

연구논문

GIS를 이용한 지하수오염 예측에 관한 연구

A Study on the Prediction of Groundwater Contamination using GIS

조시범* · 손호웅** · 이강원***

Jo, Si Beom · Shon, Howoong · Lee, Kang Won

요 旨

본 연구에서는 기존 DRASTIC 모델에 구조선밀도, 토지이용 인자 등을 추가한 수정 DRASTIC 모델을 설정하여 경기도 화남2지구의 지하수오염 가능성을 예측하고자 하였다. 2가지 인자를 추가로 설정한 이유는 우리나라의 수리지질학적 환경에서 대수층은 대부분 암반 대수층인 점을 고려할 때, 구조선밀도는 지하수 및 오염물질 유동에 직접적인 영향을 미치고, 토지이용은 점오염원 및 비점오염원의 영향을 간접적으로 반영할 수 있기 때문이다. 통계분석을 위하여 각 인자별 격자 레이어를 생성하고, 상관계수를 분석함으로써 신뢰도를 판단하였다. 최종 결과물인 지하수오염가능예측도는 “수정 DRASTIC 취약성”과 오염원의 발생 부하량 값을 논리적으로 비교함으로써 수리지질학적인 측면에서의 오염가능성 지역과 수질측면에서의 오염가능성 지역을 예측할 수 있는 방안을 제시할 수 있었다.

핵심용어 : GIS분석, DRASTIC 모델, 지하수오염, 구조선밀도, 토지이용, 지하수오염가능 예측도

Abstract

This study has tried to develop the modified DRASTIC Model by supplying the parameters, such as structural lineament density and land-use, into conventional DRASTIC model, and to predict the potential of groundwater contamination using GIS in Hwanam 2 District, Gyeonggi Province, Korea. Since the aquifers in Korea is generally through the joints of rock-mass in hydrogeological environment, lineament density affects to the behavior of groundwater and contaminated plumes directly, and land-use reflect the effect of point or non-point source of contamination indirectly. For the statistical analysis, lattice-layers of each parameter were generated, and then level of confidence was assessed by analyzing each correlation coefficient. Groundwater contamination potential map was achieved as a final result by comparing modified DRASTIC potential and the amount of pollutant load logically. The result suggest the predictability of contamination potential in a specified area in the respects of hydrogeological aspect and water quality.

Keywords : GIS analysis, DRASTIC model, groundwater contamination, lineament density, land-use, Groundwater contamination potential map

1. 서 론

근래에 들어 사회적으로 지하수의 수질문제가 대두되면서 지하수 오염 방지대책이 많이 논의되고 있으나 아직까지 지하수 오염 방지에 대한 구체적인 방안이 제시되지 못하고 있으며 일반 대중에 대한 홍보 또한 미비한 상태이다.

본 연구에서는 지하수 오염가능성 지역을 예측하고 보다 효율적인 지하수 관리를 위해서 DRASTIC 방법과 잠재오염원 발생부하량을 GIS를 이용하여 경기도 화남 2지구에 적용하여 종합오염현황도를 구축하고 지역별

지하수오염정도를 평가하였다(Rundquist *et. al.*, 1991). 한편, 기존 DRASTIC 모델에 구조선밀도, 토지이용 인자를 추가한 수정 DRASTIC 모델을 설정하여 지하수오염 가능성을 예측을 시도하였다. 구조선밀도, 토지이용의 2가지 인자를 추가로 설정한 이유는 우리나라의 수리지질학적 환경에서 대수층은 대부분 암반 대수층인 점을 고려할 때, 구조선밀도는 지하수 및 오염물질 유동에 직접적인 영향을 미치고, 토지이용은 점오염원 및 비점오염원의 영향을 간접적으로 반영할 수 있기 때문이다. 또한 통계분석을 통한 기존 모델과의 비교·분석을 수행하였으며, 이를 활용하여 지하수 오염확산을 방지하기 위

2004년 4월 20일 접수, 2004년 5월 18일 채택

* 정희원, 농업기반공사 지하수사업처 지하수자원정보화기획팀 연구원 (sibeom@karico.co.kr)

** 정희원, 배재대학교 공과대학 토목환경공학과 교수 (hshon@mail.pcu.ac.kr)

*** 종신회원, 충남대학교 토목공학과 박사과정(주)한진정보통신 GIS연구부 상무 (kwlee@hist.co.kr)

한 자료로 이용하여 국토개발에 따른 시설물 인허가를 제한할 수 있는 기반을 마련하고자 하였다.

2. 지형 및 일반지질

본 연구지역은 경기도 화성시 남양면 및 우정면 등을 포함하고 서해안과 접해있으며 Bessel 경위도좌표상 동경 126°49'00", 북위 37°10'00"에 위치한다.

그림 1은 연구지역의 지질도로서 연구지역 전역에 걸쳐 변성암류가 넓게 분포하고 있음을 보여주고 있으며, 반상변정질편마암, 화강암질편마암, 백운모편마암, 흑운모편마암 및 규암을 협재하는 상부편암 등으로 구성되어 있다. 이중 상부편암은 북동에서 남서방향으로 길게 분포하고 남쪽으로 가면서 넓게 분포하며, 운모편암, 석영편암, 각섬석편암으로 구성된다. 화강암질 편마암은 중동부와 북부에 분포하며 반상변정질 편마암이 박층으로 협재되어 있기도 하며, 곳에 따라 높은 지대에 운모편암이 소규모로 덮여 있기도 한다. 백운모편암은 대부분이 백운모로 구성되나 간혹 흑운모편암, 석영편암, 결정질 석회암 및 석회규산염암이 박층으로 협재되어 습곡에 의해 반복되어 나타난다. 시대미상의 화성암류로는 각섬암과 남양화강암으로 구성되며, 남양화강암에 대비되는 흑

운모화강암의 생성시기는 주라기로 판명되었다. 각섬암은 팔탄면 창곡리에 소규모로 분포하며 변성암류를 관입하고 있다. 남양화강암 및 흑운모화강암은 남양면, 비봉면 일대에 분포하며, 암체의 남부는 편마암상 구조를 보여주는 반면, 암체의 북단에는 흑운모화강암의 양상을 보여준다(김동학 등, 1979; 오인섭 등, 1973; 이변주 등, 1993).

본 연구지역은 하나의 큰 유역(Watershed)이지만 세부적인 조사를 위하여 그림 2와 같이 수리수문학적 지형분석에 의해 11개의 소유역으로 구분하였다.

