

《原著》

계층분석법(AHP)과 GIS를 이용한 고양시 일대의 지하수오염 관리우선순위 평가

이명진 · 현윤정* · 김영주 · 황상일

한국환경정책 · 평가연구원

Priority Assessment for Groundwater Contamination Management Using Analytic Hierarchy Process (AHP) and GIS Approach

Moung-Jin Lee · Yunjung Hyun* · Youngju Kim · Sang-Il Hwang

Korea Environment Institute

ABSTRACT

In this study, priority for groundwater contamination management was assessed based on regional vulnerability in Goyang-si area, Gyonggi-do, Korea using analytic hierarchy process (AHP) and geographic information system (GIS). We proposed a concept for regional vulnerability to groundwater contamination with using socio-environmental vulnerability factors, which can be classified into three properties including regional hydrogeological property, contamination property, and groundwater use property. This concept is applied to Goyang-si area. For AHP analysis, an expertise-targeted survey was conducted. Based on the survey, a total of 10 factors (criteria) and corresponding weights for regional vulnerability assessment were determined. The result shows that regional contamination property is the most weighted factor among the three property groups (hydrogeological property: contamination property: groundwater use property = 0.3: 0.4: 0.3). Then, database layers for those factors were constructed, and regional vulnerability to groundwater contamination was assessed by weighted superposition using GIS. Results show that estimated regional vulnerability score is ranged from 22.7 to 94.5. Central and western areas of Goyang-si which have groundwater tables at shallow depths and are mainly occupied by industrial and residential areas are estimated to be relatively highly vulnerable to groundwater contamination. Based on assessed regional vulnerability, we classified areas into 4 categories. Category 1 areas, which are ranked at the top 25% of vulnerability score, take about 2.8% area in Goyang-si and give a high priority for groundwater contamination management. The results can provide useful information when the groundwater management authority decide which areas should be inspected with a high priority for efficient contamination management.

Key words : Analytic Hierarchy Process (AHP), Geographic Information System (GIS), Groundwater contamination, Management priority, Regional vulnerability

1. 서 론

최근 물관리와 관련하여 경제 고도화, 기후변화, 재난/재해 등 환경을 위협하는 요소에 능동적으로 대처하기 위한 미래 물안보(water security) 확보가 중요한 이슈다. 특히 기후변화로 인한 가뭄 심화, 경제 성장에 따른 산업화 및 도시화, 구제역, 일본 원전사고 등 각종 재난·재해 발생 등의 환경여건의 변화는 지속가능한 양질의 수자원 확

보의 중요성을 부각시키면서 지표수에 비해 상대적으로 환경위협요소에 대한 안전성이 큰 지하수를 미래 핵심자원(key resource)으로서 재조명하게 되었다. 이러한 사회적, 자연환경적 변화에 대비하여 지하수자원을 효과적으로 보존·관리하기 위해서는 우선적으로 지하수의 수량과 수질을 위협하는 요소에 대한 지하수자원의 취약성평가가 필요하다.

우리나라 지하수 이용량은 연간 약 37억 톤으로 전체

*Corresponding author : yjhyun@kei.re.kr

원고접수일 : 2013. 6. 10 심사일 : 2013. 9. 16 게재승인일 : 2013. 9. 16

질의 및 토의 : 2013. 12. 31 까지

수자원 사용량의 약 10%를 차지하는데, 이는 지하수 개발가능량의 35% 수준이다. 산업화와 도시화에 따른 토지이용의 변화와 지하수의 수요증가는 지하수자원의 지역적 편중을 야기하고 가뭄, 홍수 등의 기후변화, 그에 따른 해수면 상승은 가용 지하수량에 영향을 미친다. Lee et al. (2010, 2011)은 기후변화에 따른 지하수 취약성평가의 일환으로 온도와 강우패턴의 변화에 따른 지하수 함양 모델을 개발하고 이를 활용하여 지하수자원을 평가하였다. 이외에도 기후변화에 따른 국내 지하수 수자원의 지속가능성에 대한 연구(Woo, 2013) 및 지역차원에서 기후변화에 의한 농업용수의 변화에 대한 연구(Song and Choi, 2012)가 수행된 바 있다.

한편, 산업의 발달과 국토 개발 등에 의하여 자연기원 및 인위적인 오염원에 의한 지하수 오염 문제가 대두되면서, 지하수의 수량 확보와 함께 지하수의 수질을 위협하는 요소에 대해 양질의 지하수를 유지·보전하는 것에 대한 관심이 증대되었다. 이에 지하수 수질을 효율적으로 관리하기 위하여 지하수 오염의 가능성이 높은 지역을 선별하기 위한 방법으로 지하수오염 취약성평가가 활용되고 있다. 지하수 오염취약성(groundwater vulnerability)은 1968년 J. Margat에 의해 처음 도입되었으며 1970년 M. Albinet에 의해 프랑스에서 최초의 취약성도가 제작되었다. 지하수오염 취약성은 오염물질의 특성에 관계없이 물의 이동만을 고려한 대수층 매질의 오염민감도를 나타내는 고유 오염취약성과 이와 함께 오염물질의 특성을 고려한 특정 오염취약성으로 평가한다(Lee and Kim, 1996; Lee et al., 2008). 국내에서도 토지이용, 잠재오염원, 대수층의 오염 민감도 등에 따른 고유 오염 취약성 또는 특정 오염취약성평가 연구가 수행된 바 있다(Woo, 1994; Lee and Choi, 1997; Jo et al., 1999; Ham et al., 2004; Lee et al., 2008; Kang and Park, 2010). 그러나 이러한 고유 오염취약성과 특정 오염취약성은 앞서 언급한 사회·환경적 여건 변화를 현실적으로 반영하지 못하는 한계가 있어 실제 지하수관리를 담당하는 지자체 공무원들이나 지하수 관련 정책결정론자들이 지하수 오염 관리우선순위를 결정하는 데에는 한계가 있다. 이에 본 연구는 지하수 오염관리와 관련된 정책 결정자나 지자체 담당자의 요구에 부합하는, 대수층 오염 민감도, 오염물질(또는 오염원)의 영향, 이용특성 등을 종합한 개념의 지역 지하수 오염 취약성을 정의하고, 이에 근거하여 경기도 고양시 일대 지역의 지하수 오염 관리우선순위를 선정하는 것을 목적으로 한다.

이를 위해 본 연구는 다음의 과정을 거친다. 첫째, 선행

연구 분석을 통해 기존의 지하수 취약성 분석의 개념과 취약성 분석 연구들을 살펴보고, 본 연구에서 사용할 지역취약성에 대한 정의를 제시한다. 둘째, AHP를 이용한 취약성 평가인자 및 가중치를 도출하여 지하수오염 지역취약성평가 방법을 마련한다. 셋째, 연구 지역인 고양시에 시범평가를 적용하기 위해 평가 지표에 대한 자료를 수집하고 GIS를 이용하여 공간정보화 과정을 거친다. 이에 AHP에 의해 도출된 가중치를 적용하고 지수중첩법을 이용하여 지역 취약성 지도를 작성한다. 마지막으로 지역취약도에 근거하여 경기도 고양시 일대에서의 지하수오염 관리를 우선적으로 수행하기 위한 대상지역을 선정, 제시한다.

