

# 일 반 기 사

134 생성형 AI를 활용한 현업 수자원 엔지니어의 업무 자동화 경험

윤재민

140 수자원 데이터, 잘 이어야 제대로 쓴다: 수자원 데이터 연계 표준 절차의 필요성과 적용 방향

이동섭

146 제2차 IPCC TG-Data 연례미팅을 다녀와서

최영돈

154 유럽 월류방어벽 기술의 최근 동향 및 적용: 현장 사례 및 평가 체계를 중심으로

노형주·신승숙·선우재빈·백중철

164 네덜란드 IAHR-SHCS 2026참가기

신승숙·노형주·선우재빈·백중철

170 호남 반도체 클러스터 용수는 충분한가? 기후변화에 따른 영산강·섬진강 기준갈수량과 물배분 안정성

성장현·김진수·강우철

178 제3회 2026 토양·지하수 협력 컨퍼런스 개최기

김병기·임정열·김병우·장선우

194 2026년 8월 26일 네팔 홍수

김 원

Water  
for future

# 생성형 AI를 활용한 현업 수자원 엔지니어의 업무 자동화 경험

- 나라장터 스마트 입찰정보 자동 알림 시스템 구축 사례 -



윤재민

(주)진화기술공사  
물환경사업부 총괄부서장  
phdyjm@naver.com

## 1. 들어가며

ChatGPT와 같은 생성형 AI가 등장한 이후, 필자 역시 많은 사람들과 마찬가지로 처음에는 단순한 질문이나 자료 검색, 어려운 개념을 쉽게 이해하는 용도로 AI를 활용하였다. 보고서나 회의자료를 작성할 때 초안을 잡거나, 생소한 내용을 쉽게 풀어 설명받는 정도가 주된 활용 방식이었다.

그러나 AI와 대화를 반복하면서 단순한 질의응답을 넘어 실제 업무에도 적용할 수 있겠다는 생각을 하게 되었다. 특히 수자원 엔지니어링 실무에서는 하천기본계획, 자연재해위험개선지구 정비사업, 재해영향평

가 등 기술적인 업무뿐 아니라 입찰정보 확인, 수주활동 지원, 사전규격 검토와 같은 반복적인 업무도 적지 않다.

그중에서도 나라장터 입찰공고와 사전규격 공개 정보를 매일 확인하는 업무는 중요하지만 상당히 반복적이다. 필요한 정보를 빠르게 확인해야 하고, 특히 사전규격 공개 정보는 사업 초기 단계의 정보를 선점할 수 있다는 점에서 수주 업무상 의미가 크다. 하지만 매일 나라장터에 접속하여 키워드를 검색하고 관련 공고를 확인하는 과정은 비효율적이며, 필요한 공고를 놓칠 가능성도 있다.

이러한 반복 업무를 줄이고자 생성형 AI와 Google

Apps Script, Telegram을 활용하여 나라장터 입찰정보 자동 알림 시스템을 구축하게 되었다. 본 글은 프로그램 개발자가 아닌 현업 수자원 엔지니어가 생성형 AI와 협업하여 실제 업무에 적용 가능한 자동화 시스템을 구축하고 운영한 경험을 공유하기 위한 것이다.

## 2. 왜 나라장터 알림 시스템이 필요했는가

수자원 분야 엔지니어링 업무에서 수주 정보의 조기 파악은 매우 중요하다. 하천기본계획, 소하천정비종합계획, 자연재해위험개선지구 정비사업, 풍수해생활권 종합정비사업, 재해영향평가 등은 발주 시점과 사전 정보 파악 여부에 따라 수주 활동의 방향이 달라질 수 있다.

기존에는 담당자가 직접 나라장터에 접속하여 관련 키워드를 검색하고, 입찰공고와 사전규격 공개 정보를 확인하는 방식으로 업무를 수행하였다. 이 방식은 특별한 기술이 필요한 것은 아니지만 매일 반복해야 한다는 점에서 부담이 있었다.

특히 사전규격 공개 정보는 본 공고 전에 사업 내용을 미리 확인할 수 있는 자료이므로, 관심 분야의 정보를 빠르게 확인하는 것이 중요하다. 필자는 이러한 정보를 보다 효율적으로 확인할 수 있는 방법이 필요

하다고 느꼈다.

반복적인 검색 업무를 줄이고, 필요한 공고가 등록되었을 때 즉시 확인할 수 있다면 수주 업무의 효율성이 높아질 수 있다. 이 단순한 문제의식이 나라장터 스마트 입찰정보 자동 알림 시스템 구축의 출발점이었다.

## 3. 생성형 AI와 함께 시스템을 만들다

필자는 전문 개발자가 아니다. 다만 대학원 시절 포트란을 이용하여 프로그램을 작성했던 경험이 있었고, 실무에서 엑셀 VBA를 활용한 간단한 자동화 경험도 있었다. 이러한 경험은 이번 작업에서 기본적인 구조를 이해하는 데 도움이 되었다.

그러나 실제 코드를 처음부터 직접 작성하는 것은 쉽지 않았다. 이때 생성형 AI를 활용하였다. 필요한 기능을 설명하면 AI가 코드를 제안하고, 필자는 이를 실행해 본 뒤 오류나 개선사항을 다시 설명하였다. 이 과정을 반복하면서 시스템을 조금씩 완성하였다.

처음부터 완성된 프로그램을 만든 것은 아니었다. 입찰공고 알림, 사전규격 알림, 키워드 필터링, 중복 제거, 텔레그램 메시지 전송 등 필요한 기능을 하나씩 추가하였다. 어떤 기능은 바로 작동하였고, 어떤 기능은 여러 번 수정해야 했다. 특히 사전규격 공개 정보



그림 1. 나라장터 스마트 입찰정보 자동 알림 시스템 구성도

의 링크 처리와 첨부파일 연결 방식은 시행착오가 있었으나, 실제 사용 가능한 수준으로 정리하였다.

이 과정에서 느낀 점은 생성형 AI가 단순히 코드를 대신 작성해 주는 도구가 아니라는 점이다. 중요한 것은 사용자가 원하는 업무 흐름을 얼마나 구체적으로 설명하느냐였다. 실무자가 문제를 정의하고, AI는 이를 구현하는 과정을 도와주는 방식이었다.

## 4. 시스템의 주요 기능

현재 운영 중인 시스템의 주요 기능은 다음과 같다.

첫째, 나라장터 입찰공고를 자동으로 수집한다. 사용자가 매번 검색하지 않아도 일정 시간마다 관련 공고를 확인할 수 있도록 하였다.

둘째, 사전규격 공개 정보를 함께 수집한다. 사전규격 정보는 본 공고 이전에 사업 내용을 파악할 수 있는 자료이므로, 수주 업무에서 중요한 의미를 가진다.

셋째, 수자원 분야와 관련된 키워드를 기준으로 필요한 공고만 선별한다. 예를 들어 하천기본계획, 소하천정비종합계획, 자연재해위험개선지구, 재해영향평가, 풍수해생활권, 우수유출저감 등 실무적으로 의미

있는 키워드를 중심으로 필터링하였다.

넷째, 동일한 공고가 반복적으로 전송되지 않도록 중복 제거 기능을 적용하였다.

다섯째, 최종적으로 선별된 공고를 텔레그램으로 전송한다. 이를 통해 사무실뿐 아니라 이동 중에도 휴대전화로 관련 공고를 확인할 수 있다.

## 5. 실제 운영하면서 느낀 효과

처음에는 개인 업무를 조금 편하게 만들기 위한 목적이었다. 그러나 실제로 사용해 보니 기대 이상의 효과가 있었다.

가장 큰 효과는 반복 검색 업무가 줄었다는 점이다. 기존에는 나라장터에 직접 접속하여 키워드를 검색하고, 관심 공고인지 확인해야 했다. 시스템 구축 후에는 텔레그램 알림을 통해 필요한 공고를 바로 확인할 수 있게 되었다.

또한 사전규격 공개 정보를 보다 빠르게 확인할 수 있게 되었다. 수주 업무에서는 본 공고뿐 아니라 사전단계의 정보가 중요하다. 관심 분야의 사전규격 정보를 빠르게 확인하면 향후 발주 예정 사업에 대한 검토

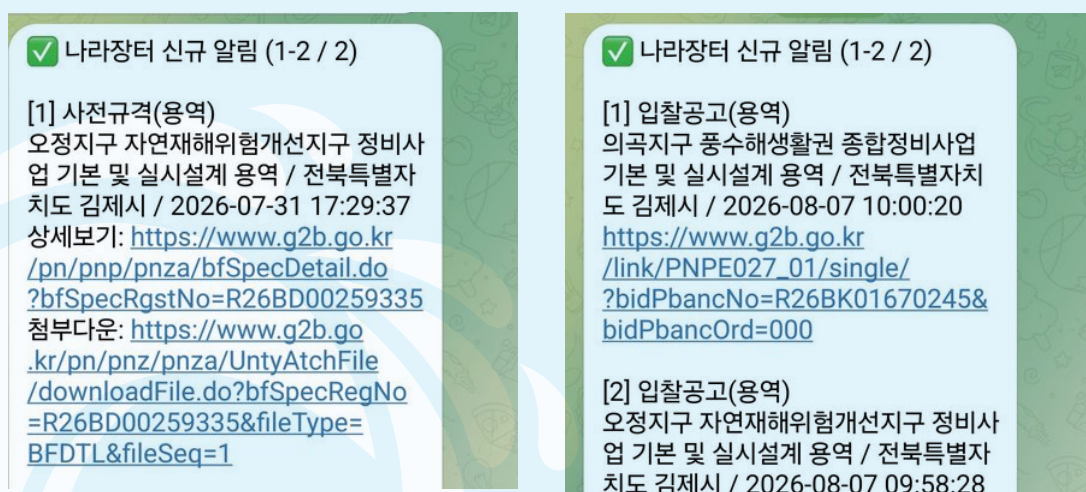


그림 2. 텔레그램을 통한 나라장터 입찰공고 및 사전규격 자동 알림 화면

와 준비가 가능하다.

시스템을 운영하면서 키워드를 추가하거나 제외하는 방식으로 계속 개선할 수 있다는 점도 장점이었다. 예를 들어 특정 공고가 누락되면 관련 키워드를 추가하고, 불필요한 공고가 반복적으로 들어오면 제외 키워드를 조정하였다. 이 과정은 단순한 프로그램 수정 이라기보다 실무자의 경험을 시스템에 반영하는 과정이었다.

회사 내부 회의에서 이 시스템을 소개한 결과, PQ 관련 업무를 담당하는 팀에서도 유용할 수 있겠다는 반응이 있었다. 또한 다른 실무자에게도 활용될 수 있겠다는 의견과 향후 기능 확대 및 활용 가능성에 대한 다양한 의견이 제시되었다. 이러한 반응을 통해 단순한 개인 자동화 도구로 생각했던 시스템이 다른 실무자에게도 도움이 될 수 있겠다는 가능성을 느꼈다.

## 6. AI 활용 과정에서 느낀 점

이번 경험에서 가장 놀라웠던 점은 개발자가 없어도 실제 업무에 사용할 수 있는 자동화 시스템을 만들 수 있었다는 것이다. 물론 생성형 AI가 모든 것을 한 번에 해결해 준 것은 아니었다. 코드가 바로 작동하지 않는 경우도 있었고, 원하는 기능을 구현하기 위해 여러 번 수정해야 했다. 생각보다 작업 시간이 소요되기도 했다.

하지만 기존 방식과 다른 점은 시행착오의 속도였다. 문제가 생기면 AI에게 오류 내용을 설명하고, 수정된 코드를 받아 다시 테스트할 수 있었다. 이 과정을 반복하면서 결국 사용할 수 있는 시스템을 만들 수 있었다.

주변에서도 유사한 자동화를 시도하고 싶었지만 코딩 경험이나 지식이 없어 쉽게 접근하지 못했다는 이야기를 들었다. 필자의 경우 과거 포트란과 엑셀 VBA를 사용해 본 경험이 있어 코드의 구조를 이해하는 데 조금은 수월했던 것 같다. 그러나 이번 경험을 통해 더 중요하다고 느낀 것은 전문적인 코딩 능력보다도, 내가 원하는 업무 흐름을 명확하게 설명하고 AI와 대화하면서 조금씩 개선해 나가는 능력이었다.

AI는 실무자의 전문성을 대신하는 도구가 아니다. 오히려 실무자가 자신의 업무를 잘 알고 있을수록 AI를 더 효과적으로 활용할 수 있다. 어떤 공고가 중요한지, 어떤 키워드가 필요한지, 어떤 정보가 실무적으로 의미 있는지는 AI보다 실무자가 더 잘 알고 있다. AI는 이를 구현하고 반복 업무를 줄여주는 도구로 활용될 때 가장 현실적인 효과를 낼 수 있다.

## 7. 향후 개선 방향

현재 시스템은 입찰공고와 사전규격 알림 기능을 중심으로 운영되고 있다. 향후에는 사용자 요구에 따라

표 1. 기존 방식과 자동 알림 방식의 비교

| 구분      | 기존 방식         | 자동 알림 적용 후     |
|---------|---------------|----------------|
| 정보 확인   | 나라장터 직접 접속·검색 | Telegram 자동 알림 |
| 검색 방법   | 관심 키워드 직접 검색  | 설정 키워드 자동 필터링  |
| 사전규격 확인 | 직접 검색         | 자동 수집·알림       |
| 중복 확인   | 사용자가 판단       | 시스템 자동 제거      |
| 확인 장소   | PC 중심         | PC·모바일 확인      |
| 조건 변경   | 검색조건 재설정      | 키워드 수정으로 대응    |

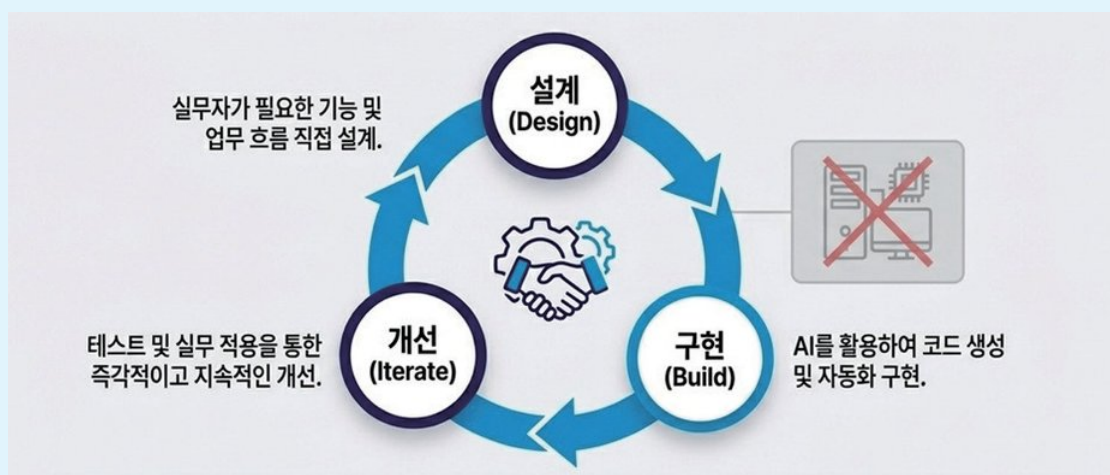


그림 3. 생성형 AI를 활용한 시스템 구축 및 개선 과정

다음과 같은 기능을 추가할 수 있을 것으로 생각한다.

첫째, 다중 사용자 지원이다. 현재는 개인 알림 중심으로 운영하고 있으나, 향후에는 여러 사용자가 각자의 관심 분야에 맞는 키워드를 설정하여 알림을 받을 수 있도록 개선할 수 있다. 실무적으로는 이 기능이 가장 중요하다고 생각한다. 필요한 정보는 사람마다 다르기 때문에, 사용자별 맞춤 키워드와 알림 설정이 가능하다면 활용성이 크게 높아질 것이다.

둘째, 지역별 필터 기능이다. 예를 들어 강원도, 경기도, 충청권 등 특정 지역의 공고만 선별하여 알림을 제공할 수 있다.

셋째, 금액별 필터 기능이다. 기초금액이 일정 금액 이상인 공고에 별도의 표시를 하거나, 특정 금액 이상만 선별하는 기능을 적용할 수 있다.

넷째, 발주기관별 분류 기능이다. 특정 지자체, 공공기관, 지방환경청 등 발주기관별로 정보를 구분하면 수주 전략 수립에 도움이 될 수 있다.

다섯째, 일일 요약 기능이다. 하루 동안 수집된 공고를 정리하여 요약 형태로 제공하면, 바쁜 실무자가 전체 흐름을 빠르게 파악하는 데 도움이 될 것이다.

## 8. 수자원 엔지니어에게 AI는 무엇인가

이번 사례는 거창한 AI 연구나 전문 프로그램 개발 사례가 아니다. 반복되는 나라장터 검색 업무를 줄이기 위해 현업 엔지니어가 생성형 AI와 함께 만든 작은 자동화 사례이다.

그러나 작은 사례라고 해서 의미가 작다고 생각하지는 않는다. 수자원 분야의 업무는 설계, 해석, 보고서 작성, 자료 검토, 입찰 준비, 수주 전략 등 다양한 작업으로 구성되어 있다. 이 중에는 고도의 전문적 판단이 필요한 업무도 있지만, 반복적이고 정형화된 업무도 적지 않다. AI는 바로 이러한 반복 업무를 줄이고, 엔지니어가 더 중요한 판단과 검토에 집중할 수 있도록 도와주는 도구가 될 수 있다.

처음에는 AI를 단순 질문이나 자료 정리 정도로 활용하였다. 그러나 이번 경험을 통해 AI가 실제 업무 시스템 구축에도 활용될 수 있다는 점을 알게 되었다. 물론 아직 해볼 수 있는 일이 훨씬 많다. 재해영향평가 검토, 하천기본계획 자료 정리, 자연재해위험개선지구 사업 검토, PQ 자료 정리 등 다양한 수자원 분야 실무에서도 AI 활용 가능성은 충분하다고 생각한다.

중요한 것은 AI가 모든 것을 대신해 줄 것이라고 기대하는 것이 아니라, 실무자가 자신의 업무를 잘 이해하고 그중 반복적이고 개선 가능한 부분을 찾아 AI와 함께 해결해 나가는 것이다.

## 9. 마치며

필자는 프로그램 개발자가 아니라 수자원 엔지니어이다. 이번 나라장터 스마트 입찰정보 자동 알림 시스템은 완성된 상용 프로그램이라기보다, 반복 업무를 줄이기 위해 생성형 AI와 함께 직접 시도하고 실제 업무에 적용해 본 자동화 사례이다.

개인적인 필요에서 시작한 작은 시도였지만, 실제 운영과 회사 내부 공유를 통해 다른 실무자에게도 활용될 가능성을 확인하였다. 앞으로 수자원 분야에서도 AI는 전문성을 대신하기보다 반복 업무와 정보 정리를 지원하여 엔지니어가 판단과 창의적인 업무에 더 집중하도록 돕는 방향으로 활용될 수 있을 것이다.

본 사례가 수자원 분야 실무자들이 생성형 AI를 보

다 현실적이고 실용적인 방식으로 활용해 보는 작은 계기가 되기를 기대한다.

### 【AI 활용을 시작하려는 엔지니어에게】

- 작은 반복 업무부터 시작한다. 매일 또는 주기적으로 반복하는 업무 중 하나를 먼저 선택한다.
- 원하는 업무 흐름을 구체적으로 설명한다. 코딩 자체보다 무엇을 어떻게 처리하고 싶은지를 AI에게 명확하게 전달하는 것이 중요하다.
- 실행하고 수정하는 과정을 반복한다. 처음부터 완벽하게 만들기보다 실제로 실행해 보고, 오류와 불편한 점을 하나씩 개선한다.
- 실무자의 경험과 판단을 반영한다. AI가 시스템 구현을 도울 수는 있지만, 무엇이 필요하고 중요한지는 해당 업무를 잘 아는 실무자가 판단해야 한다.
- 완벽한 프로그램보다 실제로 사용하는 프로그램을 만든다. 작은 자동화라도 반복 업무를 줄이고 실제 업무에 계속 활용할 수 있다면 충분한 가치가 있다.

## 수자원 데이터, 잘 이어야 제대로 쓴다: 수자원 데이터 연계 표준 절차의 필요성과 적용 방향



이 동 섭

(주)피에스글로벌 대표  
dslee@psglobal.co.kr

### 1. 머리말

물관리 업무는 이제 개별 관측자료를 단순히 축적하는 수준을 넘어, 서로 다른 기관과 시스템이 보유한 데이터를 연결해 즉시 활용하는 단계로 이동하고 있다. 집중호우, 가뭄, 도시침수, 시설 운영 판단처럼 시간에 민감한 업무에서는 수위·유량·강우 자료뿐 아니라 시설물 정보, 공간 정보, 재난 대응 정보가 함께 작동해야 실제 현장 대응력이 높아진다.

문제는 데이터가 부족해서가 아니라, 서로 바로 연결해 쓰기 어려운 경우가 많다는 점이다. 기관별로 관리하는 항목명과 단위, 코드 체계, 갱신주기, 제공 방식이 다르면 같은 의미의 정보라도 다시 정리하고 비

교하는 시간이 필요해진다. 이 과정은 데이터 기반 의사결정의 속도를 늦추고, 분석 결과의 일관성을 떨어뜨릴 수 있다.

(주)피에스글로벌은 「AI 기반 수자원 빅데이터 품질관리 기술 개발」 연구과제의 요소기술 3-1을 통해 수자원 품질관리 데이터의 공동 활용 및 정보 연계 기반을 마련하고 있다. 특히 수자원 데이터의 송·수신 절차, 표준화 체계, 활용자 관점의 제공 기준을 연계하여 실제 업무에 적용 가능한 형태의 운영 기준을 정리하는 데 초점을 두고 있다.

본 기고문은 「수자원 데이터 연계 표준 절차 가이드(안)」 및 관련 연구자료를 바탕으로, 수자원 데이터 연계 절차가 왜 필요한지, 어떤 요소로 구성되어야

하는지, 현장에 적용할 때 무엇을 우선 고려해야 하는지를 설명하기 위해 작성되었다.

## 2. 왜 수자원 데이터 연계 표준절차가 필요한가?

수자원 데이터는 단순히 숫자 몇 개를 모아둔 자료가 아니다. 하나의 수위 자료만 보더라도 그 값을 제대로 해석하려면 강우량, 유량, 관측소 위치, 시설 운영 정보, 주변 지형 등이 함께 필요하다.물관리 데이터는 이처럼 관측·운영·공간·재난 대응 정보가 서로 영향을 주고받는 복합적인 자료다. 따라서 개별 데이터셋의 품질만 확인해서는 충분하지 않다. 데이터와 데이터 사이의 관계, 그리고 그 데이터가 전달되는 방식까지 함께 관리해야 한다.

연계 표준 절차가 필요한 이유는 크게 세 가지로 볼 수 있다.

첫째, 현장 업무의 속도 때문이다. 재난 대응이나 수문 운영 업무에서는 필요한 정보가 서로 다른 시스템에 있더라도 짧은 시간 안에 함께 조회되고 분석되어야 한다. 이때 항목명이나 단위가 맞지 않으면 실무자는 데이터를 바로 쓰지 못하고 다시 가공해야 한다.

둘째, 분석과 AI 활용의 기반을 만들기 위해서다. 학습 데이터가 많더라도 항목 정의, 단위, 시간 기준, 결

측 처리 방식이 제각각이면 모델의 신뢰도를 확보하기 어렵다. 결국 AI 기반 분석의 성능은 알고리즘만이 아니라, 그 알고리즘에 입력되는 데이터가 얼마나 일관되게 준비되어 있는지에 크게 좌우된다.

셋째, 공공데이터 관리의 책임성과도 관련이 있다. 제공 가능 여부, 제한 정보 포함 여부, 목록 관리, 제공 이력은 모두 공공데이터 제공 원칙과 연결된다. 연계 절차가 불명확하면 데이터 제공 범위가 흔들리고, 제공 이후의 책임 소재도 모호해질 수 있다.

행정안전부의 공공데이터 제공·관리 원칙이 생성·수집부터 사후관리까지의 흐름을 강조한다면, 수자원 데이터 연계 SOP는 이를 물관리 데이터의 특성에 맞게 구체화한 실무 기준이라고 할 수 있다.

결국 수자원 분야의 연계 표준 절차는 공공데이터 일반 원칙을 단순히 반복하는 문서가 아니다. 여러 출처의 물 관련 정보를 하나의 운영 흐름 안에서 연결하고, 필요한 사람이 필요한 시점에 해석 가능한 형태로 활용하도록 돕는 분야 특화형 기준이다.

## 3. 연계 절차의 기본 구조

수자원 데이터 연계 SOP는 데이터를 한 번 정리해 공개하는 절차에 머무르지 않는다. 데이터가 만들어지고, 처리되고, 등록되고, 제공된 뒤 다시 갱신되는



Fig. 1. 수자원 데이터 연계 절차의 필요성

전 과정을 하나의 흐름으로 본다. 기본 구조는 생성·수집, 처리, 등록, 제공, 사후관리의 다섯 단계로 나눌 수 있다. 각 단계는 독립된 절차처럼 보이지만, 실제로는 앞 단계의 정리가 다음 단계의 품질과 활용성을 결정한다.

### 3.1 생성·수집 단계

첫 단계에서는 나중에 제공과 연계가 가능하도록 데이터를 처음부터 잘 구조화하는 일이 중요하다. 사람이 읽는 보고서 형태로만 남겨두면 활용 범위가 제한된다. 시스템이 읽고, 분해하고, 다시 조합할 수 있는 형식으로 관리되어야 한다. 가능하다면 비독점적 포맷을 우선 고려하고, 갱신 빈도가 높은 데이터는 파일 제공 방식뿐 아니라 API 기반 제공 가능성도 함께 검토할 필요가 있다.

### 3.2 처리 단계

처리 단계에서는 해당 데이터가 실제로 제공 가능한지 판단한다. 공공데이터에 해당하는지, 제공이 제한되는 정보가 포함되어 있는지, 일부 항목만 분리해 제공할 수 있는지, 제3자 권리와 충돌하지 않는지를 검토해야 한다.

이 단계가 충분히 정리되지 않으면 이후 등록과 제공 단계에서 수정이 반복된다. 예를 들어 제공 제외 정보가 뒤늦게 확인되면, 이미 작성한 목록과 제공 방식까지 다시 손봐야 한다. 따라서 처리 단계는 단순한 검토 절차가 아니라, 연계 대상 데이터의 범위와 책임을 확정하는 과정으로 보아야 한다.

### 3.3 등록 단계

등록 단계는 데이터의 존재를 공식적으로 관리 가능한 상태로 만드는 과정이다. 어떤 데이터가 있고, 어떤 조건에서 제공될 수 있으며, 누가 관리하고, 어

느 주기로 갱신되는지를 목록으로 남긴다.

목록화는 행정적인 절차처럼 보이지만, 실제 연계 업무에서는 출발점에 가깝다. 기관 간에 어떤 데이터가 있는지 모르면 연계 우선순위를 정하기 어렵고, 비슷한 데이터를 중복 구축할 가능성도 커진다. 반대로 목록이 잘 정리되어 있으면 데이터 탐색, 연계 대상 선정, 제공 협의가 훨씬 수월해진다.

### 3.4 제공 단계

제공 단계에서는 데이터를 외부로 전달하는 것만으로 끝나지 않는다. 신청 접수, 제공 여부 판단, 통보, 전달 방식 결정, 제공 이력 기록이 함께 이루어져야 한다. 제공받는 주체, 제공 시점, 제공 범위, 제공 방식이 기록되어야 이후 어떤 데이터 수요가 많은지, 어느 구간에서 품질 문제가 반복되는지 파악할 수 있다.

특히 수자원 데이터는 시점과 주기가 중요하다. 같은 수위 자료라도 실시간 관측값인지, 검·보정이 끝난 확정 자료인지에 따라 활용 목적이 달라진다. 제공 단계에서는 이런 차이를 함께 설명해야 오해를 줄일 수 있다.

### 3.5 사후관리 단계

수자원 데이터는 한 번 구축했다고 끝나는 자료가 아니다. 관측소 운영 상태가 달라질 수 있고, 센서나 시스템이 교체될 수도 있다. 항목 정의나 메타데이터가 조정되는 경우도 있다. 그래서 연계 체계의 신뢰성은 최초의 구축 과정보다 사후관리 과정에서 더 분명하게 들어난다.

목록과 실제 제공 정보가 일치하는지, 갱신주기가 지켜지는지, 변경사항이 관련 기관에 제대로 통보되는지를 주기적으로 확인해야 한다. 이 점점이 느슨해지면 처음에는 잘 작동하던 연계 체계도 시간이 지나면서 신뢰를 잃게 된다.



Fig. 2. 수자원 데이터 연계 절차의 기본 구조

## 4. 연계 표준화의 핵심 요소

연계 표준화의 핵심은 기관 간 해석 차이를 줄이는데 있다. 이를 위해서는 표준사전, 메타데이터, 연계 데이터 목록, 정합성 점검이 함께 작동해야 한다. 표준사전은 같은 항목을 같은 이름과 의미로 사용하도록 돕고, 메타데이터는 데이터의 배경과 조건을 설명한다. 연계데이터 목록은 실제 송·수신 구조를 관리하는 실무 문서 역할을 하며, 정합성 점검은 제공 이후에도 목록과 실제 데이터 상태가 어긋나지 않도록

확인하는 장치다.

행정안전부 매뉴얼에서도 기계 판독 가능 형태, 오픈 포맷, 표준 준수, 목록 등록, 품질관리의 중요성을 다루고 있다. 다만 수자원 분야에서는 여기에 시·공간 정보, 관측 특성, 갱신주기, 수문자료의 현장 활용 맥락이 함께 반영되어야 한다. 다시 말해 수자원 데이터 표준화에서는 “표준을 지켰는가” 못지않게 “현장에서 바로 연결해 쓸 수 있는가”가 중요한 기준이 된다.

특히 연계데이터 목록은 한 번 작성하고 끝나는 문서가 아니다. 시스템 변경과 함께 계속 갱신되어야 하

Table 1. 수자원 데이터 연계 표준화의 핵심 구성요소

| 구성 요소    | 주요 항목                      | 연계 실무에서의 역할                        |
|----------|----------------------------|------------------------------------|
| 표준사전     | 표준용어, 표준단어, 공통도메인          | 기관마다 다른 표현을 줄이고 같은 항목의 의미를 일관되게 유지 |
| 메타데이터    | 출처, 생성시점, 공간범위, 형식, 해상도    | 데이터의 배경정보를 함께 제공하여 검색성과 재사용성을 높임   |
| 연계데이터 목록 | 연계명, 주기, 항목명, 타입, 길이, 제공기관 | 송·수신 구조를 문서화하여 연계 오류와 해석 차이를 줄임    |
| 정합성 점검   | 변경통보, 누락 확인, 이력관리          | 제공 이후에도 목록과 실제 데이터 상태를 일치시키는 관리 수단 |

는 운영 산출물이다. 연계 주기, 항목 구조, 데이터 타입이 바뀌었는데 목록이 그대로라면 실무자나 외부 활용기관은 잘못된 기준으로 데이터를 해석하게 된다. 목록이 최신 상태를 유지하지 못하면 표준화의 효과도 현장에서 오래가기 어렵다.

## 5. 수자원 데이터 연계 표준 절차의 적용 방향

피에스글로벌 요소기술 3-1의 관점에서 보면, 연계 SOP를 현장에 정착시키기 위해 가장 먼저 해야 할 일은 ‘무엇을 연계할 것인가’를 분명히 하는 것이다. 기관별 보유 데이터 목록, 제공 가능성, 갱신주기, 메타데이터 보유 상태를 먼저 확인해야 한다. 연계는 결국 목록 위에서 시작된다.

첫째, 목록 중심으로 접근해야 한다. 보유 데이터의 범위와 상태를 알아야 연계 우선순위와 적용 범위를 정할 수 있다. 모든 데이터를 한 번에 연결하려 하기보다, 활용 수요가 높고 품질관리 효과가 큰 데이터부터 단계적으로 정리하는 편이 현실적이다.

