

기상학적 가뭄의 진행과 회복: 2025년 강릉 사례

이광훈* · 감종훈

포항공과대학교 환경공학부

(접수일: 2026년 6월 6일, 수정일: 2026년 6월 24일, 게재확정일: 2026년 7월 6일)

Meteorological Drought Propagation and Recovery: A Case Study of Gangneung in 2025

Kwang-Hun Lee* and Jonghun Kam

Division of Environmental Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology, Pohang, Korea

(Manuscript received 6 June 2026; revised 24 June 2026; accepted 6 July 2026)

Abstract In the late summer of 2025, the reservoirs in Gangneung fell to their lowest levels on record. The hydrologic drought was such severe that the natural disaster declaration was issued on 30 August 2025. Yet how much rain a drought needs to recover or whether that recovery can be predicted remains poorly understood. To advance our limited understanding, here we analyze the self-calibrating effective drought index (scEDI) with storage records from eight reservoirs and Korea Meteorological Administration subseasonal-to-seasonal (S2S) forecasts. Results demonstrate that the scEDI value falls to -2.29 on 30 August 2025 (the third most severe drought since 1990) and is above $+0.5$ (the recovery threshold) on 14 October 2025. Over the next 45 days, cumulative rainfall reached 584.7 mm, about twice the long-term average for this period. A historical-analog experiment shows that only 10% of past precipitation scenarios generate the drought recovery on time. The S2S forecasts show no recovery signal across lead times. This absence largely reflects a systematic underestimation of precipitation including the heavy rainfall that drove the recovery. The largest reservoir, which supplies over 80% of domestic water in Gangneung, recovered the most slowly owing to its size and continued water withdrawal, indicating the region's vulnerability for drought mitigation. This study highlights that securing reliable S2S predictions for the timing of rainy days is vital for effective drought contingency planning. Furthermore, it underscores the need to diversify water sources of Gangneung in a changing climate.

Key words: Meteorological drought, Drought recovery, Self-calibrating effective drought index (scEDI), Subseasonal-to-seasonal (S2S) forecast, Reservoir storage

1. 서 론

가뭄은 전 지구적으로 가장 큰 사회·경제적 피해를 유발하는 기상재해 중 하나이다. 다른 극한 현상과 달

리 가뭄은 시작과 끝을 명확히 정의하기 어렵고 넓은 지역에 걸쳐 장기간 누적되어 나타나기 때문에, 그 심도를 객관적으로 정량화하기 위한 다양한 가뭄지수가 개발되어 왔다(Palmer, 1965; McKee et al., 1993; Byun and Willhite, 1999). 최근 기후변화로 강수의 변동성이 커지면서 가뭄의 강도와 발생 빈도가 증가하고 있으며, 과거 수백 년 동안 관측되지 않았던 극심한 가뭄의 가능성도 보고되고 있다(Cook et al., 2022; Hoylman et al., 2022). 이에 따라 가뭄의 발생과 심도

*Corresponding Author: Kwang-Hun Lee, Division of Environmental Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology, Pohang 37673, Korea.
Phone: +82-54-279-2318, Fax: +82-54-279-8299
E-mail: lkh322@postech.ac.kr

를 감시하는 것을 넘어, 가뭄이 언제 어떻게 해소되며 그 해소를 사전에 예측할 수 있는지에 대한 이해의 중요성이 커지고 있다.

한국을 포함한 동아시아는 여름철 몬순에 강수가 집중되는 뚜렷한 계절성을 가지며, 이러한 강수의 시간적 편중은 특정 계절에 강수가 부족할 경우 빠르게 가뭄으로 이어지는 구조적 취약성을 만든다(Lee et al., 2016; Bae et al., 2019). 실제로 2022년부터 2023년까지 남부 지방에서는 장기간의 강수 부족으로 심각한 기상학적 가뭄이 발생하여 생활용수와 농업용수 공급에 큰 차질을 빚었다(Park et al., 2023; Choi et al., 2025). 이러한 가뭄을 정량적으로 감시하기 위해 표준 강수지수(standardized precipitation index, SPI)와 유효 가뭄지수(effective drought index, EDI) 등이 활용되어 왔으며(Byun and Wilhite, 1999), 최근에는 장기간의 기후 변동성을 반영하도록 시간에 따라 변하는 기후 값을 적용한 자기보정 유효가뭄지수(self-calibrating effective drought index, scEDI)가 제안되어 한반도 가뭄의 감시 성능이 향상되었다(Park et al., 2022).

2025년 강원도 강릉에서 발생한 가뭄은 이러한 위협이 현실로 나타난 대표적 사례이다. 기상청은 2025년 4월 6개월 누적 강수량 기반의 표준강수지수가 기준을 밑돌면서 강릉 지역에 가뭄을 선언하였고, 이후 평년을 크게 밑도는 강수와 평년보다 높은 기온이 이어지며 가뭄이 빠르게 심화되었다(KMA, 2026). 8월 상순까지 강릉의 누적 강수량은 평년의 절반 수준에 머물렀으며, 지역 생활용수의 80% 이상을 공급하는 오봉저수지의 저수율은 9월 중순 11%까지 떨어졌다. 이에 강릉시는 제한급수와 운반 급수를 시행하였고, 정부는 2025년 8월 30일 가뭄으로 인한 재난사태를 선포하였는데, 이는 자연재난을 사유로 한 첫 재난사태 선포였다. 한편 9월 13일 호우를 기점으로 집중된 강수로 저수율은 빠르게 회복되어 10월 초에는 평년 수준을 넘어섰고 재난사태는 9월 22일 해제되었다. 이처럼 강릉 가뭄은 짧은 기간에 극심한 심도까지 발달한 뒤 비교적 빠르게 해소된 사건으로, 가뭄의 심도뿐 아니라 회복 과정과 그 예측가능성을 함께 이해할 필요성을 보여준다.

기존의 가뭄 연구는 주로 가뭄의 발생 시점, 심도, 지속 기간, 그리고 기상학적 가뭄에서 농업·수문학적 가뭄으로 이어지는 전과 특성에 초점을 맞추어 왔다(McKee et al., 1993; Bae et al., 2019). 그러나 가뭄이 어느 정도의 강수가 공급되어야, 그리고 얼마나 빠른 시간 안에 해소되는지에 대한 정량적 분석은 상대적으로 부족하였다. 가뭄의 해소는 강수의 누적량과 시점에 민감하게 좌우되며, 가을철 태풍이나 집중호우와 같은 특정 강수 사상이 가뭄의 전과와 해소에 불균형적으로 기여할 수 있다(Asoka and Kam, 2025).

따라서 과거의 장기 강수 기록을 활용하여 가뭄 해소에 필요한 강수의 양과 시점을 정량적으로 평가하는 접근이 요구된다.

나아가 이러한 가뭄 해소가 계절내 계절(subseasonal-to-seasonal, S2S) 규모에서 사전에 예측될 수 있었는지는 수자원 관리 측면에서 중요한 문제이다. S2S 예보는 일기예보와 계절예보 사이의 시간 규모를 매우며 가뭄 대응에 핵심적인 정보를 제공할 수 있으나(Vitart et al., 2017), 강수의 예측성이 낮아 가뭄의 발생과 해소를 정확히 예측하는 데에는 여전히 한계가 있다(Pendergrass et al., 2020). 또한 기상학적 가뭄이 저수지 저수율과 같은 수문학적 변수로 전파되는 국지적 과정은 저수지의 규모와 운영 방식에 따라 다르게 나타나며(Kam, 2021), 하나의 지역에 분포한 다수의 저수지를 대상으로 이를 동시에 살펴본 연구는 많지 않다. 강릉 사례는 하나의 기상관측소와 다수의 저수지가 인접하여 분포해 있어, 기상학적 가뭄과 그에 대한 수문학적 반응을 함께 분석하기에 적합한 조건을 제공한다.

이러한 배경에서 본 연구는 2025년 강릉 가뭄을 대상으로 가뭄의 심도, 회복, 예측가능성, 그리고 저수지 반응을 종합적으로 분석하고자 한다. 이를 위해 강릉 지점의 장기 강수 자료로부터 1960년 이후의 scEDI를 산정하여 2025년 가뭄의 심도를 장기 기록의 관점에서 진단하고, 과거 강수 시나리오(historical analog)를 적용하여 가뭄 해소에 필요한 강수량과 시점을 정량화하였다. 또한 기상청 S2S 예보 자료를 이용하여 가뭄 해소에 대한 예측가능성을 평가하고, 강릉 지역 주요 저수지의 저수율 변동을 통해 기상학적 가뭄에 대한 수문학적 반응을 분석하였다. 본 연구에서 다루고자 하는 질문은 다음과 같다. 1) 2025년 강릉 가뭄은 장기 기록상 얼마나 극심하였는가? 2) 가뭄 해소에는 어느 정도의 강수가 필요하였으며, S2S 예보는 이러한 해소를 예측할 수 있었는가? 3) 기상학적 가뭄에 대해 강릉 지역의 저수지는 어떻게 반응하였는가? 본 연구의 결과는 기후변화로 빈번해지는 지역 규모 가뭄의 심도 평가와 회복 예측, 그리고 수자원 관리에 기초 정보를 제공할 것이다.

2. 자료 및 방법

2.1 연구 지역 및 자료

연구 지역인 강원도 강릉시는 영동 지역에 위치하며, 다수의 농업용 저수지와 장기 기상관측 지점이 한 지역에 함께 분포한다. 이러한 조건은 기상학적 가뭄과 그에 대한 저수지의 수문학적 반응을 같은 공간에서 일관되게 분석할 수 있게 한다.

강릉 종관기상관측소(ASOS, 지점번호 105, 37.75°N,

128.89°E)의 일강수량과 일평균·최고·최저기온을 기상청으로부터 취득하였으며, 분석 기간은 1912년부터 2025년까지이다. 한국전쟁기인 1950년과 1951년은 강릉 ASOS 관측이 결측되어 분석에서 제외하였다. 1950년은 가뭄 회복기에 해당하는 9월 초의 관측이 누락되었고, 1951년은 연중 관측의 상당 기간이 결측되었다.

