Atmosphere. Korean Meteorological Society
Vol. 36, No. 1 (2026) pp. 75-89
https://doi.org/10.14191/Atmos.2026.36.1.075
pISSN 1598-3560 eISSN 2288-3266

해 설
(Review)

세계 주요 인공강우실험 현황 및 물리적 평가 방법 고찰

김병곤[1)]* · 장기호[2)] · 김승범[2)] · 유철환[3)] · 박석우[1)] · 김예지[1)]
[1)]국립강릉원주대학교 대기환경과학과, [2)]국립기상과학원 기상응용연구부,
[3)]국립부경대학교 환경대기과학과

(접수일: 2026년 1월 13일, 수정일: 2026년 2월 6일, 게재확정일: 2026년 2월 8일)

A Review on Current Status and Physical Evaluation Method of Major Artificial Cloud Seeding Experiments in the World

Byung-Gon Kim[1)]*, Ki-Ho Chang[2)], Seum-Bum Kim[2)], Cheol-Hwan You[3)], Seok-Woo Park[1)], and Ye-Ji Kim[1)]

[1)]Department of Atmospheric Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea
[2)]Meteorological Applied Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Seogwipo, Korea
[3)]Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan, Korea

(Manuscript received 13 January 2026; revised 6 February 2026; accepted 8 February 2026)

Abstract Artificial cloud seeding experiments are increasing globally to address critical environmental and resource management challenges in the climate crisis era. Main experiments are briefly reviewed in order to improve domestic weather modification experiment in Korea. Both SNOWIE and CloudLab are field campaigns that put a special emphasis on understanding mixed-phase cloud microphysics, using advanced remote sensings for the orographic clouds. Specifically, CloudLab focused on creating a "natural laboratory" by performing highly controlled, repeatable seeding experiments in persistent supercooled stratus clouds whereas SNOWIE showed a characteristic zig-zag echo pattern in the downstream domain. The NDCMP has operated a hail suppression and rain enhancement program, the longest running operational seeding project in the world, and produced practical operation manuals and guidelines. UAEREP plays a significant global role in advancing weather modification and rain enhancement technology. Meanwhile, a physical evaluation method of the experiment is proposed to distinguish the seeding effect from natural precipitation variability in the Yeongdong mountainous region where cloud seeding experiments have been made for several years. First, most probable seedable conditions belong to weak cold air damming, which help orographic snow clouds well developing over the mountain. Two successful episodes were identified with enhanced radar echo and increases in particle size. Further, a higher concentration of Ag was used as direct evidence to evaluate the glaciogenic seeding. This comprehensive evaluation procedure could serve as a foundational protocol for a range of future research such as different geographic areas and varying scales of research like small scale geoengineering experiment.

Key words: Cloud, Seeding, Evaluation, Orographic, Yeongdong

*Corresponding Author: Byung-Gon Kim, Department of Atmospheric Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, 7 Jukheon-gil, Gangneung, Gangwon 25457, Korea.
Phone: +82-033-640-2326, Fax: +82-033-640-2320
E-mail: bgk@gwnu.ac.kr

© 2026 Korean Meteorological Society

1. 서 론

UN 보고서에 의하면 향후 2050년경에는 인구증가와 도시팽창 그리고 산업체 확장 등으로 인하여 개발도상국이나 농업 국가들의 약 20억명 이상 인구가 물 부족 스트레스를 겪을 것이라고 예측한 바 있다(UN, 2021). 2025년 여름 강릉시는 심각한 가뭄으로 한시적인 기간 동안 제한급수가 시행되고 전국으로부터 생수를 지원받는 등의 국가재난사태가 선포되는 등의 어려움을 겪은 바 있다. 국내에서 자연재해로 국가재난사태가 선포된 것은 이번이 처음이라고 한다. 물론 강릉 이외의 다른 지역에서도 기후변화에 따른 각종 재해기상이 빈발하고 있다. 2022년 3월 4~13일에는 영동 남부지역에서 국내 최장기간 산불이 발생하였고, 2022년 8월에는 서울 남부 지방에 발생한 집중 호우로 인해 인명 및 막대한 재산 피해가 발생하였고, 2023년 7월에는 오송지역 지하차도에서 폭우로 인해 인명피해를 입은 바 있다.

전 세계에서도 지구 기온 상승과 가뭄에 의한 산불이 빈발하고 있는데, 2023년 봄에 캐나다 북서부 지역에서 발생한 산불이 가을까지 동부로 번져 역사상 가장 큰 피해를 초래한 바 있다. 그리고 2024년에도 10월 29일 스페인 남부 지역은 몬순이 없는 지역임에도 불구하고 하루 동안 300 mm 이상의 기록적인 폭우가 한꺼번에 쏟아져 230여 명이 넘는 사망자가 발생하였다. 이 밖에도 매년 기록을 갱신하는 각종 재해기상이 일어나고 있다. 현재 인류는 전구 규모뿐만 아니라 지역적인 규모에서도 다양한 기후위기를 겪고 있지만, 현대 과학기술 역시 재해기상을 조절하고 완화시킬 수 있는 수단을 제공할 만큼 꾸준히 진보하고 있다.

기후위기시대에 일부 지역에서는 가뭄이나 수자원 부족으로 인하여 인공강우 실험의 필요성이 절실히 요구되고 있다(Rasmussen et al., 2011). 현재 널리 활용되고 있는 인공강우 실험은 수증기가 충분히 존재하고 불안정한 대기환경조건에서 구름응결핵을 살포하여 구름방울을 생성하고 성장시켜 최종적으로 강수에 이르게 하는 기술이다(Rauber et al., 2019). 이중에서도 가장 실험 성공 가능성이 높은 것이 겨울철 지형성 인공강설 실험이다(Flossmann et al., 2019). 기본 메커니즘은 과냉각수적(0^oC 이하의 수적)이 존재하는 혼합상(mixed phase) 구름에 빙정핵(주로 AgI 혹은 드라이아이스)을 살포하여 빙정을 생성시키고, 이들이 이미 존재하는 과냉각수적과의 포화수증기압 차이에 의해 수적에서 증발된 수증기가 빙정에 침적(deposition)되는 과정을 거쳐 빙정을 성장시키는 것이다(Bergeron, 1935; Findeisen, 1938). 실제로 빙정핵 뿌리기 방법은 겨울철에 산악지역 인공강설 실험에서 널리 활용되고 있고, 이미 여러 선행연구에서도 정량적으로 평가되고 과학적으로 검증된 바 있다(French et al., 2018; Tessendorf et al., 2019).

다양한 기상조절실험 중 가장 대표적인 실험으로 알려진 인공강우(설) 실험은 대다수 국가에서 수자원 확보나 가뭄 예방을 위해 보편적으로 진행되고 있다. 반면에 넓은 평원과 농지를 보유한 미국, 소련, 중국 등의 국가에서는 농작물 보호와 재해 예방을 위하여 장기간 우박 억제실험이 운영되고 있다. 이와 같이 국가가 당면하고 있는 시급한 당면과제 해결과 실용적인 수요에 의해 기상조절실험이 활발히 수행되고 있다. 예를 들면, 건조한 지역인 중동 국가에서는 수자원 확보를 위하여, 미국 서부 사막 및 산악지역에서는 건기의 식수 및 수자원 확보를 위하여, 건기의 러시아 시베리아 지역에서는 빈발하는 산불 예방을 위하여, 그리고 대기오염이 심각한 태국에서는 미세먼지 저감을 위하여 기상조절실험이 수행되고 있다. 현재 진행중인 기후변화는 인류가 의도하지 않았지만(inadvertent), 인류의 편의를 위해 다량의 화석연료를 사용하는 사회·경제적인 활동의 부작용이라고 할 수 있다. 반면에 기후위기시대에 발생하는 다양한 재해기상을 완화하기 위한 인류의 적극적(advertent) 개입 방식 중의 하나가 기상조절실험이다.

이와 같이 기상조절실험은 인공 증우(설), 산불 억제, 우박 억제, 미세먼지 저감, 안개 소산 등 각 국가의 시급한 요구에 따라 상시 운영되고 있지만, 모든 실험의 기본 원리는 적절한 대기환경조건(상승기류, 수증기 등)에서 구름씨앗을 살포하여 구름을 성장시키고 강수에 이르게 하는 것이다. 실험의 지속적인 운영 및 발전을 위해서는 효율적인 실험절차 및 가이던스에 기반하여 실험이 수행되어야 하고, 실험 결과의 과학적인 평가 및 검증도 함께 이루어져야 할 것이다. 더불어 실험의 성공을 위해서는 일차적으로 실험이 수행되는 지역의 특수성을 고려한 실험 성공 가능성이 높은(seedable) 대기환경조건을 선정해야 하고, 다음으로 구름 생성 및 발달에 최적화된 구름 씨앗의 개발도 필요하다. 또한, 살포된 구름 씨앗을 구름 속에 효율적으로 유입할 수 있는 방법 역시 제시되어야 한다.

본 논문에서는 전 세계에서 활발히 진행되고 있는 주요 기상조절실험 현황 및 기술을 국내 기술 수준과 비교하여 벤치마킹하고자 하며, 국내 지역 특성에 따른 실험조건 선정 방법을 제시하고, 일부 실험 결과의 물리·화학적 통합 평가 방법을 소개하고자 한다.

2. 기상조절실험의 현황

역사적으로 볼 때 기상조절실험의 효시는 비를 기

원하며 제사를 지내는 기우제라고 할 수 있다. 보통 제사를 지낼 때 무언가를 태우는 절차를 거치기 때문에 현대의 인공강우 실험과 비교할 때 구름씨앗을 제공하는 방법과 유사하다. 이번 장에서는 전 세계적으로 진행되는 다양한 기상조절실험 중에서 가장 대표적인 6가지 프로그램을 선정하여 각 실험의 현황 및 특징을 간략하게 정리하고자 한다.

