



Article

지하수 보조측정망의 배치를 위한 AHP 모델 개선 연구

김규범¹, 원유진¹, 김지혜², 홍택수¹, 신현정³, 오의환³, 황찬익^{2,*}

¹대전대학교 재난안전공학과

²㈜지오인솔루션즈

³한국농어촌공사 충남지역본부

Study on the AHP model improvement for the allocation of subsidiary groundwater monitoring networks

Gyoo-Bum Kim¹, Yugene Won¹, Jihye Kim², Taek-Su Hong¹, Hyun-Jeong Shin³, Eui-Hwan Oh³, Chan-Ik Hwang^{2,*}

¹Daejeon University, Daejeon 34520, Republic of Korea

²Geo-In Solutions Co. Ltd., Daejeon 34016, Republic of Korea

³Chungnam Regional Headquarters, Korea Rural Community Corporation, Hongseong 32263, Republic of Korea

Received: August 1, 2024 / Revised: September 4, 2024 / Accepted: September 10, 2024

*Corresponding author: +82-42-933-7525 / E-mail: loveu2u@hanmail.net

요약: 지방자치단체는 관할 지역 내 지하수 이용과 오염을 지속적으로 감시하기 위하여 지하수 보조관측정을 설치·운영하고 있으며, 지역지하수관리계획 수립시 AHP 모델을 활용하여 지하수 측정망 설치 계획을 수립하고 있다. 현재 사용 중인 AHP 모델은 약 20년이 경과된 것으로서 현재의 지하수에 대한 인식을 반영하지 못하고 있어 개선이 필요하다. 본 연구에서는 151명 대상의 설문조사 결과를 활용하여, 짝비교 방법에 기반한 개선된 AHP 모델을 개발하였다. 본 모델은 1차 평가인자 3개와 2차 평가인자 9개로 구성되며, 인자에 대한 일관성지수는 거의 0으로 모델이 유용한 것으로 평가되었다. 기존 AHP 모델과 비교했을 때, 지하수에 대한 중요도 인식 변화, 가뭄 등 기후변화시 지하수의 역할 증대 및 지하수 총량관리 개념 도입 등 다양한 요인들에 의하여 일부 평가인자의 가중치에 변화가 나타난 것으로 보인다. 향후 지역지하수관리계획 수립시에는 금회 개발된 개선된 AHP 모델을 활용함으로써 현재의 인식과 특성을 잘 반영하는 계획이 수립되길 기대한다.

주요어: 지하수 보조측정망, 계층분석과정, 짝비교, 설문조사, 일관성지수

ABSTRACT: Subsidiary groundwater monitoring wells have been installed and operated to continuously monitor groundwater usage and contamination within the jurisdiction of local governments. When establishing local groundwater management plans, the AHP model was used to determine the allocation of the groundwater monitoring network. The currently used AHP model is over 20 years old and fails to reflect the current perception of groundwater, necessitating improvement. This study developed an improved AHP model based on the pairwise comparison method using survey results from 151 respondents. The model consists of 3 primary evaluation factors and 9 secondary evaluation factors, with a consistency index for the factors close to zero, indicating the model's usefulness. Compared to the existing AHP model, changes in the weights of some evaluation factors were observed due to various factors such as changes in the perception of groundwater importance, the increased role of groundwater during droughts and other climate changes, and the introduction of the concept of total groundwater quantity management. It is expected that the improved AHP model developed in this study will be used in future local groundwater management plans to establish the monitoring plans that better reflect current perceptions and characteristics.

Key words: subsidiary groundwater monitoring well, analytic hierarchy process, pairwise comparison, survey, consistency ratio

1. 서언

지하수는 지하의 보이지 않는 지층구조에서 매우 천천히 이동하므로 수위 하강 및 수질오염 발생의 인지가 늦을 경우 원상회복이 불가능할 수 있고, 지하수 장애를 인지한 이후의 대처 과정에서도 기존의 관측자료가 없거나 부족할 경우에는 원인분석과 대책수립이 지연되거나 어려울 수 있다. 따라서, 지하수 관리에 있어서 관측정을 설치하고 정기적으로 지하수의 부존 및 유동특성, 배경수질 등의 자료를 취득하는 것은 기본적이며 필수적인 요소라 할 수 있다.

지하수 관측의 목적은 오랜 기간을 거치면서 시대적 환경 및 지하수에 대한 인식 흐름에 따라서 변화하게 된다. 지하수의 중요도가 시대적 변화에 의하여 바뀌기도 하고 수질 및 오염의 문제점이 대두되기도 하는 등 사회 환경의 변화는 지하수 관측의 배경과 목적 등에 변화를 야기할 수 있다.

현재 우리나라의 주요 지하수 측정망은 국가지하수관리 측정망, 국가지하수오염측정망, 농촌지하수관리측정망, 지역(보조)지하수측정망 등으로 구분되어 있으며, 국가지하수관리측정망은 우리나라 지질과 유역을 고려한 지하수 수위 및 수질 현황과 변화 추세를 파악·관리하기 위하여 설치·운영하는 측정망이며, 국가지하수오염측정망은 국가 차원의 오염관리가 필요한 오염우려지역의 지하수 오염과 확산을 지속적으로 감시하기 위하여 설치·운영하는 측정망에 해당한다(그림 1). 아울러, 농촌지하수관리측정망은 농어촌지역에서 농업용 지하수의 적정성과 수량 등을 파악하기 위하여 농림축산식품부에서 관리하고 있으며, 지역(보조)지하수측정망은 지방자치단체의 지하수 이용, 오염 등을 감시하기 위하여 설치·운영하는 국가지하수오염측정망을 보완하는 측정망에 해당한다.

