 : DC9~21V

9) 소모 전류

가) Power Save Mode(CDMA 제외) : 5~10mA

나) Normal Mode(CDMA 제외) : 200mA MAX

다) 대기시에는 Power Save Mode로 동작하고 특정 이벤트(데이터 저장을 위한 Wake-Up, 자료보고, 통신접속, 사용자 조작 등)가 발생시 Wake-Up하여 Normal Mode로 동작하고, 처리가 종료되면 다시 Power Save Mode로 동작.

나. 주요 기능

1) 자료 수집 기능

가) 센서로부터 수위 및 수질 정보를 읽어 들인다.

나) 센서의 종류에 따라 통신 방식이 상이함을 감안하여 관리자가 센서 종류 및 H/W 구성을 변경 가능하도록 함.

2) 자료 저장 기능

가) 수집된 수위 및 수질 데이터를 정해진 저장 간격에 의해서 저장하는 기능이다.

나) 시스템이 Power Save Mode로 동작 중에는 지정된 Warm-up time 전 Wake-up하여 자료를 수집하여 저장하고 다시 Power Save Mode로 동작한다.

3) 데이터 전송 기능

가) 저장 데이터 전송 기능

(1) 로거에 저장된 데이터를 정해진 시간에 중앙 감시제어국으로 지정된 시간에 TCP/IP로 자동 접속하여 전송한다.

(2) 전송 시간은 1일 24회까지 임의로 설정이 가능하다.

나) 경고 메시지 전송 기능

(1) RTU/LOGGER, 센서의 상태를 자동 점검하여 이상이 발생시 중앙 감시 제어국으로 TCP/IP로 전송하여 경고 메시지를 전송하는 기능이다.

(2) 수질 상태 감시 : 수위/전기전도도/수온 의 항목의 이상이 발생시 그 즉시 전송

(3) 시스템 상태 감시

(가) 통신 장치 : CDMA에 이상이 발생시 상태를 저장하였다가 발생시 통신이 재개되면 전송

(나)전원장치 : 전압상태에 이상이 발생 시 즉시 상태 전송

(4) LOGGING 기능 감시 : 메모리 등의 이상으로 데이터 저장이 이루어 지지 않을 경우 즉시 경고 전송

(5) 센서 상태 감시 : 센서가 오작동하면 경고 전송.

4) 원격지 데이터 요구에 대한 응답

(1) 원격지에서 접속할수 있도록 시스템은 항상 수신 대기중

(2) 수신 대기중인 상태에서 원격지에서 접속을 시도하면 자동으로 접속이 이루어짐

(3) 접속이 이루어진 상태에서 정해진 프로토콜에 의한 데이터 송/수신 가능

(4) 사용 가능 기능

(5) 실시간 수질데이터 : 현재 센서로부터 수신된 수질데이터를 전송

(6) 저장 데이터 : 정해진 타임 스케쥴에 의해서 저장된 수질데이터 전송

(7) 각종 설정값 확인/설정

(가) 센서 설치 심도

(나)데이터 저장 간격, 데이터 저장 전 센서 예열 시간

(다)시스템 시간

(라)데이터 보고시간

(마)경고 메시지 발생 종류, 값 설정

다. 전원 보호 기능

1) 전원 전압의 상태를 상시 감시하여 이상 발생시 원격지로 이상 상태 전송

2) 저전압 감시 : 전원 전압이 기준 전압 보다 낮으면 전원 보호(과 방전 방지)를 위하여 전류 소비를 최소화 함

3) 과전압 감시 : 전원 전압이 기준 전압보다 높으면 관리자가 즉시 조치 할 수 있도록 이상 상태를 원격지에 전송

라. 펌웨어 업그레이드 기능

- 1) 원격지에서 CDMA로 통신 접속하여 업그레이드 가능
- 2) PC(NOTE-BOOK)을 RTU에 직접 연결하여 통신을 통하여 업그레이드 가능

3. 모니터링 자료 관리 프로그램 개발

가. 개발 내용

공용망(인터넷)을 이용하는 CDMA Data 통신으로 관점에서 보내주는 측정Data와 10개 이내의 오류/알람 메시지를 수신하여 관정의 상태를 사용자에게 보여주고, 저장하는 프로그램을 개발한다.

나. 개발 주요 기능 (상세기능은 *별첨1)

1) 측정 Data 수신 기능

다수의 관점에서 보내오는 Data 수신 (기본 1시간 측정단위, 변경 가능)

2) 오류/알람 메시지 수신

시스템 알람 및 오류 메시지 수신

3) 관정 상태 표시

Data 수신 성공/실패여부와 시스템 알람에 따라 상태 표시

4) 로그 저장 및 조회 기능

다. 개발 환경

- 1) OS : Windows 2000 Server
- 2) DataBase : MS SQL 2000 Server
- 3) 개발툴 및 언어 : Visual Studio 6.0 , Visual C++
- 4) 동작 환경 : CPU 펜티엄 4 이상
메모리 512 Mbyte 이상
(등록하는 관정의 개수에 따라 변함)

라. 개발 기능 정의

주요기능	세부 기능	내용	비고
관측정 조회	관측정 조회	관측정 기본정보 조회	
Data 수신	관측 Data 수신	등록된 관측정들의 Data 수신 등록 관정수에 따라 동적 구성 기능 Data 수신 완료시 완료 메시지 전송	수신 전송
	알람 메시지 수신	저전압, 센서이상, Data수신 에러 등	수신
관측정 상태 측정	관측정 상태	측정 Data 수신 상태에 따라 상태표시 - 관측정 리스트 처리 - 관측정 상태에 따라 아이콘 표시 - 관측정 이름, 관정공번 - Data 수신 상태 : 정상, Data 수신중, Data 수신 실패 - 시스템 상태 : 알람, 오류 발생 표시 - 마지막 Data 수신한 시간표시 - Data 수신 실패시 : 수신Data/전체	수신
	시스템 알람	오류 메시지/측정알람 발생시 리스트로 표시 - 날짜, 시간, 관정공번, 관정명, 알람타입	수신
	관측정 상태 저장/조회	관측정 상태 및 모든 기록을 DB에 저장 - Data 수신 성공/실패 - 알람 메시지 조회 : 관정별, 기간별 조회	
환경설정	통신 설정	서버 IP 지정 사용가능 Port범위 지정 Data 수신 대기 시간	
	DB 설정	수신한 측정 Data 보관 기간 설정 로그 Data 보관 기간 설정 AquaSys DB 접속 암호변경 캐드랜드 DB 접속 암호변경	

마. 통신 프로토크

문제점	1. 통신 방식은 Tcp/Ip 패킷 통신방식이지만, 실제로는 시리얼 방식으로 데이터가 수신됨.
	2. 하나의 데이터가 하나의 패킷으로 인식 될수 없기 때문에 여러 관측정에 대해 하나의 포트를 공유 할수 없음
	3. 패킷의 데이터 부분에서 분할이되 뒷부분이 나중에 수신될때 헤더부분이 없기 때문에 어떤 관측정 데이터 인지 알수 없음
	4. 데이터의 시작과 끝을 패킷 단위로 구분할수 없음
	5. 관측정이 서버에 통신 연결될때 자기 보고를 할수 있지만, 이 보고 자체도 패킷이 분할될 가능성이 있기때문에 신뢰하기힘듦
해결책	1. 모든 관측정은 서버에 접속할때 고유한 포트를 가진다
	2. 관측정 등록/수정 할 때 포트는 유일한 값을 가지도록 한다
	3. 관측정 데이터 수신시 접속 포트로 관측정을 구분한다.
	4. 패킷의 시작과 끝은 0x02/0x03 으로 구분한다.
	5. 가능한 모든 데이터는 char로 처리 하지만 명령어 및 ParameterName은 Binary 값이 0x03 이 넘는 수/문자를 지정한다
	6. 모든 명령어 및 ParameterName은 동일한 길이를 가지도록 한다.

종 류	내 용	값 / 범위	Type	길이
패킷 시작	STX	0x02	bin	1
패킷 길이	현재부터 Bcc2까지의 길이	0x0000 ~ 0x7FFF	bin	2
관정공변	관정 공변		char	variable
PNO	Packet Number	"0"~"9"	char	1
CMD(Result)	명령 또는 결과	결과:"RA", "RN"	char	2
데이터 길이	데이터 전체 길이 길이가 0이면 데이터 부분 없음	3자리("9""9""9"까지)	char	3
데이터	Parameter Name 1	캐릭터 : "M", "D", "T", "P"	char	1
	Parameter Length 1	2자리("9""9"까지)	char	2
	Parameter 1		char	variable
데이터	Parameter Name 2	캐릭터 : "M", "D", "T", "P"	char	1
	Parameter Length 2	2자리("9""9"까지)	char	2
	Parameter 2		char	variable
	.			
	.			
	.			
패킷 끝	ETX	0x03	bin	1
Bcc1			bin	1
Bcc2			bin	1

- A. 모든 데이터의 Binary 값은 0x03 보다 커야 한다.
- B. PC -> Master, Master -> PC 공통으로 쓰임
- C. CMD(명령어)
- 1 모든 명령어는 1자리 또는 2자리로 일괄적으로 길이를 맞춤
- 1 ex) "A"/"N" => "AA"/"NN"
- D. 데이터 종류
- 1 "D" : 날짜 (YYYYMMDD)
- 1 "T" : 시간 (HHMMSS)
- 1 "I" : 저장간경 (HHMMSS)
- 1 "M" : 감시정

- 1 "F" : 취수정
- 1 "P" : Ph 농도
- 1 "S" : 전도도
- 1 "T" : 수온
- 1 "L" : 수위
- 1 "B" : 전압
- 1 "C" : 케이블길이
- 1 "D" : 깊이

사를 의뢰한 결과이다. 현장수질검사는 현장에서 수행한 간이수질검사의 결과이다. 장기관측자료는 본 연구에서 개발된 관정 수질 자동 관측 장비로부터 전송되어 데이터베이스로 구축되어 있는 자료이다.

- **분석 값의 계산 방법** : 최고, 최저, 평균값으로 분류되어 있다. 이는 한 개의 관정에서 선택된 기간에 다수의 분석결과가 존재할 때 적용되는 연산자이다.
- **관정유형, 수질검사시기 선택** : 관정의 유형은 전체, 암반, 층적으로 구분되어 있다. 수질검사시기는 전체, 시기, 일별, 시간별로 구분되어 있으며, 사용하는 자료에 따라 지원되는 형태가 다소 상이하다. 시간별 자료는 수질 자동 관측 장비를 사용하여 시간별로 자료의 축적이 가능한 장기관측자료에 대해서만 지원하는 양식이다.
- **수질기준 지정** : 지하수 수질의 기준치 초과여부를 판단하기 위해서 사용할 기준치를 지정한다. 정밀수질검사 자료의 경우는 일반적으로 지하수의 용도에 따라 적용되는 4개의 기준치를 지원하고 있다. 음용, 생활, 농업, 공업 4가지의 기준치 유형 중 하나를 선택한 후 다음 단계로 넘어간다.
- **기준치 초과 내용 표시** : 앞서의 단계에서 지정한 조건에 맞는 관정과 수질을 보여준다. 기준치 초과 내용 표시 버튼을 클릭하게 되면, 기준치를 초과한 내용을 노란색으로 선택하여 보여준다.
- **항목의 정렬** : 수질 항목이 표시되어 있는 부분을 더블클릭하면, 수질값을 정렬하여 살펴볼 수 있다.

나. 관정별 기준치 초과 항목수 보가

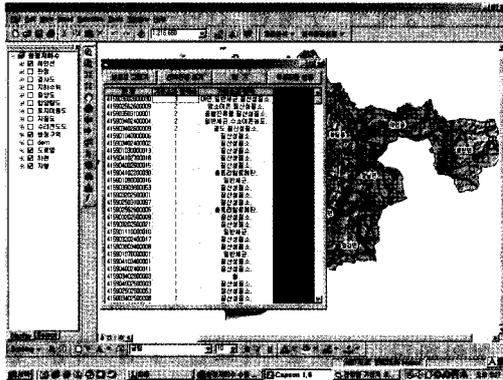


그림 3-163 관정별 기준치 초과 항목수

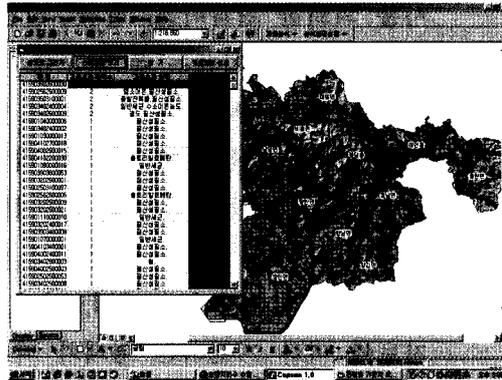


그림 3-164 선택된 관정 지도에서 보기

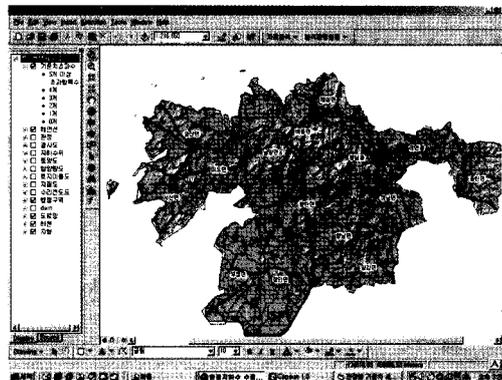


그림 3-165 관정별 기준치 초과 항목수 분포도

- 실행 : 가. 의 수질현황표 작성 틀에서 관정별 기준치 초과 항목수 보기 클릭
- 관정별로 수질을 초과한 항목의 수와 수질을 초과한 항목들을 보여줌
- 선택관정 보기 : 수질을 초과한 항목이 가장 많은 관정 등 하나의 관정을 선택한 후 선택관정 보기를 클릭하면, 관정도면에서 해당 관정이 있는 위치를 확인할 수 있다.
- 엑셀파일 생성 : 현재 보여주고 있는 관정별 수질을 초과한 항목의 수와 자세한

한 항목에 대한 내용을 엑셀파일로 생성한다.

- 분포도 그리기 : 수질을 초과한 항목수에 대한 내용을 점포도로 보여준다. 범례는 0개, 1개, 2개, 3개, 4개, 5개 이상으로 구성되어 있다.

다. 수질항목별 기준치 초과 관정수 보기

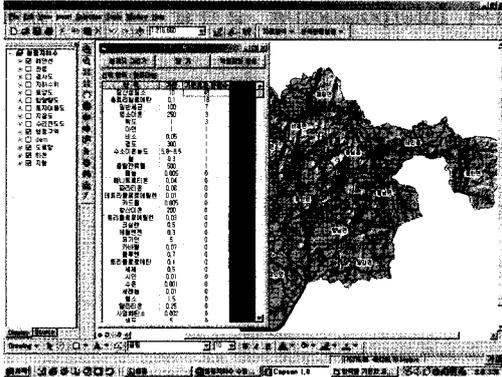


그림 3-166 수질항목별 기준치 초과 관정수

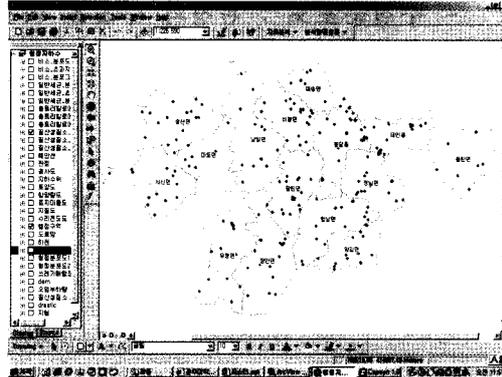


그림 3-167 수질항목별 기준치 초과 관정 분포도

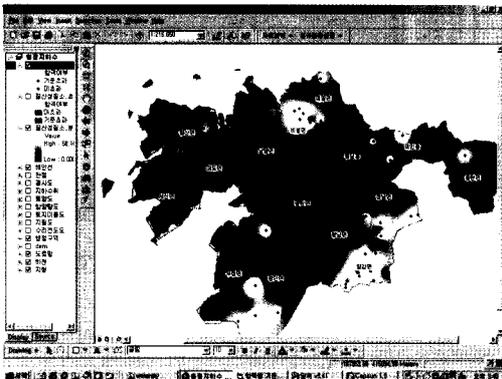


그림 3-168 선택된 수질의 분포도.

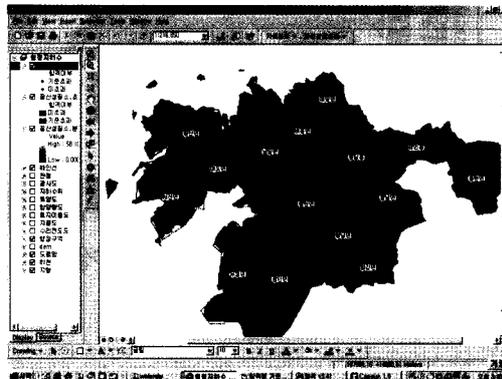


그림 3-169 선택된 수질의 기준치 초과지역 분포도

- 실행 : 가. 의 수질현황표 작성 틀에서 항목별 기준치 초과 관정수 보기 클릭
- 수질항목별 기준치와 기준치를 초과한 관정의 개수를 보여준다.
- 분포도 그리기 : 하나의 수질항목을 선택한 후 분포도 그리기를 실행하게 되면, 선택한 수질항목을 이용해 3가지의 도면이 작성된다.
- 기준초과 관정도 : 기준을 초과한 관정과 기준을 초과하지 않은 관정을 구분하여 보여준다.
- 수질분포도 : 관정의 수질을 이용하여 Interpolation한 결과를 그리드 형태로 보여준다.
- 수질초과지역도 : 관정의 수질을 이용하여 Interpolation한 결과에서 기준치를 초과한 지역과 그렇지 않은 지역을 구분하여 보여주는 도면을 생성한다. 이 도면은 청정지하수 지역을 구분하는 분석과정에서 사용된다.

