

## GIS 기반 Weight of Evidence 기법을 이용한 포천 지역의 지하수 산출특성 예측도 작성

허선희\*† · 이기원\*\*

대한광업진흥공사 국내탐사팀, 한성대학교 대학원 석사과정\*, 한성대학교 정보시스템공학과\*\*

### Feasibility Mapping of Groundwater Yield Characteristics using Weight of Evidence Technique based on GIS in the Pocheon Area

Seon-Hee Heo\*† and Kiwon Lee\*\*

Korea Resources Corporation and Graduate School of Hansung University\*

Dept. of Information System Engineering, Hansung University\*\*

**Abstract :** In this study, the weight of evidence(WofE) technique based on GIS was applied to spatially estimate the groundwater yield characteristics at the Pocheon area in Gyunggi-do. The groundwater preservation depends on many hydro-geologic factors that include hydrologic data, land-use data, topographic data, geological map and other natural materials collected at the site, even with man-made things. All these data can be digitally processed and managed by GIS database. In the applied technique of WofE, the prior probabilities were estimated as the factors that affect the yield on lineament, geology, drainage pattern or river system density, landuse and soil. We calculated the value of the weight values,  $W^+$  and  $W^-$ , of each factor and estimated the contrast value of it. Results by the groundwater yield characteristic computation using this scheme were presented feasibility map in the form of the posterior probability to the consideration of in-situ samples. It is concluded that this technique is regarded as one of the effective techniques for the feasibility mapping related to the estimation of groundwater-bearing potential zones and its spatial pattern.

**Key Words :** Weight of evidence , Groundwater yield characteristics, Hydrogeologic factors, GIS.

**요약 :** 본 연구에서는 경기도 포천군 일대의 지하수 부존특성 가능지역을 공간적으로 예측하기 위하여 GIS 기반으로 Weight of Evidence(WofE) 기법을 적용하였다. 기본 자료로는 지하수 산출 특성분석과 관련된 수문지질학적 인자인 지표파복, 지형, 지질 등의 자료를 GIS 정보로 입력하였다. 그리고, 베이저안 확률 분석기법(Bayesian Method)에 기반하여 기본자료와 함께 선구조, 암상, 수계밀도, 식생, 토양, 토지이용현황 등과 같이 산출성에 영향을 주는 인자들에 대하여 지하수 부존가능 지수와 사전/사후확률을 구하였다. 이들 자료에 대해 다시 WofE 기법을 적용하여, 각 인자들의  $W^+$ ,  $W^-$  가중 값들을 계산하였다. 또한 이러한 결과의 차이 값으로 공간적인 상관관계를 구하여 지하수 산출특성의 예측가능도를 작성하고자 하였다. 본 연구에 적용한 방법은 잠재된 지하수 부존 지역과 주변 지역의 공간적 분포를 파악하는 데 유용한 것으로 생각된다.

2005년 9월 8일 접수 ; 2005년 12월 16일 수리.

† 교신저자: 허선희(hseon@kores.or.kr)

# 1. 서론

지하수는 중요한 자원이지만 그 양이 제한적이어서 무분별하게 개발하면 수량이 고갈된다. 또한 지반침하, 해수침입 등과 같은 지하수 재해가 발생할 수 있다. 지하수 재해가 발생하면 지하수 사용이 불가능할 뿐만 아니라, 원상회복에 오랜 시간이 걸린다. 따라서, 적절한 수자원의 합리적인 이용과 체계적인 보전관리를 위해 지하수 산출성 분석 및 처리 방법에 대한 연구가 필요하다.

지하수 산출성은 지하수가 저류되어 있는 수리지질조건에 따라 하천이나 그 인근지에 분포된 충적층 및 암석의 풍화대와 같은 미고결 다공질매체 내에 저류된 충전지하수와 암석매체의 1차 유효 공극이나 단층, 균열, 절리 등과 같은 2차 유효공극 내에 저류되어있는 암반지하수로 구분할 수 있다(한정상, 1998). 이러한 충전대수층과 암반대수층에서의 지하수 산출성을 평가하고자 할 경우, 해당 지역에 분포하는 대수층의 대표적인 산출성과 수리성을 토대로 평가하는 것이 원칙이다. 그러나, 현실적으로 광범위한 지역에 불규칙하게 분포하는 다양한 대수층의 산출성과 수리성에 대한 실측자료는 제한적이다. 따라서, 지하수 산출인자 자료와 수문지질인자들과의 상

관성 분석을 통하여 산출 특성을 분석하는 GIS 기반의 처리 방법의 개발과 적용 연구가 필요한 실정이다.

본 논문에서는 포천지역의 지하수 산출인자 자료와 수문지질인자들간의 상관성 분석 결과를 근거로 지하수 산출가능성도를 작성하여 수자원의 합리적인 이용과 체계적인 보전관리에 기여하고자 함을 목적으로 한다

# 2. 지형 및 지질

연구지역인 포천시는 경기도의 북단에 위치하며, 위·경도 상으로 북위 37° 36' 00"~38° 11' 00", 동경 127° 05' 00"~127° 27' 00"에 해당한다. 지형은 일반적으로 지질 분포와 지질구조 요소를 반영한다. 산계는 대체로 북동 방향으로 발달한 2개조의 단층대(포천단층대) 방향과 유사한 N40~45E 방향성이 가장 우세하다. 이외에 이들 단층에서 파생한 단층들의 방향을 따른 N22~ 45W의 소규모 산계들이 발달되어 있다. 2개조의 포천단층대를 기준으로 서측과 동측은 깊고 높은 지형기복의 험준한 산악지역을 형성하고 있다. 이들 주변부는 풍화에 약한 화강암이 식박되어 저지의 분지상을 나타낸다(Fig.1(a)).

