

GIS를 이용한 서울시 지하수 오염분석 연구

김윤종* · 원종석* · 이석민*

Groundwater Pollution Analysis Using GIS

Youn-Jong Kim* · Jong-Seok Won* · Suk-Min Lee*

요 약

지하수는 한번 오염되면 원상복구가 어렵고 피해가 장기적으로 나타날 수 있으므로 그 관리가 아주 중요하다. 지하수 오염관리를 위해서는 오염 현황 파악과 공간적 확산 예측이 필수적이며, 이를 위해서는 GIS를 이용한 체계적인 분석이 필요하다. 따라서 지하수의 과학적 관리를 위해서는 다양한 지하수 자료들의 체계적인 데이터베이스 구축이 필수적이며, 이를 기반으로 지하수관리정보시스템에서 오염현황이 분석된 후 지하수업무와 직접 연계, 활용되어야 한다.

금번 연구는 이러한 배경 속에서 서울시 지하수관리를 위해 구축될 지하수관리 통합시스템의 지하수오염 전문분석 서브시스템을 이용하여 중구 일부지역을 대상으로 질산성질소(NO₃N)의 오염확산을 분석한 후 축척 1/5,000 오염확산예측도가 작성되었다. '96년 서울시에서는 기초조사시 1/25,000 수문지질도를 작성하였으나 이 자료로는 지역적 지하수 오염관리가 어려우며, 금번 연구를 통하여 작성된 대축척 분석도면들의 활용이 기대된다. 본 연구를 위해서 사용된 GIS시스템은 Arc/Info, Arc/View이며, 지하수분석을 위해서는 MODFLOW, MT3D가 이용되었다.

ABSTRACT: It is a well-known fact that groundwater is difficult to be recovered, once it is polluted. Since its damage may continue for a long time, its management is very much necessary. For groundwater pollution management, current groundwater quality should be analyzed and its diffusion should be estimated. Such analysis and estimation are greatly enhanced by a GIS. In order to build the GIS, groundwater information management system, various databases related to groundwater should be constructed. The system can be utilized to analyze groundwater quality and to help administrative processes of groundwater management.

* 서울시정개발연구원 지리정보연구센터(Center for GIS, Seoul Development Institute, San 4-5, Yejang Dong, Joong-Gu 100-250, (02) 726-1182)

In this study, we analyze NO_3N diffusion in the groundwater under the study area, a part of Jung-Gu area, by using groundwater analysis subsystem and create the 1/5,000 scale map for the diffusion prediction of groundwater pollution. Although Seoul Metropolitan Government has constructed the 1/25,000 scale hydrogeology map of Seoul area through basic groundwater survey in 1996, the survey data are not sufficient for local groundwater pollution management. The large scaled map constructed in this study is expected to be utilized for the management. The GIS softwares, Arc/Info and Arc/View, are used. MODFLOW and MT3D programs are extensively used to analyze groundwater pollution.

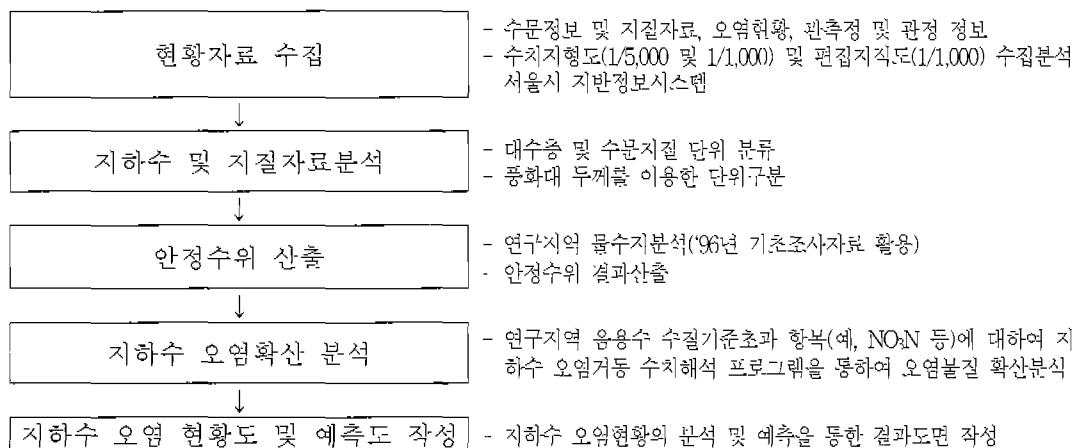
Key words: groundwater, seoul metropolitan, pollution analysis, GIS

1. 서론

국내에서는 지하수의 적극적 개발·이용에 높은 관심을 보이고 있으나, 그에 대한 보존과 오염방지에는 많은 어려움이 있다. 지하 대수층이 오염되면 이의 정화를 위해서는 많은 비용과 시간이 소요되고 오염된 지하수 사용시 인명피해도 발생할 수 있다. 지하수의 오염방지를 위해서는 잠재오염원들에 대한 철저한 조사와 관리를 통하여 그 대책을 수립하여야 한다. 이를 위하여 서울시에서는 '96년도에 지하수 기초조사를 실시하여 1/25,000 축척의 수문지질도를 작성하였으나 지역적 지하수 오염관리가 매우 어려운 실정이며, GIS를 활용하여 체계적으로 지하수의 오염현황을 분석·관리하는 것이 필요

하다. 건설교통부에서는 2001년 지하수법 개정을 통하여 지하수오염유발시설(주유소, 정화조, 세탁소, 세차장, 공장 등)들에 대한 철저한 관리 감독을 제도화하며, 지하수정보체계 구축에 대한 근거법령도 마련중이다.

