ISSN 1738-9488

Magazine of Korea Water Resources Association

물과 미래
Water for Future

한국수자원학회지
www.kwra.or.kr
2026.3 Vol. 59 No. 2

권두언
미래 지능정보사회의 가뭄 대응전략: 2030s AGI/ASI 시대를 대비하며
김성준(건국대학교 사회환경공학부 교수)

특집
가뭄 빈도해석 기반의 가뭄상황 수문 시나리오 산정 기술 개발
기후·사회·경제 변화 요인을 반영한 생활용수 수요량 시나리오 개발
국가가뭄정보통계집을 활용한 유역별 군집특성 및 가뭄 피해 민감도 평가기술
효율적 가뭄 대응을 위한 시나리오 중립 기반 다원적 의사결정 시뮬레이터

학술/기술 기사
일반 기사
신간소개
여행과 문학산책

조만석_두 강의 만남, 다양성과 조화

사단법인 한국수자원학회
KOREA WATER RESOURCES ASSOCIATION

한국수자원학회지
Magazine of Korea Water Resources Association

물과 미래
Water for Future

2026 03
Vol. 59 No. 2

월간 한국수자원학회지 2026년 3월호(통권 390호) | 비매품 | 발행일 : 2026년 3월 1일 발행처 : 사단법인 한국수자원학회 서울특별시 서초구 효령로 237, 302호 (우편 : 06671)
전화 : (02)561-2732 | Fax : (02)561-2733 E-mail : kwra@kwra.or.kr | 발행인 : 유철상 | 편집 : 화인애드 (02)2271-2811~3 인쇄 : 서경문화 (02)2272-7003

※ 이 학회지는 K-water의 일부 재정지원에 의하여 출판되고 있습니다.

권두언

03 미래 지능정보사회의 가뭄 대응전략: 2030s AGI/ASI 시대를 대비하며
김성준

특집

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 군집 특성 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

학술/기술 기사

42 우리나라의 소규모 양수발전 연구 동향과 에너지 전환에서의 역할
이효상·안국현

46 기후변화에 따른 강우특성 변화와 그에 따른 지역빈도해석 개선 방안
이가영·신주영·김규태

56 도시 물순환 시스템 분야에서의 경쟁 세션 운영 사례
박상진·정현우·정동휘

68 머신러닝 기반의 연안 침수리스크 평가와 그린-그레이 하이브리드 방재 전략
김연중

78 기후극한 시대의 복합재해 대비: 다중 주파수 분석 기반 복합 가뭄-폭염 예측
한정우

일반 기사

90 인공지능과 자연재해 예측
김병식·이영미

98 미래 AGI시대가 가져올 수자원 분야의 변화
박진혁

102 새로운 재해의 패러다임, 가뭄과 홍수가 결합된 복합수재해
나우영

111 2025 난징 중국수리학술대회 참가기
김상욱·손민우·이승엽·권순호

116 조금 뒤늦은 제21차 한·일 생태공학 공동세미나 이야기
김명환

저널 및 신간소개

126 환경수리학 (Environmental Hydraulics)
황진환

여행과 문학 산책

128 수변정담
정지용의 시론
정해옥

131 물에 얽힌 옛이야기
갠지스 강이 다시 흐르게 된 이야기
신현배

2026 수상자

135 일반포상 수상자

138 특별포상

편집후기 주요일지

139 편집후기
140 주요일지
141 회원동정
142 신규회원

143 2025년도 사업실적 및 결산보고
148 2026년 사업계획 및 예산

학회지 투고요령

회원 여러분의 투고를 환영합니다.

비회원도 투고 가능하며 게재된 원고에 대해서는 소정의 원고료를 드립니다.

※ 학회지에 투고하실 때에는 다음과 같은 투고요령을 따라 주시기 바랍니다.

1. 원고의 상단에는 투고자의 성명, 직장 및 직위를 정확히 기재하시기 바랍니다(사진 첨부).

2. 원고는 한글전용을 원칙으로 하되, 부득이 한자 및 외국어 표기가 필요한
   경우에는 ( )속에 표기하여 주시기 바랍니다.

3. 원고는 가능하면 독자의 이해가 쉽도록 간결한 문체와 쉬운 용어를 사용하여 주시기 바랍니다.

3. 그림 및 표의 작성방법, 참고문헌 인용방법 등은 전호를 참고하시고,
   자세한 사항은 논문집 의 투고지침 및 논문작성방법 을 따라 주시기 바랍니다.

4. 원고를 투고하실 때 별지에 성명, 직장 및 직위, 생년월일, 자택주소,
   전화번호 및 은행 계좌 (원고료 송금용)를 명기하여 보내주시기 바랍니다.

학회 임원 명단

| 회　　장 | 유철상

| 부 회 장 | 안재현, 박문형, 김상욱, 정일문, 이명훈, 이용곤, 김광섭, 김상단, 이범희

| 이　　사 | 강두기, 강두선, 강형식, 권현한, 김대하, 김동균, 김동수, 김병현, 김수전, 김연주, 김영도, 김영택, 김일섭, 김태웅, 노성진, 노정건, 류용욱, 문수진, 문종옥, 박기범, 박대룡, 박종표, 박진원, 박창열, 백경록, 서용권, 성장현, 손민우, 손상영, 송창근, 안국현, 이규민, 이기하, 이상은, 이승오, 이충대, 이태삼, 임현식, 정건희, 정영훈, 정은성, 지운, 홍승호

| 감　　사 | 김현준, 이상열

학회지 편집위원회 위원명단

| 위 원 장 | 김동균, 정건희

| 부위원장 | 김성은, 김열우, 김형록, 김형석, 박인환, 서승범, 신재현, 신주영, 오정선, 전창현, 정동휘, 최영환

| 간　　사 | 문수진

卷頭言

Water for future

미래 지능정보사회의 가뭄 대응전략: 2030s AGI/ASI 시대를 대비하며

김성준
건국대학교 사회환경공학부 교수
kimsj@konkuk.ac.kr

가뭄은 늘 조용히 시작된다. 홍수처럼 눈앞에서 범람하지도 않고, 태풍처럼 즉각적인 파괴를 남기지도 않는다. 그러나 가뭄은 사회 전반에 걸쳐 거대하고 오래 지속되는 상처를 남긴다. 홍수가 '단기 과잉 사건'이라면, 가뭄은 '마름의 과정'이자 '부족의 누적'이기 때문이다. 2026년 병오년을 맞이한 지금, 가뭄이 반복되는 '자연현상'이 아닌 '사회적·경제적 시스템의 취약성'이 드러나는 '구조적 재난'으로 성찰해야 할 시점에 서 있다.

가뭄은 새로운 현상이 아니다. 역사와 기후 체계 속에서 반복적으로 재현되어 온 상존적 재해이다. 삼국사기와 조선왕조실록에는 수백 차례의 가뭄 기록이 있으며, 특히 조선 후기에는 가뭄과 흉년, 민란이 연쇄적으로 발생했다. 이는 가뭄이 단순한 기후 현상이 아니라 국가 통치와 사회 안정성에 직결된 재난이었음을 보여준다.

근대 이후에도 상황은 크게 다르지 않았다. 1967~1968년 전국적 농업가뭄과 기근위기(강수량 평년 50%이하), 1994~1995년 역대급 폭염을 동반한 영·호남 생활·공업용수 대란, 2014~2015년 겨울 가뭄 심화로 인한 중부권(충청·강원·수도권) 가뭄, 2022~2023년 227.3일에 달한 역대 최장기 기상가뭄에 의한 광주·전남·경남지역의 장기 농업가뭄까지, 가뭄은 형태만 달라졌을 뿐 지속적으로 반복되어 왔다. 다만 최근 가뭄은 빈도 증가, 지속 기간 연장, 지역 편중 심화라는 새로운 특성을 보이고 있다.

APCC(아시아·태평양경제협력체 기후센터)의 다중 모델 앙상블 예측은 올해 4월부터 엘리뇨 전환가능성을 전망한다. 120년 전인 1906년 병오년의 대가뭄 기록에서는, 한반도 전반에 대가뭄·흉년이 들어 곡물 가격 폭등, 기근 기록 다수가 존재한다. 2026년 2월 현재 다목적댐, 용수댐, 농업용 저수지의 저수율

은 모두 안정적인 상황이지만, 사전 대비는 언제나 필요하다.

우리나라의 물 관리 체계는 여름철 강수 집중을 활용한 댐·저수지 의존형 물 관리 구조를 갖추고 있다. 산업화·도시화 과정에서 이 구조는 중요한 역할을 하였다. 그러나 오늘날의 현실은 생활·공업·농업용수 간 물 경쟁 심화, 수질 문제로 인한 하천유지용수의 증가, 미계측·소유역 가뭄 정보의 공백은 현재의 물 관리 시스템이 회복하지 못하는 상태로 정의되는 경우가 점점 늘고 있다.

이제 가뭄은 단순한 강수 부족의 문제가 아니다. 기후변화로 인한 강수의 시·공간 불균형, 고온 지속에 따른 차단량·증발산량 증가, 토양수분 회복 지연, 지하수 집중이용으로 인한 건천화(stream drying) 가속 등 유역 단위 물순환 왜곡이 복합적으로 작용하고 있다.

그간 우리나라 가뭄 대응 정책은 대체로 공급 확대 중심이었다. 다목적댐 건설, 광역상수도 연결, 용수 전환 운영은 산업화와 도시화 과정에서 중요한 역할을 해왔다. 그러나 기후변화가 뉴노멀이 된 현재, 질문은 명확하다. "더 많은 물을 확보하는 것만으로, 가뭄을 극복할 수 있는가?"

최근 정부 정책은 가뭄 예·경보 고도화, 가뭄 단계별 대응 매뉴얼, 농업용수 스마트 관리, 물 재이용 확대 등으로 진화하고 있다. 하지만 여전히 사후 대응적 성격과 부처·용수 간 분절성이라는 한계를 안고 있다.

가뭄은 닥친 후 극복하는 위기(crisis)가 아니라 상시적으로 관리해야 할 위험(risk)이다. 이에 다음과 같은 전환이 필요하다.

첫째, 유역 단위로 인식하고 운영해야 한다.

행정구역 중심의 가뭄 대응을 넘어, 표준유역 단위의 물순환 기반 가뭄진단과 대응이 필요하다.

둘째, 다원적 가뭄 지수와 디지털 전환은 필수이다.

강수부터 토양, 식생, 수문, 사회·경제 영향까지 여러 차원의 가뭄 신호를 함께 고려한 다중 영향 경로(multi-impact pathway) 가뭄지수와 위성·모델·AI를 결합한 자가진화형 디지털트윈 가뭄 감시 및 의사결정 체계 구축이 핵심이다.

셋째, 농업가뭄은 구조적으로 접근해야 한다.

농업가뭄은 가장 먼저 발생하고 가장 늦게 회복된다. 스마트농업 관개효율 개선, 내한 작물 구조 조정, 지역 맞춤형 물-식량-에너지 배분전략 없이는 반복될 수밖에 없다.

넷째, 기술을 넘어 사회적 수용성과 거버넌스가 핵심이다.

용수의 용도간 전환(water use reallocation/water source switching), 절수 행동 역량(water-saving behavior capacity), 수량-수질-수생태간 우선순위 설정에 대한 사회적 합의와 신뢰 기반 거버넌스가 필수적이다.

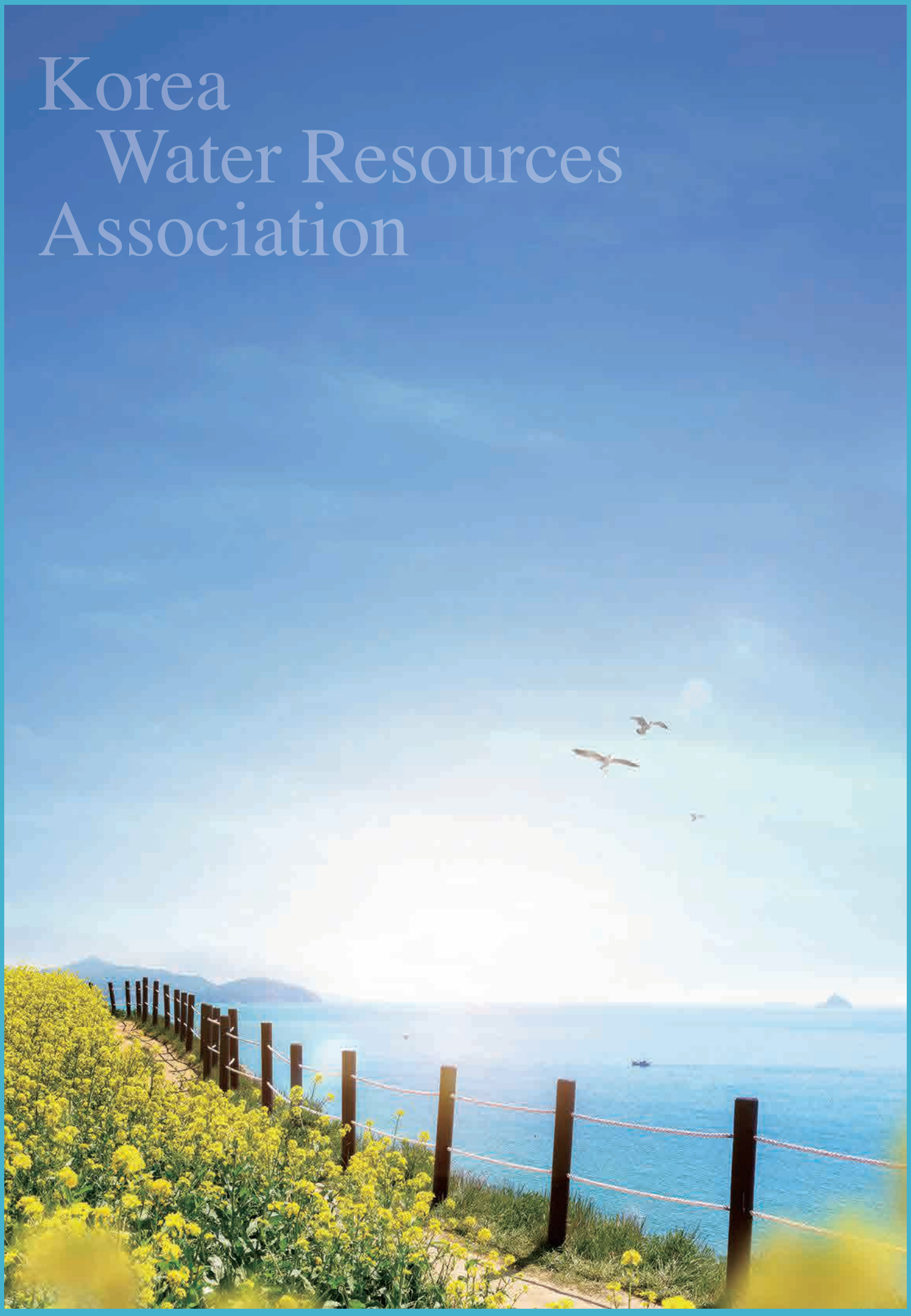
가뭄 연구의 질문도 달라져야 한다. "어느 정도의 가뭄이 닥친 것인가?", "얼마나 부족한가?"에서, "어떤 가뭄이 오고 있는가?", "어디가 언제 회복 불가능한 상태로 진입하는가?", "누가 가장 먼저 피해를 받는가?", "어떤 선택이 미래의 가뭄을 줄이는가?"를 묻는 단계로 나아가야 한다. 학자는 정책의 뒤를 따르는 존재가 아니라, 정책이 아직 보지 못한 위험을 먼저 경고하는 존재여야 한다.

가뭄은 언제나 예고 없이 오는 것처럼 보이지만, 사실은 늘 신호를 보내고 있다. 우리가 그 신호를 읽지 못했을 뿐이다. 이제 가뭄 논의는 재해 대응을 넘어, 기후변화 시대 물 관리 패러다임 전환의 출발점이 되어야 한다.

2030년 전후 도래할 범용인공지능(AGI), 초인공지능(ASI) 시대의 가뭄 대응은 또 한번의 전환을 요구한다. 초지능형 예측과 시스템 자동 최적화를 통해 가뭄의 영향을 사전에 차단하고 회복력(hydrological, agricultural, ecological, system, socio-institutional, drought resilience)을 단기화·극대화하는 체계로 진화해야 한다.

미래의 물관리는 더욱더 자연과의 수싸움(전략적 대응) 그리고 사회와의 기싸움(합의 형성)으로 결정될 것이다. 우리 학회가 그 전환의 중심에서 학문과 정책, 기술과 사회를 잇는 가교가 되어, 가뭄 속에서도 지속 가능한 사회를 가능하게 하는 논의를 이끌어가기를 기대합니다.

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

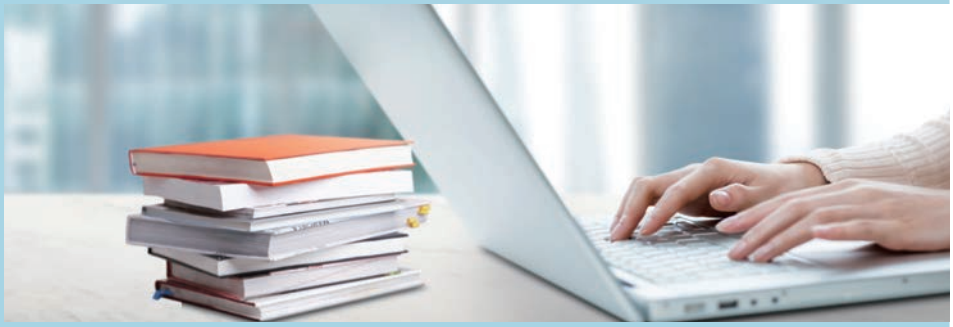
23 국가가뭄정보통계집을 활용한 유역별 군집특성 및 가뭄 피해 민감도 평가기술
이서윤·차호영·전창현·김태웅·유도근

33 효율적 가뭄 대응을 위한 시나리오 중립 기반 다원적 의사결정 시뮬레이터
박동혁·권정호·지희원·서승범

SPECIAL ISSUE

특집

01



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 “다원적 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 물부족량뿐만 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

SPECIAL ISSUE

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.

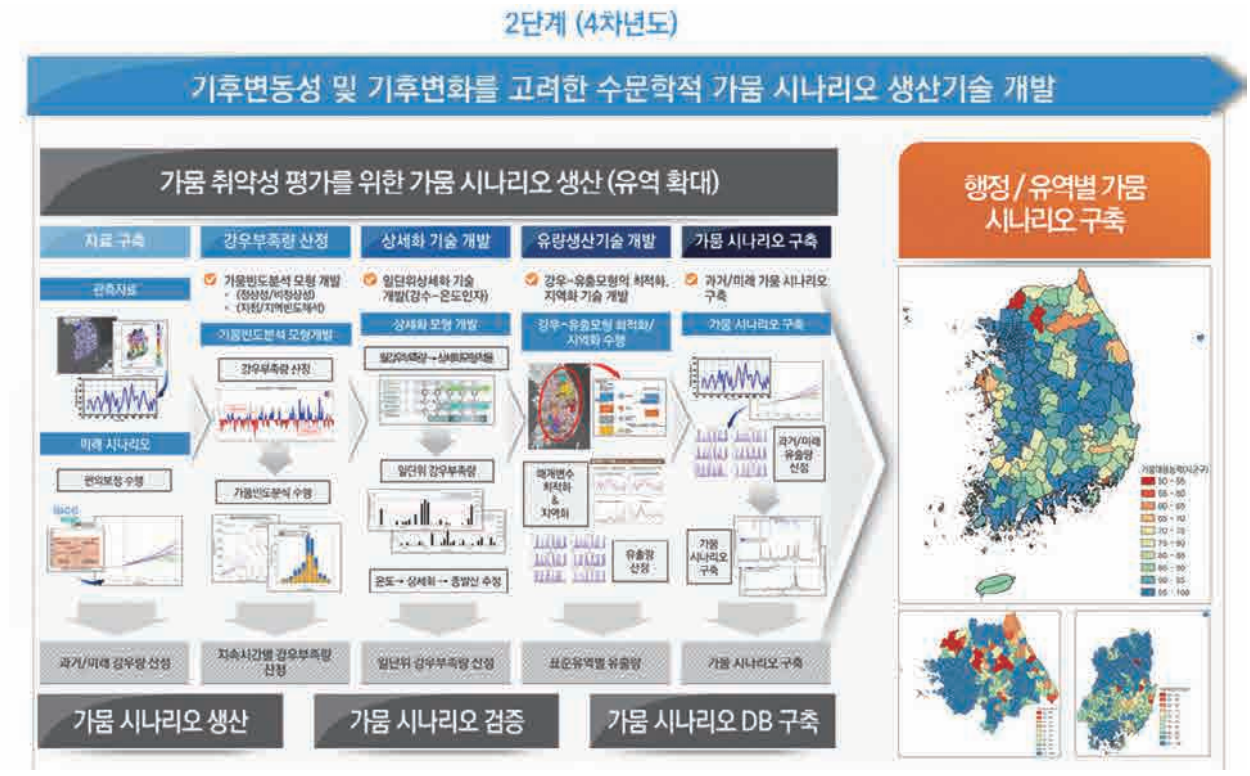


그림 1. 가뭄빈도해석 기반 가뭄상황 수문 시나리오 산정 기술 개발 개요

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 미계측 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

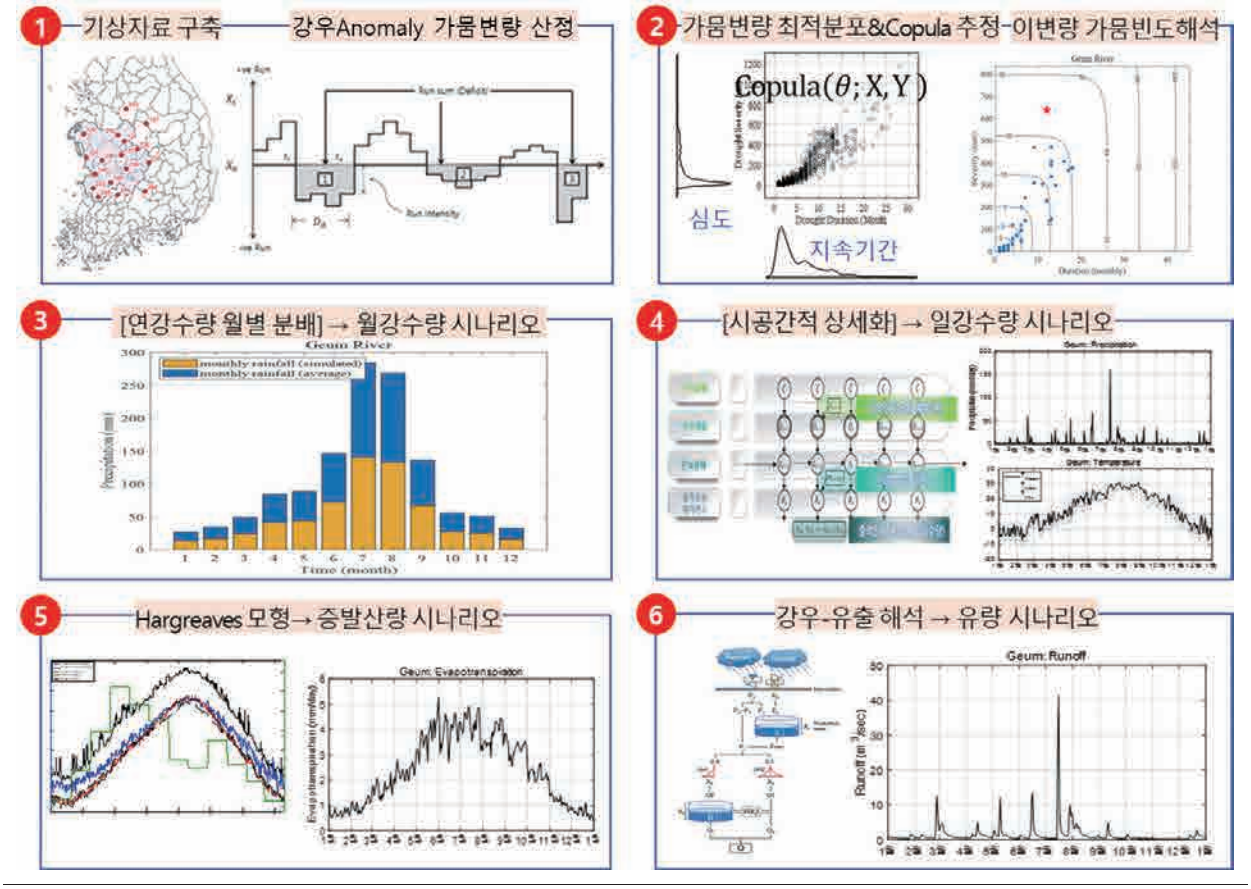


그림 2. 가뭄상황 수문 시나리오 산정 절차 모식도

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

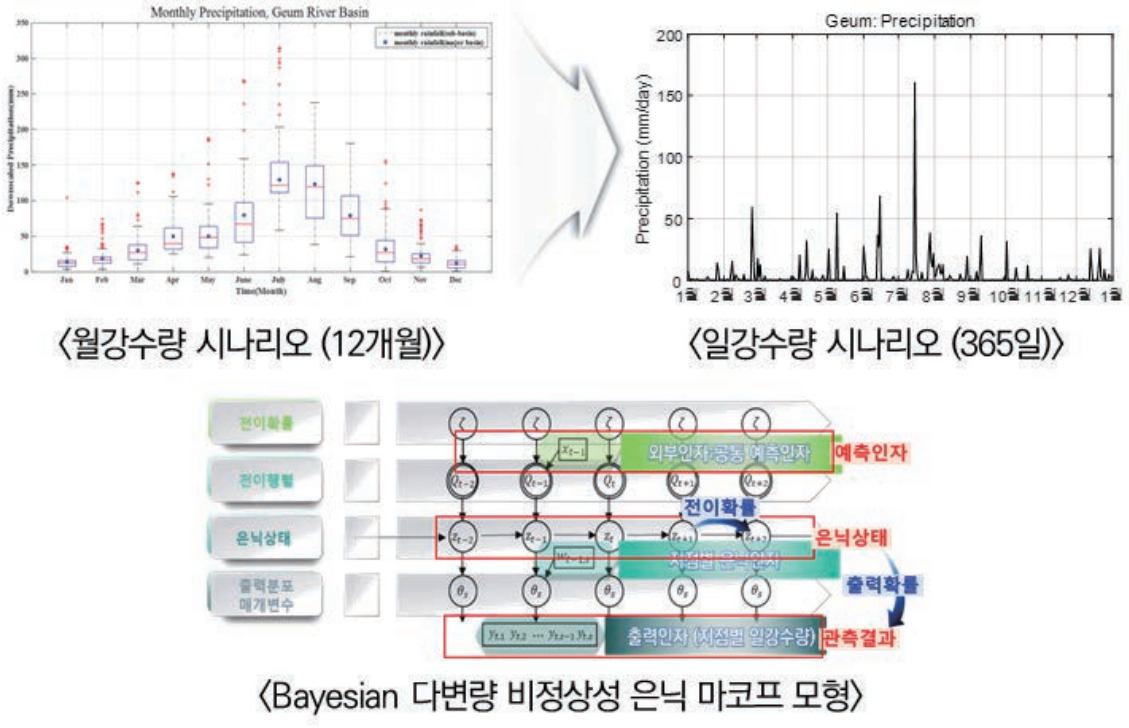


그림 3. NHMM 기반 시공간적 강수 상세화 개념도

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

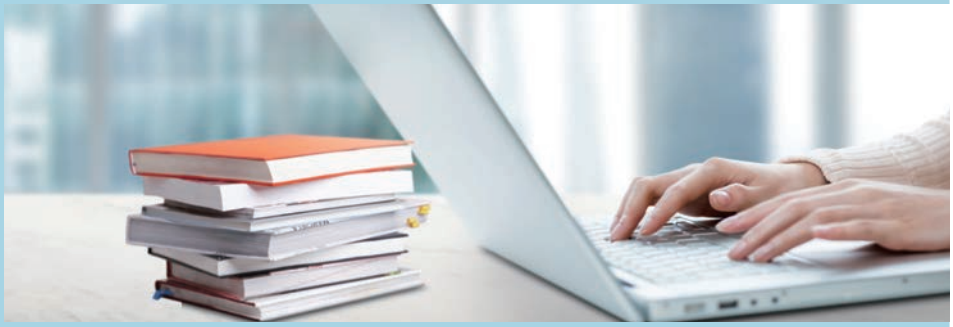
최근 기후변화의 영향으로 가뭄의 발생 빈도와 강도가 점차 증가하고 있으며, 이에 따라 안정적인 용수 확보와 물수급 관리의 중요성이 더욱 커지고 있다. 이러한 점에서 가뭄 규모를 정량적으로 평가하고 이에 대응하는 유량 시나리오를 체계적으로 산정할 수 있는 수문 시나리오 구축 기술을 가뭄취약도 평가와 물수급 분석을 위한 핵심적인 기본 토대가 될 수 있다. 이에 본 원고에서는 가뭄 빈도해석을 기반으로 한 가뭄상황 수문 시나리오 산정 기술의 연구 목적과 주요 연구 절차, 그리고 이를 통해 구축된 유량 시나리오의 활용성에 대해 소개하였다. 본 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).

특집

02



기후·사회·경제 변화 요인을 반영한 생활용수 수요량 시나리오 개발

김 태 웅
한양대학교(ERICA)
건설환경공학과 교수
twkim72@hanyang.ac.kr

김 민 지
한양대학교 대학원
스마트시티공학과 박사수료
stylus97@hanyang.ac.kr

김 지 영
한양대학교 대학원
스마트시티공학과 박사수료
jiy117@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

SPECIAL ISSUE

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.

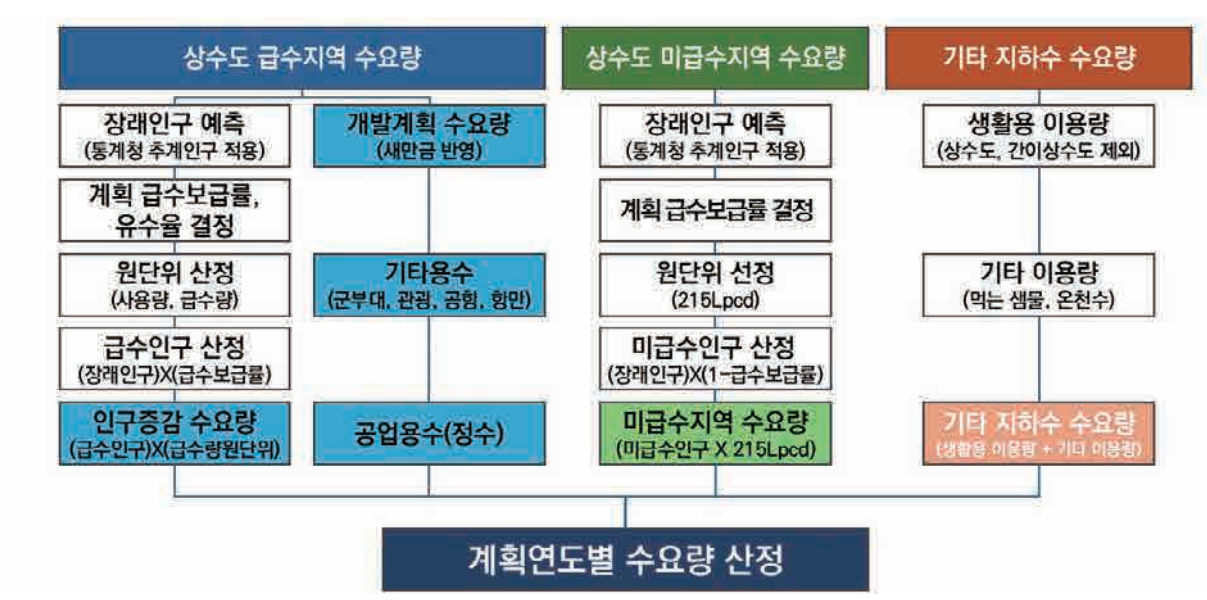


그림 1. 국가물관리기본계획의 생활용수 수요량 산정 방법

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, 급수보급률, 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.

03 기계학습 및 기후변화 시나리오 기반 생활용수 수요량 시나리오

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).

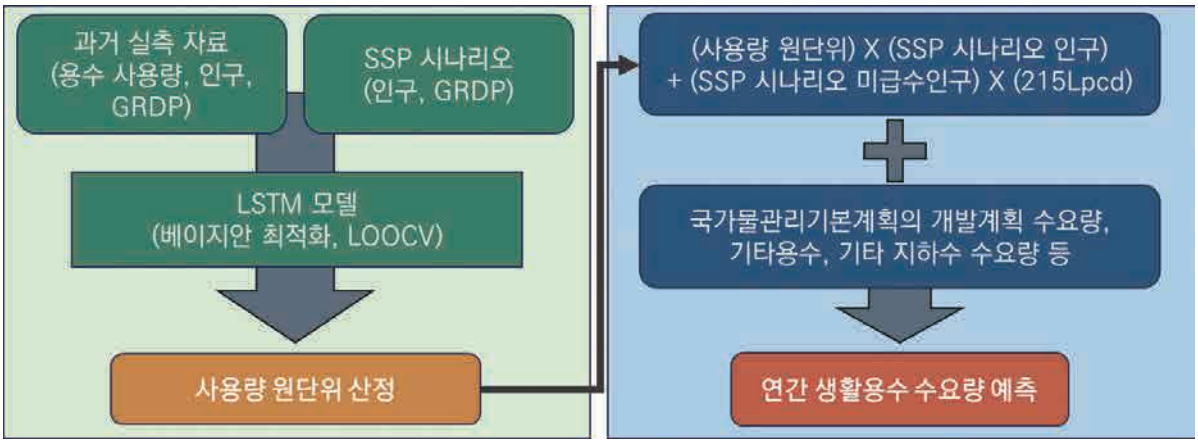


그림 2. LSTM 기반 생활용수 사용량 원단위 산정 및 수요량 예측 흐름도

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.

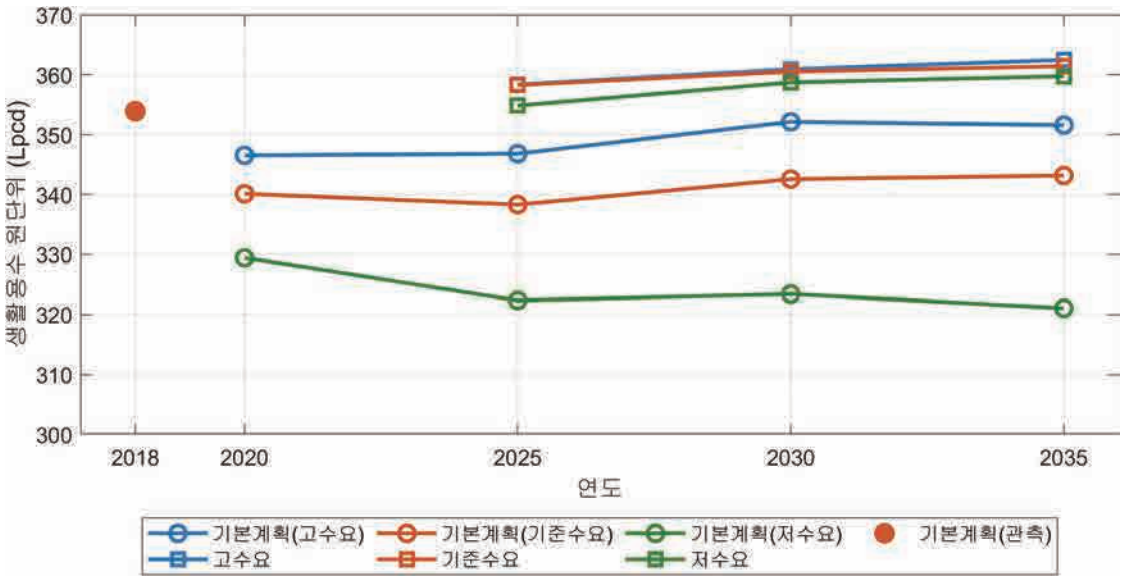


그림 3. 인천광역시의 생활용수 원단위 비교 결과

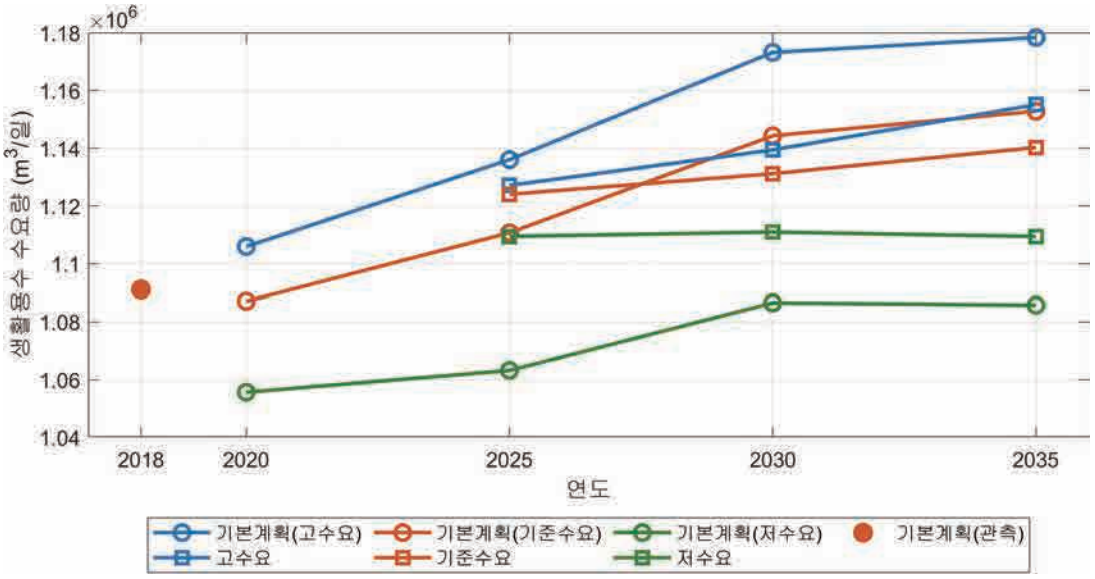


그림 4. 인천광역시의 생활용수 수요량 비교 결과

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 m^3/일에서 2035년 약 1.14×10^6 m^3/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

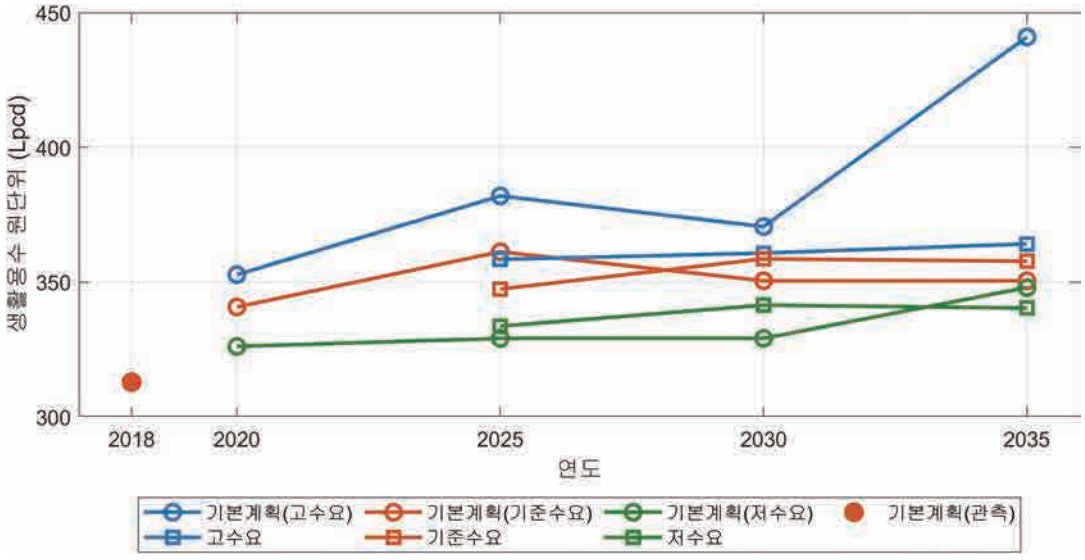


그림 5. 옥천군의 생활용수 원단위 비교 결과

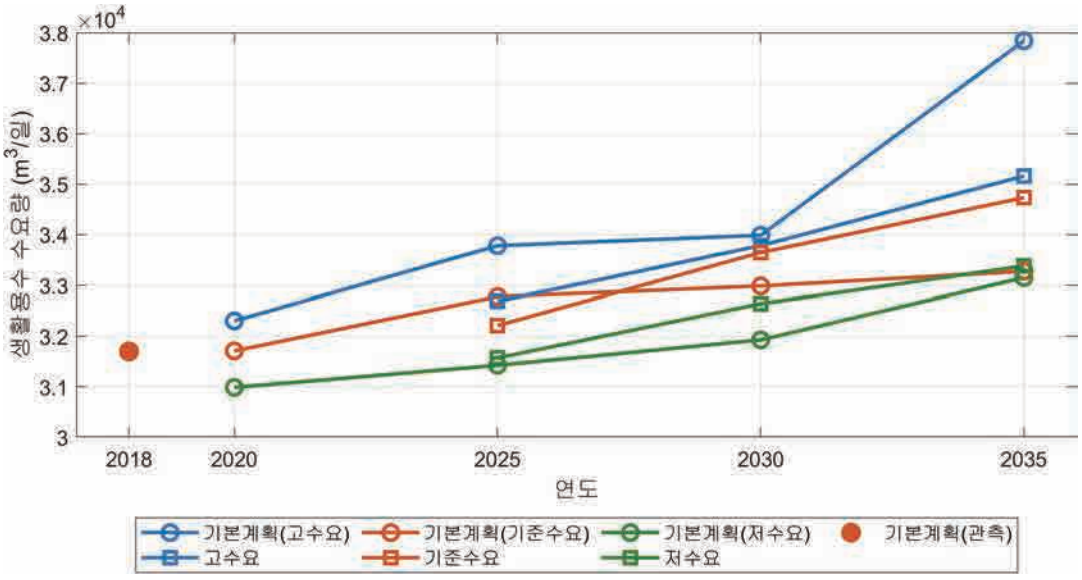


그림 6. 옥천군의 생활용수 수요량 비교 결과

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, 국가계획의 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 m^3/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.

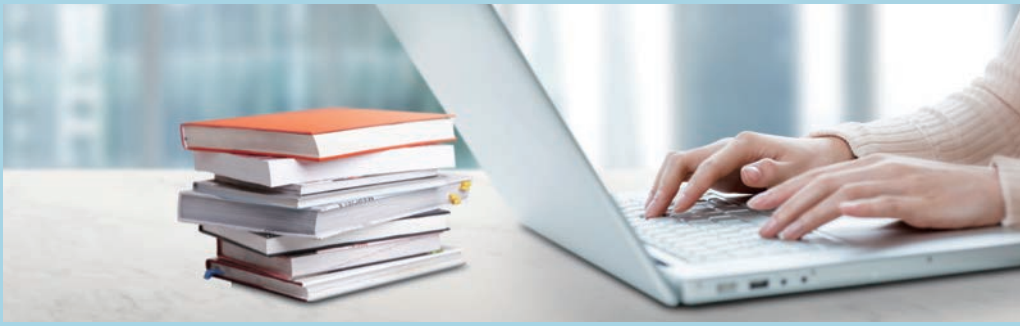
셋째, 지역 맞춤형 물 관리 정책 수립의 기초 자료로 활용 가능하다. 인구 감소형 도시와 성장형 도시의 수요 변화 특성이 명확히 구분됨에 따라, 획일적인 물 관리 정책이 아닌 지역 특성에 기반한 차별화된 전략 수립이 가능하다. 이는 지속가능한 물 이용과 운영 효율성 제고로 이어질 수 있다.

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.

특집

03



국가가뭄정보통계집을 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).

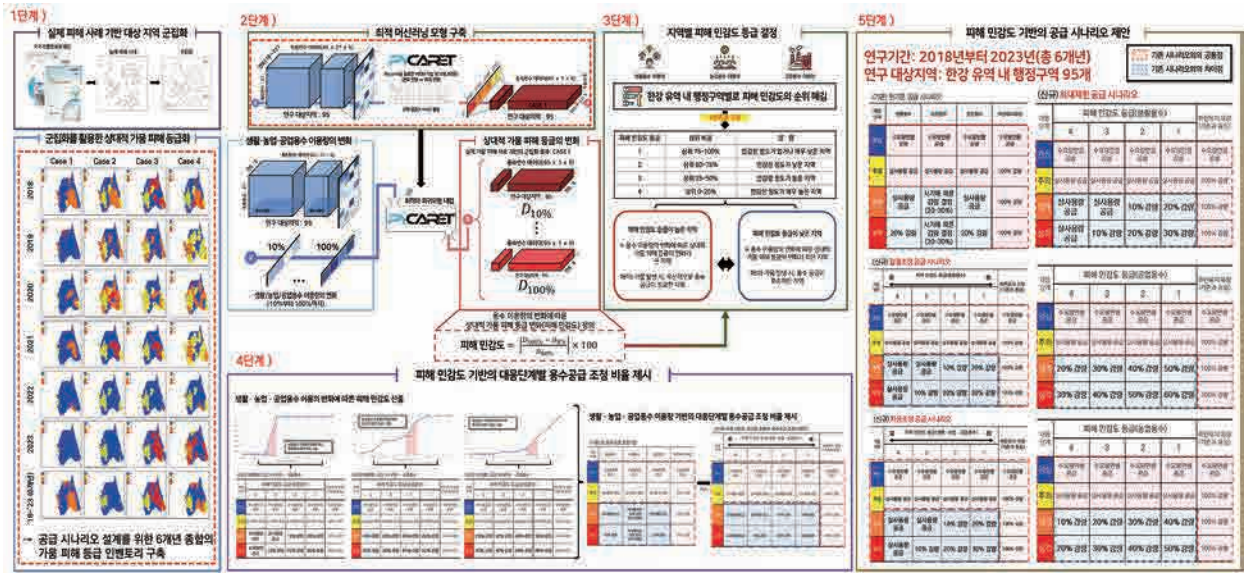


그림 1. 연구 흐름도

2.1 국가가뭄정보통계집 기반 유역별 군집특성 분석

본 연구에서는 가뭄 피해의 공간적 특성과 지역 간 차이를 체계적으로 파악하기 위해 국가에서 공식적으로 구축·제공하는 국가가뭄정보통계집(관계부처 합동, 2020-2025)을 핵심 자료로 활용하였다. 국가가뭄정보통계집은 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 국가가뭄정보통계집(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 국가가뭄정보통계집을 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

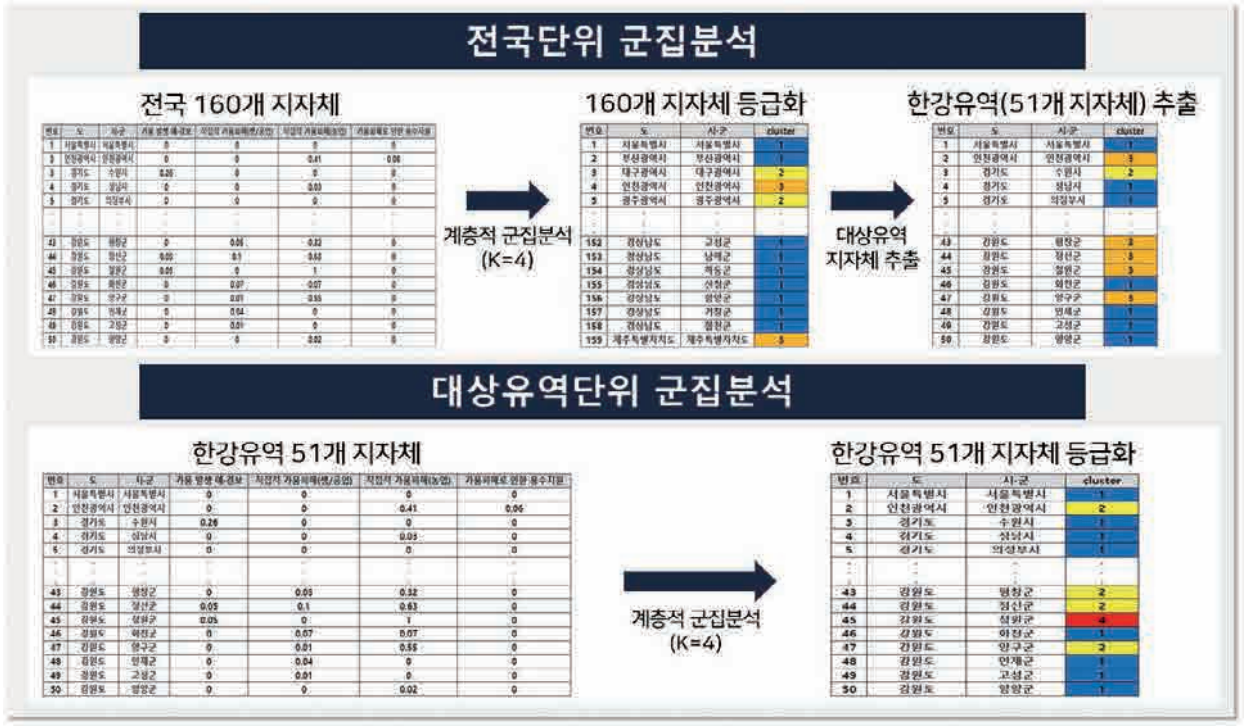


그림 2. 전국단위 군집분석 및 대상유역단위 군집분석 방법론

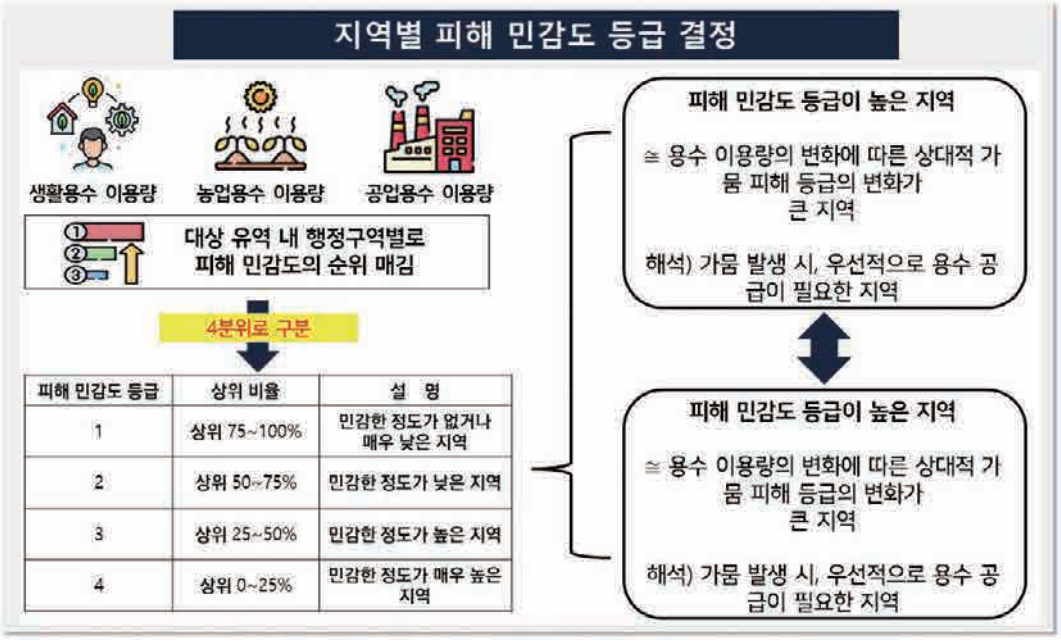
2.2. 가뭄 피해 민감도 평가 및 공급 시나리오 구성

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.



