

# 염재해 대응 지속가능한 지하수 자원 확보를 위한 KICT 해안도서 지하수 관리시스템 개발

장선우 KICT 수자원하천연구본부 연구위원

## 들어가며

해안도서 지역은 지하수 의존적인 수자원 구조로 인해 극심한 가뭄 시 물 부족과 지하수위 저하가 반복적으로 발생하며, 해수 침투로 인한 염해 피해도 지속적으로 누적되어 왔다. 이들 지역은 기후변화로 인한 해수면 상승, 강수의 불균형, 국지적 호우 등 복합적인 요인으로 이러한 불안이 더욱 가중되고 있으며 이에 대응하기 위해 지역 고유의

수자원을 효율적으로 이용할 방안 마련과 문제 해결을 위한 고도화된 지하수 관리 체계가 요구된다.

한국건설기술연구원은 이러한 배경 속에서 국내 최초로 해안도서 지역의 지하수 장해에 대응하기 위한 지하수 관리 시스템인 'KICT 해안도서 지하수 관리시스템'을 개발하였다. 본 시스템은 지역 맞춤형 물순환 해석, AI 기반 수위 예측 모델을 토대로 해안지역의 지하수 자원을 안정적으로

[그림 1] KICT 해안도서 지하수 관리 시스템 개념도



[그림 2] 기준수위 관측정 단계별 조치기준 및 조치내용 (제주특별자치도 지하수관리시행규칙 제 12조 별표 4)

1단계	2단계	3단계
해당 유역 기준수위관측정의 2분의 1이상에서 일평균 지하수위가 7일 이상 연속하여 1단계 기준수위 이하로 내려가는 경우	해당 유역 기준수위관측정의 2분의 1이상에서 일평균 지하수위가 7일 이상 연속하여 2단계 기준수위 이하로 내려가는 경우	해당 유역 기준수위관측정의 2분의 1이상에서 일평균 지하수위가 7일 이상 연속하여 3단계 기준수위 이하로 내려가는 경우
<ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="checkbox"/> 해당 유역 지하수 이용자에 대한 절수 안내</li> <li><input checked="" type="checkbox"/> 해당 유역 해안변 인근 지하수의 수질 모니터링 강화</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="checkbox"/> 취수허가량이 10,000톤/월 이상인 해당유역 지하수시설 관리자에게 취수허가량의 100분의 80 이내에서 지하수를 취수하도록 조치</li> <li><input checked="" type="checkbox"/> 해안변 인근 지하수의 염소 이온 농도가 먹는물 수질기준의 90퍼센트를 초과하는 경우 인근 지역 지하수 이용자에게 염분 농도 증가에 따른 사용 주의 안내</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="checkbox"/> 해당유역 지하수시설 관리자에게 취수허가량의 100분의 70 이내에서 지하수를 취수하도록 조치</li> <li><input checked="" type="checkbox"/> 해안변 인근 지하수의 염소 이온 농도가 수질기준을 초과하는 경우 인근 지역 지하수 이용자에게 염분 농도 증가에 따른 사용 자제 안내</li> </ul>

관리하고 미래 수자원 계획을 지원하는 데 목적이 있다. 이 시스템은 웹 기반 플랫폼으로 설계되어 누구나 쉽게 정보를 열람하고 활용할 수 있도록 하였으며, 기존의 단편적 모니터링에서 나아가 지하수 이용 제한과 같은 행정적 대응의 과학적 근거를 제공하는 데 목적을 두고 있다. 2022년부터 2024년까지 한국건설기술연구원 기관고유사업인 지역협력사업으로 수행된 본 성과는 지역적 현안 해결 모델을 구체화하기 위해 제주특별자치도의 기준수위 체계를 모델로 삼아, 수위 경보 체계에 과학적 해석 역량을 추가하고, 수역별 관리수위 활용 방식을 시각적으로 지원한다.