이에 따라 금번연구에서는 서울시 중구 일부지역을 대상으로 질산성질소(NO_3N)에 대한 지하수 오염현황을 분석하여 1/5,000 축척의 지하수 오염확산예측도를 작성하였다. 본연구의 주요 내용은 현황자료의 수집 및 분석, 수문지질단위의 구분, 지하수 부존특성 분석, 지하수 오염확산 분석 등의 과정을 거친후 지하수오염 현황도 및 예측도를 작성하는 것으로 구성된다(그림 1). 앞으로 서울시에서는 금번연구에서 작성된 대축척의 지하수 오염현황도 및 예측분석도를 활용하여 지역적 지하수 오염관리를 체계적으로 수행할 수 있을 것이다.



[그림 1] 지하수 오염연구의 주요 분석과정

2. 연구지역의 지하수 및 지질 자료분석

2.1 지하수 현황자료

연구지역은 서울시 중구 신당동 일대이며, 이 지역의 지하수 현황파악을 위한 관정현황도는 서울시 1/1,000 편집지적도의 지면을 기초로 관정의 위치를 확인한후 1/5,000 배경도면위에서 작성되었다. 이 배경도면은 서울시 1/1,000 수치지형도를 재편집한 1/5,000 수치지형도(도폭크기: 2.2km×2.75km)가 사용되었다.

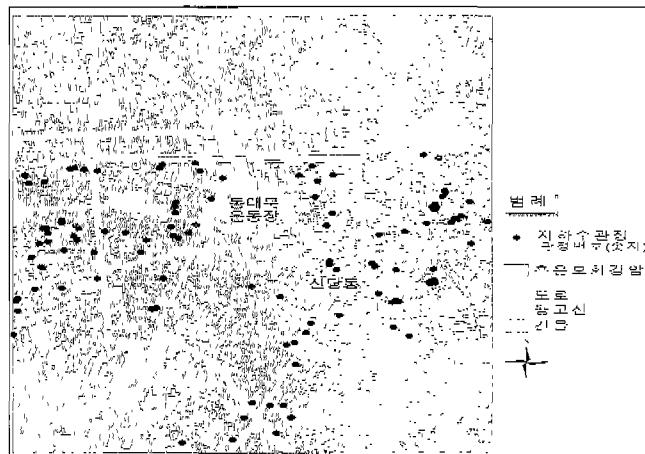
1) 지하수 관정 및 개발·이용 현황

연구지역의 지하수 관정 및 개발·이용량 분석을 위해서 지하수행정업무관리시스템인 두레

박의 '98년도 자료가 활용되었다(표 1, 그림 2). 이 지역에는 모두 117개의 지하수 개발관정이 있으며, 총 일사용량은 672m³ 로 집계되었다(99개소). 대부분은 일사용량 10m³ 미만의 소규모 관정이고(68개소) 10m³/일 이상의 관정은 총 31개소이며, 이중 100m³/일 관정은 1곳(롯데호텔)뿐이다. 관정심도는 30m 미만의 천층지하수 사용관정이 대부분이고 100m 이상의 심부지하수 사용관정은 18개소에 그치고 있다. 이는 지표수 오염에 영향을 받을 수 있는 관정이 다수 존재한다는 것을 의미하며 추후 오염원과 관정에 관한 세부적 영향조사가 필요하다. 관경은 40mm 미만의 관정이 대부분이며, 관정의 내곽를 보호하고 이물질의 유입을 차단하는 케이싱도 50%정도만이 설치되어 있는 실정이다. 이 정보들을 Arc/Info상에서 1/1,000 편집지적정보를 활용하여 GIS 자료화하였다.

<표 1> 시험연구지역의 지하수 관정현황

구 분	관 정 현 황
일사용량	· 100 m ³ /일 이상 : 1개소, 50 ~ 100 m ³ /일 : 4개소, 10~ 50 m ³ /일 : 26개소, 1~ 10 m ³ /일 : 68개소 (총 99개소임. 18개소는 일사용량이 없음)
관정심도	· 0~10m: 24개소, 10~30m: 37개소, 30~70m: 15개소, 70~100m: 24개소, 100m 이상: 18개소
관경	· 20mm 이하: 39개소, 20~30mm: 19개소, 30~40mm: 40개소, 40m이상: 19개소
케이싱 유무	· 케이싱이 있는 경우가 59개소, 없는 경우가 58개소



