

## 농촌지역 지하수의 오염 예측 방법 개선방안 연구: 충남 금산 지역에서의 적용

정법근<sup>1,2</sup> · 채기탁<sup>1</sup> · 고동찬<sup>1</sup> · 고경석<sup>1\*</sup> · 구민호<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 지하수지열연구부 <sup>2</sup>공주대학교 자연과학대학 지질환경과학과

## A Study of Improvement for the Prediction of Groundwater Pollution in Rural Area: Application in Keumsan, Korea

Beom-Keun Cheong<sup>1,2</sup> · Gi-Tak Chae<sup>1</sup> · Dong-Chan Koh<sup>1</sup> · Kyung-Seok Ko<sup>1\*</sup> · Min-Ho Koo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources (KIGAM), Groundwater Environmental Group

<sup>2</sup>Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University

### ABSTRACT

Groundwater pollution prediction methods have been developed to plan the sustainable groundwater usage and protection from potential pollution in many countries. DRASTIC established by US EPA is the most widely used groundwater vulnerability mapping method. However, the DRASTIC showed limitation in predicting the groundwater contamination because the DRASTIC method is designed to embrace only hydrogeologic factors. Therefore, in this study, three different methods were applied to improve a groundwater pollution prediction method: US EPA DRASTIC, Modified-DRASTIC suggested by Panagopoulos et al. (2006), and LSDG (Land use, Soil drainage, Depth to water, Geology) proposed by Rupert (1999). The Modified-DRASTIC is the modified version of the DRASTIC in terms of the rating scales and the weighting coefficients. The rating scales of each factor were calculated by the statistical comparison of nitrate concentrations in each class using the Wilcoxon rank-sum test; while the weighting coefficients were modified by the statistical correlation of each parameter to nitrate concentrations using the Spearman's rho test. The LSDG is a simple rating method using four factors such as Land use, Soil drainage, Depth to water, and Geology. Classes in each factor are compared by the Wilcoxon rank-sum test which gives a different rating to each class if the nitrate concentration in the class is significantly different. A database of nitrate concentrations in groundwaters from 149 wells was built in Keumsan area. Application of three different methods for assessing the groundwater pollution potential resulted that the prediction which was represented by a correlation ( $r$ ) between each index and nitrate was improved from the EPA DRASTIC ( $r = 0.058$ ) to the modified rating ( $r = 0.245$ ), to the modified rating and weights ( $r = 0.400$ ), and to the LSDG ( $r = 0.415$ ), respectively. The LSDG seemed appropriate to predict the groundwater pollution in that it contained land use as a factor of the groundwater pollution sources and the rating of each class was defined by a real pollution nitrate concentration.

**Key word** : Groundwater pollution prediction, Vulnerability, Nitrate, Rural area, GIS

### 요 약 문

지하수의 오염 예측 기법의 개선을 위하여 미국 환경청(U.S. EPA)에서 개발된 지하수 오염 취약성 평가방법인 DRASTIC 모델(Aller et al., 1987), Panagopoulos et al.(2006)가 제안한 M-DRASTIC, Rupert(1999)가 제안한 LSDG 방법을 충남 금산 지역에 적용하였다. 충남 금산 지역은 농업을 비롯한 다양한 토지이용 특성과 아울러 다양한 지질, 지형, 토양 분포를 나타내어 지하수 오염예측 기법의 개선을 위한 연구에 최적의 조건을 갖추고 있다. DRASTIC 평가를 위하여 149개의 층적층 관정에 대한 수질 및 수리지질 조사가 수행되었으며, 지하수의 질산염 이온의 농도와 각 예측 방법으로부터 도출된 지수와의 상관관계 분석을 통하여 예측방법의 효용성을 평가하였다. EPA

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

원고접수일 : 2008. 3. 17 심사일 : 2008. 3. 25 게재승인일 : 2008. 8. 26

질의 및 토의 : 2008. 10. 31 까지

DRASTIC은 지하수 심도, 순 충전량, 대수층 매질, 토양 매질, 지형 경사, 비포화대 매질, 수리전도도 등 수리지질학적 인자들을 이용하여 지하수 오염 취약성을 상대적으로 평가하는 방법으로, 지하수의 잠재오염원에 대한 정보가 포함되지 않으므로 지하수 오염을 예측하는데 비효율적이다. 본 연구 결과, 관정 주변 150 m 영역의 DRASTIC 지수와 해당 관정의 질산염 이온 농도의 상관관계는 0.058로 낮게 나타났다. 한편, M-DRASTIC의 경우 DRASTIC과 사용하는 인자는 같으나 등급과 가중치를 실제 질산염 이온 농도의 비율로부터 산출한다. 등급만을 수정하였을 경우 0.245, 등급과 가중치를 모두 수정하였을 경우 질산염 이온 농도와의 상관관계는 0.400로 지하수 오염 예측율이 개선되었다. LSDG 방법은 토지이용(Land use), 토양 배수(Soil drainage), 지하수면 심도(Depth to water), 지질(Geology)를 특성에 따라서 구분하고 해당 지역의 질산염 이온 농도 평균의 차이를 통계적으로 분석하여 등급을 산정하는 기법으로, 금산 지역에 적용한 결과 질산염 이온 농도와의 상관관계가 0.415로 개선되었다. 결과적으로 LSDG를 적용하였을 경우 EPA DRASTIC 보다 질산염 이온 농도와의 상관관계가 0.357만큼 개선되었다. M-DRASTIC과 LSDG의 예측율이 증가하는 것은, 이 방법들의 등급과 가중치에는 현재의 오염현황이 반영되기 때문으로 질산염 이온 오염 가능성을 귀납적으로 예측하기 때문이다. LSDG의 예측율이 가장 높은 이유는 LSDG에는 잠재오염원으로 분류되는 토지이용이 포함되었기 때문인 것으로 판단된다.

**주제어** : 지하수 오염 예측, 오염 취약성, 질산염 이온, 농촌지역, GIS

## 1. 서 론

최근 지하수 이용량이 증가하면서 수자원으로서 지하수의 중요성이 증대되고 있다. 이에 따라 지하수 오염 가능성을 정량적으로 평가하는데 관심이 집중되고 있다. 그러나 지하수 오염에 영향을 미치는 잠재 오염원의 종류가 다양하고, 오염 물질의 거동에 대한 예측이 어렵기 때문에 지하수 오염 가능성을 예측하는 것은 쉬운 일이 아니다. 그 동안 지하수의 오염 가능성을 평가하기 위한 방법이 고안되었는데, 그 중 가장 대표적인 방법이 미국 환경청(U.S. EPA)에서 개발된 DRASTIC 모델이다(Aller et al., 1987). DRASTIC 모델은 활용하기 쉬운 방법 중의 하나로 최근까지 해외에서만 아니라 국내에서도 많은 연구자들에 의해서 적용된 바 있다(이사로·김윤중, 1996; 이사로·최순학, 1997; 조시범 등, 1999; 손호웅, 2001; 조시범·손호웅, 2004; 함세영 등, 2004; Rupert, 1999; Baalousha, 2006; Panagopoulos et al., 2006; Antonakos and Lambrakis, 2007; Wang et al., 2007; Jamrah et al., 2007). 조시범 등(1999)와 손호웅(2001), 조시범·손호웅(2004)은 기존 DRASTIC에 토지 이용과 구조선 밀도를 추가하여 수정된 DRASTIC 지수를 제시하였고, Rupert(1999)와 Panagopoulos et al.(2006)은 관측된 질산염 이온 농도를 이용하여 등급과 가중치를 수정한 지하수 오염 취약성 지수를 제시하였으며, Wang et al.(2007)은 대수층의 두께와 오염 물질의 특성에 따른 영향을 취약성 평가에 적용하여 수정된 지하수 오염 취약성 지수를 제시한 바 있다.

EPA의 DRASTIC 모델은 수리지질학적인 인자들만을 이용하여 오염 취약성을 평가하는 방법이기 때문에 실제

오염을 예측하기 어려운 단점이 있다. 즉, DRASTIC 모델은 대수층에 오염물질이 유입되었는지 여부에 관계없이 지하수 오염의 가능성을 대수층 고유의 특성을 이용하여 평가하는 방법이다. DRASTIC에는 잠재오염원에 대한 인자가 포함되지 않기 때문에 DRASTIC 지수(index)로 지하수 오염을 예측하는 것은 논리적으로 맞지 않다. 농림부(2000)에서는 지하수 오염 예측을 지하수 오염 취약성 평가의 상위 개념으로 설명하면서, 지하수 오염 예측을 오염 취약성에 잠재 오염원 분포를 포함한 개념으로 정의한 바 있다. 우리나라 지하수 관리의 법적 근거인 지하수법에 따르면(지하수법 제 6조, 지하수법 시행령 제 7조 2항의 2) “환경부 장관이 법 제 4조 제 3항의 규정에 의하여 수립하는 지하수의 수질 관리 및 정화 계획에 ‘2. 지하수의 오염의 현황 및 예측의 사항을 포함시켜야 한다.’고 규정되고 있다. 따라서 지하수 오염 예측은 지하수 오염 취약성을 포괄하는 개념일 뿐만 아니라 지하수법에 근거한 지하수 수질 관리의 방법으로서 지하수 오염 취약성만을 평가하는 DRASTIC을 적용하기 보다는 지하수 오염 예측 방법을 개발하는 것이 바람직하다.