2. 오염취약성도 작성

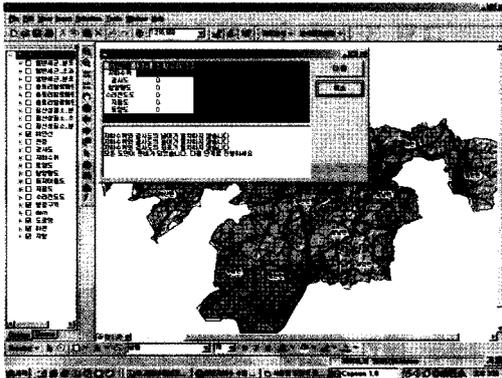


그림 3-170 사용할 도면의 정확성
체크

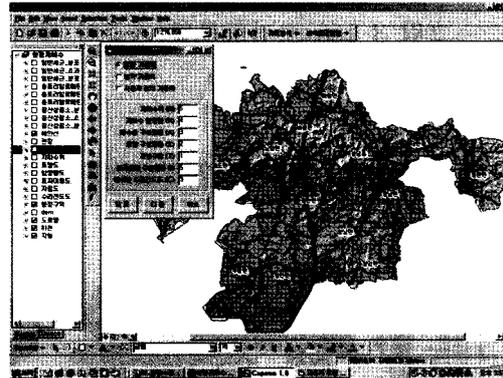


그림 3-171 가중치 유형 선택

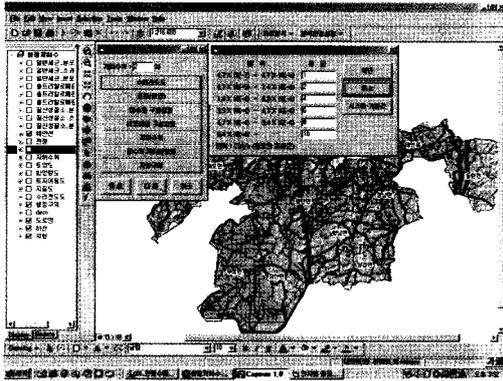


그림 3-172 수리전도도 범위 및 등급 설정

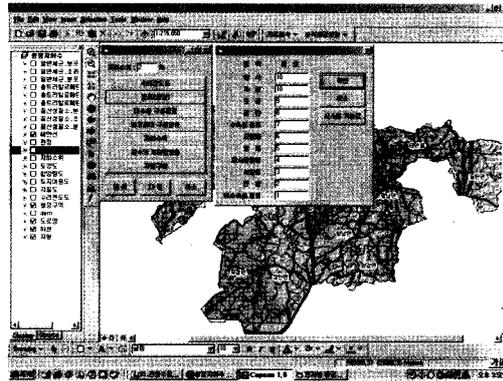


그림 3-173 포토(토양)의 범위 및 등급 설정

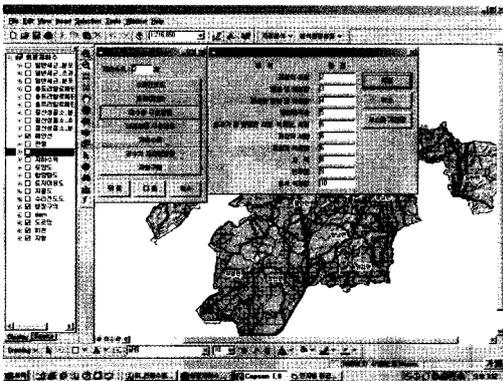


그림 3-174 대수층 구성물질의 범위 및 등급 설정

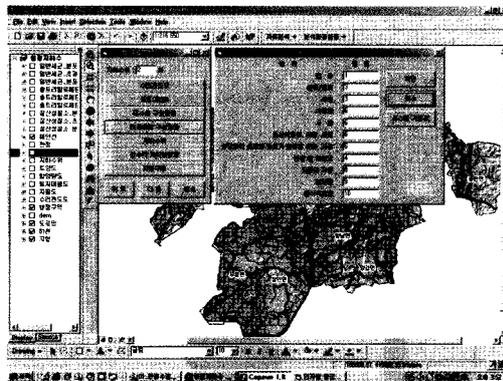


그림 3-175 비포화대 구성암종의 범위 및 등급 설정

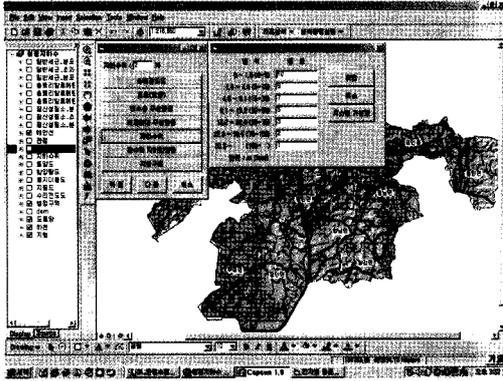


그림 3-176 지하수위의 범위 및 등급 설정.

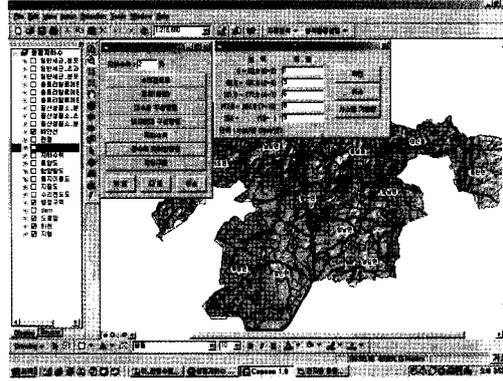


그림 3-177 지하수 함양률의 범위 및 등급 설정

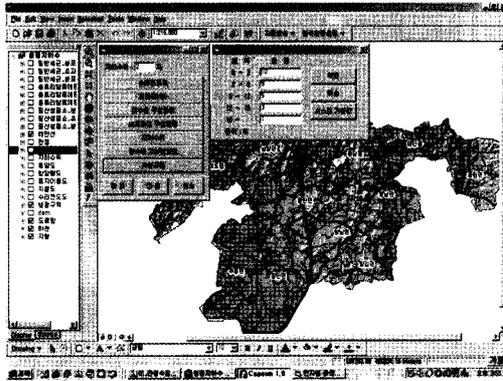


그림 3-178 지형구배의 범위 및 등급 설정

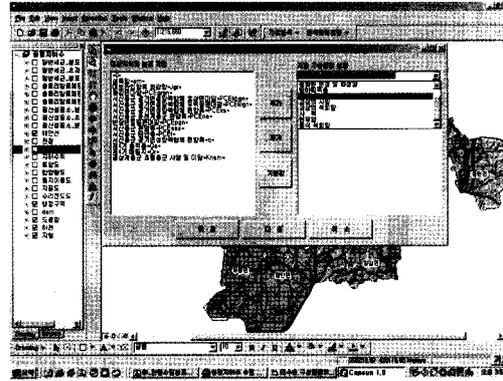


그림 3-179 대수층 구성물질의 분류 설정

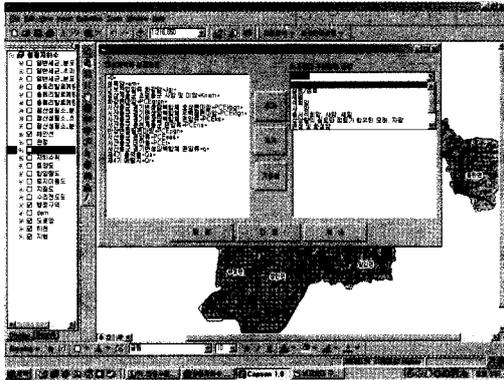


그림 3-180 비포화대 구성암종의
분류 설정

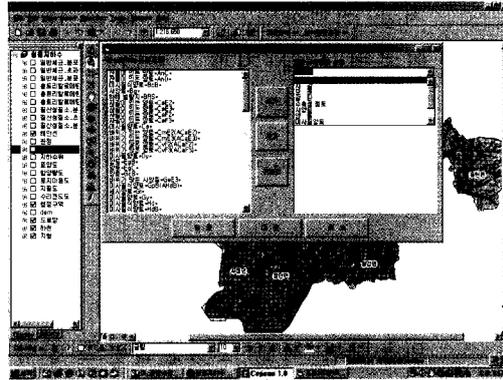


그림 3-181 표토(토양)의 분류 설정

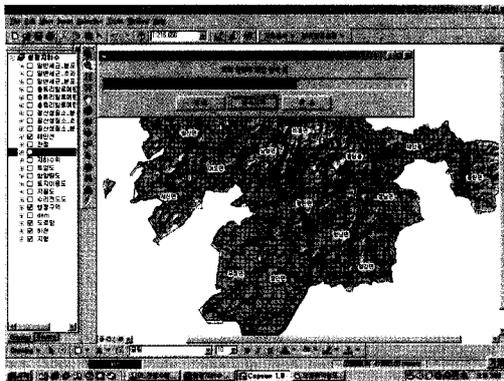


그림 3-182 DRASTIC 분석시작

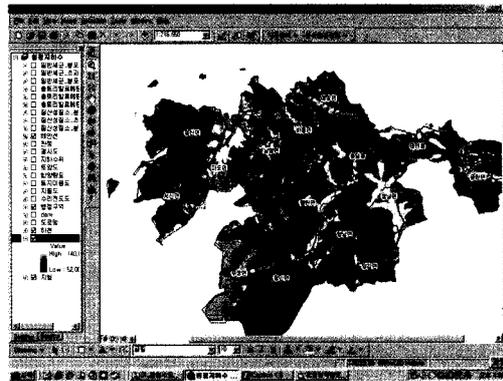


그림 3-183 DRASTIC 분석 결과

- 실행 : 청정지하수 도구모음 -> 자료분석 -> 오염취약성도 클릭
- 사용할 도면의 정확성 체크 : 분석에 필요한 도면들이 현재 존재하고 있는지 여부를 체크한다. 사용되는 도면들 중 그리드 형태의 자료에 대해서는 공간해상도, 좌표값 등을 비교하여 분석에서 사용가능한 자료인지의 여부를 알려준다. 공간해상도가 서로 다를 경우에는 사용할 수 없다.
- 가중치 유형 선택 : 가중치 유형에서는 일반, 농약, 사용자 가중치로 구분되어 있으며, 일반, 농약 가중치는 이미 지정되어 있는 값을 사용하며, 사용자 가중

치를 선택하면, 가중치 값을 사용자가 지정할 수 있다.

- **인자별 등급 지정** : 수리전도도, 표토, 대수층 구성물질, 비포화대 구성암종, 지하수위, 강수의 지하함양률, 지형구배로 구분된 각각의 인자에 대해 등급을 지정한다. 별도로 지정하지 않은 경우에는 기존에 지정되어 있는 값을 사용하게 된다.
- **대수층 구성물질의 분류** : 분석 대상지역의 지질도를 분석하여, 대상지역에 분포하고 있는 지질의 내역을 리스트로 만든다. 그리고 이것을 추가, 제거 버튼을 이용하여 지질 구성물질별로 분류한다.
- **비포화대 구성암종의 분류** : 분석 대상지역의 지질도를 분석하여, 대상지역에 분포하고 있는 지질의 내역을 리스트로 만든다. 그리고 이것을 추가, 제거 버튼을 이용하여 비포화대 구성암종별로 분류한다.
- **표토(토양)의 분류** : 분석 대상지역의 토양도를 분석하여, 대상지역에 분포하고 있는 토양의 내역을 리스트로 만든다. 그리고 이것을 추가, 제거 버튼을 이용하여 토양 구성물질별로 분류한다.
- 분석된 결과는 그리드로 표현된다.

3. 오염 발생부하량 및 발생량도

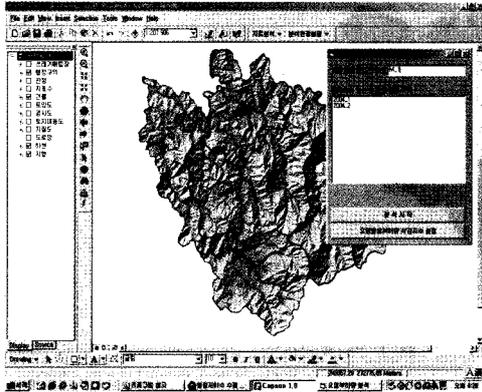


그림 3-184 생성될 결과테이블의 이름 설정.

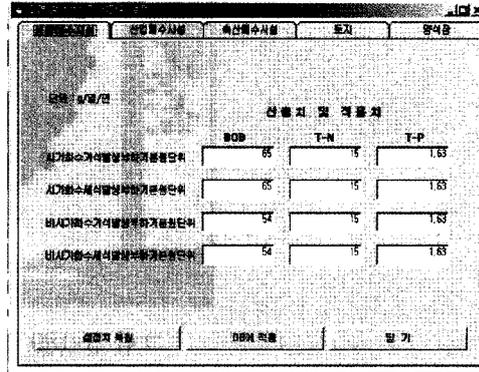


그림 3-185 오염발생부하량 원단위 설정.

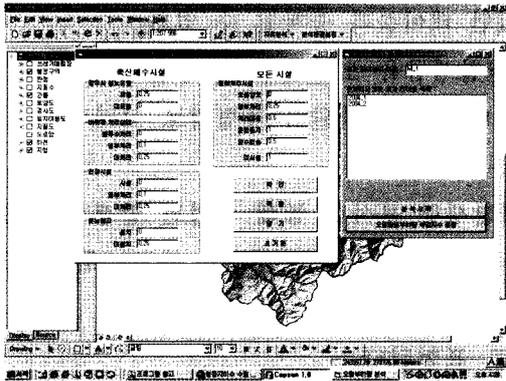


그림 3-186 오염발생부하량의 삭감 지수 설정.

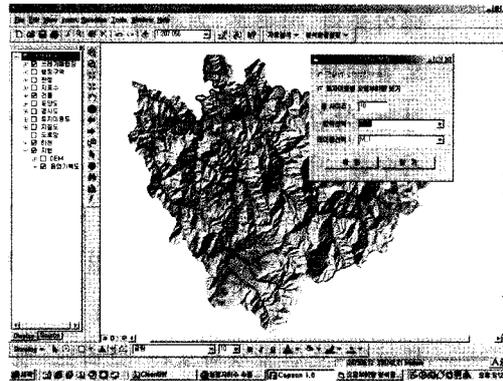


그림 3-187 오염부하량 분석결과 보기 틀.

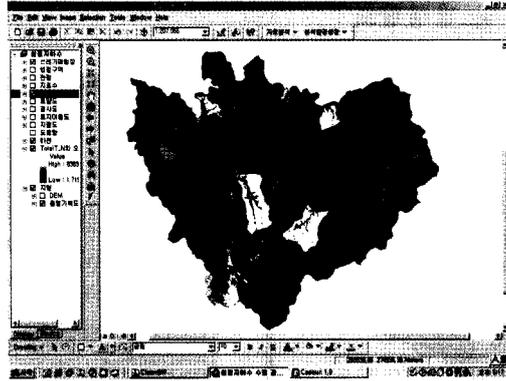


그림 3-189 분석된 오염부하량도.

- 실행 : 청정지하구 도구모음 -> 자료분석 -> 질산성질소 오염지수 클릭
- 오염부하량 결과테이블의 지정 : 오염부하량 분석을 통해 생성되는 자료는 테이블 형태로 MDB 파일에 저장된다. 생성될 테이블의 이름을 지정한다. 생성될 테이블의 이름은 기존에 생성되어 있던 테이블과 중복될 수 없다.
- 오염발생부하량 삭감지수 지정 : 오염발생량은 오염발생부하량을 계산한 후 지정된 삭감지수에 따라 삭감된 결과이다. 잠재오염원의 유형별로 고려되는 삭감지수를 지정한다.
- 오염발생량 분석결과 보기 틀 : 오염발생량 분석을 통해 생성된 발생량을 유역도와 연결하여 유역별 오염발생량을 보여준다. 오염발생량은 BOD, T_N, T_P 세 가지 항목별로 분석되어 있다.
- 분석된 오염발생량도는 그리드 형태로 표현된다.

4. 질산성질소 오염지수도

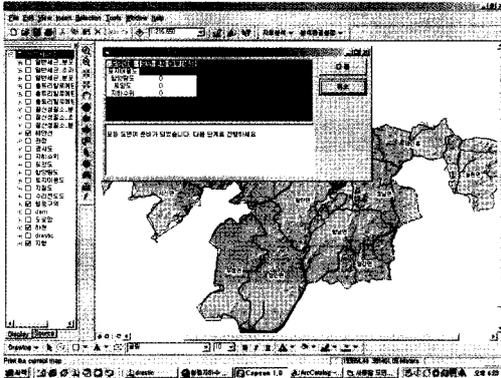


그림 3-190 사용할 도면의 정확성
체크.

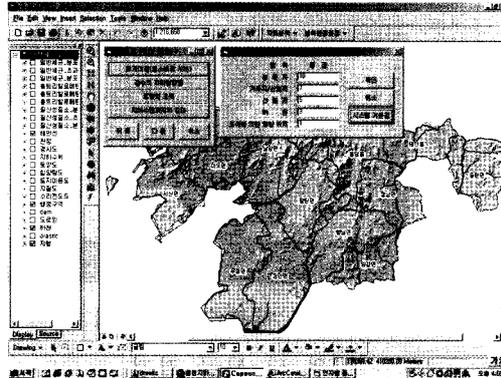


그림 3-191 토지이용 범위 및 등급
설정.

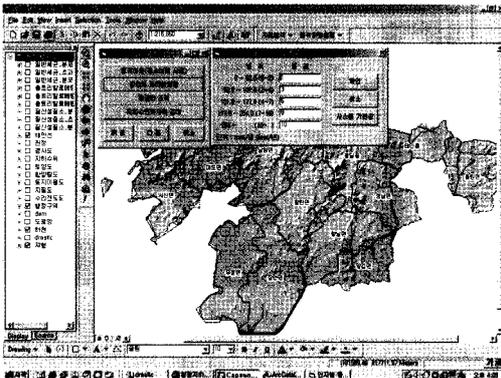


그림 3-192 강수의 지하함양물의
범위 및 등급 설정.

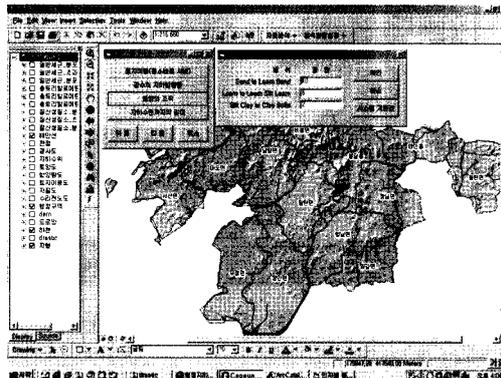


그림 3-193 토양의 조직 범위 및
등급 설정.

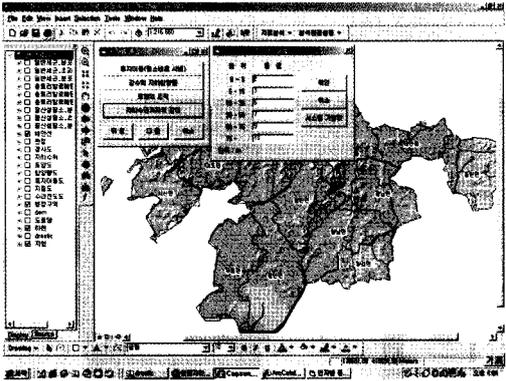


그림 3-194 지하수면까지의 깊이 범위 및 등급 결정.

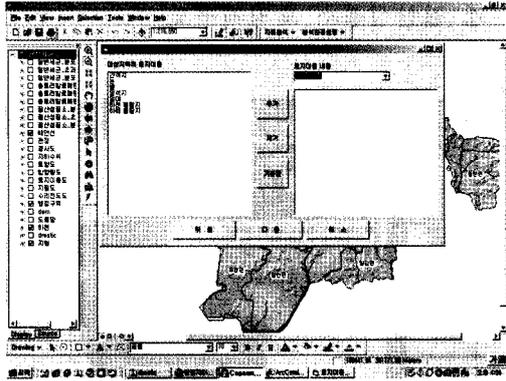


그림 3-195 토지이용의 분류.

