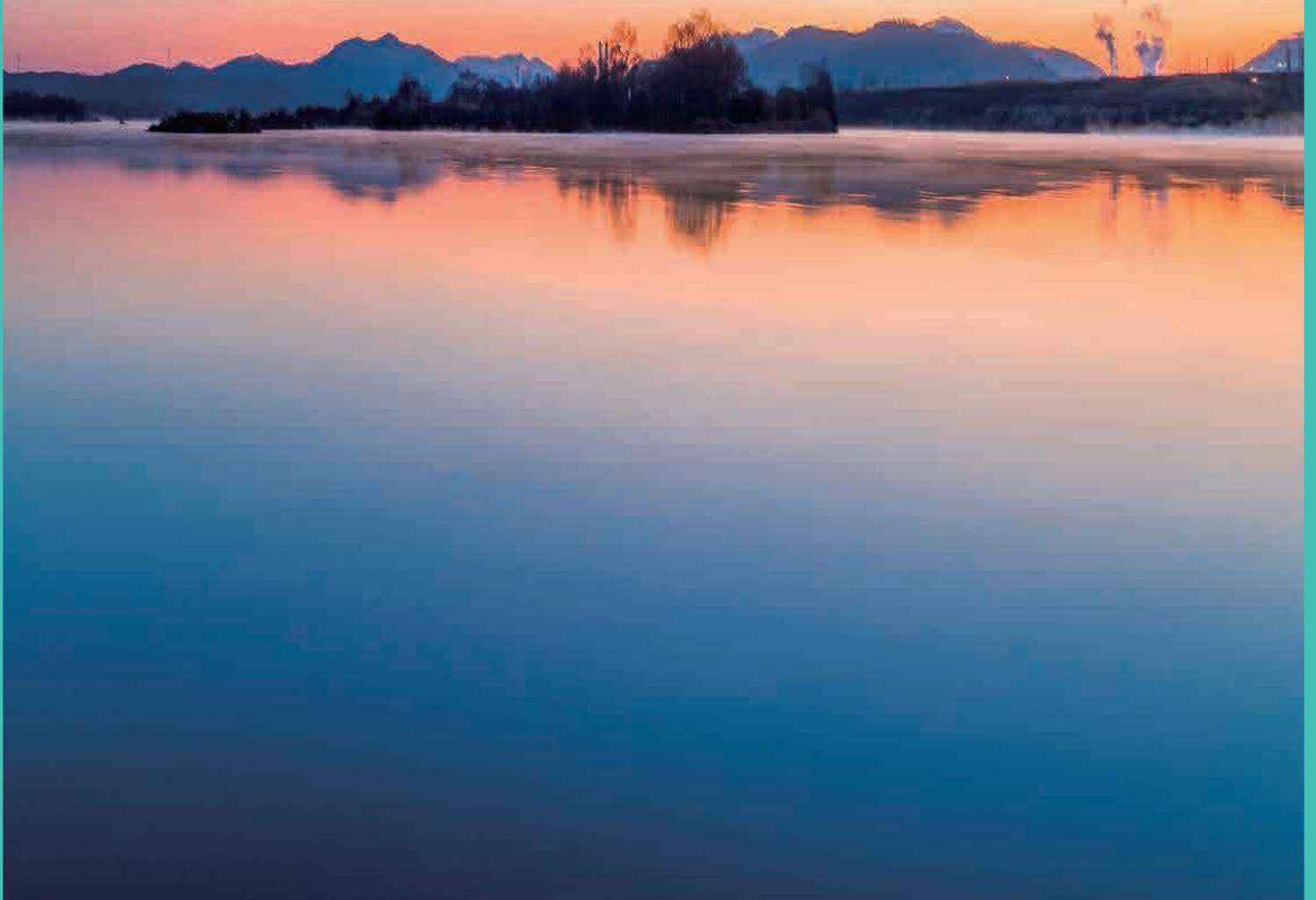


Korea Water Resources Association



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



김병식

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



이영미

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 자연 재난은 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 살펴보

았으며 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.