뿐만 아니라, DRASTIC 모델에서 사용하는 인자의 등급 및 가중치는 과학적인 방법을 통하여 정해진 것이 아니라 DRASTIC 모델의 개발에 참여한 행정가와 지하수 사업자, 연구자들 간의 합의(Delphi method)에 의해 산출되었기 때문에 과학적인 근거가 미약한 단점이 있다. 최근에는 DRASTIC에서 이용된 오염 취약성 인자의 등급 및 가중치를 실제 지하수 오염 데이터에 근거해서 귀납적으로 추론하는 방법이 적용되고 있으며(Panagopoulos et al., 2006; Rupert, 1999; Antonakos and Lambrakis, 2007), 여기에 잠재오염원으로서 토지 이용을 포함함으로

서 지하수 오염 예측 방법을 개발하고자 하는 연구가 수행되고 있다.

본 연구의 목적은 EPA의 DRASTIC 방법과 Panagopoulos et al.(2006)와 Rupert(1999)에 의해 제안된 지하수 오염 예측 기법을 충남 금산 지역에 적용하고, 이로부터 국내 여건에 적합한 지하수 오염 예측 방법을 모색하는데 있다. 즉, 본 연구의 목적은 EPA DRASTIC 방법을 적용한 결과와 실제 오염현황을 비교하여 오염 예측 시 문제점을 알아보고, M-DRASTIC과 LSDG의 적용을 통하여 개선안을 비교함으로써 국내 여건에 적합한 오염 예측 방법을 모색하는데 있다.

## 2. 연구 방법

지하수 오염 예측 기법인 미국 EPA에서 개발된 DRASTIC 모델, Panagopoulos et al.(2006)에 의해 제안된 M-DRASTIC 방법, Rupert(1999)에 의해 개발된 LSDG 방법을 적용하기 위하여 GIS 소프트웨어를 이용하여 관련 자료의 데이터베이스 구축, 분석 등을 수행하여 이의 타당성을 평가하였다. 시범 적용지역으로는 금산 지역을 선정하였다. 금산은 전형적인 농촌지역으로 주요 토지 이용은 논(9.7%), 밭(10.0%), 임야(72.9%), 주거지 및 상업지(4.1%) 등으로 임야가 대부분을 차지하며, 논, 밭 주거/상업지가 적절히 분포하고 있다. 지하수 내 질산성 질소의 주요 오염원인 질소 비료 사용량은 최근 5년(2002~2006년)간 평방킬로미터당 평균 15.6 ton이 사용되어 전국 평균(17.5 ton/km<sup>2</sup>)보다 다소 낮은 특성을 나타내었다(금산군, 2007; 농림부, 2007).

### 2.1. DRASTIC 적용

지하수 오염 가능성 평가를 위해 GIS의 공간분석 기법에 의거한 DRASTIC 방법을 적용하였다. DRASTIC이란 일정한 범위의 지역에서 지하수 오염 가능성(Groundwater Pollution Potential)을 평가하는 방법으로 지하수 오염에 관계되는 수리지질학적 요인들을 등급으로 수치화하고, 전체 인자들의 영향을 종합하여 평가하는 방법이다. DRASTIC은 1987년 미국 환경청(U.S. EPA)과 미국정호협회(NWWA)에 의하여 개발된 모델이다. 초기 DRASTIC 모델에서는 대수층의 화학성분, 온도, 투수계수(transmissivity), 비틀림도(tortuosity), 기체상의 이동 등도 포함되어 평가되었으나, 현재는 이러한 인자들 중에서 지도상으로 자료 수집이 가능하고, 지하수 오염 가능성에 영향을 미칠 수 있는 7가지의 수리지질학적인 인자들만

이 선택되었다(Aller et al., 1987).

DRASTIC 모델에서 정의하는 지하수 오염 가능성 관련 수리지질학적 인자는 지하수면 심도(Depth to water), 순충진량(Net recharge), 대수층 매질(Aquifer media), 토양 매질(Soil media), 지형(Topography), 비포화대 매질의 영향(Impact of vadose zone media), 대수층의 수리전도도(Hydraulic conductivity of the aquifer)이다. 지하수위의 심도는 지표면에서 지하수면까지의 깊이로 정의되며, 지하수면 심도가 증가할수록 지표 오염물질의 유입 가능성이 낮아지기 때문에 오염취약성이 낮다고 간주된다. 순충진량은 지표를 통해 침투되어 포화대에 도달하는 물의 총량으로 정의되며, 강우가 충전되면서 지표 오염 물질이 대수층으로 이동된다고 가정되기 때문에 순충진량이 증가할수록 오염취약성이 높다고 평가된다. 대수층 매질은 대수층 지질로 정의되며, 일반적으로 알려진 암석의 투수성이 클수록 오염취약성이 높다고 간주된다. 토양 매질은 생물 활동이 활발한 비포화대의 최상부 또는 풍화대의 최상부로서 지표로부터 심도 1.83 m 이내의 층으로 정의되며 토양층이 두껍고, 입자크기가 작을수록 오염취약성이 낮다고 평가된다. 지형은 지표면의 경사 또는 경사율로 정의되며, 지형 경사율이 클수록 지표유출량이 커져 오염물질이 지하로 침투할 가능성이 낮아지기 때문에 오염취약성이 낮다고 간주된다. 비포화대 매질은 지하수면 상부층으로 포화되어있지 않거나 불연속적으로 포화되어 있는 층으로 정의되며, 층이 두꺼울수록 오염물질이 저감될 가능성이 크기 때문에 오염 취약성은 낮다고 평가된다. 대수층의 수리전도도는 대수층 매질이 물을 유동시킬 수 있는 정도로 정의되며 수리전도도가 높으면 오염 취약성은 높다고 간주된다(Aller et al., 1987).

지하수 오염에 대한 상대적인 영향을 정량적으로 평가하기 위하여, 이들 각 인자(factor)들의 범위(range)에 등급(rating)을 부여하고 가중치(weight)를 곱해서 DRASTIC 지수(DRASTIC index:이하 Di)를 산출한다. 이 Di를 연구지역에 적용하여 지하수 오염 취약성을 상대적으로 평가한다. Di의 계산식은 다음과 같다(식 1).

$$D_i = r_D W_D + r_R W_R + r_{AW} W_A + r_S W_S + r_T W_T + r_I W_I + r_C W_C \quad (\text{식 1})$$

여기서,  $r_a$ 는 각 인자의 등급,  $w_a$ 는 각 인자의 가중치이다. Di가 높을수록 지하수 오염 취약성이 높고, 반대로 Di가 낮을수록 지하수 오염 취약성이 낮다고 평가된다. DRASTIC은 오염물질이 지표로부터 유입되며, 강우의 충전과 함께 대수층으로 유입되고, 오염물질의 유동은 물과

**Table 1.** Basic assumption of DRASTIC (after Aller et al., 1987)

1. The contaminant is introduced at the ground surface.
2. The contaminant is flushed into the groundwater by precipitation.
3. The contaminant has the mobility of water.
4. The area evaluated using DRASTIC is 100 acre(0.4 km<sup>2</sup>) or larger.

동일한 유동을 하며, 약 0.4 km<sup>2</sup> 이상의 지역에 적용되어야 한다는 기본 가정을 바탕으로 한다(Table 1). 이와 같은 기본 가정을 만족하는 지역에서는 오염 가능성 평가에 있어 최선의 방법이 될 수 있으나, 이 가정을 만족시키지 못하는 지역에 대한 평가 시에는 지하 암반의 파쇄대의 발달 방향 및 구조선의 밀도 등 오염 물질의 거동 방향에 영향을 주는 상황에 대해 고려가 되어야 할 것이다(우남철, 1994).