2. 연구지역

연구지역은 서울특별시 인근의 경기도 북부 지역 중 1기 신도시를 포함하는 경기도 고양시 전역으로 행정구역상 일산 서구, 일산 동구 및 덕양구를 포함한다(Fig. 1). 1: 25,000 지형도 상으로는 고양, 일산, 김포, 계산, 공항 및 서울 도곡이 포함된다. 면적은 전체 267.36 km²이며 위도 37°00'00"~37°07'00", 경도 126°04'00"~127°00'00"으로 자연환경은 한강 하류에 위치하고 있으며 대부분 평지에 해당한다. 고양시의 남부는 화강편마암이며, 북동부는 결정편암으로 이루어져 있다. 또한 서부는 한강과 곡릉천(曲陵川) 연안에는 비교적 넓은 퇴적평야가 형성되어 있다. 이 지역은 신도시에 따른 시가지 지역 및 도심지 주변의 농업 등 인구 밀도 및 토지이용 현황이 다양한 지역이며, 도심지역에서는 상수도를 주로 이용하고 있는 반면, 농업 중심의 도심 외곽 지역은 상당량의 지하수를 농업용수 또는 생활용수로 사용하고 있다. 연구지역인 고양시의 지하수 개발이용시설은 약 9,000개 이상이고 지하수 이용량은 연간 약 1007.49 m³로, 지하수의 개발·이용이 활발하게 이루어지고 있다(MOLTMA and K-water, 2011). 2011년 고양시 지하수 정기검사 수질자료에 따르면 환경부 지하수 수질기준 항목 중 특정유해물질은 모두 불검출되었고, 일반오염물질 중 염소이온은 수질기준보다 훨씬 낮은 농도로 검출되고 있으며, 총대장균군수 항목은 극소수의 관정에서만 초과하는 것을 볼 수 있다. 반면, 질산성 질소 항목은 일부 관정에서 먹는물 수질기준(10 mg/L)을 초과하는 것으로 조사되었고, 생활용수 기준(20 mg/L)보다 높게 나타나는 관정도 있는 등 이 지역 지하수 수질 관리에 있어서 질산성 질소에 의한 오염관리가 중요한 것으로 파악된다(Fig. 2).

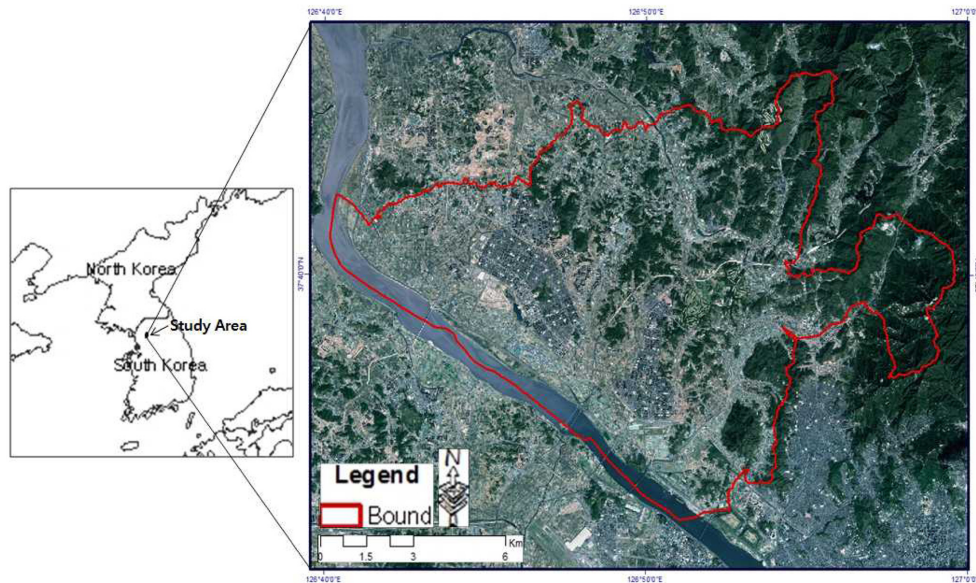


Fig. 1. Study area.

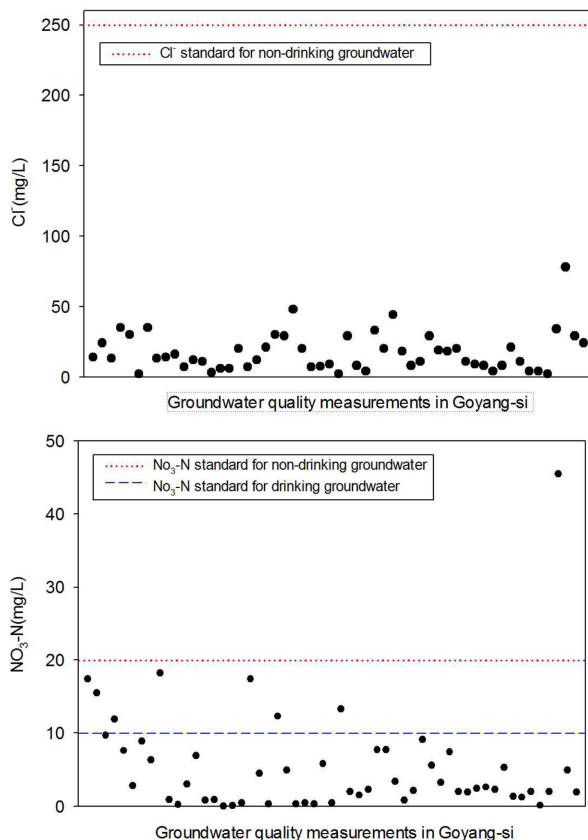


Fig. 2. Concentrations of Cl^- and $\text{NO}_3\text{-N}$ in groundwater samples in Goyang-si (2011).

한편, 이 지역에는 다양한 특정토양오염관리대상시설이 위치하고 있어, 이에 따른 지하수 오염 가능성이 존재한

다. 따라서, 이 지역의 지속가능한 지하수 이용을 위해 연구지역 내에 존재하는 특정토양오염관리대상시설 등의 인위적 또는 자연적 오염원에 의한 지하수 오염 취약성을 평가하고, 그 결과를 기반으로 한 지하수오염 관리우선순위 및 대책 마련이 필요하다.

3. 연구방법

3.1. 계층분석법

본 연구에서는 지하수오염 관리우선순위를 평가하기 위한 방법으로 광역적인 의미의 지하수오염 취약성에 근거한 AHP를 이용하였다. 행정 단위에서의 지역 지하수오염 취약성평가는 지금까지 수행되었던 고유 취약성평가 또는 특정 취약성평가와는 다른 개념이 필요하다. 기존의 고유 오염취약성이나 특정 오염취약성에서 다루는 오염의 현황, 오염원의 종류와 매질의 오염취약성 외에도, 행정 단위의 인문·사회학적 인자, 예를 들어 인구밀도, 생태자연도, 지하수 이용량 등을 고려한 다차원적 접근(multi-dimensional approach) 방법이 필요하다.