둘째, 송·수신 절차를 사전에 합의해야 한다. 데이터 구조가 바뀌거나 응답 형식이 달라질 때, 또는 오류가 발생했을 때 어떻게 통보하고 조치할지 미리 정해두어야 한다. 이런 기준이 없으면 작은 변경도 운영 장애로 이어질 수 있다.

셋째, 품질관리와 연계관리를 따로 보지 않아야 한다. 값 오류, 단위 불일치, 결측, 최신성 문제는 데이터 품질의 문제이면서 동시에 연계 운영의 문제다. 품질관리 결과가 연계 과정에 반영되고, 연계 과정에서 발견된 문제가 다시 품질관리로 돌아가는 구조가 필요하다.

넷째, 산출물을 지속적으로 유지해야 한다. 표준용어정의서, 메타데이터 정의서, 연계목록, 점검 결과서는 구축 당시의 결과물이 아니라 운영 중 계속 갱신해야 하는 관리 자료다. 실제 현장에서는 이 산출물들이 최신 상태로 유지될 때 담당자가 바뀌어도 업무 연속성을 확보할 수 있다.

이러한 운영 방향은 공공데이터 일반 매뉴얼에서 강조하는 목록 관리, 제공 기준, 사후 현행화 원칙과



Fig. 3. 수자원 데이터 연계 SOP의 현장 적용 방향

맞닿아 있다. 다만 수자원 분야에서는 실시간성, 정합성, 공간성이 더 강하게 요구된다. 따라서 연계 절차도 일반적인 데이터 제공 절차에 머무르지 않고, 수문 자료의 현장 활용 맥락을 반영한 세부 기준으로 설계되어야 한다.

## 6. 기대효과

연계 표준절차가 정착되면 가장 먼저 줄어드는 것은 데이터 활용을 준비하는 시간이다. 동일 항목의 의미를 다시 확인하고, 형식을 맞추고, 출처를 확인하는 시간이 줄어들면 분석과 서비스 개발에 더 많은 시간을 쓸 수 있다. 현장 담당자 입장에서는 데이터를 “받는 일”보다 “이해하고 쓰는 일”에 집중할 수 있게 되는 셈이다.

기관 간 공동 활용도 쉬워진다. 서로 다른 시스템이 같은 기준으로 데이터를 설명하고 주고받을 수 있으면, 중복 구축을 줄이고 협업 속도를 높일 수 있다. 또한 고품질 데이터 확보를 전제로 하는 AI 기반 분석과 예측 서비스의 확장 가능성도 커진다.

무엇보다 제공 이력, 변경관리, 현행화 체계가 정리되면 데이터 행정의 책임성과 신뢰성이 함께 높아진다. 수자원 데이터가 공공 자산으로 기능하려면 단순

히 많이 공개되는 것만으로는 부족하다. 누가, 어떤 기준으로, 언제부터 언제까지의 데이터를 제공했는지 설명할 수 있어야 한다.

## 7. 맺음말

수자원 데이터의 활용 수준은 데이터를 얼마나 많이 모았는가보다, 그 데이터를 얼마나 일관되게 연결하고 설명할 수 있는가에 더 크게 좌우된다. 데이터의 위치, 의미, 제공 범위, 갱신주기, 관리 책임이 분명해야만 실제 정책과 기술, 서비스로 이어질 수 있다.

수자원 데이터 연계 표준 절차는 기관 간 데이터 이동을 위한 기술 규격이면서 동시에 제공 원칙과 품질 관리, 사후 현행화를 묶는 운영 체계이다. 생성·수집부터 제공 이후까지를 하나의 흐름으로 관리할 때 수자원 데이터는 개별 시스템의 산출물을 넘어 공동 활용 가능한 공공 자산으로 기능하게 된다.

피에스글로벌은 요소기술 3-1 연구를 통해 이러한 연계 기반을 수자원 분야 실무에 적용할 수 있는 형태로 구체화하고 있다. 앞으로 연계 SOP가 현장 중심의 기준으로 자리 잡는다면, 데이터 기반 물관리의 정확도와 효율성뿐 아니라 국민이 체감하는 정보서비스의 품질 역시 함께 높아질 것으로 기대된다.

## 제2차 IPCC TG-Data 연례미팅을 다녀와서



최영돈

K-water연구원  
AI연구소 수석연구원  
choiyd1115@kwater.or.kr

### 1. 참가배경

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) TG-Data(Task Group on Data Support for Climate Change Assessment)는 기후변화에 관한 정부간 협의체의 기후변화 평가를 위한 데이터 지원 태스크 그룹(그림 1)이다. TG-Data는 제47차 IPCC 총회('18.3.13~16, 프랑스 파리)에서 TG-Data에 대한 참조조건(Decision IPCC-XLIX-6, Annex 1)과 IPCC 데이터 배포센터에 대한 지침(Annex 2)을 채택하여 기후변화 6차 평가보고서(AR6)의 작성부터 활동을 시작하였다.

TG-Data의 활동은 TOR(Terms of Reference)에 따라서 DDCs(Data Distribution Centers)와 TSUs(Technical Support Units) 협업을 통해 기후변

화에 대한 데이터의 관리, 투명성, 추적 가능성 및 안정성 등에 대한 지침을 제공하는 역할을 담당하고 있다. TG-Data의 주요 임무는 ① 데이터 관리 및 보존으로 IPCC 기후변화 평가보고서에 사용된 데이터의 큐레이션, 추적가능성, 안정성, 공개 등을 보장하고, ② 데이터 표준설정 관련은 데이터의 형식, 메타 데이터, 품질 등에 대한 표준을 설정·유지 관리하며, ③ 데이터 접근성 향상을 통해 연구자들이 IPCC 데이터를 쉽게 찾고 사용할 수 있도록 지원하며, 마지막으로 ④ 데이터 품질관리를 통해 데이터의 정확성과 신뢰성을 확보하기 위한 노력을 제공하는 것이다.

'24년 AR6(The 6<sup>th</sup> Assessment Report, 제6차 기후변화 평가보고서)에 대한 절차가 마무리되고, AR7(The 7<sup>th</sup> Assessment Report, 제7차 기후변화 평가보고서)의 작성이 시작되면서 '25.4월에 AR7의 준

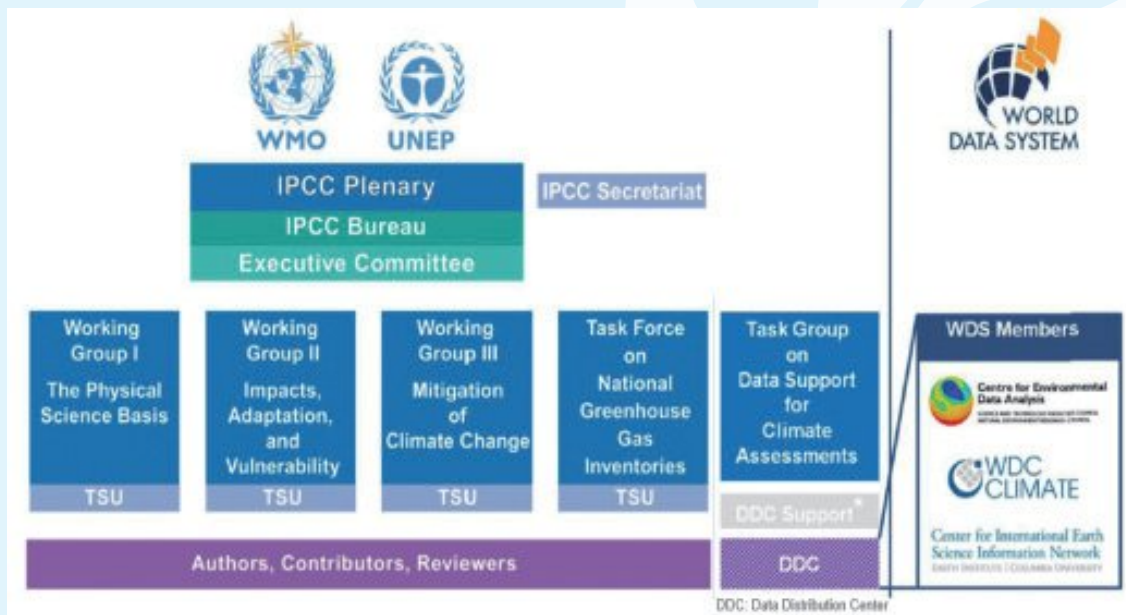


그림 1. Structure of IPCC

표 1. AR7를 위해 선정된 전세계 TG-Data 멤버 (20명)<sup>1</sup>

| No. | Name                                 | Country           | Gender | Role     |
|-----|--------------------------------------|-------------------|--------|----------|
| 1   | Aidin NIAMIR                         | Germany           | Male   | Co-Chair |
| 2   | Silvina AliCIA SOLMAN                | Argentina         | Female | Co-Chair |
| 3   | Alaa AL K HOURDAJIE                  | United Kingdom    | Male   | Member   |
| 4   | Guleid ARTAN                         | Somalia           | Male   | Member   |
| 5   | Gillian BOWSER                       | USA               | Female | Member   |
| 6   | Lijuan CAO                           | China             | Female | Member   |
| 7   | Jaime Jesus CARRERA HERNANDEZ        | Mexico            | Male   | Member   |
| 8   | Young-Don CHOI                       | Republic of Korea | Male   | Member   |
| 9   | Rebecca COWLEY                       | Australia         | Female | Member   |
| 10  | Muhammad Eeqmal Eesfansyah HASSIM    | Australia         | Male   | Member   |
| 11  | Anca HIENOLA                         | Romania           | Female | Member   |
| 12  | Maialen ITURBIDE MARTINEZ DE ALBENIZ | Spain             | Female | Member   |
| 13  | Lydie Stella KOUTIKA                 | Congo             | Female | Member   |
| 14  | Guillaume LEVAVASSEUR                | France            | Male   | Member   |
| 15  | Malik MECHHOUD                       | Algeria           | Male   | Member   |
| 16  | Milla NOBREGA DE MENEZES COSTA       | Brazil            | Female | Member   |
| 17  | Riko OKI                             | Japan             | Female | Member   |
| 18  | Ximena SCHMIDT RIVERA                | Chile             | Female | Member   |
| 19  | Ram Lal VERMA                        | India             | Male   | Member   |
| 20  | Lili ZHANG                           | China             | Female | Member   |

비를 위한 TG-Data 멤버를 모집하였다. 전세계 총 195명이 지원하였으면 '25.10월 스위스 제네바에서 열린 제69차 IPCC 세션을 통해 북중미 2, 남미 3, 유럽 5, 아프리카 3, 남서태평양 2, 아시아 5명으로 최종 20명의 TG-Data 멤버가 선정되게 되었다(표 1).

## 2. 그간 활동현황 ('25.9~'26.6)

'25년 9월 온라인미팅을 시작으로 TG-Data의 활동이 시작되었으며, '25년 12월 독일 프랑크푸르트(12.11~13)에서 제7차 기후변화평가보고서와 연계한 TG-Data의 역할과 활동계획을 논의하기 위해 제1차 TG-Data 연례미팅을 개최하였다 이를 통해서 활동의 중심이 되는 4개의 Pillars(① DDC 시스템의 전략적 조정 및 감독, ② WGs(Working Groups, 워킹그룹)에 대한 데이터 관리 지원, ③ 홍보 및 보급, ④ 전략적 파트너십 및 외부 참여)(표 2)를 선정하고, 구체적인 활동계획을 수립하였으며, 이를 기초로 TG-Data의 활동에 대한 리포트가 '26.3월 태국 방콕에서 열린 제64차 IPCC 총회에서 최종 채택되었다.

## 3. 제2차 TG-Data 연례미팅 참여 ('26.7.6~7.8)

이러한 활동과 연계하여 올해는 아르헨티나 부에노



그림 2. 제64차 IPCC 총회 TG-Data 활동보고서2

스아이레스에서 제2차 TG-Data 연례미팅('26.7.6~8)이 개최되었다. 일정은 크게 ① DDCs와 TSUs의 활동에 대한 공유 및 TG-Data의 지원 필요사항에 대한 논의, ② 각 Pillars의 TG-Data 서브그룹별 활동현황에 대한 확인 및 향후 추진계획을 논의하는 것으로 진행되었다.

먼저 “The Physical Science Basis” 기후변화 평가보고서의 데이터 관리에 대한 역할을 맡고 있는

표 2. TG-Data 활동을 위한 4개의 Pillars 구성 및 주요 내용

| 구분                             | 주요 내용                              |
|--------------------------------|------------------------------------|
| Pillar 1: DDC 시스템의 전략적 조정 및 감독 | DDC 운영의 일관성 및 장기적인 지속 가능성 보장       |
| Pillar 2: WGs에 대한 데이터 관리 지원    | 투명하고 추적가능한 데이터를 위한 적극적인 지침 및 조정 제공 |
| Pillar 3: 홍보 및 보급              | 데이터 접근성 향상, 역량 강화 및 데이터 재사용 촉진     |
| Pillar 4: 전략적 파트너십 및 외부 참여     | 외부 협업 개발 및 장기적인 데이터 보존             |

표 3. 관련 용어 정리

| 용어                                               | 설명                                                                                                                                                                                                                                                     |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| DWD <sup>1)</sup>                                | 독일 기상청(Deutscher Wetterdienst)으로 IPCC 기후변화 평가데이터 제공을 위한 데이터 분배센터의 역할을 수행                                                                                                                                                                               |
| DKRZ <sup>2)</sup>                               | 독일 기후컴퓨팅센터(Deutsches Klimarechenzentrum)로써 IPCC와 연계하여 CMIP 데이터를 제공하는 역할을 담당하는 데이터 분배센터                                                                                                                                                                 |
| CSIC <sup>3)</sup>                               | 스페인 국립연구위원회(Consejo Superior de Investigaciones Cientificas)로써 IPCC Interactive Atlas 서비스의 역할을 담당하는 데이터 분배센터                                                                                                                                           |
| CEDA <sup>4)</sup>                               | 영국의 환경기후 데이터 아카이브 분석기관(the Centre for Environmental Data Analysis)으로 IPCC와 연계하여 데이터 분배센터의 역할을 수행                                                                                                                                                       |
| CIESIN <sup>5)</sup>                             | 통합 지구시스템정보 센터(The Center for Integrated Earth System Information)로써 IPCC와 연계하여 데이터 분배센터의 역할을 수행                                                                                                                                                        |
| CMIP6 <sup>6)</sup>                              | CMIP는 기후모델 상호비교 프로젝트로 세계기후연구계획(WCRP, World Climate Research Programme) 산하에서 전세계 기후모델링 그룹들이 표준화된 실험 프로토콜에 따라 기후모델 결과를 상호 비교·평가하는 국제 프로젝트이며, CMIP6는 현재 AR6의 근거가 된 실험군으로 SSP 시나리오와 다양한 MIP 실험을 통해 지구시스템의 복잡성을 반영(Coupled Model Intercomparison Project 6) |
| CMIP7 <sup>7)</sup>                              | AR7의 작성을 위해 Fast Track 방식으로 효율을 높이고, 해상도·AI활용·형평성을 강화한 차세대 실험 체계임                                                                                                                                                                                      |
| CORDEX <sup>8)</sup>                             | 세계기후연구계획(WCRP)이 주관하는 국제협력 프로젝트로 지역 기후변화를 상세하게 예측하기 위한 지역 기후 다운스케일링(Regional Climate Downscaling) 실험임                                                                                                                                                   |
| Interactive Atlas <sup>9)</sup>                  | IPCC Interactive Atlas를 주로 Atlas로 부르고 있으며, IPCC 제6차 평가보고서 WG-1의 활동으로 개발된 웹기반 기후데이터 시각화·분석도구임3                                                                                                                                                          |
| Copernicus Climate Change Service <sup>10)</sup> | 유럽연합의 지구관측 프로그램·기후변화 전담 서비스 (C3S, 코페르니쿠스 기후변화 서비스)                                                                                                                                                                                                     |
| REF <sup>11)</sup>                               | WCRP-CMIP 커뮤니티가 개발한 차세대 기후모델 신속평가 프레임워크로 CMIP7 Fast Track 및 AR7를 지원하기 위해 만들어진 상위 워크플로우 시스템임 (Rapid Evaluation Framework)                                                                                                                               |
| ESMVal Tool <sup>12)</sup>                       | 지구시스템모델(ESM) 평가를 위해 오픈소스 진단·성능 지표 패키지 (Earth System Model Evaluation Tool)                                                                                                                                                                             |
| FAIR <sup>13)</sup>                              | 데이터 관리의 국제표준 가이드라인으로써 Findable, Accessible, Interoperable, Reusable에 대한 가이드를 제공하여 데이터의 재현성을 높이고자 하는 원칙임4                                                                                                                                               |
| CARE <sup>14)</sup>                              | 공개가 제한되는 데이터에 대해 기본의 FAIR 원칙을 보완하기 위해서 제공되는 원칙으로, Collective Benefit, Authority Control, Responsibility, Ethics에 대한 원칙을 통해 누구를 위해 어떤 목적으로 데이터를 활용할 것인지에 대한 윤리적 사회적 관점을 강조5                                                                             |
| FPIC <sup>15)</sup>                              | “자유롭고 사전적이며 충분한 정보에 입각한 동의”라는 뜻으로 원주민 및 지역공동체의 권리를 보호하기 위한 국제 인권원칙으로, 그들의 토지, 자원, 문화, 삶에 영향을 미치는 프로젝트나 정책을 시행하기 전에 반드시 해당 공동체의 동의를 얻어야 한다는 원칙                                                                                                          |

WG-1 TSU의 경우, 각 단계별 데이터의 관리를 위해 원본데이터를 Input data, 중간단계 처리데이터를 Intermediate data, 마지막 평가보고서에 반영되는 데이터를 Final data로 분류하여 단계별로 데이터의 효율적 관리를 위해 DDCs와 협업을 통해 작업을 진행 중에 있다. Input data는 DWD(독일기상청)<sup>1)</sup>와 DKRZ(독일 기후컴퓨팅 센터)<sup>2)</sup>에서 AR7 작성 시 사용된 CMIP6(기후모델 상호비교 프로젝트)<sup>6)</sup>와 CMIP7<sup>7)</sup> 데이터의 장기보존 역할을 담당하고 있으며, 그 외 CORDEX(지역기후 다운스케일링 실험)<sup>8)</sup> 및 관측자료 등의 데이터 관리에 대해서도 검토 중에 있다. Intermediate data의 경우, 먼저 CSIC(스페인 국립연구위원회)<sup>3)</sup>에서 제공되는 IPCC Interactive Atlas<sup>9)</sup>와 관련된 데이터셋을 장기보존하고 있으며, 그 외 Copernicus Climate Change Service(코페르니쿠스 기후변화 서비스)<sup>10)</sup> 데이터 등도 연계하여 검토 중에 있다. 또한, AR7의 각 챕터별 활용된 데이터 및 분석 소프트웨어(REF(차세대 기후모델 신속평가 프레임워크)<sup>11)</sup>, Matlab, ESMVal Tool(지구시스템모델 진단 성능 지표 패키지)<sup>12)</sup> 등)와 연계하여 FAIR(Findable, Accessible, Interoperable, Reusable)<sup>13)</sup> 원칙에 따라서 데이터와 분석환경을 제공하기 위해 TG-Data와 함께 검토 및 가이드를 개발 중에 있다. Final data의 경우, CEDA(영국 환경데이터 분석센터)<sup>4)</sup>에서 데이터 및 메타데이터와 함께 AR7의 최종 그림과 데이터에 대한 장기적 보존과 서비스 제공에 대한 진행현황의 공유와 논의가 있었다.

두 번째, “Impacts, Adaptation and Vulnerability” 기후변화 평가보고서의 데이터 관리에 대한 역할을 맡고 있는 WG-2 TSU의 경우, WG-1 TSU와 유사하게 활동을 하고 있으며, 데이터의 보존과 서비스를 위해 협력하는 DDC는 CIESN(미국 콜롬비아 대학의 통합 지구시스템 정보센터)<sup>5)</sup>이다. WG-1은 주로 기상데

이터를 이용하고 있기 때문에 FAIR 원칙을 최대한 만족할 수 있는 데이터 공유체계를 서비스하기 위해 노력한다. 하지만, WG-2는 기후변화에 따른 영향, 적응 및 취약성 등의 다양한 데이터를 다루고 있기 때문에 데이터의 공유도 중요하지만, 특정 지역의 피해나 기업 및 개인정보 등과 같이 공개를 제한해야 하는 특성을 가진 데이터도 함께 관리해야 한다. 따라서 WG-1과 유사한 형태로 데이터의 단계구분 및 FAIR 원칙을 적용하기 위해 검토 중이며, 필요에 따라서 FAIR 원칙을 적용할 수 없는 데이터의 경우, CARE(Collective Benefit, Authority Control, Responsibility, Ethics)<sup>14)</sup> 원칙의 적용에 대한 논의가 있었다. 현재는 추가적으로 Special Report on Climate Change and Cities 보고서와 연계한 데이터의 보존 및 관리를 위해서도 검토 중이며, 이에 대한 진행현황에 대한 공유와 논의도 있었다.

마지막으로, “Mitigation of Climate Change” 기후변화 평가보고서의 데이터관리를 담당하고 있는 WG-3 TSU의 경우도 WG-2 TSU와 유사하게 데이터의 특성이 다양하여 WG-1의 프로세스를 활용하며 데이터 특성에 따라 보완사항을 도출하여 데이터의 체계적 관리를 위해 노력 중이며, 이에 대한 진행현황의 공유가 있었다.

현재 TG-Data는 Pillar 2를 중심으로 11개의 Activities를 정의하고, Activity별로 소그룹을 나눠서 활동을 진행하고 있다. 그 중 저자가 주로 참여하고 있는 4개의 Activities의 현재까지 진행현황 및 향후 추진방향에 대해 소개하겠다.

첫 번째 Activity-1은 WG-1의 AR7 데이터와 연계하여 GitHub을 통한 분석코드 및 데이터 공유에 대한 가이드를 지원하는 것이다. AR7의 각 챕터별 보고서에 들어가는 데이터, 테이블과 그림의 경우, GitHub을 통해서 코드와 관련 Final Data가 공유되게 되며,



그림 3. IPCC 워크숍 보고서6

이를 위해 TSU에서는 WG과 협업을 통해 각 챕터별 저자들이 GitHub을 통해서 보고서에 사용한 데이터 및 코드 등을 체계적으로 공유할 수 있도록 도와주고 있다. 이때 TG-Data에서는 이를 위한 상세한 가이드 및 설명을 위한 template 등에 대한 검토 및 지원을 수행하게 된다. 그리고 Final data의 용량이 큰 경우

는 Zenodo와 같은 온라인 데이터 공유플랫폼과 연계하여 데이터를 공유할 수 있도록 하는 등의 방법론에 대한 진행현황과 향후 추진방향을 논의하였다.

두 번째 Activity-6은 다양한 지식관리 원칙과 절차(Diverse Knowledge Management Principle / Workflow)에 대한 가이드를 만드는 것이다. IPCC에서는 “IPCC Workshop on Engaging Diverse Knowledge Systems (‘26.2.10~12)”을 통해 “Engagement with indigenous knowledge, local knowledge and practitioner knowledge”와 “Methods of Assessment covered the role of artificial intelligence, systematic reviews and ex-post evaluation studies”에 대해 IPCC 기후변화 평가보고서의 작성시 워크숍에서 논의된 데이터 및 절차의 반영에 대한 논의가 있었으며, 현재 Activity-6에서는 이러한 새롭고 다양한 데이터들에 FAIR, CARE 및 FPIC(Free, Prior and Informed Consent)<sup>15)</sup> 등의 원칙 및 프로세스를 적용하기 위한 가이드작성에 대한 향후 추진일정에 대해 논의하였다.

세 번째 Activity-7에서는 “Implement a Subgroup about New Emerging Data Technologies”를 주제로, 현재 IPCC High-Level 그룹에서 내부적으로 기후변화 평가보고서 작성시 인공지능의 활용에 대한 논의가 진행 중이며, 향후 공식적으로 IPCC의 High-Level



그림 4. 제2회 TG-Data 연례미팅 (‘26.7.6~8)

가이드가 제공되면 이와 연계하여 데이터의 보존 및 관리 등과 관련된 인공지능의 활용에 대한 TG-Data의 가이드를 작성할 계획이다.

마지막으로, Activity-10 “Data Management Plan”에서는 “Towards an IPCC Assessment-Level Data Management Framework”보고서의 작성을 통해 WGs와 TSUs의 효율적 협력과 기후변화 평가보고서 작성시 데이터의 전주기에 대한 TG-Data의 역할을 명확하게 하기 위해서 데이터 관리계획의 수립과 향후 일정에 대해 논의하였다.

## 4. 돌아오며

현재 참여하고 있는 IPCC TG-Data 활동은 과학기술 분야의 계산 재현성(Computational Reproducibility) 향상을 위한 활동 중 하나라고 할 수 있다. 계산 재현성은 특정 연구자를 통해서 연구된 결과가 데이터, 분석코드 및 분석환경 등의 공유를 통해 다른 연구자의 컴퓨터에서도 동일한 결과를 얻을 수 있도록 하기 위한 체계를 제시하는 연구로서 과학기술의 지속적인 발전을 위해서 반드시 필요한 분야이다. 저자는 ‘22년부터 K-water연구원 AI연구소에서 AI관련 연구를 시작하기 이전 박사과정(‘17.8~’21.6)동안 수자원분야의 계산 재현성(Computational Reproducibility) 향상을 주제로 연구를 수행하였고, 이러한 연구가 지속적인 과학기술의 발전에 매우 중요한 요소라는 것을 인지는 하고 있었지만 지속적인 활동이나 연구는 수행하지 못하고 있었다. 그러던 와중에 ‘25년 하반기부터 IPCC TG-Data 활동을 통해 기후변화 분석에 대한 계산 재현성 향상을 위한 데이터 및 분석환경 등의 공유체계 개발에 대한 활동을 다시 시작할 수 있었다.

계산재현성의 향상은 다음세대 과학 및 기술자들

이 현재 연구 중이거나 논문에 게재된 연구결과를 다시 분석하여 정확한 분석 프로세스를 파악하고, 개선점이 있다면 정확하게 파악할 수 있도록 분석에 이용된 데이터와 분석코드를 활용하여 동일한 결과를 얻을 수 있는 환경을 제공해줌으로써 논문을 단순히 읽고 끝나는 것이 아니라 직접 데이터를 확인하고, 코드를 검토하여 분석할 수 있게 함으로써 다음세대 과학 및 기술자들이 다음 연구를 한층 더 발전시킬 수 있도록 하는 중요한 밑거름이 된다고 생각한다.

TG-Data의 활동도 이러한 의미에서 정기적으로 발간되고 있는 IPCC의 기후변화 평가보고서가 단순히 보고서로만 끝나는 것이 아니라 전세계 모든 과학자들이 보고서에서 분석하여 제시한 결과(수치, 그림 등)를 공유된 데이터와 분석 코드를 이용해 다시 재현하고 절차를 명확하게 확인할 수 있게 함으로써 기후변화 분석의 신뢰성을 높이고 앞으로 기후변화의 과학적 분석, 저감과 적응에 좀 더 실질적인 대책을 수립할 수 있는 밑거름이 될 수 있을꺼라 생각한다.

앞으로 우리나라도 과학기술의 발전을 위해서 데이터, 코드 및 분석환경의 공유문화를 확산하고, 연구결과물의 계산 재현성을 강화하기 위한 다양한 연구들이 이루어져야 할 것이다. 그리고 AI가 모든 과학기술 전반으로 급격하게 확대되어 가는 상황에서 ① AI 친화적인 FAIR 원칙이 적용된 데이터 공유체계를 확립하고, ② 공개에 제한이 필요한 정보는 CARE 원칙에 따라 체계적 절차에 따라 데이터를 공유하며, ③ 이러한 데이터와 연계하여 클라우드 기반의 지속가능한 분석체계를 확립하여 앞으로 과학 및 기술의 발전이 다음세대로 잘 이어질 수 있는 체계가 이루어지길 바라면서 이 글을 마무리하고자 한다.

## 참고문헌

IPCC SIXTY-THIRD SESSION OF THE IPCC (Lima, Peru, 27~30 October 2025) - PROGRESS REPORTS - Task Group on Data Support for Climate Change Assessments - Selected Members of the TG-Data

IPCC SIXTY-FOURTH SESSION OF THE IPCC (Bangkok, Thailand, 24~27 March 2026) - MATTERS RELATED TO OTHER ACTIVITIES - Task Group on Data Support for Climate Change Assessments

Interactive Atlas (<https://interactive-atlas.ipcc.ch/>)

The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship (Scientific Data, 2016)

The CARE Principles for Indigenous Data Governance (Data Science Journal, 2020)

IPCC Workshop on Engaging Diverse Knowledge Systems (Reading, United Kingdom, 10~12 February 2026)

## 유럽 월류방어벽 기술의 최근 동향 및 적용: 현장 사례 및 평가 체계를 중심으로

Current Trends and Application of Advanced European Flood Barrier Technologies: Focusing on Site Cases and Evaluation Systems



노형주

강원대학교 대학원  
스마트인프라방재학과  
석사과정  
2010james@naver.com



신승숙

강원대학교  
스마트인프라연구소  
연구교수  
cewsook@kangwon.ac.kr



선우재빈

강원대학교 대학원  
스마트인프라방재학과  
박사과정  
tpflawoqls@kangwon.ac.kr



백중철

강원대학교  
건설환경공학부  
교수  
paik@kangwon.ac.kr

### 1. 기후변화 대응 하천 월류방어기술의 공 학적 패러다임

기후변화에 따른 국지성 호우로 인해 계획홍수량을 초과하는 극한 홍수(extreme flood)의 발생 빈도가 급증하고 있다. 기존의 일률적인 제방 증고 방식은 막대한 부지 확보 비용과 공사 기간이 소요될 뿐만 아니라, 도심하천의 수변 접근성 및 도시 경관성을 심각하게 저해한다. 특히 역사·문화 보존지구 및 고밀도 도심 구간에서는 평상시 도시 기능을 유지하면서 비상시에만 홍수 방어높이(flood protection wall height)를 확보할 수 있는 수동조립형(modular) 및 자동형

(automatic) 가동식 홍수방어벽(flood barrier)의 도입이 필수적이다.

유럽에서는 도심 경관 보존과 홍수 방재능력 확보를 동시에 달성하기 위해 고정식 콘크리트 옹벽, 알루미늄 모듈형 스톱로그(stoplog), 부력식 자동 가동형 방어벽(SCFB, self-closing flood barrier) 등 다양한 형태의 복합 방어체계를 발전시켜 왔다. 본 연구진은 국내 '기후변화 적응 수재해 관리 기술개발사업'의 일환으로 유럽 4개국(오스트리아, 체코, 독일, 네덜란드)의 주요 방어선과 연구기관을 방문하여 방어벽의 구조적 메커니즘, 수밀성(watertightness) 확보 방안, 세굴 및 파이프 방지 체계, 그리고 수리모형실험 기반

의 성능평가 기준을 조사·분석하였다.

본 고에서는 오스트리아, 체코, 독일, 네덜란드의 홍수방어시설 설치 현장 및 유럽 최고 수준의 수리연구소(TU Dresden IWD, Deltares) 방문 결과를 바탕으로 선진 월류방어기술의 구조·수리학적 특성을 분석하였다. 조사 결과, 유럽의 월류방어벽 기술은 단일 구조물의 하중 저항에 국한되지 않고, 매립형 기초 레일, 접속부 차수재(gasket), 침투 및 배수 시스템, 그리고 스마트 모니터링이 결합된 '연속적 방어 시스템(continuous defense system)'으로 운용되고 있음을 확인하였다. 본 고에서는 이러한 선진 기술을 국내 하천 특성에 맞게 현지화하기 위한 공학적 검토 항목과 설계기준(KDS) 연계 방안을 제안한다.

