Research Paper

Data-driven Analysis for Developing the Effective Groundwater Management System in Daejeong-Hangeong Watershed in Jeju Island

Soyeon Lee¹, Jiho Jeong¹, Minchul Kim², Wonbae Park², Yuhan Kim¹, Jaesung Park¹, Heejeong Park¹, Gyeongtae Park¹, Jina Jeong^{1*}

¹Department of Geology, Kyungpook National University, Daegu, Republic of Korea

²Jeju Groundwater Research Center, Jeju Research Institute, Jeju Special Self-Governing, Korea

*Corresponding author : jeong.j@knu.ac.kr

ARTICLE INFORMATION

Manuscript received 21 April 2021
Received in revised form 14 June 2021
Manuscript accepted 14 June 2021
Available online 28 June 2021

DOI : <http://dx.doi.org/10.9719/EEG.2021.54.3.373>

Research Highlights

- Data-driven models were developed to estimate the groundwater level based on precipitation and groundwater usage amount in western part of Jeju island.
- Sensitivity analysis on the model was applied to evaluate the spatial variation of effectiveness of groundwater usage.
- Optimal groundwater usage amount in the study area was evaluated using the developed model.

ABSTRACT

In this study, the impact of clustered groundwater usage facilities and the proper amount of groundwater usage in the Daejeong-Hangeong watershed of Jeju island were evaluated based on the data-driven analysis methods. As the applied data, groundwater level data; the corresponding precipitation data; the groundwater usage amount data (Jeoji, Geumak, Seogwang, and English-education city facilities) were used. The results show that the Geumak usage facility has a large influence centering on the corresponding location; the Seogwang usage facility affects on the downstream area; the English-education usage facility has a great impact around the upstream of the location; the Jeoji usage facility shows an influence around the up- and down-streams of the location. Overall, the influence of operating the clustered groundwater usage facilities in the watershed is prolonged to approximately 5km. Additionally, the appropriate groundwater usage amount to maintain the groundwater base-level was analyzed corresponding to the precipitation. Considering the recent precipitation pattern, there is a need to limit the current amount of groundwater usage to 80%. With increasing the precipitation by 100mm, additional groundwater development of approximately 1,500m³-1,900m³ would be reasonable. All the results of the developed data-driven estimation model can be used as useful information for sustainable groundwater development in the Daejeong-Hangeong watershed of Jeju island.

Keyword : Daejeong-Hangeong watershed, groundwater level fluctuation pattern, clustered groundwater supply facility, groundwater level degradation, sensitivity analysis

Citation: Lee, S., Jeong, J., Kim, M., Park, W., Kim, Y., Park, J., Park, H., Park, G., Jeong, J. (2021) Data-driven Analysis for Developing the Effective Groundwater Management System in Daejeong-Hangeong Watershed in Jeju Island. Korea Economic and Environmental Geology, v.54, p.373-387, doi:10.9719/EEG2021.54.3.373.

✉ Journal homepage: <http://www.kseeg.org/main.html>

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.
pISSN 1225-7281; eISSN 2288-7962/©2021 The KSEEG. Printed by Hanrimwon Publishing Company. All rights reserved.

연구논문

제주도 대정-한경 유역 효율적 지하수자원 관리를 위한 자료기반 연구

이소연¹ · 정지호¹ · 김민철² · 박원배² · 김유한¹ · 박재성¹ · 박희정¹ · 박경태¹ · 정진아^{1*}

¹경북대학교 지질학과

²제주연구원 제주 지하수 연구 센터

*책임저자 : jeong.j@knu.ac.kr

요 약

본 연구에서는 자료기반 분석 기법을 이용하여 제주 대정-한경 유역의 군집형 지하수 이용 관정의 영향력을 평가하고 지하수 자원을 효율적으로 관리하기 위한 도구를 개발하였다. 분석을 위해 대정-한경 유역 내 총 19개 지하수위 관측공의 지하수위 자료, 총 3개 기상 관측소로부터 측정된 강수량 자료, 및 총 4개의 군집형 지하수 이용 관정(저지, 금악, 서광, 및 영어교육도시)으로부터 획득한 이용량 자료가 이용되었다. 먼저, 각 지하수위 관측공에 대하여 강수량 및 이용량 자료를 입력변수로 하는 자료기반 지하수위 예측모델을 개발하였다. 이때, 과거의 장기적 변동특성을 효과적으로 학습에 이용하기 위하여 누적 장단기 메모리 모델을 이용하였다. 모든 관측 공에 대하여 지하수위 예측모델을 개발하고, 이용량 입력변수에 대한 섭동 민감도 분석을 수행하여 각 군집형 관정의 공간적 영향력을 분석하였다. 금악 수원은 해당 수원 중심으로 영향이 크고, 서광 수원은 하류 지역을 중심으로 영향이 큰 것으로 나타났으며, 영어교육도시는 수원의 상류 지역 중심, 저지 수원은 수원 상류 및 하류 중심으로 영향이 나타났다. 그리고 유역 내 군집형 수원의 영향력은 대략 5km인 것으로 나타났다. 추가적으로, 학습된 예측모델을 기반으로 군집형 이용 관정의 영향 범위에 포함되는 지하수위 관측공에 대해 강수량 대비 배경 지하수위 회복을 위한 적정 지하수 이용량을 산정하였다. 최근의 강수 패턴을 적용하였을 때, 현재 지하수 이용량을 기존의 80%로 제한할 필요성이 있는 것으로 나타났으며, 강수량이 100mm 증가하였을 때, 대략 1,500 m³에서 1,900 m³의 추가적인 취수가 가능할 것으로 평가되었다. 본 연구를 통해 도출된 대정-한경 유역 지하수 거동특성 평가 결과와 자료기반 분석 도구들은 대정-한경 유역의 지속 가능한 지하수 개발을 위한 유용한 정보로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 제주도 대정-한경유역, 지하수위 변동, 군집형 지하수 이용, 지하수위 저하, 민감도 분석

1. 서 론

대부분의 섬 지역은 생활 및 농업용수의 80% 이상을 지하수에 의존하는 등 지하수를 주요 수자원으로 활용한다(Shin *et al.*, 2020). 제주도는 우리나라의 대표적 섬 지역이며 해당 지역에서 이용되는 담수의 92% 이상을 지하수에 의존하고 있다(Kim *et al.*, 2003). 제주도의 강수량(연평균 1975mm)이 육지(연평균 1316mm)에 비하여 상당히 많음에도 불구하고, 지역의 하천이 대부분 건천으로 발달하고 있어 지표수를 이용한 수자원 개발이 어렵다(Yang, 2007). 이뿐만 아니라 섬 지역의 제한된 영역 특성을 고려하였을 때, 많은 양의 지표수를 저장할 수 있는 저수지를 개발하는 것 또한 실현성이 낮다. 그러나 최근 기후변화로 인한 가뭄의 발생 빈도가 높아지고 인구 및 방문객의 수가 증가함에 따른 무분별한 지하수 이용으로 지하수자원의 고갈 발생 가능성이 증가하고 있다. 수자원 부족 문제가 발생하였을 때, 이를 해결하기 위한 섬 지역에서의 대처는 육지와 비교해 더욱 어려우므로

지속 가능한 지하수자원 보존을 위한 섬 지역 특성에 맞는 적절한 관리 방안 및 방법 개발이 필수적이라 할 수 있다.