지하수 관측정의 위치를 결정하는 방법은 지하수의 양과 질을 효과적으로 모니터링하기 위해 다양한 지리적, 지질학적 및 환경적 요인 등을 고려하는 것이 일반적이다. 최적의 지하수 관측정 위치를 선택하기 위하여 다양한 방법이 시도되어 왔다. 지형 및 지질 데이터와 geographic in-

formation system (GIS)를 결합한 모델을 활용하여 관측정의 최적 위치를 결정하는 방법(Esquivel *et al.*, 2015), 지하수 흐름 및 오염 데이터를 모델링을 통하여 예측, 평가하여 최적 위치를 결정하는 방법(Wu, 2004; Jin *et al.*, 2014) 등이 대표적인 사례이다. 최근 연구들은 대규모 데이터셋을 사용하여 최적의 위치를 예측하기 위하여 인공지능, 통계 알고리즘 또는 기계 학습 알고리즘을 사용하고 있으며, 이 방법을 통하여 복잡한 변수 간의 상호작용을 분석하고 관측정 배치를 보다 효율적으로 평가할 수 있다(Mirzaie-Nodoushan *et al.*, 2017; Ayvaz and Elçi, 2018; Kavusi *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2022; Meray *et al.*, 2022; Gladish *et al.*, 2023; Teimoori *et al.*, 2023). 이상의 방법들은 비교적 풍부한 수문 및 수질 데이터 확보를 전제로 보다 학술적으로 평가하는 방법에 해당되나, 실제 관측 현장의 경우에 이들 데이터의 확보는 용이하지 않은 것이 일반적이다. 따라서, 공무원 등 비전문가가 현장의 제한된 데이터를 활용한 정성적 관측정 배치 방법인 analytical hierarch process (AHP) 모델을 활용하여 지하수 관측정 계획을 수립하기도 한다(Kim *et al.*, 2007; Esquivel-Martínez *et al.*, 2023). 국내에서는 2002년에 한국수자원공사 주관으로 “보조지하수관측망 설치방안 수립 연구”를 수행한 바 있는데, 이 때 실시한 설문조사 결과를 활용하여 지하수 보조측정망 배치를 위한 AHP 모델을 개발하였으며, 이후 이 모델을 활용하여 지역 지하수관리 계획 수립시 보조지하수관측망 계획을 수립해 오고 있다.

본 연구에서는 현 시점에서의 설문조사 및 AHP 기법을 활용하여 개선된 지하수 보조측정망의 배치 모델을 개발하고, 금회 개발된 AHP 모델과 기존의 AHP 모델의 차이 및 변화 원인 등을 분석하고자 하였다.

2. 짝 비교 및 AHP 기법

AHP 모델은 의사결정 문제를 해결하기 위해 개발된 다기준 의사결정 기법 중 하나로서, 1970년대에 Thomas L.

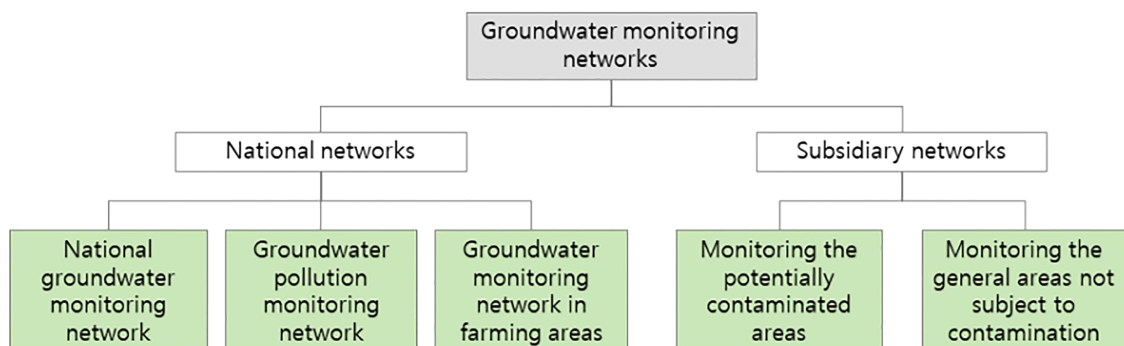


Fig. 1. Composition of the groundwater monitoring network in Korea (Ministry of Environment, 2020).

Table 1. Determination of primary evaluation factors for the AHP model.

Target monitoring areas	Selection criteria	Remarks
1) Areas where groundwater development and utilization are active	- From the perspective of preventing the depletion of groundwater resources and securing water resources for emergency use, areas with active groundwater development and utilization should be set as a focus of observation and managed by the government.	
2) Areas where it is necessary to monitor groundwater contamination and its progression	- Compared to other water sources, groundwater contamination is difficult to restore and leads to the loss of its functionality as a water resource; therefore, it should be considered a focus of observation.	
3) Areas where groundwater is utilized as an important resource for domestic and agricultural purposes	- Areas not served by municipal water supply or lacking agricultural water supply depend solely on groundwater as their only water resource, requiring thorough management.	- The agricultural use is added to the existing AHP model.

Saaty에 의해 개발되었다. AHP는 복잡한 의사결정 문제를 구조화하고 체계적으로 분석하기 위해 계층적 구조를 사용하며, 아래와 같은 과정으로 이루어진다(Saaty, 1999).

- 문제의 정의: 의사결정을 위한 문제를 정의한다.
- 계층적 구조 설정: 문제를 목표, 기준, 그리고 대안들로 구성된 계층적 구조로 분해한다.
- 짝비교: 각 요소를 쌍으로 비교하여 상대적인 중요도를 평가하는 기법을 설문조사에 활용한다.
- 비교 행렬 작성: 설문에서 얻어진 짝비교 결과를 바탕으로 비교 행렬을 작성하며, 이로부터 각 요소 간의 상대적 중요도를 수치화한다.
- 일관성(Consistency) 검사: 설문에서 얻어진 짝비교 결과가 일관성 있는지를 평가한다.
- 가중치 계산: 이상 결과를 토대로 각 기준과 대안의 가중치를 계산한다.
- 최종 모델 개발: 각 기준별 가중치를 토대로 최종 모델을 개발한다.
- 종합 순위 결정: 최종 모델을 활용하여 대안의 종합 점수를 계산하고 최적의 대안을 선택한다.

