

DRASTIC 모델 및 지하수 수치모사 연계 적용에 의한 부여읍 일대의 지하수 오염 취약성 평가

이현주¹ · 박은규^{1*} · 김강주² · 박기훈²

¹경북대학교 지질학과, ²군산대학교 토목환경공학부

A Joint Application of DRASTIC and Numerical Groundwater Flow Model for The Assessment of Groundwater Vulnerability of Buyeo-Eup Area

Hyunju Lee¹ · Eungyu Park^{1*} · Kangjoo Kim² · Ki-hoon Park²

¹Dept. of Geology, Kyungpook National University

²School of Civil and Environmental Engineering, Kunsan National University

ABSTRACT

In this study, we developed a technique of applying DRASTIC, which is the most widely used tool for estimation of groundwater vulnerability to the aqueous phase contaminant infiltrated from the surface, and a groundwater flow model jointly to assess groundwater contamination potential. The developed technique is then applied to Buyeo-eup area in Buyeo-gun, Chungcheongnam-do, Korea. The input thematic data of a depth to water required in DRASTIC model is known to be the most sensitive to the output while only a few observations at a few time schedules are generally available. To overcome this practical shortcoming, both steady-state and transient groundwater level distributions are simulated using a finite difference numerical model, MODFLOW. In the application for the assessment of groundwater vulnerability, it is found that the vulnerability results from the numerical simulation of a groundwater level is much more practical compared to cokriging methods. Those advantages are, first, the results from the simulation enable a practitioner to see the temporally comprehensive vulnerabilities. The second merit of the technique is that the method considers wide variety of engaging data such as field-observed hydrogeologic parameters as well as geographic relief. The depth to water generated through geostatistical methods in the conventional method is unable to incorporate temporally variable data, that is, the seasonal variation of a recharge rate. As a result, we found that the vulnerability out of both the geostatistical method and the steady-state groundwater flow simulation are in similar patterns. By applying the transient simulation results to DRASTIC model, we also found that the vulnerability shows sharp seasonal variation due to the change of groundwater recharge. The change of the vulnerability is found to be most peculiar during summer with the highest recharge rate and winter with the lowest. Our research indicates that numerical modeling can be a useful tool for temporal as well as spatial interpolation of the depth to water when the number of the observed data is inadequate for the vulnerability assessments through the conventional techniques.

Key words : Depth to water, Numerical simulation, Groundwater vulnerability, DRASTIC, MODFLOW

요 약 문

본 연구에서는 지하수 오염 취약성 평가 방법 중 가장 활용도가 높은 DRASTIC 기법 및 지하수 수치모사 기법을 병행하여 충청남도 부여군 부여읍 일대의 지하수 오염 취약성 변화를 평가하였다. 특히, DRASTIC 기법에서 사용되는 7가지 수리인자들 중 취약성에 대한 민감도가 상대적으로 높고 비교적 장기간 자료의 획득이 용이하지 않은 '지하수위(depth to water)' 인자에 대하여 수치모사 기법을 적용하여 시-자료에 대한 동적 보간을 실시하였으며, 이를

*Corresponding author : egpark@knu.ac.kr

원고접수일 : 2008. 1. 4 게재승인일 : 2008. 2. 20

질의 및 토의 : 2008. 4. 30 까지

통하여 시간에 따른 지하수위 변화가 지하수 오염 취약성에 미치는 영향을 검토하였다. 연구의 대상 지역은 부여군 부여읍 일대로 층적 대수층을 대상으로 기 실시된 지하수 수위자료를 보정대상으로 하였으며 연구지역의 지하수위 분포양상을 모사하기 위하여 유한차분모델인 MODFLOW를 이용하였다. 지하수 수치모사에는 정류 및 부정류 모사가 모두 실시되었다. 그 결과 기존 지구통계기법을 통한 지하수위 보간에서 가장 큰 가중치를 갖는 지형적 요인뿐만 아니라 유역 암상이나 지질특성 등과 같은 제반 수리지질학적 요인까지 복합적으로 반영하는 지하수위 자료를 얻을 수 있었다. 기존 연구에서 수위자료를 보완할 때 주로 이용되는 기법인 크리깅은 수치모사와는 달리 강우나 계절적 영향, 암상이나 지질특성 등과 같은 요인들은 반영하지 못한다. 또한 수치모사를 통하여 얻어진 수위자료는 부정류 모사가 가능함으로 인하여 풍수기와 갈수기 그리고 평수기의 지하수위 변화 등도 파악할 수 있다는 장점이 있다. 모사를 통하여 얻어진 지하수위 자료와 공동크리깅 방법을 통해 얻어진 지하수위 자료를 입력자료로 하여 연구지역에 지하수 오염 취약성을 비교 평가한 결과 평수기의 경우 유사한 경향의 지하수 오염 취약성을 보였다. 또한 공동크리깅을 통해 분석이 어려운 분기별 지하수 오염 취약성 평가 결과 강우량이 많은 여름철을 포함한 분기와 강우량이 가장 적은 겨울철을 포함한 분기가 뚜렷한 취약성 차이를 보이는 것으로 분석되었다. 본 연구에서 제시하는 바와 같이 지하수 오염 취약성 평가에 있어 가장 큰 민감도를 갖는 수위자료의 수가 공간적 혹은 시간적으로 부족한 경우 수치모사 적용을 통해 자료의 한계성을 보완할 수 있으며 시간적인 보간이 이루어질 수 있어 유용할 수 있을 것이라 판단된다.

주제어 : 지하수위 분포, 지하수 수치 모사, 지하수 오염취약성, DRASTIC, MODFLOW

1. 서 론

우리나라의 지하수 개발 및 이용량은 1994년 이후 꾸준히 증가하여 2001년 기준 연간 이용량이 총 31억 m³에 달한다(건설교통부 지하수관리 기본계획, 2002). 최근 들어 다양한 차원의 오염 방지대책이 수립 또는 제시되고 있으나 꾸준히 증가하고 있는 지하수의 개발과 이용에 비교하여 볼 때 지하수 보존과 관리에 대한 노력은 여전히 미비한 실정으로 파악되고 있다. 보다 포괄적인 지하수 오염방지 대책을 위하여서는 이미 오염에 노출된 지하수를 원상복구 하고자 하는 노력과 함께 사전에 지하수오염 가능성을 예측하고 오염 유발 인자를 제어하는 예방적 노력이 병행되어야 한다. 이러한 사전예방 노력을 위하여서는 지하수 오염 취약성의 개념이 도입될 필요가 있다. 지하수 오염 취약성이란 오염물질이 대수층 최상부 지하수면에 도달하는 경향 혹은 가능성을 의미한다(NRC, 1993).

지하수 오염 취약성을 평가하는 방법에는 지표저류시설 평가(EPA, 1983)와 매립지 오염가능성 평가(한정상, 1999)와 같이 폐수저류시설, 정화조와 액상저류시설, 매립지와 같은 시설의 부지선정에 주로 적용되는 방법들과 농업지역에서 사용되며 농약을 주요인자로 갖는 농약지수(Rao et al., 1985)와 지하수 오염물질에 일반적으로 영향을 끼치는 수리지질학적 인자를 바탕으로 하는 DRASTIC 지수(Aller et al., 1987) 등 여러 가지가 있다. 우리나라의 경우 일반적으로 DRASTIC 지수를 이용하여 지하수 오염 취약성을 평가하고 있으나 평가자의 주관에 따라 등급과 인자가 작위적일 수 있어 다양한 수정 DRASTIC

모델이 난립하고 있는 실정이다(민경덕 외, 1996; 조시범 외, 1999; 이용두, 송희경, 2006).

DRASTIC 모델은 지하수 침투와 함양에 관계되는 7가지 인자를 범위별 등급과 인자의 민감도에 따라 서로 다른 가중치를 부과하여 지하수 오염 취약성을 평가하는 기법이며 이 중 가장 높은 가중치를 가지는 인자는 '지하수위 심도'와 '비포화대 매질'이다(Insaf et al., 2005). 그러나 지하수위 심도는 수위측정이 이루어진 특정 시기 및 지점의 자료만을 대표하며 이를 기반으로 평가지역 전체를 추정하는데 있어서 다소간의 불확실성을 내재한다. 따라서 시공간적으로 광범위한 수위 측정은 적절한 오염 취약성 평가를 위하여 필수적이나 다양한 제약에 의하여 현실적으로 어려운 것이 사실이다. 이러한 제한성을 극복하기 위하여 일반적으로 사용되고 있는 방법은 회귀분석법 또는 크리깅과 같은 지구통계학적인 방법이다(이사로, 김윤중, 1996). 이러한 방법들은 일반적인 지하수위가 지형고도의 추세를 반영한다는 기본 가정에 기초하나 제한적인 수위자료와 지형도로부터 추출된 고도만을 고려하고 있으므로 정확한 지하수위를 반영한다고 보기는 어렵다. 따라서 측정된 수위자료가 부족하거나 일부지역에 편중되어 있는 일반적인 경우 지형고도에 의한 영향이 과다할 수 있으며 크리깅 분산 역시 매우 큰 수치로 나타날 수 있어 수위자료를 적절하게 추정하기 어렵다.

