

《原著》

## 지하수 오염 취약성 기법의 비교 적용 연구: 충남 홍성군 금마면 일대에서의 적용

기민규<sup>1,3</sup> · 윤희성<sup>1\*</sup> · 고동찬<sup>1</sup> · 함세영<sup>2</sup> · 이충모<sup>2</sup> · 김현수<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원

<sup>2</sup>부산대학교 지질환경과학과

<sup>3</sup>전북대학교 지구환경과학과

## A Comparative Study of Groundwater Vulnerability Assessment Methods: Application in Gumma, Korea

Min-Gyu Ki<sup>1,3</sup> · Heesung Yoon<sup>1\*</sup> · Dong-Chan Koh<sup>1</sup> · Se-Yeong Hamm<sup>2</sup>  
Chung-Mo Lee<sup>2</sup> · Hyun-su Kim<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

<sup>2</sup>Division of Earth Environmental System, Pusan National University

<sup>3</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Chonbuk National University

### ABSTRACT

In the present study, several groundwater vulnerability assessment methods were applied to an agricultural area of Gumma in Korea. For the groundwater intrinsic vulnerability assessment, the performance of DRASTIC, SINTACS and GOD models was compared and an ensemble approach was suggested. M-DRASTIC and multi-linear regression (MLR) models were applied for the groundwater specific vulnerability assessment to nitrate of the study site. The correlation coefficient between the nitrate concentration and M-DRASTIC index was as low as 0.24. The result of the MLR model showed that the correlation coefficient is 0.62 and the areal extents of livestock farming and upland field are most influential factors for the nitrate contamination of groundwater in the study site.

**Key words:** Groundwater contamination, Vulnerability assessment, Agricultural area, Nitrate

### 1. 서 론

우리나라 지하수 이용량은 2010년 기준 38.1억 m<sup>3</sup>로 용수 총 이용량의 11%를 차지하고 있고 최근 꾸준한 증가 추세에 있다(MLTM, 2012). 이에 따라 국가 수자원으로서의 지하수의 중요성과 관심이 증대되면서 안정적이고 지속가능한 활용을 위한 체계적인 관리의 필요성이 대두되고 있다. 효과적인 국내 지하수 수질 보전과 오염 방지를 위해 지하수 기초 조사 사업 및 학술 연구 활동 등을 통해 지하수의 오염 취약성을 평가하는 노력이 진행되어 왔으나 보다 다양한 평가 방법의 적용 및 비교 평가 연구에 대한 필요성 또한 제기되고 있다. 지하수 오염 취약

성 평가라는 개념은 1968년 프랑스 수리지질학자인 J. Margat에 의해 처음 도입되었고 이후 인간이나 자연의 영향에 대한 지하수계의 민감도에 의해 좌우되는 고유 속성(Vrba and Zaporozec, 1994) 또는 오염 물질이 대수층 최상부 지하수면에 도달할 가능성(NRC, 1993) 등으로 정의 되어 왔다. 지하수 오염 취약성은 평가의 목적에 따라 고유 오염 취약성과 특정 오염 취약성의 두 가지 개념으로 구분된다. 고유 오염 취약성은 오염물질과 상관없는 대수층 자체의 특성으로 대상 지역의 수문, 지질 및 수리지질 정보만을 고려하여 평가하게 된다. 특정 오염 취약성은 대상 오염 물질에 대한 대수층의 오염 가능성으로 오염 물질과 대수층 간의 수리지구화학적 관계 및 해당 오

\*Corresponding author : hyoon@kigam.re.kr

원고접수일 : 2013. 5. 30 심사일 : 2013. 6. 24 게재승인일 : 2013. 6. 24

질의 및 토의 : 2013. 8. 31 까지

염원에 대한 정보 등 보다 많은 자료를 필요로 한다 (Gogu and Dassargues, 2000). 대표적인 지하수 고유 오염 취약성 평가 기법으로 미국 환경 보호청에서 개발된 DRASTIC(Aller et al., 1987)이 있으며 지역 별 특성이나 접근 방법에 따라 SINTACS(Civita, 1994), GOD (Foster, 1987), AVI(van Stempvoort et al., 1992), EPIK(Doerflinger and Zwaglen, 1997), PI(Goldscheider, 2005), COP(Daly et al, 2002) 등 다양한 방법이 개발되어 적용성 평가 연구가 진행되고 있다. 특정 오염취약성 평가방법에는 Panagopoulos et al.(2006)에 의해 제안된 기존 DRASTIC의 지수와 가중치를 오염물질의 농도에 따라 수정하는 M-DRASTIC과 다중선형회귀나 로지스틱 회귀 등 통계적 모형에 따라 오염물질의 농도 및 확률을 예측하는 방법들이 이용되어 왔다(Nolan, 2001; Nolan et al., 2002; Muhammetoglu et al., 2003).

국내에서의 지하수 고유오염취약성 평가는 주로 기존 DRASTIC을 이용한 적용성 평가나 개선 연구들이 진행되어 왔다(Han et al., 1990; Woo, 1994; Lee and Choi, 1997; Jo et al., 1999; Ham et al., 2004; Jo and Shon, 2004; Lee et al., 2008). DRASTIC 이외의 기법에 의한 국내 지하수 고유오염취약성 평가 연구로 Kang and Park(2010)은 부여읍 일대의 지하수 오염 취약성 평가를 위해 DRASTIC과 SINTACS를 적용하여 비교 평가한 바 있다. 국내 지하수 특정 오염 취약성 평가 연구로 농촌지역 지하수 오염 취약성 평가를 위해 M-DRASTIC과 Rupert(1999)에 의해 제안된 오염 가능성도 평가 방법을 적용하였다(Cheong et al., 2008). 이와 같이 국내 지하수 오염 취약성 평가를 위해 많은 연구자들이 노력해 왔으나 다양한 방법들 간의 비교 연구 사례는 드물다. 이에 본 연구에서는 충청남도 홍성군 금마면 일대의 지하수 오염 취약성 평가를 위해 고유 오염취약성 평가 기법인 DRASTIC, SINTACS, GOD 모델과 각 모델의 취약성도를 중첩시키는 모델을 적용하고 결과를 비교 평가하였다. 또한 연구 지역의 지하수 특정 오염 취약성 평가를 위해 수리지질 인자와 관측 농도값을 활용하는 M-DRASTIC과 토지이용도, 지형요소 및 관측 농도값을 이용한 다중선형 회귀 방법의 연구지역 질산성 질소 오염도 예측 대한 적용성을 평가하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. DRASTIC

DRASTIC은 총 7가지 인자 즉, 지하수심도(D), 함양량

(R), 대수층매질(A), 토양매질(S), 지형경사(T), 비포화대매질(I), 및 수리전도도(C)를 고려하며, 각 인자의 고정된 범위에 따라 점수가 제시되어 7가지 점수 랩을 도출하여 인자의 민감도에 따라 서로 다른 가중치를 부과함으로써 최종 점수가 결정된다. 각 인자의 범위는 1에서 10 사이의 값으로 결정되며 가중치는 1에서 5 사이의 값으로 결정된다. 또한 일반지역 혹은 농촌지역 여부에 따라 두 가지 가중치 시스템을 선택적으로 부여할 수 있다. DRASTIC 지수( $D_i$ )는 각 인자의 등급과 가중치와의 곱을 중첩하여 계산한다 (식 (1)).

$$D_i = \sum_{j=1}^7 P_j W_j \quad (1)$$

여기서  $P_j$ 는 각 인자의 등급,  $W_j$ 는 각 인자의 가중치이다. 식 (1)을 통해 산정된  $D_i$ 는 일반지역 가중치 적용 시 최고 226 및 최저 23의 값을 가지며, 농업지역 가중치 적용 시 최고 256 및 최저 23의 값을 갖는다.  $D_i$ 는 취약성의 지수로 사용되며 값이 클수록 지하수의 상대적인 오염 가능성이 큰 지역을 의미한다.  $D_i$ 는 그 크기에 따라 낮음, 중간, 높음, 및 매우 높음의 4 단계로 구분되어 적용 지역의 상대적인 오염취약성 고저를 나타내게 된다 (Aller et al., 1987).

### 2.2. SINTACS

SINTACS는 이탈리아 지역의 기후와 수리지질학적 특성에 따라 DRASTIC을 수정 보완한 모형으로 이탈리아 국립연구원(Italian National Research Council)에서 개발하였다. DRASTIC과 동일한 7가지 인자인 지하수심도(S), 함양량(I), 비포화대매질(N), 토양매질(T), 대수층매질(A), 수리전도도(C), 지형경사(S)를 고려하지만 등급 및 가중값의 설정에 있어 차이점을 보인다. 등급 설정의 경우 7가지 인자 중 지하수심도, 함양량, 수리전도도에 대해서는 비선형 연속 함수 형태로 등급을 결정하도록 되어있다. 또한 가중값의 경우 SINTACS 모형은 수리지질학적 특성에 따라 6개의 가중치 모형이 제시되어 2가지 모형만을 가지고 있는 DRASTIC 모형과 비교할 때 평가지역을 수리지질학적 특성에 따라 보다 상세하게 구분할 수 있다는 장점이 있다(Civita and De Maio, 2004). SINTACS 지수는 DRASTIC과 마찬가지로 각 인자의 등급과 가중치와의 곱을 더하는 방식으로 계산되며 26에서 260 사이의 범위를 가진다.

