

# 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

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



이효상

충북대학교 토목공학부 교수  
hyosanglee@chungbuk.ac.kr



안국현

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 가능성이 제시되었으며, 특정 지역에서는 중형 발전소에 준하는 에너지 저장 규모가 가능성을 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 역할을 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, 서울 시립대학교 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. (submitted 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



이가영

국민대학교

건설시스템공학부 석사과정  
dlrkdud1013@kookmin.ac.kr



신주영

국민대학교

건설시스템공학부 교수  
jshin@kookmin.ac.kr



김규태

(주)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 지점 빈도해석으로는 한계가 존재한다. 이러한 한계를 보완하기 위해 수문학적으로 동질한 지역 내에 다수 지점의 자료를 통합 분석하는 지역빈도 해석(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 기후 변화와 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(heterogeneity 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),  $1 \leq H < 2$

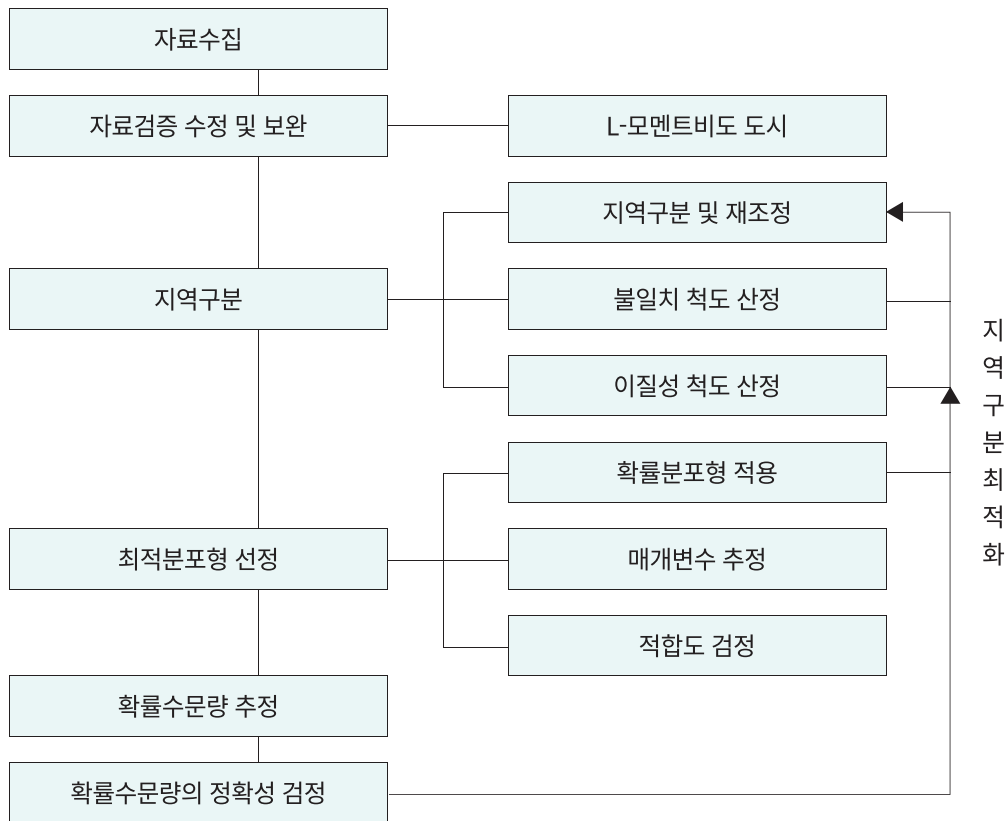


그림 1. 지역빈도해석 수행 절차



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

: 이질 가능(possibly heterogeneous),  $H \geq 2$   
 : 이질(heterogeneous)). 본 연구에서는 2024년  
 까지 확충된 자료를 바탕으로 이질성 척도( $H$  ;  
 $H_1, H_2, H_3$ )에 대한 비교 분석을 수행하였다. 여  
 기서  $H_1$ 은 L-변동계수(L-CV)를,  $H_2$ 는 L-왜도  
 (L-skewness),  $H_3$ 은 L-첨도 (L-kurtosis)를 기반  
 으로 산정된다 (Hosking and Wallis, 2005).

26개의 동질지역의 중앙값이 이질한 범주  
 ( $H \geq 2$ )에 위치할 경우를 이질한 지역으로 판단  
 하였다. 분석 결과, 26개 동질지역 중 19번 지역에  
 서 이질성 척도  $H_1$ 의 중앙값이 2.0 이상인 2.10 값  
 으로 산출되어 수문학적 이질성이 확인되었다. 그  
 림 3은 19번 지역에 대한 분석 결과를 시각화한 것

으로, 지역 내 관측소들의 지속기간별 L-모멘트  
 계수를 바탕으로 산정된 이질성 척도의 분포를 나  
 타낸다. 해당 그림에서 박스는 자료의 중앙 50%  
 범위를, 박스 내 중앙선은 중앙값을 의미하며 가  
 독성을 위해 동질성 등급에 따라 색상(동질: 녹색,  
 이질 가능: 청색, 이질: 적색)을 구분하여 표시하  
 였다. 이와 같은 이질성 척도의 분포 특성은 기존  
 동질지역 구분이 최신 강우 특성을 충분히 반영하  
 지 못할 가능성을 시사하며, 19번 지역에 대한 재  
 검토 필요성을 뒷받침한다.

### 3. 군집 분석 기반 수문학적 동질지역 재 구분

2장에서 업데이트된 강우 자료를 적용하여 기존

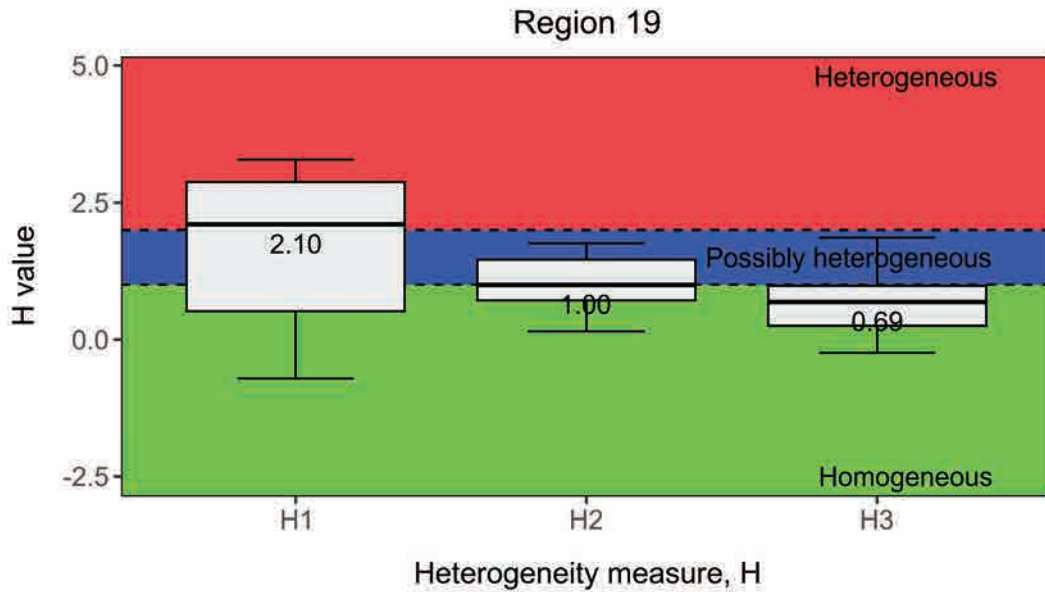


그림 3. 19번 지역의 이질성척도( $H$ ;  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$ ) 값 비교 분석

동질지역의 타당성을 검토한 결과, 19번 지역에서는 이질성 척도,  $H_1$ 값이 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 입력 변수를 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

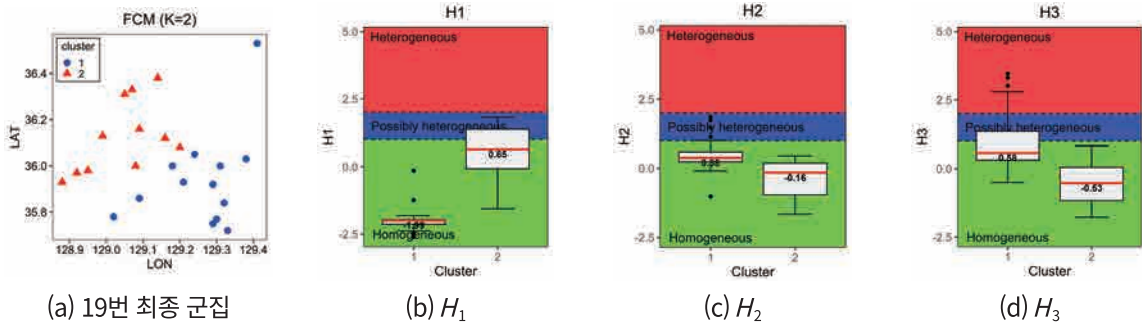


그림 4. 19번 지역 재구분 최종 군집 및 이질성 척도 결과

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  $H$ 가 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