본 연구의 목적은 기존 지하수 오염 취약성 평가에 있어 일반적으로 가장 큰 상대 민감도를 가지는 '지하수위 심도' 추정에서 나타날 수 있는 불확실성을 완화하고 오염 취약성의 시간적인 변화를 분석하는 것이다. 이를 위

하여 기존 DRASTIC 모델과 지형인자 이외의 다양한 수리지질학적 요인을 고려하는 지하수 수치모사 기법이 이용되었으며 공동크리깅을 이용한 지하수 오염 취약성과 상호 비교하였다. 또한 부정류 지하수 수치모사를 이용하여 시간적인 내삽을 실시하고 그 결과를 토대로 분기별 지하수 오염 취약성을 작성하여 계절적 변화에 따른 지하수 오염 취약성의 변화를 분석하였다.

2. 연구지역 및 유역의 설정

본 연구지역은 충청남도 부여군 부여읍 일대로써 기암리, 구교리, 구아리, 군수리, 능산리, 동남리, 중정리, 왕포리, 염창리, 현북리를 포함하는 24.28 km²의 지역이다(Fig.

1). 연구지역이 포함된 충남에는 229천 개의 지하수 개발이용시설이 있으며 이는 우리나라 전체 지하수 이용 시설의 21.2%에 해당한다(건설교통부 지하수관리 기본계획, 2002). 따라서 본 연구지역은 지하수의 개발 및 이용이 매우 활발하게 이루어지고 있어 지하수 오염 방지대책 마련이 시급하다.

연구지역의 동측은 산계 발달이 미약한 전형적인 구릉 지대가 분포하고 있으며 서측에는 남동쪽으로 금강 본류인 백마강이 흐르고 있다. 연구지역 내에는 백마강의 지류인 왕포천과 염창천이 동-서로 흐르고 있다. 따라서 연구지역의 동측 구릉지대에서는 주로 지하수의 함양이, 서측 백마강 인근에서는 지하수의 배출이 이루어지고 있으며 전반적인 지하수의 흐름은 E-W 방향인 것으로 판단된다.

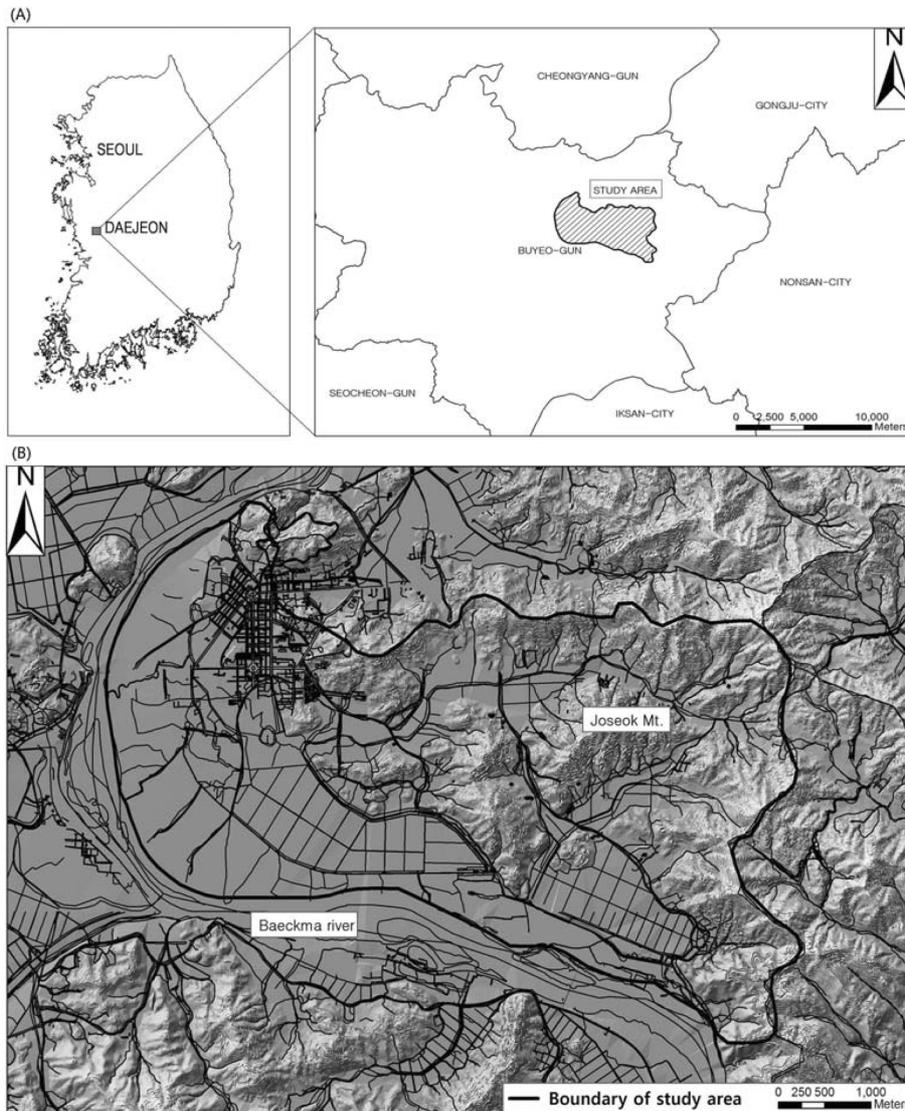


Fig. 1. Location of study area (a) and the topographic relief (b).

연구지역의 지질은 대체로 선캠브리안 화강편마암을 최하부층으로 하여 백악기 흑운모화강암, 각섬석화강암이 기반암으로 분포하며 제 4기 충적층이 연구지역 최상부 34%를 피복하고 있다. 따라서 연구지역의 대수층을 상하부로 크게 충적 및 파쇄암반 대수층으로 나눌 수 있다.

3. 연구방법

지하수 오염 취약성 평가를 위한 DRASTIC 모델(Aller et al., 1987)은 미국 환경청과 미국 지하수협회에 의해 개발되어 현재까지 널리 이용되고 있다. DRASTIC 모델은 지표로부터 유입되는 동일한 양의 오염물질에 대한 지하수의 상대적인 오염 가능 정도를 평가의 척도로 삼으며 지하수 오염 취약성을 평가하는 요소로 지하수위, 함양량, 대수층 매질, 토양 매질, 지형 경사, 비포화대 매질, 수리전도도의 7가지 수리인자를 이용한다. 각각의 인자는 범위 별 등급(rating)과 가중치(weight)의 곱으로 표현되며 이러한 인자들을 선형 누적한 DRASTIC 지수에 대하여 정도에 따라 표준화된 범위와 등급이 존재한다. 이를 수식으로 표현하면 DRASTIC 지수는 다음의 Eq (1)과 같이 각각의 인자에 해당하는 등급과 가중치를 곱한 값들의 합과 같으며 이를 통해 유역 내 분포하는 지하수의 상대적인 취약성 정도를 평가할 수 있다. 실제, Eq (1)에서 제시하는 바와 같이 지하수위 심도 및 지하수 함양은 여타 인자와는 달리 계절적으로 변화하며 이러한 변화는 기존 연구에 있어 고려되지 않았으나 본 연구에서는 이러한 변화를 고려한 DI 분포의 시간적 변화도 작성이 최종 목표이다.

$$DI(t) = D_r(t)D_w + R_r(t)R_w + A_rA_w + S_rS_w + T_rT_w + I_rI_w + C_rC_w \quad (1)$$

DI : DRASTIC INDEX

D : Depth to water

R : Net recharge

A : Aquifer media

S : Soil media

T : Topography (slope)

I : Impact of vadose zone

C : Hydraulic conductivity

r : Rating

w : Weight

t : Time

이 모델의 기본적 가정은 지하수 오염 물질은 지표로부터

터 기원하며 물과 같은 유동성을 가지고 강우에 의해 지하로 유입되며 평가지역은 0.4 km² 이상이라는 것이다(Aller et al., 1987). 앞서 언급한 7가지의 수리인자들을 선형으로 중첩시켜 얻은 공간적 분포인 DI 분포도를 통해 지하수 오염 취약성을 평가하는 기본모델 이외에도 선구조 밀도를 추가인자로 이용하거나(민경덕 외, 1996) 토지이용을 추가한 경우(조시범 외, 1999) 등 평가자의 주관에 따라 수정된 다양한 DRASTIC 모델이 존재한다. 이처럼 인자별 등급을 부여하는 과정에 있어 평가자의 주관 이 개입되는 것은 DRASTIC 모델이 비교적 수정이 용이한 선형모델이라는 점에 기인한다. 이는 DRASTIC 모델의 장점이 될 수 있으나 수리인자들 간의 상호 독립성이 보증되지 않았을 경우에는 특정 인자에 대한 가중치가 중첩되는 효과가 있을 수 있다.