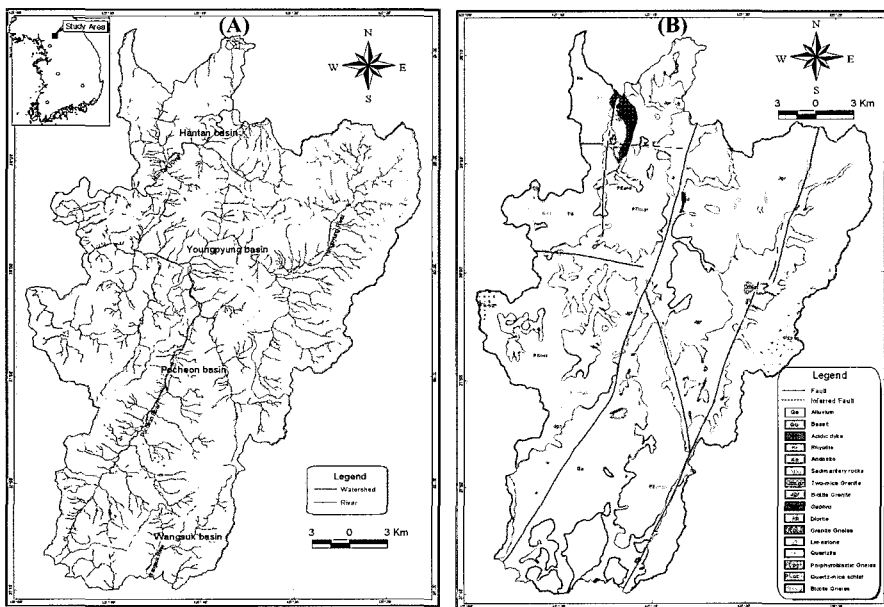


Fig. 1. (a) Location map and (b) geological map of the study area, Pocheon area.

포천지역에 분포하는 지질은 선캠브리아기의 변성퇴적암류를 기반으로 하여 이들을 관입하는 중생대 화성암류와 부정합으로 덮고 있는 백악기 퇴적암류와 화산암류, 제4기 현무암으로 구성되어 있다. 변성퇴적암류는 하부에서부터 흑운모편마암, 화강편마암, 반상변정질편마암, 규암, 석회암, 석영-운모편암 등으로 구성되어 있다. 화성암류는 주라기의 대보조산운동에 의해 섬록암류, 반려암, 조립질 흑운모화강암, 세립질 흑운모화강암, 복운모 화강암으로 구성되어 있다. 조립질 흑운모화강암은 전체적으로 조립-극조립질의 회색화강암과 영북면 일대에서 중립-조립질의 담홍색화강암이 분포한다. 연구지역 북서부에는 백악기 퇴적암류, 화산암류, 제4기 현무암이 부정합의 상태로 분포한다. 퇴적암류는 화산암질 역암과 사암으로 구성되고 소규모의 세일과 이암이 협재한다(Fig. 1(b))(김규한 외, 1984; 이병주 외, 1999).

### 3. 연구방법

#### 1) Weight of Evidence (WofE) 기법

Weight of Evidence(이하 WofE) 기법은 Bonham-Carter(1988), Harris(1995), Wright and Bonham-Carter(1996), Robinson and Kapo(2004)등 의하여 부존광물 자원탐사에 적용된 바 있다. 이 외에도 Nova Scotia 지역의 금광부존가능지역의 예측을 위한 지질학적 자료통합 및 예측도 작성(Bonham-Carter, 1998), 금 및 비철금속의 잠재 부존 광화대 조사를 위한 GIS 예측 모델링(Asadi and Hale, 2001) 등과 같은 다양한 분야에서 활용되고 있다.

WofE방법은 기존에 알고 있는 자료와 그와 관련된 다양한 공간자료들을 결합하여 상관관계의 분석을 통해 예측 및 평가모델을 도출할 수 있는 기법이다. 따라서 이 방법은 조건부 확률에 기반한 사전확률(Prior Probability)과 사후확률(Posterior Probability)의 개념을 응용하게 된다. 전자의 경우 다양한 공간 자료들을 입력하지 않은 초기 확률을 말하는데, 이런 사전확률은 특정 사상과 관련된 추가적인 정보를 이용하여 수정할 수 있다. 이렇게 수정한 확률을 사후확률이라고 한다

(Harris et al., 2000).

사후확률은 다음과 같이 정의할 수 있다

$$\text{Posterior probability} = \text{prior probability} \times \text{factor for each evidential theme} \quad (1)$$

(1)식에 log를 취하면

$$\text{Posterior logit} = \text{Prior logit} + \text{weight for each evidential theme} \quad (2)$$

즉, logit은 odds의 자연log이고, odds는 확률이 발생할 가능성과 발생하지 않을 가능성의 확률비로 나타낸다.

연구지역 전체를 T, 지하수 산출가능지역을 D, 단위 셀의 수를 N()로 나타낼 경우, 사전확률은 다음과 같다 (Bonham-Carter, 1994).

$$P\{D\} = \frac{N\{D\}}{N\{T\}} \quad (3)$$

지하수 산출가능지역(D)과 관련한 정보를 사상 B라 하면, 사상 B가 일어날 조건 하에 사상D가 일어날 조건부 확률은 다음과 같다.

$$P\{D|B\} = \frac{P\{D \cap B\}}{P\{B\}} = \frac{P\{D\}P\{B|D\}}{P\{B\}} \quad (4)$$

$$P\{\bar{D}|B\} = \frac{P\{\bar{D}\}P\{B|\bar{D}\}}{P\{B\}} \quad (5)$$

(4)식을 (5)식으로 나누면

$$O\{D|B\} = O\{D\} \cdot \frac{P\{B|D\}}{P\{B|\bar{D}\}} \quad (6)$$

$$O\{D|\bar{B}\} = O\{D\} \cdot \frac{P\{\bar{B}|D\}}{P\{\bar{B}|\bar{D}\}} \quad (7) \text{이다.}$$

여기서,  $\frac{P\{B|D\}}{P\{B|\bar{D}\}}$  : Sufficiency Ratio(LS),  $\frac{P\{\bar{B}|D\}}{P\{\bar{B}|\bar{D}\}}$  : Necessity Ratio(LN) 이다.