2.1 SNOWIE

우선 국가 차원의 첫 번째 공식적인 기상조절실험인 Stormfury 프로젝트는 1962~83년까지 허리케인 강도를 약화시키기 위하여 수행되었는데 실험의 기본 가설은 허리케인의 벽구름(wall cloud) 주변에 구름 씨앗을 살포하여 새로운 구름을 발달시켜 허리케인의 발달을 완화시키는 것이다. 하지만 정밀한 관측장비나 검증방법론의 부족으로 실험 효과를 제대로 평가하지 못했고, 실험에 의한 부작용 문제가 제기되면서 아쉽게도 프로젝트가 종료되었다(Willoughby et al., 1985). 이후 미국내에서 국가적 지원을 받는 기상조절실험은 지지부진하게 되었지만, 미국 북서부 지역에서는 지역적 특수성으로 인해 인공강설 실험이 지속되었다. 이중에서 아이다호주에서 수행된 Seeded and Natural Orographic Wintertime Clouds: The Idaho Experiment (SNOWIE) 캠페인은 전 세계 기상조절실험 및 연구를 활성화시키는 역할을 하였다(Tessendorf et al., 2019).

SNOWIE 캠페인은 겨울철 산악지역에서 수자원 확보를 위하여 시딩 실험을 수행하고 다양한 플랫폼에서 구름 및 강수의 관측과 모델링을 통해 정량적 실험 성과를 제시하였다. Figure 1은 시딩 항공기에서 AgI 연소실험를 한 이후 시딩물질들이 구름속으로 유입되면서 성장하는 과정을 풍하측 Packer John 지점에서 구름 레이더로 관측한 결과이다. 시딩 항공기가 북서에서 남동 방향으로 반복해서 이동하면서 AgI를 살포한 이후(빨간색 실선), 이들이 남서풍을 타고 북동쪽 방향으로 이류되는 과정에서 점차 빙정을 생성하고 빙정 입자 크기가 증가하여 구름의 반사도가 점차 증가하는 것을 잘 보여주고 있다(노란-빨간 색칠). 특이사항은 시딩 항공기의 왕복 비행과 시딩물질의 이류로 인하여 바람부는 수평 방향으로 지그재그 패턴의 구름반사도 증가가 나타났는데, 이는 보통의 자연 강수에서는 볼 수 없는, 시딩에 의한 구름발달 과정을 정밀하게 보여준 결과라고 할 수 있다(French et al., 2018; Tessendorf et al., 2019). 시딩 지점에서 풍하측으로 멀어질수록, 그리고 상층에서 하층으로 하강하면서 구름방울이 성장하기 때문에 구름 반사도 역시 증가하는 것을 잘 보여주고 있다. 이 밖에도 지상에서 우량계를 통해 시딩 물질의 영향을 받는 시

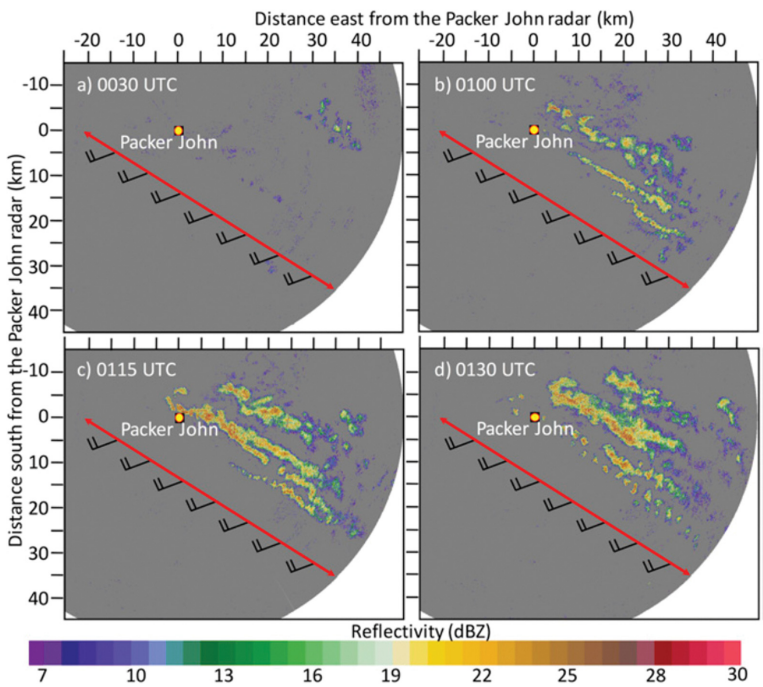

Fig. 1. Radar reflectivity (coloring) of Pack John after aircraft seeding. Red line indicates aircraft seeding track, and wind bar wind speed and direction. The analysis results are obtained from SNOWIE experiment (Tessendorf et al., 2019).

간대에 강수량 증가를 배경지역(background)의 자연 강수와 비교하여 정량적 차이를 함께 제시하였다. 이상의 실험 절차와 분석 방법을 인공강설 실험의 물리적 평가(physical evaluation)라고 한다(Rauber et al., 2019).

2.2 CloudLab

유럽은 여러 국가들이 국경을 인접하고 있기 때문에 상대적으로 인공강우실험이 활발하지 않았는데, 최근(2021~2023년)에 중요한 인공증설 실험(CloudLab)을 수행한 바 있다. 이 실험의 목적은 산악지역의 층운형 혼합상(mixed phase) 구름에 빙정핵을 살포하여 빙정 성장과정을 과학적으로 이해하는 것이다(Henneberger et al., 2023). CloudLab 캠페인은 스위스 Reiswill 근처 고원지역에서 수행되는 인공증설 실험인 데, 주로 과냉각수적을 다량 함유한 하층 층운 구름을 대상으로 하였다. 즉, 빙정핵에 의해 빙정이 생성된 이후, 과냉각수적과 빙정의 포화수증기압 차이에 의해 빙정이 성장하게 되는 과정을 야외의 자연 실험실(natural laboratory)에서 확인하는 것이다. 특이한 점은 무인항공기(드론)을 활용하여 구름속에 직접 빙정핵을 살포하며, 또 다른 무인항공기와 테더(Thethered) 존데를 활용하여 기상 조건이나 구름미세물리 특성 등을 직접 관측하였다. 연구자들은 과냉각수적에 빙정핵, AgI 시딩함으로써 빙정을 발생시키고, 빙정 성장과정을 정밀하게 관측하였다. Figure 2는 CloudLab 캠페인을 통해 얻고자 하는 시딩과 빙정의 성장과정을 수평적인 공간 해상도와 함께 모식도로 제시한 것이다. 중앙 집중관측 지점에서 테더존데와 연직스캔 구름레이더를 활용하여 구름내 빙정의 성장과정을 관측할 수 있도록 전방 풍상측에서 시딩이 이루어진다.

CloudLab 캠페인은 자연적인 변동을 제거하고 시딩 효과를 분명하게 보여주기 위해서 구름 두께가 거의 일정한 층운형이고 상대적으로 안정한 상태가 지속적으로 유지되는 조건을 선정하였다. 그리고 시딩물질이 확산되어 가는 시간과 거리를 고려하여 시딩위치와 이에 대응하는 관측장비들이 배열되어 있다(Fig. 2; Ramelli et al., 2024). 수평방향 풍속을 고려하여 관측지점(레이더, 테더존데 등) 약 3 km 풍상측에서 무인항공기(unmanned aerial vehicle, UAV)를 통해 AgI를 살포하고 이들이 이류되면서 빙정(하얀색 육각형)을 성장시키는 과정을 정밀하게 관측하는 것이다. 한 가지 주목할 점은 지상으로 낙하하는 빙정입자의 형태와 크기 및 낙하속도를 측정할 수 있는 HOLographic Imager for Microscopic Objects (HOLIMO) 장비를 설치하여 눈결정을 정량분석하고 있다. CloudLab 실험의 의의는 UAV, 테더존데 그리고 HOLIMO 등의 최첨단장비를 활용하여 구름미세물리 변화를 정밀하게 관측함으로써 시딩효과를 정량적으로 평가하고 검증하는 방법을 제시하는 점이다. 이는 혼합상 구름물리 분야의 과학적 진보와 더불어 인공강설 실험의 성공가능성을 증가시키는 데에도 기여할 것이다.

2.3 UAE Rain Enhancement Program (UAEREP)

앞 두절에서 인공강우실험의 기술적 진보뿐만 아니라 학술적인 측면에서 가장 선진적인 연구사례를 살펴봤다면, 본 절에서는 인공강우(설) 연구 진흥 프로그램이라고 할 수 있는 아랍에미레이트(UAE)의 UAE Rain Enhancement Program (UAEREP)을 간략하게 살

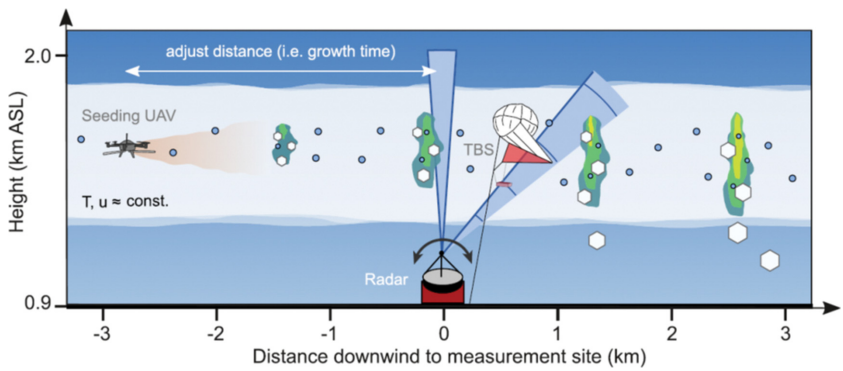

Fig. 2. Schematic diagram of CloudLab campaign (Ramelli et al., 2024). Seeding particles in brown are dispersed in mixed phase clouds with supercooled droplets, and further developed into ice particles (hexagonal plate in white). Radar reflectivity is displayed in blue-green-yellow code. This growth process of ice crystals is observed with tethered sonde system and vertical-pointing scanning cloud radar in blue. The monitoring site is arranged by considering the advection time of dispersed seeding particles.