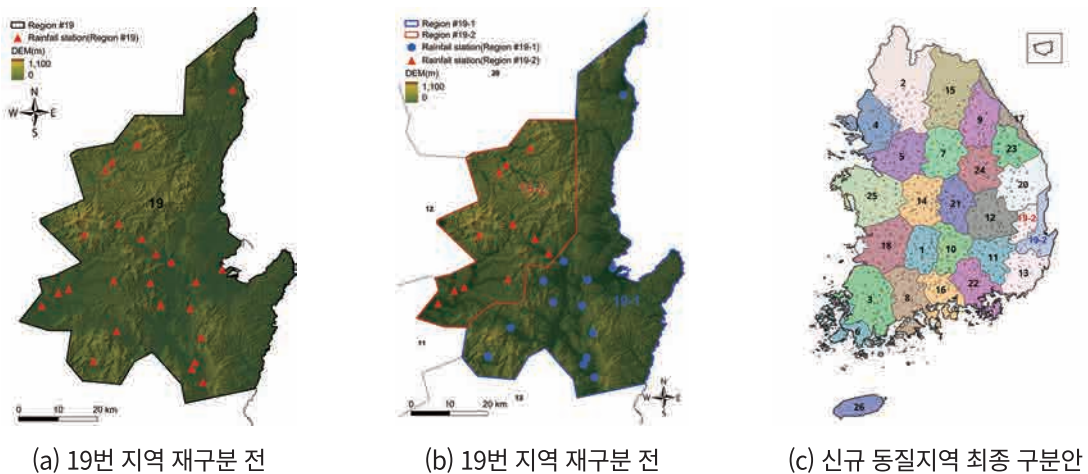


그림 5. 19번 재구분 최종 군집

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 유지

하기 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

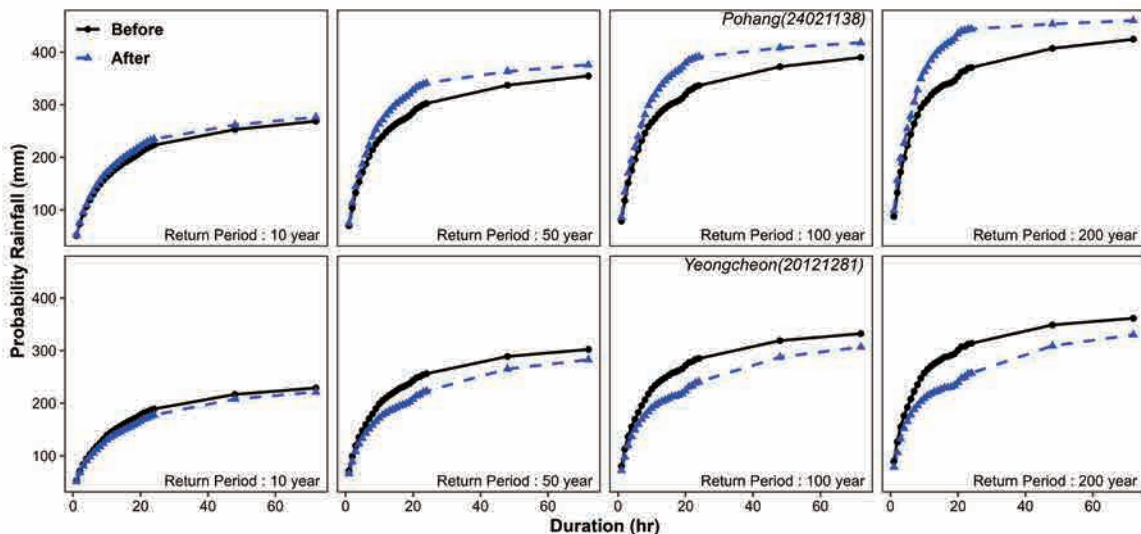
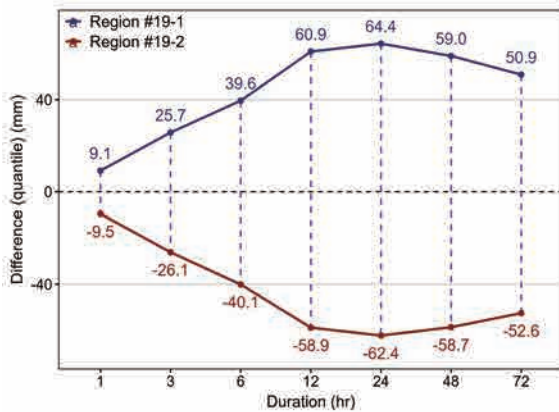


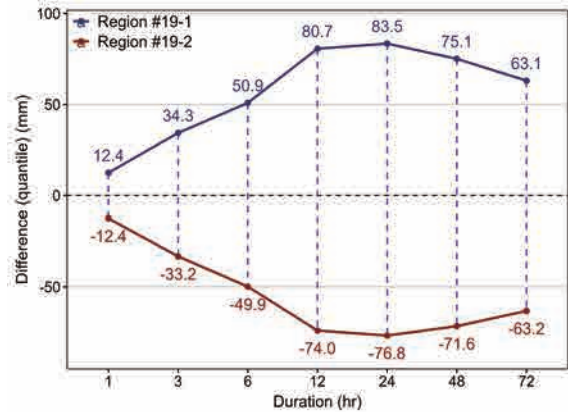
그림 6. 포항(24021138) 및 영천(20121281)의 재구분 전후 확률강우량 비교(상단 포항지점, 하단 영천지점)

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 평균하였

을 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 검

토하고 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 헌남노(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, 비정상

성을 고려한 빈도해석과 동질지역 구분 방법에 대한 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다. 이러한 관점에서 최근 제안되고 있는 비정상성 지역 빈도해석 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 진

행되었다. 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

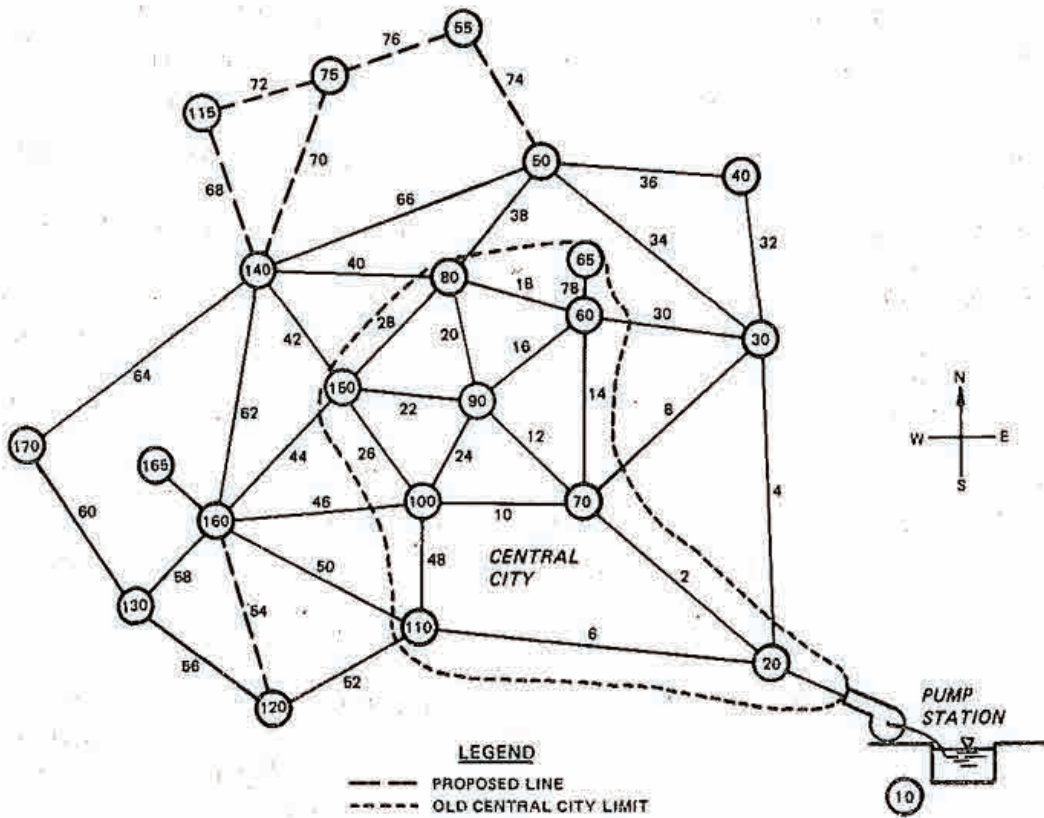


그림 1. Anytown의 상수도 관망 형태 (Walski et al., 1987)