AHP는 1970년대 초 Saaty에 의해 개발된 다기준 의사결정모델(multi-criteria decision making model)로서 의사결정 프로세스를 체계적으로 분석하고, 여러 평가인자의 가중치를 쌍대비교(pairwise comparison)에 의하여 단계적으로 도출함으로써 대안들에 대한 합리적 평가를 지원하는 방법이다. AHP의 일반적인 적용과정은 Fig. 3에 나타

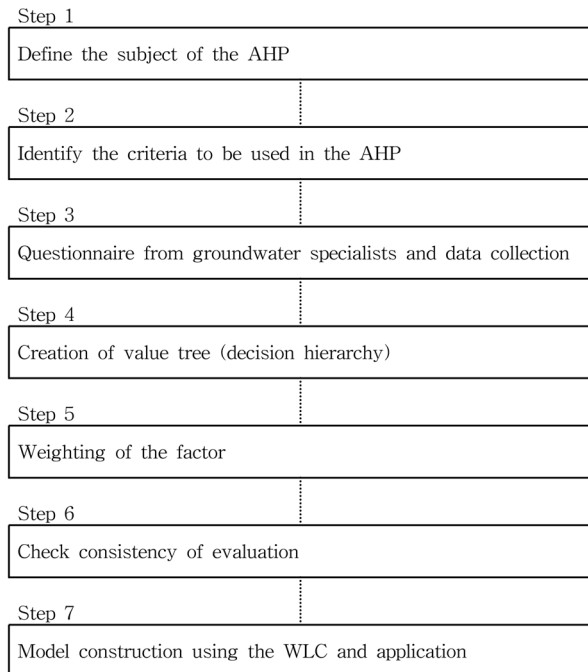


Fig. 3. AHP procedure (Kim et al., 2009).

낸 바와 같다. AHP기법은 의사결정의 평가기준이 다양하고 복합적인 다기준(multi-criteria) 의사결정이 필요한 경우에 널리 이용되고 있다. 본 연구에서는 지하수 오염특성(오염(원) 인자), 지역 매체특성(지역 매체인자), 지하수 이용특성(이용인자)의 세 가지 특성을 고려한 지역 지하수오염 취약성 평가인자에 대하여 AHP를 적용하였다. 본 연구에서 제안하는 지역 지하수오염 취약성평가에 기반한 AHP기법은 오염취약성 영향 요인(오염(원), 지역매체 및 이용 인자)을 일괄 분석하여 과학적이고 정량적인 정책 수립 및 행정 효율화를 지원할 수 있다.

3.2. 지역 지하수오염 취약성평가

지하수오염 취약성은 대수층의 특성을 의미하며, 일반적으로 고유 오염취약성(intrinsic vulnerability)과 특정 오염취약성(specific vulnerability)이 있다. 고유 오염취약성이란 지하수 유동계에 의하여 지배를 받는 대수층의 민감도를 의미하며, 이는 대수층의 수리지질학적 특성 등에 의해 달라진다. 특정 오염취약성이란 대수층의 수리지질학적 특성 뿐 아니라, 대수층에 대한 오염원의 상대적인 위치, 오염원의 형태와 특성을 고려한 오염취약성을 말한다. 즉, 특정 오염취약성은 고유 오염취약성을 갖는 대상 지역에서의 특정 오염원의 특성에 의하여 정해지는 오염취약성을 의미하며 일반적으로 고유 취약성평가에 비해 보

다 많은 입력 자료가 필요하다(Gogu and Dassargues, 2000).

지하수 오염관련 정책 결정자들이 수자원 관리 관점에서 오염취약성을 평가할 때에 고유 오염취약성과 특정 오염취약성 중 어느 개념으로 접근해야 할지 어려움을 겪는 경우가 많은데(Kim, 2008), 일반적으로 지역의 종합적인 환경관리방안 수립을 위해서는 고유 취약성평가를 수행하는 것이 바람직하고 특정 오염물질 배출 시설의 관리를 고려한 지하수오염 취약성평가를 위해서는 특정 취약성평가를 수행한다. 그러나 정책결정자 및 지하수 관련 행정 담당자 입장에서는 지하수 관리 단위에서의 수리지질학적 특성, 오염원특성, 이 외에도 지하수 이용특성 등 여러 사회·자연 환경적 요소를 복합적으로 고려한 지하수오염 취약성 평가방법이 필요하다.

본 연구에서는 전술된 기존 오염취약성의 개념이 아닌, 지하수 오염에 대한 자연환경과 사회환경의 취약성을 아우르는 광역적인 의미의 지하수 오염취약성으로 “지역 지하수오염 취약성”을 정의한다. 지역취약성(regional vulnerability)이란 지하수오염 관리와 관련된 대수층 관리, 오염물질 관리, 지하수 이용 관리 등을 복합적으로 고려하여 대수층의 오염 민감도, 오염물질(또는 오염원)의 환경영향, 지하수 이용의 위해도 등을 종합한 개념이다(Fig. 4). 지역 취약성에서 고려하는 오염특성은 해당지역의 점 오염원과 지역오염 현황 특성에 따른 지역의 상대적 위해도 수준을 나타내는 특성이고, 지역(매체)특성은 지역에 따른 오염물질의 상대적 확산 및 이동성에 영향을 미치는 인자를 파악하기 위한 것이다. 이용 특성은 지하수오염에 노출되어 영향을 받게 되는 인체 및 생태계를 고려하기 위한 인자이다. 지역 지하수오염 취약성은 정책 결정자나 지자체 담당자의 요구에 부합하는 개념으로 본 연구에서는 이를 연구지역에 적용하여 지하수오염 취약성평가를 수행하였다.

4. 연구결과

4.1. 관리우선순위 평가인자 및 가중치 결정

관리우선순위를 평가하는 첫 단계(Level 1)의 평가인자는 지역 매체특성, 오염특성과 지하수 이용특성을 고려하였고, 각 특성 평가인자에 대한 두 번째 단계(Level 2)의 평가인자를 선정하였다. 지역 매체특성인자는 지하수면 심도, 순 지하수 함양량, 대수층 매질, 토양매질, 지형경사율, 비포화대 매질영향, 대수층의 수리전도도 7개 인자로 선정하였고, 오염 특성은 오염원, 지역오염 현황 2개로 선정

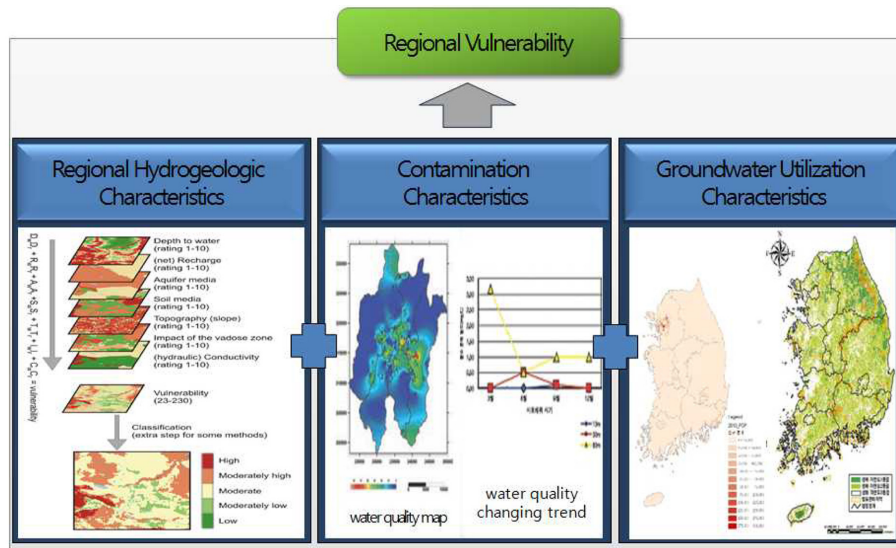


Fig. 4. Conceptual scheme of regional (groundwater contamination) vulnerability based on socio-natural environmental factors.