**지자체 지하수 관리 현황**

지하수 관리에서 가장 직접적이고 효과적인 정책 수단은 적정 지하수위를 유지하는 것이다. 본 개발 모델의 실증 부지인 제주특별자치도의 경우, 제주도는 대표 관측정을 지정하여 지하수위를 상시 모니터링하고 있으며 관측된 지하수위가 일정 수준 이하로 하강할 경우 단계별로 적절한 조치를 취할 수 있도록 체계를 마련하였다. 이처럼 사전에 정

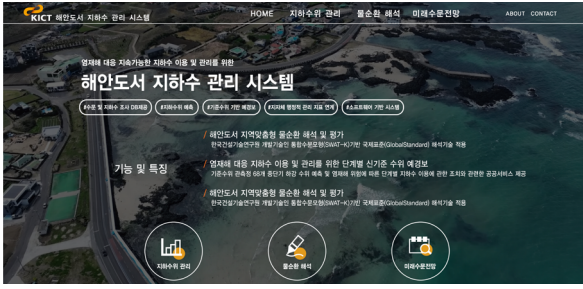
해진 수위 기준에 따라 각 단계별 대응이 이루어지도록 설정한 수위를 ‘관리수위’라 하며, 이는 지하수위 변동 자료의 통계 분석을 통해 도출된다. 2017년 제주도 일부 지역에서는 지하수위가 기준 이하로 하락하면서 1단계 경계 경보가 발령된 바 있으며, 이는 단순한 물 부족을 넘어 수자원 고갈로 이어질 수 있는 심각한 위협으로 간주된다.

**연구내용**

그림 3은 KICT에서 개발한 ‘해안도서 지하수 관리 시스템’의 웹사이트 시작화면이며 그림 4는 시스템의 사용 예시 화면이다. 이 시스템에서는 테스트베드인 제주도에서 제공되는 관측 데이터를 분석하여 수위 예·경보를 위한 지하수위 예측 정보, 통합수문모형(SWAT-K) 기반 물순환 해석 정보, 기후변화에 따른 미래 수문환경 예측 정보를 통합 제공하는 방식으로 구성되어 있다.

이 중 ‘지하수위 관리’ 항목은 기준수위 관점에서 제주도 내 각 관측 지점의 지하수위 수준을 공간적으로 시각화한다. 본 시스템의 핵심 기술은 기준수위 관측정 68개소에 대한 중·

[그림 3] KICT 해안도서 지하수 관리 시스템 시작 화면



단기 지하수위 하강 예측 및 염해 위험에 따른 단계별 지하수 이용 조치와 관련된 공공서비스로, 수위의 정밀한 관측과 예측이 해안 지하수 관리의 핵심 요소다. 지하수위 예측에는 LSTM(Long Short-Term Memory) 기법이 활용되었는데 이는 시계열 데이터를 다루는 RNN(Recurrent Neural Network)의 일종으로 장기 의존성 정보를 기억하는 메모리 셀이 포함되어 있어 긴 기간의 데이터를 처리할 수 있다. 특히 본 시스템에서는 성능 향상을 위해 LSTM 층을 적층한 Stacked-LSTM 구조를 적용하였으며, 이를 통해 각 관측소별로 학습된 모델이 개별 관측소의 수위 변화 특성을 효과적으로 반영할 수 있었다. 그 결과 지하수위, 강수량 및 선택 변수 1종을 입력값으로 활용하여 기준 시점부터 5일간의 지하수위 변화를 평균 93% 이상의 정확도로 예측할 수 있다. 또한, 염해 임계 수위 도달 여부를 기준수위 1~3단계로 감지하여 예·경보 기능을 수행한다. 또한 지하수위 예측 기능 외에 각 관측소의 수위 평균, 표준편차, 기준수위 대비 백분율 등이 그래프 형태로 제공되어 정량적 비교가 가능하다.

‘물순환 분석’ 항목은 통합수문모형 SWAT-K 기반 수문 해석 결과를 2001-2020년의 평균 수문성분량을 바탕으로 유역별 수문성분 분포를 시각화하였다. SWAT-K는 미 농무성의 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)을 한국 실정에 맞게 개선한 모형으로, 2013년 KICT의 세계최고기술(WBT)로 선정된 바 있다. SWAT-K는 지형, 토지이용, 토양, 기상 등 다양한 요소를 반영하여 지하수 함양의 시공간적 변동성을 정량적으로 추정할 수 있으며, 지표수-지하수 연동 해석이 가능하다. 분석 과정은 일 단위 기상자료(강수, 온도, 풍속 등)와 수치 주제도(DEM, 토양도, 토지이용도 등)를 바탕으로 소유역과 HRU(Hydrologic Response Unit)를 생성하고 SWAT-K DB로부터 매개변수를 구축하여 유출량, 증발산량, 함양량 등의 수문 성분을 도출한다.