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

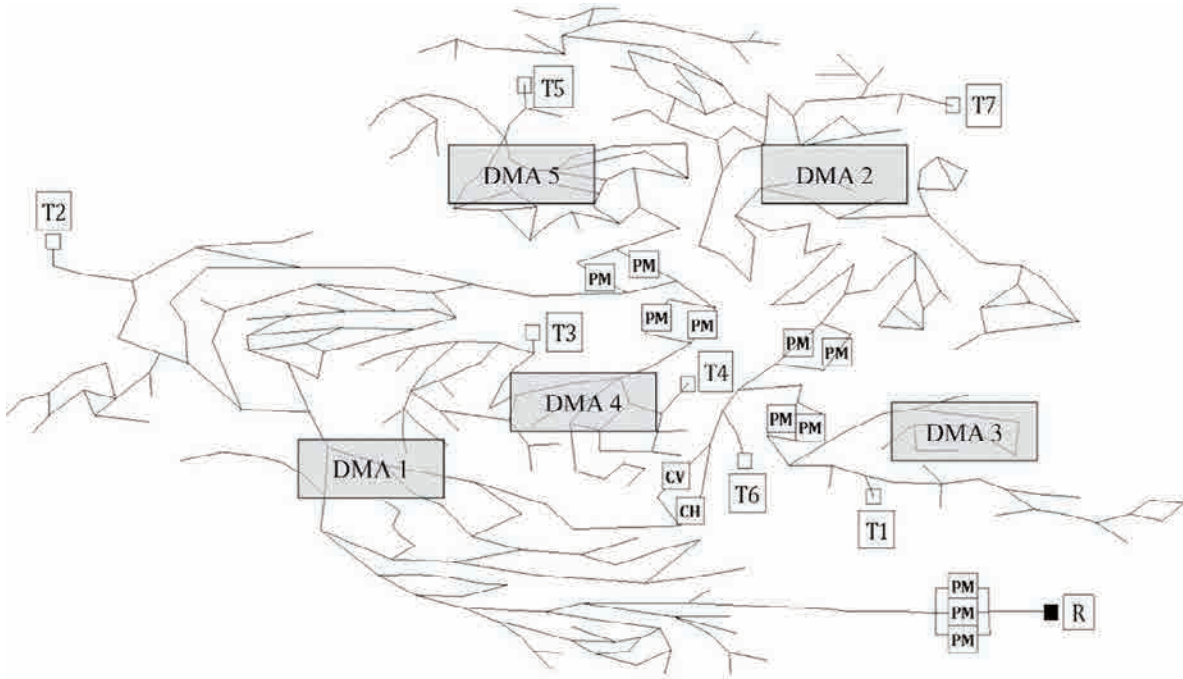


그림 2. 2014년 경쟁 세션에서 제공된 상수도 관망인 TOWN-C (Giustolisi et al., 2015)

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 복합

적 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 기후 변화와 급격한 도시화이다. 기후변화로 인한 극한 강우의 발생이 빈번하고, 도시화에 의한 불투수면 적 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 저영향개

발 (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

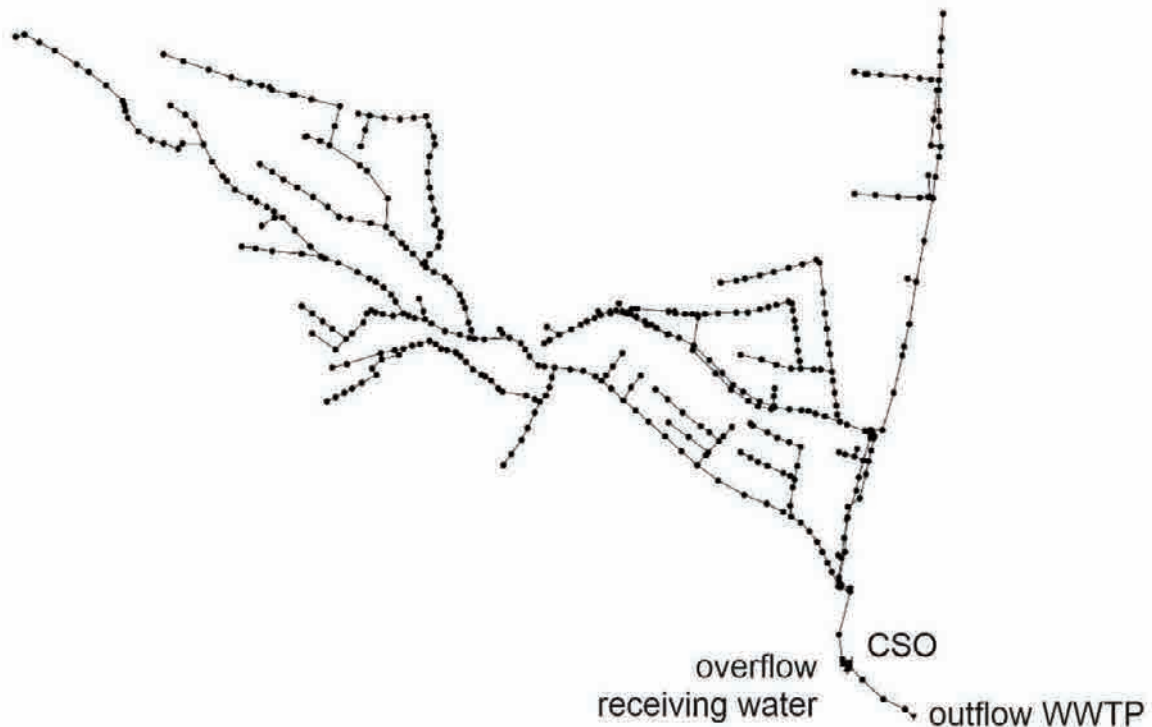


그림 4. 오스트리아 인스브루크 시의 우수관망 (Oberascher et al., 2024)

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 물

리량과 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	$Total\ Cost = \sum_{i=1}^{NS} \sum_{j=1}^{noC} (BC_i + UC_i * A_{ij})$ <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ BC: 설치 시 고정 비용</li> <li>✓ UC: 1 m<sup>2</sup>당 단위 비용</li> <li>✓ A: 저영향개발의 면적</li> </ul>
식생다양성	다양한 녹색 저영향개발 유형이 얼마나 균형 있게 적용되었는지를 판단하기 위한 항목으로, 네 가지 저영향개발 유형의 설치 면적 중 최소값	$Biodiversity = \text{Min}(\sum_{j=1}^{noC} A_{i=2,j}, \sum_{j=1}^{noC} A_{i=3,j}, \sum_{j=1}^{noC} A_{i=4,j}, \sum_{j=1}^{noC} A_{i=5,j})$ <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ A: 저영향개발의 면적</li> </ul>
홍수 저감량	저영향개발 설계 이후 총 모의 기간 동안 전체 유역에서 발생한 홍수의 저감량	$\Delta V_F = V_{F,base\ scenario} - V_{F,NBS}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ V<sub>F,base scenario</sub>: 기존 관망에서의 홍수량</li> <li>✓ V<sub>F,NBS</sub>: 저영향개발을 설치한 관망에서의 홍수량</li> </ul>
증발 증가량	도시 냉각의 효과를 반영하기 위한 항목으로, 저영향개발 설계 이후 전 유역에서 발생한 총 증발의 증가량	$\Delta E = E_{NBS} - E_{base\ scenario}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ E<sub>NBS</sub>: 저영향개발을 설치한 관망에서의 증발량</li> <li>✓ E<sub>base scenario</sub>: 기존 관망에서의 증발량</li> </ul>
하수처리장 유입 증가량	저영향개발 설계 이후 하수처리장 내 유입의 증가량	$\Delta V_{WWTP} = V_{WWTP,NBS} - V_{WWTP,base\ scenario}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ V<sub>WWTP,NBS</sub>: 저영향개발을 설치한 관망에서의 하수처리장 내 유입량</li> <li>✓ V<sub>WWTP,base scenario</sub>: 기존 관망에서의 하수처리장 내 유입량</li> </ul>
월류 저감량	저영향개발 설계 이후 합류식 하수 월류의 감소량	$\Delta V_{CSO} = V_{CSO,base\ scenario} - V_{CSO,NBS}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ V<sub>CSO,base scenario</sub>: 기존 관망에서의 합류식 하수 월류량</li> <li>✓ V<sub>CSO,NBS</sub>: 저영향개발을 설치한 관망에서의 합류식 하수 월류량</li> </ul>
수질	저영향개발 설계 이후 합류식 하수 월류를 통해 유출되는 부유물질(TSS)의 감소량	$\Delta M_{TSS} = M_{TSS,base\ scenario} - M_{TSS,NBS}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ M<sub>TSS,base scenario</sub>: 기존 관망에서 합류식 하수 월류 내 부유물질량</li> <li>✓ M<sub>TSS,NBS</sub>: 저영향개발을 설치한 관망에서의 합류식 하수 월류 내 부유물질량</li> </ul>

