

최적의 지하댐 입지 선정을 위한 효율적 평가 방법 개발

정진아 · 박은규*

경북대학교 지구시스템과학부

Development of an Efficient Method to Evaluate the Optimal Location of Groundwater Dam

Jina Jeong and Eungyu Park*

Department of Geology, Kyungpook National University, Daegu, Republic of Korea

(Received: 01 June 2020 / Revised: 04 June 2020 / Accepted: 19 June 2020)

In this study, a data-driven response surface method using the results acquired from the numerical simulation is developed to evaluate the potential storage capacity of groundwater due to the construction of a groundwater dam. The hydraulic conductivities of alluvium and basement rock, depth and slope of the channel are considered as the natural conditions of the location for groundwater dam construction. In particular, the probability models of the hydraulic conductivities and the various types of geometry of the channel are considered to ensure the reliability of the numerical simulation and the generality of the developed estimation model. As the results of multiple simulations, it can be seen that the hydraulic conductivity of basement rock and the depth of the channel greatly influence to the groundwater storage capacity. In contrast, the slope of the channel along the groundwater flow direction shows a relatively lower impact on the storage capacity. Based on the considered natural conditions and the corresponding numerical simulation results, the storage capacity estimation model is developed applying an artificial neural network as the nonlinear regression model for training. The developed estimation model shows a high correlation coefficient (>0.9) between the simulated and the estimated storage amount. This result indicates the superiority of the developed model in evaluating the storage capacity of the potential location for groundwater dam construction without the numerical simulation. Therefore, a more objective and efficient comparison for the storage capacity between the different potential locations can be possibly made based on the developed estimation model. In line with this, the proposed method can be an effective tool to assess the optimal location of groundwater dam construction across Korea.

Key words : groundwater dam, optimal location, groundwater flow numerical simulation, response surface method, artificial neural network

본 연구에서는 다양한 지하댐 입지조건에 대한 수치 모사 결과에 인공지능망 기반 반응 표면법을 적용함으로써 지하댐 건설에 따른 지하수 저류 가능량을 객관적으로 비교 및 평가할 수 있는 예측 모델을 구축하였다. 입지조건으로 기반암 및 충적층의 수리전도도, 하도의 깊이, 하도의 지하수 유동 방향으로의 경사가 고려되었다. 다양한 시나리오를 이용한 몬테카를로 기반 수치 모사 결과를 종합한 결과, 암반층 수리전도도 및 하도의 깊이가 지하댐 저류 효율에 가장 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었으며, 하도의 지하수 유동 방향으로의 경사도가 가장 미약한 영향력을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 수치 모사 결과를 기반으로 설정된 입지조건과 이의 결과를 입력 및 출력으로 하는 인공지능망 기반 예측 모델을 구축하였다. 인공지능망 기반 예측 모델의 성능 평가 결과, 모델을 통해 예측된 저

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided original work is properly cited.

*Corresponding author: egpark@knu.ac.kr

유량과 실제 수치 모사를 통해 산정된 저유량 간의 상관성이 0.9 이상의 높은 수치를 보임을 확인하였다. 따라서, 본 연구를 통해 개발된 비선형 예측 모델이 지하댐 개발 대상 지역에 대한 수치 모사 수행 없이 지하댐 건설에 따른 저유량을 즉각적으로 산정하는 데 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 개발된 예측 모델은 서로 다른 지역의 저유 가능량을 보다 객관적이고 효율적으로 비교하는데 이용될 수 있다. 따라서 개발된 모델은 국내 전 지역에 대하여 지하댐 개발 최적 입지를 선정하기 위한 효율적 도구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 지하댐, 최적 입지 선정, 지하수 유동 수치 모사, 반응 표면법, 인공신경망

1. 서 론

계절 및 지역적 특성이 강한 국내 강우 특성에 따른 용수공급의 어려움과 최근 기후변화로 인해 발생하는 장기간 가뭄 등에 대비한 적극적 대처 방안으로 안정적이며 친환경적인 수자원 확보시설의 필요성이 대두되고 있다. 특히, 안정적 수자원확보가 어려운 도서 및 해안지역, 가뭄 등에 취약하여 비상시를 대비한 수자원 확보 불가피 지역, 지하수 수량 및 수질이 불안정한 지역, 하천수 및 호소수 접근성이 양호하지 못한 지역에서의 수자원 확보 및 시설 구축이 필요한 상황이다. 근래 들어 지하댐, 지하수 인공함양시설 등 안정적인 수자원 확보시설에 관한 관심이 증가하고 있다. 지하댐은 지하 층적 대수층에 인공적인 차수벽을 설치하여 댐 상류 지하수위를 상승시키고 동시에 지하수를 저류하여 계획적이고 지속적인 지하수 개발 및 취수를 가능토록 만드는 시설이다. 지표댐과 비교하여 지하댐은 건설 시 수몰 지역이 발생하지 않아 생태학적 피해 발생 가능성이 작으며, 수면이 지표 아래에 위치하므로 증발에 의한 손실이 적고, 차수 벽체의 안정성이 지표 시설 대비 상대적으로 높은 장점이 존재한다. 또한, 지하댐을 해안지역에 설치할 경우, 부수적으로 해수 침투 현상을 방지할 수 있다는 이점이 존재한다. 국내에서는 1980 - 1990년대 설치된 경북 상주(이안) 및 영일(남송), 충청 공주(옥성), 전북 정읍 (고천 및 우일), 강원 속초(쌍천) 지역 지하댐이 이용되고 있다(Yong *et al.*, 2017). 국외의 경우, 중동 및 아프리카와 같은 건조기후 조건의 나라에서 용수 확보를 위해 활발히 건설 중이며, 일본이나 유럽 등 다수 선진국의 경우 용수 확보뿐만 아니라 염수 침입방지를 위해 지하댐을 활용하고 있다(Yong *et al.*, 2017).

안정적인 저류량 및 취수량을 확보할 수 있는 지하댐 개발 최적 입지를 선정하기 위해 다양한 방법이 이용되고 있다. 특히, 국내·외적으로 지하댐 개발 최적 입지 선정을 위해 다 기준 의사결정 방법 (Multi Criteria Decision Making, MCDM)의 일종인 계층분석과정

(Analytical Hierarchy Process, AHP)이 일반적으로 이용되고 있다(이상일 및 김병찬, 2003; K-water, 2004; Mohammad, 2012; Rezaei *et al.*, 2013; Dorfeshan *et al.*, 2014; Barkhordari, 2015). 계층분석은 다수의 목적, 고려항목, 및 의사결정 주체자 등이 연계된 복잡한 의사결정을 위해 널리 이용되는 기술이다. 이는 각 상위 계층 항목에 대한 하위 계층 후보들에 대한 평가 인자들의 중요도를 전문가의 주관적 평가 혹은 설문조사를 통해 얻은 항목별 점수로 선형조합한 후, 비교 및 분석을 통해 최하위 계층 중 특정 후보를 최종안으로 선택하는 과정이다. 계층분석과정은 주관적인 평가 요인을 통한 의사 결정기법으로 정량적 모델에 기초하기보다는 직관 및 전문가의 전문성을 바탕으로 비교적 단순한 논리를 통해 최적 입지를 선정하기 때문에 적용이 간편하며, 지리정보시스템(GIS)과 결합하여 광역적 지역에서 적지선정에 활용될 수 있다는 장점이 있어 널리 적용되고 있다. 계층분석과정을 이용한 국내 연구로, 이상일 및 김병찬 (2003)이 대표적이다. 해당 연구에서는 투수계수, 지하수 함양량, 대수층 두께 등 총 13개 입지 선정 인자를 고려하여 네 개의 국내 지역(고성 북천, 강릉 옥계, 삼척 원덕, 울산 강동)에 대한 입지평가를 시행하고 해당 지역에 대한 입지효율 우선순위를 정한 바 있다. 국외 연구 또한 대부분 계층분석과정을 통해 지하댐 입지 선정을 시행하고 있으며, 일부 연구는 일반적 계층분석과정에서 발생하는 전문가들의 평가 결과의 불확실성을 고려하기 위해 퍼지 계층분석과정(Fuzzy AHP)을 제안하고 사용한 바 있다(Rezaei *et al.*, 2013).

기존 계층분석과정을 이용한 지하댐 최적 입지 선정 방법은 이행 방법이 비교적 간단하다는 측면에서 대규모 적지선정에는 유리할 수 있으나 정성적 및 주관적 평가를 기초로 함으로써 다양한 항목을 고려한 입지 선정에서 항목별 객관적·정량적 중요도 및 평가 기준을 산정 할 수 없고 그 결과를 검증하는 것이 불가능하다는 단점이 있다. 특히, 중규모 최적지 선정과정에서 더욱 객관적인 입지평가가 이루어지기 위해서는 다

양한 수리/수문, 지질/지형, 및 기하적 요소들의 지하댐 저류량에 대한 정량적 기여도가 고려되어야 한다. 계층분석과정의 경우 주관적/정성적 기반의 입지평가 방법이므로 이러한 복합적 작용에 대한 객관적 근거 제시가 미흡하며, 그 결과 다수의 후보지 간 지하댐 건설 효율성 비교가 어렵다. 따라서 지하댐 입지조건을 고려한 지하수 유동 모델링을 통해 지하댐 건설에 따른 지하수 저류량 및 취수 가능량을 정량화하고 각 입지조건에 대한 건설 효율성 분석을 시행할 필요성이 제기되고 있다.