저수지 자료는 한국농어촌공사(KRC)에서 수집하였다. 강릉 관내 8개 농업용 저수지(오봉, 장현, 사천, 옥계, 향호, 경포, 동막, 칠성)의 일별 저수율과 시설제원을 이용하였으며, 오봉저수지의 상대적 규모를 파악하기 위해 전국 KRC 저수지의 제원 분포와 비교하였다. 저수지의 위치 표시에는 Surface Water and Ocean Topography (SWOT), Prior Lake Database (PLD)의 다각형을 사용하였다.

가뭄 해소에 대한 예측가능성 평가에는 기상청이 현업 운용하는 계절내 계절(subseasonal-to-seasonal, S2S) 예측시스템 GloSea6의 강수 예측 자료를 사용하였다. GloSea6는 기상청과 영국 기상청이 공동 운영하는 대기-해양 결합 계절예측시스템 GloSea5 (MacLachlan et al., 2015)의 개선 버전이며, 자료는 ECMWF S2S 예측 프로젝트 데이터베이스(Vitart et al., 2017)에 게시된 기상청 실시간 예측을 취득하였다. 예측은 매일 1회 0000 UTC에 초기화되며 발행일마다 7개 섭동 멤버가 60일 선행시간까지 제공된다. 1.5° 위경도 격자 자료에서 강릉 ASOS에 가장 가까운 격자(37.5°N, 129.0°E)를 선택하였으며, 2025년 8월 1일부터 10월 31일까지의 92개 발행일에 대해 각 멤버의 60일 예측을 이용하였다. 누적 강수량 변수를 24시간 간격으로 차분하여 일강수량을 산출하였다.

2.2 자기보정 유효가뭄지수(scEDI)

본 연구에서는 가뭄의 심도를 정량화하기 위해 자기보정 유효가뭄지수(self-calibrating effective drought index, scEDI)를 사용하였다. scEDI는 일강수량만으로 가뭄을 정의하는 유효가뭄지수(effective drought index, EDI; Byun and Wilhite, 1999)를 기반으로 하며, 시간에 따라 변화하는 30년 기후값을 적용하여 장기적인 기후 변동성을 반영하도록 보정한 지수이다(Park et al., 2022). 일강수량의 가중 누적값을 동일 기간의 기후값과 비교하여 표준화하며, 본 연구에서는 한국전쟁기의 결측으로 연속적인 자료 확보가 어려운 점을 고려하여 1960년 이후의 강릉 ASOS 일강수 자료로 scEDI를 산정하였다. scEDI가 +0.5 이상이면 습윤 또는 회복 상태, -0.5 이하이면 가뭄 상태로 판정하였다. scEDI는 표준화된 지수이므로 +0.5는 평년 대비 0.5 표준편차에 해당하며 평년보다 습윤한 상위 약 31%의 상태를 뜻한다. 같은 방식으로 -0.5 이하인 가뭄

상태도 약 31%의 빈도를 가지며 -0.5에서 +0.5 사이의 평년 상태가 약 38%이다. scEDI는 이동 30년 기후값으로 자기보정되므로 이러한 빈도는 기록 전체에서 일정하게 유지된다(Park et al., 2022). 회복 기준으로 0이 아닌 +0.5를 사용한 것은 0 근처의 값이 가뭄이 다시 발생할 수 있는 일시적 정상 구간일 수 있기 때문이며(Park et al., 2023), 평년보다 분명히 습윤한 상태로의 복귀를 회복으로 판정하기 위함이다. 회복 기준(+0.5)을 가뭄 시작 기준(-0.5)과 대칭으로 둔 것은 Park et al. (2022)을 따랐다. 후술하는 가상 강수 시나리오에 대한 scEDI는 모두 동일한 산출 절차를 통해 재계산하여, 시나리오 간 결과를 직접 비교할 수 있도록 하였다.

scEDI의 산정 절차는 Byun and Wilhite (1999)와 Park et al. (2022)를 따랐으며 핵심 식은 다음과 같다. 먼저 시점 t 의 유효강수량(effective precipitation, EP)을 선행 강수의 시간 가중 누적으로 정의한다.

$$EP(t) = \sum_{n=1}^{DS} \left[\frac{1}{n} \times \sum_{m=1}^n P(t-m) \right] \quad (1)$$

여기서 $P(t-m)$ 은 시점 t 로부터 m 일 전의 일강수량, n 은 누적 합산 일수, DS 는 가중 누적 기간(duration of summation)으로 본 연구에서는 365일을 사용하였다. 안쪽 합은 최근 n 일의 누적강수량을 n 으로 나눈 값이므로 최근의 강수가 더 큰 가중을 받는다.

표기의 편의를 위해 시점 t 를 달력일 k (1-365)와 연도 y 로 표시한다. scEDI는 평년값을 선행 30년의 이동 기간으로 산정한다. 달력일 k 의 이동 30년 평균 강수 rCP 는 식(2)와 같으며 l 은 $y-29$ 부터 y 까지의 이동 30년이다.

$$rCP(k, y) = \frac{\sum_{l=y-29}^y P(k, l)}{30} \quad (2)$$

이로부터 평년 유효강수량 $rMEP$ 를 산정한다.

$$rMEP(k, y) = \sum_{n=1}^{DS} \left[\frac{1}{n} \times \sum_{m=1}^n rCP(k-m, y) \right] \quad (3)$$

유효강수량에서 평년값을 뺀 편차 $rDEP$ 를 구한다.

$$rDEP(k, y) = EP(k, y) - rMEP(k, y) \quad (4)$$

끝으로 $rDEP$ 를 이동 30년 기간 $rDEP$ 의 표준편차 STD로 나누어 표준화한다.

$$scEDI(k, y) = \frac{rDEP(k, y)}{STD[rDEP(k, y)]} \quad (5)$$

평년값과 표준편차를 전체 기간이 아닌 선행 30년으로 산정하므로 scEDI는 장기적인 강수 기후의 변화를 자동으로 보정한다. 실제 산정에서는 가뭄의 지속에 따라 누적 기간 DS가 시간에 따라 변하며 그 상세한 절차는 Park et al. (2022)을 따랐다.

2.3 가뭄 심도 및 회복의 평가

2025년 강릉 가뭄의 회복 과정을 평가하기 위해, scEDI가 연 최저값을 기록한 2025년 8월 30일의 다음 날부터 scEDI가 +0.5에 도달한 2025년 10월 14일까지의 45일을 회복기로 정의하였다. 먼저 이 회복기 강수가 기후학적으로 어느 정도 수준인지 파악하기 위해, 각 연도의 8월 31일부터 10월 14일까지 45일 누적강수량을 1912년부터 2025년까지 산출하고 2025년 값의 백분위와 경험적 재현주기를 평가하였다. 1950년과 1951년을 제외한 분석 표본은 112개 연도이다.

다음으로, 어떠한 강수 조건에서 가뭄 회복이 가능하였는지를 과거 강수 분포를 이용하여 평가하기 위해 과거 강수 시나리오(historical analog) 실험을 수행하였다. 2025년 8월 30일 최저점까지는 관측 강수를 그대로 유지하고, 그 이후인 2025년 8월 31일부터 12월 31일까지의 강수를 1912년부터 2024년까지 각 연도의 동일한 월일 강수로 치환한 뒤 scEDI를 재계산하였다. 각 시나리오는 최저점 이후 강릉에 과거 특정 연도의 실제 일강수가 내렸다면 scEDI가 어떤 경로로 회복하였을지를 보여준다. 1950년과 1951년을 제외하여 총 111개의 과거 강수 시나리오를 구성하였다. 8월 31일 이후 scEDI가 +0.5에 처음 도달한 시점을 기준으로, 각 시나리오를 10월 14일 이전 회복, 10월 15일부터 12월 31일 사이 회복, 그리고 미회복의 세 군으로 분류하였으며, 시나리오별 누적강수량과 첫 회복일, 그리고 8월 31일 이후 최대 scEDI를 산출하였다.

2.4 S2S 예보를 이용한 회복 예측성 평가

가뭄 회복이 사전에 예측될 수 있었는지를 평가하기 위해, 발행일별 S2S 예측을 이용한 회복 예측 실험을 수행하였다. 각 발행일에 대하여 강릉 최근접 격자의 7개 앙상블 멤버 60일 일강수량을 추출하고, 이를 관측 기반 강수 시계열의 해당 예측 구간에 멤버별로 치환한 뒤 scEDI를 재계산하였다. 이를 통해 발행일과 예보 선행시간(lead time)에 따른 앙상블 평균 scEDI, scEDI가 +0.5에 처음 도달하는 선행시간, 그리고 관측 회복일인 2025년 10월 14일을 기준으로 한 선행시간별 회복 신호를 평가하였다. 또한 예측 결과가 모델 강수의 특성에 의해 좌우되는지를 확인하기 위해 예측 강수를 관측 강수와 직접 비교하였다. 선행시간 구간(1~7, 8~14, 15~21, 22~30, 31~45, 46~60

일)별로 예측 일강수의 평균과 호우 빈도를 관측과 비교하였고 앙상블 평균과 개별 멤버의 회복 신호 도달 발행일 수를 구분하였다. 회복을 견인한 2025년 9월 13일 호우에 대한 멤버별 예측 강도를 점검하고 회복기 동안 예측 강수의 누적 부족과 최대 일강수의 시점 오차를 산출하였다.