LS, LN을 우도비(likelihood ratio)라 하는데, LS값이 1보다 크면 LN값은 (0,1) 범위값을 가진다. 이는 지하수 산출특성과 관련된 요소들이 존재한다는 것을 의미하며, 그 존재성이 양의 증거를 의미한다. 만약, 반대의 경우라면 음의 상관관계를 나타내게 된다. 또한, LS=LN=1일 경우, 각 요소들과 지하수 산출특성과는 관계가 없음을 나타낸다. 즉, 사전확률과 사후확률이 같아짐으로써, 지하수 산출성은 여러 요소들의 존재유무에 영향을 받지 않는다.

(6), (7)식에 log를 취하면

$$\text{logit}\{D|B\} = \text{logit}\{D\} + \text{logit}\left\{\frac{P\{B|D\}}{P\{B|\bar{D}\}}\right\} = \text{logit}\{D\} + W^+ \quad (8)$$

$$\text{logit}\{D|\bar{B}\} = \text{logit}\{D\} + \text{logit}\left\{\frac{P\{\bar{B}|D\}}{P\{\bar{B}|\bar{D}\}}\right\} = \text{logit}\{D\} + W^- \quad (9)$$

여기서  $W^+$ 는 LS에 자연로그를 취한 Positive WofE로서 양의 상관관계를 나타낸다. 반면,  $W^-$ 는 LN에 자연로그를 취한 것으로, Negative WofE로 음의 상관관계를 나타낸다. 또한  $W$ 가 0일 경우는 공간적인 상관관계가 없음을 나타낸다. 다양한 공간자료들과 지하수 산출가능지점들 간의 공간적인 상관관계의 전체적인 특성을 나타내기 위하여 이러한 두 가지 가중값의 차이를 이용한다.

$$C = W^+ - W^- \quad (10)$$

사상  $B_1, B_2$ 가 일어날 조건하에 사상  $D$ 가 일어날 조건부 확률은 다음과 같다.

$$P\{D|B_1 \cap B_2\} = \frac{P\{B_1 \cap B_2|D\}P\{D\}}{P\{B_1 \cap B_2|D\}P\{D\} + P\{B_1 \cap B_2|\bar{D}\}P\{\bar{D}\}} \quad (11)$$

즉, 미지의 사상  $B_1, B_2$ 가 일어날 조건하에 사상  $D$ 가 일어날 확률을 구하는 것 보다는 이미 발생한 사상  $D$ 가 일어날 조건하에 사상  $B_1, B_2$ 가 일어날 사후확률을 구하는 것이 더 용이하다. 한 사상이 일어난 것이 다른 사상이 일어난 확률에 영향을 주지 못할 때, 즉, 두 사상이 서로 독립(Independent)인 경우에, 사상  $B_1, B_2$ 가 서로 조건부 독립이라면 아래와 같은 관계가 성립한다.

$$P\{D|B_1 \cap B_2\} = \frac{P\{D\}P\{B_1|D\}P\{B_2|D\}}{P\{B_1\}P\{B_2\}} \quad (12)$$

$$O\{D|B_1 \cap B_2 \cap B_3 \dots B_n\} = O\{D\} \times \prod_{i=1}^n LS_i \quad (13)$$

$$\text{logit}\{D|B_1 \cap B_2 \cap B_3 \dots B_n\} = \text{logit}\{D\} + \sum_{i=1}^n W_i^+ \quad (14)$$

## 2) 조건부 독립(Conditional Independence)

조건부 독립의 검증을 위해서 두 레이어 각각의 분포를 바탕으로 서로 교차되어 형성되는 표(Contingency Table)를 만든 다음 이 표의 각 칸에 제시되는 값들의 관측값과 기댓값과의 차를 서로 비교하여 독립성 혹은 관련성의 여부를 판단한다.

$$\begin{aligned} \chi^2 &= \sum_{i=1}^4 \frac{(\text{observed}_i - \text{expected}_i)^2}{\text{expected}_i} \\ &= \sum_{i=1}^4 \frac{(|\text{observed}_i - \text{expected}_i| - 0.5)^2}{\text{expected}_i} \end{aligned} \quad (15)$$

$\chi^2$ 값을 활용하기 위해서는 자유도를 고려해야 하는데, 자유도는 교차 분석표의 (행의 수 - 1) × (열의 수 - 1)로 계산한다.

## 3) 분석방법

GIS를 기반으로 하는 WofE분석기법을 이용하여 지하수 산출가능성도를 작성하기 위한 절차는 다음과 같다: (1) 지하수 산출특성과 관련된 공간정보 데이터베이스 구축, (2) 구축된 데이터베이스를 이용하여 지하수 산출특성과의 상관성 분석 실시, (3) 각 공간정보에서의 Weight값 추출, (4) 각 공간정보들을 통합하는 지하수 산출특성 평가 및 입력된 자료 검증과 같은 단계로 구분할 수 있다(Fig. 2).