지하수 유동 모델링을 통하여 지하댐 건설에 따른 효과를 분석한 연구로 Onder and Yilmaz (2005), Kim *et al.* (2013)를 예로 들 수 있다. 그러나 지하댐의 저류 용량 결정을 위한 정량적 분석에 관련된 연구는 상대적으로 희소하다. Kim *et al.* (2013)은 전남 완도군 청산도를 대상으로 지하수 유동 모델링(MODFLOW) 및 밀도류를 모의할 수 있는 용질거동 모델링(SEWAT)을 실시하여 지하댐 건설 전후의 지하수위 및 물수지 변화와 그 결과로 해수의 침투에 따라 나타나는 염도 분포 변화를 분석함으로써 댐 건설로 인한 영향을 정량화한 바 있다. 또한, Onder and Yilmaz (2005)는 MODFLOW를 이용하여 해안 대수층 내 지하댐 건설의 효과에 대해 평가 한 바 있다. 그러나 해당 연구들은 지하댐 건설에 따른 지하수 저류량에 대한 수리 지질학적 인자들의 민감도 분석이 이루어지지 않아 최적 입지 선정 항목에 대한 요인 평가가 제한적이며, 이에 따라 해당 연구들의 범용적 효용성이 크지 않다고 할 수 있다.

본 연구에서는 다양한 지하댐 입지조건들을 고려한 수치 모사를 기반으로 지하댐 건설 시 저류량 및 취수 가능량을 정량적으로 비교 평가할 수 있는 모델을 구축하였다. 또한, 최적 입지 선정을 위해 고려되는 다양한 입지조건들에 대한 정량적 평가를 실시하였다. 이를 위해, 다양한 입지항목이 고려된 시나리오를 바탕으로 지하댐 건설에 따른 지하수 유동 수치 모사를 시행하고 모사 결과를 기반으로 입지조건에 대한 평가가 실시되었다. 또한, 그 결과를 종합하여 상당한 전산 자원 및 연산시간을 요구하는 수치 모사를 수행할 필요 없이 평가자가 손쉽게 주어진 지역의 입지조건을 기반으로 지하댐 효율성을 평가할 수 있는 도구를 개발하였다.

2. 방법론

본 연구에서는 지하댐을 건설하고자 하는 유역 부지

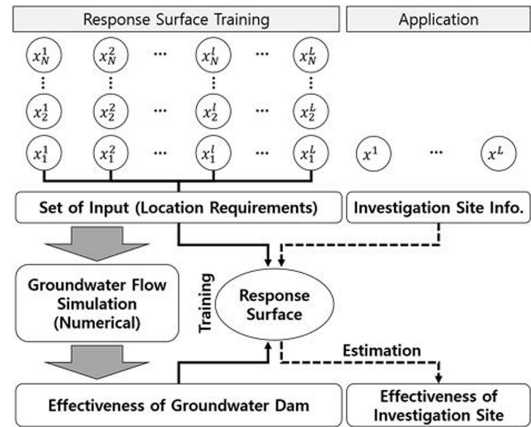


Fig. 1. Schematic diagram of the applied methods in this study.

내 수리지질학적 인자, 기하적 인자, 수리경계조건 등의 다양한 지하댐 입지조건들과 지하댐 지하수 저류효율 간의 관계를 평가하기 위해 반응표면법(response surface method, RSM)을 이용하였다(그림 1). 그림에서 보는 바와 같이 다양한 지하댐 입지조건을 반응표면 구축을 위한 설명변수로 설정하고 이러한 입지조건에 따른 지하댐 저류량을 반응변수로 설정하였다. 이때, 통계적 분포특성을 기반으로 체계적으로 변화되도록 설계된 각 입지조건들을 수치모델링의 입력자료로 활용하여 지하댐 저류량을 도출한 후, 입지조건들과 산정된 저류량 간 최적 관계 모델을 제작함으로써 지하댐 효율성 평가를 위한 반응표면을 구축하였다(그림 1). 최적 관계 모델을 제작하기 위해 본 연구에서는 다중 선형회귀분석모형(multiple linear regression model)과 비선형회귀분석모형의 일종인 인공신경망(artificial neural network, ANN)을 회귀분석모형으로 이용하였으며, 두 모델 이용 결과에 대한 비교·평가가 수행되었다. 다양한 지하댐 입지조건별 지하수 유동 수치 모사를 위해 상용 지하수 유동 모사 소프트웨어인 MODFLOW-NWT(Niswonger *et al.*, 2011)를 이용하였다.

2.1. 반응표면법(Response Surface Methodology, RSM)

RSM은 1951년 Box and Wilson(Box and Wilson, 1951)에 의해 제안된 방법으로 어떤 시스템에 영향을 주는 다양한 설명변수(또는 입력변수)와 이에 대한 시스템 반응 결과(반응변수 또는 출력변수) 간의 대표적

관계식을 구축하는 기법이다. 본래, RSM의 경우 실제 실험 결과에 대한 모델을 구축하기 위해 개발되었으나 최근 수치모델링 결과에 이용되어 방대한 연산량을 요구하는 수치 모사(예를 들어, 유한요소법 기반의 수치 모델)의 대안 모델(surrogate model)로 이용되고 있다. 따라서 특정 물리적 시스템에 대해 구축된 반응표면이 존재할 경우, 새로운 설명변수 조건을 주더라도 해당 변수에 대한 추가적인 물리적 수치모델링 없이 반응표면을 이용하여 쉽게 반응결과를 도출할 수 있다.

1) 다중선형회귀분석(Multiple linear regression, MLR)

MLR은 수학적으로 벡터 형태로 표현하면 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$y_i = \mathbf{X}_i^T \mathbf{w} + \epsilon_i \quad (1)$$

식 (1)에서 \mathbf{w} 는 가중치, \mathbf{x} 및 y 는 각각 설명 및 반응변수, 그리고 ϵ 은 모형 예측에 따른 오차를 의미한다. 여기서 \mathbf{x} 및 \mathbf{w} 의 차원은 회귀분석을 위해 고려된 회귀모형의 차수에 따라 달라진다. n 번의 몬테카를로 지하담 모사를 실시하여 총 n 개 자료가 가용할 때 식 (1)에 근거하여

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cdots & x_1^T & \cdots \\ \cdots & x_2^T & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & x_n^T & \cdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{pmatrix} = \mathbf{A}\mathbf{w} + \mathbf{E} \quad (2)$$

와 같이 문제를 구성할 수 있다. 여기서 \mathbf{A} 는 계획행렬 (design matrix)이다. 식 (2)을 최소제곱근 문제로 변환하여 \mathbf{w} 는 식 (3)를 통해 획득할 수 있다.

$$\mathbf{w} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{Y} \quad (3)$$

2) 인공신경망(Artificial neural network, ANN)

ANN은 설명변수와 반응변수 간의 비선형적 관계를 학습할 수 있으며, 이처럼 학습된 비선형 관계식은 새로운 설명 자료를 특정 클래스로 분류하기 위한 결정 경계로 이용되거나 비선형회귀모델의 목적으로 사용된다. 본 연구에서는 각 지하담 입지조건을 설명변수로 하고 이에 대한 지하담 저유량을 반응변수로 설정하여 두 변수 간 비선형 관계(반응표면)를 학습하기 위한 목적으로 ANN을 사용하였다.

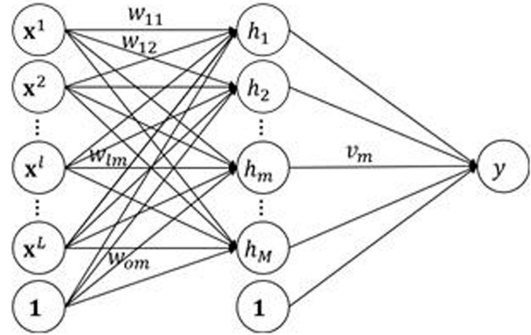


Fig. 2. The basic network structure of the applied artificial neural network in this study.