## 2. 유럽의 도심형 월류방어벽 설치 현장 및 구조적 특성 분석

### 2.1. 오스트리아 슈피츠: 지반 침투 억제와 연속 기초 결합형 모듈러 시스템

오스트리아 슈피츠(Spitz)는 유네스코 세계유산인 바하우 계곡의 도나우(Donau)강변 마을로, 마을 중심부와 강변 산책로가 도나우강과 바로 맞닿아 있다. 2002년 대홍수 이후 경관을 훼손하지 않으면서 100년 빈도 홍수를 방어할 수 있도록 2010~2011년에 고정식 콘크리트 벽과 이동식 방어벽을 결합한 약 2.2 km의 방어선이 구축되었다. 이 중 고정식 벽체는 약 224 m에 불과하고, 나머지 구간은 평상시 낮은 기초벽 그리고 스테인리스강(stainless steel)으로 제작된 바닥의 앵커플레이트(anchor plate)만 노출되어 있다가 홍수 시 알루미늄 재질의 지주와 차수 패널을 조립하는 이동식 구조이다.

이동식 방어벽에는 독일의 홍수방어시설 전문업체 IBS Technics의 알루미늄 이동식 방어시스템이 적

용되었다. 기초에 매립된 스테인리스 앵커플레이트에 지주를 볼트로 고정하고, 지주 사이에 알루미늄 차수 패널을 쌓은 뒤 상부에서 가압하여 고무패킹으로 수밀성을 확보하는 방식이다. 슈피츠에서는 지주 약 720개와 차수 패널 약 9,500개가 사용되며, 최대 방어수심은 약 4.2 m이다.

그림 1(a)는 방어선이 건물과 만나는 구간으로, 건물 측벽과 일체화된 고정식 벽체 단부에 차수 패널을 끼울 수 있는 수직 홈이 매립되어 있고, 차수재(gasket)의 변형률과 수두차에 따른 차수부 수밀성(watertightness) 및 파이핑(piping)의 수리학적 검증 등을 통해 접속부의 연속성을 확보하고 있다. 그림 1(b)와 (c)는 마을 입구 도로와 강변을 따라 포장면과 같은 높이로 매립된 앵커플레이트이다. 평상시에는 통행에 지장이 없고, 홍수 시에는 이 선을 따라 지주와 차수 패널을 세워 마을 안쪽으로는 월류를 막는 연속된 방어선이 형성된다. 기초 하부에는 최대 약 14 m 깊이의 말뚝과 차수벽(cut-off wall)을 시공해 지반을 통한 침투를 억제하고, 방어벽 안쪽의 침투수는 4개의 펌프장에서 배수한다. 홍수 시에는 지역 소방대 약 70명이 9시간 정도에 걸쳐 전체 방어선을 설치한다.

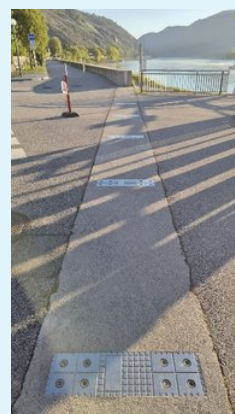
슈피츠 사례는 경관과 수변 접근성이 중요한 세계유산 관광마을에서도 고정식 시설을 최소화하고 이동식 시설을 중심으로 방어선을 구성하면 홍수 안전성과 도시경관을 함께 확보할 수 있다는 점을 보여주었다. 특히 건물, 도로, 산책로 등 기존 도시공간을 방어선의 일부로 활용하고, 평상시에는 기초벽과 앵커플레이트만 남겨 방어시설의 노출을 최소화한 점이 인상적이었다. 동시에 이동식 방어벽의 성능은 차수 패널 자체보다 평상시 보이지 않는 기초와 차수·배수체계, 그리고 설치인력과 시간을 포함한 운영체계에 크게 좌우된다는 점을 확인할 수 있었다. 이는 국내 모듈형 월류방어벽 개발 시 매립형 기초의 표준화, 기존



(a) 건물과 연결된 고정식 벽체 단부



(b) 마을 입구 도로의 매립형 기초



(c) 강변을 따라 이어진 앵커플레이트

그림 1. 오스트리아 슈피츠 도나우강변 고정식·이동식 복합 월류방어시설

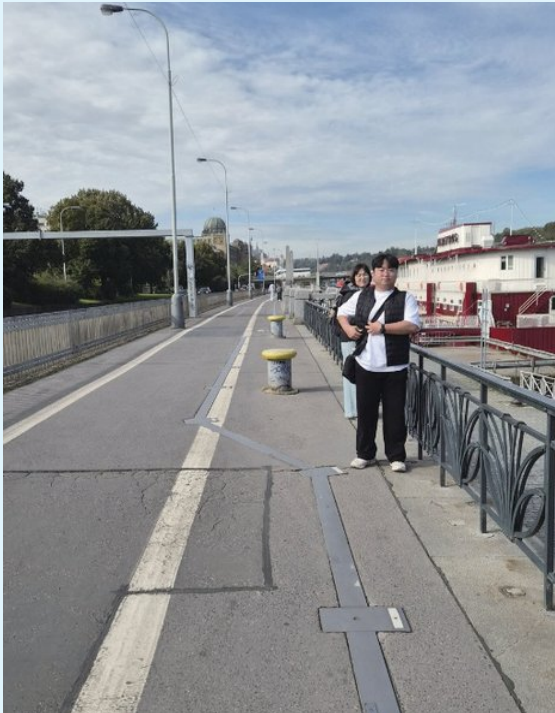
구조물과의 연결부 상세 및 설치인력 산정을 함께 고려해야 함을 시사한다.

## 2.2. 체코 프라하: 문화유산 보호를 위한 우회형 매립 레일 및 모듈화 구조

프라하 블타바(Vltava)강변 방어체계는 역사적 건축물 및 상시 도로 구간을 보호하기 위해 포장면과 수평을 이루는 연속 기초 레일(Base Rail)을 형성하였다. 프라하는 반복적인 홍수피해를 경험한 이후 제방, 고정식 콘크리트 방어벽, 이동식 알루미늄 패널, 수문 및 배수시설 등을 결합한 도시형 홍수방어체계를 구축하였다.

이번에 살펴본 프라하의 방어시설은 평상시에는 낮은 콘크리트 벽이나 기초구조물만 노출되어 도시경관과 보행을 유지하고, 홍수예보가 발령되면 기초부에 지주를 설치한 후 지주 사이에 수평 패널을 순차적으로 조립하는 방식이었다. 고정식 구조물은 상시 방어를 확보하는 동시에 이동식 방어벽의 기초와 단부 지지구조로 활용되고 있었다. 현장에서는 바닥에 매립된 기초 레일이 방어선을 따라 이어지며, 계선주나 가로등 같은 구조물을 만나면 그 둘레를 돌아가도록

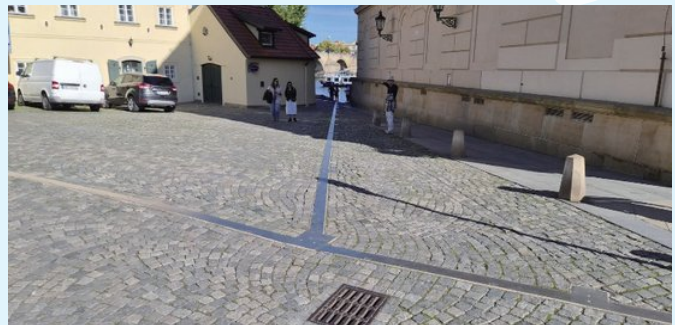
배치되어 있었다(그림 2(a)). 수해 피해가 적은 선착장은 외부에 두고, 도시 가치와 인명 피해 위험이 높은 시가지 경계를 따라 방어선을 배치하였다. 가로등, 계선주 등 지상 구조물 회피 구간에는 이중 분기 레일을 시공하여 방어선의 기하학적 연속성을 확보하였다(그림 2(b)). 역사지구 골목에서는 건물 외벽을 따라서도 레일이 매립되어 있어, 오래된 건축물의 외벽에 방어를 맡기지 않고 건물 앞에 방어벽을 세워 문화유산 자체를 직접 보호하도록 계획되어 있었다(그림 2(c)). 이러한 복합형 구조에서는 패널 자체의 강도뿐 아니라 지주와 기초 사이의 하중 전달, 패널 접합부의 누수 방지, 고정식 방어벽과 이동식 방어벽이 만나는 단부의 연속성이 중요하다. 하중 전달 메커니즘 측면에서 보면, 스톱로그 패널 전면에 가해지는 정수압과 동수압은 수직 지주(post)를 거쳐 하부 매립 앵커에 휨모멘트 및 전단력으로 전달되며, 수평 패널 간에는 고무 가스켓(gasket)의 가압 수밀 구조를 통해 차수 성능을 유지한다. 한편 실제 홍수 시 방어벽을 신속하게 설치하기 위해서 패널과 지주의 보관 장소, 현장 운반경로, 설치인력 및 설치 순서가 사전에 체계화되어 있다.



(a) 구조물을 우회하는 기초 레일



(b) 하단 강변을 제외한 방어선 배치



(c) 건물 외벽을 따라 매립된 기초 레일

그림 2. 체코 프라하 블타바강변 이동식 월류방어벽의 기초 레일과 방어선 배치

현지 홍수방어시설 관련 업체인 EKO-SYSTEM 및 IGPE의 기술·제품 사례도 함께 조사하였다. EKO-SYSTEM은 1999년부터 프라하 도심 여러 구간에 알루미늄 차수 패널 방식의 이동식 방어벽을 단계적으로 설치해 왔으며, 이번에 살펴본 구간 역시 이 업체의 시스템이 적용된 곳이다. 이동식 방어벽은 일정한 규격의 지주와 패널을 반복적으로 결합하는 모듈형 구조가 일반적이며, 방어 높이와 설치구간에 따라 패널 수와 지주 간격을 조정할 수 있다. 이러한 방식은 다양한 현장에 적용하기 쉽다는 장점이 있지만, 반복적인 조립과 해체 과정에서도 부재의 변형과 체결부의 손상이 발생하지 않도록 내구성과 반복조립 성능을 확보해야 한다.

프라하 사례는 홍수방어시설을 독립된 구조물로 설치하기보다 기존 제방과 도로, 보행공간 및 도시시설에 통합하는 것이 중요하다는 점을 보여주었다. 특히

평상시에는 방어시설의 노출을 최소화하면서도 비상 시에는 연속된 방어선을 신속하게 구축할 수 있도록 계획한 점이 인상적이었다. 프라하의 방어체계는 고정식 시설의 안정성과 이동식 시설의 유연성을 결합한 대표적인 도시형 홍수방어 사례로 평가할 수 있다.

### 2.3. 독일 드레스덴: 지형 단차 적응형 기초 및 기존 구조물 연계 방어선

TU Dresden의 Institute of Hydraulic Engineering and Technical Hydromechanics(IWD)는 하천수리, 홍수방어 및 수공구조물과 관련된 연구와 교육을 수행하고 있다. 이번 방문에서는 이동식·가동형 홍수방어시설의 연구동향과 수리실험 방법을 살펴보고, 국내 월류방어벽 개발에 적용할 수 있는 성능평가 항목을 검토하였다.

월류방어벽의 성능평가에서는 계획홍수위에 따른

정수압뿐 아니라 유속에 의한 동수압, 부유물 충돌, 파랑, 월류 및 장시간 수위 유지조건을 함께 고려해야 한다. 또한 방어벽의 변위와 응력, 지주의 휨, 패널 접합부의 누수, 기초지반의 침투 및 세굴 가능성 등을 종합적으로 평가할 필요가 있다. 특히 반복적으로 조립하고 해체하는 모듈형 방어벽은 최초 설치 상태의 성능만으로 안전성을 판단하기 어렵다. 반복조립 후 체결부의 마모와 변형, 고무패킹의 성능 저하, 부재 교체 가능성 및 설치오차가 전체 수밀성과 구조적 안정성에 미치는 영향을 검토해야 한다. 이러한 연구내용은 국내 모듈형 월류방어벽의 설계기준과 성능평가 절차를 마련하는 데 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

독일 드레스덴은 엘베(Elbe)강을 중심으로 역사문화시설과 주거지역이 발달한 도시이다. 강변에는 역사적 건축물, 관광시설, 도로 및 보행공간이 밀집되어 있어 상시 높은 콘크리트 방어벽을 설치하기 어렵다. 이에 따라 드레스덴에서는 도시경관과 공간 이용을 유지하면서 홍수 시 필요한 구간에 이동식 방어벽을 설치하는 방식이 활용되고 있다. 드레스덴 도심의 Terrassenufer 구간에서는 평상시 도로와 보행공간의 기능을 유지하고, 홍수 시 기초부에 지주와 패널을 설치하여 방어고를 확보하는 시설을 살펴보았다.

이 구간의 기초 레일은 차도와 보도를 가로질러 매립되어 있으며, 연석과 보도의 단차를 따라 꺾이며 이어져 노면 높이가 달라지는 곳에서도 방어선이 끊기지 않도록 계획되어 있었다. 방어선이 끝나는 사암 옹벽에는 평상시 블록으로 메워둔 접속부가 마련되어 있어, 홍수 시 이 블록을 빼내고 방어벽 단부를 옹벽에 직접 맞물려 설치하는 구조였다. 지형과 기존 구조물의 조건에 맞춰 기초와 단부를 세밀하게 설계한 점이 돋보였다. 이동식 시설의 성능은 패널의 높이나 강도만으로 결정되지 않는다. 방어벽에 작용하는 정수압(hydrostatic pressure), 동수압(hydrodynamic pressure) 그리고 부유물 충돌하중(impact force)의 기초 지반 전달 매커니즘을 고려하여 지주와 기초를 설계하고, 지면에 매립된 기초부와 체결구가 장기간 손상되거나 이물질로 막히지 않도록 관리해야 한다.

Dresden-Pieschen 구간에서는 엘베강변의 기존 홍수방어 옹벽 위에 이동식 구조물을 얹어 방어고를 높이는 방식을 살펴보았다. 평상시에는 옹벽 상단에 일정 간격으로 매립된 앵커플레이트만 드러나 있으며, 이를 기반으로 이동식 부재를 연속 설치함으로써 기존 옹벽을 증고하지 않고도 방어고를 확보할 수 있다. 도로가 방어선을 가로지르는 지점에는 별도의 이동



(a) TU Dresden 수리실험동의 대형 실험수로



(b) IWD 연구진의 수리실험 설명

그림 3. 독일 TU Dresden IWD 및 수리실험시설 견학

식 차단벽을 설치하며, 드레스덴시는 정기적인 시험 설치를 통해 설치인력을 훈련하고 부재 상태를 점검하고 있다. 방어구간이 길어질수록 개별 모듈의 성능뿐 아니라 전체 방어선의 연속성이 중요해진다. 지형이 변하는 구간, 도로와 출입구를 횡단하는 구간, 기존 제방이나 건축물과 연결되는 단부에서는 국부적인 누수나 흐름 집중이 발생할 가능성이 크기 때문이다. 특히 방어벽 전면의 수위가 상승하면 방어벽에는 수평 수압이 작용하고, 기초부와 접합부에서는 압력차에 의한 침투와 누수 가능성이 증가한다. 작은 틈을 통해 발생한 누수가 집중흐름으로 발달하면 기초지반의 토립자를 유실시키고 국부세굴이나 파이프링으로 이어질 수 있다. 따라서 이동식 방어벽은 상부구조의 강도와 함께 기초지반, 접합부, 단부 및 배수체계를 하나의 연속된 방어시스템으로 검토해야 한다.

드레스덴 사례는 역사도시에서 홍수 안전성과 도시 경관을 함께 확보할 수 있다는 점을 보여주었다. 동시에 이동식 방어시설이 효과적으로 작동하기 위해서는

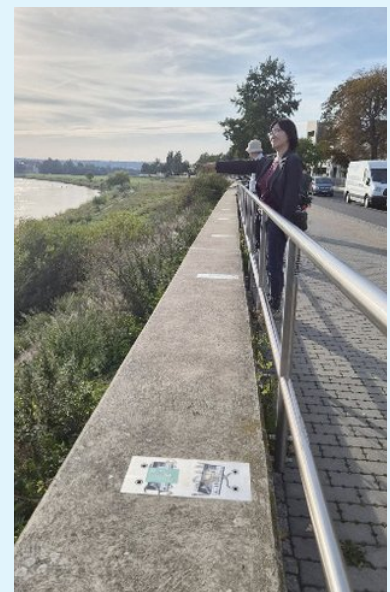
충분한 홍수예보 선행시간과 숙련된 설치인력, 명확한 운영 매뉴얼 및 정기적인 설치훈련이 필요하다는 점도 확인할 수 있었다.

#### 2.4. 네덜란드: 부력식 자동 방어벽(SCFB) 및 수자원 구조물 융합 기술

네덜란드는 저지대 특성에 맞춘 능동형 및 자동 작동형 방어시설을 다수 운용 중이다. 먼저 역사지구인 도르드레흐트(Dordrecht)의 구시가지는 강변을 따라 늘어선 포르스트라트 (Voorstraat), 프린센스트라트(Prinsenstraat), 리데이크(Riedijk) 일대의 건물 자체가 방어선 역할을 하며, 건물 사이의 골목과 출입구처럼 방어선이 끊기는 지점에만 차수 패널을 끼워 막는 방식으로 운영된다. 현장에서도 골목 입구 양쪽 기둥과 바닥에 차수 패널을 끼울 수 있는 홈이 마련되어 있어, 평상시에는 골목의 보행 기능과 경관을 그대로 유지하다가 이례적인 고수위 시에만 골목 사이사이를 막아 연속된 방어선을 형성하는 구조를 확인할 수 있



(a) Terrassenufer 단차를 따라 매립된 기초 레일과 옹벽 접속부



(b) Pieschen 기존 옹벽 상단의 앵커 플레이트

그림 4. 독일 드레스덴 엘베강변 이동식 월류방어벽 현장 견학

었다(그림 5(a)). 시와 지역 물관리위원회는 매년 폭풍 시즌 전 차수 패널을 실제로 설치해 맞춤 상태와 작동 여부를 점검하는데, 건물 리모델링으로 출입구 형태가 달라져 차수 패널이 맞지 않는 사례가 확인되기도 한다는 점은 역사지구 방어선 관리의 현실적인 과제를 보여준다.

호린헴(Gorinchem)은 16세기 말에 조성된 성곽도시로, 메르베더(Merwede)강 쪽 성벽과 제방이 마을 전체를 감싸는 방어선 역할을 한다. 강변 선착장으로 이어지는 성벽 통로는 평상시 차량과 보행자가 오가는 출입구이지만, 바닥에 차단시설의 기초와 홈이 매립되어 있어 고수위 시에는 전동식 수문과 차수 패널로 통로를 막아 마을 안쪽으로 물이 들어오지 않도록 한다(그림 5(b)). 관리기관은 정기적인 폐쇄 훈련을 통해 폐쇄 절차와 자재 상태를 점검하고 있다. 역사적 성곽을 그대로 홍수방어선으로 활용하면서 성문과 같은 개구부만 가동형으로 처리한 점이 인상적이었다.

스파컨뷔르흐(Spakenburg)의 역사적 항구 주변에는 평상시 지면이나 안벽 내부에 수납되어 있다가 수위가 상승하면 물의 부력을 이용해 자동으로 올라오는 부력식 자동 가동형 홍수방어벽이 설치되어 있다. 이 시설은 SCFB(Self Closing Flood Barrier)라 불리는 기술로, 2017년 옛 항구와 새 항구를 따라 약 360m 구간에 설치되었으며 부력식 자동 가동형 방어벽을 주 홍수방어선으로 적용한 사례로 알려져 있다. 현장에서도 항구 안벽을 따라 포장면에 매립된 방어벽 상부가 띠 형태로 길게 이어지며 항구 주변 마을을 감싸고 있는 것을 확인할 수 있었다(그림 5(c)). 평상시에는 방어벽이 포장면과 거의 같은 높이로 유지되므로 보행, 차량 통행 및 항구 경관에 미치는 영향이 작은 곳이다. 홍수 시에는 상승한 물이 방어벽 하부의 공간으로 유입되고, 부력을 받은 방어벽이 수위와 함께 상승하여 방어선을 형성한다. 수위가 낮아지면 방어벽

도 원래 위치로 내려가는 방식이다. 이 시스템은 별도의 현장 조립인력을 크게 줄일 수 있고 갑작스러운 수위 상승에도 대응할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 자동형 시설은 작동 원리가 단순하더라도 장기간 안정적인 성능을 유지하기 위한 관리가 중요하다. 방어벽 하부로 물이 유입되는 통로가 토사나 이물질로 막히지 않아야 하며, 가동부의 부식과 마모, 수납공간의 퇴적물, 방어벽 상승 시의 기울어짐 및 패널 사이의 수밀성을 정기적으로 점검해야 한다. 자동 작동 이후에도 관리자가 상태를 확인하고 필요할 경우 수동으로 개입할 수 있는 비상운영체계가 필요하다. 스파컨뷔르흐 사례는 홍수방어시설이 평상시에는 도시공간 속에 보이지 않도록 수납되면서도 홍수 시에는 스스로 작동할 수 있음을 보여준다. 특히 경관과 수변 접근성이 중요한 도심·관광지역에 적용 가능성이 높은 방식으로 판단되었다.

캄펜(Kampen)은 에이설(IJssel)강의 수위 상승과 주변 수역의 영향을 함께 받는 지역으로, 도시공간과 기존 제방을 연계한 다양한 홍수방어대책이 적용되어 있다. 캄펜은 옛 성벽을 홍수방어선으로 활용하고, 성벽이 도로와 광장, 골목으로 끊기는 지점에만 이동식 차단시설을 두는 '성벽 방어벽'을 운영하고 있다. 골목 입구에서는 양쪽 콘크리트 기둥 사이 바닥에 수문을 수납해 두었다가 고수위 시 들어 올려 통로를 막는 연직 가동형 수문(hefschuif)을 볼 수 있었는데, 소규모 가동보와 유사한 구조였다(그림 5(d)). 이러한 시설은 200여 명의 자원봉사 홍수대응단이 정기 훈련을 통해 운영하고 있다. 현장에서는 기존 제방의 방어능력을 보완하는 가동형 시설과 도로, 건축물 및 수변공간을 이용한 방어선 구성방식을 중점적으로 살펴보았다. 캄펜 사례에서 주목할 부분은 하나의 대형 구조물에만 의존하지 않고, 여러 종류의 방어시설을 연속적으로 연결해 도시 전체의 홍수방어선을 구성한다는



(a) 도르드레흐트 골목 입구의 차수 패널 설치 홈



(b) 호린험 통로의 차단시설 기초



(c) 스파켄뷔르흐 항구를 따라 매립된 부력식 자동 가동형 방어벽(SCFB)



(d) 캄펜 골목 입구의 연직 가동형 수문(hefschuif)

그림 5. 네덜란드 도르드레흐트, 호린험, 스파켄뷔르흐, 캄펜의 역사지구 홍수방어시설 현장 견학

점이다. 이때 출입구, 교량 접속부, 도로 횡단부 및 건축물 연결부는 방어선이 단절되기 쉬운 지점이므로 각 구간의 폐쇄방법과 담당 주체가 명확해야 한다. 또한 자동·가동형 시설을 도입하더라도 수위계와 홍수 예보시스템, 시설의 작동상태를 확인하는 센서, 관리자에게 정보를 전달하는 통신체계가 함께 구축되어야 한다. 이는 현재 국내에서 개발하고 있는 AI·IoT 기반 스마트 월류방어벽에도 중요한 참고가 된다. 자동 작동 여부뿐 아니라 작동 전후의 상태, 변위, 누수 및 기초부 이상을 실시간으로 확인할 수 있어야 실제 홍수 상황에서 신뢰성 있는 방어시설로 활용할 수 있기 때문이다.

### 3. 국내 기술 개발 및 현지화(localization)를 위한 공학적 시사점

유럽의 현장과 연구시설을 살펴본 결과, 월류방어 시설은 단순히 제방 위에 벽체를 추가하는 기술이 아니라 구조물, 기초지반, 예·경보, 운영 및 유지관리가 결합된 종합적인 홍수방어시스템으로 접근해야 한다. 유럽의 선진 사례 분석 결과를 바탕으로, 국내 모듈형·가동형 월류방어벽 기술 개발 시 반영해야 할 공학적 제언은 다음과 같다.

첫째, 현장의 특성에 따라 고정식, 모듈러 이동식 및 원격제어 자동형 시설의 적용조건을 구분해야 한다. 충분한 설치시간과 인력을 확보할 수 있는 지역

에는 이동식 시설을 적용할 수 있지만, 수위가 빠르게 상승하거나 설치인력의 접근이 어려운 지역에서는 자동형 시설의 적용을 검토할 필요가 있다. 도시경관과 보행·교통 기능이 중요한 지역에서는 매립·수납형 시설이 유리할 수 있다.

둘째, 모듈과 지주의 구조적 안전성뿐 아니라 반복 조립 성능을 확보해야 한다. 이동식 방어벽은 설치와 해체가 반복되므로 체결부의 마모, 부재의 변형, 설치 오차 및 패킹의 성능저하를 고려한 내구성 평가가 필요하다.

셋째, 기초부·접합부·단부의 수밀성과 방어선의 연속성을 검증해야 한다. 방어벽 본체의 강도가 충분하더라도 기초나 접합부에서 누수와 토사 유실이 발생하면 전체 시스템의 안전성이 저하될 수 있다. 기존 제방, 교량, 도로 및 건축물과 연결되는 구간을 포함하여 전체 방어선의 성능을 평가해야 한다.

넷째, 설치시간, 필요인력, 보관·운반 및 비상운영 체계를 기술개발 단계부터 고려해야 한다. 이동식 시설은 짧은 시간에 정확하게 설치할 수 있어야 하며, 자동형 시설은 센서와 통신 장애 또는 가동부 고장에 대비한 수동 작동방법을 갖추어야 한다.

다섯째, 수리실험과 반복작동시험 및 현장실증을 통한 단계적인 성능 검증을 통해 설치 매뉴얼을 표준화해야 한다. 정수압 조건뿐 아니라 유속, 파랑, 부유물 충돌, 누수, 월류 및 세굴 등 실제 홍수에서 발생할 수 있는 복합적인 조건을 재현해야 한다. 최종적으로는 실제 제방과 유사한 현장에서 장기간 운영하면서 구조적 안전성, 수밀성, 작동 신뢰성 및 유지관리성을 검증해야 한다.

마지막으로 국내 하천과 제방의 구조적 특성, 집중호우에 따른 빠른 수위 상승, 홍수예보 선행시간 및 관리기관의 운영 여건을 반영한 기술 현지화가 필요하다. 유럽에서 효과적으로 운영되는 시설이라도 국내 제방 형식과 홍수특성이 다르면 동일한 성능을 보장하기 어렵다. 따라서 유럽의 구조기술과 실증체계를 참고하되 국내 현장자료와 수리실험을 기반으로 설계기준과 성능평가 방법을 마련해야 한다.

#### 4. 맺음말

유럽의 선진 월류방어기술은 단순한 차수 구조물의 제작에 그치지 않고, 도시 공간과의 친화성, 매립 기초의 수밀성, 신속한 가동성, 수리실험 기반의 다각적 성능검증 및 체계적인 유지관리가 결합된 '통합 수재해 방어 시스템'으로 구현되고 있었다.

국내 하천은 유럽 하천에 비해 유역의 경사가 가파르고 홍수 도달시간이 매우 짧으며 집중호우의 강도가 크다. 따라서 유럽의 선진 기술 구조와 실증 체계를 벤치마킹하되, 국내의 급격한 수위 변동 특성과 지반 조건을 반영한 "한국형 스마트 모듈러/가동식 월류방어벽 표준 설계 지침"을 정립하는 것이 향후 수자원 공학 분야의 핵심 과제가 될 것이다.

#### 감사의 글

본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 기후변화 적응 수재해 관리 기술개발 사업(R&D)의 지원(RS-2026-25501299)을 받아 연구되었습니다.

## 참고문헌

- Marktgemeinde Spitz, Hochwasserschutz Spitz  
EKO-SYSTEM s.r.o., Mobile Flood Protection of the Capital City of Prague terra Infrastructure,  
Protection of the Historic City Centre in Dresden  
Pieschen-Aktuell, 2026.4.30., Probeaufbau für Hochwasserschutz in Pieschen  
DordtCentraal, 2026.9.30., Vloedschottentest houdt de binnenstad beschermd tegen  
hoogwater  
De Stad Gorinchem, 2020.9.23., Waterpoort Gorinchem sluit als oefening op 29 september  
Aggeres, 2024.1.23., Port of Spakenburg  
Waterschap Drents Overijsselse Delta, 2023.9.4., Hoogwaterbrigade traint met  
'stadsmuurwaterkering' in Kampen

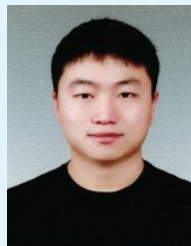
## 네덜란드 IAHR-SHCS 2026참가기



**신 승 속**  
강원대학교  
스마트인프라연구소  
연구교수  
cewsook@kangwon.ac.kr



**노 형 주**  
강원대학교 대학원  
스마트인프라방재학과  
석사과정  
2010james@naver.com



**선우재빈**  
강원대학교 대학원  
스마트인프라방재학과  
박사과정  
tpflawoqls@kangwon.ac.kr



**백 중 철**  
강원대학교  
건설환경공학부  
교수  
paik@gwnu.ac.kr

### 1. 워크숍 소개

제3회 IAHR International Workshop on Scour around Hydraulic and Coastal Structures(IAHR-SHCS)은 2026년 9월 28일부터 10월 1일까지 네덜란드 델프트의 Deltares에서 개최되었다. 2023년 중국 난징에서 시작한 이 워크숍은 2024년 청두에 이어 세 번째로 열리는 국제학술행사로 국제수리환경 공학회 (IAHR)의 Scour Research Working Group을 중심으로 연구자와 실무자들이 한자리에 모이는 장이다. 이번 워크숍의 목적은 수공·해안구조물 주변 세굴과 세굴보호에 관한 최신 연구동향 및 과학적 성과를 실제 설계지침으로 연결하는 데 있다. 기조강연과 기술세션, 포스터 발표(Poster pitches), 공동 작업 세

션, Deltares 연구시설 견학을 통해 세굴의 발생기작, 예측·평가, 수치 및 수리모형실험, 현장 모니터링, 보호공법과 사례조사 등이 폭넓게 다뤄졌다. 특히 복잡한 수리·지반 조건에서 구조물과 유동, 하상재료가 서로 영향을 주는 과정을 통합적으로 살펴볼 수 있는 기회였다.

본 워크숍 참가는 교량, 수문, 방파제, 해상풍력기초 등의 수공구조물에서 발생하는 세굴 문제의 연구 성과들을 홍수 시에 제방의 범람에 따른 피해를 줄이고자 설치하는 월류방어벽 주변의 세굴보호에 적용할 수 있는지 검토하자 한다. 월류방어벽은 홍수 시 제방의 여유고를 신속히 확보하는 시설이지만, 방어벽 자체의 구조강도만 평가해서는 안전성을 충분히 설명할 수 없다. 따라서 방어벽과 제방의 접합부, 기초지반,

단부와 연결부, 월류가 발생하는 배후면까지 하나의 흐름-구조물-지반 시스템으로 보고 제방 안정에 영향을 미치는 세굴의 수리학적 특성과 보호공법 기술 및 방법을 모색하는데 도움을 얻고자 한다.

## 2. 수공·해안구조물 주변 세굴의 발생

세굴은 흐름에 의해 하상재료 또는 기초지반의 토사가 침식 및 이송과정을 거치면서 지반고가 낮아지는 현상이다. 구조물이 흐름을 가로막으면 유선이 급격히 휘고 구조물 전면에는 하강류(downflow)와 말발굽 와류(horseshoe vortex)가 형성된다. 측면에서는 흐름이 수축하며 유속과 전단응력이 증가하고, 후면에서는 흐름박리(flow separation)와 후면와류(lee vortex)가 발생되어 입자의 이탈과 부분적 퇴적을 촉진한다. 이러한 국부적 흐름 구조가 하상재료의 저항력보다 커질 때 세굴공이 발달한다. 세굴의 규모와 진행속도는 유속, 수심, 난류강도, 흐름의 지속시간뿐만 아니라 입경분포, 점착성, 다짐도와 층상구조, 구조물의 형상·배치에 따라 달라진다. 같은 평균유속에서도 구조물의 모서리나 단부처럼 흐름이 집중되는 곳에서는 순간전단응력(instantaneous shear stress)이 크게 나타날 수 있다. 따라서 단일 경험식이나 최대유속만으로 위험을 판단하기보다는, 국부 유동장과 지반조건을 함께 반영한 평가가 필요하다.

