한국지하수토양환경학회지 Vol. 13(6), p. 1~16, 2008 ≪總設≫

지하수 오염취약성 평가 기법 동향과 국내 적용성 고찰

김 규 범*
한국수자원공사 수자원연구원

Consideration of Trends and Applications of Groundwater Vulnerability Assessment Methods in South Korea

Gyoo-Bum Kim*
Korea Institute of Water and Environment, KWATER

ABSTRACT

There are generally two types of groundwater vulnerability assessments. Intrinsic vulnerability is based on the assessment of natural climatic, geological and hydrogeological attributes and specific vulnerability relates to a specific contaminant, contaminant class, or human activity. Several methods to assess groundwater vulnerability, which are based on hydrogeologic setting and socio-economical environment, have been developed in USA and Europe. A Modified-DRASTIC model including a lineament factor has been developed in South Korea, but it still has some limitations. To develop a solid and applicable method in this country, many data of quality, hydraulic features, GIS data, and pollution source, produced from a Basic Survey based on Article 5 of the Groundwater Act and other research projects, need to be collected, analyzed and verified introducing the previous methods.

Key words : Intrinsic vulnerability, Specific vulnerability, Modified-DRASTIC, Logit regression model

요 약 문

지하수 오염취약성이란 매질 자체의 고유 오염취약성과 오염 물질의 특성 또는 특정 인간 활동 등에 따른 특정 오염취약성으로 분류되며, 세계적으로 각국의 대수층 수리적 특성 및 사회환경 여건에 따라 오염취약성 평가 기법들이 개발되어 왔다. 국내에서도 지수 방법의 하나로서 지질구조선 등을 고려한 변형 DRASTIC 방법을 개발하였으나, 고유 및 특정 오염취약성에 대한 명확한 이해 및 지하수 환경 여건 등을 고려하여 국내 여건에 맞는 오염취약성 평가 기법을 개발해야 한다. 특히, 지하수법 제정 이후 지하수 기초조사, 각종 연구 프로젝트 등을 통하여 생성된 대용량의 수질자료, 수문특성 자료, 오염원자료, GIS data 등을 종합적으로 활용하여 다양한 기법을 접목, 검증해 본다면 현실성 있는 오염취약성 평가 기법이 가능할 것이다.

주제어 : 고유 오염취약성, 특정 오염취약성, 변형 DRASTIC, 로짓 회귀분석

1. 배 경

국내의 오염 취약성 평가에 대한 개념은 1990년대초 지하수법 제5조에 의한 "지하수 기초조사"를 시행하면서 본격적으로 도입되기 시작하였으나, 현재까지 국내 실정에 부합하는 체계화된 오염취약성 평가 기법이 마련되지 못하고 있다. 국내에서는 보다 적절한 오염취약성 평가를 위하여 많은 연구자들이 기존 기법을 보완한 새로운 방법을 발굴하고자 노력해 왔으나, 이에 대한 체계적인 검증과 현장 실증이 부족해 왔던 것이 현실이다. 오염취약성

*Corresponding author : gbkim@kwater.or.kr
원고접수일 : 2008. 7. 10 심사일 : 2008. 7. 16 게재승인일 : 2008. 12. 3
질의 및 토의 : 2009. 2. 28 까지

평가 기준은 정책 입안자, 지역 지하수 관리자, 지하수 개발자 및 전문가 등이 공동으로 활용할 수 있는 보편성을 갖고 있어야 하며, 아울러 지역별 특성에 맞는 적합성이 확보되어야 한다. 또한, 지하수 관리는 타 수자원 및 토지 이용 관리 등과 병행되어 이루어지므로 지하수 분야의 비전공자가 활용할 수 있도록 모델의 입력인자에 대한 확보의 용이성 및 사용의 편의성이 함께 보장될 필요가 있다.

지난 약 20년간 지하수법 제정과 병행하여 지하수 기초조사, 지하수 영향조사 및 개발 조사, 국가지하수 관측망, 수질측정망 등 다양한 조사와 관측을 수행하였으며, 이를 통하여 얻어진 수리특성 자료, 수질분석 자료, 토지이용 자료 및 오염원 자료 등을 종합적으로 활용한다면 보다 국내 실정에 적합한 오염취약성 평가 기준과 방법을 마련할 수 있을 것으로 보며, 작금이 그 시기에 이른 것으로 생각한다. 이에 따라, 본 고에서는 기존의 국내외의 다양한 지하수 오염취약성 평가 기법을 소개하고, 일부 기법의 국내 적용을 통하여 효용성을 살펴보았으며 향후 국내 여건에 맞는 오염취약성 평가 기법 개발 방향을 제시하고자 하였다.

2. 오염취약성의 개념

지하수 오염 취약성의 평가(Groundwater vulnerability assessment)라는 용어는 1968년 프랑스 수리지질학자인 J. Margat이 사용하였으며, 최초의 취약성도(Vulnerability map)는 1970년 M. Albinet에 의하여 프랑스에서 작성된 바 있으나(Albinet and Margat, 1970), 본격적인 대수층의 오염 취약성(Aquifer pollution vulnerability)이란 용어는 대수층에서 발생되는 오염에 대한 관심을 제고하기 위하여 1980년대초 프랑스에서 사용되기 시작하였다. 일반적으로 오염취약성은 아래와 같이 2가지로 구분되어 사용된다.

2.1. 고유 오염취약성(Intrinsic vulnerability)

고유 오염취약성이란 대수층의 특성을 의미하며 지하수 유동계 자체에 의하며 지배를 받는 성질을 말한다. 이에는 지표수, 양수 작용, 대수층의 구성물질 및 오염체의 이동과 관련된 물의 이동에 영향을 미치는 매질내 응력, 수리특성 등에 의하여 정해진다. 그러나, 이와 같은 오염취약성을 정확히 이해하는 것이 쉽지 않기 때문에 오염원이 특정 지점까지 들어가는 물의 이동시간으로 정의하기도 하였다(Rao and Alley, 1993)

2.2. 특정 오염취약성(Specific vulnerability)

특정 오염취약성이란 상기 지질조건이나 대수층의 특성뿐 아니라, 대수층에 대한 오염체의 상대적인 위치, 오염원의 형태와 특성을 고려한 오염취약성을 말하는 것으로서, 고유 오염취약성을 갖는 대상 지역에서의 특정 오염원의 특성, 인간의 활동 등에 의하여 정해지는 오염취약성을 말한다(Duijenbooden and Waegeningh, 1987; Vrba and Zaporozec, 1994). 한편, 실제 수자원 정책 결정자들이 오염취약성을 평가하거나 관리할 때 고유 오염취약성에 초점을 두어야 할 지 특정 오염취약성을 핵심으로 하여야 할지 혼돈을 겪는 경우가 많다.

3. 오염취약성 평가 기법의 분류

그 동안 개발되어 온 오염취약성 평가 기법은 매우 다양하나, 주관적 평가기법(SRM; Subjective rating method)과 통계 및 공정기반 평가기법(SPM; Statistical and process-based method)으로 분류될 수 있다(Focazio et al., 2002).

3.1. 주관적 평가 기법(SRM)

주관적 평가 기법은 해당 지역의 지하수 오염취약성 정도를 높음, 보통, 낮음 등과 같이 단계로 구분하여 제시하는 방법으로서, 점수를 부여하는 지수 방법(Index method)와 여러 방법이 조합된 혼합 방법(Hybrid method)로 분류된다.

3.1.1. 지수 방법(Index method)

지수 방법은 오염취약성의 평가에 필요한 다양한 물리적 특성 인자를 활용하여 점수 또는 가중치 등을 부여한 후 총점 또는 중첩에 의하여 평가하는 방법으로서, 매트릭스 시스템(Matrix systems), 점수 시스템(Rating systems) 및 포인트 계산 시스템(Point count system) 등이 포함된다. 여기에는 GOD(Foster, 1998), PRZM(EPA, 1993), GLA(Hoelting et al., 1995), PI(Margane, 2003), DRASTIC (Aller et al., 1985) 및 SINTACS(Civita and Maio, 1997) 등 많은 방법이 개발되어 있다.

3.1.2. 혼합 방법(Hybrid method)

이 방법은 상기의 지수 방법에 통계적 방법 또는 공정기반 방법이 조합된 방법이다. 이 혼합 방법은 지수 방법의 각 인자의 배점 등을 결정할 때 보다 객관성을 확보하기 위하여 통계적 기법이나 공정기반 기법을 접목시킨 것이다.

예를 들면, Nolan et al.(1997)은 지하수내에서의 질산

염의 농도, 인구밀도, 토양의 수리적 특성, 산지와 농경지의 비율 등의 자료를 이용하여 질산염 오염 위험도를 작성하였는데, 이 때 사용된 점수 부여는 이들 4가지 항목에 대하여 질산염 농도의 산점도와 상자도표를 이용하여 2 mg/L 초과 여부를 분류 기준으로 결정하였으며, 최종 농도 차이의 평가는 Wilcoxon 검정법을 이용하되 통계적 유의성 검정 과정을 통하여 이루어졌다. 또한, Rupert (2001)는 지하수내의 질산염 농도와 지하수의 깊이, 토지이용, 토양배출 등의 관계에서 비모수적인 상관계수를 구함으로써 오염취약성 평가도를 작성하였다.