**2.2. M-DRASTIC 방법 적용**

M-DRASTIC 방법은 Panagopoulos et al.(2006)에 의해서 제안된 방법으로 DRASTIC 방법 중에서 등급 및 가중치의 산정 방법을 개선한 방법이다. 이 논문에서는 인자등급수정 방법(DRASTIC model, modified factor ratings: 이하 MRD)과 인자 및 등급수정 방법(DRASTIC model, modified factor ratings and weight: 이하 MRWD)으로 명명된 것을 본 연구에서 편의상 M(modified)-DRASTIC 으로 칭하였다. 이 방법은 EPA DRASTIC의 각 인자를 모두 적용하는데, 각 인자 분포지역 지하수의 질산염 이온 농도에 비례해서 등급을 다시 계산하는 방법이다. 가령, DRASTIC 인자의 대수층 매질에 대해서, 충적층 지역 지하수의 평균 질산염 이온의 농도가 26.08 mg/L이고, 이 값이 가장 높다면, 충적층 지역은 등급 10을 부여한다. 화강암 지역의 질산염 이온의 평균 농도가 23.13 mg/L가 나왔을 경우, 충적층 지역의 질산염 농도에 비례해서 등급을 8.9를 부여한다( $8.9 = 23.13/26.08 \times 10$ ). 가중치에 대한 수정은 등급 수정과는 다른 방법이 적용되는데, 각 인자별 등급과 질산염 이온의 농도와의 상관관계분석(Spearman's rho)을 통해 그 관계가 통계적으로 유의한 인자들만을 취약성 평가에 적용하고 나머지는 제외한다. Spearman's rho는 순위화된 자료간의 관계를 측정하는 통계 분석으로서, 독립변수와 종속변수가 연속적인 양적변수가 아니라 서열척도에 의한 비연속적인 양적변수이거나 정규분포를 따르지 않을 때 두 변수의 상관을 알기 위하여 쓰이고, 0(무관관)으로부터 ±1까지의 범위를 가지며, Spearman의 등위상관계수(rank correlation

coefficient)라고도 한다(성태제, 2001). 통계 분석은 SPSS(Chicago, IL, USA) 통계 프로그램을 이용하여 수행되었다. 통계적으로 유의한 인자들 중 상관계수가 가장 높은 인자에 가중치 5를 부여한다. 가중치 5는 EPA DRASTIC의 가중치 중 가장 높은 값이다. 나머지 인자들에 대해서는 상관계수의 비를 통해 가중치를 적용한다. 가령, 토양매질의 상관계수가 0.186으로 가장 높다면, 토양매질에 대해 가중치 5를 부여한다. 이에 비례해서, 지형경사의 상관계수가 0.183이 나왔을 경우, 가중치를 4.9을 부여한다( $4.9 = 0.183/0.186 \times 5$ ). 가중치의 상관계수 중에서 통계적으로 유의한 인자들(p value < 0.05)만을 포함하여 오염취약성 수식을 재구성한다. 등급만을 수정한 방법은 EPA DRASTIC보다 현실적으로 등급을 부여하는 방법으로 EPA DRASTIC에 비해 오염 예측율이 개선된다고 보고된 바 있다(Panagopoulos et al., 2006).

**2.3. LSDG 적용**

LSDG 방법은 Rupert(1999)에 의해서 제안된 지하수 오염취약성 평가방법으로 토지이용(Land use), 토양배수(Soil drainage), 지하수면 심도(Depth to water), 지질(Geology)만을 취약성 평가의 인자로 사용한 방법이다. Rupert(1999)는 제안한 방법의 명칭을 '보정된 오염 가능성도'라고 지칭하였으나, 본 연구에서는 편의상 LSDG라고 지칭하도록 하겠다. LSDG 방법은 7개의 DRASTIC의 인자 중 지하수 오염 취약성에 있어 가장 중요하고, 자료 수집이 용이한 토양 매질(이중에서 토양 배수를 이용함), 지하수면 심도, 토지이용을 사용하였다. Rupert(1999)가 토지이용을 적용한 이유는 지표 오염원을 지하수 오염 취약성에 반영하기 위해서가 아니라, 토지이용이 순 충전량에 영향을 미치므로 순 충전량 인자를 대체할 목적으로 토지이용을 적용하였다. 그러나 토지이용은 지표오염을 간접적으로 나타내므로 LSDG 방법은 오염 취약성 평가 방법이라기보다는 오염 예측 방법에 가깝다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 토지이용을 순 충전량의 개념이 아닌 잠재오염원의 개념을 적용하였다. 이에 따라 토지이용을 도심지역(urban), 관개농업지역(irrigated agriculture), 방목지(rangeland), 밭농사지역(dryland agriculture), 임야(forest)로 나누었다. 본 연구에서는 방목지를 제외하고 공업지역(industry)을 도심지역에 포함하여 4개 범위로 구분하였다. 토지이용도는 국토지리정보원에서 제공하는 1:25,000 축척의 토지이용현황도를 참조하였다. 한편, 토양배수는 매우 양호(excessive), 양호(well), 보통(moderate), 불량(poor)으로 구분하였다. 본 연구에서는 농업과학기술원에서 분류한

토양통에 기재되어 있는 토양 배수성을 매우양호(excessive), 양호(well), 약간 불량(Moderately poor)으로 구분하였다. 지하수면 심도의 경우, Rupert(1999)는 지하수면 심도를 0~100, 101~300, 301~600, 601~900, 900 피트 이상의 5개 범위로 나누었다. 본 연구에서는 연구지역의 지하수면 심도를 고려하여 0~5, 5~10, 10~20, 20 m 이상의 4개 범위로 구분하였다. Rupert(1999)는 토지이용, 토양배수, 지하수면 심도만을 이용하였으나, 본 연구에서는 지질(Geology) 특성도 추가하였으며, 석회암, 충적층, 화산암, 화강암, 천매암, 변성사질암의 6개 범위로 구분하였다.

LSDG 방법은 위와 같이 구분된 지역에서 지하수의 질산염 이온 농도의 평균값을 통계적으로 비교하여 각 범위에 등급을 부여하고 기중치 없이 합산하는 방법이다. Rupert(1999)는 질산염 이온 농도의 평균을 비교하는 통계 방법으로 윌콕슨 순위합 검정(Wilcoxon rank sum test)을 적용하였다. 윌콕슨 순위합 검정은 윌콕슨에 의해 제안된 방법으로 서로 독립적인 두 모집단으로부터 추출한 표본의 중앙값 크기를 비교 분석하여, 통계적으로 유의한 차이가 있는지를 검정하는 비모수 검정법(Nonparametric test)이다. 측정치 자체를 사용하지 않고 측정치의 순위를 사용하여 통계적으로 검정하며, 모집단에 대한 가정이나 조건에 구애받지 않기 때문에 자료가 정규 분포에서 벗어난 경우에 모수적 통계기법보다 나은 검정력을 나타낸다(이훈영, 2004). 통계 분석은 SPSS (Chicago, IL, USA)통계 프로그램을 이용하여 수행하였다. 만약 각 범위에 속하는 지역의 질산염 이온 농도가 통계적으로 유의하게 차이 난다면 등급을 차등 부여하고, 만약 유의한 차이를 나타내지 않는다면 등급을 동일하게 부여한다. 이 방법으로 Rupert(1999)는 미국 Idaho 지역의 지하수의 오염 취약성 평가를 수행하였고, 3개로 구분된 인자들의 각 범위에서 질산염 이온 농도의 차이가 유의하게 나타남으로써 LSDG 방법이 오염 취약성 평가에 유용함을 나타낸 바 있다.

#### 2.4. 오염 취약성 평가의 검증

위에서 기술한 3가지 오염 취약성 평가 방법을 검증하기 위해서 buffer overlay analysis(이하 BOA 방법)를 이용하였다(Alley, 1993). BOA 방법은 관점으로부터 일정 거리 범위의 buffer를 수치지도 상에 구현하고, 그 범위에 속하는 인자의 면적을 구하는 방법이다. 이를 통해서 관정에 물리화학적으로 영향을 미칠 수 있는 반경 내에 DRASTIC 값과, M-DRASTIC 값, LSDG 값의 면적 가중값을 각각 구하여 관정에서 산출된 지하수의 질산염 이

온의 농도와 비교하였다. 본 연구에서는 buffer의 크기를 구하기 위하여 50, 100, 150, 200, 250, 350, 650, 750, 850, 1000 m의 buffer 반경에 대하여 상관관계를 분석해 보았으며, 그 중 상관관계가 최대로 나타난 150 m buffer의 결과를 해석에 이용하였다.

지하수의 질산염 이온 농도는 금산 지역 149개 관정의 수리화학적 조사를 통하여 구하였다. 조사지점은 금산 지역에 고르게 분포할 수 있도록 선정되었으며, 선정된 관정은 심도 50 m 이하의 충적층 관정에 한하였다. 시료 채취 시 지하수의 온도 및 전기전도도가 일정해질 때까지 양수한 후 현장 측정 및 시료 채취를 수행하였다. 현장에서 온도, pH, 전기전도도(EC), 용존산소(DO)를 측정하였으며, pH와 DO의 측정기는 조사 전에 보정(calibration)을 수행하였다. 알칼리도는 산중화적정법을 이용하여 측정하였으며, 온도, pH와 탄산염의 평형반응식을 이용하여  $\text{HCO}_3^-$  농도를 결정하였다. 주요 용존 이온( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{F}^-$ )은 한국지질자원연구원 지하수환경연구실의 IC (Dionex ICS-1500)를 이용하여 분석하였으며, 양이온은 ICP-AES로 재분석하여 검증하였다. 분석 결과는 전하균형(charge balance)을 통하여 신뢰성을 검증하였고, 분석 간에는 한국표준과학연구원 인증표준물질(CRM: Certified Reference Material)을 이용하여 분석의 정도관리를 수행하였다.