이번 워크숍의 주요 연구주제는 이러한 복잡성을 반영하였다. 물리모형실험은 세굴공의 형성과 평형세굴심(equilibrium scour depth), 보호공의 변형을 직접 관찰하는 데 유용하며, 수치모형은 구조물 주변의 3차원 난류와 유사이송을 공간적으로 분석하는 데 활용되었다. 현장에서는 음향측심, 지형스캔, 매설형 센서와 영상계측 등을 이용해 홍수·파랑 조건에서 세굴의 시간적 변화를 추적하였다. 최근에는 단일 계측값

보다 여러 자료를 결합하여 이상 징후를 조기에 탐지하고, 설계와 유지관리의 불확실성을 줄이는 방향으로 연구가 발전하고 있었다.

## 3. 세굴 연구에 대한 기초강연과 패널토론

첫날 기초강연은 선박에 의한 침식과 지반 특성의 중요성을 제시하였다. Michel Ruyter의 강연은 안벽과 운하 바닥 주변에서 발생하는 선박 유발 침식에 관한 최근 연구를 주제로 하였고, Nina Stark의 강연은 세굴 평가에서 지반공학적 특성이 갖는 역할을 다루었다. 이는 세굴을 평가할 때 외부 흐름의 크기와 구조물 형상뿐 아니라, 바닥 재료의 침식 저항과 지반 조건을 함께 고려해야 함을 강조했다. 둘째 날에는 Michele Palermo가 하천 내 구조물의 세굴과 향후 ASCE 실무 매뉴얼을 주제로, Yuzhu Pearl Li가 파랑에서 해저지반 반응과 세굴에 이르는 완전 연성모델링을 주제로 기초강연을 진행하였다. 패널토론을 살펴보면 인공지능과 세굴보호 지침에 관한 전체 패널, 수치모델링, 해상시설의 현장 경험과 미래 경향, 수리모형실험의 미래, 하천·해안·해양의 세굴 저감 전략에 관한 내용을 다루고 있었다. 세굴보호 지침의 수요와 공급을 별도 의제로 다룬 점은 연구 성과를 설계와 관리에 활용 가능한 형태로 연결하려는 관심을 보여주었다. 그림 1은 세굴 및 하상재료 반응에 관한 기초강연과 세굴 연구를 위한 AI 기술에 대한 패널토론을 진행하는 모습이다. 기초강연과 패널토론이 세굴에 영향을 미치는 흐름과 토사 이동의 해석을 넘어 지반 반응과 실무 설계의 접점을 넓혀 가고 있음을 확인할 수 있었다.



세굴 및 하상재료 반응에 관한 기초강연



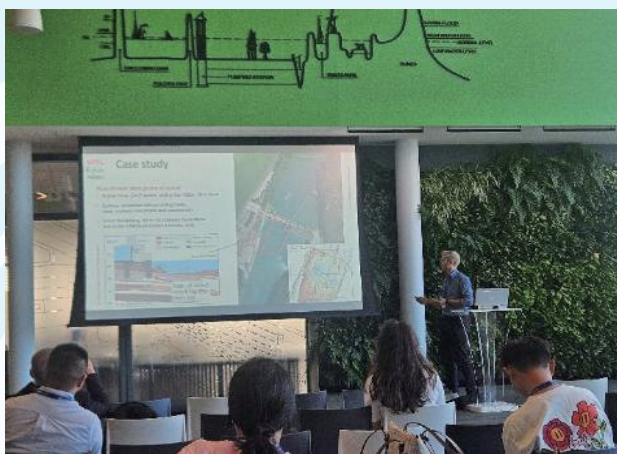
세굴 연구를 위한 AI 기술에 대한 패널 토론

그림 1. Deltares IAHR-SHCS 워크숍의 인상 깊었던 기초강연 및 패널 토론

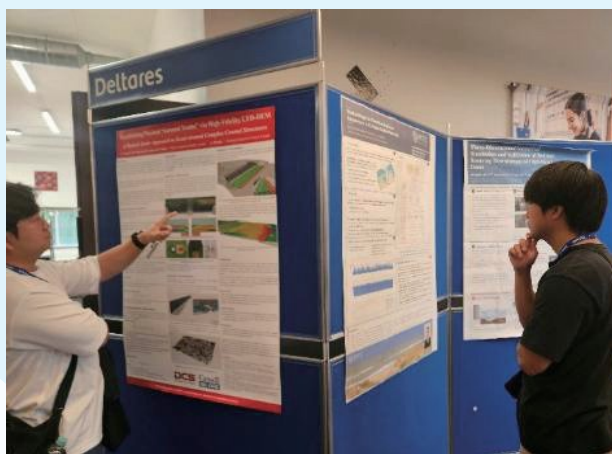
#### 4. 세굴 연구에 대한 세션별 주요 발표 내용

이번 워크숍에서는 수리모형실험, 수치해석 및 AI, 친환경 세굴보호, 실시간 모니터링을 중심으로 다양한 세굴 연구가 발표되었다. 수리모형실험 분야에서는 선박 추진기, 모노파일(mono pile), 수문, 수중보, 해저 관로 및 케이블 등 다양한 구조물을 대상으로 세굴의 발생과 시간적·공간적 변화를 분석하고, 축척효과를 고려하여 실험 결과를 실제 현장조건으로 확장

하는 연구가 소개되었다. 수치해석 분야에서는 CFD와 현장 계측자료의 비교·검증과 함께 머신러닝 및 데이터 기반 기법을 활용한 세굴심 예측과 위험도 평가가 주요 연구 방향으로 제시되었으며, 인공지능 활용에 따른 데이터의 대표성, 극한조건 예측 및 불확실성 문제도 논의되었다. 또한 해상풍력 기초와 관로 등의 세굴보호 연구에서는 사석뿐 아니라 다공성 구조, 패각(패류의 껍질)의 함유율 및 생태서식 구조 등을 활용하여 수리적 안정성과 생태적 기능을 동시에 확



(a) 콘크리트 블록을 이용한 세굴보호 세션 발표 사례



(b) 세굴 실험자료와 고정밀CFD 비교 포스터 발표 사례

그림 2. IAHR-SHCS 워크숍의 인상 깊었던 대표적인 발표 사례

보하려는 친환경 보호기술이 주목을 받았다. 이와 함께 광섬유 센서와 현장 계측을 이용한 실시간 세굴 모니터링 및 위험도 평가 연구가 소개되어, 향후 세굴 연구가 실험·수치해석·AI 예측·현장 모니터링을 연계한 통합적인 안전관리 기술로 발전하고 있음을 확인할 수 있었다. 그림 2는 IAHR-SHCS 워크숍에서 인상 깊었던 대표적인 발표 사례로 일반 세션에서 발표한 하천 댐구조물의 하류부에 콘크리트 블록을 이용한 세굴보호에 대한 연구 사례와 포스터에서 발표한 복잡한 해양 구조물의 세굴 실험자료와 고정밀CFD-DEM의 결과를 비교한 연구 사례를 보여준 것이다.

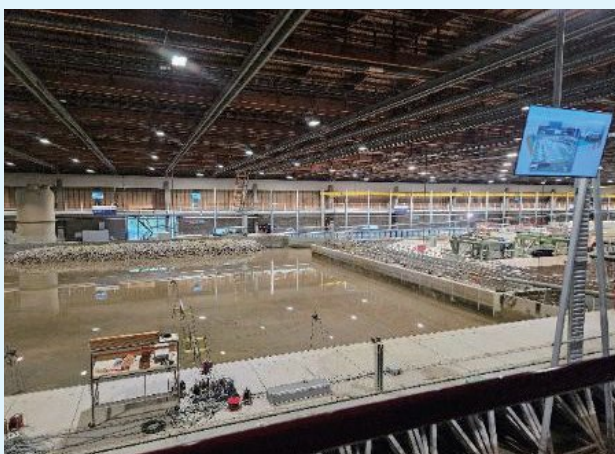
## 5. Deltares의 대형 수리실험

네덜란드 델프트에 위치한 Deltares는 하천·해안·홍수방어 및 지반 분야의 대표적인 연구기관으로, 실제 수리현상을 대규모로 재현할 수 있는 다양한 실험 시설을 운영하고 있다. 이번 현장견학에서는 파랑과 흐름, 구조물 및 지반의 상호작용을 검증하기 위한 대형 수리실험시설과 계측시스템을 살펴보았다. 특히 50×50 m 규모의 Delta Basin은 다양한 방향의 파랑과

흐름을 재현하여 방파제, 해안·해양구조물, 세굴 및 이동상 등을 3차원적으로 연구할 수 있는 대형 실내 실험시설이다(그림 3). 또한 Atlantic Basin은 길이 75 m, 폭 8.7 m 규모로 파랑과 흐름을 동시에 발생시킬 수 있으며, 모래 이동상을 이용한 해상풍력 기초의 세굴 및 세굴보호공 연구 등에 활용되고 있다. Deltares 캠퍼스 외부에는 약 291m 길이의 Delta Flume이 설치되어 있어 제방·사구·방파제 등 홍수방어시설에 최대 4.5 m의 극한파랑을 발생시켜 실규모에 가까운 조건에서 성능과 파괴과정을 검증할 수 있다. Deltares의 이러한 대형 실험시설은 축척효과를 최소화하면서 구조물에 작용하는 파력과 압력, 월류, 세굴 및 변형을 정밀하게 계측할 수 있어, 수치해석 및 현장실증에 앞서 수공구조물의 안전성과 성능을 검증하는 핵심 연구기반으로 활용되고 있다.

## 6. Maeslantkering 현장견학

현장견학에서는 Maeslantkering 인근의 홍수방어 전문 전시·교육시설인 Keringhuis를 방문하였다(그림 4). 이곳에서는 네덜란드의 제방과 가동식 방벽,



세계 최대 대규모의 실험시설 Delta Basin



최대 규모의 대형 파랑수로인 Delta Flume

그림 3. 네덜란드 Deltares의 수리실험 시설

하천 및 저류공간을 연계한 종합적인 홍수관리 체계를 확인할 수 있었다. 특히 북해의 폭풍해일과 라인·마스강의 높은 하천유량이 동시에 발생하는 복합홍수에 대한 대응체계가 인상적이었다. 세계 최대 규모의 가동식 폭풍 해일 방벽인 Maeslantkering은 평상시 항로를 개방하고, 폭풍해일 내습 시 거대한 가동식 방벽을 닫음으로서 로테르담 지역을 보호한다. 방벽의 가동 원리는 비어 있는 방벽과 지지 파이프의 내부에 물을 적절히 채우고 비움으로서 부력을 이용하는 것이며, 방벽을 열고 닫는 시간은 각각 2시간이 소요된다. 방벽을 닫은 후에도 상류 유역으로부터 유입되는 하천수를 처리하기 위해 우회수로와 Volkerak-Zoommeer 등의 저류공간을 활용한다. 이는 개별 방어시설뿐 아니라 예측·모니터링·자동제어와 수계 전체를 연계하여 홍수를 관리하는 네덜란드의 선진 홍수방어체계를 보여준다. 이번 방문을 통해 국내 가동식 홍수방어시설 개발에서도 구조적 안정성과 함께 신속한 전개, 수밀성, 자동제어 및 기존 홍수방어체계와의 연계가 중요함을 확인하였다.

## 7. 국내 월류방어 기술 연구에 주는 시사점

이번 세굴 워크숍 프로그램은 월류방어벽 자체를 중심 주제로 다루지는 않았지만, 구조물 주변 흐름과 지반 침식의 상호작용을 검토한다는 점에서 국내 월류방어 기술 연구와 연결된다. 필자의 연구 관점에서는 방어벽의 차수 및 구조 성능에 더해, 설치 지점 주변에서 정수압과 동수압이 집중되는 조건과 기초부 지반으로의 하중 전달 메커니즘 그리고 구조물 주변 침식 가능성을 함께 평가할 필요가 있다. 연결부나 단부에서의 집중 유출, 누수가 지반에 미치는 영향 등은 향후 시험과 해석으로 확인할 수 있는 연구 주제다. 이를 위해 월류 및 누수 조건의 수리모형실험, 주변 유동과 토사 이동에 대한 수치해석, 수위·압력·변형 및 지반 변화의 계측을 연결하는 접근을 고려할 수 있다. 모듈형 방어벽은 설치 지점의 지형과 지반 조건이 달라질 수 있으므로, 적용 가능한 조건과 추가 보호가 필요한 조건을 구분할 수 있는 실증자료가 중요하다. 이 부분은 워크숍 발표의 직접적인 성과가 아니라, 프로그램의 연구 주제를 국내 월류방어벽 개발 과



(a) 네덜란드의 하천 및 해안 대규모 홍수 피해 사례



(b) 세계 최대 규모의 가동식 홍수방어벽 Maeslantkering

그림 4. 네덜란드 Maeslantkering 인근의 홍수방어 전문 전시·교육시설인 Keringhuis 견학

제에 연결한 필자의 해석이다. Deltares 워크숍의 프로그램은 세굴 연구가 수리학과 지반공학, 수치해석, 계측 및 보호공 설계를 함께 다루고 있다. 국내에서도 개별 실험이나 예측모델의 성과를 현장자료와 연결하고, 설계 및 유지관리에 활용할 수 있는 근거로 관련 기술을 축적할 필요가 있다. 이번 참가를 통해 살펴본 연구 주제들은 수리구조물 주변 지반의 안정성을 보다 폭넓게 검토하고, 국내 조건에 맞는 월류방어벽 설계 제작 및 설치 기술을 구체화하는 데 참고가 될 것이다.

## 8. 맺음말

세굴은 눈에 보이는 하상 저하만을 의미하지 않는다. 세굴은 구조물 주변의 복잡한 흐름, 제방 내부의 침투와 토립자 이동, 기초의 지지력 변화가 서로 연결된 결과이다. IAHR-SHCS 워크숍은 세굴 메커니즘에 대한 과학적 이해를 실제 구조물의 설계와 유지관리

로 연결하려는 국제 연구동향을 살펴볼 수 있는 자리였다. 월류방어벽 기술 역시 방어벽 자체의 강도와 수밀성만으로 성능을 판단해서는 안 된다. 기초 제방과의 접합부, 단부와 연결부, 월류 시 배후면에서 발생하는 압력·침투·집중흐름과 국부세굴을 함께 검토해야 비로소 구조적 안정성을 확보할 수 있다. 이번 워크숍에서 확보한 연구성과들과 실무적 논의 결과를 국내 월류방어벽의 설계, 성능평가, 실증 및 모니터링 체계에 반영한다면, 기후변화에 따른 홍수 위험의 증가에 신속하게 대응하기 위한 신뢰성 높은 월류방어벽을 개발할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 기후변화 적응 수재해 관리 기술개발사업(R&D)의 지원(RS-2026-25501299)을 받아 연구되었습니다.

## 참고문헌

IAHR Working Group on Scour Research, '3rd IAHR-SHCS International Workshop on Scour around Hydraulic and Coastal Structures,' 2026

# 호남 반도체 클러스터 용수는 충분한가? 기후변화에 따른 영산강·섬진강 기준갈수량과 물배분 안정성



**성 장 현**

강원대학교 방재전문대학원  
조교수  
jhsung@kangwon.ac.kr



**김 진 수**

국회입법조사처  
입법조사연구관  
JinsooKim@assembly.go.kr



**강 우 철**

국립공주대 스마트인프라공학과  
조교수  
kang@kongju.ac.kr

## 1. 호남 반도체 클러스터와 용수 공급의 새로운 과제

호남권 반도체 산업단지 조성이 추진되면서 안정적인 용수 확보가 중요한 기반조건으로 부상하고 있다. 반도체 산업은 생산공정의 특성상 상당한 규모의 공업용수를 지속적으로 사용하기 때문에 단순히 연간 이용 가능한 수량을 확보하는 것만으로는 충분하지 않다. 평상시뿐 아니라 가뭄과 같은 불리한 수문조건에서도 필요한 수량을 안정적으로 공급할 수 있는지가 산업단지의 장기적인 운영 안정성을 결정하는 중요한 요소가 된다.

현재 정부는 호남 반도체 산업단지에 필요한 하루

65만 톤의 공업용수를 동북담에서 30만 톤, 장흥담·보성강담·나주담에서 각각 10만 톤, 주암담에서 5만 톤을 공급하는 방안을 추진하고 있다(그림 1 참조). 이와 함께 광주제1하수처리장에서 하루 30만 톤 규모의 재이용수를 추가로 확보하는 방안도 검토하고 있다. 여러 수원을 연계하여 단일 댐에 대한 의존도를 줄이고 공급원을 다변화한다는 점에서 합리적인 접근이라고 볼 수 있다.

그러나 최근 국회입법조사처는 이와 같은 용수공급 계획의 안정성을 보다 신중하게 검토할 필요가 있다는 의견을 제시하였다. 최근 5년간 주요 댐의 유입량 변동폭이 상당히 크게 나타났고, 2024년 보성강담 유입량은 최근 5년 평균보다 84% 많았던 반면 2022년

장흥댐 유입량은 평균보다 72.2% 적었다. 또한 정부가 평가한 생활·공업용수 이수안전도에서도 영산강 수계가 상대적으로 낮은 수준으로 평가되었다.

정부는 이에 대해 단기간의 유입량 변화만으로 장기적인 물 공급능력을 판단하기는 어렵다는 입장을 제시하고 있다. 동북댐 저수용량 확대, 섬진강과 동북댐을 연결하는 비상도수로 설치, 주암댐·보성강댐·장흥댐의 연계운영 등을 통해 가뭄 상황에서도 대응능력을 높일 수 있다는 설명이다. 현재의 이수안전도 역시 기존 시설조건을 전제로 한 결과이므로 향후 수자원 인프라가 확충될 경우 개선될 가능성이 있다는 것이다.

이러한 논쟁은 단순히 어느 한쪽의 판단이 맞고 다른 쪽이 틀렸다는 문제라기보다 용수 안정성을 평가하는 관점의 차이로 이해할 필요가 있다. 한쪽에서는

현재의 수문조건과 기존 시설을 중심으로 위험을 평가하고 있으며, 다른 한쪽에서는 향후 시설 확충과 수계 연계운동을 포함한 공급능력을 중요하게 보고 있다. 그러나 장기적인 산업용수 공급 안정성을 판단하기 위해서는 여기에 한 가지 질문을 추가할 필요가 있다. 기후변화로 영산강과 섬진강의 갈수기 유량 자체가 변화한다면 현재 이용하고 있는 물배분 기준과 공급계획은 미래에도 동일한 안정성을 유지할 수 있는가 하는 문제이다.

## 2. 기후변화 시대, 과거의 기준갈수량은 유효한가

수자원 공급능력을 평가할 때 연평균 강수량이나 연간 총유출량은 중요한 정보이다. 그러나 생활용수와



그림 1. 호남권 주요 수자원시설 현황

※ 자료: 환경부·K-water, 영산강·섬진강유역 가뭄백서 2022-2023, 2023.10. p.32.

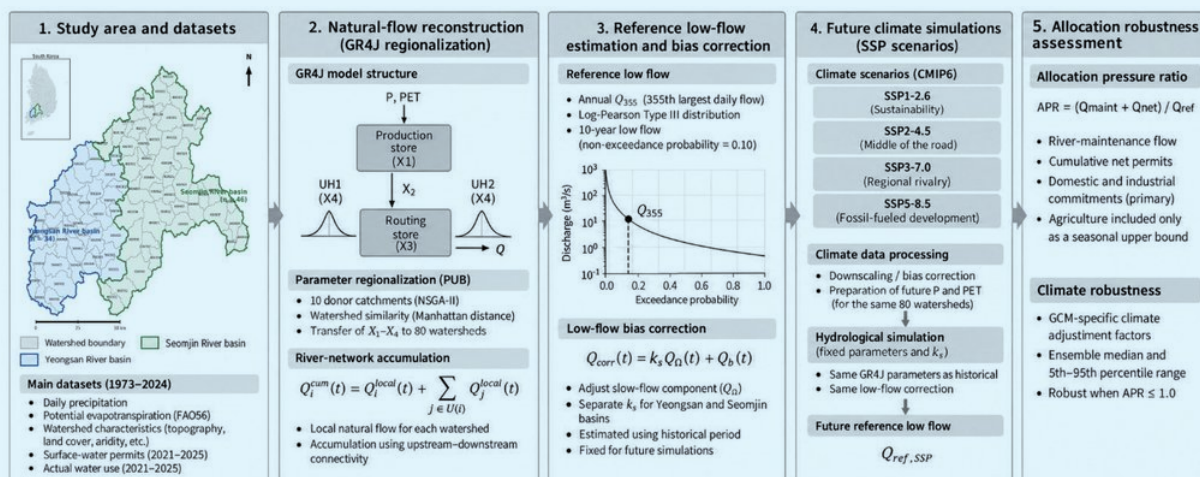


그림 2. 기후변화에 따른 기준갈수량 및 물배분 안정성 평가체계

산업용수와 같이 연중 지속적인 공급이 필요한 용수의 안정성을 판단할 때에는 평균적인 해에 얼마나 많은 물이 존재하는가보다 물이 가장 부족한 시기에 어느 정도의 유량을 확보할 수 있는지가 더욱 중요하다.

하천수 관리에서 이러한 갈수기의 물 이용 가능성을 나타내는 대표적인 지표가 기준갈수량이다. 기준갈수량은 하천수 사용허가, 하천유지유량 및 물배분 가능량을 판단하는 데 중요한 기준으로 활용된다. 문제는 현재 사용되는 기준갈수량이 기본적으로 과거의 수문자료와 통계적 특성에 기반하고 있다는 점이다.

전통적인 수자원 계획에서는 과거의 강우와 유량의 통계적 특성이 미래에도 일정하게 유지된다는 정상성에 상당 부분 의존해 왔다. 그러나 기후변화는 연평균 강수량뿐 아니라 강수의 계절분포, 무강우 기간, 증발산량, 유역저류 및 갈수기의 유출특성까지 변화시킬 가능성이 있다. 따라서 과거에 산정된 기준갈수량을 장기간 고정된 행정적 기준으로 사용하는 경우 실제 하천에서 확보 가능한 물의 양과 행정적으로 인정하는 물배분 능력 사이에 차이가 발생할 수 있다.

이러한 문제를 분석하기 위해 영산강 34개, 섬진강 46개 등 총 80개 표준유역을 대상으로 자연유량과 기

준갈수량을 산정하였다. 자연유량 산정에는 일 단위 GR4J 강우-유출모형을 이용하였으며, 강수량과 잠재증발산량을 입력자료로 활용하였다. 댐 운영, 취수, 회귀수 등 인위적인 영향을 포함하고 있는 관측유량 대신 자연상태의 유량을 복원하고, 표준유역 간 상·하류 연결관계에 따라 유량을 누적하였다.

복원된 일유량에서는 연도별 Q355를 추출하고 Log-Pearson Type III 확률분포를 적용하여 기준갈수량을 산정하였다(그림 2). 초기 모의 결과에서 공식 기준갈수량과 모의 기준갈수량 사이의 공간적 상관성은 매우 높게 나타났다. 상관계수는 영산강에서 약 0.993, 섬진강에서 약 0.998로 나타나 유역별 갈수량의 상대적인 크기와 공간적 분포를 잘 재현하였다. 반면 절대적인 기준갈수량은 상당히 과소추정되는 문제가 나타났다.

이에 전체 유량을 일률적으로 확대하기보다 GR4J의 저유량에 영향을 미치는 slow-flow 성분을 보정하였다. 그 결과 평균절대오차는 영산강에서 약 85%, 섬진강에서 약 92% 감소하였다. 보정 이후 영산강 최하류와 섬진강 최하류의 기준갈수량 역시 공식값에 상당히 근접하였다. 이러한 과정의 목적은 현재의 공

식 기준갈수량을 단순히 재현하는 데 있지 않다. 과거에 검증된 동일한 수문모형을 미래 기후조건에 적용함으로써 기후변화가 기준갈수량 자체를 어느 정도 변화시키는지 정량적으로 평가하는 데 보다 중요한 의미가 있다.

### 3. 영산강·섬진강의 미래 기준갈수량 변화

미래 기준갈수량은 18개 GCM(Global Climate

Model)을 이용하여 SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 및 SSP5-8.5의 네 가지 기후변화 시나리오에 대해 분석하였다. 미래기간은 근미래, 중기 미래 및 먼 미래로 구분하였으며, 개별 기후모형에서 계산된 기준갈수량의 변화율을 이용하여 양상별 특성을 평가하였다.

분석결과 미래의 기준갈수량 변화는 단시간이 지남에 따라 단순히 지속적으로 감소하는 형태는 아니었다. 시나리오와 미래기간, 표준유역에 따라 증가와 감소가 서로 다르게 나타났으며, 높은 온실가스 배출 시

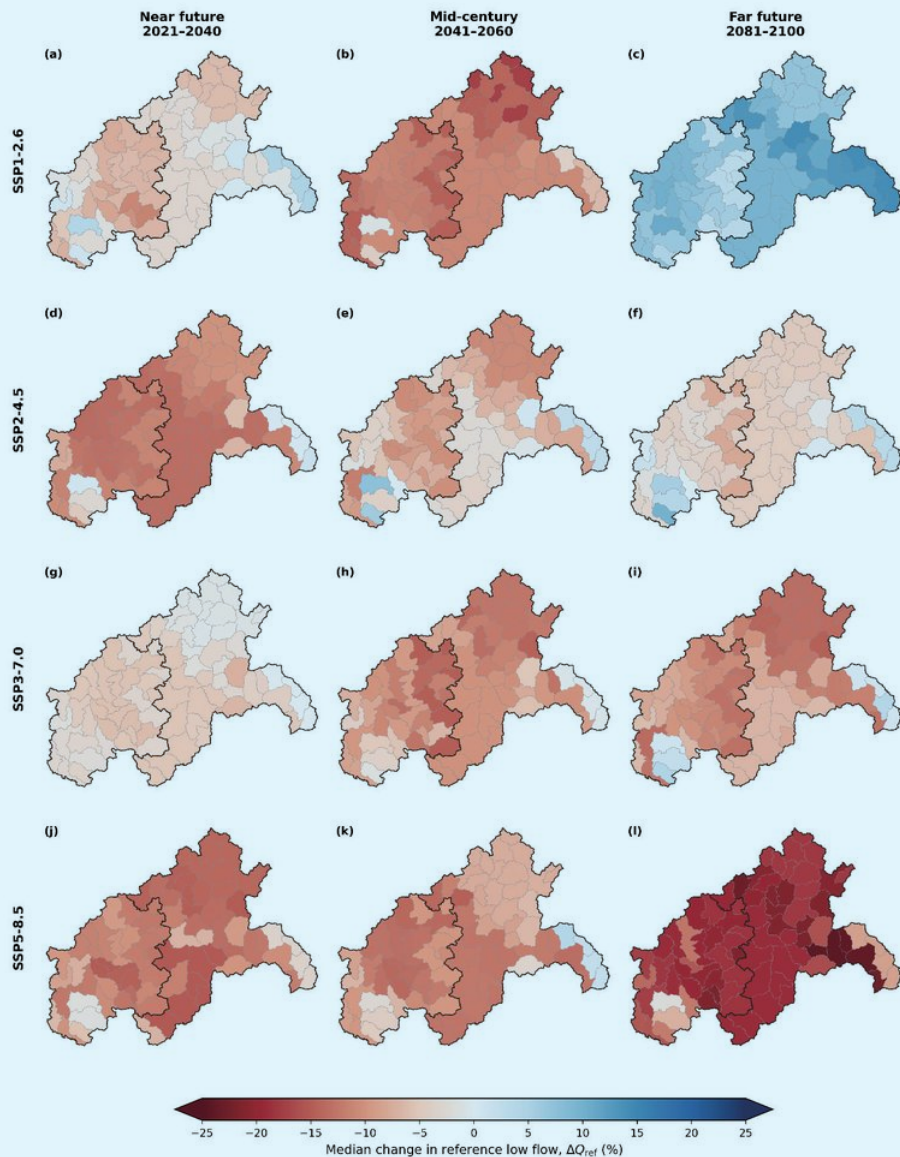


그림 3. SSP 시나리오별 미래 기준갈수량 변화

나리오라고 하여 모든 시기와 모든 유역에서 반드시 더 큰 감소가 나타나는 것도 아니었다.

근미래의 경우 SSP1-2.6에서는 80개 표준유역 가운데 71개 유역, SSP2-4.5에서는 75개 유역에서 기준갈수량이 감소하였다. SSP3-7.0과 SSP5-8.5에서는 80개 유역 모두에서 감소가 나타났다. 그러나 먼 미래의 결과는 시나리오별로 더욱 큰 차이를 보였다. SSP1-2.6에서는 80개 유역 모두에서 기준갈수량이 증가한 반면, SSP5-8.5에서는 모든 유역에서 감소하였다. SSP5-8.5 먼 미래의 유역별 변화율 중앙값은 약 -19.06%였으며, 개별 유역에서는 약 -24.18%에서 -1.99%까지 상당한 공간적 차이가 나타났다.

영산강과 섬진강 최하류에서도 고배출 시나리오가 장기간 지속될 경우 갈수기의 가용수량이 감소하는 경향이 뚜렷하였다. SSP5-8.5 먼 미래에 영산강 최하류의 기준갈수량은 현재 대비 약 15.34% 감소하였으며, 섬진강 최하류에서는 약 22.83% 감소하였다. 섬진강에서 상대적으로 더 큰 감소가 나타난 것이다(그림 3).

이 결과는 두 가지 중요한 의미를 갖는다. 첫째, 영산강 또는 섬진강 전체에 동일한 기후변화 보정계수를 적용하여 미래의 물 이용 가능량을 평가하는 방식에는 한계가 있다. 같은 수계에 속한 표준유역이라도 미래 갈수량의 변화 정도가 다르게 나타날 수 있기 때문이다. 둘째, 현재 충분하다고 판단되는 물의 양이 미래에도 동일한 수준의 공급 안정성을 보장하지 않을 수 있다. 기준갈수량이 감소하면 허가된 취수량이 증가하지 않더라도 기존 물이용이 차지하는 상대적인 압력은 자연스럽게 증가한다. 따라서 장기 산업용수 공급계획에서는 미래의 댐 시설용량만을 고려하는 것보다 그 시설로 유입되는 갈수기 자연유량 자체가 어떻게 변하는지를 함께 평가해야 한다. 특히 반도체 산업처럼 안정적인 연중 공급이 중요한 경우 평균적인

기후전망보다 가뭄조건에서의 공급능력 검토가 더욱 중요하다.

#### 4. 물은 충분한가: 하천수 허가과 유역별 물 배분 압력

기준갈수량의 감소가 곧바로 실제 물 부족을 의미하는 것은 아니다. 중요한 것은 현재의 하천유지유량과 하천수 사용허가량이 미래의 기준갈수량에 비해 어느 정도의 비중을 차지하게 되는가이다. 분석에 이용된 하천수 사용허가 자료에는 중복자료 제거 후 2,026건의 허가용도에 대한 내용이 포함되었다. 두 수계의 총 허가량은 약 2,654만  $\text{m}^3/\text{day}$ 였으며, 용도별 회귀율을 적용하면 순소비 허가량은 약 1,351만  $\text{m}^3/\text{day}$ 로 감소하였다. 즉 단순 허가수량만을 합산할 경우 실제 하천에 미치는 소비압력을 과대평가할 수 있으며, 물이용 용도별 회귀수량을 함께 고려할 필요가 있다. 농업용수는 총 허가량의 약 77.3%, 회귀율을 적용한 순소비 허가량의 약 98.6%를 차지하였다.