제주도는 1961년에 지하수 개발이 성공하면서 지하수를 생활용수 및 농업용수 등으로 활용할 수 있는 기반이 마련되었다(Go, 2006). 그리고 원활한 상수도 공급을 위해 1993년 ‘제주도 수자원 종합 개발 계획’을 수립하고, 1994년부터 2012년까지 제주도 광역 상수도 건설 사업을 추진하였으며, 2020년부터 새로운 광역 상수도 사업을 추진하고 있다(환경부, 2018). 광역 상수도의 주 취수원은 지하수이며, 취수 관정은 100m 이내의 간격으로 개발되어 있고, 해수 침투로부터 영향을 받지 않고 오염원이 적게 분포하여 수질 농도 또한 양호한 특성을 보이는 제주도 중산간 지역에 개발되었다. 그러나 광역 수원에 개발된 지하수 관정의 1일 취수허가량은 공당 평균 1,997.2m³으로 시설 생활용 지하수 1일 취수허가량 144.4m³의 13.8배 수준이고, 각 수원 내 4~10공의 지하수가 군집형으로 개발되어 있어 수원별 1일 취수허가량은 6,200~19,450m³으로 좁은 면적에 비하여 다량의 지하수

가 취수되고 있는 실정이다(제주연구원, 2018). 제주연구원(2018)이 제주도 지하수 개발 및 이용현황에 대해 분석한 결과에 의하면 제주도 지하수 특별관리구역 이외 광역 수원이 분포하는 지역에서 지하수 관정 및 양수능력 및 일 최대 이용량이 많은 것으로 확인되었다. 특히, 상위 지하수가 분포하는 중산간 지역의 지하수위는 해안 지역보다 지하수 양수에 의한 지하수위 변동폭이 크고(Go *et al.*, 2006; Kim, 2018), 고지대 지역은 장기간 양수할 경우, 지하수위의 회복능력에 영향을 줄 수 있어(Kim, 2020) 중산간 지역에 위치한 일부 광역 수원은 대규모 양수에 따른 지하수위 변동에 대한 위험성이 크다고 할 수 있다.

이처럼 지하수 이용에 따른 제주지역 수자원 고갈 문제가 우려되는 상황에서 제주도 지역의 지속 가능한 지하수자원 관리 방안 및 방법 개발을 위해서는 지하수의 부존 특성을 평가하는 것이 중요하다. 제주도의 지하수 부존 특성을 파악하기 위한 연구는 과거로부터 다양하게 이루어졌다(Choi, 1992; Hahn *et al.*, 1997; Kim *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2006; Won *et al.*, 2005; Won *et al.*, 2006; El-Kadi *et al.*, 2013). 제주 전 지역에서 획득한 암석 시추 자료를 이용하여 지하 대수층 매질 분포에 대한 연구가 진행된 바 있으며, 이를 기반으로 지하수 부존 총량이 산정된 바 있다(KIGAM, 2005). 특히, 해당 연구를 통해 지하 응회암의 분포와 지하수위 형성 간의 밀접한 상관성이 제시되었다. Won *et al.* (2005)에서는 제주도 지역별 대수층의 수리 지질학적 특성을 규명한 바 있으며, Won *et al.* (2006)에서는 제주지역의 지하수를 상위, 기저, 및 준기저 지하수로 분류하고, 이들의 지역의 지역적 분포 특성을 서귀포층의 분포 특성과 관련지어 제시한 바 있다. 그리고 El-Kadi *et al.* (2013)에서는 기상, 토지 이용, 및 양수 시나리오를 기반의 지하수 거동 수치 모사 결과를 통해 제주도의 지속 가능한 지하수 적정 이용량을 정량적 평가한 바 있다.

다수의 연구가 제주도의 지하수 거동 및 부존 특성을 설명하기 위해 이루어진 바 있으나 제주도는 여러 종류의 화성암류가 다양한 화산학적 구조를 이루며 대수층을 형성하고 있어 해당 지역의 지하수 거동 및 부존 특성을 충분히 설명하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 특히, 지속 가능한 지하수자원 개발을 위한 구체적인 방안 및 정책 마련을 위해서는 제주도의 증가하고 있는 지하수 이용량에 의한 지하수량 변화 특성에 대한 연구가 추가되어야 하며, 지속 가능한 개발량에 대한 정량적 평가 또한 필요하다.

특히, 제주 서부유역(대정, 한경, 한림, 애월, 및 안덕)은 표고 200m 인근 지역에 광역 상수도 및 상수도 지하

수 관정이 분포하고 있어 국부적으로 지하수 관정이 밀집되고, 양수능력이 $2,500\text{m}^3/\text{일}$ 이상으로 제주도 내 16개 유역 중 지하수 과다 양수에 의한 위험성이 가장 높은 것으로 평가된 바 있다(제주연구원, 2018). 실제로 서부유역 내 대부분 지하수 관측공에서 지하수위 저하 현상이 관찰된다. 현재 광역 수원이 10년 이상 운영되고 있고 앞서 설명한 바와 같이 이로 인한 지하수위 저하 현상이 관찰됨에도 불구하고, 실제 지하수 이용량을 근거로 서부지역의 지하수위 변동특성을 평가한 사례는 전무한 실정이다. 따라서 군집 지하수 관정의 대규모 양수에 의한 주변 지역 지하수위에 영향을 보다 정량적으로 검토할 필요성이 있다.

본 연구에서는 제주 서부지역 대정-한경 유역의 군집형 지하수 관정 이용에 따른 지하수량 변화 특성을 평가하고, 지속 가능한 지하수 취수량을 정량적으로 평가하기 위한 실용적인 도구를 제안하였다. 이를 위하여 대정-한경 유역 내 군집형 지하수 관정 시계열 이용량 자료 및 이에 대응하는 지하수위 변동 자료와 강수량 자료를 이용되었으며, 평가 및 취수량 산정 평가 도구를 개발하기 위하여 자료기반 예측기법이 활용되었다.

2. 연구지역 및 이용 자료

본 연구에서는 제주도 지하수 개발·이용현황 및 군집형 지하수 개발현황, 지하수위 관측정 및 강우 관측소의 분포 현황을 고려하여 연구대상 유역을 선정하였다. 지하수 관정 밀도 및 양수능력, 일 최대 이용량에 대한 공간 분석 결과, 대정 유역이 지하수 관정 및 양수능력 면적이 가장 넓고, 군집형 지하수 현황분석 결과, 대정 유역에는 군집형 지하수 관정수가 총 25공으로 가장 많이 분포하고 있다. 그리고 지속이용가능량 대비 지하수 허가량 분석 결과, 애월 유역과 한경 유역, 대정 유역이 각각 373.9%, 259.6%, 231.3% 초과하는 것으로 분석되었다. 군집형 지하수 관정 주변 지하수위 및 강우관측소 현황분석 결과, 남원, 애월, 조천 유역에 3개소의 지하수위 관측정이 분포하고 있으나 강우관측소는 설치되어 있지 않으며, 강우관측소는 대정, 한경, 중서귀, 서제주 유역에 각각 1개소씩 분포하고 있다. 대정 유역이 포함된 서부지역의 30년 평균 강수량(1988년-2017년)은 $1,144.4\text{mm}$ 로 성산과 서귀포 $1,963.1\text{mm}$ 에 비해 58.3% 수준이며, 타 지역에 비해 지하수 함양량 및 지하수 지속이용가능량이 적은 지역이다(제주연구원, 2019). 또한, 대정 유역은 군집형 지하수 관정이 표고 200m 인근에 위치하고 있어 대규모 양수에 의한 수위 변동특성을 체계적으로 분석해볼 필요가 있다. 다만, 저지수원(10공)의 개발 위치가 대