2.5 저수지 저수율 분석

기상학적 가뭄에 대한 저수지의 반응을 분석하기 위해, 강릉 관내 8개 저수지의 2025년 일별 저수율을 강릉 ASOS 일강수량과 함께 검토하였다. 각 저수지의 2025년 최저 저수율을 장기 기록(1996년부터 2025년) 내 백분위로 평가하고, 저수율이 임계값(50%, 30%, 20%) 미만으로 떨어진 일수와 8개 저수지가 동시에 임계값 미만을 기록한 일수를 산출하여 가뭄의 동조성을 분석하였다. 또한 저수율 최저점 이후 저수율이 95%와 100%에 처음 도달하기까지의 소요일수를 산정하였다. 저수율이 만수에 도달하면 더 이상 상승할 수 없으므로 종점을 고정한 평균 회복속도는 만수 도달이 빠른 저수지에서 낮게 평가된다. 이러한 포화의 영향을 피하기 위해 평균 회복속도는 최저점부터 첫 95% 도달일과 2025년 10월 14일 중 이른 시점까지의 저수율 상승분을 경과 일수로 나눈 값으로 정의하였다(이하 포화 보정 회복속도). 95%를 기준으로 삼은 것은 관측 기간 내 만수에 도달하지 못한 저수지를 포함하여 비교하기 위함이다.

3. 결 과

3.1 강릉 저수지 분포와 오봉저수지의 규모적 위치

강릉 관내에는 8개의 농업용 저수지가 분포하며, 강릉 ASOS 관측 지점과 인접해 있다(Fig. 1a). 이 가운데 오봉저수지는 총저수량 $17.30 \times 10^6 \text{ m}^3$ 로 8개 저수지 중 가장 크며, 나머지 7개(장현 2.20, 사천 2.11, 옥계 1.64, 향호 1.18, 경포 1.14, 동막 0.94, 칠성 $0.67 \times 10^6 \text{ m}^3$)와 규모에서 큰 차이를 보였다. 전국 KRC 저수지 모집단과 비교하면 오봉저수지는 총저수량에서 99.0 백분위, 유역면적(10,900 ha)에서 99.6 백분위, 만수면적(93.90 ha)에서 97.5 백분위에 위치하였으며, 만수위 표고는 115.0 m로 66.4 백분위였다(Figs. 1b-e). 즉 오봉저수지는 강원도를 대표하는 대규모 저수지에 해당한다. 강릉의 용수 공급이 이러한 단일 대형 저수지에 집중되어 있다는 점은, 기상학적 가뭄이 발생할 경우 지역 수자원이 취약해질 수 있음을 시사한다.

3.2 2025년 강릉 가뭄의 심도

1990년부터 2025년까지 강릉 ASOS의 일별 기온, 강수량, scEDI 시계열을 Fig. 2에 제시하였다. 분석 기

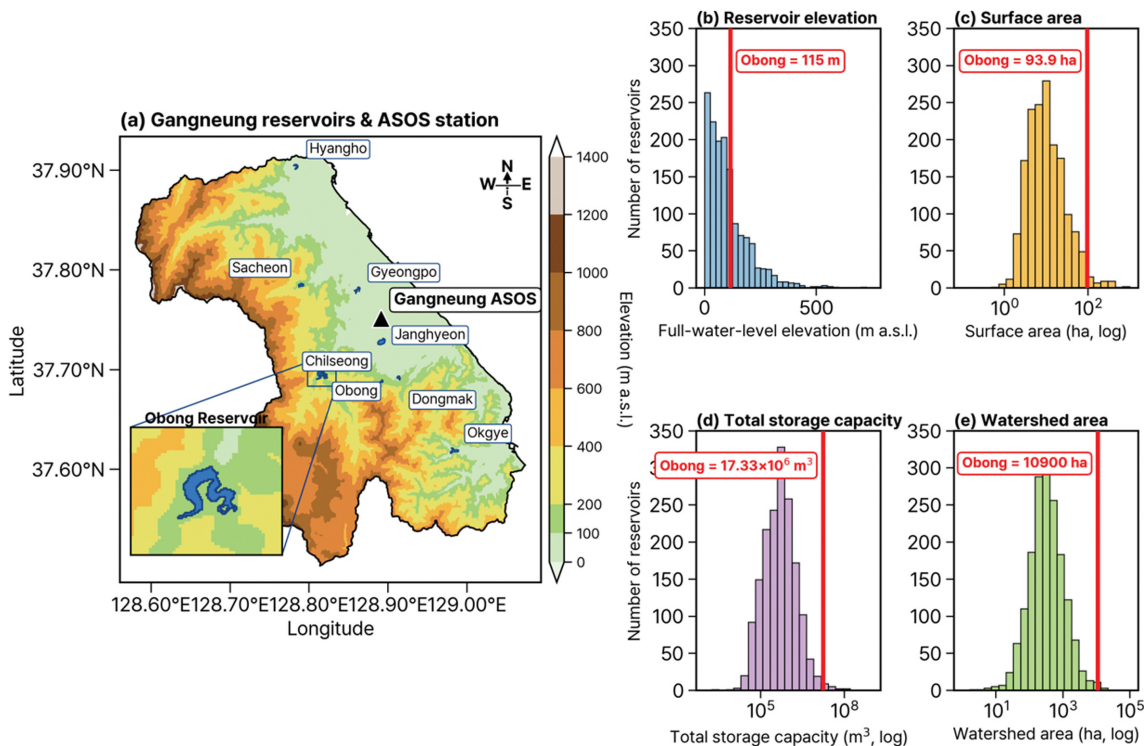


Fig. 1. Distribution of the eight agricultural reservoirs in Gangneung and the relative position of Obong Reservoir within the national reservoir population. (a) Gangneung boundary with a 90 m digital elevation model (DEM), the eight reservoirs (SWOT PLD polygons), and the Gangneung ASOS station (station 105). (b-e) Position of Obong Reservoir (red lines) within the national Korea Rural Community Corporation (KRC) reservoir population for full-water-level elevation, surface area, total storage capacity, and watershed area.

간 동안 강릉의 연평균 강수량은 약 1,451 mm였다 (Figs. 2a, b). scEDI는 2025년 8월 30일 -2.286을 기록하였다(Fig. 2c). 이는 1990~2025년에 발생한 가뭄 사건 가운데 1994년(-2.57)과 2002년(-2.289)에 이어 세 번째로 깊은 값이다. scEDI가 -0.5 미만으로 지속된 기간은 118일로 같은 기간 중 8번째로 길었다. 심도 순위를 1990년 이후로 평가한 것은 scEDI가 시간에 따라 변하는 30년 기후값을 기준으로 산정되어, 1960년 이후 자료로부터 완전한 30년 기준이 갖추어지는 시점이 1990년이기 때문이다. 최저점에 도달한 이후 scEDI는 빠르게 상승하여 2025년 10월 14일 +0.52로 회복 임계값(+0.5)을 넘어섰다. Figure 2d에는 2025년의 가뭄 최저점에서 회복일에 이르는 scEDI의 변화를 확대하여 제시하였다. 즉 2025년 강릉 가뭄은 늦여름에 이례적으로 깊은 심도까지 발달한 뒤 비교적 짧은 기간에 회복된 사건이었다.

3.3 가뭄 회복기 강수의 기후학적 특성과 회복 조건

회복기로 정의한 8월 31일부터 10월 14일까지 45

일 동안 강릉의 누적강수량은 584.7 mm로, 1912~2024년 평균인 276 mm의 약 2.1배에 해당하였다(Fig. 3). 이 값은 1950~1951년을 제외한 112개 연도 분포에서 93.7 백분위(8위)에 위치하였으며, 경험적 재현주기는 약 16년이었다. 즉 2025년의 가뭄 회복은 이례적으로 많은 강수가 집중된 시기에 이루어졌다.

이러한 회복이 어떤 강수 조건에서 가능하였는지를 평가하기 위해 과거 강수 시나리오 실험을 수행하였다(Fig. 4). 111개 시나리오 중 10월 14일 이전에 회복한 경우는 10.8%(12개)에 불과하였고, 10월 15일부터 12월 31일 사이에 회복한 경우가 6.3%(7개), 12월 31일까지 회복하지 못한 경우가 82.9%(92개)였다. 어느 시기의 강수가 회복을 결정하였는지를 정량적으로 평가하기 위해 회복 시나리오와 미회복 시나리오의 강수 시기와 강도를 비교하였다(Fig. 5). 회복 시나리오 오는 8월 31일 이후 누적강수가 미회복 시나리오보다 빠르게 증가하였고 그 차이는 9월 중에 뚜렷하게 벌어졌다(Fig. 5a). 회복 시기를 세 구간으로 나누면 9월 상반기(9월 1일부터 15일) 누적강수가 회복 시나리오

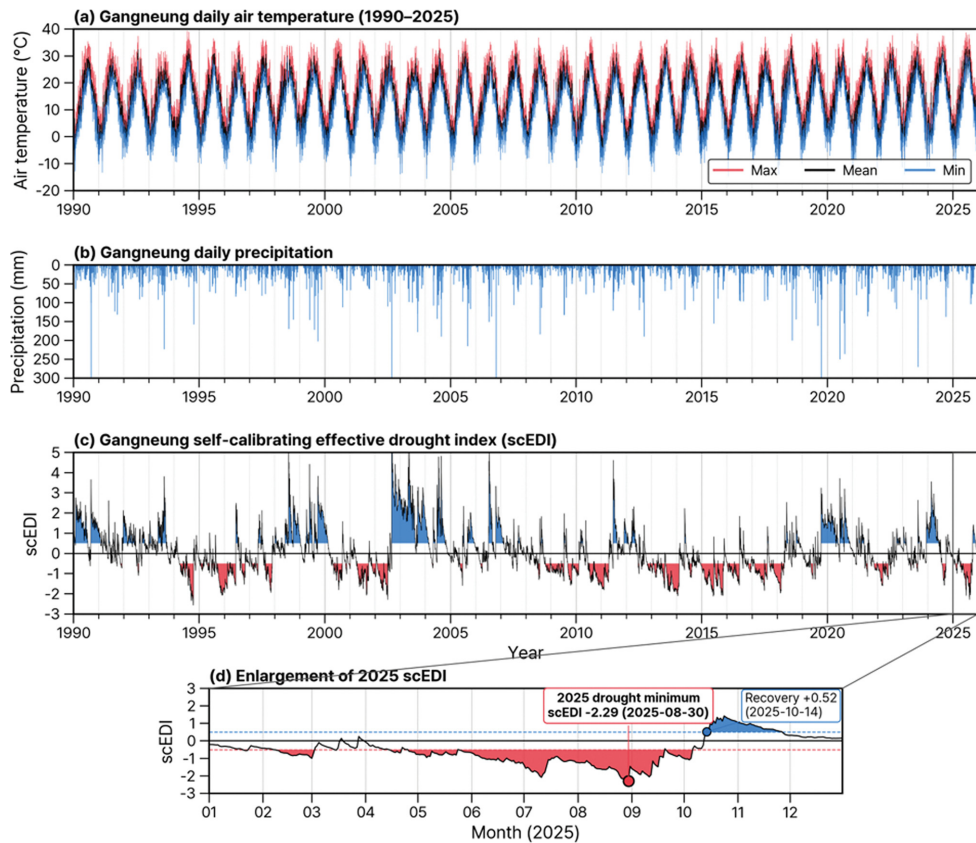


Fig. 2. Daily time series at the Gangneung ASOS station, 1990~2025. (a) Maximum (red), mean (black), and minimum (blue) air temperature. (b) Daily precipitation. (c) Self-calibrating effective drought index (scEDI) shaded blue above +0.5 and red below -0.5. (d) Enlargement of the 2025 scEDI; the 2025 drought minimum (-2.29 on 30 August) and the recovery date (+0.52 on 14 October) are indicated, and the gray box in (c) marks the corresponding period.