펴보고자 한다. 향후 인구가 지속적으로 증가하고 경제가 급성장중인 개발도상국들에게 물부족 문제는 더욱 심각한 영향을 줄 수 있기 때문에 성공가능성이 큰 효율적인 인공강우(설) 기술과 방법론 등은 절실히 요구된다. 이러한 측면에서 아랍에미레이트는 물부족을 대비하여 미래세대를 위한 혁신적인 실험기술 개발과 발전을 위해 UAEREP 프로그램을 운영중에 있다(NCM, 2025).

구체적으로 살펴보면, UAEREP는 전 세계 연구자들을 대상으로 수자원 확보나 인공강우 과학 및 기술 진보 관련 연구과제에 대해 3년간 약 150만불을 지원하는 사업이다. 본 사업은 2016년부터 시작되어 현재까지 14개 연구팀에 대해 지원하였으며, 5개 주제는 아래와 같다. 그동안 선정되었던 사업의 개요는 다음 Table 1에 제시하였다.

1) 최적의 시딩물질 개발 및 최적화 연구
2) 구름 생성 및 증우실험 최적화 연구
3) 드론 활용 자동시딩 및 관측 연구
4) 제한된 지역에서 지구(기후)공학 연구
5) 구름강수 모델 및 소프트웨어 개발 연구

UAE에서는 1990년부터 자체적으로 인공강우 실험을 시작하여 점차 확대 발전시켜 2016년부터 UAEREP 프로그램을 운영하게 되었는데, 여기서 축적된 전문기술과 과학적 성과를 자국에 적용하여 수자원 확보에 힘쓰고 있다. 주요 연구 성과를 소개하자면, 나노물질을 활용하여 보다 낮은 상대습도에서도 구름방울을 생성시킬 수 있고 상대습도 100%에서는 기존 입자보다 구름방울을 약 3배 정도 효율적으로 생성시키

Table 1. Summary of project lists selected for each cycle of UAEREP.

Cycle/ Period	Principal Investigator	Affiliation	Project Title
1 (2016~2018)	Prof. M. Murakami	Nagoya University	Advanced Study on Precipitation Enhancement in Arid and Semi-Arid Regions
1 (2016~2018)	Prof. L. Zou	Khalifa University of Science and Technology	Using Nanotechnology to Accelerate the Water Condensation Nucleation and Growth
1 (2016~2018)	Prof. V. Wulfmeyer	University of Hohenheim	Optimizing Cloud Seeding by Advanced Remote Sensing and Land Cover Modification
2 (2017~2019)	Dr. P. Lawson	Spec Incorporated	Optimization of Cloud Seeding through Seeding Efficiency, Seeding Material, and Targeted Clouds
2 (2017~2019)	Prof. H. Korhonen	Finnish Meteorological Institute	Optimization of Aerosol Seeding In rain enhancement Strategies (OASIS)
2 (2017~2019)	Prof. G. Harrison	University of Reading	Investigating the Electrical Properties of Clouds to Enhance Rainfall
3 (2018~2020)	Dr. A. Abshaev	Hail Suppression Research Center	On the Creation of Updrafts for the Formation of Artificial Clouds and Rainfall
3 (2018~2020)	Prof. E. Frew	University of Colorado	Targeted Observation and Seeding using Autonomous Unmanned Aircraft Systems
3 (2018~2020)	Prof. L. Xue	National Center for Atmospheric Research	Using Advanced Experimental – Numerical Approaches to Untangle Rain Enhancement
4 (2022~2024)	Prof. B. Baker	Spec Incorporated	Enhancing Rain in the UAE via Hygroscopic Seeding with Nano-Seeding Material
4 (2022~2024)	Prof. L. D. Monache	Scripps Institution of Oceanography	A Hybrid Machine Learning Framework for Enhanced Precipitation Nowcasting
5 (2023~2025)	Prof. G. Matras	Directed Energy Research Center	Laser-based Rain Triggering Demonstrator with Remote Sensing Technology
5 (2023~2025)	Prof. D. Rosenfeld	Institute of Earth Sciences	Identification of Clouds' Microphysical Seedability in an Actionable Manner
5 (2023~2025)	Prof. W. Cantrell	Michigan Technological University	Laboratory and Modeling Studies of Cloud Susceptibility to Hygroscopic Seeding

는 시딩물질을 개발하였다. 그리고, 비용 절감과 안전을 위해 무인항공기나 드론을 활용한 실시간 무인 항공시딩 플랫폼을 개발하였으며, 이를 활용하여 응결핵을 살포하지 않고 전하를 구름에 전달하여 강수를 촉진하는 실험을 수행하였다. 또한, 위성자료, 지상 레이더 그리고 수치예보결과 등을 종합하는 기계학습 및 AI 기반의 소프트웨어를 통하여 시딩가능한 구름 확인 및 시딩효과 관측 등의 실험 가이던스를 개발하였다. 궁극적으로 UAEREP는 전 세계 과학자들이 물 부족 지역에 강우를 증가시키는 혁신적인 방법과 기술을 개발하고 이를 전 세계에 확산시키는 역할을 하고 있다(NCM, 2025).

2.4 중국 기상조절실험

앞에서 살펴본 바와 같이 인공강우연구도 활발해지고 있지만 여러 국가에서 인공강우실험을 현업으로 운영하고 있다. 그 중 가장 적극적으로 투자하는 국가는 중국인 데, 우박억제, 수자원 확보, 미세먼지 제거, 인공 증설, 대형 이벤트 개최 등을 위해 대부분의 지방정부(성)가 자체의 기상조절국을 운영하고 있다. 중국에서는 1958년에 길림성에서 가뭄 완화를 위해 첫 야외 인공강우실험이 시작되었고, 이후 1960~1970년대에는 주로 우박억제 실험이 수행되었다. 국가 차원에서 기상조절실험이 현업으로 운영되기 시작한 것은 기상조절 국가위원회가 설립된 1994년부터이다. 이후 1996년부터 2025년까지 3차에 걸친 기상조절발전계획(Cloud Modification Development Plan, CMDP)이 추진되었고, 2000년에는 기상법이 제정되면서 중국 기상청(China Meteorological Agency, CMA)이 모든 기상조절활동 및 계획의 주무 부처가 되었다(Guo et al., 2015).

중국 기상청은 기상조절실험을 수행하고 관측할 수 있는 인프라 역시 잘 구축되어 있다. 2023년에는 세계에서 가장 큰 통합 기상관측시스템을 구축했는데, 이는 7개 대기배경관측소, 27개 기후관측소, 약 70,000개 자동기상관측소, 120개 산악기상관측소, 242개 차세대 레이더 관측소, 그리고 9개 Fengyun 기상위성으로 구성된다(CMA, 2023). 더불어 기상조절실험을 전담하는 6개 지역 기상조절센터, 6,500개의 방공용 대포, 50대 항공기, 8,200개 로켓시스템, 50,000명의 실험 인력을 보유하고 있다(CMA, 2018).

중국의 기상조절은 크게 두가지 카테고리로 나눌 수 있는데, 1) 물부족 지역의 수자원 확보나 우박 억제와 같은 일반적인 재해기상의 완화, 2) 대규모 행사 개최를 위한 대기오염저감이나 집중호우 억제 등의 기상조절실험이다. 예를 들면 2008년 올림픽 기간 중에는 심각한 대기오염 저감과 집중호우를 약화시키기 위해 21개 지점에서 1,100여개의 로켓을 발사하여 비구름대를 약화시켰고, 2021년에는 중국 공산당 100주년 행사에서 인공강우실험을 실시하여 PM2.5를 2/3 가량 감소시켜 맑은 하늘과 깨끗한 대기질을 확보하였다고 보고하였다(Weber and Jash, 2025). 중국 국가의 특성상 이와 같은 이벤트나 행사 홍보 효과를 노리는 기상조절실험도 이루어지고 있지만, 대부분의 기상조절 연구는 건조지역이나 고원지역 수자원 확보에 주력하고 있다. 하지만 중국의 기상조절실험은 기후변화시대에 경제성장과 함께 수자원의 안정적인 확보에 주력하고 있다. 대표적인 사례가 티벳 고원지역과 황하강 상류 지역(청해성)에 수행되는 '*Sky River*' 프로젝트이다. 이 지역은 아시아 주요 강들의 발원지로써 중국 북부지방의 50% 가량에 물을 공급하는 고원지대이다. 중국 정부는 연간 50~100억 m^3 물을 확보하기 위하여 원격조정이 가능한 굴뚝이나 500여개의 지상 연소기 등을 이 지역에 설치하였다(Simon et al., 2023). 한국의 인접국가인 중국에서 이와 같은 수자원 확보를 위한 대규모 프로젝트를 추진하고 있는 것은 국가간 물 안보 측면에서 시사하는 바가 크다. 이러한 주변국가의 인공강우 프로젝트로 인한 영향이 국내에 미칠 부작용은 없는 지 사전에 과학적으로 검토되고, 윤리적인 문제나 국제법 등에 대한 연구도 필요하다.

