

DRASTIC과 SINTACS 모델의 비교적용에 의한 부여읍 일대의 지하수 오염 취약성 평가

강진희 · 박은규*
경북대학교 지질학과

A Comparative Application of DRASTIC and SINTACS Models for The Assessment of Groundwater Vulnerability of Buyeo Area

Jinhee Kang · Eungyu Park*
Dept. of Geolgy, Kyungpook National University

ABSTRACT

In this study, we applied DRASTIC and SINTACS models for the assessment of groundwater vulnerability to Buyeo-eup area in Buyeo-gun, Chungcheongnam-do, Korea. Currently, DRASTIC model is a main tool for the assessment of groundwater vulnerability, which has been widely applied for the multiple purposes related to local developments, construction projects, groundwater investigations, etc. since 1980s. Because DRASTIC model has been the sole tool used for the domestic environment, there has been doubt about the degree of reliability of the model, and a benchmark model has been sought by the many practitioners. The objective of this study is to check the applicability of SINTACS model to domestic environment, which is the first attempt in Korea as far as authors understand. The comparative results show that the DRASTIC assessment underestimates groundwater vulnerability of the aquifers composed of fractured bedrocks while that from the SINTACS model is relatively higher. Through this study, it is expected that SINTACS model serves as a reasonable alternative of DRASTIC model where the subsurface is composed of more than two different media such as fractured rocks and alluvium.

Key words : DRASTIC, SINTACS, Overlay-and-index, Groundwater, Vulnerability

1. 서 론

국내 연간 지하수 이용량은 지속적으로 증가하고 있으며 이에 따라 지하수 자원 관리의 중요성이 날로 증대되고 있다. 일반적으로 기 오염된 지하수의 원상복구에는 많은 비용과 시간이 소요된다. 따라서 지하수 오염 가능성을 사전에 평가하고 이를 바탕으로 효과적인 관리방안을 마련하는 것은 비용-효율적인 접근 방법이라 할 수 있다. 이러한 이유로 지표로 유입되는 오염물질에 대한 지하수의 취약성을 평가하기 위한 노력이 1970년대부터 이루어져 왔다(Civita, 2004).

지하수오염취약성 평가 기법 중 국내외적으로 가장 선호되고 있는 방법인 중첩기법은 점수가 설정된 주제도들을 선형 중첩하여 그 값에 따라 취약성을 평가하는 기법

으로, GIS(Geographic Information Systems)와 연계하여 넓은 지역에 대한 용이한 분석이 가능함으로 인하여 더욱 활용분야가 넓어지고 있다(National Research Council, 1993). 중첩기법은 크게 HCS(Hydrogeological Complex and Settings methods)와 PS(Parametric System methods)로 분류할 수 있다(농림부, 2000). HCS는 정성적인 결과를 도출하며 중첩방법의 가장 초기 형태이다. HCS에 비하여 보다 정량적 평가 방법인 PS는 도입된 이후 현재까지 지속적으로 발전해왔으며 이것은 다시 RS(Rating System)와 PCSM(Point Count System Model)으로 분류된다. RS는 취약성 평가를 위해 고려되는 각 인자들의 값과 종류에 따라 고정된 점수의 범위를 제시한다. 이 범위는 일반적으로 주관적인 판단에 의해 분류되어 제시된다(Gogu and Dassargues, 2000). 대상 지역은 지점

*Corresponding author : egpark@knu.ac.kr

원고접수일 : 2010. 8. 6 심사일 : 2010. 8. 7 게재승인일 : 2010. 10. 7
질의 및 토의 : 2010. 12. 31 까지

(point)별로 점수(rating)가 부여되며, 각 인지별 점수의 합이 최종 점수로써 평가에 이용되는 방식이다. 이러한 평가 기법에는 GOD system(Foster, 1987), ISIS method (Civita and De Regibus, 1995)가 있다. RS(Rating System)에 추가적으로 인자간의 상대적인 중요도에 따라 가중치를 부여하는 PCSM은 가중치와 점수의 곱으로 최종 점수를 도출하여 평가하는 방식이다. 이러한 평가 기법에는 대표적으로 DRASTIC모델(Aller et al., 1987), SINTACS 모델(Civita, 1994), EPIK모델(Doerflinger and Zwahlen, 1997)이 있다. 1970년 M. Albinet에 의해 프랑스에서 최초의 취약성도가 작성된 이래로 지하수 오염 취약성에 대한 평가 기법들이 꾸준히 발전해 왔다(Gogu and Dassargues, 2000).