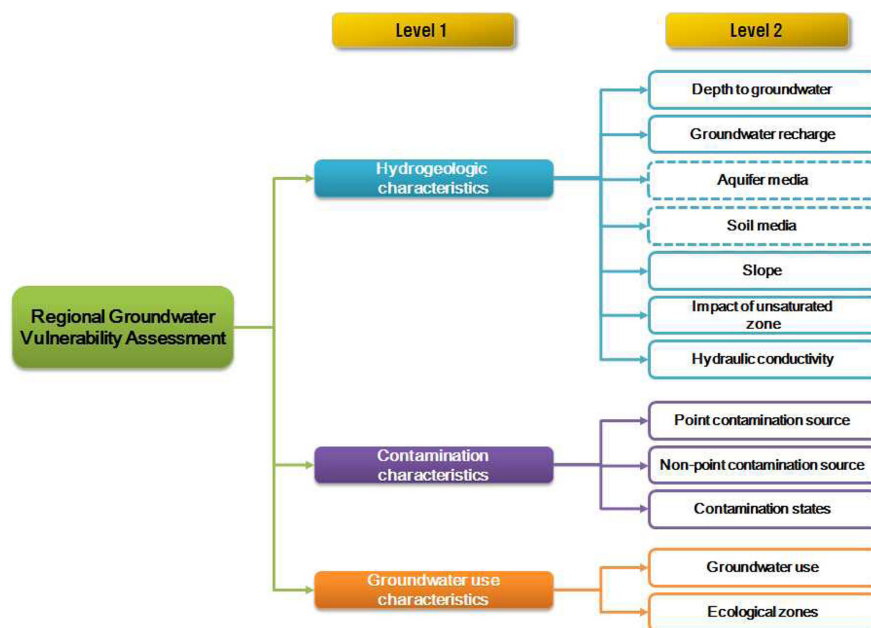


Fig 5. Hierarchical value tree using primary(Level 1) and secondary(Level 2) factors for regional groundwater contamination vulnerability.

하였다. 마지막으로 지하수 이용특성은 지하수이용량 및 생태자연도를 선정하였다(Fig. 5).

평가인자의 가중치 결정은 토양·지하수 관련 업무를 담당하고 있는 학계, 관계, 민간 및 관련 기관 전문가 등 총 75명을 대상으로 설문조사를 실시하였다. 설문내용은 계층별 지하수오염 취약성 평가인자에 대한 상대적 중요도를 판단하도록 구성하였으며 평가인자 간의 쌍대비교(pairwise comparison)를 수행하였다. 설문분석은 각 평가

인자 간의 상대적 중요도, 일관성지수(Consistency Index, CI)를 분석하였으며, 쌍대비교는 Saaty의 9점 척도를 이용하였다(Table 1).

AHP기법을 활용하여 Level 1에서는 3개의 평가인자, 지역 매체특성(F_1), 오염특성(F_2) 및 지하수 이용특성(F_3)과, 11개의 Level 2 평가인자에 대해서도 9점 척도의 쌍대비교를 수행하였다(Fig. 6). 쌍대비교에 의한 평가인자(F_{ij})에 대한 가중치(W_{ij})는 다음 식에 의해 구한다.

1. Which category of requirements is more important for the comparison of groundwater quality management priority, and to what degree?

Criteria	← extremely important								equally	→ extremely important								Criteria
Hydro-geology	⑨	⑧	⑦	⑥	⑤	④	③	②	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	Contamination
Hydro-geology	⑨	⑧	⑦	⑥	⑤	④	③	②	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	Groundwater use
Contamination	⑨	⑧	⑦	⑥	⑤	④	③	②	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	Groundwater use

2. Evaluate the relative importance of each secondary factor for groundwater quality management priority.

1	Depth to groundwater	-----	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨
2	Groundwater recharge	-----	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨
3	Aquifer media	-----	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨
4	Soil media	-----	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨
5	Slope	-----	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨
6	Impact of unsaturated zone	-----	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨
7	Hydraulic conductivity	-----	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨
8	Point contamination source	-----	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨
9	Non-point contamination source	-----	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨
10	Contamination status	-----	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨
11	Groundwater use	-----	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨
12	Ecological zones	-----	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨

Fig. 6. Questionnaire sheet for primary and secondary factors used in this study.

Table 1. The 9-point scale for pairwise comparisons by Saaty (1980)

Point	Definition
1	Equally important or preferred
3	Moderately important or preferred
5	Strongly important or preferred
7	Very strongly important or preferred
9	Extremely important or preferred
2, 4, 6, 8	Intermediate values to reflect compromise.
Inverse Number	Used when the second criterion is dominant.

$$W_{ij} = \frac{\tilde{R}_{ij}}{\sum_{i=1}^n \tilde{R}_{ij}} \quad (1)$$

여기서, $\tilde{R}_{ij} = (R_{i1}, R_{i2}, \dots, R_{in})^{1/n}$ 는 i 인자에 대한 j 인자의 상대중요도 점수(R_{ij})의 기하평균이다. 상대중요도 점수는 쌍대비교 설문조사 결과로 얻을 수 있다. 쌍대비교 분석과정에 대해서는 Kim et al.(2009)에 자세하게 설명되

어 있다. AHP 결과 도출된 가중치에 대한 일관성 신뢰도를 평가하기 위해 일관성지수와 랜덤일관성지수(Random consistency Index, RI)와의 비인 일관성비(Consistency Ratio, CR = CI / RI)를 계산하였다. Saaty에 의하면 인자수가 2개이면 RI는 0, 3개면 0.58, 7개면 1.32이다. CI가 0.1 이하인 경우 설문응답자의 일관성을 신뢰할 수 있고, 0에 가까울수록 일관성에 대한 신뢰도가 크다고 알려져 있다. Level 1 평가인자의 경우 CR은 0.0074로 계산되었고, Level 2 평가인자들에 대해서는 지역 매체특성 세부인자에 대해 0.0059로 모두 설문 응답을 신뢰할 수 있는 것으로 판단된다.

쌍대비교 분석결과, Level 1 평가인자의 상대적 가중치를 살펴보면, 지하수수질 관리 우선순위를 결정하는 데에 있어서 지역의 오염특성이 매체특성과 지하수 이용특성보다 높은 가중치를 가지는 것으로 계산되었다(Table 2). Level 2 평가인자들의 가중치는 Table 3에 제시한 바와 같다. 오염특성은 오염의 위해도 수준을 나타내는 관련 인자들을 포함하고 있어 지하수오염 취약성평가에 있어 가장 큰 영향을 미칠 것으로 판단하고 있음을 알 수 있다.