3. 계층 구조의 결정

지하수 보조측정망의 배치 결정을 위한 AHP 모델 개발이라는 목표하에 계층 구조를 설정하였다. 계층 구조는 상위 수준인 목표, 중간 수준인 기준 설정 및 하위 수준인 대안 설정으로 구분하여 결정하였다.

상위 수준인 목표는 지하수의 과잉 개발 및 오염원으로부터의 보호 등을 위하여 수위 및 수질을 관측하기 위한 지하수 보조관측망의 배치로 설정하였다. 이 목표를 달성하는데 필요한 하부 요소로서 중간 수준의 기준을 결정하였다. 이 기준은 계층 구조에서 1차 평가 인자에 해당되는데,

다수의 전문가들의 토의를 거쳐서 지하수 수위 및 수질 관측이라는 목표에 필요한 3개의 인자를 추출하였다. 이 중에서 첫 번째 및 두 번째 인자는 기존의 AHP 모델(Kim *et al.*, 2007)와 동일하게 설정하였으며, 세 번째 인자는 기존 AHP에서 “생활용”에 한정된 부분을 관측의 목표가 “생활 및 농업용”에 모두 해당될 수 있도록 확대하여 설정하였다(표 1).

계층 구조의 하위 수준을 결정하기 위하여 평가인자가 갖추어야 할 조건으로서, 대표성(지역 및 지하수의 특성을 대표할 수 있는 인자), 객관성(주관적 평가가 아닌 공개된 자료를 활용하는 인자), 용이성(속성 자료를 수집하기 용이해야 함), 단순성(자료를 처리하거나 정리하는 과정이 복잡하지 않아야 함), 독립성(자료 사이의 유사성이나 연계성이 배제되어야 함) 등이 있다. 기존 AHP 모델에서 검토되었던 지하수와 관련된 총 32개의 특성을 대상으로 위 조건들을 재검토하였으며(Kim *et al.*, 2007), 이들 조건을 만족하는 평가 인자 9개를 최종적으로 선정하였다. 특히, 기존 AHP 모델에 사용되었던 평가 인자들이 합리적이라는 점을 고려하여 동일한 인자를 선정하였으며, 추가적으로 통합 물관리 및 기후변화 등 시대적 변화를 고려하여 농업용수로 사용되는 지하수의 역할이 강조될 수 있도록 “지하수만 공급 받는 농경지의 비율”이라는 인자를 추가하였다(표 2).

최종 선정된 2차 평가인자는, 1) 지하수 이용관정의 수(지하수조사연보의 지역별 관정수), 2) 지하수 관정의 밀도(지하수조사연보의 면적당 지하수 시설수), 3) 지하수 연간 총이용량(지하수조사연보의 연간 총이용량), 4) 음용가능수질 관정의 수(지하수 조사연보 상의 음용 여부별 지하수 시설 및 이용 현황의 음용 관정 개수), 5) 지하수 오염유발 시설의 수(환경부 전국오염원조사 통계자료의 종류별 오염원 수의 총합), 6) 지하수 오염관정의 수(지하수 조사연보 상에서 용도와 상관없이 수질 불합격된 관정 수, 표본확보

Table 2. Secondary evaluation factors and data source for the AHP model.

Secondary factors	Criteria	Data source
Number of groundwater wells in the area	Areas with a large number of wells have a high importance of groundwater	Utilization of statistical data on the number of groundwater wells (From annual report on groundwater)
Density of groundwater wells	Areas with a high density of wells have concerns about the occurrence of various types of problems	Number of groundwater facilities per unit area (From annual report on groundwater)
Amount of yearly groundwater use	Areas with high groundwater usage face issues with the water cycle	Annual total groundwater usage (From annual report on groundwater)
Number of wells for drinking purposes	Drinking use signifies the importance of water	Number of drinking wells from groundwater usage statistics by drinking status (From annual report on groundwater)
Number of contamination source	Groundwater contamination management is a primary objective of monitoring	Total number of pollution sources from the national pollution source survey statistics (MoE). The number of pollution sources refers to the total sum of the industrial sector, aquaculture sector, livestock sector, environmental infrastructure facilities, and other sectors as recorded in the statistics.
Number of wells with poor water quality (Failed to pass the water quality test)	A measure to determine the extent of groundwater contamination in the area	Number of wells that failed the water quality test regardless of their use purposes. However, considering the frequency of water quality testing and data acquisition, the number of wells that failed the water quality test over a two-year period is combined and used.
Number of households using only groundwater due to the lack of municipal water supply	Primary water source in areas not served by municipal water supply	Number of households not served by municipal water supply (From municipal water supply statistics from the National Waterworks Information System, MoE)
Percentage of farmland supplied only with groundwater	Agricultural activities rely on groundwater	Utilization of agricultural water beneficiary area distribution data from Korea Rural Community Corporation. Percentage of non-beneficiary area relative to the total area
Amount of groundwater use for drinking	When a large amount of groundwater is used for drinking, water quality management is important	Annual total usage of drinking wells from groundwater usage statistics by drinking status (From annual report on groundwater)

를 위하여 2년치를 합산), 7) 지하수만 사용하는 가구의 수 (환경부 국가상수도정보시스템의 상수도 통계자료에서 상수도가 보급되지 않는 가구 수로서 미급수 세대), 8) 지하수만 공급받는 농경지의 비율(한국농어촌공사의 수혜지역 분포도에서 미수혜 지역의 면적을 전체 농경지 면적으로 나눈 비율), 9) 음용수로 이용되는 지하수의 양(지하수 조사연보 상의 음용 여부별 지하수 시설 및 이용 현황의 음용 관정의 연간 총이용량 자료) 등이 해당된다. 한편, 기존 AHP 모델 적용시 사용자에 따라서 2차 평가인자의 속성 자료 출처가 다양하여 결과의 일관성이 떨어지는 문제점이 나타나기도 하는데, 금회 연구에서는 2차 평가 인자의 속성을 추출하는 자료의 출처를 명확히 제시하였다.