3.1. 기존 DRASTIC 모델

DRASTIC 기본모델은 1987년 개발 이후 전 세계적으로 가장 보편적으로 이용하고 있는 지하수 오염 취약성 평가방법 중 하나이다. 일반적인 DRASTIC 모델에 이용되는 7가지 인자들은 모두 지표에서 기원한 지하수 오염 물질이 지하로 유입하는데 영향을 끼치는 것으로 영향을 미치는 정도에 따라 각각 다른 가중치를 갖는다. 이 중 '지하수위 심도'는 가장 높은 5점의 가중치를 가지며 전체 결과의 민감도에 가장 큰 영향을 끼친다. 또한 지하수위 심도는 다른 6가지 인자들과는 달리 계절적으로 변화하는 특성을 갖는다. 일반적으로 지표조사가 불가능한 자료의 특성상 수 개소의 관측공이 위치한 곳에서만 실측값을 얻을 수 있으므로 이에 근거한 2차원 수위분포 내삽은 많은 불확실성을 내포한다. 기존 지하수위 자료의 내삽에 이용되는 방법으로는 관측된 공에 대한 자료를 기반으로 지형고도와 지하수위의 관계를 회귀분석에 의해 추정하는 방법(이사로, 김윤중, 1996)과 지형고도와 지하수위자료를 이용하여 공동크리깅(Deutsch and Journel, 1992) 기법으로 추정하는 방법 등이 있다. 이 중 공동크리깅 기법을 이용하여 부족한 수위자료를 보완하는 방법은 현재 가장 널리 이용되고 있는 방법이다(한국수자원공사, 2002; 한국수자원공사, 2003; 한국수자원공사, 2005). 지하수위 내삽을 위하여 시행되는 공동크리깅 기법은 측정된 수위자료와 지형고도를 바탕으로 하며 일반적으로 지형에 따라 변화하는 지하수위의 특성에 근거하여 부족한 수위자료를 보완하는 방법이다. 따라서 상대적으로 부족한 지하수위 자료를 이용하여 광역적인 범위의 지하수위를 추정할 경우 효과적일 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는

DRASTIC 모델에 일반적으로 많이 이용되는 공동크리깅 기법을 통해 연구지역 내의 수위분포 양상을 추정하고, 이를 수치모사를 통해 추정된 수위분포와 비교분석하였다. 공동크리깅에 필요한 지형고도는 1:5000 수치지도 청양도폭과 한산도폭(국토지리정보원, 2004)으로부터 추출하였으며 수위자료는 금강권역 광역 지하수 조사 연구(한국수자원공사, 2002)를 통해 얻어진 군수리 충적층 일대의 수위 측정 자료를 이용하였다.

3.2. 수치모사를 이용한 DRASTIC 모델

본 연구에서 지하수위 추정을 위하여 이용된 수치모델은 미국지질조사소(USGS)에서 개발된 MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1984)이다. MODFLOW는 지하수 유동 방정식에 근거하여 자유면 및 피압대수층에 대한 3차원 모사를 시행하는 유한차분 모델이다. MODFLOW를 이용한 수치모사의 경우 대상지역의 경계 조건에 따른 지하수 유입유출, 함양, 암질, 지형, 수리전도도 등을 입력자료로 요구하며 실측자료와의 모델 보정을 통하여 실제에 가까운 지하수위의 분포를 추정할 수 있다. 또한 양수에 의한 배출이나 함양에 의한 유입 등 시간에 따라 변화하는 경계조건에 의한 지하수위의 부정류 양상에 관하여서도 예측이 가능하다. 기존의 공동크리깅 기법을 통한 지하수위의 추정기법이 지형과 측정된 수위자료만을 입력자료로 이용하는데 반하여 수치모사는 연구지역의 경계조건이나 수리특성과 같은 다양한 인자들을 함께 고려하므로 관측이 이루어지지 않은 지점에 대하여 보다 신뢰성 있는 추정이 가능하다. 또한 부정류 상태에 대한 수치모사를 통하여 강수량이나 기후의 변화 또는 지하수 이용량 변화 등과 같은 다양한 수리적 조건을 설정하고 지하수위의 변화를 추정 가능하다는 것이 가장 큰 장점일 수 있다. 따라서 지하수 수치모델을 이용할 경우 지하수위에 대한 시공간적인 내삽이 모두 가능하며 이를 DRASTIC 모델에 적용할 경우 지하수 오염 취약성의 계절적 변화 등을 추정할 수 있다는 장점을 갖게 된다.

3.2.1. 개념모델의 구성

수치모사를 수행할 영역은 산지의 지하수 분수령과 하천(백마강)을 경계로 하였으며 북측과 동측의 경우 부소산과 금성산, 오산을 잇는 능선을 불투수 경계로 설정하였으며 서측의 백마강과 백마강 지류인 왕포천 및 염창천을 지하수의 주 배출경계로 설정하였다. 격자망은 농업활동이 활발하게 이루어지고 있는 백마강 인근을 중심으로 하여 10 m로 설정하였고 중심에서 멀어질수록 10%의 증

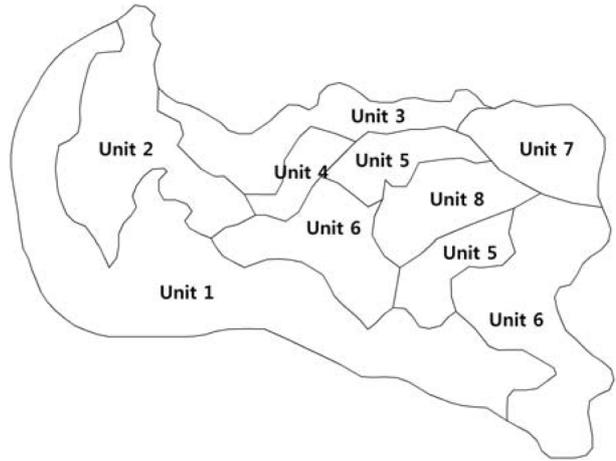


Fig. 2. Distribution of different hydrogeologic units.

Table 1. Hydraulic conductivity of each hydrogeologic unit

Hydrogeologic Unit	Hydraulic conductivity (cm/sec)
unit 1	3.125×10^{-4}
unit 2	2.315×10^{-4}
unit 3	3.472×10^{-5}
unit 4	4.630×10^{-4}
unit 5	3.472×10^{-4}
unit 6	1.157×10^{-4}
unit 7	4.630×10^{-5}
unit 8	4.630×10^{-5}

가를 가지도록 설정하였다. 하천 경계조건 중 하천 수위는 지형 고도를 이용하였고, 하천의 수심과 하천 바닥의 전도도(단위 하천저층 두께 당의 수리전도도와 하천 폭의 곱)은 각각 0.3 m~1.5 m 범위 및 단위하천 길이 당 0.1~1 m²/day로 설정하였다. 지하수 함양률을 산정하기 위하여 SCS-CN 방법을 적용하였으며 이를 통해 0.0007 m/day을 전체 지역에 동일하게 입력하였고 대상지역의 수리전도도는 기존 조사내용이 없으므로 영역 내 지질분포를 바탕으로 8개의 구역으로 분류하고 이를 바탕으로 모델 보정을 통해 결정하였다(Fig. 2).

3.2.2. 모델 보정

모델 보정은 최종적으로 PEST를 활용하여 수행되었다 (Doherty, 2004). PEST는 비선형 파라미터 예측 소프트웨어로서 모델보정 결과의 신뢰성 높이에 도움이 되며 최적화된 수치모사 결과를 얻을 수 있다. 이를 통해 최적화된 대상지역의 수리전도도는 다음의 Table 1과 같다. 모델보정을 통한 수리전도도는 대체로 $4.63 \times 10^{-5} \sim 4.63 \times 10^{-4}$ (cm/sec)의 범위 내에 존재하는 것으로 산정되었다.

Table 2. Recharge rate of each stress period

Stress Period	Recharge rate (m/day)
Stress period 1 (Mar - May)	0.000652
Stress period 2 (Jun - Aug)	0.002444
Stress period 3 (Sep - Nov)	0.000376
Stress period 4 (Dec - Feb)	0.000263

3.2.3. 부정류상태 수치모사

기존의 지하수 오염 취약성 평가는 수위측정이 이루어진 특정 시기에 대해서만 가능하기 때문에 지하수 오염 취약성 평가가 필요한 시점마다 재평가를 해야 한다. 하지만 부정류상태의 수치모사를 이용하면 공간적 분포의 추정뿐만 아니라 시간적인 내삽이 가능함으로 인하여 변화 양상을 추정할 수 있다. 따라서 오염 취약성 평가가 필요한 경우 매번 수위측정을 해야 하는 불편함과 비용을 줄일 수 있다. 본 연구에서는 연구지역 지하수 오염 취약성 정도를 계절별로 분석하기 위하여 부정류상태의 수치모사를 통해 1년간의 수위분포를 각 분기별 강우량을 이용하여 추정하였다. 앞서 실시된 정류상태의 수치모사를 초기수두로 이용하여 계절별 수위변화를 분석하기 위한 분기별 함양량은 Table 2에 제시한 바와 같으며 이는 최근 10년간 평균 강우량과 SCS-CN 방법을 계절단위로 나누어 적용하여 산정한 함양량이다.

3.3. DRASTIC 평가

3.3.1. 지하수위 심도

지하수위 심도(depth to water)는 지표면에서부터 지하수면까지의 깊이로서 이동거리와 이동시간이 길수록 오염물질이 지하수면까지 도달할 확률이 줄어들기 때문에 지표로부터 지하수면이 깊을수록 낮은 침수를 갖는다. 본 연구에서는 수치모사를 이용하여 분석한 지하수위 분포와 기존에 많이 활용되어온 공동크리깅 기법을 이용한 지하수위 분포에 대해 각각 등급을 부여하고 DRASTIC 모델에 의한 지하수위 심도 등급도를 작성하였다(Fig. 6). 본 연구에서는 총 23개의 관정으로부터 지하수위를 획득하였으며 대부분의 지하수 관정은 백마강 주변 충적층에 밀집되어 있다.

