

Korea Water Resources Association

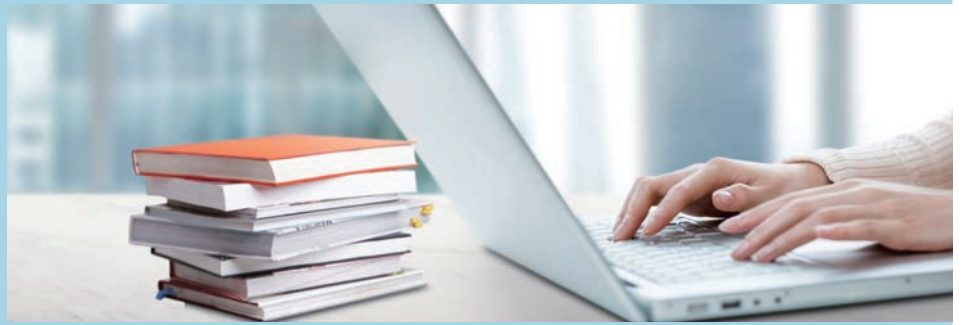


특 집

다원적 의사결정을 위한 Scenario Neutral(SN) 기반 가뭄취약도 평가기술 개발 연구단

- 08 가뭄 빈도해석 기반의 가뭄상황 수문 시나리오 산정 기술 개발
정민규·김현수·권현한
- 14 기후·사회·경제 변화 요인을 반영한 생활용수 수요량 시나리오 개발
김태웅·김민지·김지영
- 23 국가가뭄정보통계집을 활용한 유역별 군집특성 및 가뭄 피해 민감도 평가기술
이서윤·차호영·전창현·김태웅·유도근
- 33 효율적 가뭄 대응을 위한 시나리오 중립 기반 다원적 의사결정 시뮬레이터
박동혁·권정호·지희원·서승범

SPECIAL
ISSUE



가뭄 빈도해석 기반의 가뭄상황 수문 시나리오 산정 기술 개발



정민규
 세종대학교
 건설환경공학과
 박사후연구원
 jminkyu@sejong.ac.kr



김현수
 세종대학교
 건설환경공학과 석사과정
 hyunsoo20@sju.ac.kr



권현한
 세종대학교
 건설환경공학과 교수
 hkwon@sejong.ac.kr

01 머리말

효율적이고 안정적인 용수 수급 계획을 수립하기 위한 가장 기초적인 단계는 자연유량 관측자료를 기반으로 소유역별 용수 수급의 과부족을 평가하여 이수안전도를 확보하는 물수지 분석 과정이다. 최근 기후변화로 인해 국지적 대가뭄의 빈도와 강도가 급증함에 따라, 국가적 차원에서의 용수공급 안전도에 대한 수요가 높아지고 있다. 특히 제1차 국가물관리기본계획(2021-2030)에서 강조하는 하천 유역 단위의 이수안전도 제고를 위해서는 발생 가능한 가뭄 규모를 정량화하고, 해당 상황에서의 용수공급 능력을 면밀히 파악하는 것이 필수적이다. 이러한 배경에서 “다윈적 의사결정을 위한 Scenario Neutral(SN) 기반 가뭄취약도 평가기술 개발” 과제가 수행되고 있으며, 발생 가능한 다양한 물부족 상황 시나리오에 대해 가뭄취약도를 평가하고 그에 따른 가뭄대응 전략을 구축하는 데 노력을 기울이고 있다.

가뭄 상황에 대한 물수급 분석을 수행하기 위해서는 특정 가뭄 규모에 대응하는 유량 자료가 필요하다. 가뭄은 단순히 물 부족량뿐만 아니라 지속기간과 심도가 복합적으로 작용하므로, 이러한 다각적인 특성을 충분히 반영해야 할 필요성이 있다. 그러나 기존 연구들은 주로 댐 유입량과 같이 실측 자료가 확보된 지점을 중심으로 확률갈수량을 산정하는 가뭄 평가에 치중해 왔다. 또한 미계측 유역을 포함한 유역 전체를 대상으로 가뭄의 영향을 반영한

수문량을 산정하는 연구는 여전히 미진한 실정이다. 이러한 점에서 가뭄 규모를 지속기간과 심도에 의해 정확하게 측정하고, 이를 기반으로 다양한 가뭄 규모에 따른 유역별 유량 시나리오의 산정 방안을 제시하기 위해 “가뭄 빈도해석 기반의 가뭄상황 수문 시나리오 산정 기술 개발” 연구가 진행되고 있으며, 이를 본 고에서 소개하고자 한다.

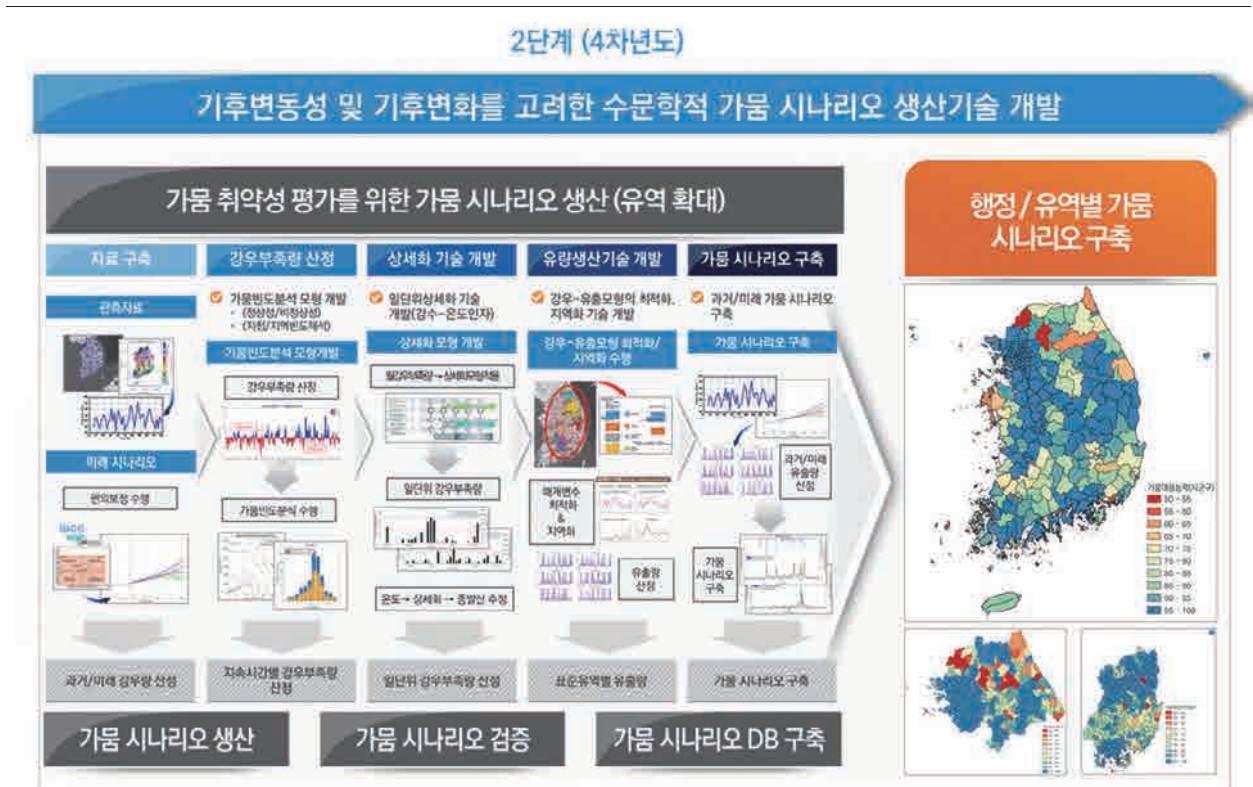


그림 1. 가뭄빈도해석 기반 가뭄상황 수문 시나리오 산정 기술 개발 개요

02
가뭄 빈도해석
기반의 가뭄상황
수문 시나리오 산정
기술 소개

가뭄상황 수문시나리오라 함은 강수 부족으로 인한 기상학적 가뭄의 규모를 정의하고 해당 규모의 가뭄에 따른 강수량과 유역의 자연유량 등 수문자료를 시나리오 형태로 구축한 자료를 의미한다. 최종적으로 유량을 산정하기 위한 강수량, 온도, 증발산량 산정 과정을 포함한다. 즉 가뭄 빈도해석을 통한 가뭄 규모 측정 결과를 가뭄으로 인한 유량 시나리오까지 연계하는 것이다. 결과적으로 가뭄 규모에 따른 표준유역별(공간해상도) 일단위(시간해상도) 유량 자료를 제공함으로써 미세측 유역을 포함한 전 유역의 가뭄취약도 분석 및 물수급 모의를 위한 핵심 기초자료를 제시하고자 한다. 본 연구의 최종 목적은 가뭄 빈도해석을 통해 도출된 다양한 규모의 가뭄 상황을 설정하고, 이에 대응하는 유량 시나리오를 산정하는 체계적인 프로세스를 개발하는 것이다. 연구의 세부 단계는 다음과 같다.

- ① 유역 월강수량 Anomaly를 기준으로 가뭄변량(지속기간, 심도) 산정
- ② 가뭄 지속기간과 심도를 고려한 이변량 빈도해석을 통해 가뭄 규모 정의 및 가뭄상황 유역 연강수량 산정
- ③ 과거 월강수량 패턴 기반으로 연강수량의 월별 분배를 통해 가뭄상황 월강수량 시나리오 산정
- ④ 산정된 유역 월강수량을 통계적 시공간적 상세화 기법을 적용하여 지점 일강수량 시나리오 산정
- ⑤ 과거 강수-기온 조건부 상관성 기반으로 강수량 시나리오에 해당하는 기온자료 구축 및 이를 활용하여 증발산량 산정으로 강우유출모형 입력자료 구축
- ⑥ 기상수문 입력자료를 활용하여 강우-유출 모의를 통해 표준유역별 유량 시나리오 산정

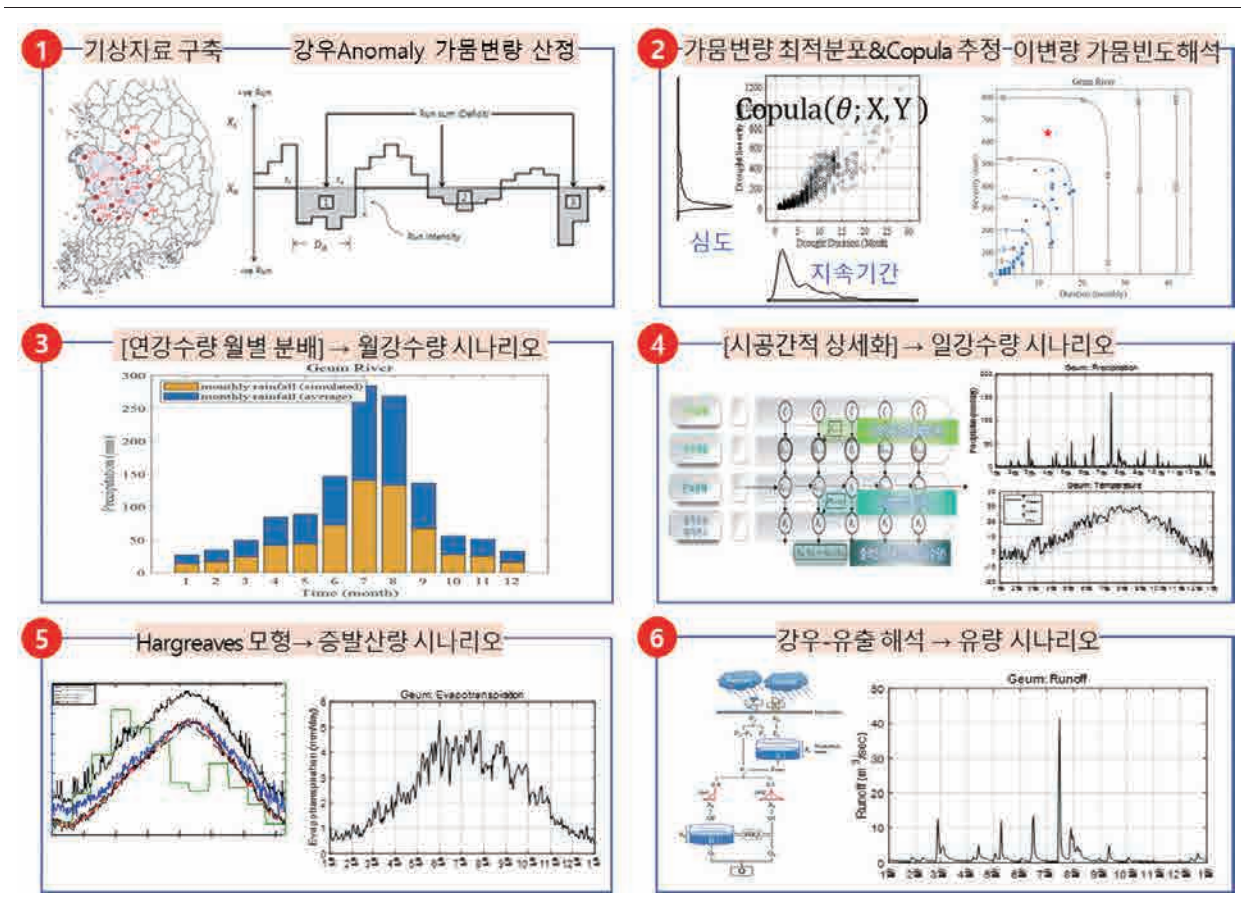


그림 2. 가뭄상황 수문 시나리오 산정 절차 모식도

2.1 가뭄 빈도해석

본 연구에서는 지속기간과 심도를 동시에 고려하는 이변량 가뭄 빈도해석 기법을 적용하였다. 가뭄 규모 산정을 위해 유역 평균 월강수량 자료를 구축하고, 과거 기간의 평균 월강수량과 6개월 누적 평균 강수량의 차이를 이용하여 월강수량 anomaly를 산정하였다. 산정된 월강수량 anomaly를 기준으로 가뭄 변량(지속기간, 심도)을 산정하고, Copula 함수를 활용한 이변량 빈도해석을 수행하였다. Copula 기반 분석은 두 변량 간의 상관구조를 효과적으로 반영할 수 있어, 가뭄 특성의 상호의존성을 정량적으로 평가하는 데 적합하다. 이러한 과정을 통해 특정 재현기간에 대응하는 가뭄 지속기간-심도 조합을 도출하고, 이를 바탕으로 가뭄상황 연강수량을 산정하였다.