국내에서도 역시 미국 환경보호청(U.S. Environmental Protection Agency)과 미국 지하수 협회(National Ground Water Association)에 의해 개발된 DRASTIC모델을 이용한 지하수 오염 취약성 평가가 있으며(이사로 · 김윤중, 1996; 조시범 외, 1999; 조시범 · 손호용, 2004; 이현주 외, 2008), 여러 분야에 걸친 지하수 환경영향평가 및 조사에 적용되고 있다. 그러나 지하수오염취약성을 평가할 수 있는 다양한 방법이 가용함에도 불구하고 국내에서는 DRASTIC모델을 제외한 나머지 방법론에 대해 연구 및 적용된 사례가 거의 없어 DRASTIC 모델을 통한 예측결과의 신뢰성을 확보할 수 있는 방안이 없다는 것이 문제점으로 대두되고 있다(김규범, 2008). 따라서 본 연구에서는 DRASTIC모델과 이를 수정 보완한 SINTACS모델을 비교·적용하고 우리나라 지하수 환경에의 SINTACS모델 적용가능성을 검토하였다.

두 모델의 상호 비교검토를 위하여 선택된 지역은 충청남도 부여군 부여읍 일대로 15.52km²면적의 소유역이다. 본 연구지역은 소유역 내에서 그 수리지질학적 특성이 층적 및 암반으로 크게 차이를 보이기 때문에 이러한 특성을 고려하지 않은 DRASTIC모델과 연구지역의 매질특성에 따라 서로 다른 가중치 모형을 적용하는 SINTACS모델을 적용하고 그 결과를 비교하기에 적합한 지역이다. 취약성의 정량적인 비교를 위하여 서로 다른 기준으로 분류된 취약성 등급도를 4개의 등급으로 정규화하고 그 결과의 상호비교를 실시하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1. DRASTIC 모델과 SINTACS 모델

본 연구에서 사용한 DRASTIC 모델은 PCSM의 대표

적인 기법으로 1987년에 USEPA와 NGWA에서 대상 지역의 상대적 지하수 오염 취약성을 정성적으로 평가하도록 개발된 이후 국내외에서 가장 보편적으로 이용하고 있는 방법 중 하나이다. SINTACS모델은 DRASTIC 모델을 이탈리아 지역의 기후와 수리지질학적 특성에 따라 적합하게 수정 보완한 모델로써, CNR-GNDICI(the Italian National Research Council-National Research Group for Prevention of Hydrogeological Disasters)가 개발한 모델이다(Civita and De Maio, 1997). DRASTIC과 SINTACS 모델은 공통적으로 지하수 침투와 함양에 영향을 미치는 7가지 인자를 고려하지만 점수와 가중치의 선정방법에 다소 차이를 보이고 있다. DRASTIC모델은 각 영향인자 특성의 상대적 순위를 매기고 이에 따라 점수를 1부터 10까지의 정수로 분류하였다. 반면 SINTACS모델의 점수의 범위는 DRASTIC모델과 동일하지만 실수를 택할 수 있으며 수리지질학적 특성에 따른 점수의 선정이 선형적이지 않다는 특성을 가지고 있다. 또한 DRASTIC모델의 가중치는 일반지역과 농업지역으로 2개의 가중치 모델이 제시되어 이 중 연구지역에 상응하는 하나의 가중치 모델을 선택하고 지역 전체에 적용한다(Table 1).

반면 SINTACS모델은 수리지질학적 특성에 따라 6개의 가중치 모형이 제시되어 평가지역을 수리지질학적 특성에 따라 수 개의 서로 다른 구획으로 구분하고 상응하는 가중치 모형을 적용할 수 있다는 상이점이 있다(Table 2). 6개의 가중치 모형은 Normal Impact, Severe Impact, Seepage, Karst, Fissured 및 Nitrates 가중치이며, 주로 낮은 지형의 경우 경작의 유무에 따라 Normal Impact 와 Severe Impact 가중치로 분류된다. 또한 침출이 일어나는 지역(Seepage 가중치), Karst가 분포하는 지역(Karst 가중치), 매우 큰 균열이 있는 경암(Fissured 가중치), 질산염비료에 의한 오염이 의심되는 지역(Nitrates 가중치)으로 분류하여 적용가능하다(Civita and De Maio, 2004). 이는 기존 취약성 평가 모델의 광범위한 적용 시 나타날 수 있는 다수의 수리지질학적 매질에 의한 상대적 평가의

Table 1. Vulnerability degrees of DRASTIC index (Aller et al., 1987)

Feature	General Weight	Agricultural Weight
Depth to Water	5	5
Net Recharge	4	4
Aquifer Media	3	3
Soil Media	2	5
Topography	1	3
Impact of the Vadose Zone	5	4
Hydraulic Conductivity	3	2

Table 2. Strings of multiplier weights given for SINTACS assessment (Civita and De Maio, 2004)