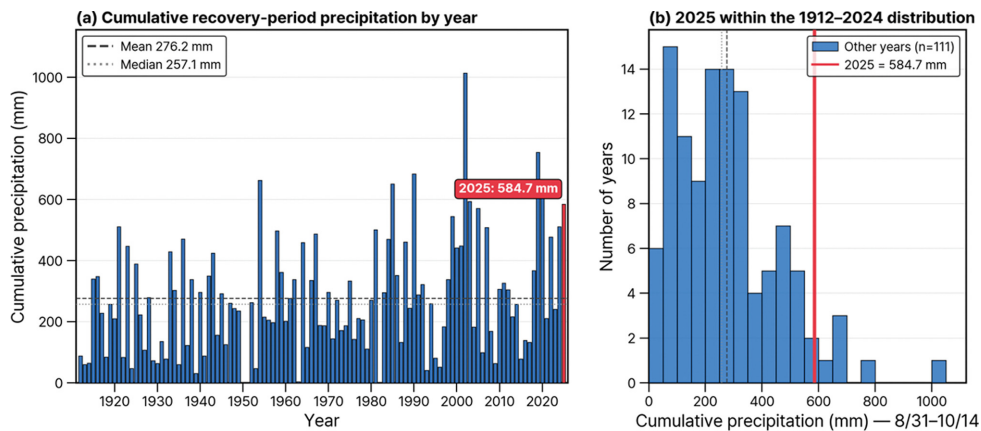


Fig. 3. Cumulative precipitation during the recovery period (31 August~14 October, 45 days) in Gangneung. (a) Recovery-period total for each year, 1912~2025; dashed and dotted lines denote the 1912~2024 mean (276 mm) and median (257 mm), and the red bar denotes 2025 (584.7 mm). (b) Position of 2025 (red line) within the 1912~2024 distribution (n = 111). The years 1950 and 1951 are excluded for missing observations.

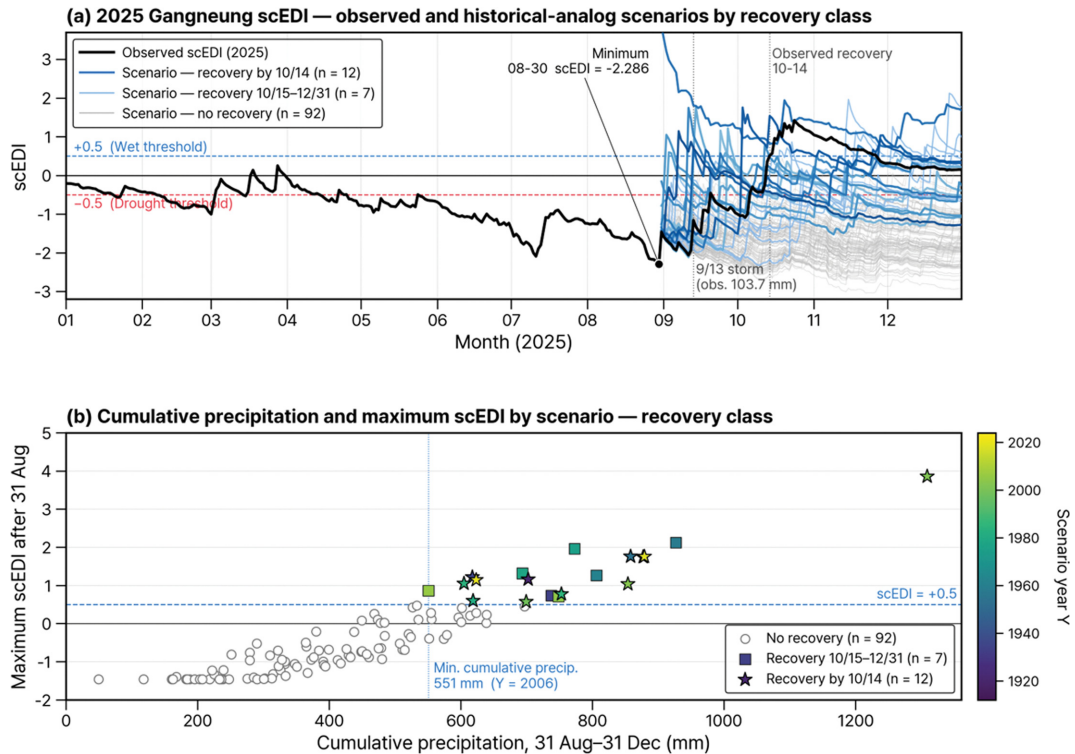


Fig. 4. Historical-analog recovery analysis of the 2025 Gangneung drought. (a) Observed 2025 scEDI (black) and the historical-analog scenarios, each obtained by replacing the 31 August~31 December precipitation with that of a past year (1912~2024); the scenarios are colored by recovery class, recovery before 14 October (dark blue, $n = 12$), 15 October~31 December (medium blue, $n = 7$), and no recovery (gray, $n = 92$). The dashed horizontal lines mark the +0.5 and -0.5 thresholds, and the 30 August minimum, the 13 September storm (103.7 mm), and the 14 October recovery date are indicated. (b) For each scenario, the maximum scEDI after 31 August against the cumulative precipitation over 31 August~31 December, with marker shape denoting the recovery class (as in panel a) and color denoting the analog year; the horizontal dashed line marks the +0.5 recovery threshold and the vertical dashed line marks the minimum cumulative precipitation among the recovering scenarios (551 mm, from the 2006 analog). Exceeding this amount did not guarantee recovery.

에서 중앙값 202 mm로 미회복 시나리오의 82 mm보다 약 2.5배 많아 이 시기 강수가 회복 여부를 가장 강하게 구분하였다(Fig. 5b). 강도 측면에서도 회복 시나리오의 회복기 최대 일강수는 중앙값 262 mm로 미회복 시나리오의 76 mm보다 크게 높았다. 또한 회복 시나리오는 12개 모두에서 일강수 50 mm 이상의 호우가 발생하였고 그 시기도 대체로 일랐던 반면 미회복 시나리오에서는 92개 중 77개에서만 그러한 호우가 나타났으며 발생 시기도 더 늦거나 분산되었다. 단일 지표로는 8월 31일부터 10월 14일까지 누적강수 500 mm가 회복 여부를 가장 잘 구분하였으며($F1 = 0.80$) 8월 31일부터 9월 15일까지 누적강수 400 mm 이상은 모든 경우에 회복으로 이어졌다. 회복에 성공한 시나리오의 최소 누적강수는 551 mm였으나 이 기준을 넘고도 회복하지 못한 사례가 있어 회복은 강수

의 총량뿐 아니라 9월 상반기의 집중 여부에 의해 결정되었다. 2025년의 실제 8월 31일부터 12월 31일까지 누적강수량은 852 mm로, 회복에 성공한 시나리오 분포의 상위 약 5%에 해당하였다. 종합하면 2025년의 빠른 회복은 충분한 양의 강수가 적절한 시기에 집중된 결과이며, 통계적으로는 드물게 나타나는 사건이었다.

3.4 S2S 예보의 회복 예측성

2025년 8월 1일부터 10월 31일까지 92개 발행일에 대한 7개 멤버의 60일 S2S 예보를 이용하여 가뭄 회복의 예측 가능성을 평가하였다(Fig. 6). 60일 예보 시기 내에서 양상불 평균 scEDI가 +0.5에 도달한 발행일은 92개 중 17개(18.5%)에 그쳤다. 관측 회복일인 10월 14일을 기준으로 선행시간 구간별 예보를 평가

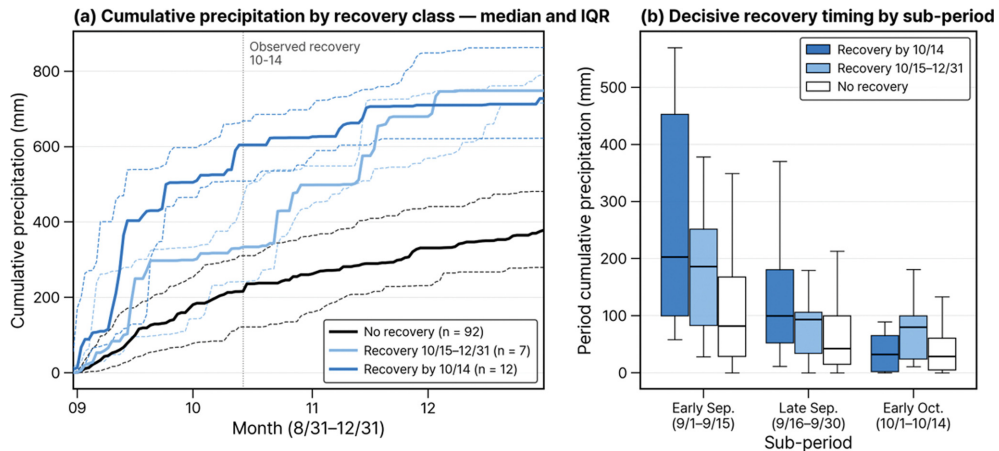


Fig. 5. Precipitation timing that determine drought recovery, derived from the 111 historical-analog scenarios (fast: recovery before 14 October, $n = 12$; late: 15 October~31 December, $n = 7$; none: no recovery, $n = 92$). (a) Cumulative precipitation from 31 August by recovery class, shown as the group median with the interquartile range shaded; the vertical dotted line marks the observed recovery date (14 October). (b) Box plots of cumulative precipitation by recovery class for three sub-periods of the recovery window, early September (1~15 September), late September (16~30 September), and early October (1~14 October).

