Vol.17, No.2(통권 제39호) 2024년 12월 31일 [등록번호 : 11-1360620-100002-09] ISSN 2092-5336

기상기술정책

METEOROLOGICAL TECHNOLOGY & POLICY

2024. 12

특집 인공강우 기술의 발전과 기후변화 대응을 위한 활용방안

칼럼 | 비구름을 만드는 '인공강우', 산불 예방을 위한 새로운 대안 |

정책초점 | 인공강설실험의 물리·화학적 통합 검증 |
| 인공강우 시뮬레이션 연구 및 현업운영 방향 |
| 인공강우의 실질적인 효과들 |
| 모델링을 통해 살펴본 인공강우의 생태보호 효과 |
| 인공강우를 통한 미세먼지 저감 가능성 |
| 인공강우를 통한 우박억제 효과 |
| 인공강우 항공관측의 필요성 및 전망 |
| 구름물리실험챔버 연구성과 |

해외기술동향 | 주요국가별 인공강우 기술 및 현황 |

포커스 | 기상조절 주요 현업국가의 조직과 예산 |

기상청

『기상기술정책』

Vol.17, No.2(통권 제39호)
2024년 12월 31일 발행
등록번호 : 11-1360620-100002-09
ISSN 2092-5336

『기상기술정책』지는 범정부적인 기상·기후 분야의 정책 수요에 적극적으로 부응하고, 창의적인 기상기술 혁신을 위한 전문적인 연구 조사를 통해 기상·기후업무 관련 분야의 발전에 기여할 목적으로 발간 기획되었습니다.

본 『기상기술정책』지는 기상·기후 분야의 주요 정책적 이슈나 현안에 대하여 집중적으로 논의하고, 이와 관련된 해외 정책동향과 연구 자료를 신속하고 체계적으로 수집하여 제공함으로써 기상 정책입안과 연구개발 전략 수립에 기여하고자 정기적으로 발행되고 있습니다.

본지에 실린 내용은 집필자 자신의 개인 의견이며, 기상청의 공식의견이 아님을 밝힙니다. 본지에 게재된 내용은 출처와 저자를 밝히는 한 부분적으로 발췌 또는 인용될 수 있습니다.

원고모집

『기상기술정책』에서는 기상과 기후분야의 정책이나 기술 혁신과 관련된 원고를 모집하고 있습니다. 뜻있는 분들의 많은 참여를 부탁드립니다. 편집위원회의 심사를 통하여 채택된 원고에 대해서는 소정의 원고료를 지급하고 있습니다.

▶ 원고매수: A4 용지 10매 내외
▶ 원고마감: 수시접수
▶ 보내실 곳 및 문의사항은 발행처를 참고 바랍니다.
☞ 더 자세한 투고방법은 맨 뒷편의 투고요령을 참고바랍니다.

『기상기술정책』 편집위원회

발 행 인 : 장동언
편 집 기 획 : 국립기상과학원 기획운영과
편집위원장 : 박영연
편 집 위 원 : 박영연, 김승범, 부경온, 원덕진, 김성우
편 집 간 사 : 우남철, 이경미, 김인겸

발행처

주소 : (63568) 제주특별자치도 서귀포시 서호북로 33
국립기상과학원(책임운영기관)
전화 : 064-780-6505 팩스 : 064-738-9071
E-mail : leekm80@korea.kr

기상기술정책

제17권 제2호(통권 제39호)
2024년 12월 31일 발행

CONTENTS

칼럼
03 _ 비구름을 만드는 '인공강우', 산불 예방을 위한 새로운 대안 / 장동언

정책초점
08 _ 인공강설실험의 물리·화학적 통합 검증 / 김병곤
22 _ 인공강우 시뮬레이션 연구 및 현업운영 방향 / 송상근
42 _ 인공강우의 실질적인 효과들 / 유철상
59 _ 모델링을 통해 살펴본 인공강우의 생태보호 효과 / 나우영
73 _ 인공강우를 통한 미세먼지 저감 가능성 / 박진수
86 _ 인공강우를 통한 우박억제 효과 / 김경익
95 _인공강우 항공관측의 필요성 및 전망 / 엄준식
116 _ 구름물리실험챔버 연구성과 / 박민수

해외기술동향
130 _ 주요국가별 인공강우 기술 및 현황 / 차주완

포커스
138 _ 기상조절 주요 현업국가의 조직과 예산 / 김영미

비구름을 만드는 '인공강우', 산불 예방을 위한 새로운 대안

장동언
기상청장

기후위기, 지구 온난화로 전 세계에 대형산불이 자주 발생하고 있다. 우리나라에도 지난 2022년 초대형 산불인 울진-삼척 산불이 발생하였는데, 당시 산불은 3월 4일부터 3월 13일까지 역대 국내 최장 시간인 213시간 43분 동안 지속되어 24,940헥타르의 숲이 잿더미로 변하였다. 이 산불로 7,279명의 이재민이 발생하고, 908개 시설과 2,483만여 그루의 나무가 피해를 보았다. 소방청과 산림청에 따르면 피해 규모는 약 1.5조 원에 달하며, 135만 톤의 이산화탄소가 배출된 것으로 파악된다. 이 산불 진화를 위해 헬리콥터가 약 1,200회 출격하고 69,000여 명의 인력이 동원되었지만, 산불 진압에 결정적인 역할을 한 것은 산불 마지막 날에 내린 강우였다고 평가되고 있다.

이처럼 비는 산불 진압에 핵심 역할을 하지만, 우리가 원한다고 해서 비가 내릴 수 있는 것은 아니다. 그러나 자연적인 비는 아니더라도 기술의 발전에 따라 인공적인 비는 가능할 터. 최근 기후위기로 인해 발생하는 자연재해를 적극적으로

최소화하는 기술 중 하나로 '인공강우' 기술이 주목받고 있다. 인공강우는 1946년 미국에서 처음으로 발견한 기술로, 구름씨를 뿌려 강수를 유도하는 방법이다. 구름은 형성되어 있으나 구름씨가 부족하여 빗방울로 성장하지 못할 때, 강우를 유도하거나 증가시키는 기술이다. 전 세계 50개국에서 150개가 넘는 인공강우 프로젝트를 진행하고 있으며, 특히 미국과 중국은 60년 이상 인공강우를 실용적으로 사용 중이다. 미국은 수자원 확보, 우박 억제와 같은 농업 생산성 향상 등을 위해 10개 주에서 인공강우를 지속해서 운영하고 있으며, 중국은 산불 예방, 생태 보호, 수자원 확보 등을 위해 막대한 예산, 인력과 항공기·대포 등을 투입하여 인공강우 체계를 꾸준하게 운영 중이다. 그리고 태국도 산불 예방, 미세먼지 저감, 수자원 확보를 위해 1993년부터 인공강우 전담청을 설립하고 현재 7개의 지역센터를 운영하고 있다.

우리나라는 2018년 기상청에서 기상항공기를 도입하면서 본격적으로 인공강우 실험과 연구를 진행하기 시작하였고, 2022년부터는 미국의 인공강우 운영 기술을 벤치마킹하며 기술을 축적해 왔다. 그리고 2024년부터 2028년까지 5년간, 선진국의 인공강우 방식에 따라 여러 대의 항공기를 이용한 상시 인공강우 체계를 운영하여, 산불 예방에 대한 인공강우 실증 연구를 추진하고 있다. 특히, 국지 강풍과 백두대간의 소나무 군락지로 대형산불에 취약한 강원특별자치도와 경북 산악·해안 건조지역을 중심으로 인공강우를 운영하여 산불을 선제적으로 예방하고자 한다.

산림청 자료에 따르면, 5㎜의 강우는 1.1일의 산불 예방 효과가 있다고 한다. 이를 바탕으로 연간 100㎜의 인공증우량이 가능하다면 약 22일의 추가적인 산불 예방 효과를 기대할 수 있으며, 이는 생태 보호를 통해 탄소 저감에도 기여할 수 있을 것이다. 현재의 인공강우 기술 수준으로 산불을 직접 진화하는 것은 여전히 어려운 과제이다. 그러나 인공강우를 활용해 겨울철 산악지역에 눈을 미리 쌓거나 봄철에 토양을 촉촉이 적셔 습도를 높이면, 산림의 건조도를 낮출 수 있다. 산림이 충분한

습기를 머금으면 산불의 초기 발화를 억제하고 확산을 지연시킬 수 있어, 산불 진화의 골든타임 확보에 도움이 될 것이다.

기상청은 2024년부터 상시 인공강우 체계의 본격적인 운영에 박차를 가하여, 이를 기후 위기 대응을 위한 핵심기술 중 하나로 확보하고자 한다. 특히, 봄과 가을철 빈번히 발생하는 대형산불에 대응하여, 인공강우 기술이 산불 예방과 확산 억제에 실질적인 효과를 발휘할 것으로 기대된다. 효율적인 운영을 통해 인공강우 기술이 산불을 선제적으로 억제하는 생태 보호의 선봉대가 되기를 바란다.

정 책 초 점

인공강설실험의 물리·화학적 통합 검증
| **김병곤**

인공강우 시뮬레이션 연구 및 현업운영 방향
| **송상근**

인공강우의 실질적인 효과들
| **유철상**

모델링을 통해 살펴본 인공강우의 생태보호 효과
| **나우영**

인공강우를 통한 미세먼지 저감 가능성
| **박진수**

인공강우를 통한 우박억제 효과
| **김경익**

인공강우 항공관측의 필요성 및 전망
| **엄준식**

구름물리실험챔버 연구성과
| **박민수**

인공강설실험의 물리·화학적 통합 검증

김병곤 강릉원주대학교 대기환경과학과 bgk@gwnu.ac.kr

Ⅰ. 개요
Ⅱ. 산악지역 인공강설 실험
Ⅲ. 인공강설 실험의 통합 검증
Ⅳ. 요약 및 제안

전 세계적으로 진행되는 기후변화에 따른 폭염과 가뭄으로 인한 산불 발화 및 수자원 부족, 도시 집중호우, 선형(linear) 폭우, 슈퍼 태풍의 발생 등의 재해 기상이 빈발함에 따라 전통적인 방식의 인공강우(설) 실험 이외에도 재해기상 완화 및 조절 방안들이 강구되고 있는 실정이다. 그리고 최근 구름물리 관측기술 및 모델링 기술의 지속적인 진보에 따라 수자원 확보 및 가뭄 예방을 위한 기상조절기술의 성공 사례들이 학계에서 보고되고 있다.

이러한 다양한 수요를 만족시키기 위한 기상조절실험 노력과 성과가 제대로 인정받기 위해서는 체계적이고 과학적인 평가 및 검증이 이루어져야 한다. 여기에서는 국내 영동지역에서 수행된 인공강설실험의 물리·화학적 검증 방법을 제시하고 이를 적용한 일부 결과를 소개하고자 한다.■

“ 인구 증가,
물수요 및 가뭄
심각성 확대 등
인공강우(설) 실험의
필요성 증대 ”

Ⅰ. 개요

세계 인구의 지속적인 증가와 물 사용량 증대, 물 수요 확대 등으로 인하여 특정 지역에서는 수자원 확보 문제가 심각하게 대두되고 있다(Rasmussen et al., 2011). 또한, 기후변화에 따른 재해기상의 빈발로 일부 지역에서는 가뭄이 심하게 발생하여 인공강우(설) 실험의 필요성이 절실히 요구된다. 현재 널리 활용되고 있는 인공강우(설) 실험은 수증기가 충분히 존재하고 불안정한 대기에 구름의 씨앗인 응결핵(혹은 빙정핵)을 살포하여 구름방울을 생성 및 성장시켜 궁극적으로 강수에 이르게 하는 것이다. 이중에서도 세계기상기구(WMO)에서 가장 추천하는 실험은 겨울철 지형성(orographic) 인공강설 실험이다(Flossman et al., 2019). 기본 가설은 과냉각수적(0℃ 이하의 수적)이 존재하는 구름에 빙정핵(주로 AgI)을 살포하여 빙정을 생성시킨 후, 이들이 이미 존재하는 과냉각수적과의 포화수증기압 차이에 의해 수적에서 증발된 수증기가 빙정에 침적(deposition)되면서 빙정이 성장하게 된다는 것이다. 이를 빙정설 혹은 Wegener – Bergeron - Findeison 이론이라고 부른다(Bergeron, 1935; Findeisen, 1938). 실제로 겨울철에 수행되고 있는 빙정핵(AgI) 씨뿌리기(seeding) 방법은 여러 인공강설 실험에서 이미 활용되고 있고, 과학적으로도 검증된 바 있다(French et al., 2018; Tessendorf et al., 2019).

이와 같이 인공강우(설) 실험의 구름 발달과정의 해석과 시딩효과의 정량평가를 통해 실험의 과학적 검증이 이루어고 있는 반면에, 전 세계에서는 기후변화에 따른 각종 재해기상이 빈발하고 있다. 예를 들면, 지구 기온 상승과 가뭄에 의해 세계적으로 산불이 빈발하고 있는데, 2023년 5월에 캐나다 북서부 지역에서 발생한 산불이 9월까지 동부로 확장하는 등 캐나다 역사상 가장 큰 피해를 초래한 바 있다. 그리고 2024년에도 10월 29일 스페인 발렌시아에서는 몬순이 없는 지방임에도 불구하고 230여명이 넘는 사망자가 발생하는 일 300㎜ 이상의 기록적인 폭우가 기록된 바도 있다. 이밖에도 매년 기록을 갱신하는 각종 재해기상(폭우, 강풍, 폭설, 폭염, 가뭄, 산불 등)이 발생하고 있다. 국내에서도 2022년 3월 4~13일 기간 동안 울진 및 삼척지역에서 국내 최장기간 산불이 발생하였고, 2022년 8월에는 서울

> 각 국가가 당면한 다양한 문제 해결과실용적 수요에 의해 기상조절 실험이 활발히 수행 중

강남에 발생한 집중 호우로 인명 및 재산 피해가 발생한 바 있고, 2023년 7월 충북 오송 지하차도에서 갑자기 쏟아진 폭우로 무고한 시민들이 생명을 잃는 어이없는 비극이 일어난 바도 있다. 이와 같이 최근 기후변화로 인한 여름철 집중호우의 강도가 이전 보다 강해지고 이에 의한 피해 역시 급증하고 있다. 즉, 인류는 지구적인 규모에서 기후변화 뿐만 아니라 지역적인 규모에서도 다양한 기후위기를 직면하고 있는 상황인 데, 그나마 다행스러운 점은 현대 과학기술은 인류에게 닥친 각종 재해기상을 조절하고 완화시킬 수 있는 수단을 제공할 만큼 발전하고 있다.

일반적인 기상조절실험은 수자원 확보나 가뭄 예방을 위해 인공강우(설) 실험 방식으로 대다수 국가에서 보편적으로 진행되고 있으며, 이와 더불어 넓은 농지를 보유한 중국, 러시아, 미국 등의 국가에서는 농작물 보호를 위하여 오랜 기간 우박 억제실험이 수행되고 있다. 이밖에도 건조한 사막지역에서는 수자원 확보를 위해서(아랍, 이스라엘 등), 산악지역에서는 건기의 식수 및 수자원 확보(미국 서부)를 위해서, 산불 예방을 위해서(시베리아), 그리고 대기오염이 심각한 국가(태국)에서는 미세먼지 저감을 위하여 기상조절실험이 등이 수행되고 있다. 결국 각 국가가 당면하고 있는 다양한 문제 해결과 실용적인 수요에 의해 기상조절실험이 활발히 수행되고 있는 것이다. 하지만, 기상조절실험의 지속적인 운영 및 확대를 위해서는 실험의 성과가 체계적이고 과학적인 방식으로 검증되어야 할 것이다.

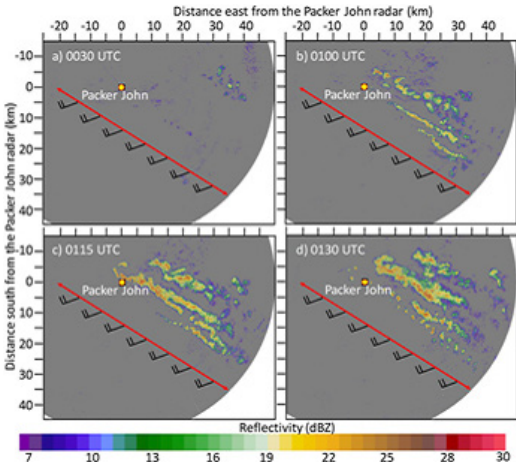
II. 산악지역 인공강설 실험

미국에서 국가 지원의 첫 번째 기상조절실험은 1962-1983년까지 수행된 Stormfury 프로젝트인 데, 실험의 기본 가설은 태풍의 눈 주변에 구름 씨앗을 살포하여 구름이 높게 발달하기 이전에 강수로 내리게 하여 허리케인의 강도를 약화시키는 것이다. 하지만 그 당시에는 관측기술의 부족으로 실험 효과를 과학적으로 검증하지 못했고, 실험에 대한 부작용 우려가 대두되면서 사업이 지속되지 못하였다. 이후 미국 내에서 국가적 지원을 받는 기상조절실험은 지지부진하게 되지만, 미국 중서부 지

> “SNOWIE 캠페인의 성공은 전 세계 기상조절실험을 다시 부활시킨 계기”

역에서는 지역적 특수성으로 인해 우박억제 및 인공강우(설) 실험이 꾸준하게 진행되었다. 그 중에서도 미국 아이다호에서 수행된 SNOWIE(Seeded and Natural Orographic Wintertime Clouds: The Idaho Experiment) 캠페인의 성공은 전 세계 기상조절실험 및 연구를 다시 부활시키는 계기가 되었다(Tessendorf et al., 2019). SNOWIE 캠페인은 미국 아이다호 주변 산악지역에서 겨울철 수자원 확보를 위하여 시딩 실험을 수행하고 다양한 플랫폼에서 구름 및 강수의 관측과 모델링을 통해 실험의 정량적 성과를 제시하였다. 그림 1은 항공기를 통해 AgI 연소실험를 한 이후 Packer John 지점의 구름 레이더 관측 결과를 제시한 것이다. 시딩 항공기가 북서에서 남동 방향으로 반복해서 이동하면서 AgI 씨뿌리기를 한 이후(빨간색 실선), 이들이 남서풍을 타고 북동쪽 방향으로 이류되는 과정에서 점차 빙정을 생성하여 구름의 반사도가 점차 증가하는 것을 잘 보여주고 있다(노란-빨간 coloring). 주목할 점은 시딩 항공기의 왕복 비행으로 풍하측 수평 방향으로 지그재그 패턴의 구름반사도 증가가 나타났는 데, 고해상도의 구름 관측을 통해 실험 효과를 정밀하게 보여준 결과라고 할 수 있다(French et al., 2018; Tessendorf et al., 2019). 시딩 지점에서 풍하측으로 멀어질수록, 그리고 위에서 아래쪽으로 내려오면서 구름방울 크기가 증가하기 때문에 구름 반사도 역시 증가하는 것을 가시적으로 잘 보여주고 있다.

그림 1. 항공시딩 이후 나타난 Pack John 레이더 반사도(빨간색 실선은 항공 시딩선, 깃대는 풍향과 풍속. SNOWIE 관측캠페인에서 얻은 레이더 영상 분석결과임.)

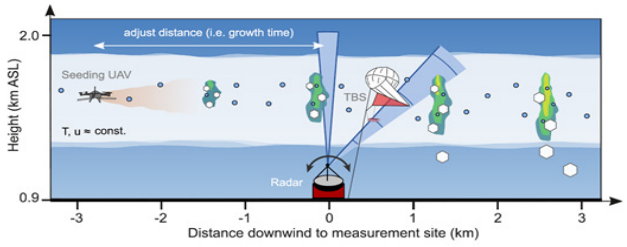


상대적으로 기상조절실험이 활발하지 않았던 유럽에서도 최근(2021-2023년) 인공증설 실험(CloudLab)을 수행한 바 있는데, 이 실험은 산악지역의 층운형 혼합상(mixed phase) 구름에 빙정핵(Ice Nuclei)을 살포하여 기초적인 빙정 성장과정의 과학적 이해에 목적을 두고 있다(Henneberger et al., 2023). CloudLab 캠페인은 스위스 Reiswill 근처 고원지역에서 수행되는 인공증설실험인데, 주로 과냉

“ CloudLab 캠페인은 스위스 고원 지역에서 수행된 층운형 구름 대상의 인공 증설실험 ”

각수적을 다량 함유한 층운형 구름을 대상으로 하였다. 특이한 점은 무인항공기(드론)를 활용하여 구름속에 직접 빙정핵(주로 AgI) 씨뿌리기를 하였으며, 다른 무인항공기와 테더(Thethered) 존데를 활용하여 기상 조건이나 구름 미세물리 특성 등을 직접 관측하였다. 연구자들은 과냉각수적에 AgI 씨뿌리기를 함으로써 빙정을 발생시키고, 이미 존재하는 과냉각수적과의 포화 수증기압 차이에 의한 빙정 성장과정을 정밀하게 관측하였다. 즉, 빙정핵에 의해 빙정이 생성된 이후에는 과냉각수적은 증발하고 증발된 수증기가 과포화상태인 빙정에 침적되면서 빙정이 성장하게 되는 과정을 자연실험실(natural laboratory)에서 확인하는 것이다. 그림 2는 CloudLab 캠페인을 통해 얻고자 하는 빙정핵 시딩과 빙정의 생성 및 성장과정을 수평적인 공간 해상도와 함께 모식도로 제시한 것이다. CloudLab 캠페인은 자연적인 변동을 제거하고 시딩효과를 분명하게 보여주기 위해서 구름이 층운형이고 기상조건이 상대적으로 안정한 상태가 지속적으로 유지되는 조건을 대상으로 하였다.

그림 2. CLOUDLAB 캠페인 개략적인 모식도(드론에서 씨뿌리기된 입자(갈색)는 과냉각수적 포함된 구름으로 확산되어 들어가 빙정설(WBF)에 의해 빙정(하얀색 육각형)이 생성·성장. 구름반사도는 파랑- 초록-노란색 코드에 의해 표현됨. 이러한 빙정의 성장 과정은 테더존데시스템과 연직 스캔 구름레이더(파란색)에 의해 관측. 시딩물질의 확산되어가는 시간을 고려하여 시딩 위치와 관측지점들이 배열되어 있음.) (Ramelli et al., 2024)



Ⅲ. 국내 인공강설 실험의 통합검증

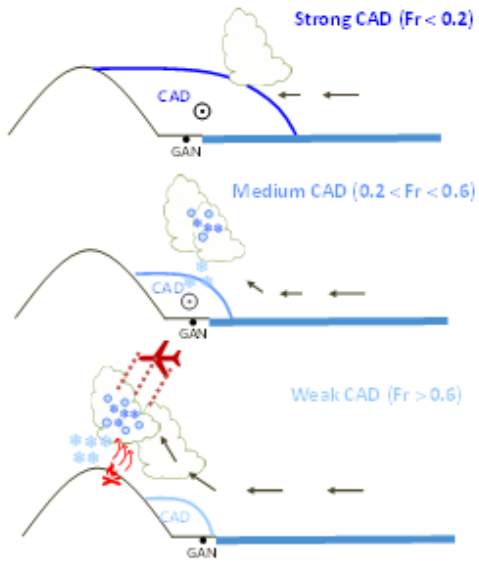
국내에서도 국립기상과학원을 중심으로 산불예방, 가뭄예방, 안개저감 및 미세먼지 저감 등을 목적으로 다양한 지역에서 기상조절실험이 수행되고 있다. 시딩실험 방법도 기상항공기, 지상연소 실험장치, 로켓, 드론 등을 다양하게 활용하여 구름씨뿌리기를 수행하고 있고, 실험 검증을 위하여 최적의 관측망 구성 및 첨단장비 등을 꾸준히 도입하여 체계적인 인공강우(설)실험을 수행하고 있다(기상청, 2022; 2023). 여기에서는 강원영동지역 대관령에서 수행된 인공강설실험의 물

> “ 인공강우 성공을 위해 대상지역의 장기간 대기환경 및 구름 조건 분석이 중요 ”

리화학적 검증 방법 및 주요 결과를 간략하게 소개하고자 한다.

실험 검증에 앞서 우선적으로 살펴봐야 할 것은 실험 조건의 선정이다. 인공강설 실험의 성공 가능성을 높이기 위해서는 실험 대상지역의 장기간 대기환경 및 구름 조건을 사전에 분석하고 실험효과를 극대화시킬 수 있는(seedable) 조건을 파악하는 것이 무엇보다 중요하다. 겨울철 영동지역 강설을 예로 들면 북동풍 계열의 한기가 동해상을 통과하면서 발달한 눈구름이 강설을 초래하게 되는데, 이 과정에서 한기가 산맥으로 접근할 때 산맥저지효과 때문에 장벽바람이 유도되고, 결국 산맥 동쪽산사면에 한기축적(Cold Air Damming, CAD)이 발생하게 된다. 만약 약하게 한기축적이 발생하고 북풍 내지 북동풍 바람이 강한 조건에서는 한기와 함께 유입되는 눈구름이 산사면을 타고 산맥 정상 부근까지 상승하면서 지형성 눈구름으로 잘 발달하여 강설을 초래하게 된다(그림 3). 하지만 한기축적이 강하게 발달하는 조건에서는 오히려 해기차에 의해 생성된 눈구름이 영동 내륙으로 진입하지 못하여 영동 내륙에 강설이 나타나지 않는다. 그리고 중간정도 세기의 한기축적일 경우에는 산맥의 동쪽 산사면 부근에 강설이 발생하는 경향이 있다(김지윤 등, 2023). 이상의 한기축적 강도에 따른 강설의 위치 변화를 나타낸 간략 모식도를 그림 3에 제시하였다. 여기에서 한기축적의 강도는 부력과 관성력의 비(Froude 수, Fr수)를 이용하여 표현할 수 있다. Fr 수는 산맥저지 효과 영향이 미미한 먼바다(해안선에서 100㎞ 떨어진 지점)에서 LDAPS 분석장 자료를 이용하여 계산하였다. Fr 수와 CAD를 비교 분석한 결과, Fr 수가 0.6 이상으로 한기축적이 약한 조건에서 산정상 부근의 지형성 눈구름이 유도되기 때문에 Fr 수가 0.2 이하의 강한 한기축적 조건보다 실험 성공 가능성이 높다고 할 수 있겠다.

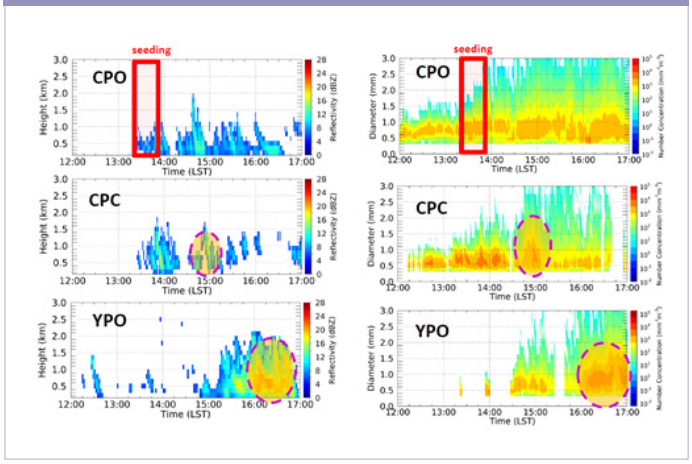
그림 3. 한기축적 강도(강중약)에 따른 눈구름의 내륙 진입여부와 강설의 위치를 보여주는 개략적인 도식도 (Fr 수는 해안선에서 동해상으로 100 km 떨어진 지점에서의 안정도와 운동량을 이용하여 계산)



> “국립기상과학원은 항공기를 이용한 시딩뿐만 아니라 지상연소 실험도 함께 수행 중”

국립기상과학원 기상응용연구부에서는 대관령 지역에서 겨울철 수자원 확보 및 산불 예방을 위해 인공증설실험을 수행하고 있는데, 항공기를 이용한 시딩뿐만 아니라 지상연소 실험도 함께 수행되고 있다. 이 중에서 지상연소 실험결과 일부를 소개하고자 한다. 대관령 주변에는 시딩 지점을 포함하여 지상 6개 관측소가 구성되어 있다. 6개 관측소는 Micro Rain Radar (MRR), Parsivel, 그리고 적설계가 기본적으로 설치되어 있다. 여기에서는 두가지 실험결과를 소개할 예정이다. 구 대관령기상대 지점(CPO) 지점에서 AgI 지상연소실험을 수행하고 있는데, 첫 번째 사례 2020년 2월 26일 시딩 실험 이후 풍하측 4 km 지점(CPC: 현 대관령기상대)에서 Micro Rain Radar (MRR)와 Parsivel을 이용하여 시딩효과를 정량적으로 분석하였고 이를 그림 4에 제시하였다. LDAPS 분석장의 바람 분석결과, 북동풍 계열 바람이 유입되면서 시딩물질이 풍하측으로 천천히 확산되면서 빙정을 생성시켰을 것으로 추정된다. 이동 방향을 따라 한 시간 이후 CPC에서, 약 두 시간 이후에는 YPO(용평)에서 구름 반사도가 순차적으로 증가한 것으로 나타났다(그림 4). 반면에 시딩물질이 이동·확산되지 않은 지점인(JBO: 진부)에서는 시딩에 의한 뚜렷한 변화가 나타나지 않았다. 그림 4에서 빨간색 네모 박스는 시딩기간을 의미하고, CPC와 YPO의 보라색 파선은 시딩에 의해 순차적으로 나타난 구름반사도와 강수입자 크기 증가를 잘 보여주고 있다. 지상 강수량(1h 해상도)의 변화는 CPC 지점에서는 의미있는 수준의 차이를 보이지 않았지만, YPO 지점에서는 약 1cm 적설이 관측되었다. 이는 AgI 시딩 시간이 30분 정도로 짧았기 때문에 구름 및 강수 반응 시간도 비례해서 한 시간 이내에 그치고 강수량 증가도 미미한 수준이었다. 그래서 향후 의미 있는 증설실험 효과를 보여주기

그림 4. CPO, CPC, YPO 지점에서 2020년 2월 26일 MRR 레이더 반사도와 PARSIVEL 입자크기분포의 시계열(진한 빨간 박스는 시딩 시간, 보라색 파선은 시딩 영향이 나타나는 시간대)



> “Ag 농도가 실험 이후 강수에서 높다면, 시딩 효과에 의한 강수임이 증명”

위해서는 실험 조건이 맞는 대기환경과 구름상태에서 시딩 시간을 최대한 증가시키는 게 필요하다.

한편 인공강설 실험의 검증에 있어서 첫 번째 사례와 같은 물리적 비교평가만으로는 시딩을 하지 않았더라도 발생했을 자연강수 가능성에 대한 문제를 완전히 배제할 수 없다. 이러한 자연적으로 발달하는 구름 및 강수 효과 의문을 제거하기 위하여 추가로 설치된 강수자동샘플러(Auto Sampler)를 활용하여 강수성분 분석을 수행하였다. 인공강설실험에서 주로 사용하는 시딩물질인 Ag 농도가 실험 이후 강수성분 분석에서 유의한 수준에서 높게 나타난다면, 이는 자연강수 영향이라기 보다는 시딩 효과에 의한 강수 증가임을 증명하는 것이다. 특히 Ag 성분이 자연 배경농도에서 매우 낮기 때문에(≪ 0.01 μg/L) 실제 실험 결과에서 Ag 성분이 확인된다면 이는 시딩효과라고 말할 수 있다. 하지만 Auto Sampler가 설치된 시기가 2020년 봄 이후 이기에 아직 사례 개수가 많지 않기 때문에, 두 번째 실험 사례로 2021년 3월 6일 실험 사례만을 토의하고자 한다.

그림 5. CPO, YPO 지점에서 2021년 3월 6일 MRR 레이더 반사도, PARSIVEL 입자크기분포, MASC 눈결정 습성의 시계열(진한 빨간 박스는 시딩 기간, 빨간색 파선은 시딩 영향이 나타나는 시간대)

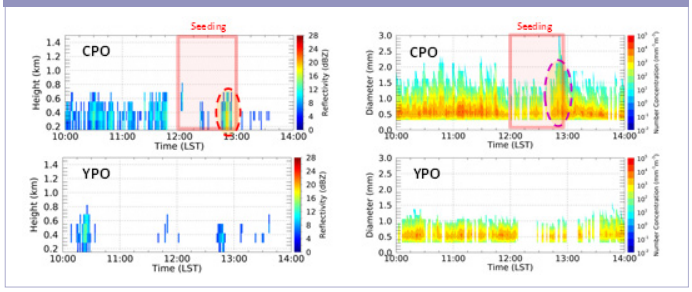


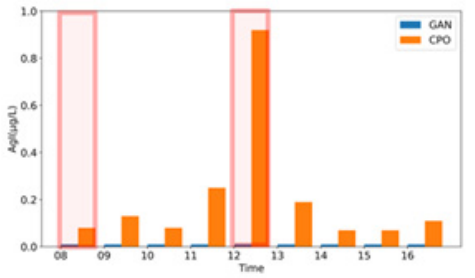
그림 5는 Auto Sampler가 설치된 CPO와 YPO 지점에서 2021년 3월 6일의 MRR과 Parsivel 관측결과를 제시한 것인데, CPO 지점에서 시딩 이후 약 30여분이 지난 후 구름 반사도와 강수입자크기 분포가 증가하고 있는 반면에, YPO 지점에서는 유의미한 변화를 확인할 수 없었다. 실제로 YPO 지점은 강수가 관측되지 않았다. 그리고 Auto Sampler로 1시간 간격으로 채취한 강수 샘플을 분석하여 Ag 성분 변화를 그림 6에 제시하였다. YPO 지점은 강수가 관측되지 않아 비교 지점으로 풍상측의 강릉에서 채취한 강수 성분 분석결과를 함께 제시하였다. 그림 6에서도 잘 나타난 바와 같이 CPO 지점의 Ag 농도(주황색)는 시딩 기간 최대 0.9 μg/L으로 비시딩기간에 뚜렷하게 증가하였고, 풍상측 강릉지점(파란색)과 비교할 때는 약 90

> 선진 실험 경험을 도입한다면, 시딩효과의 정량적증명이 가능할 것

배 가량 높은 수준을 보여 시딩에 의한 강수 조성변화를 잘 보여주고 있다.