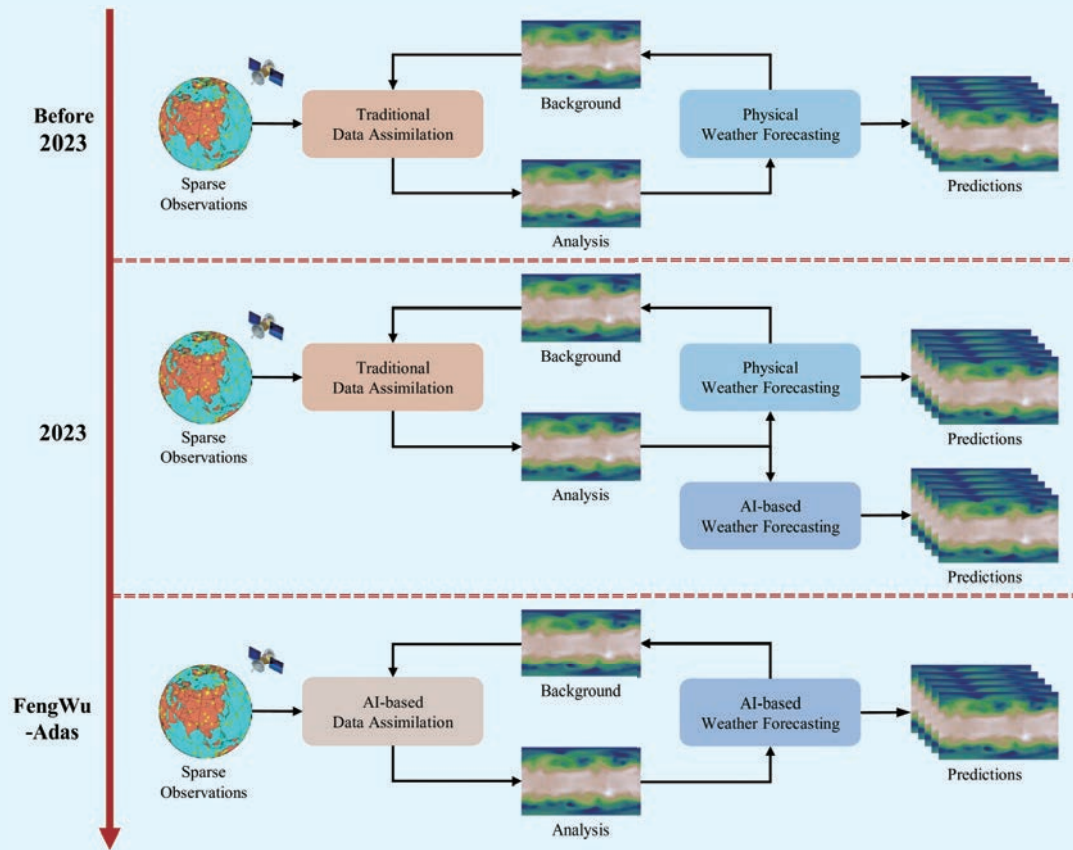


그림 2. AI in 기상예측의 변화 (출처: Chen, Kun et al. (2023))

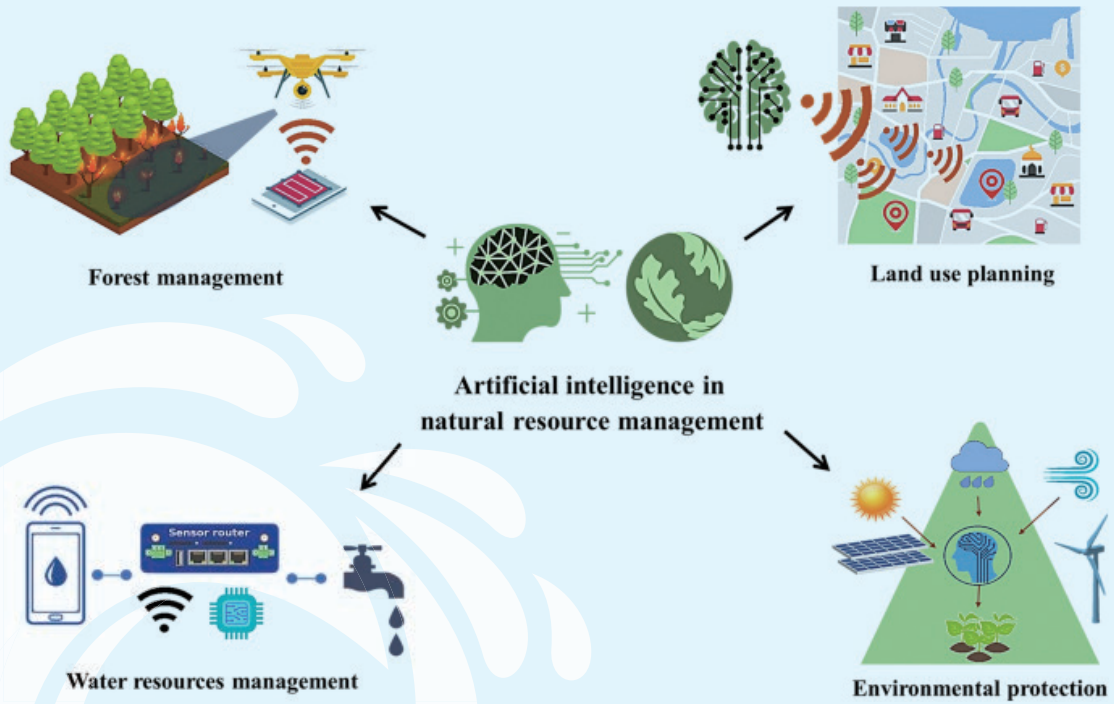


그림 3. 국지 관측자료와 AI 기술의 융합(출처: Chen, Lin, et al. (2023))