[그림 2] 연구지역의 지하수관정 및 지질현황

2) 지하수 수질현황

연구지역의 117개 관정중에서 수질검사를 실시한 관정은 모두 19개소이다(표 2). 이것은 현 지하수법상 청소용, 조경용, 공사용 등으로 분류 신고되는 지하수 관정들은 관리대상에서 제외되기 때문이다. 수질검사결과 모두 생활용수 수질검사기준에 적합한 것으로 판명되었으며 그 세부적인 수치는 검사항목별로 다양한 분포를 보인다. 대장균, 비소, 수은, 시안, 페놀, 유기인, 테트라클로로에틸렌 등 7개 항목은 검출되지 않았고, 중금속인 납, 6가크롬 및 카드뮴은 각각 6개소, 5개소 및 10개소에서 기준치 이하로 소량 검출되었다. 석유정제제품 등으로 인한 트리클로로에틸렌은 2개소에서 미량 검출되었고 염소이온과 질산성질소는 전체 관정에서 고루 검출이 되고 있다. 수소이온농도는 중성에서 약 알카리의 경향을 보이고 화학적 산소요구량

은 17개소에서 기준치 이하로 안정적인 측정값이 나타나고 있다. 수질검사 항목중에서 염소이온과 질산성질소가 전체 관정에서 검출되고 있으나 염소이온은 특정한 오염원을 지시한다고 보기 어려우므로, 주로 생활하수에 기인되는 질산성질소(NO₃N)에 대하여 오염확산분석을 실시하였다.

2.2 지질현황 및 수문지질단위 구분

지하수 오염확산분석을 수행하기 위해서는 지하지질에 관한 정보가 필수적이다. 지하수를 함유하고 있는 지층의 지질특성을 기준하여 수문지질단위를 구분하고 단위지역별 지하수 유동분석에 의한 안정수위를 산출한후 오염확산분석을 실시하여야 한다. 수문지질단위는 지하수권을 구분하는 기본단위이며, 지질시대, 암석의 종류, 암상, 지형, 공극의 형태, 대수층특성 등의 지질특성에 따라 세분된다(건설교통부, 1996).

<표 2> 연구지역의 수질검사 현황(단위는 mg/ℓ, 단 대장균은 MPN/100mℓ)

번호	관정번호	대장균	납	비소	수은	시안	6가크롬	질산성질소	카드뮴	페놀	유기인	테트라클로로에틸렌	트리클로로에틸렌	수소이온농도	염소이온	화학적 산소 요구량
1	643	0.000	0.086	0.000	0.000	0.000	0.024	6.900	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	6.400	78	2.120
2	647	0.000	0.042	0.000	0.000	0.000	0.000	2.500	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	7.100	12	0.000
3	679	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.800	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	6.800	32	0.000
4	696	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.600	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	6.900	22	0.380
5	727	0.000	0.018	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	6.400	37	0.580
6	728	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.800	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	6.800	58	3.720
7	746	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	13.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	7.000	53	0.990
8	754	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.600	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	7.100	11	0.200
9	767	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.018	17.700	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	6.800	32	0.400
10	775	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	7.100	31	0.790
11	779	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4.300	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	7.100	32	0.400
12	783	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.024	16.200	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	6.700	6.7	0.790
13	785	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.900	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	7.200	18	0.590
14	795	0.000	0.015	0.000	0.000	0.000	0.000	2.800	0.002	0.000	0.000	0.000	0.030	7.100	11	1.180
15	802	0.000	0.088	0.000	0.000	0.000	0.012	16.800	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	6.300	33	2.350
16	823	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	11.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	6.500	54.3	1.000
17	833	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.800	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	7.600	11	1.760
18	839	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.120	5.700	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	6.800	40	1.390
19	925	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	16.400	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	6.100	50	2.790

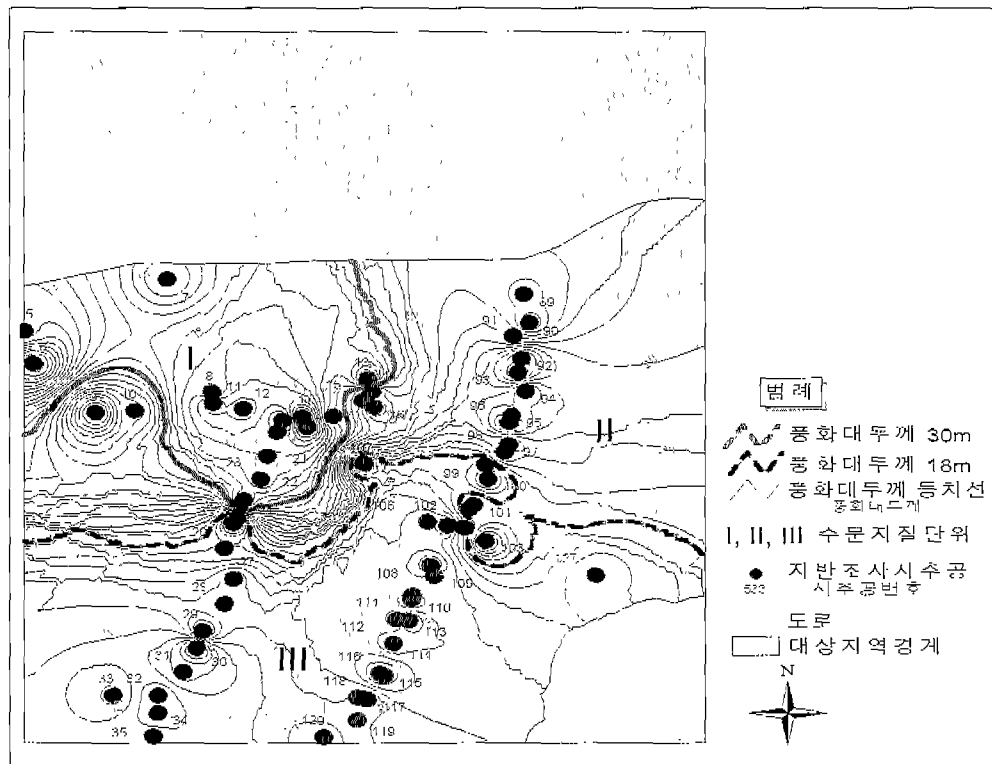
연구지역의 지질은 서울시 지반정보시스템(서울시, 1999)의 시추자료를 활용하여 분석하였다. 지질분포는 중생대 흑운모 화강암으로 대부분 구성되어 있고, 충적층의 발달은 아주 미약한 것으로 나타났다. 따라서 연구지역의 수문지질단위 구분은 흑운모 화강암을 풍화대심도, 시추코아 회수율(RQD), 절리발달상태 등에 따라 세분하는 것이 필요하다. 이를 위하여 각 시추공별 풍화대 두께를 Arc/View에 입력한후 IDW(Inverse Distance Weighting)기법을 활용하여 2m 간격의 풍화대 두께 등치선도를 작성하였으며, Natural Break 법을 이용하여 이를 3개의 등급으로 분류한후 연구지역의 수문지질단위(I: 30m이상, II: 18m~30 m, III: 18m미만)로 정하였다(그림 3).