Parameter	Normal I.	Severe I.	Seepage	Karst	Fissured	Nitrates
S (Depth to Water)	5	5	4	2	3	5
I (Net Recharge)	4	5	4	5	3	5
N (Impact of the Vadose Zone)	5	4	4	1	3	4
T (Soil Media)	3	5	2	3	4	5
A (Aquifer Media)	3	3	5	5	4	2
C (Hydraulic Conductivity)	3	2	5	5	5	2
S (Topography)	3	2	2	5	4	3

복잡성 문제점을 보완하기 위한 것이다. 위에서 언급된 두 모델의 점수와 가중치 선정방법의 차이에 따른 취약성 평가 결과의 비교를 위하여 동일한 연구지역에 두 모델을 적용하고 분석하였다.

2.2. 연구지역

본 연구지역은 충청남도 부여군 부여읍 일대로 15.52 km² 면적의 소유역이다(Fig. 1). 연구지역이 포함된 금강유역은 연간 지하수 개발가능량의 9.5%를 차지하고 있다. 연구지역의 지질은 상하부로 크게 충적 및 파쇄암반 대수층으로 대별되며, 선캠브리아기 화강편마암이 최하부층을 이루고 있다. 그 상부를 백악기 흑운모화강암, 각섬석화강암이 덮고 있으며, 최상부는 제 4기 충적층이 피복하고 있다. 따라서 연구지역의 대수층을 충적 및 파쇄암반대수층으로 대별된다. 연구지역의 동측은 산계 발달이 미약한 구

릉지대(최고 해발고도 약 230 m)가 분포하고 있으며 서측에는 남동쪽으로 백마강이 흐르고 있다.

2.3. 모델 입력인자 개발

지하수위 심도는 지표면에서 지하수면까지의 깊이를 뜻하며, 지하수위 심도가 깊을수록 오염물질이 비포화대를 통과하는 시간이 길어지게 되고 이러한 과정에서 대기에 의한 산화작용, 토양의 자연정화능력에 의해 오염물질이 대수층까지 도달 가능성이 낮아지므로 취약성 점수를 낮게 부여한다. 지하수위인자는 DRASTIC모델뿐만 아니라 SINTACS모델에서도 가장 높은 가중치를 갖는 인자 중 하나로, 전체 결과에 큰 영향을 끼친다. 반면, 일반적으로 지하수위 심도에 대한 자료의 획득은 지표조사가 불가능한 지형적 특성으로 관측공설치가 가능한 위치에서만 실측값을 얻을 수 있는 한계를 가진다(이현주 외, 2008). 이러

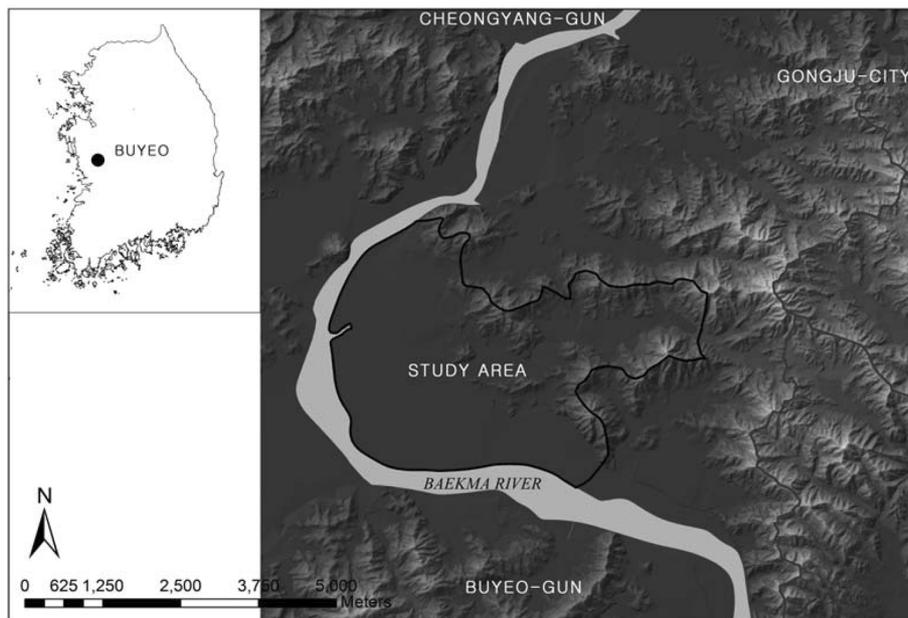


Fig. 1. Location of study area.