Table 2. Weights of the primary factors at Level 1

Factors	F_1	F_2	F_3	Weight	CI	CR
Hydrogeologic characteristics	F_1	1	0.760	1.426	0.337	0.0043
Contamination characteristics	F_2	1.316	1	1.423	0.404	
Groundwater use characteristics	F_3	0.701	0.703	1	0.259	

where, CI: consistency index; CR: consistency ratio

Table 3. Matrix and weights (W_{ij}) of the secondary criteria and consistency index (CI)

F_1 (Factor 1: Hydrogeologic characteristics)										
	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{14}	F_{15}	F_{16}	F_{17}	W_{1j}	CI	CR
F_{11}	1.000	1.519	0.700	0.610	1.769	0.718	0.575	0.122	0.0078	0.0059
F_{12}	0.658	1.000	0.564	0.595	1.488	0.717	0.580	0.102		
F_{13}	1.428	1.774	1.000	1.355	2.338	1.566	0.822	0.190		
F_{14}	1.640	1.681	0.738	1.000	2.239	1.301	0.946	0.174		
F_{15}	0.565	0.672	0.428	0.447	1.000	0.478	0.452	0.075		
F_{16}	1.392	1.395	0.639	0.769	2.091	1.000	0.616	0.140		
F_{17}	1.739	1.725	1.217	1.057	2.212	1.624	1.000	0.198		

F_2 (Factor 2: Contamination characteristics)					
	F_{21}	F_{22}	W_{2j}	CI	CR
F_{21}	1.000	1.518	0.603	0.000	-
F_{22}	0.659	1.000	0.397		

F_3 (Factor 3: Groundwater use characteristics)					
	F_{31}	F_{32}	W_{3j}	CI	CR
F_{31}	1.000	1.940	0.660	0.000	-
F_{32}	0.515	1.000	0.340		

where, W_{ij} : weights for F_{ij} ; CI: consistency index; CR: consistency ratio

또한, 지하수오염 취약성평가를 위해서는 지하수 이용특성보다는 대수층 내 오염물질의 확산 및 이동에 관련된 지역 매체특성이 약간 더 중요하게 생각하는 것으로 나타났다. Level 2의 경우에는 지역 매체특성에 해당하는 7가지 인자 중에서 대수층의 수리전도도의 가중치가 가장 높았으며, 다음으로는 대수층매질, 토양매질, 비포화대 매질 영향, 지하수면 심도, 순 지하수 함양량, 지형 경사율 순으로 나타났다. 전문가들은 지역특성 중에서는 오염의 확산이나 이동에 더 큰 영향을 미치는 요인으로 대수층 수리전도도와 대수층 매질을 선택한 것으로 판단된다. 오염특성에 해당하는 2가지 인자인 오염원 및 지역오염 현황에 대한 비교에서는, 오염원이 지역오염 현황보다 높은 가중치가 계산되었다. 마지막으로 지하수 이용특성에서는 지하수이용량이 가장 큰 가중치 값을 나타내고 있으며 생태자연도와 큰 차이를 나타내었다.

설문조사 시 기타의견으로 대부분의 전문가들은 지하수오염 취약성평가에 있어 우선 지역 매체특성 Level 2 인자 중 성격이 중첩되거나 국내 대수층에 적용할 필요가 있는 인자들을 고려하여 인자를 재설정할 필요가 있음을 지적하였다. 또한 오염원을 점오염원과 비점오염원으로 구분하여 접근할 필요성과 점오염원에 의한 위해가 비점오염원보다 더 중요하다는 의견도 제시하였다.

4.2. 지역 오염취약성에 기반한 관리우선순위 결정

4.2.1. 평가인자 공간데이터베이스 구축

지하수오염 취약성평가를 위하여 전술된 AHP 방법에서 선정한 지역 매체특성, 오염특성 및 지하수 이용특성에 대한 자료를 수집하여 GIS로 전환하여 최종적으로 Grid형태의 공간 데이터베이스를 구축하였다(Fig. 7). 본 연구에서는 AHP방법에서 설문조사 시 선정한 평가인자

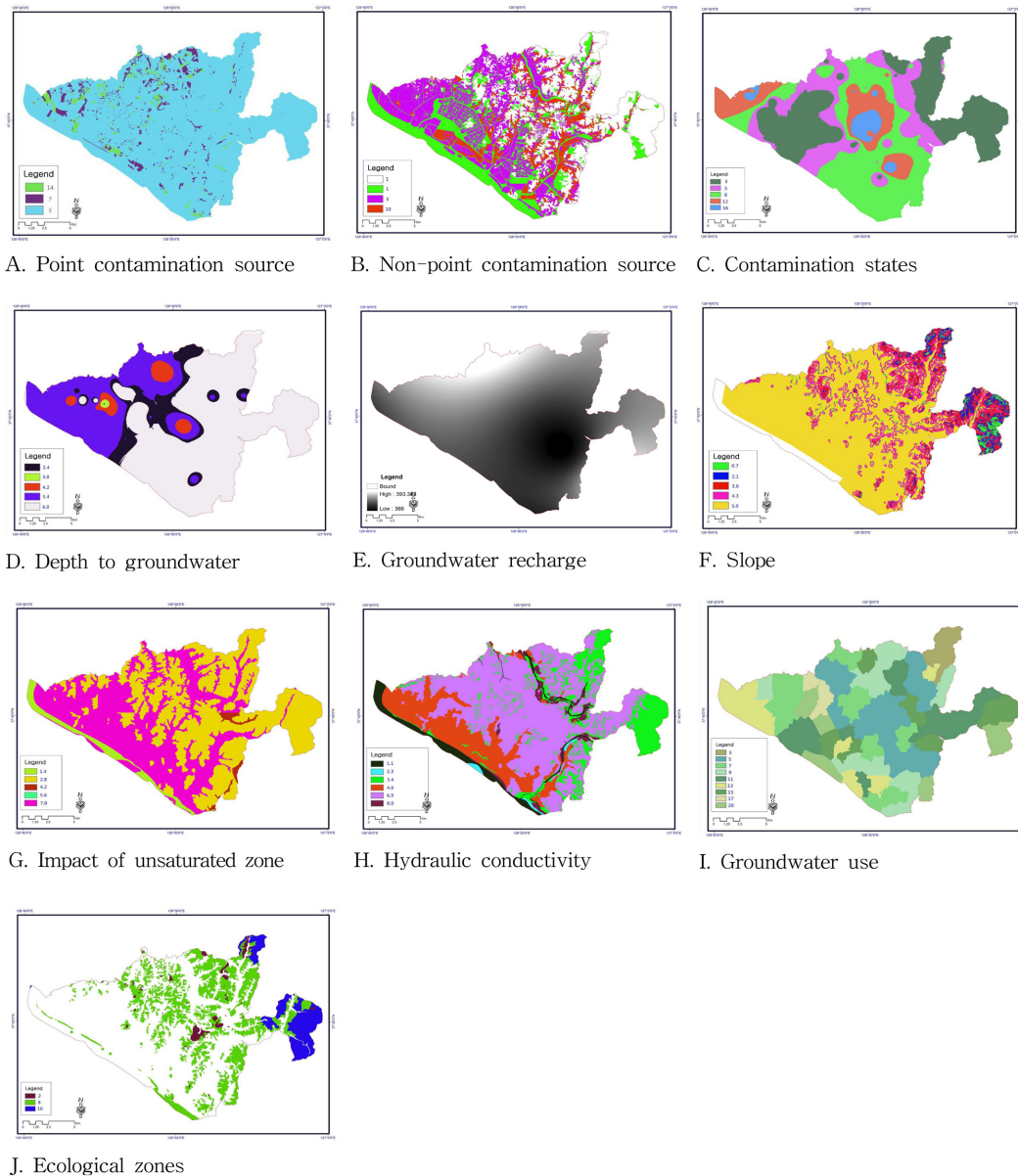


Fig. 7. GIS-based data maps for regional groundwater contamination vulnerability.