이와 같이 시공간적으로 정밀한 관측망과 고해상도 관측기기를 통해서만 정량적으로 유의미한 수준에서 인공강설 효과를 확인할 수 있었다. 하지만 SNOWIE나 CloudLab 캠페인과 같이 구름미세물리(구름방울 크기 및 개수농도) 상세 관측, 구름레이더 수평 및 연직 스캔, 시딩 항공기와 관측항공기의 분리 운영 그리고 드론(무인 항공기)을 활용한 구름 내부 직접 시딩과 같은 선진 실험 경험을 국내에도 도입한다면 시딩효과를 좀 더 정량적으로 증명할 수 있을 것이고, 나아가 실험 목적 달성이 훨씬 용이할 것으로 판단된다. 또한, 인공강설 실험 효과를 극대화하기 위해서는 시딩가능한 대기환경 및 기상조건에서 연속적이고 상시 실험이 가능한 운영체계를 구축하고 장시간 실험이 가능하도록 운영되어야 할 것이다.

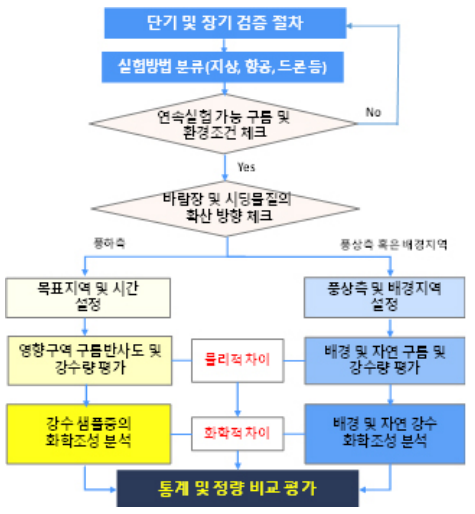
그림 6. 강릉(GAN: 파란색)과 대관령(CPO: 주황색) 지점에서 2022년 3월 6일 인공강설실험 기간 중 측정한 강수 샘플내 Ag 농도 시간 변화(빨간 박스는 시딩기간)



이상의 대관령 주변 산악지역에서 수행된 인공강설 실험결과를 기반으로 물리·화학적 통합 검증절차를 정리하여 그림 7에 제시한다. 우선 지상실험방법을 결정하고, 수평 바람장을 분석하여 시딩물질의 확산방향과 영역을 결정한다.

다음은 시딩 물질이 구름내로 유입되었는지 여부를 파악해야하고, 유입된 구름씨앗에 의한 조밀한 시간간격(고해상도)에서 구름미세물리변화(크기 및 개수 등)의 비교 평가가 필요하다. 이러한 실험 단계별 비교 검증을 위해서는 시딩물질이 확산에 의해 구름 내에 유입되는 과정의 모델링이 필요하고, 레이더나 위성 원격관측 그리고 항공 직접 관측을 통한 시딩에 의한 구름방울 크기나 개수 변화를 관측으로 확인할 수 있어야 할 것이다. 추가적으로 지상에서 우량계

그림 7. 인공강설 실험 수행 이후 실험 결과의 물리화학적 검증 방법(대관령 주변 산악지역 실험 결과를 기반으로 제안)



> “일본에서는 위험 기상의 제어 및 조절 목적의 기상조절 프로젝트가 추진 중”

와 적설계를 활용하여 조밀한 시간규모에서 강수량 변화를 관측해야 한다. 마지막으로는 강우 성분분석을 통해서 화학조성이 검출되고, 농도 역시 뚜렷하게 증가하였는지 체크되어야 할 것이다. 여기서 자연상태에서 배경농도 값이 낮은 Ag와 같은 조성을 비교 성분으로 활용하는 것은 인공강설 실험의 통합검증에 큰 도움이 된다.

Ⅳ. 요약 및 제안

지금까지 산악지역에서 인공강설실험의 물리화학적 검증방법과 주요 결과를 간략하게 소개하였다. 전반적으로 기상조절실험은 구름의 씨앗이라 할 수 있는 응결핵(Cloud Condensation Nuclei) 혹은 빙정핵(Ice Nuclei)을 살포하여 구름방울을 생성 및 성장시켜 강수(비나 눈)에 이르게 하는 것이 가장 기본적인 가설이라고 할 수 있다. 세계 여러 국가에서는 수자원 확보나 산불 예방, 안개 저감, 우박 억제와 같은 전통적인 목적을 위해 인공강우(설) 실험을 운영하고 있다. 그리고 SNOWIE나 CloudLab과 같은 과학적으로 잘 짜여진 관측망, 고해상도 정밀 관측기기들과 구름상세 모델링 등을 통해 인공강설실험의 정량적인 성과가 제시되면서 구름물리 분야 이론도 계속 진보하고 있다.

이러한 기상조절실험 분야의 발전에 발맞춰 최근 일본에서는 위험기상의 제어 및 조절을 목적으로 하는 야심찬 기상조절 프로젝트가 추진 중에 있다. 이 프로젝트의 이름은 ‘Moonshot Goal 8’으로 일본 과학기술부의 전폭적인 지원하에 2050년까지 추진되는 장기 국가 연구사업 중의 하나이다(Takemasa, 2023). 일본은 한국과 마찬가지로 여름철 태풍의 직접적인 피해와 선상(linear) 폭우 그리고 도시지역 폭우로 인한 막대한 인명 및 재산 피해를 겪고 있다. 주요 연구주제는 기후변화에 따른 위험기상의 빈발로 발생하는 각종 피해를 줄이기 위해 사회적 정책 결정을 위한 날씨와 사회의 조절기능 연구, 고립된 대류계의 집중호우나 선상강수 밴드에 의한 집중호우 조절 연구, 안전한 사회 건설을 위한 태풍 및 강풍 조절 연구 등이 있다. 향후 30여년 동안 일본에서 이러한 대규모 프로젝트가 꾸준히 수행된다면 일본에서 완화시킨 기상현상이 인접

“ 전 세계는 다양한 방법으로 기상조절을 수행중 혹은 계획중 ”

국가인 한반도에 부작용(side effect)으로 증폭되면서 재해기상으로 발전할 수도 있다. 또한, 태풍 조절과 관련해서는 태풍의 진로 변경은 인접국가에게 오히려 막대한 피해를 초래할 가능성도 배제할 수 없다. 당연히 국내에서도 이에 대비한 적절한 대응 및 준비가 필요하다.

한편, 지구온난화를 완화시키려는 노력의 일환으로 수행되는 지구공학(geoengineering) 실험도 기상조절실험의 한 종류라고 할 수 있다. 지구공학실험은 다양한 시나리오별로 이론에 기반한 수치모의 실험을 수행하는 데에 머물렀지만, 최근 전지구적 규모의 실험은 아니지만 작은 규모에서 지구공학(geoengineering) 실험이 수행되고 있다. 호주 북동부 해양은 전 세계에서 가장 산호초가 아름다운 곳(Great Barrier Reef)으로 널리 알려져 있어 수많은 관광객들을 불러 모으는 곳이다. 하지만 최근 기후변화에 따른 수온 상승으로 산호초가 하얗게 폐사하는(bleaching) 일이 벌어지고 있다. 이에 과학자들은 해양성 층적운에 구름씨앗(해염)을 다량 살포함으로써 구름방울 크기는 감소하면서 개수농도가 증가하여 태양복사에 대한 구름 반사도를 증가시키는 실험(Marine Cloud Brightening)을 하고 있다(Harrison, 2023). 구름의 반사도 증가는 해수면에 도달하는 태양복사 에너지를 줄임으로써 해수면 온도를 감소시키게 된다. 아직까지 뚜렷한 성과를 제시하고 있지는 않지만, 작은 규모일지라도 최초의 지구공학 테스트베드 역할을 한다고 할 수 있다.

이와 같이 전 세계는 직면한 기후위기 문제를 해결하고, 빈발하고 있는 자연재해를 완화시키기 위하여 다양한 방법으로 기상조절실험을 수행중이거나 계획중에 있다. 하지만 인간이 자연계에 의도적으로 개입하는 것이 인류가 원하는 결과만을 제공하지 않을 수 있다는 점을 명심해야 할 것이다. 자연 상태의 대기에는 제한된 물이 세 가지 상(phase)으로 존재하고, 총 물의 양은 보존된다. 인간의 의도적인 개입으로 어느 지역에 강수를 내리게 할 경우, 원래 강수의 혜택을 누리던 지역은 그러지 못할 가능성이 크다. 또한, 에너지 역시 보존되기 때문에 인공강설 실험을 통한 인위적인 개입이 구름생성 및 발달 과정에서 에너지 수지 변화를 어떻게 변화

> “실험 결과 기반의 구름물리 기초 이해와 실험 성과 평가를 지속해야 할 것”

시키는 지도 엄밀하게 검토될 필요가 있다. 무엇보다도 세계 여러 지역에서 운영 중인 기상조절실험의 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 평가하여 실험의 성공가능성을 지속적으로 향상시켜 나가야 할 것이다.

참고문헌

기상청, 2022: 2023년도 인공강우 시행계획, 34pp.

기상청, 2023: 인공강우 알쓸신잡, 41pp.

김지윤 등, 2024: 강원 영동지역 한기유입과 장벽바람이 강설에 미치는 영향, 한국기상학회 학술대회 초록집.

Bergeron, T., 1935: On the physics of cloud and precipitation. Proc. Fifth Assembly U.G.G.I. Lisbon, Vol. 2, Lisbon, Portugal, Union Geodesique et Geophysique Internationale, 156.178.

Findeisen, W., 1938: Die kolloidmeteorologischen Vorgange bei der Niederschlagsbildung (Colloidal meteorological processes in the formation of precipitation). Meteor. Z., 55, 121.133, https://doi.org/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., DOI:10.1175/BAMS-D-18-0160.1.

French, J. R., and Coauthors, 2018: Precipitation formation from orographic cloud seeding. Proc. Nat. Acad. Sci., 115 (6), 1168.1173, https://doi.org/10.1073/ pnas.1716995115.

Harrison, D., 2023: Marine cloud brightening, could it mitigate coral bleaching on the Great Barrier Reef? EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-17057, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-17057, 2023.

Ramelli, F. et al., 2024: Repurosing weather modification for cloud research showcased by ice crystal growth. Proc. Nat. Acad. Sci., 3(9), https://doi.org/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, https://doi.org/10.1175/2010JCLI3985.1.

Takemasa, M., 2023: Moonshot Goal8 Overview. International Symposium on Theory of Weather Controllability.

Tessendorf, S. A. and Coauthors, 2019: Transformational approach to winter orographic weather modification research: The SNOWIE Project. Bull. Amer. Meteor. Soc., 100, 71.92, https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0152.1.

인공강우 시뮬레이션 연구 및 현업운영 방향

송상근 제주대학교 지구해양과학과 교수 songsk@jejunu.ac.kr

Ⅰ. 인공강우 수치모의 연구의 필요성
Ⅱ. 국내 인공강우 수치모의 연구 현황
Ⅲ. 국외 인공강우 현업운영 체계
Ⅳ. 현업운영을 위한 정책방향 제언

첨단 기상관측 기술과 컴퓨터 기술의 발달로 2000년대 이후 수치모델을 활용한 인공강우 연구의 중요성이 점차 강조되면서, 국내외 학계에서 다양한 성공 사례가 보고되고 있다. 우리나라에서는 2021년 한 해 동안 가뭄에 취약한 충남 보령댐, 산불이 잦은 강원도, 고농도 미세먼지가 자주 발생하는 수도권을 대상으로 인공강우 장기 수치모델링을 수행하여 인공증우 효과를 분석하였다. 세 지역 모두 여름에 인공증우량이 가장 많고 겨울에 가장 적었으며, 시딩 시간을 1시간에서 연속 6시간으로 늘릴수록 인공증우량이 뚜렷하게 증가하는 경향을 확인하였다. 이러한 장기 수치모의 결과를 바탕으로 인공강우 실험시간을 확대하고 이를 현업운영에 적용한다면, 인공증우량의 증가와 함께 가뭄해소 및 수자원 확보에 크게 기여할 것으로 기대된다. 이를 실현하기 위해 국가 차원의 안정적인 예산 확보, 인프라 구축, 전담 인력 배치 등 적극적인 지원과 노력이 필요하다. ■

> “제2차 세계대전 이후 인공강우 기상조절에 관한 많은 연구가 진행”

Ⅰ. 인공강우 수치모의 연구의 필요성

19세기 후반, 인공강우의 이론적 가능성이 처음 제시되면서 구름 속에 대포를 쏘거나 고층운에 빙정핵을 살포하는 인공강우 실험이 여러 차례 시도되었으나, 실질적인 효과를 거두지는 못했다. 이를 기반으로 제2차 세계대전 이후 인공강우 기상조절 기술에 관한 많은 연구가 진행되었다. 1946년, 미국 General Electric(GE) 연구소에서는 최초로 항공기를 이용해 과냉각 수적을 포함한 구름 속에 드라이아이스를 뿌려 눈을 내리게 함으로써 인공강우 실험에 성공하였다. 이를 계기로 1950~1960년대는 물론 이후에도 세계 여러 지역에서 인공강우 실험이 활발히 이루어졌으며, 현재 미국을 비롯한 여러 나라에서 이를 현업화 및 실용화하여 수자원 확보와 가뭄 해소에 효과를 보고 있다.

우리나라에서는 1963년에 처음으로 지상연소실험과 드라이아이스를 이용한 항공실험을 시도하였으나 실패하였으며, 국가 예산 지원 부족 등 여러 이유로 약 30년 동안 인공강우 실험이 중단되었다. 이후 1994~1995년 2년간 지속된 극심한 가뭄을 해결하기 위한 방안으로 다시 인공강우 연구가 시작되었으며, 여러 차례 어려운 시기를 극복하며 현재까지 연구가 지속되고 있다. 그러나 구름물리 관측의 어려움과 장비 부족 등으로 인해 여전히 인공강우 실험의 효과를 명확하게 파악하는 데 한계가 있다. 특히, 강수의 형성과 발달 과정에서 나타나는 미세물리 과정의 변화를 정확히 해석하는 데 많은 어려움이 따른다. 이러한 한계를 극복하고 인공강우 실험 설계를 위한 최적의 조건과 장소를 선정하여 인공증우 효과를 정량화하기 위해서는 다양한 수치예측모델을 활용한 인공강우 기술개발 연구가 매우 중요하며, 그 필요성이 지속적으로 강조되고 있다. 특히, 인공강우 수치모델링은 실제 관측으로는 파악하기 어려운 고해상도의 시·공간적 정보를 확보할 수 있다는 장점이 있다.

전 세계적으로 각국은 물 부족 해결, 가뭄 해소, 안개 소산, 산불 방지 등 다양한 목적을 위해 인공강우 기상조절 연구를 꾸준히 진행해 왔다. 2000년대 이후 첨단 기상관측 기술과 컴퓨터 기술의 발달로 인해 수치모델링을 활용한 인공강우 연구가 점점 활발히 이루어졌으며, 국내외 학계에서도 다양한 인공강우 수치모의(시뮬

“ 우리나라는 국가 차원에서 다양한 목적을 위해 항공 및 지상 실험과 수치모델링 연구를 수행 중 ”

레이션) 연구가 폭넓게 수행되고 있다. 그러나 시딩 물질(빙정핵, 구름 응결핵)의 크기 분포(size distribution)에 대한 정량적 이해가 부족하다는 점은 여전히 해결해야 할 과제로 남아 있다. 이는 구름 미세물리 과정의 변화를 정확히 해석하는 데 주요 제한 요인으로 작용하고 있다. 따라서 향후에는 고해상도 수치모델에 정교한 미세물리 과정을 적용하여 보다 정확한 인공증우량을 산출하고, 그 효과를 체계적으로 분석할 수 있는 수치모델링 시스템이 필요하다.

II. 국내 인공강우 수치모의 연구 현황

우리나라에서는 국가적 차원에서 다양한 목적을 위해 인공강우 실험 지역을 선정하여 항공 및 지상 실험과 수치모델링 연구를 활발히 수행하고 있다. 수도권에서는 미세먼지 저감과 안개소산을 목표로, 충청남도 보령댐 지역에서는 가뭄 해소 및 수자원 확보를 위해, 강원도 지역에서는 산불 예방을 목적으로 연구가 진행되고 있다(https://blog.naver.com/kma_131/222572996128).

인공강우의 수치모의 관련 연구는 과거부터 국립기상과학원을 중심으로 연구기관 및 관련 대학 간의 지속적인 협력을 통해 발전해 왔다. 2000년대 중반, 국립기상과학원은 미국 국립대기과학연구소(NCAR)와 협력하여 Clark-Hall 수치모델을 국내 환경에 맞게 적용하고, 구름과 강우 생성 과정을 모의하여 시·공간적 강우 분포를 예측하는 연구를 진행하였다(국립기상연구소, 2007). 이후, 강수 발달의 충돌-병합 과정을 수치모의할 수 있는 미세구름조절모델(Microscale Cloud Modification v1.0)을 개발하며, 독자적인 인공강우 수치모델 구축을 위해 많은 노력을 기울여 왔다(장기호 등, 2008).

2013년 이후, 국립기상과학원은 기상모델 내 Morrison 구름미세물리 방안을 수정하여 시딩 물질(AgI, $CaCl_2$, NaCl) 입자의 살포 실험을 통한 인공증우 모듈을 개발하고, 이를 실제 관측 사례에 적용하여 다양한 수치모의 연구를 진행해왔다. 또한 국내 여러 대학과의 공동연구를 통해 가뭄 해소, 미세먼지 저감, 산불 예방 등

> 최근 인공강우 장기 시나리오를 수치모의한 결과가 도출되었음

다양한 목적에 맞춘 단기 및 장기 시나리오를 바탕으로 인공강우 효과를 정량적으로 분석하는 연구를 수행해 왔다(국립기상과학원, 2016; 2022; 2023; 2024). 이 외에도 고농도 미세먼지 현상이 빈번해짐에 따라 미세먼지 농도 저감을 위한 인공강우 지상 및 항공 실험이 활발히 이루어졌으며, 일부 연구에서는 수치모델을 활용하여 성공적인 결과를 도출한 사례도 있다(임윤규 등, 2022). 그러나 여전히 수치모델의 불확실성과 습성침적 과정 모의에 따른 한계가 존재하여, 보다 정교한 수치모의 연구가 요구된다.

최근, 국립기상과학원과 유관 대학이 공동으로 수행한 연구에서는 국가가 선정한 여러 실험 지역을 대상으로 인공강우 장기 시나리오를 수치모의한 결과가 도출되었다. 이 중 1시간 및 6시간 연속 시딩 실험을 통해 인공증우량을 정량적으로 산출하고, 이를 비교·분석한 결과를 간략히 소개하고자 한다. 이러한 연구는 인공강우 기술의 실용화와 현업운영 및 정책적 활용 가능성을 높이는 데 중요한 과학적 근거를 제공할 것으로 기대된다.

1. 1시간 시딩을 통한 인공강우 수치모의

국가 차원에서 가뭄 해소 및 수자원 확보를 위해 선정된 실험 지역인 충청남도 보령댐(BRD) 지역은 2000년 이후 심각한 가뭄이 빈번하게 발생해 온 지역이다. 2021년 한 해 동안 BRD 지역을 대상으로 시딩 물질인 $CaCl_2$를 1시간 동안 살포하여 인공강우 수치모의를 수행하였다. 그림 1은 BRD 지역에서 구름 시딩($CaCl_2$, AgI)을 고려한 실험(SEED)과 고려하지 않은 실험(UNSD) 간 강수량 차이(SEED-UNSD: 인공증우량)의 월평균과 인공증우율((SEED-UNSD)/

그림 1. 보령댐(BRD) 지역의 $CaCl_2$, AgI 물질에 대한 SEED와 UNSD 강수량 차이(SEED-UNSD)의 월평균 및 인공증우율(%) 변화

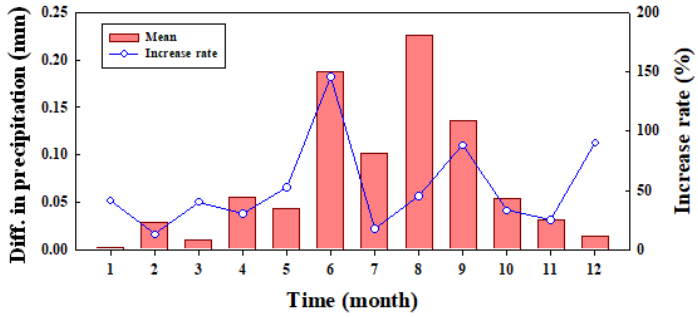
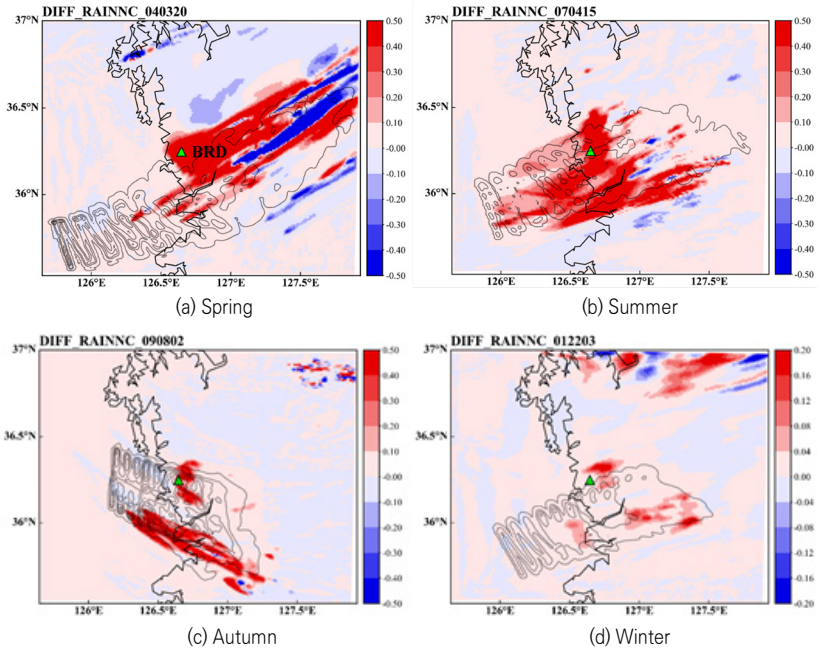


그림 2. 보령댐(BRD) 지역의 $CaCl_2$, AgI 물질에 대한 시딩 종료 후 180분 동안의 누적 인공증우량 공간분포



(a) Spring (b) Summer (c) Autumn (d) Winter

UNSD×100)의 변화를 나타낸다. 이 지역의 인공증우량은 여름철인 8월에 평균 약 0.23mm(최대 4.70mm)로 가장 많았으며, 겨울철인 1월에는 평균 약 0.003mm (최대 0.04mm)로 가장 적었다(그림 1, 표 1). 한편, UNSD 대비 인공증우율(%)은 6월에 가장 높게 나타나 평균 약 146%였으며, 2월에 가장 낮게 나타나 평균 약 13%를 기록하였다. 8월의 인공증우량이 6월보다 많았음에도 불구하고, 6월의 UNSD 강수량이 상대적으로 매우 적었기 때문에 인공증우율은 오히려 6월에 더 크게 산출된 것으로 판단된다.

표 1. 보령댐(BRD) 지역의 1시간 시딩($CaCl_2$, AgI)에 따른 인공증우량(mm) 평균 및 최대값의 월변화

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Mean	0.003	0.029	0.011	0.056	0.044	0.187	0.101	0.226	0.136	0.054	0.032	0.015
	(41.5)*	(13.3)	(40.5)	(30.7)	(52.7)	(146)	(17.8)	(45.4)	(88.4)	(33.3)	(25.4)	(90.3)
Maximum	0.044	0.666	0.210	1.058	0.845	3.822	2.221	4.699	2.443	0.996	0.582	0.283

* Mean increase rate (%).

그림 2는 BRD 지역에서 시딩 물질($CaCl_2$ 및 AgI) 살포에 따른 인공증우 효과를 보다 구체적으로 분석하기

> “보령댐 8월, 기상청 7월, 도암댐 8월에 평균 인공증우량이 가장 많았다.”

위해 계절별로 저기압 또는 전선이 통과하는 대표 사례를 선정하고, 시딩 종료 후 180분(3시간) 동안의 누적 인공증우량의 공간분포를 시각화한 결과이다. 누적 인공증우량은 봄철에 약 0.45mm로 가장 크게 나타났으며, 여름(약 0.31mm), 가을(약 0.15mm), 겨울(약 0.02mm) 순으로 확인되었다. 이 외에도 NaCl 물질에 따른 월평균 인공증우량은 $CaCl_2$와 유사한 경향을 보였으나, 인공증우 효과는 상대적으로 다소 낮게 나타났다(그림 제외).

2. 6시간 연속 시딩을 통한 인공강우 수치모의

대부분의 인공강우 수치모의 연구는 짧은 시간(1시간) 동안의 시딩을 기반으로 수행되기 때문에, 대기확산에 따른 인공증우 효과와 영향 범위를 상세히 분석하는 데 한계가 있다(Hill, 1979). 이러한 한계를 극복하고 인공증우 효과를 보다 명확히 파악하기 위해, 2021년 한 해 동안 가뭄에 취약한 충청남도 보령댐(BRD) 지역, 고농도 미세먼지가 자주 발생하는 수도권(KMA), 그리고 산불이 빈번한 강원도 도암댐(DAD) 지역을 대상으로 6시간 연속 시딩에 따른 인공강우 수치모의를 수행하였다.

그림 3. 보령댐(BRD), 기상청(KMA), 도암댐(DAD) 지역의 $CaCl_2$, AgI 물질에 대한 SEED와 UNSD 강수량 차이(SEED-UNSD)의 월평균 및 인공증우율(%) 변화

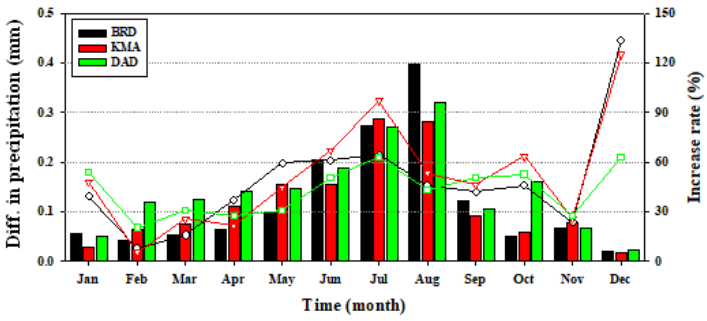


그림 3은 2021년 1년간 BRD, KMA, DAD 지역을 대상으로 6시간 연속 시딩을 적용한 평균 인공증우량과 인공증우율의 월변화를 나타낸다. BRD 지역에서는 평균 인공증우량이 8월에 약 0.40mm(최대 8.42mm)로 가장 많았고, 12월에 약 0.02mm(최대 0.34mm)로 가장 적었다. BRD 지역의 UNSD 대비 인공증우율은 2월에 평균 약 7.8%로 가장 낮았으며, 12월에 평균 약 134%로 가장 높게 나타났다.

“ 계절별 누적 인공증우량 분포는 대부분 시딩물질의 이동 경로를 따름 ”

KMA 지역의 평균 인공증우량은 7월에 약 0.29mm(최대 6.23mm)로 가장 많았고, 12월에 약 0.02mm(최대 0.26mm)로 가장 적었다. 이 지역의 UNSD 대비 인공증우율은 2월에 평균 약 5.5%로 가장 낮았고, 12월에 평균 약 125%로 가장 높게 추정되었다. 마지막으로, DAD 지역에서는 BRD와 마찬가지로 8월에 약 0.32mm(최대 5.91mm)로 가장 많았고, 12월에 약 0.02mm(최대 0.28mm)로 가장 적었다. 또한 DAD 지역의 UNSD 대비 인공증우율은 2월에 평균 약 20.4%로 가장 낮았고, 7월에 평균 약 63.1%로 가장 높은 수치를 보였다(그림 3, 표 2).

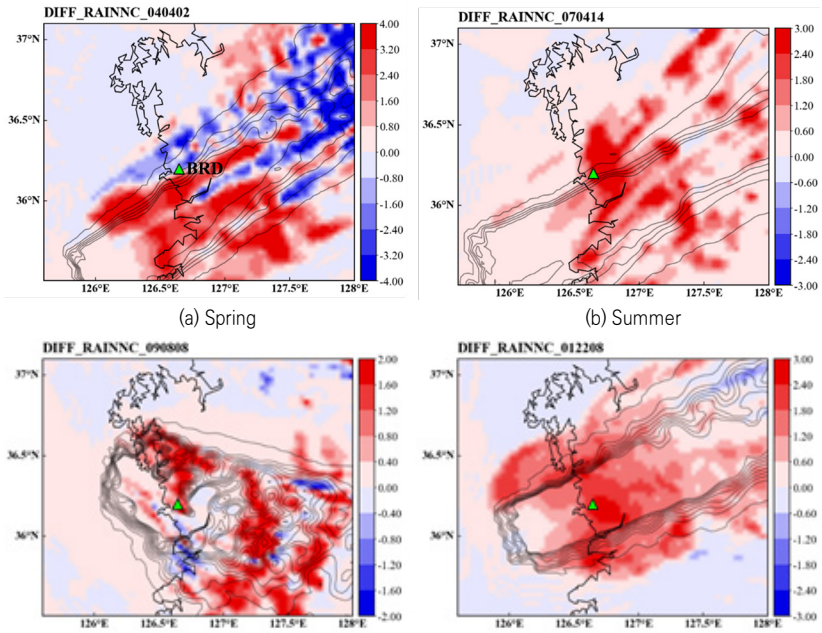
6시간 연속 시딩에 따른 인공증우 효과를 보다 상세히 분석하기 위해 세 지역(BRD, KMA, DAD)의 계절별 인공증우 효과가 뚜렷하게 나타난 대표 사례들을 선정하여 인공증우량의 공간분포를 파악하였다. 공간분포는 사례별로 시딩물질 살포 시작 시간부터 시딩 종료 후 300분(총 11시간) 동안의 누적 인공증우량을 나타낸 것이다. 전반적으로, BRD, KMA, DAD 지역의 계절별 누적 인공증우량의 분포는 대부분 시딩 물질의 이동 경로를 따라 인공증우가 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 특히 세 지역의 중심부에서 가장 뚜렷한 효과가 나타났다(그림 4~6). BRD 지역의 계절별 누적 인공증우량은 봄철에 약 2.30mm로 가장 많았으며, 다음으로 겨울(약 1.30mm), 여름(약 1.22mm), 가을(약 0.97mm) 순으로 나타났다(그림 4). KMA와 DAD 지역에서의 계절별 누적 인공증우량을 살펴 보면(그림 5, 6), KMA 영역에서는 여름(약 2.09mm), 봄(약 1.88mm), 가을(약 1.26mm), 겨울(약

표 2. 보령댐(BRD), 기상청(KMA), 도암댐(DAD) 지역의 6시간 연속 시딩($CaCl_2$, AgI)에 따른 인공증우량(mm) 평균 및 최대값의 월변화

Area		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
BRD	Mean	0.06 (39.5)	0.04 (7.8)	0.05 (16.0)	0.06 (37.3)	0.10 (59.5)	0.21 (61.1)	0.27 (64.4)	0.40 (45.8)	0.12 (42.1)	0.05 (46.0)	0.07 (23.7)	0.02 (134)
	Maximum	0.62	0.93	0.75	1.02	1.45	4.22	5.81	8.42	2.39	0.91	1.52	0.34
KMA	Mean	0.03 (48.0)	0.06 (5.5)	0.07 (25.6)	0.11 (21.6)	0.16 (44.8)	0.16 (66.8)	0.29 (96.9)	0.28 (53.5)	0.09 (46.5)	0.06 (63.5)	0.08 (25.8)	0.02 (125)
	Maximum	0.39	0.86	0.80	1.55	2.70	3.19	6.23	5.88	1.61	1.06	1.96	0.26
DAD	Mean	0.05 (54.2)	0.12 (20.4)	0.13 (31.1)	0.14 (27.5)	0.15 (30.7)	0.19 (50.5)	0.27 (63.1)	0.32 (43.3)	0.10 (50.8)	0.16 (52.6)	0.67 (27.7)	0.02 (62.9)
	Maximum	0.59	2.59	1.69	2.47	2.56	3.66	5.78	5.91	1.62	2.54	1.01	0.28

> 지역별로 계절에 따라 인공증우 효과의 차이가 명확히 드러남

그림 4. 보령댐(BRD) 지역의 계절별 $CaCl_2$, AgI 물질에 대한 살포 시작 시간부터 시딩 종료 후 300분(총 11시간) 동안의 누적 인공증우량 공간분포



(a) Spring (b) Summer (c) Autumn (d) Winter

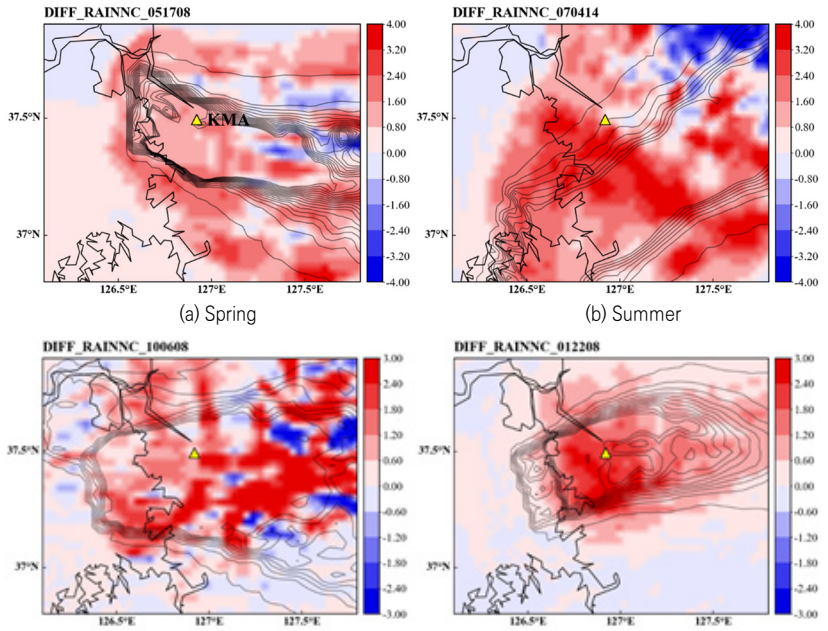
1.21mm) 순으로 나타났고, DAD 영역에서는 여름(약 1.95mm), 봄(약 1.02mm), 가을(약 0.76mm), 겨울(약 0.53mm) 순으로 나타났다. 이를 통해 지역별로 계절에 따라 인공증우 효과의 차이가 명확히 드러남을 확인할 수 있었다. 이와 같은 연구 결과는 지역별 특성과 계절적 요인을 고려한 장시간 연속 시딩 기술의 실용화를 통해, 가뭄 해소, 미세먼지 저감, 산불 예방 등 다양한 정책적 목적에 부합하는 인공강우 기술의 효과적 활용을 뒷받침하는 과학적 근거를 제공할 것으로 기대된다.