3.3.2. 함양량

함양량(net recharge)이란 강우량 중 대수층으로 침투하는 물의 양을 뜻한다. 본 연구에서는 함양량 산정을 위하여 2006년 3월에서 2007년 2월에 걸쳐 부여관측소에서 측정된 강수량 자료(기상청, 2006-2007)와 SCS-CN(Soil

Conservation Service-Curve Number) 방법을 적용하였다. SCS-CN 방법은 1950년대에 미국 토양 보전국에서 소유역에 대한 유출량을 산정하는 것을 목적으로 개발된 것으로 수문학적 토양그룹, 선행함수 조건, 토지이용 상태별 유출곡선지수에 따라 유출량을 산정한다. SCS-CN 방법으로 유출량을 구하는 과정 중 침투량에 해당하는 인자를 이용하면 함양량을 구할 수 있다. 본 연구에서는 함양량의 계절적공간적인 분포 양상을 동시에 고려하기 위해 토지이용도를 바탕으로 토지이용별 함양량을 계절단위로 산정하여 이용하였다.

3.3.3. 대수층 매질

대수층 매질(aquifer media)은 파쇄대, 절리면의 분포 정도, 분급 그리고 세립물질의 양 등을 기준으로 7개의 범위로 나뉜다(Aller et al., 1987). 파쇄대가 적고 과상일 수록 지하수 오염 취약성이 상대적으로 낮은 반면 모래, 자갈, 현무암, 카르스트 석회암과 같이 공극이 큰 매질로 구성된 대수층은 오염 취약성이 높다. 대수층 매질은 대상지역의 지질도(1:50,000 한국지질자원연구원)를 기준으로 하여 DRASTIC 모델에 적용시켰다.

3.3.4. 토양 매질

토양 매질(soil media)은 비포화대의 최상부에 해당하는 층으로서 자갈층과 같이 입도가 크거나 토양층이 얇을수록 지표 오염물질의 수직 이동이 용이하다. 점토질인 경우에는 점토의 유형이나 팽창수축의 정도에 따라 오염물질의 이동 정도가 달라진다. 연구지역 내의 토양층은 대부분 사질(sand) 내지 사양질(sandy loam)의 하성퇴적물로 구성되어 있다. 토양 매질은 1:50,000 개략토양도(농업과학기술연구원, 1967)를 토대로 등급별 분류를 실시하였다.

3.3.5. 지형경사

지형 경사(topography) 인자는 연구지역의 DEM을 이용한 경사율로부터 산정되었다. 일반적으로 지형 경사율이 0~2%일 때 강우나 지표 오염물질이 지하로 침투하기 가장 좋은 조건이다(함세영 외, 2004). 연구지역의 경우 산지의 일부를 제외한 모든 지역이 0~2% 경사율에 해당하는 것으로 분석되었다.

3.3.6. 비포화대 매질

한정상(1999)은 비포화대를 지표면에서 포화대의 최상단면까지의 구간으로 정의하고 있다. 본 연구지역의 비포

화대 매질은 하천 주변의 충적층과 흑운모화강암/각섬석 화강암/화강편마암 등의 화성 및 변성암(한국지질자원연구원, 2001)으로 구성되어 있다.

3.3.7. 수리전도도

연구지역의 수리전도도는 앞서 실시한 수치모사과정에서 모델보정으로 얻은 값을 이용하였다. 보다 합리적인 수리전도도를 얻기 위해 전술한 바와 같이 연구지역내의 암질을 8개의 수리지질구획으로 구분하고 암질과 지형을 고려하여 적절한 수리전도도를 산정하였다.

3.3.8. DRASTIC 모델에 의한 지하수 오염 취약성 평가

DRASTIC 모델에 적용되는 7가지 수리인자들에 대한 분석결과를 바탕으로 DI 분포도를 작성하고 지하수 오염 취약성 평가를 실시하였다. 공동크리깅 기법을 이용한 DI 분포도와 정류상태의 수치모사를 통해 보완된 수위자료를 바탕으로 작성된 DI 분포도를 비교분석하였으며 부정류상태의 수치모사 결과를 이용하여 작성된 분기별 DI 분포도를 통해 시간적 변화에 따른 지하수 오염 취약성을 평가하였다. 이때 분기별 DI 분포도를 작성하는 과정에서 각 분기별 수위분포자료와 함양량을 분류하여 이용하는 등 공간적인 내삽 분포뿐만 아니라 시간적인 내삽 분포 양상을 고려하는 데에 중점을 두었다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 지하수위 자료의 보완 결과

4.1.1. 공동크리깅 기법을 이용한 지하수위 분포 추정

공동크리깅 기법으로 추정된 연구지역의 수위분포는 Fig. 3과 같다. 북동쪽의 산지부근으로 갈수록 수위가 높아지는 양상을 보이는 것은 수치모사의 결과와 유사하나 최고수위가 230 m인 것으로 나타났다. 일반적으로 지하수위의 변화는 지형 변화에 비하여 완만하게 변화하며 지형 고도의 최고점이 230 m인 것을 고려하면 지나치게 높은 값으로 추정된 것으로 판단된다. 이는 연구지역 산간지역에서 지하수위를 측정할 자료가 없으며 공동크리깅의 경우 지하수위 자료가 적은 구간에 대하여 보다 많은 가중치가 지형고도에 주어짐으로 인하여 발생하는 오류이다. 반면에 공동크리깅 기법으로 추정된 수위분포를 수위측정 자료와의 검증한 결과 normalized RMS error가 0.17로 작은 오차가 적게 발생하며 이는 공동크리깅 기법이 수위 측정이 이루어진 위치에서 자료를 직접적으로 이용하기 때문이다.

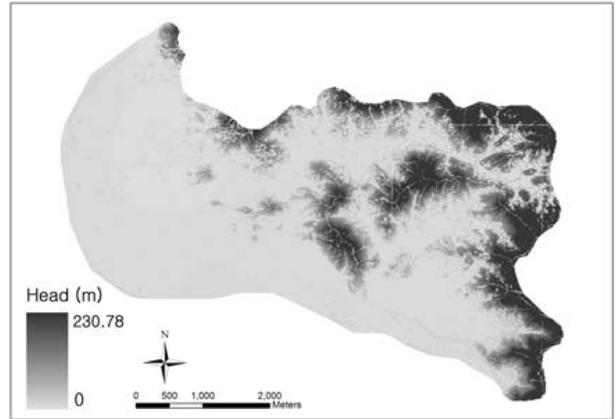


Fig. 3. Distribution of groundwater level developed using cokriging.

4.1.2. 수치모사 기법을 이용한 지하수위 분포 추정

위의 수치모사 최적화를 통해 얻어진 모사 대상지역의 지하수 수위분포 양상 및 관측수위와 모사수위 비교는 Fig. 4와 같다. 최저수위는 1.33 m, 최고수위는 95 m로 모사되었으며 연구지역의 남쪽과 서쪽에 주로 분포하는 저지대 충적층 부근으로는 10 m 내외의 낮은 수위분포를 보인 반면 북동쪽으로 이어진 구릉지와 산지 부근으로는 지형고도와 유사한 높은 수위분포를 보이는 것을 알 수 있다. PEST(Doherty, 2004)를 이용하여 최적화 되었을 때의 지하수위를 관측정의 수위와 비교한 결과는 Fig. 4와 같다. Normalized RMS error가 0.23정도로 비교적 실제와 유사하게 모사되었으며 관측치에 비해 높거나 낮게 예측된 지점이 존재하지만 관측치와 예측치가 모두 1.5~3 m의 좁은 범위 내에 몰려 있는 것으로 보아 오차가 크다고 보기는 어렵다. 또한 관측공의 위치가 충적층에 집중되어 있는 것도 그 이유라고 판단된다. 부정류상태의 수치모사 결과는 Fig. 5와 같다. 전체적인 지하수위의 분포는 정류상태의 수위와 비슷하고 계절에 따라 그 정도의 차이가 있다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 타 분기에 비해 두 번째 분기(6월~8월)의 수위가 전체적으로 높은 것으로 나타났으며 이는 분기 동안 예상되는 집중 강우로 설명이 가능하다.

4.2. DRASTIC 모델 인자 등급도

DRASTIC 모델에 적용한 7가지 수리인자들을 모델에서 제시하는 인자별 표준화된 등급기준에 따라 분류한 결과와 이를 바탕으로 작성한 등급도가 다음 Table 3-4, Fig. 6과 같다. 지하수위 심도와 함양률은 계절적 변화에 반응을 보이는 인자들이므로 계절에 따른 등급도와 표를 함께

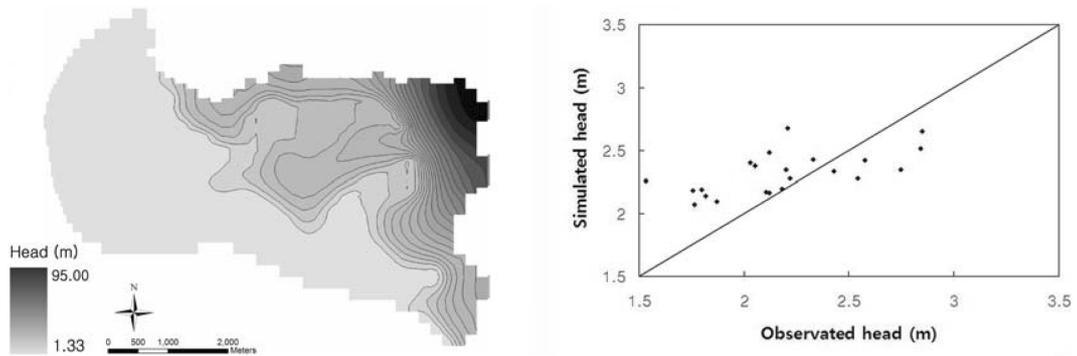


Fig. 4. Results of groundwater modeling (left) and model calibration (right).