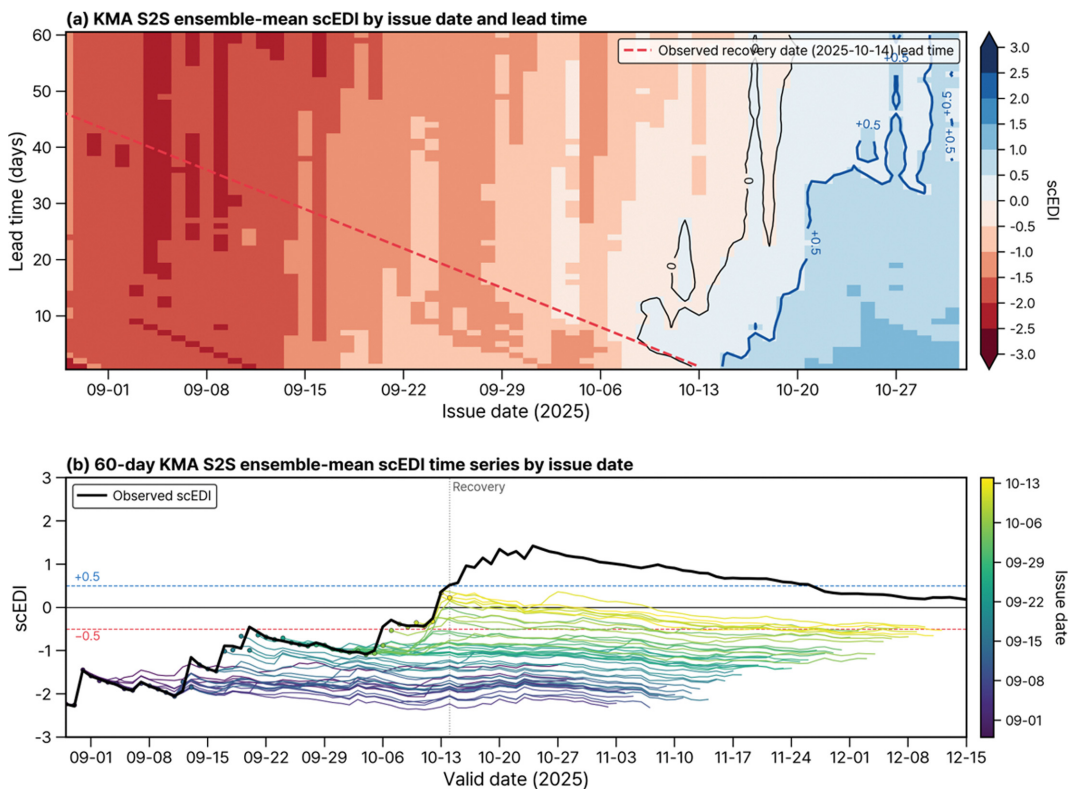


Fig. 6. KMA S2S forecasts of drought recovery by issue date. (a) Seven-member ensemble-mean scEDI by issue date and lead time; the red dashed line marks the observed recovery date (14 October 2025). (b) 60-day ensemble-mean scEDI for each issue date against valid date; colors denote the issue date, and the thick black line is the observed scEDI.

한 결과, 1~7일, 8~14일, 15~21일, 22~30일, 31~45일, 46~60일 어느 구간에서도 양상불 평균이 +0.5에 도달한 발행일은 없었다. 회복일 1주일 전에 발행된 예보에서도 회복 신호는 나타나지 않았다. 또한 선행시간이 길어질수록 양상불 평균 최대 scEDI가 단조적으로 낮아져 31~45일 구간에서는 -1.62까지 떨어졌다. 양상불 평균이 +0.5에 처음 도달한 발행일은 모두 관측

회복일 다음 날인 10월 15일 이후였으며, 그 경우에도 선행시간 1일에서만 신호가 나타났다.

이러한 예측 결과의 배경을 확인하기 위해 예측 강수를 관측과 비교하였다. KMA S2S 일강수는 모든 선행시간 구간에서 관측의 평균 0.44배에 그쳤으며 호우(일강수 30 mm 이상)의 빈도는 관측 12.0%에 비해 예측은 평균 2.6%에 불과하였다. 이러한 과소모의

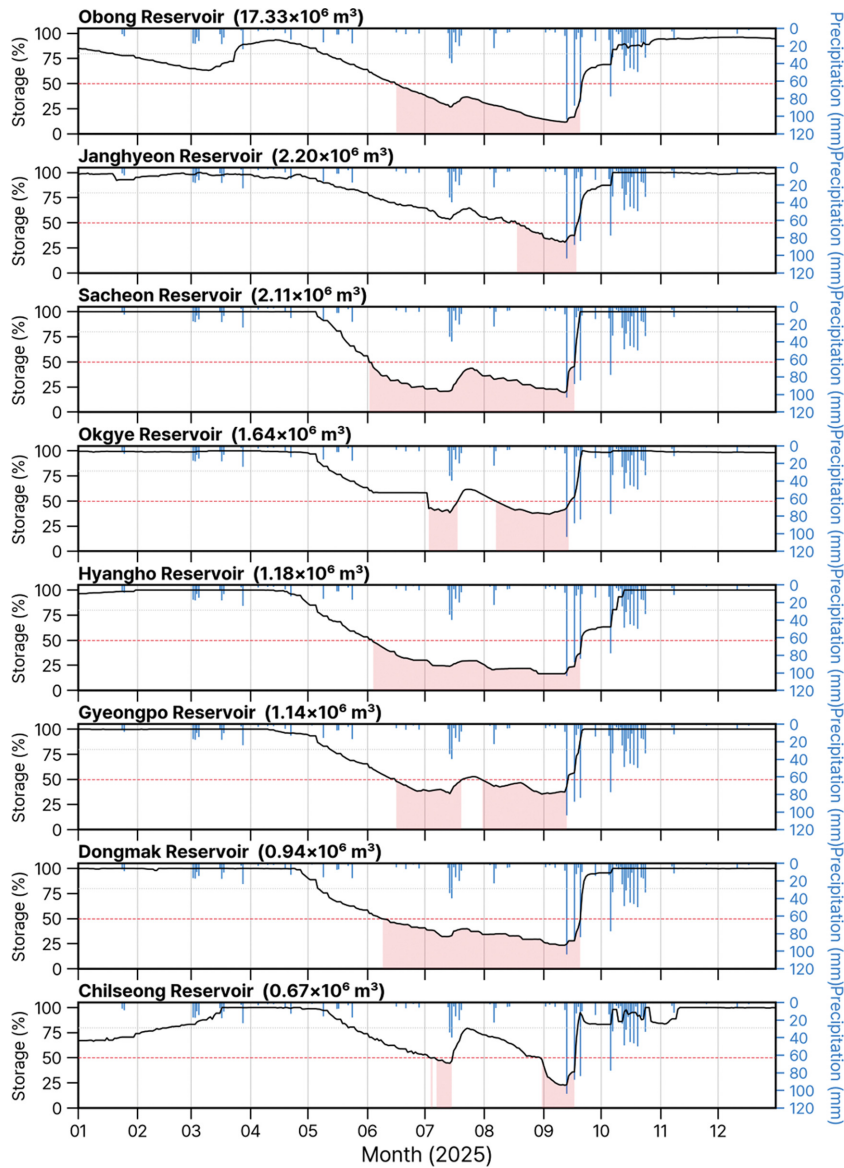


Fig. 7. Daily storage of the eight Gangneung reservoirs and daily precipitation at the Gangneung ASOS station, 2025. Panels are ordered by decreasing total storage capacity (Obong, Janghyeon, Sacheon, Okgye, Hyangho, Gyeongpo, Dongmak, Chilseong). Black lines denote storage (left axis) and blue bars denote daily precipitation (right axis); red shading marks storage below 50%.

는 선행시간이 길어져도 줄어들지 않았다. 앞서 앙상블 평균이 60일 안에 +0.5에 도달한 발행일은 17개였으나 적어도 한 멤버가 도달한 발행일은 31개로 소수 멤버의 습윤 신호가 평균에서 희석되는 경향이 나타났다. 회복을 견인한 9월 13일 호우(관측 103.7 mm)에 대해 이 날을 선행시간 안에 포함한 43개 발행일에서 멤버별 최대 예측은 평균 40.5 mm에 그쳐 관측의 약 39%만 예측하였다. 회복기 8월 31일부터 10월 14일까지 예측 누적강수는 관측 584.7 mm의 평균 44%에 그쳤고 최대 일강수의 시점 오차는 평균 7.4 일이었다. 따라서 KMA S2S 예보는 60일 선행시간 범위에서 2025년 강릉 가뭄의 회복을 사전에 예측하지 못하였으며 이는 예측 강수의 계통적 과소모의와

밀접하게 관련된다. 다만 이 과소모의에는 모델의 예측 특성뿐 아니라 해상에 인접한 1.5° 격자가 태백산맥 풍상측의 지형성 강수를 충분히 대표하지 못하는 점도 반영되었을 수 있다.