에 대한 자료의 가용성을 높이고 보다 실효성있는 오염 취약성평가 결과도출을 위해 전문가 회의를 통해 지역 매체특성과 오염특성에 해당하는 Level 2 인자와 가중치를 재선정하였다. 지역 매체특성에 대한 인자는 대수층의 수리전도도와 밀접한 관계가 있는 대수층매질인자와 토양층이 얇은 국내 대수층 여건을 고려하여 토양매질 인자를 제외하고 총 5개의 인자(지하수면 심도, 순 지하수함양량, 지형경사율, 비포화대 영향, 수리전도도)를 선정하고 각 인자에 대한 공간자료를 구축하였다. 오염특성의 Level 2 인자 중 하나인 오염원 인자를 토양오염관리대상시설이

포함되는 점오염원과 그 외의 비점오염원 인자를 구분하여 오염특성 Level 2 인자는 점오염원, 비점오염원, 현 지하수수질 상황의 3개의 인자에 대해 공간자료를 구축하였다. 선정된 인자들에 대한 자료는 전문기관으로부터 수집하여 GIS 자료 형태로 변환 및 전처리 작업을 수행하였다(Table 4). 지역 매체특성 중 지하수면 심도 및 순 지하수함양량은 지하수 관측 자료 및 기상청에서 운영 중인 무인자동기상관측장비(Automatic Weather Station, AWS) 자료 등의 Point 자료를 공간보간법을 활용하여 구축하였다. 경사의 경우 수치지도를 활용하여 등고자료를

Table 4. Data types and sources of primary (Level 1) and secondary (Level 2) factors for groundwater vulnerability assessment

Primary factors	Secondary factors	Data Type	Data Source
Hydrogeologic characteristics	Depth to water	Point/Grid	Observation data of groundwater in Goyang-si area
	Groundwater recharge	Point/Grid	National Groundwater Information Management and Service Center
	Slope	Grid	Numerical map
	Unsaturated zone medium effect	Polygon	Geologic map
	Hydraulic conductivity	Polygon	Soil map
Contamination characteristics	Point pollution source	Point/Grid	Distribution map of contamination in Goyang-si area
	Non-point pollutant source	Polygon/Grid	Land Cover Map
	State of regional contamination	Polygon/Grid	Measurement station of regional groundwater quality of Ministry of Environment
Groundwater use characteristics	Use of groundwater	Grid	Observation data of groundwater in Goyang-si area
	Ecological zoning map	Polygon	Ecological zoning map

Table 5. Ranges and weights for primary and secondary factors used in this study

Level 1	Level 2	Subdivision and grade	Grade	Weighted input factors
Hydrogeologic characteristics (0.3)	Depth to groundwater (m) (0.06)	< 5	—	6
		5 ≤ and < 10		5.4
		10 ≤ and < 20		4.2
		20 ≤ and < 30		3
		30 ≤ and < 50		2.4
		50 ≤ and < 100		1.8
		100 ≤ and < 200		1.2
		200 ≤ and < 350		0.6
	Groundwater recharge (mm/month) (0.04)	< 5	—	4
		5 ≤ and < 10		3.2
		10 ≤ and < 20		2.4
		20 ≤ and < 30		1.2
		30 ≤ and < 50		0.4
	Slope (°) (0.05)	< 5	—	5
		5 ≤ and < 13		4.3
		13 ≤ and < 21		3.6
		21 ≤ and < 29		2.1
		29 ≤		0.7
		very good		7
		good		5.6
	Impact of Unsaturated zone (0.07)	slightly good	—	4.2
		slightly poor		2.8
		poor		1.4
		very poor		0.7
		0.01 ≤		8
	Hydraulic conductivity (m/day) (0.08)	0.001 ≤ and < 0.01	—	6.9
		0.0001 ≤ and < 0.001		4.6
		1E10-5 ≤ and < 0.0001		3.4
		1E10-6 ≤ and < 1E10-5		2.3
		< 1E10-6		1.1

Table 5. continued

Level 1	Level 2	Subdivision and grade	Grade	Weighted input factors
Contamination characteristics (0.4)	Point contamination source (number) (0.14)	30 ≤	H	14
		15 ≤ and <30	M	7
		10 ≤ and <15	L	3
		< 10	–	3
		residential area	M	5
		a manufacturing area	H	10
		commercial area	M	5
		recreational facilities area	L	1
		trafficked areas	L	1
		public facilities area	L	1
	Non-point contamination source (0.10)	paddy	M	5
		field	H	10
		growing in plastic house area	H	10
		orchard	M	5
		other plantation area	M	5
		broadleaf	L	1
		coniferous	L	1
		mixed forest	L	1
		natural grasslands	L	1
		golf course	M	5
		other grassland	L	1
		inland wetlands	L	1
		coastal wetlands	L	1
		mining area	M	5
		bare ground	L	1
		inland waterways	L	1
		marine	L	1
		10.0 ≤		16
		8.5 ≤ and < 10.0		12
	Contamination status (mg/L) (0.16)	6.0 ≤ and < 8.5	–	8
		3.0 ≤ and < 6.0		5
		< 3.0		3
Groundwater use characteristics (0.3)	Groundwater use (m ³ /year) (0.20)	960,000 ≤ and < 1,430,000		20
		550,000 ≤ and < 960,000		17
		300,000 ≤ and < 550,000		15
		230,000 ≤ and < 300,000		13
		160,000 ≤ and < 230,000		11
		11,000 ≤ and < 160,000		9
		60,000 ≤ and < 110,000	–	7
		20,000 ≤ and < 60,000		5
		720 ≤ and < 20,000		3
		grade 1 or separate management area		10
	Ecological Zones (0.10)	grade 2		8
		grade 3		2
		no grade		0

TIN (Triangular Irregular Network) 구조로 변경하여 구축하였다. 또한 비포화대 매질영향 및 수리전도도의 경우 지질도 및 토양도의 Polygon 자료를 재분류하여 활용하였다. 오염특성의 경우 점오염원은 고양시에서 제공받은 오염원자료(골프장, 교통관련시설, 위험물시설, 유독물시설, 축산폐수 배출·처리시설, 폐기물 보관·처리시설, 폐수 배출·처리시설, 하수처리시설의 8종)를 Point 자료로 구축하였다. 연속지적도상의 경계 Polygon에 고양시 점오염원 위치를 중첩하여 각 Polygon이 포함하는 점오염원의 개수를 등급으로 구분하여 작성하였다. 비점오염원은 토지피복지도에 기반하여 토지용도에 따라 상(H), 중(M), 하(L) 등급으로 구분하였다. 지역오염 현황은 환경부 지역지하수수질측정망 자료 중 일반지역의 지하수수질 자료를 바탕으로 제작되었다. 앞에서도 언급했듯이 2011년 고양시 지하수 수질자료를 보면 특정유해물질의 경우 모두 검출이 되지 않았고, 질산성질소가 이 지역 지하수수질의 주요 관리항목이므로 본 연구에서는 2011년 질산성질소 농도자료를 이용하여 지하수 오염현황을 5개의 등급으로 구분하였다. 지하수 이용특성 중 지하수이용량 관련 정보는 고양시에서 획득된 정보를 바탕으로 처리하였다. 행정구역별 지하수 이용량 정보를 획득하여 읍·면·동 단위로 구축하였다. 생태자연도는 1, 2 3등급별 구성도를 활용하여 작성하였다.