3. 오염취약성 평가

DRASTIC이란 일정한 지역에서의 지하수오염가능성(Groundwater Pollution Potential) 평가 방법으로서 1987년 미국 환경청(EPA)과 지하수협회(NGWA)의 전신인 국립정호협회(NWWA)에 의하여 개발된 모델이다(EPA-600/2-87-035). 이 방법은 수리지질학적 조건하에서 지하수의 오염취약성에 관한 체계적인 평가를 제공하기 위한 수단으로서, 평가항목인 7개 인자(parameter)의 머리 글자(initial)로 구성되어 있다. 즉,

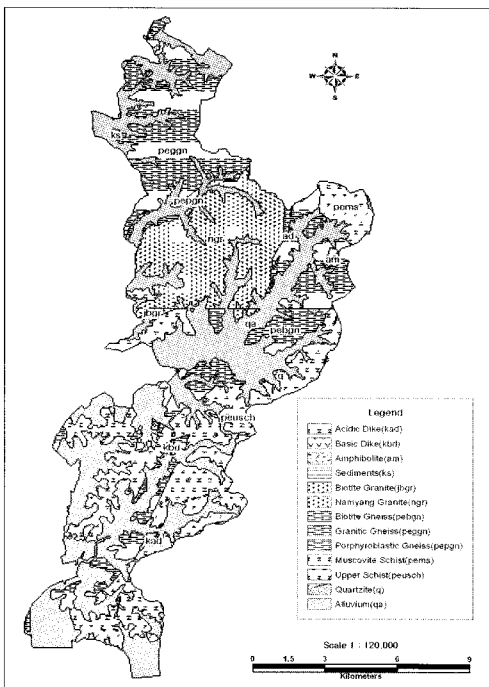


그림 1. 연구지역의 지질도

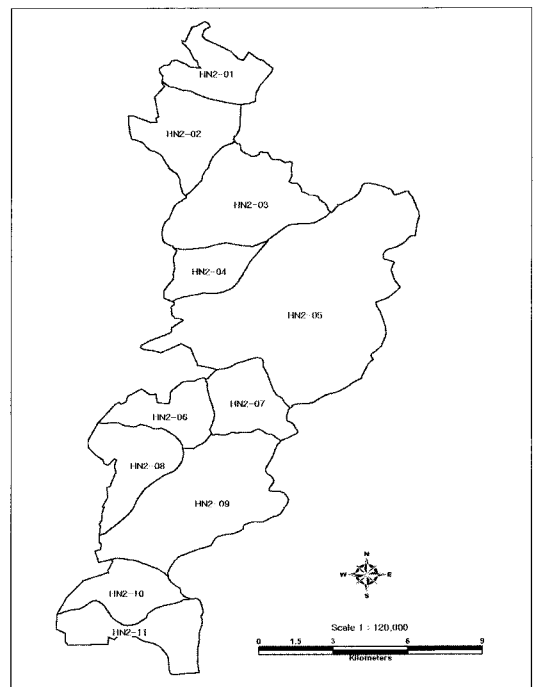


그림 2. 소유역 구분

- D - Depth to water-table(지하수면 깊이)
- R - Recharge to the aquifer(순수 함양량)
- A - Aquifer media(대수층 매질)
- S - Soil media(토양매질)
- T - Topography(slope: 지형경사)
- I - Impact of vadose(unsaturated) zone(비포화대 매질)
- C - Conductivity(hydraulic) of the aquifer(대수층의 수리전도도) 등이다.

이러한 인자들은 지하수오염에 영향을 미치는 중요도에 따라서 가중치가 설정되어 있으며, 각 인자들은 여러 범위로 세부화 되어져 각각의 범위에 따른 등급이 설정되어져 있다(Aller *et. al.*, 1987). 또한, DRASTIC 모델은 다음과 같은 몇 가지 기본 가정에 근거한다.

- 첫째, 오염원은 지표에 존재한다.
- 둘째, 오염물질의 지하유입은 강수량에 의존한다.
- 셋째, 오염물질은 물과 같은 유동성을 갖는다.
- 넷째, 평가지역은 0.4Km²(100 acres) 이상이어야 한다.

3.1 지하수위

우리나라에서 관정은 대부분 충적층에 분포하고 있어 본 연구지역 전체를 포함하기 위해서는 산악지역에 대한 지하수위를 추정해야 한다. 따라서 충적지역에서 270여

개의 관정에 대한 지하수위를 측정하였고, 산악지역에 대한 지하수위는 충적층 지역의 관정에서 갈수기와 풍수기에 조사한 자연수위와 해발고도와의 상관분석(그림 3)에서 유추된 회귀방정식의 평균값을 이용하여 다음과 같은 식을 산정하였다.

$$Y = 0.9633X - 4.0822 \quad (1)$$

$$DTG = X - Y \quad (2)$$

여기서, DTG는 지하수위(Depth to Groundwater), Y는 수두, X는 표고이다.

본 연구지역에서 지하수면의 깊이에 대한 DRASTIC 방법의 등급분류 결과, 표 1과 같이 6개의 등급(2, 3, 5, 7, 9, 10)으로 나눌 수 있는데, 9등급이 53.55%의 면적 비로 가장 넓게 분포하고, 10등급이 34.43%, 7등급이 11.05% 등 전반적으로 오염가능성이 매우 높게 나타나고 있다(그림 4).

3.2 순수 함양량

순수 함양량(net charge) 산정은 물수지방법(함양량 = 강우량 - 유출량 - 증발산량)을 적용하였는데, Thiessen 방법(Thiessen, 1911) 및 TIN(Triangular Irregular Network) 방법에 의해 소유역별 강우량을 산정하였고, 지표 유출

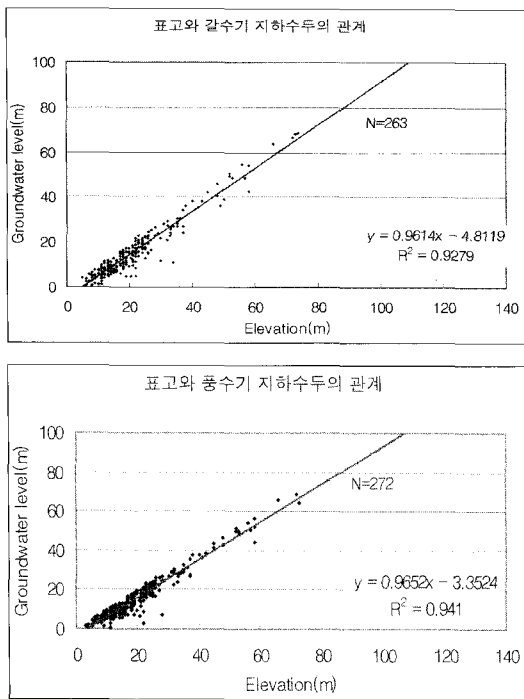


그림 3. 표고와 지하수두의 상관도

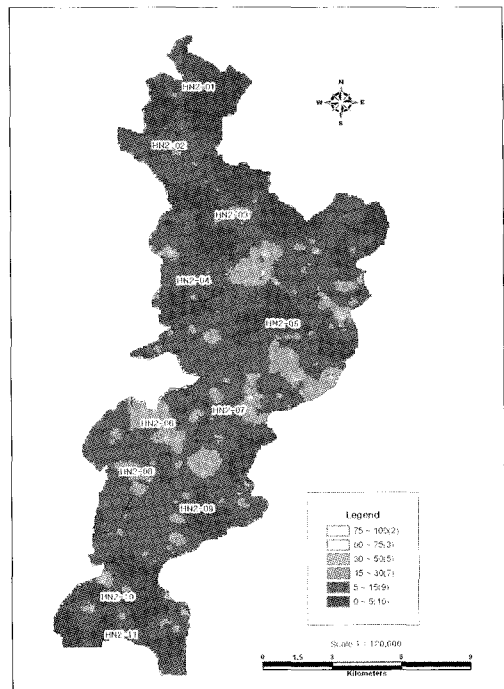


그림 4. 지하수 깊이 등급도

량은 SCS-CN 방법(Soil Conservation Service, 1972)을 그리고 증발산량은 Penman-Monteith의 경험식(Penman, 1994; 선우중호, 1983)을 이용하였다.