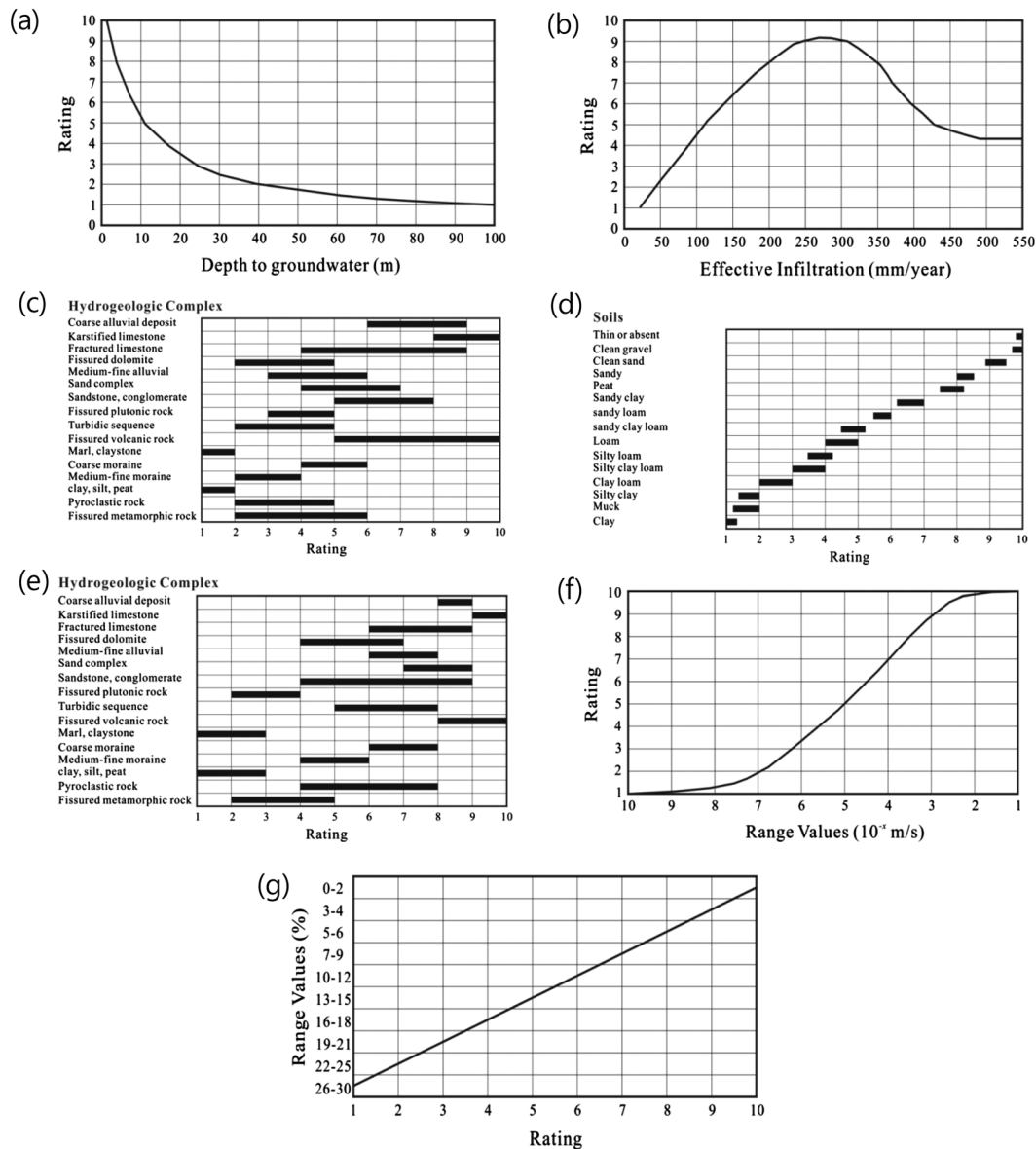


Fig. 1. Parameters and related rating graphs for SINTACS (Civita and De Maio, 2004): (a) depth to water, (b) recharge, (c) unsaturated zone media, (d) soil media, (e) aquifer media, (f) hydraulic conductivity, (g) topographic slope.

### 2.3. GOD

GOD는 Foster(1987)에 의해 제안된 기법으로 세 가지 인자를 고려한다 (Fig. 2). 세 가지 인자는 대수층의 상태 (Groundwater confinement, G), 불포화대 혹은 피압층의 특성(Overlying strata, O), 지하수 심도(Depth to water, D)이며, 이 세 인자의 등급에 대한 각 맵을 곱하여 최종 지수를 산정하게 된다. GOD는 DRASTIC과 SINTACS와는 달리 각 요소의 등급을 곱한다는 차이점이 있고, 세 가지 인자만을 고려한다는 간편성이 있다. 하지만 GOD의 인자들은 지하수 심도를 제외하고 지하 매질 분포에

대한 정보에 집중되어 있어 이에 대한 자료가 부족할 경우 불확실성이 매우 커지는 한계점을 가지고 있다.

### 2.4. M-DRASTIC

M-DRASTIC은 Panagopoulos et al.(2006)에 의해 제안된 방법으로 DRASTIC의 등급 및 가중치의 산정 방법을 개선한 방법이다. M-DRASTIC은 DRASTIC의 모든 인자를 고려하면서 각 인자의 등급 및 가중치에 대해서는 실제 측정된 오염 물질의 농도에 비례하여 차등적으로 계산하는 방법이다. 가령, 대수층 매질 인자에서 화강암류

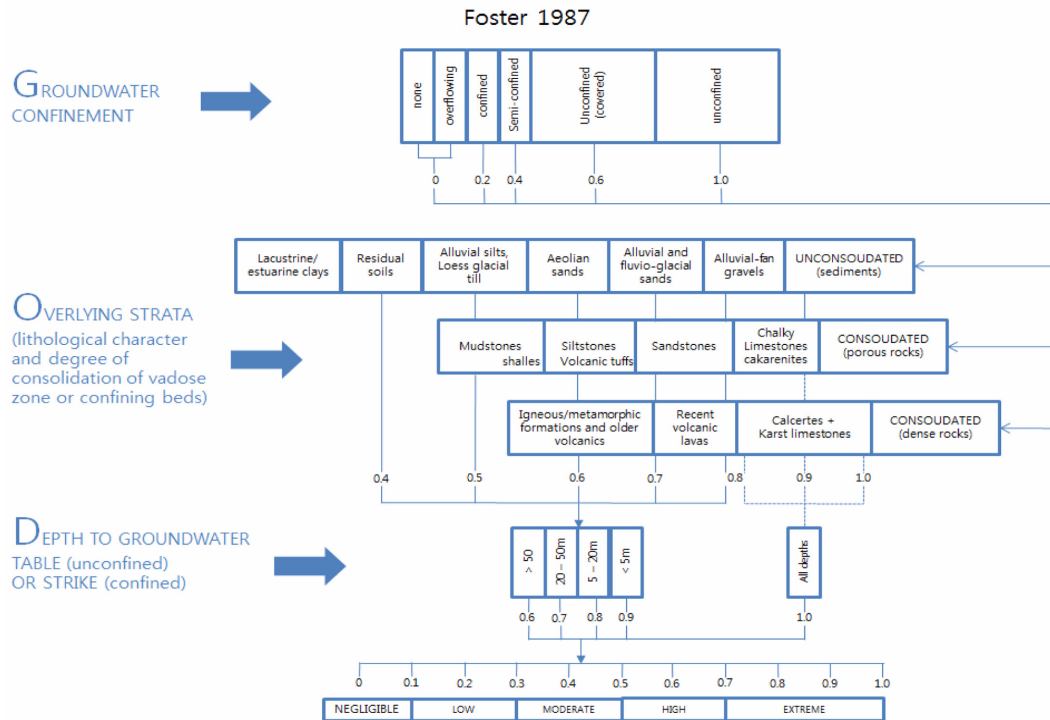


Fig. 2. Schematic diagram of GOD method and rating values (Foster, 1987).

지역의 평균 질산성 질소 농도가 14.7 mg/L로 가장 높게 나타난다면 화강암류 지역은 가장 높은 10등급을 부여하고, 충적층 지역의 평균 질산성 질소 농도가 10.6 mg/L라면 화강암류 지역의 질산성 질소 농도에 비례하여 7.2를 부여한다( $7.2 = 10.6 / 14.7 \times 10$ ). 이러한 등급 수정방법을 통한 결과는 DRASTIC과 비교해 현실적으로 등급을 부여하기 때문에 오염 예측율이 개선된다고 보고된 바 있다 (Panagopoulos et al., 2006; Cheong et al., 2008). 이러한 M-DRASTIC은 등급과 가중치를 재 산정함에 있어 실제 측정된 오염 물질의 농도를 고려하기 때문에 특정 오염취약성 평가로 분류하여 적용하였다.