#### 2.5. 연구지역

연구 지역은 충청남도 금산군으로 상수도 보급률이 50% 이하인 지역이 대부분을 차지하고 있어 지하수 오염 취약성 평가와 지하수 오염 예측에 관한 연구가 요구되었다(금산군, 2007; 환경부, 2008). 상수도 보급률(급수인구/총인구)을 세부적으로 살펴보면, 금산읍(제원면 포함) 98.2%, 추부면(금성면, 군북면, 복수면 포함) 67.9%, 금성면 40.3%, 제원면 38.4%, 복수면 22.6%, 군북면 12.2%로 대부분 50%를 밑돌고 있다. 이 지역은 생활용수 및 음용수를 지하수에 의존하고 있다. 따라서 지하수의 오염 예측과 체계적인 관리를 위해 지하수의 오염 취약성 평가와 그에 관한 연구가 필요하였다. 또한 본 연구 지역은 지질이 다양하고 산지와 평지가 고르게 분포하며, 농업지역과 도시지역이 뚜렷이 구분되는 등 오염 취약성 평가와 지하수 오염 예측 연구에 적합한 조건을 갖추었다. 연구 지역은 동경 127° 38' 03" ~ 127° 19' 19", 북위 35° 58' 32" ~ 36° 16' 06" 사이에 위치하며, 면적은 약 576 km<sup>2</sup>이다. 지형적인 특성은 해발고도 904 m의 서대산을 최고 봉으로 대둔산(878 m), 기봉(537 m), 만인산(537 m)으로

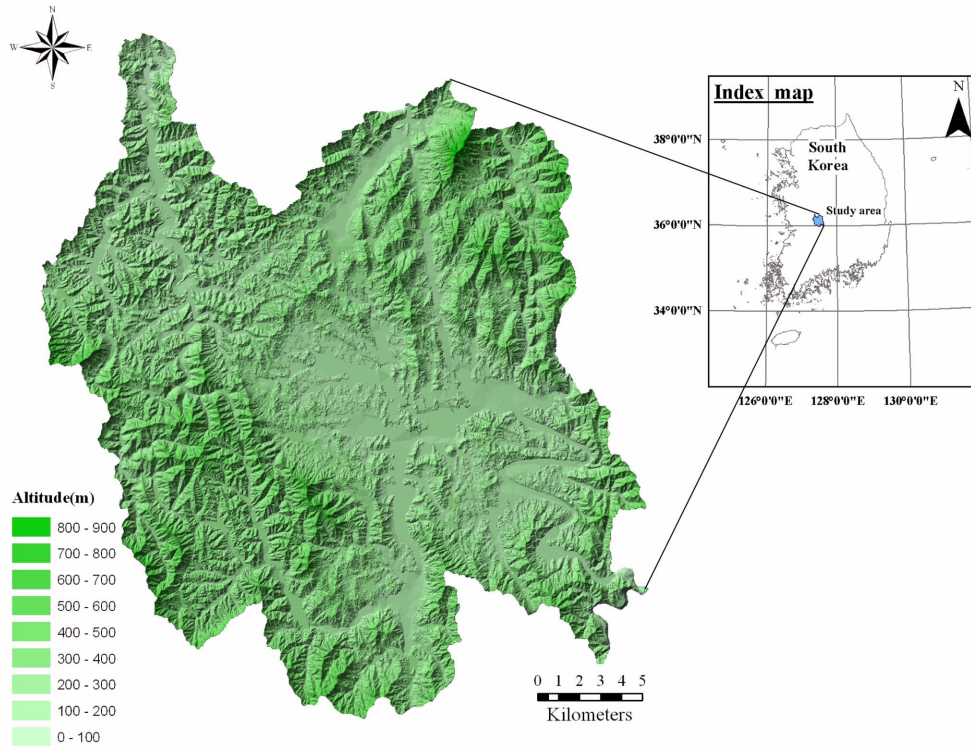


Fig. 1. Relief and geographic map of the study area.

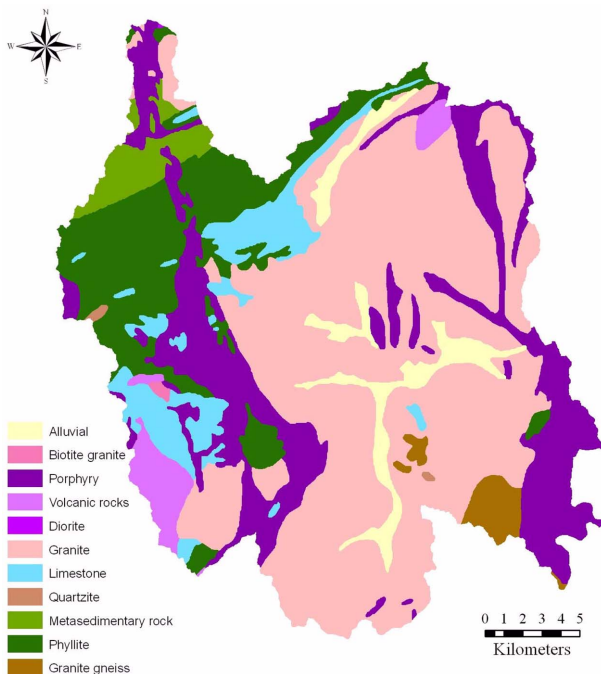


Fig. 2. Geology map of the Keumsan area (modified from Hong and Choi, 1978; Hong et al., 1980).

둘러싸여 있으며, 평균 해발고도는 약 250 m이다(Fig. 1). 연구 지역의 연평균 기온은 11.8°C이고, 연평균 강수량은

약 1,300 mm이다.

금산 지역의 지질은 옥천층군과 중생대 화성암류로 구분되며, 선 캄브리아기 편마암류, 시대 미상 옥천층군, 쥐라기 화강암, 백악기 퇴적암류, 백악기 화성암류, 제 4기 충적층 등으로 구성되어 있다(Fig. 2, 홍승호 · 최위찬, 1978; 홍승호 등, 1980). 선캄브리아기 편암류는 흑운모편마암, 시대 미상 옥천층군은 결정질 석회암, 호상석회암, 천매암, 암회색 사질암 등으로 구성되어 있다. 쥐라기 화강암은 주로 흑운모 화강암으로 구성되어 있으며, 백악기 암석은 산성 화산암류, 서대산 응회암, 석영 반암, 규장암 등으로 구성되어 있다(홍승호 · 최위찬, 1978; 홍승호 등, 1980).

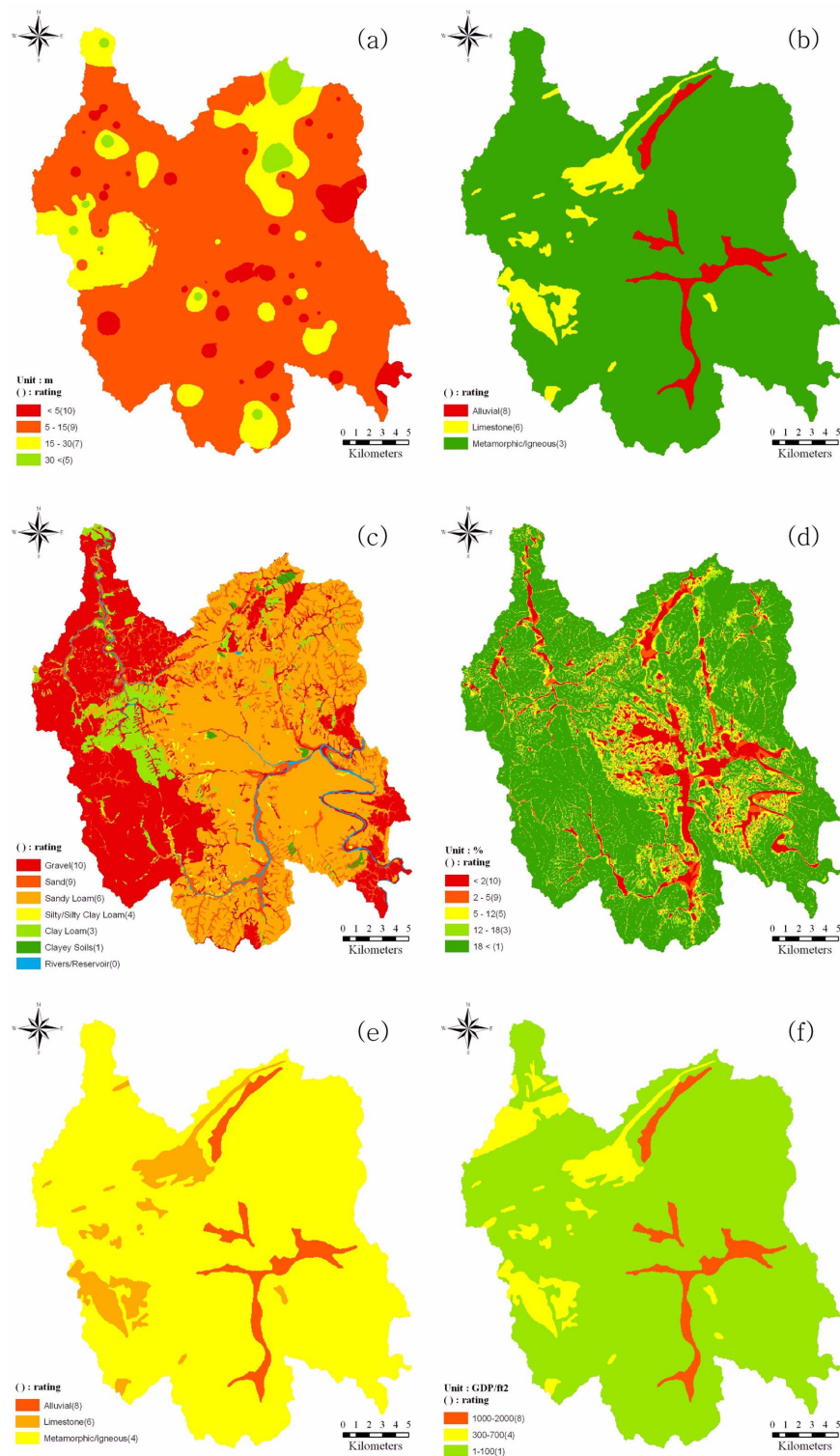
연구 지역은 금강권역에 속하고 갑천, 논산천, 대청댐상류, 영동천 유역의 4개 중권역으로 분류된다. 주요 수계로는 서화천, 천내강, 유등천, 벌곡천, 장산천이 있으며, 이러한 수계들을 따라 분지들이 형성되어 있다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. DRASTIC 적용 결과