이상 9개의 2차 평가인자 간의 상호작용과 이들 인자들이 전체 평가 체계에 미치는 영향을 합리적으로 구성하기

위하여 평가 체계를 구조화하였다. 계층 구조화를 위해서 구성하는 평가 인자들을 배열한 후, 각 평가 인자의 특성에 따라 9개의 평가 인자를 3개의 1차 평가인자 특성에 소속될 수 있도록 그룹화 하였다. 이상 과정으로 1차 평가인자 및 2차 평가인자를 활용하여 최종적으로 계층 구조를 결정하였다(그림 2).

4. 설문조사

평가인자 간의 상대적인 중요도를 결정하는 과정에서 주관성을 배제하기 위하여 지하수 종사자 및 지하수를 연구하는 전문가들을 대상으로 설문조사를 실시하였다. 1차 설문조사는 2024년 4월 학회 참석자, 2차 설문조사는 한국농어촌공사와 한국수자원공사의 지하수 관련 직원을 대상

으로 수행되었으며 총 151명이 응답하였다. 설문지는 1차 평가인자에 대한 상대적인 중요도, 2차 평가인자에 대한 절대적인 중요도를 묻는 질문으로 구성하였으며, 각 인자 간의 짝 비교에 의한 가중치 결정에 활용하였다.

5. 짝 비교에 의한 가중치 결정

각 인자들의 가중치를 결정하기 위하여 짝 비교(Pairwise comparison) 방법을 적용하였다. 2개의 1차 평가 인자를 하나의 짝으로 설정한 후 상대적인 중요도를 9점 척도에 기반하여 평가하고, 모든 인자에 대하여 짝 비교가 수행되면 행렬을 구성한 후 각 행에 대한 기하평균을 구하여 가중값으로 활용한다(그림 3). 3개(A, B, C)의 1차 평가인자를 두 개씩 선택하여 비교하는데, 예를 들어, A 인자가 B 인자와 동등하다면 1, 약한 우위에 있으면 3, 강한 우위에 있으면

5, 매우 강한 우위에 있으면 7, 절대적으로 강한 우위에 있으면 9 등으로 평가한다. 이들 값은 3×3 행렬 내에서 A 인자 행이 B 인자 열과 교차하는 지점에 위치시키고, B 인자 행이 A 인자 열과 교차하는 지점에는 해당 값의 역수를 입력한다.

한편, 설문을 통하여 얻어진 2차 평가인자의 중요도를 구하기 위하여, 151명의 응답 자료로부터 각 인자별 평균 평가점수를 구한 후 두 인자별 평균 평가점수의 상대적인 크기를 활용하여 가중치를 산정하였다. 예를 들어, “행정구역내 지하수 관정의 수”에 대한 응답자의 평균 평가점수가 6.97, “지하수 관정의 밀도”에 대한 평균 평가점수가 7.40 이라면, “행정구역내 지하수 관정의 수”가 “지하수 관정의 밀도”보다 1.44 만큼 더 중요하지 않다고 평가하였다(수식: $1.44 = 7.40 - 6.97 + 1.0$). 이 과정으로 2차 평가인자에 대한 상대적인 중요성을 도출한 후 1차 평가인자 평가에서 사

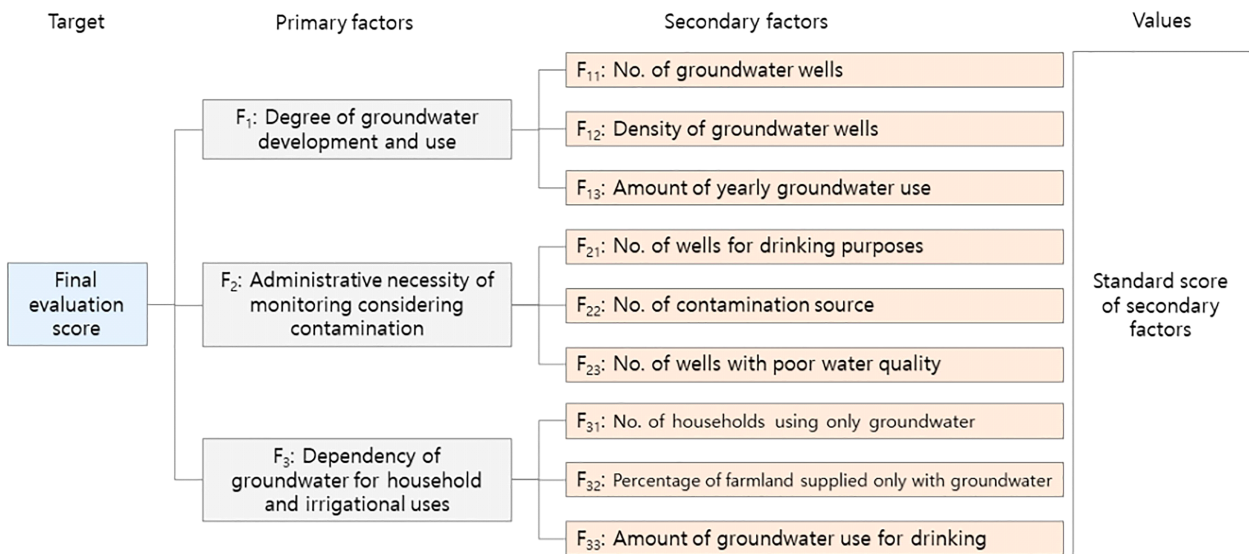


Fig. 2. Hierarchical structure of evaluation factors for the AHP model for the allocation of subsidiary groundwater monitoring wells.