3. 1시간 및 6시간 연속 시딩에 따른 인공증우량 비교

2021년 한 해 동안 충남 보령댐(BRD) 지역을 대상으로 수행한 1시간 시딩과 6시간 연속 시딩의 인공강우 수치모의 결과를 비교하였다. 각각 시딩 종료 후 3시간(180분) 동안 누적된 인공증우량의 월별 및 계절별 평균값 변화를 분석하였다(표 3). 1시간 시딩 실험에서 평균 인공증우량이 1월에 약 0.003mm로 가장 적게 나타

“ 시딩 시간이 길수록 수치모의 결과에서 뚜렷한 인공증우 효과가 나타나는 것을 확인 ”

그림 5. 기상청(KMA) 지역의 계절별 $CaCl_2$, AgI 물질에 대한 살포 시작 시간부터 시딩 종료 후 300분(총 11시간) 동안의 누적 인공증우량 공간분포

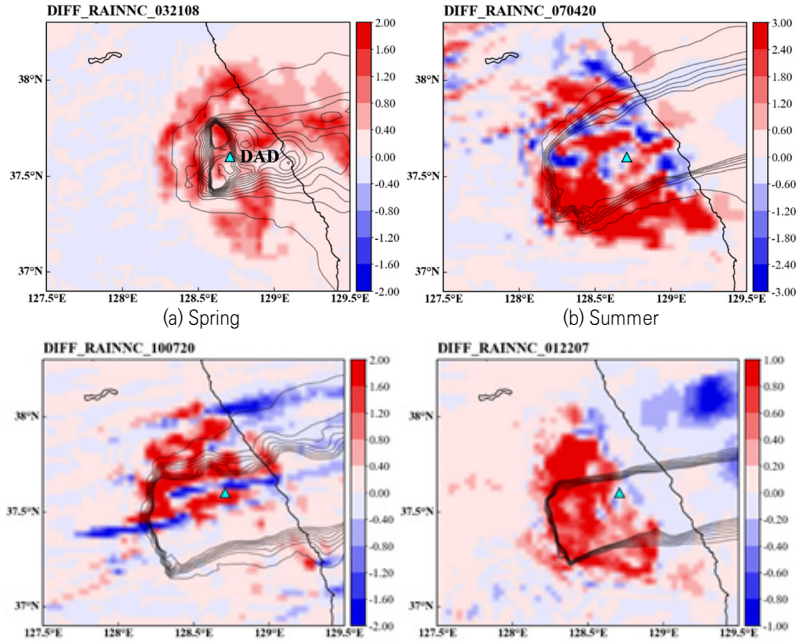


났으며, 8월에 약 0.23mm로 가장 많았다. 한편, 6시간 연속 시딩에서는 12월에 약 0.02mm로 가장 적었고, 8월에 약 0.36mm로 가장 많았다. 따라서 6시간 연속 시딩의 결과는 1시간 시딩에 비해 최소 1.3배(4월)에서 최대 24.3배(1월) 더 큰 인공증우 효과를 나타냈다(9월, 10월 제외). 계절별 비교 분석에서도 월별 패턴과 유사하게 6시간 연속 시딩은 1시간 시딩에 비해 겨울에는 3.2배, 봄과 여름에는 각각 2.3배, 1.7배, 가을에는 1.1배 더 높은 인공증우량을 기록하였다(그림 제외). 따라서 1시간 시딩을 수행한 결과에 비해 6시간 연속 시딩의 수치모의 결과에서 더욱 뚜렷한 인공증우 효과가 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 연구 결과는 인공강우 기술의 실용화와 현업운영에 중요한 시사점을 제공한다. 특히, 장시간 연속 시딩을 통해 더 큰 인공증우 효과를 얻을 수 있다는 점은 가뭄 해소, 수자원 부족 해결, 미세먼지 저감 등 다양한 문제에 효과적인 대응 방

“ 인공강우 기술의 실용화 위한 연구와 정책지원 강화 필요 ”

그림 6. 도암댐(DAD) 지역의 계절별 $CaCl_2$, AgI 물질에 대한 살포 시작 시간부터 시딩 종료 후 300분(총 11시간) 동안의 누적 인공증우량 공간분포



(a) Spring (b) Summer (c) Autumn (d) Winter

안으로 평가되며, 향후 국가 및 지역 차원의 수자원 관리 전략에 적극적으로 활용될 수 있다. 또한 6시간 연속 시딩 기술은 정책적으로 기후변화 대응, 환경 재해 예방, 그리고 지역 맞춤형 수자원 관리에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다. 따라서 이러한 연구 결과를 바탕으로 인공강우 기술의 실용화를 위한 연구와 정책적 지원을 강화할 필요가 있다.

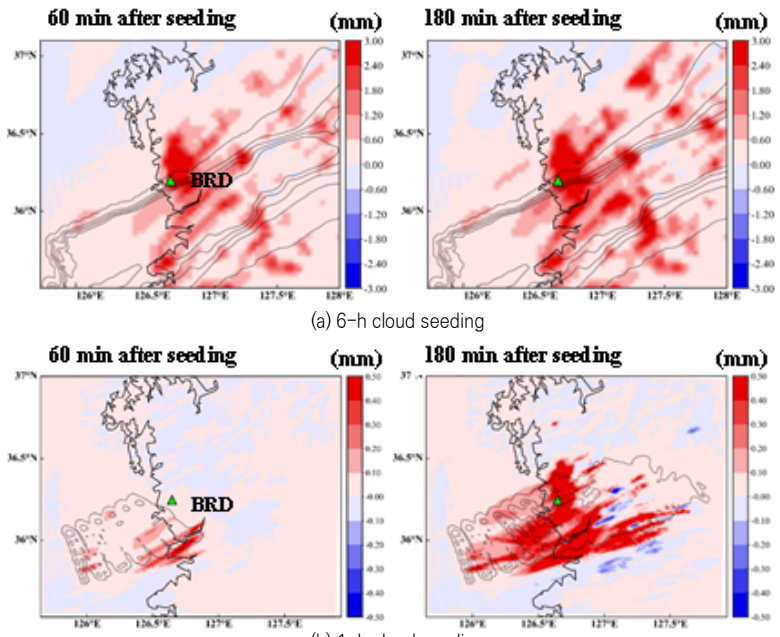
1시간 시딩과 6시간 연속 시딩에 따른 인공증우의 공간분포를 분석하기 위해 보령댐(BRD) 지역에서 계절별 인공증우 효과가 뚜렷하게 나타나는 대표 사례를 선

표 3. 보령댐(BRD) 지역의 1시간 및 6시간 연속 시딩에 따른 인공증우량(3시간 누적)의 월변화

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1h seeding	0.003	0.03	0.01	0.06	0.04	0.19	0.10	0.23	0.14	0.05	0.03	0.02
6h seeding	0.07	0.06	0.06	0.07	0.10	0.23	0.25	0.36	0.12	0.04	0.07	0.02
6h/1h ratio	24.3	2.0	5.4	1.3	2.3	1.3	2.5	1.6	0.9	0.8	2.1	1.4

“ 장시간 연속 시딩이 넓은 지역에 걸쳐 인공증우 효과를 확산시킬 수 있다. ”

그림 7. 보령댐(BRD) 지역의 여름철 대표 사례(2021년 7월 3일)에 대한 (a) 6시간 연속 시딩과 (b) 1시간 시딩 실험의 공간분포



정하여 수치모델링을 수행하였다(그림 7, 표 4). 이 중 인공증우 효과가 가장 뚜렷하게 나타난 여름철 사례(2021년 7월 3일)를 대상으로 6시간 연속 시딩과 1시간 시딩을 적용한 인공증우량의 분포를 비교하였다(그림 7). 6시간 연속 시딩의 경우, 시딩 종료 후 60분이 경과한 시점에 인공증우 효과가 BRD를 중심으로 내륙까지 넓게 확산되는 양상을 보였으나, 1시간 시딩의 경우에는 BRD 인근 일부 해안가 주변에만 인공증우 효과가 국한되었다. 또한 시딩 종료 후 180분이 경과한 시점의 인공증우 공간 분포에서도 6시간 연속 시딩이 1시간 시딩보다 더 넓은 범위에서 인공증우 효과를 나타냈다. 이는 6시간 연속 시딩이 1시간 시딩에 비해 더 큰 효과를 가지며, 넓은 지역에 걸쳐 인공증우 효과를 확산시킬 수 있음을 보여준다.

표 4는 BRD 지역에서 계절별 대표 사례를 대상으로 수행한 6시간 연속 시딩과 1시간 시딩에 따른 공간 평균 인공증우량을 나타낸다. 봄철의 경우, 6시간 연속

> “연속 시딩이 가능하도록 체계적인 수치모의 연구를 지속 수행해야함”

시딩에서 시딩 종료 후 60분 및 180분 누적 인공증우량은 각각 평균 1.95mm와 1.99mm로 산출되었다. 반면, 1시간 시딩에서는 6시간 연속 시딩에 비해 약 4배에서 최대 65배 낮은 인공증우 효과가 나타났다.

여름철 사례에서는 6시간 연속 시딩의 결과로 시딩 종료 후 60분 및 180분 누적 인공증우량이 각각 평균 1.27mm와 1.58mm로 나타나, 1시간 시딩 대비 약 5배에서 최대 21배 높은 효과를 보였다. 가을철에는 6시간 연속 시딩으로 인한 누적 인공증우량이 각각 평균 0.97mm와 1.03mm로 산출되었으며, 이는 1시간 시딩에 비해 약 7배에서 최대 11배 높은 인공증우 효과를 나타냈다. 겨울철의 경우, 6시간 연속 시딩에 의한 누적 인공증우량이 각각 평균 1.17mm와 1.36mm로, 1시간 시딩 대비 최소 65배 이상의 인공증우 효과가 추정되었다.

이와 같은 수치모의 결과는 실제 인공강우 실험에서 연속 구름시딩 기법을 도입할 경우, 보다 효과적인 인공증우 효과를 기대할 수 있음을 시사한다. 따라서 연속 시딩이 가능하도록 대기환경 및 기상조건을 고려한 체계적인 수치모의 연구를 지속적으로 수행해야 하며, 이를 뒷받침할 수 있는 항공 실험 체계로의 전환이 필요하다. 이를 위해 상시 실험이 가능한 현업 기반의 운영 체계를 구축하여 효과적인 인공증우 기술 개발과 실용화를 추진해야 할 것이다.

표 4. 보령댐(BRD) 지역의 6시간 연속 및 1시간 시딩에 의한 계절별 인공증우량(60분 및 180분)과 인공증우율(%)의 비교

		60 min after seeding		180 min after seeding	
		Mean (mm)	Increase rate (%)	Mean (mm)	Increase rate (%)
Spring	6h seeding	5.77/7.72/1.95[a]	33.9	7.02/9.01/1.99	28.4
	1h seeding	2.00/2.04/0.03	1.6	3.14/3.59/0.45	14.4
Summer	6h seeding	0.44/1.71/1.27	287	0.56/2.14/1.58	283
	1h seeding	0.02/0.08/0.06	344	0.08/0.39/0.31	394
Autumn	6h seeding	0.50/1.48/0.97	195	0.52/1.55/1.03	200
	1h seeding	0.09/0.10/0.09	10.2	0.15/0.29/0.15	99.3
Winter	6h seeding	1.24/2.41/1.17	94.2	1.27/2.63/1.36	107
	1h seeding	0.002/0.004/0.001	44.1	0.006/0.03/0.02	320

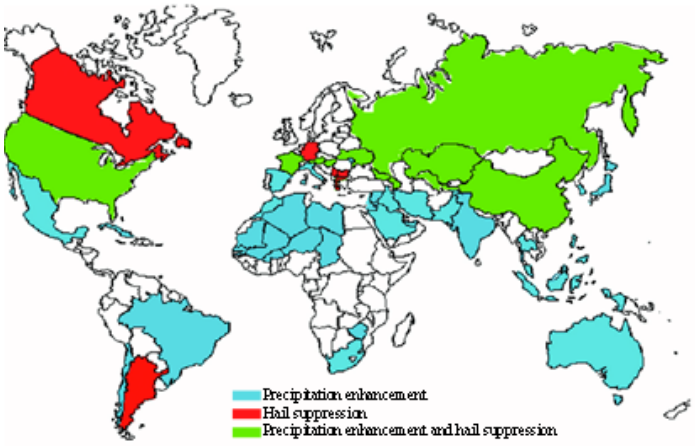
* UNSD/SEED/Difference (SEED−UNSD).

“ 2020년 기준 국내 인공강우 기술은 미국의 80% 수준 ”

Ⅲ. 국외 인공강우 현업운영 체계

우리나라의 인공강우 연구는 그동안 산학관연 협력을 통해 상당한 발전을 이루었으며, 2020년 기준으로 국내 인공강우 기술은 기상 선진국인 미국의 80% 수준으로 평가되고 있다(https://www.hankyung.com/article/202405057456Y). 2022년에는 대형 구름물리실험챔버가 국내기술로 제작되어 운영되기 시작하면서 기술 수준이 한층 더 향상되었으며, 특히 올해 6월 국립기상과학원은 태국 인공강우농업항공국(DRRAA)과 업무협약을 체결하였다. 이를 통해 인공강우 현업운영 및 기상조절 기술협력, 전문가 교류, 경험-지식-노하우 공유 등을 통해 인공강우 기술 발전을 촉진하고 관련 사회문제 해결에 기여하고자 하였다. 이와 같은 많은 노력에도 불구하고, 우리나라는 여전히 인공강우 실험 및 검증에 필요한 기술력을 축적하는 실증연구 단계에 머물고 있다. 이와 달리, 국제적으로는 약 37개국에서 150여 개 이상의 인공강우 프로젝트가 진행되고 있다. 특히, 미국, 중국, 태국, 아랍에미리트, 러시아 등은 각국의 실질적인 필요(우박 억제, 수자원 확보, 산불 예방, 미세먼지 저감 등)에 따라 인공강우 기술을 실제 현업에서 적극적으로 활용하며 상당한 성과를 이루고 있다. 그림 8은 다양한 목적에 따라 인공강우 기상조절 실험과 프로젝트를 수행하고 있는 세계 여러 국가의 분포를 나타낸다. 이 중 미국, 태국, 중국 등이 수행하고 있는 인공강우 현업운영 체계를 소개하고자 한다.

그림 8. 강우량 증가(파란색), 우박 억제(빨간색), 강우량 증가 및 우박 억제(녹색) 프로젝트를 수행하고 있는 국가의 분포(Al Mandous et al., 2006)



“ 미국 일부 지역은 현업운영 체계를 갖춰 실질적으로 인공강우 실험을 수행 중 ”

1. 미국의 현업운영 체계

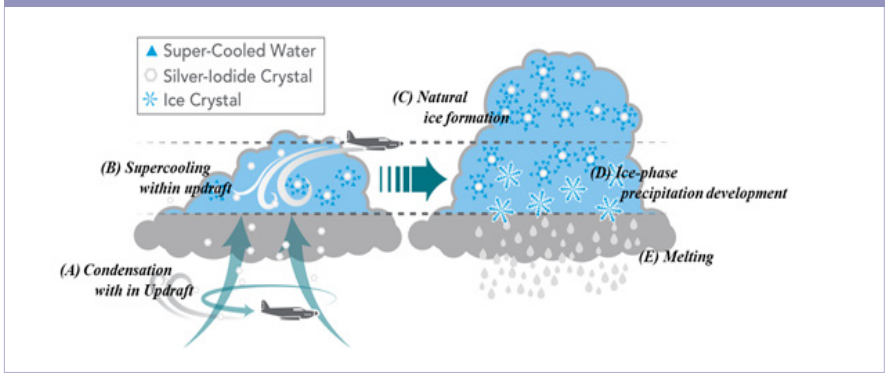
미국에서는 North Dakota, Wyoming, California, Texas 등 약 10개 주에서 다양한 목적(우박 억제, 강수 및 강설 증가)에 따라 인공강우 실험을 진행하고 있으며, 일부 지역에서는 현업운영 체계를 갖추어 실질적으로 수행하고 있다. 이 중 North Dakota주에서는 1977년부터 현재까지 North Dakota 구름 조절 프로젝트(NDCMP)를 통해 매년 6월 1일부터 8월 31일까지 항공기를 이용한 인공강우 실험을 현업으로 실시하고 있다. 해당 프로젝트는 곡물 수확 증대를 위한 우박 억제 및 강수량 증가를 목적으로 한 인공강우 실험으로, 주 7일 하루 24시간 운영되고 있다. NDCMP는 주 정부의 대기자원부에서 총괄하며, 민간 기상조절 회사인 WMI가 항공 실험과 항공기 유지관리를 담당하고 있다. 또한 North Dakota 대학과 협력하여 기상관측 장비를 직접 개발하거나 기상조절 전문인력을 양성하기도 한다.

North Dakota주에서는 인공강우 현업을 다음과 같은 순서로 수행하고 있다. 먼저, 현업 기상예측모델 및 연구용 예측모델 자료를 실시간으로 수집하고, 지역 종관 관측 및 위성정보를 활용하여 미래의 기상 상황을 분석한다. 이후, 분석 결과가 인공강우 실험에 적합한 기상 조건이라고 판단되면, 실험 관련자들이 일일 예보와 분석 브리핑에 참석하여 실험 실시 여부를 최종 결정한다. 실험이 확정되면 항공기를 이용해 인공강우 실험을 수행한다. 마지막으로, 항공기를 통해 시딩 물질을 살포한 후 풍하측 지역에서 레이더 반사도와 강수량 증가 여부를 분석하여 인공증우 효과를 평가한다(기상청, 2022).

그림 9는 미국의 현업운영 프로젝트인 NDCMP의 전반적인 개요를 보여준다. NDCMP 실험에서는 AgI와 드라이아이스를 활용해, 우박 생성 가능성이 있는 층적운의 상승기류 지역에서 구름의 운저 또는 운정에 시딩 물질을 살포한다. 이 실험의 주요 목표는 구름 내 과냉각된 물방울을 상층에서 얼음 결정으로 더 빠르게 전환시키는 것이다. 이렇게 생성된 얼음 결정은 구름 하층으로 내려오며 녹는 과정에서 우박의 크기와 양을 감소시키는 역할을 한다. 관련 연구(Tuftedal et al., 2022)

“ 태국은 습기조절, 미세먼지 저감을 위해 인공강우 실험을 꾸준히 수행해 오고 있음 ”

그림 9. North Dakota 주 현업운영 구름 조절 프로젝트(NDCMP) 실험의 전반적인 개요(North Dakota Department of Water Resources)



에 따르면, NDCMP 실험이 진행된 기간(1977~2018년) 동안 여름철 평균 강수량은 17.63cm로 관측되었으며, 이는 실험 이전 기간(1950~1975년)의 평균 강수량 16.40cm에 비해 약 7% 증가한 수치로 확인되었다.

2. 태국의 현업운영 체계

미국뿐만 아니라, 우기와 건기가 반복되는 기후로 농작물 피해가 빈번하게 발생하는 태국 또한 오랜 기간 인공강우를 현업으로 운영해 온 국가 중 하나다. 태국은 건조한 날씨를 완화하고 미세먼지를 저감하기 위해 인공강우농업항공국(DRRAA)에서 1969년부터 현재까지 인공강우 실험을 꾸준히 수행하고 있다. DRRAA는 태국 내 여러 지역(나콘사완, 수라타니, 콘깬 등)에 위치한 7개의 인공강우 센터를 하루 최대 22편의 인공강우 항공편을 운행할 수 있으며, 모든 비행 정보는 DRRAA 웹페이지에 공개적으로 게시된다. 태국 DRRAA의 인공강우 실험은 다음과 같은 절차로 진행된다. 첫 번째 단계에서는 매일 아침 수치모델 및 관측자료(위성 영상과 레이더 자료)를 이용하여 목표 지역의 구름 발생 위치와 시간을 확인한다. 이러한 목표 지역은 태국의 왕립 관개청, 기상청, 지하수 자원청이 제공한 데이터와 지역 기관 및 농부들의 요청에 따라 결정된다. 두 번째 단계에서는 예측된 구름 상태에 따라 항공기를 통해 시딩 물질을 살포한다(그림 10). 마지막으로, 실험의 성공 여부를 판단하기 위해 인공강우 대상 지역과 비대상 지역에서 관측된 평균 강우강도와

> “중국, UAE, 러시아 등 여러 국가에서 인공강우를 현업 운영하고 있음”

누적 강수량을 비교하고, 대상 지역의 강우강도 및 누적강수량이 비대상 지역보다 높을 경우 실험이 성공적으로 수행된 것으로 간주한다(Chumchean et al., 2010).

태국의 인공강우 현업 결과를 분석한 연구들에 따르면, 인공강우가 강수량 증가에 효과적임이 입증되었다. Silverman et al. (2000)의 연구에서는 1995년부터 1998년까지 진행된 67개의 실험(시딩을 수행한 34개의 실험, 수행하지 않은 33개의 실험)을 조사한 결과, 시딩을 수행한 실험에서 평균 최대 강우량이 109% 증가했으며, 레이더로 측정한 강수 에코의 최대 면적이 64% 크게 나타났다. 또한 Chumchean et al. (2011)은 2006년 8월부터 2009년 4월까지 수행된 인공강우 실험 중 증우효과가 나타난 21개 사례를 분석한 결과, 인공강우가 수행된 지역의 누적 강수량이 수행되지 않은 지역보다 평균 9% 높게 나타났음을 보고했다. 이는 태국에서 수행된 인공강우 실험이 강수량 증가에 있어 실질적인 효과를 나타낸다는 것을 보여준다.

그림 10. 태국의 인공강우 현업 단계 중 항공기를 이용해 시딩을 살포하는 모습(방콕 포스트)

3. 기타 다른 국가들의 현업운영 체계

미국과 태국 외에도 중국, 아랍에미리트, 러시아 등 여러 국가에서 인공강우를 현업으로 운영하고 있다. 먼저, 중국은 인공강우를 가장 적극적으로 운영하는 국가 중 하나로, 수자원 확보 및 미세먼지 저감을 주요 목적으로 약 60년간 인공강우 프로젝트를 현업으로 수행해 왔다. 중국의 인공강우 실험은 총 31개의 지역 인공강우 센터에서 기상항공기나 포탄 발사를 통해 이루어 지며(그림 11), 현재 약 14~30%의 증우효과를 보이고 있다. 특히, 2008년 베이징 올림픽 당시에는 올림픽이 열리기 8시간 전에 비구름 소산을 위해 시

그림 11. 2013년 7월 20일 중국에서 수행한 강우량 증가를 위한 시딩 살포 모습(중국 인민보)

“ 국내 환경에 최적화된 효과적 인공강우 현업운영 체계를 개발할 필요가 있음 ”

딩이 들어있는 미사일 1,104발을 발사하여 비를 미리 내리게 함으로써 올림픽 기간 동안 맑은 날씨를 유지하는 데 성공한 사례가 있다.

물 부족 국가로 알려진 아랍에미리트는 수자원 확보를 목표로 1990년부터 전 지역을 대상으로 인공강우 현업을 운영하고 있다. 아랍에미리트의 인공강우 실험은 크게 상황반과 실험반으로 나뉘어 진행된다. 상황반은 기상청 예보실에서 담당하며, 1명이 3교대로 근무하면서 인공강우 항공 실험을 지시 및 조정한다. 이들은 실시간으로 항공기와 구름의 위치를 파악하고, 실험반과의 통신을 통해 실험을 조율한다. 실험반은 항공기 5대와 조종사 10인으로 구성되어 있으며, 인공강우 조건이 적합한 시점에 연속 실험을 수행한다. 2021년 아랍에미리트는 200회 이상의 시딩 실험을 수행했으며, 이를 통해 연간 약 10~15%의 강수량 증가를 달성한 것으로 보고되었다.

이 밖에도 러시아는 1932년 세계 최초로 구름연구소를 설립하여, 구름챔버, 풍동장치, 기상항공기를 활용한 인공강우 실험을 진행해 온 역사가 깊은 국가다. 러시아는 매년 전승기념일에 비구름 소산을 목적으로 인공강우를 현업으로 운영하고 있으며, 최근에는 강수량 증가를 목표로 한 연구에도 집중하고 있다.

이와 같이, 여러 국가들은 다양한 방법과 장비를 활용하여 인공강우 현업을 운영하고 있다. 미국, 태국, 중국, 아랍에미리트, 러시아 등의 사례는 각 나라의 기후 조건과 사회적 필요에 따라 맞춤형 인공강우 체계를 구축하고 있다는 점에서 주목할 만하다. 따라서 우리나라도 이러한 해외 사례를 참고하여 국내 환경에 최적화된 효과적인 인공강우 현업운영 체계를 개발하고, 이를 통해 기후 문제와 사회적 요구를 해결할 방안을 모색해야 할 것이다.

Ⅳ. 현업운영을 위한 정책방향 제언

오늘날의 기후는 단순히 변화의 수준을 넘어, 기후재난이 우리의 일상이 되어가고 있는 위기 상황에 놓여 있다고 해도 과언이 아니다. 매년 세계 곳곳에서 물 부족

> “지금은 인공강우 기술의 실용화에 집중해야 할 시점”

과 가뭄 피해, 극심한 대기오염 등 다양한 기후환경 문제가 심각해지고 있으며, 이러한 문제로 인해 많은 사람들이 고통을 겪고 있다. 이러한 환경문제를 해결하기 위한 대안으로, 최근 인공강우 기상조절 기술이 환경적·경제적으로 효과적인 해결책으로 주목받고 있다. 이에 따라 여러 기상 선진국뿐만 아니라 우리나라에서도 지상 및 항공 실험과 장기 수치모의 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 장기 수치모의 연구를 통해 시딩 시간을 늘리면 인공증우량이 증가한다는 결과가 도출되었으며, 이를 현업운영에 적용하고 실용화한다면 인공강우 기술의 실질적인 효과를 높이는 동시에 연구를 한 단계 더 발전시킬 수 있을 것이다.

우리는 현재 첨단 IT 기술의 융합이 주도하는 시대에 살고 있다. 이러한 융합과학의 힘을 바탕으로 인공강우 기상조절 기술에 대한 지속적인 도전을 이어간다면, 미래에는 인공강우 연구에서 새로운 역사를 열 수 있을 것이다. 따라서 지금은 축적된 연구 성과와 노하우를 기반으로 실질적인 현업운영 체계를 구축하고, 인공강우 기술의 실용화에 집중해야 할 시점이다. 이를 위해, 현업운영을 위한 구체적인 실행 가이드라인을 다음과 같이 제언한다.

첫째, 안정적인 예산 확보와 연구개발(R&D) 투자 확대

인공강우 기술의 지속적인 발전과 실증 실험을 위해 안정적인 예산 확보와 연구개발 투자의 확대가 필수적이다. 정부 차원에서 장기적인 R&D 계획을 수립하고, 기술 개발과 실험 운영에 필요한 자원을 충분히 지원해야 할 필요가 있다.

둘째, 첨단 기술 기반 인프라 구축 및 전담 인력 양성

인공강우 실험의 정밀성과 효과를 극대화하기 위해, 첨단 시딩 장비와 기상 관측 인프라를 구축할 필요가 있다. 또한, 인공강우 분야의 전문성을 강화하기 위해 전담 인력 양성과 체계적인 교육 프로그램을 마련해야 한다. 이를 통해 전문 기술과 지식을 갖춘 인력을 확보하여 현업운영의 질적 수준을 높일 수 있을 것이다.

> 실질적 현업운영 체계가 구축되면 다양한 국가적 편익을 기대할 수 있을 것임

셋째, 현업운영 체계 확대와 실증 데이터 축적

인공강우 시뮬레이션 결과를 기반으로 장기적인 실증 실험을 확대하고, 이를 현업운영에 적용하여 정책적 활용도를 높이는 것이 중요하다. 또한 기관 간 협력과 정보 공유를 통해 통합적으로 과학적인 운영 체계를 구축할 필요가 있다. 이를 통해 축적된 실증 데이터는 현업운영의 신뢰성과 효율성을 증진시키는 데 기여할 것이다.

넷째, 전문 연구센터 설립

실질적이고 효과적인 인공강우 원천 기술을 확보하기 위해 전문 연구센터 설립이 필요하다. 다양한 학문과 기술이 융합된 접근이 필수적이며, 전문 인력과 기술이 집중될 수 있는 연구센터는 인공강우 연구 활성화 및 경쟁력 강화의 중심 역할을 할 것이다. 이를 통해, 국제적 수준의 연구 역량을 확보하고 실효성 있는 기술 개발이 가능할 것이다.

결론적으로, 이와 같은 종합적이고 체계적인 정책 추진으로 인공강우 기술의 비약적인 발전을 이루어야 한다. 이를 통해 인공강우 선진국들과 어깨를 나란히 하며, 기후변화로 인한 다양한 재난 상황에 선제적으로 대응할 수 있는 국가적 대응 체계를 구축할 수 있다. 향후 실질적인 현업운영 체계가 구축된다면, 기후위기로 인한 수자원 확보, 가뭄 피해 경감, 산불 피해 예방, 대기질 개선 등 다양한 국가적 편익을 기대할 수 있다. 결국, 이러한 노력은 국민의 생명과 재산을 보호하고, 지속 가능한 환경을 만드는데 크게 기여할 것이다. 지금이야말로 우리나라가 인공강우 기술 현업화와 실용화에 본격적으로 나서야 할 시점이다.

참고문헌

국립기상연구소, 2007: 환경보전을 위한 인공강우기술 개발.

국립기상과학원, 2016: 인공증설 실험 수치모델링기술 개발 연구 (Ⅳ).

국립기상과학원, 2022: 인공강우 실험의 예측·실시 절차 및 분석기술 개발.

국립기상과학원, 2023: 상시·연속 실험을 위한 인공강우 운영기술 개발 및 관측·수치모의 자료를 이용한 효과분석 연구.

국립기상과학원, 2024: 인공강우 파급효과(미세먼지, 생태보호) 및 구름강수 관측자료 특성 분석.

기상청, 2022: 지구온난화 추세 속, 두 번째로 높았던 2021년 기온.

기상청, 2022: 하늘사랑 2022년 12월호.

장기호, 이명주, 정진임, 장영진, 양하영, 김금란, 2008: 안개소산과 인공증우(설) 기술. Air Cleaning Technology, 21(1), 9-20.

Al Mandous, A., Abshaev, M. T., Abshaev, A. M., Al Mazroui, A., Al Muhairi, M., and Bojkov, R. D., 2006: Development of rocket and artillery technology for hail suppression. Achievements in Weather Modification - UAE Prize for Weather Modification. Department of Atmospheric Studies, Ministry for Presidential Affairs.

Chumchean, S. and Bunthai, W., 2011: Testing efficacy of rainmaking activities in the northeast of Thailand. In Proceedings of the 10th WMO Scientific Conference on Weather Modification, 4-6.

Chumchean, S., Hanchoowong, R., and Bunthai, W., 2010: Comparison between rainmaking and natural rainfall in the northeastern part of Thailand. In 5th APHW Conference, Hanoi, Vietnam, 8-10.