### 2.5. 다중선형회귀(Multiple Linear Regression)

다중선형회귀분석은 여러 독립변수들로부터 하나의 종속변수의 변화를 예측하고 종속변수에 대한 독립변수들 간의 영향력을 평가할 수 있다. 다중선형회귀 모형은 식 (3)의 형태로 표현할 수 있다.

$$Y = a + (b_1x_1) + (b_2x_2) + (b_3x_3) + (b_4x_4) \dots \quad (3)$$

여기서  $x$ 는 설명변수,  $Y$ 는 종속변수,  $a$ 는 절편,  $b_1, b_2, b_3, b_4$ 는 편회계수이다. 다중선형회귀분석은 어떤 설명변수가 종속변수에 영향을 미치는지를 파악할 수 있게 해

주고, 각각의 설명변수가 종속변수에 얼마나 영향을 미치는지를 가늠할 수 있게 해주며, 이러한 설명변수들을 사용해 종속 변수를 가능한 정확히 예측할 수 있게 해준다. 다중선형회귀분석의 과정은 다음과 같다.

- 1) 회귀모형에 포함될 종속변수와 설명변수들을 선택한다.
- 2) 설정한 회귀모형에서 편회계수 추정치를 구한 후 회귀식을 도출한다.
- 3) 추정된 모형의 모집단에서의 유의성 및 적합도를 검증한다.
- 4) 추정된 모형으로 종속변수 값을 예측하는데 사용한다.

## 3. 연구지역

연구지역은 충청남도 홍성군의 북동쪽에 위치한 금마면과 홍북면으로, 동쪽에 봉수산, 서쪽에는 백월산, 북쪽에는 용봉산을 중심으로 구릉을 형성하여 비교적 평탄한 지형을 이루고 있다. 연구지역의 우측에 위치한 봉수산은 제외하면 해발고도 100 m 이하의 낮은 지역 및 소규모 구릉으로 구성되어 있으며 봉수산 우측으로 예당저수지와 조사지역 남서쪽에 홍양 저수지가 자리 잡고 있다. 이에 연구지역은 삼교천과 봉수산 자락으로 구분하고 중앙에 화양천을 포함하는 7 km × 7 km 범위의 유역으로 약 40

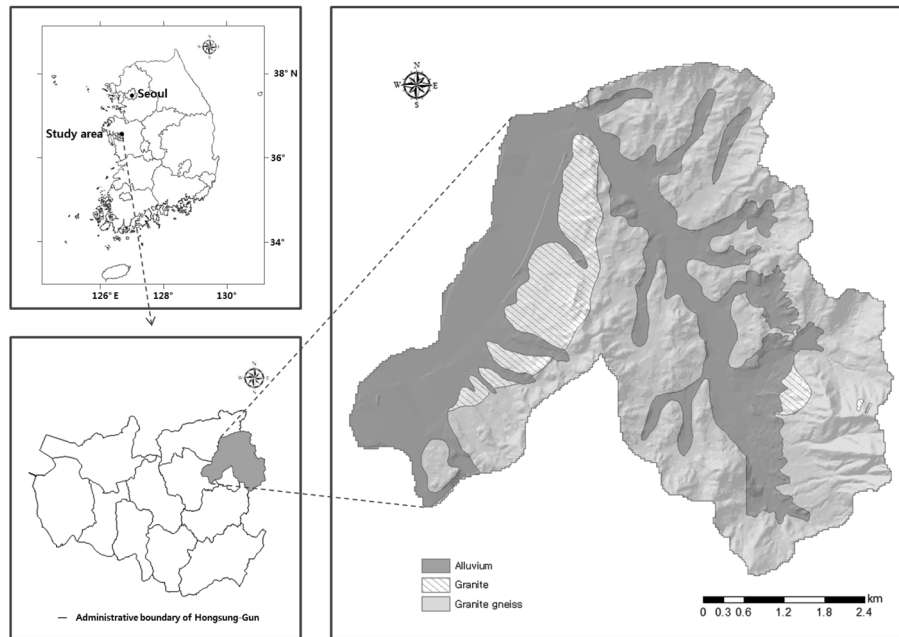


Fig. 3. Simplified geological map of the study area.

km<sup>2</sup>의 범위로 설정하였다(Fig. 3). 연구지역의 지질은 화양천 유역은 제 4기 충적층으로 이루어져 있고 충적층 바깥부분으로 결정편암계 덕정리 편마암이 자리잡고 있으며, 삼교천 중류 우안지역은 경상누층군 불국사 화강암류로 이루어져 있다.

#### 4. 결과 및 토의

##### 4.1. 지하수 고유 오염 취약성 평가

###### 4.1.1. DRASTIC 적용 결과

연구 지역에 대한 DRASTIC 인자들의 범위 및 등급 산정 결과는 Table 1과 같다. 지하수심도는 연구지역 관정에 대한 현장조사시 측정한 수위자료를 이용하여 연구지역 전체에 걸쳐 정규 크리깅(ordinary kriging) 분석을 통해 얻어진 결과값을 적용하였다. 연구지역의 지하수심도는 3개의 등급으로 분류되었고 1.52 - 4.57의 범위에서 77%의 가장 높은 비율을 보이고 있다. 지하수 함양량은 물수지 분석법을 이용하여 연구 지역 전체에 대한 함양량을 산정하였다. 연구 지역 물수지 분석을 위한 강우량 및 증발산량 산정을 위해 서산기상관측소의 최근 30년간 기상자료와 Thornthwaite(1944) 방법 및 토양함수능 산정법(Thornthwaite and Mather, 1957)을 이용하였고 지표유출량 산정을 위해 NRCS-CN법을 적용하였으며 기저유출량은 Park(1996)의 연구자료를 활용하였다. 물수지 분석에

의해 산정된 지하수 함양량은 333.81 mm/yr이다. 대수층 매질은 1 : 50,000 축척의 지질도를 이용하여 산정하였다. 연구지역의 대수층 매질은 크게 변성암류와 화성암류, 충적층의 3개의 등급으로 분류하여 적용하였다. 각 매질에 따라 변성암류는 53%, 화성암류는 9%, 충적층은 39%의 비율을 차지한다. 토양 매질은 1 : 25,000 축척의 정밀 토양도(농촌진흥청)를 이용하여 산정하였다. 토양통명 및 토양통 부호에 따라 6개 등급으로 분류 되었고, 식양질 토양이 72%로 가장 많은 비율을 차지한다. 지형 경사율은 1 : 25,000 축척의 수치지형도에서 ArcGIS 소프트웨어를 이용하여 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM)을 작성후 경사도(%)를 산정하였다. 연구지역은 산악지역이 많아 경사도 18% 이상의 범위가 56%로 가장 많은 비율을 차지하고, 다음으로 경사도 2% 이하의 평탄한 지역이 많은 비율을 차지한다. 비포화대 매질의 영향은 지역 전반에 걸친 시추 조사를 통해 수행되어야 하나 본 연구에서는 관련 자료의 부족으로 해당 지점의 지질이 비포화대에 매질 분포에 가장 큰 영향을 준다고 가정하고 지질도 정보를 이용하였다. 우리나라의 경우 토양층이 비교적 얇게 분포하기 때문에 지질도를 이용한 지질분류에 의해 비포화대 매질을 분류한 바 있다(MLTM et al., 2005; Cheong et al., 2008). 대수층의 수리전도도는 지질도를 이용하여 암반의 지질 특성에 따른 수리전도도의 범위에 대한 문헌값을 이용하였다(Freeze and Cherry,

**Table 1.** Ranges, ratings and aerial percent of DRASTIC parameters of the study area

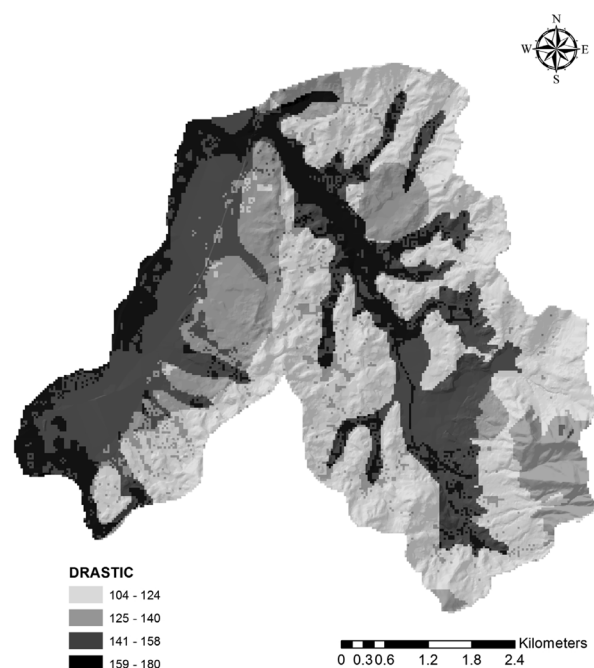
Parameters	Ranges	Rating	Weight	Area (%)
D: Depth to water (m)	4.57 - 9.74	7	5	18
	1.52 - 4.57	9		77
	< 1.52	10		4
R: Recharge (mm/yr)	333.81	9	4	100
A: Aquifer media	Metamorphic	4	3	52
	Igneous	6		9
	Alluvial	8		39
S: Soil media	Clayey	1	2	12
	Fine silty	3		4
	Fine loamy	4		72
	Coarse loamy	6		6
	Loamy skeletal	7		4
	Rocky	10		2
T: Topography (%)	> 18	1	1	56
	12 - 18	3		9
	6 - 12	5		10
	2 - 6	9		6
	< 2	10		20
I: Impact of vadose zone media	Metamorphic	4	4	52
	Igneous	6		9
	Alluvial	8		39
C: Hydraulic conductivity (GPD/ft <sup>2</sup> )	1 - 100	1	2	52
	100 - 300	2		9
	300 - 700	4		39

1979). 연구지역 지질 특성에 따라 3개의 등급으로 분류되었으며 각 등급값 및 면적 분포는 Table 1과 같다.