3.5 기상학적 가뭄에 대한 저수지 반응

강릉 8개 저수지의 2025년 일별 저수율을 강릉 일강수량과 함께 Fig. 7에 제시하였다. 오봉저수지의 저수율은 9월 12일 11.6%까지 떨어졌는데, 이는 1996년 이래 30년간 관측된 절대 최저값이다. 향호저수지 또한 8월 30일 16.7%로 30년 최저를 기록하였다. 오봉저수지의 경우 30년 동안 저수율이 30% 미만이었던 일수 88일 가운데 54일(61%)이 2025년에 집중되어,

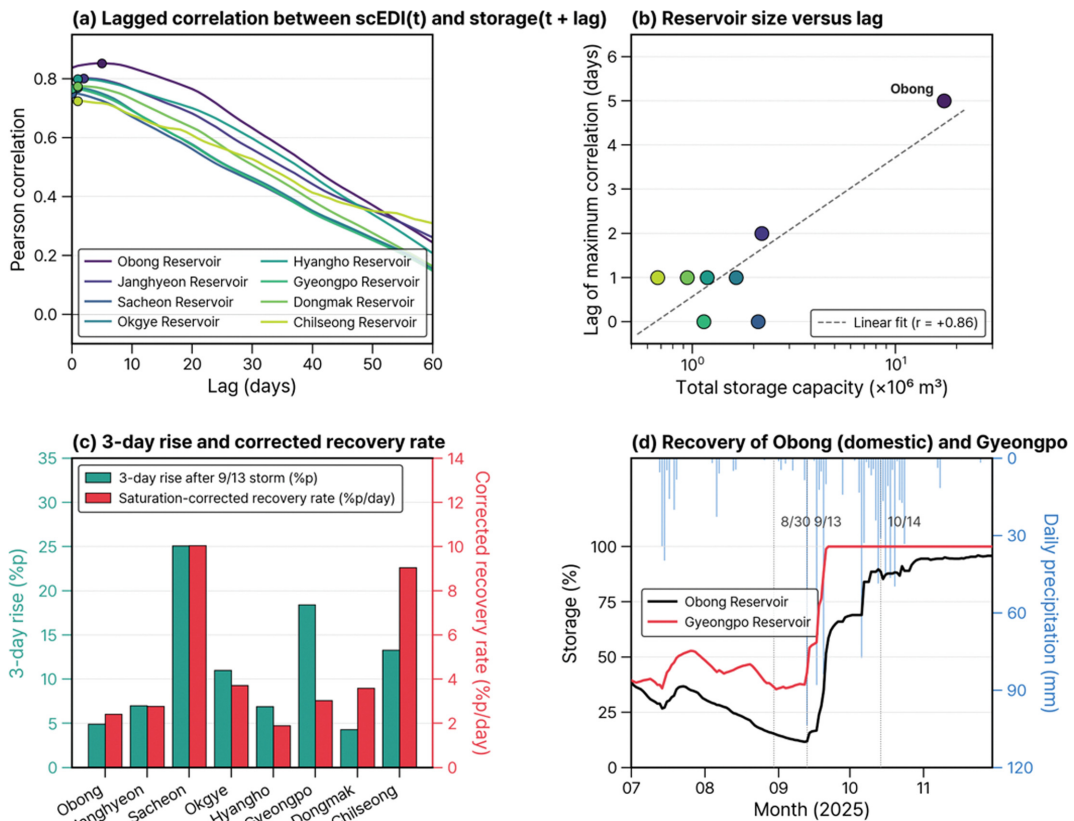


Fig. 8. Quantitative link between the meteorological drought and the response of the eight Gangneung reservoirs in 2025. (a) Lagged Pearson correlation between scEDI at day t and reservoir storage at day $t + \text{lag}$, with the marker on each curve denoting the lag of maximum correlation; a positive lag means storage follows scEDI. (b) Lag of maximum correlation against total storage capacity on a logarithmic scale; the dashed line is the linear regression ($r = 0.86$). (c) Two recovery metrics for each reservoir, the storage rise during the three days after the 13 September storm (left axis, %p) and the saturation-corrected mean recovery rate computed from the storage minimum to the earlier of the first date reaching 95% storage and 14 October (right axis, %p per day). (d) Storage of Obong, which supplies domestic water (black), and Gyeongpo (red) during the recovery period, with daily precipitation; the vertical lines mark the 30 August scEDI minimum, the 13 September storm, and the 14 October recovery date.

이번 가뭄이 30년 규모의 극값 사건이었음을 보여준다.

8개 저수지의 합산 저수량은 9월 12일 $4.77 \times 10^6 \text{ m}^3$ (총 저수용량 $27.21 \times 10^6 \text{ m}^3$ 의 18%)까지 감소하였다가, 32일 만인 10월 14일 $25.24 \times 10^6 \text{ m}^3$ (93%)로 회복되었다. 가뭄이 심화되는 동안 8개 저수지가 동시에 저수율 50% 미만을 기록한 기간이 14일(8월 31일~9월 13일), 80% 미만을 기록한 기간이 112일(5월 30일~9월 18일)에 달하여, 지역 전반에 걸친 동조적 가뭄 양상이 나타났다.

강릉 8개 저수지의 저수율은 모두 scEDI와 강한 양의 상관을 보였다(최대 상관계수 0.72에서 0.85; Fig. 8a). 또한 큰 저수지일수록 scEDI에 대한 저수율의 지연이 길어 log10 총저수량과 최대 상관 지연 사이에 뚜렷한 양의 관계가 나타났다($r = 0.86$, Fig. 8b). 이는 기상학적 가뭄이 저수지로 전파되는 시차가 저수지 규모에 따라 달라짐을 보여준다.

회복 과정에서는 저수지 규모에 따른 응답 차이가 뚜렷하였다(Fig. 8c). 9월 13일 호우 직후 3일 동안 규모가 작은 사천(+25.1%p)과 경포(+18.4%p)는 빠르게 상승한 반면 가장 큰 오봉저수지는 +4.9%p에 그쳤다. 최저점 이후 만수 도달은 사천(9월 20일)이 가장 일렀고 옥계(9월 21일), 경포(9월 22일), 장현과 동막(10월 7일), 향호(10월 13일), 칠성(10월 24일)이 뒤를 이어 8개 중 7개가 관측 기간 내 만수를 회복하였다. 가장 큰 오봉저수지만이 만수에 도달하지 못하였고 95% 도달도 11월 10일에야 이루어졌다. 이처럼 대부분의 저수지가 이미 만수에 도달한 뒤에도 종점을 고정해 평균하면 만수 이후의 정체 구간이 포함되어 실제 회복 능력이 낮게 평가된다. 포화 보정 회복속도는 사천(10.05%p/일)과 칠성(9.05%p/일)에서 종전 지표(각 2.51%p/일과 2.35%p/일)의 약 4배로 커졌고 경포도 1.47%p/일에서 3.02%p/일로 상향되어 이러한 왜곡이 만수 도달이 빨랐던 저수지에서 특히 컸음을 보여준다.

포화를 보정한 뒤에는 규모와 회복의 관계가 명확하게 나타났다. 최저점에서 95% 도달까지의 소요일은 사천과 칠성의 8일에서 오봉의 59일까지 벌어졌으며 총저수량과 강한 양의 상관을 보였다($r = 0.72$). 즉 저수지 규모가 클수록 만수 수준까지의 회복에 더 오랜 시간이 걸렸다. 한편 사천의 빠른 회복은 유역면적(22.8 km^2)이 총저수량($2.11 \times 10^6 \text{ m}^3$)에 비해 커서 단위 강수량 유입량이 많기 때문으로 해석되며, 유역면적이 훨씬 작은 동막(1.86 km^2)은 소규모임에도 반응이 느렸다. 이는 저수지의 단기 반응이 규모뿐 아니라 유역 특성의 영향을 함께 받음을 보여준다.

한편 생활용수를 공급하는 오봉저수지는 회복기에도 매일 약 0.29%p의 취수에 따른 감소가 이어졌고 회복기 전제로는 일평균 2.3에서 2.4%p의 지속적 상

승을 보였다(Fig. 8d). 따라서 오봉저수지의 느린 회복은 큰 규모와 회복기에도 계속되는 생활용수 취수가 함께 작용한 결과이다.

4. 고 찰

4.1 가뭄 회복을 좌우하는 강수의 양과 시기

본 연구의 가장 중요한 발견은 가뭄의 회복이 강수의 총량만으로 결정되지 않고 강수가 공급되는 시기와 집중도에 의해 좌우된다는 점이다. 과거 강수 시나리오 실험에서 회복에 성공한 시나리오의 최소 누적강수량은 약 551 mm였으나, 누적강수량이 600 mm를 넘고도 회복하지 못한 사례가 8건 존재하였다. 반대로 2025년은 연 강수량이 평년의 86.6%에 그쳤음에도, 9월 13일 호우를 기점으로 10월 14일까지 32일 동안 538 mm의 강수가 이어지면서 가뭄이 빠르게 해소되었다. 이는 동일한 누적강수량이라도 그 시기와 분포에 따라 회복 여부가 달라질 수 있음을 보여준다. 동아시아의 강수는 몬순과 대규모 기후 변동에 따라 큰 연변동성을 보이며(Cook et al., 2010; Yang et al., 2021; Phan-Van et al., 2022), 이러한 변동성은 회복기 강수가 연도별로 크게 달라지는 배경이 된다.