2.5 North Dakota Cloud Modification Program (NDCMP)

미국 북서부 노스다코타주는 넓은 평지를 보유하고 있어 주요 산업이 농업이라 할 수 있다. 여름철에 발생하는 우박은 농산물 수확량에 큰 피해를 줄 수 있기 때문에 주정부에서는 1948년부터 우박억제실험(NDCMP)을 수행해 왔다. 1960년부터는 항공기를 이용하여 시딩실험을 수행하였고, 1975년에는 실험을 관리하고 운영하는 전담부서가 설립되었다. 본 실험의 주요 목적은 우박억제 및 강우증가인 데, 기본적으로 빙정의 씨앗이라 할 수 있는 AgI를 살포하여 작은 크기의 빙정 개수를 증가시켜 빙정이 크게 성장하지 못하고 낙하하면서 녹아 비로 내리게 하는 원리이다.

노스다코타 주정부의 NDCMP는 지난 60여년동안 꾸준히 현업으로 수행되어 왔다는 점에 주목할 필요가 있다. 실험의 지속적인 운영으로 약 45% 정도의 우박억제 효과를 거두었고, 이에 따른 농작물 수확량 역시 증가하였다. 또한 통계적으로 유의한 수준에서 약 5~10% 가량 강우 일수 및 강우량이 증가하였다고 보고하였다(Schneider, 2023). 또한 주목할 점은 노스다코타 주정부에서는 매년 전 세계 기상조절실험 실무자들을 대상으로 인턴 및 연수 프로그램을 운영하고 있다. 주요 교육내용은 우박억제 실험방법, 실험결

Table 2. Comparisons of main artificial cloud seeding experiments in the world. SNOWIE and CloudLab are research-based projects, whereas CMDP and NDCMP are operation-based programs. Meanwhile, UAEREP is an international program to boost rain enhancement science and technology.

Content	SNOWIE[&]	CloudLab[%]	UAEREP[*]	CMA CMDP[$]	NDCMP[#]	NIMS[@]	Level[+]
Main Purpose	Enhancing Orographic precipitation	Understanding mixed cloud microphysics	Boosting seeding science and technology	Suppressing hailstorm and enhancing precip	Suppressing hailstorm and enhancing precip	Preventing wildfire, and securing water resource	-
Operation Personnel	~ 20	~ 20	~100	~50,000	~20	7	L
Investment (0.1 billion)	~10	7~10	100 (‘22)		273 (‘24)	30 (‘24)	M
Target domain	Idaho, United States	Alps, Switzerland	Global	Chines territory	North Dakota, United States	The whole Korea (Yeongdong)	-
Aircraft	2	None	4		5	2 (‘24.9 ~)	M
Period	Jan-Mar 2017	2021~2024 (ongoing)	2016 – ongoing	1958 – ongoing (Sky River: 2015 –)	1948 – ongoing	2015 – ongoing	-
Experiment Frequency	Intensive campaign	Intensive campaign	390 times (1,000 hrs)	~ 2,900 hrs seeding (~1,000 times/aircraft)	480 hrs seedings (68 hrs/aircraft)	22 times/yr (‘20-‘23)	L
Socio-economic benefit	Investigating cloud microphysics rather than seeding effect	Investigating cloud microphysics rather than seeding effect	Annual 10% increase in precipitation	Annual 20% increase in precipitation (‘05~‘14)	Annual 5~10% increase in precipitation (‘06~‘14)	Annual 1.7% increase in precipitation (‘23)	M
Observation	Aircraft and surface radar observation	Drone, Tethersonde, HOLIMO	In-situ and various remote sensings	Aircraft and surface radar observation	Aircraft and surface radar observation	Aircraft and surface radar observation	M
Evaluation	Process-level understanding of cloud development	Process-level understanding of cloud development	Theory and physical evaluation using chamber and model	Event-driven weather modification	Practical guideline and manual	Guideline, Manual and comprehensive evaluation	H
Modeling	WRF-LES	ICON	Operation system and developing software	WRF-LES	Not active	WRF-NIMS	H
Signature	Unambiguous zig-zag echo of seeding evaluation	Understanding WBF mechanism	Promoting research and cutting-edge technology	National water security and hazard mitigation	Well-documented operation manual and Summer school	Hydrology and forest impact analysis	-

SNOWIE: Seeded and Natural Orographic Winter clouds: the Idaho Experiment, UAEREP: UAE Rain Enhancement Program, NDCMP: North Dakota Cloud Modification Project, CMA: Chinese Meteorological Administration, CMDP: Cloud Modification Development Plan, NIMS: National Institute of Meteorological Sciences, HOLIMO: HOLographicImager for Microscopic Objects, ICON: Icosahedral Nonhydrostatic Model, WRF-LES: Weather Research and Forecasting model - Large Eddy Simulation

[&] French et al. (2018), Tessendorf et al. (2019)

[%] Ramelli et al. (2024), Henneberger et al. (2023)

[#] North Dakota Cloud Modification Project Final Operations (2019)

[*] Final Report of annual training for advanced artificial rain practical technology (2025), Introduction and outcome of UAEREP in the web page

[$] Research report of ISREM by Weber and Jash (2025), Guo et al. (2015), Simon et al. (2023)

[@] Annual report of artificial cloud seeding projects of NIMS (2020~2024)

[+] Level of technology is qualitatively evaluated as low (L), Medium (M), and High (H) by comparison with the other programs.

과 자료처리, 기상모델 운영, 적절한 실험 가능 종관 분석 및 실험 전반에 걸친 안전교육 등이다(Langerud, 2023). 물론 실험 결과의 과학적인 성과 부분도 있지만 장기간의 실험 운영에 따라 실험 실무 절차 및 구체적인 가이던스가 잘 제시되어 있다는 점이다. 실험 절차와 매뉴얼과 같은 실무적인 정보는 본 논문에서 깊이 다루지 않았다.

2.6 태국 왕립 인공강우 프로젝트(Royal Rainmaking Project)

태국은 아시아에서 가장 오래된 왕립 인공강우 프로젝트(Royal Rainmaking Project, RRP)을 운영하고 있다. 본 프로젝트는 푸미폰(Bhumibol) 국왕의 주도로 1969년부터 시작되었으며, 건기의 가뭄해소, 농업용수의 확보 그리고 최근에는 대기오염 저감이 실험의 주요 목적이다. 태국 RRP의 주요 특징은 3단계 절차를 따르고 있다. 첫 번째는 구름 촉발(triggering) 단계로써 대기 중에 해염이나 염화칼슘과 같은 흡습성 물질을 살포하여 구름생성을 촉진하는 것이다. 그리고 구름이 생성하고 발달하는 과정에서 두 번째 구름 비대화(fattening) 과정이 진행되는데 추가로 흡습성 입자를 살포하여 구름을 더욱 발달시키는 단계이다. 마지막 절차는 강우 유도(attacking) 단계로써 AgI나 드라이아이스 등의 빙정핵을 살포하여 빙정을 생성시키고 결국 강우를 유발하는 단계이다(DRRAA, 2025).

RRP는 왕립 인공강우연구소(Royal Rainmaking Research Institute, RRRI) 주관으로 연간 150~200회 이상 실험을 수행하고 있으며, 2010년부터는 무인항공기(UAV)를 도입하고 실시간 기상모니터링 시스템을 구축하는 등 기술혁신을 주도하고 있다. 그리고 실험 결과, 10~30% 가량의 강수량 증가가 있고, 댐 저수율 개선 그리고 미세먼지 농도 감소 등의 사회·경제적 효과가 있다고 보고하고 있다. 하지만 무작위 대조군 없이 인공강우실험이 운영되어 과학적 평가 및 검증 절차가 부족하고, 상세한 실험자료와 결과가 학술지에 제한적으로 공개되는 한계가 있다. 그러므로 RRP는 왕실 주도의 국가 장기 인공강우 프로그램이기 때문에 사회적 수용성을 높이고 지속가능성을 확보한 좋은 선례이지만, 과학적인 검증 체계 보완이 필요해 보인다(Silverman and Sukarnjanaset, 2000).

이상 SNOWIE와 CloudLab과 같은 연구과제, CMDP, NDCMP, RRP와 같은 현업과제 그리고 UAEREP 연구진흥프로그램 등의 전반적인 개요, 성과, 그리고 특이사항 등을 간략하게 정리하여 Table 2에 제시하고 국내 인공강우기술 수준을 이들과 비교하여 정성적으로 평가하였다. 단, RRP는 Table 2에서 제외하였다. 국내 실험 횟수는 미국 NDCMP의 480시간, 중국 CMDP의 약 1,000회 등 외국 사례에 비해 여전히 부족한 실정이고 운영 인력 역시 현저하게 적은 수준이다. 그리고 실험 항공기 확보나 실험 결과의 사회·경제적 효과 측면에서 개선의 여지는 있으나, 인공강우실험의 통합적인 운영 및 관리 측면 그리고 실험 결과의 평가 및 모델링 분야는 거의 선진국 수준에 근접하고 있다고 판단된다. 특히 스펙트럴 빈(spectral-bin) 미세물리과정을 고려하는 WRF-NIMS 활용 고해상도 모의는 다른 국가들과 비교할 때 상당히 높은 수준이다. 국내에서 수행된 구체적인 실험결과의 물리적 평가결과는 다음 절에서 언급할 예정이다. 향후 인공강우실험 가능 조건에서의 연속실험 확대, 현업 운영기관의 설립 및 운영 인력의 확보 등의 지속적인 인프라 구축과 함께 실험 결과의 과학적인 검증과 비용 대비 경제성 평가 등이 요구된다.