정-한경 유역 경계에 인접하고, 지하수 흐름은 대정 유역에서 한경 유역방향으로 유동하고 있어 군집형 지하수 양수에 의한 하류 지역 영향을 검토하기 위해서는 대정-한경 유역을 종합적으로 분석되어야 할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 대정-한경 유역을 연구대상 유역으로 선정하고, 대정 유역 내 3개소의 수원(저지, 서광, 및 영어교육도시)에 위치한 총 25공의 군집형 지하수 이용 관정과 한경 유역 내 1개소 수원(금악) 내 총 6공의 군집형 지하수 이용 관정에서 획득한 지하수 이용량을 분석 자료로 활용하였다. 그리고 연구대상 유역 내 지하수위 관측정은 총 24개소가 위치하고 있으며, 강우관측소는 금악 수원과 서광 수원 인근에 제주기상청에서 관리하고 있는 방재관측소 2개소(서광 및 대정)와 종관기상관측소 1개소(고산)가 위치하고 있다. Fig. 1은 연구대상지인 대정-한경 유역의 위치와 유역 내 군집형 지하수 이용 관정, 지하수위 변동 관측공 및 기상 관측소의 위치를 보여준다.

2.1. 이용 관정

대정-한경 유역 내 금악 수원 관정들의 심도는 345m-348m, 서광 수원 관정들의 심도는 200m, 저지 수원 관정들의 심도는 170m-172m, 영어교육도시 관정들의 심도는 270m이다(제주특별자치도, 2018a). 모든 군집형 이용 관정은 서로 유사한 지질 매체로 구성되어 있으며, 해당 유역의 대수층 체계는 전체적으로 상부 저투수층(조면암질 현무암, 화산재 퇴적층, 토양층), 투수층(장석 감람석 현무암, 장석 현무암, 스크리아), 및 하부 저투수층(조면

암질 현무암, 장석 휘석 현무암, 화산재 퇴적층, 응회암, 토양층)으로 구성되어 있다(Ok, 2010; Kim, 2011, Lee, 2008). 그러나 지하수의 거동은 2차 공극의 발달상태에 따라 달라짐에 따라 연구지역의 대수층은 화산암류(조면암질 현무암, 장석 감람석 현무암, 장석 휘석 현무암, 장석 현무암)의 절리대 및 스크리아(Scoria)성 퇴적층에서 주로 발달하는 것으로 판단되며, 연구대상 지역 대수층은 저투수성 지질 매체와 투수성 지질 매체들이 빈번하게 반복적으로 쌓여 있는 상대적으로 복잡한 체계를 보이고 다수 구간에서 수직균열과 클린커층(Clinker)이 발달하고 있어 심도별 대수층을 분류하기가 어려울 것으로 판단된다. 또한, 이용 관정의 굴착 심도 및 지하수위 형성 심도를 비교하였을 때, 모든 관정이 유사한 특성을 가짐에 따라, 본 연구에서는 군집형 지하수 이용 관정이 대정-한경 유역의 전체 대수층에 복합적인 영향을 주는 것을 가정하고 연구를 수행하였다. 연구대상 유역 내 지하수위 관측정의 심도는 150m(고산1)에서 357m(서광3)까지 다양하게 분포되어 있다(제주특별자치도, 2018b).

2.2. 이용 자료

본 연구를 위해 이용된 지하수 이용량, 지하수위 변동, 및 강수량 시계열 자료는 모두 일 단위 자료이며, Fig. 2는 본 연구에 이용된 자료의 시계열 변화 패턴을 보여준다. 지하수 이용량은 총 4개의 수원에서 자료를 확보하였으며, 서광 및 저지 수원의 경우, 2013년부터의 이용량 자료가 이용되었고 금악 수원은 2014년부터의 기록이 연구에 이용되었다. 영어교육도시 수원은 2015년 말 개발

Fig. 1. (a) Spatial distribution of watersheds in Jeju island, and (b) locations of the five clustering water supply facilities (Geumak, Jeoji, Seogwang 1, Seogwang 2, and English-education), the groundwater level monitoring wells, and the meteorological observatory in Daejeong-Hangyeong watershed.

Table 1. Annual groundwater withdrawal amount for each water supply facility in the study area

Year (1,000m ³ /year)	Geumak	Seogwang	Jeoji	English- education
2013	-	5,438	5,617	-
2014	3,383	7,569	7,636	-
2015	2,574	5,240	5,282	-
2016	2,819	5,455	5,612	1,024
2017	2,928	5,804	5,747	1,217
2018	2,709	6,214	5,928	1,159
2019	3,435	8,260	9,105	2,247
Mean	2,975	6,283	6,418	1,411
Max.	3,435	8,260	9,105	2,247
Min.	2,574	5,240	5,282	1,024

이 완료됨에 따라 2016년부터의 자료가 이용되었다. 수원별 지하수 이용량은 시간에 따라 대체로 일정하나 금악 및 영어교육도시 수원이 저지 및 서광 수원 개발 이후 추가적으로 개발 및 이용됨에 따라 대정-한경 유역 내 지하수 이용량은 증가하는 추세를 보인다. Table 1은 수원별 연간 총이용량 추세를 보여준다. 총 4개 수원에서의 일 단위 지하수 이용량 변화를 보면 대부분의 수원이 2013년에 개발되어 운영되고 있고 2016년에 추가 수원이 개발되어 운영됨에 따라 시간이 지날수록 대정-한경 유역의 광역 상수도 지하수 이용 총량은 증가하는 추세를 보인다(Fig. 2).

연구대상 지역 내 지하수위 변동양상은 총 16개(Fig. 1(b)에서 노란색 점)의 지하수위 관측정에서 획득하였으며, 2019년까지 최대 19년, 최소 7년 동안 관측된 자료가 연구에 이용되었다. Table 2는 관측정별 연평균 지하수위 값과 이에 대한 통계치를 보여주며, 시간에 따라 연평균 지하수위가 낮아지는 경향을 보이는 관측정이 다수 나타나며, 이러한 양상은 중산간 지역일수록 뚜렷하게 나타난다.

Table 3은 연구대상 지역 내 강우관측소별 연도별 연간 총 강수량을 보여준다. 대정-한경 유역 내 연평균 강수량은 1,379.8mm이며, 이에 비하여 2001년, 2005년, 2008년, 2011년, 2013년, 및 2017년의 연평균 강수량은 상대적으로 낮다. 세 기상 관측소 중 고산관측소의 연평균 강수량이 1,211.0mm로 다른 관측소보다 낮으며, 서광 관측소는 한라산 고산지대에 위치하고 남동 및 남서풍의 영향을 받음에 따라 대체로 높은 강수량(1,554.4mm)을 보인다(Lee, 1999). 본 연구에서는 강수량 변화에 따른 지하수위 변동양상을 분석하기 위하여 지하수위 자료가 존재하는 2001년부터 2019년까지의 강수량 자료가 이용되었으며, 각 관정에 대한 지하수위 변동분석 시, 해당 위

Fig. 2. The pattern of the applied time series data in this study: (a) groundwater withdrawal amount for each water supply facility, (b) an example of groundwater level fluctuation (Geumak1), and (c) precipitation amount.