생활용수와 공업용수와 같이 상대적으로 연중 지속적인 물이용만을 대상으로 물배분 압력을 평가한 결과, 현재 기준에서는 전체 80개 유역 가운데 74개 유역이 기준갈수량 범위 이내에 존재하였다. 반면 6개 유역에서는 물배분 압력비가 1.0을 초과하였다. 장성댐, 광주천, 황룡강 중류 및 오수천 하류에서는 하천 유지유량 자체가 공식 기준갈수량보다 크게 설정되어 있었으며, 함평천과 고막원천 하류에서는 상류에서 누적되는 생활·공업용수 순소비 허가량이 더해지면서 기준을 초과하였다.

이는 현재 영산강과 섬진강의 물배분 체계 전체가 이미 과도한 상태라는 의미는 아니다. 오히려 대부분의 유역에서는 일정 수준의 물배분 여유가 존재하였다. 그러나 기후변화가 진행됨에 따라 현재의 여유가

감소하거나 일부 유역의 상태가 변화할 수 있다는 것이 중요한 결과이다. 대표적인 사례가 보성강 하류와 오례천이다. 두 유역은 현재 기준에서는 물배분 압력비가 1.0보다 작았지만 SSP5-8.5 먼 미래에는 각각 1.220과 1.153까지 증가하였다. 18개 GCM 가운데 기준 이내로 남은 경우도 각각 5개에 불과하였다. 현재에는 큰 문제가 없지만 미래 기후변화로 인해 취약지역으로 전환될 가능성이 있는 전이유역이라고 볼 수 있다.

반면 영산강과 섬진강 최하류에서는 다른 결과가 나타났다. 영산강 최하류의 생활·공업용수 기준 물배분 압력비는 현재 0.495에서 SSP5-8.5 먼 미래 0.586으로 증가하였으며, 섬진강은 0.417에서 0.541로 증가하였다. 기후변화로 각각 약 18%와 30% 정도의 상대적 압력 증가가 나타났지만, 두 수계의 최하류에서는 18개 GCM 모두 압력비가 1.0 이하로 유지되었다(그림 4).

이 결과는 호남 반도체 용수 논의에서도 중요한 의

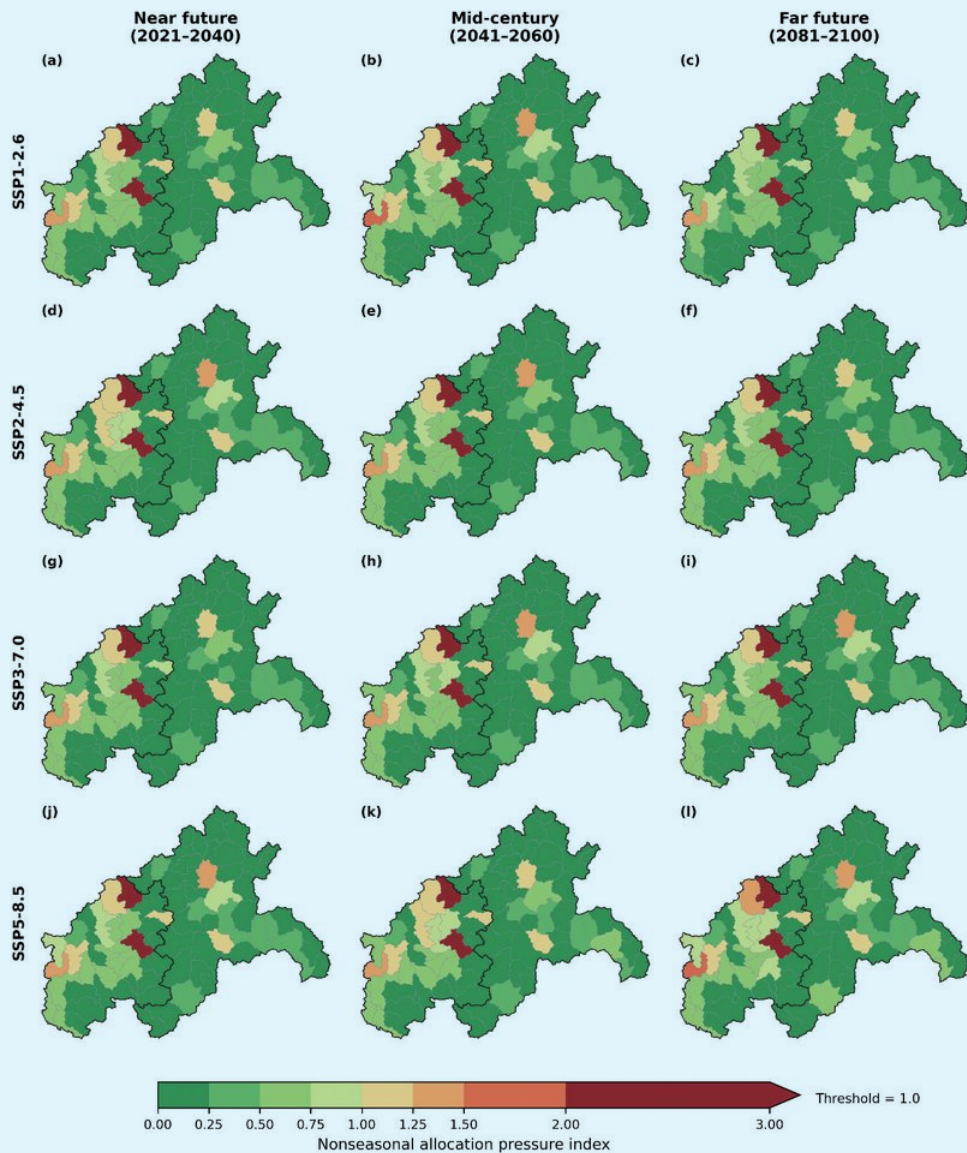


그림 4. 현재 및 SSP5-8.5 먼 미래의 유역별 물배분 압력 변화

미를 갖는다. 영산강이나 섬진강 전체의 물수지가 안정적이라고 하더라도 모든 내부유역이 동일하게 안정적이지는 않다. 특정 하류지점에 물이 남아 있더라도 부족한 상류 또는 다른 지류로 그 물을 자유롭게 이동시킬 수 있는 것은 아니다. 댐의 위치, 취수장의 위치, 도수시설의 용량과 방향, 저수지 운영규칙 등이 실제 공급 가능량을 결정하기 때문이다.

농업용수의 처리도 중요하다. 농업용 허가량을 모두 포함하면 현재에도 기준 이내로 남는 유역은 80개 중 5개에 불과하고 미래에는 3~5개 정도로 감소한다. 그러나 이 결과를 연중 실제 물 부족이 발생한다는 의미로 해석해서는 안 된다. 농업용수는 주로 5~9월의 관개기에 사용되고 모든 허가량이 동시에 최대량으로 취수되는 것도 아니며, 연간 Q355의 발생시기와 농업용수의 최대 수요시점이 반드시 일치하지 않는다. 따라서 농업용수 분석결과는 실제 연중 부족량이라기보다 관개기의 잠재적 최대 물배분 압력을 나타내는 보수적인 스트레스 테스트로 해석하는 것이 타당하다.

## 5. 호남 반도체 용수, 기후적응형 물관리로 접근해야

호남 반도체 클러스터의 용수 문제를 단순히 하루 65만 톤의 공급원을 확보할 수 있는가의 문제로만 접근해서는 장기적인 물안보를 충분히 평가하기 어렵다. 여러 댐의 공급 가능량을 합산하여 필요한 수량을 확보하는 것은 공급계획을 수립하는 첫 단계이지만, 실제 공급 안정성은 각 수원의 자연유입량과 저수상태, 기존 용수수요, 하천유지유량, 수계 간 물이동 및 가뭄의 지속기간에 따라 달라진다.

특히 본 분석에서 확인된 것처럼 기후변화에 따라 기준갈수량 자체가 변화할 수 있다. 현재의 생활·공업용수 허가체계만을 고려할 경우 영산강과 섬진강의

최하류에서는 미래에도 일정한 여유가 존재하지만 일부 내부유역에서는 현재 안전한 상태에서 미래의 취약한 상태로 전환되는 현상이 발생하였다. 따라서 수계 전체의 총량만을 가지고 산업용수의 장기 안정성을 평가하는 데에는 한계가 있다.

향후에는 자연유량, 다목적댐과 발전용댐, 농업용 저수지, 생활·공업·농업용수, 하천유지유량, 회귀수량, 수계 간 물이동을 하나의 시스템으로 연결한 물수지 분석이 필요하다. 여기에 SSP 기후변화 시나리오와 다중 GCM 전망을 적용하여 평상시뿐 아니라 다양한 수준의 가뭄에서 용수공급의 신뢰도를 평가해야 한다.

특히 반도체 산업용수는 기존 생활·공업용수에 추가되는 새로운 대규모 수요이므로 현재의 허가수량만을 이용한 분석에서 한 단계 더 나아갈 필요가 있다. 신규 산업용수 65만 톤이 추가되었을 때 각 댐의 저수율과 유입량이 어떻게 변화하고, 농업용수 공급과 하천유지유량을 유지하면서 어느 정도까지 안정적인 공급이 가능한지를 직접 검토해야 한다. 또한 극한가뭄이 지속되는 경우 어느 시점부터 댐 연계운영, 수계 간 도수, 재이용수 확대 또는 용수별 단계적 조정이 필요한지도 함께 분석할 필요가 있다.

수계 간 물이동은 기술적인 문제만으로 해결되지 않는다. 현재의 호남 반도체 용수공급 구상에서도 영산강 수계에 공급할 물의 일부를 섬진강 수계에서 확보하는 만큼 지역과 물이용자 사이의 협의가 필요하다는 점이 제기되고 있다. 정부 역시 농림축산식품부, 지역 및 한국농어촌공사 등이 참여하는 협의체를 운영하여 상·하류 간 상생방안을 마련한다는 입장이다. 발전용댐을 산업용수 공급원으로 활용하는 과정에서도 관련 법적 근거를 보완할 필요성이 제기되고 있다.

따라서 호남 반도체 클러스터 용수공급의 핵심 질문은 단순히 하루 65만 톤을 확보할 수 있는가에 머물

러서는 안 된다. 보다 중요한 질문은 기후변화로 갈수기 자연유량이 달라지고 기존 생활·농업·공업용수가 동시에 필요한 상황에서도 하루 65만 톤을 어느 정도의 신뢰도로 지속해서 공급할 수 있는가이다.

과거의 기준갈수량을 고정된 값으로 사용하는 방식에서 벗어나 기후와 수문조건의 변화를 반영하여 기준갈수량을 주기적으로 갱신하고, 표준유역별 물배분여유와 수계 간 연계운영을 함께 검토할 필요가 있다. 또한 장기적인 기후변화 평가와 단기적인 댐 운영 및 가뭄대응을 연계함으로써 공급계획의 실질적인 안정성을 검증해야 한다.

호남 반도체 클러스터 용수 문제는 단순한 산업용수 확보 문제가 아니라 향후 우리나라가 기후변화 시대의 새로운 대규모 물수요를 어떻게 수용할 것인가

를 보여주는 중요한 사례가 될 수 있다. 이제 필요한 것은 공급 가능량의 단순 합산을 넘어 기후변화에 견딜 수 있는 물배분과 운영체계를 설계하는 것이다.

### 감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00243727).

This work was supported by Korea Environment Industry & Technology Institute (KEITI) through Climate Resilient R&D Project for Water-Related Disaster Management, funded by Korea Ministry of Climate, Energy and Environment (MCEE) (RS-2023-00218873).

## 제3회 2026 토양·지하수 협력 컨퍼런스 개최기

- 기후위기 대응을 위한 토양탄소·지하수·수열에너지 활용기술 개발 -



김 병 기

한국수자원공사 K-water연구원  
연구원장  
bkkim@kwater.or.kr



임 정 열

한국수자원공사 K-water연구원  
물인프라안전연구소 연구소장  
passion@kwater.or.kr



김 병 우

한국수자원공사 K-water연구원  
물인프라안전연구소 책임연구원  
bwkim@kwater.or.kr



장 선 우

한국건설기술연구원  
수자원하천연구본부 연구위원  
chang@kict.re.kr

### 머리말

「제3회 2026 토양·지하수 협력 컨퍼런스 (Soil·Groundwater ConNex 2026)」는 한국수자원공사 K-water연구원, 한국농어촌공사 농어촌연구원, 한국수자원학회 및 한국농공학회가 참여하여 토양·지하수 분야의 연구성과를 공유하고, 기관 간 공동연구 및 기술협력 체계를 강화하기 위한 학술교류의 장으로 마련되었다.

이번 컨퍼런스는 「기후위기 대응을 위한 토양탄소·지하수·수열에너지 활용기술 개발」을 주제로, 토양탄소 저장 및 온실가스 감축, 지하수 가뭄 대응과 수자원 확보, 수열에너지 활용기술 등 주요 분야의 연

구성과와 기술개발 방향을 종합적으로 논의하였다. 특히 토양-지하수-에너지 간 상호 연계성을 기반으로 한 융복합 연구의 필요성을 강조하고, 미래 수자원·에너지 수요에 대응하기 위한 공동연구 과제 발굴과 현장 실증 확대, 기관 간 지속가능한 연구·기술 협력체계 구축을 주요 추진 방향으로 제시하였다.

### 1. 행사 개요 및 일정

#### 1.1 행사 개요

- (주 제) 기후위기 대응을 위한 토양탄소·지하수·수열에너지 활용기술 개발
- (일시) 2026.09.17.(목) 13:30~17:00

- (장 소) K-water 세종관 50주년 기념홀  
 □ (주 최) K-water연구원·한국수자원학회  
 □ (주 관) K-water연구원·한국수자원학회·  
 농어촌연구원·한국농공학회

## 2. 개회식

「제3회 2026 토양·지하수 협력 컨퍼런스」는 2026년 9월 17일 K-water 세종관 50주년 기념홀에서 산·학·연 관계자 등 약 130명이 참석한 가운데 개최되었

### 1.2 행사 일정

| 구 분                              | 시 간                        | 내 용                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 등록                               | 12:30~13:30                | ◦ 등 록                                                                                                                                                                                                               |
| 개회식                              | 13:30~13:40<br>13:40~14:00 | ◦ 개회사(K-water연구원장)<br>◦ 환영사(농어촌연구원장, 한국수자원학회부회장, 한국농공학회장)                                                                                                                                                           |
| 기조 발표                            | 14:00~14:40                | ◦ 기후위기 대응을 위한 토양 및 이수 분야 기술개발 현황<br>- 문상기 수석연구원(한국환경산업기술원)                                                                                                                                                          |
| 기념촬영                             | 14:40~15:00                | ◦ 기념촬영 및 Break Time                                                                                                                                                                                                 |
| 기관세션 I<br>(토양탄소 저감과<br>지하수가뭍 평가) | 15:00~15:40<br>(40분)       | 좌장: 장민원 교수(경상국립대학교)<br>◦ 농업 분야 토양탄소 저장 및 온실가스 감축 기술<br>- 박성직 교수 (한경국립대학교)<br>◦ 지하수 관측자료를 활용한 가뭄취약성 및 부존성 평가<br>- 황가영 선임연구원(한국농어촌공사 농어촌연구원)                                                                          |
| 기관세션 II<br>(수열에너지의 지하수<br>활용)    | 15:40~16:20<br>(40분)       | 좌장: 장민원 교수(경상국립대학교)<br>◦ 수열에너지 잠재량 통합 플랫폼: 전국 자원지도에서 입지 선정까지<br>- 윤창열 책임연구원 (한국에너지기술연구원)<br>◦ 하천수 및 지하수열원 하이브리드 수열시스템 개발 기술<br>- 조용 수석연구원(한국수자원공사 K-water연구원)<br>◦ 지하수열 활용 시스템 개발과 대수층 평가<br>- 심병완 책임연구원(한국지질자원연구원) |
| Break Time                       | 16:20~16:25                | ◦ Break Time 및 장내정리                                                                                                                                                                                                 |
| 토론 및 폐회                          | 16:25~16:55                | ◦ 종합토론<br>- 임정열 연구소장 (K-water연구원 물인프라안전연구소)<br>- 용환호 수석연구원 (한국농어촌공사 농어촌연구원)<br>- 장선우 연구위원 (한국건설기술연구원)<br>- 정한석 교 수 (서울과학기술대학교)                                                                                      |
|                                  | 16:55~17:00                | ◦ 폐회 및 마무리                                                                                                                                                                                                          |

다. 이번 행사는 K-water연구원, 농어촌연구원, 한국수자원학회 및 한국농공학회가 참여하여 기후위기 대응을 위한 토양·지하수 분야의 연구성과를 공유하고, 기관 간 공동연구 및 기술협력을 강화하기 위한 학술교류의 장으로 마련되었다.

한국수자원공사 K-water연구원 김병우 책임연구원의 사회로 진행된 행사에서는 K-water연구원장의 개회사를 시작으로 농어촌연구원장, 한국수자원학회 부회장 및 한국농공학회장의 환영사가 이어졌다. 참석자들은 기후위기와 탄소중립, 물 부족 및 에너지 전환 등 복합적인 환경문제에 대응하기 위해 토양-지표수-지하수-에너지를 상호 연계된 통합 시스템으로

접근해야 한다는 데 공감하였다. 아울러 기관별 전문성과 연구역량을 기반으로 한 학제 간 융복합 연구와 지속적인 공동연구·기술교류는 토양·지하수자원의 지속가능한 관리체계 구축과 미래 활용기술 고도화를 위한 핵심 기반으로 제시되었다.

## 2.1 개회사 및 축사: 기후위기 대응을 위한 토양·지하수 분야의 융합과 협력

「제3회 2026 토양·지하수 협력 컨퍼런스」의 개회사 및 축사에서는 기후위기, 탄소중립, 수자원 확보 및 에너지 전환 등 복합적인 환경문제에 대응하기 위한 토양·지하수 분야의 학제 간 융합과 기관 간 연구



그림 1. 「제3회 2026 토양·지하수 협력 컨퍼런스」 개최 현장 전경

표 1. 2026 토양·지하수 협력 컨퍼런스 산·학·연 참관기과 및 기업 현황

| 유관기관<br>(한국수자원공사, 한국농어촌공사, 국책연구소) | 업계 | 학계<br>(학회) | 기타 | 계   |
|-----------------------------------|----|------------|----|-----|
| 93                                | 22 | 14         | 1  | 130 |

협력의 중요성이 강조되었다.

한국수자원공사 K-water연구원 김병기 연구원장은 기후변화에 따른 물순환과 토양환경, 생태계 및 에너지 체계의 상호 연계성을 강조하며, 토양탄소 저장과 온실가스 감축, 지하수 가뭄 취약성 및 부존량 평가, 수열에너지 활용을 연계한 통합관리 기술개발의 필요성을 제시하였다. 한국농어촌공사 농어촌연구원 이승현 연구원장은 국제 토양자원 평가 경험을 바탕으로 토양-지표수-지하수-생태계 간 물질순환과 상호작용에 대한 과학적 이해를 강조하고, 수량·수질 및 생태환경 변화를 종합적으로 평가하는 통합적 연구체계 구축의 중요성을 설명하였다. 한국수자원학회 이범희 부회장은 지속가능한 수자원 관리와 기후위기 대응을 위해 학문 간 융합 및 산·학·연·관 협력을 강화하고, 연구성과 공유를 통한 혁신기술 개발과 공동연구 과제 발굴의 필요성을 강조하였다. 한국농공학회 김상민 회장은 농업용 지하수의 지속가능한 이용과 관리, 에너지 절감 및 탄소배출 저감의 중요성을 언급하며, 농업·수자원·에너지·환경을 연계한 융합

적 연구와 기술협력의 확대를 제안하였다.

이러한 논의는 토양탄소-지표수-지하수-수열에너지를 개별적인 관리 대상이 아닌 물·탄소·에너지 순환이 상호작용하는 통합 시스템으로 인식하고, 과학적 평가와 기술개발을 통해 기후위기 대응 역량을 강화해야 한다는 공통된 방향성을 제시하였다. 아울러 이번 컨퍼런스는 참여기관 간 연구성과 공유와 공동 R&D 발굴, 현장 실증 및 정책·사업화 연계를 촉진함으로써 토양·지하수 분야의 지속가능한 발전과 미래 물·환경 기술혁신을 위한 학술·연구 협력 기반을 확대하는 계기가 되었다.

## 2.2 경과보고 및 공동연구 활동 보고

그 간 추진 경과와 토양·지하수 분야의 연구협력과 기술교류를 강화하기 위해 2023년 4월 7일 실무협의체 구성을 시작으로, 그 이후 기관 간 지속적인 논의를 거쳐 2024년 9월 12일 4개 참여기관의 기관장 및 학회장 모여 정례적인 협력 컨퍼런스를 공동 개최하기로 합의하였다. 이를 기반으로 2024년 11월 22일



그림 2. 참여 기관장 개회사 및 축사

「제1회 2024 토양·지하수 협력 컨퍼런스」 개최를 통해 기관 간의 양해각서 협약(MoU)을 체결하였으며, 2025년 9월 18일 「제2회 2025 토양·지하수 협력 컨퍼런스」 개최를, 2026년 9월 17일 「제3회 2026 토양·지하수 협력 컨퍼런스」 개최를 이어오고 있다.

토양·지하수 협력 컨퍼런스와 함께 K-water 연구원과 농어촌연구원은 국가연구개발사업을 기반으로 지하수 분야의 실질적인 공동연구를 추진하고 있다. 현재 주요 공동연구로는 물공급 취약지역의 안정적인 지하수 자원 확보와 효율적 관리체계 구축을 위한 「지하수저류담 관리기술 개발」 과 지하수 정보를 3차원 공간정보와 연계하여 통합 분석·활용하는 「인공지능 기반 지하수 인터랙티브 웹 기술개발」 을 각각 5개년 연구로 수행하고 있다. 이러한 공동연구는 기후변화에 따른 물공급 취약성에 대응하고, 지하수의 조사·분석·예측 및 관리기술을 고도화하기 위한 기관 간 협력의 성과라는 데 의미가 있다.

향후 토양·지하수 협력 컨퍼런스는 기관 간 전문성과 연구역량을 기반으로 공동연구 과제를 지속적으로 발굴하고, 연구성과의 현장 실증과 정책·사업 연계를 확대함으로써 실효성 있는 연구협력 체계로 발전할 것으로 기대된다

### 3. 초청 강연 (한국환경산업기술원 문상기 수석연구원)

문상기 박사는 기후위기 대응을 위한 토양·이수 분야의 주요 국가 연구개발(R&D) 추진현황을 소개하고, 가뭄 대응 물관리 혁신기술, 지하수저류담 관리기술 및 토양 기반 탄소흡수·저장기술을 중심으로 연구성과의 정책적 활용과 현장 적용방향을 제시하였다. 특히 기후변화에 따른 가뭄의 빈도·강도 증가와 수문환경의 불확실성에 대응하기 위해서는 기존의 하천 중심

물관리에서 벗어나 지표수-지하수 연계와 토양의 탄소흡수·저장 기능을 종합적으로 고려하는 통합 물·환경 관리체계로의 전환이 필요하다고 강조하였다.

첫째, 가뭄 대응 물관리 혁신기술 개발사업은 데이터·네트워크·인공지능(DNA) 기반의 물수급 분석과 가뭄 예측·대응 의사결정 지원체계 구축을 목표로 한다. 주요 연구내용은 전국 단위 물수급 네트워크 구축, 지표수-지하수 연계 자연유량 예측, 사회·경제적 피해 및 가치평가, 최적 물배분, 동적 가뭄 취약도 평가 및 비상대응 의사결정 기술개발 등이다. 유역별 취수·배수·방류정보와 시계열 관측자료를 통합하고 지하수 기저유출 및 회귀수량을 반영하는 자연유량 예측기술은 미계측 유역의 유량 예측 정확도 향상을 목표로 하였다. 아울러 강수량, 저수율 및 용수 수급량의 시계열 변동을 반영한 동적 가뭄 취약도 평가는 가뭄 취약지도 고도화와 하천 유지유량 관리, 비상 물배분 등 국가 물관리 정책의 과학적 의사결정을 지원할 수 있다.

둘째, 지하수저류담 관리기술 개발사업은 물공급 취약지역의 수원 다변화와 대수층 기반 수자원 저장·공급기술 고도화를 목표로 한다. 주요 연구내용은 후보지 선정, 수리지질학적 특성 및 저류능력 평가, 공급가능량 산정, 지하수 유동·환경영향 분석, 설계·시공기술 고도화 및 수량·수질 통합관리 등 전주기 기술개발로 구성된다. 특히 지하수저류담의 내륙지역 확대 적용을 위해서는 지하공간 침수위험, 지반안정성 및 주변 지하수계 변화에 대한 종합적인 영향평가가 필수적이다. 또한 홍수기 잉여유량과 댐 방류수를 천변 및 대수층에 저장하고 갈수기에 활용하는 지표수-지하수 연계형 복합저류·공급체계는 수자원 이용 효율과 가뭄 대응력 향상에 기여할 수 있다.

셋째, 토양 기반 환경기술 개발사업은 국가 온실가스 감축목표(Nationally Determined Contribution, NDC) 달성을 위해 토양의 탄소흡수·저장 기능을 정



그림 3. 초청 강연(한국환경산업기술원 문상기 수석연구원)

량화하고 장기 안정성을 확보하는 것을 목표로 한다. 주요 기술로는 바이오차(Biochar) 기반 탄소저장, 강화 암석풍화(Enhanced Rock Weathering, ERW)를 통한 이산화탄소 제거 및 탄산염 광물화, 광물결합 유기탄소(MAOC) 형성을 통한 장기 탄소 안정화 기술 등이 제시되었다. 토양유형별 탄소 흡수·저장 특성과 광물결합 및 미생물 매개 탄소전환 메커니즘에 대한 규명은 국내 환경특성을 반영한 국가 고유계수 개발과 온실가스 배출·흡수량 산정의 신뢰성 향상을 위한 과학적 기반이 되었다. 또한 장기 현장관측에 기반한 측정·보고·검증(Measurement, Reporting and Verification, MRV) 체계는 탄소저감 효과의 지속성과 환경적 안전성을 정량적으로 검증하고, 국가 온실가스 감축정책과의 연계성을 강화하는 데 기여할 수 있다.

종합적으로 기후위기 대응을 위한 가뭄 대응 물관리, 지하수저류 및 수원 다변화, 토양 탄소흡수·저장 기술은 물순환과 탄소순환이 상호작용하는 통합 환경 시스템의 관점에서 연계될 필요가 있다. 지표수-지하수 연계에 기반한 수자원 이용효율 향상과 토양의 탄소저장 기능을 종합적으로 고려하는 데이터·AI 기반 예측·평가기술 및 현장 실증체계는 기후위기 대응기술의 실효성을 높일 필요가 있다고 설명하였다.

끝으로 국가 R&D 성과의 실질적인 활용을 위해서는 기술개발-현장실증-성능검증-실용화·사업화-국가 정책·제도 연계로 이어지는 선순환적 연구체계가 필요하다. 이러한 연구체계는 가뭄 대응과 물배분 의사결정, 지하수저류확대 확대 적용, 국가 온실가스 감축목표 이행 및 토양 탄소흡수량의 정량평가를 지원하며, 궁극적으로 기후위기 대응력 강화와 지속가능한 수자원·토양환경 관리체계 구축에 기여할 수 있을 것으로 전망하였다.

## 4. 기관발표

### 4.1 토양탄소 저장과 지하수 가뭄 평가

(한국농공학회·한국농어촌공사 농어촌연구원)

#### 1) 농업 분야 토양탄소 저장 및 온실가스 감축 기술

(박성직 교수)

박성직 교수는 기후변화에 대응하기 위한 농업 분야의 온실가스 감축과 토양탄소 저장기술을 소개하고, 주요 기술로 논물 관리, 바이오차(Biochar), 강화 암석풍화(ERW)의 적용 가능성과 연구성과를 제시하였다. 농업은 기후변화에 민감한 분야인 동시에 메탄( $\text{CH}_4$ )과 아산화질소( $\text{N}_2\text{O}$ )의 주요 배출원으로, 농업 환경의 특성을 고려한 온실가스 감축과 탄소저장 기



그림 4. 토양탄소 분야 주제발표(한경국립대학교 박성직 교수)

술의 개발이 필요함을 강조하였다.

논물 관리기술에서는 2023~2024년 현장실험을 통해 중간 물떼기와 걸러대기(논물 얇게 걸러대기)가 온실가스 배출과 농업용수 이용에 미치는 영향을 평가하였다. 그 결과, 중간물떼기와 걸러대기는 메탄 배출을 효과적으로 감소시켰으며, 일부 아산화질소 배출 증가에도 불구하고 CO<sub>2</sub> 환산량을 기준으로 한 전체 온실가스 배출량은 크게 감소하였다. 특히 3주간의 중간물떼기와 걸러대기를 병행한 실험조건에서는 약 70%의 온실가스 감축효과와 관개용수 절감효과가 나타났으며, 이는 적정 논물 관리기술이 온실가스 배출 저감과 농업용수 이용효율 향상에 동시에 기여할 수 있음을 보여주었다.

바이오차 기술에서는 바이오매스를 열분해하여 안정한 형태의 탄소로 전환함으로써 토양에 장기간 저장하는 원리를 설명하고, 계분 및 고추대 유래 바이오차의 적용효과를 비교하였다. 연구결과, 바이오차의 원료별 물리·화학적 특성은 토양 내 아산화질소 배출과 작물 생산성에 서로 다른 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 토양환경과 작물특성 및 원료조건을 종합적으로 고려한 맞춤형 바이오차 적용기술의 필요성을 뒷받침하였다.

한편 강화 암석풍화(ERW)는 칼슘·마그네슘 등이



포함된 규산염 광물의 풍화반응을 촉진하여 대기 중 CO<sub>2</sub>를 안정적인 무기탄소 형태로 전환·저장하는 탄소제거 기술로 소개되었다. 국내 적용을 위해서는 농경지 특성과 광물자원의 가용성을 고려한 적정 소재 발굴과 탄소저장 효과에 대한 정량적 검증이 필요한 것으로 제시되었다.

종합적으로 농업 분야의 탄소중립 실현을 위해서는 논물 관리를 통한 메탄 저감, 바이오차를 이용한 장기 토양탄소 저장, ERW를 활용한 무기탄소 고정기술을 연계하고, 온실가스 감축뿐만 아니라 농업용수 절감, 토양환경 개선 및 작물 생산성을 함께 고려하는 통합적 접근이 필요함을 강조하였다. 이러한 기술은 향후 기후변화 대응형 농업과 지속가능한 토양관리 체계 구축을 위한 핵심기술로 활용될 수 있을 것으로 전망하였다.

## 2) 지하수 관측자료를 활용한 가뭄취약성 및 부존성 평가 (황가영 선임연구원)

황가영 선임연구원은 기후위기에 따른 가뭄·홍수 등 극한 수문현상의 증가에 대응하여 안정적인 용수 확보를 위한 지하수의 전략적 활용과 대수층 특성을 반영한 가뭄 취약성 및 부존량 평가기술의 필요성을 제시하였다. 특히 지하수는 단기적인 기상변동에 상대적으로 완만하게 반응하지만, 대수층의 수리지질학적 특성에 따

라 함양·저류·배출 및 수위 회복특성이 상이하므로 이를 고려한 정량적 평가체계가 필요함을 강조하였다.

본 연구는 「인공지능형 지하수 인터랙티브 맵」 개발의 일환으로, 수문지질단위 기반의 지하수 부존량·공급가능량 평가와 가뭄 취약성 분석기술 개발을 목표로 수행되었다. 1차년도에는 경상남도 양산시의 72개 지하수 관측망과 4개 수문지질단위를 대상으로 강수에 따른 지하수위의 시간적 반응특성과 공간적 불균질성을 분석하였다.

강수-지하수위 히스테리시스(Hysteresis) 분석 결과, 지하수위 변동특성은 하천과의 거리 등 단순한 공간적 위치보다 대수층의 구조와 수문지질학적 특성에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히 동일한 강수조건에서도 수문지질단위별 지하수위 반응과 지연시간에 차이가 발생하여 대수층의 수리적 특성을 고려한 정량적 해석의 중요성을 확인하였다.