3.2. 통계 및 공정기반 평가 기법(SPM)

본 방법은 컴퓨터 및 지하수 모델의 발전으로 최근에 활발히 사용되기 시작한 방법으로서 보다 과학적인 자료와 객관적 분석 절차를 사용하기 때문에 정책결정자의 판단에 도움을 주며 타 방법에 비하여 집행시 문제 발생이 적다.

3.2.1. 통계적 방법(Statistical method)

회귀분석과 같은 통계적 기법을 이용하여 오염 인자와 농도간의 상관성을 도출하여 통계적으로 그 분포와 특성을 파악하고 예측하는 방법이다. 평가 인자 중에서 통계적으로 유의하지 않은 변수를 제거하고 가장 유의한 변수를 찾아낼 수 있어 보다 객관성을 담보할 수 있으며, 완성된 모델은 모델에 사용되지 않은 별도의 자료를 사용하여 검증이 가능하다는 장점이 있다.

본 방법에는 기본 통계량인 평균, 백분율, 중앙값 등이 지도상에서 특정 지점의 오염 특성을 설명하는데 활용되기도 하며, 고 농도와 지질특성과의 관련성을 파악하는데도 이용이 된다. Ryker(2001)는 미국 전역의 31,000개 우물내 지하수의 비소 함량에 대한 기술통계량을 활용하여 전국의 비소 농도 분포도를 작성한 바 있고, Helsel and Hirsch(1992), Erwin and Tesoriero(1997) 및 Nolan et al.(2002) 등은 질산염 등의 농도 분포 파악 및 예측을 위하여 로짓(Logit) 회귀분석 및 Tobit 분석 등을 사용하기도 하였다.

3.2.2. 공정기반 방법(Process-based method)

이 방법은 지하수의 물리적 및 화학적 처리 과정의 특성에 기반을 둔 방법으로서, 오염의 취약 지역 분포를 물과 용질의 이동 모델을 사용하여 평가한다. 이 방법은 분석 과정에서 도출되는 것이 영향 인자에 대한 점수가 아니므로 오염취약성을 상, 중, 하 등 그룹으로 분류하진 않는다. 주요 사례로는, 미국 미시간 지역에서의 제초제에 대한 오염성 평가를 위하여 Darcy 법칙과 지배방정식을 사용한 경우(Holtschlag and Luukkonen, 1997), 워싱턴주 Clark county에서 고유오염취약성 평가를 위하여 유동모델과 용질이동 모델을 사용한 경우(Snyder et al., 1998) 등 다수가 있다.

4. 기법 적용사례 및 비교

4.1. 외국의 평가 기법

1980년대 미국에서 DRASTIC 기법 등이 개발되면서 다양한 방법들이 미국와 유럽을 중심으로 개발되었는데, 대표적인 기법을 개념과 적용성을 토대로 비교하면 다음과 같다(Table 1 참조).

DRASTIC 방법은 미국, 이스라엘, 포르투갈, 나카라과, 남아프리카 및 우리나라 등 전세계에서 GIS 등을 활용한 도면화 작업과 병행하여 많이 사용되고 있으며 광역적 규모뿐 아니라 국지적인 지역에 대해서도 다양하게 적용되어 왔다. 이 DRASTIC 방법은 입력 자료의 확보가 비교적 용이하고 비용이 적게 들며 사용자가 이해하기 쉬운 결론을 도출한다는 장점이 있으나 암반 대수층의 오염취약성이 상대적으로 과소 평가된다는 점과 가중치 시스템이 과학적이지 못하다는 약점을 갖고 있다. 또한, 대상지역의 수리지질학적인 특성이 잘 파악되어 있지 않은 경우에는 3개의 인자만을 사용하는 보다 간단한 방법인 GOD가 효율적일 수 있다(Foster, 1998).

GLA 방법은 비포화대를 대상으로 오염취약성을 평가하는 기법으로서, 포화대내에서 이루어지는 오염 저감 능력은 평가 인자에서 고려되지 않는다. Table 1에서 보는 바와 같이 6개의 입력 인자로 이루어져 있으며, 피복 토양 및 비포화대의 오염에 대한 보호 효과(Protective effectiveness)를 평가하는 것이다.

PI 방법은 GLA 방법을 응용하여 카르스트지역에 적용하기 위하여 개발된 방법으로서, 보호 피복 능력(Protective cover: P 인자)과 침투 인자(Infiltration factor: I 인자)의 평가 값의 곱으로 표현된다. P 인자는 지표피복의 효율을 나타내는 것으로서 7개의 인자(상부 토양, 함양량, 하부토양, 층의 두께, 수압, 암상, 파쇄대)로부터 계산된다. I 인자는 지표상의 하천이 갑자기 사라지는 카르스트 지형의 특징을 반영하기 위하여 고안된 인자로서, 하천 소멸과 지하 공간내 수직 수평의 물의 흐름을 통한 집중 유량이 발생하는 정도를 나타낸다. 지표 하천이 완전히 사라져서 하부로 유입된 경우는 I 인자 값은 0이 되

고 그 반대는 1이 된다. GLA 방법이 수직 침투 속도가 느리고 지형경사가 완만하며 카르스트화 되지 않은 경우에 적용되는 반면, PI 방법은 투수성의 변화가 심하고 지형경사도 급하며 하천 소실이 발생되는 지역에 적용성이 좋은 방법이다. 또한, GLA와 PI 방법은 DRASTIC에 비하여 인자의 점수 계산에 보다 객관적이고 논리적인 접근이 이루어진 것으로서 대상 지역에 대한 충분한 수리특성 인자 들이 확보된다면 보다 효율적인 방법이 된다.

폴란드에서 개발된 CI 방법은 자연상태의 배경 수질의 상한값과 수질 기준의 초과 특성을 활용하는 특정 오염취

Table 1. Methods for groundwater vulnerability assessment

Methods	Description	Developer	Group[1)]	Applications
DRASTIC*[2)]	- Rating and weighting method (7 factors) - Nation, state, and county scale maps - Potential = $D_R \times D_W + R_R \times R_W + A_R \times A_W + S_R \times S_W + T_R \times T_W + I_R \times I_W + C_R \times C_W$	Aller et al.(1985) U.S. EPA	IV	USA(Aller and Ballou, 1991; Hamerlinck and Ameson, 1998; Shukla et al., 2000), S.Africa(Lynch et al., 1997), Israel(Melloul and Collin, 1998), Nicaragua(Johansson et al.,1999), S.Korea(Kim and Hamm, 1999; Lee, 2003)[3)], Mexico(Leal and Castillo, 2003)
Pesticide DRASTIC	- Rating and weighting method (7 factors) - Different weightings from DRASTIC - Agricultural region (herbicides and pesticides)	U.S. EPA	IV	Many USA applications
Modified DRASTIC*	-DRASTIC+Lineament density and/or Landuse factors (8 or 9 factors)	–	IV	S.Korea(Cho et.al, 1999; Yoo, 2001; Cho and Son, 2004; MOCT et al., 2007)
PATRIOT	- Pesticide assessment tool for rating investigation of transport (PATRIOT) - Based on PRZM(Pesticide root-zone model) - Nation, state, and county scale analysis/mapping	U.S. EPA	SV	–
GOD	- Rating method (3 factors) - $GOD = R_G \times R_L \times R_W$ • R_G: score for groundwater occurrence, R_L: score for overall lithology, R_W: score for depth to water	Foster(1987)	IV	Turkey(Simsek et al., 2008)
GLA*	- For unsaturated layer - To assess a protective effectiveness of soil - $P_T = P_1 + P_2 + Q + HP$ • $P_1 = S \times W$ • $P_2 = W \times (R_1 \times T_1 + R_1 \times T_1 + \cdots R_n \times T_n)$ S: effective field capacity of soil W: percolation rate, : rock type T: thickness of soil/rock cover Q: bonus points of perched aquifer system HP: bonus points of hydraulic pressure condition	State Geological Survey of Germany Hoelting et al. (1995)	IV	Jordan(Margane et al., 1997)
SINTACS	- Karst region - Rating and weighting method (7 factors) : Depth to water, Infiltration, Unsaturated zone, Type of soil, Characteristics of the aquifer, Hydraulic conductivity, Topographic surface - $I_{SINTACS} = \sum_{i=1}^{7} (P_i \bullet W_i)$ • P_i: scores, W_i: weights	Civita and de Maio (1997)	IV	Jordan(Kuisi et al. 2006) Italy(Corniello et al., 2004; Marsico et al., 2004)
Statistical analysis	- Use some statistics of quality items • Descriptive statistics: mean, SD, median, percentiles • Linear regression model	–	SV	USA(Welch et al., 2000; Ryker, 2001)

Remarks) 1) IV: Intrinsic Vulnerability, SV: Specific Vulnerability, 2) *: See more detailed descriptions at Section-4, 3) See more applications at Section-4.