## 4) 입력자료

지하수 부존과 관련된 수문지질학적 요인과 도면 데이터들을 ArcView(version 3.3) 및 ArcGIS(version 8.3) 프로그램을 이용하여 각각 개별적인 GIS 데이터베이스로 구축하였고, Arc-WofE 프로그램을 이용하여 지하수 산출량과의 상관성 분석을 실시하였다. 연구지역의 지하수 산출능력을 나타내는 자료는 2004년 7월~11월 기간 동안 현장에서 획득한 37개소 관정의 비양수량(Specific capacity) 자료와 영향조사 보고서(79개소),

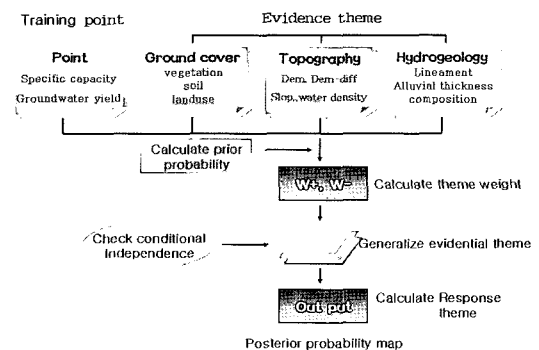


Fig. 2. Flow chart for identification of groundwater yield characteristics.

먹는샘물 보고서(5개소), 수맥조사 보고서(119개소) 등 기존자료들을 이용하였다(Fig. 3(a)).

본 연구에서는 관정 전수조사결과 연구 지역내 2047개의 공 중에 Q(산출량)값이 50ton 이상이 되는 공만을 대상으로 하였다.

공간상에 나타난 연속적인 기복변화를 수치적으로 표현한 지형고도(DEM)는 국토지리정보원에서 발간하는 1:5,000축척의 수치지형도(129도엽)에서 지형고도 레이어(7111, 7114)를 추출하여 공간해상도를 20m 간격으로 재배열 계산하여 작성하였다(Fig. 3(b)), 이렇게 작성한 DEM을 이용하여 연구지역 전체를 1km×1km의 격자(1650개)를 나누어 각 격자에 해당하는 고도차(Fig. 3(c))와, 지형의 기울기를 나타내는 지형 경사도(Fig. 3(d))를 작성하였다. 또한, 수치지형도 중에서 하천으로 분류된 레이어(2111~2114)들을 추출하여 수계밀도 분포도(Fig. 3(e))를 작성하였다.

식생분포도는 1996년도에 촬영한 Landsat-TM영상을 이용하여 식생지수를 추출하여, Normalized Difference Vegetation Index(NDVI) 기법을 이용하여 작성하였다(Fig. 3(f)). 토양도는 농업과학기술원에서 발간하는 1:50,000개략토양도를 이용하여 작성하였는데, 토양의 투수성과 지형경사등을 고려하여 A,B,C,D로 분류하였다(Fig. 3(g)). 토지이용도는 국토지리정보원에서 발간하는 1:25,000토지이용도를 이용하여 농경지, 삼림, 수면, 주거지역으로 분류하였다(Fig. 3(h)).

한편 Landsat TM 영상자료와 지형고도자료를 이용하여 육안으로 선구조를 추출하여 반경 약 1.41km의 원형격자 900개(25×36)의 격자망 내에 포함된 선구조의 수와 길이의 합을 이용하여 밀도도를 작성하였다(Fig. 3(i)). 연장성을 고려한 연장성밀도도(Fig. 4(a))는 대규모 선구조를 가중인자로 고려하여 각 격자망에 해당하는 선구조의 총연장 길이와 수, 교차점 수를 이용하여 밀도도를 작성하였다(김규범, 2005). 수문지질단위 분류도는 지하수 특성을 고려하여 수문지질학적으로 유사한 5개의 수문지질단위(Hydrogeologic unit)인 미고결퇴적물, 관입회성암류, 비다공질화산암, 다공질화산암, 변성암으로 재분류하여 작성하였다(Fig. 4(b)). 총적층 구성물질에 따른 분류도(Fig. 4(c))는 207개소의 시추자료 중 우세한 분포를 갖는 구성물질을 해당지점의 구성물질로

추정하여 작성하였는데, 이는 광범위한 연구지역에 비해 다소 부족한 자료를 이용하여 정성적인 분류를 실시하였다. 또한, 207개소의 시추자료 및 전기비저항 탐사를 통해 110개소의 기반암 심도추정자료를 이용하여 총적층 심도분포도(Fig. 4(d)), 풍화대 두께분포도(Fig. 4(e))를 작성하였다.

## 4. 분석처리 및 결과

### 1) 예측비율(Prediction Rate)

지하수 산출성을 정량적으로 검증하기 위해 지하수 부존가능성 지수(PI: Potential Index)를 구하였다. 부존가능성 지수는 식 (16)과 같이 WofE방법의 적용 결과 중 Weight값( $W^+$ ,  $W^-$ )을 각 요소에 대해 가중치를 1로 동일하게 주어 모두 더한 값이다.

$$PI = \sum W_i \quad (16)$$

전체 지하수 산출성을 나타내는 240개소의 우물자료 중 임의로 120개소의 우물을 선정하여 지하수 산출성도를 작성하여 Weight를 모두 합한 값을 등면적으로 재분류 하였다. 10 % 단위로 재분류한 결과도에 선정하지 않은 나머지 120개소의 우물 위치분포를 적용하여 WofE기법의 정확성을 검증하였다. 암반대수층의 경우, 상위 10 % 이상에서 38개소(31 %)가 존재하고 상위 30 %에서 92개소(76 %)의 우물이 존재함을 알 수 있었다. 총적대수층에서는 상위 10 % 이상에서 6개소(5.8%)가 존재하고, 상위 40 %에서 50개소(48 %)의 우물이 존재함을 알 수 있었다. 이러한 결과를 이용하여 예측비율(Prediction rate, Chung and Fabbri, 1999)을 작성하였다(Fig. 5). 예측비율의 기울기가 가파르고 곡선의 모양이 좌상으로 치우칠수록, 예측률이 높음을 나타낸다. 총적대수층의 경우 상위 30%까지 곡선의 기울기가 완만하며, 이후부터 기울기가 가파르게 상승한다. 암반대수층의 경우 상위 10%까지 곡선의 기울기가 가파르며, 좌상으로 치우쳐 WofE 방법을 이용한 예측이 총적대수층보다는 암반대수층의 결과가 정확함을 알 수 있다.