3. GIS와 MODFLOW/MT3D를 이용한 지하수 오염확산분석

3.1 안정수위 산출을 위한 지하수 유동 분석 실시

1) 안정수위

안정수위는 지하수 물수지가 균형을 이루어 수문순환계가 파괴되지 않고 양수영향으로 인하여 지하수 장애를 일으키지 않는 범위내에서 지속적으로 대수층으로부터 양수할 수 있는 상태의 지하수위를 말한다. 연구지역의 안정수위는 지하수 오염확산분석 모델링의 가장 기본적인 입력자료이며, 지하수 유동분석을 통해서 산출된다. 이 분석을 위한 프로그램은 국내의 지하수 연구기관 및 기업체



[그림 3] 연구지역의 수문지질단위 구분도

에서 사용빈도가 높은 MODFLOW를 사용하였다.

2) 안정수위 산출을 위한 지하수 유동분석

(1) 입력정보

MODFLOW의 입력정보들은 격자단위로 입력된다. 모형의 격자구성은 연구지역의 지형과 관정현황 등을 고려하여 20~50m 내외의 격자를 구성하였다. 대수층의 두께는 지반정보시스템의 시추자료를 참고하여 수문지질단위 I구역은 60m, II구역 30m, III구역 18m로 정하였으며,

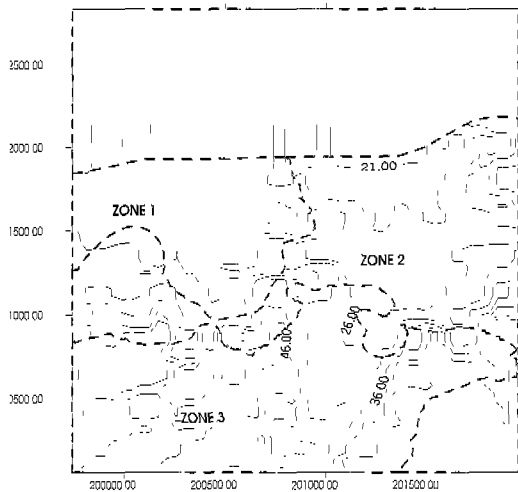
층구조는 피압/자유면 혼합대수층을 가정하여 1층구조로 구성하였다. 수리전도도는 서울지역 화강암의 수리전도도중에서 가장 높은 값을 I구역(0.0013cm/sec)에, 평균값을 II구역(0.000231cm/sec)에, 가장 낮은 값을 III구역(0.0000163cm/sec)에 부여하였다(표 3).

(2) 지하수 유동분석 결과

입력정보를 기준으로 모형의 수정과 계산을 통하여 지하수 유입과 유출간의 물수지균형을

<표 3> 지하수 유동모델링 입력자료

구 분	입력항목	내 용			비 고
		I 구 역	II 구 역	III 구 역	
격자 구성	연구지역 크기	67(열)×63(행)			한격자의 크기 : 55m ×55m, 22.5m×55m, 22.5m×22.5m
	지형	최고 124.96 m ~ 최저 17.30 m			해발고도
	대수층 두께	60 m	30m	18m	'96 기본조사 참고
	층구조	1층 구조			피압/자유면 혼합대수층 가정
수리 특성	수리전도도	0.0013 cm/sec	0.000231 cm/sec	0.0000163 cm/sec	서울지역 화강암 평균값 적용
	저류계수	비저수율(Ss) : 0.00033 m-1, 비산출율(Sy) : 0.02			'96 기본조사 참고
관정	양수정	26개 (이용량: 380m ³ /일)	58개 (이용량: 205m ³ /일)	14개 (이용량: 87m ³ /일)	'96 기본조사 참고
	관측정	3개			'96 기본조사 참고