결과적으로 일반적인 DRASTIC 기준에 의하면 조사 지역내 함양량은 10인치 이상인 9등급으로 나타났다(표 1, 그림 5). 이는 조사지역이 지형특성상 해안가에 위치하고 있어서 강우량이 내륙지역에 비해 많고, 지형경사가 완만하기 때문인 것으로 판단된다.

3.3 대수층 매질

대수층 매질(aquifer media)에 대한 자료는 1/50,000 축척의 지질도를 이용하였는데 크게 3가지 즉, 충적층(8 등급, 40.46%), 풍화된 변성/화성암(4등급, 36.64%), 변성/화성암(3등급, 22.9%)으로 구분된다(표 1, 그림 6).

표 1. 연구지역에서의 기존 DRASTIC 평가인자의 등급, 면적비 및 범위

인자 (parameter)	등급	면적비 (%)	범위
지하수면 깊이(m)	2	0.02	75 - 100
	3	0.10	50 - 75
	5	0.86	30 - 50
	7	11.05	15 - 30
	9	53.55	5 - 15
	10	34.43	0 - 5
순수함양량	9	100.00	over 250 mm/y
대수층 매질	3	22.90	Metamorphic/Igneous Weathered
	4	36.64	Metamorphic/Igneous Sand and Gravel
토양매질	2	4.52	Muck
	4	18.90	Silty Loam
	5	59.26	Loam
	6	17.03	Sandy Loam
	9	0.22	Sand
	10	0.06	Thin or Absent
지형경사(%)	1	31.75	> 18
	3	5.74	12 - 18
	5	8.37	6 - 12
	9	9.30	2 - 6
	10	44.83	0 - %
비포화대 매질	6	45.97	Metamorphic/Igneous
	8	54.03	Sand and Gravel
대수층의 수리전도도	1	9.55	1 ~ 100
	2	5.35	100 ~ 200
	4	32.67	200 ~ 300
	8	52.43	700 ~ 2,000

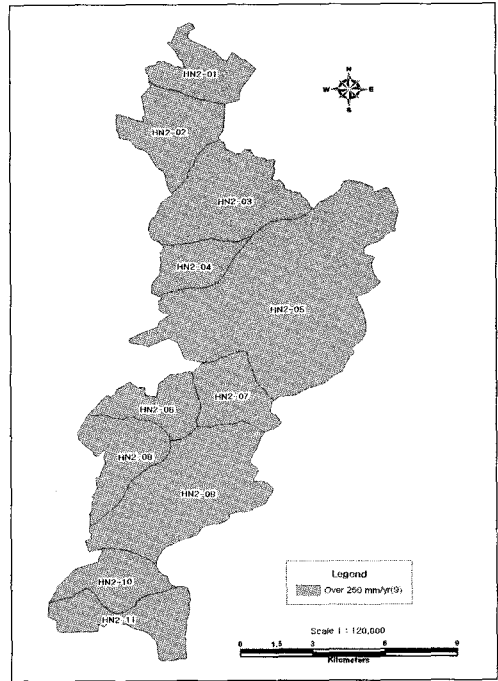


그림 5. 순수함양량 등급도

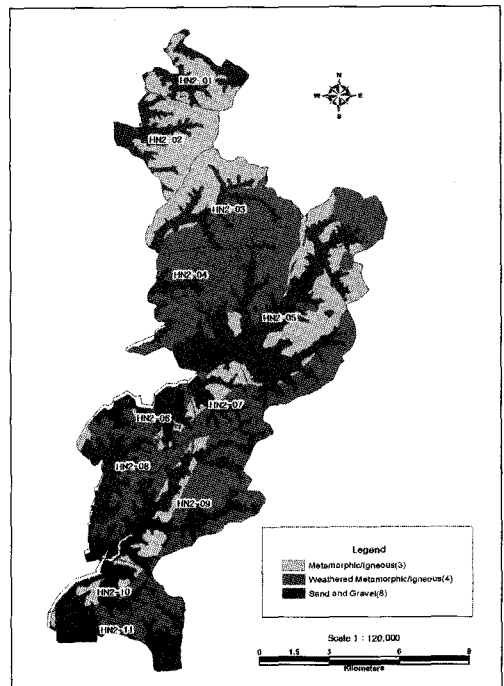


그림 6. 대수층매질 등급도

3.4 토양 매질

연구지역의 토양 매질(soil media)은 1/25,000 축척의 정밀토양도를 이용하여 DRASTIC 기준에 따라 등급과 가중치를 적용한 결과, 양토(loam)가 59.26%(등급 5)로서 가장 넓은 분포를 이루고 있고, 실트질 양토(silty loam), 사양토(sandy loam)가 각각 18.90%, 17.03%의 분포를 이루고 있다(표 1, 그림 7).

3.5 지형경사

지형 경사는 수치표고모델(DEM)을 이용하여 경사를 백분율로 계산하였는데 등급이 10, 1인 지역이 각각 44.83%, 31.75%로 가장 많이 분포하고 있어 지역별 등급차이가 매우 크게 나타나고 있다(표 1, 그림 8).

3.6 비포화대 매질

Cullen *et al.*(1992)은 비포화대(vadose zone)를 토양층 직하부에서 최상부 대수층 사이의 지층으로 정의하고 있으나, 본 연구에서는 기초 자료의 부족으로 인하여 지질도를 이용하여 DRASTIC 모델의 기준에 적용하였는데 크게 변성/화성암(등급 6, 45.97%)과 충적층(등급 8, 54.03%)으로 구분하였다(표 1, 그림 9).

3.7 대수층의 수리전도도

본 조사지역내 수리전도도는 39개 대표지점에서 각종 수리시험(양수시험, 순간수위시험, 침투율조사) 결과를 소유역별 대표등급을 적용한 결과 등급 8($3.3 \times 10^{-4} \sim 4.7 \times 10^{-4} \text{m/s}$)이 52.43%로서 가장 넓은 면적비율을 보이고 있다(표 1, 그림 10)

3.8 일반적인 DRASTIC 평가

본 조사지구내 “일반 오염 취약성도”(General DRASTIC Pollution:이하 GDP)를 확률밀도곡선에서 등면적 비율에 의해 3단계로 분류하여 그림 11과 같이 도표화하였으며, 이중 GDP가 178 이상인 경우가 HN2-01 유역에서 45.9%로 가장 넓은 분포를 이루고 있고, HN2-05 유역이 34.5%, HN2-02 유역이 31.6%의 순으로 나타나고 있어, 이들 지역은 다른 지역에 비해 상대적으로 높은 수리지질학적인 오염가능성을 보이고 있다(그림 12).