피해 민감도 등급	상위 비율	설 명
1	상위 75~100%	민감한 정도가 없거나 매우 낮은 지역
2	상위 50~75%	민감한 정도가 낮은 지역
3	상위 25~50%	민감한 정도가 높은 지역
4	상위 0~25%	민감한 정도가 매우 높은 지역

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.

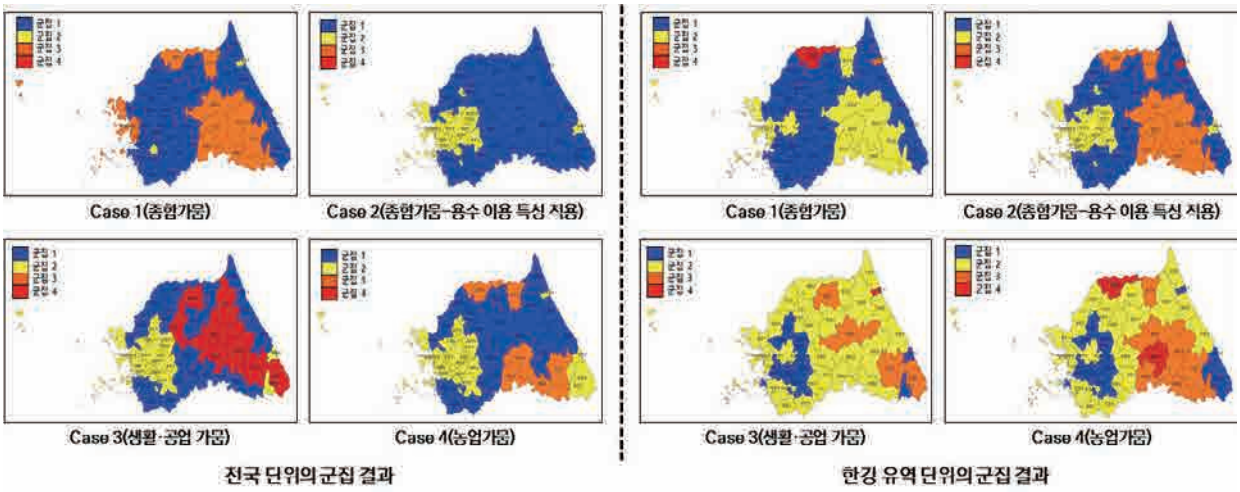


그림 4. 한강유역 군집분석 결과

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.

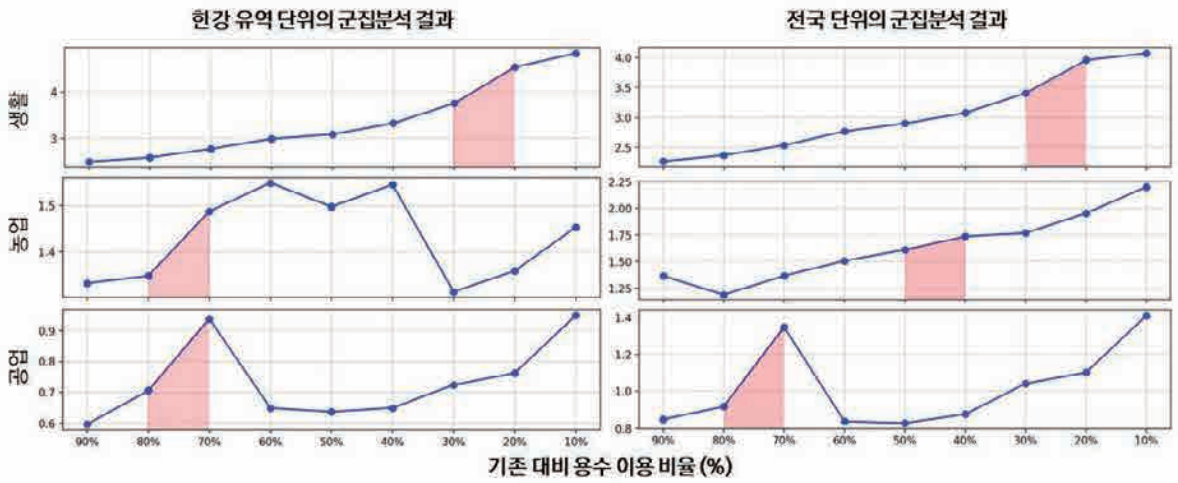


그림 5. 한강 유역 가뭄 피해 민감도 평가 결과

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

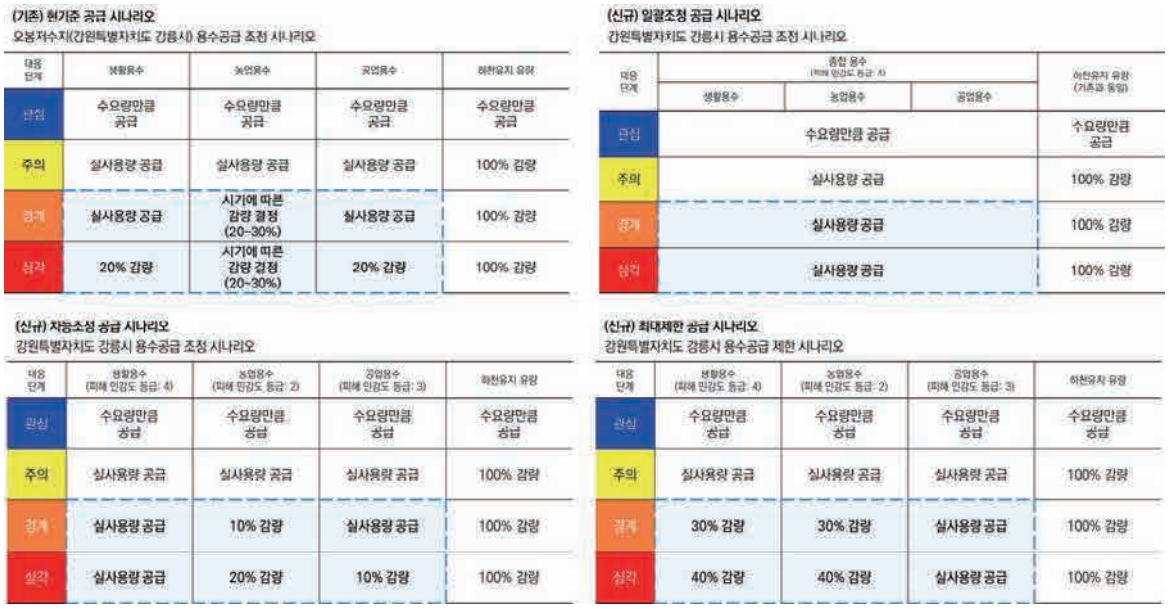


그림 6. 가뭄 피해 민감도 기반 용수 공급 조정 시나리오

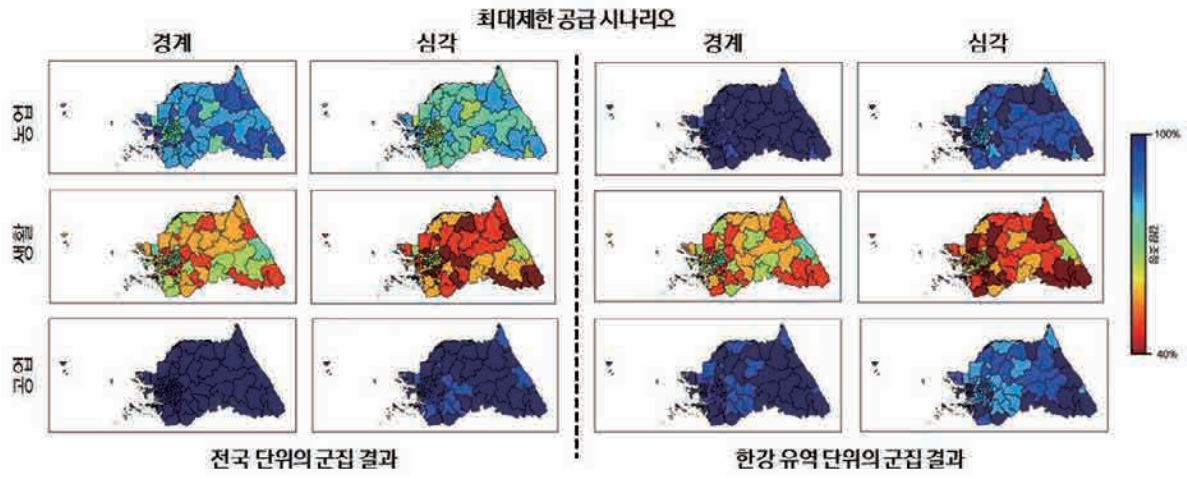


그림 7. 최대제한 공급 시나리오의 전국단위 및 한강유역단위 비교

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

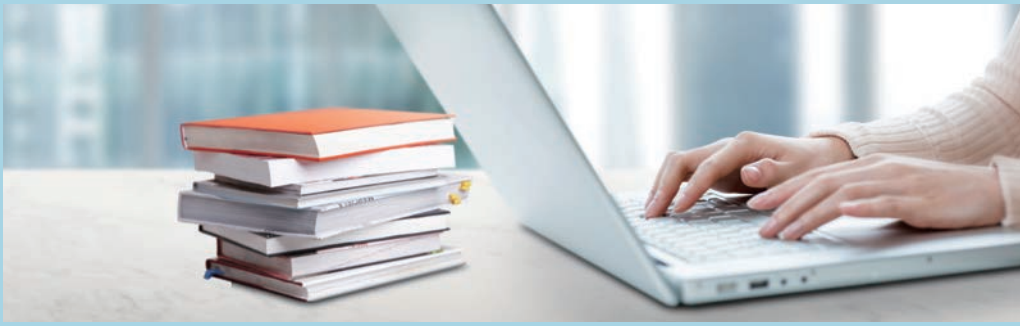
본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 기후변화 적응 수재해 관리 기술개발사업(R&D)의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2022-KE002032).

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.

특집

04



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 위험으로 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	[기존] 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, 다영한 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 유역의 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.

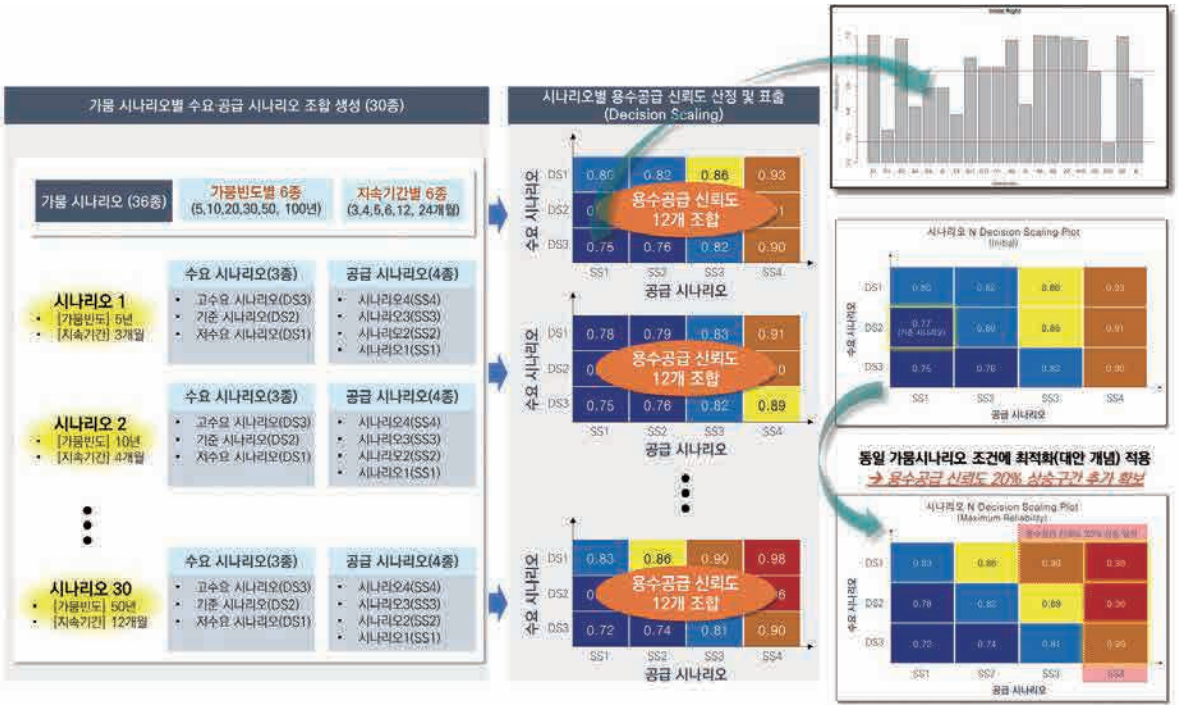


그림 1. 시나리오 중립 기반 최적 솔루션 흐름

3.2 사용자는 무엇을 입력하고, 무엇을 바꿔볼 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.

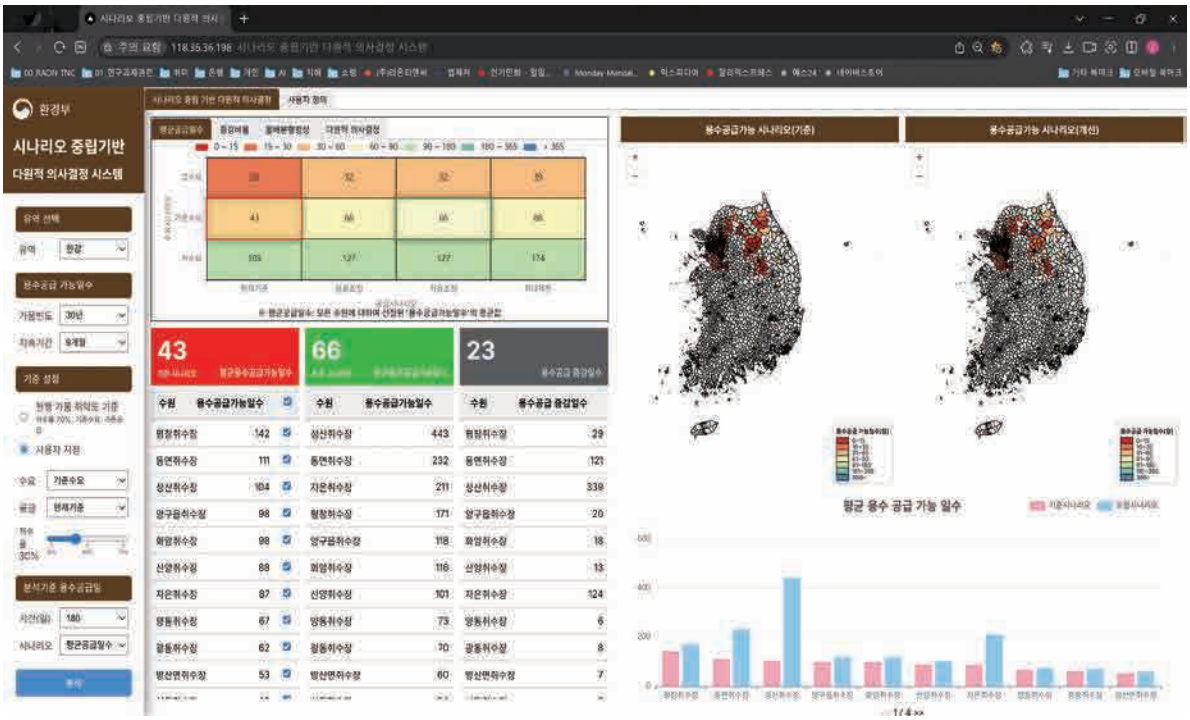


그림 2. 의사결정시뮬레이터 화면 설계

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

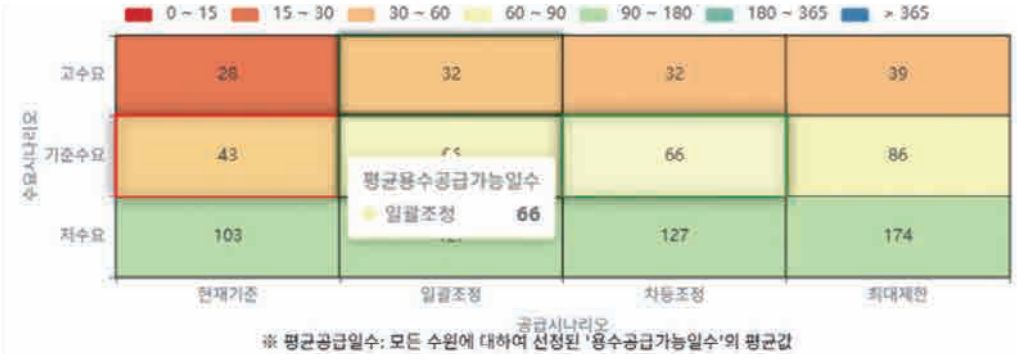


그림 3. 평균 용수공급가능일수 및 기준 대비 증감 결과

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 성능과 형평성의 관계는 그림 4에서 비교할 수 있다.

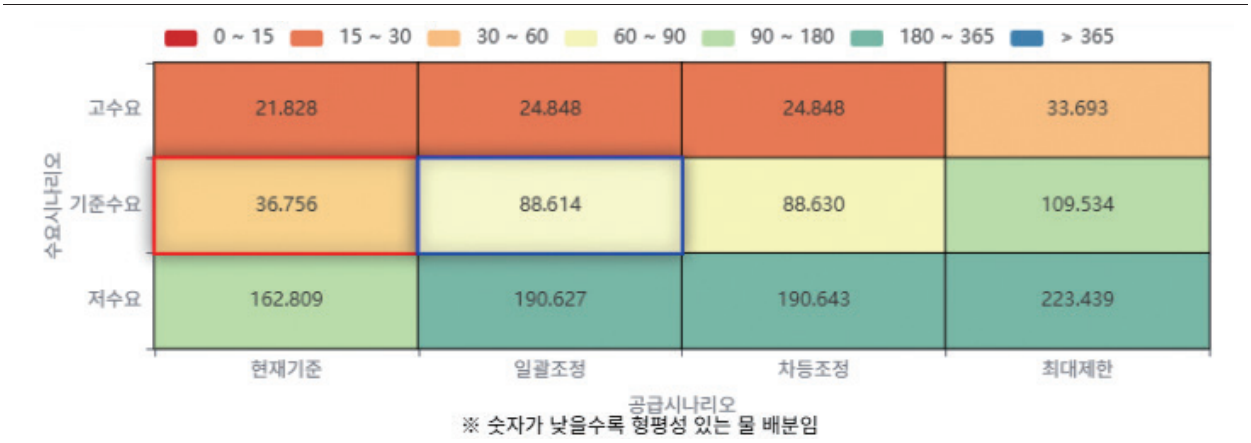


그림 4. 가뭄 대응 효율성과 물 배분 형평성의 비교

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

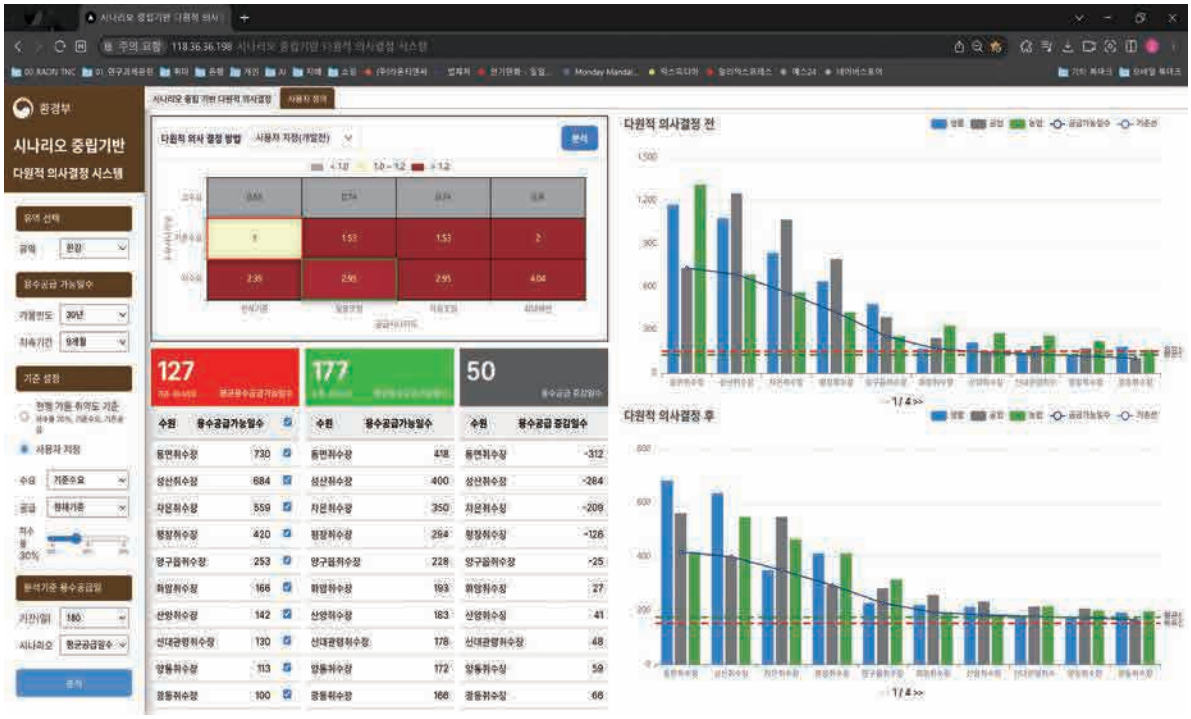


그림 5. 사용자 정의을 통한 용수공급조정(프로토타입)

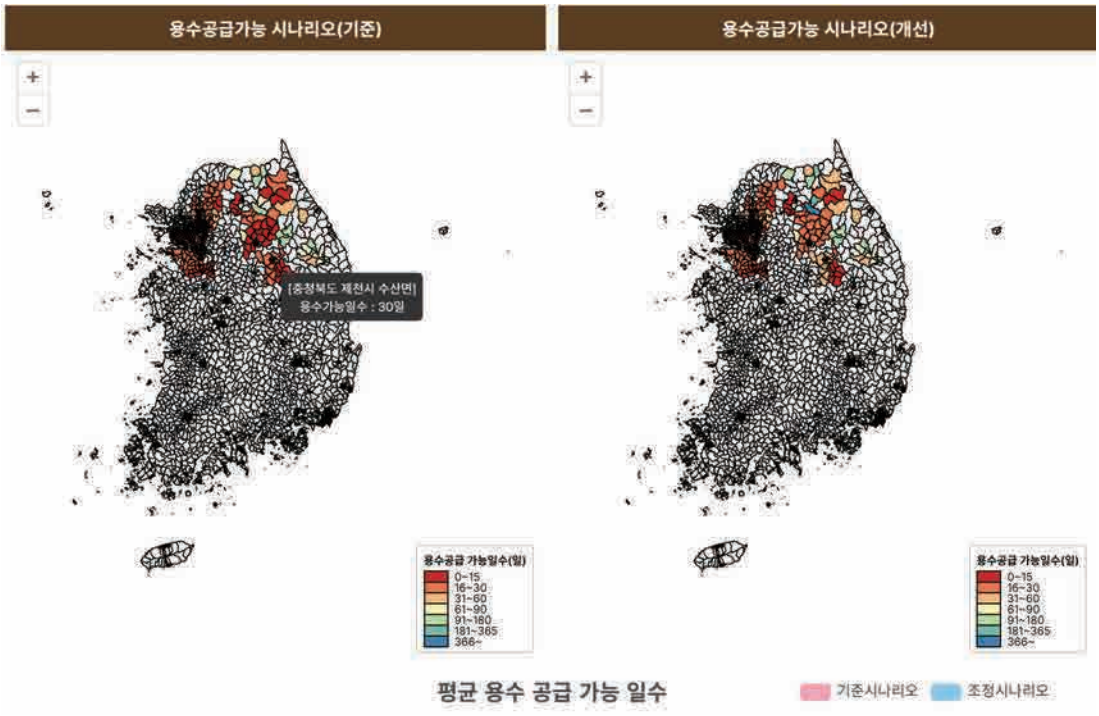


그림 6. 지자체별 용수공급 가능일수 표출

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 위험으로 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).

학술/기술 기 사

42 우리나라의 소규모 양수발전 연구 동향과 에너지 전환에서의 역할
이효상·안국현

46 기후변화에 따른 강우특성 변화와 그에 따른 지역빈도해석 개선 방안
이가영·신주영·김규태

56 도시 물순환 시스템 분야에서의 경쟁 세션 운영 사례
박상진·정현우·정동휘

68 머신러닝 기반의 연안 침수리스크 평가와 그린-그레이 하이브리드 방재 전략
김연중

78 기후극한 시대의 복합재해 대비: 다중 주파수 분석 기반 복합 가뭄-폭염 예측
한정우

Water for future

우리나라의 소규모 양수발전 연구 동향과 에너지 전환에서의 역할

A Review of Small-scale Pumped Storage Hydropower in South Korea

Water for future
학술/기술 기사
01

이 효 상
충북대학교 토목공학부 교수
hyosanglee@chungbuk.ac.kr

안 국 현
공주대학교
스마트인프라공학과 부교수
ahnkukhyun@gm.kongju.ac.kr

1. 배경

재생에너지 확대는 기후변화 대응과 탄소중립 실현을 위한 필수 전략으로 자리 잡고 있다. 대한민국은 2030 국가온실가스감축목표(NDC) 상향에 따라 태양광과 풍력을 중심으로 한 전원믹스 전환을 가속화하고 있으나, 이러한 재생에너지는 출력 변동성과 간헐성이라는 구조적 한계를 가지고 있다. 특히 단시간 내 급격한 출력 변화는 전력계통의 주파수 안정성과 운영 신뢰도를 저해하는 주요 요인으로 작용하며, 이는 재생에너지 비중이 증가할수록 더욱 심화될 가능성이 높다 (김선용, 2021).

이러한 문제를 완화하기 위한 핵심 수단으로 에너지 저장 기술의 중요성이 부각되고 있으며, 그중 양수발전은 대규모 에너지 저장장치로서 가장 성숙한 기술 중 하나로 평가된다. 국내에서는 이미 대형 양수발전이 전력계통 안정화에 중요한 역할을 수행해 왔으나, 신규 대형 양수발전 개발은 입지 제약, 환경 훼손, 사회적 수용성 문제로 인해 점차 한계에 직면하고 있다. 이에 따라 최근에는 기존 수리 인프라를 활용하는 소규모 양수발전이 대안적 기술로 주목받고 있다 (최재은, 2024).

본 소개에서는 한국에서 수행된 소규모 양수발전 관련 연구와 기술·정책 논의를 종합적으로 검토하고, 재생에너지 기반 전력계통에서 소규모 양수

발전이 수행할 수 있는 역할과 향후 연구 방향을 정리하는 것을 목적으로 한다.

2. 논의

2.1 국내 양수발전의 현황과 대형 양수발전의 한계

국내 양수발전은 1980년 청평양수발전소 준공 이후 현재까지 총 7개 발전소, 약 4.7GW 규모로 운영되고 있으며, 대규모 정전이나 발전기 고장, 지진과 같은 비상 상황에서 계통 안정화에 핵심적인 역할을 수행해 왔다 (김선용, 2021). 특히 기존 양수발전은 수분 이내 기동이 가능하다는 점에서 급격한 부하 변동에 효과적으로 대응할 수 있는 전원으로 기능해 왔다.

그러나 이러한 장점에도 불구하고, 기존 양수발전은 수백 MW급 설비와 고낙차 지형, 대규모 상·하부 저수지 조성을 전제로 하며, 이로 인해 신규 개발 시 환경 영향과 장기 인허가 문제가 불가피하다. 또한 대규모 개발 특성상 지역 주민과의 갈등, 생태계 훼손 논란이 반복적으로 제기되고 있으며, 이는 양수발전 확대 정책의 사회적 수용성을 제한하는 요인으로 작용하고 있다 (김규민, 2022). 이러한 구조적 특성은 재생에너지 확대 속도에 비해 양수발전 확장이 더딜 수밖에 없는 원인이 되고 있다.

2.2 기존 수리 인프라를 활용한 소규모 양수발전의 개념과 기술적 특성

기존 수리구조물을 활용한 소규모 양수발전은 기존 농업용 저수지, 하천 보, 소규모 댐 등을 상·하부 저수지로 연계하여 활용하는 방식으로, 신규 댐 건설을 최소화하는 것을 핵심 개념으로 한다. 설비 규모는 수십 MW 이하 또는 100MW 이하로 정의되는 경우가 많으며, 분산형 전력망 및 재생에너지 발전지 인근 설치가 가능하다는 점에서 대형 양수발전과 차별된다 (최재은, 2024).

기존 수리 인프라의 재활용은 환경 훼손과 사회적 갈등을 줄이는 동시에, 에너지 저장 기능을 추가적으로 부여할 수 있다는 점에서 수자원 이용 효율성을 크게 향상시킨다. 특히 노후화된 농업 기능이 저하되거나 활용도가 감소한 저수지를 대상으로 할 경우, 추가적인 토지 이용 변화 없이 에너지 저장 인프라를 구축할 수 있다는 장점이 있다 (이효상, 2026). 이러한 특성은 국토 이용이 집약적이고 산지가 많은 대한민국의 여건에 특히 적합하다.

2.3 국내 소규모 양수발전 잠재량 평가 연구

최근 국내 연구에서는 전국에 분포한 기존 저수지를 대상으로 인접 저수지 간 연계 가능성을 분석하고, 유효 낙차, 유효 저수용량, 이격거리 등을 기준으로 소규모 양수발전 잠재량을 정량적으로 평가하였다. 그 결과 다수 지역에서 수십 MW급 발전 용량 확보가 가능함이 제시되었으며, 특정 지역에서는 중형 발전소에 준하는 에너지 저장 규모가 가능함을 확인하였다 (이무경 외, 2026).

이러한 연구들은 소규모 양수발전이 단순한 실증 단계에 머무르지 않고, 실제 전력계통 운영에 기여할 수 있는 수준의 용량을 확보할 수 있음을 보여준다. 또한 농업 기능이 저하된 저수지를 활용할 경우 사회적 수용성과 정책적 실현 가능성이 더욱 높아지는 것으로 분석되었으며, 이는 향후 지역 기반 분산형 에너지 시스템 구축과도 밀접하게 연계될 수 있다.

2.4 소규모 수력·초소수력 연구와의 연계

하천 유량을 직접 활용하는 RoR (Run of River) 방식의 소규모 및 초소수력 발전 연구는 소규모 양수발전과 개념적으로 긴밀한 연관성을 가진다. 국내 사례 연구에 따르면 유효 낙차가 1m 내외인 소규모 하천에서도 연간 수만에서 수십만 kWh 규모의 발전이 가능하며, 이에 따른 탄소 저감 효과 또한 유의미한 수준으로 나타난다. 이러한 결과는 하천 보나 낙차공을 활용한 초소수력 발전이 독립적인 발전원으로 기능할 뿐만 아니라, 향후 소규모 양수발전과 결합된 하이브리드 에너지 저장 시스템으로 확장될 수 있는 가능성을 시사한다. 특히 하천 유량 변동성과 재생에너지 출력 변동성을 동시에 고려한 통합 운영 전략은 향후 중요한 연구 주제가 될 수 있다 (이무경 외, 2026).

2.5 산업·정책적 논의 동향

최근 국내에서는 소규모 양수발전과 Micro-WESS 개념을 중심으로 설계 기술, 기자재 국산화, BIM 기반 통합 엔지니어링 역량이 점진적으로 축적되고 있다 (김하늬, 2024). 이는 장기적으로 양수발전 기술 자립과 수력 산업 생태계 확장의 기반이 될 것으로 기대된다. 그러나 현행 전력시장 제도와 인허가 체계는 여전히 대형 발전원 중심으로 설계되어 있어, 소규모 양수발전이 에너지저장장치로서 적절한 역활을 받기에는 제도적 한계가 존재한다 (김규민, 2022).

3. 마무리

본 소개를 통해 살펴본 바와 같이, 소규모 양수발전은 대형 양수발전의 입지·환경적 제약을 보완하면서 재생에너지 확대에 따른 전력계통 불안정을 완화할 수 있는 실질적인 대안이다. 기존 수리 인프라의 재활용을 통해 환경 영향을 최소화할 수 있으며, 지역 단위 분산형 에너지 저장 수단으로서 전략적 가치가 크다. 특히 국내 연구 결과들은 소규모 양수발전이 기술적으로 실현 가능할 뿐만 아니라, 사회적 수용성과 정책적 활용 가능성 측면에서도 충분한 잠재력을 지니고 있음을 보여준다 (이효상, 2026).

향후 소규모 양수발전 연구는 다음과 같은 방향에서 심화될 필요가 있다. 첫째, 기후변화로 인한 강수 및 유출 변동성이 저수지 운영과 에너지 저장 성능에 미치는 영향을 장기적으로 평가할 필요가 있다. 둘째, 재생에너지 예측 정보와 연계한 양수·발전 운영 최적화 기법, 특히 최신 연구적 방법론의 기반에서 제어 전략에 대한 접근이 요구된다. 셋째, 수자원 관리, 홍수 조절, 가뭄 대응 기능과 에너지 저장 기능을 통합적으로 고려하는 수자원-에너지 넥서스 관점의 연구가 필요하다. 마지막으로 소규모 양수발전을 에너지저장장치로 인정하는 제도적 기반 마련과 인허가 절차 개선, 전력시장 보상 체계 정립이 병행되어야 기술적 가능성이 실제 사업으로 이어질 수 있을 것이다.

참고문헌

김선용 (2021). 양수발전 시설용량 결정과 입지선정에 대한 연구. 공학석사학위논문, 서울시립대학교 토목공학과.

이효상, 안국현 (2026). 국내 저수지를 활용한 소규모 양수발전의 개발 가능성 평가. Exploring the Development Potential of Small-Scale Pumped Storage Hydropower Using Reservoirs in South Korea. (submiited in 한국수자원학회지).

이무경, 황지민, 안국현, 이효상 (2026). 구례군 서시천 깔단보의 하천 흐름을 활용한 초소수력 잠재발전수자원량의 평가.Run-of-River Hydropower Potential Assessment at Kaldan Weir at Seosicheon, Korea. 한국수자원학회지.

최재은 (2024). 한수원, 소규모 양수발전(Micro-WESS) 개발로 양수발전 영역 확대. 산업저널, 2024년 1월 19일.

김하늬 (2024). 소규모 수력·양수발전, 엔지니어링 기술로 시장 경쟁력 강화. 공학저널, 2024년 10월 29일.

김규민 (2022). 소형 양수발전, 지역 전력망의 구원투수. 이넷뉴스(E-net News), 데스크 칼럼, 2022년 8월 8일.

기후변화에 따른 강우특성 변화와 그에 따른 지역빈도해석 개선 방안

Water for future
학술/기술 기사
02

이 가 영
국민대학교
건설시스템공학부 석사과정
dlrkdud1013@kookmin.ac.kr

신 주 영
국민대학교
건설시스템공학부 교수
jshin@kookmin.ac.kr

김 규 태
㈜한국종합기술
수자원1부 부장
hydrokew@naver.com

1. 서론

최근 기후변화로 인해 전 세계적으로 극한 강우의 발생 빈도와 강도가 증가하고 있으며, 국내 또한 국지성 및 집중호우로 인한 수해 위험이 심화되고 있다. 설계홍수량 산정을 위한 확률강우량은 이러한 수문학적 위험을 정량화하는 핵심 요소로, 그 산정 방법의 신뢰성은 수공구조물의 안전성과 직결된다. 국내는 관측 기간이 비교적 짧고 관측망이 조밀하지 않아 단일 지점의 자료만으로 극치 강우 특성을 추정하는 지점빈도해석으로는 한계가 존재한다. 이러한 한계를 보완하기 위해 수문학적으로 동질한 지역 내에 다수 지점의 자료를 통합 분석하는 지역빈도해석(Regional Frequency Analysis, RFA)이 안정적인 확률수문량을 산정하는 방법으로 활용되어 왔다 (Heo et al., 2007; Lee et al., 2007). 지역빈도해석의 신뢰도는 동질지역 구분 방식에 크게 의존하며 k-means, fuzzy c-means 등의 군집 기법을 통해 국내의 동질지역을 구분하는 연구가 수행되었다 (Lee et al., 2007; Lim, 2009). 그림 1은 이러한 지역구분 단계를 포함한 전체 지역빈도해석 수행 절차를 도식화하여 보여준다. 만약 지역구분의 형성이 부적절할 경우 확률강우량 산정의 불확실성을 초래할 수 있다. 현재 「홍수량 산정 표준지침(환경부, 2019)」에서 제

안된 국내 26개 동질지역으로 구분하고 있으며 이는 2017년까지의 강우 자료를 기반으로 구축되었다. 본 연구팀은 2024년까지의 자료로 확장하여 분석한 결과, 기존의 동질지역은 최근 가속화된 기후변화와 극한 강우의 변동성을 충분히 수용하지 못하는 한계가 있음을 확인하였다. 그로 인해 기존 동질지역의 타당성에 대한 재검토 필요성을 제기하였고, 분석 결과를 통해 일부 지역에서 통계적 이질성이 확인되었다. 이에 본 연구에서는 2024년까지 강우 자료를 군집 해석 기법에 적용하여 기존 동질지역의 타당성을 검토하고, 기후변화의 영향을 반영한 수문학적 동질지역 재구분을 수행하고자 한다. 이를 기반으로 산정된 확률강우량의 변화를 분석함으로써 기후변화가 지역빈도해석에 미치는 영향을 분석하려고 한다.

2. 홍수량 산정 표준지침(2019, 환경부)에 따른 기존 동질지역의 타당성 검토

지역빈도해석의 신뢰성을 확보하기 위해서는 수문학적 동질한 지역을 구분하는 것이 필수적이다. 본 연구는 Hosking and Wallis (2005)가 제안한 이질성 척도(heterogenity measure, H)를 활용하여 기존 동질지역의 타당성을 검토하였다. 분석 대상은 현 지침에서 제안된 26개의 동질지역이며 (그림 2), 2024년까지의 최신 강우 자료를 적용하여 기존 구분 방식과의 적합성을 비교 및 분석하였다.

Hosking and Wallis (2005)은 이질성 척도(H)를 기준으로 지역의 동질성을 세 단계로 구분하였다 ($H<1$: 동질(homogeneous), $1 \leq H<2$

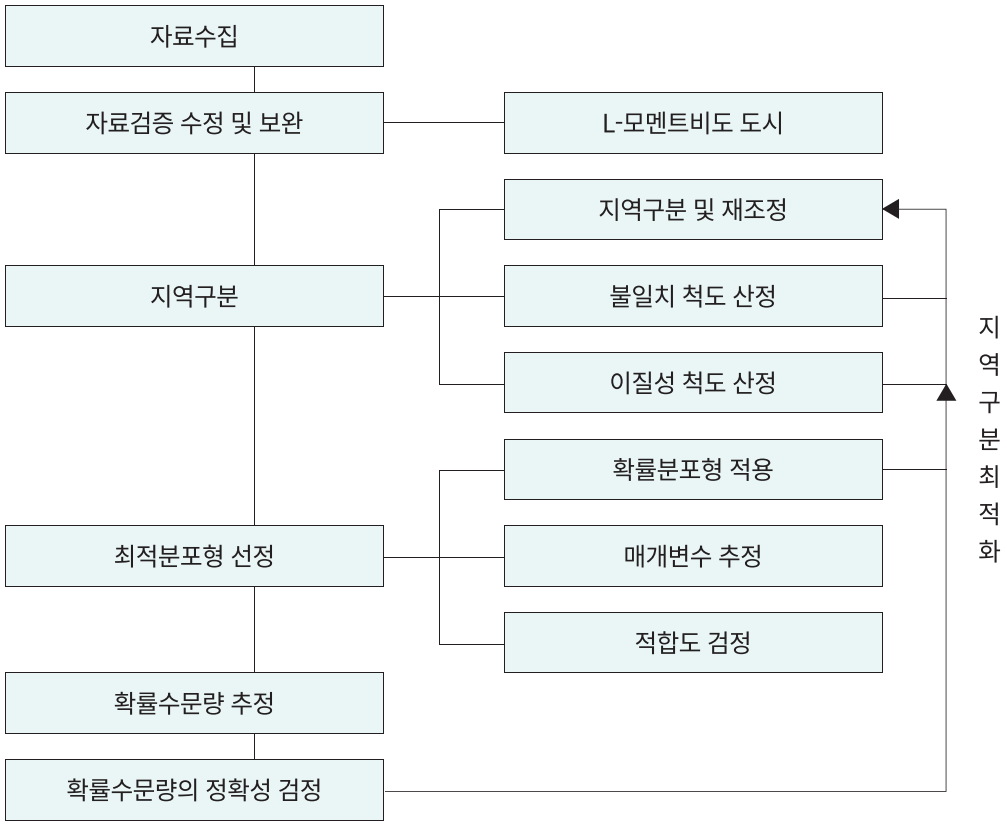


그림 1. 지역빈도해석 수행 절차

그림 2. 대한민국 지역빈도해석의 26개 동질지역 (환경부, 2019)

: 이질 가능(possibly heterogeneous), $H \geq 2$: 이질(heterogeneous)). 본 연구에서는 2024년까지 확충된 자료를 바탕으로 이질성 척도(H ; H_1, H_2, H_3)에 대한 비교 분석을 수행하였다. 여기서 H_1은 L-변동계수(L-CV)를, H_2는 L-왜도(L-skewness), H_3은 L-첨도 (L-kurtosis)를 기반으로 산정된다 (Hosking and Wallis, 2005).

26개의 동질지역의 중앙값이 이질한 범주($H \geq 2$)에 위치할 경우를 이질한 지역으로 판단하였다. 분석 결과, 26개 동질지역 중 19번 지역에서 이질성 척도 H_1의 중앙값이 2.0 이상인 2.10 값으로 산출되어 수문학적 이질성이 확인되었다. 그림 3은 19번 지역에 대한 분석 결과를 시각화한 것으로, 지역 내 관측소들의 지속기간별 L-모멘트 계수를 바탕으로 산정된 이질성 척도의 분포를 나타낸다. 해당 그림에서 박스는 자료의 중앙 50% 범위를, 박스 내 중앙선은 중앙값을 의미하며 가독성을 위해 동질성 등급에 따라 색상(동질: 녹색, 이질 가능: 청색, 이질: 적색)을 구분하여 표시하였다. 이와 같은 이질성 척도의 분포 특성은 기존 동질지역 구분이 최신 강우 특성을 충분히 반영하지 못할 가능성을 시사하며, 19번 지역에 대한 재검토 필요성을 뒷받침한다.

3. 군집 분석 기반 수문학적 동질지역 재구분

2장에서 업데이트된 강우 자료를 적용하여 기존

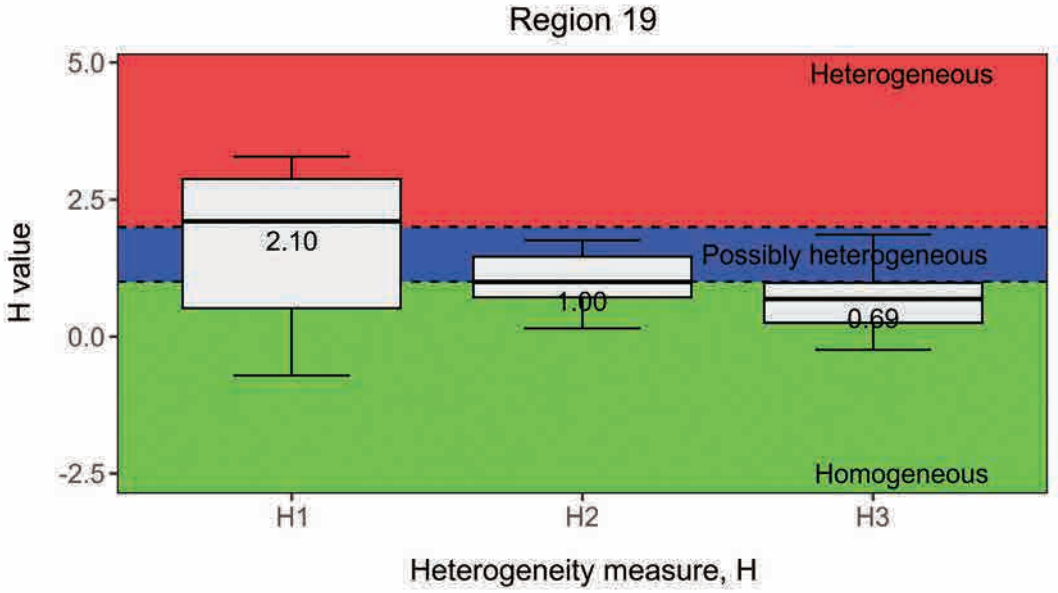


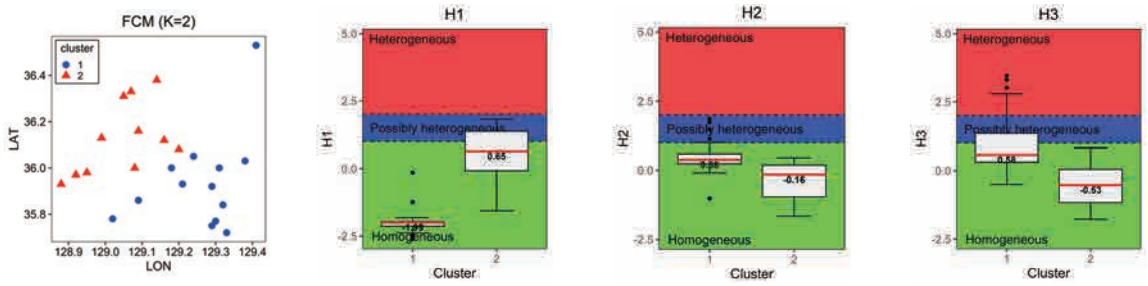
그림 3. 19번 지역의 이질성척도(H ; H_1, H_2, H_3) 값 비교 분석

동질지역의 타당성을 검토한 결과, 19번 지역에서는 이질성 척도, H_1값이 기준치를 초과하여 수문학적 동질성 가정이 성립하지 않는 것으로 확인되었다. 이는 기존 동질지역 구분이 최근 강우 특성 변화를 충분히 반영하지 못하고 있음을 의미한다. 이에 본 연구에서는 19번 지역에 군집 분석을 적용하여 수문학적 동질지역 재구분을 수행하였다.

군집 분석 기반 동질지역 재구분을 위해 2024년까지의 강우 자료를 토대로 19번 지역에 포함된 24개 지점을 대상으로 강우 특성을 대표하는 입력변수를 구축하였다. 입력 변수는 총 49개로 구성되었으며, 강우 및 공간적 특성을 함께 반영할 수 있도록 설계되었다. 구체적으로 연 · 계절 · 월 단위의 강수량과 강수일수, 그리고 관측소의 위도, 경도 및 고도와 같은 지형정보로 구성되었다. 이러한 변수들은 관측소별 강우의 규모, 발생 빈도, 계절성 및 공간적 분포 특성의 차이를 정량적으로 반영할 수 있어, 동질지역 판정을 위한 군집 분석 입력 자료로 활용되었다.

본 연구는 동질지역 재구분을 위해 통계적 유사성 기반의 k-means (MacQueen, 1967)와 EM 알고리즘(Dempster, 1977)을 기반으로 확률적 분포를 고려한 gaussian mixture model(GMM), 그리고 부분 소속도를 반영한 fuzzy c-means(FCM; Bezdek, 1984)기법을 적용하였다. 또한 고차원 자료의 직관적 해석을 위해 선형 차원 축소 기법인 주성분 분석(PCA; Pearson, 1901)과 van der Maten (2008)이 제안한 비선형 기법의 t-분포 확률적 이웃 임베딩(t-SNE)을 활용하였다. 이를 바탕으로 차원 축소의 적용 여부에 따라 군집 분석 방법론을 세 가지로 구분하여 비교 분석하였다 (방법론 #1: 차원 축소 미적용, 방법론 #2: PCA 기반, 방법론 #3: t-SNE 기반).

군집 분석을 진행하기에 앞서 이때 필요한 최적의 군집 수(k)를 선정하기 위해 실루엣계수를 활용하였다. 그 결과, 방법론 #1의 K-means($k=6$)의 경우를 제외한 모든 군집 방법에서 $k=2$로, 19번 지역을 두 개로 구분하는 것이 적절하다는



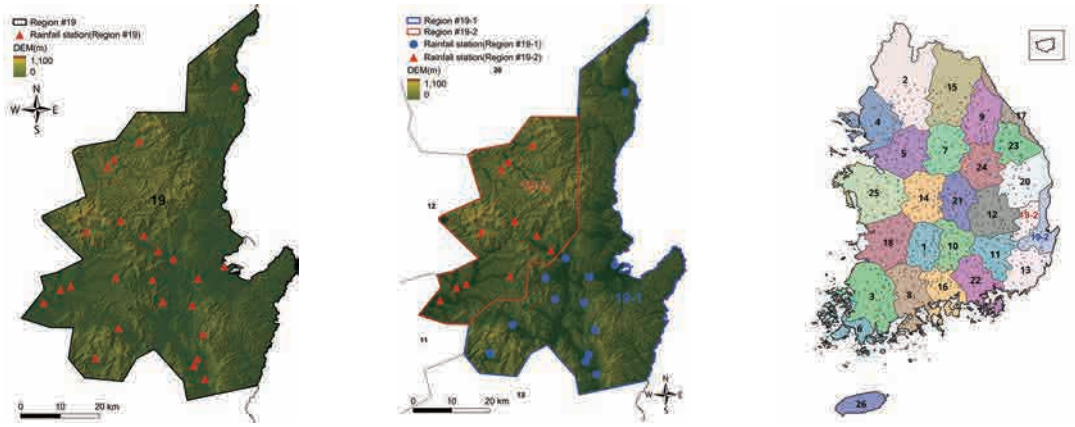
(a) 19번 최종 군집 (b) H_1 (c) H_2 (d) H_3

그림 4. 19번 지역 재구분 최종 군집 및 이질성 척도 결과

결과가 도출되었다. 군집 결과는 방법론 #1, #2, #3에 대해 적용한 세 가지 군집 기법별로 9가지 최적 군집 조합을 얻었다. 이후 각 9가지 군집 결과에 대해 이질성 척도(H_1, H_2, H_3)를 적용하여 동질 여부를 평가하였다. 이질성 척도 분석 결과, 모든 군집의 H_1, H_2, H_3 값이 2 미만인 경우를 기준으로 평가하였을 때, 방법론 #1의 FCM과 방법론 #3의 t-SNE+FCM 조합이 해당 조건을 충족하였다. 반면, 이들 조합을 제외한 방법론에서는 특정 군집의 H가 2 이상으로 이질함이 확인되었다. 이에 따라 방법론 #1의 FCM과 방법론 #3의 t-SNE+FCM은 이질성 척도가 군집 간에 비교적 균등하게 분포하는 안정적인 결과를 보였다.

종합적으로 9가지 군집 조합을 비교한 결과, 차원 축소를 적용하지 않은 방법론 #1의 FCM 기법이 군집 간 공간적 분리도와 군집 내부의 동질성을 비교적 안정적으로 나타내는 것으로 평가되었다. 방법론 #1의 FCM은 다른 조합에 비해 전반적으로 낮은 이질성 척도 값을 보여, 본 연구에서는 이를 19번 지역의 재구분 최종 군집 결과로 선정하였다. 최종 군집 결과는 그림 4(a)에 제시된 바와 같이 기존 19번 동질지역의 관측소들이 두 개의 하위 동질지역으로 구분된 형태를 보였다.