총 N 회 몬테카를로 지하담 수치 모사 결과인 저유량(Y) 및 이에 대한 총 L 개의 지하담 입지 조건

$$\left(\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1^1 & \cdots & x_n^1 & \cdots & x_N^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^L & \cdots & x_n^L & \cdots & x_N^L \end{bmatrix} \right)$$

가 주어졌을 때, 본 연구에서 고안된 ANN 네트워크는 그림 2와 같다. 본 연구에서는 입력 뉴런으로부터 받아들인 L 종류의 n 번째 입력변수 ($[x_n^1, \dots, x_n^L]^T$)로부터 최종 n 번째 출력변수(y_n)를 입력층, 은닉층 및 출력층으로 구성된 다층 전방향 신경망 (multi-layer feed Forward network)을 통해 계산하였다(식 (4)).

$$y_n = \phi_o \left(\sum_{j=1}^M v_j \phi_h \left(\sum_{i=1}^L w_{ij} x_n^i + w_{0j} \right) + v_0 \right) = \phi_o \left(\sum_{j=1}^M v_j h_j + v_0 \right) \quad (4)$$

여기서, L 및 M 는 각각 입력 및 은닉 뉴런의 개수를 의미한다. 위 비선형 관계식의 핵심요소인 가중치들(w_{ij} , w_{0j} , v_j 및 v_0) 결정하기 위해 교사학습 (supervised learning)을 기반으로 하며, 각 각의 가중치들이 의미하는 바는 다음과 같다.

- w_{ij} : 입력 뉴런 x^i 에서 은닉 뉴런 h_j 로의 연결 가중치;
- w_{0j} : 은닉 뉴런으로의 바이어스 입력의 가중치;
- v_j : 은닉 뉴런 h_j 에서 출력 뉴런 y 로의 연결 가중치;
- v_0 : 출력 뉴런으로의 바이어스 입력의 가중치

이때, 가중치는 경사 하강법을 ANN의 학습에 적용하여 실질적으로 구현가능하도록 알고리즘화 한 오류역전파 알고리즘(error back-propagation algorithm)을 통해 학습되었다.

3. 지하댐 건설에 따른 지하수 저유량 평가를 위한 수치 모사

3.1. MODFLOW-NWT: A Newton Formulation for MODFLOW-2005

본 연구에서는 지하댐을 건설함에 따라 변화하는 지하수 유동 프로세스를 모사하기 위해 MODFLOW-NWT 패키지를 이용하였다. MODFLOW-NWT 패키지는 기존 MODFLOW-2005가 지니는 건조 셀(dry cell) 문제를 해결하기 위해서 개발되었다. MODFLOW-2005에서는 셀 내 수위가 바닥 수위보다 낮아질 경우, 해당 셀이 건조 셀이 되면서 비활성화되고, 이러한 문제를 풀기 위하여 가상의 수분 공급을 통하여 해당 셀을 재 습윤화(rewetting)한다. 이와 같은 과정에서 비선형 문제가 발생할 수 있으며, MODFLOW-NWT는 이러한 문제를 근본적으로 해결한 패키지이다. MODFLOW-NWT 패키지는 항상 셀 간 연결성을 수위에 따라 업데이트하는 UPW(upstream-weighting) 패키지와 공동으로 사용된다.

1) 수치 모델 구축

앞서 설명한 바와 같이 본 연구에서는 다양한 지하댐 입지조건에서 지하댐 건설에 따른 저유효과를 비교 및 평가하기 위한 목적으로 지하수 유동 수치 모사를 실시하였다. 따라서 본 연구에서는 일반화된 지하댐의 형태 및 주변 입지조건을 수치 모사에 고려하였다. 이에 따라, X 방향으로 2km, Y 방향으로 1km의 직사각형 형태의 유역이 수치 모사 모델에 고려되었으며 Z 방향으로는 0.5km 깊이까지 대수층이 연장되어있는 것으로 설정하였다(그림 3). 그리고 대수층은 총 2층으로 구성되어 있음을 가정하였으며, 상부층은 하도 형태를 보이는 충적층, 하부층은 암반층으로 설정하였다. 그림 3에서 상부 주황색층이 충적층을 나타내며 하부 보라색층이 암반층을 나타낸다(해당 그림은 Z방향으로 50배 과장되어 도시된 그림). 수치 모사를 위해 해당 유역을 X 및 Y 방향으로 각각, 10m 및 10m 크기의 정사각 격자 모양으로 차분하였으며 Z 방향으로의 크기는 지하댐 건설 유역 하도 형태에 따라 변화하도록 설정하였다. 특히, 본 연구에서는 하도의 폭, 깊이 및 경사에 따른 지하댐 저유 효율 평가를 실시하고자 하였기 때문에, Z 방향으로의 격자 크기 및 지형 고도는 다양한 케이스로 구성되어 수치 모사에 적용되었다. 그림 3에 도시된 지형 고도 예시는 하도의 깊이가 15m 이고 기반암의 경사도가 10%인 경우이다. 최종적으로

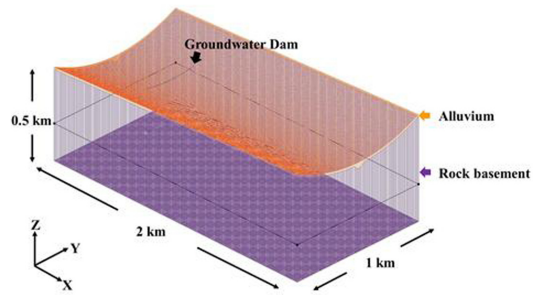


Fig. 3. An example of the 3-dimensional conceptual model for groundwater flow simulation to evaluate the capacity of groundwater storage after construction of groundwater dam.

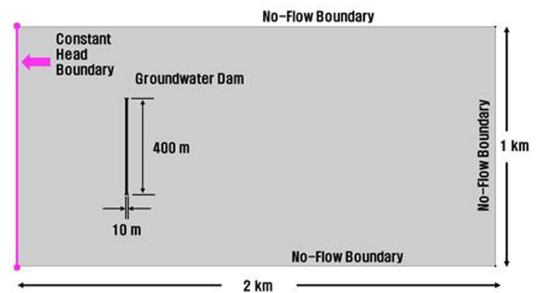


Fig. 4. The size of the domain and the hydraulic boundary condition applied for groundwater flow simulation.

본 연구에 이용된 수치 모사 모델의 X, Y, 및 Z 방향으로의 격자 수는 각각 200개, 100개, 2개이며, 총 40,000개의 격자로 지하수 유동 수치 모사 모델을 구성하였다.

지하댐은 그림 3 및 4에서 보는 바와 같이 하도의 하류 방향에 존재하는 것으로 가정하였으며, 하도를 따르는 지하수 흐름을 차단할 수 있도록 하도를 가로지르는 방향으로 연장되도록 설정하였다. 설정된 지하댐의 길이는 400m이며 폭은 10m로 가정하였으며, 상부층인 충적층 깊이까지 연장되는 것으로 가정하였다. 본 연구의 목적은 지하댐 저유효율을 높일 수 있는 자연적 입지조건을 선정하는데 있으므로 건설될 지하댐의 공학적 조건에 대한 고려는 배제하였다. 지하댐을 구성하는 매질의 수리학적 물성에 따라 지하수의 저유효율이 달라질 수 있다. 본 연구에서는 콘크리트 그라우팅 지하댐을 가정하였으나 보수적 상황에서의 지하수 저유 효율을 적용하기 위하여 지하댐의 수리적 물성치는 교란이 없는 점토의 수리전도도 보다 대체로 낮도록 가정하였으며, 이에 따라 전 지하댐 영역에 대

하여 1.0×10^{-8} cm/sec로 일정하게 설정하였다. 이는 모든 수치 모사 케이스에서 동일하게 적용되었다.

지하수 유동 수치 모사의 초기 수리수두 조건(initial condition)은 지형 고도와 동일하게 설정하였으며 수치 모델 유역의 왼쪽경계를 고정수두 경계(Constant head boundary)로 설정하여 수리 수두가 45m로 일정하게 유지되도록 모사를 실시하였다(그림 4). 그 외 나머지 경계는 무흐름 경계(No-flow boundary)로 설정하였다.

2) 입력변수 설정

a. 충전층 및 기반암 수리전도도 및 공극률

본 연구에서 확률 변수화한 설명변수는 크게 두 가지이며, 이에에는 상부 충전층의 수리전도도와 하부 암반층의 수리전도도가 있다. 미고결 다공성 퇴적물의 통계적 수리특성을 얻기 위하여 본 연구에서는 기존 연구된 두 가지 연구결과를 활용하였으며, 이에에는 Carsel and Parrish (1988)에 의해 수행된 토양 종류 별 수리특성 연구와 Jeon *et al.* (2005)에 의해 수행된 포화 수리특성 연구가 이용되었다. 연구의 합리성을 확보하기 위하여 본 연구에서는 두 연구의 결과를 모두 사용하였으며 이를 통하여 수리전도도 및 공극율에 대한 통계적 합리성을 확보하였다.