Table 1. Continued

Methods	Description	Developer	Group	Applications
Regression Model	- Tobit regression model • $y_i^* = \ln(N_i) = \alpha + \beta \ln(x_i) + \varepsilon_i$ • y_i^*: dependent variable • N_i: concentration of quality item • α: constant • β: vector of parameter slope estimates • $\ln(X)$: vector of independent variables	Tobin (1958)	SV	USA (Gardner and Vogel, 2005)
	- Logit regression model • Predict probabilities of contamination with hypothesis tests • $\log(p/(1-p)) = b_0 + b_1 \cdot var_1 + b_2 \cdot var_2 + \cdots$ • var_k: independent variables • b_0, b_1: statistically derived coefficients	Helsel and Hirsch (1992)	SV	USA (Erwin and Tesoriero, 1997; Nolan et al., 2002)
AVI	- Rating method (2 factors) : thicknesses of sediments, hydraulic conductivities for each layer - $AVI = \sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{k_i}$ • n: number of sedimentary units • d: thickness of each sedimentary unit • k: estimated hydraulic conductivity of each unit	van Stempvoort et al. (1993)	IV	Portugal (Ferreira and Oliveira, 2004) Spain (Vias et al., 2005) Mexico (Leal and Castillo, 2003)
IT	- Use an Infiltration Time (IT) factor in Poland - Applied to intrinsic and specific vulnerability: Two distribution maps from 1)travel time of material and 2)concentration of nitrate - $t_a = \frac{m_a \bullet w_o}{P \bullet \varepsilon_i}$ • m_a: thickness of vadose zone • w_a: average volumetric water content • P: mean annual precipitation • ε_i: effective infiltration coefficient - $C_{NO_3} = \frac{L_N \bullet k_N}{P \bullet \varepsilon_i} \bullet 443$ • L_N: load of nitrogen in the fertilizer • k_N: fraction of nitrogen leached to groundwater	Foster et al. (2002)	IV, SV	Similar researches: Jordan (Brosig et al., 2008) Europe (Voigt et al., 2004)
CI*	- Rating method - Use an Contamination Index (CI) - $CI = \sum_{i=1}^{n} C_{fi}$, $C_{fi} = \frac{C_{Ai}}{C_{Ni}} - 1$ • C_{fi}: contamination factor for the i-th component • C_{Ai}: analytical value of the i-th component • C_{Ni}: upper range of natural hydrogeochemical background	Backman et al. (1998)	SV	Poland (Dragon, 2007)
WYVUL	- Groundwater Protection Assessment Model - Rating and weighting method (5 factors) - Calculate a protection index (PI): 5~500 - $PI = W_w W_r + Y_w Y_r + V_w V_r + U_w U_r + L_w L_r$ • W: water quality(weight: 5) • Y: yield of the aquifers(4) • V: vulnerability index of groundwater to pollution(3) using DRASTIC index • U: use value of the groundwater(2) • L: land use characteristics(1)	Mato (2004)	IV	Tanzania (Mato, 2007)

Table 1. Continued

Methods	Description	Developer	Group	Applications
Flemish	- Rating method (3 factors) : Rock type of aquifer, Soil, Depth to water	Belgium	IV	S.Korea (MOCT and KORES, 1998)
VURAAS	- Vulnerability and Risk Assessment for Alpine Aquifer Systems in karst region, Austria - Rating method - To make a risk map to a contamination by combining a vulnerability map and a hazard map 1) Vulnerability map • Three parameters used: input, infiltration, exfiltration - $Input = P - ETa - Ao + (R \pm \Delta S)$ - Infiltration: using PI method - Exfiltration: hydrographs × storage × residence time 2) Hazard map using hazard index(HI) • $HI = H \times Q_n \times R_f$ - H: weighting factor - Q_n: ranking factor - R_f: reduction factor	COST (2002)	IV	Austria (Laimer, 2005)
PI*	- Modified method of GLA for karst region - Rating method to draw P map and I map - Composed of P(Protective cover) factor and I(Infiltration) factor - Parameters for P : Top soil, Recharge, Subsoil, Thickness of strata, Artesian pressure, Lithology, Fracturing - Parameters for I : Permeability, Hydraulic conductivity, Slope, Flow process - Protection factor (range: 0 ~ 5) $F = P \bullet I$	Goldscheider (2002)	IV	Germany (Goldscheider, 2002, 2005), Austria (Goldscheider, 2002), Spain (Brechenmacher, 2002),
EPIK*	- Karst region - Rating and weighting method (4 factors) - $F = \alpha E + \beta P + \gamma I + \delta K$ • E: development of Epikarst(1,3,4) • P: effectiveness of the Protective cover (1,2,3,4) • I: conditions of Infiltration(1,2,3,4) • K: development of the Karst network(1,2,3) • Weights α, β, γ, δ: 3, 1, 3, 2	SAEFL (2000)	IV	Swiss (SAEFL, 2000), Belgium (Gogu and Dassargues, 2000; Gogu et al., 2003) Italy (Barrocu et al., 2007)
COP*	- Karst region - Rating method (3 factors) : Concentration of flow, Overlying layers, Precipitation - $COP - Index = C\ score \times O\ score \times P\ score$	Vias et al. (2002)	IV	Spain (Vias et al., 2006)
Process-based methods	- MODFLOW - Solute Transport Modelling Tools • VULK code : 1-D transport model for Karst region - Particle tracking model etc.	–	IV	USA (Holtschlag and Luukkonen, 1997; Synder et al., 1998; Shelton et al., 2001) Europe (Cornaton et al., 2004)

약성 평가 방법으로서 다양한 수질 항목을 평가 대상으로 선정 수행할 수 있다. 예를 들어 특정 지역의 수질 오염 취약성을 평가하기 위하여 시간에 따라 농도 증가 경향이 잘 나타나는 염소, 나트륨, 황산염, TDS 및 경도 등은 해당 항목의 배경 수질에 대한 상대적인 분포 농도를 오염 요소로 평가할 수 있게 된다. 이 방법은 수질 분석 자료가 지역별로 균등하면서 많이 확보된 경우에 적용이 용이하며, 자연상태의 수질과 오염된 수질을 구분하는데도 도움을 준다.

석회암 분포지역에 대한 오염취약성 평가 기법으로는, PI, EPIK, COP, SINTACS, VURAAS, VULK code 등의 방법이 가능하며 유럽에서는 현장에서 검증이 이루어진 EPIK 방법을 권장하고 있다. EPIK 방법은 4개 인자로 구성된 선형 모델에 의하여 9~34 범위의 최종 평가값이 계산되는데 19 이하의 값을 보이는 경우 오염취약성이 높은 것으로 평가된다. 그러나, 이 방법도 카르스트 산

상에 대한 정밀한 조사, 추적자 시험, 원격탐사 등의 결과를 전제로 하고 있어 비용면에서 과다하다는 단점을 갖고 있다. COP 방법은 3개 인자(지하수 유량 집중도, 상부 지층 특성, 강우 특성)를 사용하는 방법으로서 강우 인자를 제외하면 PI 방법과 유사성을 갖고 있다. 3 인자의 곱에 의하여 0~15 범위의 값이 계산되는데 0~0.5는 오염취약성이 매우 높고 4 이상은 매우 낮음을 의미한다. 본 방법은 입력 인자의 취득이 타 방법에 비하여 어렵지 않으나 계산 과정이 복잡하고 오염취약성도 제작에 GIS 기법이 요구되는 등의 단점을 갖고 있다.

4.2. 국내 평가 기법 및 적용 사례

국내에서는 1990년대초 DRASTIC이 소개된 이후 우리나라의 산악 지형 및 얇은 토양 두께 특성을 고려하여 DRASTIC 기법을 변형한 기법들이 개발되어 사용되어 왔다. DRASTIC과 변형된 DRASTIC 기법 및 기타 방법 등의 국내 적용 사례는 다음과 같다.

1990년대초 지하수법 제정 이후 지하수법 제5조에 의하여 국토해양부에서 추진중인 지하수 기초조사에서는 주로 DRASTIC 기법을 적용하여 오염취약성 평가를 실시해오고 있으며(건설교통부 · 한국수자원공사, 2005; 건설교통부 등, 2006; 건설교통부 · 한국수자원공사, 2007; 건설교통부 등, 2007), 일부 지역(안성시, 함평-나주지역) 기초조사에서는 변형된 DRASTIC 또는 벨기에의 Flemish 방법 등을 사용한 바 있다(건설교통부, 2007; 건설교통부 · 대한광업진흥공사, 1998).

안성시 지역에서 수행된 지하수 기초조사에서는 변형된 DRASTIC 방법을 사용하였는데, 전통적인 DRASTIC 방법의 7개의 인자외에 지질구조선(Lineament) 밀도를 추가한 것으로서 다음과 같이 표현된다.

$$Modi-DRASTIC \quad Potential = D_R D_W + R_R R_W + A_R A_W + S_R S_W + T_R T_W + I_R I_W + C_R C_W + L_R L_W$$

여기에서, L은 지질구조선 밀도 인자(km/km^2)로서 0에서 0.12까지 등간격으로 분류하여 1부터 5까지의 5등급으로 분류하고 있으며, 가중치는 1.5를 부여하고 있다.

함평-나주지역의 경우에는 벨기에 수리지질학자들이 개발한 Flemish 방법이 적용되었는데 대수층의 구성 암석, 토양의 성상 및 지하수위 깊이 등 3개의 인자가 사용되었으며, 지역 실정에 맞게 각 인자의 속성을 수정하여 사용한 바 있다. 대수층의 구성 암석은 암석의 투수성에 따라 4개로, 토양의 성상은 SCS 토양분류법에 따라 3개로, 지하수위 깊이는 3.23 m를 기준으로 양분하였으며, 이들을

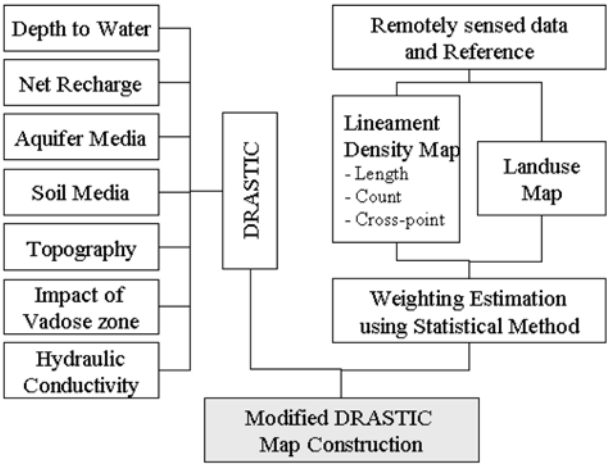

Fig. 1. Flow chart to construct a modified DRASTIC map (Modified from Cho et al.(1999)).