지형적 추세를 제거한 지하수위 잔차와 월별 이상편차(Anomaly)의 공간분석은 지하수위 변동의 계절적·공간적 불균질성을 평가하는 데 활용되었다. 분석 결과, 전체 공간평균의 변동은 상대적으로 작았으나 지역 및 수문지질단위별 잔차편차와 공간분포에서는 뚜렷한 차이가 나타나 장기 관측자료를 활용한 대수층의 동적 반응특성 및 공간적 불균질성 분석의 유효

성을 확인하였다.

한편, 기존 표준지하수위지수(Standardized Groundwater Index, SGI)는 지하수위의 평년 대비 편차를 평가하는 데 유용하지만, 대수층의 함양·배출 특성, 가뭄 이후 회복성 및 공급능력을 직접 반영하는 데 한계가 있음을 제시하였다. 따라서 지하수 가뭄 취약성의 정량적 평가를 위해서는 지하수위 변동뿐만 아니라 대수층의 투수성, 저류특성, 수문학적 반응성, 가뭄 이후 회복성 및 지속가능한 공급가능량을 종합적으로 반영하는 평가체계가 필요하다.

종합적으로 지하수 시계열 관측자료와 수문지질학적 특성을 연계한 통합 평가기술은 기존 지하수위 중심의 가뭄평가를 고도화하고, 가뭄 취약성-지하수 부존량-공급가능량-이용 신뢰성을 종합적으로 평가하는 방향으로 발전할 수 있다. 향후 전국 단위로 확대된 평가체계는 기후위기 대응을 위한 지하수자원의 적정 공급과 지속가능한 활용을 지원하는 과학적 의사결정 기반으로 발전시킬 필요성을 강조하였다.

## 4.2 지하·수열에너지 활용(K-water연구원·한국수자원학회)

### 1) 수열에너지 잠재량 통합 플랫폼: 전국 자원지도에서 입지 선정까지 (윤창열 책임연구원)



그림 5. 지하수 가뭄 분야 주제발표(농어촌연구원 황가영 선임연구원)

윤창열 박사는 수열에너지의 국가적 활용 확대를 위해 추진 중인 수열에너지 잠재량 평가 및 고해상도 자원지도 구축 연구의 추진방향을 발표하였다. 본 연구는 한국에너지기술연구원, K-water, 한국공학대학교, 안양대학교가 참여하는 4개년 공동연구로, 수열에너지의 이론적·기술적·시장 잠재량을 정량화하여 국가 재생에너지 정책과 기본계획 수립에 활용할 수 있는 과학적 기반을 구축하는 것을 목표로 한다.

연구에서는 상수·하천수·하수·지하수 등 다양한 수자원을 대상으로 위성자료, 기상자료 및 현장 관측자료를 수집·연계하고, 체계적인 품질보증·관리(QA·QC)를 통해 수온과 열에너지 이용 가능량을 평가할 계획이다. 특히 500 m 이하의 고해상도 격자 기반 수열에너지 자원지도는 기존 광역단위 평가의 공간적 한계를 보완하고, 지역별 열수요, 열원 접근성 및 환경·입지조건을 종합적으로 반영하여 실제 활용 가능한 수열에너지 잠재량을 정량적으로 평가하고자 한다.

수열에너지의 시장 잠재량 평가는 국내 수열에너지 시스템의 표준설계 조건과 균등화 열생산비용(Levelized Cost of Heat, LCOH)을 기반으로 기존 열공급 설비와의 경제성을 비교·분석하는 방향으로 추진될 예정이다. 이를 통해 수열에너지의 경제성 격차와 정책적 지원수준을 정량화하고, 기술·정책 시나리오별 잠재량의 공간적 변화를 평가하는 체계를 구축하고자 한다.

최종적으로 연구모델과 검증된 데이터베이스 및 고해상도 수열에너지 자원지도를 연계한 공개형 분석·활용 플랫폼은 국가 재생에너지 기본계획과 관련 정책 수립을 위한 과학적 기초자료를 제공하는 것을 목표로 한다. 또한 해당 플랫폼은 민간의 사업 후보지 발굴과 초기 타당성 검토를 지원함으로써 수열에너지 사업의 불확실성과 조사비용을 줄이고 보급·확산에 기여할 것으로 기대된다.

## 2) 하천수 및 지하수열원 하이브리드 수열시스템 개발 기술 (조용 수석연구원)

조용 박사는 건물 냉·난방 분야의 수열에너지 활용 확대를 위해 하천수와 유출지하수 등 다양한 수열원을 연계한 하이브리드 수열에너지 시스템의 기술개발 및 실증계획을 발표하였다. 기존 하천수 중심의 수열에너지는 높은 에너지 효율에도 불구하고 동절기 저수온과 초기 투자비 등의 제약이 있어, 다양한 열원을 연계하여 운전효율과 경제성을 향상시키는 기술개발의 필요성을 제시하였다.

특히 유출지하수는 연중 비교적 안정적인 수온을 유지하여 동절기 하천수의 낮은 수온을 보완할 수 있는 열원으로 평가하였다. 이에 따라 하천수-유출지하수-정수-태양열(Photovoltaic Thermal, PVT) 등을 연계한 하이브리드 에너지 믹스 시스템은 계절별 열원의



그림 6. 수열에너지 통합 플랫폼 분야 주제발표(한국에너지기술연구원 윤창열 책임연구원)



그림 7. 하이브리드 수열에너지 기술분야 주제발표(K-water연구원 조용 수석연구원)

온도 및 공급특성에 따라 최적 열원을 선택·조합함으로써 히트펌프의 운전효율과 수열에너지 이용률을 향상시키는 방향으로 기술개발이 추진되고 있다.

실증연구는 서울 성수동의 대형 건축물을 대상으로 추진 중이며, 약 3,000 RT 규모의 수열 히트펌프와 축열시스템을 적용하고 다양한 열원을 연계하는 복합 냉·난방 시스템을 구축할 계획이다. 실증연구를 통해 확보되는 실제 운전자료와 열원별 성능평가 결과는 하이브리드 수열시스템의 에너지 절감효과를 검증하고, 향후 수열에너지 열원의 다변화와 관련 제도를 개선하기 위한 기술적 근거를 마련하고자 한다.

향후 하이브리드 수열에너지 기술은 대형 건축물의 냉·난방뿐만 아니라 데이터센터 냉각, 공동주택 단지, 시설농업 등 다양한 열수요 분야로 확대 적용할 수 있을 것으로 전망하였다. 지역별 하천수·지하수의 수온과 공급특성을 고려한 열원 다변화 및 에너지 믹스 기술의 고도화는 하이브리드 수열시스템의 운영 안정성, 에너지 효율 및 활용성을 확대하는 기술적 기반이 될 것으로 기대하였다.

### 3) 지하수열 활용 시스템 개발과 대수층 평가 (심병완 책임연구원)

심병완 박사는 한국지질자원연구원에서 수행한 약

10년간의 연구성과를 바탕으로 지하수열 활용 시스템의 개발과 대수층 평가기술 및 주요 실증사례를 소개하였다. 지하수열은 연중 비교적 안정적인 지하수 온도를 건물 냉·난방, 시설농업 및 지역에너지 시스템 등에 활용할 수 있는 재생에너지 자원으로, 국내에서도 활용 잠재력이 높은 것으로 평가하였다.

지하수열 시스템의 안정적인 설계와 운영을 위해서는 지하수 부존량, 관정의 양수능력, 대수층의 두께와 투수성, 적정 굴착심도 및 양수·주입에 따른 주변 지하수계 영향 등을 종합적으로 평가하는 것이 중요함을 강조하였다. 대상 지역의 수리지질학적 특성과 냉·난방 수요를 연계하여 개방형 지하수열, 대수층 축열시스템(Aquifer Thermal Energy Storage, ATEs) 등 적정 시스템을 선정하는 과정이 필요함을 제시하였다.

주요 실증사례로는 대전지역의 개방형 지하수열 시스템, 완주지역 시설농업 대상 대수층 축열시스템, 삼척의료원의 대규모 지하수열 냉·난방 시스템을 소개하였다. 각 실증지역에서는 관정 굴착과 수리시험, 양수·주입시험 및 장기 모니터링 등을 통해 대수층의 수리특성과 열원 활용 가능성을 평가하였으며, 이를 기반으로 지하수열 시스템의 설계·운영기술을 검증하였다.

향후 지하수열의 보급·확대를 위해서는 지열과 지하수열의 기술적·제도적 범위를 명확히 하고, 대수층



그림 8. 지하수열 및 대수층 평가분야 주제발표(한국지질자원연구원 심병완 책임연구원)

평가 및 시스템 설계기준, 인·허가 절차, 시공·운영 및 지하수 환경관리 기준을 체계화할 필요가 있음을 강조하였다. 아울러 수리지질학적 특성을 반영한 장기 성능평가와 경제성 확보는 지하수열 시스템의 지역 맞춤형 재생에너지원 확대 적용을 위한 핵심 선결 조건으로 평가하였다.

하수 가뭄 취약성 평가, 지하수·하천수를 활용한 수열 에너지 기술을 중심으로 기후위기 대응을 위한 토양·지하수 분야의 기술개발 방향과 기관 간 협력방안을 논의하였다. 종합토론은 토양탄소 저장, 지하수 가뭄 취약성 평가 및 수열에너지 활용 분야의 연구성과와 현장 경험을 연계하여 향후 공동연구, 기술 실용화 및 정책 연계를 위한 구체적인 협력방향을 도출하는 계기가 되었다.

## 5. 종합토론

종합토론에서는 토양탄소 저장 및 온실가스 감축, 지

### 5.1 기후위기 대응을 위한 토양·지하수 분야의 협력과 기술개발 방향

#### ◆ 종합 토론 패널

임정열 한국수자원공사 K-water연구원 물인프라안전연구소 연구소장  
장선우 한국수자원학회 지하수분과 위원장(한국건설기술연구원 연구위원)  
정한석 한국농공학회 물이용분과 위원장(서울과학기술대학교 교수)  
용환호 한국농어촌공사 농어촌연구원 수석연구원

#### ※ 주요 주제

- 기후위기 대응을 위한 토양·지하수 분야의 협력과 기술개발 방향
  - ▷ 물-탄소-에너지 연계형 기후위기 대응 및 지하수 다목적 활용
  - ▷ 탄소저감 기술의 시스템 평가 및 MRV 체계 구축
- 지하수 가뭄 취약성·부존량 평가와 농어촌 활용방안
  - ▷ 대수층의 동적 특성을 반영한 농어촌 용수공급·지하공간 활용방안 모색
- AI·에너지 융복합 기반 미래 지하수자원 활용 방향
  - ▷ AI·데이터 기반 통합관리와 기관 간 공동연구 강화

임정열 연구소장은 종합토론을 통해 개별 요소기술에 대한 전문적 논의를 넘어 K-water연구원, 농어촌연구원, 한국수자원학회 및 한국농공학회가 참여하는 토양·지하수 분야의 연구영역 확대와 기후위기 대응을 위한 기관 간 협력방향을 종합적으로 논의하였다.

특히 기후위기 심화와 물환경의 불확실성 증가에 대응하기 위해서는 지표수·지하수·토양·에너지를 상호 연계된 통합 시스템으로 접근해야 한다고 강조하였다. 이를 위해 물-탄소-에너지 연계(Water-Carbon-Energy Nexus) 관점에서 수자원·토양·에너지 간 상호작용을 정량적으로 규명하고, 기관별 전문성과 연구 인프라를 활용한 융복합 공동연구체계를 구축할 필요성을 제시하였다.

토양·지하수자원의 지속가능한 보전과 활용을 위해서는 참여기관 간 공동연구와 기술협력을 기반으로 현장 실증-기술 고도화-실용화-사업화-정책·제도 연계로 이어지는 선순환적 연구체계가 필요하다. 이러한 연구기관과 학회 간 지속적인 학술·기술 교류는 연구성과의 현장 적용성과 정책 활용성을 높이고, 기후위기 대응을 위한 기술적·제도적 성과 창출에 기여할 수 있다.

이에 대해 정한석 위원장은 농업·농촌 분야의 기후위기 대응을 위해 논물 관리, 바이오차 및 강화 암석 풍화(ERW) 등 개별 탄소저감 기술 중심의 접근에서 벗어나 농업생태계의 물질순환과 환경적 영향을 고려한 시스템 기반 통합 평가체계로 전환해야 한다고 강조하였다. 특히 탄소저감 기술은 탄소저장량과 온실가스 배출뿐만 아니라 질소순환, 수자원 이용효율, 토양의 물리·화학적 특성 및 농업생산성에도 영향을 미치므로, 탄소감축 효과와 환경적·농업적 편익을 종합적으로 평가할 필요성을 제시하였다.

이러한 탄소저감 기술의 실질적인 효과를 정량적으로 검증하기 위해서는 시스템 경계의 명확한 설정과

적정 시·공간적 평가범위 확보가 중요하다고 설명하였다. 농경지의 탄소와 영양물질은 강수·관개, 침투·함양, 지표유출 및 지하수 유동을 통해 토양-암석-지하수-지표수 간에 이동·순환하므로, 장기 관측과 통합 물질수지 분석을 통해 탄소 및 영양물질의 저장·이동·유출 특성과 시스템 수준의 순저감 효과를 규명해야 한다고 강조하였다.

국내 농업·농촌지역의 수문·토양·지질학적 특성을 반영한 장기 모니터링 체계와 표준화된 관측기준은 개별·복합 탄소저감 기술의 상호작용, 탄소저장 지속성 및 환경적 영향을 정량적으로 평가하기 위한 기반이 된다. 장기 관측자료와 정량적 평가결과를 연계한 검증(Measurement, Reporting, and Verification)체계는 토양-지하수-지표수 간 탄소 및 물질순환을 반영하여 온실가스 순감축 효과의 객관성과 검증 신뢰성을 높일 수 있다.

끝으로 정한석 위원장은 토양·지하수·농업환경 분야의 장기 관측자료와 연구성과를 통합하고, 연구기관 및 학회 간 공동연구와 기술협력을 강화함으로써 농업생태계의 탄소·물·영양물질 순환을 고려한 통합 평가기술을 고도화해야 한다고 제안하였다. 이를 통해 토양·지하수·농업환경 분야의 통합 평가기술과 기관 간 연구협력체계는 탄소저감 기술의 과학적 검증과 현장 적용을 확대하고, 국가 온실가스 감축목표 달성 및 지속가능한 농업·수자원 관리를 위한 기술적·제도적 기반 강화에 기여할 수 있다.

## 5.2 지하수 가뭄 취약성·부존량 평가와 농어촌 활용방안

임정열 연구소장은 기후위기 대응과 관련한 기관별 연구발표에서 지하수 관측자료를 활용한 가뭄 취약성 및 부존량 평가의 중요성이 제시되었음을 언급하였다. 특히 가뭄 대응을 위해서는 단순한 지하수위 변동

분석을 넘어 대수층의 수리지질학적 특성, 지하수 부존량과 지속가능한 공급가능량, 가뭄 발생 이후의 지하수위 회복특성 등을 종합적으로 고려한 평가체계가 필요하다고 강조하였다. 이에 따라 종합토론에서는 지하수 가뭄 취약성·부존량 평가기술의 고도화 방향과 농업·농촌지역의 안정적인 용수공급을 위한 기술적 활용방안을 주요 논의과제로 설정하고, 이에 대한 농어촌연구원의 견해와 향후 연구방향을 질의하였다.

이에 대해 용환호 수석연구원은 기후위기 대응을 위해 가뭄 대응형 물관리, 지하수자원 평가 및 토양 탄소 흡수 등 다양한 연구개발이 추진되고 있으며, K-water 연구원과 농어촌연구원 간 공동연구를 통한 융복합 기술협력의 중요성을 강조하였다. 특히 토양은 강우침투·지하수 함양·수분저장 및 물질이동을 조절하는 핵심 매체이며, 지하수는 용수공급뿐만 아니라 수열에너지 활용을 위한 열에너지 전달매체로 기능하므로, 토양-지하수-에너지 간 상호작용을 고려한 통합 자원관리체계로의 전환이 필요하다고 설명하였다.

지하수 가뭄 취약성 및 부존량 평가기술은 기존의 지형·지질조건 중심의 정적 평가에서 벗어나 수문지질단위별 대수층의 수리적 특성과 강수·함양 변화에 따른 동적 반응 및 시·공간적 변동성을 반영하는 방향으로 고도화되어야 한다고 제시하였다. 지하수 관측망의 장기 실측자료를 기반으로 한 강수-지하수위 반응특성, 대수층별 수위변동 및 가뭄 이후 수위회복 특성 분석은 지역별 가뭄 취약성과 지하수 부존량·공급가능량의 정량적 평가 정확도를 향상시키는 데 기여할 수 있다.

아울러 관측자료 기반의 지하수 평가결과와 지하수 인터랙티브 맵 및 ICT 기반 공간정보·의사결정 지원 체계의 연계는 지역별 지하수 부존량, 대수층 산출성, 가뭄 취약성 및 이용가능량의 공간적 가시화를 가능하게 하였다. 이러한 통합 평가체계는 농업·농촌지역

의 가뭄 위험지역 사전식별, 대체수원 확보, 관정개발 적정성 검토 및 농업용수 공급계획 수립에 활용될 수 있다. 특히 계절별 농업용수 수요와 대수층의 공급능력·회복특성을 연계한 분석은 수자원 이용의 안정성과 지속가능성을 향상시키는 데 기여할 수 있다.

지하수 부존성·가뭄 취약성 평가기술과 디지털 공간정보 기술의 융합은 토양탄소·지하수·수열에너지 분야의 통합적 연구 확대를 위한 기술적 기반이 될 수 있다. 한국수자원학회와 한국농공학회 등 관련 학회 간 공동 학술세션 및 기술교류와 연구기관별 관측자료·연구성과 공유는 공동연구와 현장 실증 중심의 협력체계 강화에 기여할 수 있다.

끝으로 임정열 연구소장은 지하수자원의 지속가능한 활용을 위해 토양과 지하공간의 수자원 저장·이동 기능을 재조명하고, 기존의 관정 중심 점 단위 및 지역별 면 단위 평가에서 대수층의 수리지질학적 구조와 입체적 특성을 반영한 3차원 공간 기반 통합 평가체계로 발전시켜야 한다고 강조하였다.

지하공간은 수자원 저장·공급, 지하수 및 지중열에너지 활용, 분산형 용수공급 등 다양한 기능을 수행할 수 있는 복합 자원공간으로 평가되었다. 이에 따라 지하공간의 지속가능한 활용을 위해서는 지하수의 수량·수질 특성, 대수층의 저장·공급능력, 지하수·지중열에너지의 활용 잠재량 및 환경적 영향을 종합적으로 고려한 통합 평가체계 구축의 필요성이 제시되었다. 이러한 평가체계를 기반으로 수자원-에너지-공간정보를 연계한 지하수 통합관리기술의 고도화는 기후위기 대응 역량을 강화하고, 농어촌지역의 안정적인 용수공급과 지하수자원의 지속가능한 활용을 지원하는 기술적 기반이 될 것으로 전망하였다.

### 5.3 AI·에너지 융복합 기반 미래 지하수자원 활용 방향

임정열 연구소장은 최근 지하수가 전통적인 용수 공급 자원을 넘어 데이터센터 냉각, 유출지하수를 활용한 수열에너지, 지하공간의 열에너지 이용 등 다양한 분야로 활용범위가 확대되고 있음을 강조하였다.

특히 인공지능(AI)·디지털 기반 지하수 통합관리 기술은 지하수 부존량, 수질·수온 및 지속가능한 공급가능량의 정량적 예측과 최적 운영을 지원하는 핵심 기술로 평가하였다. 이에 따라 지하수와 지하공간을 수자원·에너지·디지털 기술이 결합된 미래 전략자원으로 활용하기 위한 핵심기술 개발과 통합관리체계 구축방향에 대해 질의하였다.

이에 대해 장선우 위원장은 이번 컨퍼런스가 K-water연구원, 농어촌연구원, 한국수자원학회, 한국농공학회 및 관련 연구기관의 토양·지하수 분야 연구성과를 공유하고, 기관 간 기술협력과 융복합 연구의 발전방향을 모색하는 계기가 되었다고 평가하였다. 아울러 각 기관의 연구목표와 기술적 접근방식은 상이하지만, 기후위기 대응과 지속가능한 수자원 확보·활용이라는 공통 목표를 기반으로 공동연구와 기술협력을 확대할 필요성을 강조하였다. AI 기반 지능형 물 관리체계 구축을 위해서는 현장 실측자료의 신뢰성 확보, 체계적인 품질보증·관리(QA·QC), 데이터 표준화 및 통합 데이터베이스 구축이 선행되어야 한다고 설명하였다. 토양·지하수·수열에너지 분야의 장기 모니터링 자료와 현장 실증자료를 기반으로 한 전국 단위 자원지도, 지하수 인터랙티브 맵 및 디지털 의사결정 지원체계의 구축은 미래 수자원 관리기술의 핵심 발전방향으로 제시되었다.

아울러 토양과 지하수 간 물·물질·열 이동과 수량·수질·에너지 특성을 통합적으로 해석하는 융복합 연구체계는 개별 연구영역 중심의 접근을 보완하고 상호작용에 대한 과학적 이해를 높일 수 있었다. 특히 토양 탄소 저장과 바이오차 활용에 따른 토양의 물리·화학

적 특성 변화, 지하수 함양, 용존물질 이동 및 지하수 질 영향을 연계한 통합 평가는 토양·지하수 분야의 융복합 연구 확대를 확대할 수 있을 것으로 전망하였다.

미래 지하수자원의 지속가능한 활용을 위해서는 대수층의 두께, 투수성, 저류특성 및 지속가능한 공급능력을 종합적으로 평가하는 기술이 필요하다. 특히 AI 데이터센터의 냉각·에너지 수요 증가와 수열에너지 활용 확대에 대응하기 위한 수리·열적 통합 평가기술은 지하수 부존량과 지속가능한 취수가능량을 정량화하고, 장기 취수 및 열에너지 이용에 따른 지하수위·수질·수온 변화와 환경영향을 예측하는 핵심 기술로 평가하였다.

끝으로 장선우 위원장은 현장 실측자료 확보-품질보증·관리 및 표준화-통합 데이터베이스 구축-AI 기반 예측·분석-공간정보화-수자원·에너지 최적 활용으로 이어지는 데이터 기반 통합 관리체계 구축을 핵심 기술개발 방향으로 제시하였다. 현장 실측자료-품질보증·관리-데이터 표준화-AI 기반 예측·분석-공간정보화를 연계한 통합관리체계는 데이터센터 냉각과 수열에너지 등 신규 수요에 대응하면서 지하수의 지속가능한 이용과 에너지 활용효율 향상을 지원할 수 있을 것으로 전망하였다. 연구기관과 학회 간 관측자료 및 연구성과의 공유, 공동연구와 현장 실증의 확대는 토양·지하수·에너지 분야의 융복합 연구를 촉진하고, 기후위기 대응기술의 고도화와 실용화를 위한 지속적인 연구협력체계 구축의 핵심 기반으로 제시되었다.

#### 5.4 마무리

종합토론에서는 토양·지하수·에너지를 개별적인 연구영역이 아닌 물순환·탄소순환·에너지 이용이 상호 연계된 통합 시스템으로 접근해야 한다는 데 공감대가 형성되었다. 기후위기에 따른 수문환경의 변동성과 불확실성이 증가하는 상황에서 지하수는 안정적

인 용수공급을 위한 수자원뿐만 아니라 수열에너지 및 지하공간 활용을 위한 복합 자원으로 그 역할이 확대되고 있으며, 이에 따라 지표수-지하수 연계 기반의 통합 물관리와 지속가능한 자원 활용체계 구축의 중요성이 강조되었다.

또한 AI·디지털 기반 지능형 물관리 체계로의 전환을 위해서는 신뢰성 높은 현장 실측자료 확보, 체계적인 품질보증·관리(QA·QC), 데이터 표준화·공유 및 통합 활용체계 구축이 선행되어야 한다는 의견이 제시되었다. 기관별로 축적된 토양·지하수·수열에너지 분야의 관측자료와 연구성과를 연계하고, 이를 공간 정보 및 AI 기반 예측·분석기술과 융합한 통합관리체계는 수자원 관리의 정확성과 효율성을 높이고 미래 물·에너지 수요 변화에 대한 선제적 대응을 지원하는 기술적 기반이 될 수 있다.

이번 컨퍼런스에서 논의된 토양탄소 관리, 지하수 가뭄 취약성 및 부존량 평가, 수열에너지 자원지도 구축, 하이브리드 수열시스템 및 대수층 특성 평가 등은 기술적 접근방식과 적용 분야에는 차이가 있으나, 궁극적으로 기후위기 대응을 위한 물-토양-탄소-에너지의 지속가능한 관리와 활용이라는 공통된 연구목표를 지향하고 있음을 확인하였다. 토양탄소 관리, 지하

수 가뭄 취약성·부존량 평가 및 수열에너지 활용 분야의 연구성과를 연계한 융복합 기술개발은 수자원 확보, 에너지 이용효율 향상, 탄소저감 및 환경보전을 통합적으로 고려하는 지속가능한 물·환경 관리기술의 발전 가능성을 보여주었다.

향후에는 개별 요소기술의 고도화와 함께 참여기관 및 학회 간 관측자료와 연구성과의 공유를 확대하고, 지표수-지하수-토양-에너지를 연계한 공동연구와 현장실증을 강화할 필요가 있다. 아울러 연구성과의 현장 적용-실용화-사업화-정책·제도 연계로 이어지는 기관 간 협력체계는 기술개발 성과의 실효성과 활용성을 높이고, 지속가능한 토양·지하수 관리기술의 현장 확산을 촉진해야하다는 데 의견을 모았다.

종합적으로 이번 컨퍼런스는 토양·지하수 분야의 다양한 연구성과와 기술적 연계 가능성을 확인하고, 기관별 전문성과 연구역량을 결집하여 미래 공동연구 및 융복합 기술개발의 방향을 모색한 의미 있는 학술·협력의 장으로 평가되었다. 기후위기 대응과 탄소중립 실현을 위한 지속가능한 수자원·에너지 관리체계 구축이라는 공동의 목표를 재확인하고, 참여기관과 학회 간 지속적인 연구협력 및 기술교류를 확대해 나갈 필요성을 강조하며 종합토론을 마무리하였다.



<장선우 위원장 & 임정열 연구소장>



<정한석 위원장 & 용환호 수석연구원>

그림 9. 종합 토론회 전경



그림 11. 제3회 2026 토양·지하수 협력 컨퍼런스 참가자

## 6. 맺음말

제3회 2026 토양·지하수 협력 컨퍼런스는 「기후위기 대응을 위한 토양탄소·지하수·수열에너지 활용기술 개발」을 주제로 토양·지하수 분야의 연구성과를 공유하고 미래 공동연구 및 기술협력 방향을 모색하는 학술·연구 협력의 장으로 개최되었다. 토양과 지하수를 개별적인 환경요소가 아니라 물질과 에너지의 이동·순환을 통해 연결되는 통합시스템으로 인식하고, 기후위기 대응을 위한 융복합 연구의 필요성을 확인하였다.

이번 컨퍼런스는 물-탄소-에너지의 통합적 관점에서 토양과 지하수의 새로운 가치를 확인하고, AI·데이터 기반의 과학적 관리와 기관 간 융복합 연구의 필요성을 공유했다는 데 의의가 있다. 향후 토양·지하수 협력 컨퍼런스가 단순한 연구성과 공유를 넘어 공

동 R&D 발굴 → 현장실증 → 기술 고도화 → 정책·사업화로 이어지는 지속가능한 협력 플랫폼으로 발전함으로써, 기후위기 대응과 탄소중립, 안정적인 수자원 확보 및 미래 에너지 전환에 기여하는 실질적인 연구 협력의 장으로 자리매김할 것으로 기대된다.

이번 협력 컨퍼런스는 4개 기관에서 발표된 토양·지하수 관련 연구성과를 공유하고 국내 산·학·연의 전문가들과 상호협력 체계를 구축한 귀중한 장이 되었다. K-water연구원, 한국수자원학회, 농어촌연구원, 한국농공학회의 적극적 참여에 감사를 드리며, 2027년에 한국농어촌공사 농어촌연구원과 한국농공학회가 공동주최하는 제4회 2027 토양·지하수 협력 컨퍼런스의 성공적인 개최를 기원합니다.

※ “제3회 2026 토양·지하수 협력 컨퍼런스 개최 결과보고서”는 한국수자원학회 및 한국농공학회 홈페이지에서 볼 수 있습니다.

## 2026년 8월 26일 네팔 홍수



김 원

한국건설기술연구원  
수자원하천연구본부 선임연구위원  
wonkim@kict.re.kr

### 1. 상상할 수 없는 규모의 홍수

네팔 정부 공식 자료에 의하면 9월 21일 기준 Rasuwa-Bhotekoshi 홍수로 인한 인명피해는 사망자 1,451명, 실종자 5,745명(외국인 636명 포함)이다(NDRRMA, Nepal). 총피해액은 2,695백만 달러이며 이중 기반 시설 분야는 1,255백만 달러(46.55%), 생산 분야는 993백만 달러(36.83%), 사회 분야는 448백만 달러(16.62%)이다. 추정되는 복구 비용은 4,775백만 달러로서, 이중 기반 시설 분야 3,126백만 달러(65.47%), 사회 분야 684백만 달러(14.32%), 생산 분야 335백만 달러(7.02%), 기타 630백만 달러(13.19%)로 구성되어 있다(NDRRMA, 2026.9).

홍수의 규모는 홍수량으로 추정해 볼 수 있다. 홍수가 발생한 구간의 1,000년 빈도 홍수량은  $1,761\text{m}^3/\text{s}$

s 인데(Rasuwigadhi hydropower company limited, 2013.2), 이번에 발생한 홍수량은 이보다 훨씬 큰  $10,000\sim 30,000\text{m}^3/\text{s}$  정도로 추정되고 있다. 1,000년 빈도 홍수량보다 10배 정도 큰 대규모 홍수가 발생한 것이다.

비가 전혀 오지 않는 상황에서 불과 몇 시간 동안 발생한 홍수로 상상할 수 없는 규모의 큰 피해가 발생했다. 주요 특징은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- ① 비가 오지 않는 상황
- ② 매우 급격한 수위 상승 및 매우 큰 유량
- ③ 토석류 동반
- ④ 사전 징조 없었음

이와 같은 특징을 고려하면 일반적인 홍수 또는 갑

자기 발생한 돌발홍수라고 정의하기 어려우며, 일반적인 빙하호 붕괴홍수(GLOF, Glacial Lake Outburst Flood)라고 하기에 모호한 부분이 있다. 지금까지 조사된 결과로 추정하면 이번 홍수의 발생과정은 다음과 같이 추정해 볼 수 있다.

- ① 기온 상승으로 인한 빙하 융해
- ② 토양수분 증가
- ③ 대규모 산사태 발생
- ④ 계곡에 대규모 저수지 생성
- ⑤ 대규모 빙하 붕괴
- ⑥ 저수지로 유입
- ⑦ 저수지 붕괴

⑧ 댐 붕괴와 발생 및 하류 전파

대규모 댐 붕괴가 발생하였으며 하천 하류로 급격하게 전파되면서 대규모 피해가 발생한 것으로 보인다.