본 연구의 과거 강수 시나리오 분석은 회복을 좌우한 결정적 시기가 9월 상반기임을 정량적으로 보였다. 이 시기에 일정 규모 이상의 호우가 있었는지가 회복 여부를 가장 강하게 구분하였으며 동일한 누적강수량도 이 시기에 강수가 집중되지 않으면 회복으로 이어지지 않았다. 실제로 2025년의 회복을 촉발한 9월 13일 호우도 이 결정적 시기 안에 있었다. 이러한 결과는 Park et al. (2023)의 연구를 확장한다. Park et al. (2023)은 scEDI를 이용하여 2022~23년 남부 지방 가뭄의 종료에 필요한 강수량을 정량화하였다. 본 연구는 단일 강렬 사건인 2025년 강릉 가뭄을 대상으로 과거 강수 분포 전체를 적용한 시나리오 실험을 수행하여 회복에 필요한 강수량을 분포적으로 평가하고, 나아가 강수의 양만으로는 회복이 보장되지 않으며 시기가 결정적이라는 점을 추가로 제시하였다. 가을철의 특정 강수 사상이 가뭄 해소에 불균형적으로 기여한다는 점은 Asoka and Kam (2025)의 결과와도 일치한다. Asoka and Kam (2025)은 열대저기압 강수의 유무가 가뭄 전파에 큰 영향을 미침을 보였는데, 본 연구에서 회복을 전인한 가을철 집중강수도 이러한 특정 강수 사상의 중요성을 뒷받침한다. 또한 Bae et al. (2019)은 한국에서 우기에 집중된 강수가 있을 경우 기상학적 가뭄이 농업·수문학적 가뭄으로 잘 전파되지 않음을 보고하였는데, 이는 강수의 시기가 가뭄의 전개와 해소를 좌우한다는 본 연구의 해석과 부합한다.

4.2 가뭄 회복의 예측 가능성과 한계

두 번째 발견은 KMA S2S 예보가 60일 선행시간 범위에서 2025년 강릉 가뭄의 회복을 사전에 예측하지 못했다는 점이다. 관측 회복일을 기준으로 어떤 선행시간 구간에서도 양상을 평균이 회복 임계값에 도달하지 못하였으며, 회복 신호는 회복일 이후에 발행된 예보에서 선행시간 1일로만 나타났다. 이는 지역 규모 가뭄의 회복을 조기에 예측하여 수자원 운영에 활용하기 어렵다는 현실적 한계를 보여준다. 다만 이러한 예측 실패를 곧바로 가뭄 회복의 예측 불가능성으로 해석하는 데에는 주의가 필요하다. KMA S2S 강수는 모든 선행시간에서 관측의 절반에 못 미치는 계통적 과소모의를 보였으며 호우의 빈도도 크게 낮았다. 선행시간이 길어질수록 양상별 평균 scEDI가 단조 감소한 것은 이러한 일정한 과소모의가 더 긴 예보 구간에 누적된 결과로 볼 수 있다. 또한 적어도 한 멤버가 회복 신호를 보인 발행일이 양상별 평균보다 많아 소수 멤버의 습윤 신호가 평균에서 희석되는 효과도 확인되었다. 그럼에도 회복을 건인한 9월 13일 호우 자체를 멤버 대부분이 재현하지 못한 점은 보다 본질적인 한계이다. 따라서 2025년 강릉 가뭄 회복의 낮은 예측성은 강수의 계통적 과소모의와 양상별 평균화의 영향에 더하여 회복을 좌우한 호우 사상을 S2S 규모에서 예측하기 어렵다는 점이 함께 작용한 결과로 해석된다.

이러한 결과는 Park et al. (2023)과 맥을 같이한다. Park et al. (2023)은 2022-23년 가뭄에서 경험적·역학적 강수 예보의 각각 25%, 20%에서만 회복 신호를 확인하여 S2S 예측성이 제한적임을 보고하였다. 본 연구의 결과도 단일 사건에서 양상별 평균 기준 회복 신호가 거의 나타나지 않아 이러한 제한적 예측성과 일치한다. 다만 본 연구는 이 신호 부재가 상당 부분 모델 강수의 계통적 과소모의와 양상별 평균화에 기인함을 함께 보였다는 점에서 차이가 있다. S2S 예보는 일기 예보와 계절예보 사이의 간극을 메우며 가뭄 대응의 핵심 정보가 될 것으로 기대되어 왔으나(Vitart et al., 2017), 강수의 예측성이 낮은 시간 규모에서는 가뭄의 발생과 해소를 정확히 예측하기 어렵다(Pendergrass et al., 2020). 한편 Kam et al. (2014a, 2014b)은 대규모 해양 구동인자에 대한 예측 기술이 반드시 가뭄 예측 기술로 이어지지 않음을 보였다. 2025년 강릉의 회복이 가을철의 비교적 단기적인 강수 사상에 의해 좌우되었다는 점을 고려하면, 이러한 회복을 계절 규모에서 예측하기 어려운 것은 자연스러운 결과로 해석된다.

4.3 기상학적 가뭄의 저수지 전파와 지역 수자원 취약성

세 번째 발견은 기상학적 가뭄이 저수지로 전파되

는 과정에서 시차가 존재하고, 저수지의 회복이 규모에 따라 다르게 나타난다는 점이다. scEDI는 2025년 8월 30일 최저점에 도달하였으나, 오봉저수지의 저수율은 약 2주 늦은 9월 12일에 최저점을 기록하였다. 이러한 기상학적 가뭄에서 수문학적 가뭄으로의 전파와 시차는 Bae et al. (2019)이 한국에서 보고한 가뭄 전파 특성과 일치한다.

회복 과정에서는 저수지 규모에 따른 응답 차이가 뚜렷하였다. 9월 13일의 호우 직후 상대적으로 규모가 작은 저수지들은 빠르게 회복한 반면, 가장 큰 오봉저수지의 회복은 느렸다. 실제로 오봉저수지는 관측 기간 내 유일하게 만수에 도달하지 못하였다. 오봉저수지의 느린 회복은 큰 규모에 더하여 회복기에도 계속되는 생활용수 취수가 함께 작용한 결과로 저수지의 규모와 용도가 수문 반응을 함께 결정한다는 Kam (2021)의 결과와 부합한다. 본 연구에서 저수지 규모가 클수록 scEDI에 대한 저수율의 지연이 길어진 것도 이러한 규모 의존적 전파를 뒷받침한다. 특히 강릉의 생활용수 공급이 단일 대형 저수지인 오봉저수지에 집중되어 있다는 점은, 대형 저수지의 느린 회복 특성과 결합되어 가뭄 시 지역 수자원의 취약성을 키우는 요인으로 작용한다. Park et al. (2024)는 기후변화 시나리오 하에서 강원 지역의 수문학적 가뭄 위험이 커질 수 있음을 제시하였는데, 단일 수원에 의존하는 강릉의 공급 구조는 이러한 위험에 특히 민감할 수 있다. 향후 한국의 가뭄 위험이 증가할 것으로 전망되는 점(Lee et al., 2016)을 고려하면, 지역 수원의 다변화와 같은 대응을 함께 검토할 필요가 있다.

4.4 기후변화 맥락과 사회적 함의

2025년 강릉 가뭄은 기후변화 시대에 지역 사회가 직면할 수 있는 수자원 위기를 단적으로 보여준 사건이다. 기후변화로 강수의 변동성이 커지면서 가뭄의 강도와 회복기 강수의 극값이 모두 증가하는 추세가 보고되고 있으며(Lee et al., 2016; Cook et al., 2022; Hoylman et al., 2022), 본 연구에서 나타난 깊은 가뭄과 이례적으로 많은 회복기 강수의 조합은 이러한 변동성 확대와 무관하지 않다.

특히 2025년 강릉 가뭄은 우리나라에서 자연재난을 사유로 재난사태가 선포된 첫 사례였다. 이는 이 가뭄이 단순한 강수 부족을 넘어 지역 사회의 생활용수 공급 체계를 직접 위협하는 수준에 이르렀음을 의미한다. 가뭄이 심화되는 동안 강릉시는 제한급수와 운반 급수를 시행하였고, 정부 차원의 대체용수 공급과 인접 댐의 비상 방류 등 비상 대응이 동원되었다. 이러한 사회적 파급은 가뭄이 기상 현상에 그치지 않고 사회·경제적 재난으로 전개되는 과정을 보여준다. 최근 한국에서도 가뭄에 대한 언론과 대중의 관심, 그

리고 가뭄이 사회에 미치는 영향에 대한 연구가 확대되고 있으며(Choi et al., 2025), 복합적인 기상재해에 대한 위험 평가의 필요성이 강조되고 있다(Hur et al., 2023; Kim et al., 2025). 본 연구가 제시한 가뭄 심도의 정량적 진단과 회복 조건의 평가는 이러한 가뭄의 사회적 영향을 사전에 가늠하고 대응을 준비하는 데 기초 정보를 제공할 수 있다.

4.5 한계 및 향후 과제

본 연구는 몇 가지 한계를 가진다. 첫째, 분석이 강릉이라는 단일 지역과 강릉 ASOS 단일 지점에 한정되어 있어, 본 연구의 결과를 다른 지역으로 일반화하는 데에는 주의가 필요하다. 둘째, 본 연구에서 사용한 scEDI는 강수량을 기반으로 하므로 기온과 증발산의 영향을 직접 반영하지 못한다. 2025년은 전국적으로 역대 두 번째로 더운 해였고 여름철 폭염이 반복되었다(KMA, 2026). 강릉의 가뭄 기간에도 평년을 웃도는 기온이 이어져 증발 수요가 컸을 것으로 보이나 scEDI는 이러한 기온 효과를 반영하지 않는다. 다만 scEDI는 1년 길이의 누적 기간을 사용하므로 강수량만으로 산정되더라도 누적 강수 부족을 통해 가뭄의 수문학적 진행을 간접적으로 반영한다. Park et al. (2022)는 365일 누적 scEDI가 남한에서 위성 기반 지면 물저장량과 모형 기반 토양수분의 변동을 잘 모의함을 보고하였다. 증발산을 엄밀히 반영하려면 직접 관측된 증발산 자료가 필요하나 강릉 지점의 장기 기록에는 이러한 자료가 없으며, 기온 기반의 잠재증발산 추정에는 산정 방법에 따라 결과가 달라져 장기 순위 비교에 불확실성을 더한다. 이에 본 연구는 심도 평가를 강수 기반 scEDI로 한정하였다. 셋째, 저수지 저수율은 기상 조건뿐 아니라 저수지의 운영과 용수 수요의 영향을 함께 받으므로, 본 연구에서 분석한 저수율 변동을 전적으로 기상학적 가뭄에 귀속하기는 어렵다. 넷째, S2S 예측성 평가는 KMA 단일 모델과 강릉 인근의 1.5° 단일 격자에 기반하였다. 해당 격자는 동해상에 인접하여 태백산맥 풍상측의 지형성 강수를 해상하기 어려우므로 예측 강수의 과소모의에는 모델의 예측 능력뿐 아니라 해상도와 격자 대표성의 한계가 함께 반영되었을 수 있다. 다중 모델과 고해상도 자료를 이용할 경우 결과가 달라질 수 있다. 다섯째, 과거 강수 시나리오 실험은 강수 분포의 정상성을 가정하므로, 기후변화로 강수 특성이 변화하는 경우 회복 조건의 추정에 불확실성이 있을 수 있다.