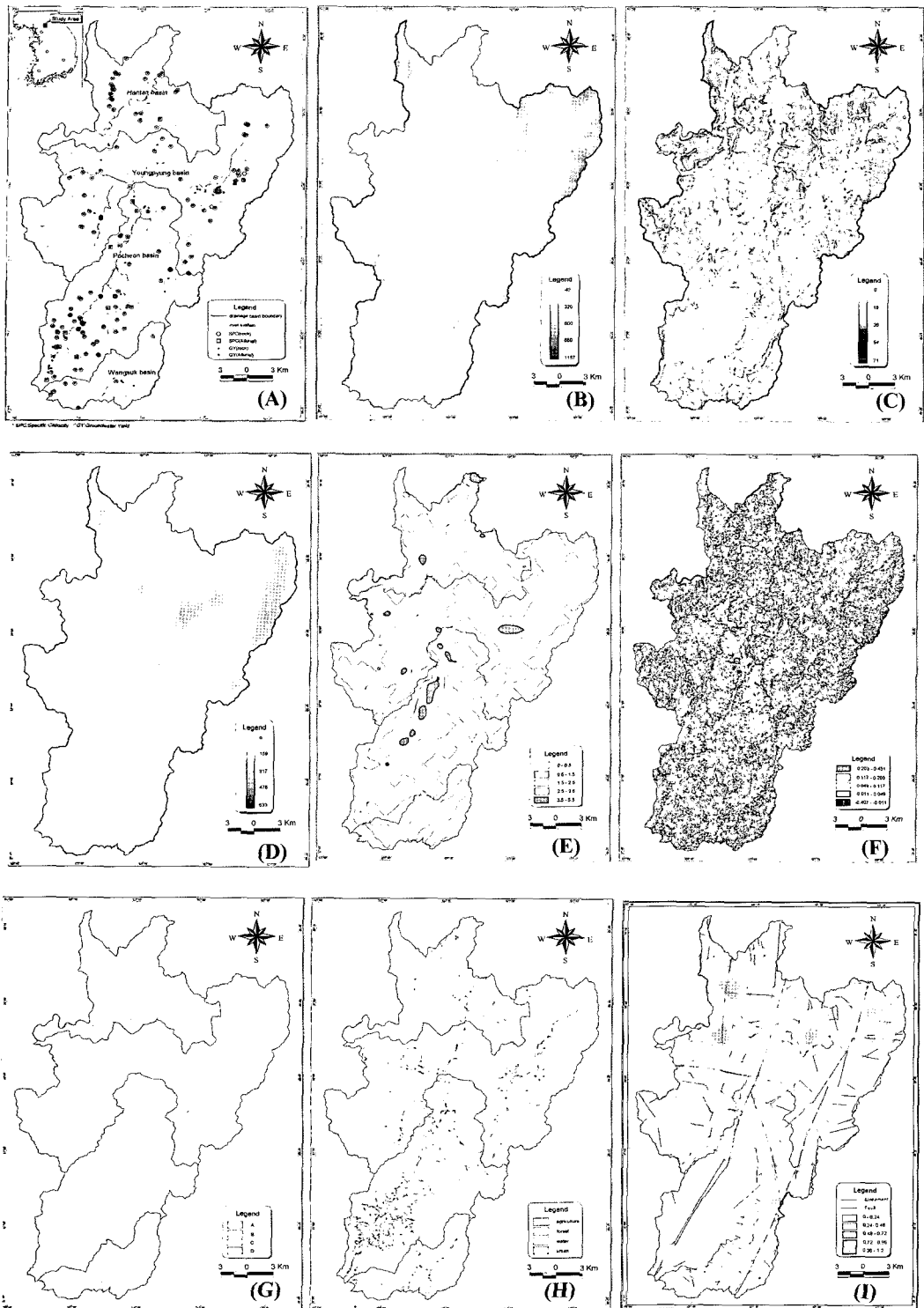


Fig. 3. (a) Groundwater yield location, (b) Digital elevation model, (c) Slope map, (d) DEM-difference map, (e) Drainage density map, (f) Vegetation map, (g) Soil map, (h) Landuse map, and (i) Lineament density map.