##### 3.1.1. 지하수면 심도

연구 지역의 지하수면 심도는 현장조사 실측자료 중 지하수 측정 불가 관정을 제외한 관정의 지하수위면의 심



**Fig. 3.** DRASTIC map of Keumsan area: (a) Depth to water, (b) Aquifer media, (c) Soil media, (d) Topography, (e) Impact of vadose zone, (f) hydraulic Conductivity.

도에 대한 자료를 이용했다. 등수위선은 ArcGIS 공간분석기법 중 역거리가중치(Inverse Distance Weight, IDW)

보간법을 이용하여 내삽함으로써 금산군 전체에 대한 지하수면의 심도를 유추하였고(Fig. 3a), 그 결과 지하수면

심도 분포는 충적층 지역에서 낮고, 산지에서 깊은 특징을 나타냈다. 지하수면의 심도는 4개 등급으로 분류되었으며, 각 등급에 따른 범위와 면적비는 Table 2과 같다.

3.1.2. 순 충전량

연구 지역의 순 충전량은 박재성 등(1999)에 의해 정리된 물수지법(water balance analysis)을 적용하였으며, 여기에 사용된 기상자료는 금산기상관측소에서 측정된 30년(1971~2000년) 동안의 월평균 값을 이용하였다. 물수지법으로 순 충전량을 산정하기 위해 필요한 손실량은 Turc식을 적용하였고, 증발산량의 산정에는 Thornthwaite의 경험식을 적용하였다. 산정 결과, 조사 지역 내 함양량은 연간 254 mm 이상인 9등급으로 나타났다.

3.1.3. 대수층 매질

연구 지역의 대수층 매질에 대한 자료는 1 : 50,000 축척의 지질도를 이용하였다. 연구 지역의 대수층 매질은 크게 변성/화성암류, 석회암, 충적층으로 구성되었으며, 이를 바탕으로 3개 등급으로 분류하여 대표 등급을 적용하였다(Fig. 3b). 각 등급에 따른 범위와 면적비는 Table 2와 같다. 충적층과 석회암을 제외한 모든 암석이 화성암과 변성암으로 분류되기 때문에 변성/화성암류의 면적이 금산 지역의 대부분을 차지한다.

3.1.4. 토양 매질

연구 지역의 토양 매질에 대한 분석은 1 : 25,000 축척 정밀 토양도(자료제공: 농촌진흥청)를 이용하여 수행했다. 그 결과 토양통명으로 54개, 토양통부호로 117개의 토양통으로 분류되었다. 토양계를 속성으로 7개 등급으로 분류되었고, 역질로 분류된 지역은 주로 산악지역에, 사양질로 분류된 지역은 주로 평야지역에 분포하는 것으로 나타났으며(Fig. 3c), 각 등급에 따른 범위와 면적비는 Table 2와 같다.

3.1.5. 지형

지형 경사율은 ArcGIS 소프트웨어를 이용하여 1 : 25,000 축척의 수치지형도에서 등고선 레이어를 추출하여 불규칙 삼각망(Triangulated Irregular Network, TIN)방법을 이용한 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM)을 작성한 후, 경사도(%)를 계산하였다(Fig. 3d). 연구 지역의 66%가 경사도 18%이상을 나타냈으며, 이는 대부분이 산악지역인 연구지역의 특성을 반영한 결과라고 할 수 있다. 이를 바탕으로 5개 등급으로 분류했으며, 각 등급에 따른 범위와 면적비는 Table 2와 같다.

**Table 2.** Original rating, areal percent, and ranges of DRASTIC factors of the study area

Factors	Rating	Area(%)	Ranges
Depth to water (m)	5	2.3	30 <
	7	17.1	15 - 30
	9	75.4	5 - 15
	10	5.2	< 5
Net Recharge (mm/yr)	9	100	more than 254
Aquifer Media	3	89.2	Metamorphic/Igneous
	6	6.5	Limestone
	8	4.3	Alluvial
	0	1.3	Rivers/Reservoir
Soil Media	1	0.6	Clayey Soils
	3	5.7	Clay Loam
	4	0.8	Silty/Silty Clay Loam
	6	49.5	Sandy Loam
	9	8.8	Sand
	10	33.4	Gravel
Topography (%)	1	65.7	more than 18
	3	10.5	12 - 18
	5	10.3	5 - 12
	9	6.3	2 - 5
Impact of Vadose zone media	10	7.2	0 - 2
	3	89.2	Metamorphic/Igneous
	6	6.5	Limestone
Hydraulic Conductivity of the aquifer (GPD/ft <sup>2</sup> )	8	4.3	Alluvial
	1	86.5	1 - 100
	4	9.2	300 - 700
	8	4.3	1000 - 2000

3.1.6. 비포화대 매질의 영향

우리나라의 경우 토양층이 비교적 얇게 분포하기 때문에 본 연구에서는 지질도를 이용한 지질분류에 의해 비포화대 매질을 분류했다(건설교통부 등, 2005). 그 결과 크게 변성/화성암류, 석회암, 충적층 3개의 등급으로 분류되었고(Fig. 3e), 각 등급에 따른 범위와 면적비는 Table 2와 같다. 비포화대 매질의 면적 분포는 대수층 매질의 분포와 동일하게 나타났다.

3.1.7. 대수층의 수리전도도

대수층의 수리전도도는 지질도를 이용하여 암반의 지질 특성에 따른 수리전도도의 범위를 적용했다(Freeze and Cherry, 1979). 그 결과 3개의 등급으로 분류되었고(Fig. 3f), 각 등급에 따른 범위와 면적비는 Table 2과 같다. 비포화대 매질과 마찬가지로 대수층의 수리전도도의 분포도 지질 분포를 따른다.



3.1.8. 질산염 이온 농도의 분포

연구 지역 관정의 질산염 이온 농도는 평균 23.3 mg/L이며, 최소 0.04 mg/L에서 최대 113.6 mg/L의 범위를 나타낸다. 먹는 물 수질기준(44.3 mg/L)을 초과하는 관정은 총 21개로 조사관정의 약 14%에 해당하며(Fig. 4), 질산염 이온 농도의 초과율은 최소 0.8%에서 최대 156.5%의 범위를 나타냈고, 대부분 주거지역 및 농업지역에 위치하고 있다.

3.2. DRASTIC 평가 결과

각 인자별로 가중치와 범위에 따른 등급을 결정한 후, 공간적인 분포를 50 × 50 m 격자로 구성하여 DRASTIC을 적용하였다. 그 결과 D는 평균이 133, 중앙값은 130이며, 최소 81에서 최대 204의 범위를 나타내었다(Fig. 5a). 충적층 지역과 석회암 지역의 Di가 높게 나타났으며, 이를 제외한 나머지 지역과 대부분의 산악 지역은 평균 이하의 값을 보였다. 이는 일반적으로 충적층과 석회암의 수리지 특성이 화성암과 변성암보다 높게 평가되는데 기인한 것으로 생각되며, 본 연구에서는 DRASTIC의 7개

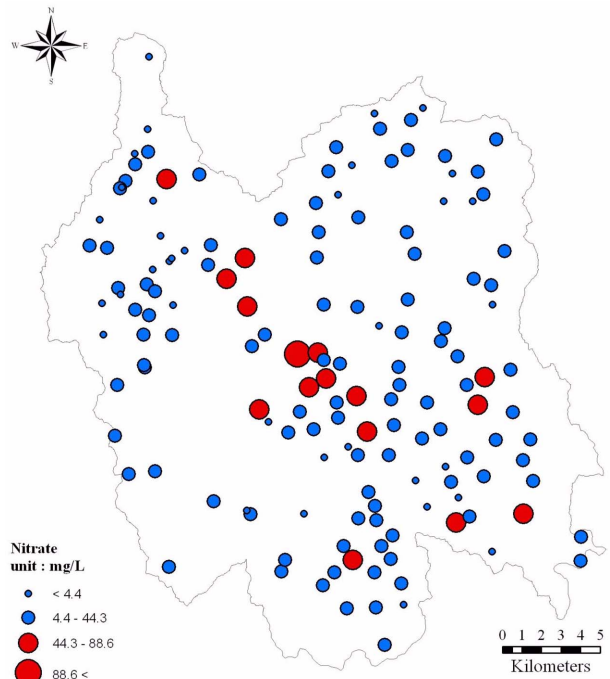


Fig. 4. Distribution of nitrates concentrations of alluvial groundwater from Keumsan area.