한편, 기존 DRASTIC 모델에 구조선밀도, 토지이용 인자를 추가한 수정 DRASTIC 모델을 설정하여 지하수 오염 가능성을 예측을 시도하였다. 구조선밀도, 토지이용의 2가지 인자를 추가로 설정한 이유는 우리나라의 수리지질학적 환경에서 대수층은 대부분 암반 대수층인 점을 고려할 때, 구조선밀도는 지하수 및 오염물질 유동에 직접적인 영향을 미치고, 토지이용은 점오염원 및 비점

오염원의 영향을 간접적으로 반영할 수 있기 때문이다. 또한 통계분석을 위하여 각 인자별 격자 레이어를 생성하고, 상관계수를 분석함으로써 신뢰도를 판단하였다.

3.9 토지이용

토지이용도(land-use)는 농업과학기술원에서 제작된 수치지도양도의 속성내역 중 토지이용 항목을 이용하여 8개 그룹으로 분류하였고, 미국 남동부 델라웨어 지역에서 지하수오염 취약성 평가를 위해서 Barry *et al.*(1990)이 제시한 표 2의 토지이용 분류에 대한 범위와 등급을 적용한 결과, 그림 13과 같이 나타났다.

3.10 구조선 밀도

구조선밀도(lineament density) 분석은 기반암에서 지하수 유동이 주로 파쇄대를 통하여 이루어지고 있는 우리나라와 같은 수리지질학적인 환경에서는 매우 중요한 인자이다(한정상, 1980; 한정상 등, 1994). 구조선은 높은 투과성의 파쇄대나 암맥과 같이 잠재적인 지하수 유동의 경계요소(flow barrier)로 작용하는데(Sander *et al.*, 1997), 일반적으로 알려져 있는 사실과는 달리 긴 파쇄대는 점토광물화(clay mineralization) 때문에 누수가 잘 일어나지 않을 수 있는 반면에 상대적으로 작은 파쇄대는 상당히 높은 투과율과 대규모 누수 문제를 일으킬 수도 있다(Banks *et al.*, 1993). 따라서 구조선의 분류는 구조선의 길이에 따른 수리지질학적인 특성의 변이에 의해서 매우 복잡해지며 궁극적으로는 같은 특징에 대해서 다중분류가 필요하다(Wise, 1983).

본 연구지역에서의 구조선밀도 분석은 지질도폭상의 구조선, DEM, Landsat TM 그리고 SPOT 등의 위성영상자료를 이용하여 분석하였는데, DEM 및 위성영상자료를 이용하는 주요 목적은 광역적인 구조선을 빠르고 손쉽게 구별할 수 있다는 점과 사람이 탐지하기 어려운 지역도 쉽게 구분할 수 있기 때문이다. 그러나 위성영상 자체의 기계적, 물리적 오차 등의 문제점은 여러 가지 보정을 통하여 해결해야 한다.

본 조사지구에서는 단지 파쇄대내에서 대수층내 오염물질 유입 가능성과 파쇄대는 모두 투수율이 좋다는 가정 하에서 구조선밀도를 산정(식 3)하였고, 이를 등간격으로 10등급화하여 DRASTIC에 적용하였다.

$$Density(\rho) = \frac{(L_1 * V_1) + (L_2 * V_2)}{A} \quad (3)$$

여기서, L_1 , L_2 는 원안의 각 선의 길이이며, V_1 , V_2 는 L_1 , L_2 의 대응값이며, A 는 원의 면적이다.