이러한 한계에도 불구하고, 본 연구에서 제시한 scEDI 기반의 회복 분석 방법은 다른 지역과 다른 가뭄 사건에도 적용할 수 있다. 향후 기온과 증발산을 함께 고려하는 지표, 다중 모델 S2S 예보, 그리고 저수지 운영 모형과의 결합을 통해 가뭄의 심도와 회복,

예측가능성을 보다 종합적으로 평가할 수 있을 것이다.

5. 결 론

2025년 강릉 가뭄은 한 지역의 수자원 체계가 기상학적 가뭄에 의해 어떻게 한계에 다다르고 또 회복되는지를 압축적으로 보여준 사건이었다. 본 연구는 이 사건을 통해 가뭄의 회복이 단순히 얼마나 많은 비가 내렸는가의 문제가 아니라 비가 언제, 어떤 분포로 내렸는가에 의해 결정된다는 점을 드러냈다. 연 강수가 평년에 못 미쳤음에도 가을철 짧은 기간에 집중된 강수가 깊은 가뭄을 빠르게 되돌렸다는 사실은, 가뭄 회복을 누적 강수량의 관점에서만 이해해 온 기존의 시각에 시기와 집중도라는 축을 더한다.

이러한 회복이 계절내·계절 규모에서 사실상 예측되지 못했다는 점은 더욱 주목할 만하다. 가뭄의 종료에 필요한 강수량을 정량화하려는 시도는 이루어져 왔으나, 본 연구는 그 회복이 언제 일어날지를 예보가 좀처럼 앞서 포착하지 못함을 보였다. 회복을 좌우한 것이 비교적 단기적이고 우발적인 강수 사상이었다는 점을 고려하면 가뭄 해소의 예측가능성은 본질적으로 제한적일 수 있으며, 이는 회복을 예보에 기대어 기다리기보다 다양한 강수 시나리오에 미리 대비하는 관리 전략이 필요함을 시사한다.

동시에 이 사건은 기상학적 가뭄이 지역의 물 공급으로 전파되는 마지막 단계에서 저수지의 규모와 공급 구조가 결정적 역할을 함을 보여주었다. 단일 대형 저수지에 의존하는 강릉의 구조는 가뭄의 심화를 늦추는 완충으로 작용하는 동시에 회복을 더디게 만드는 양면성을 지녔다. 기후변화로 가뭄과 그 회복이 더욱 변동적으로 전개될 것으로 전망되는 가운데, 본 연구가 제시한 접근은 지역 규모 가뭄의 심도와 회복가능성을 함께 진단하는 틀로서 강릉을 넘어 다른 지역과 사건의 분석으로 확장될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단(과제번호 RS-2026-25470040, 동아시아 극한 가뭄의 생성기작과 예측성에 대한 다중규모분석)과 정부(과학기술정보통신부)(과제번호 RS-2026-25537812, 국가 기후·재난 데이터 생태계 기반 통합 멀티모달 AI 시스템 개발)의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

Asoka, A., and J. Kam, 2025: Tropical cyclones unevenly shape drought propagation. *Geophys. Res. Lett.*, **52**,

- e2025GL120290, doi:10.1029/2025GL120290.
- Bae, H., H. Ji, Y.-J. Lim, Y. Ryu, M.-H. Kim, and B.-J. Kim, 2019: Characteristics of drought propagation in South Korea: Relationship between meteorological, agricultural, and hydrological droughts. *Nat. Hazards*, **99**, 1-16, doi:10.1007/s11069-019-03676-3.
- Byun, H.-R., and D. A. Wilhite, 1999: Objective quantification of drought severity and duration. *J. Climate*, **12**, 2747-2756, doi:10.1175/1520-0442(1999)012<2747:OQODSA>2.0.CO;2.
- Choi, S., A. Liu, S. Lee, H. Yoon, and J. Kam, 2025: The interplay of news media, social media, and public search behavior during the 2022–2023 South Korea drought. *Humanit. Soc. Sci. Commun.*, **12**, 99, doi:10.1057/s41599-025-06398-z.
- Cook, B. I., and Coauthors, 2022: Megadroughts in the Common Era and the Anthropocene. *Nat. Rev. Earth Environ.*, **3**, 741-757, doi:10.1038/s43017-022-00329-1.
- Cook, E. R., K. J. Anchukaitis, B. M. Buckley, R. D. D'Arrigo, G. C. Jacoby, and W. E. Wright, 2010: Asian monsoon failure and megadrought during the last millennium. *Science*, **328**, 486-489, doi:10.1126/science.1185188.
- Hoylman, Z. H., R. K. Bocinsky, and K. G. Jencso, 2022: Drought assessment has been outpaced by climate change: Empirical arguments for a paradigm shift. *Nat. Commun.*, **13**, 2715, doi:10.1038/s41467-022-30316-5.
- Hur, C.-H., B.-G. Kim, B.-M. Kim, D.-S. R. Park, C.-K. Park, S.-W. Son, J.-H. Jung, and D.-H. Cha, 2023: Review of the weather hazard research focused on typhoon, heavy rainfall, drought, heatwave, cold-wave, snowfall, and strong wind. *Atmosphere*, **33**, 223-246, doi:10.14191/Atmos.2023.33.2.223.
- Kam, J., 2021: Diversity in the observed functionality of dams and reservoirs. *Environ. Res. Infrastruct. Sustain.*, **1**, 031003, doi:10.1088/2634-4505/ac3f3f.
- _____, J. Sheffield, X. Yuan, and E. F. Wood, 2014a: Did a skillful prediction of sea surface temperatures help or hinder forecasting of the 2012 Midwestern US drought? *Environ. Res. Lett.*, **9**, 034005, doi:10.1088/1748-9326/9/3/034005.
- _____, _____, and E. F. Wood, 2014b: Changes in drought risk over the contiguous United States (1901–2012): The influence of the Pacific and Atlantic Oceans. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 5897-5903, doi:10.1002/2014GL060973.
- Kim, Y.-J., S.-W. Yeh, Y.-S. Choi, S.-W. Son, S.-G. Oh, Y.-M. Yang, and J. Kim, 2025: The need for climate risk assessment in response to the increasing occurrence of compound drought-heatwave events in Korea. *Atmosphere*, **35**, 13-27, doi:10.14191/Atmos.2025.35.1.013.
- KMA, 2026: [2025 Annual Climate Characteristics] 2025 Ranks as the Second-Hottest Year on Record, with Sea Surface Temperatures Also Second-Highest — Marked by Localized Torrential Rainfall and Recurring Heatwaves and Downpours. Korea Meteorological Administration [Available online at https://www.kma.go.kr/kma/news/press_01.jsp?mode=view&num=1194586].
- Lee, J.-H., H.-H. Kwon, H.-W. Jang, and T.-W. Kim, 2016: Future changes in drought characteristics under extreme climate change over South Korea. *Adv. Meteorol.*, **2016**, 9164265, doi:10.1155/2016/9164265.
- MacLachlan, C., and Coauthors, 2015: Global Seasonal forecast system version 5 (GloSea5): A high-resolution seasonal forecast system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **141**, 1072-1084, doi:10.1002/qj.2396.
- McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist, 1993: The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, 179-184.
- Palmer, W. C., 1965: *Meteorological drought*. U.S. Department of Commerce, Weather Bureau., Research Paper No. 45, 58 pp.
- Park, C.-K., J. Kam, H.-R. Byun, and D.-W. Kim, 2022: A self-calibrating effective drought index (scEDI): Evaluation against social drought impact records over the Korean Peninsula (1777–2020). *J. Hydrol.*, **613**, 128357, doi:10.1016/j.jhydrol.2022.128357.
- _____, S. Lee, H. Yoon, and J. Kam, 2023: Sub-seasonal to seasonal outlook of the 2022–23 southwestern Korea meteorological drought. *Environ. Res. Lett.*, **18**, 104039, doi:10.1088/1748-9326/acfb27.
- Park, Y.-Y., H. Kim, and Y. Park, 2024: Assessment of drought vulnerability due to climate change in Gangwon State. *J. Eng. Geol.*, **34**, 577-594, doi:10.9720/kseg.2024.4.577.
- Pendergrass, A. G., and Coauthors, 2020: Flash droughts present a new challenge for subseasonal-to-seasonal prediction. *Nat. Clim. Chang.*, **10**, 191-199, doi:10.1038/s41558-020-0709-0.
- Phan-Van, T., P. Nguyen-Ngoc-Bich, T. Ngo-Duc, T. Vu-Minh, P. V. V. Le, L. Trinh-Tuan, T. Nguyen-Thi, H. Pham-Thanh, and D. Tran-Quang, 2022: Drought over Southeast Asia and its association with large-

- scale drivers. *J. Climate*, **35**, 4959-4978, doi:10.1175/JCLI-D-21-0770.1.
- Vitart, F., and Coauthors, 2017: The Subseasonal to Seasonal (S2S) Prediction Project Database. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 163-173, doi:10.1175/BAMS-D-16-0017.1.
- Yang, B., and Coauthors, 2021: Long-term decrease in Asian monsoon rainfall and abrupt climate change events over the past 6,700 years. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **118**, e2102007118, doi:10.1073/pnas.2102007118.