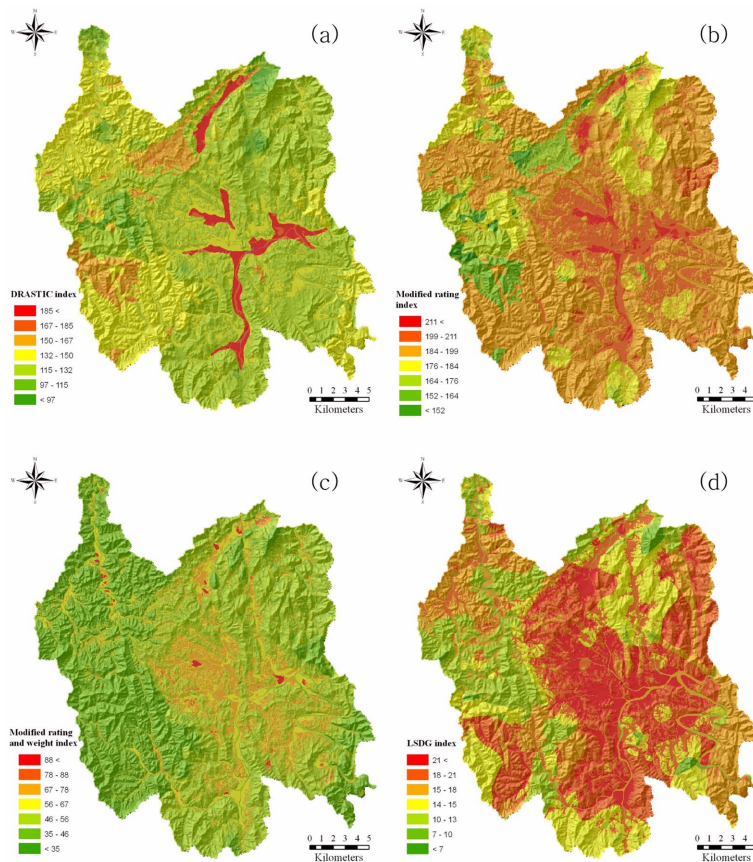


Fig. 5. Result of index map: (a) EPA DRASTIC, (b) MRD, (c) MRWD, (d) LSDG.

**Table 3.** Original and modified ratings for DRASTIC factors of the study area

Factors	Ranges	Original rating	Mean NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Modified rating
Depth to water (m)	30 <	5	17.8	6.8
	15 - 30	7	16.3	6.2
	5 - 15	9	24.3	9.3
	< 5	10	26.1	10.0
net Recharge (mm/yr)	more than 254	9	-	9
Aquifer Media	Metamorphic/Igneous	3	23.1	8.9
	Limestone	6	16.9	6.5
	Alluvial	8	26.1	10.0
Soil Media	Rivers/Reservoir	0	-	0
	Clayey Soils	1	56.7	10.0
	Clay Loam	3	19.0	3.3
	Silty/Silty Clay Loam	4	35.5	6.3
	Sandy Loam	6	27.1	4.8
	Sand	9	20.3	3.6
	Gravel	10	14.5	2.6
Topography (%)	more than 18	1	13.5	5.0
	12 - 18	3	16.9	6.3
	6 - 12	5	26.9	10.0
	2 - 5	9	23.1	8.6
	0 - 2	10	26.5	9.8
Impact of Vadose zone media	Metamorphic/Igneous	3	23.1	8.9
	Limestone	6	16.9	6.5
	Alluvial	8	26.1	10.0
Hydraulic Conductivity of the aquifer (GPD/ft <sup>2</sup> )	1 - 100	1	23.7	9.1
	300 - 700	4	13.7	5.2
	1000 - 2000	8	26.1	10.0

인자 중 대수층 매질과 수리전도도, 비포화대의 영향에 지질적 특성이 반영되었기 때문에 위와 같은 결과를 나타내었다고 사료된다. 한편, 연구지역의 남서쪽 부근은 산지임에도 Di가 높게 나타나는데 이 역시 석회암이라는 지질적 특성이 Di에 반영된 결과로 생각되며, 이러한 양상은 연구지역 내에서 국지적으로 석회암 지대에서 나타나고 있다. 오염 취약성 검증을 위해 BOA 방법(반경 150 m)을 적용하여 Di값과 질산염 이온 농도와의 상관관계를 분석하였다. 그 결과 상관계수가 0.058로 상당히 낮게 나타났다. 앞서 기술한 EPA DRASTIC 모델에서는 단순히 수리지질학적인 인자들만이 선택되어 Di가 평가되기 때문에 BOA 방법의 질산염 이온 농도와의 상관성에서는 낮은 상관계수를 나타내는 것으로 사료된다.

**3.3. M-DRASTIC 적용 결과**

M-DRASTIC 방법은 MRD와 MRWD 두 가지로 분류

되며, 등급을 수정한 결과는 Table 3에 정리하였다. 등급 수정 결과, 지하수면 심도를 제외한 나머지 인자들에 대해서는 DRASTIC의 등급 체계와 다른 결과가 나타났다. 가령 대수층 매질과 비포화대 매질의 경우, DRASTIC에서는 일반적으로 알려진 매질의 특성에 따라 충적층, 석회암지역, 화성암/변성암 지역 순으로 등급이 정해졌으나, 화성암/변성암 지역의 질산염 이온의 평균값(23.1 mg/L)이 석회암 지역(16.9 mg/L)보다 높게 나타나서 M-DRASTIC에서는 충적층, 화성암/변성암 지역, 석회암 지역 순으로 바뀌었고, 등급도 질산염 농도의 비례로 결정되었다. 심도 50 m 이내의 충적층 지하수의 질산염 이온으로 DRASTIC의 등급을 수정하였기 때문에 대수층 매질, 비포화대 매질, 수리전도도 등 심부 암반 대수층의 특성을 나타내는 인자들의 경우 대수층의 특성 보다는 오염원의 유무, 파쇄대의 유무 등의 요인이 더 크게 작용한 결과로 사료된다. 한편 토양 매질과 지형경사의 경우도 기존의

DRASTIC 등급과는 많은 차이를 나타내고 있는데, 이는 각 인자의 등급별 범위에 따른 관정의 공간적인 분포와 관정의 수, 질산염 이온 농도의 통계적 분포특성에 기인한 것으로 사료된다.

이 결과를 이용해 새롭게 산정한 MRD지수(Modified rating DRASTIC index: 이하 MRDi)는 평균이 190.4, 중앙값은 193.2이며, 최소 140.9에서 최대 222.5의 범위를 나타냈다(Fig. 5b). MRDi 최소값이 Di 평균값보다 높은 값을 보였으며, 이는 수정된 등급을 산정하는 과정에서 인자별로 가질 수 있는 최대 등급값인 10이 EPA DRASTIC과는 달리 모든 인자에 적용된 결과이다. EPA DRASTIC과 마찬가지로 충적층 지역에서 높은 MDRi값을 보였지만, 석회암 지역은 오히려 낮은 MRDi값을 보였다. 이는 등급 수정과정에서 석회암지역의 등급이 화성암/변성암지역의 등급보다 낮게 수정된 결과이다. 또한, 산지가 아닌 저지대에서도 평균값 이상의 MDRi값을 보이는데 이는 분포 면적이 가장 넓은 사양질인 토양 매질의 특성이 반영된 결과로 사료되며, 연구지역 중앙의 질산염 이온 농도가 상대적으로 높기 때문인 것으로 보인다. EPA DRASTIC과 마찬가지로 BOA 방법에 의해 오염 취약성 검증을 수행하였고, 그 결과 상관계수가 0.245로 EPA DRASTIC보다 0.187 개선되었다.