조합하여 16개의 오염취약성 지수를 생성하고 도면으로 표현하였다.

조시범 등(1999) 및 조시범 · 손호웅(2004)은 고전적인 DRASTIC 모델에 지질구조선 밀도 및 토지이용을 추가한 변형된 DRASTIC 모델을 개발하여 경기도 평택시 지역과 화성시 일부에 적용한 바 있다. 이는 지질구조선이 지하수 부존과 오염물질의 유동에 영향을 준다는 점을 반영한 것이며, 점오염원 또는 비점오염원의 영향을 간접적으로 반영하는 토지이용 특성을 인자로 추가하였다(Fig. 1). 본 방법에서 구조선 밀도의 점수는 1에서 5까지 분배하였고, 토지이용은 0에서 10까지 분배하였으며 각 인자들간의 상관관계를 이용하여 구조선밀도는 1.5, 토지이용은 3.5의 가중치를 부여하여 고전적인 DRASTIC에 추가하였다.

함세영 등(2004)는 고전적 DRASTIC 방법을 이용하여 창원시의 공단지역과 주거상업지역에 대한 오염취약성을 평가하였으며, 예상과 달리 주거상업지역에 해당하는 용지동 지역은 연구지역중 가장 낮은 DRASTIC 평가 지수를 나타내고 있음에도 불구하고 실제 지하수 오염도는 매우 높은 것으로 나타난 것에 착안하여, 기존의 DRASTIC 평가 인자에 지하수 사용량과 지하수 관정 분포 밀도와 같은 인위적인 요소를 함께 고려해야 한다고 제시한 바 있다. 이 연구에 따르면, DRASTIC 평가 지수와 먹는물 수질 부적합의 상관계수는 0.4, 지하수 사용량에 대한 상관계수는 0.7, 지하수 관정 분포 밀도와의 상관계수는 0.87로 나타나 추가적인 2개의 인자가 고려되어야 함을 제시하였다.

이현주 등(2008)는 부여군 부여읍을 대상으로 DRASTIC의 입력 인자중 취약성에 대한 민감도가 높고 취득이 용이하지 않은 지하수위 인자에 대하여 수치모사 기법

(MODFLOW 이용)을 적용하여 시간에 따른 자료를 생성하고 이로부터 시간에 따른 지하수위 변화가 오염취약성에 미치는 영향을 검토한 바 있으며, 최종적으로 갈수기와 홍수기 등 수문 조건의 변화 상태에 따른 오염취약성을 예측할 수 있어 토지 및 오염원 관리 등에 활용할 수 있을 것으로 파악되었다.

유성렬(2001)은 무주지역을 대상으로 1) DRASTIC 모델, 2) 지질구조선이 포함된 DRASTIC 모델 및 3) 지하수면의 깊이, 대수층 매질, 토양 매질, 지형경사율의 4가지 인자만을 고려한 간이 오염취약성도 모델을 각각 적용하여 오염취약성을 평가한 결과, 실제 지하수 수질 농도 분포와의 상관성은 지질구조선이 포함된 DRASTIC 방법에 의한 것이 가장 높게 나타났고 다음은 간이 취약성도, 마지막으로 기존 방법에 의한 DRASTIC의 순으로 나타났다고 연구한 바 있다.

이외에도 GIS 기법과 연계한 오염취약성 평가를 위하여 DRASTIC 및 pesticide DRASTIC 기법을 적용한 사례가 다수 있다(민경덕 등, 1996; 이사로 · 최순학, 1997; 이사로 · 김윤종, 1996; Lee, 2003).

5. 국내 적용성 토론

일반적으로 토양이나 암석의 오염 특성에 영향을 주는 내부 인자, 즉 고유 오염취약성에 영향을 미치는 요인들은 매우 다양하고 복잡하다. Foster and Hirata(1988)는 다음과 같은 항목을 고려해야 한다고 제시하고 있다: 암석의 광물학적인 조성, 암석의 치밀성, 절리와 균열의 정도, 공극의 분포, 유기물의 함량, 탄산염 함량, 점토 함량, 금속 산화물의 함량, pH, 산화환원 전위, 양이온 교환력, 암석과 토양 피복의 두께, 및 삼투율 및 속도.

이와 같은 다양한 요인 자체 뿐 아니라 이들 요인에 대한 세부 데이터의 수집이 어렵기 때문에 보다 정확한 오염취약성 평가 기준의 수립은 쉽지 않다. 게다가, 강우량, 함양 과정, 오염원의 특성, 수질 분석 자료 등과 같은 외부 요인이 추가된다면 오염취약성 평가는 더욱 복잡해지고 불확실성을 갖게 된다. 따라서, 제한된 자료를 이용하여 최적의 오염취약성 평가 기법을 도출하기 위해서는 다음과 같이 지하수계의 충분한 이해와 데이터의 처리 및 활용 기술 도입이 필요하다.

지하수계를 잘 이해하고 규명하는 것은 오염취약성 평가를 위한 기본으로서, 대상지역에 대한 1) 지하수위 분포의 규명, 2) 지하수 유동계의 정의, 3) 지하수 유동 모델의 개발, 4) 지구화학적 분포 특성의 규명, 5) 용질 이동 모델의 개발, 6) 환경 추적자의 사용을 통한 물의 기원과 연령 평가, 7) 비포화대 특성 규명 등이 필요하다. 현재 국내의 경우 지하수 기초조사 등을 통하여 수문지질도, 오염원 분포도, 지질구조선도, 수위 등치선도 및 각종 조사 데이터를 축적하고 DB화 하여 오염취약성 평가시 지하수계를 이해하는데 가용한 단계에 있다.

다음은 수질 등 관련 데이터의 오류를 최소화하여 평가결과의 오류를 줄이기 위한 방안이 병행되어야 한다. 잘못된 평가 결과는 의사결정자로 하여금 또다른 현장조사와 추가 데이터를 요구하게 하고 신속한 정책 결정을 수행하지 못하게 한다. 이와 같이 데이터의 불확실성을 정량화하고 최소화하기 위해서는, 1) 보다 신뢰도 높은 수질 분석 자료의 확보가 필수적이며, 2) 기존 수질 분석자료를 통계 처리하여 미지의 공간에 대한 분포 특성을 추정할 수 있어야 하며, 3) 제시된 오염 취약성과 실제 우물에서의 오염도를 비교하며, 4) 로짓(Logit) 및 Tobit 모형과 같은 확률론적 통계 기법으로 오염취약성을 검증하여야 한다. 현재 국내에는 환경부 및 지방자치단체에서 운영하는 지하수 수질측정망, 국토해양부 및 한국수자원공사에서 운영하는 국가지하수 관측망, 농림부에서 운영하는 해수침투 관측정, 먹는샘물 업체의 먹는샘물 관측정, 지방자치단체의 보조지하수 관측정 등 3,000개소 이상에서 연 1~2회의 지하수 수질 분석이 이루어지고 있고 매년 수만건 이상의 일반 관정 지하수에 대한 수질 분석이 이루어지고 있으므로 이들 자료를 활용하여 통계적 기법을 적용한다면 보다 정확한 데이터의 확보가 가능해지고 보다 신뢰성 높은 오염취약성 평가 도구가 개발될 수 있을 것이다.

5.1. CI(Contamination Index) 기법의 적용성

국내에 설치되어 있는 국토해양부에서 운영하는 국가지하수관측망(163개소)과 환경부의 지하수 수질측정망(781개소)의 1996년부터 2001년 기간 동안 연 2회 분석된 수질관측자료(질산성질소, 염소이온농도)를 이용한 특정 오염취약성을 평가하기 위하여 CI(Contamination Index) 방법을 적용하였다. 2종류의 관측정에 대한 평균 농도를 보면, 대부분의 국가지하수 관측망은 오염의 가능성이 매우 낮고 오염원으로부터 떨어진 곳에 설치되어 있는 반면에 지하수 수질측정망은 13개의 토지용도로 분류된 오염우려지역에 설치되어 있어 농도가 현저히 높은 것으로 나타난다(Fig. 2). 우선 국가지하수관측망 수질자료로부터 배경수질을 파악하기 위하여 누적빈도와 로그변환된 농도값 도표로부터 임계값(Threshold value)을 파악한 결과, 질산

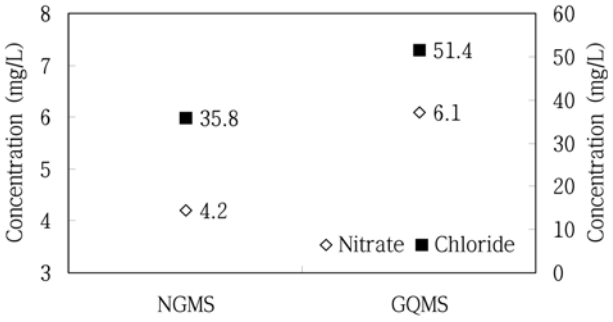

Fig. 2. Comparison of the average values of nitrate and chloride for National Groundwater Monitoring Station and Groundwater Quality Monitoring Station.