2.2 시공간적 상세화 기술

가뭄상황 수문 시나리오 구축 과정에서는 저해상도의 월 단위 강수 정보를 일 단위 강수 시계열로 변환하는 시공간적 상세화 과정이 필수적이다. 이를 위해 본 연구에서는 비정상성 은닉 마코프 모형(NHMM, Nonhomogeneous Hidden Markov Model) 기반의 시공간적 상세화 기법을 적용하였다. 비정상성 은닉 마코프 모형 기반의 시공간적 상세화 모형은 월강수량 anomaly와 지점 일강수량의 관계를

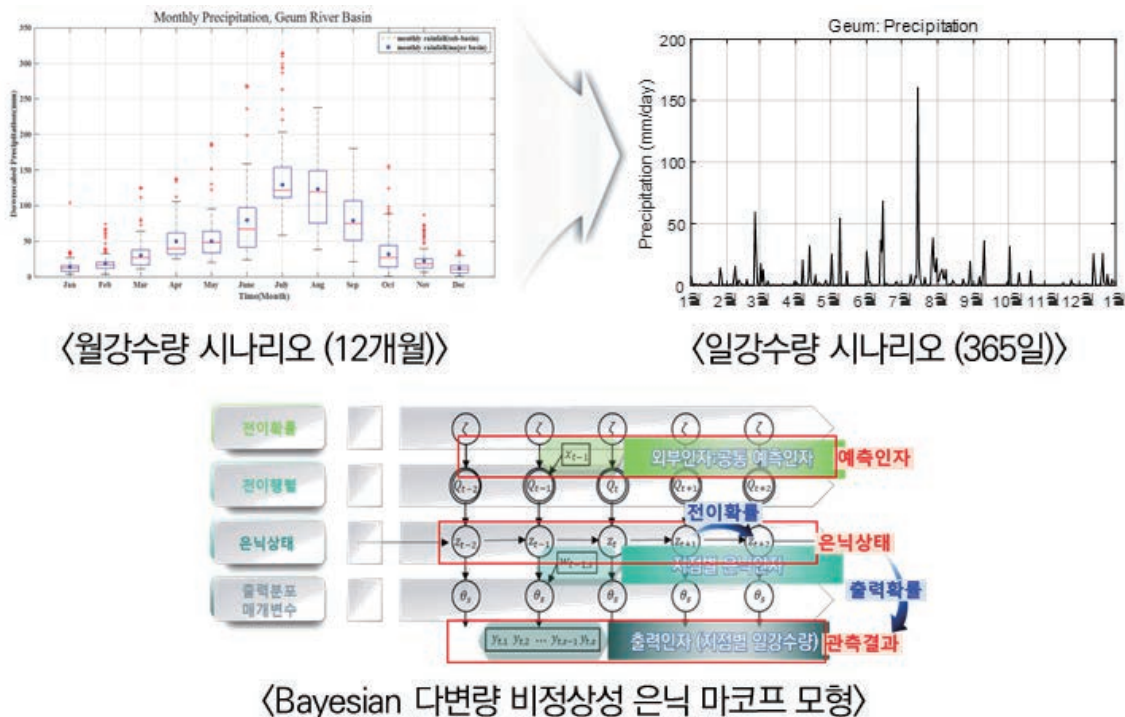


그림 3. NHMM 기반 시공간적 강수 상세화 개념도

학습하여 모형이 구축되며, 시공간적 상세화를 통해 지점별 가뭄상황 월강수량 시나리오(12개월)를 입력하여 일강수량 시나리오(365일) 모의 수행이 가능하다.

NHMM은 관측되지 않는 은닉상태에 의해 확률적으로 발생한다는 가정에 기반을 두며, 전이확률과 출력확률의 추정을 통해 강수 발생 특성을 재현한다. 특히 전이확률을 산정하는 과정에서 직전 상태뿐만 아니라 월강수량과 같은 예측인자를 함께 고려함으로써 비정상성 특성을 반영할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 특성을 활용하여 과거 유역 월강수량과 지점 일강수량 자료의 관계를 우선 학습하고, 이후 가뭄 빈도해석을 통해 도출된 월강수량 시나리오의 anomaly를 입력자료로 활용하여 지점별 일강수량 시나리오를 생성하였다. 상세화 과정에서는 은닉상태 개수의 최적화와 모형 매개변수 추정을 수행하고, 관측자료와의 비교 검증을 통해 모의 결과의 신뢰성을 확보한다.

2.3 강수-기온 연계 시나리오 구축

가뭄상황 수문 시나리오를 실제 유량 모의에 활용하기 위해서는 강수량뿐 아니라 기온 자료 역시 필수적으로 고려되어야 한다. 기온은 증발산량 산정과 유출 반응에 직접적인 영향을 미치는 핵심 수문기상 변수이다. 가뭄 빈도해석과 시공간적 상세화 과정을 통해 구축된 일강수량 시나리오와 연계하여, 가뭄상황에 부합하는 기온 시나리오를 함께 구축하였다. 이를 위해 과거 관측된 일단위 평균기온, 최고기온, 최저기온 자료를 기반으로 강수 발생 여부와 기온 간의 통계적 관계를 분석하였다. 생성된 기온 시나리오는 이후 증발산량 산정과 강우-유출 모의의 중요한 입력자료로 활용된다.

2.4 증발산량 산정

본 연구에서는 H-S(Hargreaves-Samani) 공식을 통해 증발산량을 산정하였다. H-S 방법은 최고기온, 최저기온, 평균기온 및 외기복사량을 이용하여 증발산량을 산정하는 경험식이다. H-S 방법은 비교적 단순한 입력자료만으로도 증발산량 산정이 가능하다는 장점이 있으며, 강수-기온 연계 모의를 통해 구축된 기온 시나리오와 연계하여 활용되었다. FAO-56 Penman-Monteith 방법으로 산정된 증발산량과 관측된 기온 자료를 바탕으로 H-S 공식의 매개변수를 추정하였다. 매개변수 추정 과정에서는 전국 기상청 ASOS 관측지점을 대상으로 매개변수를 추정하고, 각 지점의 기온 자료와 결합하여 증발산량을 산정하였다. 이렇게 구축된 증발산량 자료는 강우-유출 모형의 입력자료로 활용되어, 현실적인 유량 시나리오 산정에 기여한다.

2.5 강우-유출 모형을 통한 유량 시나리오 산정

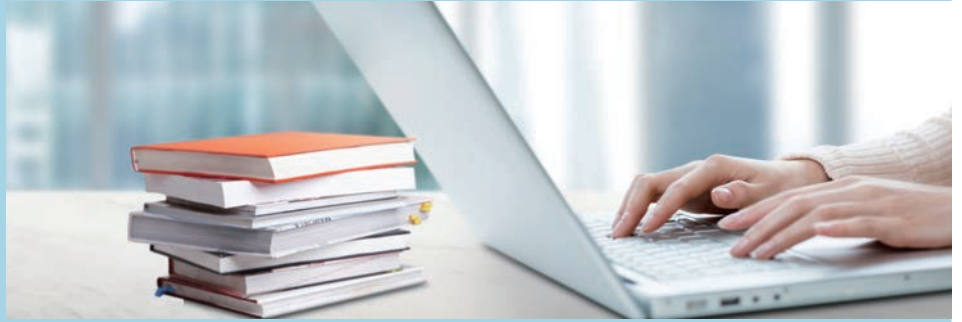
가뭄상황 수문 시나리오 산정에서는 앞서 구축된 일강수량, 기온, 증발산량 자료를 활용하여 표준유역별 유량 시나리오를 산정한다. 이를 위해 구조가 간결하고 모의 성능이 우수하다고 알려진 GR4J 강우-유출 모형을 활용하였다. GR4J 모형은 네 개의 주요 매개변수를 이용하여 일단위 유출을 모의하는 개념적 모형으로, 우리나라의 다양한 소유역 조건에서 안정적인 결과를 제공하는 특징을 가진다. 우선 자연유량이 계측된 유역을 대상으로 강우-유출 모형의 매개변수를 최적화하고, 미계측 유역 적용을 위해 Copula 기반의 지역화 기법이 적용된다. 이 기법은 계측유역에서 최적화된 GR4J 매개변수와 유역특성인자와 간의 결합확률구조를 구축하고, 이를 기반으로 미계측 유역의 유역특성인자를 통해 매개변수를 전이·추정하는 방법이다. 최종적으로 가뭄상황 일강수량 및 증발산량 시나리오를 입력하여 강우-유출 모의를 수행하였으며, 이를 통해 일단위 유량 시나리오를 구축하였다. 이렇게 산정된 유량 시나리오는 대권역 내 미계측 유역을 포함한 전 표준유역의 가뭄취약도 평가와 물수급 모의의 핵심 기초자료로 활용되며, 가뭄 대응 의사결정을 지원하는 정량적 기반 자료로 활용될 것으로 기대된다.

03 맺음말

최근 기후변화의 영향으로 가뭄의 발생 빈도와 강도가 점차 증가하고 있으며, 이에 따라 안정적인 용수 확보와 물수급 관리의 중요성이 더욱 커지고 있다. 이러한 점에서 가뭄 규모를 정량적으로 평가하고 이에 대응하는 유량 시나리오를 체계적으로 산정할 수 있는 수문 시나리오 구축 기술을 가뭄취약도 평가와 물수급 분석을 위한 핵심적인 기본 토대가 될 수 있다. 이에 본 원고에서는 가뭄 빈도해석을 기반으로 한 가뭄상황 수문 시나리오 산정 기술의 연구 목적과 주요 연구 절차, 그리고 이를 통해 구축된 유량 시나리오의 활용성에 대해 소개하였다. 본 연구 과제의 연구진은 앞서 제시된 연구 목적이 충실히 달성될 수 있도록 후속 연구를 지속적으로 수행할 계획이며, 본 기술이 국가 물관리 정책 수립과 합리적 가뭄 대응 체계 구축에 기여할 수 있기를 기대한다.

감사의글

본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 기후변화 적응 수재해 관리 기술개발사업(R&D)의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2022-KE002032).



기후·사회·경제 변화 요인을 반영한 생활용수 수요량 시나리오 개발



김태웅
한양대학교(ERICA)
건설환경공학과 교수
twkim72@hanyang.ac.kr



김민지
한양대학교 대학원
스마트시티공학과 박사수로
stylus97@hanyang.ac.kr



김지영
한양대학교 대학원
스마트시티공학과 박사수로
jjy117@hanyang.ac.kr

01 불확실성 시대의 물 수요량 시나리오의 필요성

기후와 사회 및 경제 변화는 물 관리 환경 전반에 구조적인 전환을 요구하고 있다. 최근 수십 년간 우리나라는 반복적 가뭄, 강수 편차 확대, 인구 감소와 고령화, 산업 구조 변화 등 복합적인 변화를 경험하고 있다. 기존의 정태적 물 수요 예측 방식만으로는 이러한 변화를 설명하거나 예측하기 어렵다. 이러한 상황에서 미래 물관리는 단일한 수요 예측값에 의존하기보다, 다양한 가능성을 고려한 수요량 시나리오 기반의 접근이 요구된다.

특히 생활용수는 국민 생활과 직결되는 필수 자원으로서, 그 수요 변화는 물수급 분석, 가뭄 취약도 평가, 비상 급수 계획 수립, 수자원 운영 전략 등 다양한 물 관리 의사결정의 기초 자료로 활용된다. 따라서 생활용수 수요를 고정된 값으로 전망하기보다는 사회·경제 변화와 불확실성을 반영한 수요 시나리오를 구축하고, 이를 정책과 계획 수립 과정에 활용하는 것이 점점 더 중요해지고 있다.

그동안 국내 물 수요량 전망은 주로 인구 전망과 1인 1일 평균 물사용량(원단위)을 기반으로 추정되었으며, 국가물관리기본계획에 반영되어 있다. 그러나 이러한 방식은 사회 및 경제 변화, 지역별 수요 특성, 장기적 불확실성을 반영하는 데 한계가 있다. 특히 기후변화와 인구 구조 변화가 동시에 진행되는 현 시점에서는 기존 원단위 기반 접근법을 개선할 수 있는 새로운 수요량 전망 방법의 개발이 요구된다.

본 기사에서는 기계학습 기반 장기 예측 기법과 기후변화에 따른

사회·경제 시나리오를 결합하여, 지역별 특성과 불확실성을 반영한 생활용수 수요량 시나리오를 개발하는 방법을 소개하고, 개발된 수요 시나리오가 물수급 분석, 가뭄 취약도 평가, 수자원 계획 수립 등 실제 물 관리 분야에서 어떻게 활용될 수 있는지를 중심으로 그 의미와 기대 효과를 제시하고자 한다.

02
생활용수 수요량
시나리오의 개념

2.1 생활용수 수요량 시나리오의 역할

생활용수 수요량 시나리오는 다양한 시나리오를 바탕으로 물수급 분석과 가뭄 취약도 평가를 수행하고 정책적 대안을 모색하는데 활용된다. 가뭄 취약도 평가에서는 특정 연도의 수요량 자체보다, 수요가 증가하거나 감소하는 여러 경로를 함께 고려하여 공급 안정성과 대응 여력을 검토하는 것이 중요하다. 이러한 점에서 복수의 수요량 시나리오를 활용하는 접근은 불확실성을 고려한 물 관리 체계 구축에 필수적이다.

수요량 시나리오는 댐 및 광역상수도 운영, 비상 급수 계획 수립, 용수 배분 기준 설정 등 실무적 의사결정 과정에서도 활용도가 높다. 예를 들어, 고수요와 저수요 시나리오에 따라 물 부족 발생 시점과 규모가 달라질 수 있으며, 이는 가뭄 대응 전략과 수자원 운영 방식에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 단일 전망값이 아닌 시나리오 기반 수요 자료를 활용하는 것은 보다 현실적이고 탄력적인 물 관리 의사결정을 가능하게 한다.



그림 1. 국가물관리기본계획의 생활용수 수요량 산정 방법

2.2 기존 생활용수 수요량 산정 방법

국가물관리기본계획에서 활용되는 생활용수 수요량 산정 방식은 크게 상수도 급수지역 수요량, 상수도 미급수지역 수요량, 기타 지하수 수요량 등의 합으로 구성된다(그림 1). 이 중 핵심 요소인 급수지역 수요량은 장래 인구 전망, 급수 보급률, 그리고 1인 1일 평균 물사용량(원단위)을 기반으로 산정된다. 원단위는 과거 통계자료를 이용하여 시계열 추정곡선을 통해 산정되며, 가정용·비가정용으로 구분되고 일정 기간 평균값이 적용된다.

2.3 기존 방법의 한계

국가물관리기본계획에서는 국가 단위 물 수요량 관리에 활용될 수 있도록 고수요·기준수요·저수요의 세 가지 수요 시나리오를 제공하고 있다. 다만, 기준수요는 과거 원단위 변화 추세를 반영하여 산정되고, 고수요와 저수요는 1인 1일 평균 물사용량(원단위)의 변동성에 대한 95% 신뢰구간을 적용하여 도출되었기 때문에, 실제 물 관리 의사결정 과정에서 활용하기에는 구조적인 한계를 가진다.

첫째, 기존 시나리오는 원단위의 통계적 변동성만을 반영한 범위 제시에 가까워, 인구 구조 변화, 도시 성장 단계, 생활양식 변화, 지역 여건 차이와 같은 수요 변화의 구조적 요인이 충분히 반영되지 않는다. 그 결과, 고·기준·저 시나리오가 서로 다른 미래 상황을 가정한 대안적 수요 경로라기보다는, 하나의 추세선 주변에서 수치적 범위를 조정한 결과이다.