DRASTIC의 최종 지수 산정방법에 따라 연구지역의 Di(DRASTIC index)를 산정하였다(Fig. 4). 산정 결과 Di의 최소값은 104, 최대값은 180의 범위로 나타났다. 산악지역은 상대적으로 낮은 값을 보이며, 연구지역의 좌안 경계를 따라 흐르는 삼교천과 연구지역의 중앙을 가로지르며 흐르는 화양천 주위로 높은 값을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 DRASTIC에 3가지의 인자 즉, 대수층매질과 비포화대 매질, 수리전도도의 지수를 산정하는데 있어 모두 지질도에 의존하기 때문에 지질도에서 대체로 높은 등급을 부여받는 충적층의 영향이 가중되어 나타난 결과로 판단된다.

#### 4.1.2. SINTACS 적용 결과

SINTACS를 이용한 지하수 오염 취약성 평가를 위해 DRASTIC과 같은 방법으로 7개의 각 인자 별 범위에 따른 등급과 가중치를 부여하였다(Table 2). 연속형 입력 인

**Fig. 4.** DRASTIC index map of the study area.

**Table 2.** Ranges, ratings and aerial percent of SINTACS parameters of the study area

Parameters	Ranges	Rating	Weight	Area (%)
S: Depth to water (m)	1.59 - 2.75	4.8-6.4	5	11
	2.75 - 3.76	6.4-7.2		20
	3.76 - 4.67	7.2-7.9		26
	4.67 - 5.75	7.9-8.6		26
	5.75 - 7.93	8.6-9.6		17
I: Recharge (mm/year)	333.81	8.4	4	100
N: Vadose zone media	Igneous/Metamorphic	4	4	61
	Alluvium	7.5		39
T: Soil media	Clayey	1.2	5	12
	Fine silty	3.5		4
	Fine loamy	4.5		72
	Coarse loamy	5.75		6
	Loamy skeletal	6.6		4
	Rocky	9.9		2
A: Aquifer media	Igneous/Metamorphic	8.5	2	39
	Alluvium	3		61
C: Hydraulic conductivity (m/s)	Alluvium	25	2	39
	Igneous	23		9
	Metamorphic	16.4		52
S: Topography (%)	> 25	1	3	15
	21 - 25	2		6
	18 - 21	3		5
	15 - 18	4		6
	12 - 15	5		8
	9 - 12	6		10
	6 - 9	7		12
	4 - 6	8		8
	2 - 4	9		8
	0 - 2	10		22

자에 대해서는 Civita(1994)가 제시한 값을 차용하였고 가중치는 연구지역이 전체적으로 농업활동이 활발한 지역임을 고려하여 질산성 질소에 대해 설정된 값을 이용하였다.

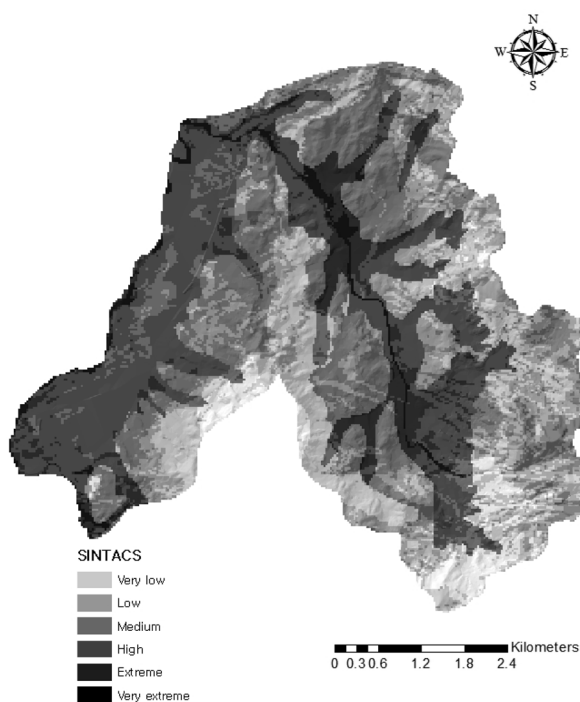
지하수심도는 SINTACS의 등급 산정방법에 따라 각 셀마다 다른 등급을 부여 받기 때문에 5개의 범위를 임의로 주어 정리하였다. 그 결과 3.76 m - 5.75 m의 범위가 가장 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났다. 함양량은 DRASTIC과 마찬가지로 물수지 분석법에 의해 산정된 값을 이용하였고 6등급을 부여 받았다. 대수층매질의 영향은 변성/화강암류와 충적층 2개의 등급으로 분류하여 산정되었고 변성/화강암류는 61%, 충적층은 39%의 비율을 차지한다. 토양매질은 토양통명 및 토양통 부호에 따라 6개 등급으로 분류하여 산정되었고, DRASTIC과 같은 비

율을 보였다. 수리전도도는 연구 지역 지질도에 대한 문헌값을 이용하여 3개의 등급으로 분류하였고 SINTACS 등급 산정 체계에 적용하였다. 지형경사는 DRASTIC과 같은 방법으로 경사율(%)을 구하여 0 - > 25%의 범위에 따라 10 - 1의 등급으로 분류하여 산정되었다.

산정된 각 인자 별 등급 및 가중값을 이용하여 SINTACS의 최종 지수(Si)를 산정한 결과 연구지역의 Si는 최소값은 131.0, 최대값은 247.0의 범위로 나타났다. Si의 분포는 산악지역을 따라 낮은(Low or Very low) 취약지수를 보이며 하천 주위 충적층은 높은 (High or Extreme) 취약지수를 나타냈다(Fig. 5). SINTACS 평가 결과 DRASTIC에 비해 중간정도의 취약성을 보이는 지역이 많은 결과로 나타났다. 특히, DRASTIC에서는 산악

**Table 3.** Ranges, ratings and aerial percent of GOD parameters of the study area

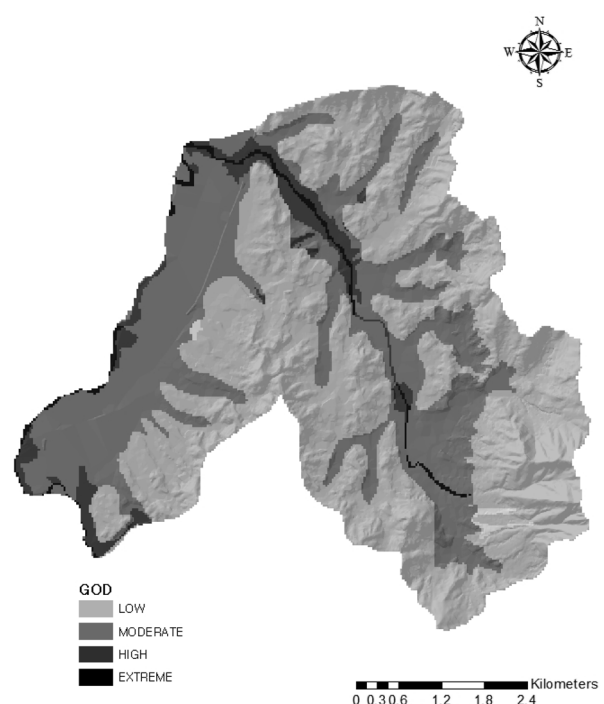
Parameters	Ranges	Rating	Area (%)
G: Groundwater confinement	Unconfined	1	39
	Semi-confined	0.4	61
O: Overlying Strata	Residual soils	0.4	12
	Alluvial silts	0.5	76
	Aeolian sands	0.6	6
	Alluvial and fluvioglacial sands	0.7	4
	Alluvial-fan gravels	0.8	2
D: Depth to water	5 - 8	0.8	22
	< 5	0.9	78

**Fig. 5.** SINTACS index map of the study area.

지역은 대부분 낮은 취약성도를 보였으나, SINTACS에서는 산악지역에서도 다양한 취약성도를 보이는데, 이러한 결과는 지하수심도와 경사의 등급을 산정함에 있어 연속 함수에 의해 보다 다양한 등급값이 반영될 수 있기 때문이라고 판단된다.