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	$Giving_{inflow} = \sum_{j=1}^{N_{node}} (Max. Inflow)_{ij}$ <p>✓ Max. Inflow: 절점의 최대 유량</p>	$Giving_{depth} = \sum_{j=1}^{N_{node}} (Max. Depth Ratio)_{ij}$ <p>✓ Max. Depth Ratio: 절점의 최대 수심 비율</p>
영향을 받는 정도	$Receiving_{inflow} = \sum_{i=1}^{N_{node}} (Max. Inflow)_{ij}$	$Receiving_{depth} = \sum_{i=1}^{N_{node}} (Max. Depth Ratio)_{ij}$

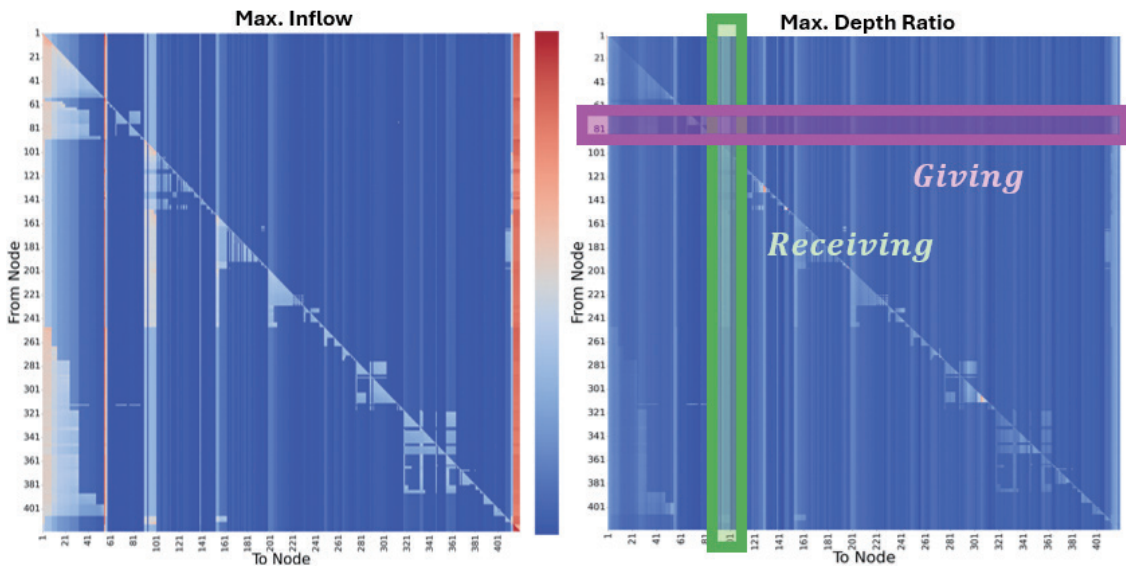


그림 5. 각 소유역의 저영향개발 설치 우선순위 산정 방법

역의 유출구가 되는 절점 수에 따른 종합 점수를 산정할 수 있다. 그리고 해당 점수를 4가지 우선 순위 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 영

향을 주는 정도를 우선순위 평가 기준으로 잡았을 때 가장 최적화된 설계가 가능하다. 20개 초과 356개 미만의 경우, 절점별 수심 비율에 영향을 주는 정도, 356개 초과인 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

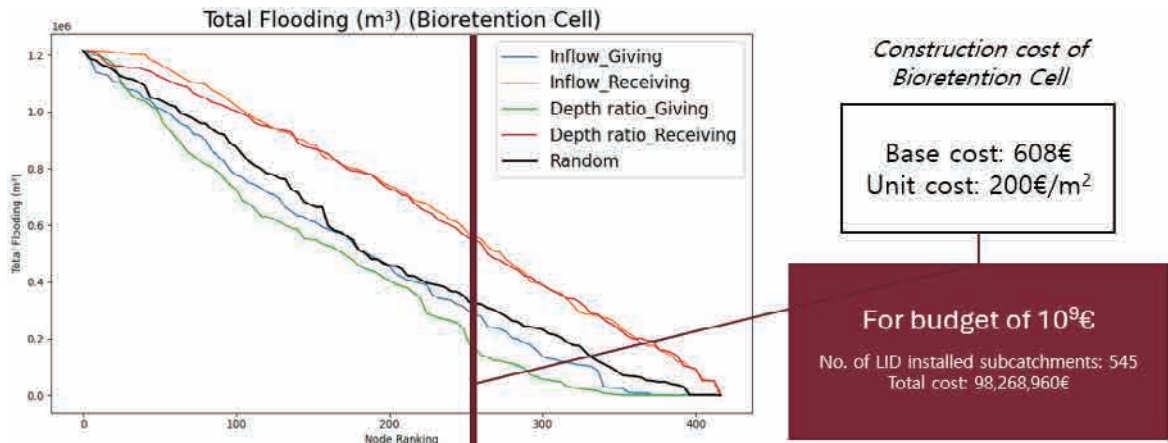


그림 6. 우선순위에 따른 저영향개발 설치 시 홍수의 저감 효과 분석

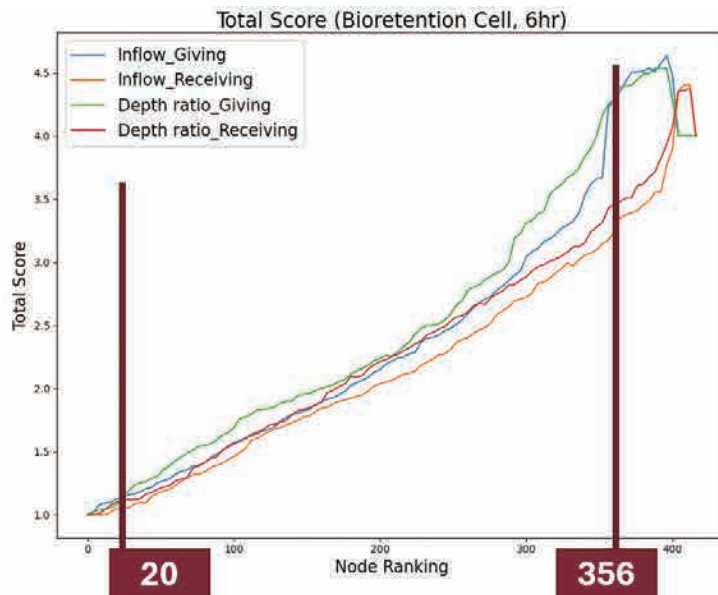


그림 7. Bio Retention System의 설계 결과

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 집약적

으로 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\(191\)](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\(556\)](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](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](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](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](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000969)

Saldarriaga, J., Bohorquez, J., Celeita, D., Vega, L., Paez, D., Savic, D., Dandy, G., Fillion, 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](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001035)

Paez, D., Fillion, 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](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](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., & Sitzenfren, 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://wdsaccwi2022.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