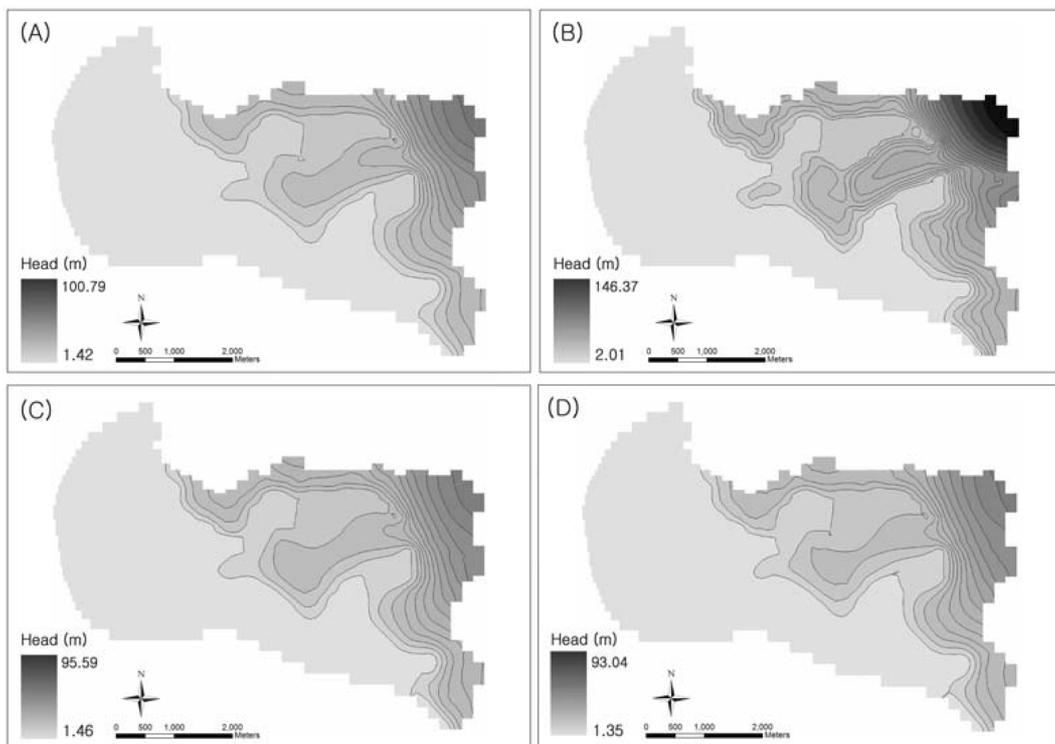


Fig. 5. Simulated distributions of groundwater level at different times: A, March ~ May; B, June ~ August; C, September ~ November; D, December ~ February.

Table 3. The ranges and ratings for DRASTIC modeling used in this study

Parameter	Range	Rating	Area (%)					
			Cokriging	Steady	Spring	Summer	Fall	Winter
Depth to water (m)	> 30.5	1	22.11	14.88	14.06	9.48	13.08	14.14
	22.9 - 30.5	2	2.56	4.40	4.43	3.26	4.15	4.28
	15.2 - 22.9	3	3.05	7.25	7.02	4.95	6.26	6.69
	9.1 - 15.2	5	2.82	14.34	14.58	11.54	13.12	13.73
	4.6 - 9.1	7	2.68	29.92	30.19	25.82	28.54	29.36
	1.5 - 4.6	9	3.01	21.58	21.74	27.14	24.04	22.29
	0 - 1.5	10	63.76	7.63	7.98	17.81	10.80	9.51

Table 4. The used ranges and ratings and the corresponding percent area

Parameter	Range	Rating	% Area				
			Steady	Spring	Summer	Fall	Winter
Recharge (mm/year)	0 - 50.8	1	22.73	0.00	0.00	10.01	11.32
	50.8 - 101.6	3	8.91	11.32	0.00	31.58	88.68
	101.6 - 177.8	6	0.00	30.27	0.00	58.41	0.00
	177.8 - 254.0	8	0.00	58.41	0.00	0.00	0.00
	254.0 +	9	68.36	0.00	100.00	0.00	0.00
Aquifer media	Massive Shale	2					55.08
	Metamorphic/Igneous	3					44.15
	Weathered Metamorphic/Igneous	4					0.77
Soil media	Loam	5					17.16
	Sandy Loam	6					29.70
	Sand	9					52.00
	Gravel	10					1.14
Topography (%)	6 - 12	5					0.11
	2 - 6	9					4.11
	0 - 2	10					95.78
Impact of the vadose zone	Metamorphic/Igneous	4					44.92
	Sand and Gravel with significant Silt and Clay	6					55.08
Hydraulic conductivity (cm/sec)	$4.7 \times 10^{-5} - 4.7 \times 10^{-5}$	1					21.12
	$4.7 \times 10^{-5} - 1.4 \times 10^{-4}$	2					21.67
	$1.4 \times 10^{-4} - 3.3 \times 10^{-4}$	4					46.35
	$3.3 \times 10^{-4} - 4.7 \times 10^{-4}$	6					10.86

제시하였다. 표와 그림에 의해 제시된 바와 같이 공동크리깅에 의한 지하수위의 경우 계절적인 강우량에 의한 영향이 반영되지 않는 반면 수치모사에 의한 수위는 강우량에 비교적 민감하게 변화하는 특성을 보인다(Table 3-4, Fig. 6).

지하수위 심도를 등급별 분류한 결과를 살펴보면 Fig. 3-5의 지하수위 분포도에 비해 급격하지는 않으나 기후의 변화에 따라 등급별 면적비가 상호간에 다소간의 차이를 보임을 알 수 있다. 공동크리깅 기법을 이용한 지하수위 심도의 등급별 비율을 보면 0~1.5 m에 해당하는 지역이 전체 면적의 약 64%를 차지하고 있는데 이는 공동크리깅에 사용된 수위 측정치가 모두 층적층의 자료인 것으로 미루어 볼 때 내삽에 이용된 자료의 편중 및 관측수의 부족으로 인하여 적절한 보완이 이루어지지 못하였기 때문인 것으로 판단된다. 동측 산지의 경우 수치모사 격자의 크기가 200 × 200 m로 비교적 크게 설정되었으므로 10 m 간격으로 지형 등고로부터 입력 수치를 추출한 공동크리깅에 비하여 낮은 해상도를 보인다(Figs. 6A & 6B). 이러한 산지는 비교적 지표의 이용이 드물어 정밀한

취약성 분석 대상에서 일반적으로 제외되는 구간이다. 보다 정밀한 추정을 위하여서는 보다 작은 크기의 격자를 적용하는 것이 바람직하나 이러한 경우 수치모사에 많은 연산시간을 소요하게 되는 단점이 있다.

연구지역 내 함양량은 대체로 3-8등급에 해당하고 여름의 경우 전지역에 9등급으로 나타났다(Table 4). 농지에 비해 산지가 더 높은 등급을 가지는 것으로 나타났으며 이는 연구지역내의 산지의 지형경사가 비교적 완만하고, 농지의 대부분이 논농사 지역이기 때문에 배수상태가 불량하여 오히려 상대적으로 높은 지형경사를 가지는 산지보다 함양량이 적은 것으로 나타났다. 시가지의 경우 함양량이 비교적 적은 것은 지표 피복 상태에 따른 것이다. 대수층 매질은 대부분 이토점토로 구성된 층적층(2등급), 변성화성암(3등급), 풍화된 변성화성암(4등급)으로 분포하고 있는 것으로 나타났으며 토양층은 대부분이 사질(sand) 내지 사양질(sandy loam)의 하성퇴적물로 구성되어있어 대부분이 5에서 6등급에 해당한다. 지형경사 인자는 유역의 96% 이상에서 0~2% 경사율(10등급)에 해당하는 것으로 분석되었다. 이는 층적층과 같이 경사가 완만한 지역

이 대부분을 차지하고, 북동쪽으로 분포하고 있는 산지도 경사가 급하지 않은 낮은 산지이기 때문이다. 연구지역의 비포화대 매질은 하천 주변의 충적층과 흑운모화강암/각섬석화강암/화강편마암 등의 화성변성암이 대부분으로 각

각 6등급과 4등급으로 분류되었다. 수리전도도는 앞서 실시한 수치모사에 적용된 것과 동일한 값을 이용하였으며 unit 4와 5를 제외한 약 89% 정도의 지역이 1, 2, 4점의 낮은 등급에 해당하는 것으로 나타났다.