#### 4.1.3. GOD 적용 결과

GOD의 등급 산정방법에 따라 대수층의 상태(G), 불포화대 혹은 피압층의 특성(O), 지하수심도(D)의 지수를 산정한 결과는 Table 3과 같다. G는 연구 지역 지질 특성을 고려하여 2개 등급으로 분류하였고 O는 연구 지역의 토양특성을 이용하여 5개 등급으로 분류하였다. D는

**Fig. 6.** GOD index map of the study area.

5 m 이하와 5 - 20 m에 대한 2개 등급으로 분류하여 산정하였다.

G, O, D 각 인자들의 등급을 곱해 Gi(GOD index)를 산정하였다(Fig. 6). Gi는 0 - 1의 범위로 나타나는데, 연구 지역의 Gi는 최소값은 0.13, 최대값은 0.72의 범위로 나타났다. 최종 GOD 지수 분류 기준에 따라 0.1 - 0.3은 LOW, 0.3 - 0.5는 MODERATE, 0.5 - 0.7은 HIGH, 0.7 - 1은 EXTREME으로 나타내었다. 본 연구지역에 대한 GOD 평가 결과 하천을 따라서 가장 취약한 것으로 나타났다 대체로 충적층에서 중간 정도의 취약성을 보여주었으며 산악지역은 대부분 낮은 취약성을 나타내고 있다. GOD에 의한 본 연구지역의 지하수 오염취약성 평가의 전



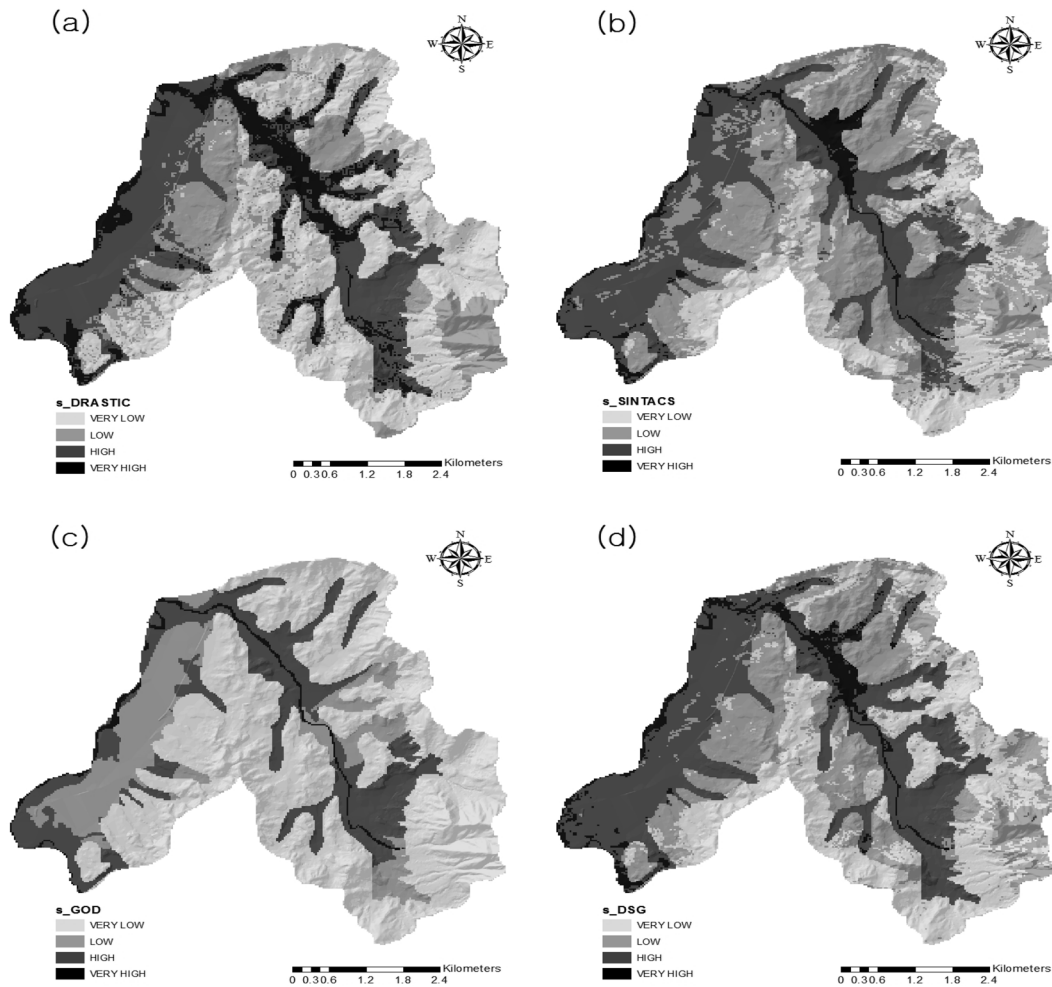


Fig. 7. Comparisons of groundwater vulnerability maps with normalized index: (a) nDRASTIC, (b) nSINTACS, (c) nGOD, and (d) nDSG.

체적인 공간적 분포 성향은 DRASTIC 및 SINTACS와 유사하지만 가장 단순한 형태의 취약성도를 보여주었다. 이는 고려하는 평가 인자가 3개인 점과 본 연구 지역에 대한 등급 구분이 세분화되지 못했기 때문일 것이다. 특히 GOD의 지하수심도 인자의 경우 50 m 이하에서 5개의 등급 구분을 하고 있는데 비교적 지하수심도가 깊지 않은 국내 적용을 위해서는 보다 세밀한 등급 구분에 대한 고찰이 필요하다고 판단된다.

#### 4.1.4. 지하수 고유 오염취약성 평가 기법 비교

지하수 고유 오염취약성 평가 기법은 각각의 특징과 제한점이 존재한다. 어떠한 문제에 대한 접근 방법이 다수이거나 그 문제가 복잡한 특성이 있을 때 적용할 수 있는 기법들을 하나로 합치는(Ensamble) 방법이 적용되기도 한다(Kurzynske et al., 2010; Yue et al., 2011). 본 연구에서는 앞서 적용한 DRASTIC, SINTACS, GOD 기법

에 대한 각 셀별 최종 지수를 합하여 취약성도를 산정하고 이를 DSG라 명명하였다. DRASTIC, SINTACS, GOD, DSG는 최종 지수의 범위가 모두 다르므로 이들의 비교를 위해 각 기법의 지수를 식 (4)를 이용하여 0에서 1사이의 값을 갖도록 조정하였다.

$$nV = \frac{Vi_{\text{cell}} - Vi_{\text{min}}}{Vi_{\text{max}} - Vi_{\text{min}}} \quad (4)$$

여기서  $nV$ 는 재분류된 지수,  $Vi_{\text{cell}}$ 은 각 셀의 지수,  $Vi_{\text{min}}$ 은 전체 셀 중 최소 지수,  $Vi_{\text{max}}$ 은 전체 셀 중 최대 지수이다. 재조정된 각 기법의 지수를 더해 DSG를 산정하였고, DSG 또한 식 (4)를 이용하여 0에서 1사이의 값을 갖도록 하였으며 0.25 간격으로 매우 낮음(very low), 낮음(low), 높음(high), 매우 높음(very high)의 4단계로 분류하여 취약성도를 작성하였다(Fig. 7). 식 (4)를 이용하여 재조정된 취약성 평가는 편의상 nDRASTIC,

**Table 4.** Results of correlation analysis between vulnerability methods

Method	sDRASTIC	sSINTACS	sGOD	sDSG
sDRASTIC	1			
sSINTACS	0.859	1		
sGOD	0.919	0.885	1	
sDSG	0.952	0.974	0.932	1

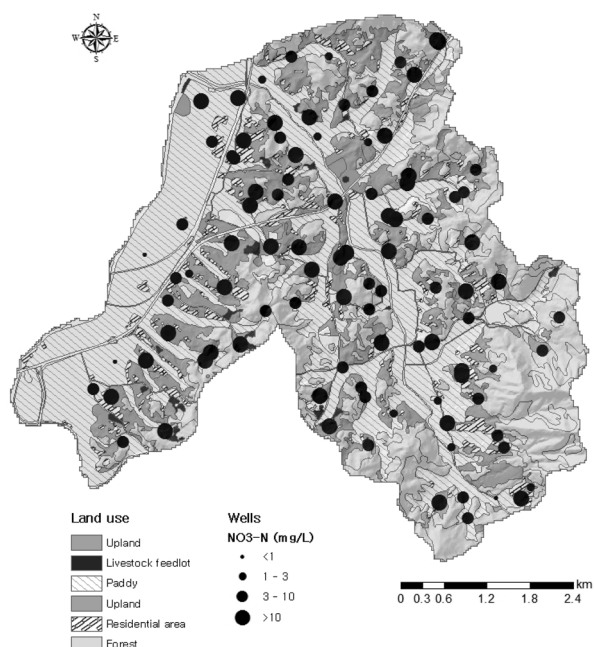
**Table 5.** The aerial percent of vulnerability categories

Category	Range	sDRASTIC (%)	sSINTACS (%)	sGOD (%)	sDSG (%)
Very Low	0 - 0.25	40	22	61	32
Low	0.25 - 0.5	21	43	16	30
High	0.5 - 0.75	28	31	21	33
Very High	0.75 - 1	10	4	2	5

nSINTACS, nGOD, nDSG로 명명하였다. 세 기법을 합한 nDSG의 취약성 분포를 보면 전체적인 취약성 분포 흐름은 nSINTACS와 유사한 형태를 보인다. nDRASTIC은 매우 높은 취약성 지역이 충적층을 따라 넓게 분포하고 nSINTACS는 낮은 취약성지역이 구릉지를 따라 넓게 분포하며 nGOD는 산악지역과 구릉지를 따라 매우 낮은 취약도가 넓게 분포하는데, nDSG는 이러한 세 기법의 각기 다른 특징이 서로 완화된 취약도 분포 형태를 보인다.