최종 선정된 군집 결과를 지리적으로 시각화하



(a) 19번 지역 재구분 전 (b) 19번 지역 재구분 전 (c) 신규 동질지역 최종 구분안

그림 5. 19번 재구분 최종 군집

였으며, 이를 그림 5에 제시하였다. 기존 19번 지역은 동해안의 경북 청송군, 포항시, 경주시를 포함하고 있으며, 그림 5(a)와 (b)는 재구분 전후의 관측소 위치와 공간 분포의 변화를 나타내었다. 재구분된 하위 지역은 19-1번과 19-2번으로 구분하여 표기하였다. 재구분 결과, 19-1번 지역은 주로 해안 및 내륙에 위치한 관측소들로 구성되었으며, 19-2번 지역은 대체로 내륙 위주의 지점들로 구성되었다. 마지막으로 그림 5(c)는 이러한 재구분 결과를 기존 26개 동질지역 체계에 반영한 결과를 함께 제시하였다.

4. 재구분된 동질지역의 검증 및 확률강우량 산정

군집 분석을 통해 재구분된 동질지역의 타당성을 검증하기 위해, 재구분 전의 19번 지역과 재구분 후 19-1 및 19-2 동질지역을 대상으로 확률강우량을 산정하고 그 변화를 비교하였다. 확률강우량 산정에는 기존 지침과의 일관성을 유지하기 위해 확률분포형으로 generalized extreme value(GEV) 분포를 동일하게 적용하였으며, 이를 통해 19번 지역의 확률강우량을 재산정하였다.

분석의 대표성을 위해, 19번 지역 내 24개 관측소 중 자료 보유 기간이 가장 긴 포항(24021138, 64개년) 및 영천(20121281, 52개년) 지점을 대표 관측소로 선정하여 확률강우량을 제시하였다. 두 지점은 각각 19번 하위 지역인 19-1번(포항(24021138)과 19-2번(영천(20121281)에 포함되어 있어, 지역 재구분에 따른 확률강우량의 변동 특성을 분석하기에 적합하였다. 그림 6은 포항(24021138) 및 영천(20121281) 지점의 재현기간 10년, 50년, 100년, 200년에 대한 지속기간별 확률강우량이다. 지역 재구분 전후의 확률강우량을 비교한 결과, 그림 6의 첫 번째 줄은 포항(24021138) 지점으로 모든 재현기간 및 지속기간에서 확률강우량이 상승하는 경향을 보인 반면, 두 번째 줄인 영천(20121281) 지점은 전반적으로 하락하는 대조적인 양상을 나타냈다. 표 1은 두 관측소의 재현기간별 확률강우량 변화 비율(%; 재구분 전 대

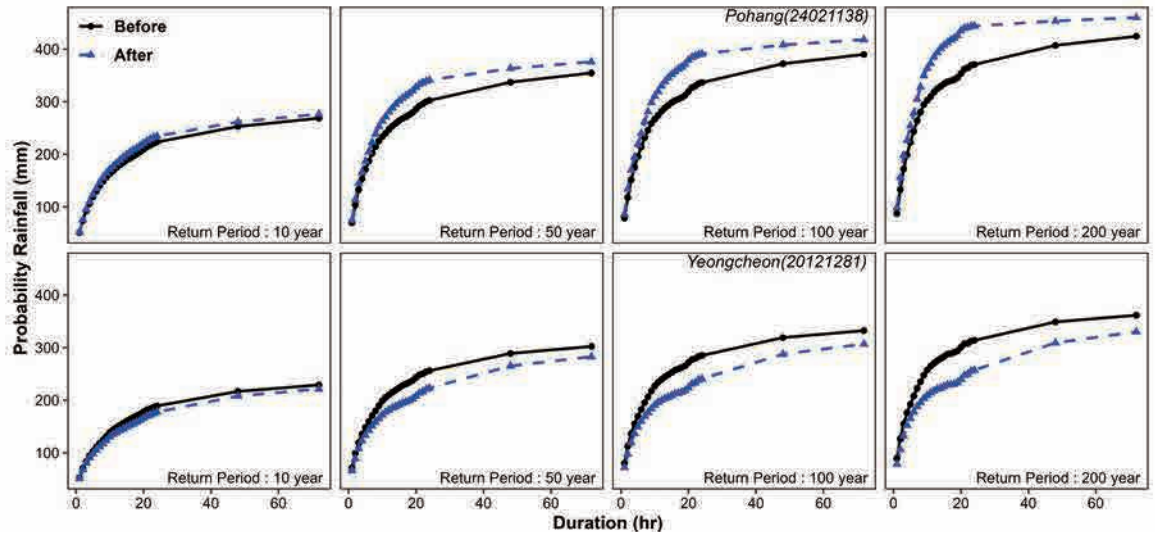
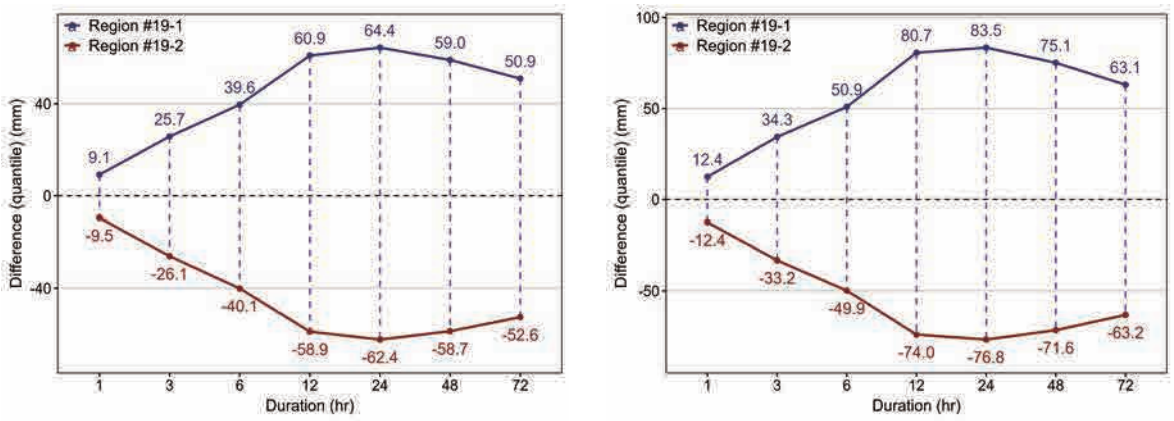


그림 6. 포항(24021138) 및 영천(20121281)의 재구분 전후 확률강우량 비교(상단 포항지점, 하단 영천지점)

표 1. 포항(24021138) 및 영천(20121281)의 재구분 전후 대비 확률강우량 변화 비율(%)

RP (yr)	비율(%)													
	Duration (hr)													
	1	3	6	12	24	48	72	1	3	6	12	24	48	72
	Pohang(24021138)							Yeongchoen(20121281)						
10	2	2.8	4.1	5.1	5.1	4.2	3.5	-2.5	-3.6	-4.9	-6.3	-6.1	-5.1	-4.1
20	4.1	5.4	6.5	8.6	8.3	6.9	5.4	-4.7	-6.2	-7.3	-9.6	-9.2	-7.6	-6
30	5.4	7	7.9	10.7	10.3	8.4	6.4	-5.9	-7.7	-8.6	-11.5	-10.9	-9	-7
50	7.1	9.1	9.6	13.3	12.8	10.4	7.8	-7.6	-9.6	-10.2	-13.7	-12.9	-10.7	-8.3
100	9.7	12	11.9	17.1	16.2	13.1	9.6	-9.8	-12.1	-12.3	-16.6	-15.5	-12.9	-9.9
200	12.4	15.2	14.2	21	19.8	15.9	11.4	-12	-14.6	-14.3	-19.4	-18	-15	-11.4



(a) 재현기간 50년 (b) 재현기간 100년

그림 7. 19번 동질지역 재구분 최종 군집에 대한 지속기간별 확률강우량 변화량 비교

비 후의 변화량)을 산정하여 제시하였다. 분석 결과, 19-1번 지역의 포항 지점은 지속기간 1시간 기준 10년, 50년, 100년의 재현기간에서 각각 2.0%, 7.1%, 9.7%의 양(+)의 변화율을 보였다. 19-2번 지역의 영천 지점은 동일 조건에서 –2.5%, -7.6%, -9.8%의 음(-)의 변화율을 기록하며 포항 지점과 대칭성을 나타냈다. 이러한 대칭적 현상은 전 재현기간 및 지속기간에 걸쳐 일관되게 관찰되었으며, 표에 제시된 전체 데이터의 비율을 평균하였을 때, 포항은 +9.5%로 영천은 –9.8%로 근접한 변화율의 절대치를 보였다. 이는 기존 단일 동질지역 내에 상반된 강우 특성을 가진 관측소들이 혼재되었음 의미하며 재구분에 따라 두 관측소의 확률강우량은 강우 특성에 맞춰 상·하향 조정되었음을 실증하였다.

앞서 지역 재구분에 따른 확률강우량의 변화를 관측소별로 분석하였으며, 재구분된 하위 지역(#19-1, #19-2)을 대상으로 확률강우량 변동 폭

을 정량적으로 산정하였다. 그림 7에 따르면, 기존 19번 지역은 재구분 이후 하위 지역으로 구분되면서 지속기간별 확률강우량 변화 양상이 지역별로 상반되게 나타났다. 19-1번 지역의 경우, 모든 지속기간에서 재구분 전 대비 확률강우량이 증가하였고, 19-2번 지역은 전 지속기간에 걸쳐 모두 감소하는 경향이 확인되었다. 또한, 두 재현기간에서 지속기간 24시간일 때, 가장 큰 변화량이 확인되었다. 재현기간 50년(그림 7(a))의 경우, 19-1번 지역이 평균 64.4 mm 증가하였고, 19-2번 지역에서는 -62.4 mm 감소하였다. 재현기간 100년(그림 7(b))에서도 동일 지속기간(24시간) 확률강우량이 19-1번 지역은 83.5 mm 증가, 19-2번 지역은 -76.8 mm 감소의 폭을 기록하였다. 또한, 두 재현기간 모두 지속기간 24시간까지의 변동 폭이 점진적으로 증가하다가 이후에는 다소 완화되는 경향을 보였다.

종합하면, 군집 분석 기반 동질지역 재구분 결과, 기존 동질지역과 달리 하위 지역별로 상반된 확률강우량 변동이 확인되었다. 19-1번 지역은 상승, 19-2번 지역은 하락하는 대조적 양상을 보였는데, 이는 동질지역 내에 특정 관측소의 강우 특성이 2017년 이후 변화되어 재구분을 통해 분리되었음을 보여준다. 또한, 변화 폭이 지속기간 24시간에서 최대치를 기록한 점은 태풍 및 집중호우과 같은 극한 강우 사상이 중단기 지속기간에 집중되고 있음을 시사한다.

5. 결론

본 연구에서는 기후변화로 인한 변화된 극한 강우 특성을 반영하기 위해, 현 지침(환경부, 2019)에 따라 설정된 수문학적 동질지역의 타당성을 검토하고 군집 해석 기법을 활용한 동질지역 재구분을 수행하였다. 2024년까지의 최신 강우 자료를 적용하여 검토한 결과, 동질지역 19번에서 수문학적 동질성 가정이 성립되지 않는 것으로 확인되었다. 이에 따라 19번 지역을 대상으로 강우 및 공간적 특성을 반영한 다차원 입력 변수를 구축하고 다양한 군집 분석 기법(k-means, GMM, FCM)과 차원 축소 기법(PCA, t-SNE)을 조합하여 동질지역 재구분을 수행하였다. 그 결과, 차원 축소를 적용하지 않은 FCM 군집 기법이 군집 간 공간적 분리와 군집 내부의 동질성을 비교적 균형 있게 만족하는 것으로 나타났다. 이를 토대로 기존 19번 동질지역을 변화된 강우 특성에 따라 두 개의 하위 동질지역(19-1, 19-2)으로 재구분함으로써, 각 군집 내 수문학적 동질성을 확보하였다. 재구분된 하위 지역을 대상으로 확률강우량을 산정한 결과, 기존 단일 동질지역 대비 상반된 변화 양상이 확인되었다. 해안가 관측소를 포함하는 19-1번 지역은 상승하고, 내륙 중심의 19-2번 지역은 하락하며 각각 평균 +9.5%와 −9.8%라는 대칭적인 확률강우량의 변화율을 나타내었다. 이는 기후변화에 따른 강우 특성의 변화가 동질지역 내 이질성이 발생하였음을 시사하며, 재구분을 통해 서로 다른 강우 특성을 보이는 관측소들이 분리되었음을 보여준다. 특히 지속기간 12시간 및 24시간에서 차이가 뚜렷하게 관찰되었으며, 이는 힌남노(2022)와 같은 극한 강우 사상의 영향으로 기존 동질지역 내에 강우 특성이 변화되었음을 의미한다. 결과적으로 이러한 분석은 동질지역 설정 방식이 지역빈도해석 기반 확률강우량 산정 결과에 직접적인 영향을 미칠 수 있음을 보여준다.

종합하면, 본 연구는 최신 강우자료를 활용하여 기후변화로 인한 극한 강우 특성 변화가 기존

수문학적 동질지역 설정에 영향을 미칠 수 있음을 확인하고, 군집 분석을 적용한 동질지역 재구분 사례를 제시하였다. 본 연구팀에서 제안한 재구분 결과는 지역빈도해석 체계의 개선 가능성을 보여주는 사례로, 향후 홍수량 산정 및 설계기준 고도화를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 지속적인 기후변화로 인해 강우 특성의 시간적 변화가 뚜렷해질 경우, 비정상성을 고려한 빈도해석과 동질지역 구분 방법에 대한 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다. 이러한 관점에서 최근 제안되고 있는 비정상성 지역빈도해석 및 동질지역 구분 연구(Ahn et al., 2018; Nam et al., 2015)는 향후 지역빈도해석 연구가 비정상성을 고려한 방향으로 확장될 필요성을 시사한다.

참고문헌

Ahn, H., Kim, S., Jung, C., and Heo, J.-H., 2018. Identification of homogeneous regions considering trends in location parameter of nonstationary Gumbel distribution in the upper stream area of the Nakdong River. In Proceedings of the KSCE 2018 Convention, 243-244. Korean Society of Civil Engineers, Seoul, Republic of Korea.

Bezdek, J. C., Ehrlich, R., and Full, W., 1984. FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm. Computers & Geosciences, 10(2-3), 191-203.

Dempster, A. P., Laird, N. M., and Rubin, D. B., 1977. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 39(1), 1-38.

Heo, J.-H., Lee, Y. S., Shin, H., and Kim, K.-D., 2007. Application of regional rainfall frequency analysis in South Korea (I): Rainfall quantile estimation. Journal of the Korean Society of Civil Engineers B, 27(2B), 101-111.

Hosking, J. R. M., and Wallis, J. R., 2005. Regional frequency analysis: An approach based on L-moments. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

Hotelling, H. (1933). Analysis of a complex of statistical variables into principal components. Journal of Educational Psychology, 24(6), 417-441.

Lee, Y. S., Heo, J.-H., Nam, W. S., and Kim, K.-D., 2007. Application of regional rainfall frequency analysis in South Korea (II): Monte Carlo simulation and determination of appropriate method. Journal of the Korean Society of Civil Engineers B, 27(2B), 113-123.

Lim, H.-J., 2009. Estimation of probabilistic rainfall in the Han River basin using the K-means clustering method. Master's thesis, Yonsei University, Seoul, Republic of Korea.

MacQueen, J. B., 1967. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, 1, 281-297.

Ministry of Environment, 1997. Standard guidelines for flood discharge estimation. Ministry of Environment, Sejong, Republic of Korea.

Nam, W., Kim, H., Joo, K., and Heo, J.-H., 2015. The identification of a homogeneous region for nonstationary regional frequency analysis. In Proceedings of the KSCE 2015 Convention, 123-124. Korean Society of Civil Engineers, Seoul, Republic of Korea.

Pearson, K. (1901). On lines and planes of closest fit to systems of points in space. Philosophical Magazine, 2(11), 559-572.

van der Maaten, L. J. P., and Hinton, G. E., 2008. Visualizing data using t-SNE. Journal of Machine Learning Research, 9, 2579-2605.

도시 물순환 시스템 분야에서의 경쟁 세션 운영 사례

Water for future
학술/기술 기사
03

박상진
고려대학교
건축사회환경공학과 석사과정
sjsj328@korea.ac.kr

정현우
고려대학교
건축사회환경공학과 박사과정
jhw950930@gmail.com

정동휘
고려대학교
건축사회환경공학부 교수
sunnyjung625@korea.ac.kr

1. 서론

국제 연구교류는 다양한 분야에서 보편화되고 있다. 국제화 흐름 속에서 수자원 분야에서도 학계 및 연구기관부터 산업 현장까지 다양한 연구인력들로 구축된 연구 네트워크를 토대로 지속적인 교류가 수행되고 있다. 지식과 경험 공유를 목표로, 연구 네트워크는 학술대회, 워크숍, 현장 견학 등의 다양한 형식으로 운영된다. 최근에는 특정 문제에서 서로 다른 접근법을 비교하는 경쟁 형식의 연구교류도 지속적으로 이루어지고 있다.

본고에서는 다양한 수자원 분야 중 도시 물순환 시스템 분야에서 경쟁 세션의 운영과 발전에 대해 정리하였다.

도시 물순환 시스템 분야 중, 상수도 관망과 우수관망 분야를 대표하는 국제학회인 WDSA/CCWI (International Joint Conference on Water Distribution Systems Analysis & Computing and Control in the Water Industry)와 UDM (Urban Drainage Modelling)을 중심으로 그 사례를 살펴보고자 한다.

2. 도시 물순환 시스템 분야에서의 경쟁 세션

도시 물순환 시스템 분야에서 최초의 경쟁 세션은 'The Battle of the Network Models'로, 1985년 미국 뉴욕주 버펄로에서 개최된 학술대회 'Computers in Water Resources'의 세션으로 진행되었다. 상수도 관망 설계 문제에서 최적화 모델과 수리학적 해석의 결합 연구 활성화를 목적으로 기획되어, 그림 1과 같은 형태의 가상 상수도 관망인 'Anytown'에서 증설에 따른 총 설계 비용의 최소화 결과를 평가하였다 (Walski et al., 1987). 결과에 영향을 미치는 펌프 운전과 탱크 수위 등의 운영 조건은 제약식으로 평가에 반영하였다. 해당 경쟁 세션에서는 다음과 같은 결론을 도출하였다: ①탱크의 위치와 규모가 최적해에 중대한 영향을 미친다. ②반드시 펌프 효율에 대한 면밀한 고려 이후 관망 규모 산정을 진행해야 한다. ③관망 최적화 모델은 관경 선택에 있어 연구자를 보조할 수는 있지만, 실현 가능한 정확한 해법의 도출은 연구자의 공학적 판단 능력을 요구한다.

앞선 결론을 통해, 도시 물순환 시스템 설계 문

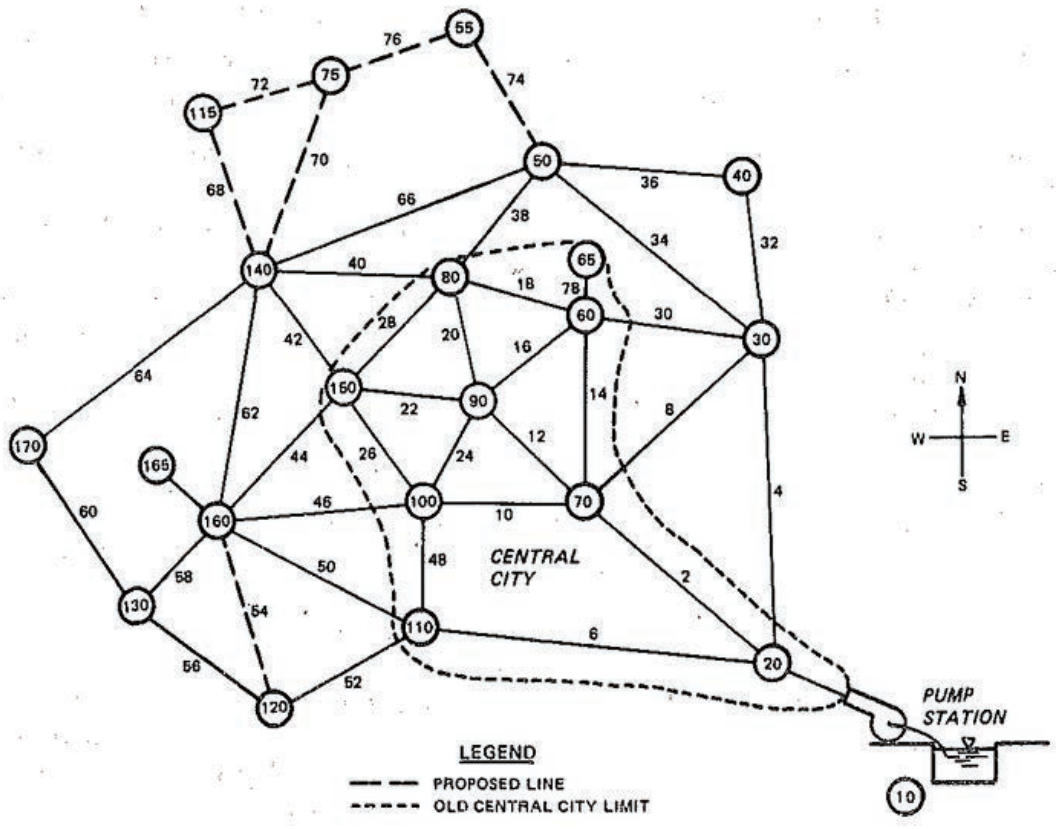


그림 1. Anytown의 상수도 관망 형태 (Walski et al., 1987)

제에 최적화 모델을 적용할 필요성이 본격적으로 인식되기 시작했다. 이후 상수도 관망 설계 연구 전반에서 최적화 알고리즘의 도입이 하나의 연구 흐름으로 대두되었다.

2.1. 상수도 분야에서의 경쟁 세션: WDSA/CCWI를 중심으로

'The Battle of the Network Models' 이후, 상수도 관망에 주안점을 둔 국제 학회 WDSA (Water Distribution Systems Analysis)에서 경쟁 세션이 도입되었으며, 최근까지 WDSA에서 경쟁 세션이 주기적으로 진행되고 있다 (표 1).

본 절에서는 WDSA에서 개최된 경쟁 세션 주제의 변화에 따라 각 경쟁 세션에서 다룬 주요 연구 주제에 대한 내용을 분석하였다.

WDSA에서 상수도 분야 최초의 경쟁 세션은 2006년에 진행되었다. 2001년 9.11 테러 이후 상수도 관망에 대한 공격 가능성이 대두되며, 관망 모델의 신뢰성 확보와 수질 오염 조기 탐지가 핵심 해결 과제로 떠올랐다. 이러한 배경으로 2006년부터 진행된 3번의 경쟁 세션은 상수도 관망의 계획 및 운영에 필요한 모델링 역량 검증에 초점을 맞추었으며, 구체적으로 수질 오염 탐지 센서의 최적 배치 (Ostfeld et al., 2008)와 관망 모델의 보정 정확도 검증 (Ostfeld et al., 2012), 그리고 관망 확장 시나리오에서의 설계 최적화(Marchi et al., 2014)를 다루었다.

2014년을 기점으로 경쟁 세션은 누수 관리와 자산관리에 초점을 맞추기 시작하였다. 상수도 관망에서 인프라의 설계 비용보다 운영 비용의 중요성이 주목받으며 설계 비용 투자보다 기존 시설의 효율적인 운영이 강조되었다.

이에 대응하기 위해 누수량 저감 설계 방법론 (Giustolisi et al., 2016)와 DMA (District Metered Area)과 체계적 누수 관리 (Taormina et al., 2018)를 위한 문제가 출제되었다 (그림 2).

한편, 스마트워터 기술을 통해 실시간 모니터링이 가능해지며, 사이버 공격과 자연재해 시나리오에서의 신속한 탐지 및 대응 역량이 주요한 연구 주제로 떠올랐다. 이에 따라 2017년부터 경쟁 세션은 위기 상황에서의 시스템 대응 능력 평가로 주제가 확장되었다. 이 시기에는 SCADA 데이

표 1. 역대 상수도 분야 국제학회에서의 경쟁 세션 주제 목록

개최연도	개최 학회	개최 장소	경쟁 세션 주제
2006	WDSA	Cincinnati (USA)	Water Sensor Networks
2010	WDSA	Tucson (USA)	Water Calibration Networks
2012	WDSA	Adelaide (Australia)	Water Networks II
2014	WDSA	Bari (Italy)	Background Leakage Assessment
2016	WDSA	Cartagena (Colombia)	Water Networks District Metered Areas
2017	WDSA	Sacramento (USA)	Attack Detection Algorithms
2018	WDSA/CCWI	Kingston (Canada)	Post-Disaster Response and Restoration
2020	WDSA/CCWI	Beijing (China)	Leakage Detection and Isolation Methods
2022	WDSA/CCWI	Valencia (Spain)	Intermittent Water Supply
2024	WDSA/CCWI	Ferrara (Italy)	Water Demand Forecasting
2026 (예정)	WDSA/CCWI	Paphos (Cyprus)	Water Futures

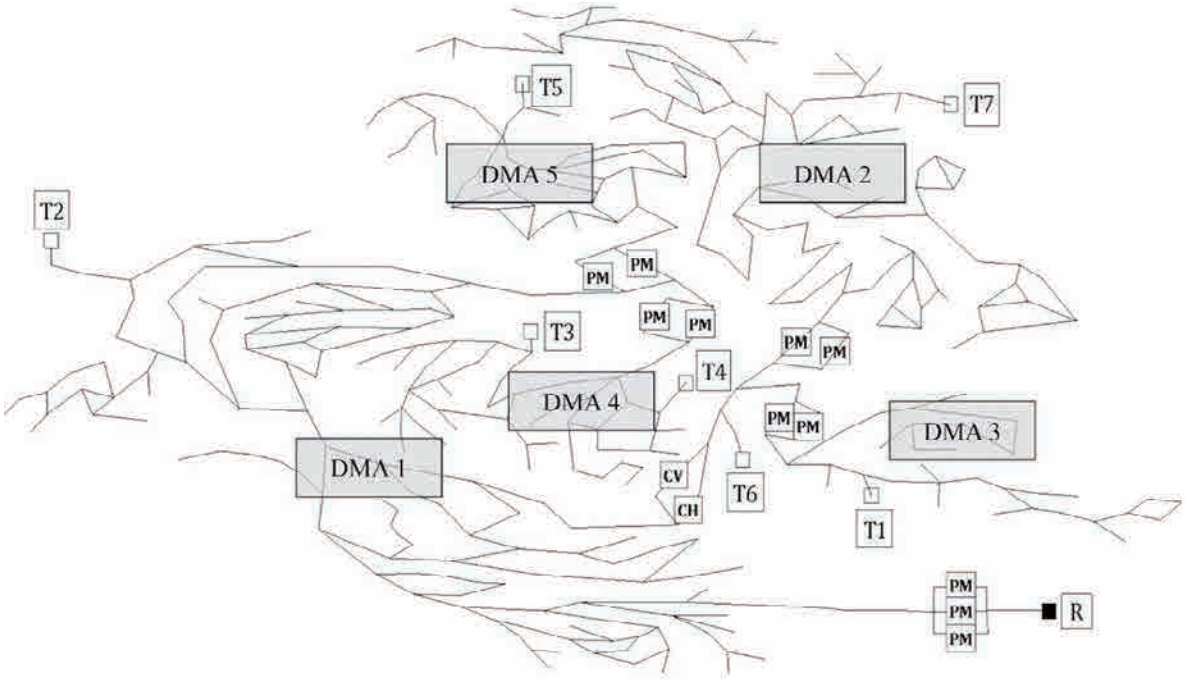


그림 2. 2014년 경쟁 세션에서 제공된 상수도 관망인 TOWN-C (Giustolisi et al., 2015)

터 기반의 사이버 공격 탐지 (Saldarriaga et al., 2019), 지진 후 관망 복구 전략 최적화 (Paez et al., 2020), 누수 탐지 및 위치추정 (Vrachimis et al., 2022) 문제가 출제되었다.

2020년 이후부터 최근까지는 기후변화로 인해 상수도 관망의 수요 패턴이 변화하고 연속 급수의 안정성이 크게 변동하는 지역들이 증가함에 따라 안정적 공급을 위한 새로운 방법론의 필요성이 대두되었다. 이러한 시대 흐름에 맞추어, 2022년부터 경쟁 세션은 불확실한 운영 환경에서의 의사결정 문제를 다루고 있다. 따라서 이 시기에는 간헐적 급수 환경에서 연속적 급수로의 전환 전략 (WDSA/CCWI Joint Conference, 2022) 및 단기 수요 예측 방법론 (Alvisi et al., 2025)의 문제가 출제되었다. 2026년 개최 예정인 “Battle of the Water Futures”에서는 단기 성능 평가를 포함하여 기후 변화와 수요 변동, 인프라 노후화 등 복합적 요인으로 인한 장기적 불확실성을 고려한 상수도 관망의 설계 및 운영 전략을 종합적으로 검토하는 것을 목표로 한다 (Alvisi et al., 2026). 해당 경쟁 세션에서는 다양한 미래 시나리오에 대한 강건성, 적응성, 그리고 단계적 의사결정 전략을 평가 대상으로 삼아, 장기적 관점에서 지속 가능한 상수도 관망 관리 방향 도출을 도모할 수 있다.

본 절에서 정리한 경쟁 세션의 변화 양상은 상수도 관망 분야 연구에서 각 시기별로 우수한 해를 규정하는 기준의 전환을 보여준다. 경쟁 세션의 초점은 설계 비용 최소화에서 운영 효율 증대, 비정상 상황 탐지 및 복구, 그리고 불확실성 아래에서의 의사 결정으로 확장되어 왔다. 이와 같이 경쟁 세션은 핵심 연구 주제를 공통의 평가 지표로 표준화하여, 서로 다른 방법론을 객관적으로 검증할 수 있게 한다.

2.2. 우수관망 분야에서의 경쟁 세션: UDM을 중심으로

최근 우수관망 분야에서 가장 핵심 이슈는 기후변화와 급격한 도시화이다. 기후변화로 인한 극한강우의 발생이 빈번하고, 도시화에 의한 불투수면적 급증은 도시 홍수의 발생 빈도와 규모가 전 세계적인 문제로 자리 잡았다. 이러한 이슈의 장기적 대응을 위해 세계적으로 도시 홍수 저감과 지속가능성 향상을 위한 방법론을 적극 도입하고 있다.

최근 가장 주목받는 자연기반해법 (Nature-based Solutions, NBS)은 증발산을 통한 도시 냉각, 식생다양성 증진, 삶의 질 향상과 같은 부가적 편익을 함께 도모할 수 있는 해법이다 (Oberascher et al., 2024). 우수관망의 배수 성능을 개선하는 동시에 자연기반해법 적용에 따른 편익 정량화 및 극대화는 다양한 연구가 수행되고 있으며, 연구흐름을 반영하여 우수관망 분야에서 자연기반해법의 적용에 대한 경쟁 세션으로 2025년, 오스트리아에서 UDM NBS Combat (Combat of Retrofitting Urban Drainage Networks with Nature-Based Solutions)이 개최되었다 (그림3)

해당 경쟁 세션에서는 오스트리아 인스브루크를 대상으로 자연기반해법의 한 범주인 저영향개발 (LID, Low Impact Development)의 다양한 시설 유형 최적 설계를 수행하였다 (그림 4).

제시된 7개 유형의 저영향개발은 설치 가능한 토지 특성에 따라 녹지 공간, 주거 공간, 그리고 도로 공간에 적용되는 유형으로 구분되며, 세부 매개변수 설정에 따라 서로 다른 종류로 정의되어 문제에 제시된다 (표 2).

저영향개발을 적용해 설계된 우수관망의 성능은 총 7가지 목적함수를 통해 종합적으로 평가된다. 이 목적함수들은 저영향개발의 비용 효율성, 수리적 성능, 그리고 부가적 편익을 균형 있게 반영하도록 구성되어 있다 (표 3). 이러한 다목적 평가 체계를 통해, 저영향개발은 침수 저감 효과에 국한되지 않고 부가적 측면을 포함한 종합적인 성능 평가의 대상으로 다루어질 수 있다.

이와 같이 다수의 목적함수를 동시에 고려해야 하는 평가 구조는 참가자들에게 상당한 계산적 부담을 요구한다. 더불어, 부정류 기반으로 해석되는 우수관망은 정상류 기반 해석이 이루어지는 상수도 관망에 비해 계산 비용이 본질적으로 많이 든다. 이러한 제약 속에서 계산 효율 확보를 위해 공통으로 제시된 방법론은 최적화 탐색 공간의 축소다. 대부분의 참가자가 사전 필터링이나 소유역 군집화를

그림 3. UDM NBS Combat 세션 발표 현장

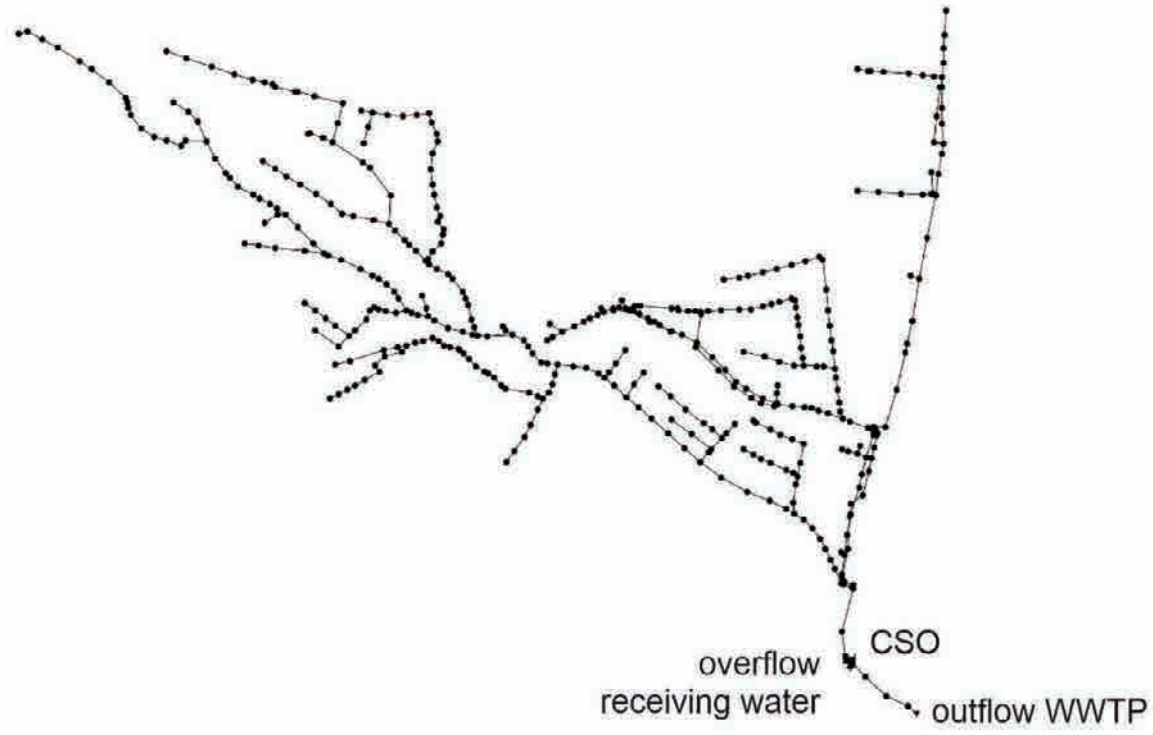


그림 4. 오스트리아 인스브루크 시의 우수관망 (Oberascher et al., 2024)

활용해 탐색 공간을 축소하는 방법론을 활용함을 확인할 수 있었다. 또한 절반 이상의 참가자들이 다목적 최적화 알고리즘을 활용하되, 목적함수를 단계적으로 적용하여 탐색 공간을 줄이는 전략을 택했다. 이는 제한된 계산 자원 내에서 선택지를 체계적으로 좁혀가는 전략이 합리적임을 시사한다.

3. 우선순위 부여를 통한 저영향개발의 다목적 설계법

앞서 소개한 UDM주제에 대해 필자는 수리학적 해석 기반의 각 소유역의 순위 부여 후 우선순위의 소유역부터 저영향개발을 설치하는 전략을 내세웠다.

3.1. 방법론

제시한 순위 부여 기준은 총 4가지로, 합산한 물리량과 물리량 합산 기준에 따라 구분된다 (표 4). 여기서 영향을 주는 정도란, 해당 절점에서 유입량이 발생했을 때 전체 시스템이 얼마나 영향을 많이 받는지를 의미한다. 반면 영향을 받는 정도란, 다른 절점에서 흘러나오는 유입량으로부터 해당 절점이 영향을 받는 정도를 뜻한다. 각 절점별 최대 유량은 첨두유량일 때의 유량값을 의미하고, 절점별 최대 수심 비율은 해당 절점에서 홍수가 일어날 가능성을 나타내는 물리량이다. 이를 히트맵 형식으로 그림 5와 같이 제시하였다.

제안한 평가 기준에 따른 절점별 순위에 따라 각 절점과 연결된 소유역에 먼저 저영향개발이 설치된다. 저영향개발을 모두 설치한 뒤, 각 목적함수에 따른 모의 결과에서 총예산에 대한 제약 조건에 따라 저영향개발 설치를 수행한다 (그림 6). 각 우선순위 평가 기준들을 비교하여 가장 총점이 높은 기준에 따른 설계를 최종 설계법으로 결정한다.

표 2. UDM NBS Combat에 제시된 저영향개발 유형별 세부 매개변수 (Oberascher et al., 2024)

Layer	Parameter	Soakaway	Bio retention system	Dry swale	Extensive Green roof	Intensive Green roof	Cistern	Permeable pavement
Surface	Berm Height (mm)	2500	300	300	5	10	-	1
	Vegetation Volume Fraction (-)	0	0	0	0	0	-	0
	Surface Roughness (n)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-	0.1
	Surface Slope (%)	0	0.1	0.1	2	0.5	-	1
Soil	Thickness (mm)	500	300	300	100	250	-	100
	Porosity (-)	0.437	0.437	0.453	0.56	0.56	-	0.3
	Field Capacity (-)	0.06	0.105	0.19	0.35	0.35	-	0.2
	Wilting Point (-)	0.02	0.047	0.085	0.02	0.02	-	0.15
	Conductivity (mm/h)	360	30	7	73.71	73.71	-	360
	Conductivity Slope (-)	10	30	30	18.33	18.33	-	10
	Suction Head (mm)	3.5	61	110	34.45	34.45	-	3.5
Storage	Thickness (mm)	500	500	-	-	-	1000	100
	Void ratio (-)	0.25	0.35	-	-	-	-	0.633
	Seepage Rate (mm/h)	36	7	7	-	-	-	7
	Clogging Factor (-)	0	0	-	-	-	-	-
Drainage Mat	Thickness (mm)	-	-	-	9.97	9.97	-	-
	Void Fraction (-)	-	-	-	0.55	0.55	-	-
	Roughness (n)	-	-	-	0.1	0.1	-	-
Drain	Flow Coefficient (-)	0	0	0	0	0	156	-
	Flow Exponent (-)	-	-	-	-	-	0.5	-
	Offset (mm)	-	-	-	-	-	6	-
	Drain delay (h)	-	-	-	-	-	6	-

표 3. UDM NBS Combat 목적함수 및 의미 (Oberascher et al., 2024)

목적함수	의미	식
총 비용	각 저영향개발 유형별로 발생하는 고정 비용과 설치 면적에 비례한 단위 비용을 합산한 값	$Total\ Cost = \sum_{i=1}^{NS}\sum_{j=1}^{noC}(BC_i + UC_i * A_{ij})$ ✓ BC: 설치 시 고정 비용 ✓ UC: 1 m^2당 단위 비용 ✓ A: 저영향개발의 면적
식생다양성	다양한 녹색 저영향개발 유형이 얼마나 균형 있게 적용되었는지를 판단하기 위한 항목으로, 네 가지 저영향개발 유형의 설치 면적 중 최소값	$Biodiversity = Min(\sum_{j=1}^{noC} A_{i=2,j}, \sum_{j=1}^{noC} A_{i=3,j}, \sum_{j=1}^{noC} A_{i=4,j}, \sum_{j=1}^{noC} A_{i=5,j})$ ✓ A: 저영향개발의 면적
홍수 저감량	저영향개발 설계 이후 총 모의 기간 동안 전체 유역에서 발생한 홍수의 저감량	$\Delta V_F = V_{F,base\ scenario} - V_{F,NBS}$ ✓ $V_{F,base\ scenario}$: 기존 관망에서의 홍수량 ✓ $V_{F,NBS}$: 저영향개발을 설치한 관망에서의 홍수량
증발 증가량	도시 냉각의 효과를 반영하기 위한 항목으로, 저영향개발 설계 이후 전 유역에서 발생한 총 증발의 증가량	$\Delta E = E_{NBS} - E_{base\ scenario}$ ✓ E_{NBS}: 저영향개발을 설치한 관망에서의 증발량 ✓ $E_{base\ scenario}$: 기존 관망에서의 증발량
하수처리장 유입 증가량	저영향개발 설계 이후 하수처리장 내 유입의증가량	$\Delta V_{WWTP} = V_{WWTP,NBS} - V_{WWTP,base\ scenario}$ ✓ $V_{WWTP,NBS}$: 저영향개발을 설치한 관망에서의 하수처리장 내 유입량 ✓ $V_{WWTP,base\ scenario}$: 기존 관망에서의 하수처리장 내 유입량
월류 저감량	저영향개발 설계 이후 합류식 하수 월류의 감소량	$\Delta V_{CSO} = V_{CSO,base\ senario} - V_{CSO,NBS}$ ✓ $V_{CSO,base\ senario}$: 기존 관망에서의 합류식 하수 월류량 ✓ $V_{CSO,NBS}$: 저영향개발을 설치한 관망에서의 합류식 하수 월류량
수질	저영향개발 설계 이후 합류식 하수 월류를 통해 유출되는 부유물질(TSS)의 감소량	$\Delta M_{TSS} = M_{TSS,base\ senario} - V_{TSS,NBS}$ ✓ $M_{TSS,base\ senario}$: 기존 관망에서 합류식 하수 월류 내 부유물질량 ✓ $M_{TSS,NBS}$: 저영향개발을 설치한 관망에서의 합류식 하수 월류 내 부유물질량

이는 지표면(소유역)과 지하 공간(우수관망)을 통합적으로 고려한 방법론으로, 저영향개발 설계에 수리학적 원리를 효과적으로 적용한 전략이라는 점에서 의의를 지닌다. 아울러 복수의 목적함수를 활용함에도 불구하고, 단순 최적화 기법에 비해 계산 비용을 크게 절감할 수 있다는 장점이 있다.

3.2. 결과

해당 방법론을 통해 저영향개발이 설치될 소유

표 4. 각 소유역의 저영향개발 설치 우선순위 평가 기준

합산 물리량 / 물리량 합산 기준	각 절점별 최대 유량	각 절점별 최대 수심 비율
영향을 주는 정도	$Giving_{inflow} = \sum_{j=1}^{N_{node}} (Max.\ Inflow)_{ij}$ ✓ *Max. Inflow*: 절점의 최대 유량	$Giving_{depth} = \sum_{j=1}^{N_{node}} (Max.\ Depth\ Ratio)_{ij}$ ✓ *Max. Depth Ratio*: 절점의 최대 수심 비율
영향을 받는 정도	$Receiving_{inflow} = \sum_{i=1}^{N_{node}} (Max.\ Inflow)_{ij}$	$Receiving_{depth} = \sum_{i=1}^{N_{node}} (Max.\ Depth\ Ratio)_{ij}$

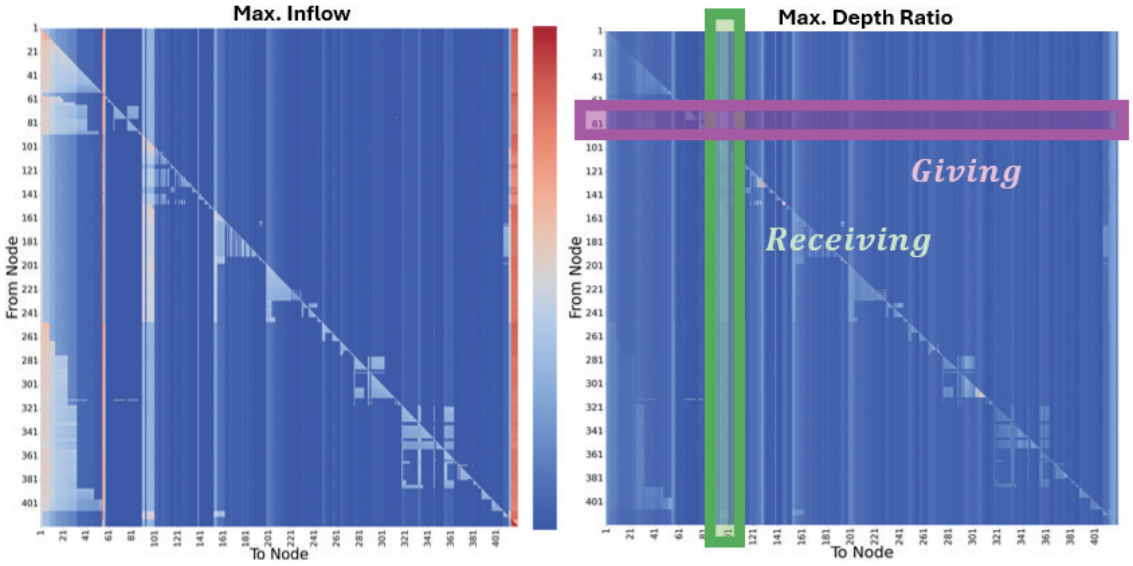


그림 5. 각 소유역의 저영향개발 설치 우선순위 산정 방법

역의 유출구가 되는 절점 수에 따른 종합 점수를 산정할 수 있다. 그리고 해당 점수를 4가지 우선순위 평가 기준에 따라 계산해, 저영향개발의 유형별로 어떤 우선순위 평가 기준이 가장 유리할지 비교해 볼 수 있다.

예를 들어, Bio Retention System의 경우, 유출구가 되는 절점 수가 20개일 때와 356개일 때 가장 유리한 우선순위 평가 기준이 나뉜다 (그림 7). 절점 수가 20개 이하일 경우, 절점별 최대 유량에 영향을 주는 정도를 우선순위 평가 기준으로 잡았을 때 가장 최적화된 설계가 가능하다. 20개 초과 356개 미만의 경우, 절점별 수심 비율에 영향을 주는 정도, 356개 초과의 경우 두 조건 모두가 가장 유리한 평가 기준으로 도출되었다.

분석 결과, 관망에 영향을 주는 정도에 따라 저영향개발을 설치할 때 설계 성능이 전반적으로 향상되었다. 이는 침수 피가 집중되는 하류 구간에 저영향개발을 배치하는 기존 접근보다, 우수관망

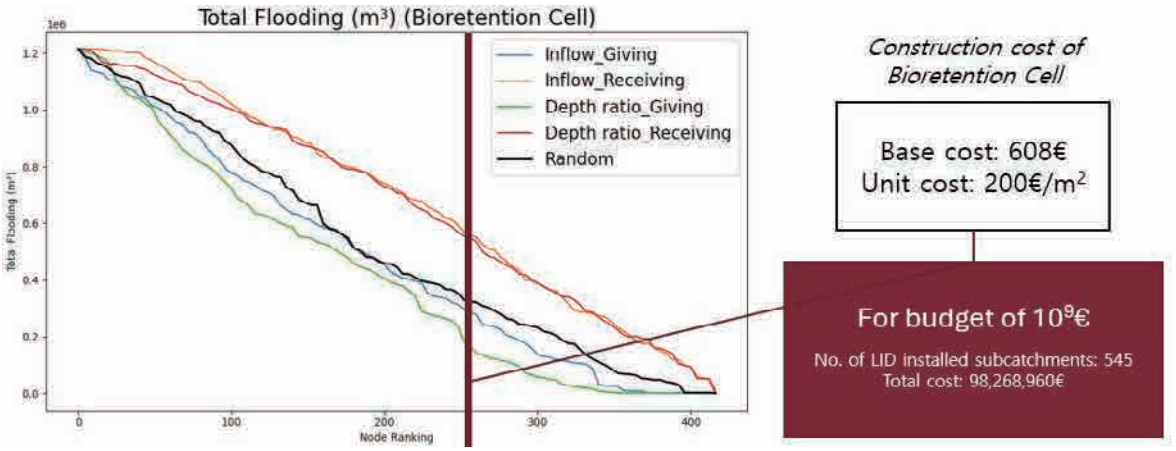


그림 6. 우선순위에 따른 저영향개발 설치 시 홍수의 저감 효과 분석

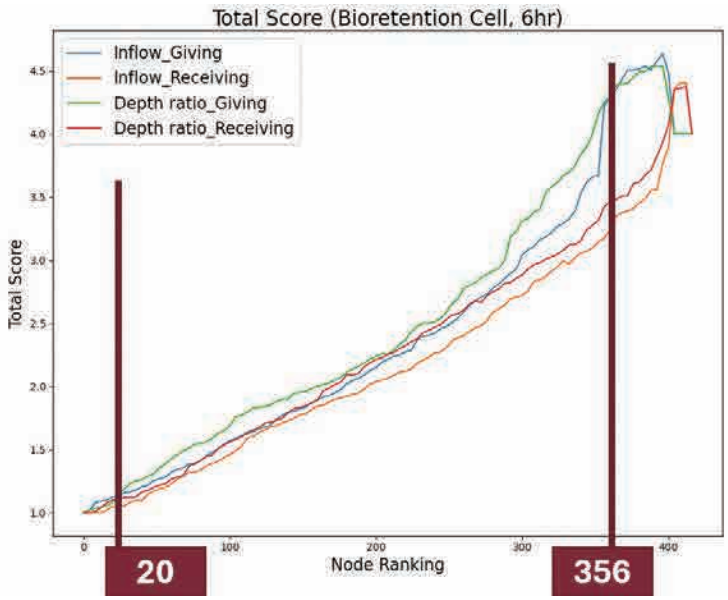


그림 7. Bio Retention System의 설계 결과

전반에 미치는 영향이 큰 상류 구간에 저영향개발을 설치하는 것이 전체 시스템을 고려한 수리학적 최적 설계에 더 부합함을 시사한다.

4. 결론

지금까지 도시 물순환 시스템 분야에서의 경쟁 세션에 대해 알아보았다. 이러한 경쟁 세션은 연구자들의 연구 의식을 고양시켜, 단시간에 집약적으로 연구할 수 있는 동기를 부여한다. 따라서 해당 주제와 관련된 경우 짧은 시간 안에 큰 진보를 꾀할 수 있어 학계의 발전에 유리하게 작용한다는 특징이 있다.