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 향상시킬 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 보완할 수 있다. 예를 들어 산불 피해 평가 보고서를 분석하면 화재 피해와 지형, 식생, 기후 변수 간의 연관성을 보여주는 패턴을 밝혀낼 수 있으며, 인공지능을 결

합한 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))

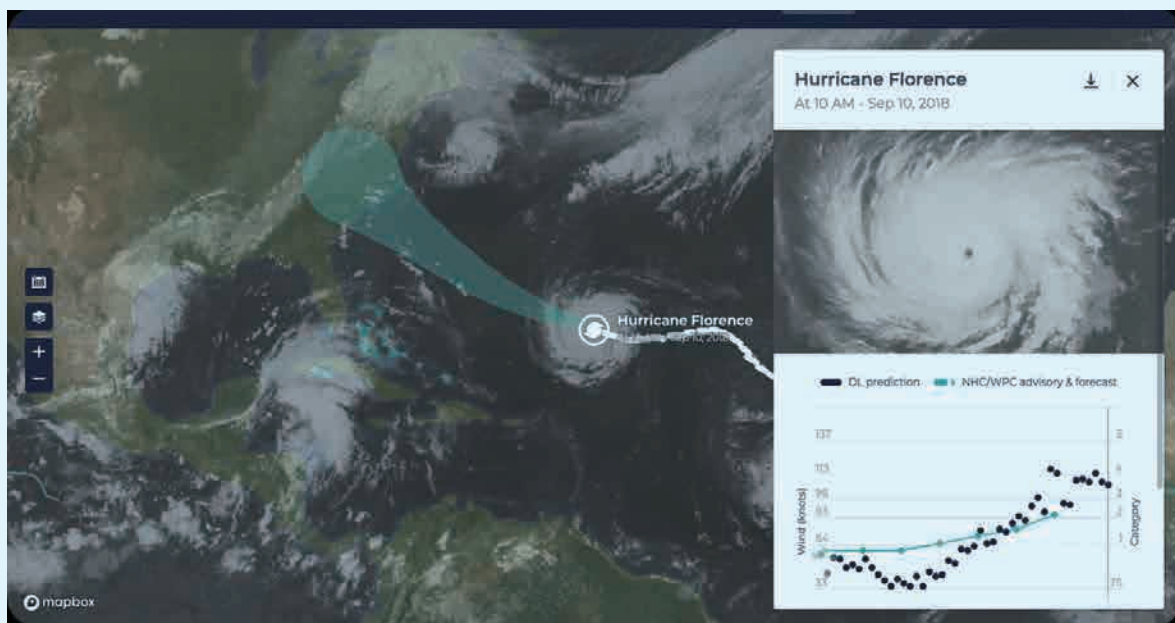


그림 5. Monitoring and Tracking Hurricane Florence Using Deep Learning(출처 : ultralytics.com)

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 조치를 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 조치를 하고 있다. 구글의 홍수 예보 도구인 Flood Hub는 현재 80개국에서 7일 전 예보를 제공하며 4억 6천만 명에 달하는 사람들을 보호하고 있다. CNN과 같은 인공지능망(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 비상 사태, 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, 지역 사회를 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 미

디어 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 기계 학습 기술을 통해 텍스트를 자동으로 분류하여 의사 결정에 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, 자연 재해·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. 열

화상 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 가속화하는데 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 전

문지식의 ‘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 최소화하는데 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=rxyyn2nlfU>

미래 AGI시대가 가져올 수자원 분야의 변화



박진혁

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 초 중반에는 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 결측 보정, 수질 이상 징후 탐지와 같은 작업은 이미 AI를