결과적으로 그림 14와 같이 조사지역내 HN2-03인 소

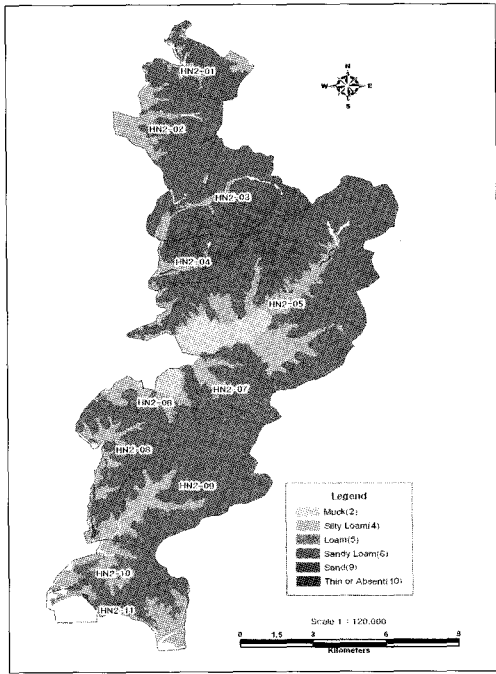


그림 7. 토양매질 등급도

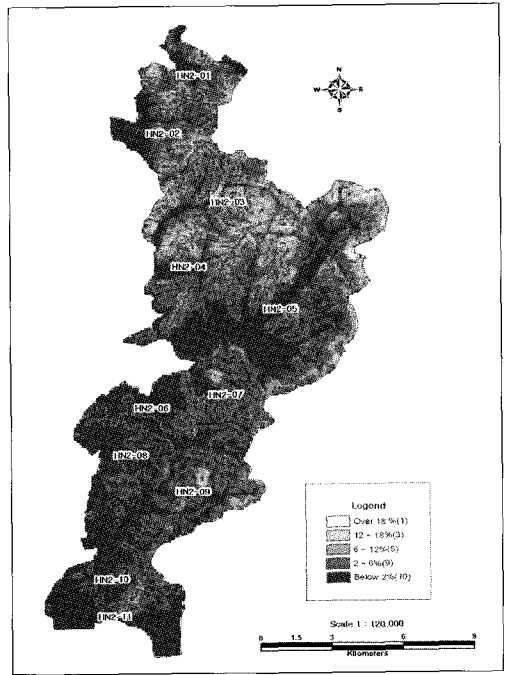


그림 8. 지형경사 등급도

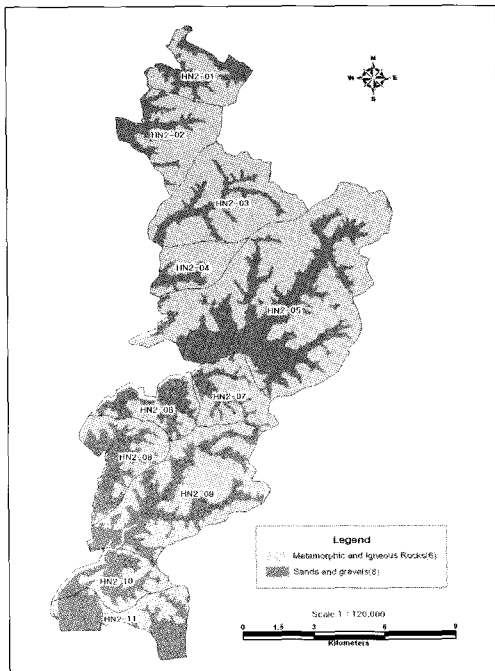


그림 9. 비포화대 매질 등급도

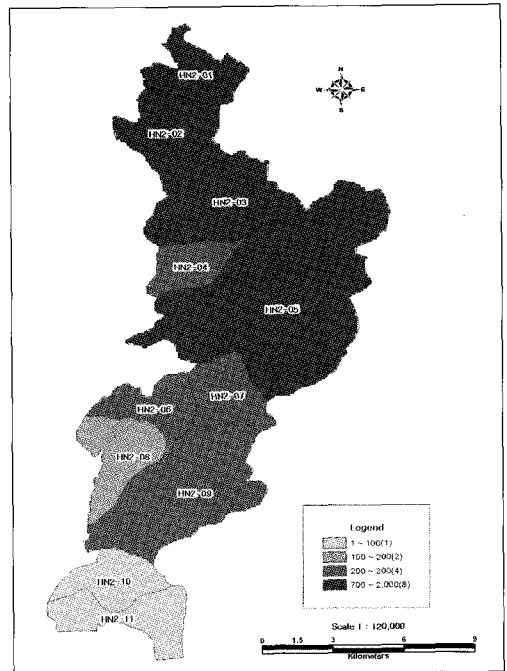


그림 10. 대수층의 수리전도도 등급도

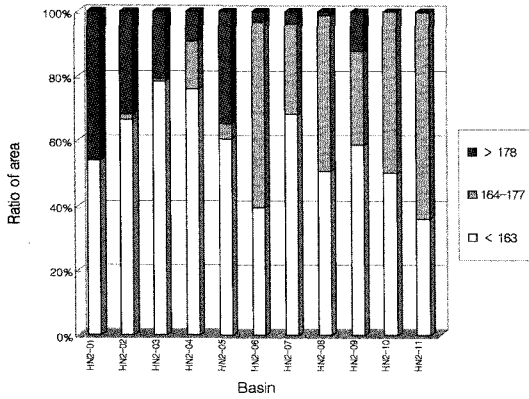


그림 11. 일정범위의 GDP 면적비율 히스토그램

유역에서 가장 큰 구조선밀도가 나타나고 있는데, 이곳은 실제로 지질도상에서 큰 단층이 지나가는 곳이다. 소유역 HN2-09의 동부지역도 마찬가지로 지질도상의 큰 단층의 연장선지역으로써 밀도가 매우 크게 나타나고 있다.

3.11 수정 DRASTIC 평가

부가 인자를 첨가한 수정 DRASTIC 모델을 설정하여 이를 연구지역에 적용한 이유는, 첫째, 일반적인 DRASTIC 모델에서 각 인자별 자료층 구축시, 나타날 수 있는 범위 및 등급 설정에 대한 오차의 분산을 줄이기 위함이고, 둘째, 우리나라의 경우 지하수는 거의 암반 지하수이므로 오염물질의 유동에 있어서 구조선은 매우 중요한 역할을 하므로, 구조선 밀도는 지하수오염가능성 평가시 반드시

표 2. 토지이용 분류 및 등급 (Barry et al., 1990)

Range	Rating
Landfill/dump, Industrial waste disposal	10
Agricultural land, Auto junkyard/salvage	9
Quarries/gravel pits, Other surface mining, Wastewater spray irrigation, Confined feedlots	6
Unconfined feedlots, Miscellaneous urban	5
Golf course, High-density residential	3
Medium-density residential, Seasonal Trailer park	2
Low-density residential, Wastewater treatment plant	1
All other	0

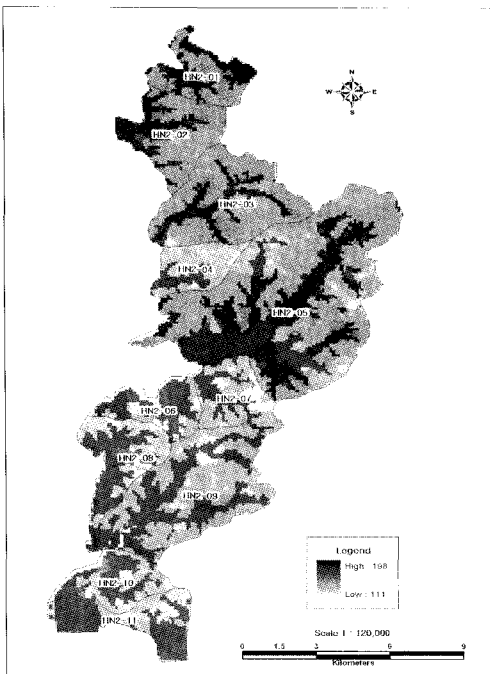


그림 12. 일반적인 지하수오염취약성도

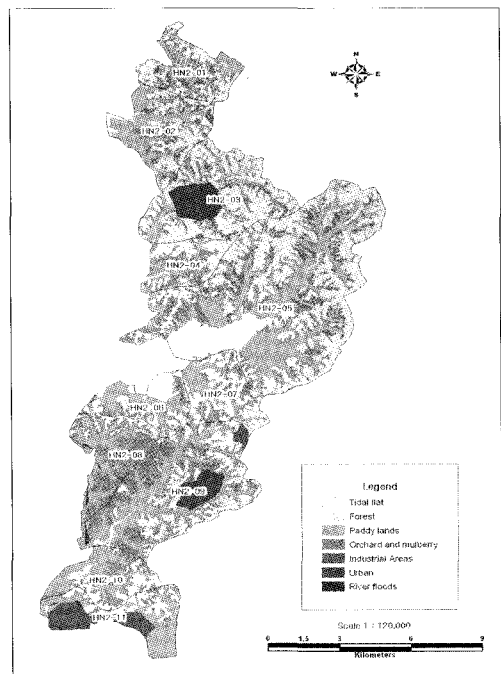


그림 13. 토지이용 분류도

필요한 인자이며, 토지이용은 점 혹은 비점 오염원의 영향을 간접적으로 반영할 수 있다는 점에서 두 인자 모두 중요하다고 판단되며, 셋째, 분산계수가 줄어들어서 자료의 신뢰성이 높아지고, 또한, 지하수 오염 가능성이 높은 지역을 구체적으로 나타낼 수 있기 때문이다.

상기한 “일반적인 DRASTIC 평가” 방법에 토지이용 및 구조선밀도를 추가한 “수정 DRASTIC 평가”를 “일반적인 DRASTIC 평가” 방법과 같은 방법으로 구한 결과(그림 15), “수정 오염 취약성도”(Modified DRASTIC

Pollution: 이하 MDP)가 180~234 사이에서 면적대비가 가장 넓은 분포를 이루는 곳은 HN2-03 유역(60%)이고, HN2-05 유역은 48%, HN2-02 유역은 40%의 순으로 넓은 분포를 보이고 있다.

4. 부가인자 사용의 타당성 검토

인자들의 가중치 적용 여부에 상관없이 분산계수(Coefficient of Variance)는 인자의 수가 증가함에 따라 감소하는 경향이 있다. 따라서 DRASTIC이 많은 인자들로 구성되어 있다는 점은 적은 수의 인자 사용시 발생하는 결과값의 변이성과 개별 인자들에 대한 잘못된 판단의 영향을 제한할 수 있는 선호적인 특성이라고 할 수 있다 (Rosen, 1994).