한 원인으로 본 연구에서는 지하수위 분포양상 모사를 위해 미국지질조사소(USGS)에서 개발된 수치모델인 MODFLOW(McDonald and Harbaugh, 1988)를 이용하여 지하수위 분포양상을 추정하였으며 모사 결과에 따라 지하수 심도 등급도를 작성하였다(Figs. 2(a) and 3(a)).

함양량은 전체 강우량 중 대수층으로 침투하는 물의 양을 뜻하며, 직접적인 오염물질의 이동과 희석에 영향을 주는 인자이다. 본 연구에서는 함양량 산정에 가장 보편적으로 이용되는 방법 중 하나인 물수지 방법을 적용하였다. 연평균강수량은 30년 평균값(1971년~2000년)을 사용하였으며, 증발산량 산정법으로는 ET-Turc equation(Turc,

1961), 직접유출량 산정법으로 SCS-CN법, 기저유출량은 30년 평균값(1972년~2001년)을 이용하여 함양량 등급도를 작성하였다(Fig. 2(b), Fig. 3(b)). 대수층의 특성은 오염물질의 분산, 희석, 흡착, 암석과 오염물질 사이의 화학적 반응에 영향을 주는 인자이다. 본 연구 지역의 일부 충적층의 비포화대와 대수층은 토양으로 구성되며 비포화대와 대수층 매질의 등급도 작성에 이러한 특성이 고려되었다(Fig. 2(c), Fig. 3(c)).

토양/표토는 비포화대의 최상부에 해당하는 층이며, 토양 매질의 특성(입자의 크기, 투수성 등)은 지표 오염물질의 수직이동에 영향을 주는 인자이다. 연구지역의 토양은