Carsel and Parrish(1988) 및 Jeon *et al.* (2005) 모두 수리특성에 대한 통계 모델을 제시한다. Carsel and Parrish(1988)는 토양 종류별 불포화 수리특성을 설명하는 변수(즉, 수리전도도, 잔류포화도, van Genuchten 모델 파라미터)에 대한 평균, 분산, 범위, 변수 상호 간의 공분산을 획득하고 이를 기반으로 각 수리변수 자료를 분석하여 경험적 확률밀도 분포를 가장 적절히 설명하는 이상적 모델을 정의한 바 있다. Jeon *et al.* (2005)는 보다 국내 상황에 적합한 지하담

자유 효율 평가를 실시하기 위하여 참조되었다. 해당 연구는 국내 대수층의 수리학적 특성을 통계적으로 평가한 연구로 국가 지하수 관측망으로부터 획득한 자료를 분석하여 국내 충전 대수층 및 암반 대수층의 평균 수리전도도를 평가하고 있다. 산정된 충전 대수층의 평균 수리전도도는 1.26m/day이며, 암반대수층의 평균 수리전도도는 0.076m/day이다. 본 연구에서는 해당 연구에서 제시하고 있는 암반 및 충전 대수층의 수리전도도 평균 및 분산 값을 지하담 수치 모사 모델의 기반암 및 충전층의 수리전도도를 산정하는데 참조하였다. 제시된 값 및 수리변수 확률모델을 이용하여 기반암 및 충전층 수리전도도에 대한 확률분포를 형성하고 이를 기반으로 몬테카를로 기법 기반 무작위 샘플링을 통해 총 200세트의 암반 및 충전층 수리전도도 자료를 구성 및 수치 모사에 활용하였다.

최종적으로 몬테카를로 기반 지하수 거동 수치 모사에 이용된 기반암 및 충전층의 수리전도도 값들의 확률분포는 그림 5와 같다. 지하수 거동 모사 결과의 수치 해석적 안정성을 확보하고 지하담 건설에 의해 충전층 내 지하수가 반드시 저유되는 케이스만을 고려하기 위하여 기반암의 수리전도도가 상당히 높은 경우와 충전층의 수리전도도가 상당히 낮은 경우는 수치 모사에서 고려하지 않았다. 따라서 그림 5에서 보는 바와 같이 기반암 수리전도도의 최소 및 최대 범위를 각각 0.05m/day 및 1m/day, 충전층의 최소 및 최대 수리전도도 값은 0.5m/day 및 10m/day로 설정한 후, 무작위 샘플링을 실시하여 수치 모사 입력변수 세트를 구성하였다.

b. 하천기하

지하수 유동 수치 모사를 위한 가상 지하담을 구성

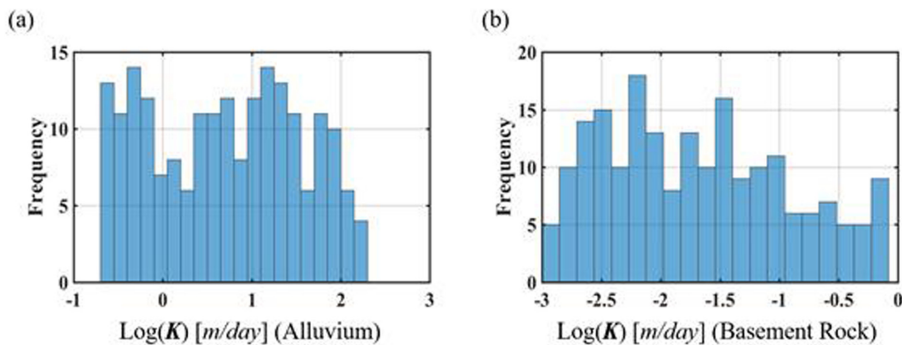


Fig. 5. Probability distribution of hydraulic conductivities (logarithmic scale) of (a) alluvium and (b) basement rock applied to Monte-Carlo based numerical simulation.

하기 위해서는 현실적인 하천 및 충적층 형태를 고려한 지하댐 기하 재현이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 우수체계 및 하천을 이루고 있는 퇴적물 입경의 중앙값을 이용하여 산정되는 하천 기하 관련 경험식 (USDA, 2008)으로부터 가상 지하댐 개발지의 암반 형태를 구성하고 지하수 유동 수치 모사에 반영하였다. 가상 지하댐 설치지역의 충적층 재현을 위해 이용된 식은 다음과 같다.

$$d = \left(\frac{F_S Q}{F_B^2} \right)^{1/3} \quad (5)$$

$$W = \left(\frac{F_B Q}{F_S} \right)^{1/2} \quad (6)$$

$$F_B = 1.9 \sqrt{D_{50}} \quad (7)$$

$$S_{side} = \frac{F_B^{0.875}}{\frac{3.63g}{\nu^{0.25}} W^{0.25} d^{0.125} \left(1 + \frac{C}{2330} \right)} \quad (8)$$

위 식(5~8)에서 W 는 feet 단위의 하천 폭, F_B 는 하천 바닥 계수, F_S 는 하천 측면계수, Q 는 ft^3/sec 단위의 유량, D_{50} 는 mm 단위로 하천을 구성하는 입자들의 입경 분포 중앙값, d 는 feet 단위의 하천 심도, S_{side} 는 하천 측면 경사, C 는 ppm 단위로 하천 바닥 퇴적물의 밀도, g 는 ft/sec^2 단위의 중력가속도, 그리고 ν 는 ft^2/sec 단위로 유수의 동점성계수를 각각 의미한다. 하도 기하 결정을 위해 이용된 파라미터 W , d , 및 S 에 대한 정보는 그림 6과 같다. 또한, 경험적으로 F_S 의 값은 점착력이 약한 퇴적물로 이루어진 하천의 경우 0.1, 실트, 점토, 양토 등으로 이루어져 있을 때, 0.2, 그리고 잘 다져진 점토로 이루어져 있을 때, 0.3의 값을 갖는다(USDA, 2008).

위 관계식을 통해 하도의 폭(W), 깊이(d), 하도 측면 경사(S_{side})를 결정하였으며, 이때, 하도의 깊이가 5m, 10m, 15m인 경우를 고려하여 세 가지 케이스에 대한 형태를 하상 지형에 고려하였다. 그리고 유체 흐름 방향으로의 하도 경사(S_{flow})는 2.5%, 5%, 7.5%, 10%의 비율로 변화하는 것으로 설정하여 최종적으로 가상 지하댐 개발지의 지형을 구성하였다. 이를 통해, 총 12종류의 하상 형태를 재현한 후, 지하수 유동 수치 모사 모델의 지형 고도로 적용하였다.

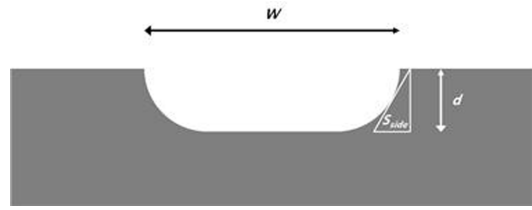


Fig. 6. Conceptual diagram of the geometry of the channel applied in this study.

c. 함양량

본 연구에서의 지하수 함양은 강수에 의해서만 발생하며, 전체 유역에 동일 양의 강수가 지속적으로 발생하나 함양은 지하수 유동 수치 모사 모델에서 최상부 층인 충적층에서 발생하고, 지하수로 함양됨을 가정하였다. 이때, 충적층의 함양율은 10%로 설정하였다 (KRC, 2014). 국내 상황에 최적화된 지하댐 최적 입지 선정 방법을 도출하기 위해 지하수 유동 수치 모사에 국내 기상 조건을 충분히 반영하고자 하였고 이에 기상청 제공 국내기후자료가 활용되었다. 우리나라 중부 지방은 연간 1,200mm에서 최대 1,500mm의 강수가 발생하며, 남부지방의 경우, 연간 1,000mm에서 1,800mm, 제주도의 경우, 1,500mm에서 2,000mm의 강수가 발생하는 것으로 나타났다. 이처럼 우리나라 전체지역에 대한 강수량이 최대 1,000mm에서 2,000mm의 범위를 보여줌에 따라, 본 연구를 위해 구성된 지하수 유동 수치 모사 모델의 함양량을 최소 0.000274m/day에서 최대 0.000548m/day로 변화시키며 이에 따른 지하댐 저유효율을 산정하였다.