조시범 등(1999)에 따르면 일반적인 DRASTIC과 수정 DRASTIC의 분산계수를 비교해 본 결과, 약 0.02 차이를 보이고 있는데, 이는 수정 DRASTIC을 사용할 경우가 일반적인 DRASTIC을 사용했을 경우보다 보다 더 구체적인 지하수오염평가가 가능하여 판단오류를 상대적으로 줄이고 보다 신뢰성 있는 결과를 유추할 수 있다는 것을 의미한다.

5. 지하수오염예측 평가

5.1 작성방법

그림 16은 지하수오염가능 예상지역을 구분하기 위한 모식도로서 지하수 유동 및 오염물질 거동에 영향을 미치는 여러 인자들 중, 대표성 있는 주요 오염인자들에 대해 발생원단위 부하량을 산정하고, 이를 100^m×100^m 격자모양으로 세분화하여 이를 표 3의 기준에 의거 수정 오염취약성도와 더불어 9가지로 분류함으로써 수리지질학적 혹은 오염부하량에 따른 취약지구를 유추할 수 있는 최종적인 지하수오염가능예측도(그림 17)를 작성하였다(Rundquist *et. al.*, 1989).

표 3은 수정 오염취약성도(MDP)와 측사, 인구, 토지이용에 따른 총부하량(본 연구에서는 생화학적 산소요구량(BOD)만을 이용)과의 관계를 나타낸 표로서 MDP의 A, B, C 등급과 부하량의 a, b, c 등급 분류기준은 확률밀도곡선에서 등면적 기준에 의한 것이다. 이는 지하수오염취약성 지역이 오염부하량 때문인지 혹은 수리지질학적 환경 때문인지 판단할 수 있도록 분류한 것이다(Kalinski *et. al.*, 1993).

5.2 결과분석

본 조사지역의 지하수오염가능예측도 수정 DRASTIC

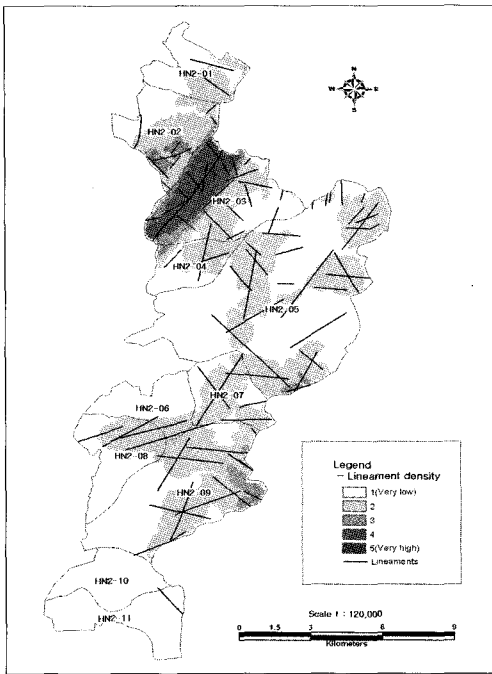


그림 14. 구조선밀도 현황도

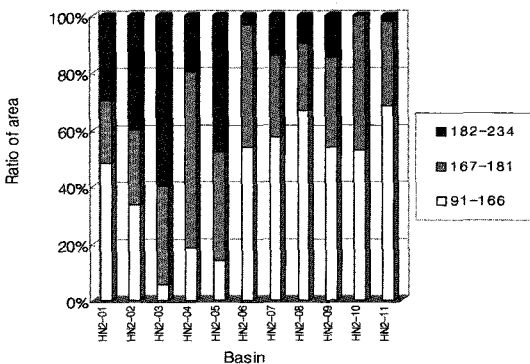


그림 15. 일정범위의 MDP 면적비율 히스토그램

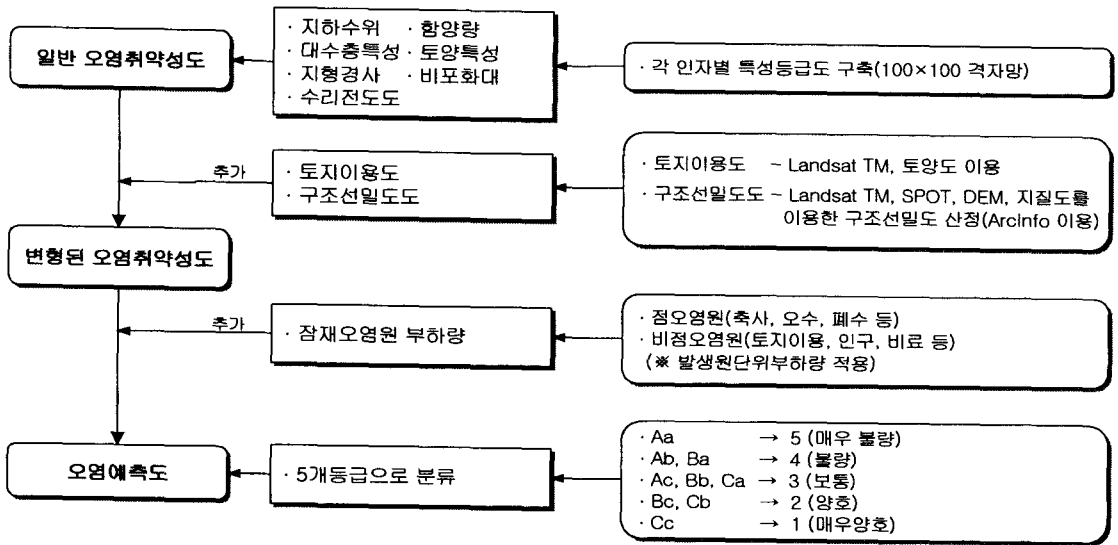


그림 16. 지하수오염가능 예상지역 구분을 위한 모식도

에 축사, 인구, 토지이용에 대한 부하량을 논리비교하여 9개의 분류로 나타내었고, 각 분류는 상대적인 평가를 위한 것이다.

결과적으로 수정 오염취약성도와 오염부하량(BOD)을 중첩한 결과, 소유역 HN2-01인 경우 Cc가 36.3%로 가장 넓은 분포를 이루고 있고, 소유역 HN2-02인 경우는 Ab와 Cb가 각각 29.6%와 28.2%, HN2-03인 경우는 Aa가 34.8%, HN2-04인 경우는 Bb가 5.08%, HN2-05인 경우는 Ac와 Bc가 각각 29.9%와 28.6%, HN2-06인 경우는 Ca와 Ba가 각각 53.7%와 43.0%, HN2-07인 경우는 Cb가 39.5%, HN2-08인 경우는 Cb가 29.9%, HN2-09인 경우는 Cc가 23.9%, HN2-10인 경우는 Bb가 31.8%, HN2-11인 경우는 Ca가 36.3%로써 각각의 소유역별 가장 넓은 분포면적을 차지하고 있다.