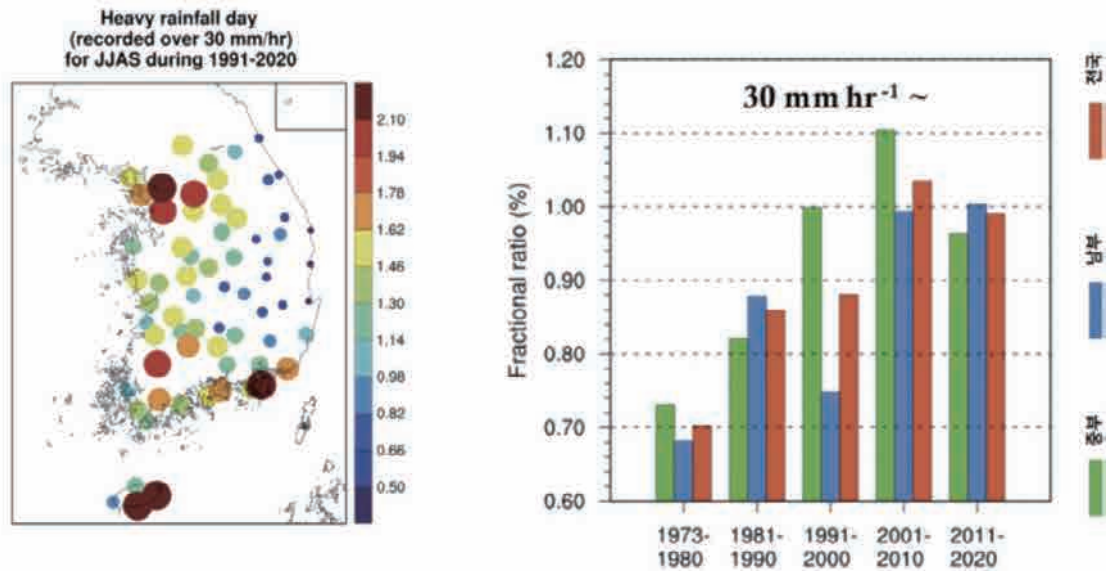
## 1. 서론

### 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 발생 빈도가 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 침

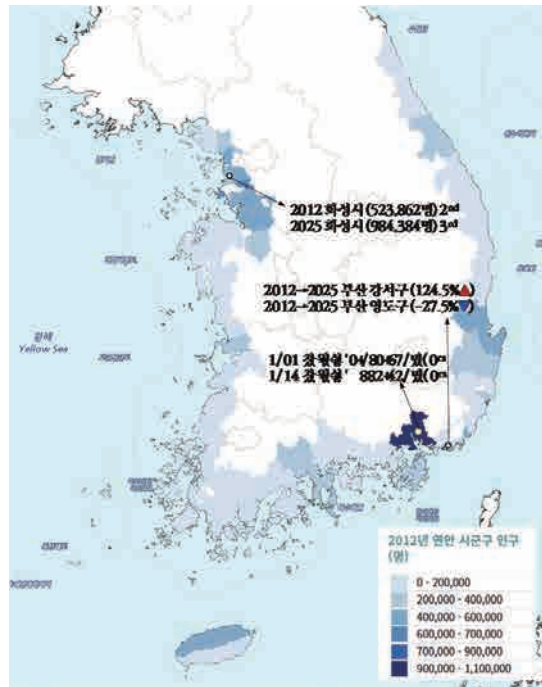
수 저감 효과를 정량적으로 평가할 수 있는 체계를 제안하고자 한다. 특히 머신러닝 기법을 활용하여 부산광역시를 대상으로 침수 리스크 평가 체계를 구축하고, 그린인프라 도입 시의 리스크 감소율을 분석한 사례를 상세히 소개하고자 한다.

## 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.

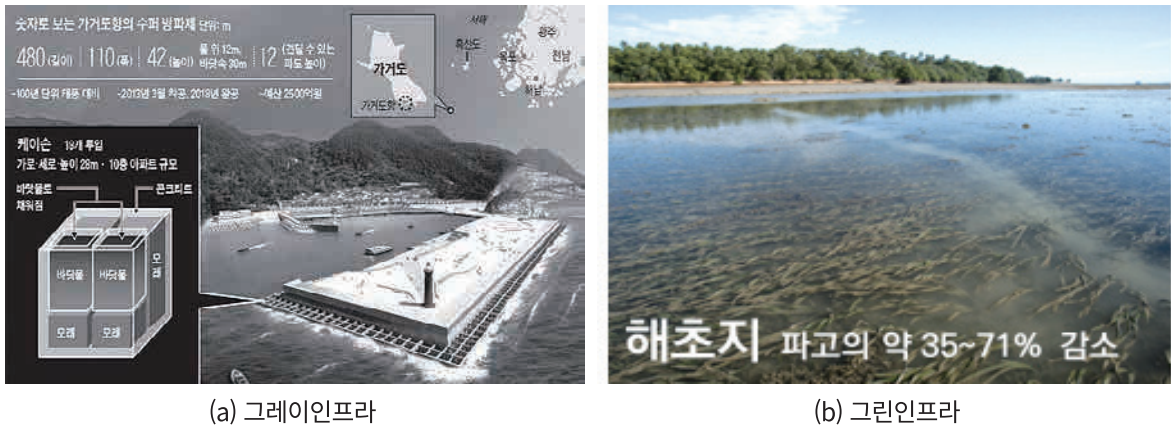
그림 2. 연안도시 행정별 인구수

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 확률

을 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 전

면에 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, 열섬 현상 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, 해안 숲 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\$/m<sup>2</sup>)와 굴초(135.63\$/m<sup>2</sup>) 복

원은 고비용 구조적 방어 효과를 제공하는 반면, 염습지(1.11\$/m<sup>2</sup>)와 맹그로브(0.1\$/m<sup>2</sup>)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

NATURAL AND NATURE-BASED FEATURES AT A GLANCE				
				
<b>Dunes and Beaches</b>	<b>Vegetated Features (e.g., Marshes)</b>	<b>Oyster and Coral Reefs</b>	<b>Barrier Islands</b>	<b>Maritime Forests/Shrub Communities</b>
<b>Benefits/Processes</b> Breaking of offshore waves Attenuation of wave energy Slow inland water transfer	<b>Benefits/Processes</b> Breaking of offshore waves Attenuation of wave energy Slow inland water transfer Increased infiltration	<b>Benefits/Processes</b> Breaking of offshore waves Attenuation of wave energy Slow inland water transfer	<b>Benefits/Processes</b> Wave attenuation and/or dissipation Sediment stabilization	<b>Benefits/Processes</b> Wave attenuation and/or dissipation Shoreline erosion stabilization Soil retention
<b>Performance Factors</b> Berm height and width Beach slope Sediment grain size and supply Dune height, crest, and width Presence of vegetation	<b>Performance Factors</b> Marsh, wetland, or SAV elevation and continuity Vegetation type and density Spatial extent	<b>Performance Factors</b> Reef width, elevation, and roughness	<b>Performance Factors</b> Island elevation, length, and width Land cover Breach susceptibility Proximity to mainland shore	<b>Performance Factors</b> Vegetation height and density Forest dimension Sediment composition Platform elevation
<small>General coastal risk reduction performance factors include: Storm surge and wave height/period, and water levels</small>				

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(연안 재해 취약성 평가체계)를 각 방법의 특징, 평가 방법론, 장·단점 및 개선방안 등을 조사하였고, 선행 연구 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 높음

을 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 도시 지역 비율, 경사도, 고도, 조위, 강수량 순으로 나타나 지형적 요인과 수문기상학적 요인이 복합적