4.2.2. 지역 오염취약성 및 관리우선순위 평가

본 연구에서는 전술한 바와 같이 지하수 전문가를 대상으로 하여 선정한 지하수 관리우선순위 선정을 위한 평가인자들에 대한 자료를 GIS로 구현하고, AHP기법과 전문가 회의를 통해 결정된 가중치를 적용하여 지수중첩기법으로 개발한 지하수오염 취약성 평가모델을 연구지역에 적용하였다. 본 연구에서 지역 오염 취약성평가에 사용된 Level 1, Level 2 평가인자들의 가중치와 Level 2 세부 평가인자들의 범위에 따른 가중치를 백분율(Level 1 - 유효숫자 1자리; Level 2 - 유효숫자 2자리)로 Table 5에 표시하였다. 지수중첩기법으로 계산된 지역취약성 지수를 이용하여 최종적으로 5 m × 5 m의 공간해상도를 가지는 지역 지하수오염 취약도를 작성하였다. 연구지역의 지하수 오염취약성 가중치 합은 22.7~94.5의 범위를 보인다. 가중치를 각 요인에 부여하여 계산한 지역취약성 지수 결과 값을 25% 등간격으로 하여 오염취약도가 높은 순서대로 1, 2, 3 및 4등급 지역으로 나누었다. 각 등급별 취약도 범위는 Table 6에 정리한 바와 같다. 취약성 지수가 높다는 것은 낮은 지역과 비교하여 상대적으로 지하수오

Table 6. Classification of regional vulnerability scores into 4 categories and areal ratios of each category in Goyang-si area

Category	Grade interval	Area (km ²)	Ratio (%)
1	22.7 ~ 40.7	7.41	2.80
2	40.7 ~ 58.6	90.48	34.23
3	58.6 ~ 76.6	100.63	38.07
4	76.6 ~ 94.5	65.78	24.89

Table 7. Statistical summary for NO₃-N concentrations in each category

Category	Mean (mg/L)	Minimum (mg/L)	Maximum (mg/L)	Number of data
1	4.7	0.30	18.0	9
2	4.0	0.20	13.3	16
3	8.2	0.05	45.5	20
4	3.3	0.10	12.3	9

염의 개연성이 높은 지역을 의미하며, 이러한 지역은 지하수 관리에 있어서 우선적으로 관심을 기울일 필요가 있는 지역이다. 따라서, 취약도가 높은 1등급으로 분류된 지역은 지하수오염과 관련하여 가장 우선적인 관리대상지역이고 4등급이 상대적으로 우선순위가 낮은 지역이 된다.

이와 같이 오염취약도에 근거하여 관리등급을 부여하고, 고양시 일대의 지하수오염 관리를 위한 우선순위지역도를 작성하였다(Fig. 8). 연구지역의 경우 취약성이 가장 높은 1등급은 전체 면적비율의 2.80%를 차지하고 있으며 상대적으로 가장 안전한 4등급은 24.89%이다. 2011년도 지하수 수질자료를 이용하여 등급별 지하수수질 자료의 통계를 비교하여 보면(Table 7), 질산성질소의 경우, 1, 2등급 지역은 각각 평균 4.7 mg/L, 4.0 mg/L이고 4등급은 3.3 mg/L로 관리 우선지역인 1등급 지역의 질산성 질소 평균 농도가 가장 높은 것으로 나타났다. 3등급인 경우에는 관리우선순위가 세 번째 등급임에도 불구하고 평균 8.2 mg/L로 매우 높은 질산성질소 농도를 보이며, 이 지역에는 총 20개의 데이터 중 먹는물 수질기준 10 mg/L을 초과하는 관정이 5개나 있는 것으로 나타났다. 한편, 다른 오염물질 항목에 대해서는 위에서 언급했듯이 지하수수질 현황자료에서 특정오염물질이 모두 검출되지 않았고 총대장균군도 극히 일부인 2지점을 제외하고는 모두 검출되지 않아 등급별 통계자료를 제시할 수 없었다. 본 연구결과에서 주의해야할 점은 연구에서 얻은 관리우선순위 등급은 지하수 수질기준 항목의 모든 오염물질에 대한 오염취약성에 근거한 것이므로 질산성질소 농도 통계자료가 관리등급과 일치되어 나타나지 않을 수도 있다는 점이다. 지

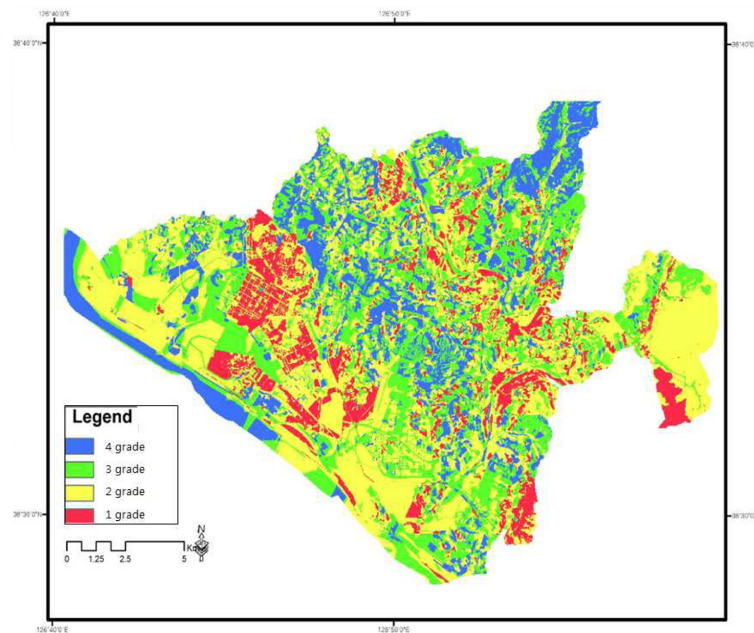


Fig. 8. Map of priority groundwater management areas based on regional groundwater contamination vulnerability.

역 취약성평가에서 사용된 평가인자들 중 지하수수질현황 인자에서만 질산성질소 자료를 사용했을 뿐이고 그 외 오염원특성 항목(점오염원, 비점오염원)과 지역 매체특성, 지하수 이용특성은 모든 오염물질에 해당되는 것이므로 Table 7에서 제시한 등급별 질산성질소 농도 통계를 바탕으로 본 연구에서 수행한 지역 취약성평가 결과를 정량적으로 검증하는 것은 무리가 있다고 판단된다.

1등급 지역은 지하수면 심도가 낮으면서 공업지역, 거주지역이 밀집되어 있는 고양시 중서부지역으로 이 지역의 지하수오염 취약도가 비교적 높은 것으로 나타났다. 2등급 지역은 준공업 지역 및 도심지 주변의 농업지역(회화단지 등)으로 분석되었다. 이를 고양시 행정구역과 중첩하여 분석하면 고양시 덕양구 화정동 및 행신동 일원, 일산동구 마두동, 장발산동 및 일산서구 일산동 등이 지하수오염 취약성이 높은 것으로 분석되었다. 이는 비록 면적은 작으나 인구가 밀집되어 지하수 이용이 상대적으로 많고 또한 잠재적인 지하수 오염원인 공업지역, 거주지역과 관련된 토양오염 우선관리대상시설이 분포하고 있는 곳으로 지하수오염과 관련된 이 지역의 사회·자연환경적 요인이 잘 반영된 결과라고 볼 수 있다.