둘째, 기존 방법은 2030년을 목표연도로 설정하여 해당 연도의 수요량 값을 중심으로 제시되는 구조이기 때문에, 연단위 수요량 시계열 자료를 제공하지 않는다. 이로 인해 시간에 따른 수요 변화를 입력자료로 요구하는 물수급 모형에 직접 적용하기 어렵고, 가뭄 발생 시점별 수요 변화나 단계별 물 부족 위험을 검토하는 데에도 제약이 따른다. 즉, 가뭄 계획 수립이나 단계별 대응 전략 수립과 같이 시간 축을 고려한 분석과 의사결정을 지원하기에는 활용성이 제한적이다.

3.1 제안 방법의 기본 개념

본 기사에서 소개하는 생활용수 수요량 시나리오는 기존 추정식 기반 방법의 한계를 해결하기 위해 기계학습 기반 시계열 예측 기법과 기후변화에 따른 사회 및 경제 시나리오를 결합한 것이 특징이다. 특히 장단기 기억 신경망(Long Short-Term Memory, LSTM)을 활용하여 생활용수 사용량 원단위를 예측하고, 이를 공통사회경제경로(Shared Socioeconomic Pathways, SSP)의 사회 및 경제 시나리오의 인구 자료와 결합함으로써 장기 수요 변화를 보다 유연하게 반영한 것이다(그림 2).

03

기계학습 및 기후 변화 시나리오 기반 생활용수 수요량 시나리오

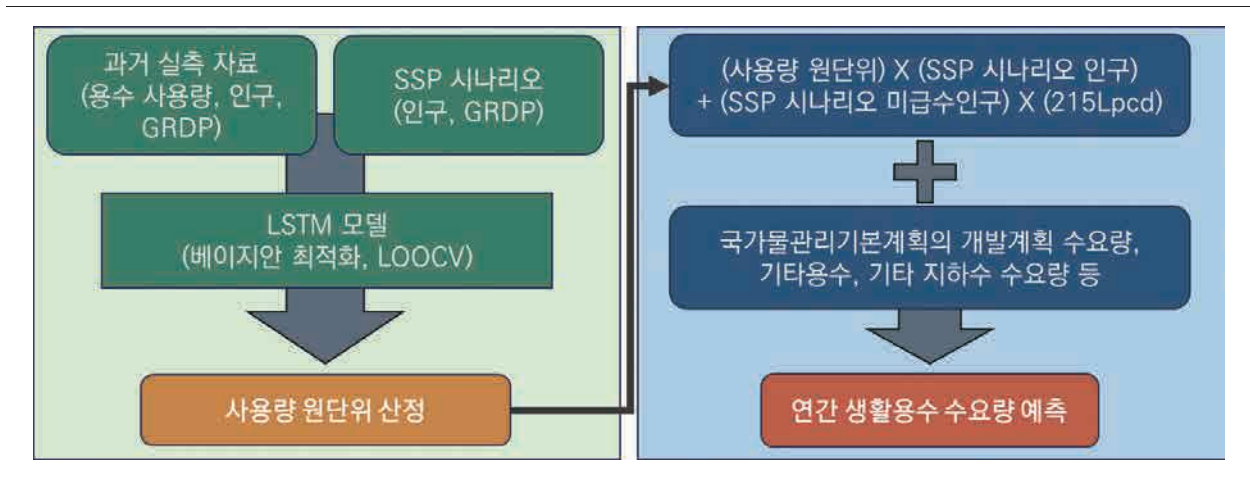


그림 2. LSTM 기반 생활용수 사용량 원단위 산정 및 수요량 예측 흐름도

3.2 LSTM 기반 원단위 예측

LSTM은 시계열 데이터의 장기 의존성을 효과적으로 학습할 수 있는 순환신경망 구조로, 물 수요량과 같이 연속적이고 누적 효과가 존재하는 자료에 적합한 모델이다. 본 연구진은 시군 단위 연간 생활용수 사용량 자료와 인구, 경제 지표 등을 입력 변수로 활용하여 생활용수 사용량의 원단위를 예측하였다.

자료 기간의 한계를 보완하기 위해 교차검증 기법 중 하나인 LOOCV(Leave-One-Out Cross Validation)를 적용했으며, 베이지안 최적화를 통해 윈도우 크기, 은닉층 노드 수, 학습률 등 주요 매개변수를 자동으로 탐색하였다. 이를 통해 지역별 특성이 반영된 맞춤형 예측 모델을 구축하였다.

3.3 생활용수 수요 시나리오 산정

생활용수 수요량 시나리오는 미래의 불확실한 여건을 고려하여, 서로 다른 가정을 바탕으로 설정된 복수의 수요 경로를 의미한다. 단일한 수요 전망값이 특정 미래를 전제로 한 결과라면, 수요량 시나리오는 인구 변화, 사회·경제 여건, 정책 환경, 생활양식 변화 등 다양한 조건이 어떻게 전개될 수 있는지를 반영하여, 가능한 여러 미래를 가정하고 그에 따른 수요 변화를 제시하는 데 목적이 있다. 이러한 시나리오 기반 접근은 물수급 분석, 가뭄 취약도 평가, 수자원 운영 전략 수립 등 불확실성을 고려한 의사결정 과정에서 중요한 기초 자료로 활용된다.

미래 사회 및 경제 변화의 불확실성을 반영하기 위해 SSP1, SSP2, SSP5 시나리오를 활용하였다. 각 시나리오는 인구 규모, 경제 성장, 산업 구조 변화에 대한 서로 다른 가정을 포함하고 있으며, 장래 수요 변화의 다양한 가능성을 포괄적으로

고려할 수 있다. 이를 통해 단일 전망치가 아닌 앙상블 기반의 수요 전망이 가능해진다.

LSTM 기반 예측을 통해 지역별 생활용수 사용량 원단위를 연단위로 산정하고, 이를 SSP1, SSP2, SSP5에 따른 인구 전망 자료와 결합하여 각 시나리오별 생활용수 수요량을 산정하였다. 이 과정에서 지역 및 연도별로 SSP 시나리오별 수요량이 동시에 산정되며, 이 세 가지 수요 경로는 사회·경제 여건 변화에 따른 수요 변동의 범위를 반영하는 자료로 활용된다.

최종적으로 본 연구에서는 SSP1, SSP2, SSP5로부터 산정된 세 가지 수요량 결과를 비교하여, 연도별로 가장 큰 값을 고수요 시나리오, 중간값을 기준수요 시나리오, 가장 작은 값을 저수요 시나리오로 정의하였다. 이러한 방식은 특정 SSP 시나리오 하나에 의존하지 않고, 복수 시나리오의 결과를 종합하여 수요 불확실성 범위를 보다 직관적으로 제시할 수 있다. 또한 연단위 시계열 형태로 수요 시나리오를 구성함으로써, 물수급 분석, 가뭄 위험 평가, 단계별 대응 전략 수립 등 다양한 실무 분석에 직접 활용 가능한 자료 구조를 확보하였다.

04 생활용수 수요량 시나리오 결과

4.1 시군별 LSTM 모델 구축 결과

시군별 LSTM 모델을 구축했으며, 산정된 최적의 매개변수와 모델 성능 평가 결과는 표 1과 같다.

표 1. 시군별 LSTM 모델의 최적 매개변수와 모델 성능 평가 결과

시군	윈도우 크기	은닉층 노드 수	최대 학습 에포크 수	미니 배치 크기	초기 학습률	경사 임계값	보정 MAE	검증 MASE	검증 MAE	검증 MASE
서울	10	19	102	27	0.001	4.366	0.024	0.311	0.069	0.949
인천	12	25	54	24	0.002	1.631	0.026	0.34	0.028	0.366
광주	6	19	58	10	0.001	1.891	0.132	0.525	0.183	0.751
대전	10	90	65	28	0.002	4.06	0.053	0.227	0.158	0.834
세종	11	60	142	17	0	4.386	0.027	0.208	0.048	0.365

전반적으로 모든 지역에서 검증 MASE 값이 1보다 작게 산정되었으며, 제안된 LSTM 모델이 단순 시계열 모델보다 예측 성능이 우수하게 나타났다. 이는 해당 지역의 생활용수 수요량 특성이 비교적 안정적으로 반영된 결과로 해석된다. 반면 광주와 대전은 비교적 높은 변동성을 보였으나, 여전히 MASE가 1 이하로 유지되어 LSTM 모델의 예측 타당성을 확보하였다.

4.2 생활용수 수요 시나리오 결과

본 연구에서 산정한 생활용수 수요량 시나리오 결과는 지역별로 상이한 변화 양상을 보였으며, 이러한 차이는 인구 구조 변화와 도시 성장 단계에 따라 뚜렷하게 구분되었다. 대표적인 대도시형 지역과 농촌 지역의 특성을 각각 반영하는 사례로 인천광역시와 옥천군을 선정하여 결과를 제시하였다.

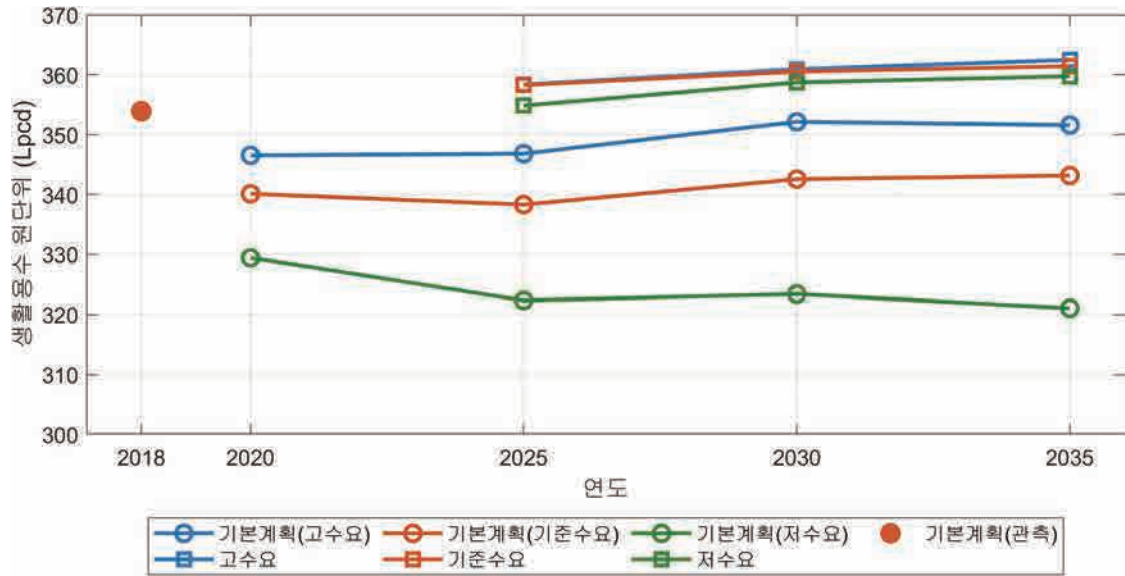


그림 3. 인천광역시의 생활용수 원단위 비교 결과

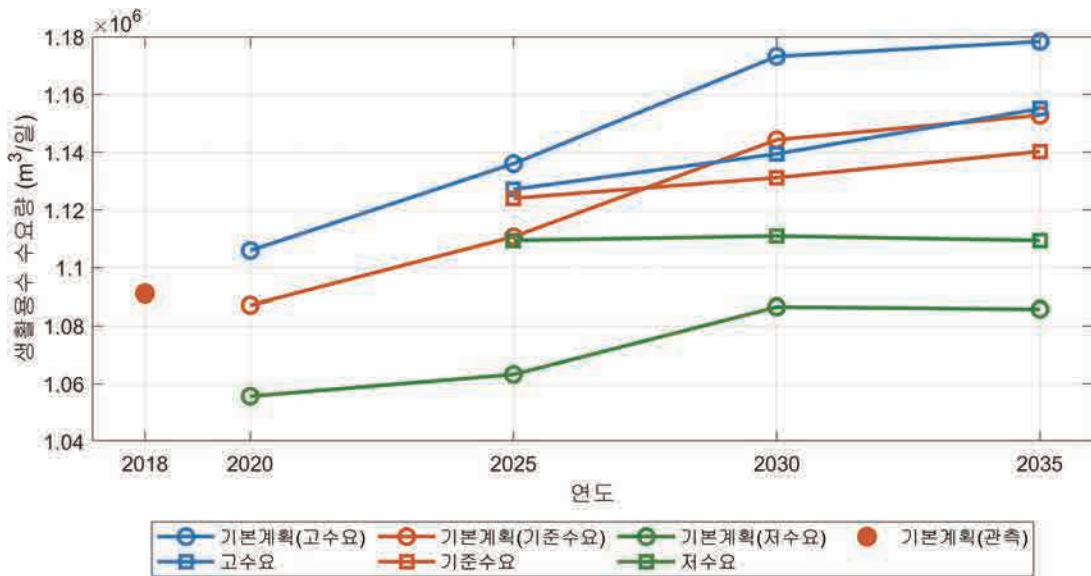


그림 4. 인천광역시의 생활용수 수요량 비교 결과

생활용수 원단위의 변화를 살펴보면, 국가물관리기본계획의 기준수요는 2020년 이후 완만한 증가 추세를 보이지만, 전반적으로 340 Lpcd 내외의 비교적 안정적인 수준을 유지하는 것으로 나타난다. 반면 본 연구에서 산정한 원단위는 기준수요 시나리오에서도 2025년 이후 358~361 Lpcd 수준으로 국가 계획 대비 다소 높은 값을 보인다. 이는 인구 감소 효과에도 불구하고 가구 규모 축소, 1인 가구 비중 증가, 생활 편의성 증대 등 사회·생활 양식 변화가 1인당 물 사용량에 지속적으로 영향을 미친 결과로 해석된다.

특히 2018년 관측값은 단일점으로 표시하여 과거 실측 자료와 전망 결과를 명확히 구분하였다. 이는 과거 관측 구간과 중·장기 전망 구간이 동일한 추세선상에 있지 않다는 것을 시각적으로 보여주는 것이며, 향후 원단위 증가는 과거 추세의 단순 연장이 아닌 사회 구조 변화에 기반한 전망 결과임을 알 수 있다.

연간 생활용수 수요량 측면에서도 유사한 경향이 확인되었다. 국가물관리기본계획의 기준수요는 2020년 약 1.09×10^6 m³/일에서 2035년 약 1.14×10^6 m³/일 수준으로 점진적인 증가를 보이는 반면, 본 연구의 기준수요는 전 기간에 걸쳐 국가 계획 대비 높은 수요 수준을 나타낸다. 다만 인천광역시는 장기적으로 인구 감소가 예상되는 지역으로, 원단위 증가에도 불구하고 수요 증가 폭은 제한적인 것으로 분석되었다.