- * 점선 : 수문지질단위 구역
실선 : 지하수위(해발고도)
- * ZONE 1 : 흑운모화강암 지역1
(풍화대심도: 30m 초과)
- ZONE 2 : 흑운모화강암 지역2
(풍화대심도: 30m미만 18m이상)
- ZONE 3 : 흑운모화강암 지역3
(풍화대심도: 18m미만)

[그림 4] 연구지역 안정수위 분포양상

맞춘 지하수 안정수위와 물수지 결과를 산출하였다. 안정수위의 양상은 지형을 반영한 양상을 보이고(그림 5), 물수지는 I 구역(ZONE 1)이 0.00 m³/일, II 구역(ZONE 2)이 +0.01 m³/일, III 구역(ZONE 3)이 -0.01 m³/일 등으로 전구역에 걸쳐 균형을 이루었다.

의 입력정보작성, 모형구성, 모형의 계산 및 수정, 예측분석 등의 과정을 거쳐 이루어진다. 시간대별 지하수 오염물질 확산에 대한 공간적인 분포계산은 5년, 10년, 15년 기간별로 계산되었으며, 질산성질소 농도의 현장측정치와 계산된 값의 비교를 통하여 수정을 거친 모형이 연구지역의 오염물질 확산 예측분석에 이용되었다.

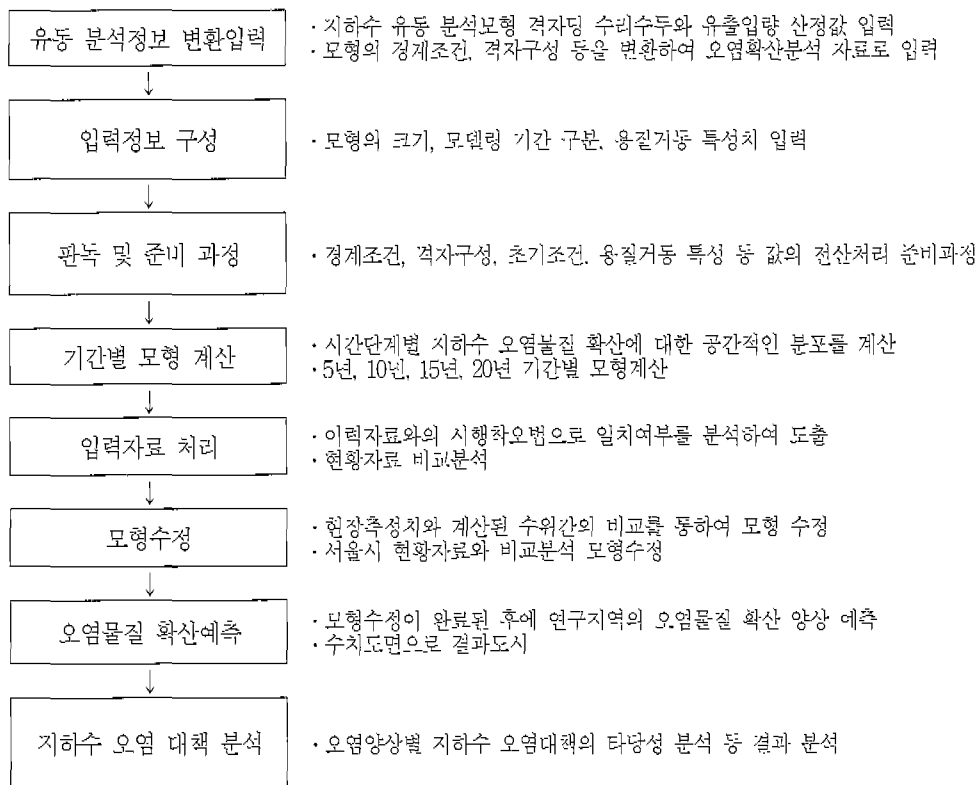
3.2 질산성질소(NO₃N)의 지하수 오염확산 분석

1) 지하수 오염확산 분석 프로세스

질산성질소(NO₃N)의 오염확산 분석을 위해 MT3D 프로그램이 사용되었으며, 이것은 오염물질이 시간에 따라 그 농도가 확산되는 양상을 예측하는 것이다. 지하수 오염확산 분석은 모형

2) 입력정보

질산성 질소(NO₃N)를 예상 오염원으로 선정하고 가상 오염유발시설(두채공장)의 위치를 결정하였으며(그림 7), 오염원의 초기농도는 5mg/ℓ로 실제자료를 입력하였다. 모델링을 위한 격자구성, 대수층의 수리특성은 앞의 지하수 유동 모델링 기본조건과 동일하며, '96년도 기초조사



[그림 6] 지하수 오염확산 분석 프로세스

자료를 활용하여 질산성질소의 분산지수(종분산지수: 0.1, 횡분산지수: 0.01)가 결정되었다(표 4). 또한 질산성질소의 농도보정을 위하여 5개 관측정을 선정하였다(표 5, 그림 7).