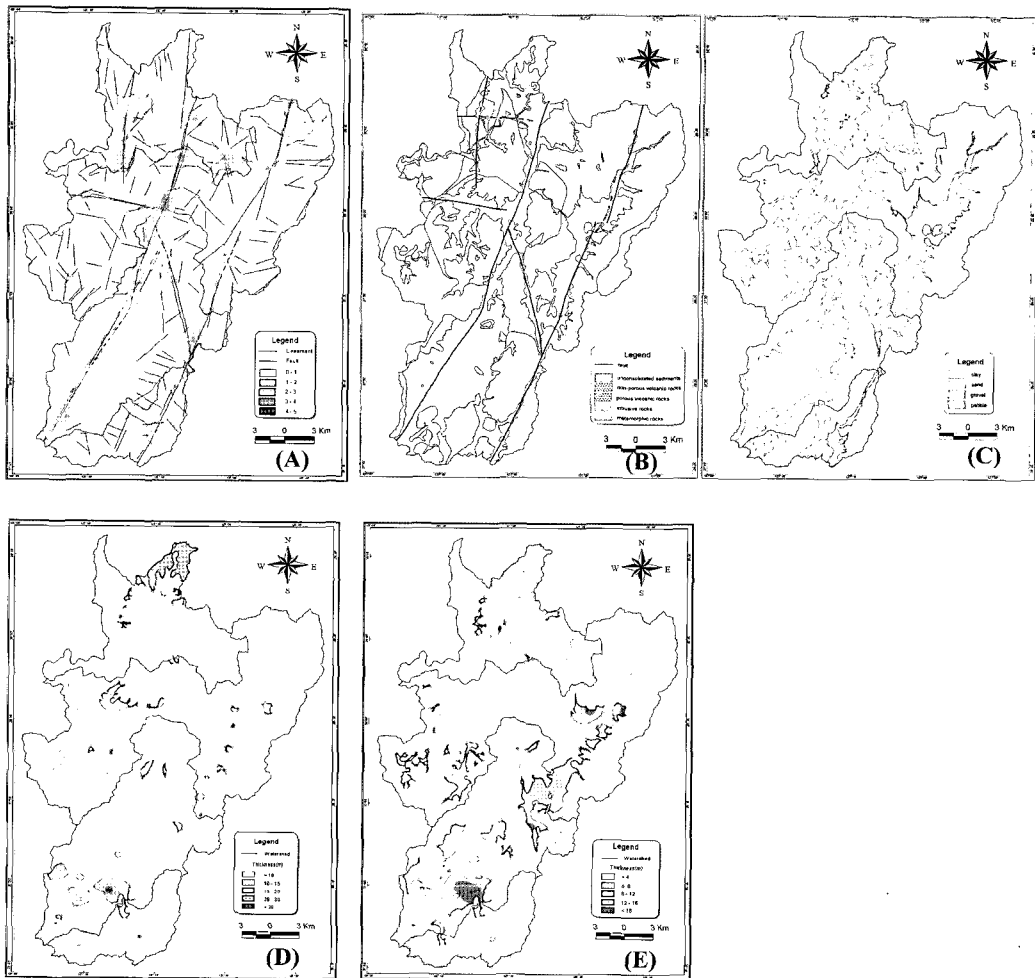


Fig. 4. (a) Lineament(Continuity)density map, (b) Hydrologic unit map, (c) Alluvium component map, (d) Alluvium thickness map, and (e) Alluvium weathering thickness map.

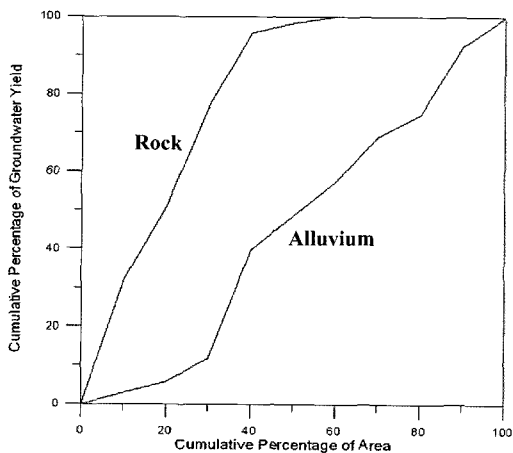


Fig. 5. Prediction rate for groundwater yield characteristics.

## 2) 조건부 독립 검증

지하수 산출성과 관련된 요소들 간의 관련여부를 판단하기 위해 WofE 방법의 가정인 조건부 독립이라는 귀무가설의 검증을 실시하였다. 요소들 간의 조건부 독립의 검증은 결과도 작성 시 관련 요소들을 사용할 것인지 아니면 제외시킬 것인지를 점검한다. 분할표로부터 계산된 카이제곱 값이 매우 크면 귀무가설은 기각된다.

본 연구에서 귀무가설의 분포는 자유도가 1이고, 유의수준 0.05에서 독립성 검증을 실시하였다(Table 1, Table 3). 유의수준 0.05이하이면 상관관계가 존재할 확률이 95%이상임을 의미한다.

Table 1. Calculated  $\chi^2$  values for testing conditional independence(Rock).

	Slope	Soil	Vegetation	Landuse	Drainage density	Hydro-geologic unit	DEM	Lineament density	DEM-Difference
Lineament(continuity)density	0.06	0	1.59	13.09	17.83	0.15	0.24	33.1	7.93
slope		14.78	26.09	0.14	19.96	40.4	6.38	0.95	4.67
Soil			6.99	1.28	1	13.45	0.27	7.71	9.1
Vegetation				7.27	11.81	12.7	3.81	0.87	0.06
Landuse					1.43	0.2	0.38	0.17	1.52
Drainage density						15.05	0.92	12.09	0.14
Hydrogeologic unit							6.14	4.57	23.2
DEM								2.69	1.84
Lineament Density									93.78

Table 2. Conditional independence test: table of probabilities(Rock).

	Slope	Soil	Vegetation	Landuse	Drainage density	Hydro-geologic unit	DEM	Lineament density	DEM-Difference
Lineament(continuity)density	0.1995	0.0377	0.7933			0.2973	0.3745		
Slope				0.2903				0.6699	
Soil				0.7424	0.6819		0.3943		
Vegetation								0.6485	0.1932
Landuse					0.7681	0.3458	0.4621	0.3170	0.7819
Drainage density							0.6630		0.2946
Hydrogeologic unit									
DEM								0.8990	0.8256

Table 3. Calculated  $\chi^2$  values for testing conditional independence(Alluvium).