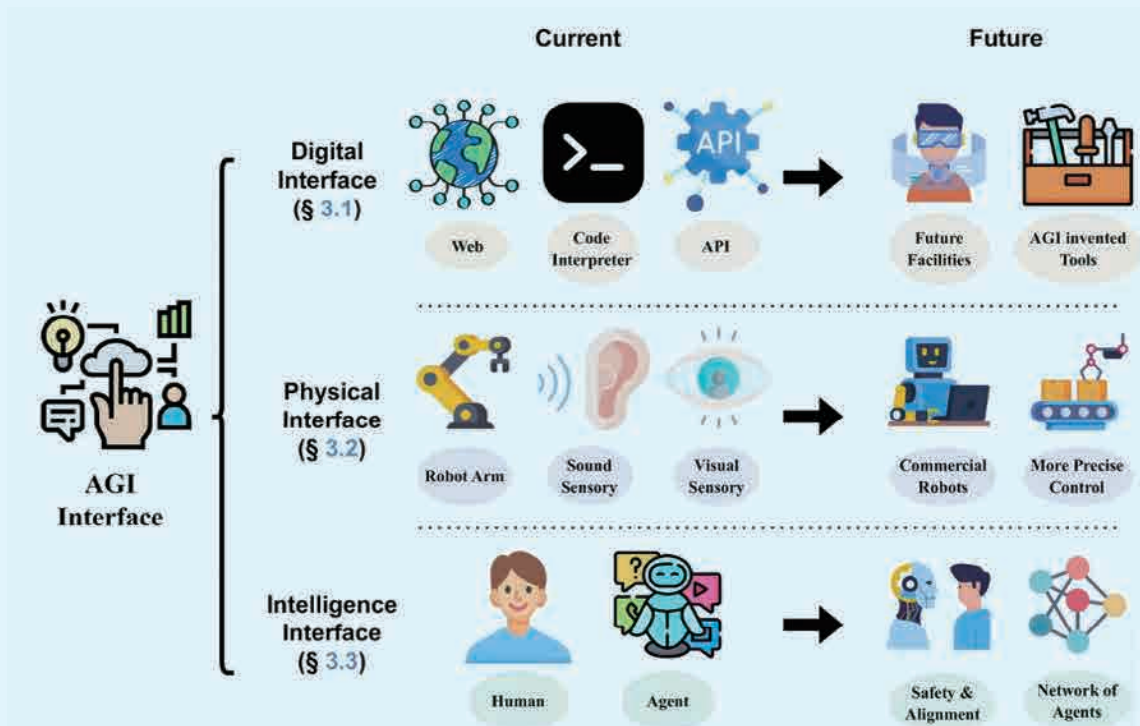


그림 1. 현수준에서 AGI 작동 원리(디지털, 물리적 및 지능기반 인터페이스, Ultraytics 홈페이지)



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 단

순히 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 일

론 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.

Ultralytics 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 과급력은 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 선형 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.

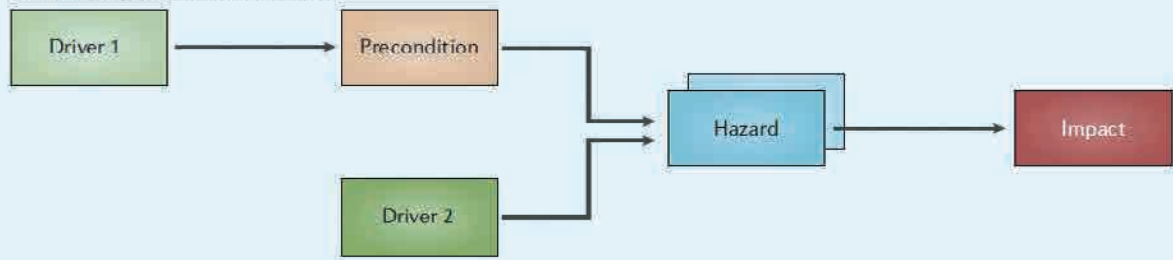
셋째, ‘시간적 연속성 복합재해(Temporally compounding events)’는 동일 지역에서 여러 재해가 짧은 시차를 두고 연쇄적으로 발생하는 유형이다. 극심한 가뭄 직후에 홍수가 발생하거나 그 반대의 상황이

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. 기후 변화의 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.

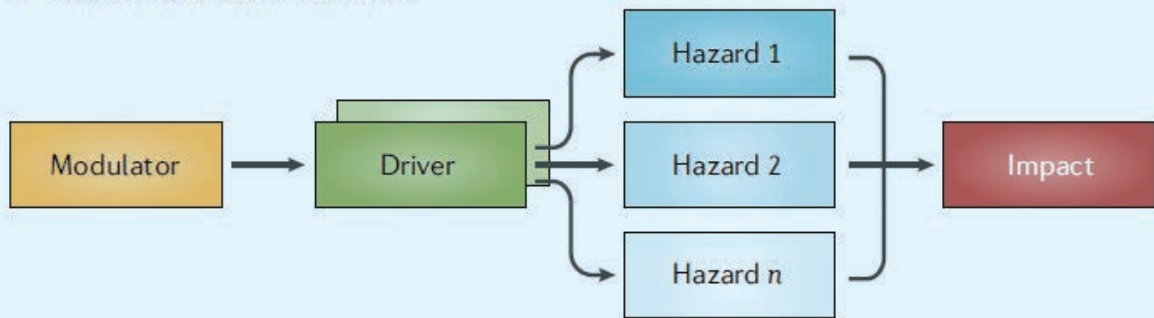
나아가 복합재해는 그 유형의 다양성과 발생 양상의 지역적 편차로 인해 명확한 발생 기작(mechanism)을 규명하는 데 큰 어려움이 따른다. 일례로 특정 지역에서 발생한 극한 기상 현상은 해당 지역의 국지적 조건뿐만 아니라, 수천 킬로미터 떨어진 원거리의 기후 변동성(climate variability)에 의해 촉발될 수도 있다. 이는 복합재해를 위시한 극한 자연재해가 본질적으로 전 지구적 규모의 대기-지표-해양(Atmosphere-Land-Ocean) 시스템 간의 복잡한 상호작용