더 나아가, 경쟁 세션은 제시된 문제에만 국한하지 않고, 전반적인 도시 물순환 시스템 분야의 질적·양적 성장에 훌륭한 밑거름이 될 수 있다. 경쟁 세션에서 제공된 데이터는 경쟁 세션 문제를 응용하여 개인의 연구를 수행하는 데에 활용할 수 있

다. 경쟁 세션을 위해 제시된 자료들은 국제 학회에서 문제없이 공개할 수 있을 정도로 저명한 국제 석학에 의해 여러 차례 검증되었으며, 누구나 활용할 수 있는 오픈소스이므로 접근성이 좋기 때문이다. 돌아오는 5월에 진행될 경쟁 세션에서 발표될 참신한 방법론과, 해당 경쟁 세션에 영감을 받아 도출될 연구들이 벌써부터 기대가 된다.

5. 감사의 글

본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 기후변화 적응 수재해 관리 기술개발사업(R&D)의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2024-00398012).

참고문헌

Walski, T. M., Brill, E. D., Jr., Gessler, J., Goulter, I. C., Jeppson, R. M., Lansey, K., Lee, H.-L., Liebman, J. C., Mays, L., Morgan, D. R., & Ormsbee, L. (1987). Battle of the network models: Epilogue. Journal of Water Resources Planning and Management, 113(2), 191–203. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1987)113:2(191)

Ostfeld, A., Uber, J. G., Salomons, E., Berry, J. W., Hart, W. E., Phillips, C. A., Watson, J.-P., Dorini, G., Jonkergouw, P., Kapelan, Z., di Pierro, F., Khu, S.-T., Savic, D., Eliades, D., Polycarpou, M., & Ghimire, S. R. (2008). The battle of the water sensor networks (BWSN): A design challenge for engineers and algorithms. Journal of Water Resources Planning and Management, 134(6), 556–568. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2008)134:6(556)

Ostfeld, A., Salomons, E., Ormsbee, L., Uber, J. G., Bros, C. M., Kalungi, P., Burd, R., Zazula-Coetzee, B., Belrain, T., Kang, D., Lansey, K., Shen, H., McBean, E., Wu, Z. Y., Walski, T., Alvisi, S., Franchini, M., Johnson, D., Ghimire, S. R., & … Koppel, T. (2012). Battle of the water calibration networks. Journal of Water Resources Planning and Management, 138(5), 523–532. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000191

Marchi, A., Salomons, E., Ostfeld, A., Kapelan, Z., Simpson, A. R., Zecchin, A. C., Maier, H. R., Wu, Z. Y., Elsayed, S. M., Song, Y., Walski, T., Stokes, C., Wu, W., Dandy, G. C., Alvisi, S., Creaco, E., Franchini, M., Saldarriaga, J., Páez, D., & … McClymont, K. (2014). Battle of the water networks II. Journal of Water Resources Planning and Management, 140(7), 04014009. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000378

Giustolisi, O., Berardi, L., Laucelli, D., Savic, D., & Kapelan, Z. (2016). Operational and tactical management of water and energy resources in pressurized systems: Competition at WDSA 2014. Journal of Water Resources Planning and Management, 142(5), C4015002. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000583

Taormina, R., Galelli, S., Tippenhauer, N. O., Salomons, E., Ostfeld, A., Eliades, D. G., Aghashahi, M., Sundararajan, V., Pourahmadi, M., Banks, M. K., Brentan, B.,

Ito, E., Meyers, J., Mitchell, J., McKenzie, E., Vassilopoulos, S., & Polycarpou, M. M. (2018). Battle of the attack detection algorithms: Disclosing cyber attacks on water distribution networks. Journal of Water Resources Planning and Management, 144(8), 04018048. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000969

Saldarriaga, J., Bohorquez, J., Celeita, D., Vega, L., Paez, D., Savic, D., Dandy, G., Filion, Y., Grayman, W., & Kapelan, Z. (2019). Battle of the water networks district metered areas. Journal of Water Resources Planning and Management, 145(4), 04019002. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001035

Paez, D., Filion, Y., Castro-Gama, M., Quintiliani, C., Santopietro, S., Sweetapple, C., Meng, F., Farmani, R., Fu, G., Butler, D., Zhang, Q., Zheng, F., Diao, K., Ulanicki, B., Huang, Y., Deuerlein, J., Gilbert, D., Abraham, E., Piller, O., … Walski, T. (2020). Battle of postdisaster response and restoration. Journal of Water Resources Planning and Management, 146(8), 04020067. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001239

Vrachimis, S. G., Eliades, D. G., Taormina, R., Kapelan, Z., Ostfeld, A., Liu, S., Kyriakou, M., Pavlou, P., Qiu, M., & Polycarpou, M. M. (2022). Battle of the leakage detection and isolation methods. Journal of Water Resources Planning and Management, 148(12), 04022068. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001601

Oberascher, M., Funke, F., Satish, Rahul, Rajabi, M., Dastgir, A., Minaei, A., Back, Y., Chen, S., Hauser, M., Hajibabaei, M., Huynh Thi Ngoc, C., Leitao, J. P., Rauch, W., Kleidorfer, M., & Sitzenfrei, R. (2024). Combat of retrofitting urban drainage networks with nature-based solutions. In Proceedings of the 13th Urban Drainage Modelling Conference (UDM). Innsbruck, Austria.

Alvisi, S., Franchini, M., Marsili, V., Mazzoni, F., Salomons, E., Housh, M., Abokifa, A., Arsova, K., Ayyash, F., Bae, H., Barreira, R., Basto, L., Bayer, S., Berglund, E. Z., Biondi, D., Boloukasli Ahmadgourabi, F., Brentan, B., Caetano, J., Campos, F., … Zou, J. (2025). Battle of water demand forecasting. Journal of Water Resources Planning and Management, 151(10), 04025049. https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-6887

WDSA/CCWI Joint Conference. (2022). Battle of intermittent water supply instructions. https://wdsa-ccwi2022.upv.es/battle-of-water-networks/#downloads

Zanutto, D., Michalopoulos, C., Tsiami, L., Artelt, A., Brandt, J., Eliades, D., Vrachimis, S., Alvisi, S., Marsili, V., Mazzoni, F., Samartzis, P., Hammer, B., Koundouri, P., Polycarpou, M. & Savić, D. (2026). The Battle of the Water Futures. arXiv preprint arXiv:2511.22986.

머신러닝 기반의 연안 침수리스크 평가와 그린-그레이 하이브리드 방재 전략

Water for future
학술/기술 기사
04

김연중
한국환경연구원 부연구위원
anyseason@kei.re.kr

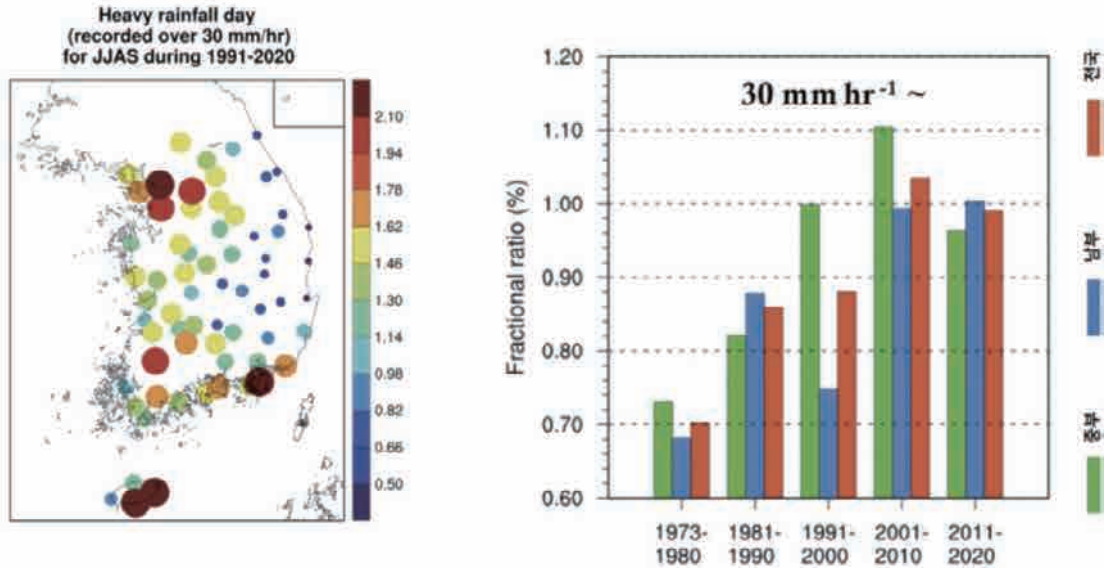
1. 서론

1.1 극단적 기상현상의 상시화와 연안의 위기

인류가 직면한 기후변화는 이제 먼 미래의 경고가 아닌 현실의 위협으로 다가오고 있다. 특히 한반도는 지난 10년간 강우강도가 점진적으로 증가하는 양상을 보이고 있으며, 무엇보다 단시간 집중호우의 발생빈도가 급격히 늘어나는 경향이 뚜렷해지고 있다. 이러한 변화는 기존 도시 배수 시스템의 설계 용량을 웃도는 강우로 인해 도시침수 피해로 직결될 가능성을 높이고 있다. 특히 태풍의 발생 위치가 과거보다 점차 북상해 우리나라에 미치는 영향이 증가하고 동시에 해수면 상승·폭풍해일·고파랑이 복합적으로 작용하는 연안 지역의 침수 취약성은 더욱 심화되고 있다. 이러한 현상들은 집중호우의 시공간적 분포 변화와 함께 우리 연안 도시에 마주한 물리적 외력의 변화를 시사하고 있다.

1.2 인구 집중과 연안 인프라의 노출

우리나라 연안 도시의 인구는 2012년 27%에서 2025년 28.4%로 지속적인 증가 추세를 보이고 있다. 부산 강서구와 같이 인구가 급증하는 지역은 해수면 상승이나 태풍 발생 시 잠재적 피해 규모가 기하급수적으



자료: 네이버 프리미엄콘텐츠(2023.5.23), "집중호우가 더욱 강력해지고 있다", 검색일: 2025.8.24.

그림 1. 집중호우의 시공간 분포(좌: 집중호우 발생일수, 우: 집중호우 비율: 30mm/hr 이상)

로 커질 수 있다. 실제로 2100년까지 해수면이 최대 82cm 상승(해양수산부, 2023)할 것이라는 전망은 연안 저지대 홍수와 염수 침투가 우리 인류 사회뿐만 아니라, 생태계에도 치명적인 리스크가 될 것임을 전문가들은 경고하고 있다.

1.3 하이브리드 인프라로의 패러다임 전환

과거의 연안 방재는 주로 제방, 방파제, 옹벽 등 콘크리트 구조물 중심의 '그레이인프라(Gray Infrastructure)'에 의존해 왔다. 그러나 이러한 방식은 막대한 건설 비용뿐만 아니라 해안 생태계 단절, 경관 훼손, 그리고 설계 용량을 초과하는 외력 발생 시 붕괴 위험이라는 한계를 지니고 있다. 이에 따라 최근 국제사회에서는 자연의 기능을 복원하여 방재 성능을 확보하는 '그린인프라(Green Infrastructure)' 또는 '자연기반해법(NbS, Nature-based Solutions)'이 대안으로 급부상하고 있다.

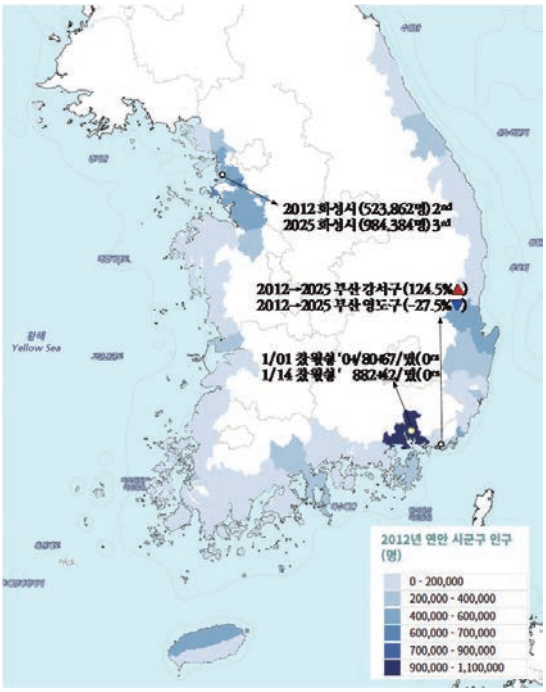
본 원고에서는 그린-그레이인프라를 활용한 침수 저감 효과를 정량적으로 평가할 수 있는 체계를 제안하고자 한다. 특히 머신러닝 기법을 활용하여 부산광역시를 대상으로 침수 리스크 평가 체계를 구축하고, 그린인프라 도입 시의 리스크 감소율을 분석한 사례를 상세히 소개하고자 한다.

2. 탄력적 연안관리를 위한 인프라 현황 및 가치

2.1 연안도시 인프라 유형

기후위기로 인해 심화되는 연안 침수 리스크에 효과적으로 대응하기 위해서는 전통적인 물리적 방어 시설과 자연의 완충 기능을 결합하여 방재 성능과 생태적 지속가능성을 동시에 확보하는 통합적 인프라 구축이 필수적이다.

먼저 그레이인프라(Grey Infrastructure)는 콘크리트 제방, 방파제, 배수관 등 인공적인 구조물과 공학 기술을 기반으로 구축되어 고파랑과 해일을 즉각적으로 차단하는 전통적인 물리적 인프라



자료: 연안포털, “연안통합지도서비스”, 검색일: 2025.9.1을 이용하여 저자 작성.

그림 2. 연안도시 행정별 인구수

이다. 이는 설계 빈도 내에서 예측 가능하고 신뢰할 수 있는 방어 성능을 보장하여 극한 재해 시 지역 안전을 강화하는 핵심적인 역할을 수행하지만, 고정적이고 경직된 구조적 특성으로 인해 급변하는 기후 변화에 적응하는 유연성이 부족하다. 또한, 분석 결과 침수 리스크에 가장 큰 영향을 미치는 요인이 불투수면이 많은 ‘도시지역 비율’로 나타난 점을 고려할 때, 그레이인프라 위주의 획일적 개발은 장기적으로 침수 취약성을 높일 우려가 있다.

반면, 그린인프라(Green Infrastructure)는 사구, 습지, 해안숲 등 자연적인 요소나 생태계 기능을 활용하여 파랑 에너지를 감쇄하고 침수 및 침식을 완화하는 자연기반해법(NbS)이다. 이는 빗물을 지표면에서 직접 흡수하여 유출량을 줄임으로써 국지적 홍수 위험을 낮추는 버퍼 역할을 수행하며, 머신러닝 분석 결과 연안 침수 위험 확률을 평균 약 6% 감소시키는 실질적인 효과가 확인되었다. 특히 이러한 저감 효과는 침수 발생 확률이 매우 높은 고위험 지역보다는 기장군 일대와 같은 중간 위험도 지역에서 통계적으로 유의미하고 가시적인 패턴을 보이는 특징이 있다.

마지막으로 하이브리드인프라(Hybrid Infrastructure)는 그린인프라의 생태적 완충 기능과 그레이인프라의 강력한 방어력을 전략적으로 결합하여 각각의 강점을 극대화하는 접근 방식이다. 예를 들어 해안 제방 앞에 맹그로브 숲이나 식생 호안을 조성하는 '리빙 쇼어라인(living shoreline)' 기법을 적용하면, 구조물의 높이를 낮추어 건설 비용을 절감하는 동시에 생태계 서비스와 서식지를 확보할 수 있다. 따라서 향후 연안 방재 정책은 지역별 위험 변수의 중요도에 따라 두 인프라의 최적 조합을 도출하여 도시의 회복탄력성을 강화하는 방향으로 패러다임을 전환해야 할

(a) 그레이인프라 (b) 그린인프라

그림 3. 그린-그레이 인프라 종류

것이다.

- 그레이인프라(Gray Infrastructure): 방파제, 호안, 배수펌프장 등 인공 구조물로 즉각적인 방어 효과가 크나 유연성이 낮음
- 그린인프라(Green Infrastructure): 해안사구, 습지, 갯벌, 해안숲 등 자연 요소로 구성되어 파랑 에너지 감쇄, 수질 정화, 생물 서식지 제공 등 다각적인 편익 제공
- 하이브리드 인프라(Hybrid Infrastructure): 두 방식의 장점을 결합한 형태로서 구조물 전면에 식생을 배치하거나, 투수성 재료를 사용하는 방식 등

2.2 그린인프라의 복합적 생태계 서비스

그린인프라는 자연적 요소를 네트워크 형태로 연결하여 다양한 혜택을 제공하는 시스템이다. 〈그림 4〉에서 설명하는 바와 같이, 그린인프라는 단순히 침수를 막는 방재 시설을 넘어 수질 정화, 열섬현상 완화, 생물 서식처 제공, 나아가 지역 사회의 건강 증진과 부동산 가치 상승이라는 경제적 효과

자료: EPA(2025), “Environmental Benefits of Green Infrastructure”, 검색일: 2025.8.19를 참고하여 저자 작성.

그림 4. 그린인프라의 혜택

까지 창출한다. 특히 연안에서는 사구, 습지, 해안숲 등이 파랑 에너지를 감쇄하고 토양을 안정화함으로써 강력한 완충 지대 역할을 담당하고 있다.

2.3 인프라 유형별 방어 기제와 비용 효율성

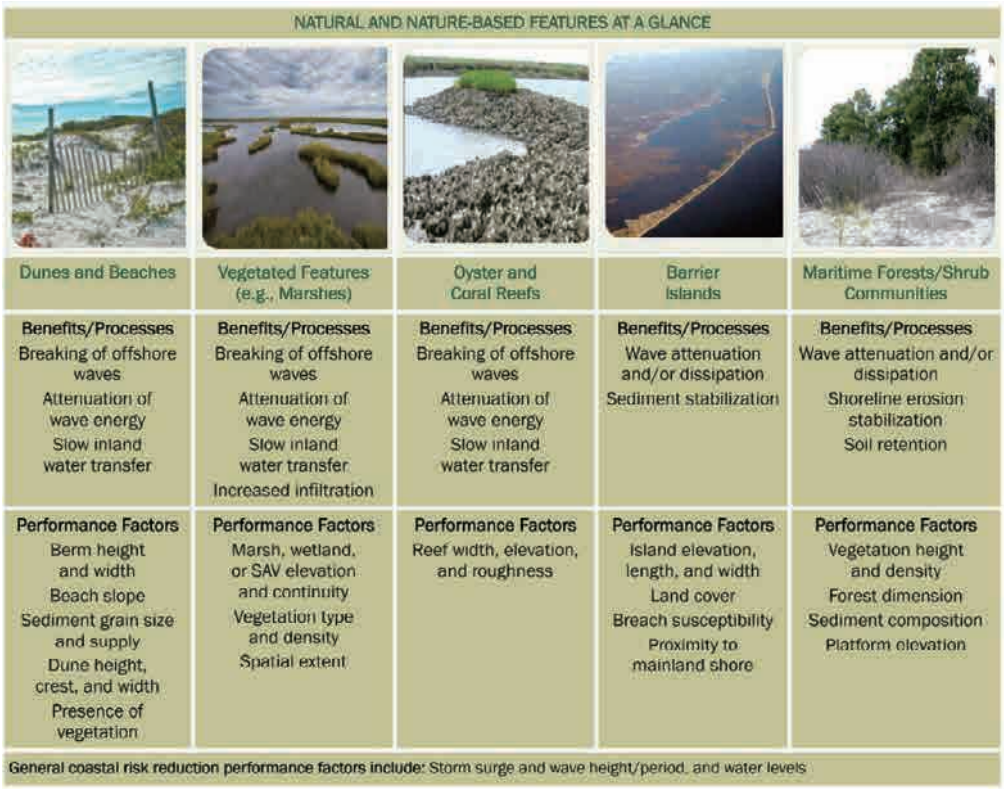
연안 그린인프라는 유형별로 독특한 방어 메커니즘을 갖고 있다 연안 보호 기능(그림 5)을 살펴보면, 산호초나 굴망태는 강력한 파랑 에너지 소산을 담당하고, 염습지와 맹그로브는 침식 억제와 퇴적물 축적에 기여함을 알 수 있다. 특히 염습지나 맹그로브 복원은 구조물 건설 대비 훨씬 저렴한 비용으로도 상당한 방재 효과를 거둘 수 있어, 기후 위기 대응의 지속 가능하고 경제적인 대안으로 평가받고 있다.

- 산호초(115.62$/㎡)와 굴초(135.63$/㎡) 복원은 고비용 구조적 방어 효과를 제공하는 반면, 염습지(1.11$/㎡)와 맹그로브(0.1$/㎡)는 저비용으로도 높은 연안보호 효과를 발휘하여 기후위기 대응에 비용효율적임

3. 연안도시 침수리스크 평가체계

3.1 머신러닝 기반 평가의 필요성

기존의 수치해석은 물리적 법칙에 충실하지만 대규모 계산 시스템과 시간이 소요되어 실시간 대응에 한계가 지적되고 있다. 특히 해수면 상승과 지반 침하, 도시 확장 등 복잡한 비선형적 관계를 반영하는 데 어려움이 있다. 이에 비해 AI와 머신러닝은 위성 데이터, IoT 센서 자료 등 대용량 다차원 데이터를 빠르게 학습하여 패턴을 인식하는



자료: Bridges et al.(2015), p.4.

그림 5. 연안 그린인프라 유형 및 연안보호 관련 기능

데 탁월하다.

연안도시 재해 리스크 평가에 활용되는 대표적 방법론인 VESTAP, MOTIVE, IPCC AR6(IPCC, 2022), 해양수산부의 연안재해 취약성평가(연안재해 취약성 평가체계)를 각 방법의 특징, 평가 방법론, 장·단점 및 개선방안 등을 조사하였고, 선행연구 사례들의 특성을 살펴보면 머신러닝이 어떻게 침수 취약성을 정교화하고 실시간 예측의 정확도를 높일 수 있는지를 여실히 보여준다.

3.2 Random Forest를 활용한 모델 구축 및 표준화

본 연구는 연안 침수 사상을 유발하는 복합적인 요인들 간의 비선형적 상호작용을 정량적으로 평가하기 위해 머신러닝 기반의 통합 분석 모델을 구축하였으며, 데이터의 일관성을 확보하기 위한 정교한 표준화 과정을 수행하였다.

먼저 데이터 표준화 단계에서는 정부 부처별로 산재한 서로 다른 형태의 방재 데이터를 통합하는 작업을 시작으로, 조위(국립해양조사원), 강우량(기상청), 고도·경사 및 토지피복(기후부) 등 각기 다른 해상도와 데이터 형식(벡터, 래스터 등)을 가진 이질적 변수들을 분석이 가능한 형태로 가공하였고, 이를 위해 모든 데이터를 동일한 공간해상도인 100×100m 격자로 재투영 및 리샘플링하여 시공간적 정합성을 확보한 단일 통합 데이터셋을 구축하였다.

모델 구축 과정에서는 공간 분석 및 환경 공학 분야에서 예측 성능과 변수 중요도 평가의 우수성이 입증된 랜덤 포레스트(Random Forest) 알고리즘을 핵심 기술로 채택하였고, 모델의 신뢰도와 객관성을 높이기 위해 다음과 같은 세부 사항을

표 1. 국내 연안재해 위험성 평가방법

방법	주요 대상/활용	평가방법	장점	한계점 및 개선방향
VESTAP	· 지자체의 기후변화 취약성 평가 · 적응계획 수립 지원	· 웹 기반 도구, 기후노출·민감도·적응능력 지표를 활용해 취약성 지수를 산정	· 사용이 용이하고 시각화 제공, 지자체의 취약성 비교 가능	· 지표와 가중치의 지역 맞춤성이 낮음, 적응능력 지표의 한계, 최신 시나리오 반영 부족 → 지표 다양화·지역화 필요
MOTIVE	· 부분별 기후변화 영향·취약성 통합 평가	· 기후·사회경제 시나리오를 입력해 농업·수자원·건강 등 부문 모형을 통합 시뮬레이션	정량적 예측과 부문 간 상호작용 분석 가능	· 모형이 복잡하고 데이터 의존도가 높음 → 사용자 인터페이스 개선, 모델 검증 및 데이터 표준화 필요
IPCC AR6 프레임워크	· 글로벌 기후위험 평가 및 정책 지원	· 위험 = 위험요인 + 노출 + 취약성 (응답의 상호작용 포함), 복합·연쇄 위험 강조	· 과학적 근거가 강하고 복합 위험성 고려	· 지역 특수성 반영이 어려워 적용 시 구체적 지침 필요 → 지역화·현지 데이터 통합 필요
연안재해 취약성 평가 (CDAS)	· 해양수산부의 연안재해 위험 지구 지정 및 연안관리 정책	· 해수면·해일·파랑 등 해양요인을 기반으로 CODI/COSI/CACI 지수를 계산해 종합 취약성 지수 도출	· 연안 특화 지표로 세밀한 평가 가능 GIS 기반 시각화	· 사회적 적응능력 반영 부족, 최신 기후시나리오와 복합재해 반영 미흡 → 사회경제적 지표 도입, 최신 시나리오 적용 필요

적용하였다.

- 데이터 불균형 해결: 실제 침수 흔적 데이터와 미발생 지역 데이터 간의 불균형 문제를 해결하기 위해 언더샘플링(undersampling) 기법을 적용하여 학습의 편향성 방지
- 학습 및 검증 분할: 모델의 일반화 성능을 확보하기 위해 전체 데이터셋의 70%를 훈련 데이터로, 나머지 30%를 테스트 데이터로 엄격히 분리하여 검증 수행
- 반복 학습을 통한 신뢰성 강화: 단일 결과의 불확실성을 최소화하고 안정적인 결과값을 얻기 위해 약 1,000회의 반복 학습(iteration) 실시

이러한 과정을 통해 도출된 최종 모델은 연안 침수 리스크 발생 확률을 0~1 사이의 범위로 정규화하여 산출하며, 1에 가까울수록 침수 위험이 매우 높음을 의미하는 확률적 위험도 지표로 나타내었다.

4. 리스크의 정량화와 저감효과

4.1 도시화와 침수 리스크의 상관관계

머신러닝 알고리즘인 Random Forest 모델을 활용하여 연안 침수 리스크를 분석한 결과, 침수 위험에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 토지피복 유형 중 도시지역 비율인 것으로 나타났다. 이는 도시화가 진행될수록 불투수면이 비율이 증가하여, 지표 유출량이 늘어나고 우수 저류 용량이 감소함으로써 침수 취약성이 높아진다는 기존 연구 결과를 정량적으로 뒷받침한다.

변수 중요도 순위는 대부분의 지자체에서 도시지역 비율, 경사도, 고도, 조위, 강수량 순으로 나타나 지형적 요인과 수문기상학적 요인이 복합적

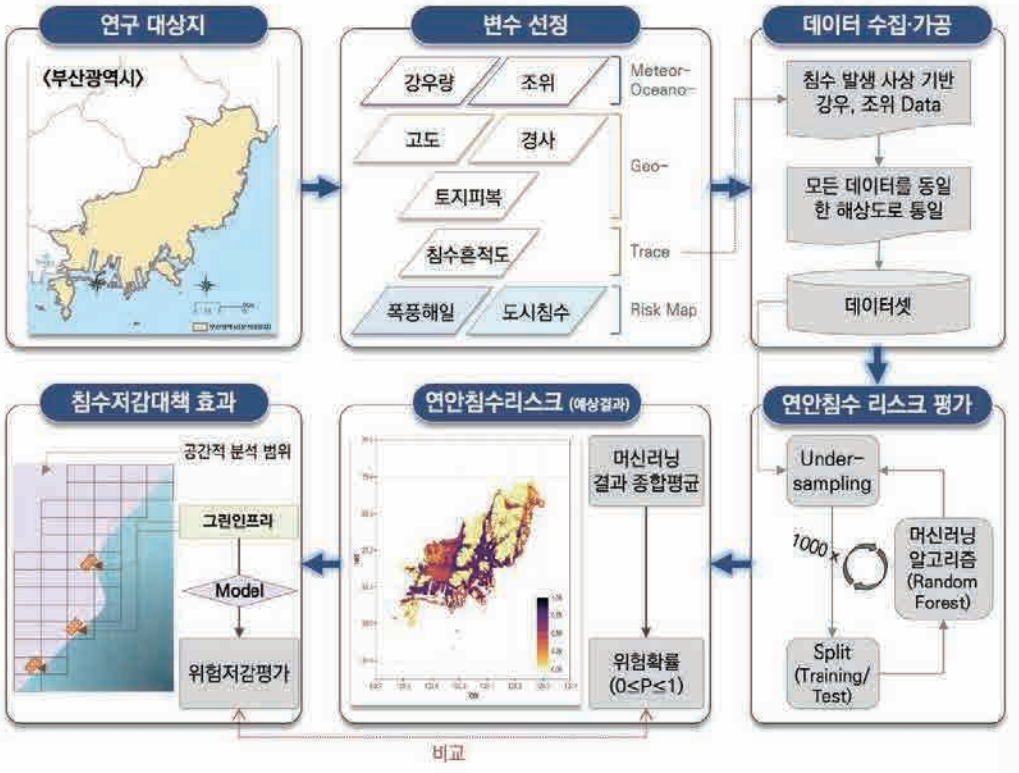


그림 6. 머신러닝 기법을 활용한 연안침수 리스크 평가체계 흐름도

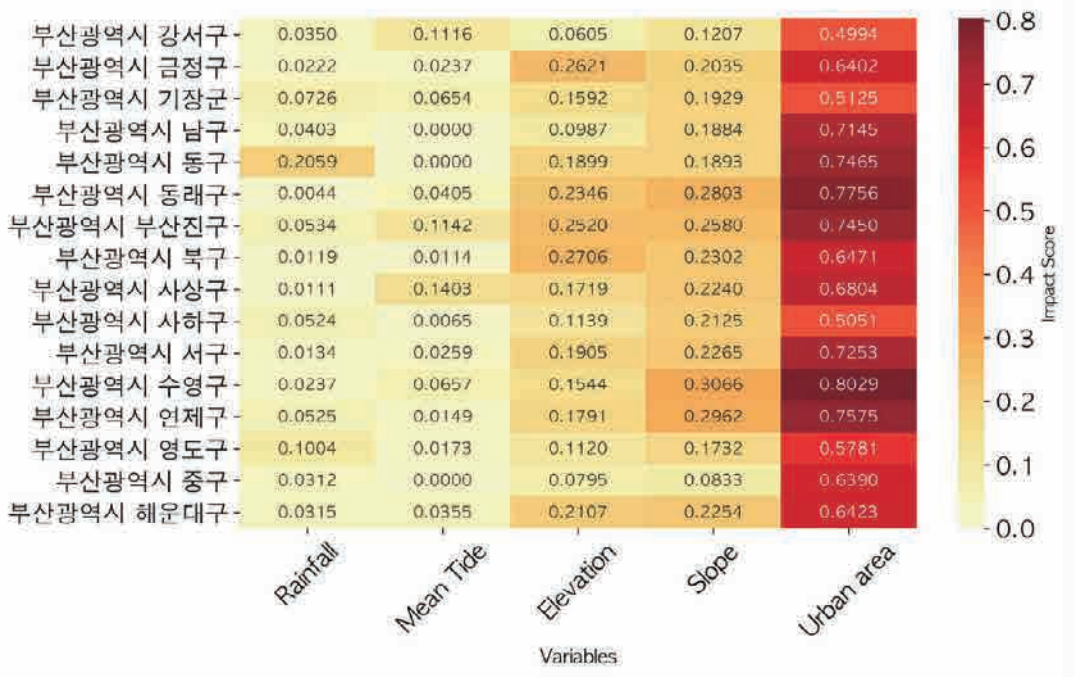


그림 7. 시군구별 리스크 분석에 사용된 변수들의 영향도(influence)

인 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 특히 부산광역시 수영구는 도시화가 침수 리스크에 미치는 영향력이 가장 높게 나타난 반면, 강서구는 상대적으로 낮게 분석되었다. 또한 지역적 특성에 따라 중요도 패턴이 달라지기도 하는데, 동구의 경우 도시화 다음으로 강우량의 영향력이 컸으며, 강서구는 조위값이 경사도와 유사한 수준의 중요도를 보여 해안 근접성과 조석 변동의 영향이 상대적으로 큰 것으로 확인되었다.

4.2 그린인프라의 침수 확률 저감 실효성

본 연구에서는 자연기반해법(NbS)의 일환인 그린인프라, 특히 녹지공간의 침수 완충 기능을 정량적으로 평가하였다. 확률분포 분석 결과, 그린인프라 적용 시 연안 침수 위험 확률이 평균 6% 감소하는 것으로 나타났다.

다만 이러한 저감 효과는 지역별 위험도 수준에 따라 공간적 차이를 보였다. 침수 발생 확률이 1에 근접한 고위험 지역에서는 그린인프라의 저감 효과가 상대적으로 제한적이었다. 반면, 부산 기장군 일대와 같은 중위험 지역에서는 저감 효과가 상대적으로 유의미하고 공간적으로도 뚜렷한 패턴을 나타냈다. 이는 그린인프라가 중위험 지역에서 효과적인 방재 수단이 될 수 있음을 시사한다.

5. 미래 지향적 연안 관리를 위한 정책적 제언

5.1 하이브리드 평가 및 데이터 통합 체계 구축

단기적으로는 본 연구에서 활용한 Random Forest 모델의 변수 중요도 분석을 상시화하여, 지역별 침수 원인(도시화, 조위, 강수 등)에 따른 맞춤형 방재 지도를 작성 연구가 필요하다. 이를 위해 기후부, 해수부, 행안부 등 각 기관에 분산된 수문기상 및 지형 데이터를 100×100m 격자 단위로 표준화하여 공유하는 '연안 방재 빅데이터 플랫폼'

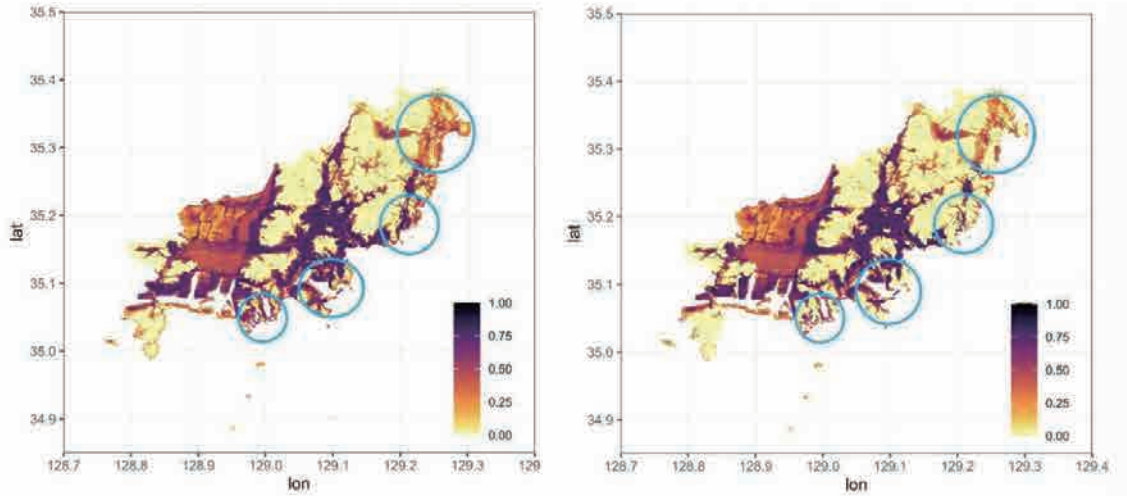


그림 4. 연안 침수리스크 분석 결과(왼쪽: 그린인프라 미적용, 오른쪽: 그린인프라 적용)

구축이 시급하다. 실시간 데이터 통합을 통해 모델의 예측 정밀도를 상시 업데이트함으로써, 기후 변화에 따른 극한 재해 상황에 선제적으로 대응할 수 있는 의사결정 지원 체계를 마련해야 할 것이다.

5.2 제도 개선 및 자연기반해법의 활성화

제도적으로는 연안 정비 사업 시 그린인프라와 그레이인프라를 결합한 하이브리드형 설계를 의무화하는 로드맵이 필요하다. 특히 본 연구에서 입증된 바와 같이, 침수 저감 효과가 가시적으로 나타나는 중간 위험도 지역을 'NbS 중점 관리구역'으로 지정하여 그린인프라 보급을 집중해야 할 것이다. 또한, 도시계획 단계에서 그린인프라 최소 비율 규정 및 투수성 포장재 사용에 대한 인센티브를 제공하고, 그린인프라가 제공하는 평균 6%의 위험 확률 저감 효과와 다중 편익(탄소 흡수, 생태계 복원 등)을 비용-편익 분석(B/C)에 정량적으로 반영하여 투자 우선순위 재설정이 필요하다.

6. 결론: 지속 가능한 연안의 미래

기후 위기로 인한 연안 침수 리스크의 증가는 더 이상 전통적인 콘크리트 장벽만으로는 방어하기 어려운 임계점에 도달했다. 본 연구는 머신러닝 분석을 통해 도시화가 침수 리스크의 핵심 동인임을 밝히는 동시에, 자연기반해법(NbS)이 실질적인 침수 완충 기능을 수행할 수 있음을 정량적으로 입증하였다.

결국 자연과 기술이 조화를 이루는 연안, 즉 그린-그레이 인프라의 전략적 배치를 통해 회복탄력성(Resilience)을 확보하는 것은 지속 가능한 연안 도시를 구축하기 위한 생존의 문제일 것이다. 본 연구에서 제안한 머신러닝 기반 평가 체계와 하이브리드 인프라 전략이 국가 연안 관리 정책의 핵심 동력이 되어, 기후 변화라는 불확실성 속에서도 안전하고 풍요로운 연안의 미래를 열어가는 정책적 밑거름이 되기를 기대한다.

감사의 글

본 원고는 2025년도 한국환경연구원(KEI)에서 수행된 「연안 그린-그레이 인프라 침수리스크 감소 평가체계 구축」의 연구결과로 작성되었습니다.

참고문헌

김연중 (2025) 연안 그린-그레이 인프라 침수리스크 감소 평가체계 구축, 한국환경연구원

해양수산부 보도자료(2023.3.9), "신(新)기후변화 시나리오 적용 우리나라 주변 해역 해수면, 2100년까지 최대 82cm 상승 전망", https://www.mof.go.kr/doc/ko/selectDoc.do?docSeq=49514&menuSeq=971&bbsSeq=10, 검색일: 2025.8.10.

네이버 프리미엄콘텐츠(2023.5.23), "집중호우가 더욱 강력해지고 있다", https://contents.premium.naver.com/jiphyunnet/knowledge/contents/230522172502311tp, 검색일: 2025.8.24.

연안포털, "연안통합지도서비스", https://coast.mof.go.kr/map/map.do, 검색일: 2025.9.1.

Bridges, T. S. et al.(2015), Use of Natural and Nature-Based Features(NNBF) for Coastal Resilience, ERDC SR-15-1, Engineer Research and Development Center, pp.1-477.

EPA(2025), "Environmental Benefits of Green Infrastructure", https://www.epa.gov/green-infrastructure/environmental-benefits-green-infrastructure, 검색일: 2025.8.19.

IPCC(2022), Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC AR6 WGII).

기후극한 시대의 복합재해 대비: 다중 주파수 분석 기반 복합 가뭄-폭염 예측

Water for future
학술/기술 기사
05

한 정 우
국립군산대학교
토목공학과 조교수
jwhan@kunsan.ac.kr

1. 머리말

기후변화의 영향으로 극한 수문사상 발생빈도와 강도가 증가하고 있으며, 이에 따라 더욱 심각한 수재해가 발생할 것으로 전망된다 (Gebrechorkos et al., 2025; Tabari, 2020). 이러한 기후변화의 수문학적 영향은 이미 물관리 현장에서 반복적으로 확인되고 있다. 기후 온난화에 따른 평균기온의 상승과 무강우 기간의 연장 추세는 더욱 높은 강도의 가뭄과 폭염 발생을 증대시켰다. 최근 두 현상의 동시 또는 연속적 발생으로 인한 복합 가뭄-폭염(compound drought-heatwave, CDH)의 발생은 수자원 관리, 농업 생산량, 생태계 다양성 보존, 온열질환 발생의 측면에서 가뭄과 폭염이 각각 발생하는것 보다 심각한 영향을 초래하는 대표적 고위험 기후 현상으로 인식되고 있다 (Tripathy et al., 2023; Zscheischler et al., 2018). 이러한 복합 가뭄-폭염(이하, CDH라 함)의 발생빈도의 증가는 기존의 생·농·공 및 환경 용수 관리의 방식이 새로운 기후 조건에 충분히 대응하고 있는지에 대한 근본적인 질문을 던진다.

그동안 가뭄과 폭염은 각각 독립적인 재해로 다루어져 왔다. 가뭄은 강수의 부족에 기인한 가용 수자원 고갈의 문제로, 폭염은 이상고온의

지속에 따른 건강 및 생태·환경 문제로 접근하는 것이 일반적이었다. 그러나, 실제 수문 순환과정에서 가뭄과 폭염은 현열속(sensible heat flux), 잠열속(latent heat flux), 토양수분 및 대기 증발요구량(atmospheric water demand)의 상호연계로 서로 영향을 주고받으며 동시에 심화하는 경우가 많다 (Yoon et al., 2026). 토양수분 감소는 현열속의 증가, 잠열속의 감소, 증발산 감소로 이어져 지표면의 냉각 효과를 약화해 결과적으로 폭염을 강화 및 장기화한다. 이렇게 장기화 및 강화된 폭염은 (잠재)증발산을 증가시켜 가뭄을 장기화하거나 돌발가뭄(flash drought) 발생으로 이어지는 연쇄적 구조 속에서 가뭄과 폭염은 더 악화된다 (Miralless et al, 2019).

이러한 배경에서 CDH를 고려한 선제적인 수자원·생태계·에너지 관리계획이 수립되어야 하나, 이를 위한 정확성과 신뢰성이 높은 CDH 예측기술에 관한 연구는 아직 부족한 실정이다. CDH 예측기술 개발은 가뭄의 다중스케일(multiscalar)에 기인한 강한 비정상성과 폭염의 급격한 발생과 짧은 첨두 도달의 특성 등이 합쳐진 매우 복잡한 시계열을 모수화 또는 학습해야 하는 어려움이 있다. 본 기사는 다중 주파수 분해 기법을 적용한 Burg 엔트로피 스펙트럼 분석법을 이용한 CDH 예측기법을 소개하고 이를 통해 복합 가뭄-폭염의 예측성과 선제적 재해관리 전략 수립에 기여할 수 있는 시사점을 논의하고자 한다. 본 기사에서 사용된 자료와 그림은 필자가 최근 발표한 연구논문에 수록된 것을 재구성한 것이다.

2. 복합 가뭄-폭염 예측기술

본 기사는 복합 가뭄-폭염 예측기술 개발에 앞서 가뭄과 폭염을 동시에 모니터링 할 수 있는 지수(index)인 표준 복합 가뭄-폭염 지수(Standardized Compound Drought-Heatwave Index, SCDHI)를 이용하였다 (Li et al., 2021). SCDHI는 가뭄지수와 폭염지수를 코플라 방법을 이용하여 결합하여 산정하였다.

SCDHI는 다양한 기상 및 기후 현상의 영향으로 여러 주파수 대역의 시계열 특성이 혼재된 가뭄지수와 폭염지수의 결합 산물이기 때문에 예측이 용이하지 않다. 이와 같은 SCDHI 시계열의 복잡성(complexity)을 해결하기 위해 본 기사는 시계열 분해기법인 최대 중첩 이산형 웨이블렛 변환(Maximal Overlap Discrete Wavelet Transform, MODWT)과 Burg 엔트로피 스펙트럴 분석법(Burg Entropy Spectral Analysis, BESA)을 결합한 하이브리드 예측모델을 제안한다.

2.1 표준 복합 가뭄-폭염 지수(SCDHI) 산정

가뭄은 수개월에서 수년에 걸쳐 지속될 수 있는 반면, 폭염은 대체로 수일에서 길면 일주일 내외의 비교적 짧은 기간에 발생하고 소멸한다. 따라서, 월 단위로 복합 가뭄-폭염 지수를 산정할 경우, 두 현상의 시간적 특성이 충분히 반영되지 않아 결합 거동을 효과적으로 모니터링·분석하기 어렵다 (Li et al., 2021). 따라서, 본 연구는 일 단위 기반의 SCDHI를 산정하여 CDH를 모니터링하고 이를 예측하는 모델을 개발하였다.

2.1.1 가뭄 및 폭염 지수 산정

SCDHI를 산정하기 위해서 가뭄과 폭염을 각각 모니터링할 수 있는 지수의 산정이 선행되어야 한다. 가뭄 지수로는 대기의 수분 요구량을 나타내는 잠재증발산량(potential evapotranspiration,

PET)과 선행 강수량의 차이인 수분 과부족(water surplus or deficit, WSD)을 7일 누적하고 이를 표준화한 표준 선행 강수-증발산 지수(Standardized Antecedent Precipitation-Evapotranspiration Index at a 7-day scale, SAPEI-7D)를 사용하였다. 이는 기온의 영향을 가뭄 모니터링에 반영할 수 있어 온난화 시대의 가뭄 모니터링에 적합하다. 폭염 지수는 1일 최고기온을 이용하여 산정한 표준 기온 지수(Standardized Temperature index at a 1-day scale, STI-1D)를 사용하였다.

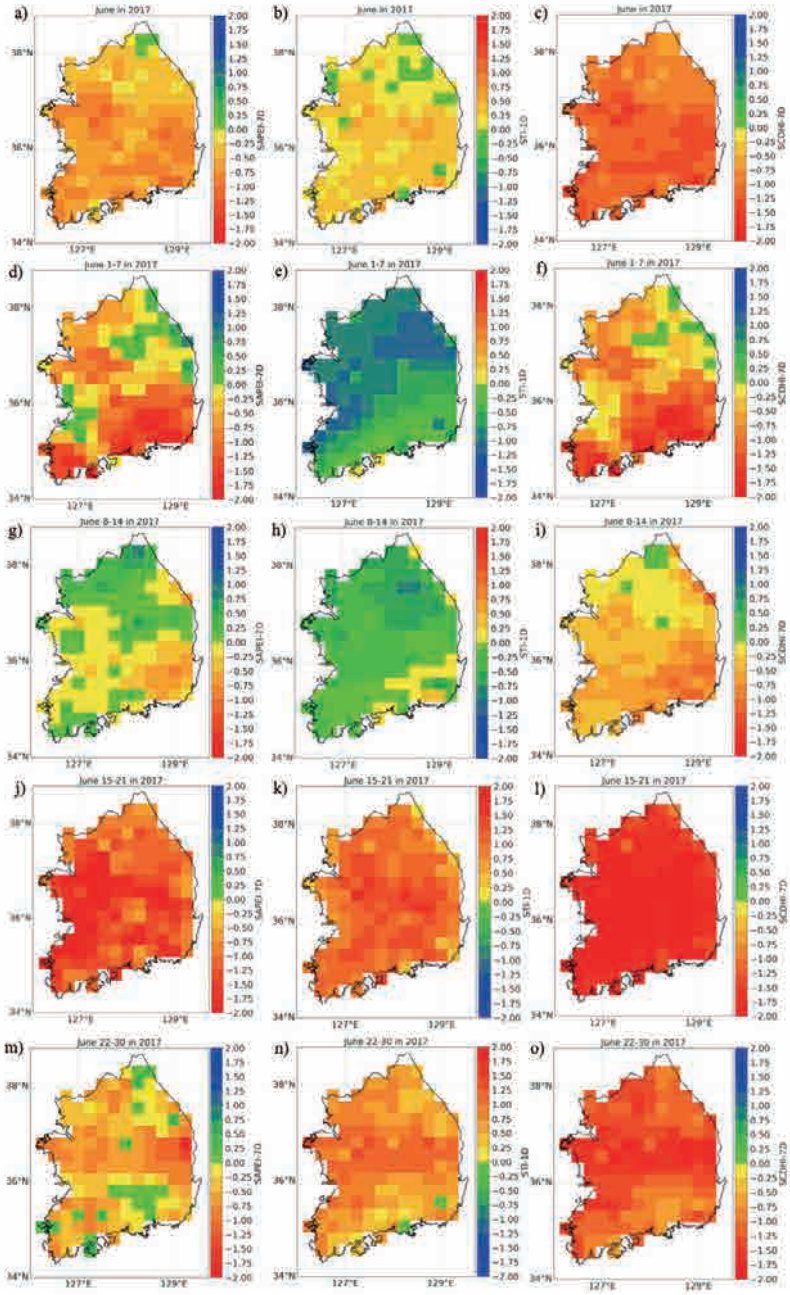


그림 1. 2017년 6월 사례에 대한 가뭄(SAPEI-7D), 폭염(STI-1D), 복합 가뭄-폭염(SCDHI-7D) 지수의 주차별 모니터링. 위에서 첫번째 열은 가뭄, 폭염, 복합지수의 6월 평균값을 나타내며, 둘째 열부터 각 주차별 평균값을 나타냄. 붉은색으로 갈수록 가뭄, 폭염, CDH가 심해짐을 나타냄

2.1.2 코플라 방법을 이용한 SCDHI 산정

앞서 산정한 SAPEI-7D와 STI-1D는 남한 전지역에 대해 중앙값(median) −0.32의 유의성 있는 음의 상관관계를 보이기 때문에 두 지수의 결합 누적 분포 함수 구축에 검벨 코플라(Gumbel copula)를 적용하였다. 결합 누적 분포함수의 값은 표준정규분포의 표준점수(standard score/Z-score)로 변환되어 SCDHI-7D 값이 산정된다. 본 기사가 소개하는 연구에서 SAPEI-7D를 사용한 이유는 여러 누적 시간 규모(1, 3, 7, 14, 30일)의 SAPEI와 STI-1D의 상관분석을 수행한 결과 SAPEI-7D가 가장 높은 상관성을 보였기 때문이다.

산정한 SCDHI-7D 및 SAPEI-7D와 STI-1D가 각각 CDH, 가뭄, 폭염을 효과적으로 모니터링 할 수 있음을 2017년 6월 발생한 CDH사상의 예를 통해 확인하였다 (그림 1). 6월 첫재 주 남부지방을 중심으로 발생한 극심한 가뭄은 6월 중순에 전역으로 확산하며 당시 동시 발생한 폭염과 함께 CDH 발생으로 이어졌고, 이는 6월 말까지 이어졌다 (그림 1).