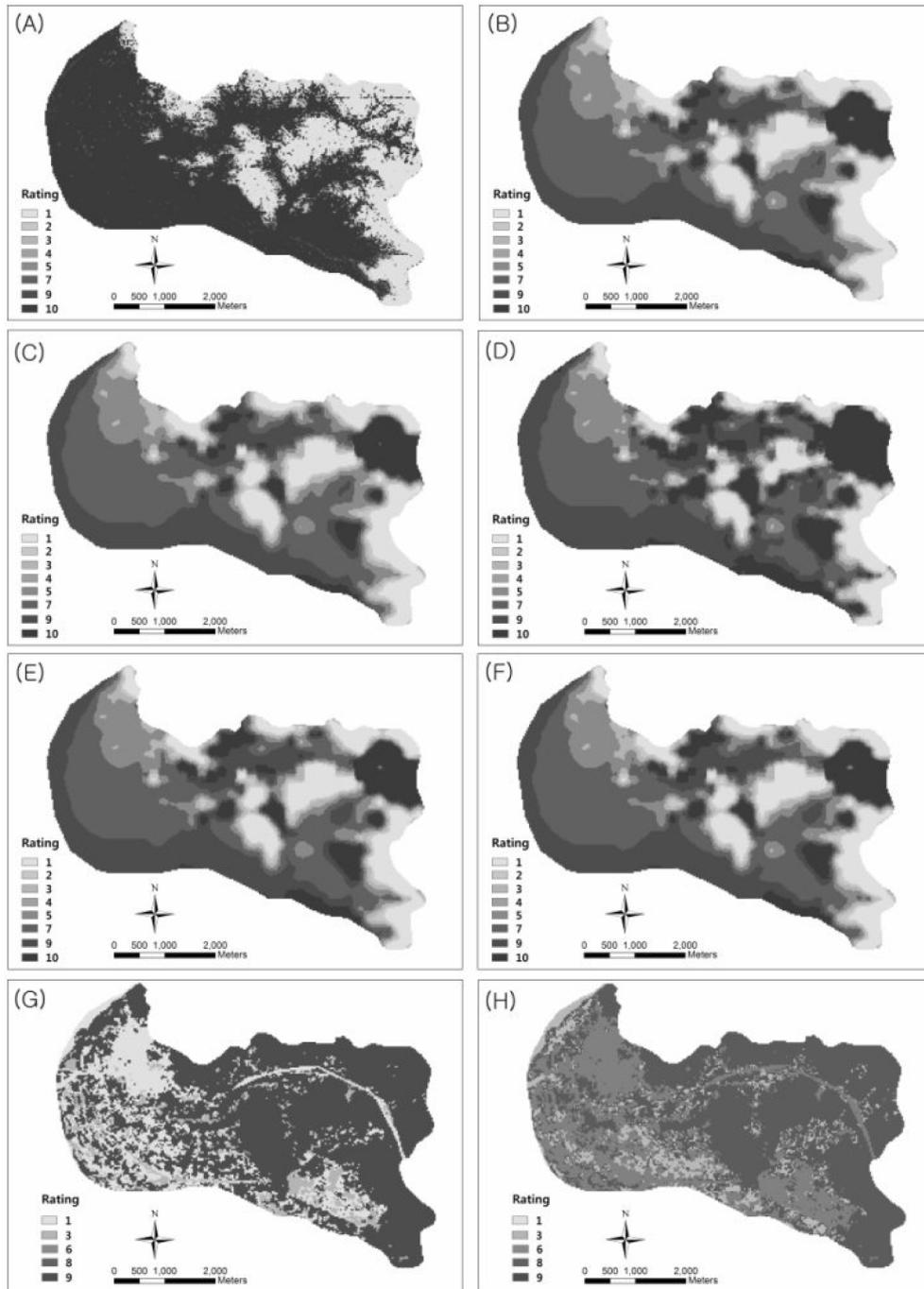


Fig. 6. Rating maps of study area: A, depth to water using cokriging; B, depth to water using steady-state flow modeling; C, simulated depth to water during the 1st stress period (SP1); D, simulated depth to water - SP2; E, simulated depth to water - SP3; F, simulated depth to water - SP4; G, steady - state recharge rate; H, recharge rate - SP1).

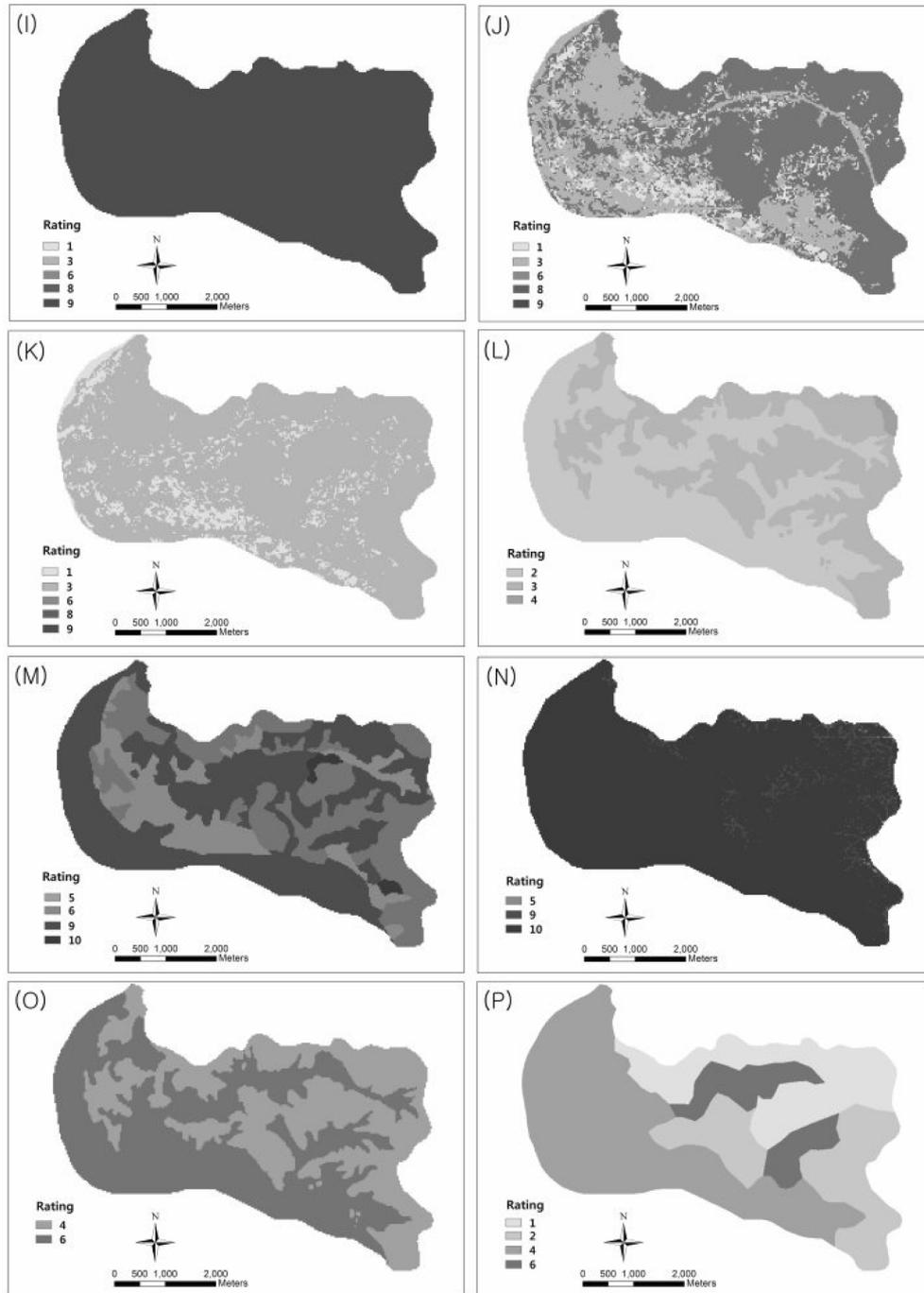


Fig. 6. (continued) I, recharge rate - SP2; J, recharge rate - SP3; K, recharge rate - SP4; L, aquifer media; M, soil media; N, topography slope; O, vadose zone media; P, hydraulic conductivity.

4.3. DRASTIC 모델에 의한 지하수 오염 취약성 평가
 각 인자별로 분류된 등급도를 이용하여 유역내의 상대적인 지하수 오염 취약성 정도를 평가하기 위해서는 각각의 등급도를 선형으로 중첩시켜 각 지점에 해당하는 DI를 구하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 공동크리깅 기

법으로 보완한 지하수위 심도와 수치모사 기법으로 보완한 지하수위 심도를 이용한 DI 분포를 작성하여 두 기법을 비교분석하고 부정류상태의 수치모사 결과를 바탕으로 계절별 DI 분포를 작성하여 시간적 변화에 따라 지하수 오염 취약성의 변화 양상과 정도를 분석하였다(Fig. 7).