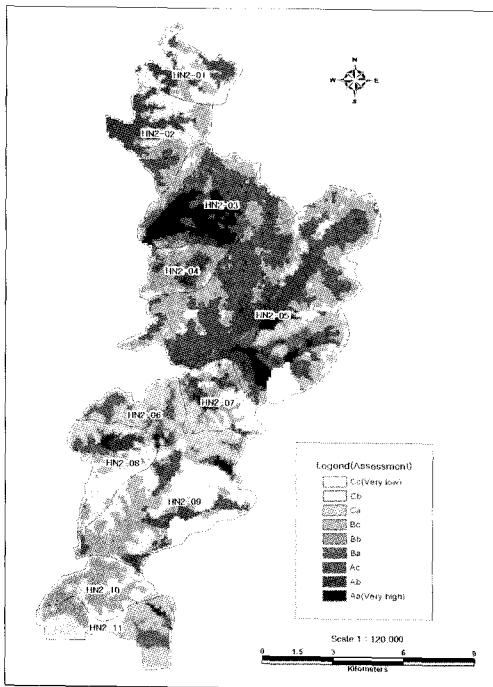


그림 17. 지하수오염가능 예측도

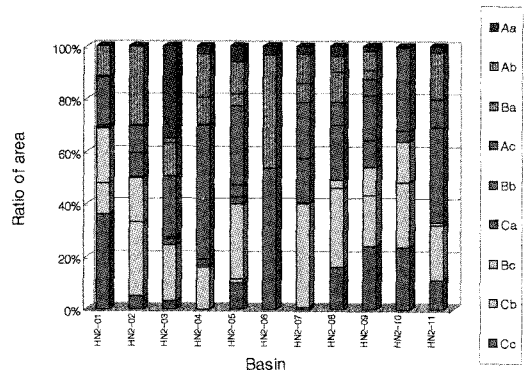


그림 18. 소유역별 지하수오염가능예측 면적비율 분류 히스토그램

표 3. 지하수오염가능 예측도 등급분류표

수정 오염취약성도	오염부하량 (BOD)	단위면적당 오염부하량		
		a(높음)	b(보통)	c(낮음)
		> 14	8-14	< 8
A(높음)	178-234	Aa	Ab	Ac
B(보통)	164-177	Ba	Bb	Bc
C(낮음)	81-163	Ca	Cb	Cc

그림 17~18을 고려해볼 때 지하수관리 주요대상인 지역은 소유역 HN2-03인 지역으로서 구조선이 발달되어 있고 잠재오염원 및 오염부하량도 크게 나타나고 있는 바, 향후 국토개발에 따른 시설물(특히 오염원) 인허가 시 신중한 주의를 기울여야 할 것이다.

반면에 소유역 HN2-01과 HN2-09 지역은 지하수 오염가능성이 가장 낮게 나타나서 향후 시설물의 건설에 가장 적합한 지역으로 추정된다. 소유역 HN2-02의 서쪽 부근과 HN2-06, HN2-07 상부, HN2-11의 동쪽부근은 관심대상으로서 국토개발에 따른 토지이용 및 시설물 건설 시 주의가 요구된다.

그림 18은 표 3에 근거하여 만들어진 지하수오염 예측 분류 히스토그램으로서 일반 DRASTIC(그림 11)과 수정

DRASTIC(그림 15)을 상호 비교해보면, 소유역 HN2-08~11인 지역에서 Aa가 상대적으로 많이 나타남으로 인해 이들 지역의 오염부하량이 큰 비중을 차지하고 있다고 볼 수 있다.

5.3 수질검사 자료와의 비교 · 검토

그림 19에서 NO₃-N(질산성질소)은 우리나라 “먹는 물” 기준인 10mg/l 이상인 지역만을 표시하였고, pH(수소이온농도)는 전반적으로 4.0~7.5 사이의 값이 나왔는데 다소 위해한 4.0~5.0 범위의 값만을 나타냈으며, EC (Electric Conductivity: 전기전도도)는 1000µS/Cm 이상인 값을 표시함으로써, 실측자료에 근거한 지하수오염 현황과 상기 서술한 모델인 지하수오염가능 예측도와와의 관계를 알아보고자 하였다.

그 결과 전반적으로 EC는 서해안 근처에서 높게 나타났고, NO₃-N은 본 조사지역이 농촌이라는 점을 고려했을 때 소수의 관점에서 먹는물 수질기준을 초과한 것으

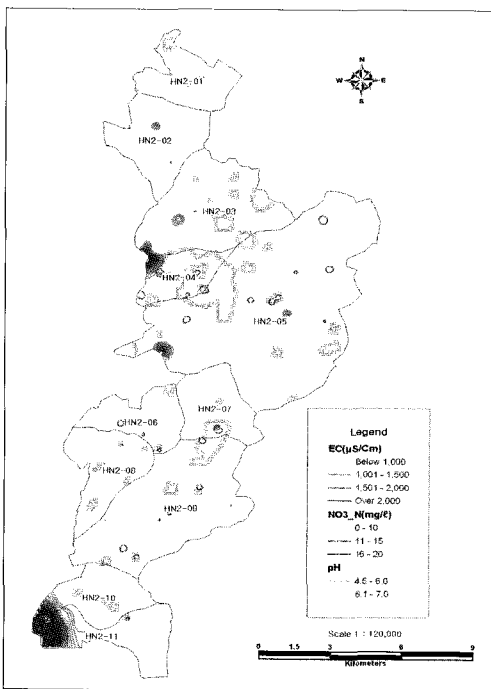


그림 19. 수질(EC, NO₃-N 및 pH) 중첩현황도

표 4. 소유역별 잠재오염원 분포현황

유역	잠재오염원(개소수)				
	축사	주유소	폐수시설	오수시설	매립장
계	475	23	74	162	2
HN2-01	13	-	-	-	-
HN2-02	22	-	-	-	-
HN2-03	63	4	6	36	-
HN2-04	65	-	1	1	1
HN2-05	117	9	35	58	-
HN2-06	25	-	1	-	-
HN2-07	26	-	6	5	-
HN2-08	52	1	-	-	-
HN2-09	63	5	21	45	-
HN2-10	19	1	3	3	1
HN2-11	10	3	1	14	-

로 나타났다. 특히 HN2-04 유역은 EC 및 NO₃-N이 매우 높고, pH가 낮아 먹는물 수질기준을 초과하고 있는 것으로 나타났다. 현장조사 결과, 이 지역은 축사가 밀집되어 있어 보다 체계적인 관리방안이 수립되어야 할 것이다. HN2-07 유역과 HN2-09 유역 경계부근에서도 NO₃-N 및 pH가 먹는물 수질기준을 초과하는 것으로 나타났다. 표 4는 각 유역별 잠재오염원 분포현황을 나타낸 표로서 HN2-03, HN2-04, HN2-05, HN2-09 유역에서 잠재오염원이 타 유역에 비해 상대적으로 많이 분포하는 것으로 나타났다.