치로부터 가까이 위치한 기상 관측소의 자료가 이용되었다.

3. 방법론

본 연구에서는 크게 두 가지 분석이 이루어졌다: 1) 각 군집형 지하수 이용 수원(총 4개)의 공간적 영향 범위 산정; 2) 기상 변화에 따른 적정 지하수 총 이용량 산정 도구 개발 및 성능 검증. 해당 분석을 수행하기 위하여 고안된 연구 절차는 Fig. 3과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 연구 절차는 3단계로 이루어졌으며, 각 단계에 대한 설명은 다음과 같다:

Table 2. Annual mean groundwater level of each groundwater monitoring wells in the study area

Year (m)	Gosan1	Mureung1	Mureung2	Sangmo1	Sangmo2	Sindo1	Yongsu1	Yongsu2	Ilgwa	Panpo1	Hamo1	Gosan2	Ansung	Geumak2	Seogwang1	Seogwang2
2001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.1	13.42	72.94	-	-
2002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.27	-	70.21	-	-
2003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.13	18.34	73.83	-	-
2004	-	1.7	10.62	3.38	7.33	-	2.69	13.78	-	-	-	4.93	17.29	73.67	-	-
2005	-	1.24	8.19	2.69	6.39	-	1.86	11.3	-	-	-	3.16	14.59	69.51	-	-
2006	-	1.08	9.05	2.87	6.86	-	2.32	13.15	-	-	-	4.66	14.99	66.03	-	-
2007	0.6	1.11	9.17	2.86	6.87	-0.1	1.96	13.89	4.62	2.19	0.51	4.45	15.35	70.25	-	-
2008	0.29	0.49	8.92	2.6	6.78	-0.03	2.33	13.14	4.08	3.4	0.58	3.91	15.59	69.35	28.98	22.62
2009	-0.07	0.43	7.01	2.25	5.74	0.36	1.81	13.43	3.49	2.99	0.46	3.22	13.14	61.81	25.2	22.18
2010	0.12	0.47	9.66	3.06	6.8	-0.16	2.25	15.44	4.14	3.56	0.51	6.3	15.47	70.53	29.84	26.06
2011	-0.24	-0.44	8.55	2.91	6.72	-0.44	1.02	13.27	3.7	2.94	0.5	4.41	15.58	73.27	30.22	27.01
2012	0.62	-0.86	10.54	3.37	7.38	-0.28	2.27	15.74	4.11	4.03	0.65	6.01	16.55	73.79	31.53	28.04
2013	0.28	-1.03	8.32	2.78	6.56	-0.79	1.47	12.66	3.43	3.4	0.5	4.22	15.44	74.2	29.63	26.69
2014	0.51	-1.01	8.82	2.75	6.56	-0.69	1.34	13.5	3.34	3.18	0.34	4.63	14.5	68.74	27.54	24.56
2015	0.43	-0.82	11.41	3.64	7.94	-0.32	1.87	15.72	4	3.93	0.46	6.07	17.64	72.92	32.42	29.58
2016	0.16	-0.62	11.8	3.65	8.13	-0.57	1.98	16.12	4.26	3.98	0.64	6.61	17.77	70.57	32.86	30.11
2017	-0.9	-1.9	7.08	2.23	6.05	-1.34	0.81	12.28	2.82	3.1	0.51	3.25	13.68	63.73	25.61	22.98
2018	-1.59	-2.08	8.4	2.43	6.36	-1.61	1.43	14.42	2.89	3.17	0.52	4.47	13.93	60.95	25.69	23.01
2019	-1.43	-1.52	8.62	2.76	6.35	-1.92	2.02	14.28	3.19	3.57	0.52	4.7	14.59	66.37	27.76	24.52
Mean	-0.09	-0.24	9.14	2.89	6.80	-0.61	1.84	13.88	3.70	3.34	0.52	4.66	15.44	69.61	28.94	25.61
Max.	0.62	1.7	11.8	3.65	8.13	0.36	2.69	16.12	4.62	4.03	0.65	6.61	18.34	74.2	32.86	30.11
Min.	-1.59	-2.08	7.01	2.23	5.74	-1.92	0.81	11.3	2.82	2.19	0.34	3.16	13.14	60.95	25.2	22.18
Median	0.16	-0.53	8.87	2.82	6.75	-0.44	1.915	13.64	3.7	3.4	0.51	4.47	15.395	70.25	29.305	25.31
Range	2.21	3.78	4.79	1.42	2.39	2.28	1.88	4.82	1.8	1.84	0.31	3.45	5.2	13.25	7.66	7.93
Std.	0.719	1.143	1.331	0.424	0.616	0.636	0.494	1.305	0.533	0.485	0.076	1.076	1.503	4.009	2.518	2.613

Table 3. Information on the annual total amount of precipitation from 2001 to 2019 for each meteorological observatory station

Year (mm)	Daejeong	Seogwang	Gosan	Sum.	Mean
2001	1,088.5	1,175.0	1,113.7	3,377.2	1,125.7
2002	1,109.5	1,437.5	1,225.8	3,772.8	1,257.6
2003	1,399.0	1,783.5	1,503.0	4,685.5	1,561.8
2004	1,191.5	1,506.0	1,269.9	3,967.4	1,322.5
2005	859.0	1,113.0	827.5	2,799.5	933.2
2006	1,141.0	1,316.0	1,350.3	3,807.3	1,269.1
2007	1,546.0	1,605.0	1,296.0	4,447.0	1,482.3
2008	1,216.5	1,212.0	972.3	3,400.8	1,133.6
2009	1,228.0	1,368.5	1,133.0	3,729.5	1,243.2
2010	1,531.5	1,991.5	1,361.8	4,884.8	1,628.3
2011	1,075.5	1,309.0	961.3	3,345.8	1,115.3
2012	1,814.0	1,981.5	1,418.1	5,213.6	1,737.9
2013	970.0	1,100.0	697.1	2,767.1	922.4
2014	1,735.0	1,821.0	1,271.6	4,827.6	1,609.2
2015	2,135.0	2,110.5	1,546.4	5,791.9	1,930.6
2016	1,815.5	2,058.5	1,293.1	5,167.1	1,722.4
2017	826.0	927.5	861.3	2,614.8	871.60
2018	1,533.0	1,795.5	1,345.8	4,674.3	1,558.1
2019	1,890.0	1,922.5	1,560.9	5,373.4	1,791.1
Mean	1,373.9	1,554.4	1,211.0	4,139.3	1,379.8
Max.	2,135.0	2,110.5	1,560.9	5,791.9	1,930.6
Min.	826.0	927.5	697.1	2,614.8	871.6
Std.	376.2	371.2	248.7	953.7	317.9

1) 1단계: 자료 확보 및 전처리 단계

먼저, 분석에 필요한 자료를 확보하고 이에 대한 전처리를 실시하였다. 수원별 지하수 이용량, 강수량, 및 이에 대응하는 지하수 이용량 시계열 자료가 확보되었으며, 이상치 및 결측에 대한 보정이 이루어졌다. 그리고 자료기반 예측모델 학습에 이용되기 위하여 모든 자료에 대한 정규화(normalization)를 시행함으로써 모든 자료의 변동 범위가 0에서 1사이 값을 가지도록 설정하였다.