성질소는 2.37 mg/L, 염소이온 농도는 17.21 mg/L로 분석되었으며 이 임계값 이상을 이상값으로 분류할 수 있다(Sinclair, 1974) (Fig. 3). 이 임계값을 CI 방법의 C_{Ni}로 고려하여 임의의 지점에 대한 분석값(C_{Ai})과 비교한 후 수질 항목별로 이 값을 모두 합한다면 최종적으로 해당 지역의 오염 취약성을 평가할 수 있다. 지하수 수질측정망 설치 대상지역인 13개 토지용도별로 오염취약성이 어떤 차이가 있는지 질산성질소와 염소이온농도 2가지 항목을 이용하여 평가한 결과(여기에서 수질농도는 6년 평균 값을 이용), 13개 토지용도지역 공히 C_d가 0보다 커서 오염취약성이 높은 것으로 나타났다(Table 2). 이는 환경부에서 정한 13개 토지용도 분류가 오염우려지역에 속하고 평균 농도가 높다는 점을 고려한다면 의미있는 결과이다. 오염취약지구로 분류하기 위해서는 C_d의 기준값이 필요한데 이는 실제 현장의 수질 특성과 비교 검증을 통하여 제시 가능하다. 예를 들어, 폴란드 지역에서 5개 수질 항목을 이용한 Dragon(2007)의 연구에서는, C_d가 0보다 작은 경우는 인위적 오염의 증거가 없고, 3보다 큰 경우에는 높은 지하수 오염을 의미하며, 7 이상인 경우에는 아주 심한 오염에 해당한다고 연구한 바 있다. 이와 같이, 오염취약성 평가에 적합한 수질항목을 선정하여 전국에 산재된 수질자료를 이용하여 CI 방법을 적용한다면 보다 용이한 특정 오염취약성 평가가 가능할 것이며 아울러, 이 결과는 환경부에서 향후 추가 설치 예정인 지하수 수질측정망의 위치를 토지용도별로 검토할 경우 위치 선정 기준으로도 활용 가능하다. 본 방법은 국내 운영중인 관측정 지점에 대한 토지용도, 지형, 지질 등의 정확한 특성 분류를 요구하며, 오염취약성 평가에 필요한 대표성과 일반성을 갖는 수질 항목을 선정하는 작업이 선행되어야 하며, 수질검사에 불합격된 자료도 평가에 포함되는 것이 보다 정확한 오염취약성 평가 결과를 얻을 수 있을 것이다.

5.2. 로짓 회귀분석의 적용성

수질자료를 이용하는 다른 방법으로서 로짓 회귀분석을 이용한 오염취약성 평가를 사용할 수 있는데, 토지 특성이 수질에 미치는 영향정도를 분석함으로써 확률론적인 오염취약성 평가가 가능하다. 충적층에 굴착된 66개소 국가지하수관측정 자료에서 취득된 염소이온농도 자료로 부터 오염 가능성을 파악하기 위하여 관측정의 주변 특성자료를 수집하였는데, 이 자료들은 관측정에서 하천까지의 거리, 인근 하천의 규모, 지형의 경사, 토지용도, 지하수위 깊이, 수리전도도, 투수량계수 등이며, 이 중에서 하천까지의 거리, 지형경사, 토지용도(본 관측정들은 Table 2의 S, N 및 C 용도 지점에 해당함)는 염소이온농도와 상관성을 보이므로 이를 이용하여 로짓 회귀분석을 실시한 결과 염소이온농도가 임계값 17.21 mg/L 이상일 확률은 다음과 같이 나타난다.

$$Probability\ [Chloride \geqq 17.21\ mg/L] = \frac{\mathrm{EXP}\ (LOGIT)}{1+\mathrm{EXP}\ (LOGIT)}$$

여기에서, LOGIT은 Table 3에 의하여 다음과 같다.

$$LOGIT = 1.383 - 0.756ST_1 + 1.460ST_2 + 0.637ST_3 - 0.091ST_4 - 20.756SL_1 + 0.481SL_2 + 0.279SL_3 - 0.687LD_1 - 2.222LD_2$$

모형의 적합도에서 보듯이 상수항으로만 적합시켰을 때에 비하여 최종 모델에서 −2 Log Likelihood 값이

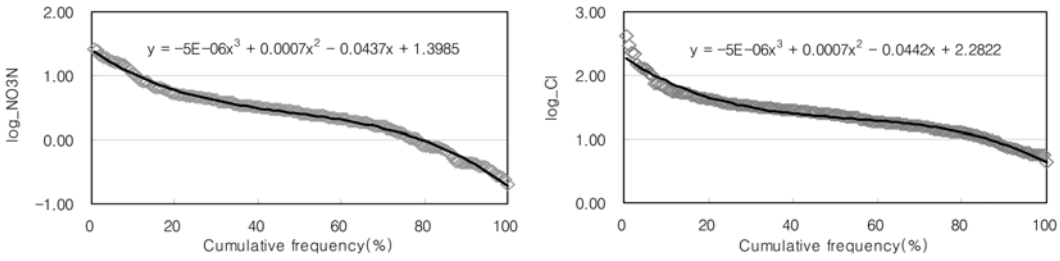

Fig. 3. Cumulative frequency diagrams for nitrate and chloride in groundwater sampled at National Groundwater Monitoring Wells.

Table 2. Example of CI application to groundwater vulnerability assessement for 13 landuse types of Groundwater Quality Monitoring Well sites

Land use	Nitrate (C_{Ni} = 2.37 mg/L)		Chloride (C_{Ni} = 17.21 mg/L)		Total (C_d)
	C_{Ai}	C_{Fi}	C_{Ai}	C_{Fi}	
Agricultural region using agricultural water (S)	4.15	0.75	24.34	0.41	1.17
Farm production complex (N)	4.56	0.92	18.67	0.08	1.01
River and nearby region (O)	5.17	1.18	40.31	1.34	2.52
Industrial complex (F)	2.20	−0.07	40.00	1.32	1.25
General waste dumping region (P)	5.71	1.41	35.70	1.07	2.48
Specification waste dumping region (Z)	6.00	1.53	88.87	4.16	5.70
Metallic mine region (K)	5.57	1.35	26.27	0.53	1.88
Human waste treatment facility and nearby region (B)	6.71	1.83	44.62	1.59	3.42
Public health investigation region (J)	6.49	1.74	59.30	2.45	4.18
Recreation parks (U)	3.08	0.30	46.62	1.71	2.01
Golf course and nearby region (G)	3.06	0.29	20.23	0.18	0.47
Residential region of urban (C)	4.75	1.00	51.96	2.02	3.02
Storage tank and nearby region (T)	5.38	1.27	58.79	2.42	3.69

17.619 줄어 들었고 유의확률이 0.039로 모형 적합이 타당한 것으로 나타났다. Pseudo-R 제곱값이 약 0.33으로 비교적 낮게 나타나 설명력은 다소 낮은 편이다. 본 모형을 이용하여 염소이온농도를 예측한 결과 17.21 mg/L를 초과하는 경우는 91%의 정확성을 갖는 것으로 나타났다. 예를 들어, 특정 지점이 하천으로부터 약 75 m 떨어져 있고, 구릉지이며, 토지용도가 농작물 주산단지라면 기준을 초과하는 염소이온농도의 발생 확률은,

$$LOGIT = 1.383 - 0.091 \times 1 + 0.279 \times 1 - 2.222 \times 1 = -0.651$$

$$\text{Prob}\ [Chloride \geq 17.21\ mg/L] = \frac{\text{EXP}\ (-0.651)}{1+\text{EXP}\ (-0.651)} = 0.34$$

로서 약 34%에 불과하여 기준 농도 이하일 가능성이 66%로서 오염가능성이 낮은 것으로 평가된다. 이와 같이, 국가 지하수 관측정의 일부 특성 자료를 활용하여 염소이온농도의 기준 초과 가능성에 대한 확률을 분석할 수 있으며 이로부터 발생 확률 분포도를 작성할 수 있어 오염취약성 평가 기법으로서의 활용성이 있다. 특히, 국내의 환경부 수질측정망은 고정 관측정으로서 10년 이상된 장기간 관측 자료가 존재하며 이들 측정망 지점에 대한 정밀 현장조사를 통하여 지점 특성 정보가 수집, 분석된다면 보다 신뢰성 높은 오염취약성 평가가 가능할 것이다.

5.3. 변형 DRASTIC의 적용성

국내의 경우 변형된 DRASTIC 기법이 각종 사업 등에 활용되고 있으나 이에 대한 보다 체계적인 검증과 현장 확인이 요구된다. 지질구조선은 암반내의 지하수 산출성과 밀접한 관련이 있다고 많은 연구자들에 의하여 수행되어 왔으나 반면에 관정의 개발이 풍화 특성 및 사회경제적 요구에 의해서도 영향을 받는다는 연구도 다수 있다. Daniel(1989)은 계곡내에 굴착된 관정은 능선부나 언덕위에서 굴착된 관정보다 약 3배의 높은 산출성을 갖는다고 연구한 바 있으며, Sami(1996)는 습곡축, 지층경사면, 파쇄대 등의 다양한 지질구조상에 위치한 관정들은 그 위치에 따라 산출성에 차이가 있음을 연구한 바 있다. Mabee et al.(1994)은 35개의 암반 관정을 분석하여 대수층의 투수량계수가 파쇄대와 관련있는 지질구조선과 양의 상관관계를 보임을 밝혔다. 또한 위성영상에서 지질구조선을 추출할 경우에는 해석전문가 및 추출 방법 등에 따라 지질구조선의 해석이 달라질 수 있기 때문에 여러 번에 걸친 지질구조선 추출 등의 보완책이 요구된다고 하였다. Sidle and Lee(1995)는 대수층의 수리전도도는 지질구조의 방향에 따라 차이가 있음을 규명하였다.