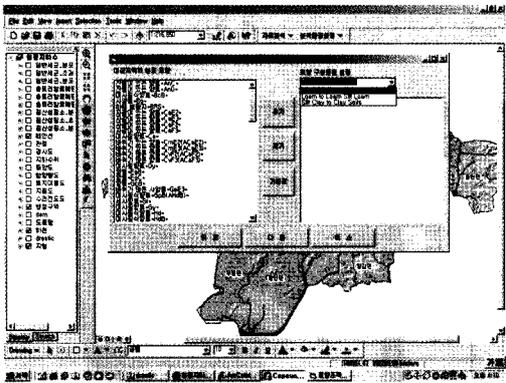


그림 3-196 토양조직의 분류.

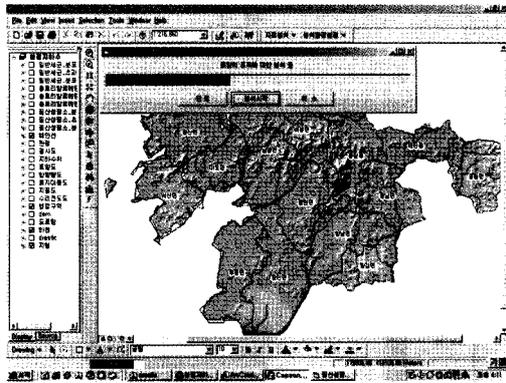


그림 3-197 질산성질소 오염지수의 분석 시작.

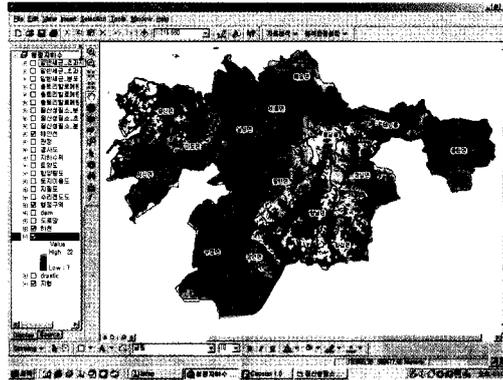


그림 3-198 질산성질소 오염지수도
작성 결과.

- 실행 : 청정지하수 도구모음 -> 자료분석 -> 질산성질소 오염지수도 클릭
- 사용할 도면의 정확성 체크 : 분석에 필요한 도면들이 현재 존재하고 있는지 여부를 체크하고, 그리드 자료가 서로 분석이 가능한지 여부를 체크한다.
- 인자별 등급 지정 : 질산성질소 오염지수 분석에서는 토지이용, 강수의 지하수 함양률, 토양의 조직, 지하수면까지의 깊이 4가지 인자가 고려되며, 별도로 등급을 지정하지 않으면, 이전 분석에서 지정하였던 등급이 적용된다.
- 토지이용의 분류 : 분석 대상지역의 토지이용도를 분석하여, 대상지역에 분포하고 있는 토지이용의 내역을 리스트로 만든다. 그리고 이것을 추가, 제거 버튼을 이용하여 토지이용별로 분류한다.
- 토양조직의 분류 : 분석 대상지역의 토양도를 분석하여, 대상지역에 분포하고 있는 토양특성을 리스트로 만든다. 그리고 이것을 추가, 제거 버튼을 이용하여 토양구성 물질별로 분류한다.

5. 해수침투 지역도

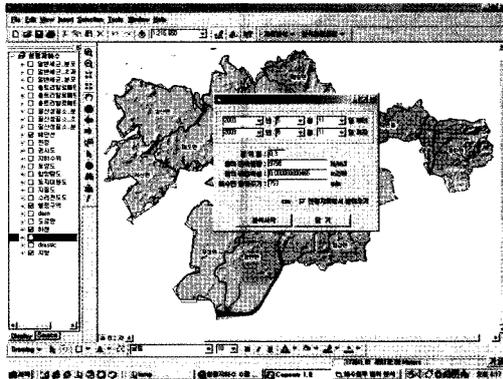


그림 3-199 해수침투 분석 툴.

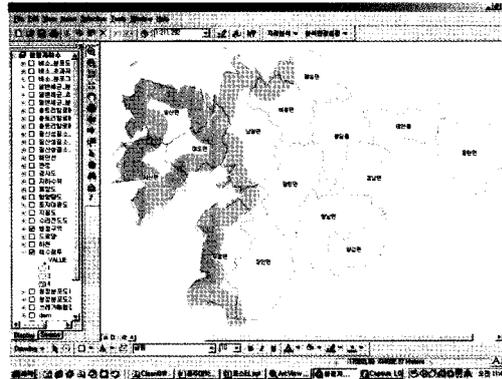


그림 3-200 해수침투 지역도.

- 실행 : 청정지하수 도구모음 -> 자료분석 -> 해수침투 분석 클릭
- 해수침투 분석은 지하수 수질 자동 관측시스템에서 축적되는 수위 자료와 대상 지역의 조위 변동 자료를 이용하여 분석을 수행한다. 단, 분석 후에 자동으로 도면을 생성하지는 않는다.
- 분석 후에는 관정별로 분석된 조석효율, 저류계수, 투수랑계수, 최대수위강하량, 해수도달범위, 해안으로부터 관정까지의 거리를 테이블로 보여준다.
- 이 결과를 종합적으로 판단하여, 해수영향범위를 3지역으로 구분하여 해수침투 지역도를 작성하게 된다. 1지역은 해수의 영향을 매우 강하게 받아 오염지역으로 구분되는 지역이며, 2지역은 일반적으로 해수의 영향을 받지만 심하지 않아 이용지역으로 구분되는 지역이며, 3지역은 해수의 영향을 받지 않는 청정지역이다.

6. 청정지역분석

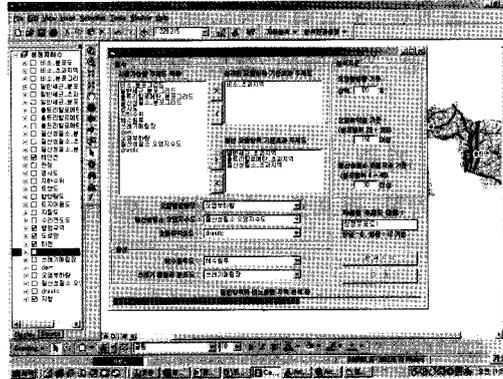


그림 3-201 청정지하수 분석환경
설정.

- 실행 : 청정지하수 도구모음 -> 자료분석 -> 청정지하수 분석 클릭
- 사용가능한 주제도 목록 : 청정지하수 분석에서는 그리드 자료들을 사용한다. 프로그램에 로딩되어 있는 그리드 주제도의 목록을 보여준다.
- 심각한/일반 오염항목 설정 : 사용가능한 주제도 목록에서 1. 관정수질분포도 작성에서 수질항목별로 지하수 수질기준이 초과된 지역과 그렇지 않은 지역으로 나누어 작성되었던 기준초과지역 분포도를 심각한 오염항목과 일반 오염항목으로 분류하여 설정해 준다.
- 오염발생량도, 질산성질소 오염지수도, 오염취약성도 설정 : 앞서 작성되었던 주제도들을 각각 설정해 준다. 드롭다운 메뉴에 나타나는 목록은 사용가능한 주제도 목록에 나타나 있는 것과 동일하다.
- 해수침투도, 쓰레기매립장 분포도 설정 : 이 도면들 역시 그리드 형태로 저장된 결과들을 사용한다.
- 오염발생량 기준 : 오염발생량은 상대적인 분포이기 때문에 대상지역에서 나타나는 값의 분포 중에서 상위 몇%를 지정해, 감시해야할 지역 등의 설정에 적용한다.

- **오염취약성 기준** : 일반, 농약, 사용자 오염취약성도 또는 다양한 지질 특성이 반영된 오염취약성도 등 각각의 오염취약성도에 나타나는 값의 분포는 조금씩 다르다. 따라서 사용되는 오염취약성도의 특성에 따라 오염에 매우 취약한 지역으로 예상되는 지역을 지시하는 값도 상이하다. 이 값을 사용자가 경우에 따라 조절할 수 있다.
- **질산성질소 오염지수 기준** : 질산성질소 오염지수도에 나타나는 값의 분포 중에서 특히 오염에 취약할 것으로 예상되는 지역을 구분하기 위해 사용되는 기준이다.

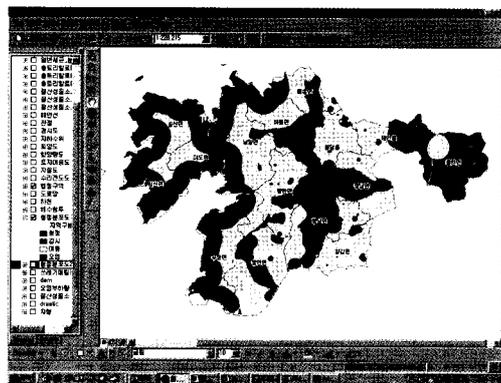


그림 3-202 청정지하수 분포지역도
작성 결과.

7. 기타 기능

가. 잠재오염원 정보 입력

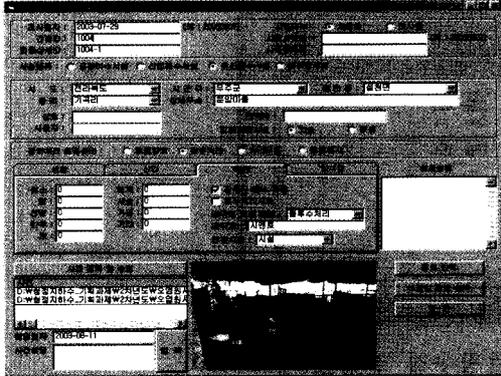


그림 3-203 잠재오염원 정보 입력

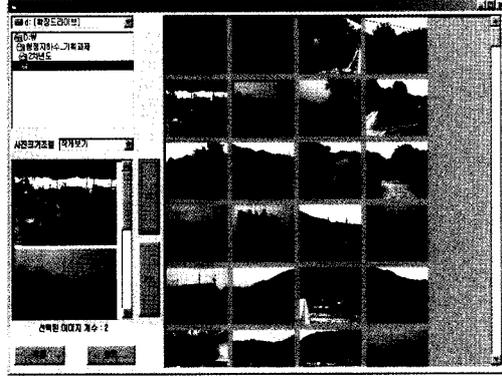


그림 3-204 잠재오염원 사진 선택

나. 분석지역 설정

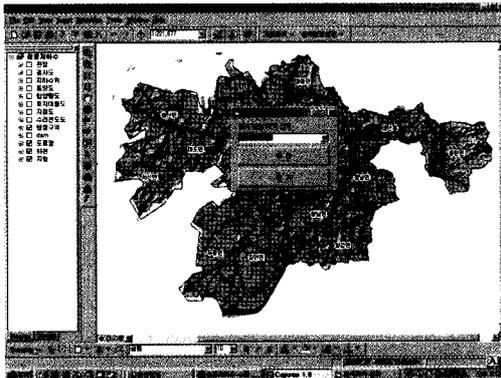


그림 3-205 분석지역의 설정.

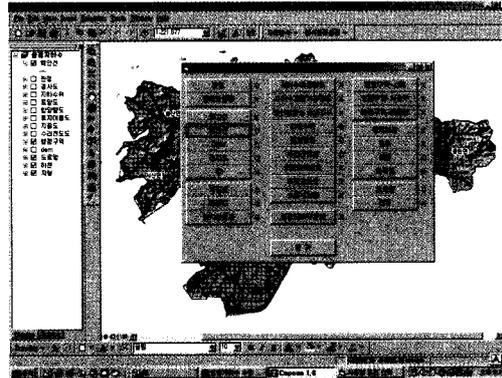


그림 3-206 사용할 도면설정.

라. 엑셀파일로 내보내기

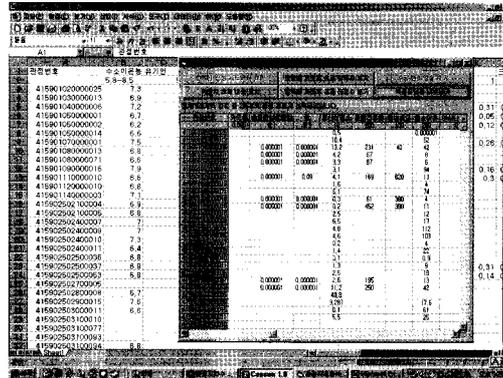


그림 3-207 관정수질 현황표
엑셀파일로 내보내기.

제 4 장 계획대비 실적표

1. 1차년도 계획대비 실적

구분 개발내용	추진 일정												진도 (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
○ 지하수오염현황조사분석														50
- 시범 연구조사지역 선정	-----													
- 점오염원조사 기준정립	-----													
- 지표수-토양-지하수오염 종합							-----							
- 오염현황도 작성기법 개발							-----							
○ 농촌 잠재오염원 조사기법 정립													50	
- 조사기준 정립	-----													
- 부하량별 가중치 설정 기준	-----													
- 관리상태별 등급 설정 기준						-----								
- 잠재오염원도 작성 기준 수립						-----								
- 지하수 오염취약성도 작성						-----								
○ 지하수 오염진단 전문가의사결정시스템 개발													30	
- 시스템 기능별 이론분석 및 현장적용 조사							-----							
○ 농지 불포화대내 비료성분 거동 분석													30	
- 실내분석 및 현장 조사							-----							

당초계획

.....
진도

구분 개발내용	추진 일정												진도 (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
○ 지하수 오염예측도 작성 - 지하수 수문모델링 분석 - 지하수 지화학 모델링 분석 - 지하수 오염예측도 작성														50
○ 지하수 수질관측망 설계, 설치 - 수질 감시 관측망 설계 및 설치 - 관측장비 설치														30
○ 농촌지역 지하수 수질감시/ 관리 시스템 개발 - 수질관측망 통신장비 개발 - 수질자료 통신 프로그램 개발 - 원거리 수질자료 수집 및 분석 프로그램 개발														30
○ 지하수개발 적지선정/수질보전구역 설정 기법														30
○ 유역별 지하수 정보관리 프로그램 개발														30
○ 진도 보고서 작성														100
총진도율	25		25			25			25			100		

—————
당초계획

진도

2. 2차년도 계획대비 실적

구분 개발내용	추진 일정												진도 (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
○ 지하수오염현황조사분석 - 시범 연구조사지역 선정 - 점오염원조사 기준정립 - 지표수-토양-지하수오염 종합 - 오염현황도 작성기법 개발														100
○ 농촌 잠재오염원 조사기법 정립 - 조사기준 정립 - 부하량별 가중치 설정 기준 - 관리상태별 등급 설정 기준 - 잠재오염원도 작성 기준 수립 - 지하수 오염취약성도 작성														100
○ 지하수 오염진단 전문가의사결정시스템 개발 - 시스템 기능별 이론분석 및 현장적용 조사														70
○ 농지 불포화대내 비료성분 거동 분석 - 실내분석 및 현장 조사														70

당초계획

.....
진도

구분 개발내용	추진 일정												진도 (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
○ 지하수 오염예측도 작성 - 지하수 수문모델링 분석 - 지하수 지화학 모델링 분석 - 지하수 오염예측도 작성														100
○ 지하수 수질관측망 설계, 설치 - 수질 감시 관측망 설계 및 설치 - 관측장비 설치														70
○ 농촌지역 지하수 수질감시/ 관리 시스템 개발 - 수질관측망 통신장비 개발 - 수질자료 통신 프로그램 개발 - 원거리 수질자료 수집 및 분석 프로그램 개발														70
○ 지하수개발 적지선정/수질보전구역 설정 기법														70
○ 유역별 지하수 정보관리 프로그램 개발														70
○ 진도 보고서 작성														100
총진도율	25			25			25				25			100

당초계획

진도

3. 3차년도 계획대비 실적

개발내용	구분	추진일정												진도 (%)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
○ 지하수오염현황조사분석 - 시범 연구조사지역 선정 - 점오염원조사 기준정립 - 지표수-토양-지하수오염 종합 - 오염현황도 작성기법 개발														100
○ 농촌 잠재오염원 조사기법 정립 - 조사기준 정립 - 부하량별 가중치 설정 기준 - 관리상태별 등급 설정 기준 - 잠재오염원도 작성 기준 수립 - 지하수 오염취약성도 작성														100
○ 지하수 오염진단 전문가의사결정시스템 개발 - 시스템 기능별 이론분석 및 현장적용 조사		-----												100
○ 농지 불포화대내 비료성분 거동 분석 - 실내분석 및 현장 조사		-----												100

----- 당초계획

..... 진도

구분 개발내용	추진 일정												진도 (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
○ 지하수 오염예측도 작성 - 지하수 수문모델링 분석 - 지하수 지화학 모델링 분석 - 지하수 오염예측도 작성														100
○ 지하수 수질관측망 설계, 설치 - 수질 감시 관측망 설계 및 설치 - 관측장비 설치														100
○ 농촌지역 지하수 수질감시/ 관리 시스템 개발 - 수질관측망 통신장비 개발 - 수질자료 통신 프로그램 개발 - 원거리 수질자료 수집 및 분석 프로그램 개발														100
○ 지하수개발 적지선정/수질보전구역 설정 기법														100
○ 구역별 지하수 정보관리 프로그램 개발														100
○ 최종 보고서 작성														100
총진도율	25		25			25			25			100		

당초계획
 진도

4. 요약

주요과제	2001.8 - 2004. 8						비고
	1차년도		2차년도		3차년도		
	상반기	하반기	상반기	하반기	상반기	하반기	
지하수 오염현황 조사분석				완료			
농촌 잠재오염원 조사기법 정립			완료				
지하수 오염진단 전문가의사결정시스템 개발					완료		
농지 불포화대내 비료성분 거동 분석					완료		
지하수 오염예측도 작성				완료			
지하수 수질관측망 설치, 설계						완료	
농촌지역 지하수 수질감시/관리 시스템 개발						완료	
지하수개발 적지선정/수질보전구역 설정 기법						완료	
유역별 지하수 정보관리 프로그램 개발						완료	
보고서 작성						완료	

제 5 장 연구개발 결과의 활용계획

제 1 절 활용계획

본 연구는 농림부 농촌개발국 농촌용수과의 현장애로사항을 해결하고자 발의된 기획연구과제이다. 농림부 지하수개발사업은 그동안 한발을 대비한 농업용수 보조수원으로서 관정개발과 용수개발 위주로 시행되어 왔으나 향후에는 종합적으로 유역단위별 수량과 수질을 관리하는 체계적인 지하수관리사업 방향으로 새로이 정책을 전환하였다. 새로운 지하수조사개발사업에서는 모든 지하수 관련 정보자료를 GIS D/B 자료로 관리하도록 시스템을 개발하였다. 동 새로운 기법은 도면상에서 지하수 속성자료를 관리하는 시스템으로 기존의 도표양식관리 방식에서 크게 진일보한 체제이나 각종 자료를 분석하여 유용한 정보를 도출하는 기능면에서 부족하다고 하겠다. 농림부에서는 본 연구를 통하여 그러한 GIS 도면정보들을 각종 잠재오염원으로부터의 발생부하량과 지하수 수질오염과의 관계를 유추할 수 있고 지하수 수질오염자료중에서도 지질등으로부터 기인하는 무기성분과 유해성 유류성분 또는 독성성분과 일반세균등 일반오염물질로 구분하여 분석할 수 있는 등의 정밀분석 기능을 개발토록하여 새로이 추진되는 자료관리체계에 추가하고자 하였다.