2.2 MODWT와 BESA를 결합한 하이브리드 예측 모델

CDH를 정확히 모니터링 할 수 있는 SCDHI-7D는 여러 주파수 대역의 시그널/시계열 특성이 혼재되어 있기 때문에 시계열 분해 방법인 MODWT를 사용하여 보다 단순한 시계열 특성을 가질 수 있도록 여러 주파수 대역의 하위 시계열로 분해하

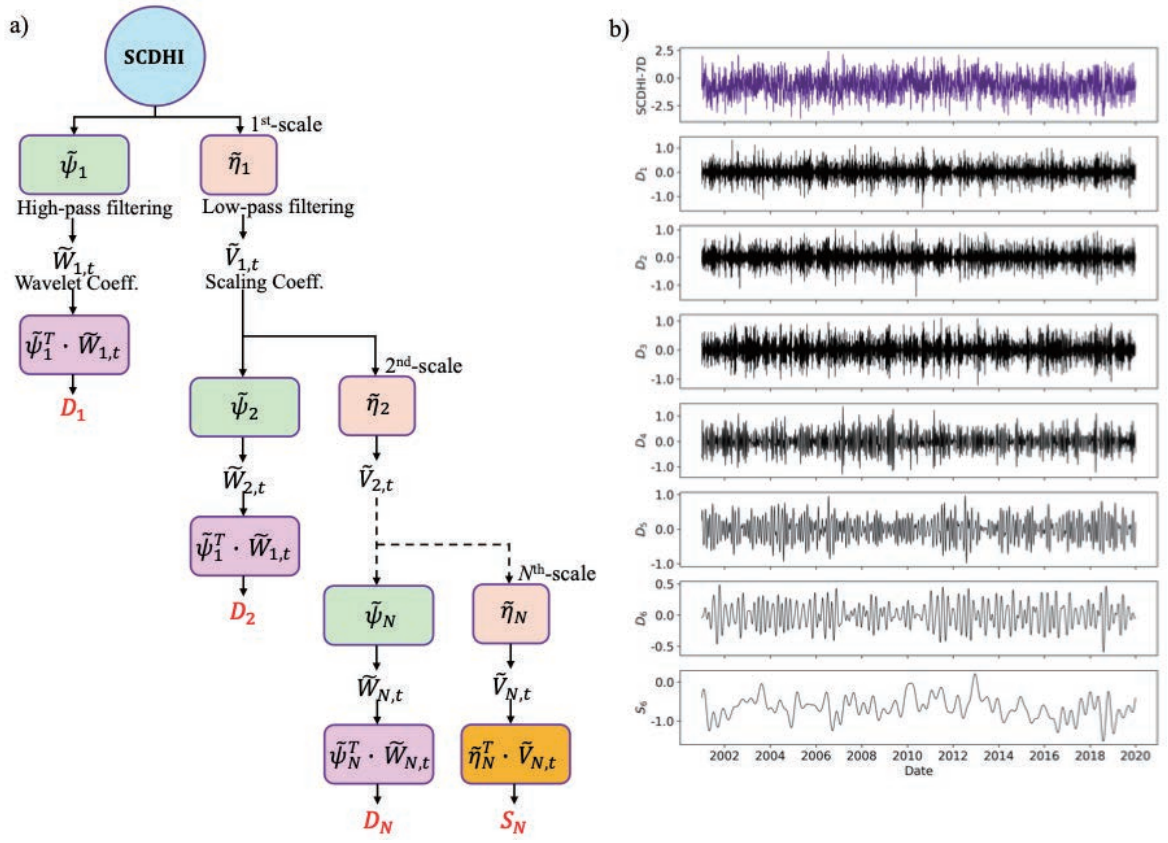


그림 2. a) MODWT 개념도, b) 샘플 지점의 SCDHI-7D를 db20과 6개의 분해수준을 가지는 MODWT를 이용하여 분해한 결과

였다. 분해된 각각의 하위 시계열을 BESA를 통해 예측한 후 예측된 하위 시계열들을 중첩함으로써 SCDHI-7D의 예측값을 최종 산정한다.

2.2.1 최대 중첩 이산형 웨이블렛 변환(MODWT)

MODWT는 각 스케일 수준에서 high-pass filter와 low-pass filter가 각각 높은 주기와 낮은 주기에 해당하는 시그널을 가두고, 낮은 주기의 시그널은 다음 단계의 스케일 수준에서 다시 높은 주기와 낮은 주기의 시그널로 연쇄적으로 분해하는 개념을 가진다 (Percival & Walden, 2000; 그림 2a).

MODWT을 이용하여 원(raw) 시계열을 하위 시계열로 분해(decomposition) 함에 있어 연구자는 모 웨이블렛(mother wavelet)과 분해 수준(level of decompostion, 몇 개의 하위 시계열로 분해할 것인가)을 정해야 한다. 필자는 모 웨이블렛으로 필터 길이 20을 가지는 도브시 웨이블렛(Daubechies wavelet 20, db20)을 사용하였고 분해 수준은 6으로 결정하여 6개의 상세신호(detail signal)와 1개의 평활신호(smooth signal)로 SCDHI-7D를 분해하였다 (그림 2b).

필터 길이와 분해 수준의 결정 시 따라야 하는 객관적인 규칙은 없어서 이들은 연구자의 판단에 따라 정해진다. 필터 길이와 분해 수준이 높아질수록 계산시간이 증대되므로 필자는 계산시간과 예측성능의 향상 정도를 고려하여 여러 조합의 시도를 통해 결정하였다.

2.2.2 Burg 엔트로피 스펙트럴 분석 (BESA)

분해된 각 신호의 예측에는 Burg 엔트로피 스펙트럼 분석(BESA)을 적용하였다 (Burg, 1975). BESA는 '최대 엔트로피 원리(pribciple of maximum entorpy)'에 기반하여, 관측된 정보의 자기상관(autocorrelation)을 만족하면서 엔트로피를 최대화하는 스펙트럼 밀도 함수를 추정한다 (Burg, 1975; Han & Singh, 2023).

BESA는 스펙트럼 밀도 함수와 자기상관이 Wienner-Khinchin이론에 의해 가지는 관계성에 기반하여 자기회귀형(Autoregressive) 모델의 예측계수를 Levinson-Burg 알고리즘을 통해 산정한다 (Han & Singh, 2023). 여기서, Levinson-Burg 알고리즘은 전방(forward)과 후방(backward)예측 오차를 동시에 최소화하며 예측 파라미터를 산정하는 역할을 한다. BESA는 기존의 선형 자기회귀 방식보다 데이터의 2차 모멘트 특성을 더 정확하게 반영할 수 있어 장기 예측에 유리하다. 최종적인 SCDHI-7D 예측값은 각 분해된 7개의 신호에 대해 BESA를 적용하여 예측한 값을 모두 중첩하여 도출된다.

3. 적용결과 및 분석

본 기사가 소개하는 예측모델의 개발과 성능검증을 위해 2000년부터 2019년까지의 기상청 MK-PRISM 데이터를 활용하였다. 2001~2013년을 모델의 예측모수 보정(calibration) 기간으로, 2014~2019년을 검증(validation) 기간으로 설정하여 분석을 수행하였다.

3.1 전반적 예측성능 평가

그림 3은 선행 예측시간(lead time) 1일부터 28일까지의 예측성능을 $MASE$(Mean Absolute Scaled Error), R^2, KGE(Kling-Gupta Efficiency)로 평가한 결과이다. 상자그래프는 남한전역에서 산정된 예측성능 메트릭(metric)을 각 선행 예측시간별로 나타내며, 파란실선과 붉은색 점은 각각

중앙값과 평균을 나타낸다. 선행 예측시간이 길어질수록 성능은 점차 감소하지만, BESA 모델은 28일 선행 예측에서도 KGE_{All}(모든 계절/전체기간에 대해 산정한 KGE)의 중앙값이 0.72 이상을 유지하는 우수한 성능을 보였다.

특히, 따듯한 계절(6월~9월)로 예측성능 평가기간을 한정하였을 때(KGE_{Warm}), KGE_{Warm}이 KGE_{All}보다 더 높은 예측 정확도를 장기간의 선행 예측시간에서 유지했다. 이는 여름철 강수와 기온 패턴이 상대적으로 뚜렷하여 예측성이 높아지기 때문으로 분석되며, 이는 폭염의 영향이 더 큰 여름철에 활용성이 높음을 보인다.

또한, 범주형 예측 정확도(categorical forecast accuracy) 측면에서도 24일 선행 시간까지 75% 이상의 적중률(hit rate)과 11.5% 미만의 오경보율(false positive rate)을 기록하여, 실질적인 조기경보 시스템으로서의 활용 가능성을 확인하였다.

그림 4는 각 선행 예측시간별 남한 전역에서 검증기간 동안 예측된 SCDHI-7D를 평균한 값(붉은 실선)을 관측값의 평균(검은 실선)과 비교한 결과이다. 파란색 음영은 예측값의 95% 신뢰구간을 나타낸다. 선행 예측시간이 증가할수록 예측된 시계열은 관측 시계열의 미세한 거동은 표현할 수 없었지만 28일 선행 예측 시까지도 신뢰구간 안에서 정확히 추세를 따름을 보인다.

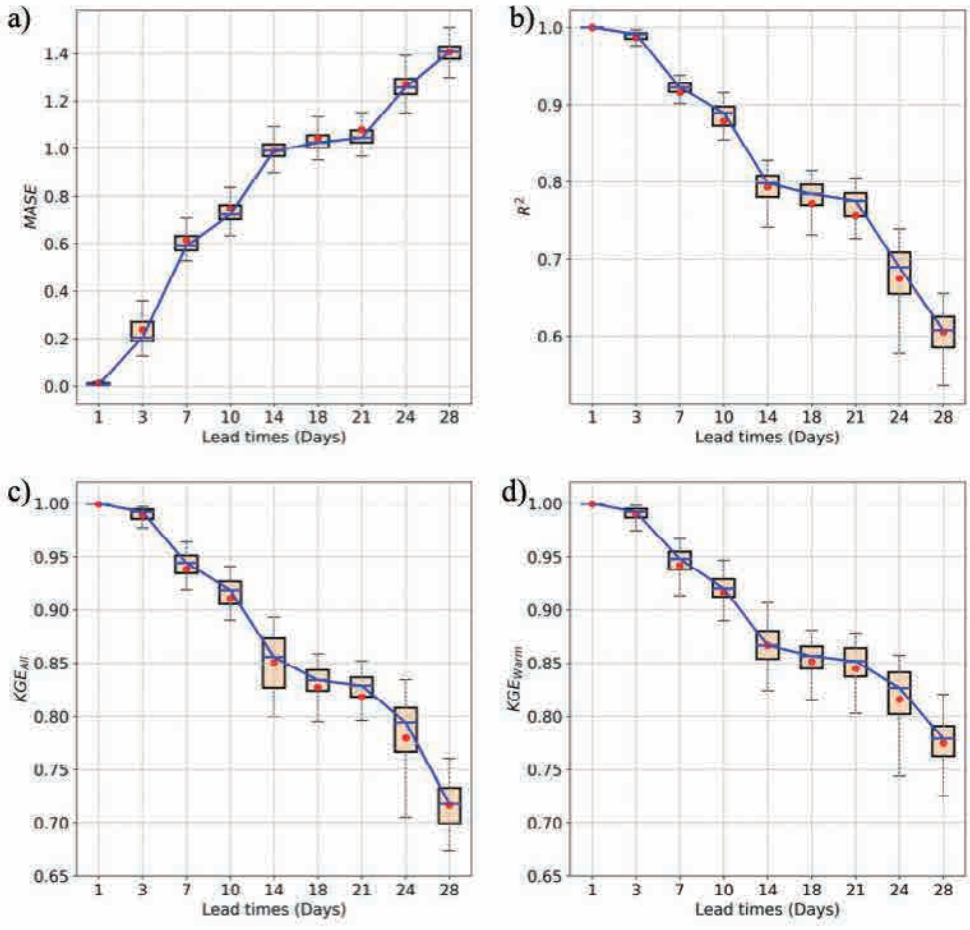


그림 3. 각기 다른 선행 예측시간(1일~28일)에서 예측성능($MASE$, R^2, KGE)의 변화

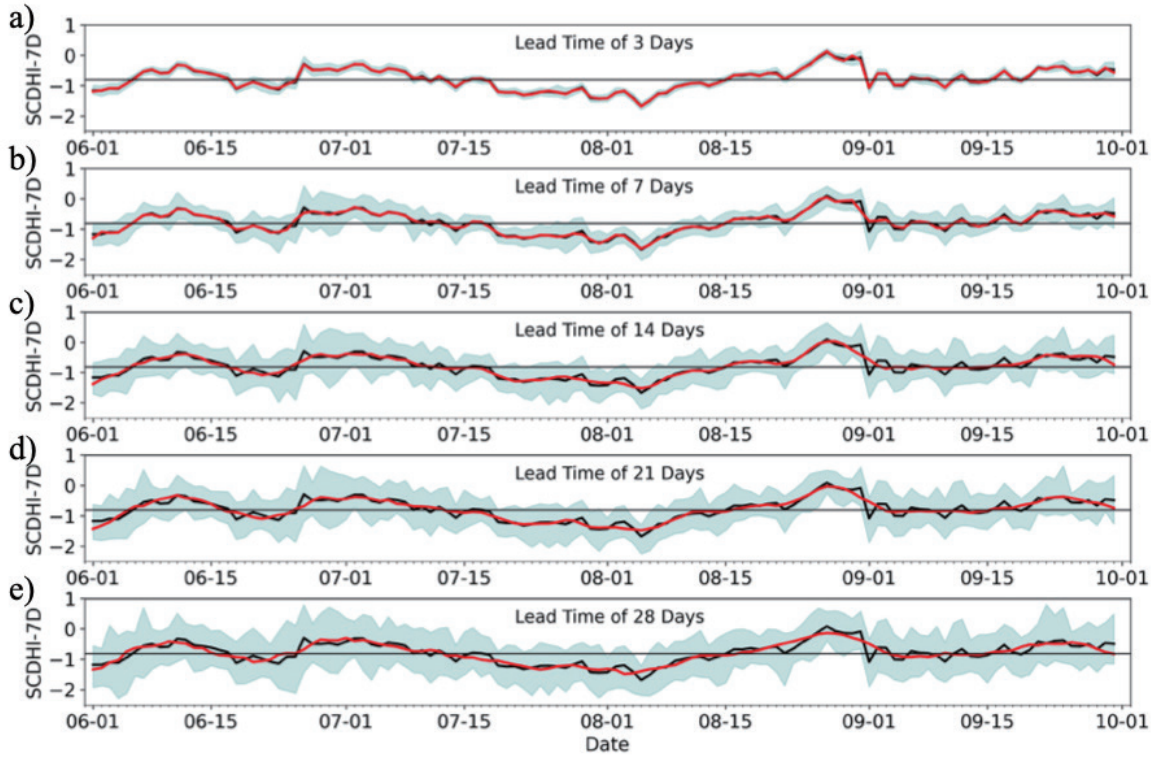


그림 4. 선행 예측시간별 남한 전역에서 검증기간 동안 예측된 SCDHI-7D를 평균한 값(붉은 실선)과 관측값의 평균(검은 실선)의 비교

3.2 지역적 예측성능 평가

예측 성능의 공간적 분포를 살펴보면, 전반적으로 우수한 성능을 보였으나 선행 예측시간이 증가하며 전라남도와 경상남도 등 남부 일부 지역과 강원도 일부 지역에서 상대적으로 낮은 정확도가 관찰되었다(그림 5의 R^2와 KGE_{All}비교). 이러한 지역적 편차의 원인을 규명하기 위해 시계열의 무작위성을 나타내는 '표본 엔트로피(sample entropy, SampEn)'를 분석하였다. 분석 결과, 강수와 최고기온의 엔트로피가 높은 지역[무작위성(randomoness)이 큰 지역]이 예측 정확도가 낮은 지역과 일치하는 경향을 보였다.

3.3 딥러닝 및 기계학습 모델과의 비교

제안된 BESA 모델의 성능을 객관적으로 평가하기 위해 대표적인 딥러닝 모델인 LSTM(Long Short-Term Memory)과 기계학습 모델인 SVR(Support Vector Regression)과 XGBoost와 비교 분석을 수행하였다. BESA와의 공정한 비교를 위해 모든 모델은 단변량(univariate) 입력과 재귀적(recursive) 예측 방식을 동일하게 적용하였다. 비교 결과, 단기 예측(1~3일)에서는 모든 모델이 유사한 성능을 보였으나 (그림 6), 선행 시간이 길어질수록 BESA 모델의 성능 저하가 가장 적게 나타났다 (3일 선행 예측시간 이후의 비교는 딥러닝과 기계학습법의 성능이 BESA와 많은 차이를 보여 수록하지 않음). 특히 복잡도가 높은 시계열을 가진 지점(그림 6c와 6d)에서 BESA는 벤치마크 모델들보다 관측값의 거동을 더 정확하게 모의하였다. 이는 단변량 및 재귀적 예측 환경에서는

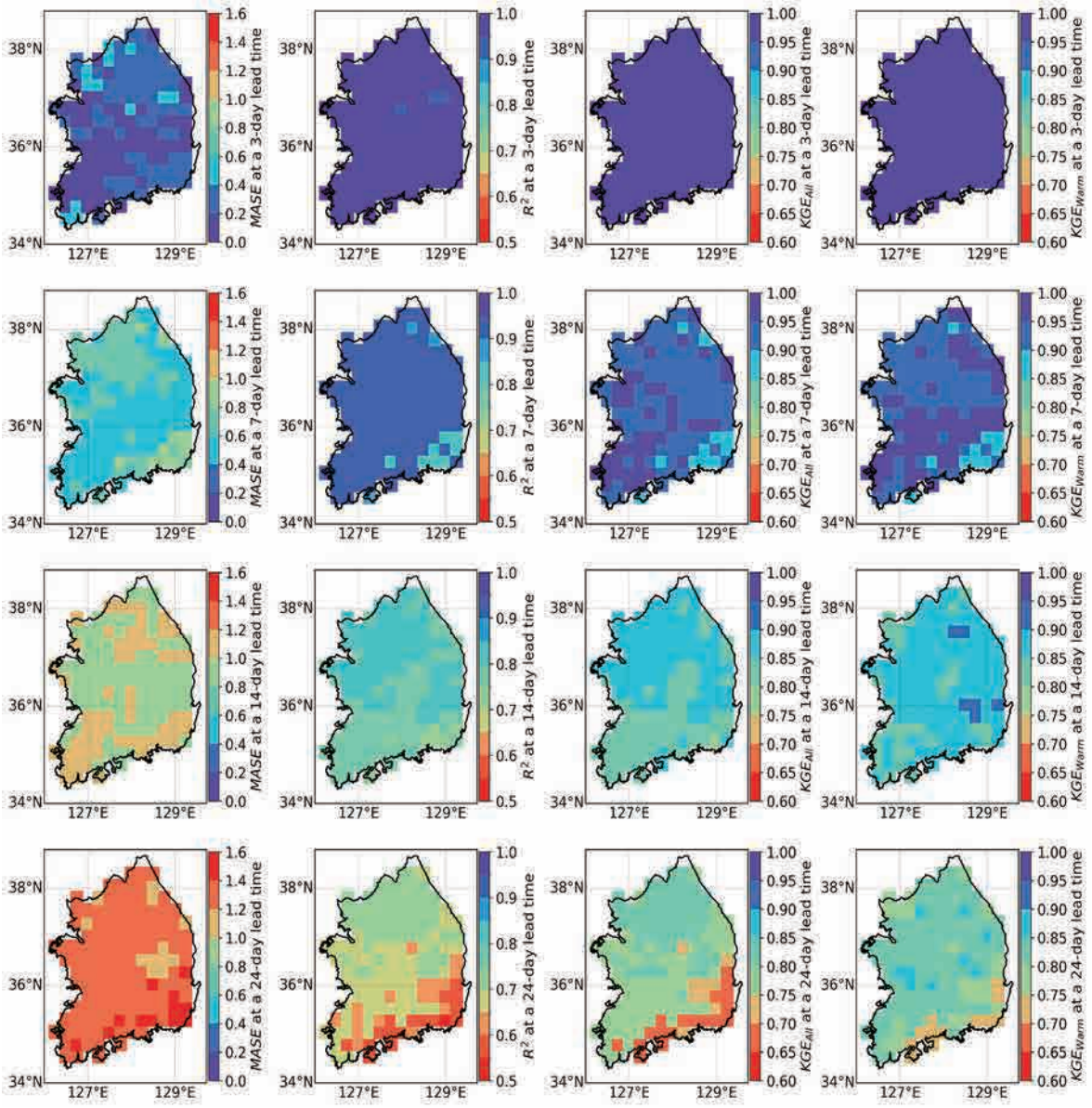


그림 5. 선행 예측시간별 예측성능의 지역적 변화

복잡한 딥러닝 구조보다 스펙트럼 특성을 잘 반영하는 BESA 기법이 더 효율적일 수 있음을 시사한다. 물론, 다변량 입력 자료를 활용하거나 모델 구조를 고도화할 경우 딥러닝 모델의 성능이 향상될 여지는 있으나, 계산 비용과 실용성 측면에서 BESA 모델은 충분한 경쟁력을 갖춘 것으로 평가된다.

4. 맺음말

본 기사에서는 MODWT(시계열 분해기법)와 BESA(Burg 엔트로피 스펙트럴 분석법)를 결합한 다중 주파수 분석 기반의 복합 가뭄-폭염 예측기술을 소개하였다. 기후변화로 인해 복합 가뭄-폭염(CDH)의 발생 빈도가 급증하는 상황에서, 본 기사에서 소개한 7일 누가 표준 복합 가뭄-폭염 지

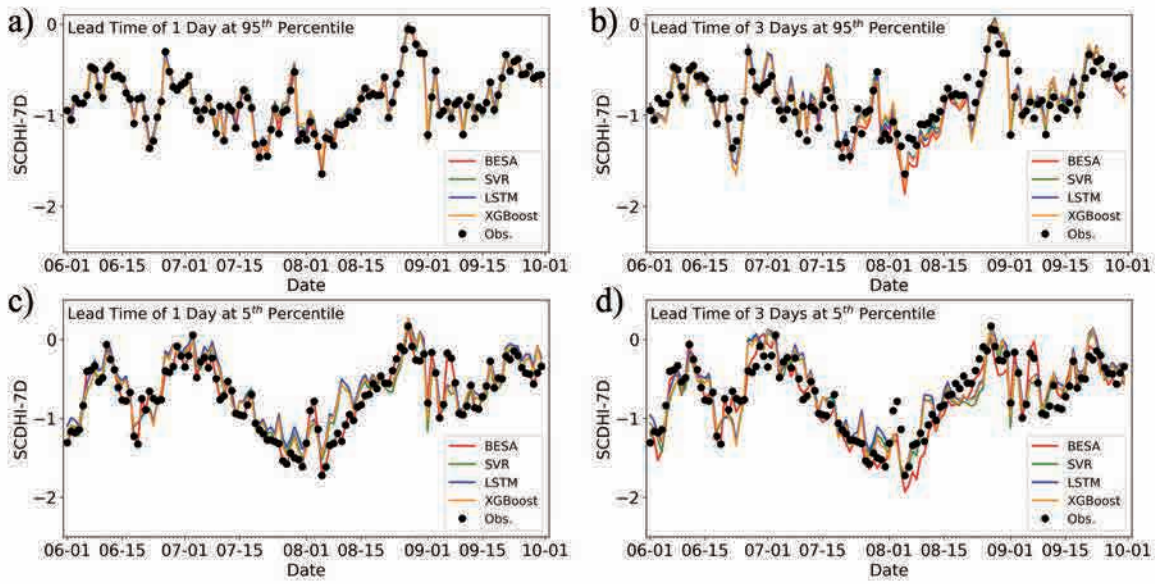


그림 6. KGE_{All}의 95번째 백분위수 이상과 5번째 백분위수 이하의 값을 갖는 지점들 중 각 백분위수 범주에서 임의로 선정한 지점에서 BESA와 벤치마크 모델(LSTM, SVR, XGBoost)의 예측 성능 비교. a)와 c)는 1일 선행 예측 시, b)와 d)는 3일 선행 예측 시의 결과를 보여줌

수(SCDHI-7D)는 기존 월 단위 지수보다 폭염의 변동성을 더욱 민감하게 반영하며 CDH를 모니터링 할 수 있음을 확인하였다.

또한, MODWT와 BESA를 결합한 예측 모델은 최대 3~4주의 선행 기간에서도 정확도와 신뢰성 높은 예측 정보를 제공할 수 있음을 입증하였다. 특히, 폭염의 영향이 심각한 여름철에 더욱 높은 정확도를 보여, 실질적인 방재 대책 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 강수와 기온의 변동성이 극심한 일부 남부와 강원도 지역에서는 예측 정확도가 다소 감소하는 한계가 있었으며, 이는 향후 비선형성을 고려한 모델 고도화나 다변량 데이터를 예측변수(predictor)로 활용하여 개선될 수 있을 것이다.

결론적으로, 본 기술은 수치예보 모델(NWP)의 장기예측 시 성능 저하 한계를 보완할 수 있는 통계적 예측모델로, 중·장기 기상 및 수문 재해 관리를 위한 조기경보 시스템의 핵심 알고리즘으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 이를 통해 미래의 물·식량 안보 위협과 산불 등 생태계 위협 요소에 선제적으로 대응하고, 효율적인 수자원 관리를 실현하는 데 기여할 수 있기를 기대한다.

감사의 글

본 연구는 한양대학교 Post-Doc·연구교원 지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(HY-2024-0183).

참고문헌

Burg, J. P. (1975). Maximum entropy spectral analysis. Stanford University.

Gebrechorkos, S. H., Sheffield, J., Vicente-Serrano, S. M., Funk, C., Miralles, D. G., Peng, J., ... & Dadson, S. J. (2025). Warming accelerates global drought severity. Nature, 1-8.

Han, J., & Singh, V. P. (2023). Long-lead drought forecasting across the continental United States using Burg entropy spectral analysis with a multiresolution approach. Water Resources Research, 59(4), e2022WR034188.

Li, J., Wang, Z., Wu, X., Zscheischler, J., Guo, S., & Chen, X. (2021). A standardized index for assessing sub-monthly compound dry and hot conditions with application in China. Hydrology and Earth System Sciences, 25(3), 1587-1601.

Miralles, D. G., Gentine, P., Seneviratne, S. I., & Teuling, A. J. (2019). Land–atmospheric feedbacks during droughts and heatwaves: state of the science and current challenges.Annals of the New York Academy of Sciences,1436(1), 19-35.

Percival, D. B., & Walden, A. T. (2000). Wavelet methods for time series analysis (Vol. 4). Cambridge university press.

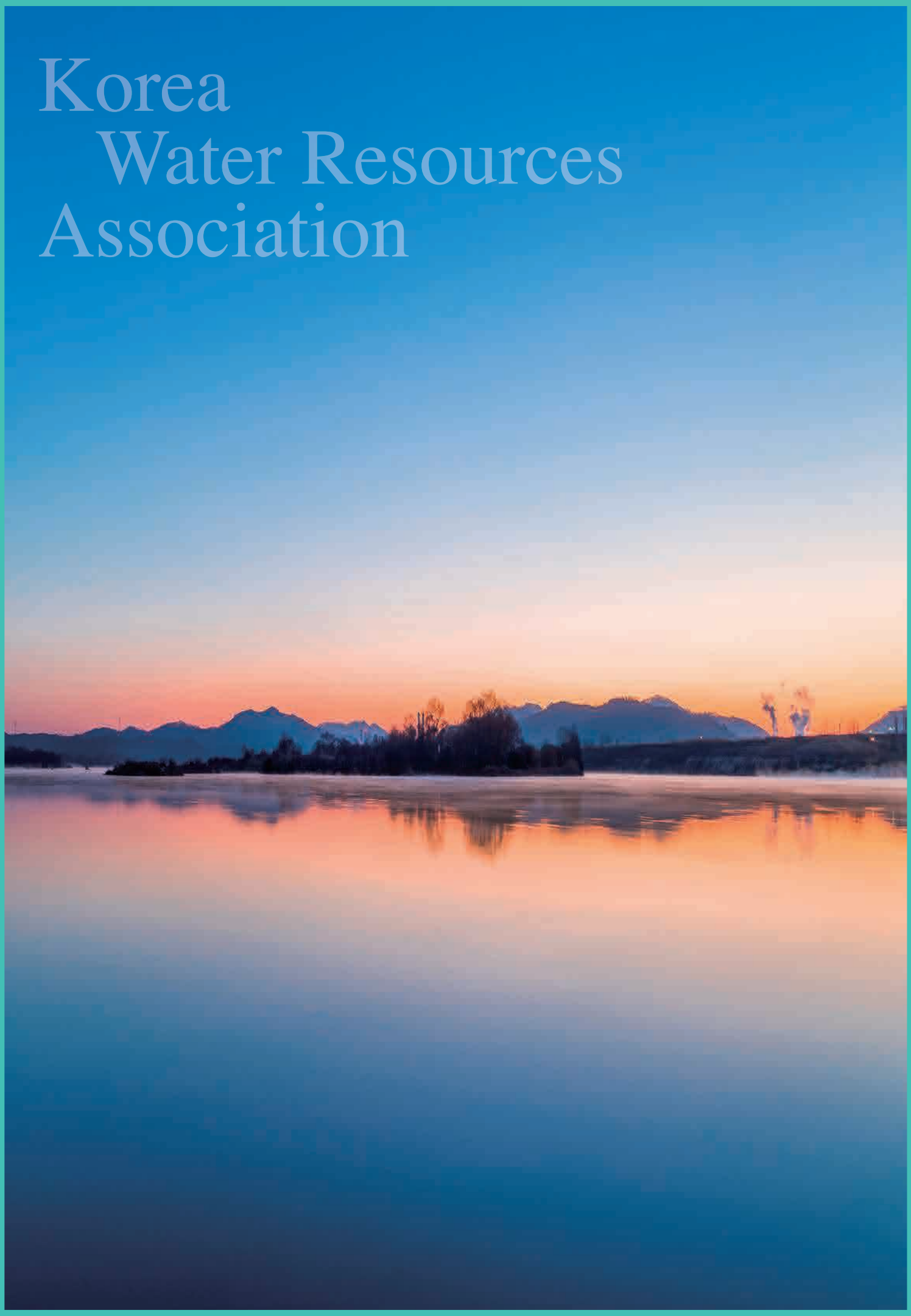
Tabari, H. (2020). Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability.Scientific reports,10(1), 13768.

Tripathy, K. P., Mukherjee, S., Mishra, A. K., Mann, M. E., & Williams, A. P. (2023). Climate change will accelerate the high-end risk of compound drought and heatwave events. Proceedings of the National Academy of Sciences, 120(28), e2219825120.

Yoon, D., Chen, J. H., Hsu, H., & Findell, K. L. (2026). Variations in land-atmosphere coupling during drought-heatwave events.Communications Earth & Environment,7(1), 1.

Zscheischler, J., & Seneviratne, S. I. (2017). Dependence of drivers affects risks associated with compound events. Science Advances, 3(6), e1700263.

Korea Water Resources Association



일 반 기 사

90 인공지능과 자연재해 예측
김병식·이영미

98 미래 AGI시대가 가져올 수자원 분야의 변화
박진혁

102 새로운 재해의 패러다임, 가뭄과 홍수가 결합된 복합수재해
나우영

111 2025 난징 중국수리학술대회 참가기
김상욱·손민우·이승엽·권순호

116 조금 뒤늦은 제21차 한·일 생태공학 공동세미나 이야기
김명환

Water for future

인공지능과 자연재해 예측

김 병 식
국립강원대학교
전자·AI 시스템공학과
방재전문대학원 정교수
hydrokbs@kangwon.ac.kr

이 영 미
한국기상산업협회 협회장
(주)에코브레인 대표이사
leeym@ecobrain.net

1. 서론

지구의 역사는 각종 재난과 늘 함께 해왔다고 해도 과언이 아니며 이에 따라 인류는 때때로 삶의 터전과 재산, 심하게는 목숨까지도 잃는 비극을 겪어왔다. 홍수, 태풍, 지진, 해일, 화산 폭발, 가뭄 등과 같은 자연재난은 여전히 지속되고 있으며 급변하는 현대사회 속에서 점점 다양해지고 있는 사회구조는 새로운 유형의 사회적 재난을 불러일으키기도 한다. 국민은 더욱 안전한 국가에서 살기를 바라며 국가는 이러한 국민의 요구에 부응해 국민의 소중한 생명과 재산을 보호하기 위한 적극적이고 체계적이며 과학적인 방안을 마련할 필요가 있다. 본 기사에서는 다양한 자연재해 예측 노력에 적용되는 핵심 인공지능(AI) 및 자연재해 예측 기술과 현재 모형 및 시스템의 사례를 살펴보았으며 개괄적으로 AI의 주요 장점, 현재의 한계, 그리고 실제 운영 환경에 적용하는 데 있어 한계점을 언급하였다. AI는 자연재난 예측에 혁명을 일으키고 회복력을 강화할 수 있는 엄청난 잠재력을 가지고 있지만, 관련 분야 전문 지식 및 지역 현실과 지능적으로 융합될 때만 그 잠재력을 최대한 발휘할 수 있다.

산불, 홍수, 가뭄과 같은 자연재해는 매년 막대한 피해를 초래한다. 따라서, 신뢰할 수 있는 재난 조기 예경보 시스템은 대피 계획 및 비상 대응에 필요한 정보를 제공하여 위험과 피해를 최소화하는 데 매우 중요하다. 그러나 예경보 시스템에 내재된 불확실성과 복잡한 변수들로 인해 이러한 예측 불가능한 사건들을 예측하는 것은 극히 어려운 일이다. 그럼에도 최근 인공지능과 머신러닝 분야의 발전은 자연재해 예측 및 위험도 평가를 한층 강화할 새로운 가능성을 열어주

그림 1. AI in 자연재난 관리(출처: Snehal Vinod Raut (2024))

고 있다. 태풍 경로 예측의 정확도 향상부터 위성 데이터를 활용한 산불 탐지에 이르기까지, AI 기반 모델은 선제적 대비를 통해 인명과 자원을 보호하는 데 중요한 역할을 할 수 있다.

2. 인공지능은 자연재해 예측에 어떻게 작동하나?

인공지능(AI)은 고급 머신러닝 알고리즘을 활용하여 재난 발생과 관련된 방대한 다변량 데이터 세트에서 미묘한 패턴을 감지할 수 있다. 대규모 데이터 세트를 학습하는 과정에서 시스템은 서로 얽힌 변수 간 관계를 반영하여 복잡한 현상을 모형화하는 방법을 습득한다. 이후 통계적 방법을 통해 불확실성을 나타내는 확률적 예측을 제공할 수 있다. 자연재해 예측에 활용되는 대표적 AI 기술로는 비선형 관계를 학습하는 신경망, 관측 이미지를 분석하는 영상처리, 재난 보고서에서 비정형 데이터를 추출하는 자연어 처리, 예측 모델을 최적화하는 강화 학습 등이 있다.

예를 들어, 합성곱 신경망(Convolutional Neural Network, CNN)은 과거 산불 발생 이전의 상황을 보여주는 위성 이미지와 기상 데이터를 함께 사용하여 훈련될 수 있다. 이를 통해 모델은 식생 수분, 지형, 온도, 바람 등의 조합이 발화로 이어지는 경향을 학습하고, 새로운 데이터에서 유사한 패턴을 인식할 수 있다.

3. 기존 기술과 국지적 관측 결과의 융합

인공지능과 머신러닝 기술을 활용한 자연재해 예측은 강력한 예측 도구를 제공하지만, 기존 기술과 국지적 관측 결과를 융합하는 것이 필수적이다. 이러한 지식을 인공지능 기반 모델과 통합하면 모델의 정확성을 높일 수 있다. 이러한 기술은 기존의 과학적 데이터나 모형으로는 해결 할 수 없는 환경변화, 조기 경보 신호, 효과적인 대응 전략에 대한 해결책을 제공할 수 있다.

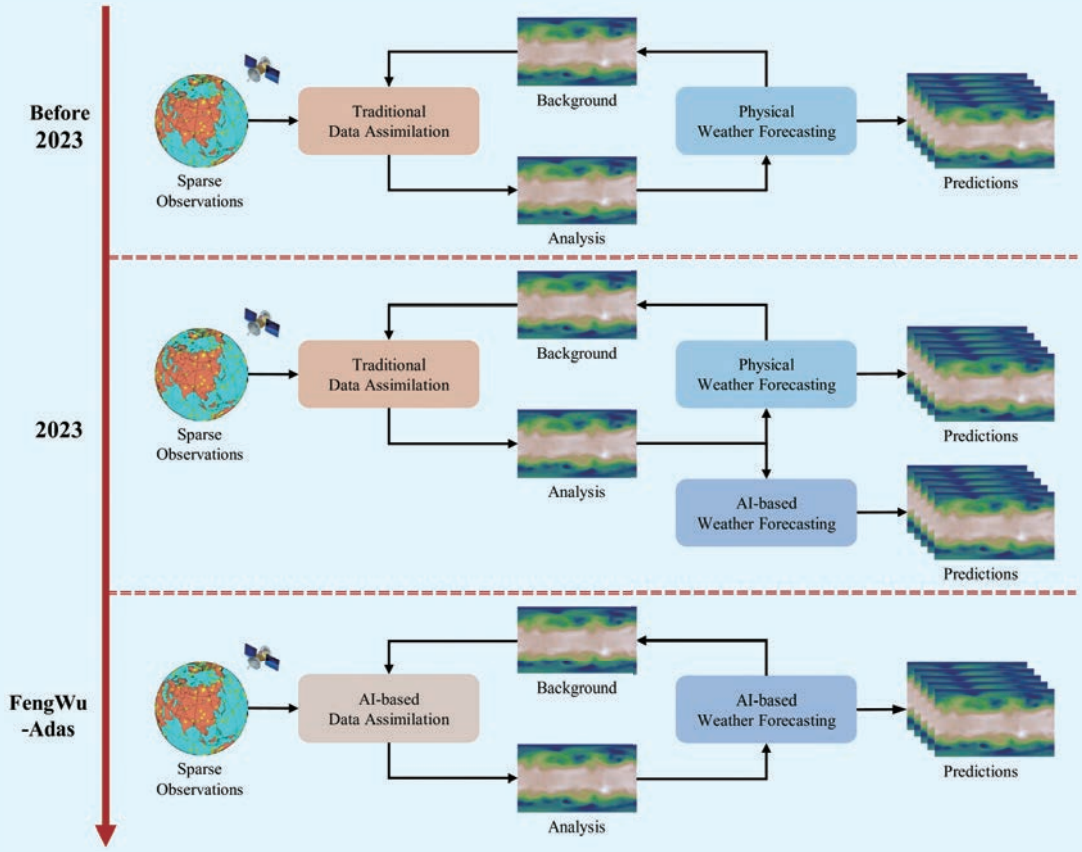


그림 2. AI in 기상예측의 변화 (출처: Chen, Kun et al. (2023))

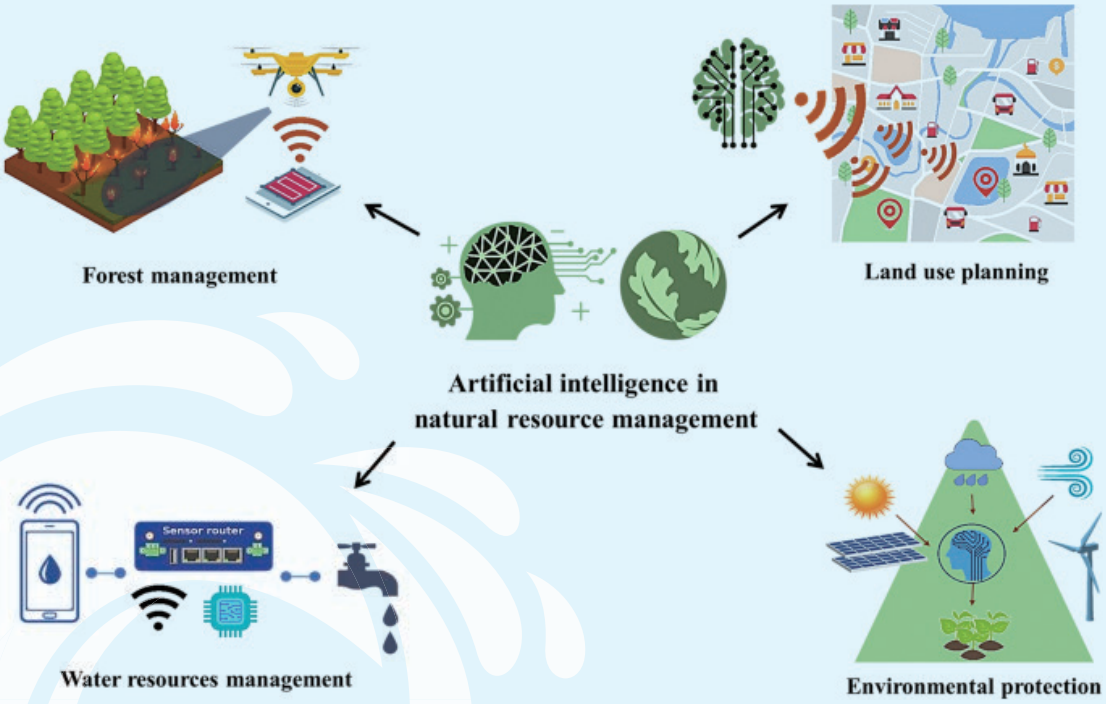


그림 3. 국지 관측자료와 AI 기술의 융합(출처: Chen, Lin, et al. (2023))

4. 자연재난 예측을 위한 AI 기술

인공지능은 방대한 양의 다차원 데이터를 분석하고 미묘한 패턴을 감지하는 데 강점을 지니므로 자연재난의 예측·모델링에 적합하다. 최근에는 다양한 머신러닝 기법이 적용되며 새로운 예측 시스템이 구축되고 있다. 신경망 기반 기법은 과거 재해 데이터에서 비선형 관계를 학습하여 모델의 정확도를 향상 시킬 수 있다. 또한, 영상 분석은 객체 인식 및 변화 감지 알고리즘을 사용하여 고해상도 항공 또는 위성 이미지를 분석할 수 있다. 이를 통해 산불 발생 시 눈에 보이는 연기가 발생하기 전에 발화를 감지하는 등 실시간 재해 모니터링이 가능하다.

한편, 자연어 처리 기술은 재난 관련 문서와 보고서에서 유용한 정보를 추출하여 다른 데이터를 보완할수 있다. 예를 들어 산불 피해 평가 보고서를 분석하면 화재 피해와 지형, 식생, 기후 변수 간의 연관성을 보여주는 패턴을 밝혀낼 수 있으며, 인공지능을 결합한 유체역학·대기 모형·수문 시뮬레이션을 불확실성 정량화와 함께 운영하는 시뮬레이션 앙상블은 지역 규모의 세밀한 예측 정보를 제공할 수 있다. 또한 인공지능은 모델 입력값과 매개변수를 최적화하는 데 도움을 줄 수 있다.

4.1 예방 / 대비 단계에서의 AI 기술 사용

재난 위기관리의 초기 단계인 '재난 발생 전' 단계는 재난의 잠재적 영향을 완화하기 위한 예방과 대비 조치를 실행하는 중요한 역할을 한다. 예방 단계는 위험을 식별하고, 취약성을 평가하고, 사건의 전개 가능성을 평가하는 체계적인 접근 방식이 포함된다. 예방 단계의 목표는 이러한 이벤트 결과를 효과적으로 최소화할 수 있는 예방 조치를 구현하는 것이다.

예방 및 대비의 구체적인 측면을 자세히 다루지는 않겠지만, 이 단계에서 도움이 될 수 있는 모형은 다음과 같다. LSTM 및 BiLSTM과 같은 고급 머신러닝 모형은 위험 요소를 실시간으로 모니터링하고 시계열

그림 4. 전통적인 재난 위기관리 4 단계(출처: Ocal & Torun (2025))

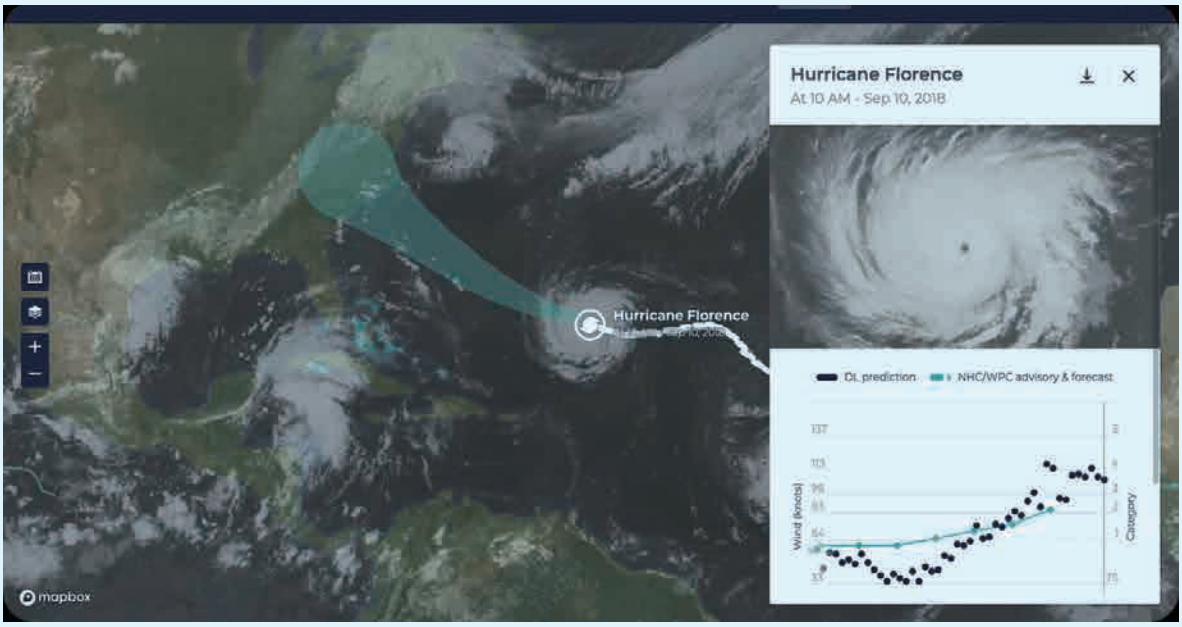


그림 5. Monitoring and Tracking Hurricane Florence Using Deep Learning(출처 : ultralytics.com)

변화를 예측하는 데 유용하며, 자연적·환경적 요인뿐 아니라 인간 활동에 의해 유발되는 재난 상황을 분석하는 데도 효과적이다. 이러한 모형은 위성 영상, 지형도 등 다양한 공간 자료를 활용함으로써 포괄적인 위험 모니터링 체계를 지원한다.

재난 위기관리는 이러한 첨단 기술을 활용하여 귀중한 관점을 취득함으로써 정보에 입각한 의사결정을 내리고 지역사회와 중요 자산을 보호하기 위한 적시 조처를 할 수 있다. '재난 발생 전' 단계가 재난 복원력의 토대를 마련하는 단계라면, AI 기반 모형의 통합은 잠재적 위협에 선제적으로 대응하고 재난의 영향을 최소화할 수 있는 능력을 향상시킨다.

또한, GRU(Gated Recurrent Units)와 같은 시계열 예측 모형은 실시간 변화 감지 및 예측, 적시 경보 발령, 자연재해 · 환경 재해 등 비상 상황 모니터링이 가능하여 재난 위기관리에 혁신을 가져왔다. 이러한 모형은 강 수위, 강우 패턴, 식생 유형과 같은 과거 데이터를 학습함으로써 예측 정확도를 높이고, 주요 비상 시나리오를 사전에 식별할 수 있다.

통합홍수경보 시스템(IFAM)은 다양한 데이터 소스를 활용하는 종합적인 해결책이다. IFAM은 기상 관측소, 수문 센서, 위성 데이터, 기상 모델, 강 수위, 강우량 측정, (물 흐름의) 유속, 토지 지형, 토양 유형 등의 정보를 통합한다. 머신러닝 알고리즘을 기반으로 하는 이 시스템은 일기예보, 수문 정보, 홍수 취약 지역을 종합적으로 분석하여 경보를 생성하고, 이를 지역 당국과 민방위 기관에 효과적으로 전달한다. 이를 통해 긴급 상황에서 IFAM은 관리 기관이 정보에 입각한 결정을 내리고 자원 배분을 최적화할 수 있도록 지원한다.

기후 위기에 대처하기 위한 지속적인 노력의 하나로 Google 등 주요 기술 기업은 중요한 조처를 하고 있다. 구글의 홍수 예보 도구인 Flood Hub는 현재 80개국에서 7일 전 예보를 제공하며 4억 6천만 명에 달하는 사람들을 보호하고 있다. CNN과 같은 인공신경망(ANN)은 주로 자연재해, 산업, 보건, 테러 사건 등 다양한 긴급 상황에서 위성 또는 드론으로 촬영한 영상을 분석하고 조기 경보 및 데이터 분석을 제공하는

데 사용된다. 민간 기업들도 물리적 데이터와 머신러닝을 통합한 첨단 플랫폼과 제품 개발을 통해 재난 관리 발전에 적극적으로 기여하고 있다. OneConcern과 같은 기업은 병원과 대피소 등 주요 인프라에 대한 상세한 정보를 제공하고 자연재해, 교통사고, 산업 비상사태, 보건 위기, 테러 위협 등 다양한 재난 시나리오에서 계획 및 자원 관리를 지원함으로써 구호 활동 중 의사결정을 안내하고 협업을 촉진하는 데 중추적인 역할을 하는 소프트웨어 플랫폼을 제공한다.

이처럼 재난 위기관리에 AI 기반 시스템과 데이터 분석을 통합함으로써 대비 및 대응 능력의 새로운 지평을 열었으며, 예기치 못한 도전에 맞서 생명, 인프라, 지역사회를 보호하는 능력을 크게 향상 시키고 있다.

4.2 대응 단계에서의 AI 기술 사용

컴퓨터가 사람의 언어를 이해할 수 있도록 하는 데 중점을 둔 AI 기술의 한 분야인 자연어처리(NLP) 기술은 긴급 상황 관리를 개선하는 데 엄청난 잠재력을 가지고 있다. NLP를 활용하면 메시지, 트윗, 소셜 미디어 게시물 등 비정형 데이터를 분석하여 조난 신호, 긴급 요청, 주요 상황 정보를 자동으로 식별할 수 있다. 또한 NLP는 정부 기관, 비정부기구, 법 집행 기관 등 비상 관리에 관여하는 다양한 조직의 상황 보고서를 분석하는 데도 유용하다. 이러한 보고서에는 재난의 범위, 인프라 영향, 인구수요 및 기타 관련 정보에 대한 중요한 세부 정보가 포함되어 있다. NLP는 기계학습 기술을 통해 텍스트를 자동으로 분류하여 의사결정에 유용한 관점을 제공한다. 특히 NLP 기반의 다국어 처리 및 번역 기술은 국제적 재난 상황에서 기관 간 협업과 정보 공유를 원활하게 한다.

한편, GIS 기술은 실시간 지리 공간 분석을 강화하여 대피 계획, 탈출 경로 파악, 이동 조정을 지원한다. GIS는 주요 인프라, 위험 요소, 인구통계학적 데이터를 단일 지도에 통합하여 위험 및 취약 지역을 강조 표시한다. 이러한 기술은 데이터 기반의 의사결정을 가능하게 하고, 비상 대응에 참여하는 모든 관련 기관 간의 효과적인 협업을 촉진한다. 미래 지향적인 기업들은 의사결정 역량을 더욱 강화하기 위해 GIS 시스

그림 6. Disaster Tweets Classification Using Machine Learning with NLP(출처 : Wisdom ML Youtube)

템에 AI 기술을 통합하는 방안을 모색하고 있다.

환경 조건, 비상 상황, 잠재적 조치, 조치 결과를 분석하도록 훈련된 인공신경망(ANN)인 DQN(Deep Q Network)이 그 예시이다. 훈련이 끝나면 ANN은 현재 상황에 따라 최선의 행동 방침을 지능적으로 결정할 수 있다. 이러한 데이터 기반 의사결정 능력은 비상 관리 운영을 안내하는 데 매우 유용하다.

4.3 복구 단계에서의 AI 기술 사용

재난관리의 복구 단계에서는 정확한 사건의 위치, 재난의 강도와 범위, 인구 통계 정보, 인구수, 취약 계층의 존재 여부와 같은 주요 데이터 포인트가 가장 중요하다. AI 기반 도구를 사용하면 피해 평가와 피해 지역 지도화 문제를 효과적으로 해결할 수 있다.

이러한 도구 중 하나는 Edge Detection과 같은 알고리즘 기술을 활용한 이미지 처리이다. 이를 통해 캡처한 이미지를 분석하여 손상된 구조물과 중요 요소를 식별하고, 피해 지역의 지도화를 쉽게 하며, 자연재해 · 교통 재해 · 산업 재해 발생 후 실행할 수 있는 경로를 설정할 수 있다.