국내에서도 지하수 산출성과 지질구조선의 상관 관계 연구가 수행된 바 있는데, 김규범(2005)은 천안과 포항지역의 관정에서의 지하수 산출성(규모 10 m^3/m 이상의 경우)이 지질구조선 길이 밀도와 선형 상관관계가 있음을 밝힌 바 있다. 또한, 화강암 및 편마암류로 주로 구성되어 상대적으로 균질한 암석 분포를 보이는 천안지역이 두 인자간의 상관성이 더 높은 것으로 나타났다. 한국지질자원연구원(2004)은 성격이 상이한 지질구조선의 개수와 길이 등 두가지 요소를 동시에 고려한 밀도 인자 추출 기법을

Table 3. Result of logistic regression analysis

(a) Coefficients of regression model

Variables	Regression coefficient	Wald statistics	Degree of freedom	p-value
Intercept	1.383	5.263	1	0.022
ST1 (Distance to stream > 1 km)	−0.756	0.425	1	0.514
ST2 (500 ~ 1 km)	1.460	1.453	1	0.228
ST3 (100 ~ 500 m)	0.637	0.281	1	0.596
ST4 (50 ~ 100 m)	−0.091	0.005	1	0.942
ST5 (< 50 m)	0	.	0	.
SL1 (Steep slope)	−20.756	.	1	.
SL2 (Moderate slope)	0.481	0.255	1	0.614
SL3 (Hilly area)	0.279	0.075	1	0.785
SL4 (Plain area)	0	.	0	.
LD1 (Land type S)	−0.687	0.903	1	0.342
LD2 (Land type N)	−2.222	5.532	1	0.019
LD3 (Land type C)	0	.	0	.

(b) Model fitting information

Model	Model Fitting Criteria	Likelihood Ratio Tests		
	−2 Log Likelihood	Chi-Square	df	Sig.
Intercept Only	51.051			
Final model	33.432	17.619	9	0.039

(c) Comparison of observed and predicted values

Observed value	Predicted value		
	1 (> 17.21 mg/L)	0 (=< 17.21 mg/L)	Percent Correct
1 (> 17.21 mg/L)	41	4	91.11
0 (=< 17.21 mg/L)	11	10	47.62
Overall Percentage	78.79	21.21	77.27

개발하였으며, 이로부터 산정된 지질구조선 밀도와 관정의 지하수 산출성을 비교한 결과 지질구조선의 연장성을 고려한 선구조 밀도가 그렇지 않은 밀도에 비하여 높은 상관도를 보이는 것으로 해석되었다.

지질구조선의 해석에 있어서 문제점으로는 지질구조선 추출시 다양한 원인에 의하여 오류가 발생할 수 있다는 점이다. 과거 여러 연구자들은 이와 같은 인위적인 오류를 최소화, 표준화하기 위하여 지질구조선 추출 알고리즘 및 분석 프로그램을 개발하였다(Caponera, 1989; Koike et al., 1995; Karnieli et al., 1996; Kim et al., 1999; Park et al., 2000; Casas et al., 2000; Costa et al., 2001; Kim et al, 2004a; Kim et al., 2004b). Kim et al.(1999)는 위성영상 자료로부터 지질구조선을 자동으로 추출하는 알고리즘을 개발하였으며, Casas et al.(2000)은 위성영상에서 추출된 지질구조선의 밀도를 계산하기 위한 Fortran 프로그램을 활용하였는데, Delauney triangulation 방법을 사용하여 이웃하는 지질구조선들 사이의 거리를 계산함으로써 지질구조선 밀도 계산에 필요한 최적 셀의 크기를 정의하였다. Kim et al.(2004a, 2004b)는 지질구조선의 밀도 산정을 위하여 최적 격자의 크기를 결정하는 회귀식을 도출하였으며, 원형 격자내의 지질구조선의 특성(거리, 교차점, 밀도 등)을 계산할 수 있도록 ArcView 프로그램을 이용하여 개발한 바 있다.

반면에, Cho et al.(2002, 2003)은 전주-완주지역의 연구를 통하여 파쇄특성을 보이는 풍화대내에서는 투수성이 심도에 따라 감소하고 관정의 산출성도 깊이에 따라 줄어드는 것으로 해석되어 지질구조선의 영향보다는 사회경제적 활동 및 풍화대의 상태 등이 관정 산출성과 영향을 미친다고 제시한 바 있다. Dewandel 등(2006)은 인도의 화강암 분포지역에 대한 연구를 통하여 풍화작용에 의하여 생성된 암반내의 균열은 대수층의 투수성에 영향을 미치게 되고 결국 산출성에 영향을 주어 지질구조선 자체의 영향보다는 풍화대의 분포에 따른 영향을 고려해야 한다고 제시한 바 있다. 이와 같은 연구결과는 지질구조선을

DRASTIC의 추가 인자로 고려하기에 앞서 지질구조선과 지하수 산출성에 대한 검증과 확인이 필요함을 보여주고 있다. 현재 국내에 적용되고 있는 DRASTIC 및 변형된 DRASTIC은 다음 사항을 충분히 고려하여 적용되어야 할 것이다.

- DRASTIC 자체의 문제점인 가중치 시스템의 한계성 및 배점과 가중치의 적정성
- 오염취약성 평가 결과와 실제 현장 수질상태의 비교 검증
- 지질구조선 인자에 대한 가능 문제점
  . 분석 전문가 및 영상 촬영 시기 등에 따른 지질구조선 추출의 차이로 인한 문제
  . 지질구조선과 실제 야외 지질구조와의 연관성의 문제 및 확인 방법
  . 지질구조선을 따른 지하수 유동, 부존 특성 및 산출성의 규명

이와 같이, 현재 국내에서 이용 중인 변형 DRASTIC 방법은 지질구조선의 의미를 보다 명확히 정의할 필요가 있고 최종 평가 점수는 실제 현장의 수질 분포 및 시계열 변화 상태와 비교하여 Feedback을 통하여 최종적으로 국내 실정에 맞는 가중치 및 점수를 정하는 것이 바람직하다.

5.4. 기타 방법의 적용

현재 국내에서는 10여년간 운영된 지하수 관측정과 지하수법에 의하여 수행되는 전국의 지하수 관정에 대한 수질 자료 등이 보유되어 있다. 또한, 지난 10여년간 지하수기초조사 및 각종 국책 조사연구 사업을 통하여 각 지역별 기초적인 수리특성 자료들이 확보되어 있는 상태이다. 따라서, 상기에서 언급한 통계적 방법 및 변형된 DRASTIC외에도 일반적인 오염취약성 평가 방법인 GOD, GLA, AVI 및 IT 등 새로운 지수 방법의 적용 및 시도가 가능할 것이다. 아울러 국내에 기 구축되어 있는 GIS 데이터(지형, 토지이용, 토양, 식생, 수문 특성, 지질 등)를 이용한 IT 기술을 활용한다면 혼합 평가 기법의 적용이 가능할 것이며 아울러 인터넷 등을 통한 사용자 접근성 및 활용성도 보다 개선될 것이다.

6. 결 언

국내 지하수 오염취약성의 평가를 위해서는 우선 고유 오염취약성의 평가와 특정 오염취약성의 평가에 대한 개념 정립이 요구되며 국내에서 자료의 취득 가능성, 국내의 지형적 특성이 고려된 기법, 지질구조선의 특성 규명, 지하수 기초조사 등을 통한 수리적 특성 규명 등이 선행, 병행되어야 한다. 현재까지 국내에서는 고유 오염취약성 평가를 위한 기법 개발과 접근을 시도해 왔으며 특히 지수 방법에 한정되어 왔다. 사용자 및 관리자의 요구에 따라 특정 오염취약성에 대한 접근도 필요할 것이며 보다 수리적인 특성 자료를 활용한 고유 오염취약성에 대한 접근이 필요하다. 다양한 연구자들에 의하여 다양한 방법들이 개발 적용되고 그 결과는 실제 현장의 자료와 비교 분석이 이루어짐으로써 궁극적으로 국내 실정에 맞는 오염취약성 평가 도구가 개발될 것으로 본다.

또한, 가용 데이터의 최대한 활용과 현장 실증 및 정부와 연구기관의 공동 노력-예산의 확보, 제도의 보완, 데이터의 제공, 분석기법의 개발 및 검증 등-이 이루어 진다면, 수리지질학자는 의사결정자에게 보다 합리적이고 과학적인 근거가 있는 국가 표준에 해당하는 오염취약성 평가 도구를 제공할 수 있을 것이다. 또한, 의사결정자는 지하수 오염과 관련된 토지 이용에 관한 필요한 제도를 정착하고 그 제도적 근거하에 활용 가능한 도구로서 평가 기법을 사용한다면 보다 선진화된 물 관리가 가능할 것이다.