MRWD지수(Modified rating and weight DRASTIC index: 이하 MRWDi)는 평균이 49.8, 중앙값이 48.5 최소 24.5에서 최대 99.0의 범위를 나타내었다(Fig. 5c). 이 값이 MRDi와 큰 차이를 보이는 이유는 기중치 수정 방식과 그 결과 산정된 수식에 기인하는데, 토양 매질(기중치 5.0)과 지형경사만(기중치 4.9)이 새로운 수식에 적용되고 나머지 인자들은 평가에서 제외되었기 때문이다. 기중치 수정 결과는 Table 4과 같고, 새롭게 산정된 수식은 다음과 같다(식 2).

$$MRWDi = 5S + 4.9T \tag{식 2}$$

여기서, S는 soil media, T는 topography의 각각 수정된 등급이다.

MRDi와 마찬가지로 충적층 지역에서 높은 MRWDi값을 보였고, 산악지역에서는 전체적으로 낮은 MRWDi값을 보였다(Fig. 5c). 연구 지역의 산악지역이 가장 낮은 등급(등급 5)을 갖는 경사율 18%이상인 지역이 대부분을 차지하기 때문이다. BOA 방법을 이용한 질산염 이온 농도와의 상관관계 분석결과, 그 상관계수는 0.400으로 EPA DRASTIC 보다는 0.342 개선된 결과를 보였고, MRDi보다도 0.155 개선된 결과를 보였다. Panagopoulos et al.

**Table 4.** Original and modified weight of the DRASTIC factors and correlation coefficients between DRASTIC factors and nitrates concentration

DRASTIC factors	Original weight	Spearman's rho coefficient	Modified factor weight
Depth to groundwater	5	0.04	-
Recharge	4	-	-
Aquifer type	3	0.11	-
Soil type	2	0.19*	5.0
Topography	1	0.18*	4.9
Impact of the vadose zone	5	0.11	-
Hydraulic conductivity	3	0.05	-

\*:  $p < 0.05$  where p is the statistical significance level

**Table 5.** Calibrated ratings, areal percent, and range of LSDG factors of study area

Factors	Rating	Area(%)	Ranges
Landuse	1	72.9	Forest
	2	10.0	Dryland agriculture
	2	9.7	Irrigated agriculture
	2	4.1	Urban
Depth to water (m)	1	9.0	20 <
	1	40.2	10 - 20
	2	45.6	5 - 10
Geology	2	5.2	< 5
	1	14.9	Phyllite (Og2)
	1	3.5	Metasedimentary rock (Og1)
	1	27.8	Quartz porphyry (Qp)
	2	28.9	Granite (Gr)
	2	8.2	Alluvial (Qa)
2	11.0	Limestone (Ls)	

(2006)의 경우에는 토양 매질과 수리전도도를 제외한 모든 인자가 통계적으로 유의한 결과를 보여 총 5개의 인자가 평가에 적용되었지만, 본 연구에서는 제외된 인자가 많기 때문에 위와 같은 결과가 나타났다고 판단된다. 따라서 지하수 오염에 영향을 미칠 수 있는 중요한 인자가 무시될 수 있는 단점이 있다.

**3.4. LSDG 적용 결과**

LSDG 방법의 적용을 위한 질산염 이온 농도와 각 인자의 범위별 상관성을 분석한 결과는 Fig. 6과 같으며, 보정된 인자별 속성은 Table 5와 같다. 각 인자마다 통계적으로 유의함을 보이는 범위가 뚜렷하지 않고, 크게 두 등급으로 구분이 되었다. 가령, 토지이용의 경우 윌콕슨 순위합 검정 결과 임야와 관계농업지역의 평균값의 차이

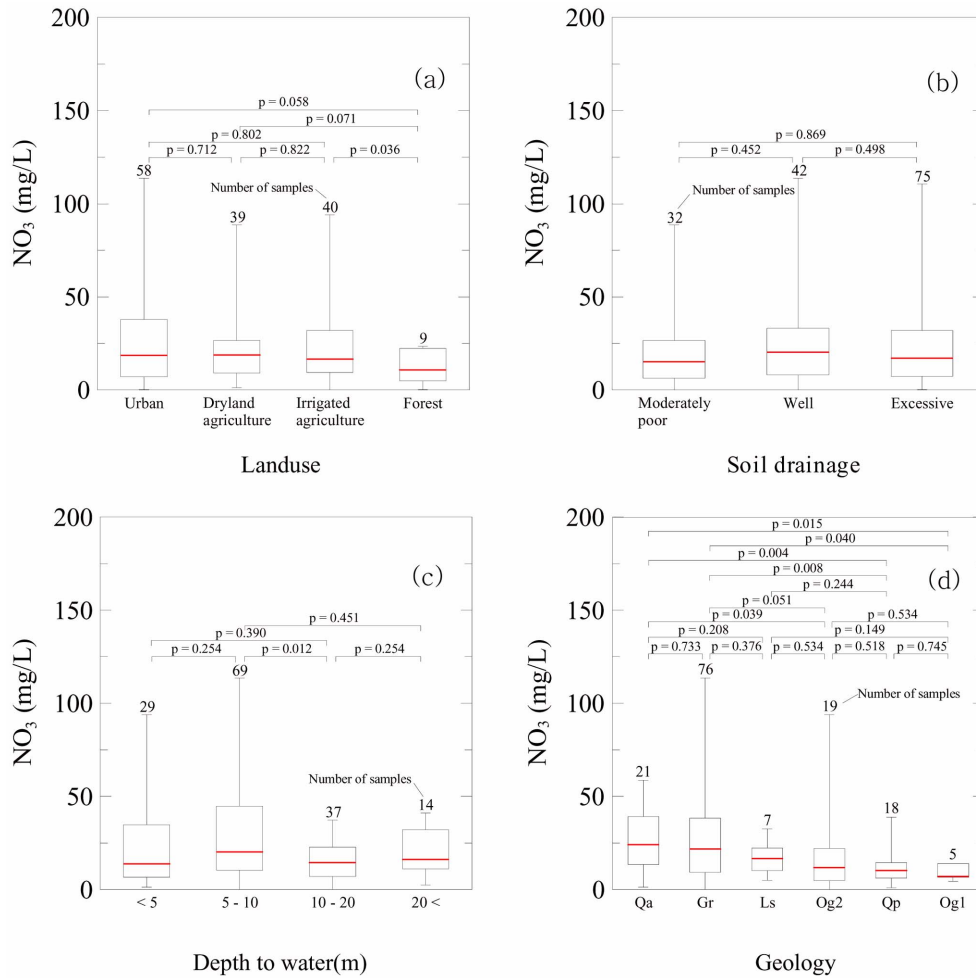


Fig. 6. Box-Whisker diagram of correlations between concentrations of nitrate and each factors : (a) Landuse, (b) Soil drainage, (c) Depth to water, (d) Geology.

Table 6. Correlation coefficients between indices of EPA DRASTIC, M-DRASTIC, and LSDG within 150 m buffer and log NO<sub>3</sub><sup>-</sup> concentration

Model definition	Correlation coefficient	Step correlation improvement	Improvement from EPA DRASTIC
EPA DRASTIC	0.058	-	-
MRD	0.245	0.187	0.187
MRWD	0.400	0.155	0.342
LSDG	0.415	0.015	0.357

는 p 값이 0.036으로 95%의 신뢰수준에서 차이가 나타났고, 임야과 밭농사지역, 임야와 도심지역의 경우 p 값이 각각 0.071과 0.058로 90%의 신뢰수준에서 차이가 나타났다. 따라서 이 경우에는 임야지역의 경우 등급을 1로 하였고, 나머지 지역의 경우 질산염 이온의 농도가 높고, 차이가 나타나지 않았으므로 등급을 2로 부여하였다. 토양배수에 대해서는 각 범위 간 어느 곳에서도 통계적으로 유의한 값을 보이지 않았기 때문에 이를 제외한 나머지

인자들만이 오염 가능성 평가에 고려되었고, 그 식은 다음과 같다(식 3).

$$LSDGi(LSDG \text{ index}) = r_L w_L + r_D w_D + r_G w_G \quad (\text{식 } 3)$$

여기서,  $r_a$ 은 각 인자(a)의 등급,  $w_a$ 는 각 인자의 가중치이다. 식 3을 적용한 결과, LSDGi는 평균과 중앙값 모두 17이며, 최소 5에서 최대 24의 범위를 보였다(Fig. 5d).