2. 피해 사진

언론이나 인터넷을 통해 알려진 동영상이나 사진을 보면 홍수의 규모를 쉽게 짐작할 수 있다. 강우로 인해 발생하여 서서히 증가하는 일반 홍수와는 달리 이번 홍수는 댐 붕괴로 인해 발생하는 홍수파의 특징을 뚜렷하게 보여준다. 매우 빠른 전파속도, 매우 급격한

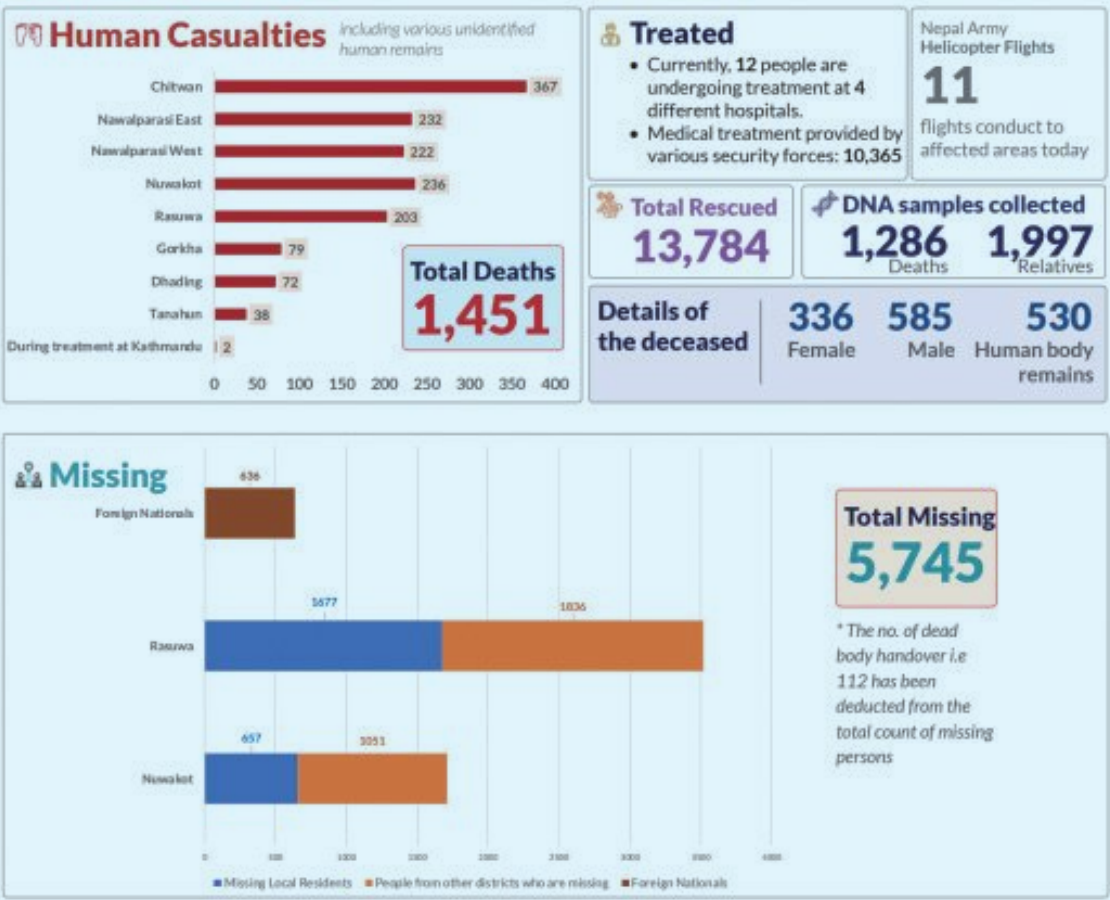


그림 1. 2026.9.21.일 기준 Rasuwa-Bhotekoshi 홍수 인명 피해(출처 : NDRRMA, Nepal)



그림 2. 홍수로 인한 피해액(a)과 추정 복구액(b) (단위 : 달러) (출처 : NDRRMA, 2026.9)

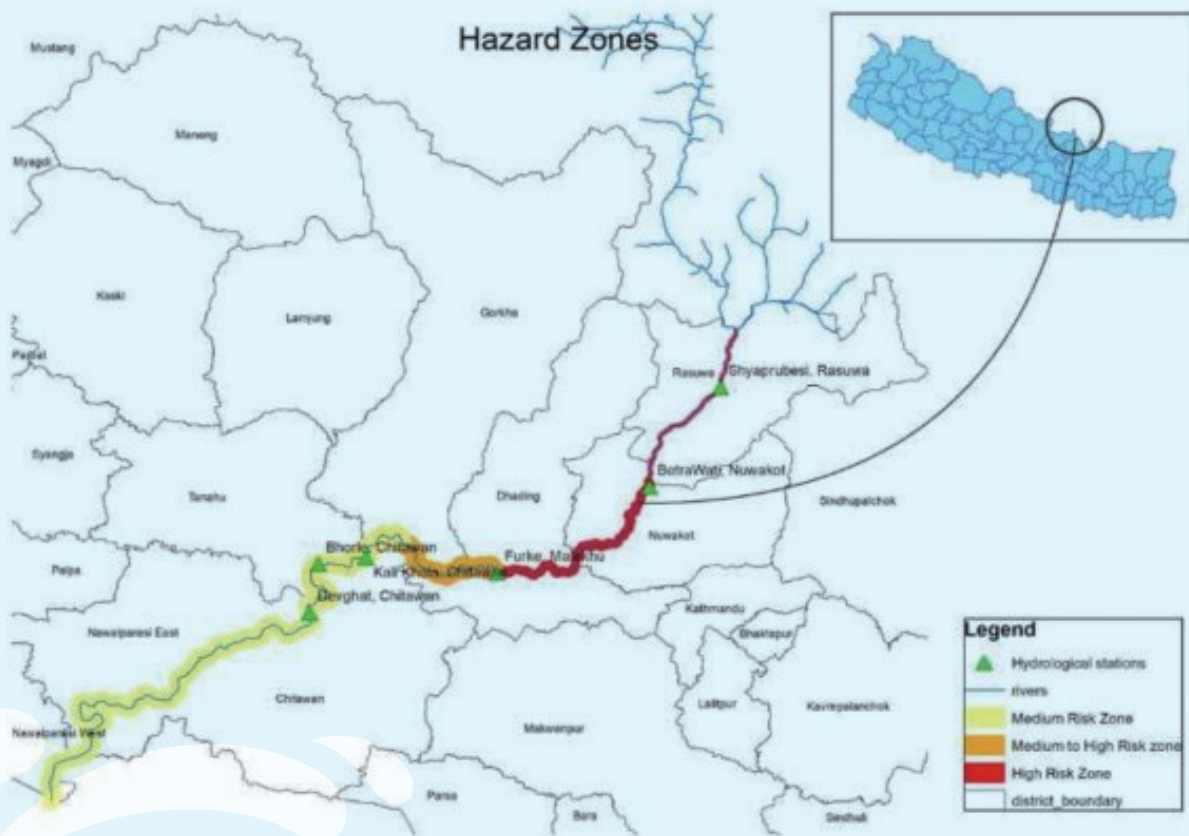


그림 3. Bhotekoshi-Trishuli-Narayani 강 피해 지역(출처 : NDRRMA, 2026.9)

수위상승, 매우 빠른 유속, 토석 동시 전파 등으로 인해 예경보 발령이나 대피 시간 확보가 불가능했다. 홍수 발생 현장에서 노동자들이 몰려오는 홍수파를 피해 대피하는 사진에서 홍수의 규모나 전파속도를 쉽

게 짐작할 수 있다.

홍수 이후 촬영된 위성사진을 보면 홍수의 규모를 알 수 있다. 기존 하천의 범위를 훨씬 벗어나 상당히 넓은 지역까지 흔적이 남아 있다. 또한 단순히 물이

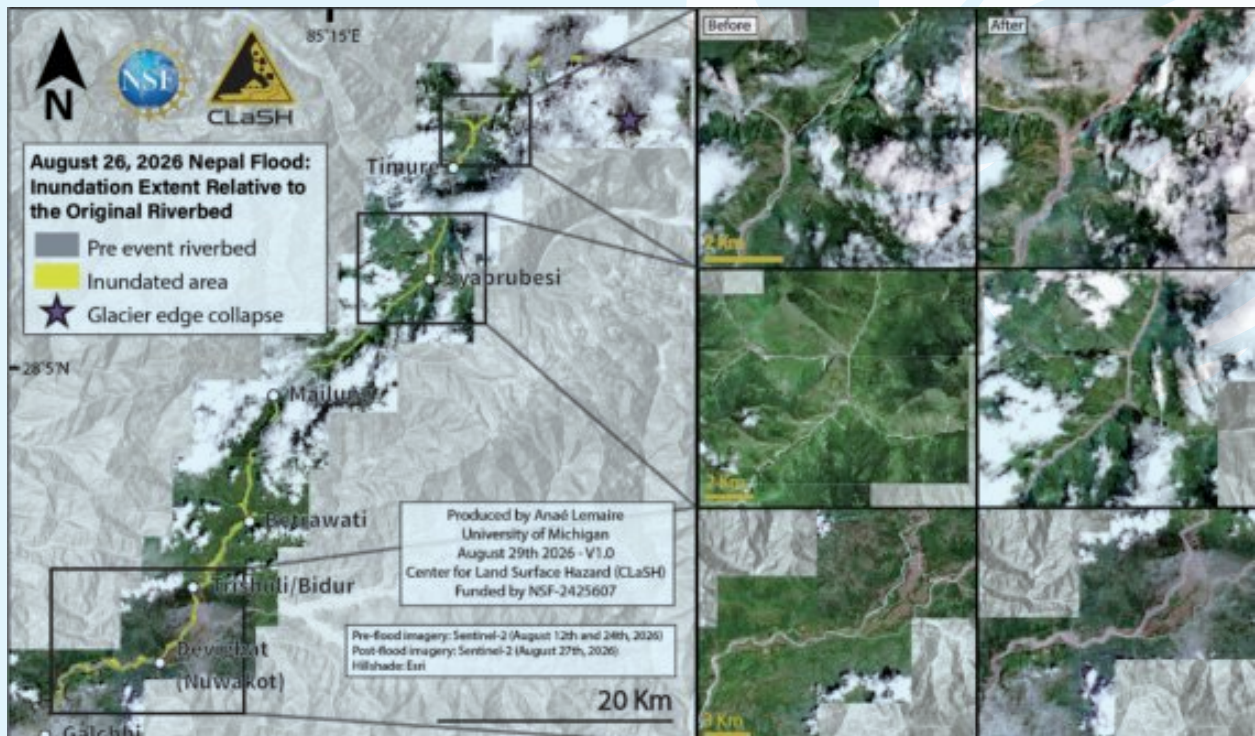


그림 4. 하천 주변 홍수 전후 변화 (출처 : Center for Land Surface Hazards)



그림 5. 홍수 발생 현장에서 건설 노동자들이 대피하는 모습 (출처 : BBC)

차는 정도가 아니라 계곡 자체를 완전히 세굴시켰고, 마을의 주택이나 건물을 붕괴시켰다. 주민들이 거주하는 일반적인 집뿐만 아니라 콘크리트로 만든 관공서 건물도 흔적도 없이 사라진 사진을 보면 이번 홍수가 얼마나 큰 규모였는지 짐작할 수 있다.

### 3. 발생 개요

#### 3.1 발생 지역

홍수 발생 원점은 중국과 नेपाल 국경 지역으로 추정된다. 빙하 붕괴 이후 대규모 홍수가 발생하였고 이 홍수가 Lende Khola강 → Bhote Koshi 강 → Trishuli 강으로 전파되었다. 이에 따라 상류 Lhende/Cuojian 계곡 → Rasuwagadhi → Syaprubesi → Betrawati → Galchhi → Malekhu → Kali Khola → Muglin → Devghat 까지 약 168km 구간에서 피해가 발생하였다.



그림 6. Trishuli 강 홍수 전후 모습 (왼쪽) 2023년 10월 18일 (오른쪽) 2026년 8월 27일 (출처 : AFP 연합뉴스)



그림 7. 네팔 북부 Rasuwa 지역 홍수 전후 모습 (왼쪽) 2023년 10 월 18일 (오른쪽) 2026년 8월 27일 (출처 : AFP 연합뉴스)

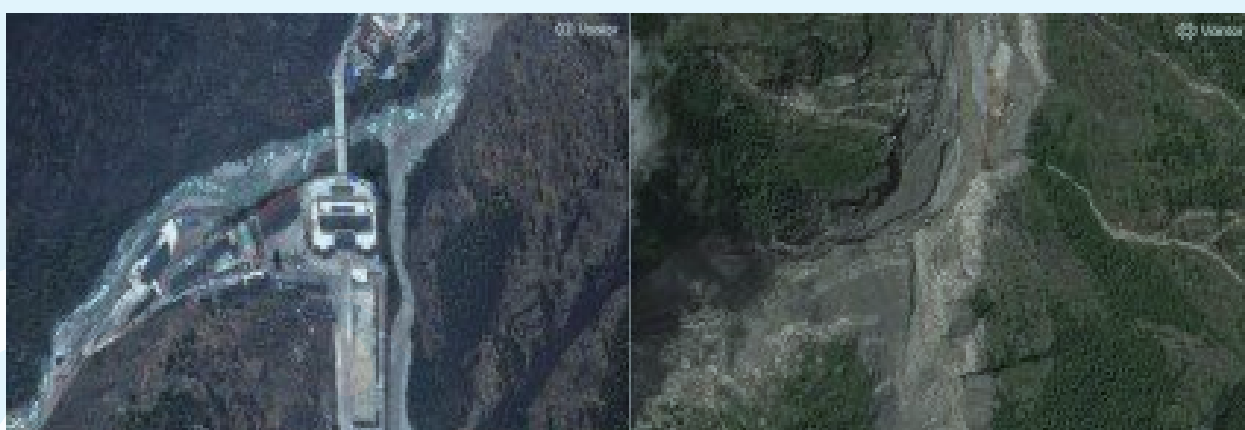


그림 8. 중국과 네팔 Gyirong-Rasuwadhi 국경 검문소 일대의 홍수 전후 모습 (왼쪽) 2024년 10월 18일 (오른쪽) 2026년 8월 27일 (출처 : AFP 연합뉴스)

### 3.2 발생 상황

대규모 빙하 붕괴 이후 발생한 홍수 상황을 시간별로 정리해 보면 다음과 같다. 08시 37분 리히터 규모

로 4.4의 진동이 발생할 정도의 산사태가 이번 홍수의 시작이었다. 진동 발생 이후 불과 3분 후에 가장 상류에 있는 수위관측소가 유실된 것으로 보면 얼마나 빨

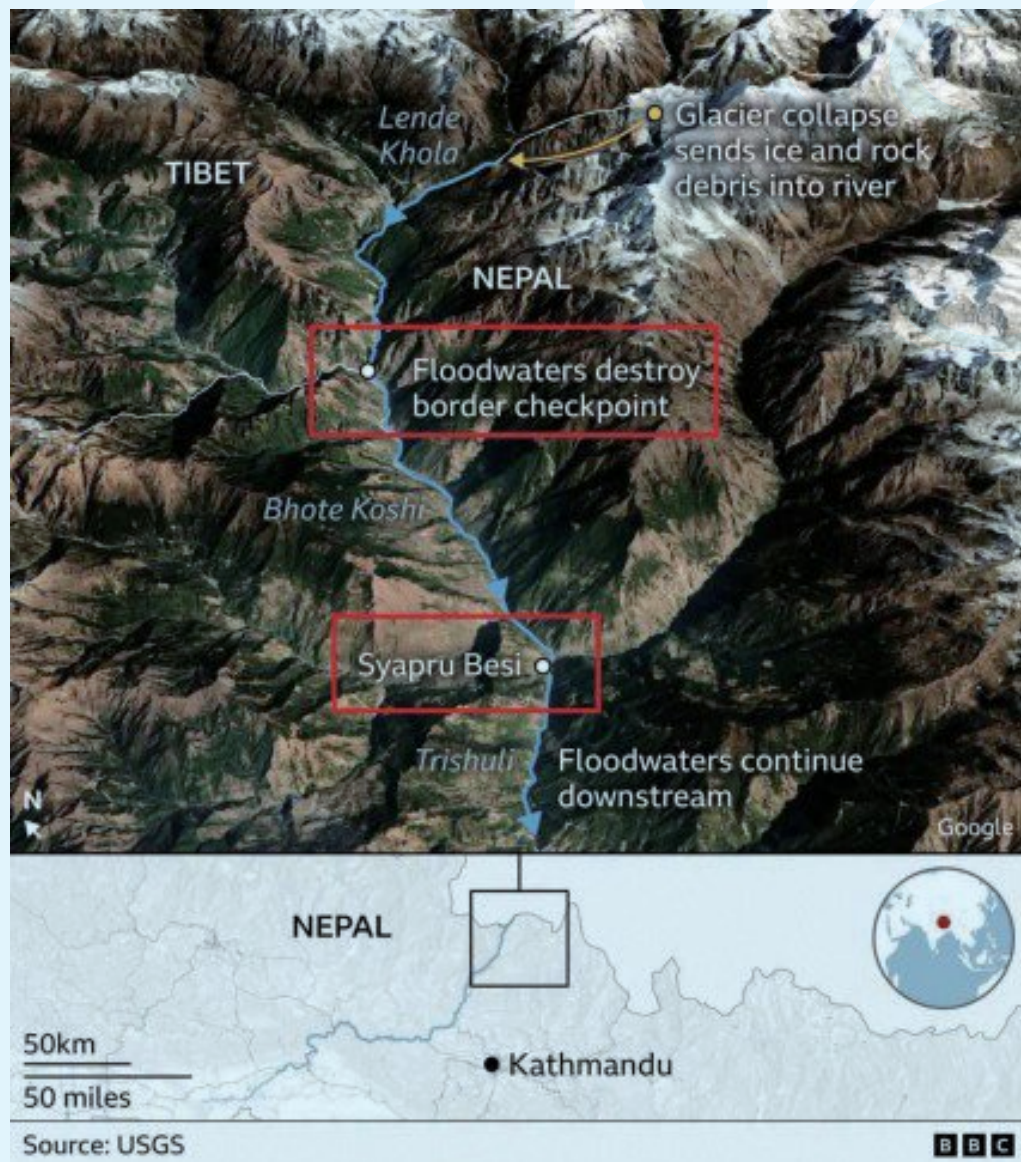


그림 9. 홍수 발생 최상류 지역 (출처 : USGS)

리 홍수가 전파된 것인지 알 수 있다. 하류 쪽으로도 매우 빠르게 전파되면서 상류 대부분의 수위관측소가 유실되었다. 유실된 관측소의 관측 주기는 10분인데 평상시 상태를 유지하다가 갑자기 닥친 홍수파로 10분 이내에 관측소가 유실되어 그다음 수위를 전송하지 못하였다.

매우 빠른 홍수파는 하류로 전파되면서 급격하게 침두가 줄어드는 현상을 보였으며, 홍수로 인해 추가

로 발생한 초과 홍수량은 약 2천만  $m^3$ 로 계산되었다.

#### 4. 홍수 전파

Trishuli 강 유역은 히말라야 고산 지대에 있으며 상류 지역 하천은 매우 경사가 급한 계곡으로 이루어져 있다. 이에 따라 상류에서 발생한 홍수는 매우 빠르게 하류로 전파될 수 있었다.

표 1. 시간별 홍수 발생 상황 (출처 : नेपाल 수문기상부)

| 시각    | 상황                                                             |
|-------|----------------------------------------------------------------|
| 08:37 | 리히터 규모 4.4 진동 관측                                               |
| 08:40 | Rasuwagadhi 수위관측소 수위 수신 중단(마지막 관측값 1.62m)                      |
| 09:00 | Bhote Koshi 강으로 큰 홍수 유입 정보 전달                                  |
| 09:20 | Betrawati 수위관측소 수위 수신 중단(마지막 관측값 3.55m)                        |
| 10:28 | 홍수 Galchhi 부근 도달                                               |
| 11:43 | Maleku 수위 관측소 위험수위 초과 이후 수신 중단(마지막 관측값 10.48m)                 |
| 14:14 | Kali Khola 수위관측소 위험수위 초과, 14:20분 최고수위 관측(12.35m)               |
| 16:00 | Devghat 수위관측소 최고수위 6.57m 도달 이후 하강 시작                           |
| 18:30 | Devghat 수위 정상 상태로 회복<br>이 지점을 통과한 초과 홍수량은 약 2천만 m <sup>3</sup> |

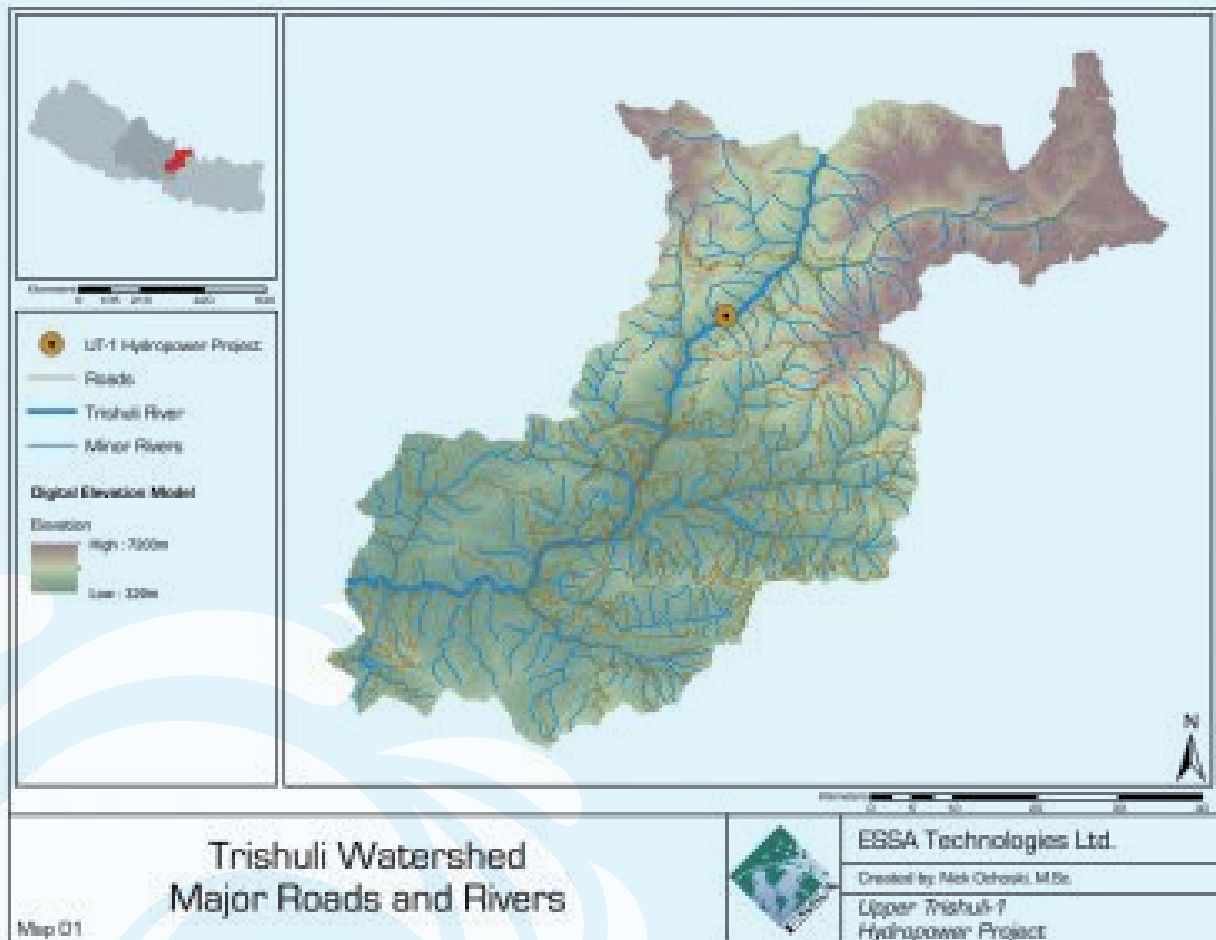


그림 10. Trishuli 강 유역도 (출처 : ESSA Technologies Ltd., 2014)

08:37분 빙하 붕괴로 인해 발생한 홍수는 08:44분 Rasuwagadhi/Gyirong, 08:50 Syabrubesi, 09:20분 Betrawati, 10:20분 Galchhi, 11:26분 Malekhu, 14:30분 Devghat에 도달한다.

#### 4.1 수위 변화

네팔과 중국 국경 9km 하류 지점에서는 08:40분, 25km 하류 지점에서는 08:50분, 45km 하류 지점에서는 09:20분 수위 기록이 중단되었다. 81km 하류에 있는 Galchhi 지점에서는 10:20~10:50분 30분 사이에 수위가 8.85m 급상승하였다. 100km 하류 Malekhu 지점에서는 11:10분 이후 수위가 상승하기 시작하여 30분 동안 7.13m 상승하였고, 11:40분에 10.48m 기록 이후 중단되었다. 137km 하류 Kali Khola 지점에서는 70분간 상승하여 14:20분에 최고 수위가 기록되었으

며, 168km 하류 Devghat 지점에서는 80분간 상승하여 16:00분에 최고 수위가 기록되었다.

#### 4.2 홍수전파 속도

중국과 네팔 국경인 Gyirong 까지 전파속도는 164km/hr(45.5m/s)로 추정되며, 그다음 Syabrubesi 구간에서는 56~163km/hr(15.5~45.3m/s)로 늦어지고, Betrawati를 지나면 27~38km/hr(7.5~10.6m/s)로 줄어든다.

Betrawati에서 Maleku까지는 7.6m/s, Maleku에서 Kali Khola까지는 5.1m/s, Kali Khola에서 Devghat까지는 5.7m/s로 홍수와 선단이 매우 빠르게 전파되었다. 하류 Devghat 지점까지 도달하는 데는 6.5시간이 걸렸다.

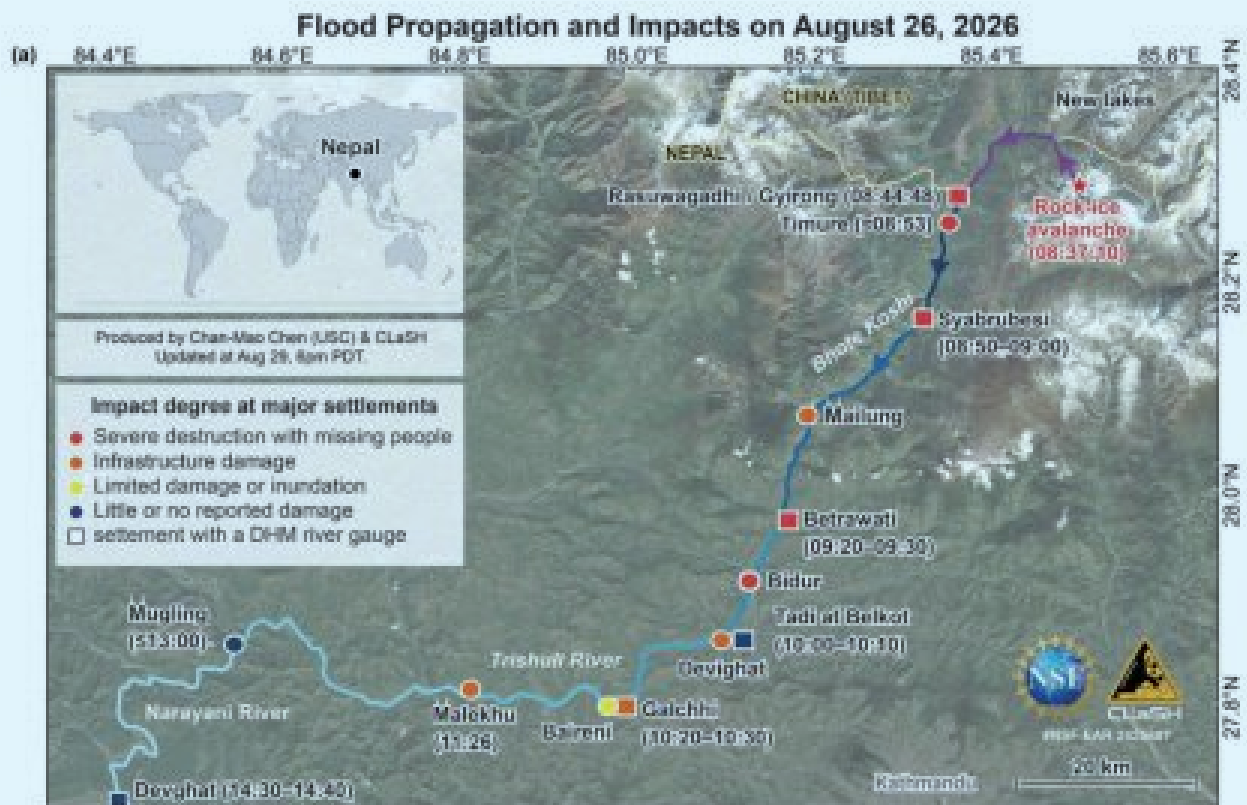


그림 11. 지점별 홍수 전파 (출처 : Center for Land Surface Hazards)

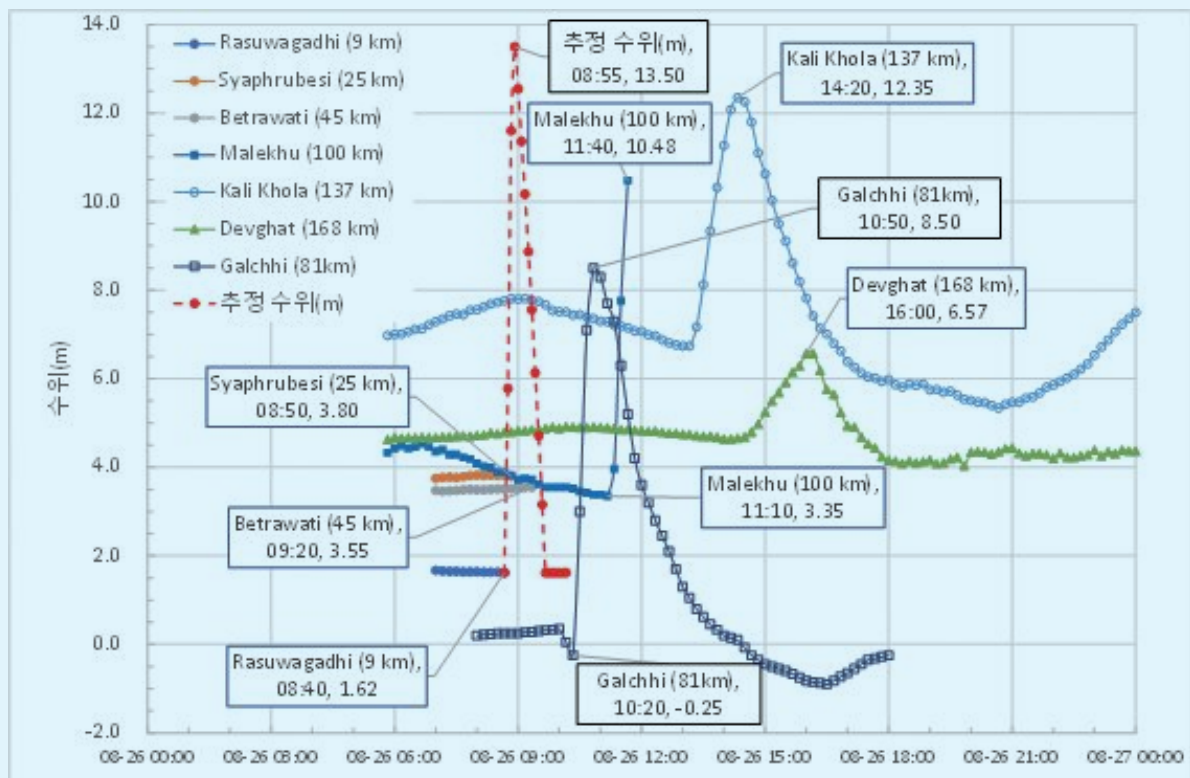
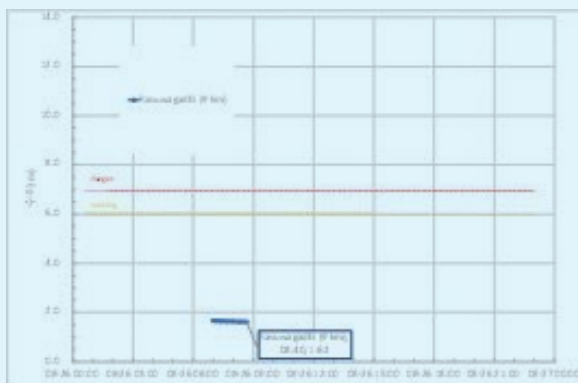
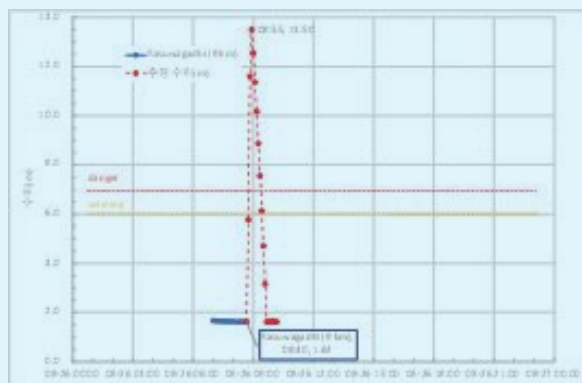