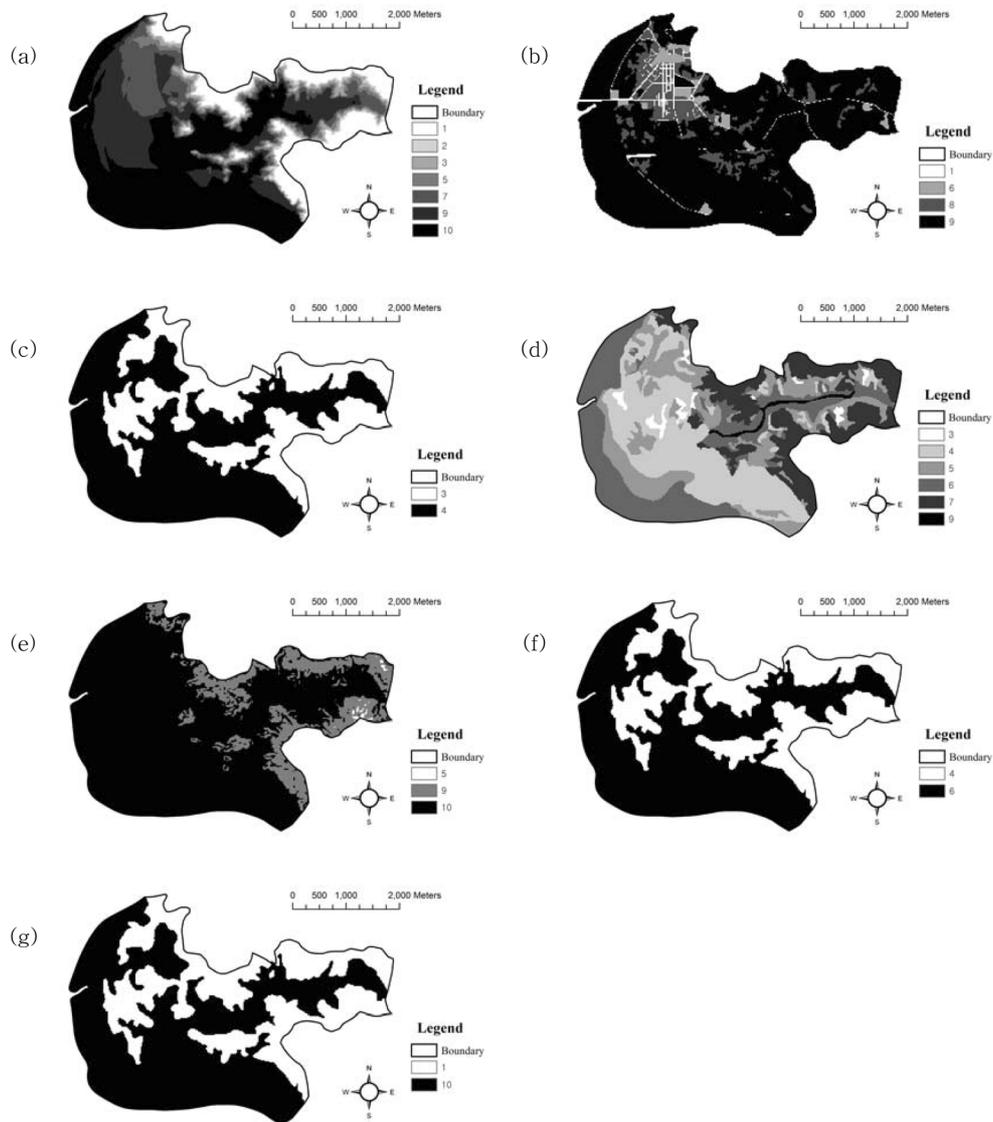


Fig. 2. Rating maps of DRASTIC in the study area (a: depth to water based on groundwater modeling, b: net recharge, c: aquifer media, d: soil media, e: topography, f: impact of the vadose zone, g: hydraulic conductivity).

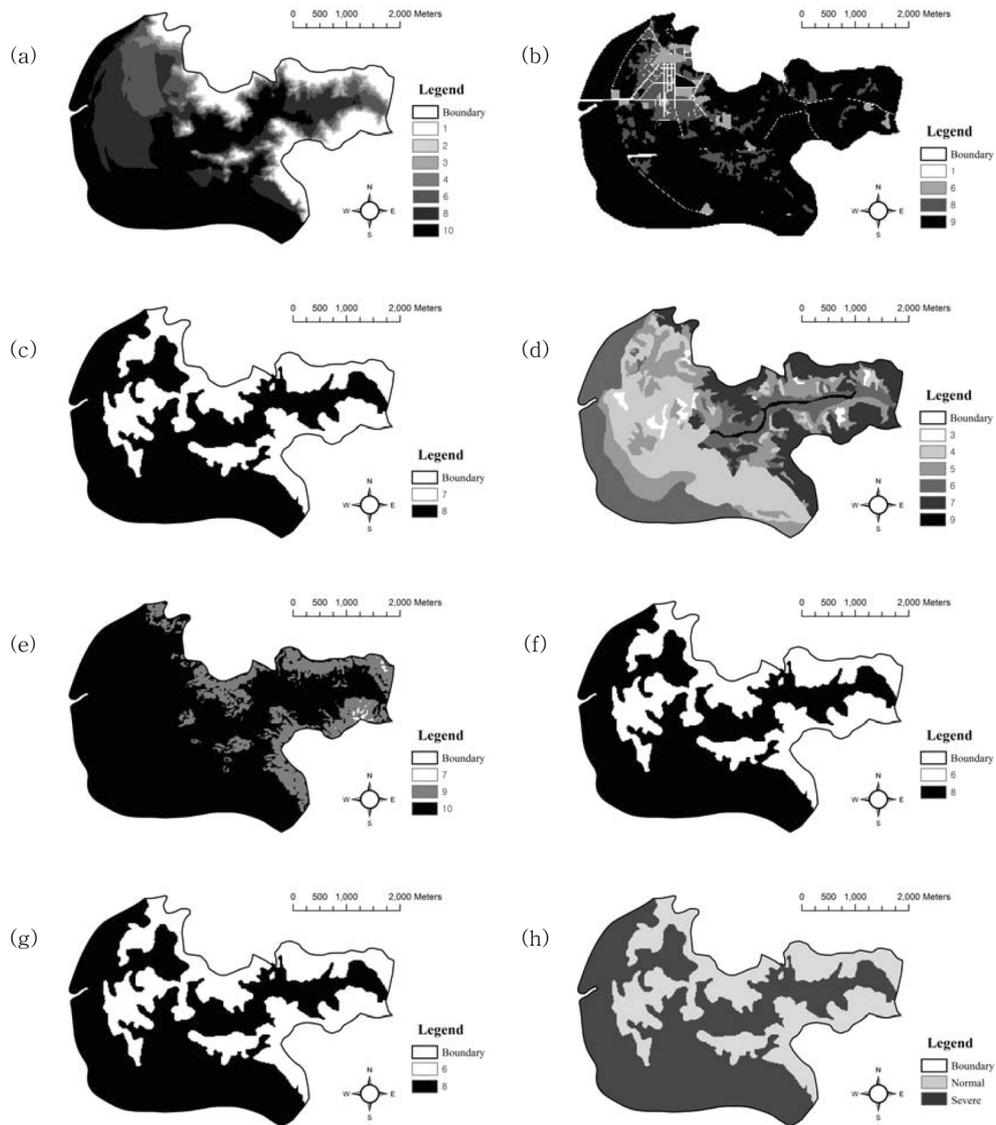


Fig. 3. Rating maps of SINTACS in the study area (a: depth to water using groundwater modeling, b: net recharge, c: aquifer media, d: soil media, e: topography, f: impact of the vadose zone, g: hydraulic conductivity, h: weight scheme).