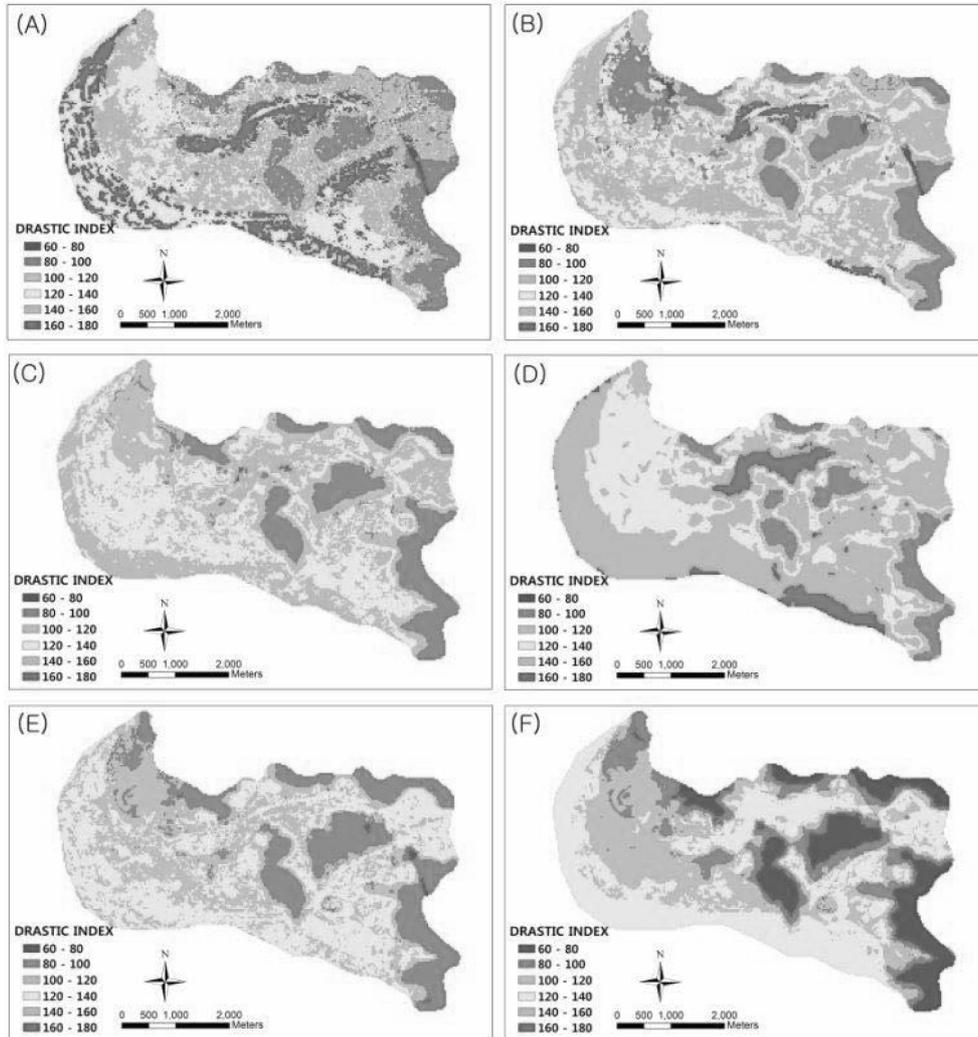


Fig. 7. DRASTIC index map of study area: A, using cokriging; B: using steady-state flow modeling; C-F, using transient flow modeling at different times (SP1-SP4).

공동크리깅을 통해 보완한 지하수위 심도를 이용한 DI 분포는 Fig. 7A에 나타나 있다. 붉은색일수록 높은 DI에 해당하며 이는 유역 내 타 지역에 비해 상대적인 취약성 정도가 큰 것을 의미한다. 주황색 내지 붉은색으로 나타난 지역은 백마강과 왕포천, 염창천이 위치한 곳으로 지형고도가 낮고 하천 주변의 충적층이 비교적 넓게 분포하고 있어 지하수 오염물질이 지하로 유입되기 용이하다. 이에 비해 푸른색으로 나타난 지역은 유역 내에서 비교적 지형고도가 높은 지역으로 대부분이 산지이며 토층이 얇고 비포화대가 결정질암으로 이루어진 지역이 대부분이다. Fig. 7B는 수치모사 기법을 통해 보완한 지하수위 심도를 이용하여 작성한 DI 분포이다. 마찬가지로 하천 주변의 낮은 지형이 분포하고 있는 지역이 붉은색을 띠고 있어

지하수 오염 취약성이 상대적으로 큰 것으로 분석되었다. 이를 A의 공동크리깅을 바탕으로 한 DI 분포와 비교하여 보았을 때 공동크리깅을 이용하여 작성된 DI 분포(Fig. 7A)는 전반적으로 연구지역의 지형고도에 종속되는 경향을 보인다. 이는 공동크리깅을 이용하여 지하수위를 추정하는 과정에서 지형고도에 대한 의존도가 높기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다.

Figs. 7C-F는 부정류상태의 수치모사 결과를 이용하여 각 분기별 지하수 오염 취약성을 평가하기 위해 작성된 DI 분포이다. 1년을 4분기로 나눈 것 중 첫 번째 분기(Fig. 7C)는 계절적으로 봄에 해당하는 시기이며 제 1분기의 지하수 오염 취약성은 연구지역 내 대부분의 충적층 분포지역에서 더 취약하다. 제 2분기에는 전체적으로 DI

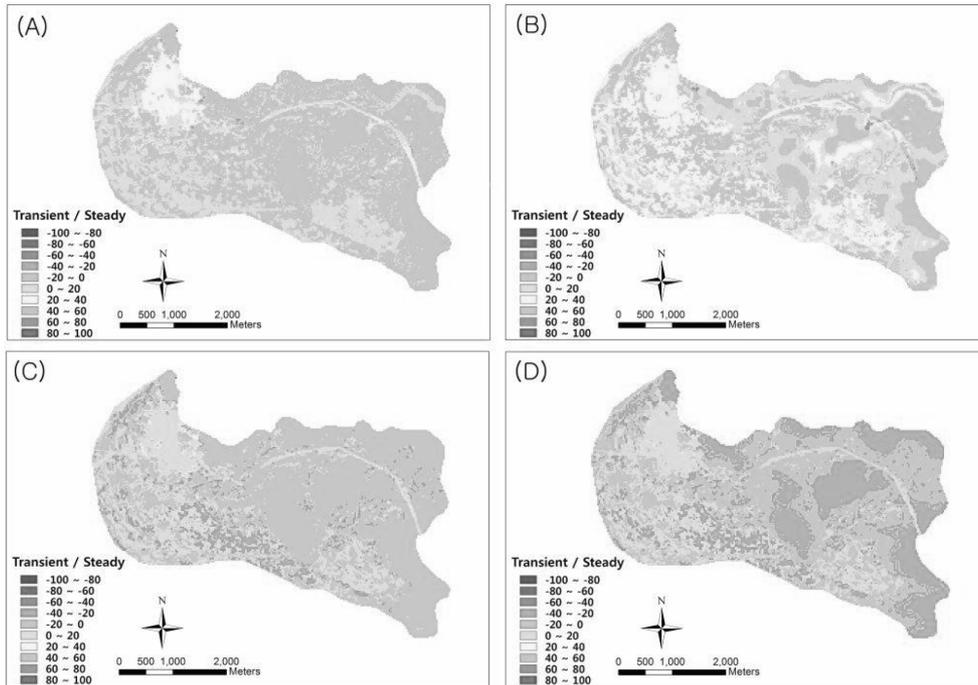


Fig. 8. Distribution of steady-state to transient DI ratio of each stress period: A, SP1; B, SP2; C, SP3; D, SP4.

가 높아졌고 산지가 분포하고 있는 북쪽과 동쪽 경계부 일부와 왕포천과 염창천의 사이에 위치한 조석산을 제외한 모든 지역에서 120 이상의 비교적 높은 DI를 가진다. 이는 여름철에 강우량이 급증하고 이로 인한 지하수위 및 함양량 증가 때문이다. 제 3분기에는 DI가 제 2분기에 비하여 전체적으로 낮아지는 경향을 보이고 있으며 분포 양상은 제 1분기와 대체로 유사하다. 제 4분기에는 하천 주변의 충적층 일부를 제외한 모든 지역의 DI가 120 이하로 1년 중 지하수 오염 취약성이 가장 낮은 시기임을 알 수 있다. 이와 같이 시간적 변화에 따라 지하수 오염 취약성은 지속적으로 변화하며 그 변화의 정도는 다음의 Fig. 8에 나타난 바와 같다. Fig. 8는 정류상을 이용하여 평가한 지하수 오염 취약성에 대한 각 시기별 예측된 지하수 오염 취약성의 비를 백분율로 나타낸 것이다. 그림에서 제시한 바와 같이 제 1 및 제 3 분기는 평상시의 지하수 오염 취약성과 크게 다르지 않은 것으로 나타났으며 정류 부정류 취약성 비 역시 대체로 -20에서 20 사이의 분포를 보인다. 그러나 제 2분기의 경우 강우가 편중되는 시기이며 많은 지역에서 20에서 40 사이의 정류-부정류 취약성 비를 확인할 수 있으며 일부 지역에서는 40 이상의 값이 나타나는 것으로 관찰되어 매우 급격하게 취약성이 증가함을 보여준다. 제 4분기의 경우 강우량과 함양량이 감소하는 시기이며 정류-부정류 취약성 비 역시 대부분의 지역에

서 -60에서 -20 사이의 값을 갖는 것으로 확인되었다. 따라서 제 4분기 동안의 지하수 오염 취약성은 제 1 및 3분기와 비교하여 급격하게 감소함을 알 수 있다.