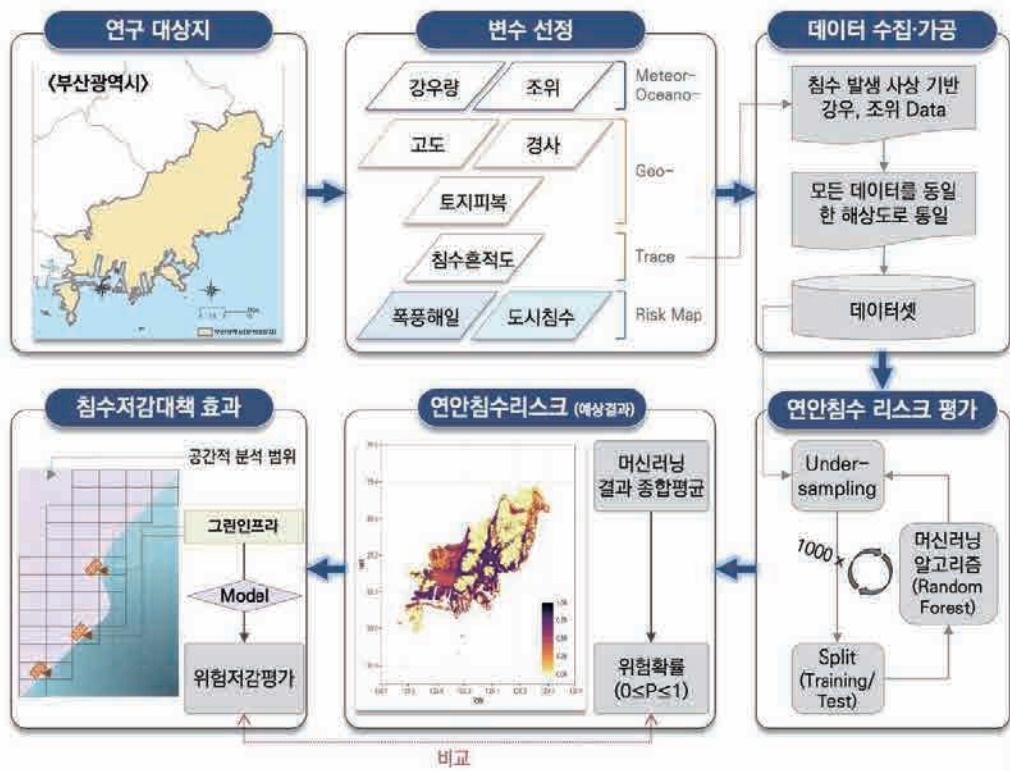


그림 6. 머신러닝 기법을 활용한 연안침수 리스크 평가체계 흐름도

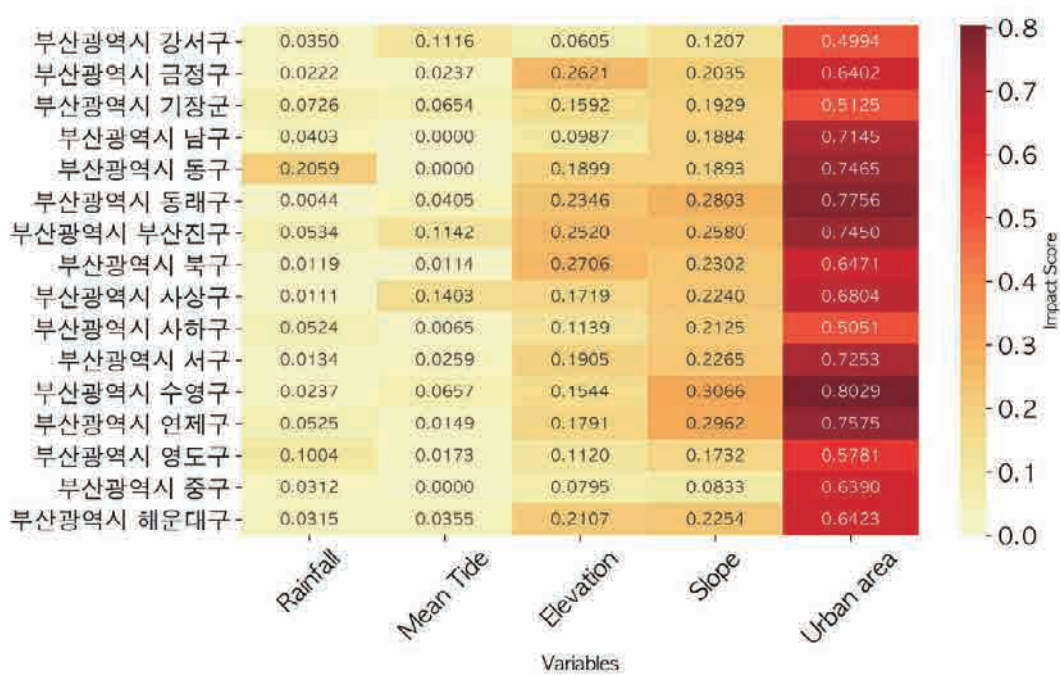


그림 7. 시군구별 리스크 분석에 사용된 변수들의 영향도(influence)

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 수단일 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’

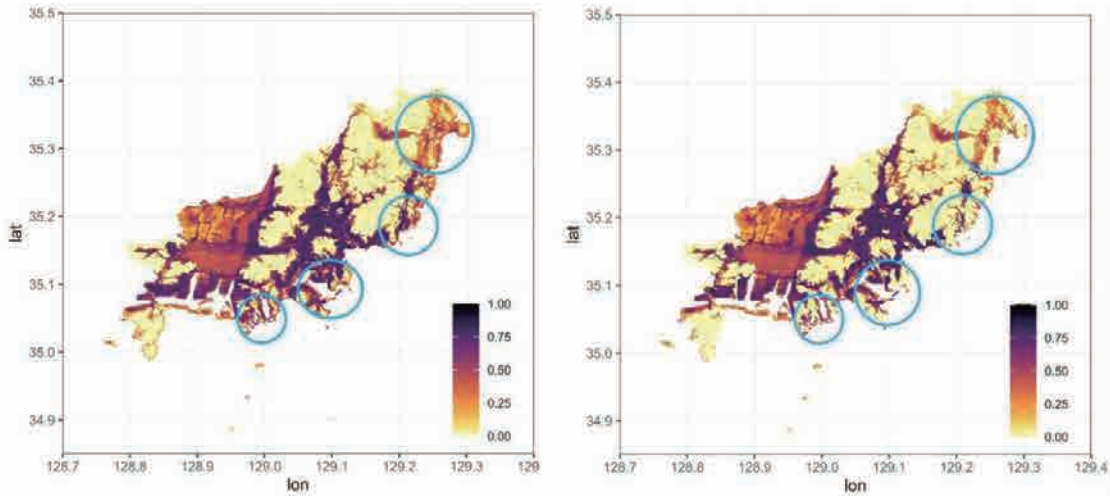


그림 4. 연안 침수리스크 분석 결과(왼쪽: 그린인프라 미적용, 오른쪽: 그린인프라 적용)

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 재설정 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 동인을 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



한정우

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 발생하는 것 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 상호연계로서 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 (Miralles 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 침투 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 연구논문에서 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 웨이블릿 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 사용하였

다. 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.

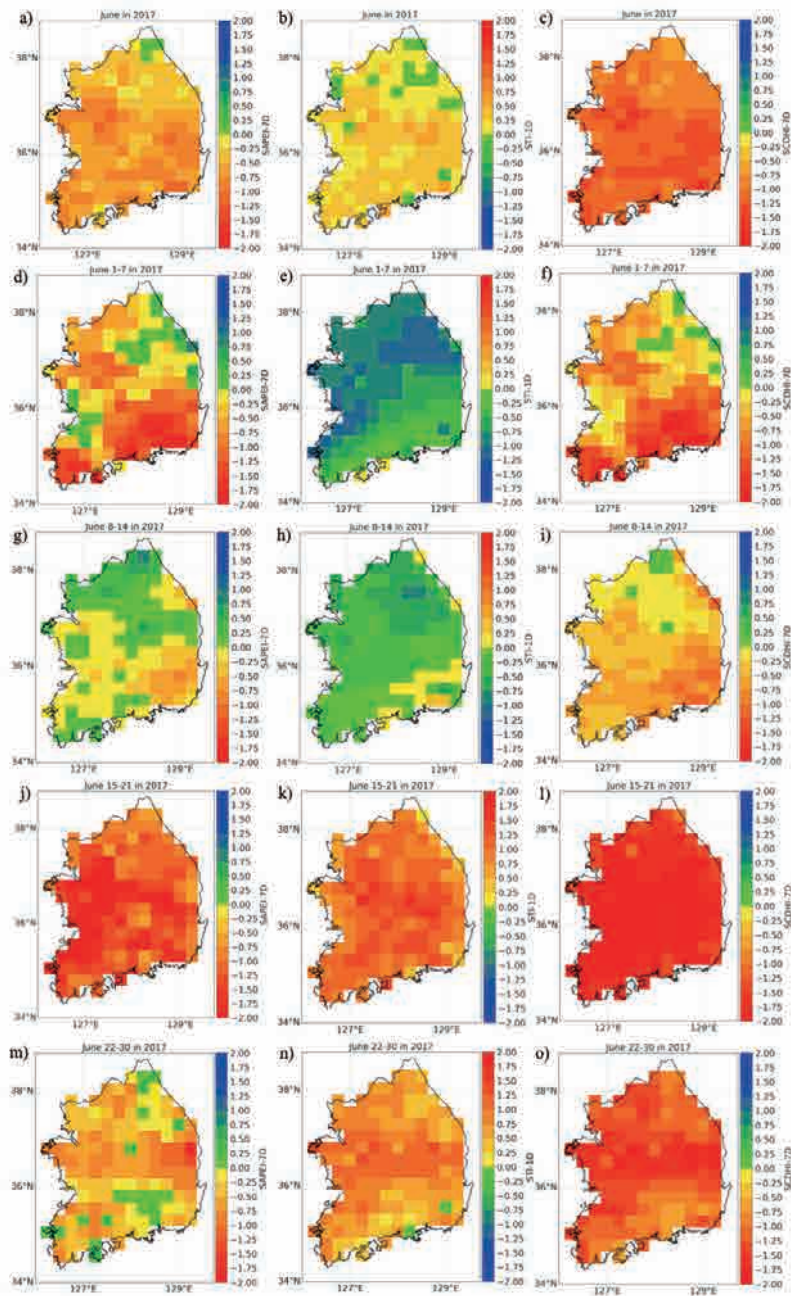


그림 1. 2017년 6월 사례에 대한 가뭄(SAPEI-7D), 폭염(STI-1D), 복합 가뭄-폭염(SCDHI-7D) 지수의 주차별 모니터링. 위에서 첫번째 열은 가뭄, 폭염, 복합지수의 6월 평균값을 나타내며, 둘째 열부터 각 주차별 평균값을 나타냄. 붉은색으로 갈수록 가뭄, 폭염, CDH가 심해짐을 나타냄

### 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 겐벨 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 첫째 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