생활용수 원단위의 변화를 살펴보면, 국가물관리기본계획의 고수요 시나리오에서는 2035년 기준 약 440 Lpcd 수준까지 급격히 증가하는 것으로

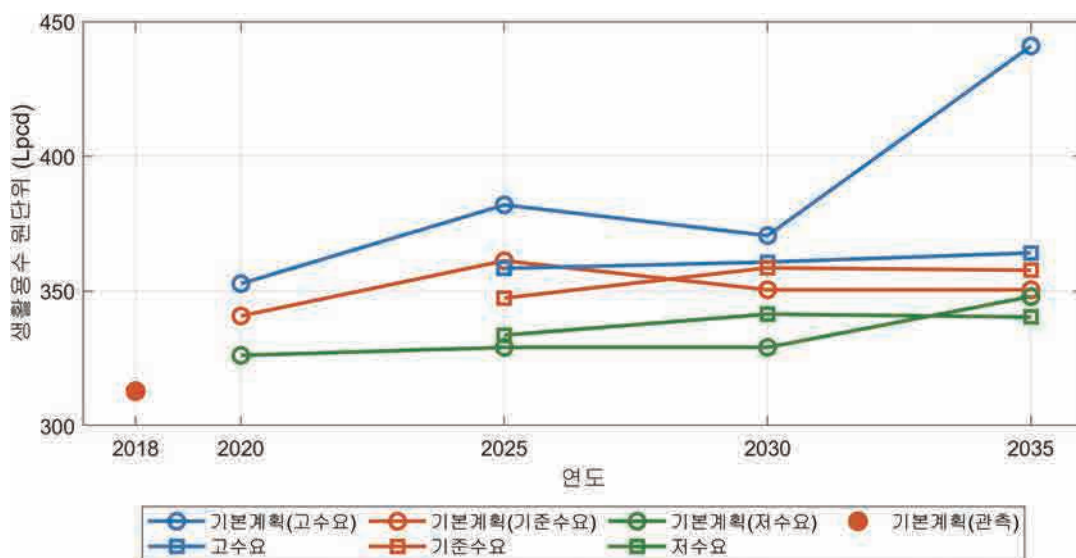


그림 5. 옥천군의 생활용수 원단위 비교 결과

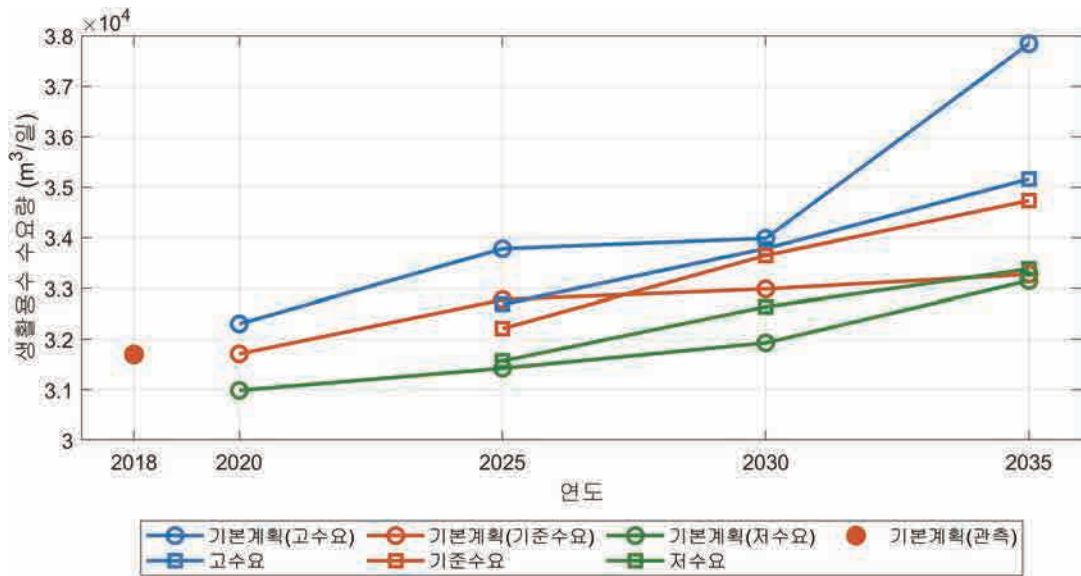


그림 6. 옥천군의 생활용수 수요량 비교 결과

나타난다. 반면 기준수요 및 저수요 시나리오는 상대적으로 완만한 증가 또는 안정적인 추세를 보인다. 이에 비해 본 연구에서 산정한 원단위는 모든 시나리오에서 350~365 Lpcd 범위 내에서 점진적으로 증가하는 경향을 보이며, 국가 계획의 고수요 시나리오와 비교할 때 변동 폭이 상대적으로 작게 나타난다.

특히 옥천군은 농촌 지역의 특성을 지닌 군 단위 지역으로, 인구 감소와 고령화가 동시에 진행되고 있는 지역이다. 이러한 특성으로 인해 생활용수 사용 행태의 급격한 변화보다는, 가구 구조 변화와 생활 편의성 개선에 따른 완만한 원단위 증가가 주요 특징으로 분석된다. 본 연구 결과는 이러한 지역적 특성이 원단위 전망에 반영된 결과로 해석할 수 있다.

연간 생활용수 수요량 측면에서도 유사한 경향이 확인된다. 국가물관리기본계획의 고수요 시나리오는 2030년 이후 수요가 급격히 증가하여 2035년에는 약 3.8×10^4 m³/일 수준에 도달하는 것으로 나타난다. 반면 본 연구의 수요 전망은 기준수요 및 저수요 시나리오에서 보다 완만한 증가 추세를 보이며, 전체적으로 국가 계획 대비 안정적인 수요 증가 경로를 제시한다.

이러한 결과는 옥천군과 같은 군 단위 지역에서 장기 물 관리 전략 수립 시, 대도시와 동일한 수요 증가 가정을 적용하는 것이 적절하지 않을 수 있음을 시사한다. 특히 국가 계획의 고수요 시나리오와 같이 급격한 수요 증가를 전제로 한 공급 확대 전략보다는, 실제 지역 여건을 반영한 단계적·유연한 수요 관리 전략이 보다 현실적인 대안이 될 수 있다.

05

기대효과 및
향후 과제

본 기사에서 소개한 기계학습 및 기후변화 시나리오 기반 생활용수 수요량 시나리오는 기후·사회·경제 변화가 복합적으로 작용하는 불확실성 환경에서 기존 물 수요량 전망 체계를 보완할 수 있는 실효적인 대안으로 평가된다. 특히 장기 인구 변화와 도시 구조의 이질성이 커지는 현시점에서 지역별 특성을 반영한 용수 수요량 전망 결과를 제공한다는 점에서 다음과 같은 정책적·실무적 활용 가치가 크다.

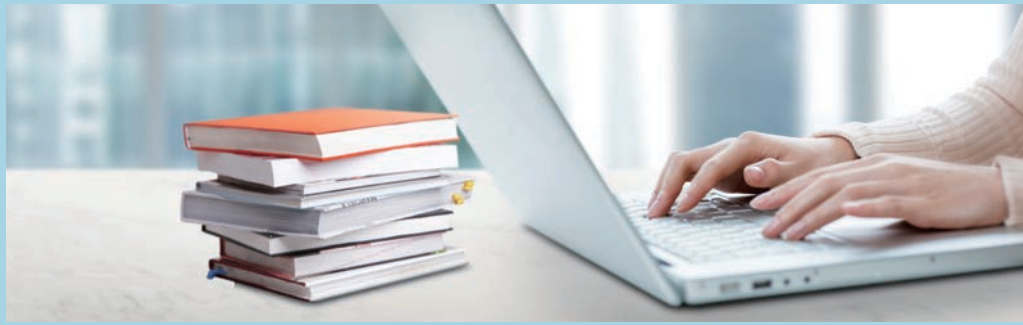
첫째, 가뭄 대응 및 방재 정책의 정밀도 향상이 기대된다. 기후변화를 고려한 생활용수 수요량 시나리오는 지역별 수요량 증가 또는 감소 가능성을 사전에 인지할 수 있게 함으로써, 가뭄 취약도 평가와 단계별 대응 전략 수립에 활용될 수 있다. 이는 비상 급수 계획, 수요 관리 강화 시점 결정 등 가뭄 대응 의사결정을 보다 과학적으로 지원한다.

둘째, 중·장기 수자원 운영 및 계획의 합리성 제고에 기여할 수 있다. 본 수요량 시나리오는 댐 운영, 광역상수도 용수 배분, 수자원 시설 투자 우선순위 설정 등에서 수요 불확실성을 고려한 의사결정을 가능하게 하여, 과잉 투자 또는 공급 부족 위험을 완화하는 데 도움을 준다.

셋째, 지역 맞춤형 물 관리 정책 수립의 기초 자료로 활용 가능하다. 인구 감소형 도시와 성장형 도시의 수요 변화 특성이 명확히 구분됨에 따라, 획일적인 물 관리 정책이 아닌 지역 특성에 기반한 차별화된 전략 수립이 가능하다. 이는 지속가능한 물 이용과 운영 효율성 제고로 이어질 수 있다.

06 맺음말

기후변화와 사회·경제 구조 변화로 인해 물 관리 환경의 불확실성이 확대되는 상황에서, 생활용수 수요량 시나리오는 단순한 통계적 예측을 넘어 정책과 방재를 연결하는 핵심 도구로 자리 잡고 있다. 본 연구진은 기존 추정식 기반 생활용수 수요량 산정 방식의 한계를 인식하고, 기계학습과 시나리오 기반 접근을 결합한 새로운 수요량 시나리오를 제시하였다. 특히 지역별 실제 생활용수 사용량 특성을 반영한 원단위 예측과 사회 및 경제 시나리오를 고려한 장기 수요량 시나리오는 향후 가뭄 대응과 수자원 계획의 실효성을 높이는 데 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 제시한 생활용수 수요량 시나리오는 장기 가뭄 위험 관리와 지속가능한 수자원 정책 수립을 위한 기초 자료로 활용될 수 있으며, 향후 다양한 수요 부문과 연계된 통합 물 관리 전략으로 확장될 수 있을 것으로 기대된다.



국가가물정보통계집을 활용한 유역별 군집특성 및 가뭄 피해 민감도 평가기술



이서윤
수원대학교 일반대학원
토목공학과
공학석사
leeseoyun537@naver.com



차호영
고려대학교
건축사회환경공학과
박사과정
ckghdud2@korea.ac.kr



전창현
고려대학교
건축사회환경공학부
부교수
cjun@korea.ac.kr



김태웅
한양대학교(ERICA)
건설환경공학과
교수
twkim72@hanyang.ac.kr



유도근
수원대학교
건설환경에너지공학부
부교수
dgyoo411@suwon.ac.kr

01 서론

최근 기후변화로 인해 가뭄의 발생 빈도와 강도가 증가함에 따라 가뭄 피해를 사전에 예측하고 합리적인 대응 전략을 수립하기 위한 과학적 의사결정 지원 기술의 중요성이 강조되고 있다. 이에 기후에너지환경부는 「기후변화 적응 수재해 관리 기술개발사업」 사업을 통해 가뭄 상황에서도 안정적인 물 이용과 효율적인 대응이 가능한 기술 개발을 추진하고 있다.

본 연구는 해당 R&D 사업의 총괄 연구과제인 「다원적 의사결정을 위한 Scenario Neutral(SN) 기반 가뭄 취약도 평가」의 일환으로 수행되었다. 이 중 3세부 연구는 '다원적 측면의 가뭄 영향평가 및 의사결정 판단기준 제시'를 핵심 연구목표로 설정하고 있다. 1단계에서 가뭄 취약성 평가를 위한 유역별 가뭄 민감도 평가 핵심요소 기술을 개발하였고 2단계에는 유역단위 민감도 평가를 전국으로 확대 적용하고 기술을 고도화하는 것을 목표로 하고 있다.

가뭄 대응 의사결정을 지원하기 위해 가뭄 피해도 군집화와 가뭄 피해 민감도 평가

방법론을 개발하였다. 가뭄 피해도 군집화는 국가가뭄정보통계집에 수록된 과거 가뭄 피해 이력과 용수 이용·공급·관리 정보를 활용하여 피해 특성이 유사한 지역을 군집으로 분류하는 방법이다. 이를 통해 지역 간 가뭄 피해 특성과 상대적 취약성을 직관적으로 파악할 수 있다. 또한 분석 범위를 전국단위 또는 특정 유역단위로 구분하여 군집분석을 진행함으로써 광역적 관점과 유역 내부 관점을 동시에 고려할 수 있도록 하였다. 가뭄 피해 민감도 평가는 용수 이용량 변화에 따른 가뭄 피해 반응 정도를 정량화하는 방법으로 동일한 용수 변화 조건에서도 지역별로 상이한 피해 반응이 나타날 수 있음을 고려한다. 본 연구에서는 용수 감량에 따른 피해 등급 변화율을 기준으로 민감도를 4단계로 구분하며 변화율이 큰 지역일수록 용수 감량 시 피해가 급격히 증가하여 용수 공급 조정에서 우선적으로 고려해야 함을 의미한다. 이러한 민감도 정보는 가뭄 발생 시 지역별 용수 공급 조정, 우선순위 설정, 단계별 대응 전략 수립을 위한 과학적 기초 자료로 활용될 수 있다. 본 논문에서는 3세부 연구에서 개발된 방법론을 소개하고 한강 유역을 대상으로 한 적용사례를 통해 실무 활용 가능성을 제시하고자 한다.

02 방법론

본 연구에서 제안하는 방법론은 국가가뭄정보통계집을 기반으로 유역별 가뭄 피해 특성을 군집화하고 이를 활용하여 가뭄 피해 민감도를 평가하는 것으로 가뭄 대응단계에 따라 용수 공급 조정 수준을 합리적으로 결정하기 위한 총 5단계의 절차로 구성된다(그림 1).