대부분 사질(sand) 내지 사양질(sandy loam)의 하상퇴적물로 구성되어 있다(Fig. 2(d), Fig. 3(d)). 지형경사는 오염물질의 지표유출에 영향을 주는 인자이다. 연구지역의 DEM을 이용하여 경사율을 산정하였으며, 본연구지역의 경우 산지의 일부지역을 제외한 모든 지역이 비교적 낮은 지형구배를 가지므로 취약성이 가장 높은 등급에 해당하는 것으로 분석되었다(Fig. 2(e), Fig. 3(e)). 비포화대는 수리지화학적 특성(광물성분, 입자크기, 카르스트 발달 등)에 의해 비포화대의 회석 능력에 영향을 받는다. 본 연구지역의 비포화대 매질은 하천 주변의 충적층과 흑운모 화강암, 각섬석 화강암으로 구성되어 있다(Fig. 2(f), Fig.

3(f)). 수리전도도는 포화대 내에서 지하수의 유동능력을 의미하며 오염물질의 수평거동에 영향을 주는 인자이다. 본 연구에서는 흑운모 화강암과 각섬석 화강암, 충적층의 대표수리전도도를 이용하여 대수층의 수리전도도 등급도를 작성하였다(Fig. 2(g), Fig. 3(g)).

3. 결과 및 고찰

3.1. DRASTIC과 SINTACS모델의 인자 등급

DRASTIC모델과 SINTACS모델에서 제시한 등급과 가중치를 각각 적용하여 연구지역의 7가지 인자를 분류하였

다. 지하수위심도 인자는 수치모사를 이용하여 얻은 지하수위와 지형고도의 차를 통하여 계산되었고 등급의 분포는 1부터 10까지 매우 넓게 나타났다. DRASTIC의 경우(Fig. 2(a)) 7, 9 및 10등급이 전체의 약 76%를 차지하였고 SINTACS의 경우(Fig. 3(a)) 6, 8 및 10등급이 전체의 약 75%를 차지하였다. 이는 연구지역이 충적층과 낮은 구릉지로 구성되어 상대적으로 낮은 지하수위심도를 갖기 때문인 것으로 판단된다. 함양량은 1부터 9까지 넓은 분포를 보이지만, 도로나 시가지 일부를 제외한 대부분의 지역이 7 및 8등급으로 전체 연구지역의 약 94%를 차지하며 두 모델에서 동일하게 나타났다(Fig. 2(b), Fig. 3(b)). 이는 연구지역에서 충적층의 함양량이 높게 산정되었기 때문인 것으로 판단된다. 또한 DRASTIC의 경우 대수층의 대부분 화성암, 변성암과 충적층으로 분류되어 3 및 4 등급을 갖고 SINTACS의 경우 7 및 8 등급을 갖는다(Fig. 2(c), Fig. 3(c)). 토양층은 두 모델이 공통적으로 3부터 9까지 넓은 등급분포를 보이며, 4, 5 및 6등급이 전체지역의 78%로 많은 비중을 차지한다(Fig. 2(d), Fig. 3(d)).

지형경사는 연구지역이 낮은 구릉지역으로 DRASTIC의 경우 연구지역의 특성상 일부 구릉지역을 제외한 대부분의 지역이 10 등급을 갖고 이는 전체지역의 85%를 차지하는 것으로 나타났다(Fig. 2(e)). SINTACS의 경우 지형경사는 대부분의 지역이 9 및 10등급을 갖고 이는 전체지역의 99%를 차지하는 것으로 나타났다(Fig. 3(e)). DRASTIC의 경우 비포화대가 화성암, 변성암, 충적층으로 분류되어 4 및 6등급을 갖고 SINTACS의 경우 6 및 8 등급을 갖는다(Fig. 2(f), Fig. 3(f)). 수리전도도는 대수층의 구성물질에 따라 대표 수리전도도 값을 이용하여 분류하였다(Fig. 2(g), Fig. 3(g)). 이렇게 얻어진 7개의 맵을 각 인자에 부여된 가중치를 적용하였고 SINTACS의 경우 가중치를 추가적으로 고려하였다. 낮은 지형의 경우 Normal과 Severe 가중치로 구분하며 경작이 이루어지지 않는 지역을 Normal 가중치, 경작이 이루어지는 지역을

Severe 가중치로 구분한다. 본 연구지역은 충적층과 구릉지역을 각각 Table 2의 Severe 가중치와 Normal 가중치로 구분하여 적용하였다(Fig. 3(h); Table 2).