4. 적용 결과

4.1. 저유효율 평가 과정

충적층에 지하댐을 건설할 경우, 지하댐의 차수 효과에 의해 지하수 유동 흐름이 느려지고 지하댐 상류 유역 내 지하수위는 상승하며 지하수가 지하댐 주변에 저류되는 효과를 가져올 수 있다. 이와 반대로 지하댐 하류 유역에서는 지하수위가 저하되는 효과가 나타난다. 본 연구에서는 지하댐의 효율성을 평가하기 위해 지하댐 상류 유역에서의 지하수위 상승효과만을 고려하고 지하댐 하류 유역에서의 지하수위 저하에 따라 발생하는 이차적 문제(예. 해수침투 발생에 따른 문제)에 대한 지하댐 효율은 고려하지 않았다. 따라서 지하댐을 건설함에 따라 발생한 지하댐 상류 유역 내 지하

수위 상승량만을 정량화함으로써 지하댐 저유효율을 평가하였다. 저유효율 산정을 위해 실시된 평가 프로세스는 그림 7과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 먼저, 지하댐 건설 전 및 건설 후 충적층에서의 지하수위 변화량 분포(H_{diff})을 다음 식을 통해 산정하였다.

$$H_{diff}(i,j) = H_{after}(i,j) - H_{before}(i,j),$$

$$i = 1, \dots, 200 \quad j = 1, \dots, 100 \quad (9)$$

여기서, i 는 X 방향으로의 격자 인덱스를 의미하며, j 는 Y 방향으로의 격자 인덱스를 의미한다. 지하수위 상승량만을 고려하고, 지하댐 상류 구역의 변화량만을 저유효율 평가에 고려하기 위해 다음과 같은 식을 이용하여 지하수위 상승분포도(H_{up})를 산정하였다.

$$H_{up}(i,j) = \begin{cases} H_{diff}(i,j) & H_{diff}(i,j) > 0 \\ 0 & H_{diff}(i,j) \leq 0 \end{cases}$$

$$i = 46, \dots, 200 \quad j = 1, \dots, 100 \quad (10)$$

최종적으로 지하댐 건설에 따른 지하수 저유량은 지하수위 상승분포도를 기반으로 다음과 같이 계산되었다.

$$Eff_{GD} = \sum_{i=1}^{200} \sum_{j=1}^{100} H_{up}(i,j),$$

$$i = 1, \dots, 200 \quad j = 1, \dots, 100 \quad (11)$$

4.2. 반응표면 구축

지하댐은 앞서 설명한 바와 같이 대수층 구성물질의 수리물성, 지하댐 건설 구역의 기하적 형태 등에 따라

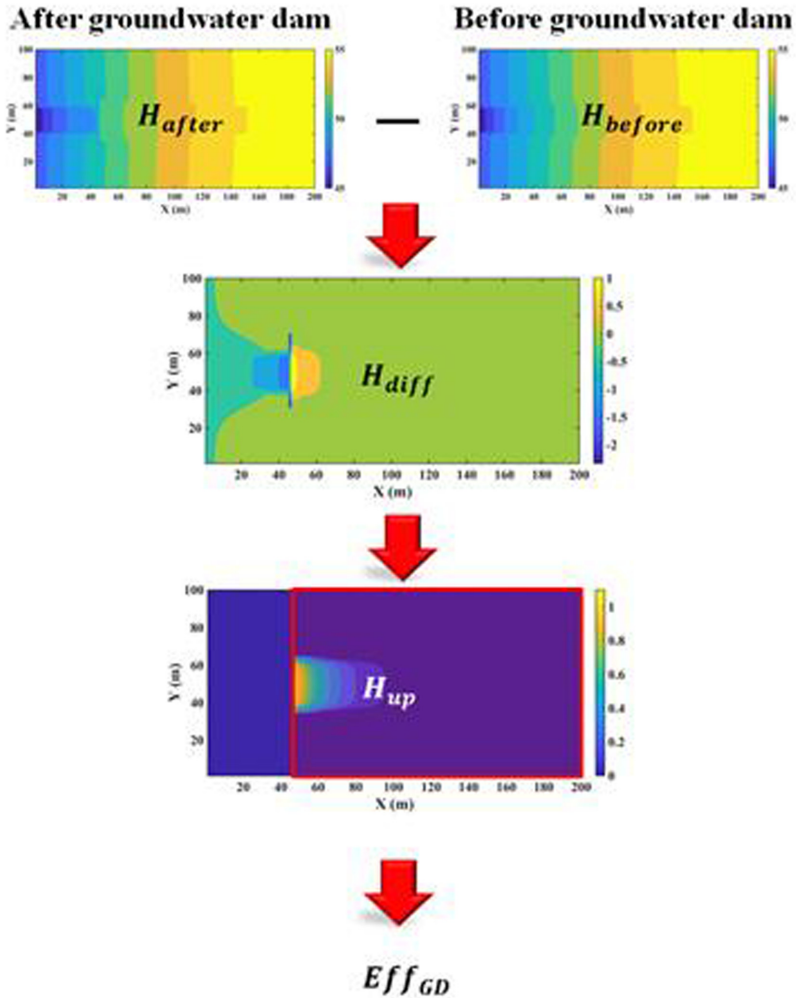


Fig. 7. Process for evaluating the capacity of groundwater storage after the construction of groundwater dam.

이의 자유효율이 달라진다. 따라서 지하댐 건설에 따른 자유효과를 최대화할 수 있는 최적 입지를 선정하기 위해서는 해당 입지조건들과 자유효율 간 관계를 정확하게 정립하는 것이 중요하다. 또한, 이러한 정보를 구축함으로써 지하댐 건설 예정지의 자유량을 사전에 예측하고 자유효과를 최대화할 수 있는 건설 방안 및 관리 계획을 수립하는 데 도움을 줄 수도 있다. 본 연구에서는 반응표면구축법을 이용하여 다양한 지하댐 입지조건들과 지하댐 건설에 따른 자유효과 간 관계식을 정립하였다. 이를 위해, 몬테카를로 모사를 통해 도출된 결과들을 모두 종합적으로 고려하여 지하댐 건설 구역 내 다양한 입지조건들과 지하댐 자유 효율 간 복합적 관계를 다차원 식을 통해 규명하였다. 반응표면 구축을 위한 입력변수로는 하도 깊이 및 경사도, 암반층 및 충적층 수리전도도가 이용되었으며, 반응변수로는 지하댐 자유량을 이용하였다. 반응표면 구축을 위해 선형 및 비선형 회귀분석 기법을 이용하였으며, 각 방법론을 이용하여 구축된 반응표면의 예측 성능을 검증하기 위해, 몬테카를로 모사에 이용된 총 200세트 ($N = 200$)의 파라미터 중, 총 개수의 70%에 해당하는 140개 ($N_{tm} = 140$)의 파라미터(x^{tm})와 해당 파라미터를 입력자료로 하는 수치 모사 결과(y^{tm})를 반응표면을 구축하기 위한 학습 자료($D_{tm} = [(x_1^{trn}, y_1^{trn}), (x_2^{trn}, y_2^{trn}), \dots, (x_{N_{trn}}^{trn}, y_{N_{trn}}^{trn})]$)로 이용하고, 나머지 30%인 60개 ($N_{val} = 60$)의 입력 파라미터 및 대응되는 수치 모사 결과를 검증자료($D_{val} = [(x_1^{tst}, y_1^{tst}), (x_2^{tst}, y_2^{tst}), \dots, (x_{N_{val}}^{tst}, y_{N_{val}}^{tst})]$) 이용하였다. 이때, 학습 및 검증에 이용된 자료는 전체 자료에 대한 무작위 샘플링을 통해 구성되었다. 구축된 반응표면($f(x^{tm}; \theta)$)의 예측성능을 정량적으로 검증하기 위한 기준으로 최소오차제곱(root mean squared error, RMSE)을 이용하였으며, 해당 식은 다음과 같다.

$$\epsilon = \frac{1}{N_{val}} \sum_{i=1}^{N_{val}} (y_i^* - y_i)^2 \quad (12)$$

여기서 y^* 는 D_{tm} 를 이용하여 구축된 반응표면($f(x; \theta)$)에 검증자료의 입지조건들(x^{tst})을 입력하여 예측된 지하댐 자유량을 의미하며, y 는 x^{tst} 를 입력자료로 하는 수치 모사를 통해 산정된 실제 지하댐 자유량을 의미한다. 또한, 예측된 지하댐 자유량(y^*)과 실제 수치 모사를 통해 산정된 지하댐 자유량(y) 간 상관성(ρ) 분석을 실시하여 반응표면을 통해 예측된 지하댐 자유량이 실제 수치 모사 결과를 통해 산정된 자유량과 얼마나 유사성이 있는지를 평가하였다.