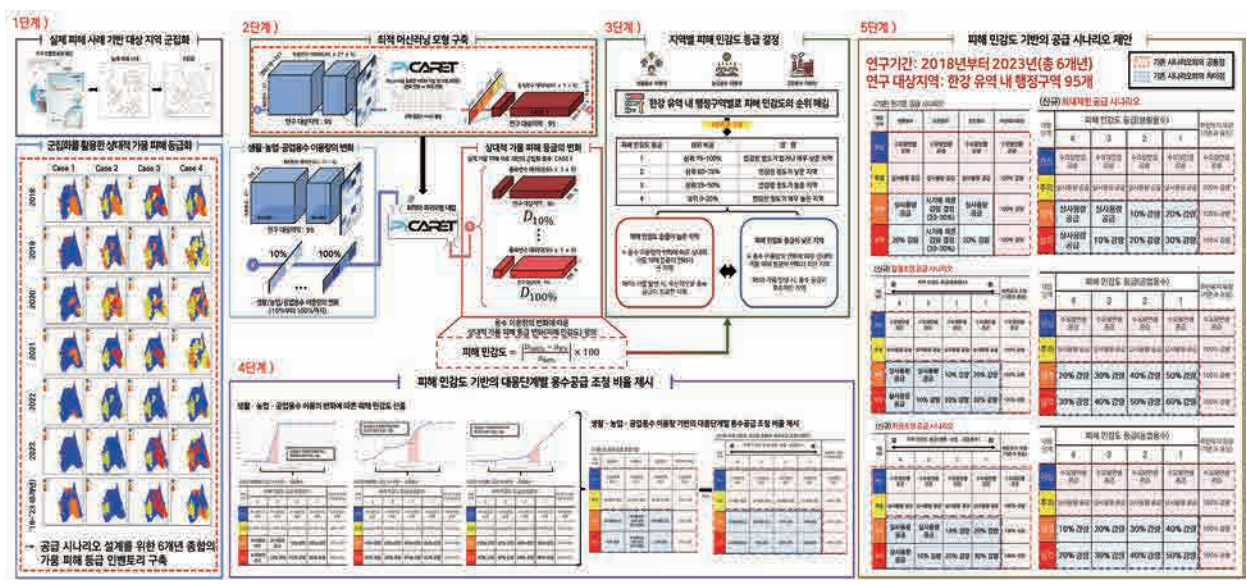


그림 1. 연구 흐름도

2.1 국가가물정보통계집 기반 유역별 군집특성 분석

본 연구에서는 가뭄 피해의 공간적 특성과 지역 간 차이를 체계적으로 파악하기 위해 국가에서 공식적으로 구축·제공하는 국가가물정보통계집(관계부처 합동, 2020-2025)을 핵심 자료로 활용하였다. 국가가물정보통계집은 가뭄 예·경보 발령 이력, 피해 발생 현황, 가뭄 대응 및 관리 정보 등을 종합적으로 포함하고 있어 가뭄 피해 평가에 있어 신뢰성이 확보된 자료로 활용되고 있다. 본 연구에서는 국가가물정보통계집(2018-2023)에 수록된 연도별 가뭄 피해 자료를 구축하여 분석에 활용하였다.

가뭄 피해도 군집화 방법론은 문기훈 외(2022)에서 제시된 방법론을 기반으로 수행하였다. 군집화를 위해 선정된 인자는 가뭄 피해 발생 여부 및 규모를 직접적으로 나타내는 피해 인자, 지역별 생활·공업·농업용수 이용 구조를 반영하는 이용 인자, 가뭄 발생 시 비상 급수 및 용수지원 여부를 나타내는 공급 인자, 가뭄 예·경보 발령 이력과 같은 관리 인자로 구성된다. 이러한 인자들은 국가가물정보통계집을 비롯하여 상수도통계, KOSIS 국가통계포털, 국가수자원관리종합정보시스템 등 국가 차원의 공신력 있는 통계 자료를 기반으로 구축되었다.

가뭄 피해 특성을 다각도로 반영하기 위해 활용 인자 조합에 따른 네 가지 가뭄 피해도 군집 시나리오(CASE1-CASE4)를 설정하였다(표1). CASE1은 피해·공급·관리 인자를 중심으로 종합적인 가뭄 피해 특성을 반영한 시나리오로 전국 지자체의 전반적인 가뭄 피해 수준을 분류하기 위한 기준 사례로 활용된다. CASE2는 CASE1의 인자 구성에 지역별 용수 이용 특성을 추가하여 가뭄 피해와 용수 이용 구조를 함께 고려해 보다 정밀한 피해 분류를 목적으로 한다. CASE3과 CASE4는 각각 생활·공업용수 및 농업용수 부족에 따른 가뭄 피해에 초점을 둔 시나리오로 용수 부문별 가뭄 피해 특성을 구분하여 분석하기 위해 설정되었다.

군집분석은 병합형 계층적 군집분석 방법을 적용하여 수행하였으며 가뭄 대응 단계인 관심-주의-경계-심각의 4단계를 고려하여 군집 수를 설정하였다. 한편, 가뭄 피해 특성은 분석 대상 범위에 따라 상이하게 나타날 수 있다는 점을 고려하여 본 연구에서는 군집분석을 전국단위와 대상유역단위로 구분하여 수행하였다. 전국단위 군집분석은 전국 지자체를 대상으로 상대적인 가뭄 피해 특성을 도출하는 데 목적이 있으며 대상유역단위 군집분석은 특정 유역 내부에서의 세부적인 피해 특성을 정밀하게 파악하기 위한 것이다(그림2).

표 1. 가뭄피해도 군집 시나리오 및 활용인자

구분	시나리오 개요	활용 인자(요약)
Case1 (종합1)	종합적 가뭄 피해 특성을 반영한 군집	· 전체 가뭄 발생 예·경보 이력 · 생활·공업·농업용수 직접 피해 이력 · 가뭄 피해로 인한 용수지원 이력
Case2 (종합2)	종합가뭄 피해인자에 지역별 용수이용 특성을 추가 반영	· CASE1 인자 전체 · 지자체별 생활·공업·농업용수 이용 특성
Case3 (생활)	생활 및 공업용수 부족에 따른 가뭄 피해 특성 중심 군집	· 생·공용수 가뭄 예·경보 이력 · 상수도 공급/미공급 지역 피해 인구 비율 · 생공용수 가뭄 피해 시 용수지원
Case4 (농업)	농업용수 부족에 따른 가뭄 피해 특성 중심 군집	· 농업가뭄 예·경보 이력 · 논·마름 및 밭·시듦 피해 면적 비율 · 농업용수 가뭄 피해 시 용수지원

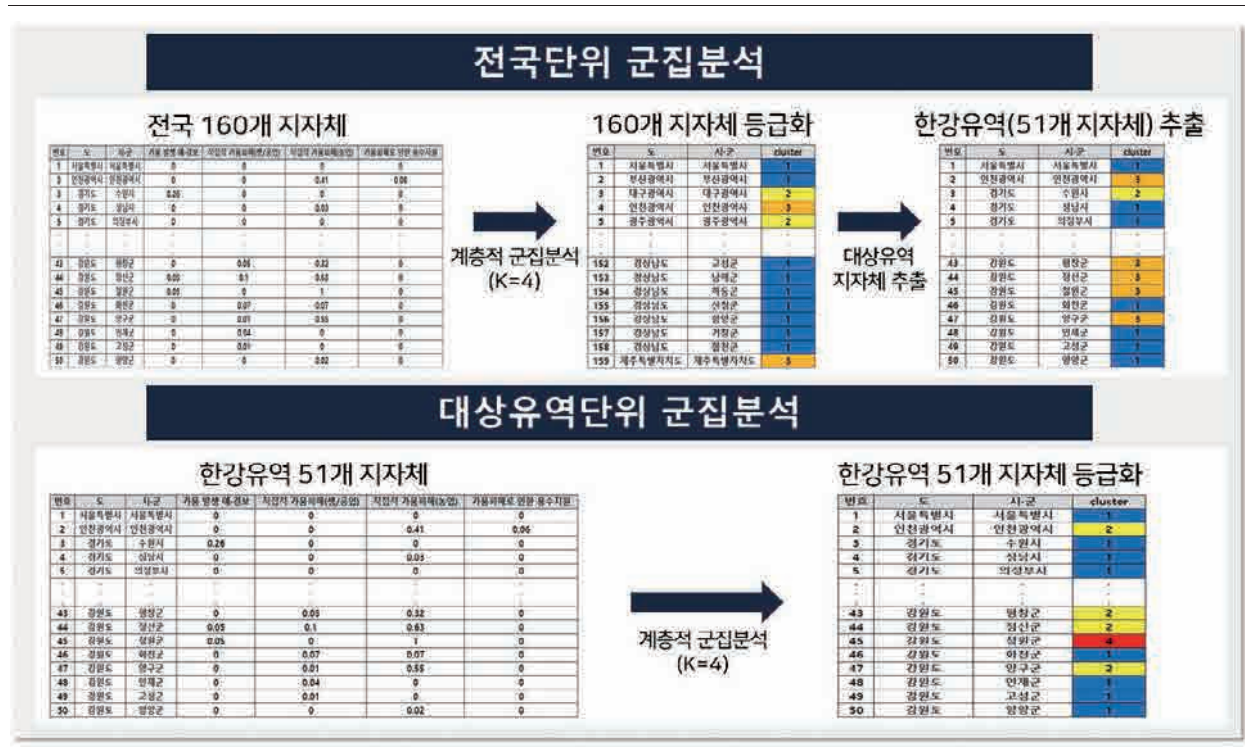


그림 2. 전국단위 군집분석 및 대상구역단위 군집분석 방법론

2.2. 가뭄 피해 민감도 평가 및 공급 시나리오 구성

본 연구에서는 가뭄 피해도 군집분석을 통해 도출된 상대적 가뭄 피해 등급을 기반으로 용수 이용 변화에 따른 가뭄 피해 반응을 정량적으로 평가하기 위한 가뭄 피해 민감도 평가 방법을 적용하였다. 가뭄 피해 민감도 평가는 차호영 외(2025)에서

제시된 방법론을 기반으로 수행하였다. 가뭄 피해 민감도는 용수 이용 조건 변화에 따라 피해 수준이 얼마나 민감하게 변화하는지를 나타내는 지표로 가뭄 대응 시 용수 공급 조정 기준 설정을 위한 핵심 정보로 활용된다 (그림 3).

가뭄 피해 민감도 산출을 위해 독립변수(수문·기상학적 인자, 지역 특성 인자, 용수 이용량)와 종속변수(상대적 가뭄 피해 등급)를 활용한 회귀 기반 예측 모형을 구축하였다. 본 연구에서는 여러 회귀모형을 비교·검토한 후 용수 이용 변화에 따른 피해 등급 예측에 적합한 회귀 기반 모형을 채택하여 민감도 산출에 활용하였다. 민감도 평가는 대상유역 내 행정구역 단위를 기준으로 수행되었으며 생활·공업·농업용수를 구분하여 기준 이용량 대비 단계적인 감량 조건을 적용하였다. 각 용수 이용 조건에 따른 상대적 가뭄 피해 등급의 변화량을 산출하고 이를 기준 조건 대비 변화율로 정량화하여 가뭄 피해 민감도로 정의하였다.

산출된 가뭄 피해 민감도를 용수 공급 조정 기준으로 활용하기 위해 기존의 댐 용수공급 조정 방식에 더해 총 네 가지 용수 공급 시나리오를 설정하였다. 현행 기준을 적용한 현기준 공급 시나리오를 기준으로 동일한 감량 기준을 적용하는 일괄조정 공급 시나리오, 피해 민감도 수준에 따라 지역별로 감량 비율을 차등 적용하는 차등조정 공급 시나리오, 그리고 가뭄 상황이 심각한 경우를 가정한 최대제한 공급 시나리오를 정의하였다. 이러한 시나리오 체계는 가뭄 상황과 관리 목표에 따라 사용자 및 정책 입안자가 적절한 대응 전략을 선택할 수 있다.

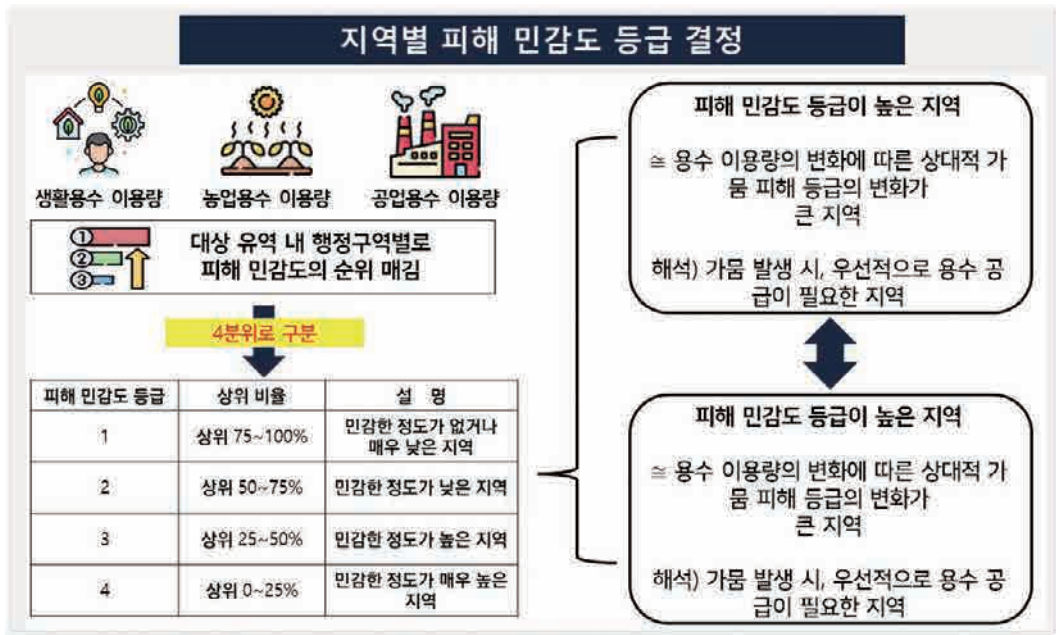


그림 3. 피해 민감도 등급 결정 방법론

03

한강 유역 적용 사례

3.1 한강 유역 가뭄 피해도 군집특성 분석 결과

한강 유역은 우리나라 중부 지역에 위치하며 수도권을 포함하는 인구 밀집 지역으로 생활 및 공업용수 수요가 높고 가뭄 발생 시 사회경제적 파급효과가 큰 유역이다. 본 연구에서는 한강 유역에 속한 51개 지자체를 대상으로 2장에서 제시한 가뭄피해도 군집분석 방법을 적용하여 전국단위 및 대상유역단위 군집분석을 수행하였다.

그림 4은 한강유역에 대한 가뭄 피해도 군집분석 결과의 공간적 분포를 보여준다. 전국단위 군집분석과 한강유역단위 군집분석을 비교하면 동일한 방법론을 적용하였음에도 분석 범위에 따라 지자체별 군집 분류가 달라지는 것을 확인할 수 있다. 일부 지자체는 전국단위 분석에서 중간 수준의 군집으로 분류되었으나 한강유역단위 분석에서는 상대적으로 높은 군집으로 재분류되었으며 반대의 경우도 나타났다. 이는 분석 범위에 따라 상대적 가뭄 피해 특성이 달라지기 때문이다. 따라서 하나의 유역에 국한된 지역적 가뭄이 발생할 경우 한강유역단위 군집분석이 유역적 특징을 명확하게 구분할 수 있으며 두 개 이상의 유역에서 가뭄이 전역적으로 발생할 경우 전국단위 군집분석이 합리적일 것으로 판단된다.