LSDGi는 평탄한 충적층 지역에서 높게 나타나는데, 이

**Table 7.** Summary of advantage and disadvantage of each method

Methods	Advantage	Disadvantage
DRASTIC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Low cost for collecting data sets</li> <li>• This method can be applied to wide area</li> <li>• The interrelationships among the parameters decreases the possibility of ignoring some important parameter</li> <li>• Statistically accurate because of reducing error while it calculate index using many parameters</li> <li>• This method can be applied to complicated geology</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Too many parameters</li> <li>• Difficult to applied to particular hydrologic setting which is controlled by specific parameter</li> <li>• The selection of parameters is based on qualitative judgement</li> <li>• Some parameters affecting contaminant transport can be disregarded</li> <li>• This method can overestimate the vulnerability in alluvial groundwater</li> <li>• Difficult to evaluate by pollution status</li> <li>• The pollution prediction can be ineffective because it includes only hydraulic parameters</li> </ul>
MRD	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rating includes the pollution status</li> <li>• Relatively simple and perspicuous statistics are applied</li> <li>• Pollution prediction improved from DRASTIC</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Few case studies</li> <li>• This method can over and under-estimate the pollution prediction where lack of groundwater quality data</li> <li>• There will be differences between theoretical rating (DRASTIC) and realistic rating (MRD)</li> <li>• Rating cannot be applied generally</li> </ul>
MRWD	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Weighting includes the pollution status</li> <li>• Relatively simple and perspicuous statistics are applied</li> <li>• Pollution prediction improved from DRASTIC</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Few case studies</li> <li>• Important parameters affecting contaminant transport can be disregarded</li> <li>• Oversimplified</li> </ul>
LSDG	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rating includes the pollution status</li> <li>• Relatively simple and perspicuous statistics are applied</li> <li>• Potential pollution sources (land use) are included</li> <li>• Pollution prediction improved from DRASTIC</li> <li>• Less parameters reduces error and difficulties</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Few case studies</li> <li>• Oversimplified</li> <li>• Rating cannot be applied generally</li> </ul>

는 주로 저지대에 논/밭 지역, 도심 지역과 지하수면 심도 10 m 이내지역, 화강암, 석회암, 충적층 지역이 분포하기 때문이다. 오염 가능성의 검증을 위한 질산염이온 농도와 BOA방법을 이용한 LSDGi값의 상관관계 분석결과, 상관 계수는 0.415로 앞서 수행된 DRASTIC에 비해서는 0.357, MRD에 비해서는 0.170, MRWD에 비해서는 0.015가 개선되었다(Table 6).

#### 4. 결 론

본 연구에서는 지하수의 오염 가능성 예측에 가장 기본이 되는 EPA DRASTIC 방법의 적용 시 문제점을 고찰하고 이를 개선하기 위해 Panagopoulos et al.(2006)에 의해 개발된 M-DRASTIC(MRD 방법과 MRWD 방법), Rupert(1999)에 의해 개발된 LSDG 방법을 충청남도 금산군 지역에 적용하여 지하수의 오염을 예측하였으며 EPA DRASTIC으로부터 개선율을 비교하고자 하였다. 각 방법별 오염 가능성 예측도를 작성한 후, 검증을 위하여 각 지도에서의 오염가능성 지수와 질산염 이온 농도와의 상관관계를 BOA 방법을 통해 수행하였고, 그 결과 EPA

의 DRASTIC 방법을 기준으로 나머지 방법들에서 모두 그 상관관계가 개선되는 것을 확인하였다. DRASTIC 방법과 LSDG 방법간의 상관계수의 차는 0.357로 가장 높은 개선율을 보였고, 그 외의 방법들 간의 개선율은 MRD의 경우 0.245, MRWD의 경우 0.400으로 각각 0.187, 0.342 정도로 개선되었다. EPA DRASTIC은 수리 지질학적 요인들만 고려된 반면, M-DRASTIC과 LSDG의 경우 각 인자가 갖는 범위에서의 질산염 이온 농도와 상관성, 토지이용 상태 등 실제 오염상태를 반영하여 지하수 오염 예측율이 높게 나타났다. 따라서 지하수 오염 예측을 위해서는 M-DRASTIC이나 LSDG와 같이 오염현황을 반영하거나 토지이용이 포함되는 방법들이 DRASTIC에 비해 적합하다는 결론을 얻었다. 그러나 개선된 방법들은 실제 오염 현황을 반영하여야 하기 때문에 지하수 수질 조사가 불가피 하고 그에 따라서 등급과 가중치 등이 결정되므로 지역마다 등급과 가중치가 다르게 적용될 수 있다. 따라서 M-DRASTIC과 LSDG 방법을 적용하기 위해서는 전국적인 조사를 통하여 등급 및 가중치에 대한 검증과 표준화가 필요하다. 뿐만 아니라, 위 방법들은 국내외적으로 지하수 오염 관리에 적용된 사례가

드물어서 국내외적인 검증이 필요하다. 각 방법의 장단점은 Table 7에 정리하였다.

지하수 오염 취약성 평가나 지하수 오염 예측을 위해서는 대상 지역의 지하수위, 수리전도도, 비포화대 매질, 순충진량 등 수리지질학적인 자료와 토지이용 등의 인문사회적인 자료의 정확성이 관건이다. 이와 같이 기초 자료가 부실할 경우 M-DRASTIC이나 LSDG 방법은 지하수 수질의 현 상태를 반영하여 미래의 지하수 오염을 예측하는데 많은 시간과 노력을 절감할 수 있는 방법으로 사료된다. 그러나 무엇보다도 정확한 지하수문 자료들을 확보하여야 하며, 체계적인 지하수 오염 현황 자료가 구축되어야 한다. 특히 M-DRASTIC과 LSDG의 경우 각 인자의 등급별 범위에 속하는 관정의 개소수가 충분하여야만 방법의 신뢰성이 높아질 수 있다. 이를 토대로 한 국내 여건에 적합한 새로운 모델의 개발이 꾸준히 이루어져야 하며, 정확한 기초 자료 확보를 위한 보다 체계적인 지하수 관리 체계가 확립되어야 할 것이다.

## 사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 ‘청정 대용량 지하수자원 확보기술개발(08-3211)’과제의 일환으로 수행되었다. 정밀토양도는 농촌진흥청 농업과학기술원에서 제공받았으며 이에 감사드린다.

## 참 고 문 헌

건설교통부, 한국수자원공사, 농업기반공사, 2005, 김해지역 지하수기초조사보고서.

금산군, 2007, 금산통계연보 2007.

농림부, 2000, 농어촌지역 지하수자원의 오염예측도 작성기법에 관한연구, 농림부, p. 320.

농림부, 2007, 농림통계연보 2007.

박재성, 김경호, 전민우, 김지수, 1999, 소유역의 지하수함양율 추정기법, 한국지하수환경학회지, 6(2), 76-86.

성태제, 2001, 현대 기초통계학의 이해와 적용, 교육과학사, 서울, p. 507.

손호웅, 2001, GIS를 이용한 경기도 화남2지구의 지하수오염 예측에 관한 연구, 한국지구물리학회지, 4, 267-285.

우남철, 1994, 지하수 오염 가능성 평가기법 “DRASTIC” 개요, 자원환경지질학회지, 27, 611-612.

이사로, 김윤중, 1996, DRASTIC SYSTEM을 이용한 지하수 오염 가능성 및 위험 분석 연구, 한국GIS학회지, 4, 1-11.

이사로, 최순학, 1997, GIS 기법을 이용한 영광지역의 지하수 오염 취약성 평가, 한국지하수환경학회지, 4, 223-230.

이훈영, 2004, 이훈영교수의 통계학, 청람, 서울, p. 526.

조시범, 민경덕, 우남철, 이사로, 1999, GIS를 이용한 경기도 평택군 지역의 지하수 오염 가능성 평가 연구, 한국지하수환경학회지, 6, 87-94.

조시범, 손호웅, 2004, 지하수오염 예측을 위한 GIS 활용연구, 한국지구물리학회지, 7, 121-134.

함세영, 정재열, 김무진, 김인수, 황한석, 2004, DRASTIC과 지하수 수질에 의한 창원시 지하수 오염취약성 평가, 자원환경지질, 37, 631-645.

홍승호, 이병주, 김원영, 1980, 한국지질도(1 : 50,000) 무주도폭, 자원개발연구소.

홍승호, 최위찬, 1978, 한국지질도(1 : 50,000) 금산도폭, 자원개발연구소.

환경부, 2008, 2006 상수도 통계(수정본), 환경부 상수도정책실 수도정책과, 대양인쇄, p. 1885.

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 hydrogeology settings, USEPA, USEPA Document, EPA-600/2-87-035.

Alley, W.M., 1993, Regional groundwater quality, Van Nostrand Reinhold, New York.

Antonakos, A.K. and Lambrakis, N.J., 2007, Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the drastic model, an example from NE Korinthia, Greece, *Journal of Hydrology*, 333, 288-304.

Baalousha, 2006, Vulnerability assessment for the Gaza Strip, Palestine using DRASTIC, *Environ Geol*, 50, 405-414.

Jamrah, A., Al-Futaisi, A., Rajmohan, N., and Al-Yaroubi S., 2007, Assessment of groundwater vulnerability in the coastal region of Oman using DRASTIC index method in GIS environment, *Environ Monit Assess*, DOI 10.1007/s10661-007-0104-6

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.

Rupert, M.G., 1999, Improvements to the DRASTIC Ground-Water Vulnerability Mapping Method, USGS, USGS Fact Sheet, FS-066-99.

Wang, Y., Merkel, B.J., Li, Y., Ye, H., Fu, S., and Ihm, D., 2007, Vulnerability of groundwater in Quaternary aquifers to organic contaminants; a case study in Wuhan City, China, *Environ. Geol.*, 53, 479-484.