	Landuse	Drainage density	DEM-difference	DEM	Vegetation	Slope	Weathering-thickness	Thickness	Composition
Soil	3.49	0.99	0.27	1.13	0.05	0.01	1.03	0.14	16.49
Landuse		0.07	0.19	0.78	0.96	1.21	0.01	0.02	6.85
Drainage density			0.22	4.90	0.07	0.00	2.51	3.97	0.73
DEM-difference				0.14	0.05	1.85	0.07	0.42	0.35
DEM					0.51	0.00	4.44	3.33	2.19
Vegetation						7.61	1.45	3.01	0.09
Slope							0.00	0.50	3.20
Weathering-thickness								48.53	8.55
Thickness									3.44

암반대수층의 경우 토양은 경사도, 식생은 경사도와 토양, 토지이용은 연장성을 고려한 선구조 밀도, 식생, 수계밀도에서는 연장성을 고려한 선구조 밀도, 경사도, 식생, 수문지질단위에서는 경사도, 토양, 식생, 수계밀

도, 지형고도에서는 경사도, 식생, 수문지질단위, 선구조 밀도에서는 연장성을 고려한 선구조 밀도, 토양, 수계밀도, 수문지질단위, 고도차에서는 연장성을 고려한 선구조 밀도, 경사도, 토양, 수문지질단위, 선구조 밀도가 서



Table 4. Conditional independence test: table of probabilities(Alluvium).

	Landuse	Drainage density	DEM-difference	DEM	Vegetation	Slope	Weathering-thickness	Thickness	Composition
Soil		0.6801	0.3999	0.7124	0.1835	0.0568	0.6899	0.2898	
Landuse		0.2119	0.3394	0.6240	0.6725	0.7292	0.0734	0.1043	
Drainage density			0.3620		0.2028	0.0536	0.8872		0.6085
DEM-difference				0.2913	0.1796	0.8260	0.2115	0.4818	0.4461
DEM					0.5241	0.0350			0.8612
Vegetation							0.7712		0.2412
Slope							0.0332	0.5218	

로 상관성이 있는 것을 확인할 수 있었고, 조건부 독립인 요소들에 해당하는 확률을 Table 2에 나타내었다.

충적대수층의 경우 토지이용은 토양, 지형고도는 수계밀도, 경사도는 식생, 풍화대 두께는 지형고도, 충적층 두께는 수계밀도, 지형고도, 식생, 풍화대 두께, 충적층 구성요소는 토양, 토지이용, 경사도, 풍화대 두께, 충적층 두께와 서로 상관성이 있는 것을 확인할 수 있었고, 조건부 독립인 요소들에 해당하는 확률을 Table 4에 나타내었다.

### 3) 산출능력평가 및 산출특성도 작성

연구지역의 지하수 산출성 분석결과와 우물 산출량 자료와의 상관성 분석을 통해 산출능력을 평가하고, 이 결과가 갖는 의미를 정량적으로 나타내고자 하였다. 암반대수층에서 비양수량에 대한 사후확률은 0.8~1.0의 범위에 집중되어있고, 비양수량에 대한 산출성은 SPC 값 0~20m<sup>3</sup>/day/m에 집중적으로 분포되어 있으며, 양

의 상관관계를 나타낸다(Fig. 6). 충적대수층의 경우도 역시 비양수량에 대한 사후확률이 0.8~1.0의 범위에 대부분 분포하고 있고, 비양수량에 대한 산출성이 양의 상관관계를 나타낸다(Fig. 7).

이러한 관계를 정량적으로 나타내면, 암반 대수층의 경우 지하수 산출확률이 0.13이하일 경우 150m<sup>3</sup>/day, 0.13~0.48일 경우 250m<sup>3</sup>/day, 0.48~0.83일 경우 350m<sup>3</sup>/day, 0.83이상일 경우 350m<sup>3</sup>/day 이상의 지하수 산출이 예상된다. 충적 대수층의 경우, 지하수 산출 확률 전체적으로 일정하게 230m<sup>3</sup>/day~260m<sup>3</sup>/day 정도의 지하수 산출이 예상된다. 상기 결과를 토대로 암반 대수층에 대한 지하수 산출특성도(Fig. 8(a))와 충적대수층에 대한 지하수 산출특성도(Fig. 8(b))를 각각 작성하였다.

충적대수층의 경우 요소들의 데이터베이스 구축 시 가용자료가 부족하여 좀 더 정확한 확률 값을 산출하기가 어려웠다. 지하수를 함유하는 대수층은 서로 연결되

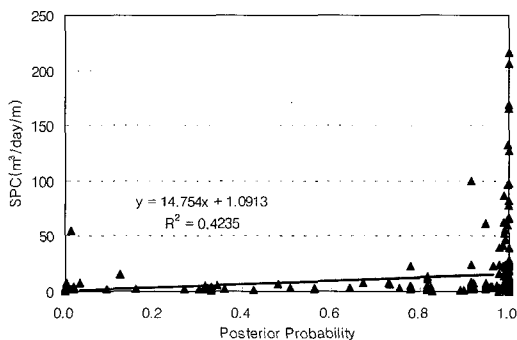


Fig. 6. Relationship between posterior probability and SPC: Rock.

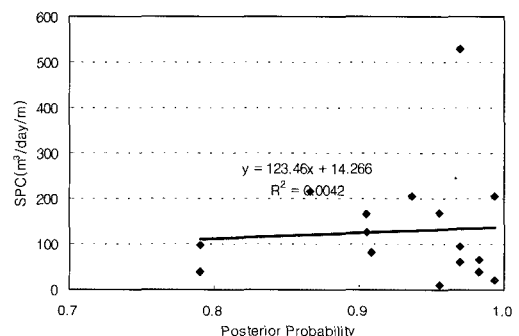


Fig. 7. Relationship between posterior probability and SPC: Alluvium.