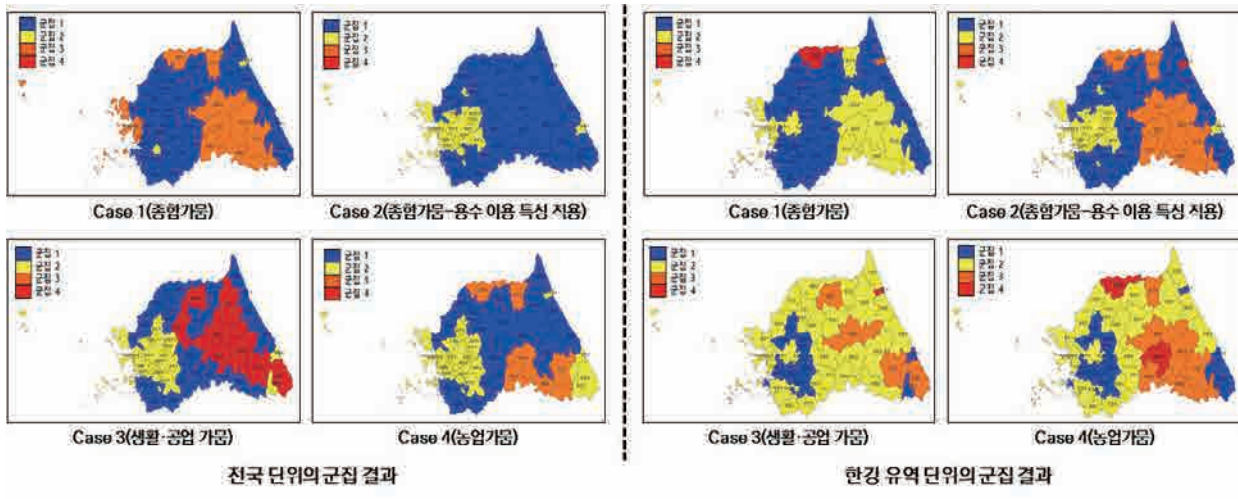


그림 4. 한강유역 군집분석 결과

표 2는 각 CASE별로 2018-2023(6개년)의 군집 형성에 영향을 미친 주요 인자들을 정리한 것이다. 한강 유역의 전국단위 분석에서는 CASE1, 3에서 피해 인자가 1순위로 작용하였으나 CASE2, 4에서는 용수 이용비율이 1순위 인자로 나타나 한강 유역의 용수 이용 구조적 특성이 상대적으로 반영되는 양상을 보였다. 반면 한강유역단위 분석에서는 모든 CASE에서 피해 인자가 1순위로 작용하여 피해 발생

여부 및 규모가 군집 형성의 핵심 요인임을 확인하였다.

전국단위 분석과 한강유역단위 분석의 군집 4 분류 지자체를 비교하면 강원도 철원군, 홍천군 등 일부 지역은 양쪽 분석에서 공통적으로 높은 군집으로 분류되었으나 경기도 수원시, 강원도 속초시 등은 한강유역단위에서만 군집 4로 분류되어 분석 범위에 따른 차이를 보였다. CASE3에서는 양쪽 분석 모두 미보급 인구에 대한 생공피해가 주요 인자로 작용하였으며 CASE4는 한강유역단위에서 논 피해, 전국단위에서는 농업용수 이용비율이 각각 1순위 인자로 나타나 분석 범위에 따른 군집 형성 요인의 차이가 명확히 구분되었다.

표 2. 한강 유역 대상 군집 형성 요인 요약

전국단위 군집분석(Case1 - Case4)			
구분	군집 1순위 인자	군집 2순위 인자	군집 4로 분류된 지자체
Case1 (종합1)	[피해] 농업피해→생공피해	예·경보	강원도 철원군
Case2 (종합2)	[이용] 생공이용비율	농업이용비율	강원도 홍천군, 정선군
Case3 (생활)	[피해] 생공피해(미보급)	생공이용비율	강원도 삼척시, 홍천군, 횡성군, 정선군, 경기도 가평군
Case4 (농업)	[이용] 농업이용비율	농업피해(논, 밭)	강원도 원주시

한강 유역 단위 군집분석(Case1 - Case4)			
구분	군집 1순위 인자	군집 2순위 인자	군집 4로 분류된 지자체
Case1 (종합1)	[피해] 농업피해	생공피해	강원도 정선군, 철원군
Case2 (종합2)	[피해] 생공피해	생공이용비율	강원도 철원군, 홍천군, 속초시, 경기도 수원시
Case3 (생활)	[피해] 생공피해(미보급)	생공이용비율	강원도 홍천군, 속초시, 정선군
Case4 (농업)	[피해] 농업피해(논)	농업이용비율	강원도 횡성군, 철원군, 원주시, 인천광역시, 경기도 시흥시, 평택시, 파주시

3.2 한강 유역 가뭄 피해 민감도 평가 및 용수 공급 조정 시나리오

한강 유역 내 지자체별 가뭄 피해 민감도 평가 결과, 용수 이용 감량에 따른 피해 등급 변화 양상이 지역별로 상이하게 나타났다. 그림 5는 한강 유역을 대상으로 용수 부문별 민감도 평가를 수행하여 기준 대비 용수 이용 비율 변화에 따른 군집 변화

추이를 나타낸 것이다. 한강유역단위의 군집분석 결과를 활용한 결과는 전국단위 군집분석 결과보다 증감하는 추세가 눈에 띄게 나타났다. 증감 추세를 고려하지 않고 급격하게 변화하는 부분을 살펴보면 한강유역내에서 생활용수는 최대 70%까지 감량할 수 있으며 농업용수와 공업용수는 최대 20%까지 감량할 수 있을 것으로 판단된다.

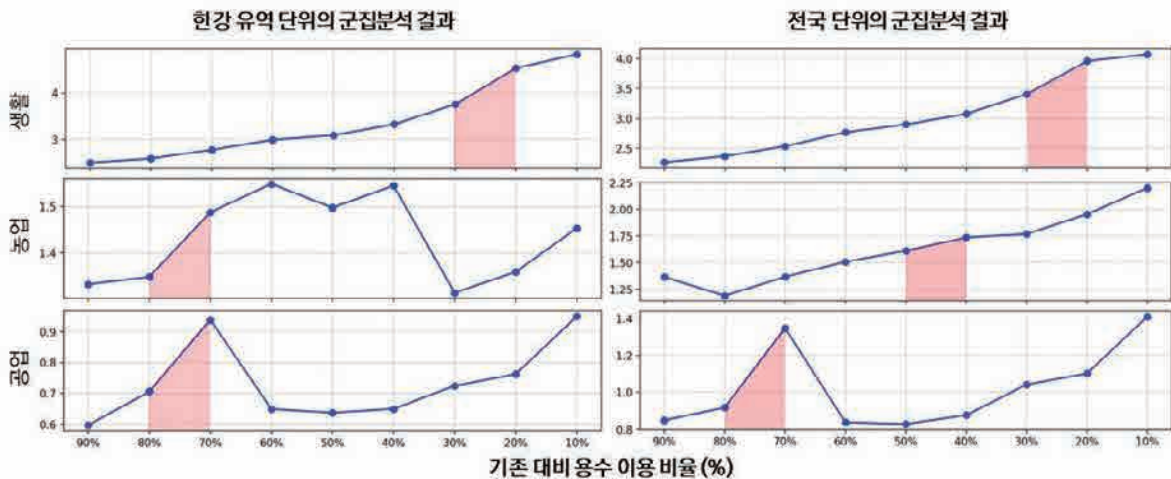


그림 5. 한강 유역 가뭄 피해 민감도 평가 결과

본 연구에서는 이러한 민감도 평가 결과를 활용하여 용수 공급 조정 시나리오를 제안하였다. 그림 6는 (기존)댐 용수공급 조정 시나리오와 (신규) 3종 시나리오(일괄조정, 차등조정, 최대제한)를 적용하였을 때 나타나는 차이점을 보여준다. 일괄조정 시나리오는 모든 용수 부문에 동일한 감량 비율을 적용하며, 차등조정 시나리오는 피해 민감도 등급을 반영하여 용수 부문별로 차등화된 감량 기준을 적용한다. 민감도 등급이 높을수록(등급 4) 감량 비율을 높게 설정하여 용수 공급 우선순위가 후순위로 밀리도록 하였다. 최대제한 시나리오는 극한 가뭄 상황에서 고려될 수 있는 시나리오로 한강 유역 기준 생활용수는 최대 70%까지 감량 가능한 것으로 제시된다.

그림 7은 최대제한 시나리오를 적용하여 전국단위와 한강 유역단위 결과를 비교한 것이다. 생활용수의 경우 한강유역단위에서 피해 민감도 등급 4인 지역(높은 감량 적용 지역)이 전국단위보다 더 많이 나타났으며 이는 유역단위 분석이 유역 내부의 상대적 특성을 직접적으로 반영하기 때문이다. 농업용수는 전국단위에서 최대 60% 감량이 요구되는 반면 한강유역단위에서는 80%까지 확대되었다. 이는 전국단위에서는 서울특별시를 중심으로 한 용수 수급 구조가 반영되나

(기준) 원기준 공급 시나리오 오봉저수지(강원특별자치도 강릉시) 용수공급 조정 시나리오					(신규) 일괄조정 공급 시나리오 강원특별자치도 강릉시 용수공급 조정 시나리오			
대응 단계	생활용수	농업용수	공업용수	하천유지 용량	종합 용수 (피해 민감도 등급: 4)			하천유지 용량 (기준과 동일)
					생활용수	농업용수	공업용수	
관심	수요량만큼 공급	수요량만큼 공급	수요량만큼 공급	수요량만큼 공급	수요량만큼 공급			수요량만큼 공급
주의	실사용량 공급	실사용량 공급	실사용량 공급	100% 감량	실사용량 공급			100% 감량
경계	실사용량 공급	시기에 따른 감량 결정 (20-30%)	실사용량 공급	100% 감량	실사용량 공급			100% 감량
심각	20% 감량	시기에 따른 감량 결정 (20-30%)	20% 감량	100% 감량	실사용량 공급			100% 감량

(신규) 저용소정 공급 시나리오 강원특별자치도 강릉시 용수공급 조정 시나리오					(신규) 최대제한 공급 시나리오 강원특별자치도 강릉시 용수공급 제한 시나리오				
대응 단계	생활용수 (피해 민감도 등급: 4)	농업용수 (피해 민감도 등급: 2)	공업용수 (피해 민감도 등급: 3)	하천유지 용량	대응 단계	생활용수 (피해 민감도 등급: 4)	농업용수 (피해 민감도 등급: 2)	공업용수 (피해 민감도 등급: 3)	하천유지 용량
관심	수요량만큼 공급	수요량만큼 공급	수요량만큼 공급	수요량만큼 공급	관심	수요량만큼 공급	수요량만큼 공급	수요량만큼 공급	수요량만큼 공급
주의	실사용량 공급	실사용량 공급	실사용량 공급	100% 감량	주의	실사용량 공급	실사용량 공급	실사용량 공급	100% 감량
경계	실사용량 공급	10% 감량	실사용량 공급	100% 감량	경계	30% 감량	30% 감량	실사용량 공급	100% 감량
심각	실사용량 공급	20% 감량	10% 감량	100% 감량	심각	40% 감량	40% 감량	실사용량 공급	100% 감량

그림 6. 가뭄 피해 민감도 기반 용수 공급 조정 시나리오

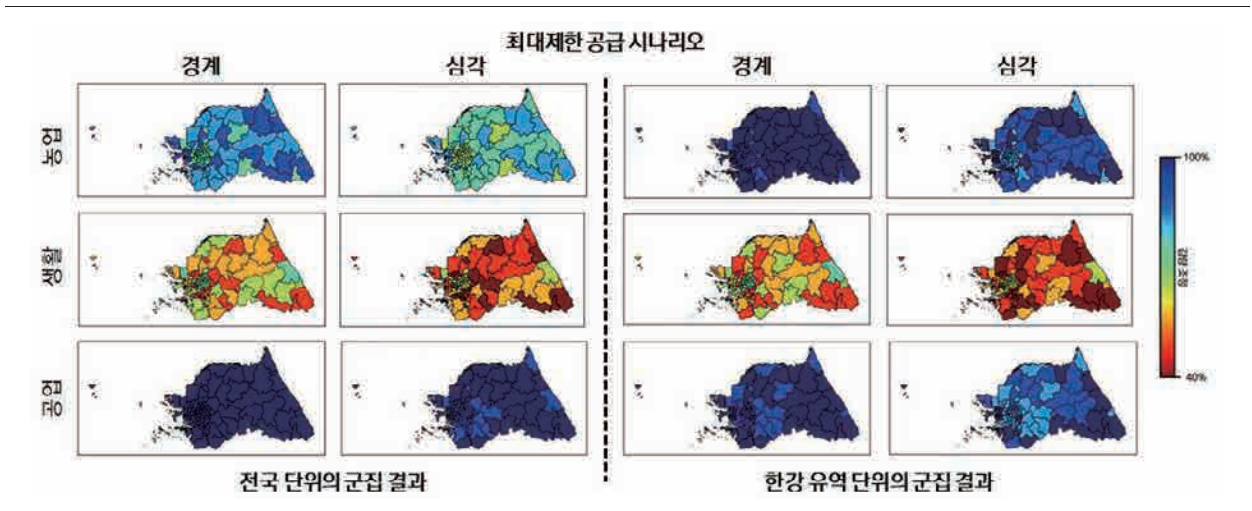


그림 7. 최대제한 공급 시나리오의 전국단위 및 한강유역단위 비교

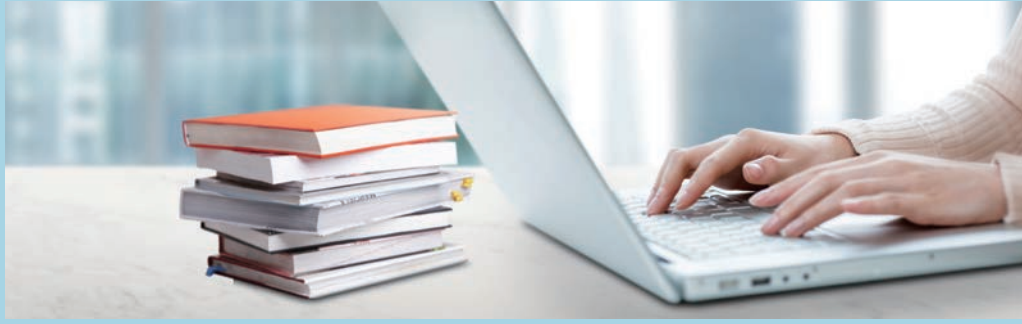
유역단위에서는 지역별 용수 수요 구조와 가뭄 민감도 특성이 보다 직접적으로 반영되기 때문이다. 이러한 차이는 용수 공급 정책 수립 시 분석 범위에 따라 감량 우선순위와 전략이 달라질 수 있음을 의미하며 유역 및 지자체 단위의 수급 구조를 반영한 다층적 분석의 필요성을 시사한다.

감사의 글

본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 기후변화 적응 수재해 관리 기술개발사업(R&D)의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2022-KE002032).