2) 2단계: 지하수위 변동 예측모델 구축 단계

두 번째 단계에서는 전처리된 시계열 자료를 기반으로 지하수위 예측모델이 학습되었다. 지하수 이용량 및 강수량 시계열 자료가 지하수위 변동을 예측하기 위한 입력변수(또는 설명변수)로 이용되었다. 이때, 첫 번째 분석을 위한 지하수위 예측모델은 수원별 지하수 이용량 자료가 독립적으로 입력되도록 구축되었으며, 두 번째 분석을 위한 모델은 모든 수원에서의 지하수 이용 총량이

입력변수로 활용되었다. 두 가지 분석 모두 자료기반 시계열 예측기법을 이용하여 강수량 및 지하수 이용량을 기반으로 지하수위 변동을 예측하는 모델을 구축하였다. 학습되는 예측모델의 검증을 위해 학습용(Training), 학습시 검증용(Validation), 및 최종 검증용(Testing) 자료가 준비 및 이용되었으며, 이를 통해 최종적으로 검증된 지하수위 예측모델(Fig. 3에서 Validated groundwater level estimation model)이 세 번째 단계에 활용되었다.

3) 3단계: 지하수위 변동 예측모델 기반 분석 단계

지하수위 예측을 위해 다양한 입력 인자(예. 강수, 수원별 지하수 이용량)를 예측모델에 적용할 수 있으며, 이러한 입력 인자들은 지하수위를 예측하는데 각기 다른 중요도(또는 영향력)를 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 수원별 공간적 영향력을 정량화하기 위하여 각 수원 자료에 대한 지하수위 변동 민감도 분석(sensitivity analysis)을 수행하였다. 민감도 분석을 위해 본 연구에서는 섭동 민감도 분석(perturbation sensitivity analysis)(Scardi and Harding, 1999)을 이용하였으며, 이는 특정 입력변수 값을 변화시키며 이에 대한 출력의 변화량을 측정하는 방법이다. 민감도 분석을 통해 높은 중요도를 가지는 것으로 평가된 군집형 수원은 해당 관측정의 위치와 높은 상관성을 가지는 것으로 평가될 수 있다. 따라서 이와 같은 분석을 수행하여 각 관측정에서의 지하수위를 예측하는 데 민감한 영향을 준 군집형 수원에 대한 정보를 도출하고, 높은 공간적 상관성을 가지는 관측정 및 군집형 수원 정보를 도출하였다.

그리고 두 번째 분석으로 분석 기간 하반기에 급격하게 하강하는 지하수위가 배경수위로 회복되기 위해 필요한 적정 지하수 이용량을 산정하기 위한 평가를 진행하였다. 이를 위해, 2단계에서 개발된 지하수 총 이용량 및 강수량을 입력자료로 하는 예측모델을 기반으로 급격하게 지하수위가 하강하는 시기에 지하수 이용량을 변화시켜 지하수위 회복량을 평가하였다. 해당 분석은 다양한 강수 시나리오에 대하여 대정-한경 유역의 배경지하수위를 유지할 수 있는 적정 지하수 이용량을 산정하는데 유용하게 활용될 수 있다.

3.1. 자료기반 시계열 예측

본 연구는 지하수위 시계열 변동 예측을 위해 누적 장단기 메모리(stacked Long and Short-Term Memory, LSTM)를 이용하였다. LSTM은 회귀신경망(Recurrent Neural Network)의 일종으로 은닉층의 정보가 예측을 위한 입력정보로 활용됨에 따라 시계열 자료에 대한 예측

Fig. 3. The workflow proposed for this study.

시, 과거 시계열적 변동 패턴을 예측에 활용하는데 뛰어난 것으로 알려져 있다(Hochreiter and Schmidhuber, 1997; Zhang *et al.*, 2018). 이러한 특징으로 인하여 수리지질학 분야에서는 다양한 기상자료를 기반으로 지하수위의 장기적 변동 패턴을 학습하는데 주로 이용되고 있다(Jeong *et al.*, 2019). Fig. 3(a)는 LSTM의 일반적인 예측 네트워크를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 과거의 은닉 정보 및 입력자료가 현재의 예측에 지속적으로 영향을 주는 네트워크를 가지고 있으며, 지속적인 과거 정보 입력으로 인한 학습 시 기울기 소실(vanishing) 및 폭주(exploding) 문제를 해결하기 위하여 불필요한 입력의 기

역을 지우기 위한 입력(input), 망각(forget), 및 출력(output) 게이트(gate)로 구성된 LSTM cell을 포함하고 있다. 본 연구에서는 지하수위 예측 성능을 높이기 위해서 보다 비선형적 예측모델을 이용하고자 하였으며, 이를 위해 LSTM cell을 여러 층으로 쌓는 학습 네트워크인 누적 LSTM(stacked LSTM)을 최종적으로 이용하였다(Fig. 4(b)).

N 시퀀스의 총 L 개 종류의 입력변수(예를 들어, 강수량 및 지하수 이용량 시계열 자료)($\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_L, \dots, \mathbf{x}_N]$, $\mathbf{x}_t = [x_t^1, \dots, x_t^L, \dots, x_t^L]^T$)와 N 시퀀스의 지하수위가 주어졌을 때($\mathbf{Y} = [y_1, \dots, y_t, \dots, y_N]$), 누적 LSTM을 이용한 t 시간에서의 지하수위(y_t)는 다음과 같이 예측된다:

$$y_t = \phi_x(\mathbf{w}h_t + \mathbf{b})$$

$$h_t^i = o_t^i \circ \phi_h(a_t^i)$$

$$a_t^i = f_t^i \circ a_{t-1}^i + i_t^i \circ \phi_a\left(\sum_{j=0}^T W_o^{h_{t-j}} h_{t-j}^{i-1} + W_a^h h_{t-1}^i\right)$$

$$o_t^i = \phi_o\left(\sum_{j=0}^T W_o^{h_{t-j}} h_{t-j}^{i-1} + W_o^h h_{t-1}^i\right)$$

$$f_t^i = \phi_f\left(\sum_{j=0}^T W_f^{h_{t-j}} h_{t-j}^{i-1} + W_f^h h_{t-1}^i\right)$$

$$i_t^i = \phi_i\left(\sum_{j=0}^T W_i^{h_{t-j}} h_{t-j}^{i-1} + W_i^h h_{t-1}^i\right), \quad i = 2, \dots, D$$

$$h_t^1 = o_t^1 \circ \phi_h(a_t^1)$$

$$a_t^1 = f_t^1 \circ a_{t-1}^1 + i_t^1 \circ \phi_a\left(\sum_{j=0}^T W_o^{x_{t-j}} x_{t-j} + W_a^h h_{t-1}^1\right)$$

$$o_t^1 = \phi_o\left(\sum_{j=0}^T W_o^{x_{t-j}} x_{t-j} + W_o^h h_{t-1}^1\right)$$

$$f_t^1 = \phi_f\left(\sum_{j=0}^T W_f^{x_{t-j}} x_{t-j} + W_f^h h_{t-1}^1\right)$$

$$i_t^i = \phi_i\left(\sum_{j=0}^T W_i^{x_{t-j}} x_{t-j} + W_i^h h_{t-1}^i\right), \quad i = 2, \dots, D$$

위 식에서 a_t^i , i_t^i , o_t^i , 및 f_t^i 는 t 시간에 대한 i 번째 LSTM cell, cell 연산을 위한 입력, 출력, 및 망각 게이트를 의미하며, 입력, 출력, 및 망각 게이트의 차원은 은닉 뉴런을 의미하는 h 와 동일하다. 기호 $\circ$ 는 원소곱을 의미하고,

(a)

ϕ 는 활성화함수를 의미하며 이에는 hyperbolic tangent 함수, sigmoid 함수, Rectified linear unit 등이 이용될 수 있다.