3.2. 지하수오염취약성 평가 분석

본 연구에서는 DRASTIC과 SINTACS Index 맵의 정량적인 비교 분석을 위하여 기존에 4등급으로 분류된 DRASTIC Index와 기존에 6등급으로 분류된 SINTACS Index를 동일한 간격으로 구분하여 4개의 등급으로 재분류하였다(Fig. 4). 등급이 높을수록 지하수가 오염에 취약하다는 것을 의미한다. 두 Index 맵의 분석을 통해 공통적으로 백마강 일대의 충적층이 분포하는 지역이 가장 높은 등급을 나타내었고, 산지지역과 일부 도로를 포함한 시가지와 공장일대는 상대적으로 낮은 등급을 나타냄을 알 수 있다. 전체 연구지역의 1~4등급별 비율(Table 3)은 DRASTIC의 경우 각각 0.75%, 26.58%, 13.45% 및 59.23%의 비율을 보이며 2등급과 4등급이 가장 높은 비율을 차지하고 있음을 알 수 있다. SINTACS의 경우 각각 1.77%, 9.29%, 41.02% 및 47.92%의 비율을 보이며 3등급과 4등급의 비율이 가장 높다. 본 연구에서는 3 및 4등급을 지하수오염취약지역으로 보고 연구지역 내에서 오염취약지역이 차지하는 비율을 비교하였다. DRASTIC의 경우 오염취약지역이 전체 지역의 약 73%로 나타나는 반면, SINTACS의 경우는 약 89%로 나타났다. 즉, 상대적으로 SINTACS 모델을 적용시켰을 때 취약성이 더 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Table 3. The vulnerability class identified from DRASTIC and SINTACS

Vulnerability class		DRASTIC(%)	SINTACS(%)
Low	1	0.75	1.77
	2	26.58	9.29
High	3	13.45	41.02
	4	59.23	47.92

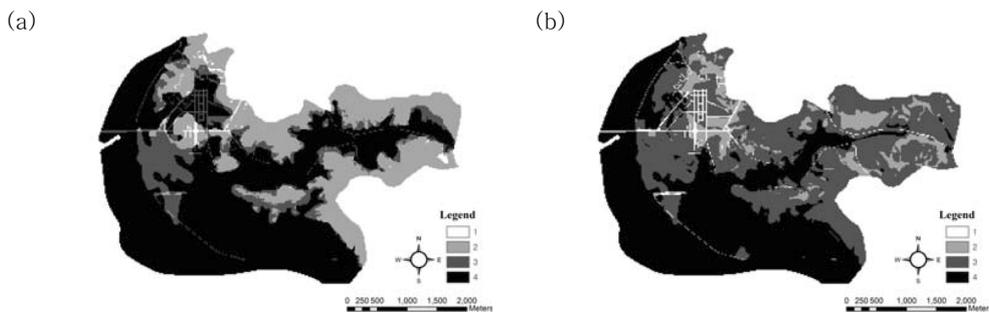


Fig. 4. Vulnerability index maps (a: DRASTIC, b: SINTACS).

이러한 연구결과의 상이점이 가중치적용방법과 어떠한 관련이 있는지 파악하기 위해 두 맵을 층적 및 산지지역으로 분류하여 오염취약지역의 비율을 비교하였다. 그 결과 DRASTIC 맵에서는 오염취약지역의 94.5%가 층적층 지역에 분포하며 SINTACS 맵에서는 오염취약지역의 68.4%가 층적층 지역에 분포한다. 즉, SINTACS Index 맵에서는 DRASTIC Index 맵과 비교했을 때 산지지역이 비교적 높은 취약성을 보임을 알 수 있으며, DRASTIC 모델을 적용했을 때 오염취약지역이 층적층으로 매우 편중되는 경향을 보인다. 이러한 결과는 DRASTIC 모델이 전체 지역에 동일한 가중치를 적용함으로써 지역의 수리지질학적 영향이 가중되어 산지지역이 층적층에 비해 상대적으로 취약성이 매우 낮게 측정된 것으로 판단된다. 반면, SINTACS의 경우 연구지역의 수리지질학적 특성에 따라 서로 다른 가중치 모형으로 구분하여 적용함으로써 지역특성에 따른 취약성의 편중이 완화된 것으로 판단된다. 이러한 차이점은 DRASTIC 모델의 암반대수층 취약성이 상대적으로 과소평가될 수 있다는 기존의 연구 결과와 부합되며 지역적 특성을 고려한 가중치를 구분하여 적용한 SINTACS의 특성이 반영된 결과이다.