참고문헌

- 관계부처합동 (2020). 2018년 국가가뭄정보통계집
관계부처합동 (2021). 2019년 국가가뭄정보통계집
관계부처합동 (2022). 2020년 국가가뭄정보통계집
관계부처합동 (2023). 2021년 국가가뭄정보통계집
관계부처합동 (2024). 2022년 국가가뭄정보통계집
관계부처합동 (2025). 2023년 국가가뭄정보통계집
문기훈, 정유진, 전창현, 주진걸, 유도근 (2022). 국가가뭄정보통계집 정보를 활용한 전국 지자체 별 가뭄 피해도 군집분석. 한국방재학회논문집, 제22권, 제6호, pp. 293-300.
차호영, 전창현, 유도근, 이서윤, 이승연, 김태웅, 백종진 (2025). 용수 공급의 지역별 우선순위 선정을 위한 평가 방법론 개발: 용수 대비 피해 민감도를 중심으로. 한국수자원학회논문집, 제58권, 제1호, pp. 37-51.



효율적 가뭄 대응을 위한 시나리오 중립 기반 다원적 의사결정 시뮬레이터



박동혁
 ㈜라온티앤씨
 기업부설연구소 연구소장
 parkdh@raontnc.com



권정호
 ㈜라온티앤씨
 기업부설연구소 연구원
 jung3409@raontnc.com



지희원
 서울시립대학교
 국제도시개발학과 박사과정
 heewon.jee@gmail.com



서승범
 서울시립대학교
 국제도시과학대학원 부교수
 sbseo7@uos.ac.kr

01 가뭄 대응의 변화

기후변화로 인한 강수 패턴의 불확실성 증가는 가뭄 발생의 빈도와 지속기간을 동시에 증대시키고 있다. 국내에서도 2000년대 이후 가뭄의 발생 주기가 짧아지고 반복적인 물 부족 피해가 누적되는 경향이 나타나고 있으며, 이는 단순한 수문학적 변동을 넘어 사회·경제적 위협으로 확산되고 있다. 특히 생활·농업·공업용수 전반에서 물 수요는 지속적으로 증가하는 반면, 신규 수자원 확보는 환경적·사회적 제약으로 인해 점차 어려워지고 있다.

그동안의 중장기 물 수급 계획과 가뭄 대응 전략은 과거 기후 조건이 반복된다는 가정 아래 특정 시나리오를 설정하고 대응 방안을 마련하는 방식에 의존해 왔다. 그러나 기후변화 시나리오를 반영한 분석 결과에 따르면, 이러한 접근은 미래 물 부족 규모를 과소평가할 가능성이 크며, 기존 국가 물관리 계획 대비 물 부족 위험이 크게 증가하는 것으로 나타나고 있다. 이는 특정 미래를 가정한 계획 수립 방식이 불확실성이 큰 기후변화 환경에 충분히 대응하지 못함을 보여준다.

한편 가뭄 대응은 단순히 물을 더 확보하는 문제가 아니라, 제한된 수자원을 어떻게 나누고 운영할 것인가에 대한 의사결정 문제로 성격이 변화하고 있다. 수원 간 공급 여건의 차이, 용수 부문별 우선순위, 지역 간 형평성 문제는 가뭄 대응 전략을 수립하는 과정에서 핵심적인 고려 요소로 작용한다. 이러한

상황에서는 단일 기준에 따른 최적 해법보다, 다양한 조건과 이해관계를 함께 고려할 수 있는 의사결정 체계가 필요하다.

이 글은 이러한 문제의식에서 출발해, 시나리오 중립 접근과 다원적 의사결정 개념을 결합한 가뭄 대응 의사결정 시뮬레이터가 어떤 역할을 할 수 있는지를 살펴본다.

02

시나리오 중립 기반 다원적 가뭄 대응 의사결정의 정의

2.1 시나리오 중립 접근의 의미

기후변화 영향을 고려한 가뭄 분석에서는 오랫동안 특정 미래 시나리오를 가정하는 방식이 사용되어 왔다. 예를 들어 “향후 강수량이 10% 감소할 경우”와 같은 조건을 설정하고, 이에 대응하는 물 관리 방안을 검토하는 방식이다. 그러나 이러한 접근은 선택된 시나리오에 따라 결과가 크게 달라질 수 있으며, 실제로 대비해야 할 위험의 범위를 충분히 보여주지 못한다는 한계를 가진다.

시나리오 중립(Scenario Neutral) 접근은 이러한 한계를 보완하기 위한 개념이다. 이 접근은 미래가 어떻게 될지를 예측하기보다, 발생 가능한 다양한 조건에서 가뭄 대응 체계가 어떻게 반응하는지를 살펴보는 데 초점을 둔다. 즉, 특정 시나리오의 정답을 찾는 것이 아니라, 어떤 조건에서 시스템이 취약해지고 어떤 운영 방식이 상대적으로 안정적인지를 탐색하는 방식이다. 이러한 개념적 차이는 기존 시나리오 기반 접근과 대비되는 구조로 정리할 수 있으며, 그 차이는 표 1에 개략적으로 나타나 있다.

표 1. 시나리오 기반 접근과 시나리오 중립 접근의 개념적 차이

구분	[기준] 시나리오 기반 접근	시나리오 중립 접근
개념	10년 후 강수량이 10% 감소할 것이니 이에 대한 물 부족 대응 방안 마련	10년 후 강수량은 20% 증가할 수도 있고 30% 감소할 수도 있으니 제방 설계기준과 극심한 물부족 대응 방안을 함께 마련해야 함
목적	구체적 시나리오 제시, 예측 기반 대응책 마련	발생 가능한 시나리오 조합 고려 탐색 기반, 강건한(robust) 대응 준비

기존 연구에서 고려하지 않았던 시스템 운영 측면에 시나리오 중립 개념을 도입하였으며, 다양한 공급-수요 관리 조합에 의한 가뭄 대응력 개선 효과 평가 및 최적 대안을 탐색하고자 하였다.

2.2 가뭄 대응에서의 다원적 의사결정

가뭄 대응 과정에는 다양한 이해관계자가 관여한다. 생활용수 이용자, 농업과

산업 부문, 물관리 기관, 지자체와 중앙정부는 각기 다른 목표와 우선순위를 가지고 있으며, 이들 간의 요구는 종종 충돌한다. 이러한 상황에서 가뭄 대응 전략은 단일 기준에 따라 결정되기 어렵다.

다원적 의사결정은 이러한 현실을 반영한 개념으로, 서로 다른 요구와 가치를 함께 고려해 어느 한쪽에 과도하게 불리하지 않은 대안을 도출하는 과정을 의미한다. 가뭄 대응에서는 전체적인 공급 효율뿐 아니라, 공급 개선 효과가 특정 수원이나 용수 부문에 편중되지 않는지도 중요한 판단 기준이 되며, 가뭄 시 수자원 배분 측면에서는 정부, 물관리 기관, 수원(취수장), 수요처(생활/농업/공업용수 이용자) 등이 각자의 이해관계를 조율하며 공동의 결정을 내리는 과정을 의미한다.

의사결정 시뮬레이션에서는 여러 수원(water source, intake station)의 수요를 함께 만족시키는 물 공급 대안을 찾는 것이며, 최적의 의사결정을 위한 두가지 기준(효율성, 형평성)을 고려한다. 가뭄 대응 효율성은 수원들의 용수공급가능일수를 최대화 (전체 영역의 평균 대응력 최대화)하고, 가뭄 대응 형평성은 수원 간 용수공급가능일수의 차이를 최소화 (수원 간 대응력 편차 최소화) 하는 목적을 가진다. 위 두 가지 의사결정 기준을 종합적으로 고려하여 최적의 대안을 제시하며, 예를 들어, 용수공급가능일수를 20% 이상 개선하는 대안 중 형평성이 가장 높은 대안을 선정하는 것이 의사결정 시뮬레이션의 주된 기능이다.

03

다원적 가뭄 대응 의사결정 시뮬레이터

3.1 시뮬레이터는 무엇을 하기 위한 도구인가

이 의사결정 시뮬레이터는 “가뭄이 올 것인가”를 예측하는 도구가 아니다. 대신 가뭄이 발생했을 때, 어떤 대응 전략이 얼마나 오래 버틸 수 있는지, 그리고 그 부담이 특정 지역이나 수원에 편중되지 않는지를 함께 살펴보기 위한 도구다.

기존의 가뭄 분석은 하나의 시나리오를 설정하고 그 결과를 제시하는 데 그치는 경우가 많았다. 그러나 실제 정책 현장에서는 단일한 해답보다, 여러 선택지 사이에서 무엇을 택할 것인가가 더 중요한 문제로 등장한다. 이 시뮬레이터는 바로 그 지점을 겨냥한다. 즉, 다양한 가뭄 조건과 수요·공급 운영 방식을 직접 바꿔보면서, 대응 전략의 성능과 한계를 동시에 비교·검토할 수 있도록 설계된 의사결정 지원 도구다. 시뮬레이터의 전체적인 구성과 흐름은 그림 1에 개략적으로 나타나 있다.

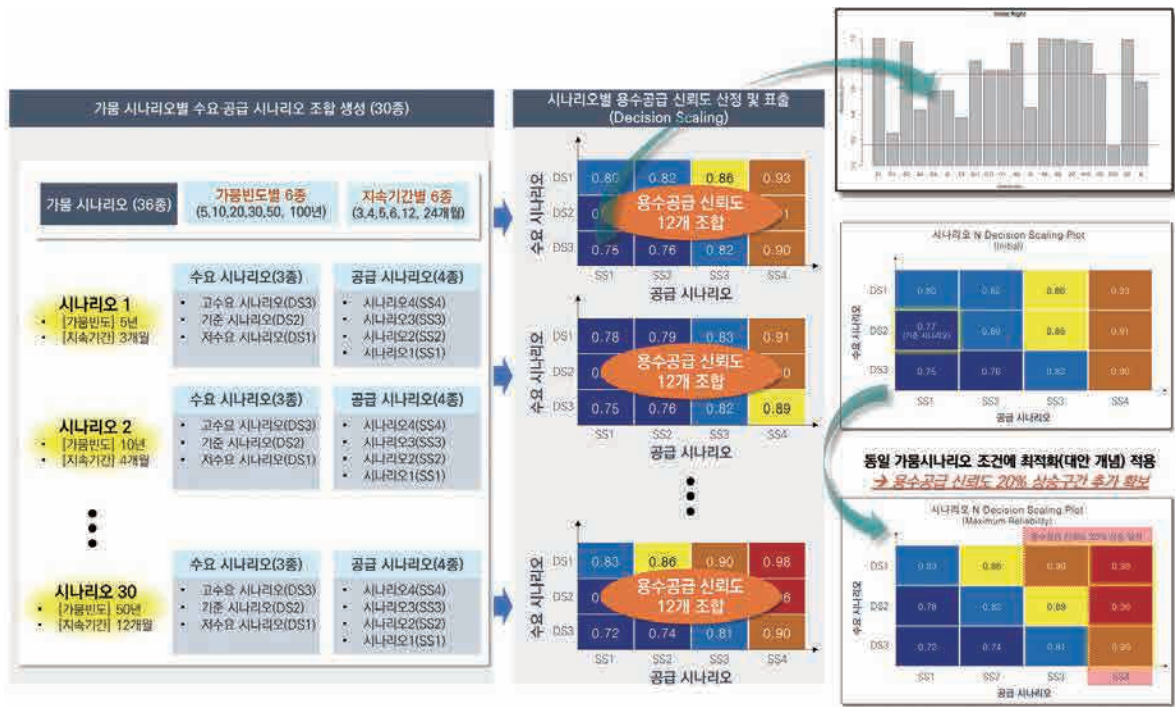


그림 1. 시나리오 중립 기반 최적 솔루션 흐름

3.2 사용자는 무엇을 입력하고, 무엇을 바꿀 수 있는가

시뮬레이터는 정책 담당자나 실무자가 실제 의사결정 과정에서 고려하는 요소들을 그대로 입력값으로 사용한다. 사용자는 먼저 분석 대상 유역을 선택한 뒤, 가뭄의 빈도와 지속기간을 설정한다. 이는 “얼마나 자주”, “얼마나 오래” 가뭄이 이어지는 상황을 가정할 것인지를 의미한다.

이후 수요 수준과 공급 운영 방식을 조합한다. 수요는 기준수요, 고수요, 저수요와 같이 단계적으로 설정할 수 있으며, 공급은 현재 운영 기준을 유지할 것인지, 일괄 또는 차등 조정을 적용할 것인지를 선택할 수 있다. 이러한 입력 구조를 통해 사용자는 단일한 미래가 아니라, 현실적으로 발생 가능한 여러 상황을 나란히 비교할 수 있다. 이러한 입력과 분석 흐름은 그림 2에 제시된 화면을 통해 직관적으로 이해할 수 있다.

3.3 시뮬레이터가 보여주는 핵심 결과: '얼마나 버티는가'

시뮬레이터가 가장 먼저 보여주는 핵심 결과는 평균 용수공급가능일수다. 이는 선택한 가뭄 조건과 운영 전략 하에서, 유역 전체가 평균적으로 얼마 동안 물 공급을 유지할 수 있는지를 나타내는 지표다. 가뭄 대응에서 직관적으로 가장 이해하기 쉬운 성능 지표이기도 하다.

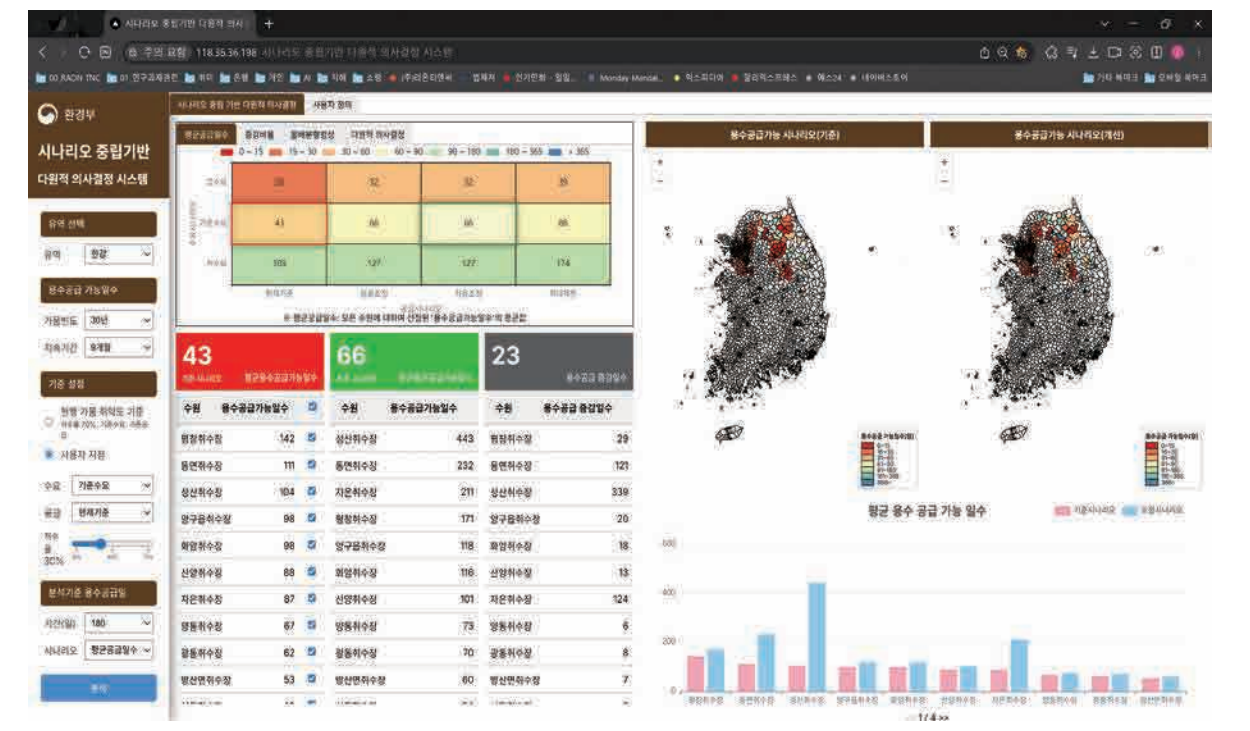


그림 2. 의사결정시뮬레이터 화면 설계

하지만 이 시뮬레이터는 단순히 “며칠을 더 버틸 수 있는가”만을 보여주지 않는다. 기준이 되는 운영 조건과 비교해 공급 가능 기간이 얼마나 늘어나거나 줄어드는지를 증감률로 함께 제시함으로써, 특정 전략의 상대적 효과를 명확히 드러낸다.