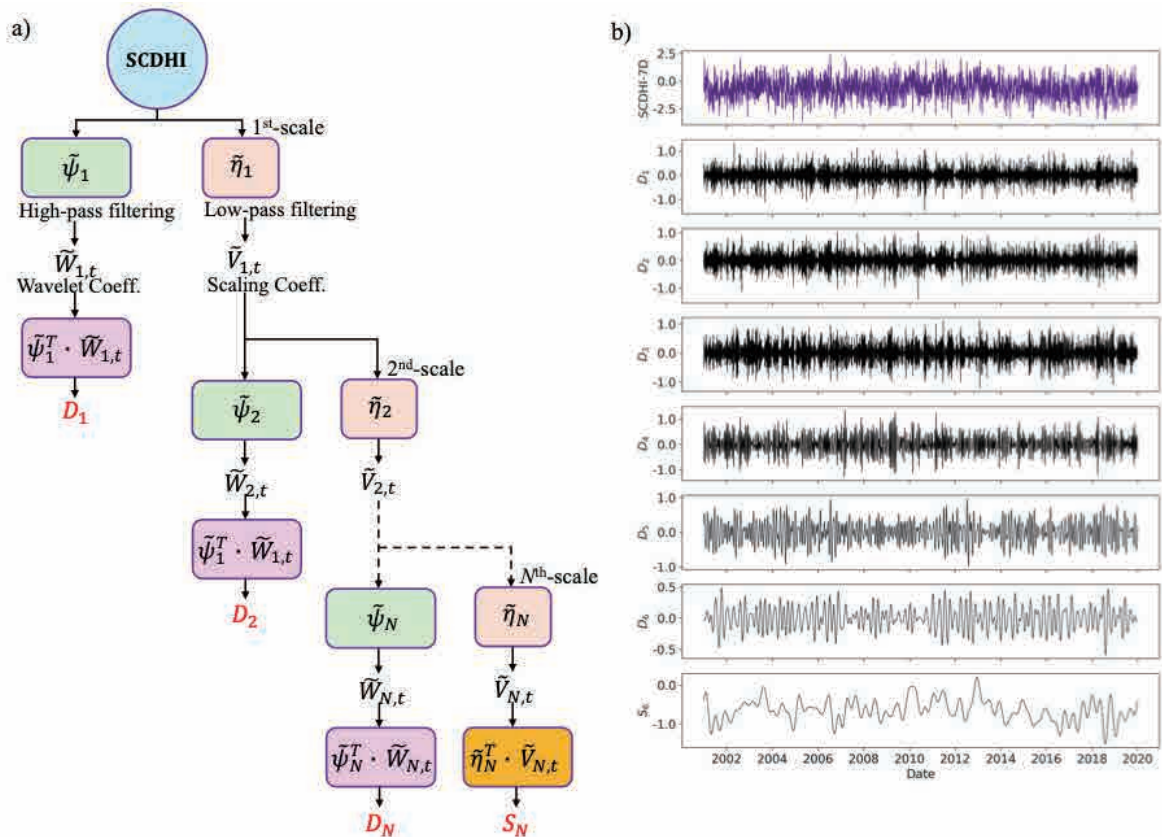


그림 2. a) MODWT 개념도, b) 샘플 지점의 SCDHI-7D를 db20과 6개의 분해수준을 가지는 MODWT를 이용하여 분해한 결과

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

### 2.2.1 최대 중첩 이산형 웨이블릿 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 웨이블릿(mother wavelet)과 분해 수준(level of decomposition, 몇 개의 하위 시계열로 분해할 것인가)을 정해야 한다. 필자는 모 웨이블릿으로 필터 길이 20을 가지는 도브시 웨이블릿(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(principle of maximum entropy)'에 기반하여, 관측된 정보의

자기상관(autocorrelation)을 만족하면서 엔트로피를 최대화하는 스펙트럼 밀도 함수를 추정한다 (Burg, 1975; Han & Singh, 2023).

BESA는 스펙트럼 밀도 함수와 자기상관이 Wiener-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 성능 검증을 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 예측 시간별로 나타내며, 파란실선과 붉은색 점은 각각

중앙값과 평균을 나타낸다. 선행 예측시간이 길어 질수록 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 평가 기간을 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.