사진 측량 기능이 탑재된 무인 항공기(UAV)는 상황 모니터링과 구조 작업 지원에 중요한 역할을 한다. 열화상 및 LiDAR(빛 감지 및 거리 측정) 센서를 장착한 드론은 중요한 이미지를 캡처한 다음 특수 AI 알고리즘을 사용하여 분석한다. 이러한 분석은 접근하기 어려운 지역에서 실종자나 재해 피해자를 발견하는 데 도움이 되며, 구조 활동의 효율성을 높여준다. 머신러닝 알고리즘을 활용하는 U-Net 기반 알고리즘과 같은 AI 기반 도구는 위험 평가, 재건 우선순위 지정, 피해 지역 세분화에 이바지한다. 이러한 알고리즘은 위성 또는 항공 이미지와 같은 다양한 출처의 레이블이 지정된 데이터 세트를 활용하여 피해 지역을 정확하게 식별하고 복구 단계에서 자원 계획을 지원할 수 있다. 인공 신경망(ANN)과 CNN은 이 과정을 더욱 개선하여 재난의 원인과 관계없이 피해 지역을 정확하게 분류하고, 종합적인 피해 평가와 전략적인 자원 배분을 가능하게 한다. 또한 이러한 네트워크는 복구 작업의 조정을 최적화하고 재난 후 활동의 복구를 가속화하는 데 중요한 정보인 온전한 구조물, 물 또는 에너지 매장량과 같은 잔여 자원의 지도화를 쉽게 한다.

5. 맺음말

본 기사에서는 자연재해 예측과 재난관리 전 과정

그림 7. Damage assessment using semantic segmentation (출처 : technologyreview.com)

에서 인공지능(AI)이 어떤 방식으로 활용될 수 있는지, 그리고 실제 적용을 위해 무엇이 필요한지를 개괄적으로 살펴보았다. AI는 방대한 다변량 데이터에서 패턴을 학습해 홍수·산불·가뭄 등 재난의 조기 예·경보, 위험도 평가, 실시간 모니터링을 고도화할 수 있으며, 위성·드론 영상 분석과 자연어처리, GIS 기반 의사결정 지원 등을 통해 예방-대비-대응-복구 각 단계의 실행력을 높일 잠재력이 크다. 특히 다양한 관측 자료를 통합하는 경보 체계나, 글로벌 규모의 예보 서비스, 민간 플랫폼의 재난 시나리오 기반 자원관리, 그리고 피해지역 분할·피해평가 자동화 등은 AI가 현장 문제 해결로 이어질 수 있음을 보여준다.

다만 AI 기반 예측·분석이 재난 현장에서 신뢰받기 위해서는 기술 자체의 성능뿐 아니라 데이터 품질과 대표성, 지역 특성 반영, 불확실성에 대한 정량적 제시, 운영 환경에서의 검증과 지속적 개선이 함께 갖춰져야 한다. 무엇보다 재난은 지역별 지형·기후·인프라·사회적 취약성이 다르게 작용하므로, AI는 단독 해법이 아니라 기존 물리 기반 모형과 관측, 현장 전문지식의 '지능적 융합'을 통해서만 잠재력을 최대화할 수 있다. 또한 실제 재난대응 체계에 넣기 위해서는 기관 간 데이터 연계, 표준화된 운영 절차, 책임 있는 의사결정(사람 중심의 최종 판단)과 같은 거버넌스가 필수적이다.

결국 AI의 역할은 "재난을 완전히 없애는 것"이 아니라, 더 이르고 더 정확한 정보로 위험을 줄이고 대응 시간을 확보하여 인명과 재산 피해를 최소화하는 데 있다. 앞으로는 기술 개발과 더불어, 현장 적용을 전제로 한 실증과 교육·훈련, 데이터·모형의 공동 활용 생태계를 강화함으로써 AI 기반 재난 예측·대응 시스템이 사회 전체의 재난 회복력(resilience)을 높이는 방향으로 발전해 나가야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 기상청 재원으로 한국기상산업기술원의 기상기후데이터 융합분석 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

Chen, Kun, et al. (2023). Towards an end-to-end artificial intelligence driven global weather forecasting system. arXiv preprint arXiv:2312.12462.

Chen, Lin, et al. (2023). RETRACTED ARTICLE: Artificial intelligence-based solutions for climate change: a review. Environmental Chemistry Letters, 21(5), 2525-2557.

Ocal, F. E., & Torun, S. (2025). Leveraging artificial intelligence for enhanced disaster response coordination. International Journal of Disaster Risk Management, 7(1), 235-246.

Raut, S. V. (2024). Artificial intelligence use in disaster management. International Journal of Innovative Science and Research Technology, 9(5), 101-109.

ultralytics (2024.09.25.). "자연 재해 관리에 있어서의 AI", https://www.ultralytics.com/ko/blog/ai-in-natural-disaster-management

MIT Technology Review (2023.02.20.). "How AI can actually be helpful in disaster response". https://www.technologyreview.com/2023/02/20/1068824/ai-actually-helpful-disaster-response-turkey-syria-earthquake/

Wisdom ML (2022.07.24.). "Part 1 | Disaster Tweets Classification Using Machine Learning with NLP | NLP Project in Python", https://www.youtube.com/watch?v=rexyyn2nlfU

미래 AGI시대가 가져올 수자원 분야의 변화

박 진 혁
K-water연구원 수자원환경연구소
수석연구원
park5103@kwater.or.kr

1. AI를 넘어 AGI로

최근 일론 머스크는 AGI(Artificial General Intelligence, 범용 인공지능)에 대해 불과 몇 년 안에 인간 수준의 지능을 넘어서는 인공지능이 등장할 수 있으며, 그 이후의 사회는 지금과 전혀 다른 모습이 될 것이라는 기사를 본 적이 있다. 지금까지 일론 머스크는 전기자동차와 민간 우주개발 등에서 항상 3~5년 앞을 내다보는 전망을 제시해 왔으며, 당시에는 비현실적으로 보였던 발언들조차 시간이 흐른 뒤에는 상당 부분 현실로 이어졌기 때문에 이번 AGI에 대한 예측 역시 가볍게 넘기기 어렵게 만든다. 다수 전문가의 전망에 따르면, 2020년대 후반에는 도메인 간 추론이 가능한 준AGI 수준의 시스템이 등장하고, 2030년대 초중반에는 목적 설정과 장기 판단이 가능한 실질적인 AGI가 출현할 가능성을 제기하지만, 일론 머스크는 그 시기를 더 앞당겨서 예측하고 있다.

그의 예측이 현실이 된다면, 기존의 AI를 넘어서는 AGI 시대는 예상보다 빠르게 도래할 것이며, 그 파급효과 또한 매우 클 것으로 보인다. 이러한 문제의식은 자연스럽게 수자원 분야에 미칠 영향에 대한 고민으로 이어진다. 현재 수자원 분야에서는 인공지능(AI)의 활용이 빠르게 확대되고 있다. 강우-유출 예측의 정확도 향상, 가뭄 및 홍수 지표의 자동 산정, 수질 센서 자료의 이상 탐지 등 다양한 영역에서 데이터 기반 기법이 실무에 적용되고 있으며, 그 성과 또한 점차 가시화되고 있다. 그러나 이러한 변화는 어디까지나 현재의 AI가 제공할 수 있는 범위 내의 진전에 해당한다.

다가오는 AGI시대는 이러한 흐름의 단순한 연장이

아니다. AGI는 특정 목적에 최적화된 계산 도구가 아니라, 복합적인 문제를 맥락 속에서 이해하고 목표를 설정하며 장기적 결과를 고려해 판단할 수 있는 지능으로 정의된다. 이러한 특성은 불확실성과 복잡성이 본질적으로 내재된 수자원 분야에 근본적인 변화를 야기할 가능성이 크다.

현재 진행 중인 AGI연구에서는 고급 머신 러닝, 인지 모델링 및 신경 과학의 통찰력이 어떻게 협력하여 다양한 영역에서 학습하고 적응하는 시스템을 구축할 수 있는지 모색하고 있다. 지금까지의 진행 상황을 바탕으로 AGI를 만드는 데는 다음과 같은 몇 가지 핵심 기술을 혼합하는 것이 포함될 가능성이 높다(Ultraytics 홈페이지, 2026).

딥러닝: AGI는 우리가 주변 세계를 관찰하고, 듣고, 경험함으로써 자연스럽게 배우는 방식과 유사하게 딥러닝을 사용하여 패턴을 인식하고 해석한다.

강화 학습: AGI는 환경과 상호작용하고 피드백을 받으며 그에 따라 행동을 조정하여 시간이 지남에 따라 스스로를 개선할 것이다. 예를 들어 AGI 기반 시스템은 시뮬레이션 환경에서 새로운 제품 조립을 연습하고, 실수로부터 배우고, 접근 방식을 개선한 다음, 실제 제조에 학습 내용을 적용할 수 있다.

신경망: 신경망을 AGI의 두뇌라고 생각할 수 있다. 신경망은 많은 정보를 빠르게 분석하고, 복잡한 패턴을 발견하고, 자세한 지침 없이도 독립적으로 결정을 내릴 수 있도록 한다.

현재 수자원 분야에서 활용되는 AI는 주로 대규모 관측자료와 시뮬레이션 결과를 학습하여 예측정확도를 향상시키는데 초점이 맞추어져 있다. 이러한 AI는 입력과 출력이 비교적 명확히 정의된 문제에서 높은 성능을 보이며, 반복적 계산과 패턴 인식이 요구되는 업무를 효율적으로 대체하거나 보조하는 역할을 수행한다. 실제로 홍수 예측모델의 보정, 관측자료 결측보정, 수질 이상 징후 탐지와 같은 작업은 이미 AI를

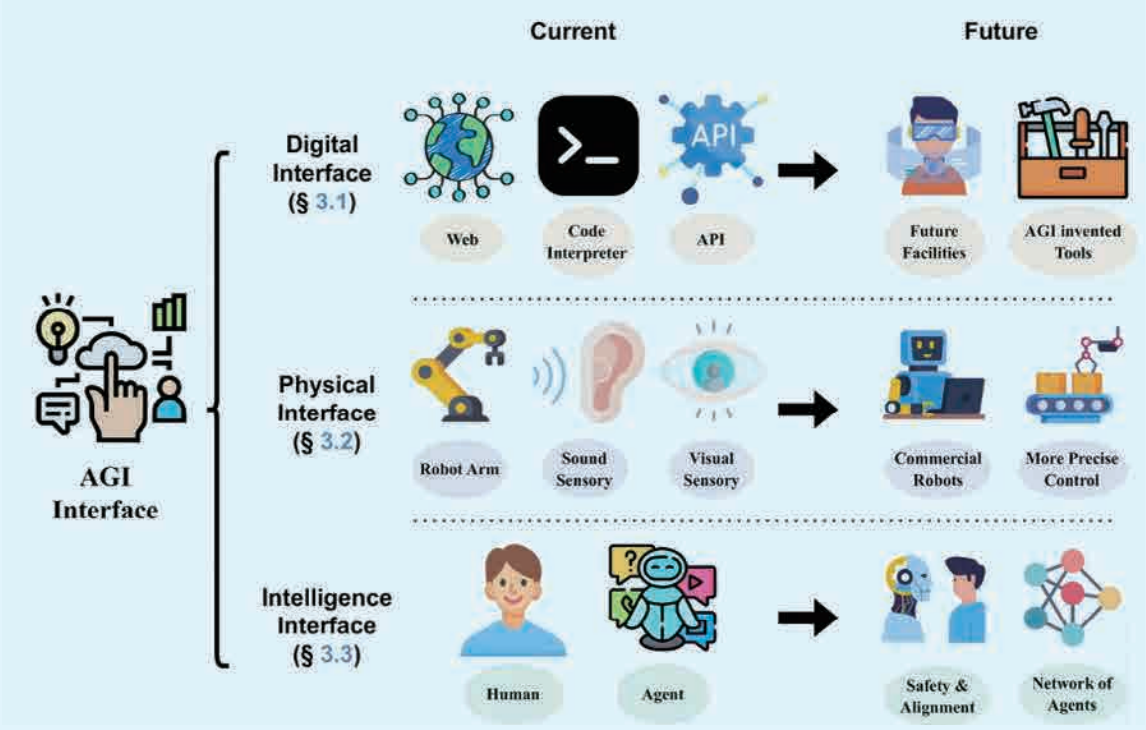


그림 1. 현수준에서 AGI 작동 원리(디지털, 물리적 및 지능기반 인터페이스, Ultraytics 홈페이지)

그림 2. 미래 AGI(범용인공지능)의 출현 (챗GPT 활용)

통해 상당 부분 자동화되고 있다.

그러나 이러한 AI는 문제의 맥락을 스스로 이해하거나 문제의 중요도를 판단하지는 못한다. 예를 들어 홍수량 예측결과가 사회적 재난으로 이어질 가능성이 있는지, 혹은 어떤 대응 전략이 장기적으로 더 바람직한지를 판단하는 것은 여전히 전문가의 영역에 남아 있다. 현재의 AI는 '어떻게(How)'를 최적화하는 데는 탁월하지만, '왜(Why)'와 '무엇을(What)'에 대한 이해는 제한적이다.

AGI는 이러한 한계를 넘어설 것으로 보인다. AGI는 단순히 데이터 패턴을 학습하는 것을 넘어, 수자원 시스템의 복잡한 상호작용을 이해하고, 다양한 이해관계자의 요구를 균형 있게 고려하며, 불확실한 미래에 대한 시나리오를 자율적으로 생성하고 평가할 수 있다. 이는 수자원 관리의 의사결정 구조 자체를 변화시킬 가능성이 있다.

예를 들어, 기후변화로 인한 강수 패턴의 변화는 단순히 홍수나 가뭄의 빈도를 증가시키는 것에 그치지 않는다. 이는 물 공급 계획, 에너지 생산, 생태계 보전, 농업용수 배분 등 여러 분야에 걸쳐 복잡한 영향을 미친다. AGI는 이러한 다차원적 문제를 통합적으로 분석하고, 각 대안의 장기적 파급효과를 예측하며, 최적의 적응전략을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

AGI 시대의 수자원 관리는 지금과는 근본적으로 다른 모습을 보일것이다. 실시간 의사결정 지원 시스템은 단순한 예측 도구를 넘어, 상황을 이해하고 대안을 제시하는 전략적 파트너로 진화할 것이다. 수자원 전문가의 역할 또한 변화하여, 데이터 분석보다는 가치 판단과 윤리적 결정, 그리고 AGI가 제시한 대안에 대한 사회적 합의 도출에 더 집중하게 될 것이다. AGI 시대는 기술적 도약인 동시에, 수자원 관리의 거버넌스와 윤리에 대한 근본적인 재검토를 요구하는 전환점이 될 것이다.

수자원 분야는 AGI가 가장 큰 변화를 가져올 수 있

는 영역 중 하나다. 불확실성과 복잡성, 그리고 다양한 이해관계가 얽혀있는 이 분야에서 AGI의 등장은 단순한 기술적 진보를 넘어 의사결정 패러다임의 근본적 전환을 의미한다. 이러한 변화에 선제적으로 대응하고 준비하는 것이 향후 수자원 관리의 성패를 좌우할 것으로 보인다. 서두에서도 언급한바 와 같이 일론 머스크가 그려온 미래는 언제나 논란의 중심에 있었지만, 시간이 흐를수록 현실에 가까워졌다. 이러한 맥락에서 AGI에 대한 그의 발언은 하나의 예언이라기보다, 앞으로 수자원분야가 어떤 모습으로 변화하게 될지를 우리에게 묻는 질문에 가깝다.

참고문헌

Alvarez, S. (2025, October 20). Elon Musk: Grok 5 now has a 10% chance of becoming world's first AGI. Teslarati.

Elon Musk predicts artificial intelligence will be smarter than any human by the end of 2026. Reuters. (2025, October 23). Artificial Intelligencer-OpenAI and Google's wrestling match.

Ultraytics 홈페이지 : https://www.ultralytics.com/ko/blog/

새로운 재해의 패러다임, 가뭄과 홍수가 결합된 복합수재해

나우영
동아대학교
건설시스템공학과 조교수
wna92@dau.ac.kr

1. 들어가며

바야흐로 기후위기(climate crisis)의 시대가 도래했다. 급격한 기온 상승과 맞물려 요동치는 기후시스템이 우리 사회에 미치는 파급력은 실로 막대하다. 지금까지 우리가 경험하지 못했던 비정상성(nonstationarity)을 띤 재해들이 전례 없는 규모로 출현하고 있는 것이 그 증거다. 지구촌 곳곳을 강타하는 가뭄, 홍수, 폭염, 산불 등의 소식은 이제 더 이상 이례적인 뉴스로 다가오지 않을 정도다.

우리가 최근 체감하고 있는 자연재해의 또 다른 특징은 여러 극한 사상(events)들이 서로 결합하여 나타난다는 점이다. 예컨대 미국 캘리포니아 지역은 2014년부터 2017년까지 극심한 가뭄에 시달리다 대기강(atmospheric river)에 의한 대홍수를 맞이했다. 유럽 역시 2021년 최악의 홍수에 이어 500년 빈도의 대가뭄을 연이어 겪으며 엄청난 피해를 입었다.

지역적 편차는 있겠으나, 다수의 연구에 따르면 이른바 복합재해(compound hazard)라 불리는 다차원적 재해의 빈발은 이미 전 지구적인 현상으로 자리 잡았다(Bevacqua et al., 2021; Messori et al., 2021). 더욱이 기후변화의 영향으로 향후 그 발생 횟수와 파괴력은 한층 가중될 것으로 우려된다(Bevacqua et al., 2023). 본 고에서는 이러한 거시적 변화 속에서, 복합재해의 정의와 유형, 요구되는 자료의 특성, 물 관련 복합재해에 대한 분석 사례들을 소개하고자 한다.

2. 복합재해에 대하여

복합재해는 두 개 이상의 재해 유발 인자(drivers)

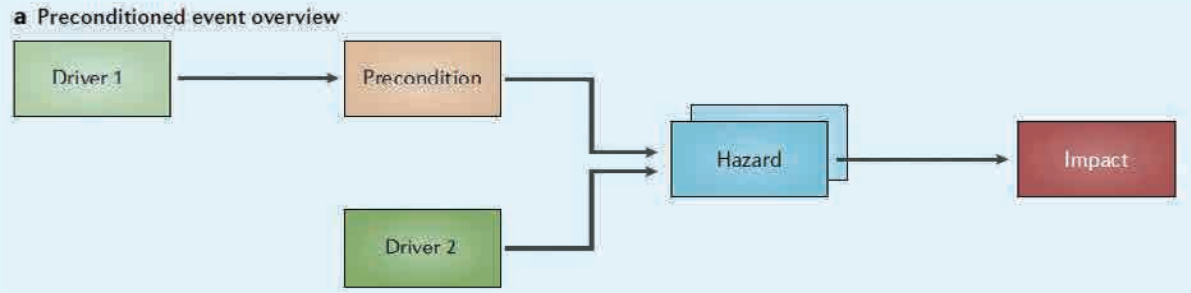
나 재해 현상(hazards)이 시공간적으로 상호작용하여 사회·경제적 혹은 환경적 피해를 가중시키는 현상으로 정의할 수 있다. 이때 결합하는 재해들은 서로 이질적이거나 동질적일 수 있으며, 그 결합 방식 또한 시공간적으로 매우 다차원적인 특성을 지닌다. 주목할 점은, 개별 재해 인자 단독으로는 그 위험성이 크지 않더라도 이들이 결합할 경우 비선형적인 상호작용을 통해 피해 발생 확률과 규모가 기하급수적으로 증폭될 수 있다는 것이다. 즉, 복합재해의 파급력은 단순한 산술적 합을 크게 상회한다. 따라서 기존의 단일 재해 중심의 평가 기법을 복합재해에 그대로 적용할 경우, 실제 내재된 위험도를 심각하게 과소평가하는 한계를 지니게 된다.

복합재해 관련 연구를 선도하는 Helmholtz Centre for Environmental Research의 Jakob Zscheischler 연구팀은 전 지구적으로 발생하는 복합재해를 발생 기작에 따라 크게 네 가지 유형으로 분류한 바 있다(그림 1). 첫째, '사전 조건화된 복합재해(Preconditioned compound events)'이다. 이는 특정 기상·수문학적 조건이 선행되어 후속 재해에 대한 취약성을 높이는 경우를 뜻한다. 장기간의 선행 강우로 인해 토양수분이 포화된 상태에서 추가적인 호우가 유입되어 홍수 위험이 극대화되는 현상이 대표적이다. 둘째, '다변량 복합재해(Multivariate compound events)'로, 동일한 지역에서 서로 다른 재해 인자가 동시에 발생하여 피해를 가중시키는 형태이다. 주로 연안 지역에서 조위 상승(만조)과 강한 호우, 그리고 하천의 고수위가 중첩되며 복합홍수(compound flooding)를 유발하는 경우가 이에 해당한다.

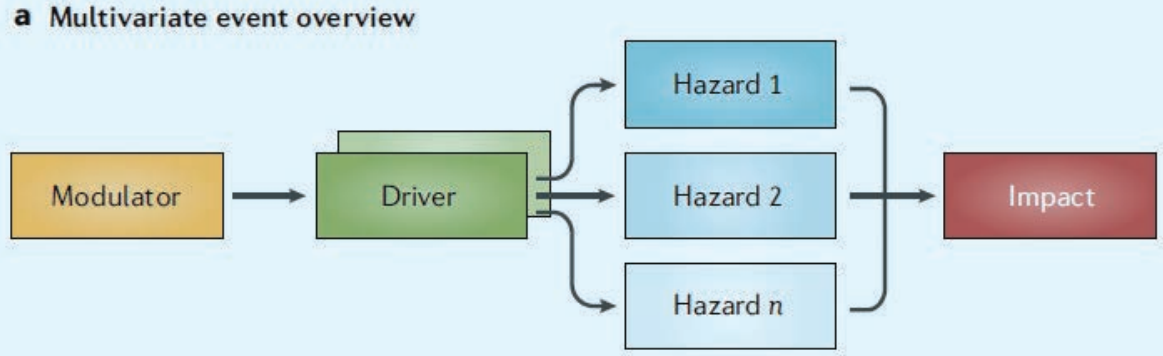
셋째, '시간적 연속성 복합재해(Temporally compounding events)'는 동일 지역에서 여러 재해가 짧은 시차를 두고 연쇄적으로 발생하는 유형이다. 극심한 가뭄 직후에 홍수가 발생하거나 그 반대의 상황이 전개되어, 수자원 확보 및 치수 관리에 심각한 교란을 초래하는 사례를 들 수 있다. 넷째, '공간적 복합재해(Spatially compounding events)'로, 서로 다른 여러 지역에서 동일한 유형의 재해가 동시다발적으로 발생하는 현상을 의미한다. 아프리카, 유럽, 북미 등 주요 대륙에서 유사한 시기에 가뭄이 발생하여 전 지구적인 식량 안보 위기를 초래하는 것이 그 예이다. 기후변화의 심화로 인해 수문 기상학적 변동성이 커짐에 따라, 향후에는 이러한 기존의 네 가지 범주를 넘어서는 더욱 새롭고 복잡한 형태의 복합재해 유형이 출현할 가능성도 배제할 수 없다.

국내 학계 및 실무에서는 복합재해 중에서도 특히 연안 도시에서 발생하는 복합홍수(compound flooding)에 지속적인 주목을 해왔다. 삼면이 바다로 둘러싸인 한반도의 지리적 특성상, 인구와 주요 산업 시설이 밀집된 연안 해안 도시가 다수 분포하고 있기 때문이다. 내륙 도시의 침수 피해가 주로 국지적인 지형 특성이나 내수배제 시스템의 용량 한계에 기인하는 반면, 연안 도시의 홍수는 조위 상승, 집중호우, 폭풍해일, 그리고 하천 수위 상승 등 다차원적인 수문·해양학적 인자들이 중첩되어 발생한다. 특히 국가 핵심 산업인 조선업 및 대규모 해안 인프라가 집중된 부산, 울산, 창원 등 동남권 메가시티는 이러한 연안 복합홍수 위험에 구조적으로 크게 노출되어 있다.

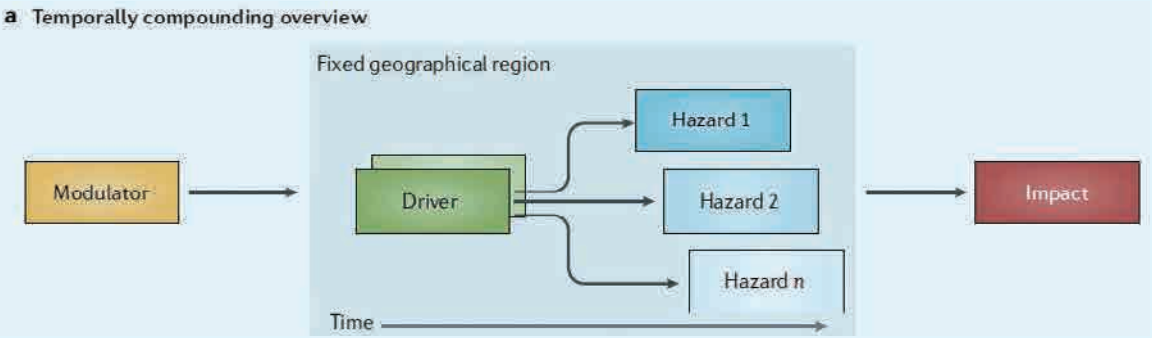
나아가 복합재해는 그 유형의 다양성과 발생 양상의 지역적 편차로 인해 명확한 발생 기작(mechanism)을 규명하는 데 큰 어려움이 따른다. 일례로 특정 지역에서 발생한 극한 기상 현상은 해당 지역의 국지적 조건뿐만 아니라, 수천 킬로미터 떨어진 원거리의 기후 변동성(climate variability)에 의해 촉발될 수도 있다. 이는 복합재해를 위시한 극한 자연재해가 본질적으로 전 지구적 규모의 대기-지표-해양(Atmosphere-Land-Ocean) 시스템 간의 복잡한 상호작용



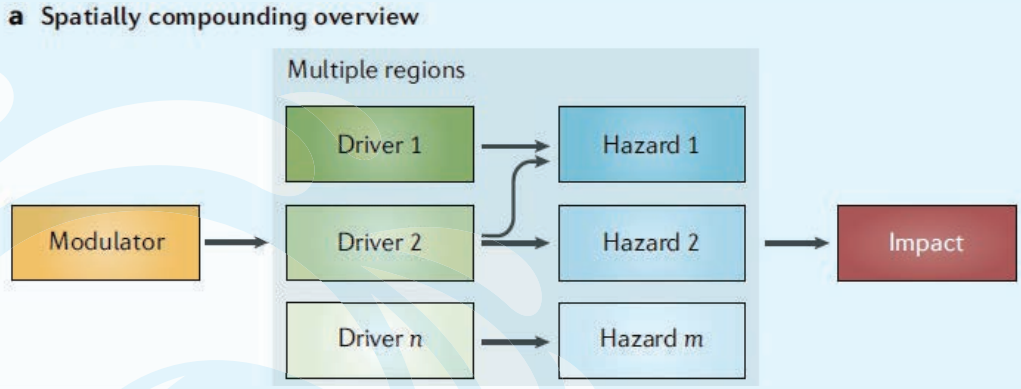
Type 1: 선행 조건을 갖춘 복합재해



Type 2: 동시 발생 복합재해



Type 3: 시간 지연 복합재해



Type 4: 원격 결합 복합재해

그림 1. Zscheischler et al. (2020)의 네 가지 복합재해 유형. Modulator는 기후시스템의 변동성이며 Driver를 조성함, Driver는 Hazard를 유발하는 기상학적 현상, Hazard는 Driver에 의해 발생하는 자연재해, Impact는 복합재해의 발생으로 인해 유발되는 피해를 의미함

에 기인하기 때문이며, 대중적으로 알려진 기후 시스템의 비선형적 역학 관계인 '나비효과(Butterfly Effect)' 및 원격상관(Teleconnection)의 관점에서 해석될 수 있다. 이러한 복잡성과 불확실성에도 불구하고, 최근에는 물리적 기반의 역학 모델뿐만 아니라 데이터 기반 추론을 통해 재해의 복합적인 거동과 시공간적 상관관계를 명확히 이해하려는 연구가 활발히 진행되고 있다(Wang et al., 2024).

3. 자료의 중요성

복합재해 연구에 있어 양질의 방대한 데이터 확보는 필수적인 선결 과제이다. 복합재해는 기본적으로 두 개 이상의 기후 및 수문 변수가 동시에 극한 상태에 도달할 때 발생하므로, 단일 재해에 비해 관측되는 사상(event)의 빈도가 절대적으로 부족할 수밖에 없다. 따라서 복합재해의 위험도를 정량화하고 통계분석의 신뢰성을 확보하기 위해서는 충분한 표본(sample) 크기의 확보가 전제되어야 한다. 나아가 기후변화에 따라 미래에 복합재해가 어느 정도의 빈도와 강도로 발생할 것인지 전망하는 것 역시 매우 중요한 연구 주제이다. 그러나 기존의 일반적인 관측 자료나 단일 궤적(single-trajectory) 기반의 미래 시뮬레이션 자료는 희소한 복합재해 사상을 충분히 모의하고 기후시스템의 불확실성을 평가하는 데 뚜렷한 한계를 지닌다.

이러한 한계를 극복하기 위한 훌륭한 대안으로 단일모형 대규모 기후앙상블(Single Model Initial-condition Large Ensemble, 이하 SMILE) 자료가 활발히 활용되고 있다(Kay et al., 2015). 2010년대에 그 개념이 정립된 이후, 현재 미국 National Center for Atmospheric Research를 비롯한 7개 이상의 주요 연구기관에서 SMILE 자료를 생산 및 관리하고 있다. SMILE은 인위적인 기후변화 요인과 기후시스템 내부의 자연적 변동성(internal variability)을 모두 고려하여 생산되는 기후 모의 자료이다. 구체적으로, 온실가스 배출로 인한 인위적 영향은 특정 미래 시나리오(예: RCP8.5 또는 SSP5-8.5)를 통해 반영하며, 기후의 내부 변동성은 모의 초기 조건에 극히 미세한 섭동(10^{-14} K 수준)을 부여하는 방식으로 구현한다.

SMILE은 모의 성능이 검증된 단일 기후모형 내에서 통상 30~50개의 앙상블 멤버를 생성한다. 이렇게 구축된 대규모 앙상블 멤버들은 미래에 발현 가능한 기후 전망의 범위를 폭넓게 제시함과 동시에, 발생 확률이 극히 낮은 복합 수재해 사상의 표본을 대량으로 확보할 수 있게 해준다. 이는 결과적으로 다변량 확률모델링을 통한 위험도 산정, 재해 특성 및 변수 간의 상관도 분석의 신뢰도를 대폭 향상시킨다. 즉, SMILE 자료는 단순한 미래 기후의 평균적 예측을 넘어 기후시스템의 변동성에 기인한 불확실성까지 정량적으로 구현해 낸다. 이를 통해 발생 가능한 다수의 복합재해 시나리오를 선제적으로 파악하고, 미래 전망에 대한 통계적 강건성을 확보할 수 있다.

최근에는 특정 지역의 특성을 반영하여 상세화 및 편의보정(bias-correction) 절차까지 수행된 SMILE 기반 자료들이 제공되고 있다. 북미 지역을 대상으로 구축된 Canadian Large Ensembles Adjusted Dataset (CanLEAD)가 그 대표적인 사례이다(Cannon et al., 2022). CanLEAD는 총 50개의 독립적인 미래 전망 궤적을 제공하며, 이는 2100년에 현실화될 수 있는 50가지의 서로 다른 지구 기후의 대안적 미래(그림 2)를 보여주는 것으로 해석할 수 있다. 아울러 동아시아 지역의 수자원 및 방재 정책 수립을 위해서는 d4PDF (database for Policy Decision-making for Future climate change) 앙상블 자료가 매우 유용하게 활용될 수 있다(Ishii and Mori, 2020).

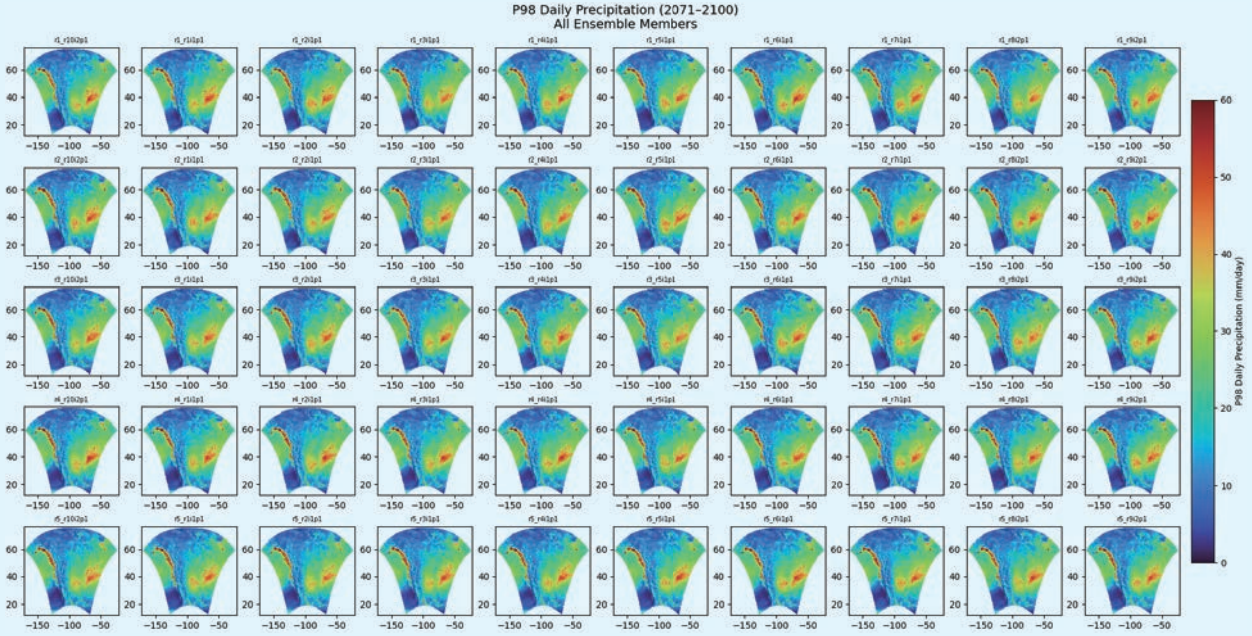


그림 2. CanLEAD 단일모델 대규모 기후앙상블에서 생산된 북아메리카 지역의 2071-2100년 상위 98% 일 강수량 분포

4. 가뭄-홍수 복합수재해 발생 분석 및 전망 사례

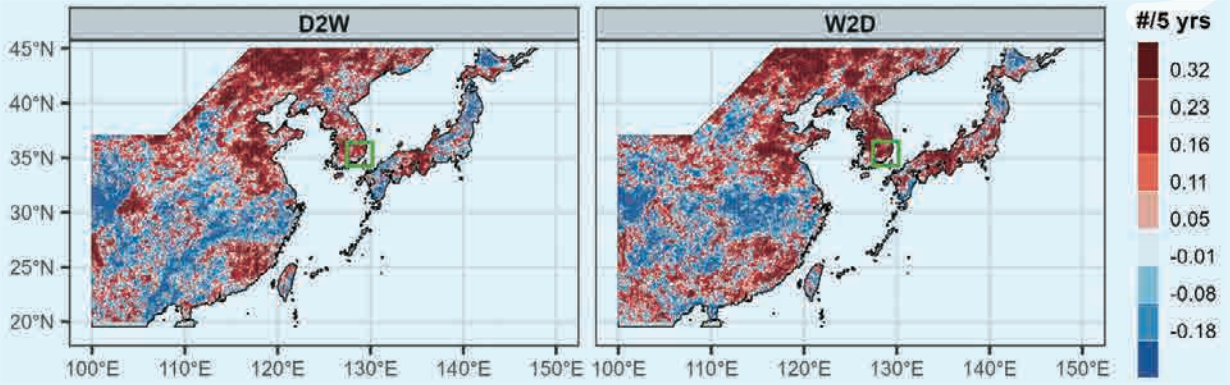
본 고에서는 Zscheischler et al. (2020)이 제시한 복합재해 유형 중 세 번째에 해당하는, 가뭄과 홍수라는 양극단의 수문 현상이 짧은 시차를 두고 교차 발생하는 '복합 수재해' 사례를 집중적으로 조명하고자 한다. 가뭄과 홍수의 급격한 전이(transition)는 댐 운영 및 용수 공급 체계에 심각한 교란을 초래한다. 특히, 극심한 가뭄으로 인해 토양의 소수성이 증가한 상태에서 집중호우가 발생할 경우, 강수의 토양 침투능이 저하되어 표면 유출이 급증함으로써 홍수 피해가 가중된다. 반대로 홍수 직후 가뭄이 발생하는 패턴은 식생 생장에 치명적인 타격을 입힌다. 이러한 형태의 극단적 수문 사상은 국내보다 해외 학계에서 일찍이 주목해 왔으며, 강수 채찍(Precipitation whiplash), 수문학적 시소(Hydrological seesaw), 수문기후학적 진동(Hydroclimatic swing) 등 다양한 용어로 명명되어 활발히 연구되고 있다(Tan et al., 2023; Swain et al., 2025).

이와 관련하여 Lee et al. (2025)은 동아시아 지역을 대상으로 과거부터 최근까지 복합 수재해의 발생 특성 및 시공간적 변화를 분석하였다. 해당 연구에서는 유럽중기예보센터(ECMWF)에서 제공하는 9km 공간 해상도의 기후 재분석 자료인 ERA5-Land를 활용하였다. 구체적으로는 기온, 강수량, 토양수분 데이터를 비모수적(non-parametric) 방식으로 결합하여 지표면의 물 부족 및 수자원 확보 상태를 정량화하였다. 연구진은 가뭄에서 홍수(Drought-to-Wet, D2W), 혹은 홍수에서 가뭄(Wet-to-Drought, W2D)으로의 전이가 12개월 이내에 발생하는 상황을 복합 수재해로 정의하고, 1951년부터 2020년까지 70년간의 장기 데이터를 바탕으로 발생 빈도의 증감 경향성을 평가하였다.

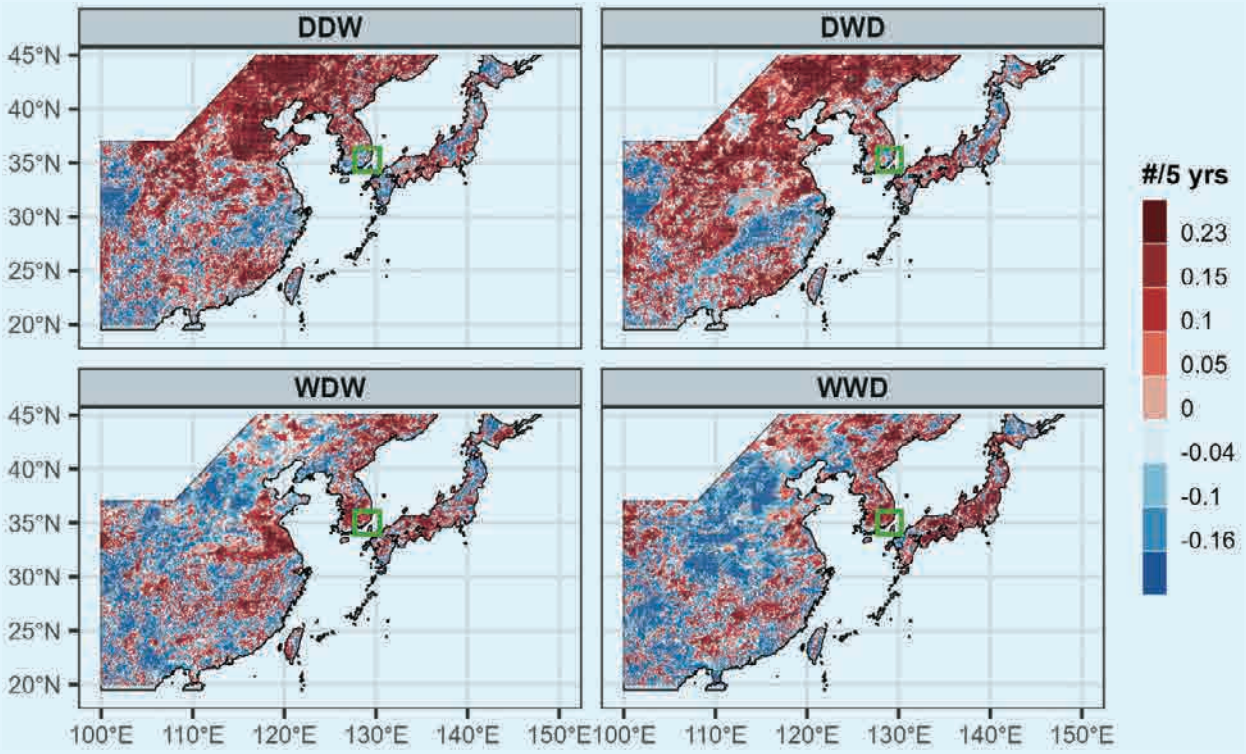
분석 결과, 한반도는 이러한 복합 수재해의 발생 위험에 지속적으로 노출되어 왔으며 그 가능성 또한 뚜

렷하게 증가하는 추세를 보였다. 제시된 〈그림 3〉에서 우리나라 대부분의 지역이 붉은색 계열로 나타나는 것은 복합 수재해 발생 빈도의 유의미한 증가 경향을 방증한다. 특히 경상남도 지역의 경우, 가뭄 후 홍수(D2W), 홍수 후 가뭄(W2D), 홍수-가뭄-홍수(WDW), 홍수-홍수-가뭄(WWD) 등 다중 전이 형태의 복합재해 발생이 타 지역에 비해 두드러지게 관측되었다. 이는 과거에 비해 최근으로 올수록 극단적 수문 현상의 교차 발생 빈도가 잦아지고 있으며, 결과적으로 국가 수자원 확보 및 치수 관리의 불확실성과 난이도가 지속적으로 가중되고 있음을 시사한다.

앞서 소개한 SMILE을 활용하여 북아메리카의 가



<두 개의 수재해가 지연 결합된 복합사상의 발생 증감 경향>



<세 개의 수재해가 지연 결합된 복합사상의 발생 증감 경향>

그림 3. Lee et al. (2025)에서 확인한 1951-2020년까지 70년간 동아시아 지역의 복합수재해 발생 횟수 변화 경향. 붉은색은 증가, 푸른색은 감소 경향을 나타냄. D2W: 가뭄에서 홍수 전이, W2D: 홍수에서 가뭄 전이, DDW: 가뭄-가뭄-홍수 전이, DWD: 가뭄-홍수-가뭄 전이, WDW: 홍수-가뭄-홍수 전이, WWD: 홍수-홍수-가뭄 전이.

뭄-홍수 복합수재해 발생 양상을 전망한 사례도 있다. Na and Najafi (2024)에서는 CanLEAD 자료를 이용하여 건조(습윤)→습윤(건조) 전이 사상의 변화를 전망하였다. 기상학적, 농업적, 수문학적 극단 상황을 포괄적으로 평가하기 위하여 meta-Gaussian model을 이용하여 이 세 가지 지표를 삼변량 건습 지수라는 하나의 통합된 지표로 병합한 것이 큰 특징이다. 또한 50개의 앙상블 멤버 데이터를 풀링(pooling)하여 극단적 기후 이벤트 추정을 위한 표본 크기를 크게 늘렸으며, 기준 기간(1981~2010년) 데이터의 하위 10%와 상위 10% 임계값을 적용해 개별 건조 및 습윤 기간을 정의하였다. 최대 12개월 이내에 발생하는 건조에서 습윤(D2W) 및 습윤에서 건조(W2D)로의 전환 이벤트를 식별한 후, 다양한 온난화 수준(+1.5, +2.0, +3.0, +4.0°C)에 따른 시간적 특성(발생 빈도, 지속 시간, 전환 시간, 변동 강도 등)과 공간적 특성(공간 비율, 집계 지수)의 변화를 추정하였다.

분석 결과, 기후 온난화가 진행됨에 따라 북미 전역에서 수문기후학적 전환 현상이 훨씬 더 빈번해지고 그 정도가 강해질 것으로 예측되었다. 기온 상승 폭이 커질수록 가뭄에서 홍수로, 혹은 홍수에서 가뭄으로 변하는 전환 시간(transition time)은 짧아지는 반면 변동 강도(swings intensity)는 커져, 극단적 기후 전환이 매우 빠르고 강력하게 일어날 것이며(그림 4),

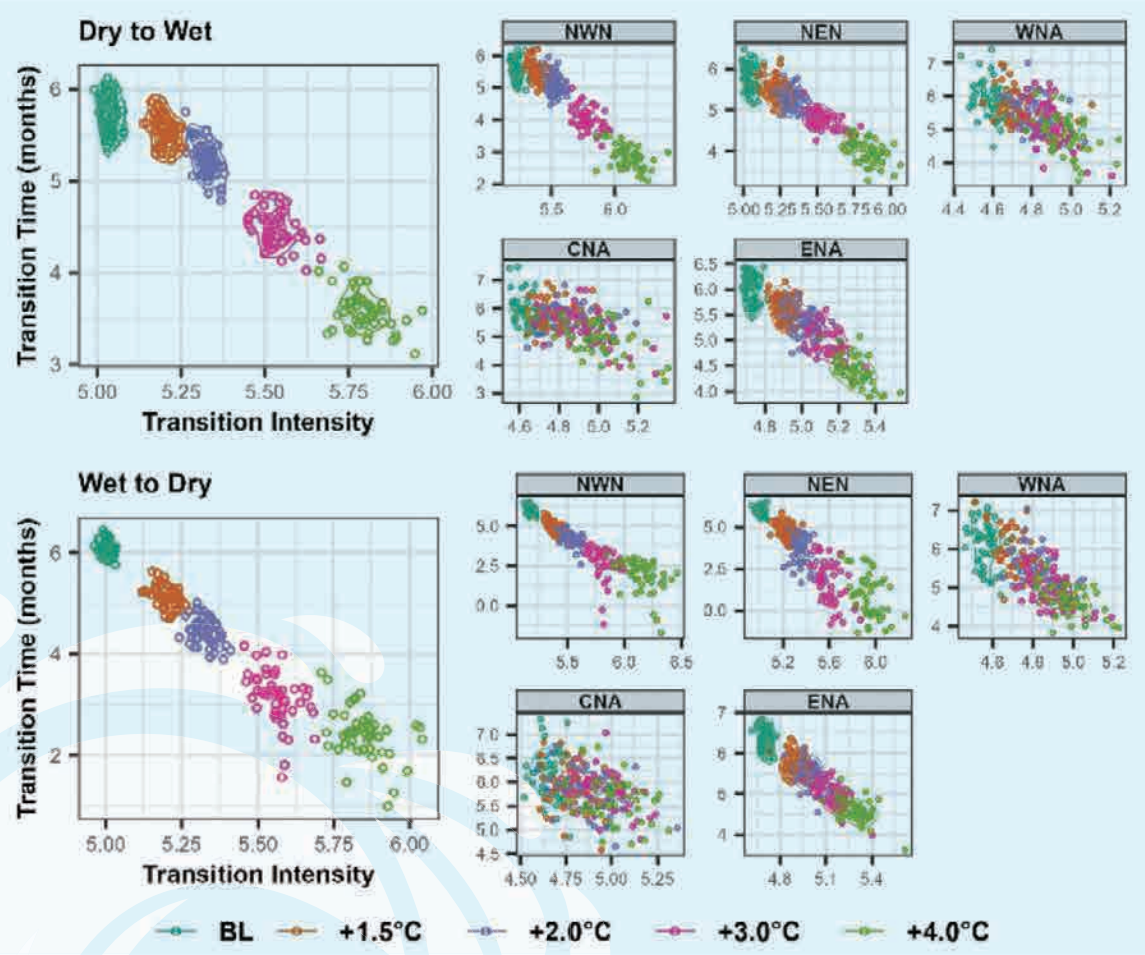


그림 4. Na and Najafi (2024)에서 확인한 북아메리카 지역의 다양한 온난화 수준(+1.5, +2.0, +3.0, +4.0°C)에 따른 전환 시간, 변동 강도의 변화. 산점도에서 점들이 좌상단에서 우하단으로 이동할수록 건조(습윤)→습윤(건조) 전이가 매우 빠르고 강력하게 일어남을 의미함.

공간적으로도 이러한 극한 전환 현상의 영향을 받는 면적이 점차 넓어지는 경향이 확인되었다. 또한 계절적 관점에서는 온난화 수준이 높아질수록 겨울은 더 습해지고 여름은 더 건조해지는 패턴이 나타나며, 이것이 계절 간의 극단적인 수문기후학적 전환을 더욱 부추길 가능성이 높은 것으로 나타났다.

5. 마치며

미래에는 복합수재해가 더욱 극심해지지 않을까 조심스레 전망해본다. Clausius-Clapeyron relation에 따르면, 대기의 온도가 1°C 상승할 때마다 포화수증기량은 약 7%씩 지수함수적으로 증가한다. 이는 대기가 머금을 수 있는 가용 수분이 많아져 단일 강우 사상의 규모와 강도가 극대화될 수 있음을 의미하는 동시에, 강우 발생의 시간적 간격(무강우일수) 또한 길어질 수 있음을 시사한다. 결과적으로 온난화는 극한 홍수와 극심한 가뭄이라는 상반된 재해의 발생 위험도를 동시에 팽창시키는 역설적인 상황을 초래한다.

치명적인 상황을 마주하지 않으려면 선제적인 대응책 마련이 필요하다. 가령 상류 유역에 홍수가, 하류 유역에 가뭄이 발생하는 공간적 복합재해 시 단순한 댐 방류는 하류의 가뭄 해소에 기여하는 긍정적인 조치로 오인될 수 있다. 그러나 장기 가뭄으로 인해 토양 표면의 소수성이 극도로 증가한 상태에서 방류량이 급증할 경우, 지표 침투능 저하로 인해 급격한 표면유출이 발생하여 하류에 예기치 못한 돌발홍수를 유발하는 결과를 낳을 수 있다. 따라서 복합적인 수문조건에 대한 유연한 대응이 필요하다. 더불어 장기화되는 가뭄에 대비하여 하수처리수 재이용, 빗물 활용, 인공강우 등 대체 수자원의 적극적인 확보 및 다변화 전략이 수반되어야 할 것이다.

앞으로 복합재해의 빈발은 기존의 단일 재해 중심 수자원 확보 및 관리 체계에 근본적인 패러다임 전환을 요구하고 있다. 시공간적으로 상이한 기작을 가진 재해들이 연쇄적 혹은 동시다발적으로 발생함에 따라 방재 역량의 부담이 가중되고 있으나, 이를 통합적으로 제어할 수 있는 표준화된 대응 방안은 여전히 미비한 실정이다. 엎친 데 덮친 격으로 벌어지는 자연의 채찍을 지혜롭게 마주할 수 있는 과학적, 공학적 해답을 찾길 바라본다.

참고문헌

Bevacqua, E., De Michele, C., Manning, C., Couasnon, A., Ribeiro, A. F., Ramos, A. M., ... & Zscheischler, J. (2021). Guidelines for studying diverse types of compound weather and climate events. Earth's Future, 9(11), e2021EF002340.