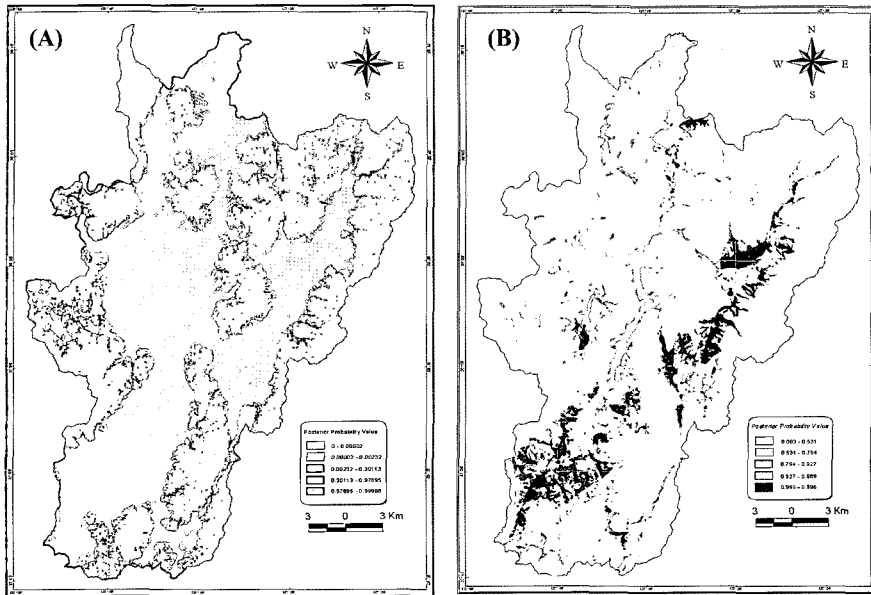


Fig. 8. Feasibility map of groundwater yield characteristics, as the posterior probability: (a) Rock zone, (b) Alluvium zone.

어있고, 항상 이동한다는 특성을 정확히 반영하지는 못했지만, 이러한 결과는 광범위한 지역의 불균질한 대수층 내에 존재하는 지하수 산출가능성을 공간적으로 예측할 수 있는 정보로 활용할 수 있다.

### 5. 결론

지하수 산출성과 관련된 수문지질학적 인자들에 대한 데이터베이스를 구축하고, 구축한 데이터베이스를 이용하여 Bayesian 확률방법인 WofE 방법을 이용하여 지하수 산출가능성 분석을 실시하였다. 또한, 작성한 산출가능성도의 검증에 위하여 예측비율(Prediction Rate) 및 조건부 독립검증(Conditional Independence)을 실시하고, 비양수량(SPC) 및 양수량 값을 이용하여 산출확률을 예상 지하수 산출량으로 나타내었다.

본 연구에 적용한 방법은 광역적인 지역의 지하수 부존 위치와 부존 규모를 파악하는 데 유용한 것으로 생각되나, 층적층 관련 자료는 현장 수질 자료 및 입력자료가 부족하여 유의미한 결과를 산출하기가 어려웠다. 또한 본 연구에서는 GIS 데이터베이스로 구축된 모든 입

력 자료를 대상으로 WofE기법을 적용하였으나 향후 본 기법을 적용하는 연구에서는 다양한 수문 입력자료의 적용 타당성에 대한 세부적인 검토가 필요하며, 자료의 추가 혹은 제거에 의한 산출가능성의 변화등에 대한 연구 및 예측결과에의 검증 기법에 대한 추가 연구 및 실험 적용이 필요할 것으로 생각된다.

### 사사

본 연구는 2005년도 한성대학교 교내연구비 지원에 의하여 수행되었음.

### 참고문헌

김규범, 2005. 지하수 관측망 최적 설계 및 시계열 자료 해석, 서울대학교 박사학위논문: 63-160.  
 김규한, 김옥준, 민경덕, 이운수, 1984. 추가령 지구대의 지질구조, 고지자기 및 암석학적연구. 광산지질, 17.

- 이병주, 김유봉, 이승렬, 김정찬, 강필중, 최현일, 진명식, 1999. 서울-남천점 지질도폭 설명서(1:250,000), 한국자원연구소.
- 한정상, 1998. 지하수 환경과 오염, 전영사, 107 p.
- Asadi, H. H. and M. Hale, 2001. A predictive GIS model for mapping potential gold and base metal mineralization in Takab area, Iran, *Computers & Geosciences*, 27: 901-912.
- Bonham-Carter, G. F., 1994. *Geographic Information Systems for geoscientist, modelling with GIS*, Pergamon Press, Oxford, 177-337p.
- Bonham-Carter, G. F., F. P. Agterberg, and D. F. Wright, 1989. *Weights of evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential* In: Agterberg FP, Bonham-Carter GF(eds) *Statistical Applications in the Earth Sciences*. Geological Survey Canada Paper 899: 171-183.
- Chung C. F. and A. G. Fabbri, 1999. Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65: 1389-1399.
- Harris, J. R., L. Wilkinson, L., and E. C. Grunsky, 2000. Effective use and interpretation of lithochemical data in regional mineral exploration programs: application of Geographic Information Systems(GIS) technology, *Ore Geology Reviews*, 16: 107-143.
- Robinson, G. P. and K. E. Kapo, 2004. A GIS analysis of suitability for constructing aggregate recycling sites using regional transportation network and population density features, *Resources, Conservation and Recycling*, 42: 351-365.