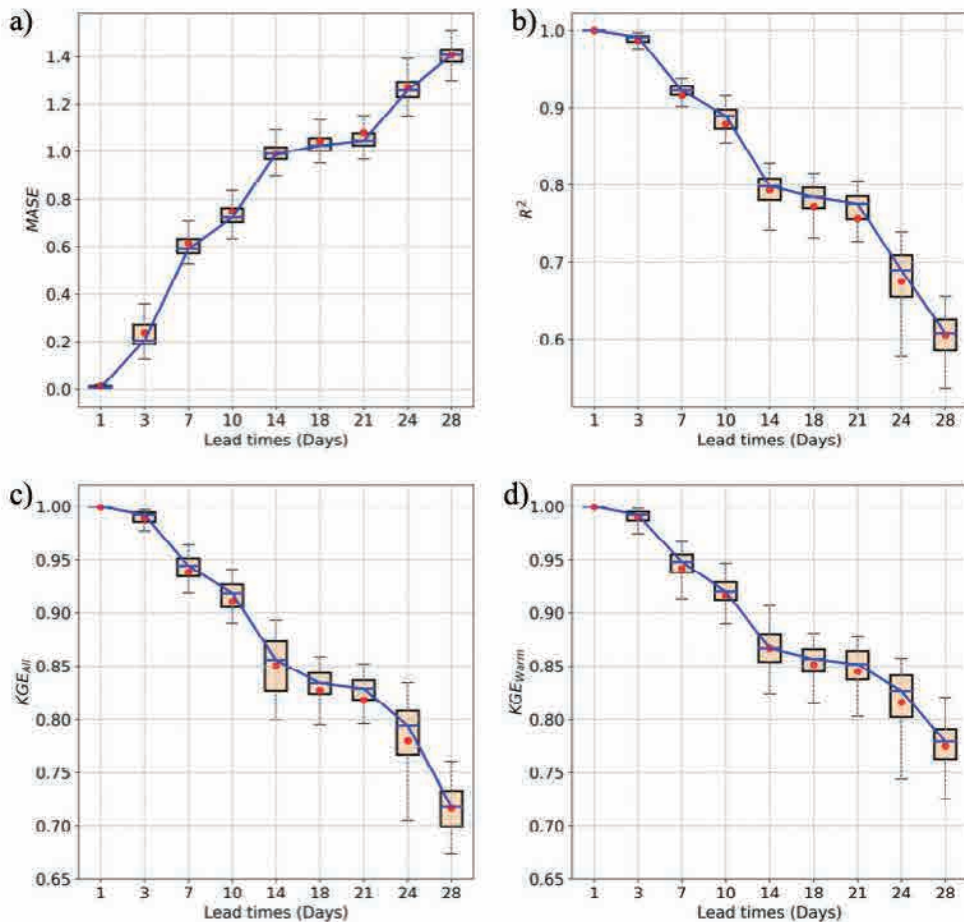


그림 3. 각기 다른 선행 예측시간(1일~28일)에서 예측성능( $MASE$ ,  $R^2$ ,  $KGE$ )의 변화

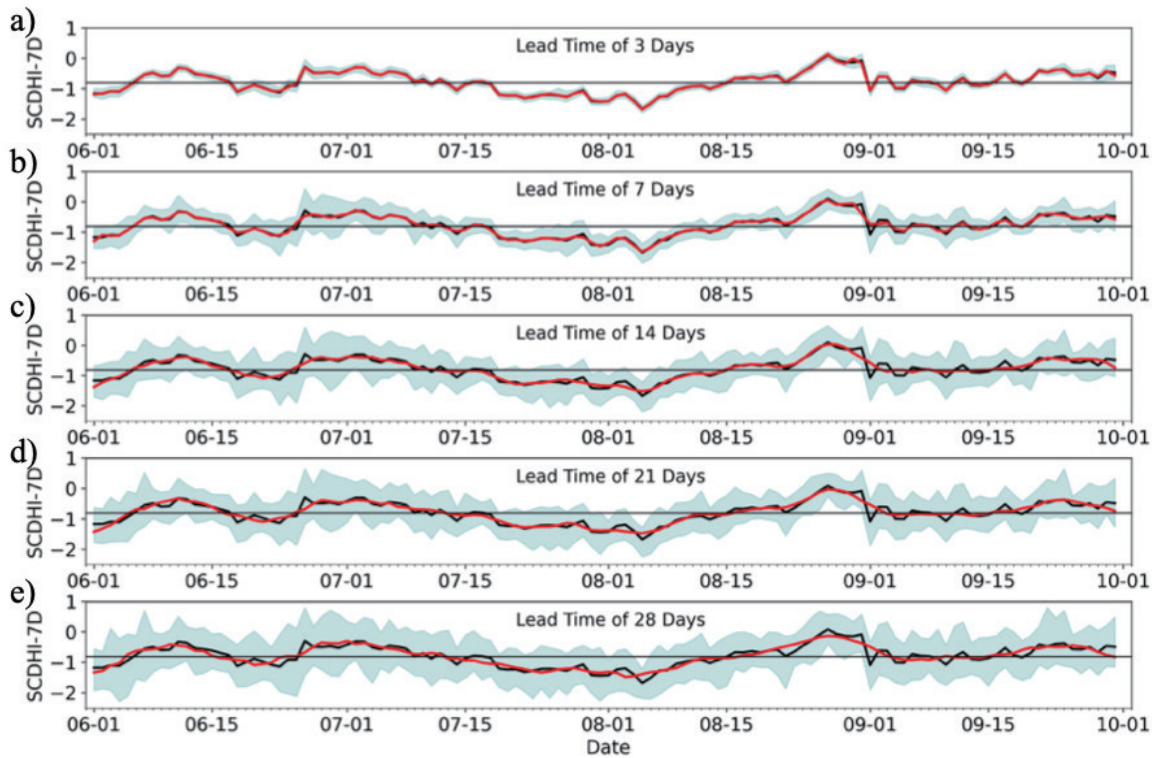


그림 4. 선행 예측시간별 남한 전역에서 검증기간 동안 예측된 SCDHI-7D를 평균한 값(붉은 실선)과 관측값의 평균(검은 실선)의 비교

### 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  $R^2$ 와  $KGE_{All}$  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(randomness)이 큰 지역]이 예측 정확도가 낮은 지역과 일치하는 경향을 보였다.

### 3.3 딥러닝 및 기계학습 모델과의 비교

제안된 BESA 모델의 성능을 객관적으로 평가

하기 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

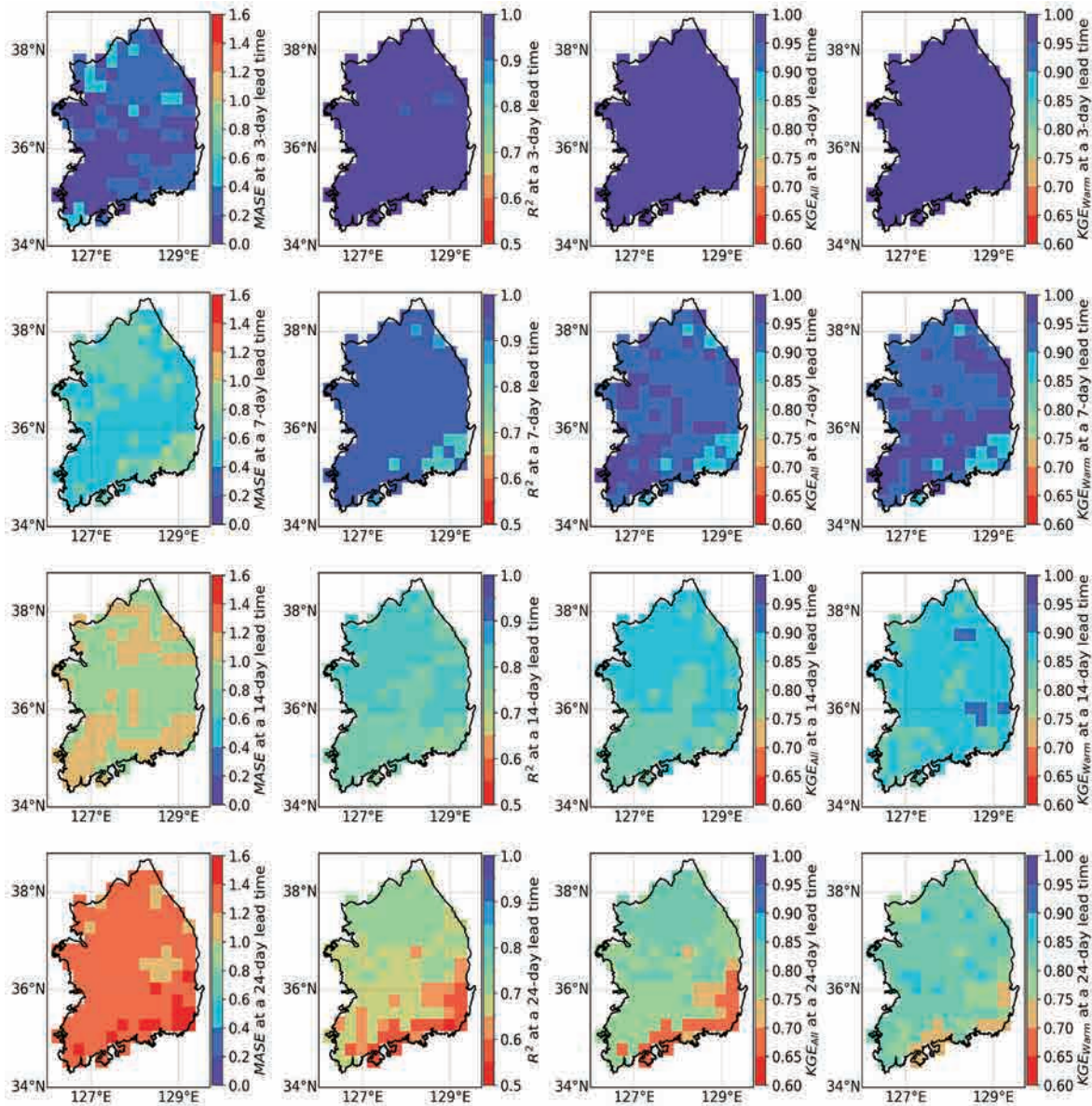


그림 5. 선행 예측시간별 예측성능의 지역적 변화

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 예측 기술을 소개하였다. 기후변화로 인해 복합 가뭄-폭염(CDH)의 발생 빈도가 급증하는 상황에서, 본 기사에서 소개한 7일 누가 표준 복합 가뭄-폭염 지

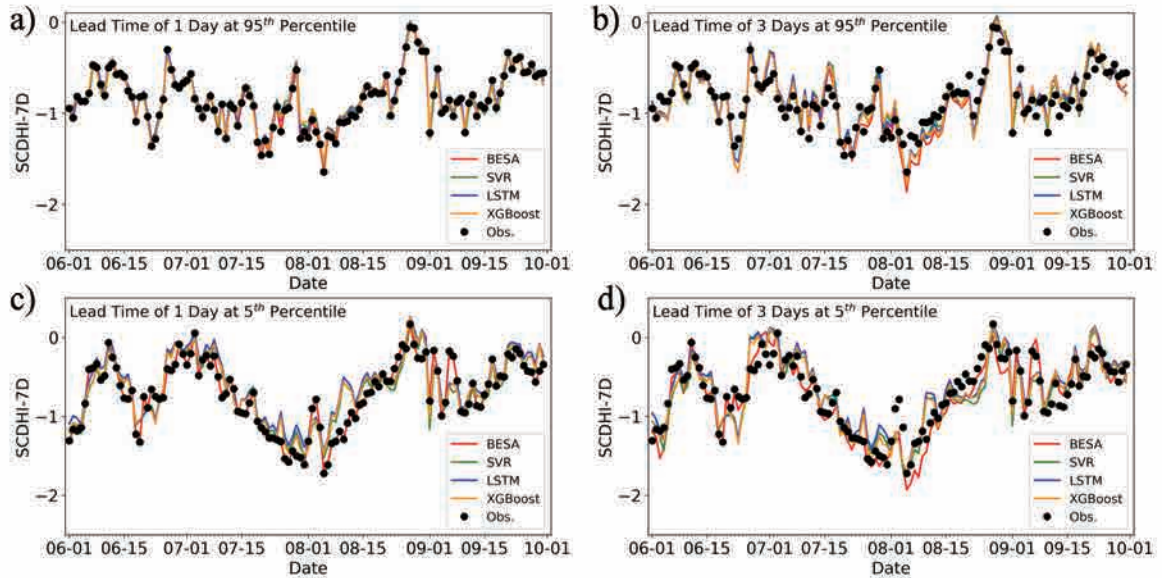


그림 6.  $KGE_{All}$ 의 95번째 백분위수 이상과 5번째 백분위수 이하의 값을 갖는 지점들 중 각 백분위수 범주에서 임의로 선정한 지점에서 BESA와 벤치마크 모델(LSTM, SVR, XGBoost)의 예측 성능 비교. a)와 c)는 1일 선행 예측 시, b)와 d)는 3일 선행 예측 시의 결과를 보여줌

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 장기에측 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.