4. 결 론

국내에서는 지하수오염취약성 평가를 위한 다양한 방법이 가용함에도 불구하고 DRASTIC 모델을 제외한 나머지 방법론에 대해 연구 및 적용된 사례가 거의 없어 DRASTIC 모델을 통한 예측결과의 신뢰성을 확보할 수 있는 방안이 없었다. 그러므로 본 연구에서는 7가지 동일한 수리인자를 고려한 DRASTIC 모델과 SINTACS 모델의 차이점을 비교분석하고 SINTACS 모델의 국내적용성에 대해 검토하였다. 연구결과 SINTACS 모델을 적용시켰을 때 전체지역의 취약성이 상대적으로 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 이것은 SINTACS 모델을 적용했을 때 연구지역의 수리지질학적 특성에 따라 서로 다른 가중치 모형으로 구분하여 적용함으로써 지역특성에 따른 취약성의 편중이 완화되었기 때문인 것으로 판단된다. 특히 대수층의 많은 부분이 암반대수층으로 이루어진 국내 환경의 특성 때문에 DRASTIC 모델을 적용으로 취약성이 과소평가될 수 있는 우려가 있어 SINTACS 모델을 이용하는 것이 이러한 문제점 해결에 보다 합리적인 대안이 될 수 있을 것으로 판단되며 전반적인 지역특성이 포괄적으로 고려될 수 있을 것으로 판단된다.

반면, 연구지역을 구분하여 다른 가중치를 적용할 경우

여전히 분석자의 주관에 개입될 가능성이 있기 때문에 이러한 과정에 객관성 확보가 이루어져야 하며 범위로 제시된 인자의 점수 선정에 있어서 정량적 기준이 뚜렷이 제시되지 않았다는 단점이 있다. 현재의 연구를 통해 어느 일개모델의 우수성을 단정하기에는 현실적인 자료가 미비한 상황이다. 그러나 두 가지 대표적 모델의 상호 비교를 통해 예측에 대한 신뢰성이 재고될 수 있을 것으로 판단되며 향후 상호 대별되는 대수층 매질로 구성된 지역의 지하수오염취약성 평가에 있어 두 모델의 비교 적용이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 건설교통부, 2002, 지하수관리 기본계획, p. 95.
- 기상청, 1972-2001, 부여 기상연보, <http://www.kma.go.kr/>.
- 김규범, 2008, 지하수 오염취약성 평가 기법 동향과 국내 적용성 고찰, *지하수토양환경*, 13(6), 1-16.
- 농림부, 2000, 농어촌 지역 지하수 자원의 오염 예측도 작성 기법에 관한 연구, p. 27.
- 이사로, 김윤중, 1996, DRASTIC SYSTEM을 이용한 지하수 오염 가능성 및 위험 분석 연구, *한국GIS*, 4(1), 1-11.
- 이현주, 박은규, 김강주, 박기훈, 2008, DRASTIC 모델 및 지하수 수치지모사 연계 적용에 의한 부여읍 일대의 지하수 오염취약성 평가, *지하수토양환경*, 13(1), 77-91.
- 조시범, 민경덕, 우남철, 이사로, 1999, GIS를 이용한 경기도 평택군 지역의 지하수 오염 가능성 평가 연구, *지하수토양환경*, 6(2), 87-94.
- 조시범, 손호용, 2004, 지하수 오염 예측을 위한 GIS 활용 연구, *지구물리*, 7(2), 121-134.
- 한국수자원공사, 2002, 금강권역 광역 지하수 조사, p. 257.
- 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, p.455.
- Civita, M., 1994, *Le carte della vulnerabilita' degli acquiferi all'inquinamento: Teoria & pratica*, Pitagora Editrice, Bologna, p. 325.
- Civita, M. and De Maio, M., 1997, SINTACS: un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilita degli acquiferi all'inquinamento: metodologia e automatizzazione [SINTACS: a parametric system for the assessment and mapping of the groundwater vulnerability to contamination: methodology and automation], *Pitagora Editrice*, Bologna, 60, p. 208.
- Civita, M. and De Maio, M., 2004, Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: The Italian "com-

bined" approach, *Geof' sica International*, **43**(4), 513-532.

Civita, M. and De Regibus, C., 1995, Sperimentazione di alcune metodologie per la valutazione della vulnerabilita degli acquiferi, *Pitagora Editrice*, Bologna, **3**, 63-71.

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, 117-123.

McDonald, M.G., and Harbaugh, A.W., 1988, *A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater flow model*, U.S. Geological Survey, p. 586.

National Research Council, 1993, Ground water vulnerability assessment: Predicting relative contamination potential under

conditions of uncertainty, *National Academy Press*, Washington, DC, p. 42-63.

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. Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, *Proceedings and Information*, **38**, p. 69-86.

Gogu, R.C. and Dassargues, A., 2000, Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods, *Environmental Geology*, **39**(6), 549-559.

Turc, L., 1961, Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: A simple climatic formula evolved up to date, *Ann. Agron.*, **12**, 13-49.