3) 오염확산 분석결과 및 대책

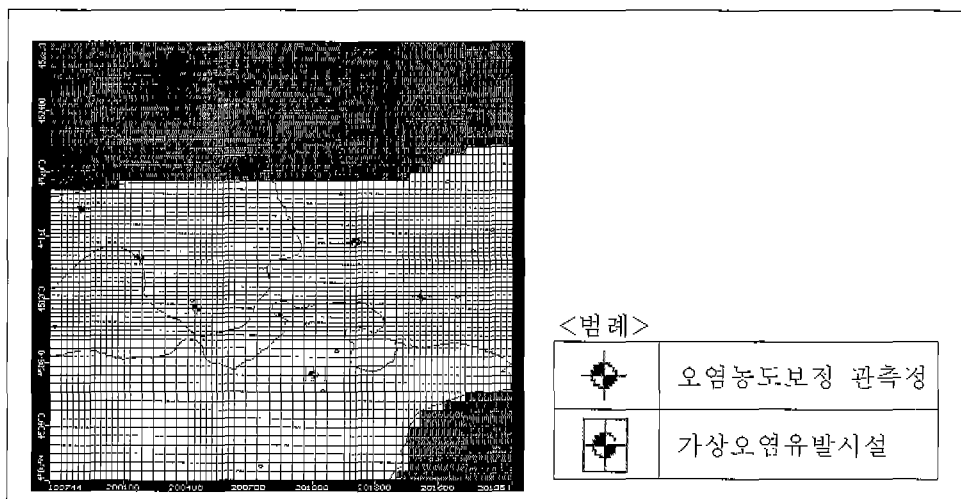
5년, 10년, 15년 이후 질산성질소의 오염확산 양상은 기상오염원(두채공장)을 중심으로 반경 약 0.5km 의 범위를 가지고 북쪽으로 확산되는

<표 4> 지하수 오염확산 모델링 입력자료

구 분	입력항목	내 용	비 고
유동모델링 기본조건	격자구성, 대수층 수리특성 등	지하수 유동 모델링의 설정과 동일	
오염물질의 거동특성	분산지수	종분산지수 : 0.1, 횡분산지수 : 0.01	· 서울지역 화강암 평균값 적용('96 기본조사 참고)
경계조건	오염원지역	오염유발가능시설을 격자 1개로 설정하고 농도는 5mg/l 로 설정	· 2000년도 오염유발가능시설 조사 결과 참조
정호	관측정	5개	· '96 기본조사 참고

<표 5> 5개 관측정의 질산성질소 농도(단위: mg/l)

번호	관정번호	질산성질소
2	647	2.500
6	728	1.800
7	746	13.000
14	795	2.800
16	823	11.000



[그림 7] 가상오염원과 오염모델링 관측정 위치

중요한 오염구역($5 \sim 6\text{mg/l}$)이 나타나고 있으며, 15년 경과 후에는 이 중요오염구역 바깥쪽으로 약 1km 간격의 0.5mg/l 농도분포를 보이는 약한 오염확산 양상이 관찰된다(그림 8). MT3D로부터 얻어진 이 분석결과를 Arc/View로 export 하여 질산성질소의 최종 오염확산예측도(그림 10)가 작성되었다.

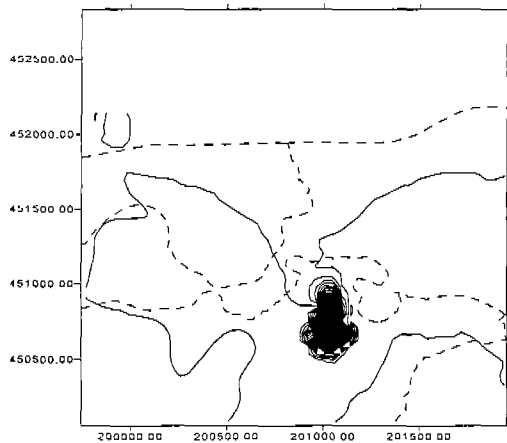
이러한 지하수 오염분석 결과는 수문지질도(주도면), 오염현황도(그림 9), 오염확산예측도(그림 10) 등의 GIS 데이터베이스로 구축되었다. 이를 토대로 시나 구청에서는 두채공장을 중심으로 지하수오염방지를 위한 시설의 설치를 명령하여야 하며(지하수법16조), 오염원인자로 하여금 정기적인 수질검사를 실시하여 시나 자치구청에 보고하

도록 조치하여야 할 것이다. 2001년 지하수법 개정안에는 막대한 지하수 오염정화비용을 오염원 인자가 부담하도록 규정하고 있기 때문에 이러한 사항들은 시급히 조치가 되어야만 할 것이다.