참 고 문 헌

건설교통부, 대한광업진흥공사, 1998, 함평-나주지역 지하수 기초조사 보고서, 대전, p. 504.

건설교통부, 한국수자원공사, 2005, 칠곡지역 지하수 기초조사 보고서, 대전.

건설교통부, 한국수자원공사, 2007, 보령지역 지하수 기초조사 보고서, 대전.

건설교통부, 한국수자원공사, 대한광업진흥공사, 2006, 익산지역 지하수 기초조사 보고서, 대전.

건설교통부, 한국수자원공사, 한국농촌공사, 2007, 안성지역 지하수 기초조사 보고서, 대전.

건설교통부, 한국수자원공사, 한국지질자원연구원 2007, 예산지역 지하수 기초조사 보고서, 대전, p. 136.

김규범, 2005, 지하수 관측망 최적설계 및 시계열 자료 해석, 서울대학교 박사학위 논문, 서울.

민경덕, 이영훈, 이사로, 김윤종, 한정상, 1996, DRASTIC을 이용한 지하수 오염 가능성 분석 및 그래픽 사용자 인터페이스 개발 연구, 지하수환경, **3**(2), 101-109.

유성렬, 2001, GIS를 이용한 무주 지역의 지하수 오염취약성 평가, 연세대학교 석사학위 논문, 서울.

이사로, 김윤종, 1996, DRASTIC system을 이용한 지하수 오염

가능성 및 위험 분석 연구, 한국GIS학회지 **4**(1), 1-11.

이사로, 최순학, 1997, GIS 기법을 이용한 영광지역의 지하수 오염취약성 평가, 지하수환경, **4**(4), 223-230.

이현주, 박은규, 김강주, 박기훈, 2008, DRASTIC 모델 및 지하수 수치모사 연계 적용에 의한 부여읍 일대의 지하수 오염취약성 평가, 지하수토양환경, **13**(1), 77-91.

조시범, 민경덕, 우남칠, 이사로, 1999, GIS를 이용한 경기도 평택군 지역의 지하수 오염 가능성 평가 연구, 지하수환경, **6**(2), 87-94.

조시범과 손호웅, 2004, 지하수 오염 예측을 위한 GIS 활용 연구, 지구물리, **7**(2), 121-134.

한국지질자원연구원, 2004, 지질도 GIS 시스템 구축 보고서, 국무총리실, 서울.

함세영, 정재열, 김무진, 김인수, 황한석, 2004, DRASTIC과 지하수 수질에 의한 창원시 지하수 오염취약성 평가, 자원환경지질, **37**(6), 631-645.

Albinet, M. and Margat, J., 1970, Cartographie de la vulnerabilite a la pollution des nappes d'eau souterraine, *Bulletin BRGM 2nd Series*, **3**(4), 13-22.

Aller, L. and Ballou, K., 1991, Ground Water Pollution Potential of Lake County, Ohio, Ohio Department of Natural Resources, p. 39.

Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H., and Petty, R.J., 1985, DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Using Hydrogeologic Settings, EPA/600/2-85/018, Oklahoma, USA, p. 163.

Backman, B., Bodis, D., Lahermo, P., Rapant, S., and Tarvainen, T., 1998, Application of a contamination index in Finland and Slovakia, *Environ. Geology*, **36**, 55-64.

Barrocu, G., Muzzu, M., and Uras, G., 2007, Hydrogeology and vulnerability map (Epik method) of the "Supermonte" karstic system, north-central Sardinia, *Environ. Geology*, **51**(5), 701-706.

Brechenmacher, J., 2002, Vulnerability mapping in the karst system, Sierra de Libar, Andalusia, MSc thesis, University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany.

Brosig, K., Geyer, T., Subah, A., and Sauter, M., 2008, Travel time based approach for the assessment of vulnerability of karst groundwater: the Transit Time Method, *Environ. Geology*, **54**(5), 905-911.

Caponera, F., 1989, Remote Sensing Applications to Water Resources: Remote Sensing Image Interpretation for Ground Water Surveying, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, p. 234.

Casas, A.M., Cortes, A.L., Maestro, A., Soriano, M.A., Riaguas, A., and Bernal, J., 2000, LINDENS: A program for lineament length and density analysis, *Comp. Geosci.*, **26**(9/10), 1011-1022.

Cho, M., Choi, Y., Ha, K., Kee, W., Lachassagne, P., and Wyns, R., 2002, Paleoweathering covers in Korean hard rocks: a methodology for mapping their spatial distribution and the thickness of their constituting horizons; Applications to identify brittle deformation and to hard rock hydrogeology, *KIGAM Bulletin* **6**(2), 12-25.

Cho, M., Choi, Y., Ha, K., Kee, W., Lachassagne, P., and Wyns, R., 2003, Relationship between the permeability of hard-rock aquifers and their weathered cover based on geological and hydrogeological observations in South Korea, *International Association of Hydrogeologist IAH Conference on "Groundwater in Fractured Rocks",* Prague, Czech Republic, p. 41-42.

Civita, M. and de Maio, M., 1997, Assessing groundwater contamination risk using Arc/Info via GRID function, *Proceedings of ESRI User Conference*, San Diego, USA.

Cornaton, F., Goldscheider, N., Jeannin, P.Y., Perrochet, P., Pochon, A., Sinreich, M., and Zwahlen, F., 2004, The VULK analytical transport model and mapping method, In: F. Zwahlen (ed.), *Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers, Final report (COST Action 620).*

Corniello, A., Ducci, D., and Monti, GM., 2004, Aquifer pollution vulnerability in the Sorrento peninsula, southern Italy, evaluated by SINTACS method, *Geofisica Internacional*, **43**(4), 575-581.

COST, 2002, Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers, COST Action 620-Final Report 1st draft.

Costa, R.D. and Starkey, J., 2001, Photolin: a program to identify and analyze linear structures in aerial photographs, satellite images and maps, *Comp. Geosci.*, **27**, 527-534.

Daniel, C.C.III., 1989, Statistical Analysis Relating Well Yield to Construction Practices and Siting of Wells in the Piedmont and Blue Ridge Provinces of North Carolina, U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2341-A, 27 p.

Dewandel, B., Lachassagne, P., Wyns, R., Marechal, J.C., and Krishnamurthy, N.S., 2006, A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering, *J. Hydro.,* **330**, 260-284.

Dragon, K., 2007, Application of a groundwater contamination index to assessment of confined aquifer vulnerability, In: Witkowski et al. (ed.), *Groundwater Vulnerability Assessment and Mapping*, Taylor and Francis, London, p. 87-93.

Duijenbooden, W. and Waegeningh, H.G., 1987, Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, *Proceedings and Information, No.38 the International Conference held in Netherlands, 1987*, TNO Committee on Hydrological Research, Delft, The Netherlands.

EPA, 1993, PRZM-2: A Model for Predicting Pesticide Fate in the Crop Root and Unsaturated Soil Zones: User Manual for Release 2.0, US Environmental Protection Agency, EPA 600/R-93/045, 406 p.

Erwin, M.L. and Tesoriero, A.J., 1997, Predicting Groundwater Vulnerability to Nitrate in the Puget Sound Basin, US Geological Survey Fact Sheet 061-97, 4 p.

Ferreira, J.P.L. and Oliveira, M.M., 2004, Groundwater vulnerability assessment in Portugal, *Geofisica Internacional*, **43**(4), 541-550.

Focazio, M.J., Reilly, T.E., Rupert, M.G., and Helsel, D.R., 2002, Assessing Ground-water Vulnerability to Contamination: Providing Scientifically Defensible Information for Decision Makers, U.S. Geological Survey Circular 1224, U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, USA.

Foster, S., 1998, Groundwater recharge and pollution vulnerability of British aquifer: A critical review, In: N.S. Robins (ed.), *Groundwater Pollution, Aquifer Recharge and Vulnerability*, Geological Society of London, London, p. 7-22.

Foster, S. and Hirata, R., 1988, Groundwater pollution risk assessment-A methodology using available data, Pan-American Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences(CEPIS), Lima/Peru, p. 73.

Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., and Paris, M., 2002, Groundwater Quality Protection: A Guide for Water Utilities, Municipal Authorities and Environmental Agencies, The World Bank, Washington DC, p. 103.

Gardner, K.K. and Vogel, R.M., 2005, Predicting groundwater nitrate concentration from landuse, *Ground Water*, **43**(3), 343-352.

Goldscheider, N., 2002, Hydrogeology and vulnerability of karst systems-examples from the Northern Alps and Swabian Alp, PhD thesis, University of karlsruhe, Karlsruhe, p. 229.

Goldscheider, N., 2005, Karst groundwater vulnerability mapping: Application of a new method in the Swabian Alb, Germany, *Hydrogeo. J.*, **13**(4), 555-564.

Gogu, R.C. and Dassargues, A., 2000, Sensitivity analysis for the EPIK method of vulnerability assessment in a small karst aquifer, Southern Belgium, *Hydrogeo. J.*, **8**, 337-345.

Gogu, R.C., Hallet, V., and Dassargues, A., 2003, Comparison of aquifer vulnerability assessment techniques, Application to the Neblon river basin (Belgium), *Environ. Geology*, **44**(8), 881-892.

Hamerlinck, J.D. and Ameson, C.S., 1998, Wyoming Ground Water Vulnerability Assessment Handbook-Spatial Data and Visulaization Report 98-01, University of Wyoming, Laramie, Wyoming, www.sdvc.uwyo.edu/groundwater/report.html.