5. 결론 및 토의

본 연구에서는 경기도 고양시를 대상으로 전문가 설문

에 의한 계층분석과정을 수행하고 전문가 의견을 토대로 지하수오염 취약성평가에 필요한 평가인자와 가중치를 도출하였다. 그리고 이를 GIS로 구현하여 지하수오염 취약도 작성 및 이를 바탕으로 지하수오염 관리우선순위를 평가하였다.

기존의 지하수오염 취약성평가 연구들이 고유 오염취약성 중심으로 진행되고, 오염특성 및 지하수 이용특성 인자 및 영향에 대한 분석을 추가적으로 수행하거나, 전체적인 상관관계를 제대로 반영하지 못했을 뿐 아니라 지표들의 통합방법에서 전문가의 근거가 미약했다는 점에서 이를 개선한 지표와 계층분석을 결합한 형태의 취약성 평가기법은 기존의 취약성 평가기법을 개선하고 지하수오염 취약성을 평가하는데 효과적인 방법으로 사료된다.

본 연구에서는 수자원 관련 정책 결정자의 관점에서 오염취약성을 평가할 때에 고유 오염취약성과 특정 오염취약성 중 어느 개념으로 접근해야 할지 어려움을 겪는 경우의 대안으로 지역오염 취약성 평가기법을 제안하였으며, 지역 매체특성, 오염 및 지하수 이용특성을 모두 고려한 지하수오염 관리 우선 지역을 도출하였다. 본 연구의 결과는 지하수 오염이 발생하는 지역의 특성 및 오염원과 지하수 이용특성을 모두 고려한 국내외적으로 처음 시도되는 연구이다. 또한 이러한 취약성평가 결과는 향후 국토개발의 심화와 함께 우려되는 물 부족(생활 및 농업용수 등) 및 오염 피해에 대한 정책 수립 및 정책우선순위

결정을 위한 주요 자료로 활용될 수 있을 것이다.

그럼에도 불구하고, 본 연구는 몇 가지 한계를 가지고 있다. 첫째, 지하수 수위 자료 및 함양량 자료, 지하수 수질자료의 부족이다. 현재 연구지역에서 관측되는 지하수 관정의 정보는 개인 지하수관정에서 검사한 지하수 정기 수질검사 자료를 시청에서 정리한 것으로 연구목적에 맞는 자료가 부족한 형편이다. 둘째, 연구결과의 검증이다. 우선 본 연구에서 사용한 평가항목과 가중치는 AHP기법을 활용하여 어느 정도의 신뢰성을 갖고는 있으나, 전문가들의 의견에 근거한 것으로 본 연구에서 제시한 방법을 적용하여 실제 지하수 관리우선순위를 결정하는 데에 앞서 연구결과에 대한 검증이 필요하다. 마지막으로, 본 연구에서는 고양시의 지하수 내 질산성질소 자료만을 이용하여 지하수 수질현황을 반영하였으나, 오염원에 대해서는 지역 내 위치하는 모든 가능한 오염원을 포함하고 위해성이 높은 특정유해물질의 오염원인 점오염원에 대한 가중치가 더 크기 때문에 취약성평가 결과 얻어진 관리우선순위등급에 지하수 수질현황이 크게 반영되지 못하였다. 향후 이런 한계점을 개선하기 위하여 여러 항목의 지하수 수질자료를 함께 반영하여 해당 지역에서 지하수 수질관리에 있어서 우선적으로 관리해야하는 관리대상항목 우선순위를 제시하거나, 또는 항목별로 지하수 수질 관리우선순위 지역을 선정하는 등의 연구가 수행되어야 할 것이다. 추후 이러한 한계점 보완을 위한 지속적인 연구가 이루어질 필요가 있으며 지하수오염 취약성평가 결과를 기반으로 현재의 기반시설 및 도시계획 사업에 대한 평가와 의사결정에 반영하는 노력도 함께 이루어질 필요가 있다.

사 사

본 연구는 한국환경정책·평가연구원의 2012년도 수시 과제 “오염지하수 관리강화를 위한 제도적 지원방안”과 한국환경공단의 “2012년도 토양지하수 오염 취약성평가 및 관리방안 마련”의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- Gogu, R.C. and Dassargues, A., 2000, Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods, *Environ. Geol.*, **39**(6), 549-559.
- Ham, S.Y., Cheong, J.Y., Kim, M.J., Kim, I.S., and Hwang, H.S., 2004, Assessing groundwater vulnerability using DRASTIC method and groundwater quality in Changwon City, *Econ. Environ. Geol.*, **37**(6), 631-645.
- Jo, S.B., Min, K.D., Woo, N.C., and Lee, S.R., 1999, A study on groundwater contamination potential of Pyungtaek-Gun area, Kyunggi-Do using GIS, *J. Soil & Groundwater Environ.*, **6**(2), 87-94.
- Kang, J. and Park, E., 2010, A comparative application of DRASTIC and SINTACS models for the assessment of groundwater vulnerability of Buyeo area, *J. Soil & Groundwater Environ.*, **15**(5), 32-39.
- Kim, G.B., 2008, Consideration of trends and applications of groundwater vulnerability assessment methods in South Korea, *J. Soil & Groundwater Environ.*, **13**(6), 1-16.
- Kim, G.B., Ahn, J.S., and Marui, Atsunao, 2009, Analytic hierarchy models for regional groundwater monitoring well allocation in Southeast Asian countries and South Korea, *Environ. Earth Sci.*, **59**, 325-338.
- Lee, H., Park, E., Kim, K., and Park, K.H., 2008, A joint application of DRASTIC and numerical groundwater flow model for the assessment of groundwater vulnerability of Buyeo-Eup area, *J. Soil & Groundwater Environ.*, **13**(1), 77-91.
- Lee, M., Lee, J., Jeon, S., and Hwang, H., 2010, Review of policy direction & coupled model development between groundwater recharge quantity and climate change, *J. Environ. Policy*, **9**, 157-184.
- Lee, M. and Lee, J., 2011, Coupled model development between groundwater recharge quantity and climate change using GIS, *KAGIS*, **14**(3), 36-51.
- Lee, S.R. and Kim Y.J., 1996, Analysis of groundwater pollution potential and risk using DRASTIC SYSTEM, *J. GIS Ass. Korea*, **4**(1), 1-11.
- Lee, S.R. and Choi, S.H., 1997, Groundwater pollution susceptibility assessment of Younggwang area using GIS technique, *J. Soil & Groundwater Environ.*, **4**(4), 223-230.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MOLTMA) and K-water, 2011, Annual report on groundwater.
- Saaty, T.L., 1980, The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation (Decision Making Series), McGraw Hill International, 287 p.
- Song, S.H. and Choi, K.J., 2012, An appropriate utilization of agricultural water resources of Jeju island with climate change (I), *J. Soil & Groundwater Environ.*, **17**(2), 62-70.
- Woo, N.C., 1994, Introduction to DRASTIC: a method for groundwater vulnerability assessment, *Econ. Environ. Geol.*, **27**(6), 611-612.
- Woo, N.C., 2013, Climate change and groundwater sustainability in Korea for next decade, *J. Soil & Groundwater Environ.*, **18**(1), 1-5.