각 기법별의 유사성을 평가하기 위해 피어슨의 상관 분석(Pearson's correlation analysis)을 이용하여 유의수준 <0.01에서 각 기법간의 상관성 분석을 수행하였다 (Table 4). 상관성 분석 결과 모든 기법 간에서 유의수준을 만족하는 결과를 보이며 대체로 상관성이 좋은 것으로 나타났다. 각 기법간의 유사성을 보면 nSINTACS와 nDRASTIC, nSINTACS와 nGOD 사이의 상관성이 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 그에 반해 nDSG와 nDRASTIC, nSINTACS, nGOD와는 상관계수 0.93 이상의 높은 상관성이 나타났는데 이러한 결과는 nDSG가 각 기법의 특징을 잘 반영한다는 것을 의미한다.

재분류된 DRASTIC, SINTACS, GOD, DSG의 정량적인 비교를 위해 각 기법별 최종 지수 범주별 면적 비율을 산정하였다(Table 5). 각 기법별 특징을 보면, nDRASTIC은 모든 기법 중 매우 높음(Very High)의 비율이 10%로 가장 높게 나타났다. nSINTACS는 모든 기법 중 낮음(Low)의 비율이 43%로 가장 높게 나타났으며 nGOD는 매우 낮음(Very Low)의 비율이 61%로 가장 높게 나타났다. 그에 반해 nDSG는 매우 낮음(Very Low), 낮음(Low), 높음(High)의 비율이 각 30% 정도로 고른 비율을 보여 각 기법의 특징이 고루 반영된 것으로 나타났다.

**Fig. 8.** Distribution of NO<sub>3</sub>-N concentration and land use map of the study area.

#### 4.2. 지하수 특정 오염 취약성 평가

연구지역의 질산성 질소 오염 수준은 심각한 것으로 보고된 바 있다(Ki, 2013). 본 연구에서는 2011년 5월에 측정된 질산성 질소 농도 자료를 바탕으로 연구 지역 질산성 질소에 대한 특정 오염 취약성을 평가하였다. 연구 지역 내 100개 관정에 대한 질산성 질소 오염 수준에 따른 공간적인 분포를 토지이용도에 도시하면 Fig. 8과 같다. 연구지역의 경우 이미 전체적으로 높은 수준으로 오염이 진행되었기 때문에 토지이용과 뚜렷한 관계는 보이지 않으나, 대체로 축산시설 주위로 높은 수준의 관정 그룹이 형성되어 있으며 논을 따라서는 일부 낮은 오염수준

**Table 6.** Modified ranges, ratings, and aerial percent of M-DRASTIC parameters

Parameters	Ranges	Rating	M-rating	Weight	Area (%)
Depth to water (m)	> 15	7	10	5	77
	5 - 15	9	7		4
	< 5	10	7.2		18
Recharge (mm/yr)	333.81	9	9	4	100
Aquifer Media	Metamorphic	4	6.5	3	52
	Igneous	6	10		9
	Alluvial	8	7.2		39
Soil Media	Clayey Soils	1	2.5	2	12
	Fine silty	3	10		4
	Fine loamy	4	3.7		72
	Coarse loamy	6	2.3		6
	Loamy skeletal	9	0.6		4
	Rocky	10	2.9		2
Topography (%)	> 18	1	7.8	1	56
	12 - 18	3	10		9
	5 - 12	5	9.4		10
	2 - 5	9	9.8		6
	< 2	10	8.8		9
Impact of Vadose zone Media	Metamorphic	3	6.5	5	52
	Igneous	6	10		9
	Alluvial	8	7.2		39
Hydraulic Conductivity (GPD/ft <sup>2</sup> )	1 - 100	1	6.5	3	52
	300 - 700	4	10		9
	1000 - 2000	8	7.2		39

의 관정이 나타나는 것으로 보인다.

#### 4.2.1. M-DRASTIC 적용 결과

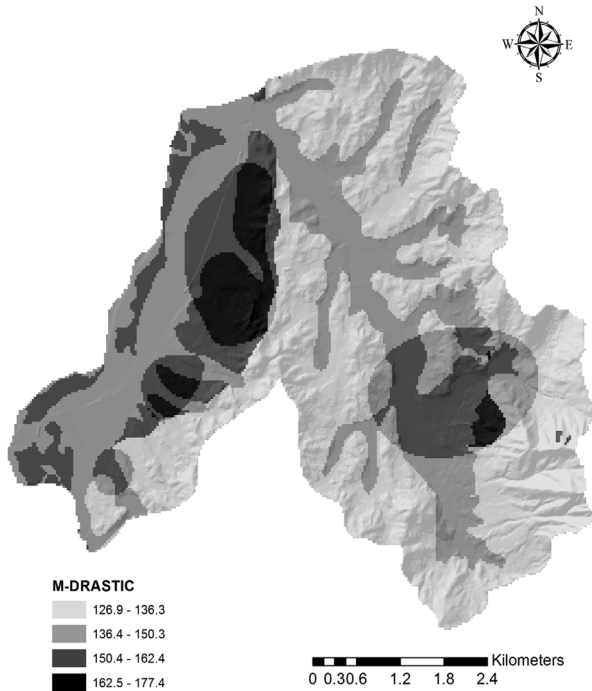
연구 지역의 질산성 질소 농도를 이용하여 수정된 M-DRASTIC 등급 및 면적 분포는 Table 6과 같다. 등급 수정 결과 지하수심도(D)의 경우 이전 등급과 다르게 가장 깊은 범위(4.57 - 9.14 m)에서 평균 질산성 질소 농도가 가장 높게 나타나 10등급을 부여하였고, 가장 낮은 범위(< 1.52 m)는 7.2등급으로 1.52- 4.57 m 범위에는 7등급으로 부여하였다. 지하수 함양량(R)은 연구지역 전체에 하나의 함양량을 갖기 때문에 기존 DRASTIC 등급을 따랐다. 지질 관련 인자 즉, 대수층 매질(A)과 비포화대 매질(I), 수리전도도(C)는 DRASTIC에서는 변성암류가 가장 낮고 충적층이 가장 높았으나, 측정된 질산성 질소의 평균 농도가 화강암류에서는 14.7 mg/L, 충적층에서는 10.6 mg/L, 변성암류에서는 9.5 mg/L로 나타나 화강암류에 가장 높은 10등급을, 충적층에 7.2등급, 변성암류에 6.5등급을 부여하였다. 토양 매질(S)의 경우 fine silty의 평균 질

산성 질소 농도가 29.9 mg/L로 가장 높아 10등급으로 부여하였고, 이에 따라 clayey는 2.5등급 fine loamy는 3.7등급, coarse loamy는 2.3등급, loamy skeletal은 0.6등급, rocky는 2.9등급으로 차등 부여하였다. 마지막으로 경사(T)의 경우 12- 18 경사(%) 범위는 평균 질산성 질소 농도가 12.2 mg/L로 가장 높아 10등급으로 부여하였고, 이에 따라 > 18은 7.8등급, 6- 12는 9.4등급, 2- 6은 9.8등급, < 2는 8.8등급으로 차등 부여하였다. 가중치 수정 방법은 각 인자별 등급과 질산성 질소 농도와의 상관성분석(Spearman's rho)을 통해 유의한 인자들에만 적용하는데 본 연구에서는 상관성분석 결과 모든 인자에서 유의수준을 만족하지 못하는 결과로 나타나, 가중치는 기존 DRASTIC의 가중치를 적용해 최종 M-DRASTIC index를 산정하였다(Fig. 9). 그 결과 기존의 DRASTIC은 충적층에서 취약성도가 높게 평가되었으나, M-DRASTIC의 경우 충적층의 취약성도가 낮아지고 화강암류 지역의 취약성도가 상대적으로 높아진 결과로 나타났다. 이러한 결과는 DRASTIC과 M-DRASTIC이 7가지의 인자 중 지

**Table 7.** Results of correlation analysis and RMSE value between NO<sub>3</sub>-N and output value of MLR models

Model	RMSE	r*	P-value
100 point	6.824	0.622	< 0.000

\*Correlations are significant at the 0.05 level (2-tailed)

**Fig. 9.** M-DRASTIC index map of the study area.

질관련 인자가 3가지로 높은 비중을 차지하기 때문에 지질 관련 인자의 등급에 따라 크게 좌우되는 것으로 판단된다.