Hill, G. E., 1979: Research on Increased Winter Orographic Precipitation by Cloud Seeding (FY 1979) Development of Cloud Seedability Criteria.

Silverman, B. A. and Sukarnjanaset, W. 2000: Results of the Thailand warm-cloud hygroscopic particle seeding experiment. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 39(7), 1160-1175.

Tuftedal, M. E., Delene, D. J., and Detwiler, A., 2022: Precipitation evaluation of the North Dakota Cloud Modification Project (NDCMP) using rain gauge observations. Atmospheric Research, 269, 105996.

인공강우의 실질적인 효과들

유철상 고려대학교 교수 envchul@korea.ac.kr

Ⅰ. 수자원 확보에 인공강우가 효과적일 수 있는 이유
Ⅱ. 기대 이상인 탄소흡수 증가 효과
Ⅲ. 봄철의 산불을 줄이는 겨울철 인공증설

인공강우가 성공적으로 수행된다는 전제하에서 그 효과는 상당히 크다. 예상할 수 있는 것보다 큰데, 예를 들어, 인공강우에 의해 연강수량이 20% 증가하는 경우 총유출은 25% 이상 증가하는 것으로 나타난다. 이 결과는 강우 증가량 중 90% 이상이 총유출의 증가로 이어진다는 결과이기도 하다. 인공강우가 특히 수자원의 추가 확보차원에서 매우 큰 잠재력이 있다는 것을 의미한다. 추가로, 인공강우로 식물의 성수기 16일 누적강우를 50㎜ 수준으로 유지해 준다면 식물의 탄소 축적을 3% 이상 증가시킬 수 있으며, 12-2월의 강설량을 60㎜ 정도로 유지시킬 수 있다면 산불위험도를 중간 이하로 낮출 수 있다는 결과도 확인된다. ■

“ 댐유역 수자원 확보 문제의 해결책 중 하나로 인공강우를 고려할 수 있음 ”

Ⅰ. 수자원 확보에 인공강우가 효과적일 수 있는 이유

1. 수자원 확보를 위한 인공강우의 필요성

다목적댐의 수자원 확보 문제는 과거부터 현재까지 지속적으로 발생하고 있다. 이는 주로 가뭄에 의해 발생하는 문제이다. 무강우 기간이 오래 지속되면 댐 유역으로부터의 유출이 감소하여 수자원 확보가 어려워지게 되고, 그 결과로 댐의 저수량이 감소하게 된다. 저수량 부족의 정도가 심화되면 댐의 용수 공급이 제한되어 주변 지역에 큰 피해가 발생할 수 있다.

실제로 우리나라에서는 2000년 이후 크고 작은 가뭄이 지속적으로 발생하고 있으며, 2001-2002년, 2009-2010년, 2014-2015년에는 비교적 큰 규모의 가뭄이 발생하였다. 가뭄으로 인한 용수공급 제한 문제는 2014-2015년 동안 지속된 가뭄 사례에서 자세히 살펴볼 수 있다. 이 가뭄은 서울·경기·강원·충북·충남 등 중부지방에 막대한 피해를 발생시켰다(문장원과 이동률, 2015; 김한수 외, 2016; 이지완 외, 2016). 가뭄으로 인한 피해를 줄이기 위해서는 댐 유역에서의 추가적인 수자원 확보 방안이 필요하다.

댐유역 수자원 확보 문제의 해결책 중 하나로 인공강우를 이용하는 방법을 고려할 수 있다. 가뭄 발생 등의 원인으로 인해 수자원 확보가 어려워진 댐 유역에 인공강우를 발생시키면 댐 유역의 유출량(댐으로의 유입량)이 증가하여 필요한 댐 저수량의 확보를 기대할 수 있다. 특히, 댐의 규모에 비해 댐 유역의 면적이 큰 경우, 강우강도(rainfall intensity)가 작거나 강우강도의 증가가 작더라도 다량의 수자원을 확보할 수 있다는 측면에서 효과가 더욱 클 수 있다.

인공강우의 증우효과는 이미 많은 선행 연구에서 검증되었다. 미국 Wyoming 주와 North Dakota 주, California 주를 대상으로 수행된 인공강우 실험 결과에 의하면 작게는 5%, 많게는 15% 정도의 강우 증가율을 보이는 것으로 나타났다(Solak et al., 1987; WMA, 2005; Griffith et al., 2007; Breed, 2008; WWDC, 2010; Acharya et al., 2011). 호주의 Adelaide와 Tasmania, New England 지역

“ 여러 실험을 통해 갈수기의 유량확보에 인공강우가 효과적임을 확인 ”

을 대상으로 한 인공강우 실험에서는 강우 증가율이 5-30% 정도로 분석되었다(Long and Huggins, 1992; Morrison et al., 2009; Beare et al., 2010). 이외에도 이스라엘에서는 10-20%, 중국 Jianxi Province에서는 20%, 인도 Karnataka에서는 27% 등의 증가율을 보였다(Gagin and Neumann, 1981; Ben, 1990; Kulkarni et al., 2019; Wang et al., 2019). 지역, 기간, 실험 방법 등에 따라 증가율이 각기 다르지만, 인공강우는 대체적으로 5~20% 이상의 증우효과를 유발하는 것으로 나타났다.

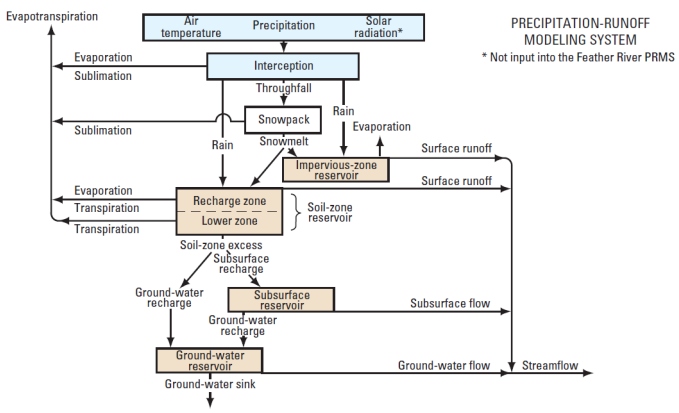
인공강우가 유출에 미치는 영향을 평가한 사례도 있다. 1980년대와 90년대에 이스라엘 지역에서는 인공강우 실험 이후 유역 유출량 관측을 통해 인공강우가 유출의 증가를 유발한다는 것을 확인하였다(Ben-Zvi, 1988; Ben-Zvi and Langerman, 1993; Ben-Zvi and Fanar, 1997). 인공강우 발생 유무에 따른 연·월유출량 비교를 통해 인공강우가 유출에 미치는 효과를 정량적으로 검증하였다. Acharya et al.(2011)는 미국 Wyoming 주의 North Platte River 유역을 대상으로 인공강우에 의한 유출의 증가 정도를 평가하였다. 인공강우 자료를 Variable Infiltration Capacity(VIC) 모형의 입력자료로 이용하여 유출모의를 수행하였다. 먼저, 인공강우로 인하여 0.1-5% 정도의 강수량 증가가 발생할 것으로 가정하여 여러 인공강우 시나리오를 생성하였다. 1981년부터 2000년까지의 기간을 대상으로 인공강우 시나리오에 의한 유량 증가 정도를 평가한 결과, 연유출량의 경우 0.1-5%의 강수량 증가에 대해 0.02-2%의 유량이 증가하였고, 갈수기에는 유량이 0.1-5% 정도 증가하였다. 이러한 결과를 통해 갈수기의 유량 확보에 인공강우가 효과적임을 확인하였다.

2. 보령댐 유역에 대한 강우-유출 해석

인공강우가 수자원확보에 어떻게 기여할 수 있는지는 국내 보령댐을 대상으로 한 연구인 Yoo et al.(2022)에서 살펴볼 수 있다. 이 연구에서는 Precipitation Runoff Modeling System(PRMS) 모형을 이용하여 유출해석을 수행하였다. PRMS 모

형은 미국 United States Geological Survey(USGS)에서 개발한 장기유출모형으로(Leavesley et al., 1983) 강수, 기온과 같은 기상입력자료와 유역의 지형자료, 토양특성, 토지이용특성 등을 통해 결정되는 매개변수를 이용하여 차단, 침투, 유효강우, 직접유출, 중간유출, 지하수유출 등 수문과정에 포함되는 여러 성분들에 대한 모의가 가능하다.

그림 1. PRMS의 수문과정 구조(Markstrom et al., 2015)



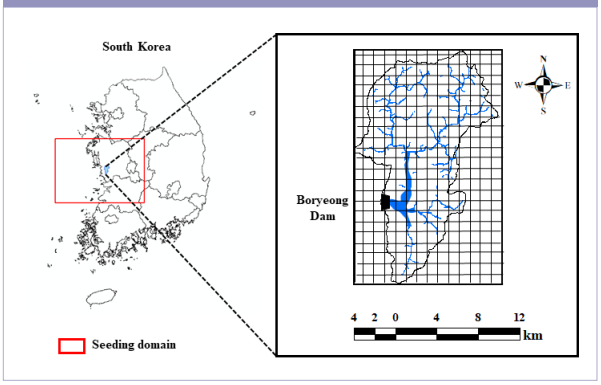
PRMS 모형에서 수문순환 과정은 다섯 단계로 이루어진다. (1) 유역에 발생한 강수의 일부는 식생에 의해 차단되어 증발되며, 강수의 나머지는 식생을 통과하여 지표면에 도달한다. (2) 지표면에 도달한 강수의 일부는 불투수층 저수지를 통해 지표면에 저류되어 증발하거나 지표를 통해 유출된다. 나머지는 토양 내부로 침투되어 토양저수지에 유입된다. 이때 토양에 저류되는 양은 토양의 포장용수량(field capacity)과 위조점(wilting point)에 따라 결정된다. 또한, 토양저수지는 토양의 종류에 따른 토양깊이(soil depth)와 식생의 근입깊이(root depth)를 고려하여 함양대(recharge zone)와 하부층(lower zone)으로 구분되는데, 함양대에서는 증발과 증산이 모두 발생하지만, 하부층에서는 증산만 발생한다. (3) 토양저수지에 저류된 유량 중 일부는 증산되고, 일부는 지표를 통해 유출된다. 나머지는 지표하저수지 및 지하수저수지로 유입된다. (4) 지표하저수지의 저류량 중 일부는 중간유출이 되고, 일부는 지하수저수지로 유입된다. (5) 지하수저수지에서는 지하수유출 및 지하수 싱크가 발생한다. 그리고 지표유출량과 중간유출량, 지하수유출량이 합쳐져 총 유출량이 된다. 그림 1은 PRMS에서 고려하는 수문과정을 보여주는 구조도이다.

보령댐 유역은 충청남도 보령시와 부여군의 일부를 포함하며, 유역의 주하도에는

> 보령댐의 용수부족 문제는 기존 해결책으로 궁극적 해결이 어려운 상황

웅천천이 흐른다(그림 2). 웅천천은 보령댐 유역을 지나 해수면 상의로 빠져나간다. 보령댐 유역의 면적은 163.6㎢으로 우리나라의 다른 댐 유역들에 비해 매우 작은 규모이다. 따라서 확보될 수 있는 수자원량이 적으며, 이러한 특성으로 인해 가뭄에 취약하여 2010년대 들어 수차례 용수부족 사태가 발생한 바 있다. 보령댐의 저수면적은 5.8㎢에 연간용수공급용량이 106.6×10⁶㎥ 정도로 댐의 규모 또한 작아 가뭄 시 저수율이 빠르게 감소하는 특성이 있다.

그림 2. 보령댐 유역 위치 및 유역도



보령댐 유역에서 가장 심각한 가뭄 사례는 2015년에 발생하였다. 보령댐 유역의 2015년 일누적강우량은 1,022.8㎜로 27년(1988-2014년) 평균 강우량 1,414.4㎜의 72.3%에 불과하였다. 2015년 11월 7일 기준으로 댐 저수율은 18.9%를 기록하였으며, 과거 최저저수량인 2014년의 45×10⁶㎥과 비교하여도 21.93×10⁶㎥이 부족하였다(충남연구원, 2016). 가뭄이 장기화됨에 따라 보령댐의 저수율을 유지하고자 보령댐 급수지역인 충남 서북부권 8개 시·군에서는 제한급수를 시행하였으나, 그럼에도 불구하고 보령댐의 저수량은 지속적으로 감소하였다(충남연구원, 2016). 심각한 가뭄이 어느 정도 해소된 이후 미래의 가뭄재해를 예방하기 위하여 2016년 도수로를 설치하여 댐 용수 사용량의 약 50%를 비상 공급할 수 있는 시스템을 갖추게 되었다. 그러나 최근에도 가뭄 위험 경계경보가 발령되는 등 여전히 궁극적인 해결은 어려운 상황이다(최영제, 2017). 이는 보령댐 유역의 크기가 작아 충분한 양의 수자원을 확보하기 어렵고, 댐의 규모 또한 작아 가뭄 발생 시 용수공급에 필요한 충분한 저류량을 확보하지 못하는 근본적인 문제에서 비롯된 것이다.

3. 보령댐 유역을 대상으로 한 인공강우의 효과 분석

WRF 모형을 이용한 인공강우 모의 결과는 seeding 양에 비례하여 강수가 증가하는 경향을 보여준다. 대략 1시간 정도의 seeding으로 1㎜ 정도의 평균 강우

> “인공강우 증가율이 커질수록 증우의 효과는 더욱 뚜렷하게 나타남”

량 증가를 나타내고 있다. 단순하게 계산하면 100회 정도의 seeding으로 100㎜ 정도의 증우를 기대할 수 있다는 계산이 나온다. 연강수량의 10%에 육박하는 큰 양이다. Seeding의 시점, 기간, 방법 등에 따라 다른 결과가 유도될 수 있으나, 적절한 seeding이 이루어진다면 충분히 기대할 수 있는 증우량으로 판단된다. 국외의 연구에서도 증유 정도가 5~20% 범위로 나타남을 보고하고 있다(Solak et al., 1987; Griffith et al., 2007; Acharya et al., 2011; Ćurić et al., 2019; Kulkarni et al, 2019). 따라서 10% 정도의 증우는 충분히 가능한 수준으로 판단할 수 있다. Yoo et al.(2022)의 연구에서는 2020년을 대상으로 1년 동안 발생한 총강수량의 5, 10, 15, 20%가 인공강우에 의해 추가로 발생하는 시나리오를 고려하였다. 각 시나리오 별 수문성분의 변화 양상은 표 1에 정리하였다.

표 1. 인공강우 발생 시나리오별 연단위 수문성분의 증가량 및 증가율(2020년)

성분	단위	시나리오				
		Unseeded	5%	10%	15%	20%
총강우	㎜	1300.0	1365.1	1430.2	1495.3	1560.4
차단	㎜	225.7	227.9	228.6	230.8	231.6
	%	-	0.95	1.29	2.24	2.59
침투	㎜	1002.4	1061.1	1121.0	1179.4	1238.9
	%	-	5.86	10.73	15.76	21.18
유효강우	㎜	71.9	76.1	80.6	85.1	89.9
	%	-	5.87	12.08	18.39	25.11
기저유출	㎜	454.1	466.8	478.8	489.5	499.3
	%	-	2.80	5.44	7.81	9.96
중간유출	㎜	394.8	437.4	482.5	527.7	575.1
	%	-	10.79	22.22	33.68	45.68
직접유출	㎜	66.7	70.9	75.4	79.9	84.7
	%	-	6.31	13.01	19.78	27.00
총유출	㎜	915.5	975.1	1036.7	1097.1	1159.1
	%	-	6.50	13.23	19.83	26.60

표 1에 정리된 결과를 보면 먼저 총강우의 증가에 따라 차단, 증발, 침투되는 양의 증가는 거의 없는 것으로 나타난다. 이는 seeding에 의한 증우가 아니라 기존 강우 중 일부가 이미 차단, 증발, 침투 등으로 손실되었기 때문이다. 즉, 증우 부분만을 고려하면 손실은 최소화되고 대부분이 유출에 직접 기여하는 특성을 보이게 된다. 결과적으로 유출 부분에서도 기저유출의 변화는 작고, 중간유출과 직접유출의 증가가 두드러지게 나타나게 된다. 인공강우의 증가율이 커질수록 증우의 효과는 더욱 뚜렷하게 나타나는 것으로 나타난다. 예를 들어, 인공강우에 의해 연강수량이 20% 증가하는 시나리오에서 연간 총유출은 26.6% 증가하는 것으로 나타났다. 이 결과를 강우 증가량과 유출 증가량이라는 측면에서 다시 살펴보면, 강우 증가량 중 93%가 총유출의 증가로 나타났다는 결과이기도 하

“강수량과 순일차 생산량은 양의 상관관계이나, 지역과 기후에 따라그 정도는 크게다르게 나타남”

다. 즉, 인공강우로 인한 증우량은 추가의 손실 없이 대부분 수자원 확보로 직결된다는 것을 나타낸다.

II. 기대 이상인 탄소흡수 증가 효과

1. 식물의 광합성과 순일차생산량

순일차생산량(Net Primary Production, NPP)은 식물의 광합성에 기반한 생산량인 일차생산량(Gross Primary Production, GPP)에서 호흡으로 인한 소모를 제외한 부분을 의미한다. 순일차생산량은 궁극적으로 식생에 저장된 탄소량을 의미하는 것이기도 하며, 녹색식물의 광합성 과정으로 축적된 단위 시·공간당 순유기물양(net accumulation of organic matter per unit and space)으로 정의되기도 한다(Yu et al., 2009). 순일차생산량은 대기와 생태계 사이의 이산화탄소 교환량을 나타내는 용어로 사용되기도 한다(Prentice et al., 2001). 전통적으로 생태계 탄소순환에서 흡수대(sink)를 판단하는 중요한 지표이기도 하며, 식량생산능력을 나타내는 지표로도 사용된다(Zhang et al., 2016; Jiao et al., 2017; Li et al., 2019; Wang et al., 2019).

일반적으로 순일차생산량의 크기는 산림에서 가장 높게 나타난다. 산림을 제외하면 농경지, 초원, 나지의 순이다(신사철과 유철상, 1997). 순일차생산량은 기본적으로 식생의 분포나 밀도에 큰 영향을 받는다. 그리고 순일차생산량은 식생의 성장과 0.72, 강수량과는 0.4-0.9의 높은 상관을 보이는 것이 확인되기도 하였다. 즉, 식생의 성장은 물의 순환과정과 매우 밀접한 관계를 갖는다. 특히 강수량은 건조 혹은 반건조 기후에서 성장하는 식생의 연간 변동성에 많은 영향을 미치는 인자이다(Deshmukh, 1984). 일반적으로 강수량과 순일차생산량은 양의 상관관계를 갖는 것으로 알려져 있으나(Potter et al., 1999), 지역과 기후에 따라 그 정도는 크게 다르게 나타난다.

순일차생산량을 추정하는 가장 효과적인 방법은 위성자료를 활용하는 방법이다. 순일차생산량의 측정은 일사량(net radiation), 광합성효율, 온도, 토양수분 등

> “인공강우의 순일차생산량 증가효과에 관한 연구가 수행됨”

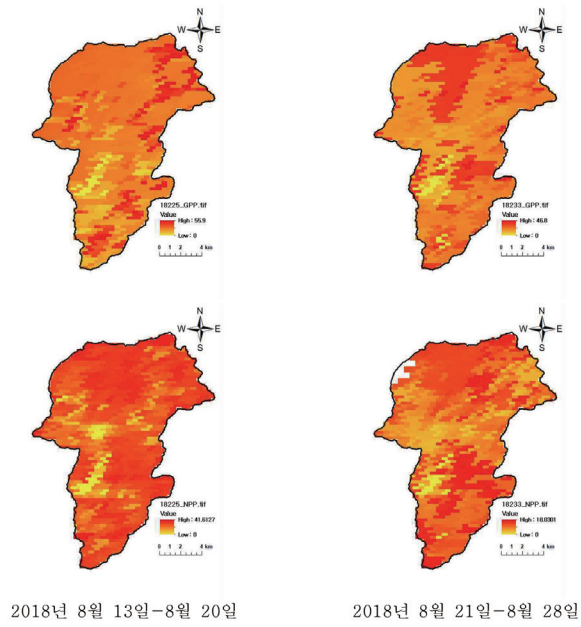
다양한 입력자료를 필요로 한다. 따라서, 원격탐사자료와 함께 광이용효율(Light Use Effciency, LUE)을 활용하여 간편하게 순일차생산량을 추정할 수 있는 다양한 모형이 개발되었다. 그 모형으로는 C-Fix(Veroustraete, 1994), CASA(Potter et al., 1993), GLOPEM(Prince and Goward, 1995), SDBM(Knorr and Heimann, 1995), MODIS NPP(Running et al., 2004) 등이 있다. Tao et al.(2005)에서는 다양하게 개발된 순일차생산량 산정 모형에 대하여 정확도를 비교하는 연구를 수행하였으며, 이 중 CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach) 모형이 비교적 순일차생산량의 추정 결과가 정확함을 보인 바 있다. CASA 모형은 전지구 혹은 지역적 규모로 순일차생산량을 간편하게 추정할 수 있는 방법이다. 이 모형은 다양한 지역에서 다양한 작물의 순일차생산량을 산정하는데 사용된 바 있다(나상일 외, 2013).

2. 순일차생산량(NPP)의 계산

인공강우가 가지는 순일차생산량의 증가효과는 Lee et al.(2024)의 연구에서 살펴볼 수 있다. 이들의 연구는 보령댐 유역을 대상으로 하였고, 순일차생산량 추정을 위해 CASA 모형을 이용하였다. 모형의 적용에 필요한 정보로 MODIS Product(National Aeronautics and Space Administration, NASA) 자료와 일 단위의 합계일사량 자료를 수집하여 이용하였다. 먼저, MODIS 위성자료는 Auqa 및 Terra에서 제공하는 Surface Reflectance(SR), Land Surface Temperature(LST), Fraction of the Absorbed Photosynthetically Active Radiation(FPAR) 등이다. 이들 자료는 매년 1월 1일을 기준으로 8일 간격으로 관측된 자료를 합성하여 최적의 값 또는 평균값으로 제공한다. 합계일사량 자료로는 보령댐 유역에서 가까운 홍성 종관기상관측소(ASOS) 관측소의 자료를 사용하였다.

이 연구에서는 먼저 수집된 MODIS 위성자료와 합계일사량 자료를 활용하여 보령댐 유역의 순일차생산량을 계산하였다. 또한 CASA 모형으로 계산된 순일차생산량의 평가를 위해 MODIS 일차생산량(MODIS GPP)과 MODIS 순일차생산량(MODIS NPP) 자료를 수집하였다. MODIS GPP 자료는 CASA 모형에 활용된 다른

그림 3. GPP(위) 및 NPP(아래) 산정 결과 예시



2018년 8월 13일-8월 20일 2018년 8월 21일-8월 28일

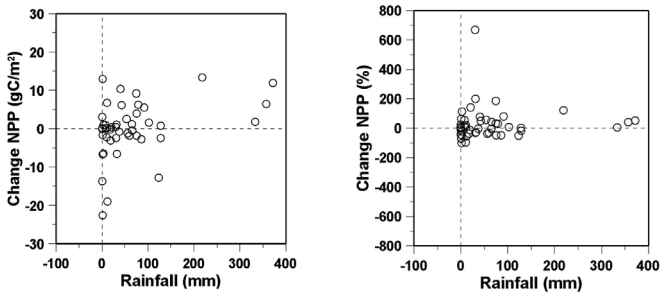
MODIS 위성자료와 마찬가지로 8일 단위로 제공된다. 여기서 8일 단위는 GPP 계산에 사용되는 위성자료들의 최적값으로부터 1일에 해당하는 GPP를 계산한 후 이를 8배 한 값을 의미한다. MODIS NPP 자료는 합산된 8일 단위의 MODIS GPP 자료에서 식생이 광합성에 따른 호흡량을 제외하여 연 단위로 제공된다. 그림 3은 보령댐 유역에서 계산된 8일 단위의 GPP와 NPP 결과 중 일부(2018년 8월 13일-8월 28일)를 보여주고 있다.

3. 인공강우로 인한 순일차생산량의 증가

토양수분은 강우에 의존적이다. 홍수유출의 경우에는 선행 5일 강우가 토양수분의 판단기준으로 사용되지만 식물의 성장과 관련해서는 최대 3개월까지의 누적강우를 이용한다. Lee et al.(2024)의 연구에서는 순일차생산량이 8일 간격으로 계산된다는 점과 우리나라 산지는 농경지에서와는 달리 토심이 얕다는 점을 고려하여 토양수분이 순일차생산량에 미치는 영향을 판단하였다. 그 결과 순일차생산량의 증가는 과거 16일 동안의 누적강우와 큰 상관이 있는 것으로 확인하였다. 이러한 결과는 과거 16일 강우의 규모가 일정수준 이하일 경우 인공증우를 통해 순일차생산량을 증가시킬 수 있음을 의미한다.

그림 4는 과거 16일 강우에 대한 순일차생산량 증가의 정도를 절대량과 상대비율로 나타낸 것이다. 이 그림에서 보여주는 내용은 특히 과거 16일 강우량으로

그림 4. 과거 16일 강우와 순일차생산량 증가의 관계(2018년)



(a) 절대량 (b) 상대비율

> “CASA 모형으로 계산된 2018년 보령댐 유역의 연평균 순일차생산량은 0.62kgC/㎡”

50㎜ 이상에서 순일차생산량의 증가가 크다는 점이다. 인공강우의 크기를 무한정 크게 할 수는 없으므로 본 연구에서는 과거 16일 강우의 양을 50㎜ 이상으로 증가시키는 경우와 100㎜ 이상으로 증가시키는 경우에 대해 순일차생산량의 증가 및 탄소 축적량의 변화를 추정하였다. 참고로 50-100㎜ 구간에서의 순일차생산량 증가 규모는 약 1.873gC/㎡ 정도이다.

참고로, 2018년에 대해 과거 16일 누적강우량이 50㎜ 미만인 경우와 100㎜ 미만인 경우를 조사하였다. 과거 16일 누적강우량이 50㎜ 미만인 경우와 50-100㎜인 경우는 각각 27과 11회로 나타났다. 누적강우량이 100㎜ 이하인 경우는 연중 대부분을 차지하는 것으로 나타난다. 그러나 이 기간 중 소위 식물의 성수기(growing season)에 해당하는 구간 15(4월 24일)-36(10월 15일)만 고려하면, 과거 16일 누적강우량이 50㎜ 미만인 경우는 11회, 과거 16일 누적강우량이 50-100㎜인 경우는 3회로 나타난다. 마지막으로, 누적강우량이 목표에 미달하는 경우에 대해 목표치에 해당하는 50㎜, 100㎜까지 증우되었다고 가정하여 순일차생산량이 증가되는 규모를 추정하였다(표 2). 먼저, 16일 누적강우 50㎜까지 증우시키는 경우의 순일차생산량의 증가 규모는 20.60gC/㎡로 나타났다. 추가로, 16일 누적강우 100㎜까지 증우시키는 경우 순일차생산량의 증가 규모는 5.62gC/㎡로 나타났다.

CASA 모형으로 계산된 순일차생산량을 활용하여 보령댐 유역의 2018년 탄소 축적량을 계산하였다. 탄소 축적량은 보령댐 유역의 연평균 순일차생산량에 보령댐 유역 면적을 곱함으로써 산정할 수 있다. CASA 모형으로 계산된 2018년 보령댐 유역의 연평균 순일차생산량은 0.62kgC/㎡이다. 유역 면적 163.6㎢를 고려하면 보령댐 유역의 탄소 축적량은 101,292,940kg/year으로 나타난다. 목표 16일 누적강우량에 따른 탄소 축적량의 변화를 살펴보면, 과거 16일 누적강우가 0-50㎜인 경우를 50㎜로 증우시킨 경우, 순일차생산량의 연간 증가 규모는 20.60gC/㎡에 달한다. 이에

표 2. 목표 16일 누적강우에 따른 보령댐 유역의 순일차생산량(탄소 축적량) 증가 규모 추정(2018년)

16일 누적 목표 강우	경우의 수	순일차 생산량 (gC/㎡)	탄소 축적량 (ton C/year)
(인공강우 없는 경우)	-	619.15	101,293
50 ㎜	11	639.75	104,664 (+3.33%)
100 ㎜	3	624.77	102,212 (+0.91%)
합	14	645.37	105,583 (+4.24%)

“전국적으로 주요 산불발생 요인은 실화”

따른 탄소 축적량은 104,663,591㎏C/year이 된다. 16일 누적강우가 50-100㎜인 경우를 100㎜로 증우시킨 경우의 순일차생산량의 연 증가 규모는 5.62gC/㎡이며, 이에 따른 탄소 축적량은 102,212,208㎏C/year이 된다. 두 경우를 모두 고려하면 탄소 축적량은 총 105,582,859㎏C/year로 나타난다(표 2). 이 결과는 인공강우가 없는 경우와 비교하여 탄소 축적량이 각각 3.33%, 0.91% 및 4.24%의 증가되었음을 나타낸다. 소극적인 경우로 한정하여 16일 누적강우를 50㎜로 맞추어 주기만 해도 탄소의 축적량을 3.33% 증가시킬 수 있다는 결과인 것이다

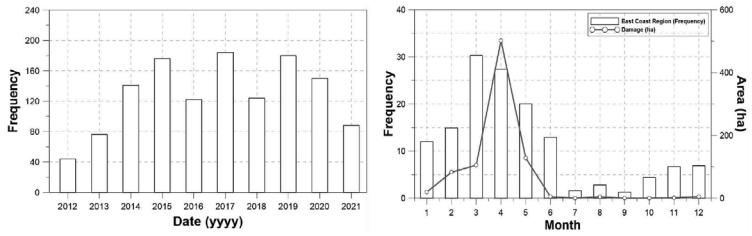
III. 봄철의 산불을 줄이는 겨울철 인공증설

1. 동해안 지역의 산불 발생 현황

최근(2012-2021년) 동해안 지역의 산불 발생 현황은 산림청에서 제공하는 산불 통계연보의 국내 산불 발생 건수 자료에서 확인할 수 있다. 산불 통계 연보에는 전국을 대상으로 한 월별, 연도별 산불 발생 건수가 정리되어 있으며, 월별, 연도별 산불 피해 면적, 산불 진화 현황, 사상자 현황, 피해 금액, 산불 발생 원인 등이 기재되어 있다. 그림 5(a)는 연도별 동해안 지역의 산불 발생건수를 시계열로 나타낸 것으로서 2012-2015년 동안 산불 발생건수가 지속적으로 증가한 것을 알 수 있다. 2012년에서는 44회였던 산불 발생건수가 2013년 76회, 2014년 141회, 2015년 176회로 순차적으로 증가하였다. 이후 2019년까지 120-190회 사이로 산불 발생건수의 증감이 반복되었으며, 2020년 150회, 2021년 88회로 감소하는 추세가 나타났다.

위 결과를 월별로 구분하여 산불 발생 건수 및 피해 면적을 살펴보면 그림 5(b)와 같다. 우선, 월별 산불 발생 건수는 3월에 제일 많은

그림 5. 동해안 지역 산불 년 발생 건수(a) 및 월별 평균 발생 건수와 피해면적(b)



(a) 연도별 산불 발생건수 (b) 월별 평균 건수 및 피해면적

> “토양수분이 높다면 봄철 산불 발생을 억제하는 효과”

것으로 나타났다. 3월 전후인 2월, 4월의 산불 발생 횟수도 많고, 그 다음에는 5월이 크게 나타났다. 여름철 우기의 산불 발생 횟수는 매우 적으며, 다시 가을을 지나 겨울에 접어들며 산불 발생횟수도 증가한다. 월별 산불 피해 면적의 경우는 대체로 산불 발생 건수와 비례하는 경향을 보였다. 4월에 가장 큰 값을 보이며, 다음으로 5월, 2월의 순으로 넓게 나타난다. 산불 발생 횟수가 3월이 가장 많음에도 피해면적이 4월에 더 큰 이유를 정확히 설명하기는 어려우나, 동해안의 산악지대에 3월까지도 남아 있는 눈의 영향으로 추측된다.

전국적으로 주요 산불발생 요인은 실화(accident fire)로 나타난다. 실화는 1,797건으로 약 37.3%를 차지하는 것으로 나타났다. 다음으로 기타 원인(others) 642건(24.9%), 밭 소각(burning field) 637건(13.4%), 쓰레기 소각(burning trash) 637건(13.3%), 담뱃불(cigarette fire) 258건(5.4%), 건축물 화재(structure fire) 257건(5.4%)으로 나타났다. 동해안 지역의 경우도 유사한 특성을 보이는데, 가장 높은 산불발생 요인은 역시 실화로 나타났다. 실화는 454건으로 약 35.3%로 나타났다. 다음으로, 기타 원인 341건(26.5%), 밭 소각 191건(19.1%), 쓰레기 소각 166건(12.9%), 건축물 화재 75건(5.8%), 담뱃불 58건(4.5%) 순으로 나타났다.

2. 겨울철 인공강설이 봄철 토양수분 상승에 기여

겨울철은 낮은 기온으로 인해 강우 대신 강설이 발생한다. 이때, 많은 양의 강설과 낮은 기온은 적설(snowpack)의 요인이 된다. 겨울철 발생한 적설은 융설(snowmelt)이 됨에 따라 토양에 수분을 공급하며, 토양이 건조해지는 것을 방지해 준다. 국내의 경우 봄철 건조한 날씨로 인해 산불이 지속적으로 발생한다. 이때, 토양수분이 높다면 봄철 산불 발생을 억제하는 효과가 있다.