3. 국내 인공강설 실험 결과 평가

3.1 실험 가능 조건의 선정

국내에서도 1963년에 양인기 박사에 의해 처음 인공강우 실험이 실시된 이래(Yang, 1965), 국립기상과학원을 중심으로 산불 및 가뭄예방을 목적으로 여러 지역에서 인공강우(설)실험이 수행되고 있다. 하지만, 한반도에 가뭄이 발생하면 한시적인 대응책으로 단기적인 실험이 수행되어 실험 기술의 축적이 미흡했다. 2008년부터 임대 소형항공기를 이용한 실험 및 지상 검증실험이 제한적으로 이루어지다가, 2018년에 연구용 항공기의 도입과 함께 연속적인 인공강우실험이 가능하게 되었다(Cha et al., 2019). 무인항공기(unmanned aerial vehicle)를 활용하여 시딩 실험을 수행하고 연구용 항공기를 활용한 관측을 통해 일부 실험효과를 제시한 바 있다(Jung et al., 2022). 항공기를 이용한 시딩실험 방법 이외에도 지상연소 실험장치, 로켓, 드론 등을 다양하게 활용하여 구름씨 뿌리기를 수행하고 있다(Chang et al., 2007). 또한, 실험 검증을 위하여 최적의 관측망 구성 및 첨단장비 등을 꾸준히 도입하여 체계적인 인공강우(설)실험을 수행하고 있으며, 실험 효과 분석 및 수치모델을 활용한 인공강우 효과를 연구하고 있다(Ko et al., 2024; Lim et al., 2022; Cha et al., 2019). 본 절에서는 강원 영동지역 대관령에서 수행된 인공강설실험의 물리·화학적 검증 방법 및 주요 결과를 간략하게 소개하고자 한다.

인공강설 실험의 성공 가능성(seedablility)을 높이기 위해서는 대상지역 고유의 지형특성을 반영하여 실험효과를 증가시킬 수 있는 최적의 대기환경 및 구름조건을 사전에 파악해야 한다. 예를 들면, 겨울철 영

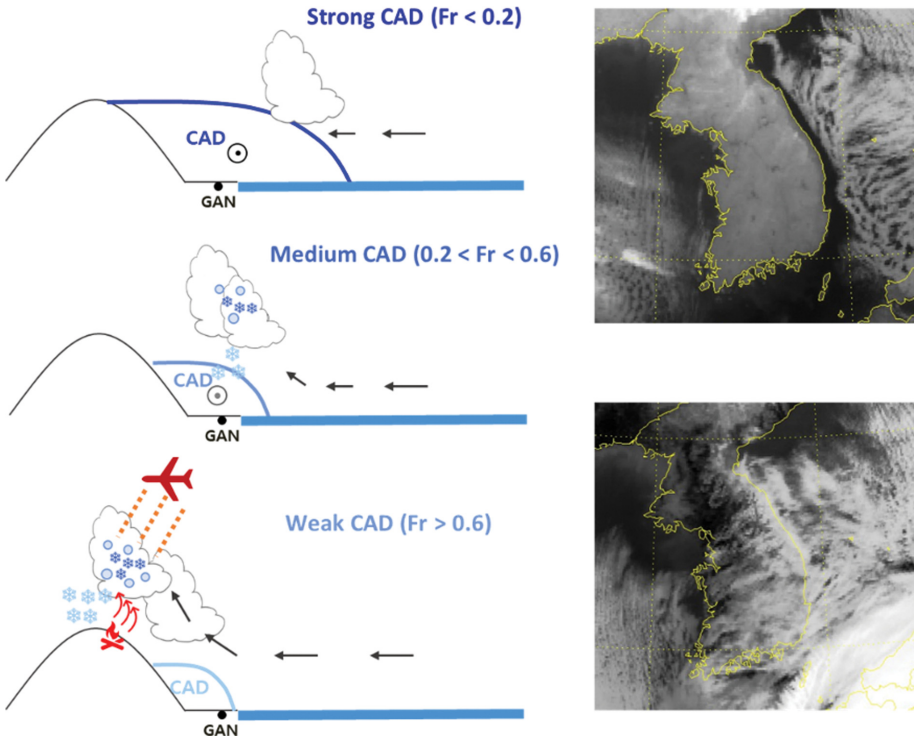

Fig. 3. Schematic diagram of snow clouds' penetration and snowfall location according to the CAD intensity defined as Froude number (*Fr*). GAN denotes Gangneung in the Yeongdong plain of Korea. Typical infrared cloud images of strong CAD (6 Feb. 2020; right upper) and weak CAD (10 Feb. 2014; right lower) are shown corresponding to left diagrams. *Fr* is calculated using Eq. (1) at the point upwind 100 km away from the coastline. The bottom panel indicates better seedable condition of orographic clouds with weak CAD of *Fr* larger than 0.6.

동지역 강설은 북동풍 계열의 한기가 동해상을 통과하면서 눈구름이 발달하여 유발되는데, 이 과정에서 한기가 태백산맥으로 접근할 때 산맥저지효과 때문에 동쪽산사면에 한기축적(cold air damming, CAD)이 자주 발생하게 된다(Kim et al., 2021). 한기축적이 약하게 발생하고 북풍 내지 북동풍 바람이 강한 조건(약한 CAD)에서는 눈구름이 산사면을 타고 상승하면서 지형성 눈구름이 잘 발달하여 산지에 더 많은 강설을 초래하게 된다(Fig. 3 아래). 반면에 한기축적이 강하게 발달하는 조건(강한 CAD)에서는 동해상의 눈구름이 영동 내륙으로 진입하지 못하여 영동 내륙에는 약한 강설이나 무강설이 나타날 수 있다(Fig. 3 위). Figure 3은 이러한 한기축적 강도에 따른 강설 지역의 변화를 제시한 간략 모식도이다(Kim et al., 2023). 그리고, 모식도의 가설을 뒷받침할 수 있는 강한 CAD와 약한 CAD 사례시의 전형적인 위성 구름 영상(IR)을 Fig. 3 오른쪽에 제시하였다.

한기축적의 강도는 프로우드 수(*Fr*)로 표현할 수 있는데, *Fr* 수는 안정도를 대변하는 부력 진동수(Brunt Vaisala Frequency)와 관성력의 비를 의미한다[식(1)].

$$Fr = \frac{U_{925}}{N_{850-1,000}H} \tag{1}$$

여기서 U_{925}는 925 hPa에서의 태백산맥에 직각방향의 풍속, $N_{850-1,000}$는 Brunt Väisälä 진동수로써 850 hPa과 1,000 hPa 고도에서 온위의 경도, H는 산맥의 평균 고도로 여기서는 1 km로 가정하였다.

Fr 수는 산맥저지 효과 영향을 받지 않는 먼바다(해안선에서 100 km 떨어진 지점)에서 Local Data Assimilation Prediction System (LDAPS) 분석장 자료를 이용하여 계산하였다. *Fr* 수에 따른 CAD 강도와 영동지역 강설 분포 특성을 비교 분석한 결과, *Fr*가 0.6 이상으로 약한 CAD 조건일 때 산지 부근에 지형성 눈구름을 유발하기 좋기 때문에 실험 성공 가능성이 큰 것으로 나타났다(Kim et al., 2023).

한편, 영동지방은 지속적인 푄의 영향으로 2025년 여름 강릉에 국가재난사태를 초래한 가뭄과 같이 영동 평지의 가뭄이 악화되는 실정이다. 그러므로 현재

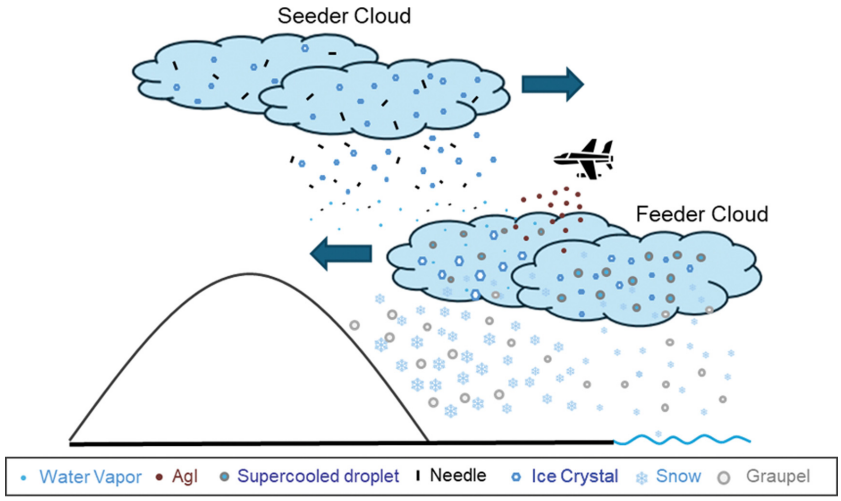

Fig. 4. Schematic diagram of artificial seeding targeted for the plain domain during the Seeder-Feeder clouds structure in the Yeongdong region. Ice crystals from a seeder cloud falling into a feeder cloud, and growing to larger graupel and aggregates. Each symbol is explained in the bottom.

는 대관령을 중심으로 하는 영동 산악지역에서의 인공강설 실험이 주로 수행되고 있지만, 태백산맥 동쪽 평지를 목표지점으로 하는 인공강설 실험 역시 중요하다. 영동 평지에 강설을 유발하기 위해서는 중간 혹은 강한 CAD 조건이면서, 가강수량이 풍부한(겨울 기준 10 mm 이상) 대기환경조건에서 실험이 수행되어야 할 것이다. 영동지역에서 강설 사례 중 대략 30%를 차지하는 시더-피더(Seeder-Feeder) 구름 조건은 일반 동해효과 강설 보다 가강수량이 약 2배 정도 크다(Han et al., 2025). 시더-피더 강설은 동진하는 상층 구름(seeder)의 빙정들이 동해에서 내륙으로 진입하는 하층 혼합상 구름(feeder)으로 낙하하는 과정에서 결착(riming) 및 부착(aggregation)과정으로 눈결정을 성장시키는 현상이다. 따라서 영동 평지를 대상으로 하는 인공강설 실험인 경우에는 CAD 강도는 상대적으로 크고, 시더-피더 사례와 같이 가강수량이 풍부한 기상조건에서 시딩실험이 수행되어야 할 것이다. 이상의 시더피더 조건에서의 인공강설실험 개략 모식도를 Fig. 4에 제시하였다.