‘미래 수문전망’ 항목에서는 18개 전지구기후모형(Global Climate Models, GCM)의 공유사회경제경로(Shared Socioeconomic Pathways, SSP) 기후변화 시나리오 자료

를 제주도 지역에 맞게 상세화하고 편의 보정한 후, 유역모형(SWAT-K)과 연계하여 제주도 내 16개 표준유역 단위에서의 미래 수문 변화를 분석하였다. 또한 시나리오별로 근미래(2011~2040), 중간미래(2041~2070), 먼미래(2071~2100) 등 기간을 구분하여 변화 양상을 검토하였다. 이를 통해 강수량, 유출량, 증발산량, 지하수 함양량 등 주요 물순환 요소의 변화를 종합적으로 전망하고, 기후변화에 대응한 효과적인 물관리 전략 수립을 지원할 수 있다

이와 같이 본 시스템은 공간 기반 시각화와 정량 정보를 통합 제공함으로써 지자체, 연구자, 정책결정자가 과학적이고 전략적인 자원 관리를 수행할 수 있도록 돕는다. 특히 지자체의 지하수 관리 기준을 기반으로 위험도 분석을 수행하고 최신 기후 시나리오 연계를 통한 미래 예측 기능은 지하수의 지속가능한 이용을 위한 핵심 자료로 기능한다.

이 기술 개발 과정에서는 해안도서 지역적 특성을 반영한 기술을 구현하기 위해 제주특별자치도청과 제주연구원 지하수연구센터의 실무 자문과 데이터 공유가 이루어졌으며, 이를 통해 현장성이 높은 시스템 구축이 가능하였다. 이러한 지역 협업은 실질적인 기술 성과를 도출한 차별화된 접근으로 평가된다.


맺음말

본 시스템은 해안도서지역 지하수 이용의 안정성을 진단하고, 기후변화에 대응한 장기적 자원 관리 전략 수립을 지원하기 위해 구축되었다. 이와 같은 사전 대응 체계는 지역 주민과 지자체가 물 사용을 선제적으로 조절하고, 필요시 대체수자원을 확보할 수 있는 시간적 여유를 확보하게 한다.

시스템은 기존 지하수 관측망 정보와 통합되어 보다 정밀한 분석이 가능하며, 지자체의 행정관리 지표와 연계해 지역 맞춤형 관리수위 설정, 유역별 조절 방안 수립, 기후변화 기반의 수자원 계획 수립 등 다양한 정책 활용이 가능하다. 이는 해안 지하수의 환경적 특성과 지역 사회의 수요를 반영한 과학 기반 자원 관리 시스템으로서의 실효성을 입증하고 있다.

나아가 본 시스템은 제주도에 국한되지 않으며 다른 지자체로의 확장 가능성도 크다. KICT 시스템의 AI 기반 예측 기능은 이러한 지역별 지하수 관리의 불균형 문제를 해소하고, 물순환 기반 도시계획 수립을 위한 기반을 제공할 수 있다. 이는 물 자원의 지속 가능성 확보를 동시에 가능케 하는 전략적 기술 플랫폼으로 향후 다양한 지역과 상황에서 폭넓은 활용이 기대된다. **KICT**

[그림 4] KICT 해안도서 지하수 관리 시스템 사용 예시 화면



**KICT** 해안도서 지하수 관리 시스템 모니터링

Home 지하수위 관리 물순환 해석 미래수문전망

**지하수위 관리**

- ▶ 지하수위 관리 현황
- ▶ 인공지능 기반 지하수위 예측
- ▶ 지하수위 관측자료 장기 추세

**물순환 해석**

- ▶ 물지수 해석
- ▶ 공간분포 해석

**미래수문 전망**

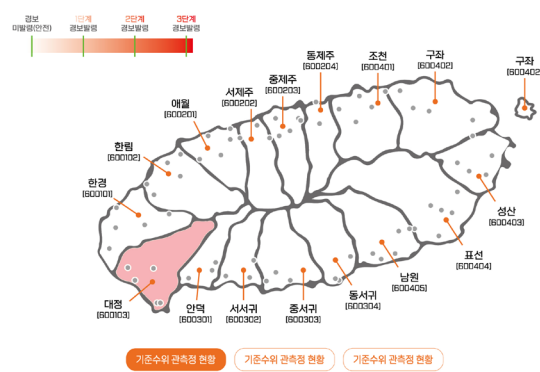
- ▶ 공간분포 전망
- ▶ 지역별 연/월 전망
- ▶ 물지수 전망

**지하수위 관리**

· 기준수위 관측망 지하수위 추세 및 인공산광망 기반 지하수위 예측정보를 조회할 수 있습니다.