a Preconditioned event overview



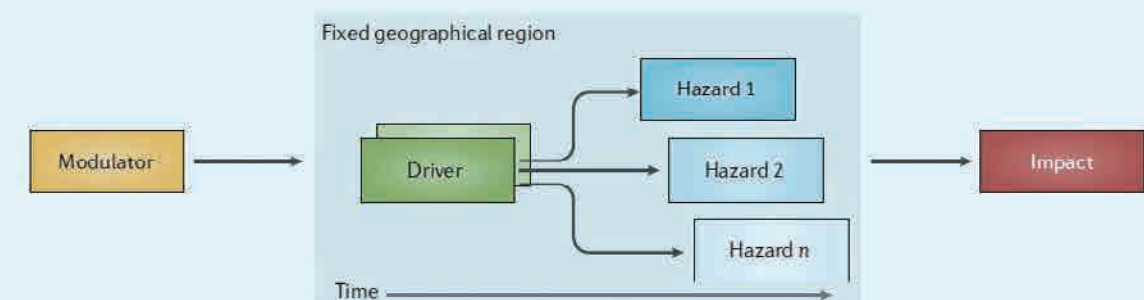
Type 1: 선행 조건을 갖춘 복합재해

a Multivariate event overview



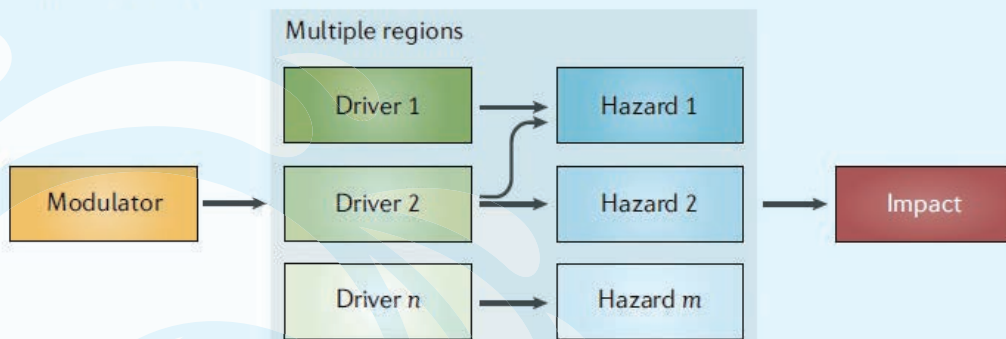
Type 2: 동시 발생 복합재해

a Temporally compounding overview



Type 3: 시간 지연 복합재해

a Spatially compounding overview



Type 4: 원격 결합 복합재해

그림 1. Zscheischler et al. (2020)의 네 가지 복합재해 유형. Modulator는 기후시스템의 변동성이며 Driver를 구성함, 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 확률 모델링을 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).

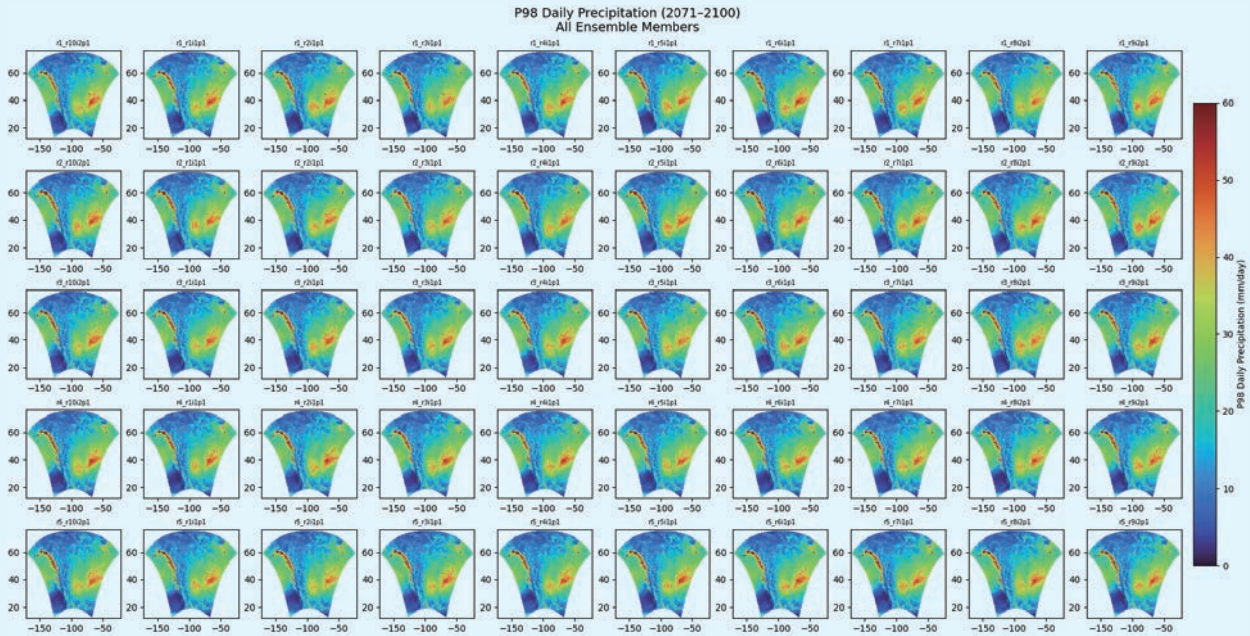


그림 2. CanLEAD 단일모델 대규모 기후양상물에서 생산된 북아메리카 지역의 2071-2100년 상위 98% 일 강수량 분포

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).