4. 결 과

4.1. 군집형 지하수 이용에 따른 지하수위 영향 분석

4.1.1. 배경 지하수위 변화 분석 결과

Fig. 5는 예측된 배경 지하수위 결과와 실제 관측 지하수위 간 차이인 RSE(root-squared-error) 시계열 자료의 변화 패턴(하단 그래프의 붉은색 선), 강수량 변화 패턴(하단 그래프의 파란색 선), 및 지하수 이용량 변화 패턴(하단 그래프의 검은색 선)을 보여준다. 분석 기간에서의 전반적 변화 패턴들을 비교 분석하고 자료의 잡음으로 인한 과도한 변동 패턴에 의한 분석 오차를 줄이기 위해 이용량 변화 패턴을 제외한 시계열 자료에 대하여 이동평균(moving average)을 적용한 평활화를 실시하였으며, 100일을 평균 산정 기간으로 적용하였다. 대부분 관측정에서 지하수위 패턴이 시간에 따라 일정하게 변동되는 양상을 보이거나, 강수량이 적은 해를 기준으로 일정 시간 후 지하수위가 하강하는 현상이 발생하였다. 이러한 현상은 군집형 관정 개발 시기인 2009년 이후, 더 뚜렷해지는 것으로 판단되나, 2009년 이전의 지하수위 및 강수량 자료가 충분하지 않은 관측정이 많고 2009년 이전, 상대적으로 심한 가뭄이 2005년 한 해만 존재함에 따라 정확하게 판단하기 어려울 것으로 보인다. 2009년 이후 가뭄 시기인 2013년과 2017년을 기준으로 RSE가 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 2017년의 경우 지하수위 회

(b)

Fig. 4. General network structure of (a) LSTM and (b) stacked LSTM applied in this study.

Fig. 5. Estimation examples for (a) Gosan1, (b) Geumak2, (c) Mureung1, and (d) Sangmo1: (Top) the predicted groundwater base-level (black line) and actual groundwater level (blue line); (Bottom) comparison between the variation trend of the difference of the predicted and actual groundwater level (red line), moving averaged precipitation (blue line), and the groundwater usage total amount of the clustered groundwater supply facilities.

복이 2013년보다 느려진 것으로 보인다. 또한, 2018년과 2019년은 평년보다 많은 강수가 내렸음에도 지하수위 하강 특성이 지속해서 발생하고 있다. 이는 강수량의 영향도 있을 뿐만 아니라 군집형 수원에서 총 이용량 또한 2009년 개발 이후 대비 증가하여 지하수위 저하가 급격하게 발생했을 것으로 판단된다.

4.2. 군집형 수원의 공간적 영향력 평가

4.2.1. 이용량을 고려한 딥러닝 기반 지하수위 예측모델 구축

강수량뿐만 아니라 이용량을 입력 인자로 이용하여 stacked LSTM 네트워크를 학습하고 대정-한경 유역 내 관측공에서의 지하수위 변동양상을 예측하였다. 총 4개의 군집형 수원에서 이용량 자료가 독립적인 입력자료로 이용되었다. 2017년까지의 지하수 이용량 및 강수량 자료를 학습에 이용하고, 2018년의 자료는 학습 시 오버피팅(overfitting)을 방지하기 위한 검증 자료로 이용되었으며, 2019년 자료는 성능을 검증하기 위한 테스트 자료

로 이용되었다. Fig. 6은 학습된 예측모델을 이용하여 예측된 지하수위와 실제 지하수위 간의 차이를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 2018년에서 2019년 기간에 급격하게 하강하는 실제 지하수위를 합리적으로 예측하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 지하수 이용량 증가가 영향을 주었을 것으로 판단된다.

4.2.2. 지하수위 예측모델을 이용한 군집형 수원별 민감도 분석

지하수위 예측을 위해 다양한 입력 인자를 모델에 적용할 수 있으며, 이러한 입력 인자들은 지하수위를 예측하는데 각기 다른 중요도를 가진다. 따라서 본 연구에서는 예측 입력 인자들의 영향력을 정량화하기 위하여 학습된 stacked LSTM 네트워크를 이용한 민감도 분석을 수행하였다. 지하수위와 4개의 군집형 수원 이용 간의 상관성을 평가하기 위해 민감도 분석을 활용하였고, 이를 위해 섭동 민감도 분석(perturbation sensitivity analysis)을 이용하였다. 각 수원의 이용량을 차례로 무양수 자료(0

Fig 6. Examples of the applied data and estimation results for (a) Ilgwa and (b) Sindo1: (Top) pattern of the precipitation and groundwater withdrawal amount of each water supply facility; (Bottom) the predicted and the actual groundwater level.

t)로 변환 후, 학습된 예측모델의 입력자료로 적용하고, 무양수 자료가 적용된 예측 결과와 실제 지하수 이용량이 적용된 예측 결과와의 RSE를 산정하였다. 이때 RSE는 이용량이 존재하는 기간에 대해서만 산정 및 비교 분석하였고, RSE가 클수록 무양수가 적용된 군집형 관정의 민감도가 해당 관측정에 대하여 크다는 것을 의미한다. 민감도를 의미하는 RSE를 정량적으로 산정한 결과는 Table 4와 같다.

산정된 민감도를 기반으로 우세한 상관성을 보이는 군집형 수원을 관측정마다 산정하고 이를 지도에 표시하여

Table 4. Sensitivity analysis between water supply facilities and groundwater monitoring wells

Wells	Sensitivity			
	Geumak	Seogwang	English-education	Jeoji
Gosan1	338.26	441.40	533.80	246.56
Gosan2	220.85	413.90	91.92	374.17
Geumak2	258.88	227.73	353.10	324.66
Mureung1	227.79	304.17	98.06	170.06
Mureung2	182.66	250.89	124.76	136.98
Sangmo1	144.40	510.51	104.93	178.21
Sangmo2	135.67	427.03	76.06	216.15
Seogwang1	200.39	681.77	63.82	330.15
Sindo1	194.09	232.09	253.01	252.73
Anseong	146.68	351.59	74.66	228.10
Yongsu1	166.96	158.31	110.76	202.25
Yongsu2	222.78	219.87	96.30	138.15
Ilgwa	67.05	268.58	165.60	168.10
Panpo1	119.94	376.24	34.09	212.98
Hamo1	134.55	201.12	174.26	103.70

각 군집형 수원의 공간적 영향 범위를 확인하고자 하였다(Fig. 7). 금악 수원의 경우 금악 수원 중심으로 영향이 크게 나타났으며, 서광 수원은 수원 하류 지역을 중심으로 영향이 큰 것으로 분석되었다. 영어교육도시는 수원의 상류 지역을 중심으로 영향이 크고, 저지 수원은 수원 상하류 중심으로 영향이 나타났다.