Factors	A	B	C	Geometric mean	Weight
A	1	6	$\frac{1}{7}$	$\sqrt[3]{(1 \times 6 \times \frac{1}{7})} = 0.95$	$\frac{0.95}{3.07} = 0.31$
B	$\frac{1}{6}$	1	3	$\sqrt[3]{(\frac{1}{6} \times 1 \times 3)} = 0.79$	$\frac{0.79}{3.07} = 0.26$
C	7	$\frac{1}{3}$	1	$\sqrt[3]{(7 \times \frac{1}{3} \times 1)} = 1.33$	$\frac{1.33}{3.07} = 0.43$
Sum				3.07	1.0

Fig. 3. Example of weight calculation using 3×3 matrix of primary factors and pairwise comparison method.

용된 짝 비교 방법으로 행렬을 구성하고 기하평균 및 가중치를 산정하였다.

6. 최종 AHP 모델 개발

지하수 보조측정망 배치를 위한 AHP 모델은 목표, 1차 평가인자, 2차 평가인자 및 2차 평가인자의 속성으로 구성된다. 위의 짝 비교를 통하여 각 인자들에 대한 가중치를 도출하였으며, 가중치 및 속성값을 활용하여 최종적으로 얻어지는 각 관측 대상 후보 지역별 총 점수는 아래와 같이 각 단계별 값들의 승합산으로 표현된다.

$$Total\ score = \sum_i^{N_1} \left[FW_i^{step1} \cdot \sum_j^{N_2} (FW_{ij}^{step2}) \cdot (x_{ij}^k) \right] \quad (1)$$

여기에서, 총점수는 각 관측대상 후보지역에 대한 최종 평가점수, N_1 은 1차 평가인자(F_1, F_2, F_3)의 수(본 모델에서는 3), FW_i^{step1} 은 1차 평가인자 F_i 의 가중치, N_2 은 1차 평가인자 i 에 연결되는 2차 평가인자의 개수(본 모델에서는 3), FW_{ij}^{step2} 은 1차 평가인자 i 의 2차 평가인자 j (F_{ij})의 가중치, x_{ij}^k 는 평가 지역 k 에서 1차 평가인자 i 의 2차 평가인자 j 의 3단계 속성을 의미한다.

여기에서 x_{ij}^k 는 3단계 속성 값으로서 값의 단위가 다양할 수 있으므로 표준화된 값으로 환산하여야 하며, 아래와 같이 평균과 표준편차를 활용하여 계산되었다.

$$x_{ij}^k = \frac{X_{ij}^k}{\sigma} \quad (2)$$

여기서, X_{ij}^k 는 지하수 보조측정망을 배치하고자 하는 평가대상 지역 k 의 평가 항목의 크기이며, σ 는 평가 항목의

표준편차로서 $\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_{ij}^k - X)^2}{N}}$ 이며, X 는 X_{ij}^k 의 평균값, N 은 평가대상 지역의 수를 의미한다.

이상 각 인자별 속성 및 가중치를 토대로 지하수 보조관 측정 배치 수를 결정하기 위한 최종 AHP 모델을 도출하였다(그림 4).

한편, 각 인자들에 대하여 분석 결과를 받아들이기 위해서는 짝 비교가 일관성이 있었는지 평가되어야 한다. 이는 일관성 비율(consistency ratio: CR)을 의미하며 허용되는 변동의 정도가 10% 미만이어야 한다(Lane and Verdini 1989; Saaty 1999).

$$CI = \frac{(\lambda - n)}{(n - 1)} \quad (3)$$

여기에서, CI 는 일관성 지수(consistency index), λ 는 일관성 벡터의 평균값, n 은 평가인자의 수를 의미한다.

일관성 비율(CR)은 짝 비교가 무작위의 짝 비교 행렬에서 얼마나 벗어나 있는지를 평가하는 것으로서,

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

이며, random index (RI)는 무작위 지수라고 하며 평가 인자가 3개인 경우에는 0.58의 값이 적용된다. 일관성 비율 산정 결과 거의 0 값에 해당하는 것으로 평가되었으며, Saaty의 경험 법칙에 의하면 모두 10% 미만으로서 각 행렬은 일관성을 갖는 것으로 평가되었다(표 3).

7. 기존 모델과의 비교

설문조사를 통하여 취득된 1차 평가인자 3 항목에 대한

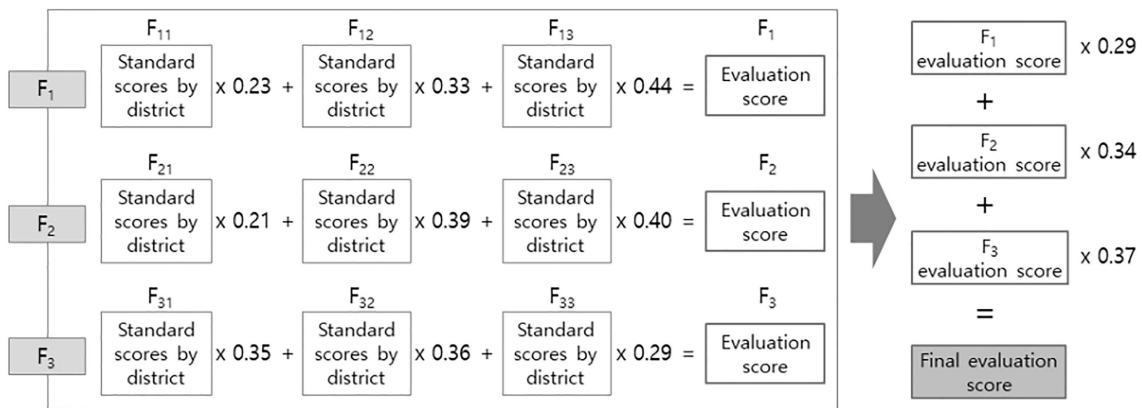


Fig. 4. Calculating process of the final evaluation score using the primary and secondary evaluation scores in the final AHP model.

Table 3. Consistency ratio calculated from the weighted average of each secondary evaluation factor.