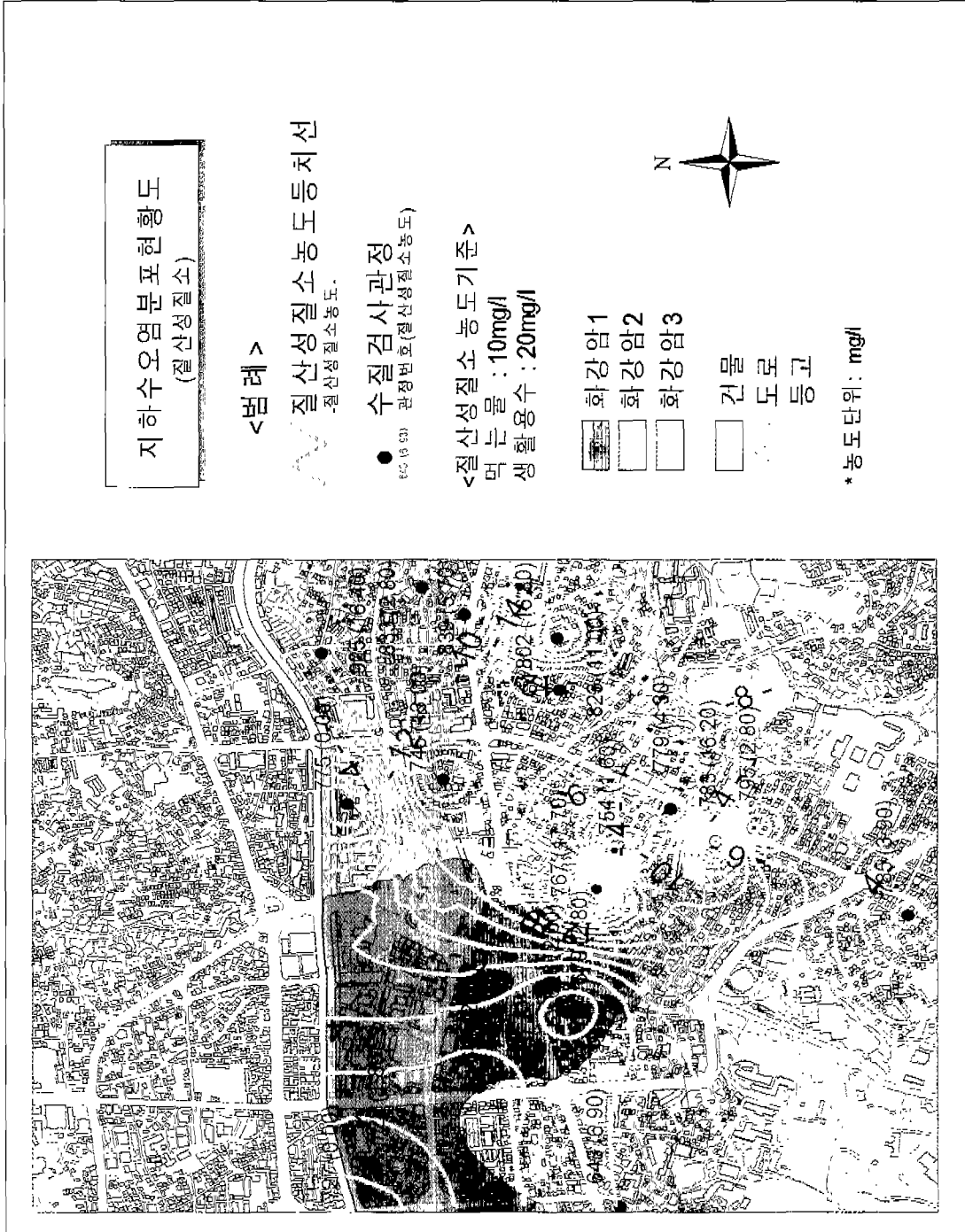
4. 결 론

지하수오염의 방지를 위해서는 체계적인 지하수정보 데이터베이스구축을 통한 오염 현황 관리와 예측분석이 필수적이다. 금번연구는 이를 위해서 GIS와 지하수 전문분석프로그램을 연계, 운영하여 연구지역의 오염확산에 대한 공간적 분석을 시행하였다. 이와같이 GIS를 이용한 지하수의 분석, 관리는 앞으로 서울시 지하수 오염관리에 적극 활용될 것이며, 지역적인 지하수관리에도 도움이 될 것이다. 따라서 추후 연구과제는 지하수오염의 체계적인 조사, 지하수오염 정보체계구축, GIS전문가시스템 개발 등이 수행되어야하며, 이를 통하여 지역적인 지하수 오염방지대책 의 수립이 가능할 것이다.