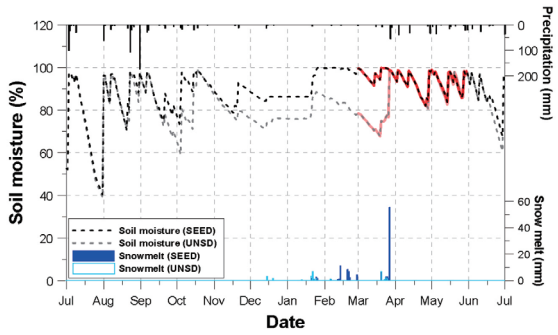
마정혁과 유철상(2024)의 연구에서는 겨울철 인공강설에 의한 봄철 토양수분의 변화를 파악하였다. PRMS 모형을 이용하여 도암댐 유역에 대해 인공강설 전과 후의 토양수분변화, 융설량을 모의하였다. 모의 시작기간은 7월로 하였으며, 이는 집중호우가 발생하는 7월부터 모의를 시작하여 겨울이 되기 전 토양에 수분이 충분

“산불위험지수는 산불 발생 가능성을 나타내는 대표 척도”

히 공급될 수 있게 함이다. 이후 다음 해 6월까지 모의를 지속하여 1년 정도의 모의를 수행하였다. 인공강설 모의 자료에 의한 댐 유역별 토양수분의 변화는 그림 6과 같다.

그림 6을 보면 인공강설에 의한 토양수분과 융설의 변화가 확연히 나타나는 것을 알 수 있다. 우선 토양수분의 변화를 보면, 대체로 여름에 상승하며, 겨울-봄에 하강하는 것을 볼 수 있다. 특히 주요 관심 기간인 봄철(붉은색 실선, 분홍색 실선)의 토양수분 변화를 보면, 인공강설 이전에는 약 70-99%에 주로 위치해 있으나, 인공강설을 고려하는 경우에는 80-99%로 상승하는 것을 확인할 수 있다. 특히 3월에 나타난 변화에 주목할 만하다. 이는 기본적으로 이시기의 융설량에 기인하는데, 3월 말에는 약 60㎜에 달하는 융설량이 발생하였다.

그림 6. 도암댐 유역에서 인공강설을 고려하는 경우에 대한 토양수분 모의 결과(붉은색 실선: 인공강우 고려(SEED), 분홍색 실선: 인공강우 미고려(UNSD))



3. 토양수분 증가에 따른 산불 위험도의 감소

산불위험지수는 산불 발생 가능성을 나타내는 대표적인 척도이다. 산불 발생에 영향을 미치는 기온, 토양수분, 습도, 강수량, 바람, 번개 발생확률(probability of lightning), 대기의 안정성(atmospheric stability) 등의 인자들을 조합하여 산불위험지수를 산정한다. 이러한 산불위험지수는 국가별로 기후 특성에 알맞게 개발되어왔다. 공교롭게도 국토 면적이 넓은 미국, 러시아 등에서 개발한 위험지수가 상대적으로 많은 것으로 나타난다. 먼저, 미국의 경우 Munger Index(MI; Munger, 1916), Fosberg Fire Weather Index(FFWI; Fosberg, 1978) 등의 지수가 사용되어 왔다. 러시아에서는 Zhdanko Index(ZhI; Zhdanko, 1965) 등의 지수를 개발하였다. 마정혁과 유철상(2024)의 연구에서는 이들 산불지수 중 토양수분의 정도를 잘 반영하고, 아울러 국내의 특성을 잘 반영하는 것으로 나타난 ZhI를 사용하여 인공강설에 따른 산불위험도의 변화를 분석하였다. ZhI의 경우 강수의 기간도 중요하지만 강수의 강도

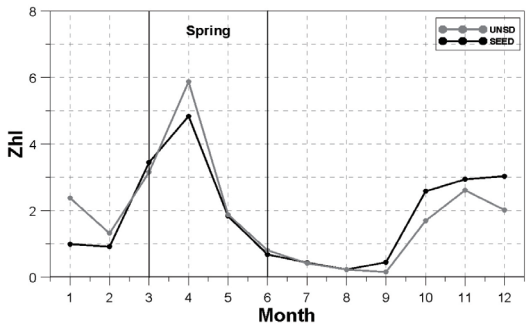
> 겨울철 강설량이 최소 60mm 정도일 경우 토양수분상태가 안정적으로 유지됨

도 중요하게 작용을 한다. ZhI는 기본적으로 20㎜를 초과하는 강수 발생 시 산불 위험도를 초기화 한다는 특징이 있다. 초기화 이후 산불위험도가 다시 높아지기 위해선 일정 기간 무강수 또는 낮은 강수량이 지속 되어야 한다.

그림 7은 도암댐 유역을 대상으로 인공강우를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우에 대해 산불 위험지수의 변화를 비교한 것이다. 그림에서 확인할 수 있는 것처럼, 인공강설을 고려하지 않는 경우 산불의 위험도는 4월에 6까지 올라가지만 인공강설이 고려되는 경우 5 미만으로 떨어지는 것이 확인된다. 또한 1월에도 인공강설로 인해 산불위험도가 크게 감소한 것을 확인할 수 있다.

마지막으로, 봄철 동해안 산불의 위험을 보통 수준으로 줄이기 위해서는 겨울철 강설량(강우 깊이로 환산하는 경우)을 어느 정도로 유지할 필요가 있는지에 대한 의문이다. 이는 겨울철 강설이 봄철 토양수분함량에 미치는 영향을 반영하는 것이기도 하다. 마정혁과 유철상(2024)의 연구를 보면 겨울철(12-2월) 강설량이 최소 60㎜ 정도일 경우 토양수분상태가 안정적으로 유지됨을 보여준다. 이 보다 작은 경우에는 토양수분함량이 평균적으로 10-20% 감소하며, 극단적으로 토양수분함량이 50% 이하로 떨어질 수 있다. 이러한 결과는 물론 겨울철 인공강설의 목표를 추정하는데 도움이 된다. 즉, 총 강설량을 60㎜ 이상으로 유지할 수 있도록 인공강설을 수행하는 것이 필요해 보인다. 이러한 목표 달성을 위해 어떤 방식으로 어떤 시점에 인공강설을 수행할 지는 추가로 연구되어야 할 부분이다. 즉, 인공강설의 시점 판단, 인공강설의 시간적 배분(월간 배분), 공간적 배분 문제 등이 구체적으로 다루어질 필요가 있다.

그림 7. 인공강설에 따른 산불위험지수의 변화



참고문헌

김한수, 김현식, 전근일, 강신욱, 2016: 2014년~2015년 가뭄의 평가. 물과 미래, 49(7), 61-75.

나상일, 홍석영, 김이현, 이경도, 장소영, 2013: 논벼 NPP 지수를 이용한 우리나라 벼 수량 추정, Korean. J. Remote. Sens., 29(5), 461-476.

마정혁, 유철상, 2024: 국내외 주요 산불위험지수의 국내 적용성 평가: 태백산맥 동쪽 지역을 대상으로, 한국습지학회논문집, 26(3), 204-218.

문장원, 이동률, 2015: 물공급능력지수를 이용한 다목적댐별 2014-2015 가뭄현황 분석. 물과 미래, 48(12), 51-57.

신사철, 유철상, 1997: NOAA/AVHRR 자료를 이용한 순일차생산량 분포 추정. 한국환경과학회지 6(6), 605-612.

이지완, 장선숙, 안소라, 박기욱, 김성준, 2016: 기상학적 가뭄, 농업 가뭄 및 빅데이터 현장가뭄간의 상관성 평가. 한국지리정보학회지, 19(1), 64-79.

최영제, 2017: 보령댐 도수로 운영 효과 분석 (석사학위) 아주대학교 일반대학원, 경기도.

충남연구원, 2016: 보령댐 급수능력 평가 및 가뭄 대응방안 연구. 충청남도: 충남연구원.

Acharya, A., Piechota, T. C., Stephen, H., and Tootle, G., 2011: Modeled streamflow response under cloud seeding in the North Platte River watershed. J. Hydrol., 409(1-2), 305-314, doi:10.1016/j.jhydrol.2011.08.027.

Beare, S., Chambers, R., and Peak, S., 2010: Statistical modeling of rainfall enhancement. J. Wea. Mod., 42(1), 13-32, doi:10.54782/jwm.v42i1.158.

Ben, Z., 1990: Springflow enhancement in Northern Israel due to cloud seeding. Isr. J. Earth Sci., 39(2-4), 103-117.

Ben-Zvi, A., 1988: Enhancement of runoff from a small watershed by cloud seeding. J. Hydrol., 101(1-4), 291-303, doi:10.1016/0022-1694(88)90041-8.

Ben-Zvi, A. and Fanar, A., 1997: The effect of randomized cloud seeding on runoff depth from a small watershed in central Israel. J. Hydrol., 191(1-4), 161-178, doi: 10.1016/S0022-1694(96)03073-9.

Ben-Zvi, A. and Langerman, M., 1993: Assessment of runoff enhancement by randomized cloud seeding in case of a carry-over flow. J. Hydrol., 142(1-4), 391-408. https://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90020-A.

Breed, D., 2008: Cloud seeding to enhance snowfall. Colorado Water Newsletter, 25(6), 1–37.

Ćurić, M., Lompar, M., and Romanic, D., 2019: Implementation of a novel seeding material (NaCl/TiO2) for precipitation enhancement in WRF: Description of the model and spatiotemporal window tests. Atmos. Res., 230, 104638.

Deshmukh, I. K., 1984: A common relationship between precipitation and grassland peak biomass for east and southern Africa. Afr. J. Ecol., 22(3), 181-186.

Fosberg, M. A., 1978: Weather in wildland fire management: the fire weather index. US For Serv Reprints of articles by FS employees.

Gagin, A. and Neumann, J., 1981: The second Israeli randomized cloud seeding experiment: Evaluation of the results. J. Appl. Meteorol. Climatol., 20(11), 1301-1311.

Griffith, D. A., Solak, M. E., Yorty, D. P., and Brinkman, B., 2007: A level II weather modification feasibility study for winter snowpack augmentation in the Salt River and Wyoming ranges in Wyoming. J. Wea. Mod., 39(1), 76-83.

Jiao, C., Yu, G., He, N., Ma, A., Ge, J., and Hu, Z., 2017: Spatial pattern of grassland aboveground biomass and its environmental controls in the Eurasian steppe. J. Geogr. Sci., 27(1), 3-22.

Knorr, W. and Heimann, M., 1995: Impact of drought stress and other factors on seasonal land biosphere CO2 exchange studied through an atmospheric tracer transport model. Tellus B, 47(4), 471-489.

Kulkarni, J. R., Morwal, S. B., and Deshpande, N. R., 2019: Rainfall enhancement in Karnataka state cloud seeding program "Varshadhare" 2017. Atmos. Res., 219, 65-76.

Leavesley, G. H., Lichty, R. W., Troutman, B. M., and Saindon, L. G., 1983: Precipitation-runoff modeling system: User's manual. Water-resources Investigations Report, 83(4238), 207.

Lee M., Yoo C., and Chang K.-H., 2024: Unexpected contribution of cloud seeding to NPP increase during drought. Hydrol. Res., 55(1), 17–32, doi:10.2166/nh.2023.075.

Li, B., Huang, F., Qin, L., Qi, H., and Sun, N., 2019: Spatio-temporal variations of carbon use efficiency in natural terrestrial ecosystems and the relationship with climatic factors in the Songnen Plain, China. Remote. Sens., 11(21), 2513.

Long, A. B., and Huggins, A. W., 1992: Australian Winter Storms Experiment (AWSE) I: Supercooled liquid water and precipitation-enhancement opportunities. J. Appl. Meteorol. Climatol., 31(9), 1041-1055.

Morrison, A. E., Siems, S. T., Manton, M. J., and Nazarov, A., 2009: On the analysis of a cloud seeding dataset over Tasmania. J. Appl. Meteorol. Climatol., 48(6), 1267-1280.

Munger, T. T., 1916: Graphic method of representing and comparing drought intensities. Mon. Weather Rev., 44(11), 642-643.

Potter, C. S., Randerson, J. T., Field, C. B., Matson, P. A., Vitousek, P. M., Mooney, H. A., and Klooster, S. A., 1993: Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. Global Biogeochem. Cycles, 7(4), 811-841.

Potter, C. S., Klooster, S., and Brooks, V., 1999: Interannual variability in terrestrial net primary production: Exploration of trends and controls on regional to global scales. Ecosyst., 2, 36-48.

Prentice, I. C., Farquhar, G. D., Fasham, M. J. R., Goulden, M. L., Heimann, M., Jaramillo, V. J., and Yool, A., 2001: The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide.

Prince, S. D. and Goward, S. N. 1995: Global primary production: a remote sensing approach. J. Biogeogr., 815-835.

Running, S. W., Nemani, R. R., Heinsch, F. A., Zhao, M., Reeves, M., and Hashimoto, H., 2004: A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. Bioscience, 54(6), 547-560.

Solak, M. E., Henderson, T. J., Allan, R. B., and Duckering, D. W., 1987: Winter orographic cloud seeding over the Kern River Basin in California. J. Wea. Mod., 19(1), 36-40.

Tao, S., Xu, F. L., Wang, X. J., Liu, W. X., Gong, Z. M., Fang, J. Y., ... and Luo, Y. M., 2005:

Organochlorine pesticides in agricultural soil and vegetables from Tianjin, China. Environ. Sci. Technol., 39(8), 2494-2499.

Veroustraete, F., 1994: On the use of a simple deciduous forest model for the interpretation of climate change effects at the level of carbon dynamics. Ecol. Modell., 75, 221-237.

Wang, N., Quesada, B., Xia, L., Butterbach-Bahl, K., Goodale, C. L., and Kiese, R., 2019: Effects of climate warming on carbon fluxes in grasslands—A global meta-analysis. Glob. Chang. Biol., 25(5), 1839-1851.

Wang, W., Yao, Z., Guo, J., Tan, C., Jia, S., Zhao, W., ... and Gao, L., 2019: The extra-area effect in 71 cloud seeding operations during winters of 2008-14 over Jiangxi Province, East China. J. Meteorol. Res., 33(3), 528-539.

WMA (Weather Modification Association) 2005: Weather Modification Association Capability Statement. Utah, USA: Weather Modification Association.

WWDC (Wyoming Water Development Commission) 2010: Wyoming Weather Modification Pilot Project. Wyoming, USA: Wyoming Water Development Commission.

Yoo, C., Na, W., Cho, E., and Chang, K.-H., 2022: Evaluation of cloud seeding on the securement of additional water resources in the Boryeong Dam Basin, Korea. J. Hydrol., 613(B), 128480, doi:10.1016/j.jhydrol.2022.128480.

Yu, D., Shi, P., Shao, H., Zhu, W., and Pan, Y., 2009: Modelling net primary productivity of terrestrial ecosystems in East Asia based on an improved CASA ecosystem model. Int. J. Remote. Sens., 30(18), 4851-4866.

Zhang, Z., Craft, C. B., Xue, Z., Tong, S., and Lu, X., 2016: Regulating effects of climate, net primary productivity, and nitrogen on carbon sequestration rates in temperate wetlands, Northeast China. Ecol. Indic., 70, 114-124.

Zhdanko, V. A., 1965: Scientific basis of development of regional scales and their importance for forest fire management. Contemporary Problems of Forest Protection from Fire and Firefighting; Melekhov, IS, Ed, 53-86.

모델링을 통해 살펴본 인공강우의 생태보호 효과

나우영 동아대학교 건설시스템공학과 조교수 wna92@dau.ac.kr

Ⅰ. 생태보호의 필요성과 인공강우에 거는 기대
Ⅱ. 인공강우의 생태 활성도 증진 효과 평가 방법
Ⅲ. 댐유역 적용 사례
Ⅳ. 제언 및 결론

식물 생태계는 생장활동을 통해 상위 소비자들에게 에너지원을 제공함과 동시에 대기 중의 탄소를 흡수하여 온실효과를 저감시키는 데에 기여한다. 그러나 적절한 수준의 수분이 공급되지 않는다면, 광합성이 제대로 작동하지 않아 기대만큼의 효과를 얻기 힘들다. 이에 대한 해결 방안으로 인위적으로 강수를 증대시켜 토양수분 상태를 향상시키는 인공강우가 고려될 수 있다. 인공강우의 생태계 활성 효과는 인공강우-생태 결합 모델링을 통해 1차적으로 평가할 수 있다. 국립기상과학원 연구팀의 연구 결과, 인공강우는 보령댐유역의 연간 식생의 활성도를 어느 정도 높일 수 있는 것으로 나타났다. 또한 그 효과는 식생의 활성화가 시작되는 봄철에 좀 더 큰 것으로 확인되었다. 추가적인 분석에서는 유역의 산림이 발달할수록 인공강우의 식생 활성 효과가 두드러지는 것으로 나타났다. 이러한 연구 결과들은 향후 인공강우 발생 전략 및 정책 수립시 부분적으로 기여할 수 있을 것이며, 궁극적으로는 기후위기 시대 우리나라의 산림 생태계를 보호하는데 일조할 것으로 기대된다. ■

“ 가뭄은 산림, 습지와 같은 식생 생태계의 생존에도 심각한 영향을 끼친다. ”

Ⅰ. 생태보호의 필요성과 인공강우에 거는 기대

일반적으로 생태계는 생물적 요소와 비생물적 요소가 서로 계층화되어 연결된 지구상의 동역학적 시스템을 말한다. 생물적 요소는 생산자(producer), 소비자(consumer), 분해자(decomposer)로 구성된다. 식물은 대표적인 생산자이다. 광합성을 통해 빛 에너지를 화학에너지로 전환시키면서 에너지원을 생산한다. 소비자는 주로 초식동물과 육식동물을 일컬으며, 생산자가 만드는 유기물을 통해 생을 유지한다. 물론 육식동물은 초식동물을 통해 에너지를 얻는 경우가 더 많다. 분해자에는 균류가 있으며, 생물의 사체와 유기물을 분해하여 무기물로 변환시킨다. 이러한 생물적 요소의 활동을 빛, 온도, 공기, 물, 토양과 같은 비생물적 요소가 돕는다. 이 중 생산자의 역할을 하는 식생은 가장 기본적인 요소로서 생태계 전체의 기반을 맡고 있으며, 그러다 보니 일종의 소비자에 속하는 우리 인간 또한 식생에 의존적일 수밖에 없다.

식생 생태계에는 과유불급(過猶不及)이라는 사자성어가 무척 잘 어울린다. 식물의 상태가 좋으려면 생장 활동을 통해 유기물을 최대로 만드는 아주 적절한 조건을 만들어주어야 하는데, 이때 수분이 과하지도, 부족하지도 않게 공급되어야 하기 때문이다. 육상 식생이 집중되어 있는 산림 또는 농경지에 한정하면, 적절치 못한 수분량으로 인하여 식생이 피해를 보는 사례를 꽤 자주 마주할 수 있다. 예컨대 과도하게 수분이 부족한 가뭄 상황에서는 광합성이 제대로 작동하지 않아 넓은 지역의 식생이 괴사하기도 한다. 물이 과하게 공급되는 홍수기에는 수확량 측면에서 강도 높은 피해를 유발한다. 특히 3일 이상 침수가 이어지면 벼가 죽기 시작해 농사를 완전히 망치는 것으로 알려져 있다. 이 중 우리나라에서는 주로 가뭄에 의한 식생 피해가 두드러졌다.

가뭄은 수자원 확보 문제를 야기할 뿐만 아니라, 산림, 습지와 같은 식생 생태계의 생존에도 심각한 영향을 미친다. 가뭄이 심해져 토양수분이 부족해질 경우, 식생의 광합성 작용이 정상적으로 진행되지 않아 생존에 위협을 받게 된다(Reich et al., 2018). 또한 탄소 흡수 능력의 감소, 산불 발생 증가, 나무의 사망률 상승, 생

> “식생의 활성도를 높일 수 있는 방안으로 인공강우가 고려될 수 있다.”

물권-대기 상호작용의 손상 등 이차적인 피해를 초래하면서 육상 생태계에 물리적 스트레스를 가한다(van der Molen et al., 2011). Meir et al.(2008)의 아마존 열대우림 탄소 수지 분석에 따르면, 가뭄 기간 동안 탄소 흡수량이 감소하였고, 이는 순일차생산량(Net Primary Production, NPP)의 감소로 이어졌다. 또한, 글로벌 탄소 플럭스 네트워크(FLUXNET)의 관측 결과, 가뭄 조건에서 식물의 생장이 크게 저해된다는 점이 확인되기도 하였다(Schwalm et al., 2010).

식생의 활성도를 높일 수 있는 방안으로 인공강우가 고려될 수 있다. 인위적으로 증가된 강우는 넓은 지역의 토양수분을 향상시킨다. 인공강우에 의한 토양수분의 증가는 식생의 탄소순환에 긍정적인 영향을 미칠 것임이 충분히 예상되나, 아직까지 그 효과를 공학적으로 검토한 사례는 드물다. 강수, 토양수분과 식생 활성화 사이의 상관관계가 검증되었고(Kong et al., 2020), 특히나 최근 수문 및 탄소순환을 동시에 모의할 수 있는 다양한 수문-식생 결합모형이 제시되었음에도 인공강우의 식생 활성화 효과는 여전히 미지인 상태이다. 이에 본 고에서는 모델링에 기반하여 인공강우가 식생의 활성도에 미치는 영향을 살펴본 연구사례를 소개하고자 한다.

II. 인공강우의 생태 활성도 증진 효과 평가 방법

1. 모델링 프레임워크

인공강우에 의해 생태 활성도가 어느 정도 증진될지에 대한 평가는 기본적으로 모델링에 기반한다. 항공 및 지상 인공강우 실험에 의한 총일차생산량(Gross Primary Production, GPP) 등 식생 활성지표의 증가량을 지상 및 위성을 이용하여 직접적으로 측정하는 방법이 가장 직관적이며 정확하다고 할 수 있겠으나 아쉽게도 현재 국내의 실정으로는 해당 연구의 실행이 어렵다. 또한, 식생이 분포하는 공간은 매우 넓기 때문에, 지점 단위의 실험 결과를 참고할 수는 있겠으나 유역 또는 지역 단위의 분석이 동반되어야 불확실성을 줄일 수 있다. 이에 대부분의 국내

“ 인공강우-생태 결합 모델링은 인공강우 모의와 식생성분 변화 모의로 구분됨 ”

외 연구에서는 인공강우의 발생 상황을 수치모델링을 통해 모의하고, 모의된 인공강우가 식생에 미치는 영향을 또다른 모델링을 통해 평가하였다(Yoo et al., 2024). 즉, 두 차례의 모델링이 결합되어야 하며, 본 고에서는 이를 인공강우-생태 결합 모델링이라고 하겠다.

인공강우-생태 결합 모델링의 전체적인 흐름은 당연하게도 두 부분으로 나뉜다. 인공강우를 모의하는 과정과 인공강우에 의한 식생성분의 변화를 모의하는 과정이다. 인공강우 모의에 앞서 기상 상황을 수치모델로 재현하는 과정이 필요하다. 그 다음 응결핵에 해당하는 구름 씨앗(cloud seed)을 인위적으로 살포하여 그로 인한 강수량을 모의한다. 종국에는 수치모델링을 통해 씨앗을 살포하지 않은 경우(unseeded case; UNSD)와 씨앗을 살포한 경우(seeded case; SEED)에 대한 강수량 모의 결과를 제공한다. 그리고 UNSD와 SEED의 모의결과의 차이가 곧 인공강우에 의해 늘어난 강수량으로 볼 수 있다. 그러나 기상 시스템의 비선형적 거동, 입력 데이터의 불확실성, 구름 미세물리 및 행성 경계층 물리학에 대한 불완전한 이해 등 여러 요인으로 인해 오차가 포함될 수 있어 때로는 UNSD와 SEED 사이의 차이가 그리 크지 않은 즉, 인공강우의 효과가 작은 상황이 유발되기도 한다.

다음으로 생태모델이 구축되어야 한다. 이 과정은 특정 지역을 대상으로 하는데, 모델 구축시 필요한 검증을 용이하게 하기 위하여 통상 유역 단위로 설정한다. 모델의 구축에는 대상 지역의 기상자료, 지형정보가 입력되며, 모델의 매개변수를 추정하고 검증하는 과정이 필요하다. 대부분 모델의 경우, 대상 지역을 생태과정이 모의되는 공간적인 unit 단위로 구분하여 지역별 특성을 반영한 모델링을 수행한다. 공간 구분을 고려하여 매개변수를 추정하고, 모의된 결과가 관측치와 괴리가 있는지 다양한 평가지표를 통해 검증한다. 적절한 지표값이 계산되었으면 생태모델이 잘 구축된 것으로 볼 수 있다.

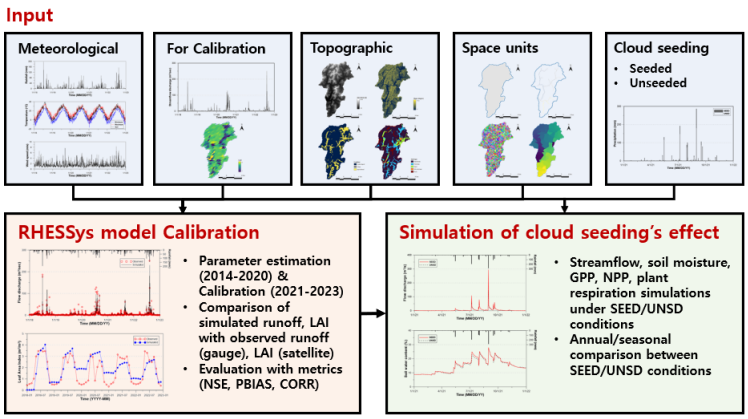
이제 인공강우 모의자료 UNSD와 SEED를 각각 구축된 생태모델에 입력하고, 다양한 식생성분들을 모의한다. 모델마다 출력하는 결과 성분들이 달라지는데, 최근 국립기상과학원에서 수행한 연구에서는 모델링 결과로써 수문성분의 경우 유

> “국립기상과학원은 WRF 모델로 인공강우 수치모의 수행”

출량, 토양수분량, 증발산량 등을 출력하고, 식생성분의 경우 GPP, NPP, 식생 호흡량 등을 얻는다. 그리고 두 cases(UNSD와 SEED 인공강우를 생태모델에 입력한 경우)의 출력 결과(여러 가지 수문 및 식생성분들)에 대한 차이를 비교하는 것으로 인공강우가 식물 생태계의 활동을 얼마나 향상시키는지 평가할 수 있다.

일례로 그림 1은 보령댐유역에 대한 인공강우-식생 결합 모델링 프레임워크이다(Yoo et al., 2024). 식생 모델로는 Regional Hydro-Ecological Simulation System (RHESSys) 모형을 선정하였으며, 모델에 대한 상세한 소개는 다음 절에서 하겠다. 먼저, 기상자료, 지형정보를 모형에 입력하고, 모의가 이루어지는 단위 unit으로 전체 유역을 나누었다. 다음으로 매개변수 모형의 검보정을 수행하였다. 이때 일정 기간에 대해 수문 및 식생성분에 대한 매개변수를 가정하고, 다른 기간에 대해 모의한 결과(수문성분: 유역 출구에서의 유출량, 식생성분: 유역 평균 leaf area index)가 관측치를 잘 재현하는지를 토대로 모델 구축의 적정성을 판단하였다. 모형의 구축이 완료되었으면, UNSD, SEED 모의자료가 모형에 입력되고, 식생 활성도의 지표가 될 수 있는 토양수분량, GPP, NPP 등의 성분을 모의하였다. 마지막으로 두 cases의 결과를 비교함으로써 인공강우의 효과를 정량화하였다.

그림 1. 보령댐유역 대상 인공강우-식생 결합 모델링 과정(Yoo et al., 2024)

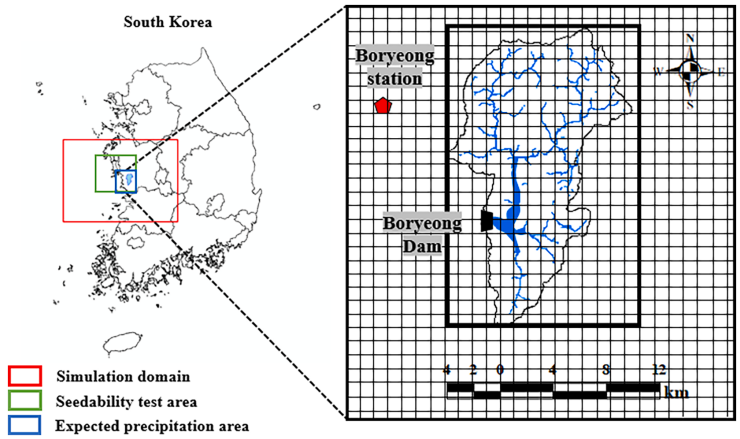


2. 인공강우 수치모의자료의 처리

국립기상과학원에서는 범용성이 큰 기상모델로 알려진 Weather Research and Forecasting(WRF) 모델을 통해 인공강우의 수치모의를 수행하고 있다. WRF 모

“ 인공강우 모의 자료를 생태 모델에 입력할 때, 3차원 자료를 1차원 시계열로 변환 ”

그림 2. 보령댐유역 대상 WRF 모델 인공강우 모의 도메인 및 격자 정보(Yoo et al., 2022)



델에서 출력되는 UNSD, SEED 자료는 (시간)×(위도)×(경도)의 3차원 배열로 구성된다. 통상 매시간 강우 모의가 이루어지며, 일반적인 수치모의와 같이 모델링 도메인(domain)이 설정되고, 그 도메인은 수 ㎞ 정도 크기의 단위격자로 세분화되어 인공강우 모의자료가 생산되는 형태이다.

인공강우 모의자료를 생태 모델에 입력할 때에는 3차원 모의자료를 1차원 시계열로 변환하는 전처리 과정이 필요할 때도 있다. 그 이유는 수치모델링 결과(인공강우 모의자료)는 격자형 자료이지만 일부 생태 모델(집체형 모형)에서는 대상 유역에 대한 면적평균 강수량을 입력자료로 받아들이기 때문이다. 참고로 Yoo et al. (2024)에서 활용한 RHESSys 모형의 경우, 격자형 또는 면적평균된 단일 모의치를 모두 받아들일 수 있다. 그러나 Yoo et al. (2022)에서 활용한 Precipitation Runoff Modeling System(PRMS) 모형은 격자자료를 입력자료로 받아들일 수 없다. 그림 2는 Yoo et al. (2022)에서 2018년과 2019년의 인공강우를 모의하는데 사용된 도메인과 격자 정보를 보여준다. 219㎞×159㎞ 크기의 직사각형 지역이 전체 도메인이며, 단위격자의 해상도는 3㎞×3㎞이다. 도메인 내 격자들 중 보령댐 유역의 경계 내부에 있는 격자에 대한 수치모의 결과가 매 단위시간마다 평균치로 계산되어 입력자료로 사용되었다.

> “일반적인 수문 모형은 식생의 생장에 따른 탄소 순환을 모의 못함”

3. 생태수문모형(Ecohydrological Models)

일반적인 수문모형(hydrological models)은 식생의 생장에 따른 탄소의 순환을 모의하지 못한다. 반대로 생태모형(Ecological models)은 토양 및 식생에서의 유기물 순환 모의에는 특화되어 있으나 물의 순환 모의가 어려운 한계가 있다. 생태수문모형은 두 모형의 특징을 모두 포함한다. 즉, 생태수문모형은 수문순환을 구성하는 유출, 증발산, 토양수분 등의 수문성분과 식물의 생지화학적 과정을 구성하는 토양 및 식생에서의 탄소 및 질소 등 유기물의 이동을 두루 모의할 수 있다. 표 1에서는 주로 사용되는 생태수문모형의 특징을 정리했다. 원활한 연구의 수행을 위해서는 토양 및 식생에서의 탄소, 질소 순환 및 식물의 생지화학 과정, 유출, 증발산 등 수문모의가 가능한 모델이 필요하다. 또한, 프로그램 접근성이 확보되고(오픈소스), 국내 적용 사례가 있고(모형 구축의 용이성), 최근까지도 활발하게 활용되고 있는지도 중요하다. 여러 모형들 중 VISIT과 SWAT 모형은 수문 및 생태성분의 모의에 적용된 사례가 있었지만(Schmalz and Fohrer, 2009; Ito and Inatomi, 2012), 주로 둘 중 한 가지 순환에 특화한 것으로 확인되며, TOPOG_IRM, BEPS-TerrainLab, tRIBS-VEGGIE 등은 수문 및 식생성분에 대한 모의가 가능하나 국내 적용 사례의

표 1. 대표적인 생태수문모형들의 특징 비교

모델명	기능	개발국가 및 문헌	프로그램 접근성	최근 적용 사례	우리나라 적용 여부
RHESSys	토양 및 식생에서의 탄소, 질소 순환 및 식물의 생지화학 과정, 유출, 증발산 등 수문모의	미국 Tague and Band (2004)	오픈소스	O	O
TOPOG_IRM	식생에서의 탄소 순환, 식물의 생지화학 과정 및 유출, 증발산 등 수문모의	호주 Hatton et al. (1992)	확보 어려움	X	X
BEPS-TerrainLab	토양 및 식생에서의 탄소, 질소 순환 및 식물의 생지화학 과정, 유출, 증발산 등 수문모의	캐나다 Govind et al. (2009)	확보 어려움	O	X
tRIBS-VEGGIE	토양 및 식생에서의 탄소, 질소 순환 및 식물의 생지화학 과정, 유출, 증발산 등 수문모의	미국 Ivanov et al. (2008)	개발기관요청 필요	O	X
VISIT	토양 및 식생에서의 탄소 순환 및 식물의 생지화학 과정 특화	일본 Ito (2008)	오픈소스	X	O
SWAT	유출, 증발산 등 수문모의에 특화	미국 Arnold et al. (2012)	오픈소스	O	O

“ 인공강우의 식생 증진효과 평가시 RHESSys이 적절 ”

부족, 프로그램 접근성이 낮은 점이 단점으로 작용함을 알 수 있다.