또한 농림부에서는 연구 과정중에 주기적으로 개최된 연구협의회를 통하여 지속적으로 연구방향을 수정 보완하면서 각 지자체의 지하수 담당 공무원의 비전문성과 잦은 인사이동 상황등을 고려하여 초기 기초정보 자료만을 추가 입력시키고 메뉴방식의 간단한 분석프로그램을 개발하여 누구나 쉽게 활용할 수 있도록 연구방향을 유도하여 왔다. 때문에 본 연구를 통하여 개발된 지하수 분석관리기법은 지하수관리사업에 곧바로 기능 추가 형태로 첨가되고 자치단체별 지하수관리사업프로그램에 활용될 계획이다.

또한 다양한 세부 연구결과는 지하수 관련 학계와 연구분야에서도 자유롭게 활용되도록 인터넷상에서 자료 처리 분석 및 관리가 가능토록 되어 있다. 이러한 세부 개발 기술은 다음과 같이 활용가능하다.

○ 농촌지역 지하수 오염원 분석 관리 체계

농촌지역 지하수 수질에 영향을 미칠 수 있는 주요 오염원 형태를 분석하고 발생부하량으로부터 오염부하량을 재 산출하여 오염원이 실제 지하수 수질오염에 미치는 위험정도를 상관관계로 분석하였으며, 또한 대수층 분포지질과의 관계도 분석하여 비점오염원과 점오염원을 체계적으로 종합 분석할 수 있고, 수질오염현황 자료와 동시에 비교 분석하여 상호 상관관계를 유추해 볼 수 있도록 시스템을 개발하였다. 농촌지역의 비점오염원의 오염특성을 환경인자간의 상호 영향을 규명하는 조사기법을 마련하여 신뢰성 있는 자료를 제공할 수 있는 Tool을 개발하여 오염원의 지역별 관리가 가능하도록하였다.

점차 부각되는 농촌 지역의 독성유해물질로 인한 토양 및 지하수 오염현황을 체계적으로 파악하여 환경정책수립 및 운용에 필요한 과학적 근거자료로 활용 가능하며, 농촌지역 지하수 수질오염에 영향을 미치는 인자들을 도출하고 그 가중치 정도를 체계적으로 분석하여 그 오염원인과 예방대책을 수립하는데 활용이 가능토록 개발하였다. 또한 농촌 오염지역의 환경 위해도 저감을 위한 최적 복원기술의 선정 및 개발시에도 경제적인 기법 선정에 필요한 기초자료 활용 분석이 가능하다.

농촌지역 지하수 수질에 영향을 미칠 수 있는 주요 오염원 형태를 분석하고 발생부하량으로부터 오염부하량을 재 산출하여 오염원이 실제 지하수 수질오염에 미치는 위험정도를 상관관계로 분석하였으며, 또한 대수층 분포지질과의 관계도 분석하여 비점오염원과 점오염원을 종합적으로 분석하게 하여 청정지역과 감시지역을 구분해 내는 자료로서 활용 가능하다.

○ 농촌지역 지하수 비점오염원 분석 관리 체계

먼저 문헌과 현장조사를 통하여 우리나라 농경지의 주요 비점오염원가운데 토양에 잔류되어 있는 비료성분이 가장 기여도가 높은 것으로 나타났으며, 특히 수계의 부영양화를 발생시키는 N과 P 성분이 주요 오염원인 것으로 판단된다. 이들 성분의 오염도는 지역별 특성과 시비조건, 토지이용도에 따라 다르며 논과 밭의 경우를 비교하여 볼 때 논에 비해 밭의 경우에 비교적 토양 투수성이 낮아 오염성분의 지하수 유입정도가 상대적으로 낮을 것으로 판단되며 그러나 지표상에 물을 보유하고 있는 시기가 길어 강우

유출등에 의한 지표상의 유출이 클 것으로 사료된다. 이와 반면에 밭의 경우는 비교적 토양의 투수성이 양호하므로 강우시 지표상의 유출뿐만 아니라 지하로의 유출도 클 것으로 판단된다.

토양중 비료성분의 유출특성을 연구한 실험에서 지하수로의 유입정도는 비교적 이동성이 좋은 질소성분의 경우가 큰 것으로 나타났으며, 질소성분의 형태는 토양의 산화환원분위기에 의해 좌우되는 것으로 나타났다. 이러한 산화환원 분위기는 지질 특성과 유기물 함량 그리고 온도 등에 의존하는 것으로 나타났다. 인의 경우는 비교적 흡착성이 좋아 토양이나 콜로이드 표면에 흡착되어 지하로의 확산은 작으나 지표상 유출수중에 포함된 입자들의 이동과 함께 넓은 범위로 확산되는 것으로 나타났다.

○ 청정 및 보존구역 분석 기법

본 연구에서는 군단위 지역을 다양한 대수층 수리특성과 수문분석, 오염원 분석을 통하여 청정지역과 감시지역, 이용지역과 오염지역으로 구분하였으며 이중 청정지역으로 구분된 지역에 대하여는 다음과 같은 업무 수행시 활용하면 청정한 지하수 수질을 보전이 가능하다

- 신규 오염 유발시설 적지선정, 잠재오염원 인허가시 지하수 보전 타당성 검토방안을 검토 활용할 수 있다.
- 국토개발 이용계획 수립단계의 오염원이 되는 각종 시설물 위치선정 타당성 검토자료로 활용이 가능하다.
- 지하수 자원 수질 보호 정책 판단 자료
- 농촌 지역의 지하수 개발에 적합한 부지 평가 및 선정의 기초자료로 활용

지역경제발전에 필수적으로 따르는 개발관련 신규 시설물 (잠재 오염원)을 되도록 오염확산에 저항력이 강한 지역으로 유도하고, 오염취약지구는 수질보호정책을 강화추진함으로써 청정한 지하수 자원을 보전, 이용, 관리할 수 있는 정책 판단자료로 활용할 수 있다.

청정 및 보존구역 분석 기법은 자치단체 지하수 담당자들로 하여금 지역간 수질오염 예방과 오염감시에 대한 개념을 가질 수 있도록 하며 다음과 같은 활용이 가능하다

다

가) 청정 및 지하수 함양지역

- 청정지역 중 함양지역은 지하수 보전구역으로 지정 관리
- 상수원 용도의 지하수 개발 적지
- 지하수 보전구역으로 지정관리
- 신규 오염시설물 설치 제한
- 기존 시설물 이전 권장 및 소규모 오폐수 정화시설 지원사업 우선 추진

나) 감시지역 : 청정지역으로서 오염에 취약하며 기존에 오염원이 부존하는 지역

- 기존에 분포된 오염원들을 지속적으로 감시하기 위하여 오염 확산 감지를 위한 실시간 모니터링 시스템을 설치 운영해야 한다. 실시간 모니터링 자료는 인터넷을 통하여 중앙통제 컴퓨터로 EC, 수온, 수위 자료를 통하여 감시되고 정기적인 센서점검을 시행한다.
- 지하수 수질오염 보전대책을 위한 감시정(관측정) 위치선정
: 잠재오염원 밀집지역 하류부, 오염취약성 경계부
- 신규 시설물 설치를 원하는 허가 신청자들에게는 완벽한 정화처리 시설을 설치하는 전제로 인허가 업무를 통제한다.
- 오염취약지역 내 토지이용에 대하여는 지하수환경영향 평가를 실시하고 그 결과에 따라 인허가하고 독성 폐기물을 발생시키는 다음의 시설물은 설치를 제한시켜야 한다.
- 지하수오염 감시 지구 내 행위제한(안)
: 독성폐기물 처분, 취급시설 설치 금지
: 석유 및 유류, 화학제품 저장탱크 설치 금지
: 고농도 오염물질 배출업소(공단, 축산단지)설치 금지
: 오염물질 유출 사고시 긴급 재해대책 가동

다) 이용지역 : 비 독성물질로 미약하게 오염된 지역

- 정기적인 지하수 수질 검사로 오염물질 농도 변화와 이용량을 통제

- 농공단지, 쓰레기매립장, 축산단지, 공동묘지, 골프장 등 각종 오염유발시설물 신규 위치로 유도하되 철저한 오염방지시설 설치를 전제로 한다.
- 오염물질 성분에 따라 오염원을 추정하고 해당 오염성분을 유발시킬 수 있는 오염원을 규명하고 상수도원이 아닌 농업 및 공업용수로의 활용을 유도
- 지역내 부존하는 오염원들에 대하여 철저한 오염 방지 대책을 권장

라) 지하수 오염지역 : 독성물질로 오염되었거나 일반오염물질로 심하게 오염된 지역

- 오염지역내 관정 이용 금지 조치
- 지하수오염 현황 정밀조사 추진 및 정화처리 대책 수립
- 오염지역 토지 소유주에게 오염 통보

○ 지하수 수질자료 D/B 분석 기법의 활용

- 계절별 수질변화 추이 분석으로 수질오염현상의 진행 또는 자연저감으로 인한 감소등을 파악 가능하며, 지질 및 암반 성분과 관련되는 무기물질 성분과 지질관계, 질산성 질소 성분, 유류성분 등과 폐광산, 축산단지등과 오염성분과의 관계 여부를 검토할 수 있다. 이러한 수질 성분과 관련 오염원과의 관련 검토로 지하수 담당 공무원으로 하여금 지역내의 수질관리에 대한 개념을 가질 수 있다. 또한 이러한 수질 오염이력 D/B 자료는 인터넷으로 공개되어 자료를 공유할 수 있어 유사한 조사의 경우 학계와 조사자들로 하여금 조사비 중복 투자를 방지하고 좀 더 정확한 수질분석이 가능하다.

○ 지하수 개발적지선정/ 지하수 수질보전구역 설정을 위한 전문가 의사결정 시스템 개발

전문가 의사결정시스템은 오염취약성 분석기법 중 DRASTIC 기법을 활용하는 방법으로 개발하였다. 시범 연구지역(화성시)에서 쉽게 획득할 수 없는 비포화대 매질의 영향을 제거한 나머지 6개의 인자(DRASTIC)로 민감도를 작성하였고, 질산성질소의 오염원인자로서 축산시설과 폐수발생, 생활하수 및 오폐수의 발생, 질소비료 시비 강도를 대체하는 토지이용도 등의 3개 오염원인 인자를 조합하여 오염취약성도를 작

성하였다.

나아가 다른 지역에서의 적용성을 높이기 위해 통계모델에서 제시된 3개 민감성인자(지하수 심도, 함양량, 토양매체의 특성)만으로 민감성도를 작성한 후, 질산성질소 오염원인자를 조합하여 또 다른 오염취약성도를 작성하였고, 이들의 결과를 6개 민감성인자를 활용한 오염취약성도와 비교, 검토하였다. 이렇게 작성된 개별 오염취약성도와 종합 오염취약성도는 실제 연구지역(화성시)의 지하수 중 질산성질소 농도값의 분포와 비교하였다. 이러한 분석과 비교결과 지역적인 관리의 우선순위와 각 지역에서의 중요한 오염원인자를 규명할 수 있었다. 이들을 정리하면 다음과 같다.

○ 농촌지역 지하수-지표수 연계이용 및 종합적 수질관리 방안 수립

-해안변 염수침투 우려지역 : 농촌 지역 지하수는 식수와 관개용수로 그 활용도가 높다. 이로 인해 조수의 영향을 많이 받는 해안 지역 농촌에서는 지하수 양수로 인한 염수 침투로 지하수의 염류 농도가 증가하고 염류 농도 증가로 인한 농작물의 피해를 막기 위해 더 많은 양수를 하는 악순환이 반복되어 이에 대한 관리가 시급한 실정이다. 수질 분석 결과 나타난 현상은 화옹방조제로 조석의 영향을 받지 않게 된 방조제 내부는 담수화가 서서히 진행되고 있고 매항리가 있는 방조제 바깥쪽은 심각한 해수의 침투에 영향을 받고 있다. 특히 바닷물의 밀도로 인한 대부분의 농지에서 물을 회석하기 위해 계속하여 양수하여 여름에 논에 물을 공급하고 있는 실정이다. 담수지역의 폭이 바닷가로 갈수록 천부지하수를 사용하기 위해 관정의 깊이가 10m를 넘지 않고 있다. 해안가 지역에서는 우선적으로 급수시설이 지원되어야 하고 농업용수는 적정양수량을 산정하였다. 계속양수지역과 심부지역에서 수질 분석 결과 해수의 영향을 많이 받고 있는 것으로 나타났다. 하지만 그 접근의 어려움 때문에 지금까지 오염가능성과 용수 부족의 위험으로부터 방치되어왔던 것이 사실이다.

지하수 시스템 분석을 위해서 양수 시험, 순간수위변화 시험 등의 수리 시험을 통해 대수층의 특성을 나타내는 여러 수리상수를 구하는 방법이 많이 사용되고 있으나 일반적으로 이 수리상수들은 관심 영역의 크기에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있으며 (Domenico and Schwartz, 1998), 이에 따라 염수와 실제 지하수를 이용하는 곳의 지하수와의 관계를 규명하기 위해서는 지하수를 이용하고 있는 곳과 바다 사이에 있는 대수층을 대표할 수 있는 적절한 수리상수를 구하는 것이 중요하다. 이 같은

크기를 갖는 시스템의 수리상수는 별도의 수리 시험을 시행하지 않고 다음과 같이 조석 효율(Tidal Efficiency, TE)을 통해 추정할 수 있으며 이에 대한 이론적 배경은 본문에서 설명하였다

본 연구에서는 전문적인 지식이 없는 관련 공무원들도 쉽게 해안 지역 농촌의 지하수 시스템을 분석할 수 있도록 조석 효율만으로 해당 대수층의 수리 상수들을 추정할 수 있는 방법을 제안하였으며 이를 이용하여 용수를 공급하는 양수정에 염수가 침투하지 않도록 적정 양수량을 제안하는 모형을 제시하였다.

- 지표수-지하수 연계 이용방안으로는 우선 지하수 오염원을 지표수에도 그대로 적용된다는 점에서 오염원자료는 공유가 가능하였다. 분석된 지하수 청정지역은 그대로 지표수 청정지역이었으며, 금회 시범지구에서는 무주군의 지표수인 무주댐이 양수 발전소로서 발전용수로 순환되고 있을 뿐 기타 공업 및 농업용수로의 활용이 되지 않고 있었다. 또한 화성군에서도 지표수가 부족하지 않아 지표수 연계이용은 크게 분석되지 않았다. 다만 지하수 수질 분석결과 청정지역은 지표수도 청정지역으로 구분됨에 따라 본 청정지하수 수질감시 시스템에서는 지표수 지하수 연계이용은 수질분석결과 지하수 청정지역내의 지표수-지하수 수자원을 생활 및 음용수로 활용토록하고 감시대상 지역 이하 지표수는 공업 및 농업용수로의 활용토록 제안하였다.

○ 농촌지역 지하수 수질감시/관리시스템 개발

관정에 대한 수질정보를 실시간으로 연속적으로 얻는 것은 지하수의 유동과 확산을 파악하는데 중요한 역할을 한다. 이러한 지하수 수질 모니터링을 지속적으로 시행하려면 많은 인력, 비용과 시간이 필요하다. 이러한 문제를 해결하는 방법으로 관정 지하수 수질 모니터링 시스템을 개발하여 사용하는 것이 대안으로 채택되었다.

지하수 수질 정보시스템은 디지털 방식의 다 항목 수질측정기에 의하여 수위, 수온, 수소이온농도, 전압, 수심에 해당하는 수질정보를 연속 수집하여 시간에 따라 변화하는 항목 별 데이터의 변동 추이 및 여러 항목간의 연관 관계를 집중감시 할 수 있도록 한다. 또한 여러 개소에 분산 설치된 수질 측정기와 중앙의 컴퓨터를 네트워크로 연결하여 여러 가지 수질 항목의 데이터를 수집 및 분석 함으로서 한 개소뿐 아니라 여러 개수의 동일 항목간, 다른 항목간의 연관관계 등을 종합 분석 함으로서 수질 변

동추이를 다각적으로 판단 할 수 있게 하고자 한다.

본 연구는 궁극적으로 자치단체 별로 해당지역 지하수의 수량 수질관리에 필요한 제반 지하수 관련자료를 분석하고 이를 도면화하며 오염원 분포 위치와의 관계를 비교 분석함으로써 오염경로를 유추 할 수 있고 오염 예방대책과 정화처리 대책, 신규 청정지하수 개발 적지 선정, 청정지역 수질감시가 가능토록 하는 GIS분석 프로그램을 개발 하였다.

농림부의 기획과제로 과제 발주 당시부터 이미 본 연구 성과 결과물은 농림부 주관으로 추진되는 지하수관리사업 정책에 반영되도록 예정된 과제이며, 또한 이는 각 시군 자치단체 지하수 담당 공무원과 농기공 등 지하수 관련기관에서의 활용도 예정되어 있었으며, 과제 수행 도중에 자료관리 기법을 인터넷 기반으로 변경함으로써 일반인에게도 자료 공개가 가능하여 활용성은 충분히 확장될 수 있으리라고 판단된다.

제 6 장 결 론

본 연구의 목적은 농림부에서 최근에 새롭게 개발 추진하고 있는 GIS를 이용한 지하수 정보관리 체제를 자료관리 차원에서 청정한 지하수를 보전하면서 한편으로는 지속적으로 이용할 수 있는 방안을 도출하고자 농촌지역 지하수의 주요 오염원을 발취하고 그 주요 오염원의 거동 특성을 규명한 후, 그 결과를 분석하는 기능을 개발하고자 하였다. 농림부에서는 그동안 각 지방자치단체에서 시행하여 오던 지하수 자료관리체제 즉, 관정에 대한 주소위치와 소유주를 포함하여 다양한 시추 정보자료를 서식(표)으로 통계자료로 관리해 오던 기존 관리체제를 GIS 도면상에서 해당관정의 시추자료와 오염원 위치, 지질 및 지형 정보등을 한눈에 파악할 수 있는 관리체제로 전환하여 자치단체에 보급하고자 새로운 지하수조사개발 관리시스템을 개발하였다. GIS 도면에 의한 지하수정보 관리는 유역 내에 위치하는 여러 개의 관정들을 종합 관리가 가능하며 유역 내 전체적인 지하수 함양량과 유역 단위별 총 이용량 파악이 가능하며 각 자치단체에서 신규 관정 개발 신청 및 인허가시 타당성 여부를 판단 할 수 있는 정보파악이 가능하다. 또한 관할 시,군 내의 지하수 정보자료를 수계별로 종합 관리할 수 있으며 관정에 대한 수질오염 현황 자료와 잠재오염원, 하천과 지질, 토양 자료들이 GIS 도면화 속성 자료로서 관리될 수 있는 체제로 구축되어 있으며 시범 운영기간을 거쳐 가까운 장래에 자치단체로 보급될 예정이다.