#### 4.2.2. 다중선형회귀 적용 결과

본 연구에서는 다중선형회귀 분석을 위한 종속변수는 질산성질소 농도로 설정하였고 토지이용 및 지형 요소를 독립변수로 고려하였다. 독립변수 입력 자료 구성을 위해 관정 별 원형 버퍼(buffer)를 설정하고 버퍼 내의 논(P), 밭(U), 주거지(R), 축사(L), 임야(F)의 면적비와 평균 경사(S) 및 평균 고도(E)를 산정하였다. 버퍼 반경은 연구 지역의 100개 관정에 대한 버퍼 반경 별 질산성 질소 농도와 독립변수와의 상관 분석을 통해 200 m로 설정하였다. 본 연구 지역에 대해 설계된 질산성 질소 농도에 대한 다중선형회귀 함수는 다음과 같다.

$$NO_3-N = 12.196 + (-7.410 \times P) + (11.198 \times U) + (8.685 \times R) + (149.6 \times L) + (-2.239 \times F) + (-4.744 \times S) + (-9.285 \times E) \quad (5)$$

설계된 모형에 대한 관측 농도와의 상관관계수(r)와 오차 제곱 평균의 제곱근(RMSE)은 각각 0.62와 6.82 mg/L로

계산되었고 유의수준 0.05를 만족하는 것으로 나타났다 (Table 7). 다중선형회귀 함수의 표준화 계수(standardized coefficient)는 논(P), 밭(U), 주거지(R), 축사(L), 임야(F)에 대해 각각 -0.203, 0.216, 0.117, 0.425, -0.055이고 경사(S), 고도(E)에 대해 각각 -0.076, -0.202로 계산되었다. 따라서 다중회귀분석 결과 본 연구 지역의 지하수 질산성 질소 오염에 대해 관정 주변 축사 및 밭의 면적 비율이 가장 큰 영향력이 있는 것으로 나타났고 논의 면적 비율과 고도가 비교적 큰 음의 영향력을 보여주는 것으로 조사되었다. 주거지, 임야, 경사에 대한 영향력은 상대적으로 크지 않은 것으로 나타났다.

#### 4.2.3. 질산성 질소 관측 농도와의 비교

본 연구에서 관측된 100개 관정에서의 질산성 질소 농도와 DRASTIC, M-DRASTIC, 다중선형회귀 모형 적용 결과 간 유의수준 0.05에서의 상관성 분석을 수행하였다 (Fig. 10). DRASTIC 지수와 질산성 질소의 상관성 분석 결과 상관관계수는 -0.32, 유의확률은 0.755로 계산되어 상관성이 없는 것으로 분석된 반면 M-DRASTIC 지수에 대해서는 유의확률 0.016에서 0.24의 상관관계수를 보여주었으며 다중선형회귀 모형 적용 결과에 대한 상관관계수는 0.62로 산정되었다.

질산성 질소 관측 농도와의 비교 결과 수리지질 인자만을 고려하는 DRASTIC의 경우 본 연구 지역에 대해 현재 지하수 오염도에 대한 설명력은 전혀 없는 것으로 나타났다. 앞서 언급한 바와 같이 DRASTIC 모델은 수리지질 인자만을 고려하는 고유 오염취약성 평가 기법으로 오염원 및 오염물 특성을 고려하지 않기 때문에 특정 시기에 일부 지점에서 관측된 오염 농도와의 비교로 모델의 수준을 평가하는 것은 개념상 맞지 않다. 지하수 고유 오염취약성 기법은 현재 오염도 평가 및 예측이 아닌 오염 가능성 제시를 통해 오염 유발 시설 지점 선정을 위한 기초자료 제공 등의 분야에 적용되는 것이 바람직하다. 향후 국내 상황에 맞는 인자 선정, 등급값 및 가중값 설정을 위한 노력이 필요하며 오염원 및 오염 물질 관련 정보를 효과적으로 결합할 수 있는 방법에 대한 지속적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다. 질산성 질소 농도값을 이용하여 등급값을 수정한 M-DRASTIC의 경우

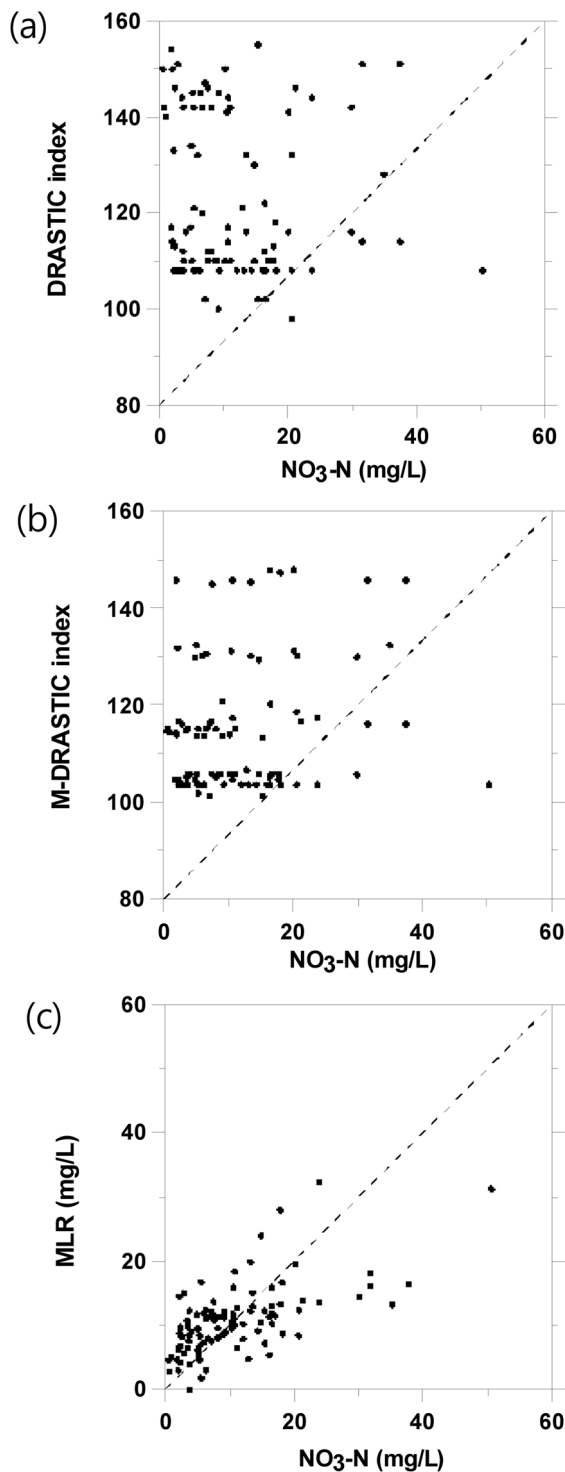


Fig. 10. Comparisons of  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentrations with (a) DRASTIC index, (b) M-DRASTIC index, and (c) MLR results.

상관계수는 0.24로 개선되었지만 여전히 낮은 상관성을 보여 수리지질 인자와 오염 농도값 만을 이용한 본 연구 지역의 오염도 예측은 한계가 있는 것으로 나타났다. 토

지이용도, 지형 및 오염 농도 자료를 활용한 다중선형회귀 분석법을 적용했을 때 질산성 질소 오염 농도와의 상관성이 가장 크게 나타났으나 오염원 및 오염 농도 등에 대한 조사가 수반되어야 한다는 제한점이 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 농업 활동이 활발한 충청남도 홍성군 금마면 일대에 대한 지하수 오염 취약성 평가 기법들을 적용하고 이를 비교·평가하였다. 고유 오염취약성평가 결과 DRASTIC은 대수층매질, 비포화대 매질, 수리전도도의 세 인자가 지질도 자료에 의존되기 때문에 높은 등급을 부여받는 충적층에 대한 영향이 가중되어 충적층 지역에서 가장 높은 취약성을 보였다. SINTACS는 DRASTIC과 같은 인자가 고려되었음에도 DRASTIC에 비해 산지에서 다양한 취약도를 보이는데, 이러한 결과는 지하수심도와 경사의 등급을 산정함에 있어 연속함수에 의한 다양한 실수를 부여받기 때문인 것으로 판단된다. GOD 역시 DRASTIC, SINTACS와 마찬가지로 하천을 따라 높은 취약도를 보이나, 상대적으로 단순한 형태의 취약도를 보였다. 3개의 평가 지수를 종합하는 DSG 모델을 제안하고 적용한 결과 각 기법의 특성이 고루 나타나는 것으로 조사되었다. 그러나 본 연구의 결과는 각 기법들의 평가 결과의 검증에 대한 고찰이 이루어지지 않았다는 점에서 한계점이 있다. 지하수 고유 오염취약성의 검증은 대규모 현장 실험을 통해 이루어질 수 있으나 현실적으로 쉽지 않으며 이에 대한 대안으로 대상 지역에 대한 수치 모델링 결과를 활용할 수 있다. 이에 대한 고찰은 차후 추가 연구를 통해 수행할 계획이다.