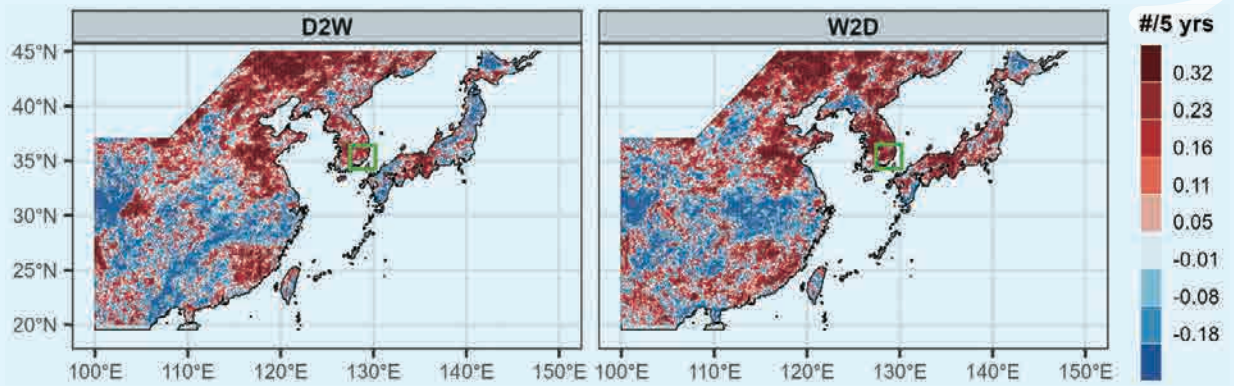
이와 관련하여 Lee et al. (2025)은 동아시아 지역을 대상으로 과거부터 최근까지 복합 수재해의 발생 특성 및 시공간적 변화를 분석하였다. 해당 연구에서는 유럽중기예보센터(ECMWF)에서 제공하는 9km 공간 해상도의 기후 재분석 자료인 ERA5-Land를 활용하였다. 구체적으로는 기온, 강수량, 토양수분 데이터를 비모수적(non-parametric) 방식으로 결합하여 지표면의 물 부족 및 수자원 확보 상태를 정량화하였다. 연구진은 가뭄에서 홍수(Drought-to-Wet, D2W), 혹은 홍수에서 가뭄(Wet-to-Drought, 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

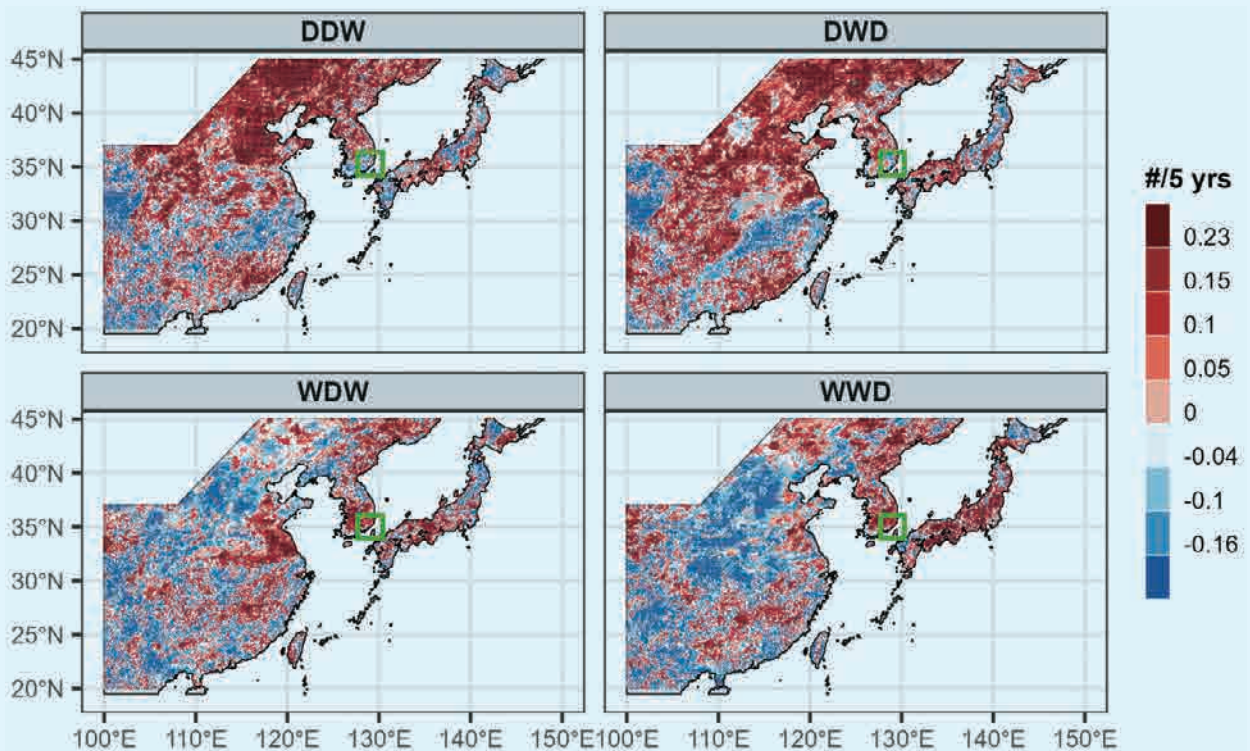
렷하게 증가하는 추세를 보였다. 제시된 <그림 3>에서 우리나라 대부분의 지역이 붉은색 계열로 나타나는 것은 복합 수재해 발생 빈도의 유의미한 증가 경향을 방증한다. 특히 경상남도 지역의 경우, 가뭄 후 홍수(D2W), 홍수 후 가뭄(W2D), 홍수-가뭄-홍수(WDW), 홍수-홍수-가뭄(WWD) 등 다중 전이 형태