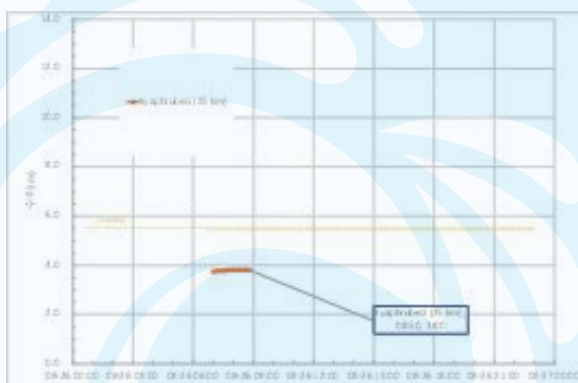
그림 12. 하류 수위 변화 (출처 : 네팔 수문기상부 자료를 이용하여 작성)



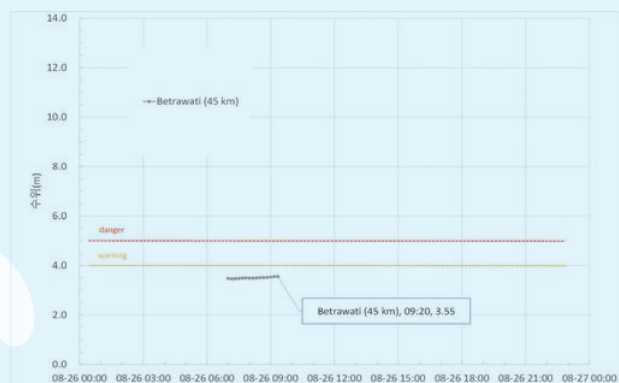
Rasuwagadhi(9km)



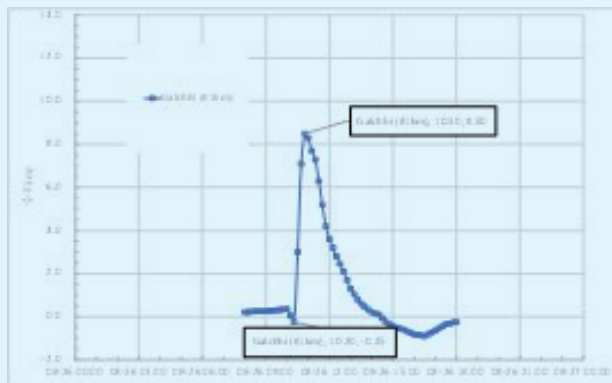
Rasuwagadhi(9km) - 가정



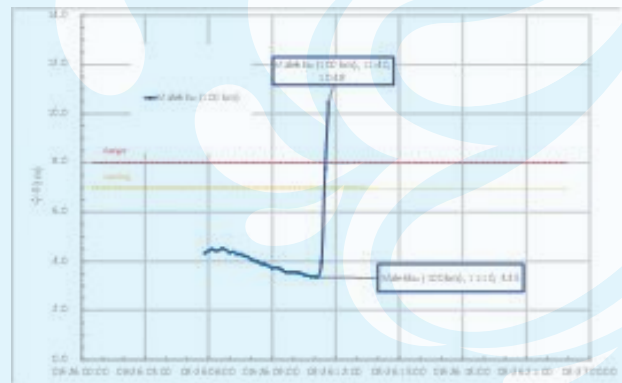
Syaphrubesi (25 km)



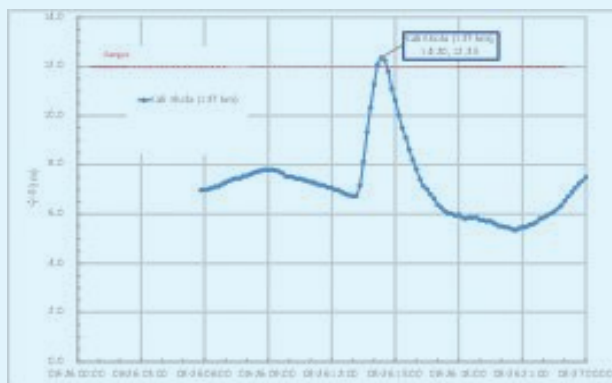
Betrawati (45 km)



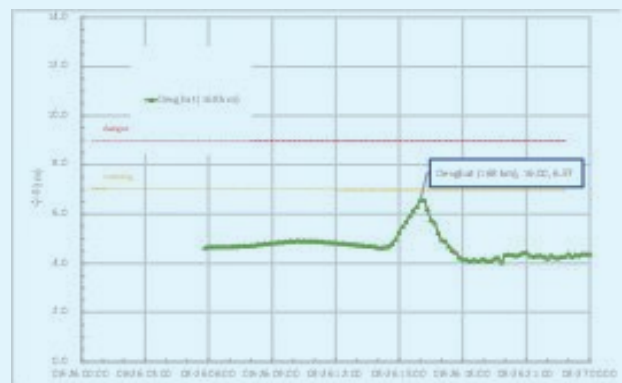
Galchhi (81km)



Malekhu (100 km)



Kali Khola (137 km)



Devghat (168 km)

그림 13. 하류 각 지점별 수위변화 (출처: नेपाल 수문기상부 자료를 이용하여 작성)

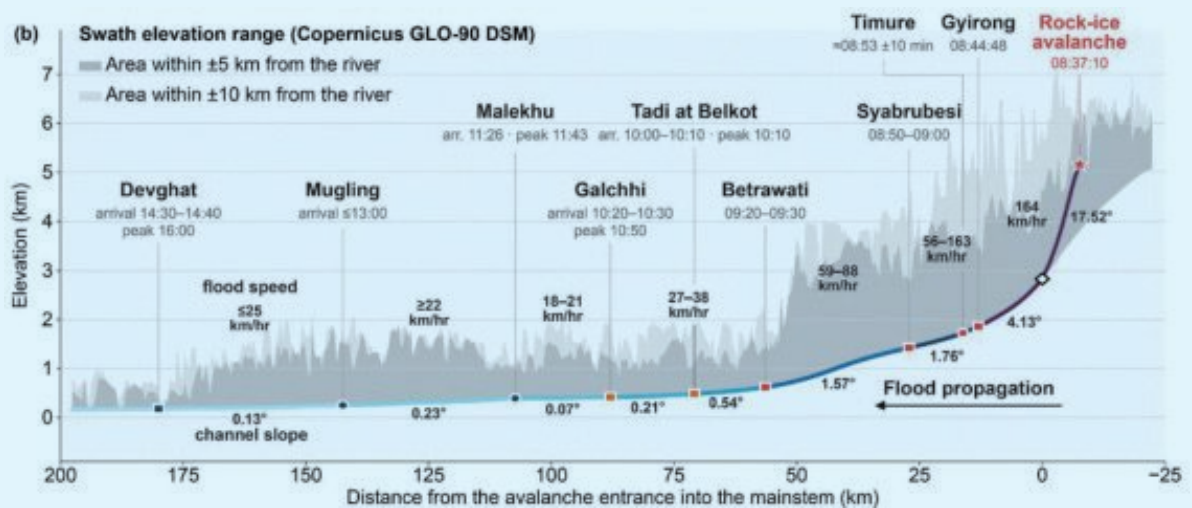


그림 14. 지점별 홍수 전파 시간 (출처: Center for Land Surface Hazards)

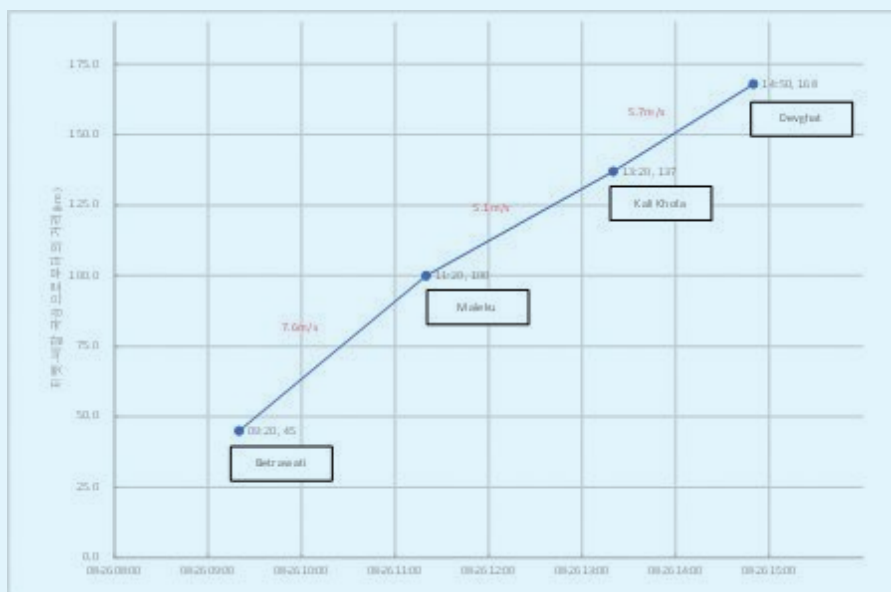


그림 15. 하류 각 지점별 홍수전파 속도 (출처 : New Spotlight Magazine)

## 5. 홍수 규모

### 5.1 홍수량 추정

가장 하류에 있는 Devghat 관측소에서는 수위-유량관계 곡선이 작성되어 있으며 이를 이용하여 수위

와 유량을 모두 산정할 수 있다. 이번 홍수 때, 이 지점의 첨두 홍수량은  $5,850\text{m}^3/\text{s}$ 이었고, 네팔 정부 자료에 의하면 이 지점의 평상시 유량은  $2,600\text{m}^3/\text{s}$ 이다. 이를 기반으로 이번 홍수 때 14:10~18:00 사이 이 지점에서 발생한 총 초과 홍수량을 계산하면 약 2천만 $\text{m}^3$ 가 된

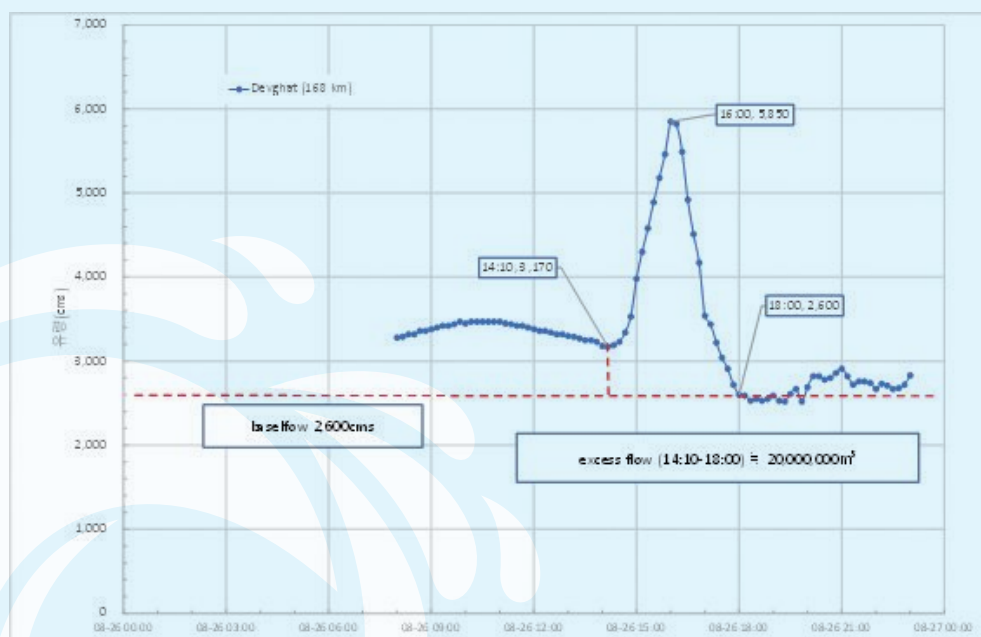


그림 16. Devghat 지점의 유량과 초과 홍수량

다. 이번 홍수가 강우로 발생한 것이 아니므로 강우나 지류 유입 등이 없이 발생한 것을 고려하면 이 홍수 총량이 상류 한 지점에서 발생한 것으로 가정할 수 있다.

5.2 상류에서 발생한 수위 및 유량 추정

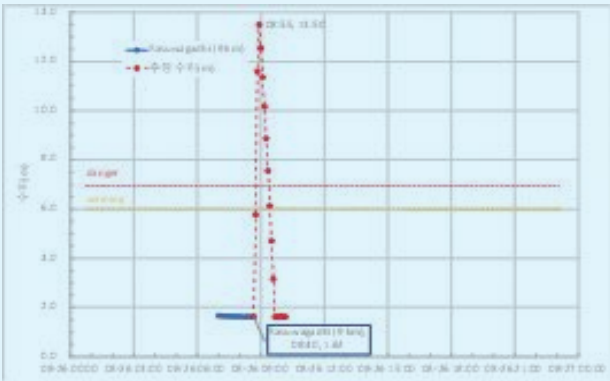
하류 100km 지점인 Malekhu 에서 30분간 7.13m 수위가 급상승하였고, 댐 붕괴로 인해 발생할 수 있는 홍수 수문곡선의 특성, 댐 붕괴파의 하류 전파 특성 등을 고려하면 최상류 Rasuwagadhi 지점에서 수

위 및 유량을 추정하는 것이 가능하다. 이 지점에서 수위 변동이 전혀 없던 상황에서 08:40분 이후 갑자기 수위 전승이 중단된 점을 고려하면 10분 동안 수위가 급상승하였다는 것도 추정할 수 있다. Galchhi와 Malekhu에서 관측된 홍수파의 상승특성 및 Devghat에서 산정된 약 2,000만 톤의 초과 홍수량, 일반적인 댐붕괴파의 특성 등을 고려하여 추정한 Rasuwagadhi 지점의 수위와 유량은 다음과 같다.

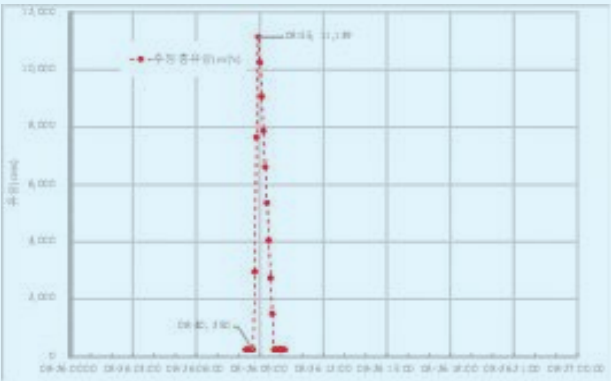
홍수는 15분 동안 상승하였다가 45분 동안 하강하

표 2. 최상류 Rasuwagadhi 관측소에서 추정된 수위와 유량

| 시각    | 수위(m) | 유량(m³/s) |
|-------|-------|----------|
| 08:40 | 1.62  | 250      |
| 08:45 | 5.78  | 2,972    |
| 08:50 | 11.60 | 7,655    |
| 08:55 | 13.50 | 11,139   |
| 09:00 | 12.55 | 10,268   |
| 09:05 | 11.36 | 9,070    |
| 09:10 | 10.17 | 7,872    |
| 09:15 | 8.87  | 6,620    |
| 09:20 | 7.56  | 5,368    |
| 09:25 | 6.13  | 4,061    |
| 09:30 | 4.71  | 2,755    |
| 09:35 | 3.16  | 1,502    |
| 09:40 | 1.62  | 250      |



추정된 수위



추정된 유량

그림 17. Rasuwagadhi 관측소에서 추정된 수위와 유량

는 것으로 추정하였고 초과 홍수량이 20,000,000m<sup>3</sup>가 되도록 수문곡선을 가정하였다. 그 결과 15분 동안 11.88m의 수위 상승과 11,000m<sup>3</sup>/s의 첨두유량을 추정하였다. 이 지점의 1,000년 빈도 홍수량이 1,761m<sup>3</sup>/s인 점을 고려하면 얼마나 큰 홍수량이 발생하였는지 짐작할 수 있다. 이 경우 계산되는 최대 유속은 14m/s이다.

## 6. 하천 상황

### 6.1 수문 상황(Rasuwagadhi 수력발전소)

이 지점의 유역면적은 3,300km<sup>2</sup>이고 댐과 발전소 사이 하상경사는 3.26%이다. 이 유역의 연평균 강수량은 1,000mm이고, 8월 평균 유량은 216.4m<sup>3</sup>/s로 하천 규모에 비해 상당히 큰 편이다.

Long term Mean Monthly Flow at Rasuwagadhi, Intake site of RGHEP

| Month     | Jan  | Feb  | Mar  | Apr  | May  | Jun   | Jul   | Aug   | Sep   | Oct   | Nov  | Dec  |
|-----------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| Mean Flow | 24.2 | 21.4 | 20.6 | 25.0 | 63.0 | 123.6 | 180.9 | 216.4 | 161.2 | 104.8 | 55.7 | 32.4 |

그림 18. Rasuwagadhi 지점의 월평균 유량(m<sup>3</sup>/s) (출처 : Rasuwagadhi hydropower company limited, 2013.2)

Fig.RGHEP-1 Flow Duration Curve at Weir Site

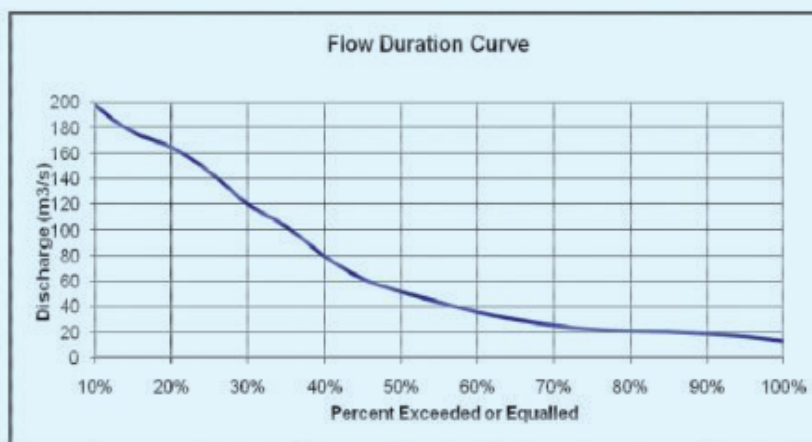


그림 19. Rasuwagadhi 지점 유량곡선 (출처 : Rasuwagadhi hydropower company limited, 2013.2)

Flood Estimates

| Return Period | Flood at Intake site (m <sup>3</sup> /s) | Flood at Powerhouse (m <sup>3</sup> /s) |
|---------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 2             | 421                                      | 427                                     |
| 10            | 701                                      | 712                                     |
| 20            | 828                                      | 841                                     |
| 100           | 1167                                     | 1185                                    |
| 1000          | 1761                                     | 1788                                    |

그림 20. Rasuwagadhi 관측소 빈도별 홍수량 (출처 : Rasuwagadhi hydropower company limited, 2013.2)

## 6.2 하천 단면 형상

홍수가 발생한 구간의 상류 하천은 전형적인 협곡이다. 이 구간에서 측량된 하천 단면 자료를 살펴보면 1,000년 빈도 홍수 때 형성될 수 있는 수심은 약 15~20m, 수면 폭은 약 100~400m이다.

## 7. 홍수 발생 원인 추정

네팔 홍수가 발생한 지 몇 달이 지났지만 아직 정확한 발생 원인은 명확하게 규명되지 않고 있다. 위성사진 확인 결과 기존에 이번 홍수를 발생시킬 만한 빙하 호가 확인되지 않아 초기에는 거대한 빙하 붕괴가 원인으로 지목되었다. 하지만 시간이 흐를수록 빙하 붕괴만으로는 약 2천만  $m^3$ 의 초과 홍수를 만들기 어렵다는 반론이 힘을 얻고 있다. 이런 상황에서 가능한 시나리오는 다음과 같다.

(가정 1) 홍수 발생 하루 이전 약 2천만  $m^3$  자연 호수 형성

이 가정은 홍수 발생 직전 24시간 이내에 거대한 자연 호수가 형성되었을 가능성을 기반으로 한다. 이를 위해서는 약 300 $m^3/s$ 의 하천 유량이 흐르고 있었다는 가정이 필요하다. 이 유량이 흐르는 상태에서 거대한 산사태가 발생하여 자연 산사태 댐을 만들었고, 물이 누적되어 약 2천만  $m^3$ 의 자연 호수가 형성될 수 있다는 것이다. 이 호수에 8.26일 거대한 빙하가 떨어지면 약 11,000 $m^3/s$ 의 대규모 홍수가 발생했다는 가정이다. 이 지점의 8월 평균 유량이 216 $m^3/s$ 이고, 빙하가 녹은 물이 산사태를 유발할 수 있음을 고려하면 이 시나리오의 가능성이 높을 것으로 판단된다. 다만 아직 계곡에 산사태가 발생했었는지, 어느 지점에 산사태 댐이 만들어졌었는지, 이 댐에 약 2천만  $m^3$ 의 물이 고여 있었는지 등에 대해서는 확인되지 않은 상황이다.

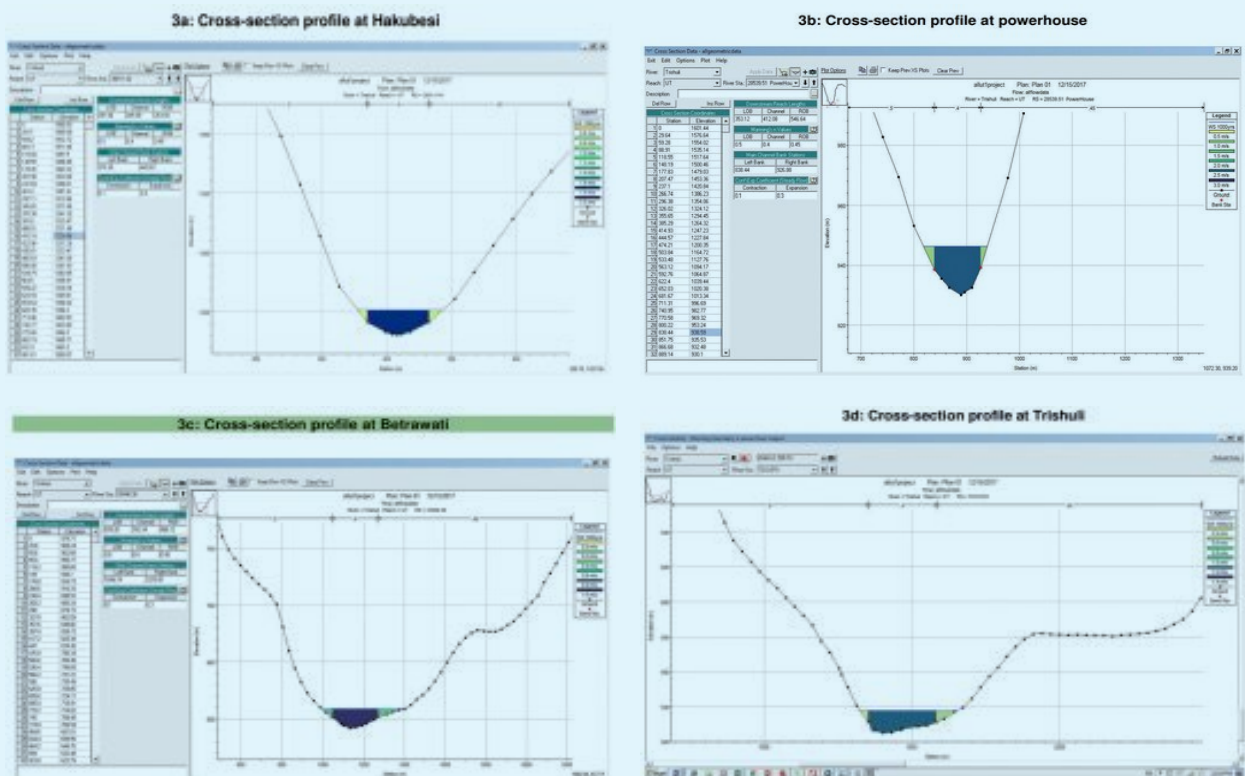


그림 21. 하천단면 (출처 : NWEDC, 2018)

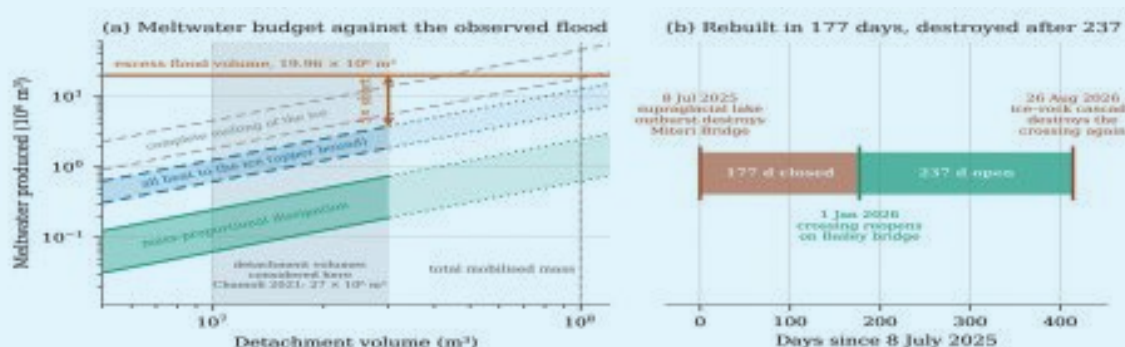


**Figure 4.** Water source and reconstruction cycle. (a) Meltwater produced by frictional dissipation against detachment volume. The green band is the mass-proportional partition and the blue band the upper bound in which all frictional heat reaches the ice, each spanning ice fractions of 0.2 to 0.5, drops of 1200 to 1830 m and initial ice temperatures of 0 to  $-5^\circ\text{C}$ . Both fade beyond  $3 \times 10^5 \text{ m}^3$ , where the axis ceases to describe an ice-bearing detachment. Grey dashed lines show complete melting with no energy constraint, and the arrow marks the shortfall at the most favourable corner of the parameter space, where the upper bound still falls five-fold short of the observed flood volume shown in orange. (b) The Rasuwagadhi crossing between the two events, destroyed on 8 July 2025, reopened after 177 days and destroyed again after 237 days in operation.

그림 17. 빙하로 인한 물 발생 가능량 추정 (출처 : Acharya and Paudel, 2026, preprint)

(가정 2) 오래전 약 2천만  $\text{m}^3$  자연 호수 형성

이 가정은 오래전에 이미 약 2천만  $\text{m}^3$ 의 자연 호수가 형성되어 있었다는 것이다. 오래전에 거대한 빙하호가 있었고 빙하 붕괴와 동시에 이 빙하호가 붕괴하면서 대규모 홍수를 만들었다는 가정이다. 이 가정의 문제는 기존 위성영상에서 빙하호의 존재를 확인할 수 없다는 것이다. 빙하 붕괴 지점 하류에 형성된 거대한 빙하호는 위성영상에서 발견되지 않는다. 따라서 이 가능성은 높지 않은 것으로 보인다.

(가정 3) 자연 호수 없는 상황, 빙하 붕괴만으로 홍수 발생

이 가정은 호수 없이 빙하 붕괴만으로 대규모 홍수가 발생했다는 것이다. 빙하 붕괴와 동시에 빙하 아래에 있던 물이 토석과 같이 유출되었고, 추락하는 과정에서 마찰열에 의해 빙하가 녹으면서 많은 양의 물이 형성되었다는 가정이다. 그러나 이런 과정에서 형성된 홍수(토석류)라면 전파속도가 빠르지 못할 것이며, 하류 168km까지 도달하기는 어려웠을 것으로 추정된다. 일부 연구에서도 빙하 붕괴만으로 초과 홍

수량을 생성하기는 어려웠을 것으로 판단하고 있다 (Acharya and Paudel, 2026).

## 8. 시사점

네팔 홍수는 전혀 예상할 수 없는 극단적 홍수다. 강우에 의한 홍수도 아니고 돌발적인 강우에 의한 홍수도 아니다. 일반적인 빙하 홍수도 아니다. 매우 특이한 상황이 겹쳐서 매우 극단적이고 괴멸적인 홍수가 발생하였다. 현재로서 추정할 수 있는 원인은 기후 변화 → 기온 상승 → 빙하 용해 → 거대한 산사태 발생 → 계곡 폐색, 산사태 댐 형성 → 급작스러운 수량 누적, 거대한 자연 호수 형성 → 거대한 빙하 붕괴 발생 → 자연 호수로 빙하 추락 → 호수 붕괴 → 거대한 댐 붕괴 홍수 발생으로 볼 수 있다.

매우 극단적인 상황이지만 발생했다. 범위를 좁혀 댐 붕괴 홍수라고 생각하면 이번 홍수에 대한 이해는 달라진다. 기후변화로 인해 극단적인 강우 등의 현상이 발생할 수 있고 이 현상이 댐 붕괴로 연결된다면 괴멸적인 홍수가 될 수 있다는 것이다. 실제로 우리나라

라에서도 2002년 태풍 루사 때 여러 농업용 저수지가 붕괴한 적이 있으며 과거에도 농업용 저수지 붕괴 사고는 여러 번 발생한 바 있다.

네팔 홍수를 계기로 고려해야 하는 상황은 발생하지 않으리라고 생각했던 극단적인 상황이 발생할 수 있고 우리가 예상하지 않았던 극단적인 피해가 발생할 수 있다는 것이다.

우리나라에는 대규모 댐을 비롯하여 약 18,000개의 저수지가 운영되고 있다. 댐 붕괴를 대비하여 일정 규모 이상의 저수지의 경우 법적으로 비상대처계획(EAP)을 수립해 두고 있다. 네팔 홍수를 계기로 다시

한번 점검해야 할 부분은 댐붕괴에 대한 대비 체계이다. 형식적인 절차를 넘어 대비 체계의 작동 가능성을 다시 확인해야 한다.

댐뿐만 아니라 사회적으로 홍수 취약 시설에 대한 대비도 필요하다. 대규모 제방 붕괴, 지하 서부간선도로나 여의-신월 지하철도와 같은 초대형 지하 시설, 도심 대규모 지하공간, 인구 밀집 지역 등에 대해서는 새로운 차원의 대비가 필요하다. 극단적 상황 발생에 대비할 수 있는 인명 보호 대책 수립과 이의 작동을 주기적으로 확인할 수 있는 시스템이 절실한 상황이다.

#### 참고문헌

- Acharya, Sunim and Paudel, Animesh, 2026(not published, preprint), The Bhote Koshi-Trishuli flash flood of 26 August 2026, Rasuwa, Nepal: warning latency exceeded flood travel time
- Center for Land Surface Hazards, 2026.8.30., August 2026 Nepal Trishuli Flood
- Department of Hydrology and Meteorology, Nepal
- ESSA Technologies Ltd., 2014, Appendix C: GIS Mapping and Spatial Analysis, Supplemental ESIA-Upper Trishuli-1 Hydropower Project.
- New Spotlight Magazine, Bhotekoshi Flood: The Warning That Came by Telephone
- NDRRMA(National Disaster Risk Reduction and Management Authority), Ministry of Home Affairs, Government of Nepal
- NDRRMA(National Disaster Risk Reduction and Management Authority), 2026.9., Rapid Damage and Needs Assessment(RDNA), Ministry of Home Affairs, Government of Nepal
- NWEDC(Nepal Water and Energy Development Co. PVT. LTD.), 2018, Disaster Management Plan, Upper Trishuli (UT-1) Hydropower project(216MW), Rasuwa District, Nepal
- Rasuwa Gadhi hydropower company limited, 2013.2., Rasuwagadhi hydroelectric project, Prequalification documents