인공강우의 식생 증진효과 평가가 목적이라면 RHESSys이 가장 적절한 것으로 보인다. RHESSys 모형의 가장 큰 장점은 수문과정과 식생과정 사이의 상호작용(토양층 내 물의 이동이 식생의 생지화학적 과정에 미치는 영향과 식생의 생장이 수문과정에 미치는 영향)에 대한 세밀한 모의가 가능하다는 것이다(Tague and Band, 2004). 식생특성과 토지피복에 따라 수문모의 결과 또한 민감하게 달라질 수 있다는 점을 고려하여 보다 면밀한 수문-식생 결합모의가 가능하다. 또한, 모의가 이루어지는 지역을 5개 규모의 공간 unit으로 구분함으로써 모의에 대한 오차 및 불확실성을 효과적으로 줄일 수도 있다. 식생특성을 고려한 물리기반 모의가 격자기반으로 이루어지기 때문에 경험공식에 의존하는 SWAT과 같은 모형에 비해 정확도가 높은 편이기도 하다. RHESSys 모형은 오픈소스 모형이며, 웹페이지(https://github.com/RHESSys/RHESSys/wiki)에서 코드와 매뉴얼 등이 제공된다. 더욱이 국내 소규모 산림유역에 다수의 적용 사례가 있어 모형 매개변수의 검보정에 참고할 수도 있다(김은숙 외, 2007; 신형진 외, 2012). 다양한 공간규모(0.1㎢의 아주 작은 지역에서부터 60,000㎢ 정도)에서 수문, 식생, 토양, 수질 성분의 모의가 가능하다. 보다 자세한 RHESSys에 대한 정보는 Chen et al. (2020)을 참고하길 바란다.

Ⅲ. 댐유역 적용 사례

1. 보령댐 유역에 대한 생태보호 효과

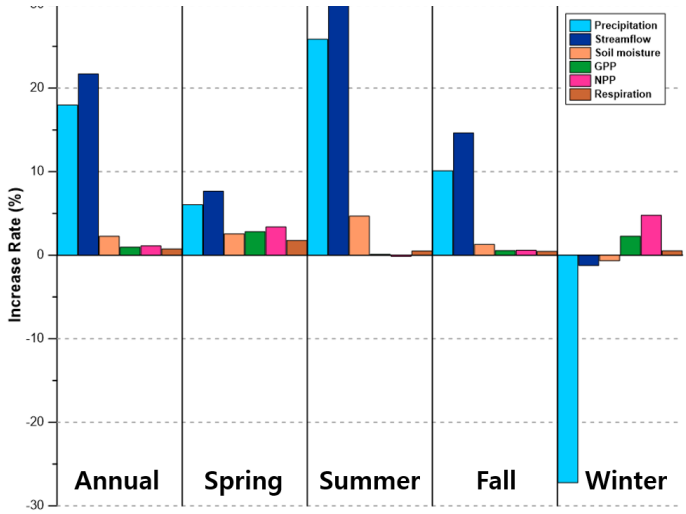
상기 프레임워크를 토대로 인공강우로 인한 보령댐유역의 식생 활성도 증진 정도를 평가하였다. 먼저, 2021년에 대해 WRF 모델링을 수행하여 UNSD, SEED cases의 강수량 시계열을 모의하였다. 그 결과, UNSD case의 2021년 총 강수량은 1081.5㎜이었으며, SEED의 연강수량은 인공강우 연간 수치모의 결과, 2021년 총 강우량의 약 18%가 인공강우에 의해 증우된 것으로 나타났다. 이는 현재까지 국외

“ 봄철 인공강우의 증가율과 유사하게 유출, 토양수분, GPP, NPP가 증가하여 인공강우 효과가 가장 크게 나타남 ”

에서 수행된 인공증우 사례 중에서도 많은 양의 증우를 발생시킨 수준임이 확인된다(Griffith et al., 2009; Acharya et al., 2011).

인공강우가 수문 및 식생순환 과정에 미치는 영향을 종합적으로 평가하기 위하여 식생성분의 연간 및 계절별 증가율을 비교하였다(그림 3). 증가율은 UNSD 대비 SEED 결과의 비율을 의미한다. 전반적으로 GPP, NPP, 식생 호흡량이 증가함에 따라 인공강우는 식생의 활성도를 높이는 역할을 하는 것으로 확인되었다. 연간 증가율은 강수 및 유출이 가장 큰 것으로 나타났으며, 다음으로 NPP, GPP 등 식생성분이 뒤따랐다. 계절별 증가율 산정 결과, 식생의 활성도 측면에서는 GPP와 NPP 모두 봄철에 가장 증가율이 큰 것으로 나타났다. 즉, 인공강우에 의해 증가한 봄철 토양수분이 식생 활성도의 증가로 이어진 것으로 판단할 수 있다. 특히 다른 계절에 비해 봄철에는 인공강우의 증가율과 유사한 정도로 유출, 토양수분, GPP, NPP의 증가가 발생하여 인공강우의 효과가 평균적으로 가장 큰 것으로 나타났다. 식생활동이 활발해지기 시작하는 봄철에 인공강우의 효과가 가장 높다는 점에서 의미가 있다.

그림 3. 인공강우에 의한 2021년 보령댐유역의 연간 및 계절별 식생성분의 증가율

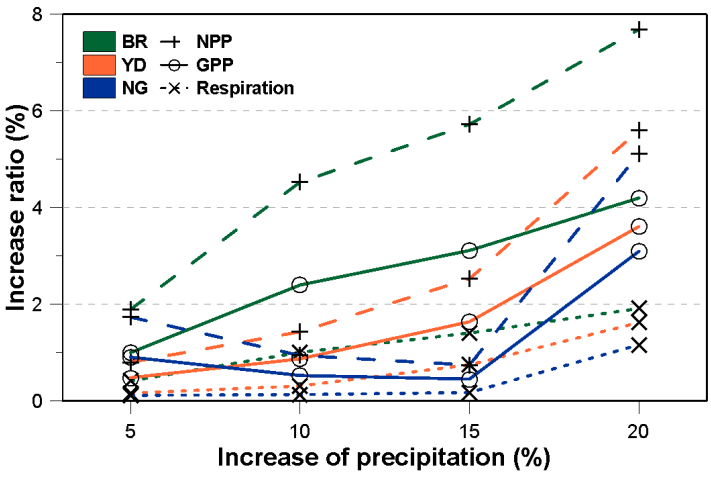


2. 유역의 산림 특성에 따른 효과 차이

댐유역별로 산림 특성은 모두 다르다. 예를 들어 보령댐유역은 우리나라의 댐유역 중 상당히 작은 면적(163.6㎢)을 차지하는 편이지만 산림이 차지하는 비율이 83.7%로 높은 편이다. 이렇듯 유역의 산림 특성에 따른 인공강우의 식생 활성효

“ 대부분의 식생 성분은 인공강우 발생이 늘어나면서 증가율이 상승 ”

그림 4. 2020-2023년 인공강우 발생에 따른 보령댐(BR), 용담댐(YD), 남강댐(NG) 세 댐유역의 식생변수 증가율 비교



과 차이를 분석하기 위하여 보령댐유역과는 다른 특성을 가지는 용담댐, 남강댐 유역에 대해서도 인공강우-식생 모델링을 적용해보았다. 용담댐유역의 전체 면적 930.0㎢ 중 산림은 79.8%, 남강댐유역 2,285㎢ 중 78.1%를 산림이 차지한다. 즉, 남강댐유역은 광역규모로 면적이 매우 큰 반면, 타 댐유역에 비해 산림의 비율과 종류가 높은 생산성을 기대하기 어려운 조건을 지닌다. 이러한 차이가 인공강우의 식생 활성 효과 차이로 이어질 수 있다.

이번에는 서로 다른 유역규모 또는 산림 특성을 가지는 세 댐유역에 대해 인공강우의 수문, 식생 증진 효과를 평가하였다. 2020-2023년 동안 인공강우에 의한 증우가 5, 10, 15, 20% 발생하는 시나리오에서 연간 식생성분의 증가율을 댐유역별로 산정하여 비교하였다(그림 4). 대부분의 식생성분은 인공강우 발생이 늘어나면서 증가율이 상승하는 경향을 보였다. 식생의 활성도를 판단할 수 있는 GPP와 NPP의 증가율은 보령댐, 용담댐, 남강댐 유역 순으로 두드러졌다. 이는 공교롭게도 전체 유역면적 중 산림이 차지하는 비율의 순서와 같다. 식생성분 중 인공강우에 의해 가장 크게 증가하는 것은 NPP로 나타났으며, GPP, 식생호흡량 순이었다. 식생

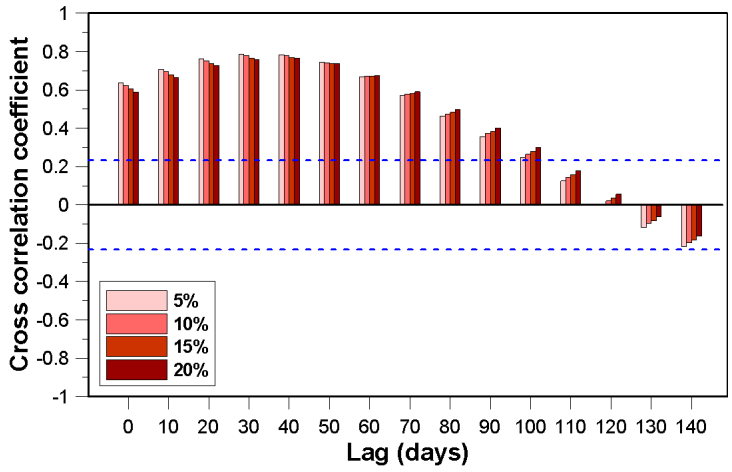
> “인공강우로 식생 활성도를 높이려면 산림비율, 구성, 목재 종류 등을 고려하는게 유리”

활동에 의해 순수하게 발생하는 1차생산량 즉, 산림이 대기 중의 탄소를 흡수하는 양이 인공강우에 의해 가장 큰 영향을 받았다는 점은 의미하는 바가 크다. 또한, 다른 댐유역과 다르게 남강댐유역의 경우, 인공강우로 인한 강수량 증가율이 5%에서 15%로 늘어날수록 GPP와 NPP의 증가율이 감소하는 경향을 보이기도 하였다. 이는 반드시 광역규모의 유역에 인공강우를 발생시킨다고하여 그에 상응하는 정도의 식생 활성도 증진을 기대하지 못할 수도 있다는 바를 시사한다. 즉, 인공강우에 의해 식생 활성도를 높이는 전략으로 유역의 규모보다는 산림의 비율, 구성, 목재의 종류 등을 고려하는 편이 유리할 수도 있겠다.

3. 시간 지연되어 나타나는 인공강우의 효과

일반적으로 인공강우의 식생 활성화 효과는 지체되어 나타나는 것으로 알려져 있다. 강수가 토양내부로 흡수되어 식물에 전달되기까지 충분한 시간이 확보되어야 하기 때문이다. 이와 관련하여 선행되는 인공강우에 의해 식생의 활성도가 어느 정도의 시간 지연을 두고 증대되는지를 교차상관분석을 통해 확인할 수 있다. 교차상관분석은 두 시계열 사이의 시차를 늘려가며 상관계수를 산정하는 통계분석의

그림 5. 2020-2023년 보령댐유역의 90일 누적 강수량과 1개월 지속 GPP 사이의 시간 지연 상관계수 correlogram



“ 인공강우-식생 결합 모델링을 위해 관측 기반 연구, 대상 지역의 공간 규모에 따른 모델링 프레임워크 구상이 필요하다. ”

한 종류로, 상관계수가 높을수록 선행 인자가 후행인자에 미치는 영향이 큰 것으로 본다. 예시로써 보령댐유역에 대하여 현재 시점의 90일 누적 강수량(5, 10, 15, 20% 증우 cases)과 10×N(N=1,2,3,...)일 지연된 GPP 사이의 교차상관분석을 수행하였다(그림 5). 그림 5에서 파란 점선은 T-Test 신뢰구간을 의미하며, 상관계수의 절대값이 신뢰구간을 초과하면 통계적 유의성이 있다고 판단할 수 있다.

분석 결과, GPP는 인공강우 발생 30-40일 후에 가장 큰 영향을 받고, 그 영향은 약 90-100일까지 지속되는 것으로 나타났다. 즉, 인공강우 발생 한 달 후에 식생의 활성도가 최대로 증대되는 시점으로 기대할 수 있으며, 영향의 지속성은 약 3개월 정도인 것이다. 다른 식생성분에 대한 분석 결과도 크게 다르지 않으며, 지체시간은 비교적 일관적인 것으로 확인되었다.

Ⅳ. 제언 및 결론

인공강우-식생 결합 모델링을 수행하며 얻은 교훈은 크게 세 가지이다. 첫째, 관측에 기반한 연구의 필요성이다. 저자가 수행한 연구는 말 그대로 모델링일뿐이다. 모델링의 중요성을 폄하하려는 것은 전혀 아니나 모델링이 가치를 가지려면, 그 결과를 지지하는 실측 기반의 연구가 동반되어야 한다. 모델링을 통해서는 전반적으로 인공강우가 식생의 활성도를 높이는 역할을 하며, 그 효과는 유역의 식생특성에 밀접한 관계가 있고, 기대되어지는 타이밍은 1-3개월 지체되어 나타난다는 유용한 정보를 얻었다. 이제는 인공강우가 발생하면, 모델링에 기반한 결과가 실현되는지 확인하는 절차가 필요하다. 대관령, 기상청, 김포공항 등 인공강우 실험에 필요한 여러 인프라가 구축되어 있는 것으로 알고 있다. 산림 내 식생지표관측장비와 연계한다면, 상기의 우려를 부분적으로 덜 수 있을 것이다.

둘째, 대상 지역의 공간 규모에 따라 가장 적합한 모델링 프레임워크를 구상하는 것이다. 현재까지의 연구에서 주로 활용한 RHESSys는 작은 규모의 산지 소유역에서부터 대규모의 유역에까지 적용될 수 있다고 명시되어 있다(Chen et al., 2020).

> “댐유역 특성에 맞는 다양한 인공강우 발생 전략이 필요하다.”

그러나 생태모델은 특성상 작은 유역에 적합한 것이 있고, 대유역에 적합한 것이 있다. 따라서 유역의 규모에 따라 다른 종류의 모델을 적용하는 것을 고려해보거나 혹은 우리나라 전체에 대해 모델을 구축하고 단위 unit을 조정하여 원하는 지역의 식생활성도를 면밀히 따져볼 수 있는 시스템을 조성하는 것을 생각해볼 수 있겠다.

마지막으로 댐유역 특성에 맞는 다양한 인공강우 발생 전략이 필요하다. 모델링을 통해 유역면적 중 산림비율이 커질수록 대체로 식생의 활성도가 인공강우에 의해 증가하는 것으로 나타났다. 샘플 수가 부족하여 더욱 면밀한 검토가 필요하겠지만, ‘유역의 규모보다는 유역면적 중 산림의 비율이나 산림 중 활엽수 비율이 인공강우의 효과에 더 큰 영향을 미친다'는 가정을 내세울 근거가 된다고 본다. 효과가 지체되는 시간도 유역 내 산림 특성에 따라 다르게 나타나 향후 인공강우 전략 및 정책을 수립할 때 이러한 점들을 고려하는 것이 필요해 보인다. 잘 짜여진 전략을 통해 궁극적으로는 기후위기 시대에 우리나라의 산림 생태계를 보호하는 데 인공강우의 역할이 더욱 믿음직 해지기를 기대한다.

참고문헌

김은숙, 강신규, 이보라, 김경하, 김준, 2007: 광릉 원두부 유역 생태수문과정의 통합을 위한 지역 생태수문 모사 시스템 (RHESSys) 의 모수화와 적용. 한국농림기상학회지, 9(2), 121-131.

신형진, 박민지, 김성준, 2012: 관측자료와 RHESSys 모형을 이용한 산림유역의 생태수문 적용성평가-설마천유역을 대상으로. 한국수자원학회논문집, 45(12), 1293-1307.

Acharya, A., Piechota, T. C., Stephen, H., and G. Tootle, 2011: Modeled streamflow response under cloud seeding in the North Platte River watershed. J. Hydrol., 409(1-2), 305-314.

Chen, B., Liu, Z., He, C., Peng, H., Xia, P., and Nie, Y., 2020: The regional hydro-ecological simulation system for 30 years: A systematic review. Water, 12(10), 2878.

Griffith, D. A., Solak, M. E., and Yorty, D. P., 2009: 30+ winter seasons of operational cloud seeding in Utah. The Journal of Weather Modification, 41(1), 23-37.

Ito, A. and Inatomi, M., 2012: Water-use efficiency of the terrestrial biosphere: a model analysis focusing on interactions between the global carbon and water cycles. J. Hydrometeorol., 13(2), 681-694.

Kong, M., Jia, Y., Gu, Y. J., Han, C. L., Song, X., Shi, X. Y., ... and Li, F. M., 2020: How film mulch increases the corn yield by improving the soil moisture and temperature in the early growing period in a cool, semi-arid area. Agronomy, 10(8), 1195.

Meir, P., Metcalfe, D. B., Costa, A. C. L., and Fisher, R. A., 2008: The fate of assimilated carbon during drought: impacts on respiration in Amazon rainforests. Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci., 363(1498), 1849-1855.

Reich, P. B., Sendall, K. M., Stefanski, A., Rich, R. L., Hobbie, S. E., and Montgomery, R. A., 2018: Effects of climate warming on photosynthesis in boreal tree species depend on soil moisture. Nature, 562(7726), 263-267.

Schmalz, B. and Fohrer, N., 2009: Comparing model sensitivities of different landscapes using the ecohydrological SWAT model. Adv. Geosci., 21, 91-98.

Schwalm, C. R., Williams, C. A., Schaefer, K., Arneth, A., Bonal, D., Buchmann, N., ... and A. Richardson A. D., 2010: Assimilation exceeds respiration sensitivity to drought: A FLUXNET synthesis. Glob. Change Biol., 16(2), 657-670.

Tague, C. L. and Band, L. E., 2004: RHESSys: Regional Hydro-Ecologic Simulation System—An object-oriented approach to spatially distributed modeling of carbon, water, and nutrient cycling. Earth Interact., 8(19), 1-42.

van der Molen, M. K., Dolman, A. J., Ciais, P., Eglin, T., Gobron, N., Law, B. E., ... and Wang, G., 2011: Drought and ecosystem carbon cycling. Agric. For. Meteorol., 151(7), 765-773.

Yoo, C., Na, W., Cho, E., Chang, K. H., Yum, S. S., and Jung, W., 2022: Evaluation of cloud seeding on the securement of additional water resources in the Boryeong Dam Basin, Korea. J. Hydrol., 613, 128480.

Yoo, C., Na, W., Chang, K. H., and Song, S. K., 2024: Ecohydrological investigation of cloud seeding effect on vegetation activity in the Boryeong Dam Basin, South Korea. Sci. Total Environ., 173598.

인공강우를 통한 미세먼지 저감 가능성

박진수 국립환경과학원 환경연구관 airchemi@korea.kr

Ⅰ. 대기질 측정을 위한 입체관측
Ⅱ. 인공강우를 통한 광역적 미세먼지 저감

국립환경과학원에서는 지상, 해상, 상공에서 대기질 입체관측을 수행하며 미세먼지 구성 성분을 분석하고 있다. 최근 미세먼지 농도는 저감 정책 및 신재생에너지 사용과 COVID-19로 인한 국제적 화석연료 사용량 감소로 인해 크게 감소하였다. 2010년도 초반에 비해 현재 대기질은 보다 개선되었다고 볼 수 있지만, 겨울철 및 봄철에 고농도 사례는 지속적으로 발생하고 있다. 이러한 경우 미세먼지 장거리 유입과 에어로졸 2차 생성으로 대기질이 급격하게 변화하게 되고, 우리 인체에 영향을 주는 물질이 증가할 수 있다. 대기질 개선의 해결책으로 인공강우를 제시할 수 있으며, 선행 연구 결과로 인공강우를 통한 미세먼지 저감 효과는 분명히 있음을 확인하였다. 인공강우 실험에는 다양한 불확도 요인이 존재하지만, 꾸준한 연구를 통해 인공강우는 광역적 미세먼지 저감에 훌륭한 수단으로 사용할 수 있을 것으로 기대된다. ■

“ 환경부는 초미세 먼지 성분측정망 43개소를 운영 중 ”

Ⅰ. 대기질 측정을 위한 입체관측

1. 지상, 해상, 상공에서의 대기질 입체관측

환경부는 2010년 국민적 관심이 많았던 미세먼지 발생 기원 및 정책효과 장기 판단을 위해 초미세먼지(이하 PM-2.5)를 측정하는 성분측정망을 공간적인 고려를 통해 배치하여 현재 총 43개소를 운영하고 있다. 측정 성분은 질량, 중금속, 이온, 탄소 성분이 있으며, 질량 측정은 여과지에 먼지를 채취하여 무게 칭량후 유량으로 나누어 구한다. 탄소 성분은 NIOSH TOT(Thermal/Optical Transmittance) 분석 방법으로 각기 다른 온도와 환경에서 유기 탄소와 원소 탄소를 선택적으로 산화하여 탄소 성분을 정량적으로 분석한다. 유기 탄소의 경우 무산소 불활성 가스(예, 헬륨) 환경에서 온도가 높아지면 휘발 또는 열분해 되고, 원소 탄소의 경우 산소가 존재하는 상태에서 열분해 되는 성질을 이용한 것이다. 이온 성분은 여과지에 포집된 먼지를 증류수로 추출하여 양이온과 음이온 이온 크로마토그래피로 정량 분석한다.

중금속 성분은 포집된 필터에 X-선을 조사하면 각 원소에 따라 고유한 파장의 X-선이 발생되는데, 그 세기를 측정하여 대기 중에 극미량으로 함유된 유해 성분 조성을 정성 및 정량 측정한다.

그림 1. 초미세먼지 성분측정망 위치

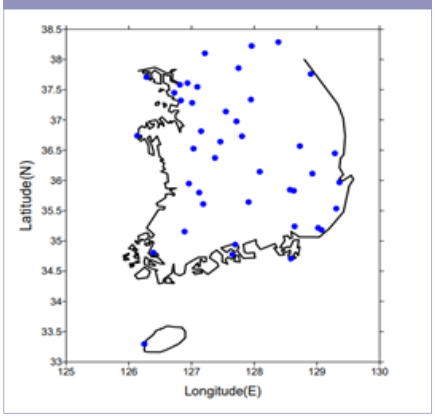


그림 1에는 성분측정망의 위치를 나타내었고, 측정망에 대한 보다 자세한 사항은 ‘대기환경측정망 설치·운영 지침(국립환경과학원, 2022)’에 설명되어 있다.

지상 측정만으로는 대기경계면(Planet Boundary Layer) 내의 오염물질 이동과 화학적 변화 이해에 대한 많은 제한점이 있어, 해상경계면 상의 오염물질 정보 파악을 위한 선박관측, 항공 기술과 실시간 분석 기술을 응용한 항공관측을 수행하고 있다. 국립기상과학원과 함께 YES-AQ(Yellow Sea air quality)를 2018년부터 수행하고 있으며, 기상관측용 선박 기상 1호에 대기질 측정 장비를 탑재하여 해

> “국립기상과학원은 기상1호 활용하여 해수면 상 대기질 관측”

수면 상의 대기질을 관측한다. 기상 1호는 총톤수 498 톤, 길이 64.3 m, 폭 9.4 m로 자동고층기상관측장비를 장착한 연구용 선박이다. YES-AQ 동안 선박에 탑재한 장비는 ToF-ACSM(Time of Flight- Aerosol Chemical Species Monitor, Aerodyne, USA), 베타선 측정기(BAM1020, MetOne., USA), 시료채취기(E-FRM, MetOne, USA)이다. 주요 분석 항목은 표 1과 같고, 그림 2는 항구에 정박되어 있는 기상 1호이다.

국립환경과학원은 19인승 항공기를 대기질 관측이 가능하도록 개조하여 계절관리제 기간인 겨울철과 오존 고농도 위험 기간인 여름철에 항공관측을 수행하고 있다. 항공기의 상세 제원은 표 2에 정리하였다. 여러 제원 중 최대이륙중량은 항공기, 관측장비, 탑승자, 연료 등 모든 중량의 합을 의미한다. 관측 목적에 따라 탑승 인원 및 탑재 장비를 선정하고 연료량을 정하며, 항공기는 최대 약 4시간 동안 비행이 가능하다.

표 1. 선박관측 탑재 장비 및 관측 요소

	Species	Instrument	Resolution
Chemical composition and mass concentration of PM	PM-2.5 mass	BAM 1020 (MetOne Ins., USA)	1 hr
	PM-2.5 sulfate, nitrate, ammonium, organics	ToF-ACSM (Aerodyne, USA)	5 min
Filter sampling	Mass, ion, carbonaceous, metal composition of PM-2.5	E-FRM (MetOne Ins., USA)	1 day

항공관측의 특성상 고농도 발생 시 정해진 시간 내 빠른 속도로 이동하며 광범위한 영역을 관측하기 위해 1 Hz 간격의 고해상도 측정 장비를 탑재한다. 입자상 물질을 관측하기 위해 UHSAS(Ultra high sensitivity aerosol spectrometer, DMT, USA), HR-ToF-AMS(High Resolution-Time of Flight-Aerosol mass spectrometer, Aerodyne, USA), SP2(Single particle soot photometer, DMT, USA)를 탑재한다. 가스상 물질을 관측하기 위해 휘발성유기화합물(VOCs) 측정은 PTR-Tof-MS(Proton Transfer Reaction-Time of Flight-Mass Spectrometry, Ionicon, Austria), 이산화황(SO_2) 측정은 CIMS(Chemical Ionization Mass Spectrometry, UCI, USA)를 사용한다. 이 외 이산화질소(NO_2), 암모

그림 2. 기상관측선 기상 1호

표 2. 항공기 제원

Category	Performance and Specifications
Fuel	2,519 L(360 kg/hr)
Maximum takeoff weight	7,765 kg
Maximum cargo capacity	1,984 kg
Cabin height / width / length	1.8 m / 1.38 m / 7.67 m
Aircraft Height / width / wing length	4.7 m / 17.6 m / 17.6 m
Maximum flight altitude (Airborne measurement maximum flight altitude)	7,620 m (≒3,000 m)
Range (Range during the airborne measurement)	2,306 km (≒900 km)
Power	AC 230 V(6 A, 50 Hz, 8 Qty.)
Maximum aboard researcher	4 persons
Code / call sign	HL5238 / Hanseo ECO

니아(NH_3), 온실가스(CO, CO_2, CH_4)를 관측할 수 있는 장비를 탑재한다. 그림 3에는 항공기와 내부 장비 배치도를 나타내었으며, 표 3에는 관측장비별 관측 요소를 표시하였다.

항공기를 활용하여 2016년 KORUS-AQ, 2018년 EMERGE, 2021년 ACCLIP 등 국제공동연구에 참석한 바 있으며, 초창기 항공관측 정보공유 수준에서 최근에는 선진국과 동일한 수준의 측정기와 운영 경험 확보를 통해 2024년에 추진한 ASIA-AQ에서는 우리나라 연구 지역을 분담하는 수준까지 발전하였다. 관측결과를 종합한 'KORUS-AQ 최종종합보고서(국립환경과학원, 2020)'에는 국외 미세먼지 유입 기여율이 44 ~ 68% 수준이며, 초미세먼지 농도 저감을 위해서는 2차 생성과 특정 고분자(C_7 이상) 방향족 화합물에 대한 연구 및 관리의 필요성을 제시한 바 있다.

지상, 선박, 항공관측을 수행하고 얻어진 자료를 통해 대기오염물질 유입 시 서해상과, 국내에서 미세먼지 농도와 구성 성분이 어떻게 변화하는지 확인할 수 있었다. Choi et al. (2024)은 관측자료와 화학수송모델을 활용하여 가을과 겨울 서해상 장거리 유입 시, 상층과 하층의 2차 생성 무기염 형성 메커니즘을 규명하였다. 겨울

그림 3. 항공관측용 항공기 B1900D(좌), 내부 장비 배치도(우)

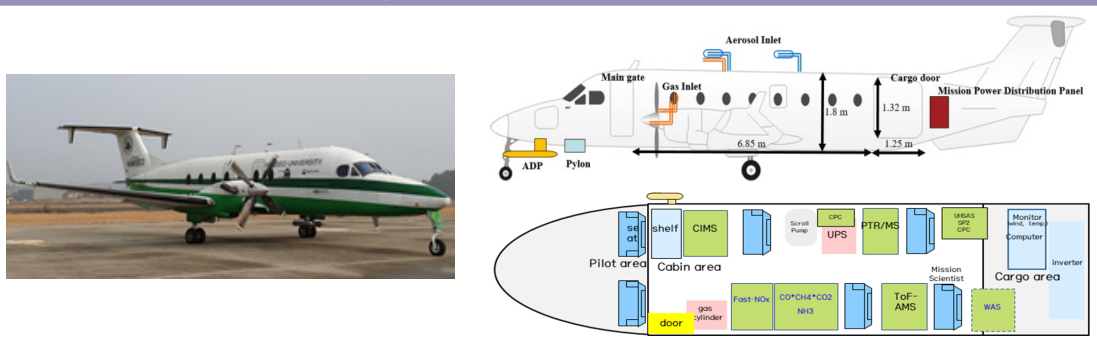


표 3. 항공기 탑재 장비와 장비별 관측 요소

Category	Instrument	Species
Gases	PTR-ToF-MS	Volatile Organic Carbons
	Off-axis ICOS	NH_3, CO, CO_2, CH_4
	CAPS	NO_2
	Chemiluminescence	Ozone
	TILDAS	HCHO
	CIMS	HNO_3, SO_2
Particles	HR-ToF-AMS	NR-PM-1.0(Organics, nitrate, sulfate, ammonium)
	UHSAS, PCAPS	Particle size distributions
	SP2	Black carbon
Meteorology and GPS	AIMMS-30(Air data probe)	Meteorology(Temp, humidity, pressure, wind speed, wind direction), GPS(latitude, longitude, altitude)

에는 상층과 하층 모두 고농도 $(NH_4)_2SO_4$와 NH_4NO_3가 유입되고, HNO_3은 우리나라의 NH_3와 반응하여 NH_4NO_3가 대량 생성되는 결과를 보였다. 가을에는 하층 유입 시 겨울 대비 높은 온도로 NH_4NO_3는 증발되고 NH_3, HNO_3는 침적과정을 거쳐 낮은 농도로 유입된다. $(NH_4)_2SO_4$는 증발하지 않고 국내로 유입된다. 이러한 생성 기작은 그림 4에 표현하였다.

입체관측 결과는 모델 입력자료 및 검증자료로 사용될 수 있다. Wong et al. (2024)은 배출량 산정의 정확도 제고를 위해 항공관측을 이용한 배출원(화력발전, 제철제강, 석유정제 등) 주변 실측정 자료와 box mass balance model을 활용하여 하향식 배출량 산출기법의 정확도를 평가하였다. 그 결과, 내삽 및 외삽 방법에 따라 SO_2 농도의 불확도는 최소 5%에서 최대 28%이고, 평균 20%의 결과를 보였다. 그리고 선행 연구에서 일반적으로 사용되

그림 4. 가을철 및 겨울철 2차 생성 무기염 생성 메커니즘(Choi et al., 2024)

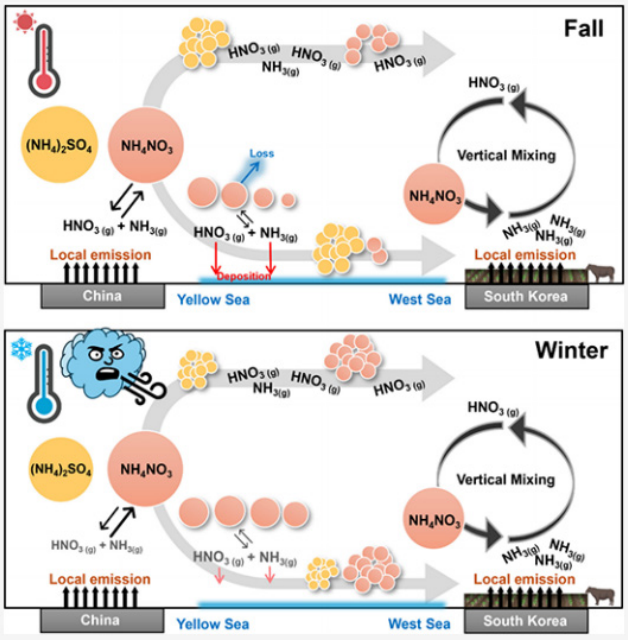
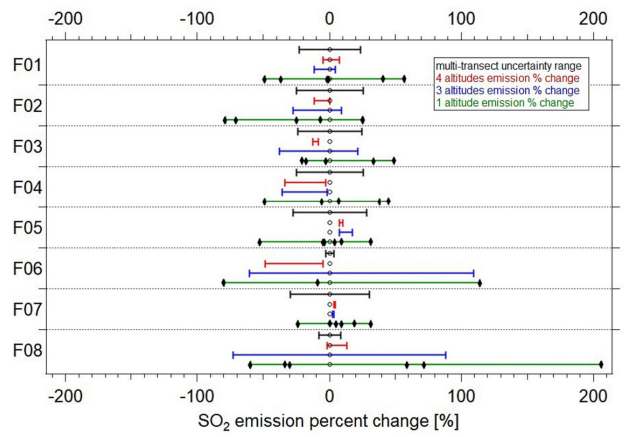


그림 5. 상향식 산출기법과 하향식 산출기법에 따른 당진 및 태안발전소의 SO_2 배출량 비교(Wong et al., 2024)



는 단일 고도 배출량 산출기법의 평균 정밀도는 47%이고 불확도가 최대 206%지만, 다중 고도 배출량 산출기법은 불확도가 20% 이내로 감소했다(그림 5). 항공관측 시, 오염물질 플룸을 지나며 농도가 높은 구간을 관측하는 경우 불확도는 더욱 감소하였다.