Bevacqua, E., Suarez-Gutierrez, L., Jézéquel, A., Lehner, F., Vrac, M., Yiou, P., & Zscheischler, J. (2023). Advancing research on compound weather and climate events via large ensemble model simulations. Nature Communications, 14(1), 2145.

Cannon, A. J., Alford, H., Shrestha, R. R., Kirchmeier-Young, M. C., & Najafi, M. R. (2022). Canadian Large Ensembles Adjusted Dataset version 1 (CanLEADv1): Multivariate bias-corrected climate model outputs for terrestrial modelling and attribution studies in North America.

Ishii, M., & Mori, N. (2020). d4PDF: large-ensemble and high-resolution climate simulations for global warming risk assessment. Progress in Earth and Planetary Science, 7(1), 1-22.

Kay, J. E., Deser, C., Phillips, A., Mai, A., Hannay, C., Strand, G., ... & Vertenstein, M. (2015). The Community Earth System Model (CESM) large ensemble project: A community resource for studying climate change in the presence of internal climate variability. Bulletin of the American Meteorological Society, 96(8), 1333-1349.

Messori, G., Bevacqua, E., Caballero, R., Coumou, D., De Luca, P., Faranda, D., ... & Zscheischler, J. (2021). Compound climate events and extremes in the midlatitudes: Dynamics, simulation, and statistical characterization. Bulletin of the American Meteorological Society, 102(4), E774-E781.

Na, W., & Najafi, M. R. (2024). Rising risks of hydroclimatic swings: A large ensemble study of dry and wet spell transitions in North America. Global and Planetary Change, 238, 104476.

Swain, D. L., Prein, A. F., Abatzoglou, J. T., Albano, C. M., Brunner, M., Diffenbaugh, N. S., ... & Touma, D. (2025). Hydroclimate volatility on a warming Earth. Nature Reviews Earth & Environment, 6(1), 35-50.

Tan, X., Wu, X., Huang, Z., Fu, J., Tan, X., Deng, S., ... & Liu, B. (2023). Increasing global precipitation whiplash due to anthropogenic greenhouse gas emissions. Nature Communications, 14(1), 2796.

Wang, J., DeFlorio, M. J., Gershunov, A., Guirguis, K., Delle Monache, L., & Ralph, F. M. (2024). Association of western US compound hydrometeorological extremes with Madden-Julian oscillation and ENSO interaction. Communications Earth & Environment, 5(1), 314.

Zscheischler, J., Martius, O., Westra, S., Bevacqua, E., Raymond, C., Horton, R. M., ... & Vignotto, E. (2020). A typology of compound weather and climate events. Nature reviews earth & environment, 1(7), 333-347.

2025 난징 중국수리학술대회 참가기

김상욱
강원대학교
토목공학과 교수
sukim70@kangwon.ac.kr

손민우
충남대학교
토목공학과 교수
mson@cnu.ac.kr

이승엽
한남대학교
토목환경공학과 교수
seungyub.lee@hnu.kr

권순호
한남대학교
토목환경공학과 연구교수
rnjstnsgh90@nate.com

1. 학술대회 소개 및 참여 일정

저자를 포함한 4명의 한국수자원학회 참석자들은 2025년 10월 24일 금요일부터 27일 월요일까지 중국 난징(Nanjing)에서 개최된 '2025 난징 중국수리학술대회(2025 China Water Academic Congress)'에 참석하였다. 과거 저자는 고인이 되신 이길성 교수님을 모시고 2008년 IAHR-APD 참석을 위하여 난징 호하이 대학을 방문한 적이 있었는데, 당시 난징의 밤거리는 흰색 내의만 입고 마작에 열중하고 있는 아저씨를 포함하여 가짜 중국 술과 물건들로 가득했었다. 특히 학회 기간은 중국 측 인사들의 적극적인 건배로 국내 참석자 다수가 많이 힘들어했던 기억이 있어 이번에도 같은 분위기면 어쩌나 하는 걱정이 출발 전부터 들었었다. 그러나 2025년의 난징은 과거와는 달랐다. 길거리를 방황하던 흰 내의 아저씨들은 마작패와 함께 사라졌으며, 공무원들을 8시 출근은 물론 주말도 교대로 근무하고 있었고 학술대회와 같은 부수 행사는 주말을 이용하여 이루어진다고 한다. 긴장된 저녁식사 자리는 그야말로 저녁식사 자리였고, 공무원들의 '건빠이' 축하는 몇몇 공산당원들이 순환하며 주재하는 자리말고는 사라졌다. 걱정은 사라졌으나, 그 변화에 서늘했다.

이번 학술대회 참석은 우리 수자원학회와 꾸준히 교류하고 있는 국제교류 차원에서 중국 측의 초대로 이루어졌다. 이번 학술대회는 '함께 만드는 물의 안전한 미래(Building a Safe Water Future Together)'라는 주제 아래 중국수리공정학회(CHES)와 난징수리과학연구원(NHRI), 그리고 호하이 대학(Hohai University)이 공동으로 주관하였다.

개최지인 난징은 중국의 고도(古都)이자, 양쯔강 하류의 물 관리 핵심 거점으로 이번 학회 주관기관인 난징수리과학원은 1935년에 설립되어 올해로 창립 90주년을 맞이한 역사 깊은 연구기관이며, 공동 주관인 호하이 대학 역시 개교 110주년을 기념하는 현수막이 걸려 있어 중국 내 수공학 분야의 오랜 역사와 학문적 열기를 학회장 입구에서부터 느낄 수 있었다. 나중에 알게 된 사실이지만 호하이 대학은 중국의 중앙부처인 '수리부' 소속 공무원 중 다수를 배출하고 있어 맨파워가 강한(?) 학교라고 한다. 이번 대회에는 한국수자원학회 회원들을 포함하여 세계 각국의 수자원 전문가, 정책 입안자, 연구자들이 모여 기후변화와 홍수, 가뭄 그리고 지속 가능한 물 관리에 대한 심도 있는 논의를 진행하였다.

2. 학술대회의 구성 및 주요 내용

개막식은 25일 토요일 08:30부터 17:30까지 하루 동안 15명의 연사와 10개 정도의 기관보고로 구성되어 있어 개막식 행사 자체를 매우 중요하게 다루고 있음을 알 수 있었다. 15명의 연사는 대부분 중국 최상위 기술자를 뜻하는 원사(院士)들로 섭외하였으며, 현 IAHR Philippe Gourbesville 회장님과 2011~2015년 IAHR Roger Falconer 회장님의 발표도 포함되어 있었다. Roger Falconer 회장님은 중국공정원 외국인 원사로 활동하고 계심을 이번에 알았다.

학술대회는 NHRI 국제회의장과 호하이 대학교 강당을 비롯한 학내 강의실 등을 중심으로 진행되었으며 포스터 세션을 등을 제외한 구두발표 세션은 25개였으나, 1개 세션이 2일 동안 2~3개의 세부세션을 운영하였으며, 평균적인 1개 세션 당 발표자는 20명 정도였다. 대략적으로 계산해보면 세션 발표자가 약 500여 명의 규모로 보면 될 것 같았다. 25개 구두발표 세션의 개별주제를 소개하는 것이 우리 학회회원께 도움이 될 것 같아 아래에 나열하였다.

(1) 수리/수문 거대 모델(Large Model)과 스마트 업무 응용
(2) 디지털 트윈 수리/수문 체계 건설
(3) 수자원관리 전문위원회 연례회의
(4) 댐 안전 감시 전문위원회 연례회의
(5) 수리/수문 계측 기술 혁신
(6) 급격한 도시화지역의 홍수 방어
(7) 가뭄 재해 방어

그림 1. 학술발표회장 외부 (좌) 및 내부 (우)

(8) 지능형 원격탐사와 '3가지 방어선' 건설
(9) 2035 유역 발전 전략
(10) 수력 전문위원회 연례회의
(11) 수생태 전문위원회 연례회의
(12) 유역 하천/호수 수생태 환경 보호 및 관리
(13) 하천/호수 유사의 관리
(14) 지하수 과학 및 공학
(15) 동북아시아 및 극동지역의 한랭 지역(Cold Region) 수리/수문
(16) 중국수리학술대회 전망
(17) 신소재 및 신기술
(18) 중국 서부 수리/수문 개발 및 암석 및 토질 공학 협업
(19) 도시지역 수자원 절약 및 이용
(20) 미래 물 과학 · 청년 혁신 포럼
(21) '제15차 5개년 계획(15.5)' 조명
(22) 수자원 투자 및 수가/수권/수시장 개혁(수자원 경제)
(23) 수리/수문/수생태 제품 가치 실현
(24) 수리/수문 관력 학술지 발전계획
(25) 국제교류 및 일대일로(Belt and Road)

위의 25개 세션 중에서 (1)과 (2)는 주로 디지털 기술을 이용한 하천관리를 주제로 편성한 세션으로 발표를 듣기 위한 청중들이 대강당을 가득 메우고 있었는데, 중국의 수자원 연구자들이 AI 기술에 얼마나 높은 관심을 가지고 있는지 알 수 있었다.

한국 참가자 중 권순호 박사는 25일 토요일 오후에 열리는 25번째 세션인 국제교류 및 일대일로 세션에서 'Sustainable Strategy to Retrofit Detention Facilities for Urban Drainage Systems under Extreme Climate Scenarios'라는 제목의 연구결과를 발표하였다. 이 세션은 우리 한국수자원학회 발표자와 함께 세계기상기구(WMO), 교토대학, NHRI 내 이집트 유학생, 이집트 Blue Nile Institute, 라오스 국가경제연구소, 캄보디아 국가기술연구소 등 7개국 11명의 발표자가 세션을 구성하였는데, 특색이 있었던 점은 발표자들의 발표 이전에 행해진 국제협약 행사였다.

해외에서 참석한 발표자들과 그 일행들이 각자의 연구내용을 발표하기 전 2시간 정도를 중국수리공정학회(CHES), 난징수리과학연구원(NHRI), 그리고 호하이 대학 국제교류처가 주관이 되어 진행한 이 행사는 학술대회에서 개최되는 국제세션을 적극적으로 (?) 활용하기 위하여 기획된 '일대일로 국제협약 행사(Belt and Road International Water Alliance)'였다.

그림 2. 일대일로 수자원 협약 (좌) 및 한국 측의 발표 (우)

그림 3. 양쯔강 대교 지점의 기왕 최고 홍수위 (좌)와 양쯔강 대교 (우)

이 협약은 '일대일로' 사업의 일환으로 진행되고 있는 중국의 수자원 인재교류 사업으로 중국과 이집트, 모로코 등의 아프리카 북부에 위치한 국가들과의 인재교류 협약이다. 대부분의 학술발표회 참석자들은 학술발표회 국제세션 중 진행된 중국 측의 이러한 협약 행사의 진행을 바라보며 아마도 즐겁지만은 않았으리라. 이 행사를 통해 중국 수리부가 북부 아프리카에 위치한 국가를 대상으로 해외사업 진행을 추진하고 있으며, 이를 위한 인적 교류를 호하이 대학이 주도적으로 수행하고 있음을 알았다. 상당수의 대학원생이 중국의 지원을 받으며 석사 또는 박사학위를 수여받고 귀국하고 있다고 한다.

3. 학술대회 기타 일정

26일 일요일 오후에는 난징의 주변을 흐르고 있는 양쯔강을 답사하였다. 중국 측의 배려로 호하이 대학교 李浩然 교수님이 우리를 안내해주었다. 난징 양쯔강 다리를 보고 근처에 있는 신규 개발단지를 들려 식사하고 숙소로 돌아오는 일정이었다. 양쯔강 다리는 1968년 개통된 교량으로서 양쯔강을 가로지르는 교량 중 세 번째로 건설되었으며, 이 교량부터 순수하게 모든 기술을 중국이 개발한 기술을 사용하였다고 한다. 양쯔강 다리의 교각에는 아래 그림과 같이 1983년부터 관측된 몇 개의 년최고 홍수위를 그려놓았는데, 역대 최고 홍수위는 2020년에 발생되었고 EL. 10.39 m임을 알 수 있었다. 년최고 홍수위의 편차가 크지 않으니 양쯔강은 하천폭이 넓고 하천유로도 길고 길 것이다. 하천 이름 그대로 중국에서 가장 길어 중국을 분할하며, 강을 따라 삼국지의 전설들이 흐르는 것 같았다.

4. 맺음말

4일간의 학회 일정을 마치고 귀국하면서 다시금 중국의 변화를 돌아보았다. 중국은 학술대회 자리에서 베이징 홍수나 포양호 가뭄 등의 대응에서 중국 정부의 미숙함을 숨기지 않았고, 오히려 이에 대해 반성하

고 대책을 찾아가는 모습을 찾아볼 수 있었다. 이는 정부 공무원뿐만아니라 학계도 마찬가지의 분위기였다. 특히 최근에는 중국의 기술적 발전을 바탕으로 AI를 활용한 첨단 기술로 물 문제를 극복하려는 동력으로 삼고 있었다. 또한 대규모 하천공사의 진행과 더불어 세심한 생태 복원(양쯔강 보호)을 동시에 추진하는 양동작전(?)을 구사하고 있었다. 나름 한국의 물관리 전문가로서 이번 참관은 단순한 기술적 벤치마킹을 넘어, 국가 차원의 수자원 계획의 수립이 얼마나 치밀하고 과감해야 하는지를 깨닫게 해 준 소중한 기회였다. 우리나라 역시 기후 위기의 안전지대가 아닌 만큼, 중국의 이러한 거대한 실험과 도전들을 예의 주시하며 우리의 미래를 준비해야 할 것이다. 마지막으로 바쁜 중에 중국행에 동행해 준 참가자 전원께 심심한 감사를 표합니다.

조금 뒤늦은 제21차 한·일 생태공학 공동세미나 이야기

김 명 환
한국건설기술연구원
수석연구원
narrowgate@kict.re.kr

[출발하며]

이번 세미나 참석의 결정적 동기는 막연한 호기심, 그리고 마치 숙제처럼 마음 한구석에 자리 잡고 있던 어떤 한 장소에 대한 동경 때문이었다. 쉰이라는 나이에 이르는 동안 단 한 번도 가보지 못한 나라, 나에게는 "가깝고도 먼 나라 일본"이라는 말은 평생 현실이었다. 학술대회와 회의, 여행 등으로 여러 나라를 다녀왔지만, 정작 일본 땅은 한 번도 밟아본 적이 없었기에 나는 항상 일본이라는 나라와 그곳에 사는 사람들에 대한 막연한 호기심이 있었다. 여기에 더해, 일본 기후현의 ARRC(Aqua Restoration Research Center)는 내가 현재 근무하고 있는 한국건설기술연구원 하천실험센터(River Experiment Center) 설립에 가장 큰 영감과 동기를 제공한 시설로, 설립을 위한 연구 단계부터 지금까지 하천실험센터와 깊은 인연을 맺어온 나에게 언젠가는 꼭 한 번 방문해야 할 하나의 작은 숙제와도 같은 곳이었다. 그러기에 이번에 개최하는 제21차 한·일 생태공학 공동세미나의 개최지가 ARRC라는 소식을 접했을 때, 나는 주저하지 않고 세미나 참가를 신청했다.

10월 23일 김해공항, 태어나 처음으로 나고야로 향하는 일본행 비행기에 몸을 실었다. 그리 길지 않은 비행시간이 새로운 여정에 대한 기대감으로 잔뜩 고양된 내 마음 때문인지 더 짧게 느껴졌다. 나고야 주부공항 도착 후 기차에 탑승해 기후역으로 가는 동안, 창밖에 스쳐 지나가는 일본의 산과 들, 하천, 마을의 모습은 분명히 처음 보는 풍경임에도 괜스레 익숙하게 느껴졌다. 오전부터 시작되는 세미나 때문에 하루 일찍 기후에 도착한 나와 일행이 가장 먼저 찾은 곳

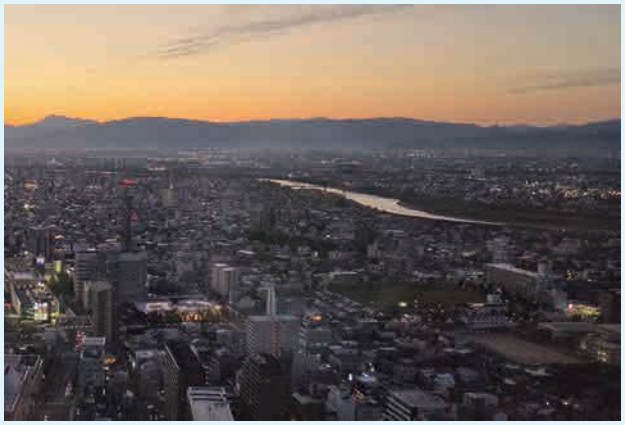


그림 1. 전망대에서 바라본 기후현을 지나는 나가라강

그림 2. 세미나의 시작을 기다리는 참가자들

은 전망대였다. 일본을 자주 다녀온 나의 동행인의 강력한 추천에 이끌려 전망대에 올라갔다. 사실 당시에는 이렇다 할 만큼 큰 감흥을 느끼지는 못했다. 하지만 생전 처음 방문한 일본의 풍경인지라 무심코 몇 장의 사진을 스마트폰에 담았다. 그리고 그때 기후 시내를 지나는 나가라강의 풍경을 우연히 담을 수 있었는데, 이제는 그 사진 한 장이 일본이라는 나라와 그곳의 자연과 함께 살아가는 사람들, 그리고 무엇보다 이번 한·일 생태공학 공동세미나의 의미와 그 안에서의 만남에 대해 되새기는 중요한 열쇠가 된 것 같다. 그때 나를 전망대로 이끈 나의 동행에게는 이글을 빌어 새삼 감사의 마음을 전하고 싶다.

[세미나 첫날: 다른 나라, 다른 강, 다른 사람들, 그러나 닮은 고민]

기후역에서 출발하는 셔틀버스를 타고 도착한 ARRC 주차장에서 가장 먼저 나의 눈에 들어온 것은 연구시설이라기보다는 생태 공원에 가까운 센터와 그 주변 풍경이었다. 어디까지가 연구센터이고 어디까지가 시민이 이용하는 수변공원시설인지 모를 정도로 ARRC는 기소강 및 강 주변의 다른 시설들과 어우러져 있었다. 이날 오후에 진행된 ARRC의 실험 수로 견학 때, ARRC는 단순한 전시·견학 시설이 아니라 실규모의 수공·생태 실험시설이라는 점을 유독 강조한 견학 안내자의 이야기를 듣고 공감하며 가볍게 웃었던 이유가 이때의 첫인상 때문이 아닌가 싶다. 조금 걸어서 도착한 ARRC의 회의실에는 이미 먼저 도착한 일본의 연구자들이 기다리고 있었다, 세미나 등록을 마친 후 일본 연구자들과 짧게 인사를 나누면서 자리 착석한 뒤 PWRI(Public Works Research Institute, 일본토목연구소)의 Keigo Nakamura 박사의 환영사를 시작으로 “연구와 실천을 통한 하천환경 복원과 하천 문화 유지(Restoring River Environments and Sustaining River Culture through Research and Practice)”라는 주제의 이번 세미나가 자연스럽게 개최되었다.

니가타 대학의 Yoichi Kawaguchi 교수가 좌장을 맡아 진행한 첫 번째 세션에서는 나고야 대학의 Yuexia Zhou 교수가 첫 발표를 시작했다. Zhou 교수는 3차원 LiDAR 측량 수변림 포인트 클라우드 자료를 통해 얻은 유동 방향의 유효 투영 면적에서 항력항을 환산하고, 이를 수치 모형에 적용하여 수심 및 유속 분포 결과가 적절하게 일치하는 것을 보여주었다.

이후 다음 발표에서는 서울대학교의 김대현 교수가 섬진강에서의 극한 홍수 이후 하천 형태 변화에 대하

여 발표하였다. 이 발표에서 김대현 교수는 섬진강 본류를 대상으로 전체, 상류, 하류 세 구간의 퇴적 및 침식을 분석하고, 구간에 따라 하천 변이의 주요 지배인자가 바뀌는 것을 보여주었다. 김대현 교수는 발표를 통해 극심한 홍수 이후 하천의 지형학적 변화를 분석할 때 구간을 나눌 필요가 있음을 제안하면서 하천 상·하류 간의 연속성과 불연속성을 동시에 보는 관점에 대하여 설명하였다. 질의응답에서 나고야 대학의 Tetsuro Tsujimoto 교수는 하천을 분할된 연속체(segmented continuity)라고 언급했는데, 이는 이 연구의 필요성을 가장 직관적으로 설명하는 표현이 아니었나 생각한다.

이어진 Tashiro 교수의 발표는 범람원 코어를 통해 지난 수십 년간의 하천 주변의 환경 변화를 거꾸로 읽어내는 연구에 관한 내용이었다. 중국의 양쯔강과 일본의 이비가와강에서 채취한 코어 분석 결과를 통해 Tashiro 교수는 "홍수와 토지이용, 산업화가 코어 안에서 층별로 기록된다"고 설명했다. "코어 속의 각각의 층들이 어느 해의 홍수, 어느 시기의 가동된 공장, 어느 시기의 토지이용 상황 등을 보여준다."라는 설명을 들으면서 범람원에서 얻은 코어의 분석을 통해 지형·수질·정책·역사를 체계적으로 한꺼번에 읽어내고자 하는 모습이 인상적이었다.

이어서 진행된 한국건설기술연구원 장은경 박사의 발표도 매우 인상적이었다. 하천실험센터의 실규모 수로에 실물에 근접하는 목본류 식생 모형 패치를 설치하고, 그 전후에서 시간이 지남에 따라 하상이 어떻게 변하는지를 실제로 세심하게 측정한 연구였다. 장은경 박사는 LiDAR와 음향 기반 측정 방식으로 얻은 식생 모형 패치 주변의 시간에 따른 세굴과 퇴적 양상을 분석하여, 식생 군락 전면부와 측면부는 조립화되고, 내부 및 하류 구간은 세립화되는 특성을 보여주면서 식생 군락이 하천의 지형과 퇴적물을 재구성하는 식생과 하상의 상호작용에 관한 실험적 증거를 제시하였다.

장은경 박사의 발표를 듣고 있다 보니 앞에서 발표한 Zhou 교수의 발표가 생각 났다. 장은경 박사는 실물에 근접하는 목본류 군락을 대형 수로에 설치해 세굴과 퇴적의 변화를 관찰했고, Zhou 교수는 측량을 통해 얻은 포인트 클라우드를 통해 식생의 3차원 항력 구조를 정량화했다. 그냥 보기에는 이 두 사람의 실험 방법도, 실험하는 장소도 달랐지만, 결국 두 사람 모두 "식생이 하천에 미치는 영향을 어떻게 정량적으로 표현할 것인가?"라는 공통된 질문에 대해 다른 방식으로

그림 3. 세미나 구두 발표
(서울대학교 김대현 교수)

그림 4. 세미나 구두 발표
(오사카 공립대 Yasuhiro Takemon 교수)

답하고 있는 것은 아닐까? 라는 생각이 들었다.

이후 요도가와 하구에서 사라진 조간대를 토사 투입(보충)으로 서서히 되살린 사례에 관한 Yasuhiro Takemon 교수의 발표를 마지막으로 첫 번째 세션을 마치고, 잠깐의 휴식 뒤에 서울대 김대현 교수를 좌장으로 하는 두 번째 세션이 시작되었다.

두 번째 세션의 첫 발표는 국립생태원의 옥기영 선임연구원의 발표로 시작되었다. 옥기영 박사는 금강 하구의 갯벌에서 채취한 퇴적물 코어를 분석하여, 장기간의 하천 지형 형성과 변화를 추적하는 연구에 대해 설명하였다.

옥기영 박사의 연구도 하천만 다를 뿐 Tashiro 교수의 연구와 닮아 있었다. 두 연구 모두 하천이 퇴적층에 남긴 과거의 정보를 읽어내어 이를 이용해 하천 유역 관리를 위한 치수·환경·생태에 참고할 수 있는 기준을 세우고, 체계적으로 하천을 이해하고 관리하고자 하는 비슷한 목표를 추구하고 있었다.

이후 쿠마모토 대학의 Hiroshi Cho 교수는 발표를 통해 남아시아 하천에서 오래전부터 사용해 온 수제 구조물인 반달(Bandal)과 일본의 전통 수제 세이규(Seigyu)를 접목한 자연기반해법(NbS, nature-based solutions)을 제시하였다.

두 번째 세션에서는 나의 발표도 있었다. 나는 베타 글루칸을 혼합하여 만든 바이오 토양을 임진강 제방에 도포하는 공법으로 친환경성과 안정성의 두 가지 목표를 모두 달성한 연구 결과를 소개했다. 이어서 발표된 도쿠시마 요시노가와 하류에서 eDNA 기법을 활용하여 어류 생물다양성 패턴을 분석한 Kawaguchi 교수의 연구와 금강 수계를 대상으로 ANFIS(Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System)를 이용해 저서무척추동물의 서식 적합도 곡선을 구축한 연세대 한상진 학생의 연구도 닮아 보였다.

이후에 이어진 포스터 발표에서는 발표자들이 각자의 연구를 간략하게 소개하고 자유롭게 토론하는 시간을 가졌다. 그리고 도시락으로 마련된 점심 식사를 마친 후, 마지막 세 번째 세션이 시작되었다.

한국교통대학교 장창래 교수의 사회로 진행된 세 번째 세션에서는 나고야대 학교 Tsujimoto 명예교수가 “Fluvial Processes Supporting River-Ecosystem Integrity” 라는 제목의 기조 강연을 통해 하천의 하상·유사 이송·식생 상호작용이 어떻게 하천 생태계의 통합성을 지탱하는지를 설명했다. 하천의 홍수와 퇴적이 재해를 일으킴과 동시에, 서식처와 생태계를 유지시킨다는 일본의 원로 연구자의 이야기에서 자연이 일으키는 재난을 인정하고 받아들여 조화롭게 자연과 공존하는 일본 고유의 문명을 발전·유지 시켜 온 일

그림 5. 포스터 발표(KICT 이찬주 연구위원)

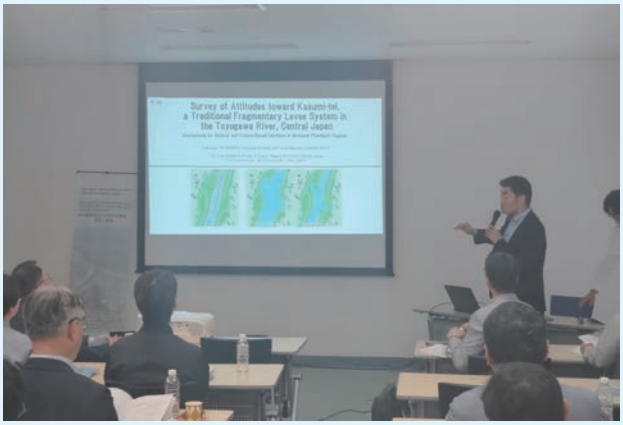


그림 6. 포스터 발표(나고야 대학 Takashi Tashiro 교수)

본인들의 철학이 느껴졌다.

이어서 공주대학교의 김이형 교수는 기조 발표에서 PFCs, 미세플라스틱, 항생제 등의 오염물질들이 기후변화와 결합하여 수생생태계에 어떻게 복합적인 영향을 미치는지 알려주었고, 다음으로 기후대학의 Morihiro Harada 교수는 나가라강의 수온 분포를 분석한 자신의 연구 결과를 소개했다. Harada 교수는 나가라강 현장의 어민 조합과 함께 구축한 수온·유량 관측망을 설명하면서, 댐이 없는 나가라강의 홍수와 어류 이동, 어업활동이 어떻게 유기적으로 결합 되어 있는지를 보여주었다. 광주과학기술원의 김은석 교수는 한국 하천의 침입 덩굴식물인 환삼덩굴의 서식 선호와 경쟁력을 분석하여, 하천의 복원·식재 설계에서 "어떤 토착 다년생을 심어야 환삼덩굴을 억제할 수 있는가"라는 매우 실무적인 문제를 다루기도 했다.

세미나 발표의 마지막 세션으로 종합토론이 있었는데, 오사카 공립대학 Takemon 교수와 연세대학교 최성욱 교수가 이날의 모든 발표를 하천 관리의 동적 측면, 유역 규모의 관리 측면, 장기 역사적 측면, 식생 관리 측면, 연구 기술적 측면의 5가지 측면으로 분류하여 정리해 주었다. 두 교수는 각각의 발표가 이 다섯 가지 분류 안에서 어떻게 연관되는지를 간략하게 짚어주고 오래도록 세미나를 이어온 양국 연구자들의 노력과 이번 세미나를 준비한 조직위원회의 수고에 감사의 뜻을 전했다. 그리고 다음 해에 한국에서 이 세미나가 계속 이어질 것과 더 발전하기를 기대한다는 이야기를 끝으로 모든 발표와 토론이 마무리되었다.

[ARRC 실험수로에서 물과 흙 사이의 자연 위를 걷다]

발표와 토론을 마친 이후 곧바로 진행된 ARRC 실험수로 견학에서는 상·중·하류로 나뉜 약 800m 길이의 대형 실험 수로와 곳곳에 배치된 저류지와 범람원, 다양한 호안블록 그리고 그 사이에 다양한 설비와 센서들을 볼 수 있었다.

ARRC는 단순히 "대형 수로만 있는 연구시설"이 아니라, 실험과 현장을 바로 연결하는 실증 플랫폼에 가까워 보였다. "이 구간은 하상 변화와 어류 서식처를 동시에 보는 곳이고, 이쪽은 범람원 식생과 홍수 재현 실험을 하는 곳이고..."라고 안내를 맡은 PWRI의 Yuta Mizoguchi 박사가 설명을 계속하는 동안, 나는 수로와 주변 시설들이 '실험장'이기보다는 하나의 작은 유역 같다고 느꼈다.

Mizoguchi 박사는 이곳이 단순한 전시·견학장이 아닌 "실규모의 수공·생태 실험장"이라고 강조하면

그림 7. 세미나 토론(Hiroshi Cho 교수와 최성욱 교수)

그림 8. 정리 및 제언(최성욱 교수와 Yasuhiro Takemon 교수)

서, 하천의 상·중·하류 구간이 재현된 대형 인공수로에서는 홍수 시 하도 형상과 서식처 구조가 어떻게 바뀌는지, 다양한 호안블록과 같은 하천 구조물이 실제로 어떤 수리·생태적 효과를 발휘하는지 장기적으로 모니터링하고 있다고 언급했다. ARRC의 실험수로의 활용 방식은 실용적이고 현장 지향적이었다. 수로는 실험을 위해 만들어진 인공적인 구조물이었지만, 수로의 생태실험에서는 더 이상의 인공적인 요인을 허용하지 않고자 하는 일본 연구자들의 노력이 돋보였다. 내가 보기엔 "축소된 실제 하천"을 만들어 놓고 거기서 데이터를 수확하는 모습이었다.

앞서 잠시 언급했지만 나는 과거 하천실험센터의 예산요구 당시부터 설계와 준공까지의 센터 설립 업무와 연구에 직간접적으로 참여한 바가 있었다. 당시 하천실험센터의 실험 수로 중 하나는 "ARRC처럼 장기 생태 모니터링 실험이 가능한 수로로 만들려고 시도했던 기억이 잠시 회상되었다. 결국 당시의 다양한 주변 여건으로 인해 하천실험센터는 ARRC와 같은 자연유하 방식의 하천 생태 모니터링 실험 수로를 만들 수 없었다. 그 당시 우리도 가지고 싶어 했던 모델을 실제 눈으로 확인하면서, 현재 우리 하천실험센터의 장점과 단점을 동시에 확인할 수 있었다. "한국건설기술연구원 하천실험센터가 얼마나 잘 운영되고 있는지, 그리고 앞으로 어디까지 욕심을 내야 하는지"를 조용히 되짚어보는 시간이었다.

그림 9. ARRC의 실험수로 견학

그림 10. ARRC의 호안블록 모니터링 시험 구간

그림 11. ARRC 실험수로 견학의 마지막

그림 12. ARRC 실험수로 견학을 마치며 돌아오는 참가자들

[세미나 둘째 날, 나가라강을 따라 올라가며]

둘째 날인 10월 25일에는 아침 일찍부터 나가라강 현장 답사가 이어졌다. 한국과 일본의 연구자를 태운 작은 버스는 기후역을 출발해 나가라강을 거슬러 올라갔다.

조금 번외의 이야기이긴 한데, 우리를 태운 버스는 너무 좁았다. 참가 인원수에 딱 맞춘 버스에 한국과 일본의 연구자들이 다닥다닥 붙어 이동한 그때의 상황은 다시 경험하고 싶진 않으면서도 이상하게 계속 좋은 기억으로 남는다. 어쩌면 그때야말로 사람을 태우는 버스의 좌석조차도 낭비하고 싶어 하지 않는 일본의 진짜 문화를 접한 순간이 아니었을까 하는 생각이 들기도 한다.

각설하고 이렇게 일본의 문화체험(?)을 하며 도착한 첫 정차지는 나가라교 일대였다. 하천의 이름으로 지어진 다리 위에서 내려다본 나가라강은 넓은 하폭에 수심은 그리 깊어 보이지 않았다. 안내는 기후대학의 Harada 교수가 맡았다. Harada 교수는 이 구간이 과거에는 몇 갈래로 나뉘어 흐르던 하도였고, 20세기 초 개수사업을 통해 단일 하도로 정리되었다고 설명했다. 강을 바라보는 사이 설명은 우카이로 옮겨 갔다. 우카이는 목에 줄이 묶인 가마우지가 은어를 잡게 하고, 그 후에 목에 걸린 은어를 다시 뱉게 하여 어획하는 나가라강을 상징하는 1,300년 넘게 이어온 어업이다. 지금은 관광과 문화유산의 성격이 더 강하지만

그림 13. 셔틀버스를 안에서

그림 14. 홍수 방어를 위한 나가라교 마을 차수문

그림 15. 우카이를 설명하는 Harada 교수

과거에는 생계형 어업이었다고 한다. 이 생계형 어업이 지금은 강의 과거를 기억하며 즐기는 문화로 이어진 모습이 신기하면서도 한편으론 전통을 사랑하고, 소중하게 지켜온 그 모습이 멋있게 느껴졌다.

Harada 교수는 나가라 강에 설치된 수온계를 보여주면서 일 평균 수온이 약 18 ℃ 아래로 떨어지면 은어와 같은 어종의 하류 회유가 본격적으로 시작된다는 이야기를 들려주었다. 그리고 이어서 댐이 없는 하도의 특성으로 인해 우카이 선착장과 관람시설, 그리고 주변의 마을은 홍수에 잠길 것을 전제로 계획되었으며, 마을 주민들은 매년 홍수의 위험을 나누는 방식으로 살아가기에 강 옆에 사는 것이 아니라 강 안에서 사는 느낌이 더 강하다고 말했다. 마을 입구와 건물 입구마다 설치되어 있는 작은 차수문들은 이러한 이들의 삶을 여실 없이 보여주었다. 나가라교 부근에서 살아가는 사람들은 21세기에도 댐이 주는 편리함을 버리고 자연 그대로의 하천과 함께 살아가고 있었다. 우리 일행은 하천과 치수, 도시, 전통, 문화, 산업이 하나로 어우러진, 지역주민과 함께하는 하천 관리가 어떤 모습인지를 몸소 체험하고 있었다.

두 번째 정차지는 미노시였다. 미노시에 도착한 뒤 마을 입구의 관문인 미노교가 1916년에 완공된 일본에서 가장 오래된 현대식 현수교라는 Harada 교수의 설명을 들으면서 미노교를 건넜다, 다리를 건너면서 이야기는 자연스럽게 미노 와시라는 일본 수제 종이의 이야기로 옮겨 갔다. 여기서도 안내를 맡은 Harada 교수가 “미노에서 만들어지는 와시는 나가라강물과 주변 산의 깨끗한 지하수를 수백년 동안 유지·관리해온 마을 주민들의 노력 덕분에 원활한 생산과 우수한 품질이 유지되고 있다.”고 설명해주었다. 미노의 와시 생산은 단순히 종이를 만드는 산업이 아니라, 강과 숲, 미노의 사람들이 오랜시간 동안 함께 만들어온 하나의 문화유산과도 같았다. 이 멋진 경험을 기억하고자 미노 와시로 만들어진 작은 색종이를 구입했다. 굉장히 일본스로운 이 색종이를 보면서 나무를 베고, 섬유를 추출하고, 강물을 끌어와 씻는 제지 과정을 위해 과거에서부터 지금까지 애써온 미노시 사람들의 모습이 떠오르는 것 같았다.

마지막으로 도착한 장소인 구조 하치만은 ‘물의 도시’라는 별명이 너무 잘 어울리는 곳이었다. 계곡을 따라 흐르는 하천 좌우로 조성된 이 마을은 몇 걸음만 걸어도 맑은 물이 흐르는 작은 수로가 계속 나타났다. 마을 사람들은 샘물과 수로를 마을의 전통과도 같은 규칙과 자율적 통제에 따르며 공유하고 있었다. 우리를 안내했던 구조 하치만 출신의 해설자는 “이곳의 물은 상류에서 내려오는 깨끗한 강물과 용천수가 섞여

그림 16. 미노시 입구의 미노교

그림 17. 미노시의 수로

있으며, 주민들은 일정한 규칙을 정해 그 물을 생활용수와 소규모 관개 등에 사용하고 있다."고 설명해주었다. 구조 하치만의 독특하고도 독창적인 규칙은 물을 마시는 자리와 씻는 자리가 분명하게 구분되어 있다는 점이었다. 마을 입구에 설치된 전통적인 다단식 수조는 이를 가장 잘 설명해주는 시설이었다. 해설자는 수조 앞에서 "구조 하치만에서는 샘물이 가장 먼저 나오는 첫 번째 칸의 물은 식수로 사용하고, 그 아래 두 번째 칸의 물로는 야채를 씻고, 마지막 세 번째 칸의 물로는 설거지를 합니다. 그리고 마지막 칸에 남은 음식 찌꺼기는 수조 안의 물고기들이 먹게 하여 사용한 물을 자연 정화한 뒤 강으로 흘려보냅니다."라고 이야기했다. 일본의 작은 마을에서 오랫동안 전통을 이어온 생활하수 정화시스템의 이야기를 들으며, 그 멋진 아이디어에 나도 모르게 감탄하며 고개를 끄덕였다. 다단식 수조의 첫 칸으로 흘러나오는 샘물을 손에 조금 담아 마셔 보았다. 차갑고 청량한 구조 하치만의 샘물로 나의 목을 적시는 순간 '한국에도 이런 마을이 있었으면 좋겠다'라는 생각이 스치듯 지나갔다. 그리고 동시에 한국에서는 오염으로 인해 이제는 찾아보기가 쉽지 않은 약수터를 생각하면서 조금 씁쓸한 마음도 들었다.

버스가 구조 하치만을 떠나 기후역으로 돌아오는 동안 일본의 하천 관리와 문화, 하천을 대하는 일본인들의 모습이, 그리고 하천을 연구하는 사람으로서 내가 어디를 향해 나아가야 하는지가 계속 나의 머릿속을 맴돌았다. 그리고 그런 고민에 빠진 나를 보면서 이번 세미나처럼 전 일정이 하나의 주제를 중심으로 이토록 치밀하게 구성된 경우는 흔치 않겠다는 생각이 자연스럽게 들었다. 이번 제21차 한·일 생태공학 세미나만큼이나 "연구와 실천을 통한 하천환경 복원과 하천 문화 유지"라는 주제에 대해 귀로 듣고, 눈으로 보고, 관련된 장소로 이동하며, 비슷한 연구를 하는 사람들과 이야기할 수 있는 시간은 이전에도, 그리고 이후로도 없을 것이라는 생각이 확신과도 같이 마음 한 곳에 자리 잡았다. 이번 세미나는 단순한 학술발표회를 넘어 한·일 연구자들이 지난 20여 년간 쌓아온 신뢰와 고민을 서로의 연구를 통해 다시 한번 확인하는 자리임과 동시에 앞으로 우리가 나아갈 길에 대해 한 번 더 숙고하는 시간이 아니었나 생각된다. 나의 대단히 짧은 영어 실력은 일본 연구자들과의 대화를 매번 어렵게 만들었고, 함께한 동료들의 통역에 기대야 하는 순간도 적지 않았다. 그럼에도 나를 향한 배려 속에 나눌 수 있었던 일본 연구자와의 짧은 대화, 작은 농담들이 묘하게 나의 마음을 편안하게 해주었다. 일본과 한국의 연구자들이 같은 하천을 연구

그림 18. 물의 도시 구조 하치만의 전경

그림 19. 구조 하치만의 다단계 수조

하고 있지는 않지만, 비슷한 학문을 배우고, 닮은 고민을 품고, 닮은 연구를 하는 사람들이라는 것만으로도 금방 친한 동료가 될 수 있을 것 같았다.

견학을 마친 다음 날인 10월 26일 나고야 공항에서 김해공항으로 돌아오는 비행을 끝으로 세미나와 관련한 모든 일정은 마무리되었다. 3박 4일이라는 짧은 기간 동안, 나는 처음 발을 디딘 일본이라는 나라에서, 생각지도 못하게 "하천과 함께 살아가는 또 다른 방식과 그를 위한 노력"을 현장 가까이에서 확인할 수 있었다.

조금은 뒤늦게 쓰는 이 이야기를 마무리하며, 개인적인 소망을 하나 덧붙이자면, 바로 다음 회차의 세미나가 될지 또는 몇 년 뒤 개최하는 세미나 될지 모르겠지만, 지금보다 한층 더 성숙한 연구자료와 외국어 실력으로 한·일 생태공학 공동세미나 자리에 다시 한 번 참석하여 일본의 연구자들과 더 많은 이야기를 나누고 그들의 연구에 꼭 필요한 도움을 줄 수 있는 시간을 가지고 싶다고 생각해본다. 그리고 그 시작의 첫 장면이, 50대에 들어선 미숙한 어느 연구자가 처음으로 일본 땅을 밟고 생면부지의 일본인 연구자들과 함께 일본의 하천과 문화를 탐방하며 걸어가던 모습이라면 조금 멋지지 않을까 생각해 본다.

그림 20. 미노시 입구에서 일본의 연구자들과

그림 21. 구조 하치만에서 마지막 단체 사진

환경수리학 (Environmental Hydraulics)

황진환
서울대학교
건설환경공학부 교수
jinhwang@snu.ac.kr

수체 내에서 물질의 혼합과 거동을 이해하는 것은 물환경관리의 근간이라고 할 수 있다. 환경수리학은 통합물관리에서 유체역학을 기반으로 한 수리학과 물질의 상태와 변화를 중심으로 한 수질학을 연결시켜주는 중요한 학문 분야이다. 물론 학문 간의 연계라는 역할과 함께, 확산과 분산이론, 난류 제트 이론, 성층류 이론 등을 포함하여 환경수리학 자체가 가지고 있는 학문 고유의 주제들 각각이 식수, 생활용수 등 각종 용수의 공급, 하·폐수의 처리 및 배출, 수환경의 이용과 관리, 수생태계의 보전 등을 통해 국민의 보건과 안전을 확보하고 삶의 질을 향상하는 데 필수적인 학문이다.

이번에 서일원 서울대학교 명예교수가 환경수리학 (Environmental Hydraulics)을 하천유동과 수질해석의 이론 및 모델링의 부제하에 인천대학교 송창근 교수, 서울과학기술대학교 박인환 교수, 한경국립대학교 김준성 교수와 함께 4인 공저로 새롭게 출간하였다. 서일원 명예교수는 미국 일리노이 대학 박사과정과 함께 시작하여 1992년 서울대학교 부임이래 40년 가까이 환경수리학을 가르치고 연구해왔다. 그의 연구 결과를 바탕으로, 기존 환경수리학의 성경이라고 부를 수 있는 Fisher et al. (1979)의 Mixing in Inland and Coastal Waters를 능가하는 교과서를 국내에서 학생들이 쉽게 접근할 수 있는 한글로 국내 최초 발간하였다는 점에서 관련 분야 전문가로서 매우 고무적이라고 생각한다.

이 책은 크게 2부로 구성되어 1부, 1장에서 6장까지는 주로 수환경 오염물질의 혼합에 대한 이론과 해석 방법에 대해 2부는 7장에서 9장으로 구성되어 주로 하천 수리 및 수질 해석을 위한 대학원 수준에서 공부할 수 있는 모델링 방법을 구체적으로 제시하였다. 전체적으로 1부는 3-4학년 전공수업이나 대학원 수업에서 다루어야 할 내용을 주로 한국에서 연구된 자료와 해외 자료를 통해

서 구성하여 친밀감을 높였고, 구체적인 예제를 제공함으로써 독자의 이해도를 높일 수 있게 하였다. 2부는 주로 현업에서 모델링을 구현하는 전문가와 모델을 개발하고 사용하는 대학원생들이 공부할 수 있는 내용을 다루었다. 각 장마다 예제와 문제를 제공하고 있어서 교재로 선택하기에 매우 좋은 구성을 가지고 있다.

각 장의 내용을 살펴보면 1장은 환경수리학의 기초가 되는 개념과 이론을 전체적으로 설명하고 있으며, 이와 함께 수환경 오염에 대한 정의와 오염물질에 관하여 기술하였다. 더불어, 수질해석 및 모델링의 기초가 되는 오염물질의 수문학적 이동 및 반응 현상에 대한 개요를 제시하였다. 2장은 어찌 보면 하천수리학의 가장 중요한 개념을 설명하는 장이다. 주로 하천혼합의 기초 이론인 분자확산과 난류 확산에 관한 방정식을 유도와 함께 설명하였고, 또한, 분산의 핵심 개념인 전단흐름을 분산방정식을 기반으로 해서 설명하고 있다. 3장은 오염물질의 혼합 과정을 단계적으로 설명하였고, 분산 방정식에 주로 이용되는 각 혼합계수에 대한 이론적 유도와 관측을 통해 얻는 방법에 관해 기술하였다. 4장에서는 다양한 오염물질의 특성과 이들의 발생 경로 그리고 이로 인한 수환경에 미치는 영향을 수질해석 이론과 함께 설명하였다. 5장은 하천혼합의 설명 중 가장 정확하고 강력한 방법인 해석해를 기술하였다. 주로 1차원 문제에 대한 기본 해석해를 유도하고 이를 확장하여 고차원 및 복잡한 문제에 대한 해석해를 제시하였다. 6장은 물질의 혼합 거동 해석에 필요한 현장계측에 관해서 서술하였다. 저자들이 과거 수행한 현장에서 수행한 실험을 통해 갱신된 자료를 바탕으로 하천 추적자 실험의 세부 절차와 방법론을 소개하고, 현장에서 계측한 수리 및 농도 자료를 이용하여 혼합계수를 산정하는 방법론을 소개하였다. 7장은 일반적 수체해석에 적용 가능한 하천수리 모형의 이론과 모델링 기법을 설명하였다. 주로, 저자들의 연구결과를 바탕으로 하여 유한요소법의 기본 원리와 하천 혼합에 적용할 구성 절차를 설명한다. 8장은 물질 모델링을 위한 수치해석방법에 관해 기술하였다. 주로 2차원 혼합 해석을 위해 오일러리안 및 라그랑지안 해석 방법에 관해 설명하였다. 이와 함께, 하천에서 많이 사용하는 1차원 하천저장대 모형의 해석을 위한 유한차분법 적용 방법을 소개했다. 마지막으로 9장은 저자들에 의해 한국에 맞게 개발된 하천 수리 및 수질 모델 상용모형을 소개한다. 국내에서 개발된 RAMS의 해석엔진에 대해 기술하고, River 2D의 지배방정식과 적용 사례를 소개함으로써 고급기술자들이 모델을 운용함에도 본 저서가 도움이 되도록 하였다.

이렇게 다양한 주제를 하천 혼합에 집중하여 저술함으로써 미래의 학문 후속세대와 관련 분야에 근무하는 전문가들의 이해를 명확하고 쉽도록 하였다. 현재 출판본은 환경수리학에서 한 축으로 다루어야 할 제트 혼합, 저수지, 해양, 하구 등에 문제는 포함하지는 않아서 오히려 하천이라는 주제에 집중할 수 있다. 기존에 발간되었던 책들에서 지하수, 대기, 하구 등을 무리하게 포함하여 매우 무거운 느낌이었다면, 우리나라 실정에 맞게 하천에 집중한 혼합이론을 집중한 하천수리학이 이 분야를 공부하고, 혹은 수질 문제나 유사이동을 공부하는 후학에게 효율적이고 명쾌하게 다가갈 수 있을 것 같다.