Evaluation factor	Weighted average	Lambda	CI	CR
F11	0.703			
F12	0.980	3.001	0.000	0.001
F13	1.318			
F21	0.639			
F22	1.161	3.000	0.000	0.000
F23	1.200			
F31	1.046			
F32	1.079	3.000	0.000	0.000
F33	0.875			

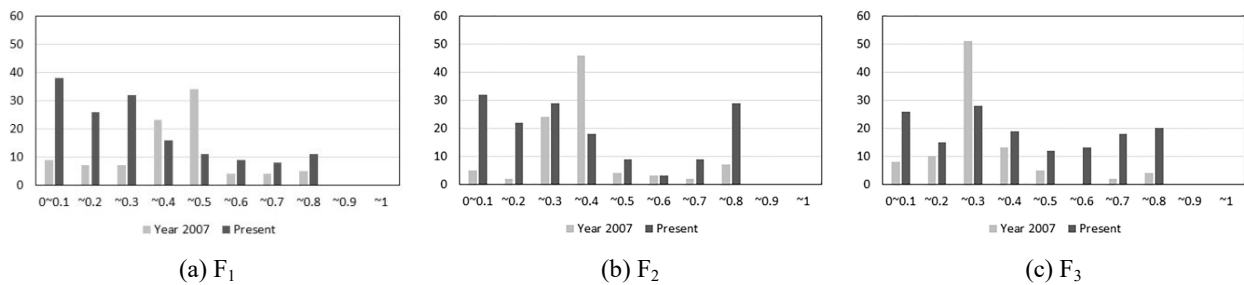


Fig. 5. Comparison of the distribution of weights for the relative importance of three primary evaluation factors between the existing AHP model (n=93) and the new AHP model (n=151).

설문자별 가중치의 분포를 도시해 보았다(그림 5). 2007년의 AHP 모델(응답자: 93명)과 동일한 1차 평가인자를 사용하였기 때문에 과거와 현재의 가중치의 분포 차이를 비교할 수 있다. 평가인자 F₁에 대한 가중치의 분포를 보면, 기존 모델의 경우에는 정규 분포에 가까운 반면 금회 모델에서는 왜도가 0.92로서 치우쳐 있음을 알 수 있으며, 평가인자 F₂에서도 유사한 특성 변화가 나타났다. 이는 두 인자간 상대 중요도 비교에서 한쪽으로 치우치는 경향이 증가되었다는 것을 의미하며, 이는 지하수에 대한 관측의 필요성을 판단할 때 고려되는 인자들의 상대적인 중요도에 대한 판단 기준이 보다 명확해 졌음을 의미한다.

1차 평가인자에 대한 가중치를 보면, 2007년 모델에서는 F₁:F₂:F₃가 0.38:0.34:0.28인 반면에 금회 모델에서는 0.29:0.34:0.37로서 F₁의 가중치가 줄어들고 F₃은 증가하였다. 이는 지하수가 활발히 이용되는 지역 보다는 생활/농업용 자원으로 중요성을 갖는 지역에서 관측이 보다 활발해야 한다고 인식하고 있음을 보여준다. 금회 모델에서는 2007년과 달리 F₃에 농업용의 개념을 추가한 것이 영향을 미쳤을 수 있으나, 지난 20년간 기후변화로 인하여 가뭄의 빈도 및 강도가 증가하고 있어 단순히 지하수 이용 보다는 지하수가 생활/농업용 자원으로로서의 중요성이 부각되고 있음을 설명하고 있다.

2차 평가인자에 대한 평가점수의 평균을 2007년 모델과

비교해 보면, 대부분의 항목에서 2007년에 비하여 낮아졌음을 알 수 있으며 과거에 비하여 항목간 점수 편차가 줄어들었는데 이는 특정 항목의 중요성이 강조되기 보다는 대부분의 항목이 비슷하게 중요해졌음을 의미한다(그림 6). 한편, 2007과 금회 모델에서의 대표적인 차이는 F₁₁(지하수 이용관정의 수)과 F₁₃(지하수 연간 총이용량)의 평가점수가 역전된 것이다. F₁₁의 경우, 2007년 모델에서는 8.53, 금회 모델에서는 6.97, F₁₃의 경우, 2007년 모델에서는 7.14, 금회 모델에서는 7.79로 나타났다. 이는 최근에 충청남도 등에서 추진 중인 지하수 총량제 등 지하수 총량관리에 대한 관심이 증가하면서 개수 보다는 이용량의 중요도

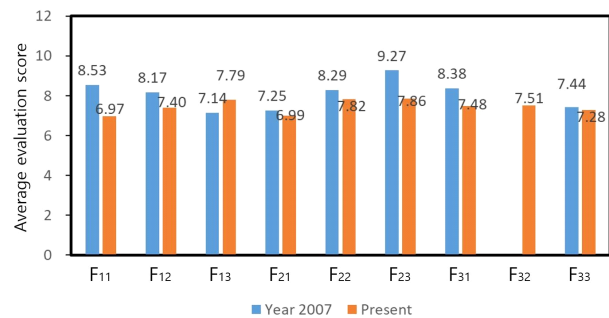


Fig. 6. Comparison of average evaluation scores for the secondary evaluation factors between the previous and current models.

Table 4. Results of the final evaluation scores for each city and county in Chungcheongnamdo Province.