이러한 결과는 표와 그래프 형태로 동시에 제공되며, 예시는 그림 3에서 확인할 수 있다.

3.4 '효율성만 좋은 전략'의 한계: 형평성 지표의 의미

가뭄 대응 전략이 전체 평균에서는 효과적으로 보일 수 있지만, 실제로는 특정

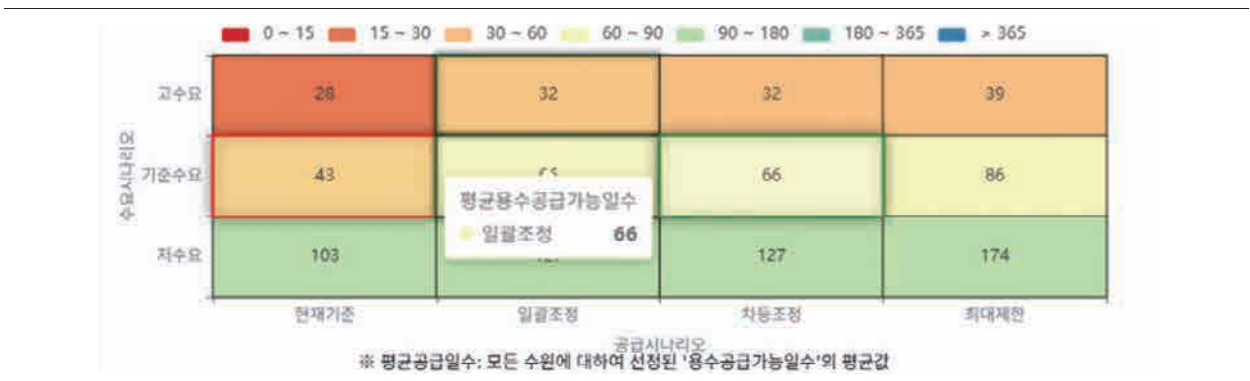


그림 3. 평균 용수공급가능일수 및 기준 대비 증감 결과

수원이나 지역에 부담이 집중되는 경우가 많다. 이 시뮬레이터는 이러한 문제를 드러내기 위해 물 배분 형평성 지표를 함께 제시한다.

형평성은 수원별 용수공급가능일수의 편차를 통해 표현된다. 편차가 크다는 것은 일부 수원은 상대적으로 오래 버틸 수 있지만, 다른 수원은 빠르게 한계에 도달한다는 의미다. 반대로 편차가 작을수록 가뭄 부담이 비교적 고르게 분산된 것으로 해석할 수 있다.

이 기능을 통해 사용자는 “전체적으로는 좋아 보이지만, 특정 지역이 과도하게 희생되는 전략”을 자연스럽게 걸러낼 수 있다. 평균 성과와 형평성의 관계는 그림 4에서 비교할 수 있다.

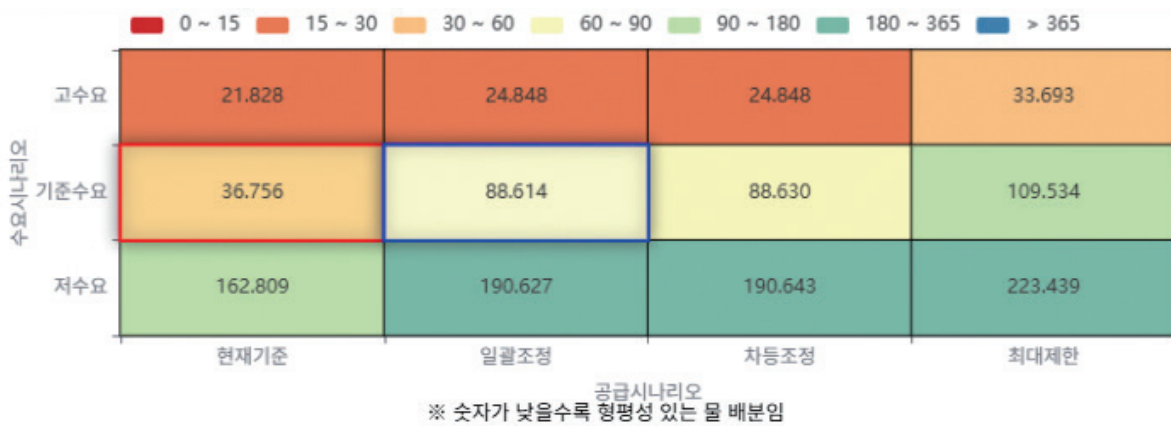


그림 4. 가뭄 대응 효율성과 물 배분 형평성의 비교

3.5 다원적 의사결정: 조정 전과 조정 후를 비교하다

이 시뮬레이터의 가장 중요한 특징은 조정 과정이 포함된다는 점이다. 목표로 설정한 성능 수준에 도달하지 못하는 경우, 수원별 공급량을 조정해 전체 대응력을 개선하는 과정을 시뮬레이션할 수 있다.

이 과정은 실제 정책 현장에서 이루어지는 협의 과정을 모사한 것이다. 공급 여건이 상대적으로 나은 수원의 부담을 일부 조정하고, 취약한 수원을 보완함으로써 전체 유역 차원의 대응력을 끌어올리는 방식이다. 이러한 조정 전·후의 변화는 수치와 그래프로 명확히 비교되며, 그림 5에 그 차이가 나타나 있다.

이 기능을 통해 시뮬레이터는 단순한 분석 도구를 넘어, “어떻게 조정하면 목표에 도달할 수 있는가”를 함께 고민하는 의사결정 지원 도구로 기능한다.

3.6 공간적으로 보는 가뭄 대응: GIS 기반

가뭄 대응의 효과는 수치만으로는 충분히 이해하기 어렵다. 동일한 평균 성능을

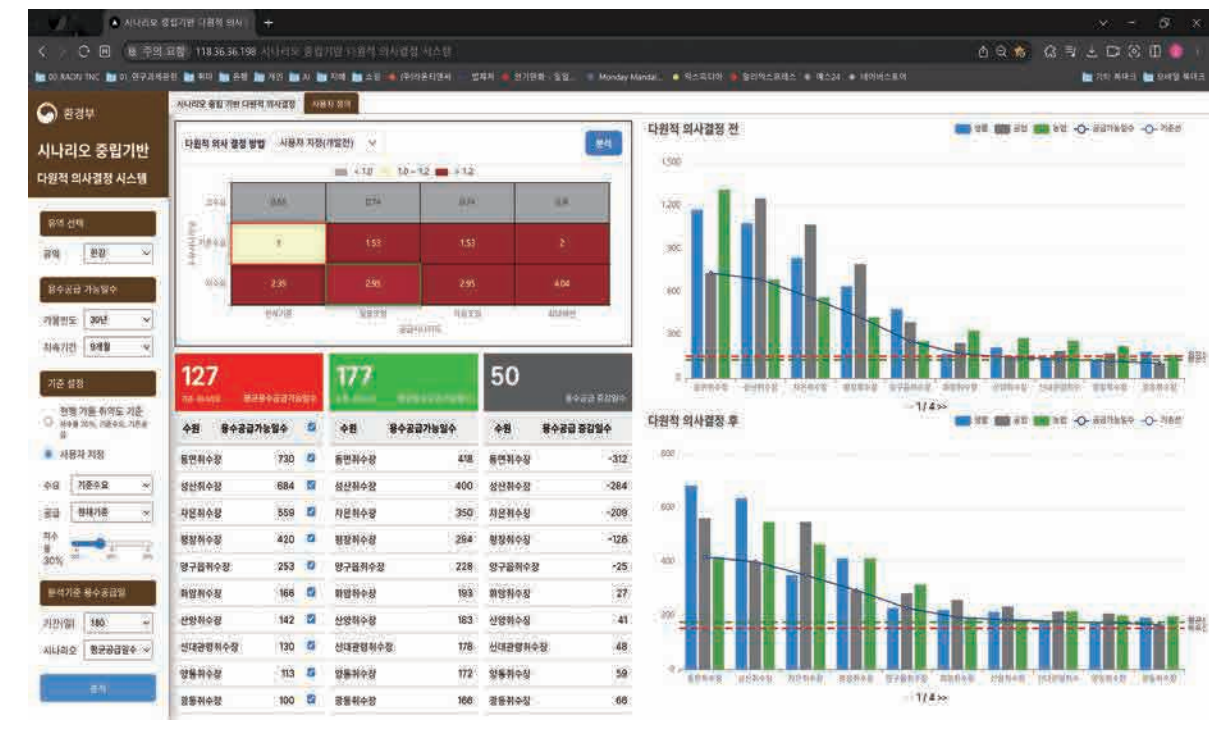


그림 5. 사용자 정의를 통한 용수공급조정(프로토타입)

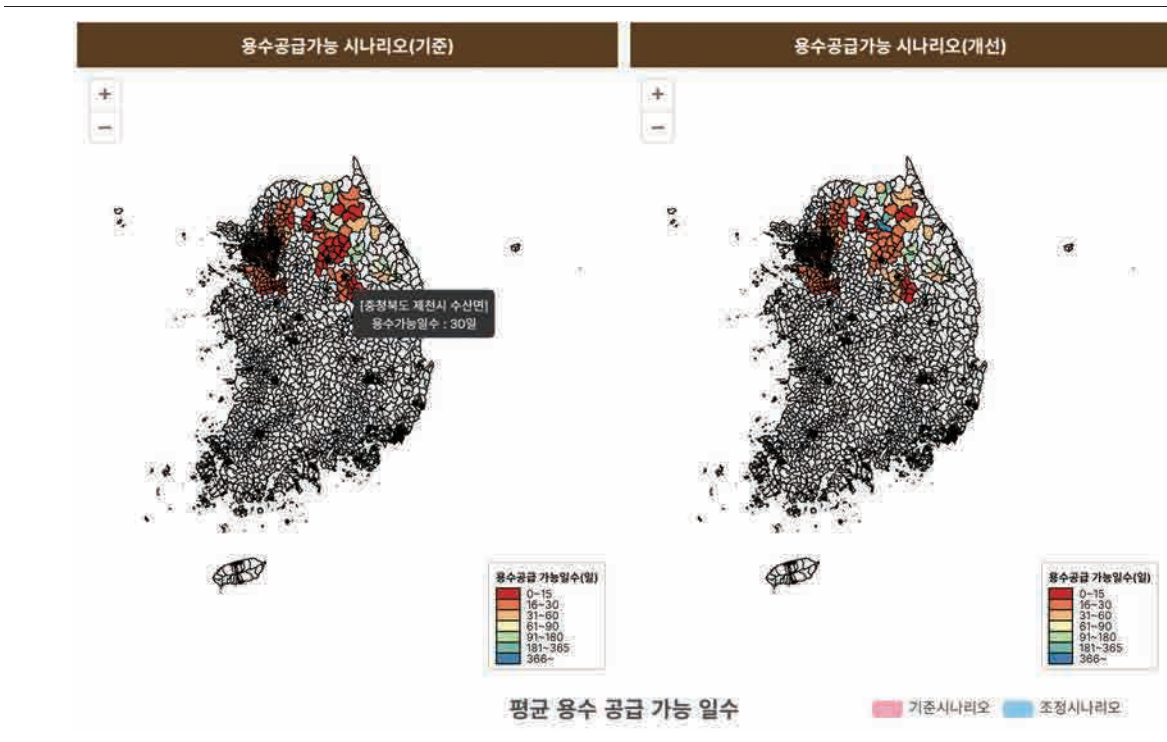


그림 6. 지자체별 용수공급 가능일수 표출

보이더라도, 어느 지역이 개선되고 어느 지역이 악화되는지는 정책적으로 매우 중요한 정보다. 이를 위해 시뮬레이터는 분석 결과를 GIS 기반 공간 정보로 함께 제공한다.

기준 시나리오와 조정된 시나리오를 나란히 비교하면, 가뭄 대응 전략이 지역별로 어떤 변화를 가져오는지 직관적으로 확인할 수 있다. 이러한 공간적 결과는 그림 6에 제시되어 있다.

5.7 의사결정 시뮬레이터가 갖는 의미

이 의사결정 시뮬레이터의 핵심 가치는 정답을 제시하지 않는다는 점에 있다. 대신, 다양한 조건과 전략을 놓고 “무엇이 얼마나 나아지는지”, “그 부담은 어디에 집중되는지”를 투명하게 보여준다. 이는 불확실성이 큰 가뭄 대응 문제에서, 하나의 해답보다 합리적인 선택을 돕는 정보가 더 중요하다는 인식에 기반한 설계다.

결국 이 시뮬레이터는 가뭄 대응을 기술적 계산의 문제가 아니라, 비교와 조정, 합의를 통해 만들어지는 의사결정 과정으로 보여주는 도구라 할 수 있다.

04 맺음말

가뭄은 더 이상 일시적인 자연재해가 아니라, 기후변화와 사회 구조 변화가 결합된 복합적 위협으로 인식되고 있다. 이러한 상황에서는 특정 미래를 가정한 대응 전략보다, 다양한 조건에서 안정적으로 작동할 수 있는 의사결정 체계가 필요하다.

시나리오 중립 접근과 다원적 의사결정 개념을 결합한 의사결정 시뮬레이터는 이러한 요구에 부합하는 하나의 대안이다. 이 도구는 가뭄 대응 전략을 정량적으로 비교하는 데서 나아가, 실제 정책과 운영 과정에서 선택 가능한 대안을 탐색할 수 있는 환경을 제공한다는 점에서 의미가 있다.

앞으로 이러한 접근이 실제 가뭄 사례와 정책 현장에 적용된다면, 불확실성이 큰 미래 환경에서도 보다 유연하고 형평성 있는 가뭄 대응이 가능해질 것으로 기대된다.

감사의 글

본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 기후변화 적응 수재해 관리 기술개발사업(R&D)의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2022-KE002032).