2. 미세먼지가 인체에 미치는 영향

미세먼지란 오염원으로부터 대기 중으로 배출되거나 발생하는 고체상 또는 액체상의 미세한 물질을 말하며, 공장, 건설 현장, 산불, 자동차 배기가스 등의 발생원에서부터 직접적으로 배출되는 1차 미세먼지와 발생원으로부터 배출된 물질이 대기 중에서 다른 물질과 화학반응을 일으키거나 자외선과의 광화학 반응을 통하여 생성된 2차 미세먼지로 나뉜다.

1차 미세먼지는 산림 지역이나 공사 현장에서 바람 또는 외부 힘에 의해 비산되는 흙먼지나 바닥 먼지, 해안 지역에서 파도치면서 발생하는 해염, 도로변 타이어 마모로 인해 발생하는 먼지, 산불 발생에서 배출되는 숯 같은 연소 입자 등 다양한 입자들로 구성되어 있다. 이와 달리 2차 미세먼지는 오염원으로부터 배출된 가스상 또는 입자상 물질이 대기 중에 화학반응 또는 광화학 반응을 통해 다른 입자로 생성된 유기물 및 무기물을 말한다. 우리나라는 편서풍에 의하여 중국에서 배출되는 대기오염물질의 장거리 이동에 의한 영향도 받으며 국토의 약 70% 가 산림으로 이루어져 있을뿐더러, 산림에서 배출되는 자연적 오염원에 이동오염원, 발전소, 산업단지 등등 다양한 인위적 오염원도 혼재되어 있어 국외 유입뿐만 아니라 국내 자체로부터 배출된 대기오염물질의 영향도 동시에 받는 것으로 나타났다(Choi et al., 2019).

> “PAHs는 인간 건강에 영향을 미치는 대기 오염 물질 중 하나이다.”

에어로졸의 주요 구성 요소인 입자상 물질(PM, Particulate Matter)은 직·간접적인 영향을 통해 기후에 영향을 미치고, 인간의 건강에 영향을 미치는 등 공중보건에 많은 영향을 주고 있다(Zhang et al., 2019). 또한 미세입자는 상당한 유해 물질을 함유하고 있어 호흡기 특히, 폐포 깊숙이 침투할 수 있기 때문에 입자직경이 작을수록 인체에 대한 위해성을 증가시킨다. 대기 중 미세먼지에 대한 인체 위해성 연구는 다양하게 수행되었다. 예를 들어 미세먼지 조성을 바탕으로 미세먼지에 함유된 다환방향족탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)는 돌연변이 유발성 및 발암성 화합물로 알려져 있으며, Cd, Pb, Hg 및 As 등의 중금속은 지적장애, 암, 신장 손상 및 신경독성 등의 인체 손상을 일으킬 수 있다(Chen et al., 2015; Liu et al., 2019). 이에 미세먼지는 함유된 성분 및 미세먼지 표면에 흡착되어 있는 성분에 따라 다양한 인체 영향을 미치게 된다. PAHs는 발암 가능성이 높고 그 발생원이 어디에나 존재하기 때문에 인간 건강에 영향을 미치는 대기 오염물질 중 하나로 알려져 있다. 대기 중 PAHs는 탄소계 연료의 불완전 연소에 의한 것으로 바이오매스 연소, 석탄 및 석유 연소 등이 주 발생원이다. 미국 환경보호청(USEPA)은 16종의 PAH를 우선순위 오염물질로 지정했으며, 세계보건기구(WHO)는 Benzo[a]pyrene 1 ng/㎥의 대기질 기준으로 설정하고 있다.

PM-2.5는 2011년 환경기준이 설정된 이후 5~6년 동안 고농도 현상이 자주 발생하고 지속시간이 길게 유지되면서 국민에게 그 어느 때보다 많은 관심의 대상이 되었으며, 많은 횟수로 언론에 노출되었다. 전 국민이 미세먼지의 위해성에 대해서는 전문가 수준의 지식을 가지게 되었다고 해도 과언은 아닐 정도이다. 그간 정부의 배출량 감소를 위한 정책, 친환경에너지로의 전환, 측정망 확대 등의 노력과 COVID-19로 인한 전 세계적인 연소량의 감소로 미세먼지 농도가 낮아지는 결과를 가져왔다. 이와 관련된 많은 논문이 중국 학자들을 중심으로 발표되고 있으며, 우리나라 전문가들도 일부 발표하고 있다. Xu et al. (2020)은 중국 우한, 징먼, 언스 3개 도시에서 코로나 봉쇄로 인한 미세먼지 농도 변화를 살펴보았고, 봉쇄 이전(2017~2019년)과 봉쇄 이후(2020년) PM-2.5 농도는 50.8 ㎍/m3(40.5%) 감소하

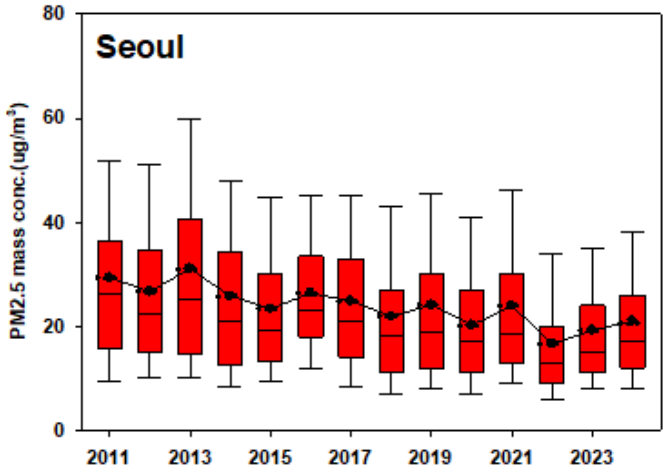
“ PM-2.5 배출원의 영향을 분리하여 동북아시아 대기질 관리에 대한 국가간협력 필요성 제기 ”

였다. Hasnain et al. (2021)에 따르면 중국 난징시는 봉쇄 이전과 이후 PM-2.5 농도 감소율이 -33.56%로 나타났다. 중국 대도시에서는 봉쇄로 인해 미세먼지 농도가 1/3 이상 감소한 결과를 보였다. 우리나라도 2020년 3월 사회적 거리 두기 이후 PM-2.5 농도는 2019년 평균과 비교하여 전국적으로 16.98 ㎍/m3(45.45%) 감소하였다(Ju et al., 2021). 특히, Kim et al. (2022)에서는 서울특별시의 2020년과 2019년 PM-2.5 생성 원인과 기상 조건에 따른 영향을 자세히 살펴보았다. PM-2.5를 생성하는 SOx, NOx, 생물성 연소, 난방, 소각 각각 -47%, -59%, -54%, -75%, -52%로 2019년에 비해 기여도가 상당히 감소하였음을 보였다.

또한, 장거리 유입에 유리한 기상 조건에서 중국의 1차 대기 오염 물질 감소로 중국 기여도가 감소하고, 우리나라에 대기 정체를 유발하는 기상 조건에서 자체 발원에 의한 기여도가 증가함을 보였다. 결과적으로 PM-2.5 배출원의 영향을 분리하여 동북아시아 대기질 관리에 대한 국가 간 협력의 필요성을 제안하였다.

전반적으로 그림 6에서 보는 바와 같이 PM-2.5 농도는 지속적으로 감소하는 추세를 보였으나, 최근 그 감소 추세는 지체되고 있으며, 고농도 사례는 매년 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 국내의 경우 초미세먼지에 대한 자료 축적 과정이 상대

그림 6. 서울 PM-2.5 성분측정망 연평균 PM-2.5 농도(㎍/m³, 2024년은 6개월 평균)



> “광역적 미세먼지 농도 감소에 탁월한 수단은 강우에 의한 세정효과”

적으로 길지 않고, 관련 통계자료가 많이 축적되지 않아 제한적인 연구가 이루어지고 있으나 향후 인체 위해성, 비용 편익 분석 등이 체계적으로 이루어 질 수 있을 것이다.

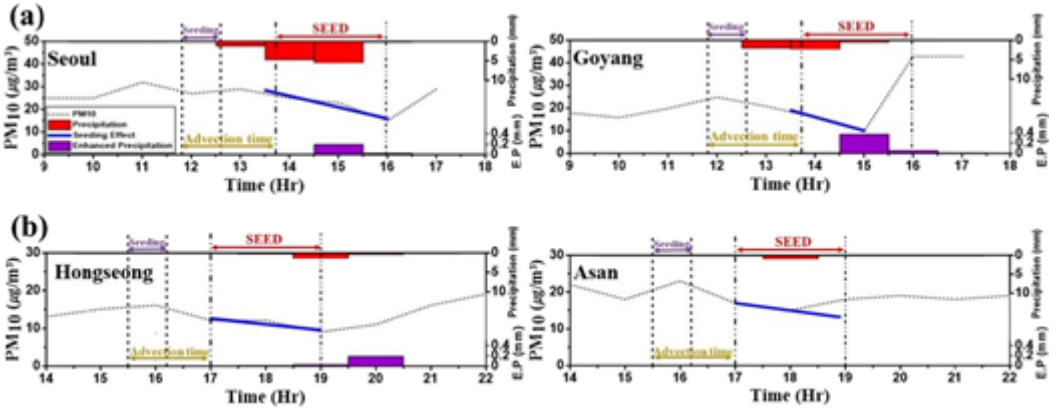
Ⅱ.인공강우를 통한 광역적 미세먼지 저감

1. 강우의 미세먼지 저감 효과

초미세먼지 농도는 앞서 설명한 바와 같이 배출량 저감 정책, 신재생에너지 사용 확대 등의 내부적 노력과 COVID-19로 인한 국제적 연소량의 감소로 낮아진 결과를 보였다. 발원지와 국내 자체 배출량 저감을 통해 미세먼지 농도를 감소시킬 수 있으나, 사회적 거리 두기 해제 이후 뚜렷한 감소세는 나타나지 않고 있다. 이를 통해 우리는 더 나아진 대기질 속에서, 이를 유지하는 방안을 찾아야 한다. 다양한 연구와 관측 결과를 통해 대기질이 급격하게 변하는 원인으로 장거리 유입과 에어로졸 2차 생성이 있으며, 대기 정체를 유발하는 기상 조건에서 고농도 사례 발생 시, 대기질 저하가 장기간 지속된다. 이러한 상황에서 광역적 미세먼지 농도 감소에 탁월한 수단은 무엇일까? 바로 강우에 의한 세정효과라 할 수 있다. Ouyang et al. (2015)는 2013년도 베이징 도심의 12개 강우 사례를 통해 미세먼지 저감 효과를 분석하였다. 강우 강도와 PM-2.5 농도의 상관관계 분석으로 결정계수는 0.668~0.974의 범위를 가짐을 보였다. 실제 농도 값은 400 ㎍/m³ 이상에서 10~30 ㎍/m³으로 감소하며 강한 역상관관계를 보였다. 이러한 자연적 강우는 20분만 지속되어도 미세먼지 농도가 크게 감소하고, 대기중 중금속 성분 또한 침전되어 감소함을 확인하였다.

최근에는 기술 발전을 통해 자연적 강우 현상을 인위적으로 조절할 수 있는 수준이 되었다. 초기에는 단순한 강우 발생과 강우량 증가의 목적으로 수행되었던 인공강우 연구가 현재에는 미세먼지 저감 효과의 수단으로 연구되고 있다. 국내 연구자들은 지속적인 연구를 통해 최근 인공강우 및 증우를 통해 대기질을 개선할 수 있음을 보였다. 임윤규 외 (2022)는 수치모델을 이용하여 인공증우에 따른 PM-10

그림 7. 실험 기간의 PM-10 농도 일변화((a) 오전 실험, (b) 오후 실험)(Ku et al., 2023)



저감 효과를 분석하였다. 수치모의 결과 1.5 mm/hr의 강우가 5시간 동안 지속될 시, PM-10 농도는 최대 22%까지 감소하고, 농도 감소 면적은 인공 증우 면적의 6.4배에 달한다. 인공증우량을 50% 수준으로 감소시켜도 저감 효과는 최대 16%까지 나타나 미미한 수준의 강우라도 넓은 범위에 유의미한 저감 효과가 나타났다. Ku et al. (2023)은 2020년 11월 1일 서해상에서 오전과 오후 2번의 인공강우 실험을 수행하고, 실제 관측 자료를 활용하여 미세먼지 농도 변화를 분석하였다. KMA/National Institute of Meteorological Sciences(KMA/NIMS) atmospheric research aircraft(NARA) 관측 결과 $CaCl_2$ 시딩 이후 강우 입자는 최소 70%에서 최대 300%가지 증가하였으며, 오전 실험을 통해 서울과 경기도 북부에 강우가 발생하였고, 오후 실험을 통해 충청도 일부 지역에서 강우가 발생하였다. 그림 7은 각 관측소의 PM-10 일변화를 나타내었으며, 두 실험에서 강우의 영향을 받은 지역에서는 PM-10 농도가 감소함을 확인할 수 있고, 이는 인공강우를 통해 미세먼지를 저감할 수 있음을 시사한다.

2. 인공강우의 상용화 가능성

Li et al. (2017)은 2008년 베이징 하계 올림픽 개막식을 원활하게 진행하기 위해 수행한 광범위 인공강우 실험의 효과를 분석하였다. 총 10개 지점에서 시딩

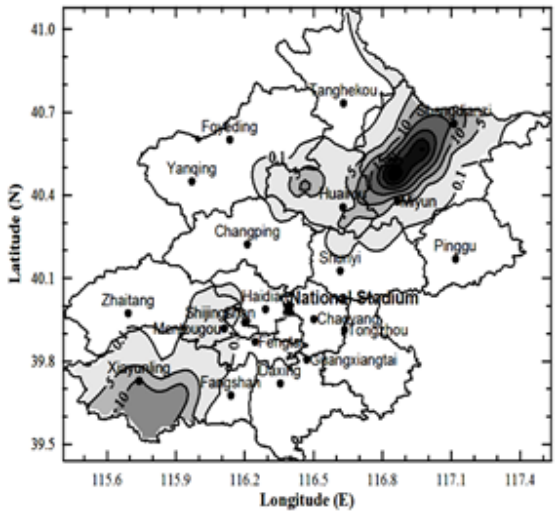
> “미세먼지 저감 위한 인공강우 실험의 원천기술 확보가 중요”

(seeding)을 수행하여 그림 8과 같이 강우 분포가 나타났다. 인공강우로 인해 목표한 행사 지역에 내려야 할 강우가 다른 지역으로 분산되어 강우가 완화되는 결과를 보였다. 지상관측소, 레이더를 통해 강우 유무를 분석한 결과, 5개 지점에서 긍정적인 효과가 나타났으며, 나머지 지점에서는 효과가 미미하였다.

인공강우를 통한 강우 발생에는 습도, 바람, 시딩량, 시딩 고도 등 다양한 요소에 의한 불확도가 존재하고 있다. 목표 지역에 높은 확률로 강우를 발생시킬 수 있도록 수치모델을 통한 모의 실험, 실제 관측을 통한 검증, 인공강우 실험 내 존재하는 불확도 평가 등 목표 지역의 강우 발생과 미세먼지 저감에 초점을 맞추어 많은 연구를 수행한다면 분명 대기질 관리 수단으로 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

소개한 연구 사례를 통해 현재 인공강우는 미세먼지 저감에 분명히 효과가 있는 긍정적 상황이며, 연구 성과가 나타나는 초기단계이므로 원천기술을 확보하는 것이 중요하다. 이렇게 연구 및 기술 확보를 도모함과 동시에 시딩 물질로 인한 강우의 산성도 변화, 그에 따른 토양 및 식생 영향, 수자원 균형 등 인위적인 기상조절로 인해 발생하는 문제점을 정확히 파악한다면 인공강우는 대기질 관리 정책에서 중요한 역할을 하고, 상용화의 단계로 나아갈 수 있을 것이다.

그림 8. 6시간 누적 강수량(mm, 2008년 8월 8일 1800 – 9일 0000 UTC(Li et al., 2017)



참고문헌

국립환경과학원, 2022: 대기환경측정망 설치·운영 지침.

국립환경과학원, 2020: 한-미 협력 국내 대기질 공동조사(KORUS-AQ) 최종종합보고서(Final Science Synthesis Report).

임윤규, 김부요, 장기호, 차주완, 이용희, 2022: 수치모델을 이용한 인공증우에 따른 PM10 저감효과 분석. 대기, 32(4), pp.341-351.

Choi, M., Park, J., Sung, M., and Ying, Q., 2024: Long-Range Transport of Secondary Inorganic Aerosol from China to South Korea. Environmental Science & Technology Letters.

Wong, G., Wang, H., Park, M., Park, J., Ahn, J. Y., Sung, M., Choi, J., Park, T., Ban, J., Kang, S., and Lee, T., 2024: Optimizing an airborne mass-balance methodology for accurate emission rate quantification of industrial facilities: A case study of industrial facilities in South Korea. Science of the Total Environment, 912, p.169204.

Choi, J., Park, R. J., Lee, H. M., Lee, S., Jo, D. S., Jeong, J. I., Henze, D. K., Woo, J. H., Ban, S. J., Lee, M. D., Lim, C. S., Park, M. K., Shin, H. J., Cho, S., Peterson, D., Song, C. K., 2019: Impacts of local vs. trans-boundary emissions from different sectors on PM2.5 exposure in South Korea during the KORUS-AQ campaign, Atmospheric Environment, 203, 196-205.

Zhang, Z., Dong, B., Li, S., Chen, G., Yang, Z., Dong, Y., Wang, Z., Ma, J., and Guo, Y., 2019: Exposure to ambient particulate matter air pollution, blood pressure and hypertension in children and adolescents: a national cross-sectional study in China. Environment international, 128, 103-108.

Zhang, Z., Dong, B., Li, S., Chen, G., Yang, Z., Dong, Y., Wang, Z., Ma, J., and Guo, Y., 2019: Exposure to ambient particulate matter air pollution, blood pressure and hypertension in children and adolescents: a national cross-sectional study in China. Environment international, 128, 103-108.

Liu, K., Wang, X., Wei, N., Song, Z., and Li, D., 2019: Accurate quantification and transport estimation of suspended atmospheric microplastics in megacities: Implications for human health. Environment international, 132, 105127.

Xu, K., Cui, K., Young, L. H., Hsies, Y. K., Wang, Y. F., Zhang, J., and Wan, S., 2020: Impact of the COVID-19 event on air quality in central China. Aerosol Air Qual. Res. 20, 915–929. [online]

Hasnain, A., Hashmi, M. Z., Bhatti, U. A., Nadeem, B., Wei, G., Zha, Y., and Sheng, Y., 2021: Assessment of Air Pollution before, during and after the COVID-19 Pandemic Lockdown in Nanjing, China. Atmosphere, 12(6), p.743.

Ju, M. J., Oh, J., and Choi, Y. H., 2021: Changes in air pollution levels after COVID-19 outbreak in Korea. Science of the Total Environment, 750, p.141521.

Kim, Y., Jeon, K., Park, J., Shim, K., Kim, S. W., Shin, H. J., Yi, S. M., and Hopke, P. K., 2022: Local and transboundary impacts of PM2.5 sources identified in Seoul during the early stage of the COVID-19 outbreak. Atmospheric Pollution Research, 13(8), p.101510.

Ouyang, W., Guo, B., Cai, G., Li, Q., Han, S., Liu, B., and Liu, X., 2015: The washing effect of precipitation on particulate matter and the pollution dynamics of rainwater in downtown Beijing. Science of the Total Environment, 505, pp.306-314.

Ku, J. M., Chang, K. H., Chae, S., Ko, A. R., Ro, Y., Jung, W., and Lee, C., 2023: Preliminary results of cloud seeding experiments for air pollution reduction in 2020, Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 59(3), pp.347-358.

Li, H., Dai, Y., Wang, H., and Cui, J., 2017: Artificial seeding effects of convective clouds on the opening day of Beijing 2008 summer olympics. Journal of Geoscience and Environment Protection, 5(4), pp.118-138.

인공강우를 통한 우박억제 효과

김경익 경북대학교 명예교수 kimke0927@naver.com

Ⅰ. 미국, 태국의 우박억제
Ⅱ. 국내의 우박피해 사례
Ⅲ. 우박억제 실험조건과 우박탐지
Ⅳ. 우박억제의 개념과 방법
Ⅴ. 요약과 제언

초대형세포 뇌우(supercell thunderstorm)에서 형성되는 우박은 빙정(氷晶) 표면에 차가운 물방울이 얼어붙어 지상에 떨어지는 지름 5㎜ 이상의 얼음덩이이다. 우박은 농작물, 차량, 가옥에 큰 피해를 주며, 사람이 맞으면 다치거나 심지어 생명을 잃을 수 있다. 최근 연구에 의하면 지구온난화로 인해 기온이 상승하면 뇌우빈도가 5-20% 증가한다. 일부 국가들이 우박억제를 위해 기상기술 조절기술을 적용하고 있으며, 또한 지속적인 연구를 수행하고 있다. 한국도 매년 우박에 의한 피해가 보고되고 있다. 따라서 우박억제를 위한 인공강우가 요구된다. ■

“ 인공강우 통해 우박 피해를 35-50% 감소 가능 ”

Ⅰ. 미국, 태국의 우박억제

우박은 인공강우를 통해 완전히 제거할 수 없지만, 우박으로 인한 피해를 35-50% 정도 감소시킬 수 있다. 우박을 감소시킬 목적으로 인공강우를 시도하는 국가는 미국, 캐나다, 러시아, 중국, 태국 등 여러 나라가 있다. 그러나 실제로 대외에 발표된 관련 기술 보고서나 논문은 상당히 제한적이다. 여기서는 미국과 태국의 사례에 대해 주로 기술되어 있다. 미국 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)의 연례 위험기상 보고서에 의하면 2023년에 우박은 6,962회 발생했다. 이 수치는 2022년의 4,436회에 비하면 무려 57%나 증가한 것이다. 보고서의 우박통계는 우박이 가장 많이 내린 텍사스주를 포함한 5개 주만 고려한 것이다. 보험회사 「State Farm」이 2022년 우박피해로 지불한 보험료는 35억 USD이며, 이는 2021년에 비해 10억 USD 더 증가한 금액이다.

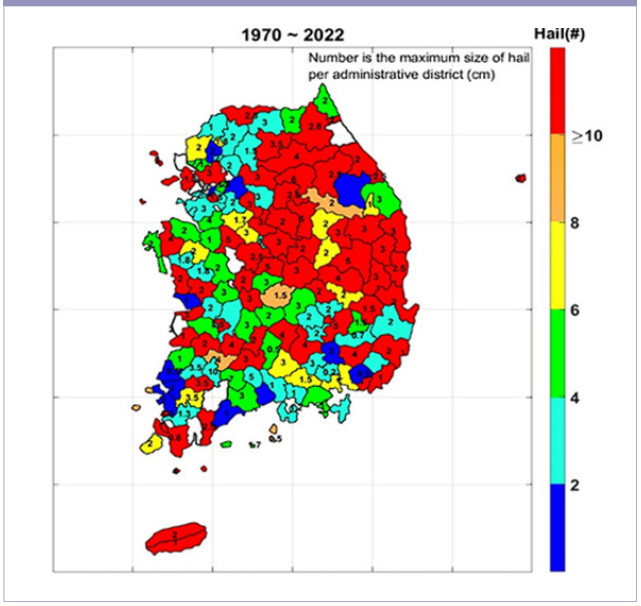
미국은 1972년부터 인공강우를 통해 우박억제를 위한 실험을 수행하였다(Changnon, 1977). 여기에 기술된 우박억제에 관한 내용은 노스다코타(North Dakota) 주의 사례이다. 해당 내용은 기상조절 프로젝트 담당 기상학자인 Mark Schneider의 발표자료(2023년 10월)를 기초로 하고 있다. 노스다코타의 서부 지역은 여타 지역과 비교하면 대체로 더 건조하며 우박의 발생빈도가 더 높다. 따라서 주의 서부 지역에서 오랫동안 구름 씨뿌리기 프로그램이 운영되었다. 구름씨 뿌리기 비용은 참여하는 군(county)과 주 정부(state government)가 분담하고 있다. 최근 몇 년 동안 프로젝트 비용의 약 2/3는 군이, 나머지 1/3은 주 정부가 지원하였다. 노스다코타가 구름조절과제(North Dakota Cloud Modification Project: NDCMP)를 통해 추정한 목표지역의 10년 평균 연간 피해 절감 액수는 375만 USD이다. 그러나 이 수치는 목초(건초)나 당시 일반적인 작물(사탕 무, 감자, 콩, 카놀라, 렌즈콩 등)은 포함하지 않고 있다. 주 전체적으로 매년 우박억제를 위한 인공강우로 약 9,700만 USD를 절감할 수 있다고 추정하고 있다. 연간 투자금액은 80만 USD이다. 투입 인력은 31명이며, 항공기 5대가 투입되고, 지역 공항 4곳이 참여하여 우박지도를 작성한다.

“ 아시아에서 우박의 빈도는 감소하지만, 크기는 유지 ”

태국은 1969년부터 인공강우를 시작하였으며, 특히 우박억제용 인공강우 현업 및 기술 연구 개발을 하고 있다. 전국에 7센터, 28대 전용 항공기가 현업 운영 중이며, 로켓, 지상 연소기, 드론 등을 보유하고 있다. 2022년 기준 투자금액은 연간 약 935만 USD이다. 투입 인력은 총 741명(정부 공무원 311명, 정부 직원 347명, 상근직원 83명)이다. 우박억제를 위해 기상 레이더를 전국 11개소(S-밴드 고정 6개소, C-밴드 이동 5개소)와 상층 대기의 연직 관측 및 모니터링을 위해 라디오미터를 전국 12개소에서 운영하고 있다. 우박억제를 위한 인공강우는 3-5월에 수행하고 있다.

중국기상청은 1958년에 항공기를 이용하여 인공증우를 처음 시도하였다(CMA, 2018). 현재 가뭄완화(drought relief), 우박억제, 수자원 부족완화를 위해 인공강우를 하고 있다. 투자금액은 밝히고 있지 않으나, 우박억제를 위해 인공강우를 운남성과 다수의 성에서 매년 50만 평방키로미터에 걸쳐 실시하고 있다. 우박탐지에는 기상 레이더를 이용하며, 우박억제를 위해 연기 발사체 로켓(smoke projectile rocket)을 이용하고 있다.

그림 1. 남한의 우박위험지도(Kim et al., 2023)



Ⅱ. 국내의 우박피해 사례

기후변화 시나리오에서 우박에 관한 Kim et al.(2023)의 연구에 의하면 아시아에서 우박의 빈도는 감소하지만, 우박의 크기는 그대로 유지되고 있다. 이 시나리오는 아시아 대륙에 대한 평균적 기술이다. 우박을 동반하는 뇌우는 중규모 기상 현상으로 지형, 한랭전선의 통과, 대기 불안정 정도에 따라 크게 바뀔 수 있다. 기상청이 수집한 자료에 의하면 전국의 우박 횟수는 2020년 15회, 2021년, 41회, 2022년 10회이다. 이 자료는 우박빈도가 대

기의 기상상태에 따라 크게 변할 수 있음을 보여준다. 그림 1은 1970-2022년 동안 기상청과 신문기사를 참고하여 작성한 남한의 우박위험지도(hail risk map)이다(Kim et al., 2023). 각 행정구역에 있는 숫자는 53년 동안(1970-2022년) 보고된 우박의 최대크기(㎝)이며, 색은 우박의 빈도를 나타낸다.

그림 2. 우박과 손상된 사과(2023.10.26; 참잘농장 제공)

최근 농민들의 우박피해에 대한 인식 개선으로 보험 가입이 증가하는 추세다. 그림 2는 강원도 영월에서 2023년 10월 26일 저녁 1시간 동안 4~5차례 내린 구슬 크기의 우박과 그로 인해 손상된 사과를 보여준다. 이 때, 보험회사가 과수원을 방문하여 피해 규모를 조사하였다(햇살담은, 2023.10.31.). 호남일보(2023.7.26.)에 의하면 전라남도는 5월 4-6일 내린 호우·우박 피해를 입은 4,347 농가에 복구비 52억 원을 지원할 것을 확정했다고 보도했다. 그림 3은 농식품부가 2017년 5~6월 우박피해 9,540 농가에 재해복구비로 124억 400만 원을 지원한 사례이다. 최근 기후변화로 인해 농작물 피해가 증가하면서 정부가 지원하는 농작물 피해 보험 가입을 적극적으로 권장하고 있다. 커져 가는 피해를 줄이고 정부 지출을 줄이기 위해 우박에 의한 농산물 피해를 감소시킬 수 있는 인공강우에 의한 우박억제가 필요하다.

그림 3. 우박피해에 대한 재해복구비 지원(2017)

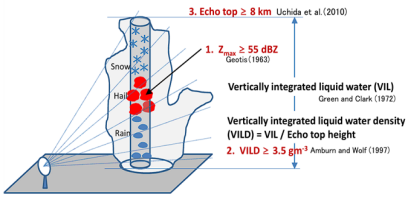
Ⅲ. 우박억제 실험조건과 우박탐지

우박억제를 위해 인공강우를 실시할 경우 기본적으로 안정도지수(SI, LI, KI), CAPE, CIN, 가강수량(PW), 상대습도(RH), 풍속(WS) 등을 분석한다. 표 1은 태국에서 우박억제를 위한 인공강우 시에 적용하는 대기 조건과 레이더 조건이다. 이

> 구름 성장과 구름의 미세물리 과정의 지역적 특성은 기후환경에 매우 민감

조건의 기준은 지역과 인공강우 시행 방법에 따라 약간의 차이가 있을 수 있다. 그림 4는 일본 기상청이 제시한 레이더 조건으로 표 1과 차이가 있다. 그 이유는 태국은 열대지역이고, 일본은 중위도 온대 지역으로 기후환경의 차이 때문이다. 구름 성장과 구름의 미세물리 과정의 지역적 특성은 기후환경에 매우 민감하다.

그림 4. 우박억제 실험조건(Ishihara, 2004)



우박 못(hail spike)은 플레어(Flare) 또는 TBSS(Three Body Scatter Spike)라고도 하며, 기상 레이더의 PPI 영상에서 큰 우박으로 인해 나타나는 허상(artifact)이다(Wilson and Reum, 1988). 그림 5는 TBSS 형성과정의 모식도이다. 그림 5에서 레이더에 발사된 전파 중 일부는 우박(C)에서 후방산란되어 경로 R을 따라 이동하여 레이더가 수신한다. 그러나 우박에서 산란 전파의 일부는 지표로 향하여 그림 5에 표시된 지표의 타원 영역(회색)에서 반사된다. 지면에서 반사된 전파의 경로 중 가장 짧은 것이 2h이고, 가장 긴 것은 2r이다. 지면에서 반사된 전파는 우박에서 재 반사되어 경로 R을 따라 레이더에 도달한다. 이 경우 레이더는 지면에서 반사되어 수신한 전파를 경로 R의 연장선에 있는 멀리 떨어져 있는 물체에 의한 에코로 잘못 인식하여 플레어 에코가 형성된다. 그림 5에서 길이가 2r인 청색 부분이 플레어 에코이다.

그림 5. TBSS 형성의 모식도(Kurimski, 2010)

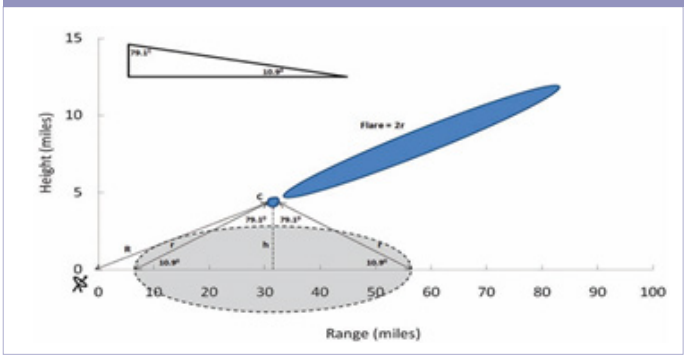


그림 6은 레이더가 고도각 7.9°를 유지한 상태에서 관측한 PPI이다. 그

표 1. 우박억제 실험조건

대기 조건	레이더 조건
SI 〈 −1.0 LI 〈 −1.0 KI 〉 30 CAPE 〉 2000 J/㎏ CIN 〈 −400 PW 〉 3.8 ㎝ RH 〉 70% (〈 10,000 ft) WS 〈 10 kts (〈 15,000 ft)	Maximum radar reflectivity factor: dBZ 〉 45 Top of maximum dBZ ≥ 6 ㎞ Cloud top 〉 6 ㎞ Probability of hail 〉 0.2 VIL ≥ 25 ㎏/㎡ Volume 〉 10

> “플레어 에코의 강도는 우박의 크기, 수농도, 습한 정도, 중심부의 규모에 따라 다르다.”