3.2 실험 결과 평가

본 절에서는 3.1절에서 확인한 바와 같이 영동지역에서 약한 CAD와 같은 지형성 눈구름이 발달하기 좋은 조건에서 대관령 산지에서 수행된 지상연소 실험 결과 일부를 소개하고자 한다(KMA, 2022; 2023). 대관령 주변 산악지역에는 지상연소 실험 지점(구 대관령 기상대: CPO)과 6개의 관측소가 구성되어 있다. 6개 관측소에는 Micro Rain Radar (MRR), Particle Size and Velocity (Parsivel), 그리고 적설계가 기본적으로 설치되어 있다. 본 절에서는 두 가지 성공적이었던 지상연소 실험 사례의 결과를 제시한다. Figure 5는 첫 번째 약한 CAD 사례인 2020년 2월 26일 시딩 실험 이후 풍하측 4 km 지점(현 대관령기상대: CPC)에서 레이더(MRR)와 파시벨을 이용하여 분석한 결과를 나타낸 것이다. 모델 재분석장(LDAPS)의 바람 분석결과, 북동풍 계열 바람과 함께 시딩물질이 풍하측으로 이동하면서 구름내에 빙정 생성을 유발했을 것으로 추정된다. 대략 한 시간 이후 대관령 기상대(CPC)에서, 그리고 약 두 시간 이후에는 용평(YPO)에서 구름반사도가 증가하였다(Fig. 5). 하지만, 시딩 영향이 없을 것으로 추정되는 배경지점, 진부(JBO)에서는 시딩 실험에 의한 변화가 나타나지 않았다. Figure 5에서 빨간색 네모 박스는 시딩기간을 의미하고, CPC와 YPO의 보라색 파선은 시딩에 의해 순차적으로 나타난 구름반사도와 강수입자 크기 증가를 잘 보여주고 있다. 지상 강수량(1 h 해상도)의 변화는 CPC 지점에서는 의미 있는 수준의 차이를 보이지 않았지만, YPO 지점에서는 약 1 cm 적설이 관측되었다. 이는 AgI 시딩 시간이 30분 정도로 짧았기 때문에 구름 및 강수 반응 시간도 한 시간 이내에 제한되었고, 강수량 증가도 미미한 수준이었다. 그래서 향후 의미 있는 증설실험 효과를 보여주기 위해서는 1) 실험 조건이 맞는(seedable) 대기환경 및 구름조건에서 시딩 시간을 최대한 증가시키거나, 2) 지상 강수량을 조밀한 시간 해상도에서 관측하는 게 필요하다.

한편 인공강설 실험의 검증에 있어서 첫 번째 사례

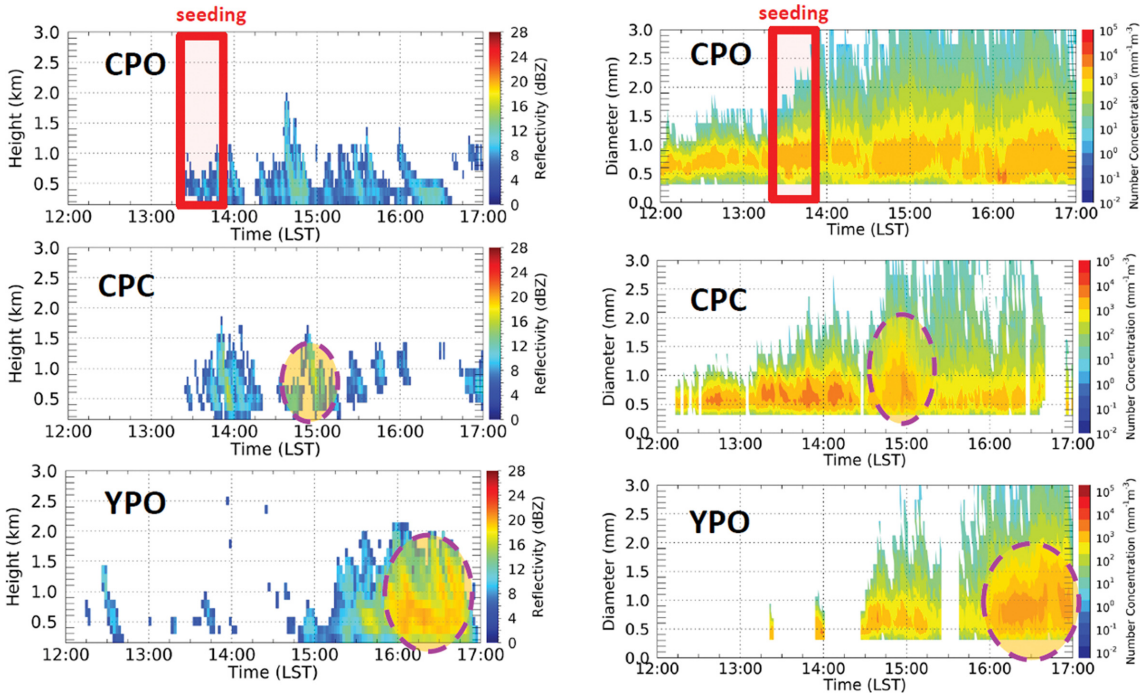

Fig. 5. Time variation of cloud reflectivity from Micro Rain Radar (Left) and precipitation particle size distribution from Parsivel (Right) on 26 February 2020 at Cloud Physics Observatory (CPO), Cloud Physics Center (CPC) and YongPeong Observatory (YPO). Red box indicates seeding period, violet dashed circle indicates increased response of reflectivity and particle size.

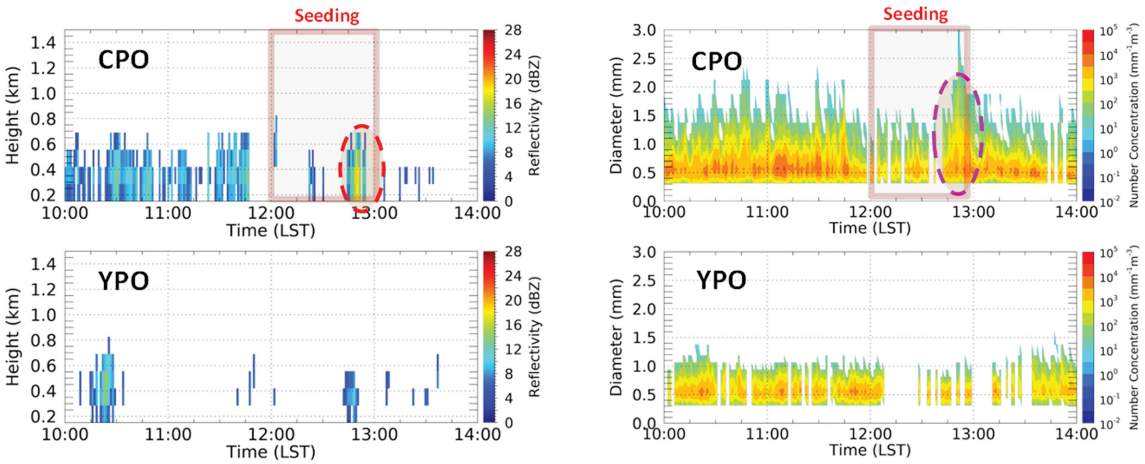

Fig. 6. The same as in Fig. 5 except for 6 March 2021.

와 같은 구름 및 강수의 물리적 비교평가만으로는 시딩을 하지 않았더라도 발생했을 가능성이 있는 자연강수 문제를 완전히 배제할 수 없다. 이러한 자연 강수 효과 가능성을 최소화하기 위하여 추가로 설치된 강수 자동채취기를 활용하여 강수성분 분석 결과를 평가하는 방법을 적용하는 것이 바람직하다. 인공강설실험에서 주로 사용하는 시딩물질인 Ag 농도가 실험 이후 강수 성분 분석에서 유의한 수준에서 높게 나타났다면, 이는 자연강수 영향이라기 보다는 시딩 효과에 의한 강수 증가이었을 가능성이 크다. 하지만

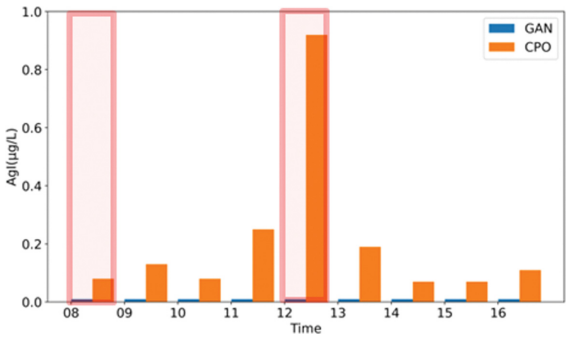

Fig. 7. Variations of Ag concentration in the precipitation sample at Gangneung (GAN) and Cloud Physics Observation (CPO) on 6 March 2021. Red box indicates seeding period.

강수채취기가 설치된 시기가 2020년 봄 이후이고 겨울철 실험 사례가 적기 때문에 두 번째 실험 사례로 또 다른 약한 CAD 조건의 2021년 3월 6일 실험을 선정하고 토의하고자 한다.