6. 결 론

본 연구에서는 지하수 오염가능성 지역을 예측하고 보다 효율적인 지하수 관리를 위해서 DRASTIC 방법과 잠재오염원 발생부하량을 GIS를 이용하여 경기도 화남2 지구에 적용하여 종합오염현황도를 구축하고 지역별 지하수오염정도를 평가하였으며, 기존 DRASTIC 모델에 구조선밀도, 토지이용 인자를 추가한 수정 DRASTIC 모델을 설정하여 지하수오염 가능성을 예측하고자 하였다. 본 연구에서는 DRASTIC 모델을 사용함에 있어서 첫째, 부가적 인자 사용의 필요성을 제시하고 둘째, 수정 DRASTIC 모델을 사용했을 경우에 변이양상을 알아보고 셋째, 오염예측도 작성방안을 제시하고 넷째, 최종적인 오염취약성 지역을 확인하고자 하였다.

1. 일반적인 DRASTIC 모델을 적용한 결과, HN2-01 유역에서 GDP가 가장 많은 분포를 이루었으나, 수정 DRASTIC 모델을 사용했을 때는 HN2-03 유역이 구조선밀도 및 토지이용의 영향 때문에 상대적으로 큰 값을 보이고 있으며, 잠재오염원 및 오염부하량도 크게 나타나고 있으므로 향후 국토개발에 보다 신중한 주의를 기울여야 할 것이다. 또한, 수정 DRASIC 모델을 사용한 결과 일반적인 DRASTIC 모델에 비해 오염 가능 지역이 보다 세분화되었고, 결과적으로 오염 가능성이 높은 취약지역을 구체적으로 나타낼 수 있었다.
2. 지하수오염예측도는 수정 DRASTIC과 잠재오염원 부하량을 중첩함으로써 오염근원이 수리지질학적인 원인인지 혹은 잠재오염원이 원인인지를 유추할 수 있었다. 본 연구지역에서 지하수오염 가능성이 가장 높다고 예측되는 곳은 HN2-03 유역이고 반대로 가장 낮은 지역은 HN2-10 유역이라고 유추된다.
3. 수질검사 자료에서는 HN2-04 및 HN2-05 유역 경계부

가 가장 주목할 만한 지역으로 나타났는데, 이들 지역은 EC, NO₃-N 및 관정밀도가 매우 높고 pH는 4.0~5.0 사이의 낮은 값을 보이고 있다. 또한 HN2-03 유역은 타유역에 비해 면적대비 가장 높은 관정밀도를 보이고 있어, 오염예측도와 비교했을 때 지자체의 지하수 개발 인허가에 신중을 기해야 할 것으로 판단된다.

4. 본 연구에서는 부가 인자들의 가중치 결정에 있어서 인자별 상관계수를 이용하였는데 향후 가중치 결정에 있어서 보다 체계적인 방법이 요구되고, 그러한 방법 중의 하나로서 신경망(neural network)을 이용한 역산 가중치를 결정하는 것도 좋은 방법이라고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 농업기반공사 지하수관리조사사업의 일환으로 이루어졌으며, 한국학술진흥재단의 일부 연구지원(KRF-2000-DP0434)으로 수행되었다. 자료취득 및 분석에 많은 도움을 주신 화성시 지하수담당자, 농업기반공사 동료직원들께 감사를 드리며, 논문심사에서 훌륭한 지적을 하여 주신 심사위원회도 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 김동학 등(1979), 한국지질도(1:50,000), 아산지역도폭 및 설명서, 자원개발연구소, pp. 1-30.
2. 김동학 등(1980), 한국지질도(1:50,000), 평택지역도폭 및 설명서, 자원개발연구소, pp. 1-50.
3. 농촌진흥청 식물환경연구소(1972), 평택군 정밀토양도(1: 25,000), pp. 1-10.
4. 선우중호(1983), 수문학, 동명사, pp. 136-137.
5. 오인섭, 박석환(1973), 한국지질도(1:50,000), 오산지역도폭 및 설명서, 국립지질광물연구소, pp. 1-35.
6. 이병주 등(1993), 한국지질도(1:50,000), 발안지역도폭 및 설명서, 한국자원연구소, pp. 1-28.
7. 조시범 등(1999), GIS를 이용한 경기도 평택군 지역의 지하수오염취약성 평가 연구, 자원환경지질학회지, 24권 3호, pp. 257-265.
8. 한정상(1980), 한반도의 암반지하수에 관한 연구, 한국수문학회지, 14권, pp. 73-81.
9. 한정상, 한규상(1992), 고지대 결정질 파쇄암의 수리지질특성과 수리지질학적 이방성에 관한 연구, 지질학회지, 28권, pp. 19-31.
10. Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., Petty, R. J., and Hackett, G.(1987), DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings, USEPA Document #EPA/600/2-87-035, pp. 237-245.
11. Banks, D., E. Rohr-Torp, and H. Skarphagen(1993), Ground-

- water resources in hard rock; Experiences from the Hvaler study Southeastern Norway Memoires of the XXLVth Congress of IAH, Hydrogeology of Hard Rocks, Oslo, pp. 39-51.
12. Cullen, S. J., Kramer, J. H., Everett, L. G., and Eccles, L. A.(1992), Is our groundwater monitoring strategy illogical, Groundwater Monitoring and Remediation, Groundwater Publishing Co. pp. 103-107.
 13. Evans, B. M. and Myers, W. L.(1990), A GIS-based approach to evaluating regional groundwater pollution potential with DRASTIC, Journ. of Soil and Water Conservation, Vol. 45, No. 2, pp. 242-245.
 14. Kalinski, R. J., Kelly, W. E., Bogardi, I., Ehrman, R. L. and Yamamoto P. D.(1993), Correlation Between DRASTIC Vulnerabilities and Incidents of VOC contamination of Municipal Wells in Nebraska, pp. 156-159.
 15. Penman, H. L.(1994), Natural evaporation from open water, bare soil and grass, Proc. Royal Society(London), A 193, pp. 120-146.
 16. Rosen, L.(1994), A study of the DRASTIC Methodology with Emphasis on Swedish Conditions, Ground Water, V. 32, No. 2, pp. 278-285.
 17. Rundquist, D. C., Li, R. Y., Di, L., Liu, M.(1989), Applying concepts of geographic systems and expert systems to the "DRASTIC" ground water-vulnerability model, Water Resources Center, University of Nebraska-Lincoln, pp. 346-369.
 18. Rundquist, D. C., Peters, A. J., Di, L., Rodekoeh, D. A., Ehrman, R. L., and Murray, G.(1991), Statewide groundwater vulnerability assessment in Nebraska using the DRASTIC/ GIS model, Geocarto International, V. 6, No. 2, pp. 51-57.
 19. Sander, P., Minor, T. B., and Chesley, M. M.(1997), Ground-Water Exploration Based on Lineament Analysis and Reproducibility Tests, Ground Water, V. 35, No. 5, pp. 888-894.
 20. Soil Conservation Service(SCS) (1972), Hydrology, SCS National Engineering Handbook, Section 4, Washington, D.C., U.S, Department of Agriculture, pp. 48-79.
 21. Thiessen, A. H.(1911), Precipitation for large areas, Mon. Weath. Rev., V. 39, pp. 1082-1084.
 22. Wise, D. U.(1983), Linesmanship and the practice of linear geo-art: Discussion and reply, Reply, Geological Society of America Bulletin, V. 93, pp. 1379-1386.