1) 암반 및 충적층 수리전도도에 대한 자유량 변화

a. 선형 회귀모형을 이용한 반응표면

앞서 설명한 바와 같이 지하댐이 건설될 대수층의 암반 및 충적층의 수리전도도는 다양하게 변화할 수 있으며, 이들과 지하댐 자유량과의 관계가 비선형적으로 나타났다. 또한, 이 두 층의 수리 물성 특성은 다른 입지조건들과 비교하였을 때, 지하댐 자유 효율에 상당히 큰 영향을 주는 것을 확인하였으므로 먼저, 두 입지조건(즉, 암반층 및 충적층 수리전도도)의 변화에 대한 지하댐 자유량 변화 관계를 파악하고 두 입지조건 중 어떠한 조건에 지하댐 자유 효율이 더 큰 영향을 받는지를 확인하고자 하였다. 그림 8은 몬테카를로 수치 모사를 위해 구성된 총 200개의 암반층 및 충적층 수리전도도 입력변수와 이를 입력변수로 하는 지하수 유동 수치 모사를 통해 산정된 지하댐 자유량과의 관계를 보여준다. 이때, 하도의 깊이 및 경사도는 10m 및 5%로 일정한 수치 모사를 실시하여, 하도의 깊이 및 경사도에 따른 자유효과는 해당 분석에서 제외하였다. 그림에서 보는 바와 같이 암반층의 수리전도도가 낮고 충적층의 수리전도도가 높을수록 지하댐 내 자유되는 지하수의 양이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이때, 암반층 및 충적층 수리전도도의 변화에 따른 지하댐 자유량 변화양상이 비선형적 관계를 보이는 점을 고려하여 두 층의 수리전도도를 입력변수로 하고 자유량을 반응변수로 하는 2차 다항식(2 degree of polynomial function)의 반응표면($f(K_a, K_r; \theta)$)을 구축하였다. 이용된 반응표면의 일반식은 다음과 같다.

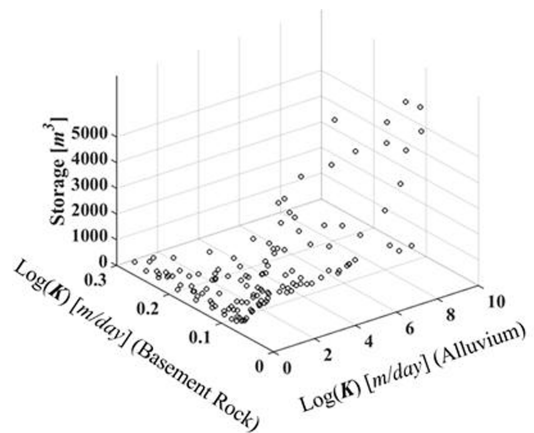


Fig. 8. The variation trend of groundwater storage with respect to the hydraulic conductivities of alluvium and basement rock in case of 10m depth of the channel and 5% of channel slope.

Table 1. The estimated weight coefficients (θ) of the developed response surface to evaluate the groundwater storage according to the hydraulic conductivities of alluvium and basement rock

Factor	θ	
bias	θ_0	5,124
K_a	θ_1	829
K_r	θ_2	72,683
K_a^2	θ_3	26
$K_a K_r$	θ_4	3,015
K_r^2	θ_5	210,141

$$f(K_a, K_r; \theta) = \theta_0 + \theta_1 K_a + \theta_2 K_r + \theta_3 K_a^2 + \theta_4 K_a K_r + \theta_5 K_r^2 \quad (13)$$

여기서 K_a 및 K_r 은 충적층 및 암반층의 수리전도도를 의미하며, θ 는 구축된 반응표면 선형 회귀식의 가중치를 의미한다.

최소 오차제곱근에 기반한 최적화기법을 이용하여 선형회귀식의 가중치를 산정하였으며, 각 항에 대하여 산정된 가중치 결과는 다음 표 1과 같다. 각 항(즉, K_a , K_r , K_a^2 , $K_a K_r$, K_r^2)에 대한 가중치(즉, θ_1 , θ_2 , θ_3 , θ_4 , θ_5)는 지하댐 저유량에 대한 각 항의 영향력을 설명해 준다. 따라서 산정된 가중치가 클수록 해당 인자가 지하댐 효율에 민감한 영향을 준다고 해석할 수 있다. 표 1에서 나타난 바와 같이 암반층 수리전도도로 구성된 항에 대체로 높은 가중치 값을 가지도록 산정되었다. 특히, K_r^2 에 대한 가중치가 210,141로 다른 항에 비하여 상당히 높은 결과를 보여주었다. 이는 암반층의 수리전도도가 충적층의 수리전도도에 비해 지하댐 저유 효율에 큰 영향을 미침을 의미한다. 따라서 지하댐 건설 최적 입지 선정 시, 건설 구역의 암반층 수리 물성에 대한 정밀한 조사가 전제되고 지하댐 건설에 적합한 조건의 암반층을 확보해야 지하댐 건설에 따른 저유 효율을 최대화시킬 수 있을 것으로 판단된다.

그림 9는 암반층 및 충적층 수리전도도에 대해 구축된 반응표면을 3차원 그래프로 도시화한 그림이다. 그림 9(a)를 통해 지하댐 저유량이 0 m^3 이상이 되기 위한 암반층 및 충적층 수리전도도 허용범위를 산정할 수 있으며, 그림 9(b)를 통해 지하댐 건설에 따른 지하수 저유량을 $1,000 \text{ m}^3$ 이상 확보하기 위한 대수층 물성치 범위를 알 수 있다. 이와 같은 정보는 실제 지하댐 건설 입지 선정 시, 암반층 및 충적층의 수리전도도 허용치 기준으로 사용 가능하며, 원하는 지하수 저유량을 확보하기 위한 대수층 탐사 기준으로 사용될

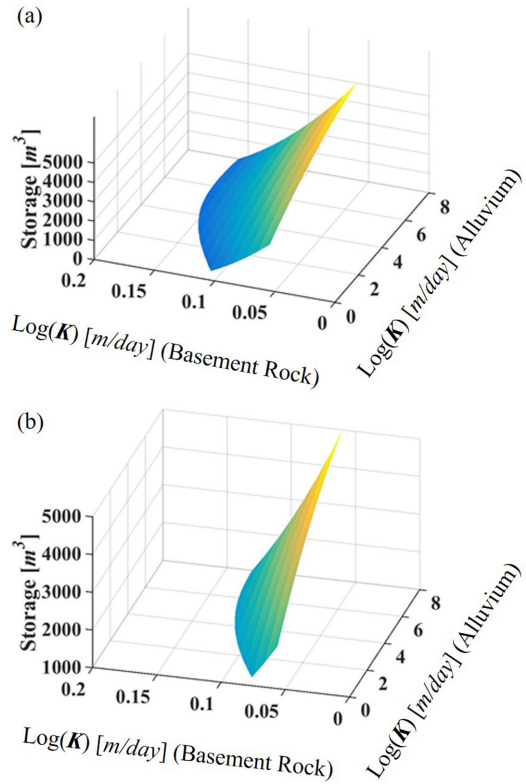


Fig. 9. The shape of the developed response surface according to the hydraulic conductivities of alluvium and basement rock in cases that the evaluated amount of groundwater storage is (a) 0 m^3 and (b) $1,000 \text{ m}^3$.

수 있을 것으로 판단된다. 또한, 원하는 저유량 확보를 위해 충적층 또는 암반층에 대한 공학적 설계 방안을 수립하는데 또한 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

앞선 분석 결과는 하도의 경사가 5%이고 하도 충적층의 깊이가 10m인 특정 지형 고도에 대해서 암반층 및 충적층 수리전도도에 대한 지하댐 저유 효율을 보여준다. 이를 확장하여 하도 경사가 2.5%, 5%, 7.5%, 10%이고, 하도 충적층 깊이가 5m, 10m, 15m일 때 또한 각 케이스마다 동일한 분석이 가능하다. 그림 10은 고려된 모든 지형고도 케이스에서 암반층 및 충적층 수리전도도 변화에 따른 지하댐 저유량 변화양상을 한 3차원 그래프에 모두 도시한 그림이다. 모든 경우에 대해서 충적층의 수리전도도가 증가하고 암반층의 수리전도도가 낮아질수록 지하댐 저유효율이 증가하는 패턴을 관찰할 수 있다. 따라서 다른 지형고도 케이스에 대해서도 동일한 방법을 적용하여 특정 구역별 반응표면 구축 및 분석이 가능하다.

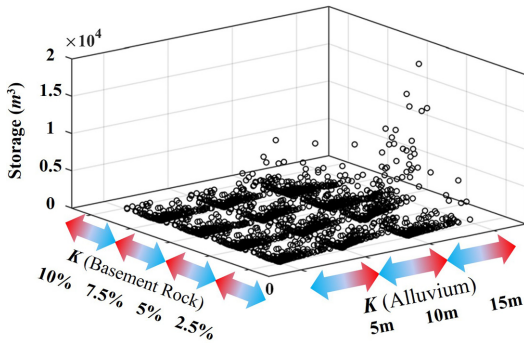


Fig. 10. The variational trend of groundwater storage according to the hydraulic conductivities of alluvium and basement rock in all the combinations of channel slope (2.5%, 5%, 7.5%, and 10%) and depth of the channel (5m, 10m, and 15m).

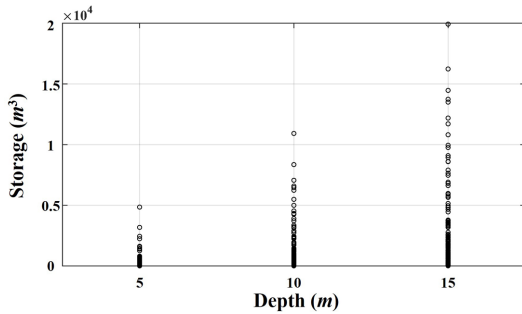


Fig. 11. The variational change of groundwater storage according to depth of the channel.