국토개발과 지하수자원 보호와 개발은 서로 상반되는 개념으로 개발정책 수립시 수질보전과 개발은 서로를 조화시키기가 쉽지 않으며, 특히 결정권을 가진 일선 행정관서 담당자에게는 더욱 그러하다. 지금까지 어떠한 개발에 앞서 지하수수질 보호분야는 검토는 거의 미미하게 검토되어 온 것이 현실로 오염 징후가 파악되어 민원이 발생하는 등 오염사례가 발생된 이후에 지하수에 관한 별도의 환경영향조사가 시행되는 현실이다. 또한 쓰레기 매립장 및 하수종말처리장 등 경제 개발에 따라 신규 건설이 불가피한 시설물 위치선정 시 주민의 지역 이기주의로 인하여 지하수 오염에 가장 심각할 수 있는 유역 상류부의 깊은 산 계곡 같은 곳으로 위치가 선정되는 경우가 있어, 현재 주민들의 민원은 피할 수 있을지 몰라도 장래 우리의 후손이 이용해야 할

지하수자원을 오염위협에 빠지게 하는 우를 범하게 되는 사례도 발생하고 있다.

본 청정지하수 수질관리시스템에서는 정밀 지하수 환경영향조사시 소요되는 막대한 예산과 소요기간을 투입하지 않고 사전에 토지이용계획 수립단계에서 지하수 오염 예방차원의 예비타당성 검토가 가능하며 청정지역에는 잠재오염 시설물 설치를 지양하고 이용지역으로 설치를 유도하며, 심각한 오염지역에는 정화처리 하기 전에는 지하수 이용을 제한하는 등 농촌지역 국토개발시 합리적인 수자원 보급계획을 수립 할 수 있도록 하였다.

또한 본 연구는 농림부 농촌용수과의 현장애로과제로서 연구결과는 곧바로 농림부의 지하수조사개발사업의 일환으로 추진되는 지하수 정보관리시스템에 분석기능으로 추가되어 활용될 수 있도록 연구과정 중에 관련분야 담당자와 전문가들로 구성된 연구협의회를 지속적으로 운영하여 연구방향을 활용측면에서 개선시켜가며 추진하였다.

본 연구에서는 농촌지역 청정지역 지하수 수질감시/ 관리시스템 개발을 최종목표로 하여 아래와 같이 분야별 세부 목표를 설정하고 연구하였다.

- 농촌지역 지하수 오염현황 종합분석 기준 수립 보급
- 지하수 개발적지선정/ 지하수 수질보전구역 설정을 위한 전문가 의사결정 시스템 개발
- 농촌지역 지하수-지표수 연계이용 및 종합적 수질관리 방안 수립
- 농촌지역 지하수 수질감시/관리시스템 개발

가. 농촌지역 주요 오염원 분석

1. 비점 오염원

농촌지역 지하수의 가장 빈도가 높은 오염항목은 질산성질소 항목이며 이는 비점 오염원인 농약과 비료 또는 점오염원인 화장실과 같은 점오염원이라 볼 수 있다.

농촌지역 지하수 오염과 관련하여 주요 비점오염원으로서는 크게 두가지 항목을 고려하여 연구하였는 바 첫째는 농약과 비료이며 두 번째는 해안변 대수층에서의 염수침투에 관한 오염특성을 규명하여 보았다. 연구결과 농약과 비료 시비가 농경지에서 지하로 직접 침투되어 지하수에 직접적으로 오염을 유발하는 정도는 미약한 것으

로 판단되었으며 농약과 비료 시비 이후 강수가 발생할 경우 하천으로 직접 유출되어 지표수 오염을 유발시키는 것으로 판단되었다. 농약과 비료가 강수에 의하여 하천수를 오염시키는 것에 대한 저감방안으로 PRB 및 Phyto-remediation 공법을 실험하여 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

또다른 비점오염원인 해안변의 해수침투는 아직은 그리 심각하지는 않으나 조석차에 영향을 받으며 시범지구 일부 지역에서는 최대 4~5 km 까지 해수침투가 발생한 곳도 있었으나 그 정도가 심하지 않아 대부분의 지역에서는 농업용수로 사용할 수 있을 정도의 염도를 나타내고 있었다. 비점오염원에 의한 지하수 오염과정에 대한 연구결과는 다음과 같다.

○ 농약 및 비료에 의한 지하수 오염 연구

본 연구에서는 농경지내 비점오염원의 거동특성으로 N, P에 대하여 식생 유무(有無) 및 온도에 따른 거동 특성을 파악하였으며, 시간변화에 따라 유출되는 침출수와 토양 깊이별 N, P를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

가) 식재 유무(有無)별 N, P 거동 특성결과 침출수 중 질소와 인의 거동은 NH_4^+-N 의 경우 모든 칼럼에 대하여 1mg/L 이하의 매우 낮은 값을 나타냈으며, NO_3^--N 는 NH_4^+-N 의 생물학적 질산화 반응에 의해 상대적으로 높게 측정되었다. 특히 물을 채워서 칼럼실험을 실시한 논토양 보다는 미생물의 활성에 중요한 인자인 통기성이 상대적으로 좋은 밭토양에서 생물학적 질산화의 반응이 활발하였고 식재 무(無)에 비하여 식물을 식재한 식재 유(有)에서 반응이 활발하였다. 이는 뿌리의 성장에 따른 뿌리 근권 주변의 유기물이 증가되어 미생물의 활발한 활동으로 생물학적 질산화 반응이 식재 무(無)보다는 식재 유(有)에서 더 높게 증가된 것으로 판단된다.

나) TKN의 경우 식재 무(無)에 비하여 식재 유(有)에서의 농도가 낮게 측정되었으며, 왕성하게 발달한 식물 뿌리에 의하여 요구되는 유기질소가 흡수된 것으로 판단된다. 인 성분의 경우도 TKN의 경우와 같이 식재 무(無)보다는 식재 유(有)에서 식물이 필요한 인 성분의 흡수와 섭취가 이루어졌다고 판단된다.

- 다) 알칼리도의 경우 식재하지 않은 토양에 비하여 식물을 식재한 토양의 침출수가 보다 낮음을 알 수 있었다. 이러한 영향은 칼럼에 시비된 비료의 성분 중 NH_4^+-N 의 질산화 과정과 뿌리에서 분비된 저분자 유기산 및 부분적 부식에 의해 H^+ 이온이 증가되어 pH가 약 알칼리성에서 중성부근의 약산성으로 감소하였고 염기성의 H^+ 이온 완충 작용도 감소된 것으로 판단된다.
- 라) 토양내 식재 유무(有無)에 따른 질소와 인의 거동은 90일째 발 식재 유무(有無)에서 NH_4^+-N 는 깊이가 깊어질수록 현저하게 감소하는데 단, 표토(surface soil)보다는 clay성분의 함량이 높은 것으로 알려진 top soil에서 더 높게 나타났다.
- 마) T-P는 시간경과와 식재 유무(有無)에 따른 영향없이 논토양에 비하여 밭토양의 T-P의 농도가 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 논토양에 비해 밭토양에 다량의 인을 함유하고 있는 복합비료를 2배정도 더 시비하였기 때문인 것으로 판단되며 수분과 함께 쉽게 용출될 수 있는 P_2O_5 의 경우에는 토양내 T-P의 농도와 비례하는 것으로 나타났다. 또한 논토양과 밭토양에서 식물뿌리의 발달된 형태로 볼 때 모를 심은 논토양은 많은 잔뿌리가 칼럼 내의 토양 전체로 고루 퍼져 있었으며 고추를 심은 밭토양의 경우 굵은 뿌리가 주를 이루었다. 따라서 모를 심은 논토양의 경우에 고추를 심은 밭토양의 경우 보다 N과 P, 영양분의 흡수능력이 더 큰 것으로 추정된다.
- 바) 온도조건별 N, P 거동 특성결과 침출수 중 질소의 거동은 현장조건에 의해 논토양에 대한 요소비료의 2차 시비(39일째)로 인해 49일째 26℃의 온도 조건에서 NH_4^+-N 농도가 높게 나타났다. NO_3^--N 는 4℃의 온도조건에서 초기부터 시간경과에 따른 변화를 보이지 않았으며 26℃의 경우 높은 농도를 나타내었다. 이는 낮은 온도조건인 4℃에서 토양내 미생물의 활동이 거의 나타나지 않은 것으로 판단되며 높은 온도조건인 26℃에서 미생물 활동에 적합한 온도에 의해 질산화 현상이 빠르게 진행된 것으로 판단된다.
- 사) 토양내 온도에 따른 질소와 인의 거동은 온도가 낮은 조건일수록 토양내 NH_4^+-N 가 높게 나타났고, NO_3^--N 의 경우 높은 온도인 26℃에서 4℃와 14℃에 비하여 높게 나타났는데 이는 온도가 높은 조건에서 미생물의 활성이 증가하여 NH_4^+-N 의 질산화 반응이 더 크게 진행된 결과로 사료된다.
- 아) ORP의 경우도 14℃와 26℃의 온도 조건에서 친온성(중온성) 미생물(mesophilic

microbes)의 성장과 활동으로 4℃ 온도 조건의 토양보다 낮은 환원상태범위를 나타낸 것으로 추정된다. 본 실험에서는 P에 대하여 온도에 따른 미생물의 영향과 시간경과에 따른 농도변화 및 추이는 발생되지 않았다.

농경지 비점오염원의 특성과 비료성분의 유출특성 그리고 국내의 관리기술에 대한 조사 및 관리공법개발에 대한 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

먼저 문헌과 현장조사를 통하여 우리나라 농경지의 주요 비점오염원가운데 토양에 잔류되어 있는 비료성분이 가장 기여도가 높은 것으로 나타났으며, 특히 수계의 부영양화를 발생시키는 N과 P 성분이 주요 오염원인 것으로 판단된다. 이들 성분의 오염도는 지역별 특성과 시비조건, 토지이용도에 따라 다르며 논과 밭의 경우를 비교하여 볼 때 논에 비해 토양 투수성이 낮아 오염성분의 지하수 유입정도가 상대적으로 낮은 것으로 판단되며 그러나 지표상에 물을 보유하고 있는 시기가 길어 강우 유출등에 의한 지표상의 유출이 클 것으로 사료된다. 이와 반면에 밭의 경우는 비교적 토양의 투수성이 양호하므로 강우시 지표상의 유출뿐만 아니라 지하로의 유출도 클 것으로 판단된다.

토양중 비료성분의 유출특성을 연구한 실험에서 지하수로의 유입정도는 비교적 이동성이 좋은 질소성분의 경우가 큰 것으로 나타났으며, 질소성분의 형태는 토양의 산화환원분위기에 의해 좌우되는 것으로 나타났다. 이러한 산화환원 분위기는 지질 특성과 유기물 함량 그리고 온도 등에 의존하는 것으로 나타났다. 인의 경우는 비교적 흡착성이 좋아 토양이나 콜로이드 표면에 흡착되어 지하로의 확산은 작으나 지표상 유출수중에 포함된 입자들의 이동과 함께 넓은 범위로 확산되는 것으로 나타났다.

농경지 비점원 오염의 확산을 방지하기 위한 여러 가지 기술들이 소개되어 있으나 농경지의 경우에 주어진 환경특성상 에너지와 관리가 많이 소요되는 장치형 시설보다는 자연형 시설이 더 유리한 것으로 판단되며 여기에는 저류형 또는 식생형 시설이 포함될 수 있으며 유출량과 수질을 동시에 조절할 수 있는 저류형과 식생형이 혼합된

관리 시스템이 바람직한 것으로 사료된다.

본 연구에서 시범적으로 실험실에서 적용한 식생과 흡착매질의 혼합 시스템을 이용한 유출수중의 암모니아성 질소의 제거기술은 높은 제거효율로 비추어 볼 때 현장 적용 가능성이 높은 것으로 사료되며, 특히 농경지 지역과 같이 인력이나 장치투입이 어려운 지역에 적합한 기술로 판단된다. 그러나 본 시스템에 대한 보다 정확한 평가를 위해서는 장기적인 실험이 필요한 것으로 판단된다.

지금까지 우리나라에서는 점오염원에 대해서는 적극적인 처리대책이 추진되고 있으나, 비점오염원에 대해서는 구체적인 대책을 추진하지 않아 효율적인 수질관리정책수립에 있어 사각지대로 존재하고 있다. 앞에서 살펴본 바와 같이 우리나라에서 비점오염원의 기여율은 일부 오염물의 경우 총 배출량의 절반 이상을 차지하고 있으며, 점오염원처리를 위한 환경기초시설의 완비와 토지이용의 고도화에 따라 비점오염원의 기여율은 더욱 비중이 증가하리라 전망된다. 따라서 효율적인 수질관리를 위해서는 비점오염원 관리기반의 구조, 비점오염원 처리대책의 강구, 비점오염원과 점오염원의 연계운영 등 비점오염원에 대한 적극적인 관리대책이 필요하다.

○ 해안변 해수침투에 의한 지하수 오염 연구

지하수 시스템 분석을 위해서 양수 시험, 순간수위변화 시험 등의 수리 시험을 통해 대수층의 특성을 나타내는 여러 수리상수를 구하는 방법이 많이 사용되고 있으나 일반적으로 이 수리상수들은 관심 영역의 크기에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있으며 (Domenico and Schwartz, 1998), 이에 따라 염수와 실제 지하수를 이용하는 곳의 지하수와 관계 규명하기 위해서는 지하수를 이용하고 있는 곳과 바다 사이에 있는 대수층을 대표할 수 있는 적절한 수리상수를 구하는 것이 중요하다. 이 같은 크기를 갖는 시스템의 수리상수는 별도의 수리 시험을 시행하지 않고 다음과 같이 조석 효율(Tidal Efficiency, TE)을 통해 추정할 수 있으며 이에 대한 이론적 배경은 다음과 같다. 조석 효율은 tide stage (H) 변화와 수두 (h) 변화의 비로 정의되며 해수의

수위 변화 자료와 지하수위의 장기 모니터링 자료가 있을 때 일정한 식으로 산출할 수도 있다 (Batu, 1998).

나) 수치모형을 이용한 염수침투 우려지역에서의 적정 양수량 산출

본 연구에서는 지하수 유동 방정식과 용질 이동 방정식을 연동하여 계산하는 miscible transport model을 사용하여 염수 침투를 고려한 적정 양수량 제안 모형을 검증하였다. 사용한 수치 모형은 miscible transport model 중 하나인 FEMWATER로, 이는 3차원 모형이며 용질 이동과 이에 따른 밀도류의 모의가 가능하며 불포화대의 지하수 유동 모의가 가능하다. 이러한 수치 모의의 결과를 통해 제안된 적정 양수량 제안 모형이 수치적으로는 적절함을 검증할 수 있었다.

다) 조석효율을 이용한 해수영향권 구분

해수의 영향을 덜 받을수록 해수의 조석에 의해 지하수위가 변하는 정도를 나타내는 조석효율 (TE)은 작아지게 된다. 이 조석효율과 식 (3-60)을 이용하여 해수영향권을 유추할 수 있어 대상 지역 대수층의 투수량계수를 알고 있다면 해변으로부터 어느 정도 거리까지 해수의 영향이 미치는지 추정할 수 있다.

각 관측정의 해변으로부터의 거리와 제안된 적정 양수량과의 상호 비례관계를 보이며 제안된 적정 양수량은 바다로부터 거리가 멀수록 커지는 경향을 보여준다.

추정된 투수량계수와 저류계수를 이용하여 산출식을 통해 해수의 영향권을 추정하였다. 이 때 해수의 영향 유무는 조석 효율 10^{-4} 을 기준으로 판단하였다. 실제 조사 지역 관정에서 산출된 해수영향권은 최소 HS-01이 약 2.3 km에서 HS-04호 공에서 최대 약 5.2Km 로 산출되었다. 추정된 해변으로부터 해수의 영향 거리는 해수영향권 구분에 이용할 수 있다.

라) 해안 주변의 수질

2004년 1월에 채취된 시료의 분석값은 대부분은 농업용수로 사용되는 관정으로 심부로 갈수록 해수의 영향을 많이 받게 되므로 10m내외의 천부관정으로 이루어져있다. 일부 심부 관정을 제외하고 대체로 비슷한 성분 조성을 나타내었다. 전체적으로 양이

은은 $Na > Ca > Mg > Si > K$ 의 조성을 갖으며, 음이온은 $Cl > NO_3 > SO_4$ 을 보였다. 오염을 나타내는 NO_3 는 주택 주변 천부관정에서 허용기준치 이상으로 높게 나타났다. 천부관정보다 심부관정과 계속 양수지역에서 전체적인 이온성분이 높은분포를 보여 강우의 영향과 해수의 밀도에 영향을 지배적으로 받는 특성을 반영하고 있음을 확인할 수 있다. Si는 오랜 시간동안의 암석과의 접촉을 나타낸다.

일부지역에서는 NO_3 가 높게 나타나는데 이는 농촌지역 생활하수의 유입에 의한 영향이다. 전체적으로 생활하수나 오폐수의 유입에 의하여 해안지역 농촌 지하수의 수질조성이 강한 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다.

2. 점 오염원

농촌지역 질산성질소와 관련된 주요 점오염으로는 쓰레기 매립장, 주유소, 축산단지, 주거지역에서의 오폐수 방류등이 있으며 가장 오염빈도가 높은 수질 항목으로 질산성 질소 성분에 대하여 오염지수도를 작성하는 기법을 개발하였다.

○ 질산성질소 오염지수도 작성기능

농어촌지역에서 청정수자원인 지하수의 질산성질소 오염예방과 수질관리를 위한 의사결정 시스템은 농어촌지역 지하수가 당면하게 될 다양한 잠재오염원의 설치와 배출이 지하수에 미치는 영향을 고려하여, 이들의 위치 또는 입지의 선정 시 또는 행정적이 시설관리나 대책 시행에서 우선순위를 설정하는 것이 목표이다. 우선순위가 결정되면, 각각의 오염현상과 오염지역에 대해서는 법적/제도적인 관리 틀 안에서 적절한 대책이 시행될 것이다. 따라서 지하수 오염예방에서 가장 중요한 것은, 앞으로 오염발생 가능성이 높은 지역을 예상하고, 이들 지역에서의 지하수 중요성을 고려하여 오염방지 및 관리대책을 수립 시행하는 것이라 할 수 있다.

o. 농어촌지역의 지하수 수질특성과 시공간적 변화

무주지역을 대상으로 연구한 결과, 농어촌지역에서는 지하수와 지표수가 직접적인 연관성을 가지고 상호반응하는 관계로 존재한다. 지표수는 강수에 의해 직접적인 반응이 나타나는 반면, 지하수는 강수에 의한 영향이 일정시간 지체되어 나타난다. 이러한 현상은 지하수의 수질에서 계절별 변화요인으로 나타난다.

특히 지하수의 수질은 기반암의 조성에 따라서 크게 영향을 받으므로, 지하수를 사용하는 지역의 지질매체의 구성 광물성분에 대한 정확한 이해가 지하수질을 보호하고 청정수자원으로 지속적 개발가능성을 확보하는데 중요한 요소가 된다.

주변의 인위적 오염원(농지, 축사, 생활하수)등에 노출되어 있는 농어촌지역의 지표수는 하천으로 오염물질의 직접적인 유입 뿐만 아니라 오염된 지하수가 배출되면서 하천수의 오염이 진행되고 악화될 수 있다. 따라서 지표 오염원에 대한 관리는 지하수자원의 오염방지 뿐 아니라, 나아가 지표수자원의 수질보호에도 중요하다.