질산성 질소에 대한 특정 오염취약성평가 결과 M-DRASTIC은 충적층의 취약도가 낮아지고 화강암류 지역의 취약도가 상대적으로 높아진 결과로 나타났는데, DRASTIC과 마찬가지로 지질관련 인자의 비중이 높기 때문에 이들의 등급에 따라 전체적인 최종지수 또한 크게 좌우되는 것으로 보인다. 본 연구 지역에 대한 다중선형회귀분석 결과 모형의 상관계수는 0.62를 나타내었고 관정 주변 축사와 밭 면적의 영향력이 가장 큰 것으로 조사되었다.

본 연구에서는 충남 홍성군 금마면 일대에 대해 총 6가지의 지하수 오염 취약성 평가 방법이 적용되었으며 각 방법들의 특징과 제한점을 조사하였다. 이후 국내 상황에 맞는 취약성 평가 기법 선정 및 개선 노력이 계속되어야 할 것이다. 더 나아가 수리지질 요소와 오염원을 함께 고

려할 수 있는 방법, 효과적인 독립 변수 설정 방법 및 오염 농도와 비선형성을 고려할 수 있는 방법 등에 대한 지속적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 환경부 토양·지하수오염방지기술개발사업의 일환인 ‘지하수 질산성 질소 비점 오염 관리 및 취약성 평가 기법 개발(172-112-012)’ 과제의 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H., Petty, R.J., and Hackett, G., 1987, *DRASTIC: a standardised system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings*, USEPA, 455 p.
- Cheong, B.K., Chae, G.T., Koh, D.C., Ko, K.S., and Koo, M.H., 2008, A study of improvement for the prediction of groundwater pollution in rural area: application in keumsan, Korea, *J. Soil & Groundwater Env.*, **13**(4), 40-53.
- Civita, M., 1994, Le carte della vulnerabilita' degli acquiferi all'inquinamento: Teoria & pratica, *Pitagora Editrice*, Bologna, 325 p.
- Civita, M., and De Maio, M., 2004, Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: The Italian “combined” approach, *Geof' sica International*, **43**(4), 513-532.
- Daly, D., Dassargues, A., Drew, D., Dunne, S., Goldscheider, N., Neale, S., Popescu, I.C., and Zwahlen, F., 2002, Main concepts of the “European approach” to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping, *Hydrogeol. J.*, **10**(2), 340-345.
- Doerfliger, N. and Zwahlen, F., 1997, EPIK: a new method for outlining of protection areas in karstic environment. In: Gunay G, Jonshon AI (eds) *International Symposium and Field Seminar on “Karst Waters and Environmental Impacts”*, Antalya, Turkey, Balkema, Rotterdam, p. 117-123.
- Foster, S.S.D., 1987, Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy, van Duijvenbooden, W., van Waegeningh, H.G.(eds.), *Vulnerability of Soils and Groundwater to Pollution*, TNO Committee on Hydrological Research, The Hague. **38**, p. 69-86.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A., 1979, *Groundwater*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 604 p.
- Gogu, R.C. and Dassargues, A., 2000, Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods, *Environ. Geol.*, **39**(6), 549-559.
- Goldscheider, N., 2005, Karst groundwater vulnerability mapping: application of a new method in the Swabian Alb, Germany, *Hydrogeol. J.*, **13**(4), 555-564.
- Ham, S.Y., Cheong, J.Y., Kim, M.J., Kim, I.S., and Hwang, H.S., 2004, Assessing groundwater vulnerability using DRASTIC method and groundwater quality in Changwon City, *Econ. Environ. Geol.*, **37**(6), 631-645.
- Han, J.S., Han, K.S., Lee, Y.D., and Yoo, D.H., 1990, An assessment of groundwater pollution potential of a proposed petrochemical plant site in Ulsan, South Korea, *J. Korean Inst. Mining Geol.*, **23**(4), 425-452.
- Jo, S.B., Min, K.D., Woo, N.C., and Lee S.R., 1999, A study on groundwater contamination potential of Pyungtaek-Gun area, Kyunggi-Do Using GIS, *J. Korean Soc. Groundwater Environ.*, **6**(2), 87-94.
- Jo, S.B. and Shon, H.W., 2004, A study on the prediction of groundwater contamination using GIS, *J. Korean Geophysical Soc.*, **7**(2), 121-134.
- Kang, J.H. and Park, E., 2010, A comparative application of DRASTIC and SINTACS models for the assessment of groundwater vulnerability of Buyeo Area, *J. Soil & Groundwater Env.*, **15**(5), 32-39.
- Ki, M.G., 2013, Characterization of nitrate contamination and vulnerability assessment of groundwater in an agricultural area (northeastern Hongseong), Unpublished MS thesis, Chonbuk National University, 114 p.
- Kim, G.B., 2008, Consideration of trends and applications of groundwater vulnerability assessment methods in South Korea, *J. Soil & Groundwater Env.*, **13**(6), 1-16.
- Kurzynski, M., Woloszynski, T., and Lysiak, R., 2010, On two measures of classifier competence for dynamic ensemble selection - Experimental comparative analysis, *ISCIT 2010 - 2010 10th International Symposium on Communications and Information Technologies*, Japan, p.1108-1113.
- Lee, H.J., Park, E., Kim, K.J., and Park, K.H., 2008, A joint application of DRASTIC and numerical groundwater flow model for the assessment of groundwater vulnerability of Buyeo-Eup Area, *J. Soil & Groundwater Env.*, **13**(1), 77-91.
- Lee, S.R. and Choi, S.H., 1997, Groundwater pollution susceptibility assessment of Younggwang area using GIS technique, *J. Soil & Groundwater Env.*, **4**(4), 223-230.
- Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs (MLTM), K-Water, Korea Rural Community Corporation, 2005, Report on groundwater basic survey of Kimhae area.
- Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs (MLTM), 2012, National Groundwater Monitoring Network in Korea Annual Report 2012, 691 p.

- Muhammetoglu, H., Muhammetoglu, A., and Soyupak, S., 2003, Assessment of nitrogen excess in an agricultural area using a nitrogen balance approach, *Proceedings of the 7th International Specialised IWA Conference*, Bruen, M. (editor), Dublin, Ireland, p.727-732.
- Nolan, B.T., 2001, Relating nitrogen sources and aquifer susceptibility of nitrate in shallow ground waters of the United States, *Ground Water*, **39**(2), 290-299.
- Nolan, B.T., Hitt, K.J., and Ruddy, B.C., 2002, Probability of nitrate contamination of recently recharged groundwaters in the conterminous United States, *Environ. Sci. Technol.*, **32**(10), 2138-2145.
- National Research Council, 1993, Ground Water Vulnerability Assessment: Predictive Relative Contamination Potential under Conditions of Uncertainty. Washington, D.C.: National Academy Press, 224 p.
- Panagopoulos, G.P., Antonakos, A.K., and Lambrakis, N.J., 2006, Optimization of the DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and GIS, *Hydrogeol. J.*, **14**, 894-911.
- Park, C.K., 1996, Estimation of the available amount of groundwater in South Korea: 2. Application of five major river basins, *J. Soil & Groundwater Env.*, **3**(1), 21-26.
- Ritter, A., Munoz-Carpena, R., Bosch, D.D., Schaffer, B., and Potter, T.L., 2007, Agricultural land use and hydrology affect variability of shallow groundwater nitrate concentration in South Florida, *Hydrol. Processes*, **21**, 2464-2473.
- Rupert, M.G., 1999, Improvements to the DRASTIC Ground-Water Vulnerability Mapping Method, USGS, USGS Fact Sheet, FS-066-99.
- Thornthwaite, C.W., 1944, Report of the committee on transpiration and evaporation, Transactions, American Geophysical Union, **25**, 687 p.
- Thornthwaite, C.W. and Mather, J.R., 1957, Instruction and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance, 5th printing, v.10, CW Thornthwaite Associates, Laboratory of Climatology, Elmer, NJ, USA.
- Van Stempvoort, D., Evert, L., and Wassenaar, L., 1995. AVI: A method for Groundwater Protection mapping in the Prairie Province of Canada. PPWB Report No. 114, National Hydrogeology Research Institute, Saskatoon Saskatchewan, Canada.
- Vrba, J. and Zaporozec, A., 1994, Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability: IAH International Contribution to Hydrogeology, Verlag Heinz Heise GmbH & Co KG, **16**, 131p.
- Woo, N., 1994, Introduction to DRASTIC: a method for groundwater vulnerability assessment, *Econ. Environ. Geol.*, **27**(6), 611-612.
- Yue, Y., Li, X., and Zong, Q., 2011, Development of automobile fault diagnosis expert system based on fault tree neural network ensemble, *2011 International Conference on Electronics, Communications and Control(ICECC) Proceedings*, China, p. 2028-2031.