2) 하도 충적층 깊이에 대한 저유량 변화

해당 분석에서는 하도 충적층 깊이와 지하댐 저유량 간 관계를 평가하였다. 하도의 경사는 5%로 고정한 후, 하도 충적층의 깊이를 5m, 10m, 15m로 변화시키며 지형 고도를 설정하였으며, 이에 총 200세트의 충적층 및 암반층 수리전도도 세트를 입력하여 몬테카를로 수치 모사를 실시 및 결과를 산출하였다. 그림 11은 하도 충적층 깊이에 따른 저유량 결과를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 하도 충적층의 깊이가 증가함에 따라 지하댐 저유량이 증가하는 경향을 보이며 둘 간의 관계가 비교적 선형적임을 알 수 있다.

3) 하도 경사도에 대한 저유량 변화

해당 분석에서는 하도 충적층의 바닥 경사도와 지하댐 저유량 간 관계를 평가하였다. 이를 위해 하도 충적층의 깊이는 10m로 고정한 후, 경사도를 2.5%,

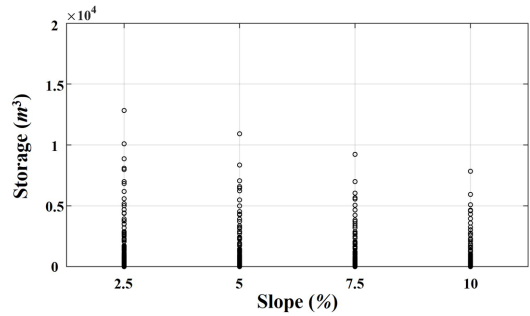


Fig. 12. The variational change of groundwater storage according to slope of the channel.

5%, 7.5%, 10%로 변화시키고, 총 200세트의 충적층 및 암반층 수리전도도 세트를 입력 물성치로하여 몬테카를로 수치 모사를 실시하였다. 그림 12는 경사도에 따른 지하댐 저유량 결과를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 하도의 경사가 낮아짐에 따라 지하댐 저유량이 증가하는 경향을 보이며, 경사도와 지하댐 저유량 간의 관계 또한 선형적으로 나타남을 알 수 있다.

4) 4가지 지하댐 입지조건에 대한 지하댐 저유량 반응표면 구축

해당 분석에서는 4가지 지하댐 입지조건인 암반층 및 충적층 수리전도도, 하도 깊이, 하도 경사도와 지하댐 저유량 간의 관계식을 구축하였다. 지하댐 저유량에 영향을 주는 입지조건들이 4가지로 증가함에 따라 해당 분석에서는 선형회귀모형뿐만 아니라 비선형회귀모형 또한 분석에 적용한 후, 두 모형을 통해 구축된 반응표면의 성능을 비교 분석하였다. 앞서 설명한 바와 같이 검증을 위해 구성된 검증자료($D^{test} = [x^{test}, y^{test}]$)가 비교분석에 이용되었으며, 검증용 파라미터(x^{test})를 반응표면에 입력하여 예측된 지하댐 저유량(y^*)과 실제 수치 모사를 통해 도출된 지하댐 저유량(y^{sim}) 간 최소오차제곱분석과 두 저유량 간 상관성 분석을 두 모형을 이용하여 구축된 반응표면에 적용하여 비교·분석이 이루어졌다.

a. 선형 회귀모형을 이용 반응표면

암반층 및 충적층 수리전도도, 하도 깊이, 하도 경사도 4가지 입지조건과 지하댐 저유량과의 관계를 반응표면 구축을 통해 규명하였다. 앞서 설명된 케이스와 동일하게 다양한 입지조건과 지하댐 저유량과의 관계가 2차 다항식 형태를 보임에 따라 해당 분석 또한 2

차 다항식을 회귀모델로 설정하고 반응표면($f(K_a, K_r, S, D; \theta)$)을 구축하였다. 이를 위해 이용된 일반식은 다음과 같다.

$$f(K_a, K_r, S, D; \theta) = \theta_0 + \theta_1 K_a + \theta_2 K_r + \theta_3 D + \theta_4 S + \theta_5 K_a^2 + \theta_6 K_r^2 + \theta_7 S^2 + \theta_8 D^2 + \theta_9 K_a K_r + \theta_{10} K_a D + \theta_{11} K_a S + \theta_{12} K_r D + \theta_{13} K_r S + \theta_{14} DS \quad (14)$$

여기서, K_a 및 K_r 는 충적층 및 암반층 수리전도도, D 는 하도의 깊이, S 는 하도의 경사도를 의미한다. 2차 다항식 모델을 이용하고 4개의 입지조건이 존재함에 따라 총 15개 항에 대한 가중치(θ)를 회귀분석을 통해 산정하였다. 가중치 산정을 위해 최소오차제곱근에 기반한 최적화기법을 이용하였으며, 각 항에 대하여 산정된 가중치 결과는 다음 표 2와 같다. 표 2에서 나타난 바와 같이 암반층 수리전도도(K_r)로 구성된 항(즉, $K_r, K_r^2, K_a K_r$)이 대체로 높은 가중치 값을 가지도록 산정되었다. 그 외, 하도의 깊이(D) 또한 지하담 저유효율에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 암반층의 수리전도도는 2차항으로 구성하였을 때(즉, K_r^2)의 가중치가 1차항으로 구성하였을 때(즉, K_r)의 가중치보다 더 큰 값으로 나타났지만, 하도 깊이의 경우 1차항(D)에 대한 가중치가 2차항(D^2)에 대한 가중치보다 높게 나타났다. 이는 그림 11에서 나타난 바와 같이 지하담 저유량과 하도 깊이 간의 관계가 선형적인 특성을 보

Table 2. The estimated weight coefficients (θ) of the developed response surface to evaluate the groundwater storage according to the hydraulic conductivities of alluvium and basement rock, depth and slope of the channel

Factor	θ	
bias	θ_0	0.008
K_a	θ_1	0.1541
K_r	θ_2	-0.2678
D	θ_3	0.2109
S	θ_4	0.1316
K_a^2	θ_5	0.0453
K_r^2	θ_6	0.3195
S^2	θ_7	-0.1562
D^2	θ_8	-0.108
$K_a K_r$	θ_9	-0.2265
$K_a D$	θ_{10}	0.1239
$K_a S$	θ_{11}	-0.1657
$K_r D$	θ_{12}	-0.1191
$K_r S$	θ_{13}	0.1138
DS	θ_{14}	-0.069

이고, 암반층 수리전도도와와의 관계는 비선형성을 보이기 때문에 판단된다. 산정된 가중치에 대한 종합적인 분석 결과, 암반층 수리전도도 및 하도의 깊이가 지하담 저유 효율에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판단되며, 하도 경사도가 가장 미약한 영향력을 가지는 것으로 판단된다.

b. 비선형 회귀모형을 이용한 반응표면 구축

ANN을 이용하여 4가지 지하담 입지 조건(암반층 및 충적층 수리전도도, 하도 깊이, 하도 경사도)과 지하담 저유효율 간 관계식을 구축하였다. 4가지 지하담 입지 조건에 대한 선형회귀분석과 같은 입력변수를 2차항으로 구성하여 입력 뉴런의 개수를 바이어스 뉴런 포함 총 15개로 구성하였으며, 각 뉴런에 입력되는 입지조건 파라미터는 $K_a, K_r, D, S, K_a^2, K_r^2, D^2, S^2, K_a K_r, K_a D, K_a S, K_r D, K_r S, DS$ 그리고 바이어스 값 1로 구성되었다. 은닉 뉴런의 개수는 은닉 바이어스 뉴런 포함 총 5개로 구성하였으며, 지하담 저유량 값을 출력으로 도출하기 위해 출력 뉴런은 1개로 구성하였다. 이와 같은 네트워크 구조를 이용하여 비선형 회귀모형을 구성하였으며, 이를 위해 산정되는 가중치의 개수는 총 65개(W 및 V)이고, 온라인 학습 방식을 기반으로 하는 오류역전파알고리즘을 이용하여 가중치가 산정되었다. 입력뉴런과 은닉뉴런 사이 이용되는 활성화함수(ϕ_h)는 시그모이드 함수(sigmoid function)

인 $\phi_h(x) = \frac{1}{(1 + \exp(-w^T x))}$ 을 이용하였으며, 은닉뉴런과 출력뉴런 사이의 활성화함수(ϕ_o)는 선형함수인 $\phi_o(x) = v^T x$ 가 이용되었다.