추가적으로, 군집형 수원의 공간적 영향 범위를 알아보기 위해 앞서 산정한 RSE 값들의 공간적 비유사도 변화를 분석하였다. 이를 위해, 본 연구에서는 반베리오그램(Semivariogram) 분석을 시행하였다(Fig. 8). 군집형 수원의 모든 방향을 고려한 비유사도 공간적 변화 분석 결과, 영향 범위가 약 5,000m로 산정되었다. 이는 군집형 수원에서 양수할 경우 영향을 받는 관측정이 안정, 서광1, 서광2, 서광3, 금악1, 금악2임을 의미한다. 연구대상 유역의 서부 해안 지역에 위치한 고산1 관측정은 군집형 수원 이용에 의한 영향이 큰 것으로 분석되었으나, 군집형 수원의 공간적 영향력이 5,000m임을 고려한다면, 수원에서의 취수로 인한 해당 지역의 영향력은 실제로 적을 것으로 판단된다. 대정-한경 유역 내 공공 농업용 지하수 이용량이 많음(Choi, 2013)을 고려하였을 때, 고산1 관측정의 지하수위 하강은 농업용 지하수 이용과 관련성이 있을 것으로 판단된다.

4.2.3. 적정 지하수 이용 총량 산정

분석 기간 하반기에 급격하게 하강하는 지하수위가 배경 수위로 회복되기 위해 필요한 적정 지하수 이용량을 산정하기 위한 예측 도구를 개발하였다. 이를 위해, 지하수 이용량 및 강수를 입력자료로 하여 지하수위를 예측할 수 있는 모델을 stacked LSTM 기법을 기반으로 개발하고 급격하게 지하수위가 하강하는 시기에 지하수 이용

Fig. 7. Spatial distribution of the influence by groundwater withdrawal amount of each water supply facility: (a) Geumak, (b) Seogwang, (c) English-education, and (d) Jeoji water supply facility.

Fig. 8. The evaluated semivariogram for the influence of the water supply facilities usage.

량을 변화시켜 지하수위 회복량을 평가하였다.

앞서 분석을 통해 산정된 군집형 수원에서의 영향 범위에 포함되는 관측정 서광1, 서광2, 및 서광3을 적정 지하수 이용 총량을 산정하는데 이용하였다. Fig. 9는 예측된 지하수위(붉은색 선)와 실측 지하수위(검은색 선)를 보여주며, 강수량(하늘색 바)과 이용량(하늘색 실선)은 0에서 1로 정규화된 값으로 표기하였다. Fig. 9는 서광1 관측정에 대하여 3년 평균 강수량이 100%일 때 이용량을 조절하였을 경우의 지하수위 회복량을 예시로 보여준다. 실제 지하수위가 급격하게 하락한 시기의 지하수 총 이용량을 줄임에 따라 지하수위가 회복되어 배경 지하수위에 수렴하는 것을 확인할 수 있으며, 총 이용량을 현재 이용량의 80%로 제한하였을 때 지하수위가 회복됨을 확인할 수 있었다(Fig. 9(b)).

추가로, 강수량을 변화시켰을 경우 지하수위가 배경 지하수위까지 회복할 수 있는 적정 취수량을 평가하였다(Fig. 10). 서광1 관측공의 경우, 연 강수량이 1,548mm일

Fig. 9. The variational trend of the groundwater level of Seogwang1 observation well when the groundwater total usage amount of the water supply facility is limited by (a) 100%, (b) 80%, and (c) 0%.

때 일 평균 이용량을 약 $31,830\text{m}^3$ 사용한다면 적정 지하수위를 유지하는 것으로 판단된다. 또한, 연 강수량이 100mm 증가 혹은 감소 시 지하수위를 유지하기 위한 적정한 일 평균 이용량은 약 $1,890\text{m}^3$ 늘리거나 줄이면 될 것으로 판단된다. 서광2 관측공의 경우, 연 강수량이 1,548mm일 때 적정 지하수위를 유지하기 위한 일 평균 이용량은 $36,380\text{m}^3$ 인 것으로 판단되며, 연 강수량이 100mm 증가 혹은 감소 시 지하수위를 회복하기 적절한 일 평균 이용량은 약 $1,731\text{m}^3$ 늘리거나 줄이면 될 것으로 판단된다. 서광3 관측공의 경우, 연 강수량이 1,548mm일 때 일

Fig. 10. The relationship between the precipitation amount and the optimal groundwater usage amount for (a) Seogwang1, (b) Seogwang2, and (c) Seogwang3.

평균 이용량을 34,106m³로 제한해야 할 것으로 판단되며, 연 강수량이 100mm 증가 혹은 감소 시 지하수위를 회복하기 적정한 일 평균 이용량은 약 1,521m³ 늘리거나 줄이면 될 것으로 판단된다. 이러한 결과는 강수량 증가 또는 감소량 대비 적정 지하수 이용량을 산정하는데 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서 개발된 모델은 강수 변화에 대한 외삽(extrapolation)의 성능은 검증되지 않음에 따라 이에 대한 추가적인 연구를 통한 보완이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 자료기반 기법을 활용하여 제주 서쪽에 위치한 대정-한경 유역의 지하수 거동특성을 파악하고 군집형 지하수 이용 관정의 영향력을 파악하였다. 분석을 위해 각 지하수위 관측공에 대하여 강수량 및 이용량 자료를 입력변수로 하는 자료기반 지하수위 예측모델을 stacked LSTM 기반으로 개발하였으며, 이를 기반으로 다 음의 결과를 도출하였다:

1) 대정-한경 유역 내 지하수위 저하 현상은 강수량의 감소뿐만 아니라 2009년 이후 증가한 군집형 수원의 지하수 이용량 또한 영향을 미친 것으로 판단된다.

2) 금악 수원의 공간적 영향력은 해당 수원 중심으로 가장 크며, 서광 수원은 수원 하류 지역을 중심으로 영향이 크고, 영어교육도시는 수원의 상류 지역, 그리고 저지 수원은 수원 상하류 중심으로 영향이 나타난다.

3) 군집형 지하수 이용 관정의 공간적 영향 범위는 대략 5km인 것으로 평가되었으며, 해안가 지역의 지하수위 저하 현상은 유역 내 농업용 지하수 이용에 의한 것으로 판단된다.