의 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.

뭍-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 건조

에서 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),

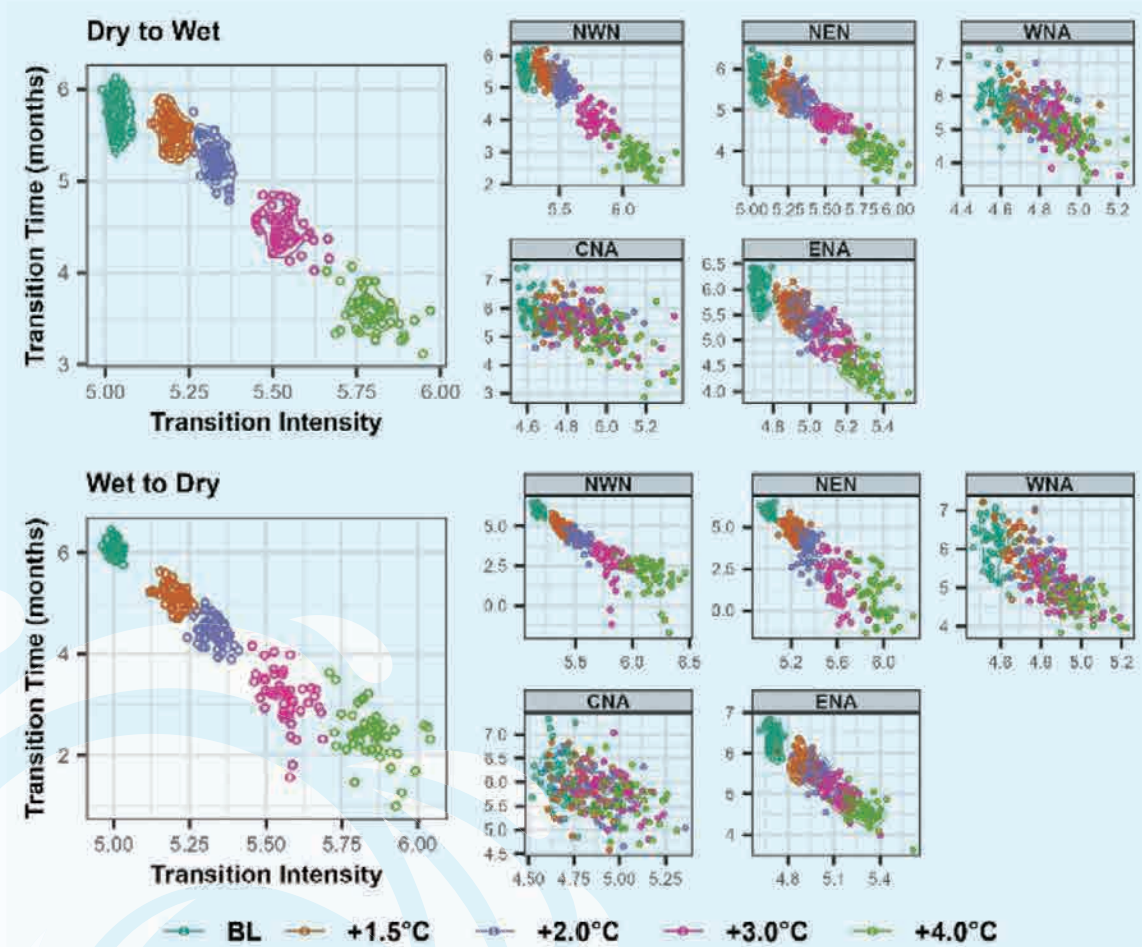


그림 4. Na and Najafi (2024)에서 확인한 북아메리카 지역의 다양한 온난화 수준(+1.5, +2.0, +3.0, +4.0°C)에 따른 전환 시간, 변동 강도의 변화. 산점에서 점들이 좌상단에서 우하단으로 이동할수록 건조(습윤)→습윤(건조) 전이가 매우 빠르고 강력하게 일어남을 의미함.