c. 선형회귀 및 비선형회귀분석 결과 비교

총 200개의 자료 중 30%의 자료를 검증자료로 이용하여 구축된 선형 및 비선형 반응표면의 예측 성능을 비교하였다. 먼저, 검증용 입지조건들을 구축된 반응표면에 적용하여 예측된 결과와 실제 수치 모사 결과 간의 최소오차제곱분석결과를 비교하였다. 선형반응표면의 경우, 최소오차제곱이 0.0540으로 나타났으며, 비선형반응표면의 경우 0.0094로 나타났다. 이를 통해 비선형반응표면이 4가지 입지조건과 지하담 저유량 간 관계를 보다 잘 설명할 수 있음을 알 수 있다. 그림 13은 반응표면을 이용하여 예측된 지하담 저유량과 수치 모사를 통해 도출된 실제 지하담 저유량 간 상관성 분석 결과를 보여준다. 그림에서 X축은 실제 저유량 값, Y축은 예측된 저유량 값을 의미하며, 붉은색 점선

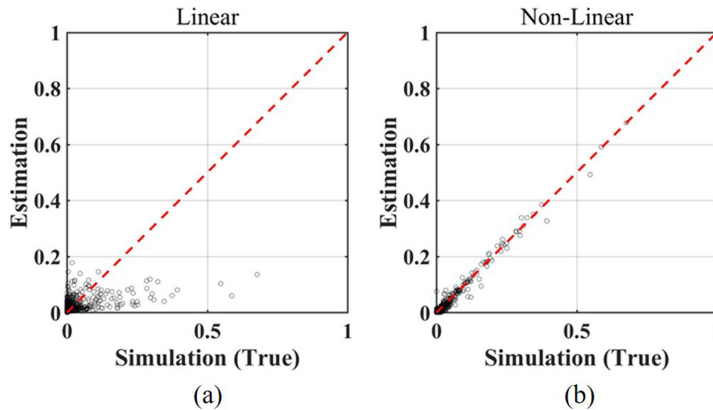


Fig. 13. Comparison between the simulated groundwater storage and the estimated groundwater storage using (a) linear response surface and (b) non-linear response surface.

은 예측 저유량과 실제 저유량이 같은 경우를 의미한다. 그림 13(a)는 선형반응표면에 대한 상관성 분석 결과이며, 그림 13(b)는 비선형반응표면에 관한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 비선형반응표면을 통해 예측된 저유량이 선형반응표면을 이용한 경우보다 실제 저유량과 상당히 더 유사한 결과를 보여줌을 알 수 있다. 예측 저유량과 실제 저유량 간 상관도 또한 선형반응표면의 경우 0.5873으로 나타나고, 비선형반응표면의 경우 0.9898로 나타남에 따라 비선형 회귀모형을 통해 구축된 반응표면이 지하댐 입지조건과 지하댐 저유량 간 관계를 더 잘 설명할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 개발된 모델을 이용하여 본 연구에서 이용된 4가지 입지조건으로부터 지하댐 건설에 다른 효율을 수치 모사 수행 없이 즉각적으로 산정할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결 론

본 연구에서는 다양한 지하댐 입지조건에 대한 정량적 평가를 기반으로 지하댐 건설에 따른 지하수 저류가능량을 객관적으로 비교 평가할 수 있는 모델을 구축하였다. 이를 위해, 다양한 지하댐 입지조건이 고려된 지하수 유동 수치 모사를 시행하여 시나리오별 저류량을 산정하고 입지조건과 저류량 간의 반응표면을 구축하였다. 입지조건으로 기반암 및 충적층의 수리전도도, 하도의 폭 및 깊이, 하도 측면 경사가 고려되었다. 이때, 기반암 및 충적층의 수리전도도의 경우, 각 조건에 대한 확률모형을 고려함으로써 몬테카를로 기반 수치 모사가 가능하도록 설정하였으며, 현실적 하도 형태를 고려하기 위하여 하천 기하 관련 경험식을

기반으로 총 12종류의 하상이 수치 모사에 고려되었다.

다양한 시나리오를 기반의 수치 모사 결과를 종합한 결과, 암반층의 수리전도도가 충적층의 수리전도도에 비해 지하댐 저유 효율에 큰 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 하도 형태와 관련하여, 하도 충적층의 깊이는 지하수 저유량과 선형적 비례관계를 가짐을 알 수 있었으며, 하도의 경사 또한 저유량과 선형적 관계를 가지나 이는 경사가 낮음에 따라 저유량이 증가하는 경향을 보였다. 모든 입지조건 시나리오 결과를 기반으로 둔 종합적 분석 결과, 암반층 수리전도도 및 하도의 깊이가 지하댐 저유 효율에 가장 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었으며, 하도의 지하수 유동 방향으로의 경사도가 가장 미약한 영향력을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

또한, 본 연구에서는 최종적으로 암반층 및 충적층 수리전도도, 하도 깊이, 하도 경사도와 지하댐 저유량 간의 관계식을 선형 및 비선형 회귀분석을 통해 구축하였다. 특히, 본 연구에서는 비선형 관계식 구축을 위해 인공신경망을 이용하였다. 그 결과, 비선형 관계식이 2차 다항식을 이용한 선형 관계식보다 우수한 예측 결과를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 그뿐만 아니라 비선형 관계식으로 예측된 저유량과 실제 수치 모사를 통해 산정된 저유량 간의 상관성이 0.9 이상의 높은 수치를 보임을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 개발된 예측 모델은 특정 지역의 입지 조건이 주어졌을 때, 해당 지역에 대한 수치 모사 수행 없이 지하댐 건설에 따른 저유 효율을 즉각적으로 산정하는 데 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 개발된 비선형 예측 모델은 서로 다른 지역의 저유 효율을 보다 객관적으로 비교 및 평가하는데 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 2018학년도 경북대학교 신입교수정착연구비에 의하여 연구되었다.

References

- Barkhordari, J. (2015) The pre-selection of suitable sites for small underground dams in arid areas using GIS (A case study in Yazd_Ardakan watershed). *International Geoinformatics Research and Development Journal*, v.6(1), p.18-27.
- Carsel, R. F. and Parrish, R. S. (1988) Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resour. Res.*, v.24(5), p.755-769.
- Domenico, P. A. and Schwartz, F. W. (1998) *Physical and Chemical Hydrogeology*, 2nd Ed., Wiley & Sons, New York. p.506.
- Dorfeshan, F., Heidarnajad, M., Bordbar, A. and Daneshian, H. (2014) Locating Suitable Sites for Construction of Underground Dams through Analytic Hierarchy Process, *International Conference on Earth, Environment and Life Sciences (EELS-2014)*, Dec. 23-24, Dubai, UAE, 86-90.
- Jeon, S., Koo, M., Kim, Y. and Kang, I. (2005) Statistical Analysis of Aquifer Characteristics Using Pumping Test Data of National Groundwater Monitoring Wells for Korea. *The Journal of Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, v.10(6), p.32-44.
- Kim, J., Lim, K., Park H. and Rhee, B. (2013) Analyzing the Effect of Groundwater Dam Construction Using Groundwater Modeling. *The Journal of Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, v.18(3). p.11-22.
- Korea Rural Community Corporation (KRC) (2014) *Annual report on the rural groundwater management subsystem*. Korea Rural Community Corporation, 112p. Republic of Korea.
- Lee, S.-I. and Park, B.-C. (2003) Site Suitability Analysis for Underground Dam Using Analytic Hierarchy Process. *The Journal of Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, v.8(4), p.36-44.
- Ministry of the Environment Overseas Environmental Cooperation Center (2004) *Model project to combat desertification*. Technical Report of the Subsurface Dam.
- Mohammad, K. M. (2012) Model for Determination the Optimum Location of Subsurface Dam Using Analytical Hierarchy Process AHP. *Advances in Environmental Biology*, v.6(3), p.1292-1297.
- Onder, H. and Yilmaz, M. (2005) Underground Dams: A tool of sustainable development and management of groundwater resources. *European Water*, v.11(12), p.35-45.
- Rezaei, P., Rezaie, K., Nazari-Shirkouhi, S. and Tajabadi, M. R. J. (2013) Application of Fuzzy Multi-Criteria Decision Making Analysis for Evaluating and Selecting the Best Location for Construction of Underground Dam. *Acta Polytechnica Hungarica*, v.10(7), p.187-205.
- Richard, G. N. (2011) MODFLOW-NWT, A Newton formulation for MODFLOW-2005. U.S. Geological Survey. Chapter 37 of Section A, *Groundwater Book 6, Modeling Techniques*.
- United States Department of Agriculture: Natural Resource Conservation Service. (2008) *Stream Restoration and Design*. National Engineering Handbook 654.
- Van Genuchten, M. Th. (1976) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. J.*, v.44(5). p.892-898.
- Yong, H.-H., Song, S.-H., Myoung, W.-H., An, J.-G. and Hong, S.-W. (2017), Current status and application of agricultural subsurface dams in Korea. *Journal of Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, v.22(3), p.18-26.