**유역선택**

· 지도에서 유역을 선택해주세요. 상세정보를 확인할 수 있습니다.



기준수위 관측망 현황
기준수위 관측망 현황
기준수위 관측망 현황

**기준수위 관측망 현황**

· 정보 기준: 유역 내 기준수위 관측망의 2분위 이상에서 일평균 지하수위가 7월 이상 연속하여 단계 기준수위 이하로 내려가는 경우에 발생합니다.

관측망	구분	유역	관측개시일	표고	기준수위 (1단계)	기준수위 (2단계)	기준수위 (3단계)	1단계 이상 지하수위 지속일수	2단계 이상 지하수위 지속일수 예측	위험여부
와지	북부	애월	2023-02-01	14.37	3.59	2.88	2.25	0일	0일	안전
산영	북부	애월	2001-01-01	3.52	3.52	2.72	2.02	0일	0일	안전
하귀2	북부	애월	2002-09-26	86.33	7.33	6	4.79	0일	0일	안전
왕인	북부	애월	2003-10-11	131.55	4.77	3.78	2.9	0일	0일	안전
생가2	북부	애월	2003-10-11	146.26	4.36	3.45	2.65	0일	0일	안전
이오	북부	서재주	2001-01-01	33.76	3.92	2.72	1.55	0일	0일	안전
하귀3	북부	서재주	2001-01-01	119.71	9.91	7.9	6.99	0일	0일	안전
황안	북부	서재주	2004-01-14	152.33	32.27	29.96	27.7	0일	0일	안전
공항	북부	중제주	2001-01-01	47.43	4.27	3.42	2.66	0일	0일	안전

**물순환 해석**

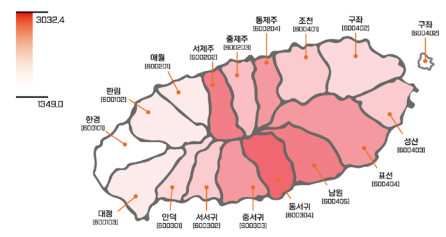
· 수문모형(SWAT-K)을 이용하여 분석된 유역단위 수문성분 정보를 조회합니다.

**강수량**   **증발산량**   **유출량**   **함양량**

물지수 해석

공간분포해석

· 과거기간(2001-2020년)의 연평균 강수량(mm)



**미래수문 전망**

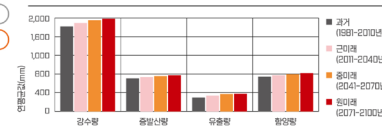
SSP 시나리오 기반 미래수문성분 정보를 조회할 수 있습니다.

**SSP1-2.6**   **SSP2-4.5**   **SSP3-7.0**   **SSP5-6.5**

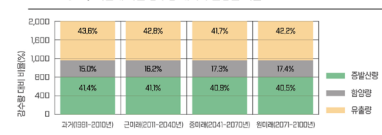
공간분포 전망

지역별 연/월 전망

물지수 전망



SSP1-2.6 | 기간에 따른 강수량 대비 수문성분 비율



**참고자료**

- 김철겸, 조재필, 이정은, 장선우 (2023) CMIP6 기후변화 시나리오에 따른 제주도 지역의 미래 수문변화 전망. 한국수자원학회 논문집, 56(11), 737-749.
- 박창희, 정일문 (2020) LSTM 모델을 이용한 지하수위 예측 평가. 한국수자원학회 논문집, 53(4), 273-283.
- 심영규, 정일문, 장선우 (2024) 국내외 해안 지하수관리 정책 사례 분석. 한국수자원학회 논문집, 57(9), 633-643.
- 제주특별자치도 (2022) 제주특별자치도 통합물관리 기본계획 2023-2032, 79-6500000-000914-13
- 한국건설기술연구원 (2024) 신기준수위 기반 해안지역 지하수 관리 솔루션 개발 최종보고서, KICT 2024-100
- Kim, N.W., Chung, I.M., Kim, C., Lee, J., Lee, J.E. (2009) Development and applications of SWAT-K (Korea), In: Arnold, J. et al. (Eds.), Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Global Applications,
- IPCC (2023) Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Lee, H. and Romero, J. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.