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 수문 조건에 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. 앞친 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
rnjstnsg90@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. 길

거리를 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

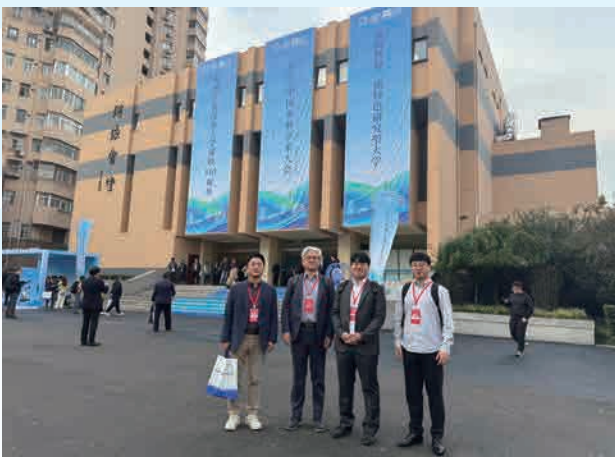


그림 1. 학술발표회장 외부(좌) 및 내부(우)

- (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 유사 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 관련 학술지 발전계획
- (25) 국제교류 및 일대일로(Belt and Road) 위의 25개 세션 중에서 (1)과 (2)는 주로 디지털 기

술을 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 인제교류 사업으로 중국과 이집트, 모로코 등의 아프리카 북부에 위치한 국가들과의 인재 교류 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 둘러 식

사하고 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. 10.39m임을 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 공무원뿐만 아니라 학계도 마찬가지로의 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 물 관리 전문가로서 이번 참관은 단순한 기술적 벤치마

킹을 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



김명환

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. 신이라는 나이에 이르는 동안 단 한 번도 가보지 못한 나라, 나에게 “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 위

한 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 이 글을 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 견

학 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 항력을 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 대해

여 발표하였다. 이 발표에서 김대현 교수는 섬진강 본류를 대상으로 전체, 상류, 하류 세 구간의 퇴적 및 침식을 분석하고, 구간에 따라 하천 변이의 주요 지배 인자가 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 읽어내고

자 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 측정하는 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(Seigyū)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 저서 무척추동물의 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 기초 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)

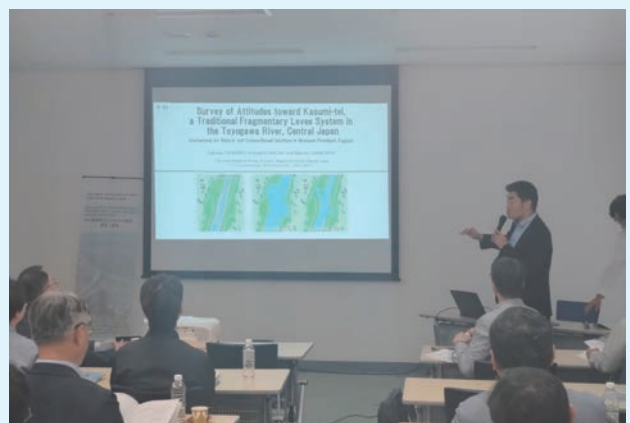


그림 6. 포스터 발표(나고야 대학 Takashi Tashiro 교수)

본인들의 철학이 느껴졌다.

이어서 공주대학교의 김이형 교수는 기초 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 결합되어 있는지를 보여주었다. 광주과학기술원의 김은석 교수는 한국 하천의 침입 덩굴식물인 환삼덩굴의 서식 선호도와 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 짚어 주고 오래도록 세미나를 이어온 양국 연구자들의 노력

과 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 자연위를 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 모습이였다.

앞서 잠시 언급했지만 나는 과거 하천실험센터의 예산요구 당시부터 설계와 준공까지의 센터 설립 업

무와 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 시간이였다.



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. 어찌면 그때야말로 사람을 태우는 버스의 좌석조차도 낭비하고 싶어 하지 않는 일본의 진짜 문화를 접한 순간이 아니었을까 하는 생각

이 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 뺄게 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 보여 주면서 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 일본스러운 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 점이였다. 마을 입구에 설치된 전통적인 다단식 수조는 이를 가장 잘 설명해주는 시설이였다. 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 찾아가기가 쉽지 않은 약수터를 생각하면서 조금 씩씩한 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 학술 발표회를 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, 닳은 고민을 품고, 닳은 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, 개인

적인 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 한번 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 모습이 라면 조금 멋지지 않을까 생각해 본다.



그림 20. 미노시 입구에서 일본의 연구자들과



그림 21. 구조 하치만에서 마지막 단체 사진