Helsel, D.R. and Hirsch, R.M., 1992, Statistical Methods in Water Resources. Elsevier Publishers, New York, 529 p.

Hoelting, B., Haertle, T., Hohberger, K.H., Nachtigall, K.H., Villinger, E., Weinzierl, W., and Wrobel, J.P., 1995, Concept for the Determination of the Protective Effectiveness of the Cover above the Groundwater against Pollution, Ad-hoc Working Group on Hydrogeology, Hannover, p. 28.

Holtschlag, D.J. and Luukkonen, C.L., 1997, Vulnerability of Ground Water to Atrazine Leaching in Kent County, Michigan, U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 96-4198, Reston, USA, p. 49.

Johansson, P.O., Scharp, C., Alveteg, T., and Choza, A., 1999, Framework for ground-water protection-the Managua Ground Water System as an example, *Ground Water*, **37**(2), 204-213.

Karnieli, A., Meisels, A., Fisher, L., and Arkin, Y., 1996, Automatic extraction and evaluation of geological linear features from digital remote sensing data using a Hough transform, *Photo. Eng. Re. Sens.*, **62**, 525-531.

Kim, G.B., Lee, J.Y., and Lee, K.K., 2004a, Construction of lineament maps related to groundwater occurrence with ArcView and AvenueTM scripts, *Comp. Geosci.*, **30**, 1117-1126.

Kim, G.B., Lee, J.Y., and Lee, K.K., 2004b, Application of representative elementary area (REA) to lineament density analysis for groundwater implication, *Geosci. J.*, **8**, 27-42.

Kim, S.W., Won, J.S., Kim, W.K., and Min, K.D., 1999, Lineament analysis in the Euseong area using automatic lineament extraction algorithm, *Econ. Environ. Geol.*, **32**, 19-31.

Kim, Y.J. and Hamm, S., 1999, Assessment of the potential for ground water contamination using the DRASTIC/EGIS technique, Cheongju area, South Korea, *Hydrogeo. J.*, **7**(2), 227-235.

Koike, K., Nagano, S., and Ohmi, M., 1995, Lineament analysis of satellite images using a segment tracing algorithm (STA), *Comp. Geosci.*, **21**, 1091-1104.

Kuisi, M.A., El-Naqa, A., and Hammouri, N., 2006, Vulnerability mapping of shallow groundwater aquifer using SINTACS model in the Jordan Valley area, Jordan, *Environ. Geology*, **50**(5), 651-667.

Laimer, H.J., 2005, Die Erfassung der Karstgrundwasser-Vulnerabilitat mit der Methode "VURAAS" (Karst groundwater vulnerability assessment with the "VURAAS" method), *Grundwasser*, **10**(3), 167-176.

Leal, J.A.R. and Castillo, R.R., 2003, Aquifer vulnerability mapping in the Turbio river valley, Mexico: A validation study, *Geofisica Internacional*, **42**(1), 141-156.

Lee, S., 2003, Evaluation of waste disposal site using the DRASTIC system in Southern Korea, *Environ. Geology*, **44**(6), 654-664.

Lynch, S.D., Reynders, A.G., and Schulze, R.E., 1997, A DRASTIC approach to ground water vulnerability in South Africa, *S. African J. Sci.*, **93**(2), 59-60.

Mabee, S.B., Hardcastle, K.C., and Wise, D.U., 1994, A method of collecting and analyzing lineaments for regional-scale fractured-bedrock aquifer studies, *Ground Water*, **32**, 884-894.

Margane, A., 2003, Management, Protection and Sustainable Use of Groundwater and Soil Resources in the Arab Region-Volume 4-Guideline for Groundwater Vulnerability Mapping and Risk Assessment for the Susceptibility of Groundwater Resources to Contamination, Damascus.

Margane, A., Hobler, M., and Subah, A., 1997, Groundwater Resources of Northern Jordan-Special Report No. 3: Mapping of Groundwater Vulnerability and Hazards to Groundwater in the Irbid Area, prepared by WAJ & BGR, Amman, p. 50.

Marsico, A., Giuliano, G., Pennetta, L., and Vurro, M., 2004, Intrinsic vulnerability assessment of the south-eastern Murge (Apulia, southern Italy), *Nat. Haz. E. Sys. Sci.*, **4**, 769-774.

Mato, R.R.A.M., 2004, Modeling and mapping groundwater protection priorities using GIS: the case of Dar es Salaam city, Tanzania, In: *Groundwater Vulnerability Assessment and Mapping, Abstracts*, International Conference, Usrtron, Poland, p. 100.

Mato, R.R.A.M., 2007, Modeling and mapping groundwater protection priorities using GIS: the case of Dar Es Salaam city, Tanzania, In: Witkowski et al. (ed.), *Groundwater Vulnerability Assessment and Mapping*, Taylor and Francis, London, p. 155-166.

Melloul, M. and Collin, M., 1998, A proposed index for aquifer water-quality assessment: the case of Israel's Sharon region, *J. Environ. Manage.*, **54**(2), 131-142.

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. Tech.*, **36**(10), 2138-2145.

Nolan, B.T., Ruddy, B.C., Hitt, K.J., and Helsel, D.R., 1997, Risk of nitrate in groundwaters of the United States-a national perspective, *Environ. Sci. Tech.*, **31**(8), 2229-2236.

Park, Y.J., Lee, K.K., and Kim, J.M., 2000, Effects of highly permeable geological discontinuities upon groundwater productivity and well yield, *Math. Geology*, **32**, 605-618.

Rao, P.S.C. and Alley, W.M., 1993, Pesticides, In W.M. Alley (ed.), *Regional Groundwater Quality*, Van Nostrand Reinhold, New York, NY, p. 345-377.

Rupert, M.G., 2001, Calibration of the DRASTIC groundwater vulnerability mapping method, *Ground Water*, **39**(4), 625-630.

Ryker, S.J., 2001, Mapping arsenic in ground water-A real need, but a hard problem, *Geo. News. E. Sci.*, **46**(11), 34-36.

SAEFL (Swiss Agency for the Environment, Forest and Landscape), 2000, Practical guide groundwater vulnerability mapping in karst regions (EPIK), Bern, 57 p.

Sami, K., 1996, Evaluation of the variations in borehole yield from a fractured Karoo aquifer, South Africa, *Ground Water*, **34**, 114-120.

Shelton, J.L., Burro, K.R., Belitz, K., Dubrovsky, N.M., Land, M., and Gronberg, J., 2001, Low-level Volatile Organic Compounds in Active Public Supply Wells as Groundwater Tracers in the Los Angeles Physiographic Basin, California, 2000, U.S. Geological Survey Water Resources Investigation Report 01-4188, Sacramento, CA, USA.

Shukla, S., Mostaghimi, S., Shanholt, V.O., Collins, M.C., and Ross, B.B., 2000, A county-level assessment of ground water contamination by pesticides, *Ground Water Moni. R.*, **20**(1), 104-119.

Sidle, W.C. and Lee, P.Y., 1995, Estimating local ground water flow conditions in a granitoid: preliminary assessments in the Waldoboro pluton complex, Maine, *Ground Water*, **33**, 291-302.

Simsek, C., Gemici, U., and Filiz, S., 2008, An assessment of surficial aquifer vulnerability and groundwater pollution from a hazardous landfill site, Torbali/Turkey, *Geosci. J.*, **12**(1), 69-82.

Sinclair, A.J., 1974, Selection of threshold values in geochemical data using probability graphs, *J. Geochem. Explor.*, **3**, 129-149.

Snyder, D.T., Wilkinson, J.M., and Orzol, L.L., 1998, Use of a Ground-water Flow Model with Particle Tracking to Evaluate Ground-water Vulnerability, Clart County, Washington, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2488, 63 p.

Tobin, J., 1958, Estimation of relationships for limited dependent variables, *Econometrica*, **26**(1), 24-36.

van Stempvoort, D., Everet, L., and Wassenaar, L., 1993, Aquifer vulnerability index: a GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping, *Canadian Water Res. J.*, **18**, 25-37.

Vias, J.M., Andreo, B., Perles, M.J., and Carrasco, F., 2005, A comparative study of four schemes for groundwater vulnerability mapping in a diffuse flow carbonate aquifer under mediterranean climatic conditions, *Environ. Geology*, **47**(4), 586-595.

Vias, J.M., Andreo, B., Perles, M.J., Carrasco, F., Vadillo, I., and Jimenez, P., 2002, Preliminary proposal of a method for contamination vulnerability mapping in carbonate aquifers, In: *Karst and Environ.*, p. 75-83.

Vias, J.M., Andreo, B., Perles, M.J., Carrasco, F., Vadillo, I., and Jimenez, P., 2006, Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karst aquifers): the COP method, Application in two pilot sites in Southern Spain, *Hydrogeo. J.*, **14**(6), 912-925.

Voigt, H.J., Heinkele, T., Jahnke, C., and Wolter, R., 2004, Char-

acterization of groundwater vulnerability to fulfill requirements of the water framework directive of the European Union, *Geofisica Internacional*, **43**(4), 567-574.

Vrba, J. and Zaporozec, A., 1994, Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability; IAH International Contribution to Hydrogeology, v.16, Hannover: Heise Verlag.

Welch, A.H., Westjohn, D.B., Helsel, D.R., and Wanty, R.B., 2000, Arsenic in ground water of the United States-Occurrence and geochemistry, *Ground Water*, **38**(4), 589.