4.4. 지하수 오염 취약성 평가 결과의 검증

지하수 취약성 평가 결과의 검증을 위하여 연구지역 지하수의 주 오염물질인 NO₃ 농도와 비교하였다. 일반적으로 지하수 오염 정도와 지하수 오염 취약성은 정확한 비례관계를 가지지 않으나 관측지점이 대부분 유사한 형태의 농경지역인 것으로 미루어 보아 판단할 때 취약성 결과와 지하수 오염 정도는 일정 정도 이상의 상관관계를 가질 수 있다. 분석에 이용된 NO₃ 농도는 2001년 9월과 2002년 6월 2회에 걸쳐 실시된 수질측정 자료(한국수자원공사, 2002)를 이용하였으며 상관분석 결과는 Fig. 9에 제시된 바와 같다. DI와 지하수 오염물질간의 상관관계를 분석한 결과, 전반적으로 미약한 선형 상관관계가 나타남을 알 수 있다. 선형 관계의 결정계수(R²)는 정류상의 수치모사 기법을 이용한 경우 0.21(Fig. 9A), 공동크리깅을 이용한 경우 0.11(Fig. 9B), 시기적으로 관측 시점을 포함하는 제 3분기에는 0.32(Fig. 9C), 또 다른 관측 시점을 포함하는 제 2분기에는 0.2(Fig. 9D)로 나타났다. 지하수 취약성 평가 시 실제 지역의 토지이용상태나 농업강도와 같은 다양한 영향 요소가 배제되어 있으며 낮은 결정계수

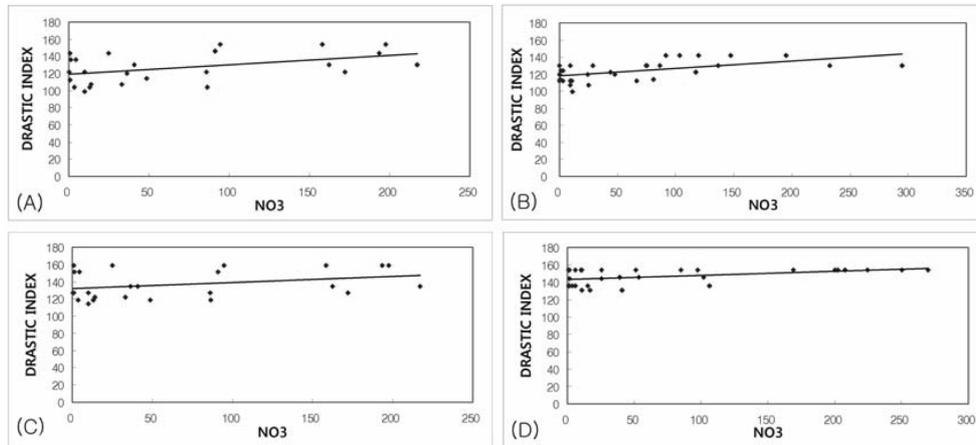


Fig. 9. Linear relationship between NO₃ concentration and DRASTIC index: A, using steady-state flow modeling; B, using cokriging; C, using transient flow modeling (SP3); D, using transient flow modeling (SP2).

로 인하여 공동크리깅을 이용한 취약성 평가와 정류 모사 결과를 이용한 평가, 그리고 부정류 모사에 의한 취약성 평가 상호간의 차이를 정량적으로 파악하기에는 다소간의 무리가 있으나 정성적인 평가에 의하면 수치모사에 의한 선형 상관성이 다소 높음을 보여준다.

위의 계절적인 DI분포와 NO₃의 선형적 상관관계 결과로 미루어 볼 때 지하수 오염 취약성을 파악하는데 있어 지하수위 및 함양량과 같이 시간적으로 변화하는 인자들에 대한 고려가 취약성 예측의 질적 향상을 위하여 필요하다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 DRASTIC 기법 및 지하수 수치모사를 병합 적용하여 충청남도 부여군 부여읍 일대에서 지하수 오염 취약성평가를 실시하였다. DRASTIC 모델에 사용되는 7가지 수리인자들 중 광역적인 자료의 취득이 어려우며 여타 인자들에 비하여 전체 결과에 대한 상대 민감도가 높은 지하수위 심도 인자에 대하여 수치모사 기법을 적용하여 자료의 보간을 실시하였으며 이의 결과를 공동크리깅 기법을 이용한 취약성 평가결과를 상호 비교분석하였다.

특히, 지하수 오염 취약성의 시간적인 변화를 분석하기 위하여 정류 및 부정류 수치모사를 모두 실시하였다. 지하수위 심도와 함양량은 시간 변화에 종속되는 수리인자이므로 강우나 기후변화와 같은 시간적 변화에 따라 동일한 지역의 지하수 오염 취약성이 달라진다. 본 연구에서는 이러한 변화를 고려하기 위하여 부정류상태의 수치모사를 실시하여 분기별 지하수위의 분포양상을 추정하였으며 이를 바탕으로 각 분기별 강우량에 대한 함양률을

SCS-CN방법으로 산정하여 부정류 모사에 적용하였다. DRASTIC 기법을 이용하여 부여군 부여읍 일대의 지하수 오염 취약성 평가를 실시한 결과 충적층과 시가지 주변이 대체로 오염에 취약한 것으로 분석되었고 계절적으로 여름에 해당하는 제 2분기(6월~8월)에는 평상시에 비해 약 40에서 최대 60%까지 취약성이 증가하며 겨울에 해당하는 제 4분기(12월~2월)에는 약 40에서 60% 가량 감소하는 결과를 얻을 수 있었다.

지하수 수치모사를 이용한 지하수 오염 취약성 평가법의 경우 수리적 조건의 시-변화를 고려할 수 있으며 궁극적으로 지하수 관측이 이루어지지 않은 시점에 대한 오염 취약성 평가가 가능하다. 특히 본 연구에서 제시하는 방법을 통하여 지하수 오염 취약성 모델이 구성되었을 경우 장기간의 갈수기 또는 홍수기와 같은 비상 시기의 지하수 오염 취약성을 즉각적으로 예측할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 지하수위 수치모사기법을 이용하여 지하수위를 추정하는 방법은 특정시기에 한정되어 이루어진 수위 측정에 의한 취약성 평가의 시간적 제한성을 완화시킬 수 있는 방안이 될 수 있을 뿐만 아니라 부족한 관정 데이터의 보완을 위하여 지형적인 요인 외에도 다양한 수리영향 인자들을 이용함으로써 합리적인 예측을 가능토록 할 것으로 판단되며 합리적인 토지 이용을 유도하여 토지 활용도의 극대화에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2006년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국 과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(R01-2006-000-11050-0).

참 고 문 헌

- 건설교통부, 2002, 지하수관리 기본계획, p. 95.
- 국토지리정보원, 2004, 청양/한산 1 : 5,000 지형도.
- 기상청, 2006-2007, 부여 기상연보, <http://www.kma.go.kr/>.
- 농업과학기술연구원, 1967, 1 : 50,000 개략도양도.
- 민경덕, 이영훈, 이사로, 김윤중, 한정상, 1996, DRASTIC을 이용한 지하수 오염 가능성 분석 및 그래픽 사용자 인터페이스 개발연구, 지하수 환경학회, 3(2), 101-109.
- 이사로, 김윤중, 1996, DRASTIC SYSTEM을 이용한 지하수 오염 가능성 및 위험 분석 연구, 한국GIS학회지, 4(1), 1-11.
- 이용두, 송희경, 2006, 제주도 서부지역의 지하수 오염취약성 작성 연구, 한국지하수토양환경학회 춘계학술발표회, 한국지하수토양환경학회, p. 316-318.
- 한국수자원공사, 2002, 금강권역 광역 지하수 조사, p. 257.
- 한국수자원공사, 2005, 인천지역 지하수 기초조사, p. 193.
- 한국수자원공사, 2003, 포항지역 지하수 기초조사, p. 472.
- 한국지질자원연구원, 2001, 1 : 50,000 부여 지질도폭.
- 한정상, 1999, 지하수환경과 오염, 박영사, p. 1071.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H., Petty, R.J., and Hackett, G., 1987, *DRASTIC : A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential using Hydrogeological Setting*, USEPA, p. 455.
- Deutsch, C.V. and Journel, A.G., 1992, *GSLIB: Geostatistical Software Library and user's guide*. Oxford University Press, p. 369.
- Doherty, J., 2004, *Model-Independent Parameter Estimation User Manual*, Watermark Numerical Computing, p. 336.
- Insaf, S.B., Mohamed, A.A.M., Tetsuya, H., and Kikuo, K., 2005, A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan, *Science of the Total Environment*, 345, 127-140.
- 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, *Groundwater Vulnerability Assessment*, National Academy Press, p. 224.
- Rao, P.S.C., Hornsby, A.G., and Jessup, R.E., 1985, Indices for ranking the potential for pesticide contamination of groundwater, *Soil and Crop Science Society of Florida*, 44, 1-8.
- U.S. Environmental Protection Agency, 1983, *Surface impoundment assessment: national report*, p. 220.