Fisher, Hugo B., List, E. John, Koh, Robert C.Y., Imberger, Jorg, and Brooks, Norman H., (1979), Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic Press, DOI: https://doi.org/10/1016/C2009-0-22051-4

정지용의 시론

정해옥
청명종합엔지니어링 회장
papaenergy@naver.com

한 시인의 詩作品은 그 시인의 시정신이 형상화된 것이다 시정신은 곧 그 시인의 시적 지향성이며, 시관이라고 할 수도 있다 시관이란 "시는 무엇인가"에 대한 시인의 관점이다

시에 대한 관점은 시인의 시론으로 전개될 수도 있고, 시작품으로 형상화될 수도 있다 정지용(1902~1950)의 시론과 시작품을 통해 그의 시적 지향성의 실상을 알아볼 수 있다

그의 詩作활동 기간은 1926년에서 1941년까지의 약 15년간이다 1920년대는 한국문학사에서 낭만주의 시대였고, 1930년대부터는 순수문학과 함께 모더니즘 운동이 시작된 시기였다 이 기간 동안의 정지용이 그의 시론을 통해 전개된 시적 경향을 살펴본다

정지용은 1948년에 발표한 글에서 "국토와 인민에 흥미가 없는 문학을 순수하다고 하는 것이냐? 나는 사춘기에는 연애 대신 시를 썼으며 그 이후에는 일본 놈이 무서워서 산으로 바다로 회피하여 시를 썼는데 그것이 순수시인 소리를 듣게 된 내력"이라고 했다

하며 자신의 시작 행위까지도 부정하고 있다「 조선시의 반성 」이란 제목이나, '국토와 인민'이란 용어도, 그 당시의 이념적인 혼란기에 토로한 발언이라 할 수밖에 없을 것이다 그래서 詩論이 아니라 時論이라고 한 것이다

영문학을 전공한 정지용이 영미 주지주의 문학론에 자극되었다는 것은 부정할 수 없다 그러나 정지용의 문장이나 어투, 용어의 한자적 표현 등은 서구 지향성과는 이질적이라 할 수 있다 모더니티가 아니라 전통의 느낌이 든다

정지용 시론의 정신적 기반은 儒學의 理氣論인 듯싶다 유학의 기본이 형식보다는 내용을 중시한다 그 내용이 바로 性情이다 이이李珥는 "天理가 사람에게 부여되는 것을 性이라 하고, 性이 氣와 합쳐서 일신을 주제하는 것을 마음"이라고 했다 이 마음이 작용하는 것을 情이라고 했다 性情이 자연 그대로 피어나면 좋지만 人爲가 가해지면 안 된다고 했다

性情이란 본시 타고난 것이니 시를 가질 수 있는 혹은 시를 읽어 맛들일 수 있는 은혜가 도시 性情의 타고 낳은 복으로 칠 수밖에 없다..... 그러나 성정이 水性과 같아서 믿을 수 없는 노릇이니 담기는 그릇에 따라 모양을 달리 하며, 물감대로 빛깔이 변하는바가 온전히 성정이 물을 닮았다고 할 것이다 그 뿐이랴 잘못 담기어 停滯하고 보면 물도 썩어 독을 품을 수가 있는 것이 또한 물이 性情을 닮았다고 해야 할 것이다

中庸에서는 "性을 하늘이 내려준 것"이라 했고, 정지용은 '본시 타고난 것'이라고 했다 그러면 情이란 무엇인가 중용에서는 희로애락이라고 했다 이처럼 시와 관련하여 성정을 전제하고, 이 성정이 수성과 같다고 한다

이러한 논리는 주지적인 서구의 모더니티 지향성과는 거리가 멀다고 할 수 있다 상징을 물과 같다고 한 것은 "담기는 그릇에 따라 모양을 달리하며, 물감대로 빛깔이 변하는 바"와 같이, 내용은 같은 성정이지만, 그 표현형식에 따라 모양과 빛깔이 형형색색 다르다는 것이다

넓은 벌 동쪽 끝으로
옛이야기 지즐대는 실개천이 휘돌아 나가고
얼룩백이 황소가
해설피 금빛 게으른 울음을 우는 곳

-그곳이 참하 꿈엔들 잊힐리야

질화로에 재가 식어지면
뷔인 밭에 밤바람 소리 말을 달리고
엷은 조름에 겨운 늙으신 아버지가
짚벼개를 돋아 고이시는 곳

-그곳이 참하 꿈엔들 잊힐리야

흙에서 자란 내 마음
파아란 하늘빛이 그립어
함부로 쏜 화살을 찾으러
풀섶 이슬에 함추름 휘적시든 곳

-그곳이 참하 꿈엔들 잊힐리야

전설바다에 춤추는 밤물결 같은
검은 귀밑머리 날리는 어린 누이와
아무렇지도 않고 예쁠 것도 없는
사철 발벗은 안해가
따가운 햇살을 등에 지고 이삭 줏던 곳

-그곳이 참하 꿈엔들 잊힐리야

하늘에는 석근 별
알 수도 없는 모래성으로 발을 옮기고,
서리 까마귀 우지짖고 지나가는 초라한 지붕,
흐릿한 별빛에 돌아앉아 도란도란 거리는 곳

-그곳이 참하 꿈엔들 잊힐리야

「 鄕愁 」전문

鄕愁는 1927년「조선지광」3월호에 발표된 작품이다 일본 유학을 가기 전 고향에 잠시 들러 쓴 시다「카페 프란스」와 함께 초기의 작품이라 할 수 있다 연 구분을 해서 모두 5연으로 구성된 것 같지만 "-그것이 참하 꿈엔들 잊힐리야" 한 행도 연으로 본다면 모두 10연으로 된 작품이다

고향을 그리워함이 향수다 그렇다면 분명히 전통 지향성의 발로로 그리움을 노래 한 것이다 김춘수는 "-그곳이 참하 꿈엔들 잊힐리야"를 후렴이 아닌 "cut와 cut를 montage하여 이을 고리"라 하고, "시의 효과는 전혀 montage의 효과에 달렸다"고 했다

정지용의「鄕愁」는 실제로 고향을 그리는 'homesickness'다 고향에 대한 그리움의 대상은 인물이 주가 된다 시 첫 연에선 고향의 사물, 둘째 연에선 아버지, 셋째 연에선 유년의 꿈, 넷째 연에선 누이와 아내, 끝 연에선 다시 공간적인 이미지로 구성되었다

여기서 보면, 아버지와 누이, 그리고 아내는 그리움의 대상이 되어 있다 이에 대해 김휘정은 "'금빛과 게으른'이 지향하는 세계는 낭만적인 이상세계를 지시한다

그러한 세계 속에 가족의 모습(아버지, 누이, 아내)은 자연스럽다"고 했다 그런데 가장 중요한 어머니가 없다 이것도 주지주의자의 '鄕愁' 때문일까 왜 어머니가 빠졌을까 그것이 의문으로 남는다

정지용은 전통 지향성에만 치우친 보수주의자도 아니요, 모더니티 지향성에 치우친 모더니즘 시인만도 아니다 그의 시적 표현에는 진보적인 모더니티 지향성이며, 정신세계의 넓이와 깊이에 대해서는 먼 동양의 경전에까지 관심을 둔 전통 지향성을 견지했다고 할 수 있다

그의 모더니티 지향성은 시적 표현을 위한 형태주의적 관심이었고, 전통 지향성도 '시의 위의'를 위한 관심이었다 그는 진보를 위한 혁신주의자도 아니요, 보수를 위한 전통주의자도 아니었다 오직 새로운 시를 위한 천재 시인이었다

참고문헌; 월간문학(2019.4 김미연)

갠지스 강이 다시 흐르게 된 이야기

신 현 배
시인, 아동문학가
4201708@hanmail.net

시바는 인도 신화에 나오는 최고신입니다. 브라흐마, 비슈누와 더불어 힌두교의 3대 남성 신으로 꼽힙니다.

어느 날 나다라를 비롯한 하늘나라 성자들이 찾아와서 시바 신에게 청했습니다.

"천상의 노래를 듣고 싶습니다. 저희들을 위해 노래를 불러 주십시오."

시바 신은 고개를 가로저으며 말했습니다.

"나는 노래를 불러 줄 수가 없다. 내 노래가 워낙 웅장하고 강해서 너희들이 듣기 힘들거든. 내가 노래를 부르면 하늘과 땅은 물론 지하 세계에까지 불길에 휩싸이고 황폐하게 될 거야."

나다라가 물러서지 않고 계속해서 청했습니다.

"어떤 고난이 닥쳐도 저희들은 천상의 노래를 듣고 싶습니다. 제발 저희들의 청을 물리치지 말아 주십시오."

나다라가 끈질기게 조르자 시바 신이 말했습니다.

"좋다. 내 요구를 들어 준다면 노래를 불러 주마. 내 노래를 꽉 잡고 놓지 않을 힘센 청중을 데려오너라."

"알겠습니다."

나라다는 비슈누 신을 찾아가서 말했습니다.

"시바 신이 저희들을 위해 천상의 노래를 부르십니다. 비슈누 신께서도 오셔서 노래를 들어 주십시오. 노래가 워낙 웅장하고 강해서 시바 신의 노래를 꽉 붙잡아 주셨으면 합니다."

비슈누 신은 나라다의 부탁을 들어 주기로 하고, 그를 따라 갠지스 강으로 갔습니다. 시바 신은 갠지스 강가에 앉아 노래를 부를 채비를 하고 있었습니다.

이윽고 비슈누 신이 갠지스 강물 위에 앉자, 시바 신은 천상의 노래를 부르기 시작했습니다.

시바 신이 말한 대로 그 노래는 웅장하고 강했습니다. 노래가 온 누리에 울려 퍼지자, 하늘과 땅은 물론 지하 세계에까지 불길이 일어나 뜨겁게 달구어졌습니

다. 과수나무 과일들이 금세 익어 버리고, 새파란 나뭇잎들이 금방 단풍이 들었습니다. 뜨거운 열기로 갠지스 강물이 부글부글 끓었습니다.

비슈누 신은 갠지스 강물 위에 앉아 시바 신의 노래를 꽉 잡고 있었습니다. 하지만 그 노래의 힘이 워낙 크고 강하여 감당할 수가 없었습니다. 비슈누 신은 노래를 붙들고 있던 손을 놓고 뜨거운 강물 속으로 빠져들었습니다. 그대로 있다가는 강물과 함께 녹아 버릴 것만 같았습니다.

그때 천상에서 지켜보고 있던 브라흐마 신이 나섰습니다. 브라흐마 신은 비슈누 신을 강물 속에서 건져냈습니다. 그리고 황금 주전자를 꺼내 갠지스 강물을 그 안에 담아 버렸습니다.

브라흐마 신이 시바 신에게 명령했습니다.

"노래를 그쳐라, 어서!"

시바 신은 브라흐마 신의 명령에 따라 노래를 중단했습니다. 그러자 하늘과 땅, 지하 세계를 들끓게 한 불길과 열기가 식고 세상은 평온을 되찾았습니다.

그러나 인간 세상은 어려움을 겪어야 했습니다. 수많은 사람들의 젖줄이 되어 주던 갠지스 강이 사라졌기 때문입니다.

지상의 여러 나라 왕들은 갠지스 강물이 다시 땅을 적시고 흐를 날을 기다렸습니다. 인간들의 힘으로는 갠지스 강물을 다시 땅 위로 흐르게 할 수 없기에 그들은 신들에게 간절히 기도했습니다. 잃어버린 갠지스 강을 찾아 달라고.

사가라 왕의 손자인 딜리파 왕도 신들에게 기도하는 왕 가운데 한 사람이었습니다. 딜리파 왕은 자신의 소원을 이루기 위해 기도뿐만 아니라 고행도 마다하지 않았습니다. 그런 정성이 하늘에 닿았는지 어느 날 딜리파 왕은 신의 목소리를 들었습니다.

"네 소원을 들어 주마. 네가 곧 아들을 낳을 것이고, 그 아들이 황금 주전자 안에 담긴 갠지스 강물을 땅으로 끌어내릴 것이다."

"감사합니다!"

딜리파 왕은 신의 목소리를 듣고 뛸 듯이 기뻐했습니다.

얼마 뒤 딜리파 왕은 아들을 낳았습니다. 하지만 그 아들은 몸이 약하고 병치레가 심하여 아버지를 실망시켰습니다. 심지어 척추 병을 앓아 일어서고 앉는 것조차 힘들었습니다. 용하다는 의원은 모두 불러왔으나 아들 바기리타의 병을 고치지 못했습니다.

'제 몸도 잘 가누지 못하는 이 아이가 무슨 수로 신의 뜻을 이루겠는가?'

딜리파 왕은 병약한 아들을 바라보며 한숨을 내쉬었습니다.

스무 살 청년으로 자라난 왕자 바기리타가 어느 날 나무그늘에 앉아 책을 읽고 있을 때였습니다. 그의 앞에 아쉬타바크라 성자가 나타났습니다. 그 성자는 온몸이 구부러지고 비틀려 있었으며 얼굴은 괴물처럼 흉측했습니다.

바기리타는 성자에게 인사하려고 일어서려 했습니다. 하지만 제대로 인사도 못 하고 몸을 떨며 바닥에

쓰러졌습니다.

성자는 바기리타가 자기를 놀리려고 일부러 바닥에 쓰러진 줄 알았습니다. 그는 바기리타를 노려보며 말했습니다.

"내가 어쩌다가 이런 몸이 되었는지 아는가? 내 아버지는 학문을 좋아하는 브라만이셨어. 학자들을 집으로 초대하여 토론하는 것을 좋아하셨지. 나는 아직 어머니 뱃속에 있었지만 많은 것을 듣고 배울 수 있었어. 베다 경전을 달달 외울 정도였지. 하루는 아버지가 집에서 베다 경전을 외우고 있었어. 내가 어머니 뱃속에 들어 보니 발음이 틀린 거야. 내가 입을 열어 아버지의 발음이 틀렸다고 말했지. 그랬더니 아버지는 화를 벌컥 내며 '너는 기형아로 태어날 거야!' 하고 저주를 내리셨단다. 그 바람에 나는 기형아로 태어나 이렇게 장애인으로 살게 되었지."

성자는 자기 이야기를 늘어놓더니 바기리타를 무섭게 쏘아보았습니다.

"나는 저주를 받아 태어난 몸이야. 나를 장애인이라고 놀려댔으니 나도 너에게 저주를 내리겠다."

바기리타가 다급하게 말했습니다.

"성자님, 제 말을 믿어 주십시오. 저는 당신을 절대로 놀리지 않았습니다. 저도 장애인인데 어떻게 성자님을 놀릴 수 있겠습니까? 혼자서 일어서고 앉는 것이 힘들어 쓰러진 겁니다."

성자는 미심쩍은 듯 바기리타를 바라보다가 오른손을 들며 말했습니다.

"좋다. 네 말이 사실인지 거짓인지 확인하겠다. 나를 놀린 것이 맞다면 너는 이 자리에서 괴물로 변할 것이고, 네 말이 맞다면 너는 건강한 청년으로 변할 것이다."

성자가 오른손을 내리자 놀라운 일이 벌어졌습니다. 바기리타가 키가 크고 늠름한 청년으로 변한 것입니다.

바기리타는 궁전으로 달려가서 아버지를 만났습니다. 딜리파 왕은 아들에게 방금 일어난 일에 대해 전해 듣고 아들의 달라진 모습을 보자 기쁨을 감추지 못했습니다.

"오, 이제 네가 신의 뜻을 이루겠구나!"

딜리파 왕은 아들에게 임금 자리를 물려주고 궁전을 떠났습니다. 숲속에 들어가 기도와 명상으로 남은 삶을 살기 위해서였습니다.

바기리타는 왕이 되었지만 기도와 고행을 멈추지 않았습니다. 자신의 소원을 들어 달라고 브라흐마 신에게 계속 기도했으며, 몇 달씩 단식을 하는 등 고행을 이어갔습니다.

어느 날 브라흐마 신이 바기리타 왕 앞에 나타났습니다.

"네 정성이 보통이 아니구나. 네 소원이 무엇인지 말해 보아라. 무슨 소원이든 들어 주마."

바기리타 왕이 대답했습니다.

"저에게는 두 가지 소원이 있습니다. 첫째는 아들을 많이 낳는 것이고, 둘째는 브라흐마 신께서 가진 황금 주전자 안에 담긴 갠지스 강물을 땅으로 끌어내려 흐르게 하는 것입니다."

브라흐마 신이 말했습니다.

"네 두 가지 소원을 들어 주마. 그런데 갠지스 강물을 땅으로 끌어내릴 때 해야 할 일이 있다. 하늘에서 강물이 떨어지면 그 강도가 워낙 세기에 땅이 갈라지거나 산산조각이 날 거야. 따라서 강물이 땅에 떨어지기 전에 가는 물줄기로 바꾸어 줄 수 있는 이가 필요하다."

바기리타는 브라흐마 신의 말을 듣고 이번에는 시바 신에게 기도했습니다.

"하늘에서 갠지스 강물이 떨어지기 전에 가는 물줄기로 바꾸어 줄 수 있는 분은 시바 신밖에 없습니다. 저를 도와주십시오."

시바 신이 바기리타 앞에 나타났습니다.

"네 소원을 들어 주마. 하늘에서 갠지스 강물이 떨어질 때 머리로 받아 가는 물줄기로 바꾸어 주마."

"감사합니다!"

브라흐마 신은 바기리타와의 약속을 지켜 황금 주전자 안에 담긴 갠지스 강물을 하늘에서 쏟아 내었습니다. 그때 시바 신은 땅 위에 꿇어앉아 그 강물을 머리로 받아 가는 물줄기로 바꾸어 주었습니다.

바기리타 왕은 시바 신 곁에 앉아 감사 기도를 드렸습니다. 그러고는 소라고둥을 불며 일어섰는데, 하늘에서 떨어진 가는 물줄기가 양떼처럼 바기리타 왕의 뒤를 따랐습니다. 갠지스 강물은 바기리타 왕이 지나가는 길을 따라 천천히 흘렀습니다. 이리하여 갠지스 강은 이때부터 땅 위를 다시 흐르게 되었답니다.

2026년 일반 및 특별포상 수상자

일반포상

공로상

김 기 형
인천환경공단
청라사업소장

김 상 호
상지대학교
건설환경공학과 교수

문 용 주
㈜삼안
부사장

정 창 삼
인덕대학교
스마트건설방재학과
교수

최 현 일
영남대학교
건설시스템공학과
교수

학술상

김 상 욱
강원대학교
토목공학과
교수

김 연 주
연세대학교
건설환경공학과
교수

백 경 록
고려대학교
건축사회환경공학부
교수

손 민 우
충남대학교
토목공학과
교수

정 건 희
호서대학교
건축토목공학부
교수

정 영 훈
경북대학교
건설방재공학과
교수

기술상

강 철
행정안전부
재난안전검검과
팀장

김 창 환
기후에너지환경부
한강홍수통제소
예보통제과장

노 영 신
한국수자원조사기술원
연구위원

방 윤 현
㈜청솔엔지니어링
사장(대표이사)

배 영 대
한국수자원공사
수자원기획처
처장

안 정 환
한국수력원자력(주)
차장

이 창 현
㈜유신
수자원부
상무

저술상

김 원
한국건설기술연구원
선임연구위원

이 동 률
㈜건화
수자원부
부사장

논문상

박 인 환
서울과학기술대학교
건설시스템공학과
교수

이 동 섭
한국건설기술연구원
연구위원

전 창 현
고려대학교
건축사회환경공학부
교수

학위논문상

권 영 화
한국건설기술연구원
박사후연구원

김 진 욱
고려대학교
박사후연구원

백 태 효
국립한국교통대학교
박사후연구원

장 원 진
한국건설기술연구원
박사후연구원

채 승 택
서울과학기술대학교
박사후연구원

특별포상

국립환경과학원
수상이유 : 수질·수생태·수자원을 아우르는 통합 연구를 통해 지속 가능하고 건강한 물환경 관리 기반을 구축하여, 국민이 안심할 수 있는 물관리 체계를 선진화하는데 기여함

한국환경산업기술원
수상이유 : 기후변화 및 산업구조 변화 등 수자원관리와 관련된 미래변화에 효과적으로 대응하기 위하여 핵심기술개발을 지원함으로써 국민의 물복지를 향상시키는데 기여함

동부건설(주)
수상이유 : 국내 수자원의 효율적인 취수와 이수에 전심으로 이바지하고 있으며, 최근 “충주댐계통 공업용수도사업 및 추가사업 제3공구 시설공사”를 성공적으로 추진함으로써 수자원 기술발전과 국민들의 안정적인 물사용에 기여함

씨엔에치아이앤씨(주)
수상이유 : 산림계류 유량 관측체계 구축을 통해 홍수 대응을 위한 기초자료 확보 및 상·하류 연계 홍수 대응 체계 강화에 기여하였으며, 산림 재해 예방 및 국민 안전 증진에 이바지함

SBS 이현정 기자
수상이유 : 기후변화에 따른 ‘극한 호우’가 잦아지면서 여름철 대규모 인명피해가 반복되는 실태를 조명하고, 정부 재난 안전 대책의 한계와 개선 방향을 점검하는 심층 보도를 통해 국민의 생명과 안전을 지키는 데 기여함

감사패

안상진
수상이유 : 한국수자원학회 원로회의 의장으로서 학회발전과 화합을 위하여 헌신적으로 노력함.

우효섭
수상이유 : 「하천수리학 공개강좌」를 통한 재능기부로 수자원 분야 전문지식과 경험을 공유하여, 학회의 학문적 역량 강화에 크게 기여함

편집후기

서승범 (서울시립대학교 교수) & **최영환** (경상국립대학교 교수)

안녕하세요, 2025년 3월호 편집을 맡은 서승범, 최영환입니다. 바쁘신 가운데 옥고를 투고해주신 모든 저자분들께 진심 어린 감사의 인사를 올립니다. 먼저 미래 지능정보사회의 가뭄 대응전략에 관한 주제로 권두언을 작성해 주신 건국대학교 김성준 교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 이번 호의 특집 주제인 '다원적 의사결정을 위한 Scenario Neutral(SN) 기반 가뭄취약도 평가기술 개발 연구단'에 관한 옥고를 투고해 주신 세종대학교 정민규 박사님, 한양대학교(ERICA) 김태웅 교수님, 수원대학교 이서윤 연구원님, ㈜라온티앤씨 박동혁 대표님께도 감사 인사를 드립니다. 이번 호에는 총 5편의 학술/기술 기사와 5편의 일반기사를 수록할 수 있었습니다. 학술/기술 기사를 투고해 주신 충북대학교 이효상 교수님, 국민대학교 이가영 연구원님, 고려대학교 박상진 연구원님, 한국환경연구원 김연중 박사님, 국립군산대학교 한정우 교수님께 감사를 드립니다. 또한 일반기사를 투고해 주신 강원대학교 김병식 교수님, K-water연구원 박진혁 박사님, 동아대학교 나우영 교수님, 강원대학교 김상욱 교수님, 한국건설기술연구원 김명환 박사님께도 감사를 드립니다. 그리고 올해 발간된 환경수리학(서일원·송창근·박인환·김준성 공저) 교과서 서평을 작성해 주신 서울대학교 황진환 교수님께도 깊은 감사를 드립니다. 또한 여행과 문학산책에 좋은 원고를 연재해 주시는 청명종합엔지니어링 정해옥 회장님과 신현배 시인께도 깊은 감사를 드립니다. 더불어 학회지 편집을 위해서 늘 정성을 다해주시는 편집위원 및 사무국 관계자분들께 진심으로 감사드립니다.

※ 학회지의 내용중 수정 보완되어야 할 사항이나 학회에 실렸으면 하는 내용이 있으면 전자우편 (kwra@kwra.or.kr)이나 팩스(02-561-2733)로 보내주시면 적극 반영될 수 있도록 노력하겠습니다.

신규회원 가입 안내

☐ **학회 홈페이지를 통해 가입할 수 있습니다.**
(http://www.kwra.or.kr → 회원마당 → 가입안내 → 온라인 회원가입)

구 분	입 회 비	연 회 비	종신회비
정 회 원	20,000	60,000	750,000
학생회원	10,000	20,000	-

☐ **회원가입 혜택**

- 연6회 한국수자원학회지 "물과 미래"(e-Book) 무료 제공
- 연12회 국문논문집(e-Journal) 무료 제공
- 국문논문집을 신청하여 구독할 수 있음
- 학회에 논문투고를 할 수 있음
- 홈페이지 접속 및 정보서비스(뉴스레터 등) 무료서비스 제공
- 학술발표회 등 학회행사 참가시 참가비 할인혜택
- 학회에 비치된 도서를 무료로 열람 · 대여할 수 있음
- 학회에서 발행되는 각종 출판물을 구입시 할인 받을 수 있음

1. 포상심사위원회 회의

- 일시: 2026년 1월 9일(금) 14:00
- 장소: 한국수자원학회 회의실
- 참석: 안재현, 김동수, 김상단, 김상욱, 김영택, 김일섭, 박문형, 손상영, 이명훈, 이범희, 홍승호
- 안건: 1) 일반, 특별포상 심사 및 후보 선정
  2) 학회장 표창 및 장락생 선발

2. 학술발표회 준비위원회 제1차 회의

- 일시: 2026년 1월 7일(수) 15:00
- 장소: 온라인 회의
- 참석: 정일문, 김영택, 장선우, 신주영, 권시윤, 최성욱, 정기철, 성경민, 김성훈, 엄명진, 이준영, 박인환, 최영환, 김민석, 장은경, 한희찬, 박종민, 이승엽, 전상훈, 김덕환, 안국현, 김열우, 나병준, 최수훈, 이상현, 김보성, 오상호, 김인철, 송재열
- 안건: 1) 업무 분장
  2) 현장답사 일정

3. 제1차 회장단회의

- 일시: 2026년 1월 9일(금) 16:00
- 장소: 한국수자원학회 회의실
- 참석: 유철상, 김상단, 김상욱, 박문형, 이명훈, 이범희, 강두선, 김동수, 김영택, 김일섭, 손상영, 김영도, 정건희
- 안건: 1) 추진실적 및 현황보고
  2) 기타사항

4. 원로회의 의장단회의

- 일시: 2026년 1월 12일(월) 10:30
- 장소: 한국수자원학회 회의실
- 참석: 안상진. 김국일, 조원철, 최한규
- 안건: 2026년 정기총회 안건 논의

5. 제1차 논문집편집위원회 회의

- 일시: 2026년 1월 15일(목) 16:00
- 장소: 온라인 회의
- 참석: 김영도, 노성진, 박대룡, 정동휘, 이기하, 이준영, 이기하, 송창근, 장선우
- 안건: 1) 2025년 논문실적 보고
  2) 피인용상 선정 결과 및 개선방안 논의
  3) 우수학생논문상 실적
  4) AI Agnet

5. 원로회의 정기총회

- 일시: 2026년 1월 23일(금) 15:20
- 장소: 건설회관 2층 중회의실
- 참석: 안상진 의장 외 50명(위임 27명)
- 안건: 1) 2025년 추진실적보고
  2) 2026년 사업계획(안)
  3) 제15대 의장 선출 – 김국일 고문 선출

6. 제98차 평의원회(2026년 제1차 이사회 겸)

- 일시: 2026년 1월 23일(금) 16:00
- 장소: 건설회관 2층 중회의실
- 참석: 유철상 회장 외 206명(위임 157명)
- 안건: 1) 보고안건 – 주요사업 회무보고
  2) 2025년 결산(안)
  3) 2026년 사업계획 및 예산(안)

7. 제60회 정기총회

- 일시: 2026년 1월 23일(금) 17:00
- 장소: 건설회관 2층 중회의실
- 참석: 유철상 회장 외 260명(위임 170명)
- 안건: 1) 시상식
  2) 2025년 주요 실적 및 현황 보고
  3) 감사보고

4) 2025년 결산(안)
5) 2026년 사업계획 및 예산(안)
6) 청년이사회 위촉장 수여

8. 학술발표회 준비위원회 제2차 회의(1차 현장답사 겸)

- 일시: 2026년 2월 6일(금) 12:00
- 장소: 부산항국제전시컨벤션센터
- 참석: 정일문, 김영택, 신주영, 엄명진, 안국현, 한희찬, 오상호, 임상지, 권형택, 유승준, 맥앤윕
- 안건: 1) 행사 준비 현황 논의
  2) 현장 점검

9. 제2차 회장단회의

- 일시: 2026년 2월 6일(금) 13:00
- 장소: 한국수자원학회 회의실
- 참석: 유철상, 김광섭, 김상단, 김상욱, 안재현, 이명훈, 이범희, 강두선, 권현한, 김일섭, 손민우, 박대룡, 전상훈
- 안건: 1) 추진실적 및 현황보고
  2) 위원회별 추진계획 및 논의사항

10. 2026년 회장단 및 분과위원장 Workshop

- 일시: 2026년 2월 6일(금) 14:00
- 장소: K-water연구원 대회의실
- 참석: 유철상 회장 외 40여명
- 안건: 1) 위원회별 사업계획 논의
  2) 학회 발전방안 논의

이현지(6754) (재)국가농림기상센터 연구개발부 연구원 변경
권혁준(6254) ㈜건화 환경평가부 대리 변경
이상훈(5427) 국립환경과학원 수자원연구과 전문연구원 변경
조준원(5308) ㈜건화 수자원부 대리
강태운(4571) 한국지질자원연구원 지질재해연구실 선임연구원 변경
임윤성(3543) 코지스 부장 변경
김용명(3337) ㈜대한콘설탄트 상하수도부문 부사장 변경
이민호(3328) ㈜인우 수자원부 상무 변경
이병선(3289) ㈜윤창 부사장 변경
김익경(3195) 아람코퍼레이션(주) 사장 변경
황보종구(2845) ㈜JBT 지능형 유량사업부 상무 변경
류종현(2718) ㈜다산컨설턴트 부사장 변경
장웅철(2016) ㈜영진엔지니어링 수자원부 상무 변경
김봉재(1580) ㈜동해종합기술공사 물사업부문 사장 변경

이름(회원번호)	소속 및 직책	이메일 주소
김현택(7826)	고려대학교 스마트도시재생협동과정 연구원	verdad@korea.ac.kr
박상현(7827)	(주)한국종합기술 수자원부 과장	plaund@naver.com
장우진(7828)	(주)서광건설엔지니어링 수자원부 부장	jwjjjw@naver.com
박찬흠(7829)	디에스이앤씨 수자원부 전무	libertas2027@naver.com
강철(7830)	행정안전부 재난안전점검과 팀장	aoao0011@gmail.com
유경아(7831)	국립환경과학원 수자원연구과 환경연구관	angelka@korea.kr
민중혁(7832)	국립환경과학원 수자원연구과 과장	joonghyuk@korea.kr

축하합니다

김국일 고문 제15대 원로회의 의장 선출

김국일 고문((주)녹색기술공사 상임고문)이 2026년 원로회의 정기총회(2026.1.23.)에서 제15대 원로회의 의장으로 선출되었습니다.

2025년도 사업실적 및 결산보고

■ 2025년도 사업실적 요약

구분	내용	회수
1. 회의개최	1) 총회	1
	2) 평의원회	2
	3) 이사회	4
	4) 회장단 회의	9
	5) 편집위원회 회의	4
	6) 포상 심사위원회	1
	7) 회장단 및 분과위원장 워크샵	1
	계	21
2. 위원회 활동	1) 분과위원회 회의/세미나	56
	2) 특별위원회 회의/세미나	1
	3) 수자원현안위원회 회의/세미나	2
	계	59
3. 학술발표회	1) 학술발표회 개최	2
	2) 현장답사	2
	3) 후원설명회	1
	4) 준비위원회 회의	8
	계	13
4. 국제교류활동	1) 국제교류학회 참가	4
	2) 국제회의 참가	2
	계	6
5.심포지엄/웍샵/토론회/강좌	1) 심포지엄	3
	2) 웍샵	1
	3) 강좌	2
	계	6
6. 미래물포럼	1) 미래물포럼	3
	계	3
7. 간행물 발간	1) 학회지	12
	2) 논문집	12
	3) 영문논문집	4
	4) 이슈페이퍼	5
	계	33
8. 지회활동	1) 회의	11
	2) 학술대회/세미나/토론회/현장견학/기타	9
	계	20
9. 원로회의 활동	1) 회의	9
	2) 간담회 및 특강	5
	3) 학술발표회 시니어세션	2
	4) Study Tour 및 토론	1
	5) 문화행사 및 기타	2
	6) 학회지 기고	5
	계	24
10. 관련기관 회의 및 행사	1) 국회물포럼	1
	2) 2025 공동포럼	1
	3) 토양·지하수 분야 협력 컨퍼런스	1
	4) KIHS 수자원 포럼	1
	계	4
	총계	189

■ 2025년 일반회계

(단위: 원)

계 정	2025		2024	
	예 산	집 행	예 산	집 행
1. 회 비	(80,700,000)	(86,700,000)	(70,700,000)	(73,479,196)
일 반 회 비	40,000,000	42,600,000	30,000,000	39,779,196
도서관 회비	700,000	600,000	700,000	700,000
특별회원 회비	40,000,000	43,500,000	40,000,000	33,000,000
2. 논문집 구독회비	500,000	500,000	500,000	550,000
3. 연구사업 회비	(340,000,000)	(370,415,816)	(300,000,000)	(313,448,283)
이 월	160,000,000	237,639,917	170,000,000	156,157,553
신 규	180,000,000	132,775,899	130,000,000	157,290,730
4. 보조금	55,000,000	83,530,000	37,000,000	92,798,861
5. 임대료	12,000,000	9,000,000	17,000,000	17,000,000
6. 수공학웍샵	20,000,000	11,600,000	20,000,000	17,200,000
7. 학술발표회	170,000,000	279,780,000	150,000,000	248,480,000
8. 간행도서	2,000,000	0	2,000,000	867,965
9. 논문게재료	25,000,000	38,795,000	25,000,000	23,055,000
10. 잡 수 입	(40,000,000)	(45,037,230)	(35,000,000)	(41,838,584)
광고	5,000,000	0	0	0
종신회비 및 기타이자	30,000,000	29,793,462	30,000,000	26,850,336
기타 잡수입	5,000,000	15,243,768	5,000,000	14,988,248
11. 논문심사료	12,000,000	15,850,000	10,000,000	10,450,000
12. 종신회비기금 전입	27,500,000	27,500,000	28,000,000	28,000,000
13. 부가세		700,000		
계	784,700,000	969,408,046	695,200,000	867,167,889
전기이월	442,372,532	442,372,532	589,711,706	589,711,706
합 계	1,227,072,532	1,411,780,578	1,284,911,706	1,456,879,595

계 정	2025		2024	
	예 산	집 행	예 산	집 행
1. 사 업 비	(633,280,000)	(592,310,923)	(602,380,000)	(565,155,903)
학회지 간행	(145,880,000)	(155,951,100)	(148,080,000)	(120,053,280)
인쇄비	96,000,000	119,283,300	108,000,000	87,778,900
JHER사무국	6,000,000	6,000,000	6,000,000	6,000,000
e-book	3,960,000	3,960,000	3,960,000	3,960,000
회의비	9,600,000	2,802,800	4,800,000	2,886,500
원고료	14,400,000	13,830,000	14,400,000	10,840,000
발송비	10,920,000	10,075,000	10,920,000	8,587,880
Ai Agent	5,000,000	0		
학술발표회	170,000,000	205,147,060	150,000,000	193,303,155
수공학웍샵	16,000,000	8,437,360	16,000,000	10,969,220
분과연구활동비	60,000,000	39,285,938	63,000,000	28,479,500
사업활동비	126,000,000	95,018,130	125,000,000	141,832,551
국제협력사업	40,000,000	33,915,599	36,000,000	25,748,048
연회비	7,900,000	7,315,521	4,800,000	4,240,209
포상비	25,000,000	19,282,000	17,000,000	13,096,000
회의비	25,500,000	20,121,550	25,500,000	18,781,040
도서발간	3,000,000	0	3,000,000	0
지회지원	14,000,000	7,836,665	14,000,000	8,652,900
2. 경 상 비	(191,396,306)	(147,214,515)	(148,811,400)	(109,983,919)
회장단 활동비	14,000,000	13,123,800	12,000,000	11,340,000
업무추진비	6,000,000	5,745,735	6,000,000	3,531,600
직무수행비	8,174,190	8,174,190	6,000,000	6,000,000
복리후생비	49,162,116	44,452,756	46,751,400	44,745,960
여비교통비	14,000,000	9,857,958	14,000,000	12,085,151
정보통신비	4,200,000	3,697,320	4,200,000	3,429,190
홈페이지 관리비	4,800,000	4,620,000	4,800,000	3,960,000
홈페이지 구축비	30,000,000	9,900,000		
발송비(기타)	2,400,000	1,355,360	2,400,000	940,380
소모품비	6,000,000	5,452,120	6,000,000	3,671,237
제수수료	24,000,000	22,470,536	24,000,000	13,270,501
제세공과금	20,000,000	5,122,740	20,000,000	5,023,900
수선비	8,000,000	12,582,000	2,000,000	1,326,000
광고비(과총)	660,000	660,000	660,000	660,000
3. 관 리 비	22,000,000	20,537,570	22,400,000	19,939,710
4. 급 여	163,705,390	163,705,390	154,936,800	154,936,800
5. 퇴 직 급 여	19,796,786	19,796,786	24,938,631	24,938,631
6. 비품 및 도서비	5,000,000	749,000	5,000,000	440,000
7. 논 문 심 사 료	12,000,000	15,850,000	10,000,000	10,450,000
8. 예 비 비	30,000,000		30,000,000	28,462,100
9. 선 급 부 가 세				200,000
10. 교 육 컨 텐 츠	100,000,000			100,000,000
11. 급 여 예 수 금		1,142,220		
계	1,177,178,482	961,306,404	998,466,831	1,014,507,063
차기이월	49,894,050	450,474,174	286,444,875	442,372,532
합 계	1,227,072,532	1,411,780,578	1,284,911,706	1,456,879,595

■ 2025년 특별회계

(단위: 원)

항목	금액	비고	
1. 발전기금	1,075,087,416	• 전기이월	1,050,518,566
		• 이자수입	24,568,850
2. 종신회비	757,527,798	• 전기이월	746,727,798
		• 2025년 회비	38,000,000
		• 일반회계 전출(예정)	(27,200,000)
3. 관리예치금	3,368,343	• 한신리빙타워 302호	2,788,200
		• 한신오피스텔 405호	580,143
4. 국제학술기금	40,903,649	• 전기이월	103,268,678
		• 이자수입	2,634,971
		• IAHR-APD 2026 대여금[1]	(65,000,000)
5. 임대보증금	10,000,000	• 한신잠실코아오피스텔 405호[2]	
6 퇴직적립금	173,962,067	• 전기이월	150,878,787
		• 이자수입	3,286,494
		• 2025년 입금	19,796,786
합계	**2,060,849,273**		

1) IAHR-APD 2026 운영비 대여: 행사를 성공적으로 수행하기 위해 행사 준비를 위한 운영비 대여
- 행사명: IAHR-APD 2026 (국제수환경공학회 아시아 · 태평양 지역 대회)
- 기간: 2026.7.19.(일) - 7.22.(수)
- 장소: 인천 송도컨벤시아
- 대여금: 6,500만원(PCO 계약금, 행사준비비 등)
- 상환기한: 2026년 9월
- 지원조건: 행사 후 잉여금은 학회 국제학술기금으로 전입

2) 주식회사 크랭크인 신규 계약: 계약 기간 2년(2025.6.7. - 2027.6.7.)

(1) 교육컨텐츠 제작 특별회계

(2025.01.01 ~ 2025.12.31) (단위: 원)

계 정	수입			지출		
	항 목	예 산	집 행	항 목	예 산	집 행
교 육 컨 텐 츠	2025년 적립	100,000,000		제작	226,253,680	
				회의비		333,000
계		100,000,000	0	계	226,253,680	333,000
전기이월		226,253,680	226,253,680	차기이월	100,000,000	225,920,680
합 계		326,253,680	226,253,680	합 계	326,253,680	226,253,680

※ 200,000,000원 정기예금 예치

※ 26,253,680원 보통예금(1005-004-174941)

(2) 세계물총회 사업비 이관금(임시 회계)

(2025.01.01 ~ 2025.12.31) (단위: 원)

계 정	수입			지출		
	항 목	예 산	집 행	항 목	예 산	집 행
세계물총회 사업비 제17차 세계물총회 후속조치 사업	전기이월	**8,739,014**	**8,739,014**	제45회 미래물포럼		**1,100,000**
				대한민국 국제물주간 특별세션		**488,400**
				차기 이월		**7,150,614**
계		8,739,014	8,739,014	합 계	8,739,014	8,739,014

※ 참고: 세계물총회 사업비 사용 후 잔액 7,150,614원 정기예금 재예치

2026년 사업계획 및 예산

1. 2026년 사업계획

※ 학회 설립 목적(정관 제 2 조): 지구상의 물에 관한 학술발전을 도모하며 사회공익에 기여
※ 학회 사업(정관 제 4 조):
1. “물”에 관련되는 모든 학문분야의 연구, 교육 및 지도
2. 학회지, 논문집 및 관련 기술 서적의 출판
3. 학술발표회, 세미나 및 심포지엄, 강연회, 간담회의 개최 및 국내외 견학 시찰
4. 국내외 관련학회와의 학술교류
5. 정부, 공공단체, 기타 기관이 의뢰하는 “물”에 관한 기술연구
6. 포상 및 장학사업
7. 기타 학회 목적달성을 위하여 필요한 사업

1) ‘물’에 관련되는 모든 학문분야의 연구, 교육 및 지도

- 학술 및 기술 발전과 연구개발을 위하여 분과위원회 활동을 활성화한다. 이를 위하여 회원들이 자발적으로 구성하고 참여하는 방향으로 분과위원회를 운영한다.
- 수자원 관련 사회적 이슈에 대한 회원의 의견을 수렴하고 해결방안을 모색하기 위한 문제해결형 분과위원회를 공모를 통해 운영한다.
- 하천환경, 수자원 정책, 재해관리, 탄소중립 등 유관분야 전문가들을 위한 활동공간을 확충하고, 융복합 학문분야의 활성화를 도모한다.
- 대학원생 또는 초급기술자를 대상으로 하는 교육강좌로 수공학웍샵을 개최하고, 수자원분야 기술이슈를 다루는 기술발표회을 개최한다.
- 여성과학기술단체총연합회 지원사업을 수행한다(여성위원회).
- 청년 전문가들의 학회 참여 활성화를 위해 청년이사회 제도를 운영하며, 청년 회원들이 학회의 주체로 성장할 수 있도록 지원한다.
- 교육컨텐츠 특별위원회를 지속적으로 유지하고 수자원분야 교육 컨텐츠를 개발하여 영상콘텐츠를 통해 배포한다.
- 전국 지자체 연구원 수자원분야 협의체를 구성하고, 기술위원회 내 지정분과로 추진한다.

2) 학회지, 논문집 및 관련 기술 서적의 출판

- 학회지를 격월간으로 6회 발간하며, 웹매거진 발행을 추진한다.
- 논문집을 월간으로 12회 발간하며, 논문집의 SCOPUS 등재 유지를 위하여 노력한다.
- 국제학술지인 Journal of Hydro-environment Research의 간행을 위한 사무국을 운영하며, 인용수 향상을 위한 활동을 지원한다.
- 학술 및 기술위원회의 분과위원회 활동성과로 기술보고서를 발간하며, 연 1회 이상 우리 학회지에 학술 또는 일반기사로 게재한다.
- 특별위원회 활동성과를 정책 및 기술제안서로 발간하여 관련기관에 배포한다.
- 논문집 활성화를 위해 신설된 우수학생논문상을 지속 가능하도록 발전시킨다.
- 논문집 AI Agent를 도입하여 논문투고와 심사의 효율화을 높이고, 논문집의 질적 수준을 향상시킨다. 논문집 AI Agent는 교육컨텐츠 제작의 일환으로 추진한다.

3) 학술발표회, 심포지엄 및 세미나, 강연회, 간담회 개최 및 국내외 견학시찰

- 2026년 한국수자원학회 학술발표회를 개최하여, 학술 및 기술교류와 전문가 네크워크를 구축하여 과학기술 발전에 기여한다.
- 미래물포럼을 매 분기 개최하여 그 성과를 관련기관에 건의하여 실현되도록 한다.
- 국내외 수자원 관련 현장견학을 실시한다.
- 수자원 관련 사회현안에 대한 토론회, 간담회를 개최한다.

4) 국내외 관련 학회와의 학술교류

- 국내 유관학회들과의 회장단 모임을 정례화하고, 회원 교차가입, 물 관련 현안에 대한 공동 논의, 심포지엄 공동 개최 등 다양한 협력방안을 모색한다.
- 일본, 중국, 뉴질랜드, 베트남, 태국 등의 해외 교류학회에서 개최하는 연차 학술대회에 참가할 대표단을 파견한다.
- 국내외 물관리 관련 국제기구와 협력 네트워크를 구축한다.
- 학술발표회 International Session을 기획 및 운영한다.
- IHP 사업을 위한 신규 사업 발굴 및 관련 사업 추진을 지원한다.
- IAHR-APD 2026 성공적인 개최를 위하여 지원한다.

5) 정부, 공공단체, 기타 기관이 의뢰하는 “물”에 관한 기술연구

- 수자원 연구 R&D 기획 및 사업 추진을 모색한다.
- 수자원 미래 정책 및 기술 제안을 통해 신규 사업을 발굴한다.
- 수자원 관련 각종 학술용역을 수행한다.
- 외부기관의 전문가 추천 및 자문 요청에 적극 참여, 학술 및 기술봉사를 통하여 사회공익에 기여한다.

6) 포상 및 장학사업

- 학회 포상규정에 의거하여 공로상, 학술상, 기술상. 저술상, 논문상. 학위논문상 등의 학회상을 포상한다.
- 학회 포상규정에 의거하여 수자원 분야의 발전에 크게 기여한 개인 또는 단체에 특별포상을 수여한다.
- 활발한 활동으로 학회발전에 기여한 회원들을 선정하여 학회장 표창을 수여한다.
- 학술적으로 우수한 성과를 이룬 학생 회원들을 대상으로 장학금을 수여한다.

7) 기타 학회 목적달성을 위하여 필요한 사업

- 학회 홈페이지를 개선하여 회원들의 교류와 학회를 대표하는 공간으로 확장한다.
-온라인 뉴스레터를 개편하여 회원들에게 유용한 정보를 제공하고, 회원들의 참여를 유도한다.
- 수자원 관련 정보제공 및 학회 홍보를 위한 한국수자원학회TV를 운영한다.
- 지역간 또는 이해당사자간 갈등 등 수자원 관련 현안들에 대한 해결책을 마련하기 위한 수자원현안위원회를 설치하며, 이슈페이퍼를 배포하여 학회차원의 의견을 제시한다.
- 물산업을 국가 신성장동력으로 육성하고자 하는 정부 시책과 국가경쟁력 제고를 체계적으로 지원할 수 있도록 물산업 분야에서의 수자원 발전방안을 논의한다.
- 회원들 간의 친목도모와 유대강화를 위한 다양한 교류활동을 증진한다.
- 지회의 활성화 및 교류 증진을 위한 회의를 개최한다.
- 기후위기, 도시침수, AI(인공지능) 홍수예보, 댐-하천 디지털트윈, 4차산업혁명 등과 직결된 미래정책 및 기술정책 제안을 통해 공익을 추구한다.

- 사진공모전을 개최하여 학회홍보에 활용하며, 물의 중요성과 환경보전에 대한 사회적 인식을 증진시킨다.

8) 원로회의 사업계획

- 각종 회의(총회, 본부 총괄 회의, 운영위원회, 기획위원회, 자문위원회 등)
- 정부, 공공기관 등 정책자문
- Study tour 및 토론회
- 학술발표회 시니어세션
- 현안 수자원행정 청취 및 토론회
- 연구과제 발굴모색
- 원로회의의 원활한 운영방안모색
- 학회 중요운영사안 자문
- 각종 문화행사로 회원의 친목도모
- 간담회 및 특강
- 학회지 기고 활성화
- 기타

2. 2026년 예산

(단위 : 원)

수 입				지 출			
계 정	2025년	2026년	증감	계 정	2025년	2026년	증감
1. 전기이월	442,372,532	450,474,174	8,101,642	1. 사업비			
				정간물 간행	145,880,000	128,080,000	△17,800,000
2. 회비				학술발표회	170,000,000	214,000,000	44,000,000
일반회비	40,000,000	53,400,000	13,400,000	수공학웍샵	16,000,000	16,000,000	0
도서관회비	700,000	700,000	0				
특별회비	40,000,000	40,000,000	0	분과연구활동비	60,000,000	64,000,000	4,000,000
				사업활동비	126,000,000	113,000,000	△13,000,000
				국제협력사업	40,000,000	40,000,000	0
3. 구독회비	500,000	500,000	0	연회비	7,900,000	8,000,000	100,000
				포상비	25,000,000	25,000,000	0
				회의비	25,500,000	28,500,000	3,000,000
4.연구사업회비	340,000,000	280,000,000	△60,000,000	도서발간	3,000,000	3,000,000	0
				지회지원	14,000,000	14,000,000	0
5. 보조금	55,000,000	55,000,000	0	2. 경상비			
				회장단활동비	14,000,000	15,000,000	1,000,000
				업무추진비	6,000,000	6,000,000	0
6. 임대료	12,000,000	12,000,000	0	직무수행비	8,174,190	8,400,000	225,810
				복리후생비	49,162,116	51,657,000	2,494,884
				여비교통비	14,000,000	14,000,000	0
7. 수공학웍샵	20,000,000	20,000,000	0	정보통신비	4,200,000	4,200,000	0
				홈페이지관리비	4,800,000	4,800,000	0
				홈페이지개편	30,000,000	0	△30,000,000
8. 학술발표회	170,000,000	220,000,000	50,000,000	발송비(기타)	2,400,000	2,400,000	0
				소모품비	6,000,000	6,000,000	0
				제수수료	24,000,000	20,000,000	△4,000,000
9. 간행도서	2,000,000	2,000,000	0	제세공과금	20,000,000	6,000,000	△14,000,000
				수선비	8,000,000	10,000,000	2,000,000
				과총광고비	660,000	660,000	0
10. 논문게재료	25,000,000	25,000,000	0				
				3. 사무실관리비	22,000,000	22,000,000	0
11. 잡수입				4. 급여	163,705,390	173,484,000	9,778,610
(광고)	5,000,000	5,000,000	0				
(종신,기타이자)	30,000,000	30,000,000	0	5. 퇴직급여	19,796,786	27,774,726	7,977,940
(기타잡수입)	5,000,000	5,000,000	0				
				6. 비품및도서비	5,000,000	5,000,000	0
12. 논문심사료	12,000,000	12,000,000	0	7. 논문심사료	12,000,000	12,000,000	0
				8. 예비비	30,000,000	30,000,000	0
13. 타기금전입	27,500,000	27,200,000	△300,000				
(종신회비)				9. 타기금전출	100,000,000	100,000,000	0
				(교육컨텐츠)			
				10. 차기이월액	49,894,050	65,318,448	15,424,398
합 계	1,227,072,532	1,238,274,174	11,201,642	합 계	1,227,072,532	1,238,274,174	11,201,642

한국수자원학회논문집

JOURNAL OF KOREA WATER RESOURCES ASSOCIATION

제59권 제2호 통권 제414호 2026년 2월

>> Research Articles

■ JMA-MSM 기상장 기반 ADCIRC-SWAN 연성모델을 이용한 폭풍해일 및 폭풍파 모의: 태풍 마이삭(2009)과 하이선(2010)을 대상으로
Simulation of storm surges and waves using the coupled ADCIRC-SWAN model based on JMA-MSM meteorological fields: A case study of typhoons Maysak (2009) and Haishen (2010)
황태건 · 김현정 · 민병일 · 이상엽 · 이우동
Hwang, Taegeon · Kim, Hyeon-Jeong · Min, Byung-Il · Lee, Sang-Yeop · Lee, Woo-Dong

■ 도시 지하공간 침수에 기여하는 맨홀의 영향도 기반 평가 방법론
An impact-based evaluation methodology for identifying manholes contributing to urban underground flooding
권성천 · 이기하 · 이진형 · 이승수
Kwon, Seongcheon · Lee, Giha · Lee, Jinhyeong · Lee, Seungsoo

■ 야외관측 및 수치해석을 이용한 하천 사주 상 식생 사멸조건의 추정 - 초본류 사례
Estimation of the vegetation mortality conditions on a riparian sand bar using the field observation and numerical simulation
- A case of herbaceous plant in Korea
우효섭 · 장창래 · 이찬주 · 조형진 · 최성욱
Woo, Hyoseop · Jang, Chang-Lae · Lee, Chanjoo · Cho, Hyung-jin · Choi, Sung-uk

■ 오버샘플링이 머신러닝 모델 예측성능에 미치는 영향: 녹조예측 실증분석
Impact of oversampling on the predictive performance of machine learning models: Empirical analysis of algal bloom prediction
Lee, Junhaeng · Yi, Choongsung · Ryu, Jewan · Kim, Sunghoon
이준행 · 이충성 · 류제완 · 김성훈

■ LSTM을 활용한 용담댐 하류 다중지점 시간 단위 하천 수위 예측 모델 개발과 성능평가
Development and performance evaluation of LSTM-based multi-points water level forecasting model for downstream region of Yongdam Dam
Yang, HyunSeok · Choi, YoungDon · Kim, SungHoon · Lee, JunSeok
양현석 · 최영돈 · 김성훈 · 이준석

■ 적설 및 융설 영향을 반영한 GR4J 모형의 유출 모의 평가
Evaluation of GR4J streamflow simulations incorporating snow accumulation and snowmelt
이서균 · 박문형 · 강수빈 · 권현한
Lee, Seo Gyun · Park, Moon Hyung · Kang, Subin · Kwon, Hyun Han

■ 도시침수 분석 정확성 향상을 위한 소유역 분할 기법 평가
An evaluation of subcatchment delineation methods for enhanced accuracy in urban flood analysis
신금채 · 이정환
Shin, Geumchae · Lee, Junghwan

■ 생성형 AI 기반 위성사진 예측을 활용한 대기운동벡터 산출 기법 연구
Atmospheric motion vector derivation technique using generative AI-based satellite image prediction
남동재 · 안종탁 · 나병준
Nam, Dongjae · An, Jongtak · Na, Byoungjoon

>> Special Issue: 지능형 도시홍수 예측

■ 지속가능한 배수시스템 포장의 줄눈 여부에 따른 배출성능에 대한 실험적 검증Experimental study on the hydraulic performance of permeable block systems with joints
염성일 · 안정규 · 이정민
Yeom, Seongil · Ahn, Jungkyu · Lee, Jeongmin