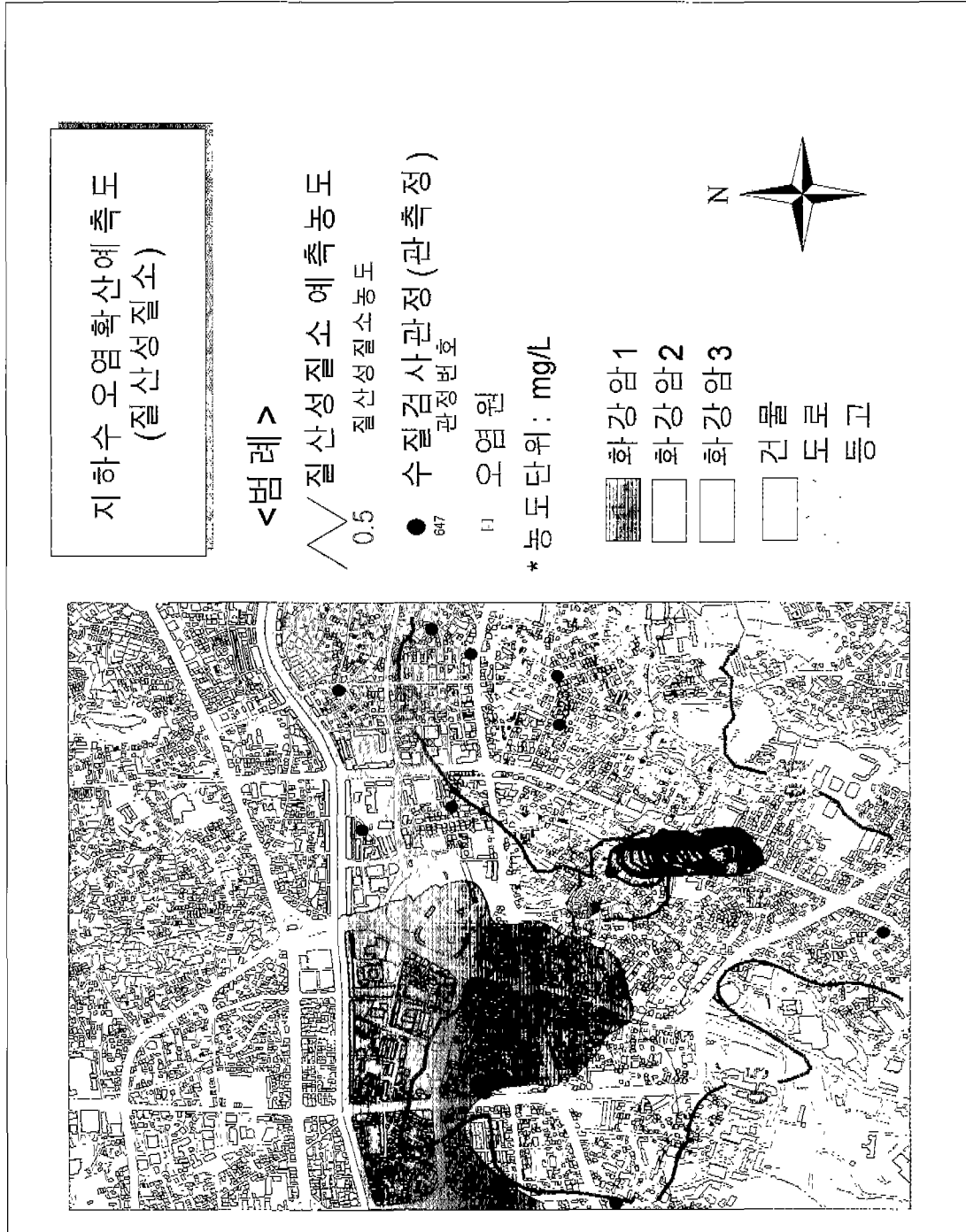
본 연구에서 실시한 지하수 오염확산분석은 5개의 관측농도와 $50\text{m} \times 50\text{m}$ 의 격자크기로 수행된 것이다. 추후 상세한 지하수오염관리를 위해서는 다수의 현장수질자료를 바탕으로 한 모형의 보정과 모형격자의 세밀화 등을 통하여 오염확산분석의 신뢰성을 높여가야 할 것이다.



[그림 7] 오염확산양상(15년 후)



[그림 9] 시범지역의 지하수 오염 현황도



[그림 10] 시범지역의 지하수 오염예측도(15년후)

참 고 문 헌

- 건설교통부, 1995, 『지하수 관리조사 보고서』
- 건설교통부, 1997, 『지하수 업무수행 지침서』
- 건설교통부, 1997, 『GIS를 이용한 지하수 채수량 분석 및 관리시스템 개발 연구』
- 건설교통부, 1998, 『GIS를 이용한 지하수 채수량 분석 및 관리시스템 개발 연구』
- 건설교통부, 1998, 『수문지질도 제작 및 작성 지침』
- 건설교통부, 1999, 『지하수 조사연보』
- 과학기술처, 1997, 『지하수 오염방지 및 응용화 기술연구(서울지역)』
- 서울시정개발연구원, 1995, 『서울시 지하수 오염방지 및 관리방안 연구』
- 서울특별시, 1996, 『서울특별시 지하수 관리계획 기본 조사보고서』
- 서울특별시, 2000, 『2000 지하수관리계획』
- 서울특별시, 2000, 『서울특별시 지하수 관측망 설치 및 운영』
- 한정상, 1999, 『지하수 환경과 오염』, 박영사
- 한정상의, 1999, 『3차원 지하수모델과 응용』, 박영사
- 김윤영, 이강근, 성익환, 1998, “서울지역의 지하수 시스템 조사: 수리특성분석”, 『지질공학회지』, 제8권, 제1호, p.51-73
- Struckmeier, W.F. and Margat, J. 1995, 『Hydrological Maps : A Guide and a Standard Legened』, International association of hydrology
- 한국수자원공사홈페이지, “수문지질도 제작현황”, warnis.kowaco.or.kr/gww/wgate_main.htm
- 미국지질조사소홈페이지, “수자원 자료”, <http://water.usgs.gov/GIS/>
- 미국환경부홈페이지, “지하수·응용수국”, <http://www.epa.gov/ow/>