Figure 6은 강수 자동채취기가 설치된 CPO와 YPO 지점에서 2021년 3월 6일의 MRR과 Parsivel 관측결과를 제시한 것인데, CPO 지점에서 시딩 이후 약 30여분이 지난 후 구름 및 강수 입자크기 분포가 증가하고 있는 반면에, 주변 용평(YPO) 지점에서는 뚜렷한 변화가 나타나지 않았는데, 용평은 무강수가 기록되었다. Figure 7은 1시간 간격으로 강수 채취기에서 포집한 강수의 화학조성을 분석하여 Ag 성분 변화를 제시한 것이다. Ag 농도 비교를 위하여 풍상측의 강릉(GAN)에서 채취한 강수 성분 분석결과를 함께 제시하였다. 그림에서도 잘 나타난 바와 같이 CPO 지점의 Ag 농도는 시딩 기간 최대 0.9 μg L^{-1}으로 비시딩 기간에 비해 뚜렷하게 증가하였고, 풍상측 강릉 지점과 비교할 때는 약 90배 가량 증가하여, 시딩에 의한 강수 조성변화를 확인할 수 있었다. 이는 단기간(1시간 동안)에 일시적으로 증가한 수치로써 거의 인체에 영향을 미치지 않는 수준이다.

이상의 인공강설 실험결과를 기반으로 물리·화학적 통합 검증절차를 요약하면 다음과 같다. 1) 지상실험 방법을 결정하고, 수평바람장을 분석하여 시딩물질의 확산 방향과 영역을 결정한다. 2) 살포된 시딩 물질이 구름내로 적절히 유입되었는 지를 확인해야 하고, 3) 유입된 구름씨앗에 의한 조밀한 시간 간격(고해상도)과 공간 규모에서 구름방울 크기 및 개수 등의 비교평가가 필요하다. 4) 지상에서 우량계와 적설계를 이용하여 시딩효과가 구현되는 시간 규모에서 강수량 변화를 관측해야 한다. 5) 최종적으로 강우 성분분석을 통해서 시딩한 화학조성이 검출되고, 농도 역시 유의미한 수준에서 증가하였는지 체크되어야 할 것이다.

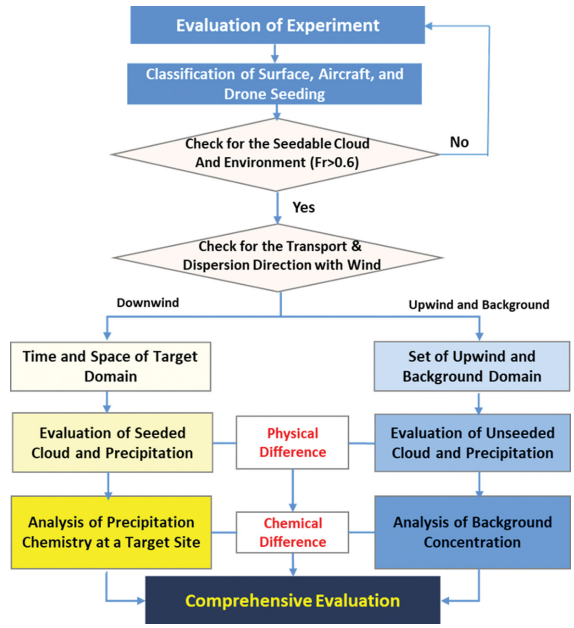

Fig. 8. Comprehensive evaluation procedure of cloud seeding results in the mountains based on the Yeongdong cloud seeding experiments.

Figure 8은 이상의 통합검증절차를 간략하게 정리한 흐름도이다.

4. 요약 및 제안

지금까지 세계적으로 주요 기상조절실험 현황 및 기술수준을 비교하였고, 국내 기상조절실험 중 가장 대표적인 인공강설실험의 물리적 평가 방법을 국내 영동지역 사례를 중심으로 소개하였다. 대부분의 인공강우(설) 실험은 구름의 씨앗이라 할 수 있는 응결핵(빙정핵)을 살포하여 구름방울(빙정)을 성장시켜 강수(비나 눈)에 이르게 하는 것이다. 인공강우(설) 실험은 단순히 실험 차원을 넘어서 일부 SNOWIE나 CloudLab과 같은 구름미세물리 연구를 동반한 프로젝트도 수행된 바 있는데, 잘 짜여진 관측망, 고해상도 정밀 관측기기들과 구름상세 모델링 등을 통해 실험효과의 과학적인 검증결과가 제시되면서 이들의 주요 성과는 인공강우(설)실험 뿐만 아니라 다른 기상조절실험의 지속 가능성을 확보하고, 다양한 추가 실험들을 시작하게 하는 원동력이 되고 있다.

SNOWIE와 CloudLab과 같은 구름물리 기반의 최첨단 연구과제뿐만 아니라 NDCMP, CDMP, RRP 등의 인공강우 현업과제 그리고 UAEREP, 전 세계 기상조절실험 연구진흥프로그램 등과 국내 인공강우실

험 기술 수준을 비교한 결과, 국내 실험 운영 인력이나 실험 횟수 등은 선진 프로그램에 비해 아직 부족한 실정이지만, 인공강우실험 결과의 물리·화학적 평가 및 모델링 수준이나 실험의 통합적인 운영 및 관리 측면에서는 거의 선진기술 수준에 근접하고 있다고 판단된다. 더불어 실험대상지역에서 최적의 구름 및 대기환경조건을 사전에 분석하여, 고유의 지형특성을 반영한 실험 성공 가능성이 높은 조건을 선정하는 것은 필수적이다. 단, 실험 결과의 물리적인 평가 이외에도 실험횟수가 충분히 누적된다면 시딩 영향구역과 배경 구역의 구름 및 강수 차이에 대한 통계적인 평가 및 검증이 요구된다(Breed et al., 2014).

인공강우(설) 실험의 과학적 성과와 함께 최근 일본에서는 위험기상의 제어 및 완화를 위하여 야심찬 재해기상조절 프로그램(*Moonshot Goal 8*)이 진행중이다. 여름철 일본은 태풍에 의한 피해뿐만 아니라 선형 밴드(linear-band) 폭우 그리고 도심 집중호우로 인한 막대한 피해를 겪고 있다. 이 프로그램은 기후변화에 따른 각종 위험기상을 완화하여 사회·경제적 피해를 줄이기 위하여 일본 과학기술부의 지원하에 2050년까지 추진되는 장기 국책연구과제이다(Takemasa, 2025). 주요 연구주제는 위험기상의 빈발로 발생하는 각종 피해를 줄이기 위한 날씨와 사회의 조절기능 연구, 고립된 대류계 및 선형밴드 강수 시스템에 의한 집중호우 완화 연구, 안전한 사회 건설을 위한 태풍 및 강풍 조절 연구 등이 있다. 우려스러운 점은 향후 30여년 동안 일본에서 이와 같은 대형 프로젝트가 성공적으로 수행되어 재해기상 조절 및 완화 기술로 인하여 약화된 재해기상 현상이 인접국가(한반도 포함)에서 강화되는 부작용(side effect)으로 나타날 수도 있다는 것이다. 또한, 태풍의 세기는 변동 없이 인위적으로 진로 변경이 성공한다면 변경된 진로상에 있는 인접국가에게는 되려 막대한 피해를 초래할 가능성도 배제할 수 없다. 모든 기상현상의 질량과 에너지는 보존되기 때문에 국내에서도 일본에서 수행중인 *Moonshot Goal 8* 프로그램에 대응하는 역학 및 에너지 수지 측면의 재해기상완화 연구가 추진되어야 할 것이다.

또한, 소규모 지역적인 규모에서의 기상조절실험을 전지구 규모로 확장하고, 지구온난화를 완화시키는 목적으로 수행하는 것이 지구공학(geoengineering) 실험이다. 최근 기후변화에 따른 수온 상승으로 호주 북동부 산호초가 폐사하는(bleaching) 현상을 줄이기 위하여 과학자들이 해양성 층적운에 구름씨앗(해염)을 다량 살포함으로써 구름의 태양 반사도를 증가시키는 실험(Marine Cloud Brightening, MCB)을 수행하고 있다(Harrison, 2023). 또한 최근 미국 워싱턴 대학 Wood 교수를 중심으로 약 30여개 연구팀이 공동으로 MCB 연구를 시작하여 진행중에 있다(Feingold et al., 2024). 구름의 반사도 증가는 해수면에 도달하는 태양복사에너지를 줄임으로써 해수면 온도를 감소시키게 된다. 현재는 MCB 이론 연구나 성공가능성 테스트 등의 시작 단계이지만, 작은 규모일지라도 지구공학 실험연구의 테스트베드 역할을 할 것으로 기대된다.

이와 같이 전 세계는 직면한 기후위기 문제를 해결하고, 빈발하고 있는 자연재해를 완화시키기 위하여 다양한 방법으로 기상조절실험을 수행중이거나 계획중에 있다. 특히 중국에서 국가 차원에서 수행중인 '*Sky River*' 프로젝트는 대규모 자원이 투입되는 사업이기 때문에 이로 인한 물자원의 배분 측면에서 주변국가에 어떤 영향이 나타날 지 예측하기 어렵다(Weber and Jash, 2025). 인류가 자연에 의도적으로 개입하는 것이 꼭 인류가 원하는 결과만을 제공하지 않을 수 있다는 점을 명심해야 한다. 자연 상태의 대기에는 제한된 물이 존재하고 총 물의 양이 보존된다면, 인간의 의도적인 개입으로 어느 지역의 특정 기간에 강수를 추가로 내리게 할 경우 원래 강수의 혜택을 누리던 지역은 그러지 못할 가능성이 크다. 또한, 에너지 역시 보존되기 때문에 인공강우 실험에 의한 구름생성 및 발달 과정에서 에너지 수지 변화는 어떻게 나타나고, 실험 결과가 동반하는 부작용 발생 가능성도 사전에 검토할 필요가 있다. 그러므로 정부 차원에서 동북아 기상조절 모니터링 네트워크를 구축하는 노력이 필요하고, 세계기상기구 기상조절 전문가 그룹에도 적극적으로 참여해야 할 것이다. 그리고 국내 기상조절 가이드라인 및 안정성 평가체계 수립도 서둘러야 할 것이다.