추가적으로 군집형 이용 관정의 영향 범위에 포함되는 지하수위 관측공을 중심으로, 배경 지하수위 유지를 위한 강수량 대비 지하수 이용 제한량 평가 도구를 개발하였다. 최근 강수 패턴을 기반하였을 때, 현재 군집형 수원의 지하수 이용량의 80%로 이용량을 제한하였을 때, 적정 지하수위를 유지하는 것으로 나타났다. 이와 같이 개발된 적정 지하수 이용량 평가 도구는 대정-한경 유역의 지속 가능한 지하수 개발을 위한 유용한 정보로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서는 대정-한경 유역 내 농업용 지하수 이용량이 고려되지 않음에 따라 이로 인한 분석 결과의 오차가 발생할 수 있어, 이에 대한 추가적인 자료 확보 및 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한, 본 연구는 연구대상 유역의 전체 대수층에 대한 군집형 이용 관정의 영향력을 평가한 연구임에 따라 심도별 독립적인 대수층 시스템의 가능성은 고려되

지 않았다. 따라서, 연구대상 유역의 군집형 관정의 이용 심도, 주변 지하수 관측공에서의 지하수위 분포, 지질 분포와의 관계성에 대한 복합적인 추가 분석을 통해 심도별 대수층 연결성 등에 대한 연구가 진행될 필요가 있다.

사 사

이 논문은 2018학년도 신임교수정착연구비에 의하여 연구되었음

References

- Choi, K., Song, S., Kim, J. and Lim, C. (2013) Estimation of regional agricultural water demand over the Jeju Island. *Journal of Environmental Science International*, v.22, p.639-649. doi: 10.5322/jesi.2013.22.5.639.
- Choi, S. (1992) Geological structure and groundwater resources of Cheju and Oahu Island, *The Journal of Engineering Geology*, v.2, p.70-91.
- El-Kadi, A.I., Tillery, S., Whittier, R.B., Hagedorn, B., Mair, A., Ha, K. and Koh, G. (2014) Assessing sustainability of groundwater resources on Jeju Island, South Korea, under climate change, drought, and increased usage, *Hydrogeology Journal*, v.22, p.625-642. doi: 10.1007/s10040-013-1084-y.
- Go, G. (2006) 제주도 지하수의 특성과 수자원관리 (I)-제주 지하수 조사. 연구발달사, *Water for future*, v.39, p.73-80.
- Hahn, J., Lee, Y., Kim, N., Hahn, C. and Lee, S. (1997) The groundwater resources and sustainable yield of Cheju volcanic island, Korea. *Environmental Geology*, v.33, p.43-53. doi: 10.1007/s002540050223.
- Hochreiter, S. and Schmidhuber, J. (1997) Long short-term memory, *Neural computation*, v.9, p.1735-1780. doi: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.
- Jeong, J. and Park, E. (2019) Comparative applications of data-driven models representing water table fluctuations. *Journal of Hydrology*, v.572, p.261-273. doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.02.051.
- KIGAM (2005) Integrated analysis of groundwater occurrence in Jeju, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 498p.
- Kim, B., Hamm, S., Lee, C., Ok, S., Cha, E. and Ko, Y. (2011) Feature of regional hydrogeology and groundwater distribution of volcanic rocks in Jeju Island, *Journal of the geological Society of Korea*, v.47, p.263-176.
- Kim, G., Lee, K., Park, K., Hwang, D. and Yang, H. (2003) Large submarine groundwater discharge (SGD) from a volcanic island, *Geophysical Research Letters*, v.30, p.2098. doi:10.1029/2003GL018378.
- Kim, J. (2020) Characteristics of Groundwater Level Variation in Wells around Eoseungsaeng Reservoir, Jeju Island, Doctoral dissertation, Jeju National University.
- Kim, K., Seong, H., Kim, T., Park, K., Woo, N., Park, Y., Koh, G. and Park, W. (2006) Tidal effects on variations of fresh-saltwater

- interface and groundwater flow in a multilayered coastal aquifer on a volcanic island (Jeju Island, Korea). *Journal of Hydrology*, v.330, p.525-542. doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.04.022.
- Kim, M. (2018) Hydraulic Watershed Classification and Flow Characteristics Analysis of Groundwater in Jeju Island, Doctoral Thesis, Jeju National University.
- Kim, Y., Lee, K., Koh, D., Lee, D., Lee, S., Park, W., Koh, G. and Woo, N. (2003) Hydrogeochemical and isotopic evidence of groundwater salinization in a coastal aquifer: a case study in Jeju volcanic island, Korea. *Journal of Hydrology*, v.270, p.282-294. doi: 10.1016/s0022-1694(02)00307-4.
- Lee, K., Wenner, D.B. and Lee, I. (1999) Using H-and O-isotopic data for estimating the relative contributions of rainy and dry season precipitation to groundwater: example from Cheju Island, Korea, *Journal of Hydrology*, v.222, p.65-74. doi: 10.1016/s0022-1694(99)00099-2.
- Lee, S. (2008) Characteristics of hydrogeological and groundwater occurrence in the western coastal areas of Jeju Island, Korea, Doctoral Thesis, Jeju National University.
- Mair, A., Hagedorn, B., Tillery, S., El-Kadi, A. I., Westenbroek, S., Ha, K. and Koh, G. (2013) Temporal and spatial variability of groundwater recharge on Jeju Island, Korea, *Journal of Hydrology*, v.501, p.213-226. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.08.015.
- Ok, S., Hamm, S., Kim, B., Cheong, J., Woo, N., Lee, S., Koh, G. and Park, Y. (2010) Characteristic of aquifer system and change of groundwater level due to earthquake in the western half of Jeju island, *Economic and Environmental Geology*, v.43, p.359-369.
- Scardi, M. and Harding Jr, L.W. (1999) Developing an empirical model of phytoplankton primary production: a neural network case study, *Ecological modelling*, v.120, p.213-223. doi: 10.1016/S0304-3800(99)00103-9.
- Shin, M., Moon, S., Kang, K., Moon, D. and Koh, H. (2020) Analysis of groundwater level variations caused by the changes in groundwater withdrawals using long short-term memory network, *Hydrology*, v.7, p.64. doi: 10.3390/hydrology7030064.
- Won, J., Kim, J., Koh, G. and Lee, J. (2005) Evaluation of hydrogeological characteristics in Jeju Island, Korea, *Geosciences Journal*, v.9, p.33. doi: 10.1007/BF02910552.
- Won, J., Lee, J., Kim, J. and Koh, G. (2006) Groundwater occurrence on Jeju Island, Korea, *Hydrogeology Journal*, v.14, p.532-547. doi: 10.1007/s10040-005-0447-4.
- Yang, S. (2007) 제주도의 하천관리와 개선방안, 하천과 문화, v.3, p.105-115.
- Zhang, J., Zhu, Y., Zhang, X., Ye, M. and Yang, J. (2018) Developing a Long Short-Term Memory (LSTM) based model for predicting water table depth in agricultural areas, *Journal of hydrology*, v.561, p.918-929. doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.04.065.
- 제주특별자치도 (2018a) 지질 주상도, 제주특별자치도 물 정책 과-관측망 시스템-이용량 관측소
- 제주특별자치도 (2018b) 지질 주상도, 제주특별자치도 물 정책 과-관측망 시스템-지하수위 관측소
- 제주연구원 (2018) 지하수자원 특별관리구역 확대를 위한 기초조사, 현안연구, 2018-17, 50-59.
- 제주연구원 (2019) 서부지역 지하수위 변화 추세와 대응방안, 제주연구원 정책이슈 브리프, v.319, 29p.
- 환경부 (2018) 광역 상수도 사업, 환경부 수자원 정책자료