Region	F ₁					F ₂					F ₃					Total score
	F ₁₁ score	F ₁₂ score	F ₁₃ score	F ₁ score	Weighted F ₁	F ₂₁ score	F ₂₂ score	F ₂₃ score	F ₂ score	Weighted F ₂	F ₃₁ score	F ₃₂ score	F ₃₃ score	F ₃ score	Weighted F ₃	
	F _{11st} × 0.23	F _{12st} × 0.33	F _{13st} × 0.44		× 0.29	F _{21st} × 0.21	F _{22st} × 0.39	F _{23st} × 0.4		× 0.34	F _{31st} × 0.35	F _{32st} × 0.36	F _{33st} × 0.29		× 0.37	
Gyeryong	0.023	0.404	0.058	0.485	0.141	0.008	0.021	-	0.028	0.010	0.058	2.288	0.016	2.361	0.874	1.024
Gongju	0.801	1.003	1.948	3.752	1.088	0.613	0.758	1.040	2.412	0.820	0.436	1.864	0.895	3.195	1.182	3.090
Geumsan	0.411	0.771	0.661	1.843	0.534	0.079	0.315	-	0.393	0.134	0.613	2.120	0.176	2.908	1.076	1.744
Nonsan	0.761	1.481	1.200	3.442	0.998	0.214	0.557	0.252	1.024	0.348	1.330	1.092	0.335	2.758	1.020	2.367
Dangjin	0.499	0.765	1.153	2.418	0.701	0.512	0.977	1.151	2.640	0.898	0.870	2.227	0.910	4.006	1.482	3.081
Boryung	0.404	0.745	1.143	2.293	0.665	0.085	0.703	-	0.788	0.268	0.227	1.509	0.238	1.974	0.730	1.663
Buyeo	0.746	1.291	0.628	2.665	0.773	0.688	1.338	0.126	2.152	0.732	0.291	1.429	0.354	2.074	0.767	2.272
Seosan	0.851	1.239	1.220	3.310	0.960	0.352	0.482	0.741	1.574	0.535	0.319	1.311	0.259	1.889	0.699	2.194
Seocheon	0.425	1.257	0.600	2.282	0.662	0.163	0.176	0.032	0.370	0.126	0.262	1.247	0.205	1.713	0.634	1.421
Asan	0.392	0.781	1.211	2.384	0.691	0.189	0.484	0.757	1.430	0.486	0.230	1.516	0.672	2.418	0.895	2.072
Yesan	0.427	0.852	1.143	2.421	0.702	0.353	0.512	0.110	0.976	0.332	0.120	1.408	0.940	2.467	0.913	1.947
Cheonan	0.795	1.351	1.142	3.287	0.953	0.570	1.005	0.284	1.858	0.632	0.816	1.831	0.456	3.103	1.148	2.733
Cheongyang	0.289	0.651	0.574	1.514	0.439	0.165	1.098	0.315	1.578	0.537	0.139	1.648	0.250	2.037	0.754	1.729
Taeon	0.520	1.091	0.650	2.261	0.656	0.324	0.082	-	0.405	0.138	0.315	1.557	0.348	2.220	0.821	1.615
Hongsung	0.614	1.487	0.797	2.898	0.840	0.405	0.923	-	1.327	0.451	0.188	1.834	0.359	2.381	0.881	2.173

Remark: F_{11st} refers to the standardized score of F11.

를 높게 평가하게 되었음을 의미한다.

8. 충청남도의 지하수 보조측정망 배치 계획 수립

“충청남도 지하수관리계획(Chungcheongnamdo, 2019)”에 의하면 기존의 모델을 활용하여 도의 지하수 보조관측 정 총 1,430개의 배치 계획을 수립된 바 있으며, 본 연구에서는 급히 개발된 AHP 모델을 활용하여 충청남도 각 시군별 배분계획을 재수립하였다.

충청남도 15개 시군별로 최근 통계를 활용한 2차 평가인자의 입력 자료를 수집하였으며, 각 인자별 수집자료에 대한 표준화, 각 인자의 가중치를 반영한 표준점수의 승합산 및 1차 평가인자의 합산을 통하여 최종 평가점수를 산정하였다(표 4).

한편, 도내 시군별 평가점수의 총합에 대한 시군별 평가점수의 비율은 시군별 지하수 관측의 상대적인 필요성을 설명하는 값이라 할 수 있으므로 이를 활용하여 시군별 지하수 보조관측정의 수를 결정하였다(표 5). 지하수 보조관측정을 가장 많이 설치해야 하는 시군은 공주, 당진, 천안 등으로 분석되었으며, 기존 모델을 적용한 기존 계획과 비교해 보면, 논산, 서산, 천안 등은 지하수관측정의 수가 줄어든 반면에 계룡, 아산, 예산 등은 증가한 것으로 나타났다.

9. 토의 및 결론

현재 각 시군의 지하수관리계획 수립시 지하수 보조측

정망의 배치 계획은 약 20년 전에 개발된 AHP 모델을 활용하여 수립하고 있는데, AHP가 설문조사 결과에 의존하는 모델로서 설문 응답자의 인식이 결과에 중요하게 작용한다는 점을 고려할 때 현재 상황에 적절하지 않은 모델이라 할 수 있다.

본 연구에서는 151명의 지하수 관련 전문가로부터 지하수 보조측정망 설치에 필요한 고려 인자(1차 및 2차 평가인자)를 대상으로 짝비교 방식의 설문조사를 실시하였으며, 그 결과를 활용하여 AHP 모델을 도출하였다. 2007년에 개발된 기존 AHP 모델과 비교하였을 때 1차 평가인자의 경우에는 두 인자간 상대 중요도 비교에서 한쪽으로 치우치는 경향이 증가한 반면에, 2차 평가인자의 경우에는 인자들의 평가 점수의 편차가 과거보다 줄어든 결과가 나타났다. 이는 지하수가 일상적인 용도로 사용된다는 관점보다는 과거에 비하여 가뭄 발생 등 기후변화 시대에 유용한 수자원이므로 의미가 크다는 점을 반영하고 있으며, 최근 지하수 정책의 화두로 등장한 지하수 총량 관리의 필요성 등을 설문 응답자들이 인식하고 있음을 반영한 것으로 보인다.