무엇보다도 세계 여러 지역에서 운영중인 기상조절 실험의 성공과 지속적인 발전을 위해서는 단순히 실험에 그치지 말고, 실험 결과에 기반한 구름물리 과정의 기초적인 이해뿐만 아니라, 본문에서 제시된 바와 같이 실험 성과를 물리·화학적 측면에서 과학적으로 정량평가하여 실험의 성공 가능성을 지속적으로 향상시켜 나가야 할 것이다. 마지막으로 장기적인 실험의 연속성을 확보하기 위하여 소요경비에 대한 경제편익 분석이 필요하다. 미국 NDCMP 사업의 비용대비 편익 추정치 분석결과, $1 투자당 $5~10 편익이 발생한 것으로 보고하고 있는데(Schneider, 2023) 국내에서도 수자원 확보나 산불예방 측면에서 경제성 평가가 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 기상응용연구부 학술연구용역 지원으로 수행되었습니다. 또한, 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(RS-2025-16065527). 본 논문의 개선

을 위해 건설적인 의견 및 꼼꼼한 조언을 해 주신 두 분 심사위원께 감사드립니다.

REFERENCES

Bergeron, T., 1935: On the physics of cloud and precipitation. Proc. Fifth Assembly U.G.G.I. Vol. 2, Lisbon, Portugal, *Un. Geod. Geophys. Int.*, 156-178.

Breed, D., R. Rasmussen, C. Weeks, B. Boe, and T. Deshler, 2014: Evaluating winter orographic cloud seeding: design of the Wyoming weather modification pilot project. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **53**, 282-299, doi:10.1175/JAMC-D-13-0128.1.

Cha, J. W., and Coauthors, 2019: Analysis of results and techniques about precipitation enhancement by aircraft seeding in Korea. *Atmosphere*, **29** 481-499, doi:10.14191/Atmos.2019.29.4.481.

Chang, K.-H., M.-J. Lee, K.-D. Jeong, J.-Y. Jeong, H.-Y. Yang, J.-W. Cha, K.-M. Park, and S.-N. Oh, 2007: An Experimental Study for the Hygroscopic-particle Moving Seeding Method to Dissipate Natural Advection Fog. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **43**, 299-303.

CMA, 2018: 60 years of weather modification in China. China Meteorological Administration [Available online at https://www.cma.gov.cn/en2014/news/Features/201809/t20180913 _477849.html].

_____, 2023: China Focus: China Forges Ahead with Meteorological Modernization. China Meteorological Administration [Available online at https://global.chinadaily.com.cn/a/202303/23/WS641c1327a31057c47ebb62fb.html].

DRRAA, 2025: Rainmaking Manual. Department of Royal Rainmaking and Agricultural Aviation, 48 pp.

Feingold, G., and Coauthors, 2024: Physical science research needed to evaluate the viability and risks of marine cloud brightening. *Sci. Adv.*, **10**, doi:10.1126/sciadv.adi8594.

Findeisen, W., 1938: Colloidal meteorological processes in the formation of precipitation. *Meteor. Z.*, **55**, 121-133, doi:10.1127/metz/2015/0675.

Flossmann, A. I., M. Manton, A. Abshaev, R. Bruintjes, M. Murakami, T. Prabhakaran, and Z. Yao, 2019: Review of advances in precipitation enhancement research. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **100**, 1465-1480, doi:10.1175/BAMS-D-18-0160.1.

French, J. R., K. Friedrich, S. A. Tessendorf, R. M. Rauber, B. Geerts, R. M. Rasmussen, L. Xue, M. L. Kunkel, and D. R. Blestrud, 2018: Precipitation formation from orographic cloud seeding. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, **115**, 1168-1173, doi:10.1073/ pnas.1716995115.

Guo, X., D. Fu, X. Li, Z. Hu, H. Lei, H. Xiao, and Y. Hong, 2015: Advances in cloud physics and weather modification in China. *Adv. Atmos. Sci.*, **32**, 230-249, doi:10.1007/s00376-014-0006-9.

Han, J. H., and Coauthors, 2025: Analysis of seeder - feeder effect on snowfall in the Yeongdong region. *Proc. of 2025 Kor Meteor. Soc. Spring Meeting*. 285.

Harrison, D., 2023: Marine cloud brightening, could it mitigate coral bleaching on the Great Barrier Reef? *EGU General Assembly* 2023, Vienna, Austria, EGU23-17057, doi:10.5194/egusphere-egu23-17057.

Henneberger, J., and Coauthors, 2023: Seeding of supercooled low stratus clouds with a UAV to study microphysical ice processes: an introduction to the CLOUDLAB project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **104**, E1962-E1979, doi:10.1175/BAMS-D-22-0178.1.

Jung, W. S., and Coauthors, 2022: Progressive and prospective technology for cloud seeding experiment by unmanned aerial vehicle and atmospheric research aircraft in Korea. *Adv. Meteor.*, **2022**, doi:10.1155/2022/3128657.

Kim, M.-G., B.-G. Kim, S.-H. Eun, Y.-J. Chae, J.-H. Jeong, Y.-G. Choi, and G.-M. Park, 2021: Analysis of the Relationship of Cold Air Damming with Snowfall in the Yeongdong Region. *Atmosphere*, **31**, 421-431.

Kim, J. Y., and Coauthors, 2023: Effect of cold air damming and barrier wind on snowfall in the Yeongdong region. *Proc. of 2023 Kor. Meteor. Soc. Annual Meeting*. 69.

KMA, 2022: Report and Plan of Cloud Seeding Experiment, *KMA Annual Report*, Korea Meteorological Administration, 34 pp.

_____, 2023: Report and Plan of Cloud Seeding Experiment, *KMA Annual Report*, Korea Meteorological Administration, 41 pp.

_____, 2024: Summary Report and Plan of Cloud Seeding Experiment, *KMA Annual Report*, Korea Meteorological Administration, 14 pp.

Ko, A. R., and Coauthors, 2024: Analysis of the effects of airborne snowfall enhancement experiments based on atmospheric stability: a case study of the IJCO-WCE 2019 campaign. *Atmosphere*, **34**, 445-462, doi:10.14191/Atmos.2024.34.4.445.

Langerud, D., 2023: Design and operations of summer precipitation enhancement projects in North Dakota. *NIMS Seminar of October 2023*, 44 pp.

Lim, Y.-K., B.-Y. Kim, K.-H. Chang, J. W. Cha, and Y. H. Lee, 2022: Analysis of PM10 reduction effects with

artificial rain enhancement using numerical models. *Atmosphere*, **32**, 341-351, doi:10.14191/Atmos.2022.32.4.341.

NCM, 2025: Strategic plan 2025-2030 of the UAE research program for rain enhancement science. National Center of Meteorology, 74 pp.

Ramelli, F., and Coauthors, 2024: Repurposing weather modification for cloud research showcased by ice crystal growth. *PNAS Nexus*, **3**, doi:10.1093/pnasnexus/pgae402.

Rasmussen, R., and Coauthors, 2011: High-resolution coupled climate runoff simulations of seasonal snowfall over Colorado: a process study of current and warmer climate. *J. Climate*, **24**, 3015-3048, doi:10.1175/2010JCLI3985.1.

Rauber, R. M., and Coauthors, 2019: Wintertime orographic cloud seeding–a review. *J. Appl. Meteor. Climatol*., **58**, 2117–2140, doi:10.1175/JAMC-D-18-0341.1.

Schneider, M., 2023: Weather modification in North Dakota. *NIMS Seminar of October 2023*, 42 pp.

Silverman, B. A., and W. Sukarnjanaset, 2000: Results of the Thailand warm-cloud hygroscopic particle seeding experiment. *J. Appl. Meteor*., **39**, 1160-1175, doi:10.1175/1520-0450(2000)039<1160:ROTTWC>2.0.CO;2.

Simon, M., J. McDonald, and K. Brent, 2023: Transboundary implications of China's weather modification program. *Trans. Environ. Law*, **12**, 594-622, doi:10.1017/S2047102523000146.

Takemasa, M., 2025: Moonshot Goal 8 Overview. *International Symposium on Weather Controllability 2025* [Available online at https://www.jst.go.jp/moonshot/sympo/20251030/index.html].

Tessendorf, S. A., and Coauthors, 2019: Transformational approach to winter orographic weather modification research: The SNOWIE Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **100**, 71-92, doi:10.1175/BAMS-D-17-0152.1.

UN, 2021: *Summary progress update 2021: SDG 6 water and sanitation for all*. UN-Water Technical Advisory, United Nation, 54 pp.

Weber, M. G., and A. Jash, 2025: *Chinese cloud seeding practices on the Tibetan plateau towards new forms of hydrohegemony and security dilemma?* Res. Paper of Inst. Strat. Res. Milit. Sch., **146**, 20 pp.

Willoughby, H. E., D. P. Jorgensen, R. A. Black, and S. L. Rosenthal, 1985: Project STORMFURY: a scientific chronicle 1962~1983. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **66**, 505-514, doi:10.1175/1520-0477(1985)066<0505: PSASC>2.0.CO;2.

Yang, I. K., 1965: Basic investigation and preliminary field test for precipitation enhancement. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci*., **1**, 8-13.