3. 농촌 지하수 수질오염과 대수층 매질 등 오염 확산 특성

지하수 오염이란 오염원의 존재 유무와 그 발생 량에 따라 직접적으로 영향을 받으며 또한 오염물질이 있다고 하더라도 토양과 대수층의 특성에 따라 오염물질이 확산 속도와 범위가 달라지게 된다. 이처럼 지하수 오염은 오염 Source와 오염원이 이동하는 매체(Mass)의 특성에 따라 그 정도가 달라지기 때문에 앞장까지는 Source의 특성을 검토하였고, 지금부터는 매체의 오염확산 특성을 조사 분석하였다.

○ 전문가 의사결정 모델 개발

지하수 오염발생가능성을 예측하기 위하여, 이 연구에서는 경기도 화성시 일대를 대상으로 하여 통계적인 방법을 통한 모델개발을 검토하였다. 통계적인 연구에서는 지하수에 나타나는 질산성질소에 관련된 대표적 영향인자들 중에서 현장에서 쉽게 획득 가능한 자료들을 선정하여 모델을 개발하였다. 이에 다음의 4가지 인자가 선정되었다:

- ① 질소비료의 시비 ,
- ② 강우 또는 관개에 의한 함양 ,
- ③ 토양의 조직,
- ④ 지하수면까지 깊이

이들 4가지 인자를 모델개발의 요인으로 선정한 이유는 다음과 같다:

- ① 질산성 질소의 침출을 조정하는 매우 중요한 역할
- ② 농업활동에 의한 지하수의 오염을 산정할 수 있는 가장 보편적인 인자
- ③ 서로 다른 지점을 비교 평가하는데 이용가능
- ④ 지하수질 관측의 필요를 최소화
- ⑤ 자료를 얻기 쉬우며 이용과 평가가 쉽다
- ⑥ 자료들은 서로 상호 교환이 쉽다
- ⑦ 직접 및 간접적으로 다른 인자들과 연관되어 있다

(작물인자, 작물형태, 그리고 물리적, 생물학적, 화학적 인자들).

- ⑧ 최소한의 자료를 이용하여 가장 빨리 위해성을 평가할 수 있다.

지하수에 대한 4가지의 질산성질소 오염인자를 사용하여 오염가능성을 지시하는 오염지수(pollution index)를 각 관측공에 대하여 산정하였으며, 이들 오염지수와 실제 질산성질소의 관측값 간의 상관성을, (1) 선형관계성을 검토하기 위한 Pearson Product Moment Correlation Coefficient(r)와 (2) 비선형관계(non-parametric relations)를 검토하기 위한 비모수 통계분석(nonparametric statistical test) 방법으로 Spearman Rank Correlation Coefficient (rs)를 분석하였다. 그 결과, 피어슨 계수와 스피어만 계수는 0.39와 0.38로서 99% 신뢰도 수준에서 계산된 오염지수와 실제 지하수의 질산성질소의 농도 사이에 통계적으로 의미있는 상관성이 있음을 보여주었다. 즉, 전술한 단계에서 선정된 4개 인자로 산출된 오염지수가 현재 지하수의 질산성질소 농도 분포를 간접적이지만 지시자로서 사용될 수 있음을 의미한다.

따라서 전술한 4개 항목에 대한 자료가 존재하는 지역에서는 그 지점에 대한 지하수 오염가능성을 지수로 산출할 수 있고, 이에 근거하여 다른 지역과의 상대적인 오염가능성에 대한 비교와 그에 따른 오염원인 시설 내지 행위에 대한 관리방안의 시행 내지 우선순위의 결정 등을 수행할 수 있다.

○ 오염취약성 분석에 의한 의사결정 모델

오염취약성 분석을 위하여 Aller et al.(1987)이 제시한 DRASTIC Method를 기준으로 하여 대수층 민감도를 작성하였다. 연구지역(화성시)에서 쉽게 획득할 수 없는 비포화대 매질의 영향을 제거한 나머지 6개의 인자(DRASTIC)로 민감도를 작성하였고, 질산성질소의 오염원인자로서 축산시설과 폐수발생, 생활하수 및 오폐수의 발생,

질소비료 시비강도를 대체하는 토지이용도 등의 3개 오염원인 인자를 조합하여 오염 취약성도를 작성하였다.

나아가 다른 지역에서의 적용성을 높이기 위해 통계모델에서 제시된 3개 민감성인자(지하수 심도, 함양량, 토양매체의 특성)만으로 민감성도를 작성한 후, 질산성질소 오염원인자를 조합하여 또 다른 오염취약성도를 작성하였고, 이들의 결과를 6개 민감성인자를 활용한 오염취약성도와 비교, 검토하였다. 이렇게 작성된 개별 오염취약성도와 종합 오염취약성도는 실제 연구지역(화성시)의 지하수 중 질산성질소 농도값의 분포와 비교하였다. 이러한 분석과 비교결과 지역적인 관리의 우선순위와 각 지역에서의 중요한 오염원인자를 규명할 수 있었다. 이들을 정리하면 다음과 같다:

① 축산시설이 널리 분포된 장안면과 남양동 지역에서는 오염도가 상대적으로 낮지만 숫자적으로는 훨씬 더 많은 수의 오염된 지하수관정이 나타난다.

② 양감면 일대와 태안읍 서부와 봉담읍 북부 지역에 나타나는 높은 질산성질소 지하수오염도는 토지이용특성에 영향을 받은 것으로 평가된다.

③ 6개의 민감성 인자와 3개의 질산성질소의 오염원인자를 활용한 취약성도와 3개의 민감성 인자와 3개의 질산성질소의 오염원인자를 활용한 취약성도의 결과는 동일하다. 즉, 남양동, 장안면, 양감면 등이 우선 관리지역으로 나타나며, 정남면, 향남면, 팔탄면 등이 다음 순서의 관리대책 지역으로 평가된다.

④ 따라서, 지하수의 수질보호와 관리대책 수립을 위한 우선지역 선정에 위해서는 6개의 민감성 인자를 활용한 경우와 3개의 민감성 인자를 활용한 경우에 차이가 없다. 따라서, 기존에 가용한 자료를 활용하고 자료수집과 분석의 효율성을 제고하며 실질적인 행정관리에 용이성을 고려할 때, 3가지 민감성 인자만을 활용한 오염취약성 평가로도 충분히 그 목적을 달성할 수 있으리라 판단된다.

⑤ 단, 서신면, 마도면 일부지역에 나타나는 질산성질소에 의한 지하수의 높은 오염도는 현재 가용한 오염원인자에 대한 자료에서는 오염가능성을 정확하게 예측할 수 없다. 이러한 지역에 대해서는 보다 정밀한 현장조사가 필요하다.

결론적으로, 농어촌지역에서 청정지하수의 수질을 관리하고 질산성질소에 의한 오염예방을 위해서는,

① 지역의 자여적인 수질변화 요인인 수리지질학적 특성을 이해하고,

- ② 명백한 지표 오염원인자인 축산시설과 폐수방출, 생활하수와 오폐수 방출 및 비료의 시비정도에 대한 체계적인 관리가 중요하며,
- ③ 오염지수 내지 오염취약성을 평가함으로 오염가능성을 예측함으로,
- ④ 오염발생 이전에 방지와 관리대책을 수립하고 적극적으로 시행하여야 한다.

농경지 비점원오염 관리를 위해서는 비점오염원 대량발생지역의 수질관리강화를 위해 토지이용별 비점오염원 관리기준이 마련되어야 한다. 이를 위해 일정규모 이상의 비점오염원은 점오염원으로 간주하여 방류수 수질기준을 적용하는 등 적극적인 처리 방안도 강구하여야 한다. 상수보호구역으로 지정된 지역에서는 비점오염원의 현지 처리기법을 도입하고, 비점오염원과 점오염원 처리효율을 비교하여 경제적인 오염원 저감방안을 모색하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

4. 농촌지역 청정 지하수 수질감시

농림부 주관으로 시행되고 있는 지하수 관리사업 프로그램에서는 기본적으로 관정 위치도와 오염원위치도, 지하수 부존량 산출 및 유역별 현재 이용량과 향후 개발량, 수질현황이 산출될 수 있도록 되어 있다. 본 연구에서는 이러한 기본적인 프로그램에 각 수질항목별로 오염정도와 몇가지 항목들을 중첩시켜 분석이 가능하며 오염항목 전체를 검토 할 수도 있으며 수질항목을 무기물질과 유해항목, 또한 일반 오염물질 항목으로 나누어 분석이 가능하도록 프로그램을 작성하였다.

본 연구에서는 농촌지역 지하수 오염원과 매질의 주요특성에 대하여 조사 분석하였으며 결과물로 규명된 이러한 특성을 활용하여 GIS 프로그램을 이용하여 지하수 자료관리 및 분석을 위한 프로그램을 개발하였다. 기개발되어 있는 제반 기초 지하수 정보 도면들을 어떻게 활용하여 자치단체에서 필요한 유역별 지하수 관리를 할 수 있는가에 목표를 두었다. 기본도면으로는 지질도와 관정 위치도, 토양도, 수질분석자료, 각종 점 오염원 위치도등이 있다. 이러한 도면들을 분석할 수 있는 기준 tool을 만들었으며 전체 시범지구를 청정지역, 감시지역, 이용지역, 오염지역으로 구분 관리코자 하였다. 본 연구에서는 이처럼 대수층을 4개 기준지역을 구분하고 자동적으로 감시 대상지역이 도출될 수 있도록 하였다.

본 연구에서 개발된 질산성질소 오염도, 해수침투 오염도, 오염취약성도는 연구결과에 따라 GIS 프로그램으로 별도로 작성하였으며 지하수 오염은 무기성분 오염물질과 일반 오염물질 유해성 오염물질로 나누어 분석이 가능토록하여 오염원과의 상관관계를 유추 할 수 있도록 하였다. 점 오염원에 대하여는 기존유사 GIS프로그램에서 오염원 위치와 단순 규모만을 표시하는 기법을 향상시켜 오염발생 부하량을 고려하고 다시 그중에서 하수처리시설을 고려하여 실제 오염에 위협이 되는 정도만을 고려토록 프로그램을 작성하였다. DRASTIC 기법으로 오염지수도 산출할 수 있도록 되어 있다.

○ 청정지역 분포도 분석기능

1) 청정지역 분포도 분석 알고리즘 작성

청정지하수 분포지역을 분석하기 위해 사용되는 인자들은 다음과 같다.

- 심각한 오염항목들
- 일반 오염항목들
- 질산성질소 오염지수도
- 오염발생량도
- 오염취약성도
- 해수침투도
- 쓰레기 매립장 분포도

위의 모든 도면들은 그리드 주제도를 선택하도록 되어 있다. 심각한 오염항목과 일반 오염항목의 분포도는 판정분포도 작성 기능에서 개발된 틀을 이용해 작성된 결과물이다. 판정분포도 작성 기능에서 수질 항목별로 분포도를 작성하게 되면, 각 기준에 따라 기준을 초과하는 지역은 1, 기준을 초과하지 않는 지역은 0으로 구분하는 분포도가 작성되는데, 이를 이용하는 것이다. 심각한 오염항목인지 아니면 일반 오염항목인지에 대한 판단은 분석가가 수행하여, 지도에 로딩되어 있는 그리드 주제도들 중 각 분류에 입력하게 된다.

위에서 선택된 주제도들을 이용해 지하수의 수질, 오염취약성 등을 고려한 청정지역, 감시지역, 이용지역, 오염지역으로 구분되는 청정지역 분포도를 작성하게 된다. 청정지역은 심각한 오염항목, 일반 오염항목에 노출되어 있지 않아 청정한 지하수 수질

을 유지하고 있으며, 주변에 잠재오염원이 존재하지 않아 오염발생량이 적고, 오염취약성이 높지 않은 지역으로 청정한 지하수 수질을 유지하기 양호한 지역이다. 감시지역은 청정지역과 동일하게 청정한 지하수 수질을 유지하고 있지만, 주변에 잠재오염원이 존재하거나, 질산성질소 지수, 오염취약성 등이 높게 나타나 향후 수질이 악화될 가능성이 있는 지역으로 감시가 필요한 지역이다. 이용지역은 다수의 일반 오염항목들에 노출되어 있거나, 해수의 영향을 어느 정도 받고 있는 지역으로 지하수 수질은 떨어지지만 농업, 공업용수 등으로 활용이 가능하고 일반적인 정화처리를 통해 생활용수 등으로 활용이 가능한 지역이다. 오염지역은 심각한 오염항목들에 노출되어 있거나, 많은 일반 오염항목들에 노출되어 있는 지역으로 지하수 수질이 현저히 낮아 고도의 정화처리 과정을 통해서만 활용이 가능한 지역이다.

이렇게 각 단계별 생성된 도면들을 중첩분석한 후 생성된 도면은 최종적으로 해수침투 여부, 쓰레기 매립지 분포 상황을 반영하여 청정지역 분포도로 생성된다. 해수침투 지역은 고농도 해수침투 지역과 일반농도 해수침투 지역으로 나누어 고농도 해수침투 지역은 오염지역으로 일반 해수침투 지역은 이용으로 분류하여 놓은 도면을 이용한다. 쓰레기 매립장은 매립방법에 따라 위생 매립장은 감시대상으로 분류하고, 비위생 매립장은 안정에 정도에 따라 감시대상과 오염지역으로 분류한 도면을 이용한다. 해수침투와 쓰레기 매립지의 고려는 앞서 각 단계별로 생성된 도면들을 중첩시키는 것과 마찬가지로 가장 나쁜 결과 값을 최종적으로 반영하게 된다.

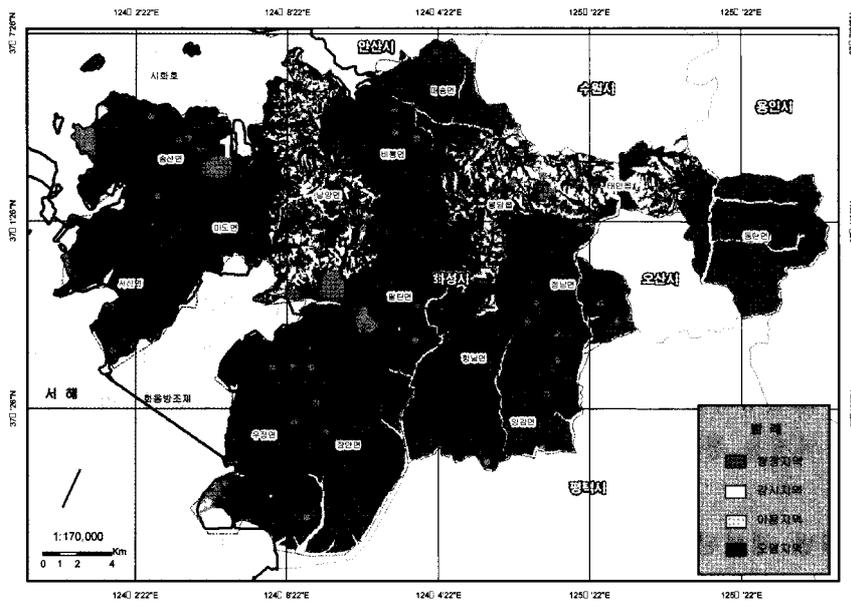


그림 6-1 경기도 화성시 청정지하수 분포도

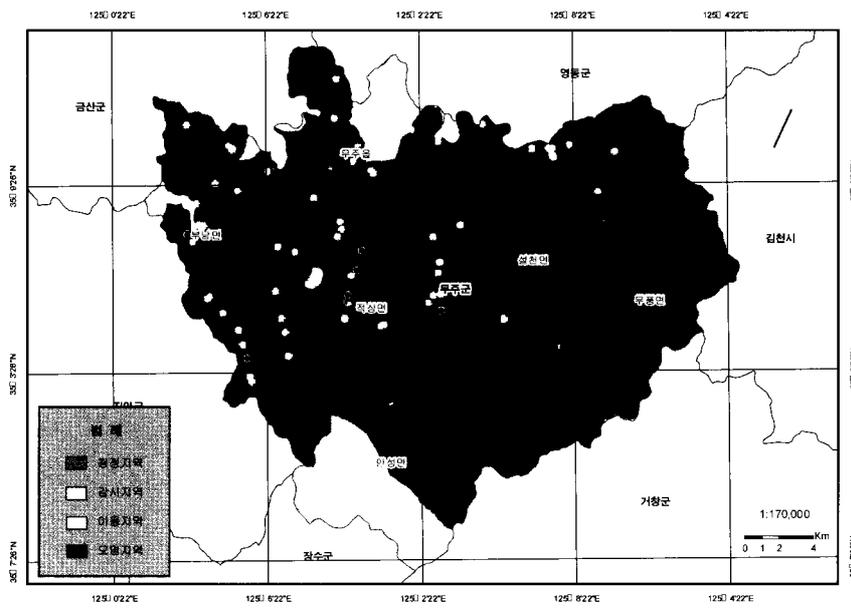


그림 6-2 전라북도 무주군 청정지하수 분포도

상기 최종 결과 도면에서 볼 수 있듯이 지하수 오염지역과 감시지역을 쉽게 찾아 볼 수 있으며 어떤 수질 오염항목과 어떤 주변 오염원이 문제시 되는 지는 해당 지점을 눌러 바로 알아 볼 수 있도록 되어 있다. 감시 지역에 대하여는 지역을 확대하여 유역 상하류를 감안하여 오염 또는 청정지역을 선정하여 관측망 시설을 설치하여 감시 할 수 있으며, 이러한 자료는 인터넷 자료로 실시간 관측 되도록 프로그램화 되어 있다. 현재는 EC, 온도 수위 자료를 받고 있으며 향후 관측장비의 발전과 더불어 항목은 추가 될 수 있다. 모든 분석 결과물들은 인터넷상에서 일반에게 공개되도록 하였으며, 단지 자료의 업데이트와 추가만은 지하수 전문직들 또는 담당 공무원만이 가능하도록 프로그램화 되어 있다.

본 연구로 유역별 지하수 관련 자료를 DB 화 하여 본 프로그램을 적용시 해당지역을 청정지역과 오염, 감시, 이용지역으로 구분이 가능해 지며, 각 수질항목별 분포도와 변화추이도 등 수많은 중간과정의 분석도면들을 쉽게 볼수 있도록 프로그램화 하였다. 이러한 프로그램을 위하여 기초적인 조사 즉 농촌지역 주요오염원을 규명하고 유동 특성과 저감방안 까지를 검토하고, 지하수전문가들을 위한 의사 결정시스템을 개발하였으며 질산성질소, 비점오염원으로서 농약과 비료 거동 특성 규명 및 해수침투 분석등 오염원별 거동특성을 규명하고 이를 토대로 프로그램을 개발하였다. 또한 지하수 토지이용별 지역별 강수의 지하수 함양율을 실측하여 다양한 이론적 산출기법과 비교하였다.