AHP 모델에서는 설문 응답자의 인식이 중요한데, 설문 응답자가 지하수 또는 유사 분야를 전공한 사람들이라는 점을 고려한다면 그 동안의 지하수 교육, 물 환경의 변화 및 기후변화 등이 설문자의 인식 및 응답에 영향을 미쳤을 것이다. 따라서, 현재 상태의 설문 응답자의 지하수에 대한 인식 및 지식 수준 변화 등을 반영한 새로운 AHP 모델이 개발된 만큼 이를 활용한 지하수 관측망 정책이 수립되어야

Table 5. Proposal for the number of subsidiary groundwater monitoring wells for each city and county in Chungcheongnamdo province.

Region	Number of monitoring wells (2019 plan, applying the 2007 model)	New AHP model			
		Score by region ÷ Total of each score (A)	Proposed number of monitoring wells (A×1,430)	Current installation status	Proposed additional installation plan
Gyeryong	39	0.0329	47	10	37
Gongju	136	0.0993	142	10	132
Geumsan	81	0.0560	80	5	75
Nonsan	127	0.0760	109	4	105
Dangjin	134	0.0990	142	19	123
Boryung	72	0.0534	76	6	70
Buyeo	109	0.0730	104	8	96
Seosan	114	0.0705	101	29	72
Seocheon	71	0.0457	65	7	58
Asan	88	0.0666	95	28	67
Yesan	74	0.0625	89	4	85
Cheonan	132	0.0878	126	34	92
Cheongyang	74	0.0556	79	3	76
Taeon	77	0.0519	74	8	66
Hongsung	101	0.0698	100	9	91
Sum	1,430	1.0000	1,430	184	1,246

할 것이다. 지하수에 대한 인식 변화의 정확한 원인과 정도에 대해서는 향후 추가적인 연구를 통하여 규명해야 할 것으로 본다. 아울러, 향후 5년 또는 10년 이후에도 AHP 모델을 활용한 지하수 보조측정망 배치 계획을 수립한다면 새로운 설문 결과를 활용하여 개선된 AHP 모델을 개발, 활용하는 것이 바람직할 것이다.

감사의 글

이 논문은 한국농어촌공사의 지원(충남형 지하수 총량 관리 모델 개발 연구)에 의하여 수행되었습니다.

REFERENCES

- Ayvaz, T.M. and Elçi, A., 2018, Identification of the optimum groundwater quality monitoring network using a genetic algorithm based optimization approach. *Journal of Hydrology*, 563, 1078-1091, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.06.006>.
- Chungcheongnamdo, 2019, Report on the establishment of the supplementary groundwater management plan in Chungcheongnamdo. Climate and Environment Bureau, Chungcheongnamdo.
- Esquivel, J.M., Morales, G.P. and Esteller, M.V., 2015, Groundwater monitoring network design using GIS and multicriteria analysis. *Water Resources Management*, 29, 3175-3194, <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0989-8>.
- Esquivel-Martínez, J.M., Expósito-Castillo, J.L., Esteller-Alberich, M.V., Gómez-Albores, M.A., Medina-Rivas, C.M. and Fonseca-Ortiz, C.R., 2023, Prioritization of areas for groundwater monitoring using analytic hierarchy process method in Geographic Information Systems: a case of Mexico. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20, 5965-5982, <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04383-6>.
- Gladish, D.W., Pagendam, D.E., Janardhanan, S. and Gonzalez, D., 2023, Geostatistical based optimization of groundwater monitoring well network design. *Frontiers in Earth Science*, 11, <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1188316>.
- Jin, X., Ranjithan, R.S. and Mahinthakumar, G. (Kumar), 2014, A monitoring network design procedure for three-dimensional (3D) groundwater contaminant source identification. *Environmental Forensics*, 15, 78-96, <https://doi.org/10.1080/15275922.2013.873095>.
- Kavusi, M., Khashei Siuki, A. and Dastourani, M., 2020, Optimal design of groundwater monitoring network using the combined election-kriging method. *Water Resources Management*, 34, 2503-2516, <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02568-7>.
- Kim, G.B., Son, Y.C. and Hwang, C.I., 2022, Determination of new national groundwater monitoring sites using artificial neural network model in South Korea. *Geosciences Journal*, 26, 513-528, <https://doi.org/10.1007/s12303-021-0044-0>.
- Kim, J.W., Lee, J.Y., Yi, M.J. Kim, G.B., Won, J.H. and Lee, K.K., 2007, Allocating local groundwater monitoring stations for South Korea using an analytic hierarchy process. *Hydrogeology Journal*, 15, 615-632, <https://doi.org/10.1007/s10040-007-0168-y>.
- Lane, E.F. and Verdini, W.A., 1989, A consistency test for AHP

- decision makers. *Decision Sciences*, 20, 575-590, <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1989.tb01568.x>.
- Meray, A.O., Sturla, S., Siddiquee, M.R., Serata, R., Uhlemann, S., Gonzalez-Raymat, H., Denham, M., Upadhyay, H., Lagos, L.E., Eddy-Dilek, C. and Wainwright, H.M., 2022, PyLEnM: a machine learning framework for long-term groundwater contamination monitoring strategies. *Environmental Science and Technology*, 56, 5973-5983, <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c07440>.
- Ministry of Environment, 2020, Plan for the installation of groundwater quality monitoring network and measurement of water pollution status. Ministry of Environment Notification 2020-253.
- Mirzaie-Nodoushan, F., Bozorg-Haddad, O. and Loáiciga, H.A., 2017, Optimal design of groundwater-level monitoring networks. *Journal of Hydroinformatics*, 19, 920-929, <https://doi.org/10.2166/hydro.2017.044>.
- Saaty, T.L., 1999, *Decision making for readers: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world*, 3rd edn. RWS Publications, Pittsburgh.
- Teimoori, S., Olya, M.H. and Miller, C.J., 2023, Groundwater level monitoring network design with machine learning methods. *Journal of Hydrology*, 625(B), 130145, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130145>.
- Wu, Y., 2004, Optimal design of a groundwater monitoring network in Daqing, China. *Environmental Geology*, 45, 527-535, <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0907-x>.