이러한 제반 기술들은 모두 농림부에서 현재 개발추진되고 있는 지하수관리사업 프로그램에 바로 추가기능으로 접속이 가능하도록 동일한 D/B와 프로그램 언어를 사용하였으며 동 프로그램 개발자들과도 지속적인 회의를 가지며 추진해 왔다. 다만 다양한 본 연구결과의 분석기능 들의 적용 여부는 농림부관계관님들의 검토에 따르게 될 것이다.

참고문헌

- 농림부, 농업기반공사, 2001, 농촌지하수관리조사보고서(화성시 I:화남2지구)
- 농업기반공사, 2000, 농어촌 지역 지하수 자원의 오염 예측도 작성 기법에 관한 연구
- 농업기반공사, 2003, 화성시 지하수관리조사 보고서
- 박정용, 이용일. 1997, 백악기 무주분지의 층서 재정립, 지질학회지, 33권, p65-77
- 박정용, 이용일. 2000, 적상산에 분포하는 백악기 무주분지 역암(길왕리층)의 기원지, 지질학회지, 36권 4호, p355-370
- 윤정아, 김규한, 2000, 남한 탄산수의 지구화학적 특성과 안정동위원소 조성, 지하수환경 7권 3호, p119-124
- 이대성, 남기상, 1969, 한국 지질도 (1:50,000), 장거리 도폭 및 설명서, 한국지질조사소, 33p
- 한국전력공사 (KEPCO), 1991, 무주양수 1,2호 설계기술용역 지질조사보고서 (미발간)
- 김천수, 1992, 제주도 지하수환경의 오염취약성, 1992년도 제 8회 공동학술강연회 발표 문집(지하수 자원의 활용과 보전), 대한광상지질학회, 13-28.
- 부성안, 정교철, 2000, 제주도 동부권역 담지하수 대수층에서의 염수 침입, J. Engin. Geol., 10, 115-130.
- 최순학, 1992, 지하수 자원보존 및 개발방향, 1992년도 제 8회 공동학술강연회 발표논문집(지하수 자원의 활용과 보전), 대한광상지질학회, 97-114.
- 한정상, 1998, 지하수 환경과 오염, 전영사, 1071.
- 김광식, 토양성분의 용탈에 관한 연구(Ⅲ), 한국토양비료학회지 16(4): pp. 311-317 (1983).
- 방기웅, 이준호, 유명진, “도시소유역에서의 비점오염원 유출특성에 관한 연구”, 한국수질보존학회지, 13(1), pp. 79~99, (1997)
- 환경부, “비점오염원조사 연구사업보고서”, (1995)

- 김종찬, 김요용, 박익범, 정주용, 민윤기, “비점오염원 관리방안”,
경기도보건환경연구원, pp. 3~45, (2001)
- 임선옥, 서영호, 심명호, “토양시용 요소의 동태에 대한 환경요인의 영향”,
한국농화학학회, pp. 95, (1996)
- 신영오 외 공저, “토양·식물영양·비료학”, 집현사, pp. 189, 191 (2001)
- 유관식, 유순호, 송관철, “관수에 의한 시비양분의 토양 중 이동에 관한 연구
I (관수량에 따른 양분이동)”, 한국토양비료학회지, 24(2), pp. 102~108, (1991a)
- 유관식, 유순호, 송관철, “관수에 의한 시비양분의 토양 중 이동에 관한 연구
I (토양수분 조건과 Cl, P의 이동)”, 한국토양비료학회지, 24(3), pp. 159~164,
(1991b)
- 유관식, 유순호, 송관철, “관수에 의한 시비양분의 토양 중 이동에 관한 연구
I (토양수분 조건에 따른 질소의 이동)”, 한국토양비료학회지, 27(3), pp. 232~237,
(1994)
- 김진우, 김창환, 이대진, 최용수, 허성수, “토양 비료 개론”, 선진 문화사, pp. 209,
207, 279, 298 (2001)
- 조성진외, “비료학”, 향문사, pp. 129~151, (2000)
- 배재근, 오종민, “토양오염 측정분석”, 신광문화사, pp. 59, 183~184, 215, 220, 253
(2002)
- 농촌진흥청, “토양화학분석법” pp. 74~78, 89~91
- 김좌관, “수질오염개론”, 동화기술, pp. 99~100, (2000)
- 장윤영외, “토양환경공학”, 향문사, pp. 32~33 (2001)
- 최지용, 신창민, “비점오염원 유출저감을 위한 우수유출수 관리방안”,
한국환경정책평가연구원 (2002).
- 최지용, 신은성, “농업지역 비점오염원 관리방안 연구”, 한국환경정책평가연구원,
(1998)
- 최지용 “비점오염원의 제도적 관리방안 연구”, 한국환경정책평가연구원 (1998).
- 환경부, “비점오염원 관리요령” 수질보전국 (2000)
- 환경부, “비점오염원 조사연구”, (1995)
- 농촌진흥청, “농업환경오염경감대책연구”, 서울대학교 농업생명과학대학 (1994)

박후원, “팔당상수원오염무제 해결을 위한 제언”, 경실련 환경개발센터 (1998)

전상호, “팔당 상수원 오염원 현황 분석 및 수질오염 추이”, 경실련 환경개발센터 (1998)

환경부 보도자료 (2004)

환경부 보도자료, “공단등 오염우려지역 지하수의 6.8%가 기준초과 지하수보전 및 복원을 위한 종합대책 추진” (2002).

김원기, “황토를 이용한 수중의 인 및 중금속 제거효율에 관한연구”, 광운대학교 석사논문 (2000).

요코하마시 환경과학 연구소, “노랑꽃창포에 의한 수질정화법” (1994).

임업연구원, “포플러를 이용한 환경오염정화 및 복원”, 산림과학속보 (2002).

배재근, 오종민, “토양오염 측정분석” 신광문화사, p. 59, 183-184, 215, 220, 253, (2002).

노재성, 홍성수, 강호, “국산천연 제올라이트에 의한 폐수중의 암모늄 이온의 제거를 위한 기초연구.-pH 및 양이온의 영향”, 대한환경공학회지, Vol. 12, pp. 31~38 (1990).

김동민 외 7명 공저, “폐수처리공학”, 동화기술, p108-111 (1997)

홍지숙, 임현성, 서정권, 노재성., “천연 제올라이트의 이온 교환 특성을 이용한 NH₄⁺-N 이온 제거에 관한 연구”, J. Korean Ind. Eng. Chem., Vol. 12, No.2 p 165-169 (2001).

남영우, 김남명, 신호철, 운영자., “천연제올라이트에 의한 상하수의 암모니아성 질소 제거에 관한 연구(I) 양이온 교호나 특성 및 재생방법”, 한국폐기물 학회지, Vol.14, No.7, p784-791, (1997).

이동훈, “우사 폐수 중 암모니아성 질소 제거를 위한 zeolite column의 적정 조건”, Korean J. Environ. Agric., Vol. 15, No. 2, p232-238, (1996).

건설교통부, 지하수관리계획 보고서, 1996.

건설교통부, 지하수조사연보, 1997, 1998 및 1999.

국립환경연구원, 독일의 지하수관리, 1993.

국토개발연구원, 제주도 중산간지역 종합조사, 1997.

김운성의 6명, 잔류농약 분석법, 홍익기술, page21~22, 211~260, (2000)

김진우의 4명, 토양비료개론 선진문화사, page 203, (2000)

농림부, 전북 통계연보, page60~61, 66~69, 70~71, 188~189, (2001)

농림부, <http://www.maf.go.kr/html/index.asp>

농약공업협회, <http://www.kacia.or.kr>

농촌진흥청, 농약의 안전성과 작물보호, page3~35, (1999)

대한전문건설협회, 지하수법령집(지하수법령집의 최신집), 1999. 7.

동화기술, 환경관계법령(개정판).

무주군청, 통계연보, 2002

박창규의 9명, 농업환경화학, 동화기술, page183~185, 226~227, 241~242, 253~254 (1996)

방기웅, 이준호, 유명진, 도시소유역에서의 비점오염원 유출특성에 관한 연구, 한국수질보존학회지, 13(1), pp. 79~99, (1997)

정영호의 5명, 최신농약학, 시그마 프레스, page5, 47~58, 99, (2000)

조성진, 비료학 향문사, page 24~27, (2000)

지하수 조사연보, (96, 97, 98)

창원시, 창원시 강변여과수개발 타당성조사, 1997.

최병순의 4명, 토양오염 개론, 동화기술, page147~149, (1999)

최종우, 이규승, 담토양중 유기인계 농약의 잔류수준과 Diazinon과 Dursban제의 분해에 관하여, 한국수자원공사, 강변여과 및 인공함양 방법을 이용한 영산강수원개발 기본조사, 1999.

한국수자원공사, 전국 층적층지하수조사, 1996.

한국수자원공사, 하상퇴적층 여과방식에 의한 금강수도 취수개선 방안조사 연구, 1996.

한정상, 국내 지하수 관리의 문제점과 개선방향 대한지하수환경학회 (1999), page1

한정상, 지하수 환경과 오염, 박영사, page691~694, (2000)

한정상, (사)대한지질학회, 환경정책 기본법 제정시 지하수보호규정 설정의 당위성, 1989. 9.

한정상, 낙동강 물이용조사단, 낙동강하류지역 취수원 다변화 방안 타당성조사,

- 2000.
- 한정상, 대한광업진흥공사, 지하수개발가능량 및 오염취약성 평가에 관한 연구, 1998. 12.
- 한정상, 우남철, (사)대한지하수환경학회, 환경부, 지하수 수질기준 타당성 검토 및 조정방안 연구, 1999. 11.
- 한정상, 지하수환경과 오염, 박영사, 2000, 193p.
- 한정상, 한국수자원공사, 낙동강권역 광역지하수조사, 2000.
- 한정상, 한규상, 오염지하수·토양환경의 위해성 평가와 자연저감, 도서출판 한림원, 1999,
- 한정상, 한찬, 3차원 지하수모델과 응용, 박영사, 1999.
- 환경부, 비점오염원조사 연구사업보고서, (1995)
- 환경부, 부산광역시, 경상남도, 부산·경남지역 복류수 및 강변여과수 타당성조사, 1996.
- 환경부, 부산광역시, 용산지구 강변여과수 시범개발 조사사업, 1999.
- 환경부, 전국수도종합계획, 1998.
- 환경부, 환경통계연감, 1999. 12.
- 환경부, <http://www.me.go.kr:50000/user/index.html>
- 무주군청, <http://www.muju.chonbuk.kr>
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., Petty, R. J., and Hackett, G., DRASTIC: A standardized system for evaluation ground water pollution potential using hydrogeologic settings, EPA 600/2-87/035, May, 1987, U.S. Environmental Protection Agency, Ada, Oklahoma.
- Appelo C. A. J., and Postma, D, Geochemistry, Groundwater and Pollution, A.A.Balkema, p.263-265(1994)
- Aravena R., Evans M. L., and Cherry J. A., 1993, Stable isotopes of Oxygen and Nitrogen in Source Identification of Nitrate from Septic System, Groundwater Vol.31, No.2, p.180-186
- Canter, L.W., Environmental impact assessment, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1996, 140-143.

- Canter, L.W., Nitrate in groundwater, Lewis publishers, 1996, 263.
- Carlson C., Critto A., Marcomini A., Nathanail P., 2001, Risk based characterisation of contaminated industrial site using multivariate and geostatistical tools, Environmental pollution, 111 p.417-427
- Chan Ho Jeong, 2001, Effect of land use and urbanization on hydrochemistry and contamination of groundwater from Taejon area, Korea, Journal of Hydrology 253, 194-210
- Eduardo J. and Amado Guzman-Guzman, 1989, Multivariate Analysis in Hydrochemistry: An Example of the Use of Factor and Correspondance, Groundwater vol.27, No1, p27-34
- Facchinleei A., Sacchi E., Mallen L. 2000, Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils, Environmental pollution, 114, p313-324
- Follett R. F., 1989, Nitrogen management and ground water protection. Developments in agricultural and managed-forest ecology 21. Elsevier, New York, 395.
- Follett R. F. and Hatfield J. L., 2001, Nitrogen in the environment : sources, programs, and management, Elsevier, Amsterdam.
- Goolsby D. A., Battaglin W. A., Lawrence G. B., Artz R. S., Aulenbach B. T., Hooper R. P., Keeney D. R., and Stensland G. J., 1999, Flux and sources of nutrients in the Mississippi - Atchafalaya river basin. Topic 3 report for the integrated assessment on hypoxia in the Gulf of Mexico. NOAA coastal ocean program decision analysis series no.7, NOAA coastal ocean program, Silver Spring, 130.
- Gromly J. R. and Spalding R. F., 1979, Sources and Concentration of Nitrate-Nitrogen in Groundwater of the Central Platte Region, Nebraska, Groundwater Vol.17, No.3, p.291-301
- Hallberg G. R., 1986, Overview of agricultural chemicals in groundwater . Proc Conf agricultural impacts on ground water, Omaha, Nebraska, National water

- well association, 1-63.
- Hem J., Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. Third edition, U.S Geological survey water-supply paper 2254(1992)
- Hendry M. J. and Franklin W., 1990, The Chemical Evolution of Ground Water in the Milk River Aquifer, Canada, *Groundwater*, vol.28, no.2, p253-261
- Keeney, D. R., Transformation and transport of nitrogen, in agricultural management and water quality, Schaller, F. W. and Bailey, G. W., eds, Iowa State University Press, Ames., Iowa, 1983, 48-64.
- Nakagawa Y., Iwatsubo G., 2000, Water chemistry in a number of mountains streams of east Asia, *Journal of Hydrology*, p118-130
- Nolan, B. T., 2001, Relation nitrogen sources and aquifer susceptibility to nitrate in shallow groundwaters of the United states, *Groundwater*, vol.39, No.2, 290-299.
- Ramolino, L., Development of a nitrate pollution index for groundwater, Master of environmental science thesis, 1988, University of Oklahoma, Norman, Oklahoma, 138-262.
- Reddy, K. R. and Patrick, W. H., 1981, Nitrogen transportations and loss in flooded soils and sediments, in *CRC Critical reviews in environmental control*, vol.13, no.4, 273-303.
- Robert W., Stephen L., Babara M., and Manilig C., 1993, Analysis of Temporal Variability in Hydrogeochemical Data Used for Multivariate Analysis, *Groundwater* vol.31, No.2, p221-229
- Spalding, R. F. and Exner, M. E., 1993, Occurrence of nitrate in groundwater - A riview, *Journal of Environmental Quality*, 25, 425-432.
- Ward, M. H., Mark, S. D., Cantor, K. P., and Weisenburger, D. D., Correacillasenor, A., and Zahm, S. H., 1996, Drinking water nitrate and the rick of non-Hodgkin's lymphoma, *Epidemiology* vol.7, 465-471.
- Batu, V., *Aquifer Hydraulics*, 1998, A Comprehensive Guide to Hydrogeologic Data Analysis, John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y. 727.

- Bear, J., 1972, Dynamics of fluids in porous media, American Elsevier, New York, N.Y. 764.
- Domenico, P. A., and F. W. Schwartz, 1998, Physical and Chemical Hydrogeology, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y. 506.
- Essaid, H. I., 1990, A multilayered sharp interface model of coupled freshwater and saltwater flow in coastal systems: Model development and application, Water Resour. Res., 26, 1431-1454.
- Fetter, C. W., 1994, Applied Hydrogeology, 3rd Ed., Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J. 691.
- Jacob, C. E., 1950, Flow of Groundwater, In Engineering Hydraulics, ed. H. Rouse, John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y. 1039.
- Kim, Y. Y., Kang, D. K., and Lee, K. K., 1996, Hydraulic properties of a coastal dump in Pohang, Southeastern Korea, Journal of the Korean Society of Groundwater Environment, 3, 1-8.
- Lee, K. H., 1992, On the hydrodynamic balance of fresh and salt waters in the Cheju Island, Geol. Soc. Korea, 28, 649-664.
- Meisler, H., Leahy, P. P., and Knobel, L. L., 1985, Effect of eustatic sea-level changes on saltwater-freshwater relations in the Northern Atlantic Coastal Plain, USGS Water-Supply Paper, 2255.
- Amiel, A.J., M. Nameri, and M. Magaritz. "Influence of intensive cultivation and irrigation on exchangeable cations and soil properties : A case study in Jordan Valley, Israel", Soil Sci., 142, pp. 223~228(1986)
- Misra, U. K., W. J. Upchurch, and C. E. Marshall. "Lysimetric and chemical investigation of pedological changes : part 4. Mineral equilibria in relation to potassium and magnesium-enriched environment in the profile", Soil Sci., 122, pp. 25~35(1976)
- Sumner, M. E., H. Shahandeh, J. Bouton, and J. Hammel. "Amelioration of an acid soil profile through deep liming and surface application of gypsum", Soil Sci. Soc. Am. J., 50, pp. 1254~1258(1986)

- Krupp, H. K., J. W. Biggar., and D. R. Nielsen. "Relative flow rates of salt and water in soils", Soil Sci. Soc. Am. Proc, 36, pp. 412~417(1972)
- Bergstrom, L. 1987. "Nitrate leaching and drainage from annual and perennial crops in tile drained plots and lysimeters", J. E nviron. Qual., 16, pp. 11~18(1987)
- Bergstrom L., and Brink N., Effect of differentiated applications of fertilizer N on leaching losses and distribution of inorganic N in the soil, Plant and Soil, 93:333-345(1986).
- Gould W.D., Hagedorn C., and McCreedy R.G.L., Transformations and fertilizer efficiency in soil., Advances in Agronomy., 40:209-238(1986)
- Jardine P.M., Wilson G.V., and Luxmoore R.J., Modeling the transport of inorganic ions through undisturbed soil columns from two contrasting waters., Soil Sci. Am J., 52:1252-1259(1988)
- Jury W.A., Gardner W.R., Saffigna P.G., and Tanner C.B., Model for predicting simultaneous movement of nitrate and water through a loamy sand, Soil Sci., 122:36-43(1976)
- Mochoge B.O., and Beese F., Leaching of plant nutrients from an acid forest soil after nitrogen fertilizer application. Plant and Soil. 91:17-29(1986)
- Webster P., Belford R.K., and Cannel R.Q., Corp uptake and leaching losses of ¹⁵N-labelled fertilizer nitrogen in relation to waterlogging of clay and sandy foam soils, Plant and soil. 92:89-101(1986)
- Park C.S, Park J.K and Kim Y.S Studies on the adsorption to the paddy soils. The research reports of the Rural Development Administration. Vol.7, No.1 pp. 17-24(1983)
- Ryu I.S., and Jo I.S Langmuir phosphorus adsorption maximum as a criterion for determination of rate of phosphorus application, J.Korean Soc.Soil Sci. Feri. 10(2):93-97(1977)
- Magett, W. L, 1989, Citizen's Guide to Environmental Terminology, Water Resource18, Cooperative Extention Service, University of Maryland.

- Alm, A. L., 1990, Non-point sources of water pollution, *Environmental Science and Technology*, Vol. 24, No 2, pp. 967
- Bachman, L. J., 1984, The Columbia aquifer of the eastern shore of Maryland part I, hydrology. Report of Investigation No. 40. Maryland Geological Survey.
- Hamilton, P. A., R. J. Sherlock, and P. J. Phillips, 1989, Ground water quality assessment of the Delmarva Peninsula, Maryland and Virginia analysis of available water quality data through 1987, Open File Report 34-89, U.S Geological Survey.
- Gould, W. D., C. Hagedorn, and R. G. L. McCready(1987) Urea transformations and fertilizer efficiency in soil. *Adv. Agron* 40:209-238
- Nyle C. Brady., Tenth Edition, *The Nature and Properties of soil*. pp. 9~10, 99, 102~103, 165~170, 177~179, 315~367
- Bergstrom, L. 1987. "Nitrate leaching and drainage from annual and perennial crops in tile drained plots and lysimeters", *J. Environ. Qual.*, 16, pp. 11~18(1987)
- D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H.Loeppert, P.N. Soltanpour, M.A. Tabatabai, C.T. Johnson, and M.E. Sumner, edit. comm. Hardcover, "Methods of Soil Analysis: Part 3-Chemical Methods", SSSA and ASA Number 5 in the Soil Science Society of America Book Series. (1996)
- Trevors, J.T., Mayfield, J., and Inniss, W.E. Measurement of electron transport system(ETS) activity in soil. *Microb. Ecol.* 8:163-168 (1982)
- Larry, W. C., Robert, C. K. and Deborah, M. F, "Groundwater Quality Protection", 4th. pp.5-18 (1990).
- EPA/600/R-98/125, "Permeable Reactive Barrier Technologies for Contaminant Remediation", USEPA (1998).
- Jerald. Schnoor, Ph. D, P.E., DEE, "Phytoremediation" Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center (1997).
- Brown, S.L., Chaney, R.L., Angle, J.S., and Baker, A.J.M., "Zinc and cadmium

- uptake by hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* grown in nutrient solution", *Soil. Sci. Am. J.* 59, pp.125-133 (1995).
- Terry, N., Carlson, C., Raab, T.K, and Zayed, A., "Rates of Se volatilization among crop species", *J. Environ. Quality*.21, pp.341-344 (1992).
- Raskin, I., "Making Phytoremediation Work. Presented at Conference on Phytoremediation-Cost-Effective Clean-Up", International Business Communication , Arlington, Virginia, May 8-10 (1996).
- Blaylock, M.J., Salt, D.E., Dushenkov, S., Zakharova, O., Gussman, C., Kapulnit, Y., Ensley, B.D., and Raskin, I., "Enhanced accumulation of Pb in Indian Mustard by soil applied chelating agents", *Environ. Sci. Tech.* 31, pp.860-865 (1997).
- Cunningham, S.D., Anderson, T.A., Schwab, A.P., Hsu, F.C., "Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants", *Advances in Agronomy*. 56, pp.55-114 (1991).
- McCutcheon, S.C., Ecological engineering, "New roles for phytotransformation and Biochemistry", International Phytoremediation Conference, May 8-10, Avlinton, VA (1996).
- Smith, R.A.H., and Bradshaw, A.D., "Stabilization of toxic mine waste by the use of tolerant plant populations. *Trans*", *Inst. Min. Metal.* 81, pp.A230-A237, (1972).
- Brooks R. R., Reeves R. D., Morrison R. S., Malaisse F., "Plant soil.", 50, pp. 503-507 (1978).
- Schnoor, J. L., Licht, L. A., McCutcheon, S. C., Wolfe, N. L, and Carreira, L. H., Phytoremediation of organic and nutrient contaminants. *Environ. Sci. Technol.* 29, pp. 318A-323A (1995).
- Forth, H.D. "Fundamentals of Soil Science", 8th ed. Wiley, New York (1990).
- Wolverton, B.C., McDonald, R.C., Duffer, W.R., "Microorganisms and higher plants for waste water treatment", *J. Miss. Acad. Sci.* 31, pp. 79-89 (1983).

- Trevors, J.T., Mayfield, J., and Inniss, W.E. "Measurement of electron transport system(ETS) activity in soil", *Microb. Ecol.* 8, p.163-168 (1982).
- Ames, L. L, "Cation Sieve Properties of the Open Zeolite, Chabazite, Mordenite, Erionite and Clinoptilolite, *American Mineralogist*", Vol. 46, Sept.-Oct., p.1120, (1961).
- Barrer, R. M., Rapadopoulos, R. and Rees, L. U. C, "Exchange of Sodium Clinoptilolite by Organic Ions", *Journal of Inorganic Nuclear Chemistry*, Vol. 29, p. 2047 (1967).
- Koon, J. H. and Kaufman, W. J., "Ammonia Removal from Municipal Waste Water", *WPCF*, Vol. 47, No. 82, p. 64~68 (1975).
- Jorgensen, S. E., Libor, O., Graber, K. L. and Barkacs, K., "Ammonia Removal by Use of Clinoptilolite", *Water Research*, Vol. 10, p. 213~224 (1976).
- Belor-Baykal. B, Oldenburg. M and Sekoulov. I., "The use of ion exchange in ammonia removal under constant and variable loads", *Envir . Technol.*, London, Vol.17, p717-726 (1996).
- Booker. N. A, Cooney. E. L and Priestly.A.J., "Ammonia removal from sewage using natural Australian zeolite", *Water sci. and Technol.*, Vol.34, No.9, p17-24, (1996).
- Hlavay. J, Vigh. G, Olaszi. V and Inczedy. J., "Investigations on natural Hungarian zeolite for ammonia removal", *Water Res.*, Vol.16, No.4, p417-420, (1982).
- Kithome. M, Paul. J. W, Lavkulich. L. M and Bomke. A. A., "Kinetics of ammonium adsorption and desorption by natural zeolite clinoptilolite", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 62, No.3, p622-629, (1998).
- A Guide for Conducting Potential Contaminant Source Inventories for Wellhead Protection, 1999.
- Air Stripping VOCs from groundwater : Process Design Considerations, Brandon R. Ball and Michael D. Edwards, *Environmental Progress*(Vol. 11, No. 1), 1992.

43. Alm, A. L., 1990, Non-point sources of water pollution, Environmental Science and Technology,
- Anne S. Legault, Konstantin Volchek, Andre Y. Tremblay and Harry Whittaker, Removal of Arsenic from Groundwater using reagent Binding/Membrane Separation, Environmental Progress, Vol. 12, No. 2, pp157-162, 1993.
- Bachman, L. J., 1984, The Columbia aquifer of the eastern shore of Maryland part I, hydrology. Report of Investigation No. 40. Maryland Geological Survey.
- Bergstrom, L. 1987. Nitrate leaching and drainage from annual and perennisl crops in tile drained olots and lysimeters , J.Environ. Qual.,16,pp11~18(1987)
- Brandon R. Ball and Michael D. Edwards, Air Stripping VOCs from groundwater : Process Design Considerations, Environmental Progress, Vol. 11, No.1, pp39-48, 1992.
- Buonicore A.J, Cleanup Criteria for Contaminated Soil and Groundwater-ASTM DS64, ASTM, 1995.
- C. M. Kae and and R. C. Borden, Enhanced Aerobic Bioremediation of a Gasoline-contaminated Aquifer by Oxygen-releasing Barriers,The Second International In-Situ and On-Situ Bioreclamation Symposium, 1993.
- Chapter 246-290 WAC, Group A Public Water Systems, Washington State Department of Health. 1994.
- Chemical Barriers for controlling Groundwater Contamination, S. J. Morrison and R. R. Spangler, Environmental Progress(Vol. 12, No. 3) 1993.
- Contaminant Transport in Groundwater, H.E.Kobus, W.Kinzelbach, IAHR Symposium Stuttgart/4-6 April, 1989
- David, P. Ahlfeld, Roger H. Page, and George F. Pinder, Optimal Groundwater Remediation methods applied to a Superfund site : From formulation to Implementation , Groundwater, Vol. 33, No. 1, pp58-70, 1995.
- Dworkin,D.,D.J.Messinger, and R.M.Shapot. 1988. In Situ Flushing and

- Bioreclamation. Technologies at a Creosote-Based Wood Treatment Plant. In: Proceed. of the 5th National Conference on Hazardous Waste and Hazardous Materials - April 19-21, 1988-Las Vegas, NV. Hazardous Materials Control Research Institute, Washington,DC.
- Enhanced Aerobic Bioremediation of a Gasoline-contaminated Aquifer by Oxygen-releasing Barriers, C. M. Kae et al., The Second International In-Situ and On-Situ Bioreclamation Symposium, 1993.
- Enhanced Degradation of dissolved Benzene and Toluene using a Solid Oxygen-releasing Compound, Gino C. bianchi-Mosquera et al., Winter 1994 GWMR pp 120-128.
- Field Testing Solar Photocatalytic Detoxification on TCE-Contaminated Groundwater, Mark S. Mehos et al., Environmental Progress(Vol. 12, No. 3) 1992.
- Gabriel Bitton, Jon Willy & Sons, Groundwater Pollution Microbiology , Chares P. Gerba, 1984.
- garet M.Kelly, U.S.EPA & U.S.Air Force, ver 1, 1993, 7
- Gino C. bianchi-Mosquera, Richelle M Allen-King, and Douglas M. Ma, Enhanced Degradation of dissolved Benzene and Toluene using a Solid Oxygen-releasing Compound,, Winter 1994 GWMR pp 120-128.
- Granular Activated Carbon Pilot Treatment Studies for Explosives Removal From Contaminated Groundwater, W.J. Wujcik et al., Environmental Progress(Vol. 11, No. 3) 1992.
- Groundwater Pollution Microbiology , Gabriel Bitton, Chares P. Gerba, Jon Willy & Sons, 1984
- H.E.Kobus, W.Kinzelbach, Contaminant Transport in Groundwater, IAHR Symposium Stuttgart/4-6 April, 1989.
- Hamilton, P. A., R. J. Sherlock, and P. J. Phillips, 1989, Ground water quality assessmrnt of the Delmarva Peninsula, Maryland and Virginia analysis of available water quality data through 1987, Open File Report 34-89, U.S

- Geological Survey.
65. <http://www.home.rda.go.kr>
- In Situ Biodegradation of TCE Contaminated Groundwater, Michael J. Nelson, John V. Kinsella, Terry Montoya, Environmental Progress(Vol. 9, No. 3) 1990.
- In Situ Bioreclamation of Contaminated Grouudwater, Bruce E.Rittman, Albert J. Valocchi, Joseph E. Odencrantz, Wookeun Bae, WRC Report No.209, 1988, 11 J. Inst. Agr. Res. Util, page44 (2000)
- Joseph S. Divinny, Lorne G. Everett, James C.S. Lu and Robert L. Stollar, van strand Reinhold, Subsurface Migration of Hazardous Wastes ,Env. Eng. Series.1990.
- Kirankumar V. Topudurti, Norma M. Lewis and Steven R. Hirsh, The Applicability of UV/Oxidation Technologies to treat Contaminated Groundwater, Environmental Progress, Vol. 12, No. 1, pp54-60, 1993.
- Kuhn, R.C.,and K.R.Piontek. 1989. A Site-Specific In Situ Treatment Process Development Program for Wood Preserving Site. Presented at Robert S.Kerr Technical Assistance Program-Oily Waste Fate, Transport, Site Characterization and Remediation,May 17-18, Denver,CO.
- L. C. Davis, L. E. Erickson, E. Lee, J. F. Shimp, and J. C. Tracy, Modeling the Effects of Plants on the Bioremediation of Contaminated Soil and Groundwater, Environmental Progress, Vol. 12, No. 1, pp67-75, 1993.
- Landfill of Waste ; Leachate, T.H. Christensen, R.Cossu, R.Stegmann, Elsevier9 Applied Science, 1992
74. Magett, W. L, 1989, Citizen's Guide to Environmental Terminology, Water Resource
- Mark S. Mehos and Craig S. Turchi, Field Testing Solar Photocatalytic Detoxification on TCE-Contaminated Groundwater, Environmental Progress, Vol. 12, No. 3, pp194-199, 1992.
- Michael J. Nelson, John V. Kinsella, Terry Montoya, In Situ Biodegradation of TCE Contaminated Groundwater, Environmental Progress, Vol. 9, No. 3,

- pp190-196, 1990.
- Michael McCann, Paul Boersma, and Joseph Danko, Remediation of a VOC-Contaminated Superfund Site using Soil Vapor Extraction, Groundwater Extraction and Treatment : A Case Study, Environmental Progress, Vol. 13, No. 3, pp208-213, 1994.
- Modeling the Effects of Plants on the Bioremediation of Contaminated Soil and Groundwater, L. C. Davis et al., Environmental Progress(Vol. 12, No. 1), 1993.
- Nash,J.H.1988. Project Summary: Field Studies on In Situ Soil Washing. EPA/600/S2-87/110, U.S.EPA Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, Cincinnati, OH. ol. 24, No 2, pp, 967
- Optimal Groundwater Remediation methods applied to a Superfund site: From formulation to Implementation, David, P. Ahlfeld et al., Groundwater(Vol.33, No. 1)
- Paul E. Flathman, Douglas E. Jerger, and Patrick M. Woodhull, Remediation of Dichloromethane(DCM) Contaminated Groundwater, Environmental Progress, Vol. 11, No. 3, pp202-209, 1992.
- Physicochemical Treatment Processes and Pollution Prevention Hazardous Wastes and Groundwater, Proceedings WEFTEC '94, Vol 2,
- Physicochemical Treatment Processes and Pollution Prevention Hazardous Wastes and Groundwater, Proceedings WEFTEC '94, Vol 2, 1994.
- Remediation of a VOC-Contaminated Superfund Site using Soil Vapor Extraction, Groundwater Extraction and Treatment : A Case Study, Michael McCann et al., Environmental Progress(Vol. 13, No. 3) 1994.
- Remediation of Dichloromethane(DCM) Contaminated Groundwater, Paul E. Flathman et al., Environmental Progress(Vol. 11, No. 3) 1992.
- Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Col.Neil J.Lamb,
- Removal of Arsenic from Groundwater using reagent Binding/Membrane

- Separation, Anne S. Legault et al., Environmental Progress(Vol. 12, No. 2) 1993.
- S.J. Morrison and R. R. Spangler, Chemical Barriers for controlling Groundwater Contamination, Environmental Progress, Vol. 12, No. 3, pp175-181, 1993.
- Soils in Waste Treatment and Utilization, Wallace H.Fuller, Arthur W. Warrick CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida, vol 1, 2, 1985
- State of Rhode Island, Rules and Regulations for Water Quality Regulations, 1997. 10.
- State of South Dakota, Wellhead Protection Quidelines, Dept, of Envirn. & Natural Resources, 1995. 4.
- State of Vermont Source Water Assessment and Protection Program, Water Supply Div. Draft, 1998. 10.
- State of Vermont, Groundwater Quality Standards, 1992.
- State of Wisconsin, Wisconsin Source Water Assessment Program Plan, Dept. of Natural Resources, 1999.
- Stief,K. 1984. Remedial Action for Groundwater Protection Case Studies Within the Federal Republic of Germany. In: the 5th National Conference on Management of Uncontrolled Hazardous Waste Sites. November 7-9. Washington,DC.
- Subsurface Migration of Hazardous Wastes , Joseph S. Divinny, Lorne G. Everett, James C.S. Lu and Robert L. Stollar, van Nostrand Reinhold, Env.Eng.Series.1990
- Suthans. Sutherson, Remediation Engineering, Geraghty & Miller, 1997, pp54-65.
- T.H. Christensen, R.Cossu, R.Stegmann, Landfill of Waste ; Leachate, Elsevier Applied Science, 1992.
- The Applicability of UV/Oxidation Technologies to treat Contaminated Groundwater, Kirankumar V. Topudurti et al., Environmental Progress(Vol. 12, No. 1) 1993.

- The Commonwealth of Massachusetts, 1996 Guidelines and Policies for Public Water System, Vol. I, Guideline, 1996. 11.
- Truett, J.B., R.L. Holberger, and D.E. Sanning. 1982. In Situ Treatment of Uncontrolled Hazardous Waste Sites, Proceedings of the 3rd National Conference. The Hazardous Materials Control Research Institute. Silver Springs, MD. pp.451-457. U.S EPA, (1990)
- U.S. Environmental Protection Agency. 1984. Case Studies 1-23: Remedial Response at Hazardous Waste Sites. EPA/540/2-84/002B. Municipal Environmental Research Laboratory, Cincinnati, OH.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1985. Handbook: Remedial Action at Waste Disposal Sites (Revised) EPA/625/6-85/006. Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, Cincinnati, Ohio and Office of Emergency and Remedial Response, Washington, DC.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1990. Handbook on In Situ Treatment of Hazardous Waste-Contaminated Soils. EPA/540/2-90/002, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, Ohio.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1993. Superfund Innovative Technology Evaluation Program, Technology Profiles (Sixth Edition), EPA/540/R-93/526, Office of Research and Development, Washington, DC.
- U.S. EPA & U.S. Air Force, Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, EPA542-B-93-005, 1993.
- U.S. EPA, SITE Technology Profiles Sixth Ed., 1993. SITE Seventh Ed., 1994, 9. Bruce E. Rittman, Albert J. Valocchi, Joseph E. Odencrantz, Wookeun Bae In Situ Bioreclamation of Contaminated Groundwater, WRC Report No.209, 1988. USEPA 570/9-91-009, Delineation of Wellhead Protection Areas in Fractured Rocks, 1991.
- USEPA 816-R-98-019, Protecting Sources of Drinking Water, 1999. 4.
- USEPA 822-Z-99-001, National Recommended Water Quality Criteria Correction, 1999. 4.

USEPA, Clean Water Act, 1977.

USEPA, Draft/Risk Management Strategies, 1998. 12.

USEPA, Emergency Planning and Community Right to Know Act, 1986.

USEPA, FIFRA(7U.S.C. S/S 136 et seq), 1972.

USEPA, Guidelines for Delineation of Wellhead Protection Areas, 1987.

USEPA, National Primary Drinking Water Standard, Part 141.

USEPA, OSHA(29U.S.C. S/S 651 et seq), 1970.

USEPA, RCRA(42U.S.C. S/S 6901 et seq), 1976.

USEPA, Safe Drinking Water Act/Major Environ. laws, 1974.

USEPA, Superfund-CERCLA Overview, 1999. 7.

USEPA, Toxic Substances Control Act, 1976.

USEPA/625/R-93/002, Wellhead Protection A Guide for Small Community, 1993.

W.J. Wujcik, W. L. Lowe, and P. J. Marks, Granular Activated Carbon Pilot Treatment Studies for Explosives Removal From Contaminated Groundwater, Environmental Progress, Vol. 11, No. 3, pp178-189, 1992.

Wallace H.Fuller, Arthur W. Warrick, Soils in Waste Treatment and Utilization, CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida, vol 1, 2, 1985

Washington State Department of Ecology, Implementation Guidance for the Groundwater Quality Standards, Publication, #96-02, 1996. 4, 1~132p.

Washington State Department of Ecology, Protecting Groundwater: A Strategy for Managing Agricultural Pesticides and Nutrients. Publication #91-42, 137p, 1992.

Washington State Department of Health and Department of Ecology, Water Reclamation and Reuse Interim Standards. Publication #93-21, 1993.

Winton, E.F., Tardiff, R.G. and McCabe, L.J., Nitrate in drinking water. J. Am. Water Works Assoc. 63:95. (1971)