림 6에서 적색 영역은 우박의 중심부(hail core)이며, 그 높이는 지상에서 7.2㎞이다. 그리고 우박 중심에서 방위각 355°방향으로 길게 뻗어있는 것이 플레어 에코이며, 그 길이는 우박의 중심부에서 약 82㎞이다. 그림 6에서 레이더의 위치는 플레어 에코의 방향과 정반대이다. 플레어 에코의 강도는 우박의 크기, 수농도, 우박의 습한 정도(wetness), 우박 중심부의 규모에 따라 달라진다.

그림 7은 우박 발생 시에 이중편파 레이더로 관측한 (a)레이더 반사도 인자, (b)수상체 분류의 RHI 영상이다. 그림 7(a)는 수평 편파 레이더 반사도 인자의 RHI 영상이다. S-밴드 레이더의 경우 반사도 인자가 53-55㏈Z 이상이면 우박이 존재하는 것으로 고려한다(Ryzhkov and Zrnic, 2019). 이 기준에 따르면그림 7(a)에서 수평거리 50㎞ 근처에서 높이 약 10㎞까지가 우박이 존재할 가능성이 큰 지역으로 추정된다. 그림 7(b)의 수상체 분류에 의하면 수평거리 50㎞ 근처에서 높이 약 3-9㎞까지 우박이 존재할 가능성이 큰 지역이 진한 노란색(HA)으로 표시되어 그림 7(a)보다 좀 더 구체적이다. 그림 7(b)는 우박탐지에 있어서 이중편파 레이더 관측에 기반한 수상체 분류가 우박탐지에 매우 탁월함을 보여준다. 큰 수적은 LD, 이슬비는 DR, 비는 RA, 호우는 HR, 비와 우박은 HR, 우박은 HA, 싸락눈은 GR, 습한 얼음은 WI, 마른 얼음은 DI, 빙정은 CR, 수지상 빙정은 DI로 표시되어 있다.

그림 6. 레이더 PPI에서 우박(적색)과 플레어 (Kurimski, 2010)

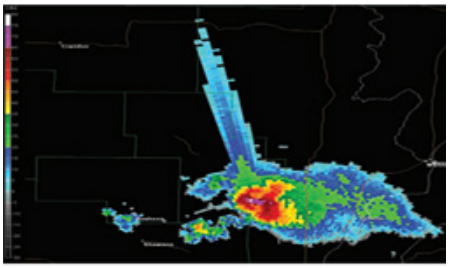
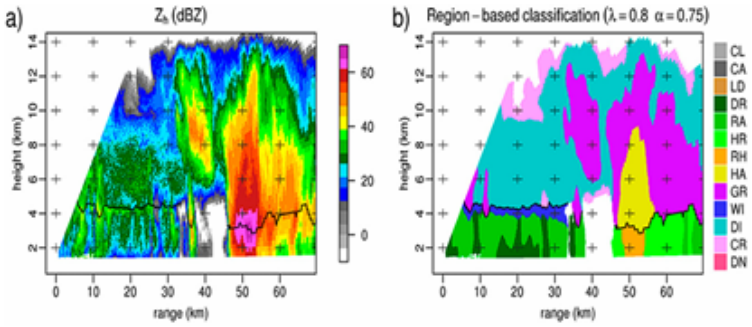


그림 7. 이중편파 레이더의 RHI, (a) 레이더 반사도 인자, (b) 수상체의 분류(Bechini and Chandrasekar, 2015)



“ 우박 크기 감소는 유익한 경쟁, 조기강우, 궤적 하향조정의 세 방법이 있다. ”

Ⅳ. 우박억제의 개념과 방법

우박은 과냉각수, 초기우박 씨앗(싸락눈, 동결된 수적), 그리고 성장하는 우박을 중력에 맞서 지탱할 수 있는 충분히 큰 상승기류의 영역에서 형성된다. 우박억제는 성장 가능한 우박의 크기를 감소시키는 방법으로 다음 3가지가 있다(Boe et al.,2004).

(1) 유익한 경쟁(Beneficial competition): 과냉각수가 있는 영역에 빙정핵을 뿌리면, 빙정의 수가 상당히 증가한다. 이때 자연빙정과 인공빙정이 성장에 필요한 과냉각수를 두고 서로 경쟁한다. 이 과정에서 빙정 전체에 대해 과냉각수가 재분배가 된다. 그 결과 빙정핵 살포 후에 우박 크기는 빙정핵을 살포 안 한 경우에 비해 더 작다.

(2) 조기강우(Early rainout): 이 방법은 우박의 성장을 지속할 수 없을 정도로 상승기류가 약하고, 과냉각수가 있는 영역인 대류탑(convective turret)에 구름씨뿌리기를 통해 강수발달을 촉진하여 조기강우를 유도한다. 조기강우로 인해 우박의 성장에 필요한 과냉각수를 감소시키는 것이 목적이다.

(3) 궤적 하향조정(Trajectory lowering): 상승기류가 약하고 과냉각수가 적은 구름 하부에 빙정핵을 살포하면 우박씨앗(hail embryo)의 성장이 촉진된다. 이렇게 성장한 우박은 자연적인 우박보다 크기가 작게 되며, 약한 상승기류 때문에 지면을 향해 낙하한다.

제시한 세 방법 중 현재 가장 많이 사용하는 것은 구름의 미세물리 과정을 고려한 ‘유익한 경쟁’이다. 우박억제를 위한 시딩 물질로 요오드화은(AgI)이 주로 사용된다. 그 이유는 AgI를 과냉각수 영역에 살포하면 새로 빙정을 형성하거나 과냉각수적을 동결시켜 후에 우박 씨앗의 수를 증가시킬 수 있기 때문이다. AgI 시딩은 지상 연소기, 지상에서 로켓 및 대공포, 항공기를 이용하여 구름의 과냉각수가 있는 부분에 살포한다. 지상 로켓이나 대공포는 중국과 러시아에서 주로 이용되고 있다.

Ⅴ. 요약과 제언

우박억제를 위한 인공강우를 효율적으로 수행하기 위해서 다음 사항을 제언한다.

(1) 우박에 대한 각종 자료를 이용하여 남한 전역에 대한 우박지도와 피해 지도를 작성하고, 우박억제 실험이 필요한 지역을 분석한다.

(2) 우박을 생성하는 초대형 세포 뇌우의 발달 조건 분석 및 표 1과 같은 대기 조건의 기준값을 정하고, 우박억제 실험에 적용한다.

(3) 기상 레이더 관측자료를 이용하여 표 1과 같은 레이더 관측 모수의 기준값을 정하고, 우박억제 실험에 적용한다.

(4) 레이더 반사도 인자의 PPI와 RHI에서 53㏈Z 이상 영역과 Flare 에코를 분석한다.

(5) 우박억제 시에 AgI 살포는 지상 연소기와 항공기를 이용하는 것이 적절하다.

(6) 유사한 두 개의 초대형 세포 뇌우(seeding, no seeding)를 선정하여 우박억제 실험 결과를 비교·평가한다.

(7) 이중편파 레이더 모수에서 산출한 수상체 분류는 과냉각수와 우박 탐지에 매우 탁월함을 보여준다. 따라서 기상과학원이 효율적인 인공증우와 우박억제 실험을 위해서 연구용 X-밴드 편파 레이더를 도입해야한다.

참고문헌

Bechini, R. and Chandarsekar, V., 2015: A semisupervised robust hydrometeor classification method for dual-polarization radar applications. J. Atmos. Ocean. Tech., 32, 22-47.

Boe, B. et al., 2004: The Weather modification ssociation's response to the National Research Council's report titled, "Critiucal issues in weather modification research. 51pp.

Changnon Jr. S. A., 1977: On the status of hail suppression. Bull. Amer. Met. Soc., 58, 20-28.

CMA(Chaina Meteorological Administration), 2018: 60 years of weather modification in China: Source:China Meteorological News Press 13-09-2018.

Ishihara, M., 2004: A Case study on hail detection in thunderstorms as an application of polarimetric Radar (일본 기상청 발표 자료).

Kim, M. H., Lee, J., and Lee, S.-J., 2023: Hail: Mechanisms, Monitoring, Forecasting, Damages, Financial Compensation Systems, and Prevention. Atmosphere 2023, 14, 1642. https://doi.org/10.3390/ atmos14111642.

Ryzhkov, A. V. and Zrnic, D. S., 2019: Radar polarimetry for weather radar observations. Springer, 486pp.

Wilson J. B. and Reum, D., 1988: The flare echo: reflectivity and velocity signature. J. Atmos. Ocean. Tech., 5, 197-205.

인공강우 항공관측의 필요성 및 전망

엄준식 부산대학교 대기환경과학과, 부산대학교 환경연구원 jjunum@pusan.ac.kr

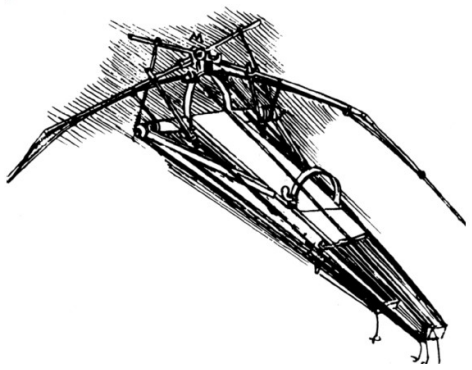
I. 새의 날갯짓에서 인공강우까지: 항공과 기상 관측의 역사
II. 인공강우 실험과 항공기
III. 대한민국 기상청 항공기와 인공강우 실험 현황
IV. 전망 및 제언

기후변화로 인한 물 부족과 재해성 가뭄이 심화되면서, 인공강우 기술은 수자원 확보와 재해 완화를 위한 필수적 수단으로 주목받고 있다. 특히, 미국의 SNOWIE 프로젝트는 항공 관측을 통해 인공강우의 효과를 실시간으로 검증함으로써 그 실효성에 대한 의구심을 해소했다. 이 연구는 항공기를 활용한 정밀한 구름 미세물리 관측과 체계적 실험 설계가 인공강우의 성공을 결정짓는 핵심 요소임을 입증했다. 대한민국 기상청 국립기상과학원은 나라호와 무인 항공기를 도입하여 인공강우 실험을 수행하고 있으며, 구름 입자와 강수 입자의 변화를 실시간으로 관측하고 분석하고 있다. 항공 관측은 지상과 위성 관측의 한계를 보완하며, 구름 내부의 미세물리 과정을 이해하고 인공강우의 효과를 정량적으로 평가하는 데 필수적이다. 이러한 기술은 단순히 강수량을 증가시키는 것에 그치지 않고, 지속 가능한 수자원 관리와 재해 기상조절 기술로 확장될 수 있다. 따라서, 항공 관측 기반 인공강우 기술의 지속적인 연구와 발전은 대한민국이 기후변화 시대에 대응하고, 국제적 기상 연구에서 주도적 역할을 수행하는 데 중요한 기반이 될 것이다. ■

“ 비행 기술 혁신은 1799년 양력과 추력의 분리 개념이 제시되면서 시작 ”

I. 새의 날갯짓에서 인공강우까지: 항공과 기상 관측의 역사

그림 1. 레오나르도 다빈치가 설계한 오르니톱터 (Introduction to flight, Wikimedia Commons)



인류는 고대로부터 하늘을 나는 것에 대한 열망을 품어왔다. 이러한 열망은 고대 그리스 신화에 등장하는 다이달로스와 이카로스의 이야기에서 잘 드러난다. 다이달로스는 감금된 크레타 섬의 미궁에서 탈출하기 위해 깃털과 밀랍으로 날개를 만들어 비행에 성공했지만, 그의 아들 이카로스는 태양에 너무 가까이 날아올라 밀랍이 녹아 바다로 추락하고 말았다. 이 신화는 인간이 새를 모방한 비행의 가능성과 한계를 동시에 상징적으로 보여준다. 이러한 상상력은 수천 년간 이어졌으며, 르네상스 시대에 이르러 레오나르도 다빈치는 새의 날갯짓을 기계적으로 재현하는 오르니톱터(그림1)를 설계했다. 그의 정교한 스케치와 설계는 비행에 대한 과학적 접근의 출발점이 되었으나, 당시 기술적 한계로 인해 실용화되지는 못했다.

18세기에 접어들면서 비행 기술은 새로운 국면을 맞이했다. 1783년, 몽골피에 형제는 뜨거운 공기를 이용한 열기구를 개발하여 인류 최초의 유인 비행을 성공시켰다. 같은 해, 자크 샤를은 수소 기체의 부력을 이용한 수소 기구로 또 다른 형태의 비행을 실현했다. 두 실험 모두 인간이 하늘을 비행할 수 있다는 가능성을 입증했으나, 열기구는 방향 제어가 어려웠다. 열기구는 동력을 갖추지 않았지만, 인간이 하늘로 올라갈 수 있다는 가능성을 입증했다. 이는 대기 관측 기술의 비약적인 발전으로 이어졌다. 1749년에는 연에 온도계를 매달아 상층 대기의 온도를 측정했으며(그림 2), 19세기에는 열기구를 이용해 고도별로 기압, 온도, 습도를 정밀하게 측정하는 실험이 이루어졌다.

이 시기에는 열기구를 활용한 고고도 비행이 가능했으나, 기상 조건과 기술적 한계로 인해 많은 제약이 있었다. 예를 들어, 1862년 영국의 과학자들은 약 11km 상공까지 열기구로 비행하며 대기 관측을 수행했지만, 극한의 추위와 저산소 상태로

생명의 위협을 받았다. 이러한 위험성에도 불구하고, 이 시기의 열기구 비행은 상층 대기의 구조와 특성을 이해하는 데 중요한 기여를 했다.

그림 2. 1800년대 후반, 기상관측을 위한 연 사용 모습 (NOAA: https://www.noaa.gov/media/digital-library-photo/pl23wea01100jpg)

비행 기술의 혁신은 1799년 조지 케일리가 양력과 추력의 분리 개념을 제시하면서 시작되었다. 케일리는 이를 바탕으로 현대 비행기의 기본 구조를 설계했으며, 그의 연구는 비행체가 공기 중에서 균형을 유지하며 비행할 수 있는 원리를 과학적으로 설명했다. 19세기 후반, 독일의 오토 릴리엔탈은 글라이더를 개발하여 2000회 이상의 비행을 성공적으로 수행하며 동력 비행의 기반을 마련했다.

특히, 라이트 형제는 릴리엔탈의 연구를 바탕으로 비행 원리를 정교하게 다듬었다. 1903년 12월 17일, 그들은 가솔린 엔진을 장착한 플라이어 1호로 인류 역사상 최초의 동력 비행에 성공했다. 라이트 형제는 비행 중 양력과 항력을 정량적으로 분석하고, 삼축 제어 시스템을 도입해 비행기의 안정성과 조정성을 확보했다. 이는 현대 항공 기술 발전의 기틀을 마련했으며, 항공기를 활용한 대기 관측 시대의 개막을 알렸다.

20세기 초반에는 항공 기술의 급속한 발전과 함께 항공기를 이용한 대기 관측이 본격적으로 시작되었다. 1930년대에는 라디오 송신기를 장착한 라디오존데가 개발되어 실시간으로 기온, 습도, 기압을 측정할 수 있었다. 이는 기상 예측의 정확성을 크게 향상시켰으며, 항공기를 활용한 고층 대기 관측은 더욱 정교해졌다. 제2차 세계대전 동안에는 레이더 기술이 급격히 발전했고, 전후에는 사운딩 로켓과 인공위성이 도입되어 성층권과 중간권까지 대기 관측의 범위가 확장되었다.

항공 기술의 발전은 대기 관측의 정밀도를 획기적으로 높였으며, 이는 인공적으로 기상 현상을 조절하려는 시도로 이어졌다. 1946년, 미국의 Vincent Joseph Schaefer(1906-1993)는 드라이아이스를 이용해 과냉각된 구름 속에서 빙정을 생

“ 기상조절 기술은 기후변화와 물 부족 문제에 대응하는 핵심적인 과학적 해결책으로 평가 ”

성하는 데 성공하며 인공강우의 가능성을 처음으로 입증했다(Schaefer, 1946). 곧이어, Bernard Vonnegut(1914-1997)는 요오드화은을 사용한 실험에 성공하며 인공강우 기술이 실용화의 길로 접어들었다(Vonnegut, 1947). 이후 Project Cirrus, Project Stormfury, ASCII 프로젝트, SNOWIE 프로젝트와 같은 대규모 연구가 진행되었으며, 항공기를 이용한 구름 씨뿌리기(cloud seeding)와 첨단 관측 장비를 결합해 강수량 증가, 우박 억제, 안개 소멸 등 다양한 기상조절 기술의 과학적 기작이 규명되었다.

이처럼 새의 날갯짓에서 시작된 인간의 비행에 대한 열망은 항공 기술의 혁신으로 이어졌고, 오늘날에는 항공기를 활용한 인공강우 실험을 비롯한 첨단 기상조절 기술로 발전했다. 항공 관측과 기상학은 현대 과학과 기술의 중요한 축으로 자리매김하였으며, 인공강우, 우박 억제, 안개 소멸과 같은 기상조절 기술은 기후변화와 물 부족 문제에 대응하는 핵심적인 과학적 해결책으로 평가받고 있다.

II. 인공강우 실험과 항공기

항공기를 이용한 인공강우 실험은 구름에 인위적으로 응결핵이나 빙정핵을 투입하여 강수량을 증가시키려는 시도로, 강수량 부족, 가뭄 해소, 우박 억제, 안개 소멸 등의 기상조절 목표를 달성하는 데 중요한 역할을 한다. 항공기를 이용하면 구름의 높이와 위치에 정밀하게 접근할 수 있을 뿐만 아니라, 실험의 효과를 실시간으로 관측할 수 있다. 역사적으로 여러 국가에서 수행된 항공기를 사용한 대규모 프로젝트들은 인공강우 기술의 발전과 실용화에 기여했으며, 기상조절의 과학적 기반을 마련했다(Flossmann et al., 2019; Rauber et al., 2019).

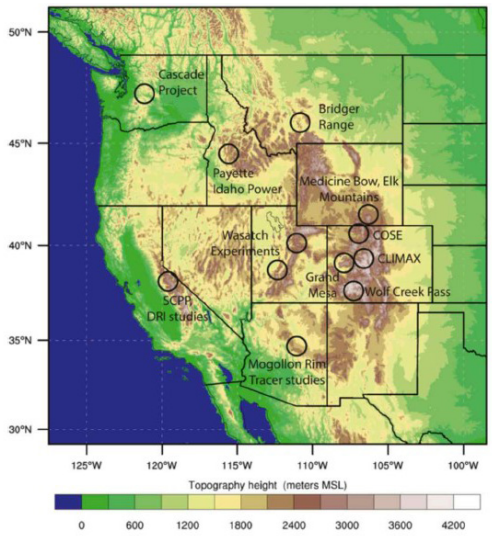
항공기를 이용한 인공강우 실험은 미국 서부의 대부분 주와 기타 건조 지역에서 겨울철 산악 기상조절의 실험으로 활발히 진행됐다. 2003년에 발간된 미국 국립연구위원회(NRC) 보고서(NRC, 2003)는 “계획된 날씨 조절 노력이 효과적이라는 확실한 과학적 증거는 여전히 없다”라고 하였지만, 물에 대한 수요가 증가하고 있으

> “Project Cirrus는 항공기를 이용한 최초의 체계적인 인공강우 실험”

며, 구름 씨뿌리를 통해 추가로 물을 생산할 경우 발생하는 잠재적 비용 대비 이익이 크기 때문에 물 부족 지역을 중심으로 실험이 진행되었고(그림 3), 최근 들어 결실을 맺고 있다(Rauber et al., 2019).

Project Cirrus(1947~1952)는 항공기를 이용한 최초의 체계적인 인공강우 실험으로, 미국 General Electric 연구소와 미군이 협력하여 수행했다(Huschke, 1963; Schaefer, 1968). 이 프로젝트는 제2차 세계대전 이후 과학적 호기심과 군사적 및 실용적 필요에 의해 시작되었으며, 드라이아이스(고체 이산화탄소)와 요오드화은(AgI)을 이용해 강수를 유도하는 기술의 가능성을 검증하고자 했다. 실험은 주로 뉴멕시코주와 플로리다 해안 상공에서 진행되었다. 연구팀은 B-17 폭격기를 이용해 고도 4,500m에서 6,000m에 위치한 적란운과 층적운에 접근하여 씨뿌리기를 수행했다. 드라이아이스는 구름 속에서 급격한 냉각 효과를 일으켜 과냉각 상태의 물방울을 빙정으로 전환하고, 요오드화은은 자연 빙핵과 유사한 결정 구조로 작용하여 빙정을 생성하는 역할을 했다. 관측은 항공기에 장착된 온도계, 습도계, 구름 입자 관측 기기를 통해 수행되었고, 지상에서는 레이더 시스템과 시각 관측을 병행했다. 1947년 10월 13일, 뉴멕시코에서 드라이아이스를 살포한 결과, 구름에서 빙정이 형성되고 강수 현상이 발생했다. 이는 인공강우의 가능성을 최초로 과학적으로 입증한 사례로 기록되었다. 그러나 후속 실험에서는 기상 조건과 구름의 물리적 특성에 따라 결과가 일관되지 않음을 확인했다. 일부 실험에서는 강수 유도가 실패하거나 예측과 다른 결과가 나타났다. Project Cirrus는 인공강우 연구에서 씨뿌리기 물질의 선택과 기상 조건의 중요성을 부각시켰으며, 후속 연구가 해결해야 할 과제를 명확히 했다. 이 프로젝트는 인공강우 기술의 초기 토대를 마련했으

그림 3. 1960년부터 2019년까지 서부 미국에서 구름 씨뿌리를 통해 눈 덮임(snowpack)을 증대시키는 산악 강수 강화의 타당성을 평가하기 위해 수행된 주요 연구 프로젝트의 위치(Rauber et al., 2019)



“ASCII 프로젝트는 요오드화은 씨뿌리기 효과를 정량적으로 분석하기 위해 진행”

며, 항공기를 활용한 기상조절 실험의 시작을 알렸다.

Project Stormfury(1962~1983)는 열대성 저기압(태풍)의 강도를 인공적으로 약화시키기 위해 미국 해군 연구소와 국립해양대기청(NOAA)이 주도한 기상조절 연구 프로젝트였다(Willoughby et al., 1985). 태풍은 매년 막대한 인명과 재산 피해를 초래하기 때문에, 이를 약화시키기 위한 체계적인 연구가 필요했다. 실험은 카리브해와 대서양에서 발생하는 태풍(허리케인)을 대상으로 수행되었다. 연구진은 태풍의 눈벽(eye wall)에 요오드화은을 살포하여 새로운 눈벽을 형성하고, 기존 눈벽의 강도를 약화시키는 방법을 시도했다. 씨뿌리기는 P-3 오리온과 C-130 허큘리스 항공기를 사용해 수행되었으며, 항공기에는 레이더, 라이다, 온도 및 습도 센서가 장착되었다. 요오드화은은 항공기에서 연소시켜 생성된 입자가 태풍의 상승기류에 정확하게 살포되었다. 1963년과 1969년 태풍 Beulah와 Debbie를 대상으로 한 실험에서 최대 풍속이 약 10~30% 감소하는 현상이 관측되었다. 이는 태풍의 눈벽 재구성으로 인한 강도 약화로 해석되었다. 그러나 실험의 재현성이 부족하고, 자연 태풍의 변동성과 인공 씨뿌리기의 효과를 명확히 구분하기 어려웠다. 기술적 한계와 더불어, 기상조절에 대한 윤리적 논란으로 인해 1983년에 프로젝트는 종료되었다. 그럼에도 불구하고, Project Stormfury는 태풍 연구와 기상조절 기술 발전에 중요한 경험과 교훈을 남겼다. 특히, 태풍 내부 구조와 기상 역학에 대한 이해를 높이는 데 기여했다.

ASCII 프로젝트(AgI Seeding Cloud Impact Investigation)는 2012~2014년에 겨울철 산악 지역의 강설량 증가를 목표로 미국 서부에서 수행된 연구로, 요오드화은 씨뿌리기의 효과를 정량적으로 분석하기 위해 진행되었다(Geerts et al., 2013; Pokharel and Geerts, 2016). 실험은 주로 콜로라도주와 와이오밍주의 산악 지대에서 진행되었다. King Air 항공기를 이용해 고도 3,000m에서 5,000m의 산악 구름에 요오드화은을 살포했다. 항공기에는 레이더, 라이다, 구름 입자 관측기기 등 다양한 첨단 센서를 장착하여 구름의 미세물리적 변화를 실시간으로 모니터링했다. 요오드화은을 살포한 후 구름 내 빙정 농도가 증가하였으며, 강설량이

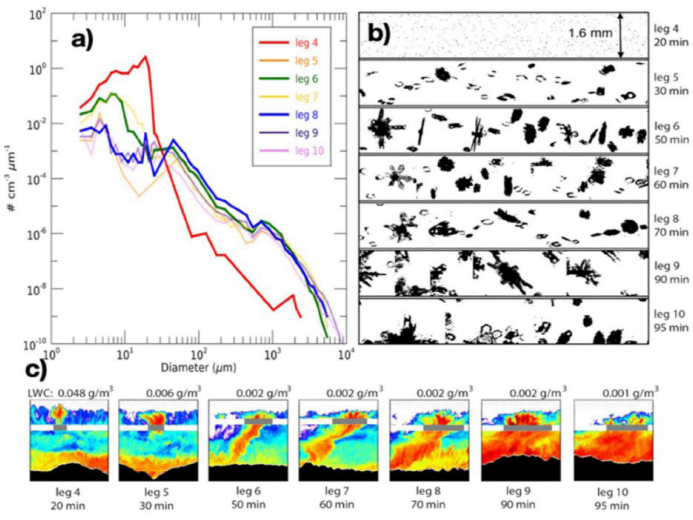
> “SNOWIE 프로젝트는 산악 지대 구름에 요오드화은을 투입하여 강설 과정을 연구”

평균 15~20% 증가하는 것이 관측되었다. ASCII 프로젝트는 인공강우의 과학적 효과를 정량적으로 입증하였고, 항공 관측이 구름 씨뿌리기의 효과를 평가하는 데 필수적임을 보여주었다. 또한, 기상 조건에 따라 씨뿌리기의 효율성 변화를 분석하며, 실험 설계와 기술 개선의 중요성을 강조했다.

SNOWIE 프로젝트(Seeded and Natural Orographic Wintertime clouds: the Idaho Experiment)는 2017년 1월부터 3월까지 미국 아이다호주에서 수행된 겨울철 인공강우 실험으로, 산악 지대에서 발생하는 구름에 요오드화은을 투입하여 강설 과정을 연구했다(French et al., 2018; Tessendorf et al., 2019). 연구진은 King Air 항공기를 이용해 구름 속에 요오드화은을 살포했으며, 항공기에는 레이더, 라이다, 구름 입자 관측 기기, 비디오 입자 탐지기 등 첨단 관측 장비를 장착하여 실험의 효과를 실시간으로 모니터링했다. 씨뿌리기 후 약 20분 이내에 구름 내에서 빙정이 성장하여 지표로 눈이 내리는 현상이 관측되었고, 강설량이 평균 10~15% 증가하는 결과가 나타났다(그림 4). SNOWIE 프로젝트는 구름 씨뿌리기의 실시간 효과를 입증한 중요한 사례로 평가되었으며, 항공기를 이용한 정밀한 관측이 인공강우 기술의 발전에 필수적임을 보여주었다. 또한, 이 연구는 기상 모델링과 실험 데이터를 결합하여 인공강우의 예측 정확성을 높이는 데 기여했다. SNOWIE 프로젝트는 인공강우 실험의 효과를 정량적으로 입증하였으며, 회의적이었던 전 세계가 인공강우 기술에 다시 주목하게 된 계기로 평가된다.

위의 미국의 인공강우 실험 이외에도

그림 4. SNOWIE 프로젝트 2017년 1월 31일 사례. 요오드화은 살포 영역에 대한 수직 방향 항공기 관측 구간(leg 4–10)별 결과((a) 구름 입자 관측 기기로 관측된 구름 입자 크기분포, (b) 해당 구름 입자 이미지. 오른 쪽의 시간은 씨뿌리기 후 경과 시간을 의미. (c) 레이더 반사도. 회색 네모는 씨뿌리기 물질의 위치와 구름입자 크기분포를 산출하는데 사용된 자료의 기간을 의미)(Friedrich et al., 2021)



“SNOWIE 프로젝트는 인공강우 효과를 정량적으로 입증, 전 세계가 인공강우 기술에 다시 주목한 계기로 평가됨”

다른 국가들에 의한 인공강우 실험도 활발히 진행되고 있다. 중국은 1958년 지린성에서 첫 항공기 기반 인공강우 실험을 성공적으로 수행한 후, 세계에서 가장 활발하게 기상조절 기술을 발전시킨 국가 중 하나가 되었다(중국인민공화국 기상청, 2018). 중국은 2008년 베이징 올림픽과 2021년 중국 공산당 창당 100주년 행사에서 기상조절을 통해 맑은 날씨를 유지하며 기술력을 입증했다. 특히 Tianhe 프로젝트는 티베트 고원의 수증기를 북부 황하 유역으로 유도해 강수량을 증가시키는 것을 목표로 한다. 이를 위해 항공기와 드론을 이용해 요오드화은을 살포했으며, 수백 개의 촉매 장치를 티베트 고원에 설치했다. 2020년에는 2025년까지 550만 km^2에 이르는 광범위한 지역에서 인공강우와 우박 억제를 수행하는 대규모 기상조절 계획을 발표했다(중국인민공화국 국무원, 2020). 중국은 또한 드론을 이용한 혁신적인 접근을 도입했다. Wing Loong II 드론을 개조한 Ganlin-1은 원격으로 구름 씨뿌리기를 수행해 비용 효율성과 안전성을 높였다. 2022년에는 극심한 가뭄에 대응하여 쓰촨성과 충칭에서 항공기와 로켓을 동원해 인공강우를 실시했다. 이러한 실험들은 수력 발전을 지원하고 농작물 수확을 보호하는 데 중요한 역할을 했다.

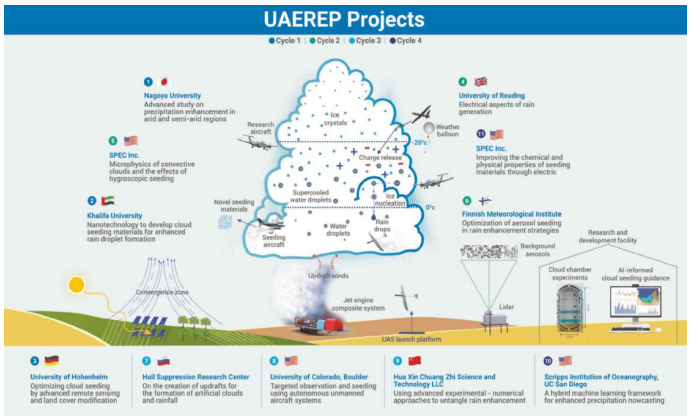
아랍에미리트(UAE)는 2002년부터 National Center of Meteorology (NCM)를 중심으로 항공기를 이용한 인공강우 실험을 수행하고 있다(Wehbe, et al., 2023). 아랍에미리트는 King Air 항공기를 사용해 구름에 소금 입자를 살포하는 씨뿌리기 기술을 개발했다. 이 기술은 구름 내 수증기를 응결시켜 강수를 유도하며, 고온 건조한 기후에서도 효과를 보였다. 최근에는 드론을 이용한 전기 방출 기술을 도입하여, 구름에 전하를 가해 물방울의 응결을 유도하는 새로운 접근 방식을 실험하고 있으며(Harrison et al., 2024), 구름씨앗으로 사용될 신물질을 개발하고 있다(Tai et al,. 2017). 이러한 기술은 물 부족 문제 해결과 생태계 보존을 목표로 한다. 아랍에미리트는 또한 Rain Enhancement Program (REP)을 통해 글로벌 연구 협력을 추진하고 있다(그림 5). 미국, 영국 등 여러 국가와 협력하여 인공강우 기술을 발전시키고 있으며, 항공기를 이용한 정밀한 씨뿌리기와 실시간 관측을 결합해 강수

> “최근 스위스에서 주도한 CLOUDLAB은 항공기 기반 인공 강우 실험의 새로운 지평을 열었다.”

량 증대 효과를 높이고 있다. 이러한 노력은 아랍에미리트의 기후변화 적응과 지속 가능한 수자원 관리에 기여하고 있다.

유럽에서도 최근 스위스 ETH Zurich에서 주도한 CLOUDLAB 프로젝트가 항공기 기반 인공강우 실험의 새로운 지평을 열었다(Henneberger et al., 2023). 이 프로젝트는 유럽연구위원회(ERC)의 Horizon 2020 연구 및 혁신 프로그램의 지원을 받아 진행되고 있다. CLOUDLAB은 겨울철 층운형 구름을 대상으로 한 정밀한 씨뿌리기 실험을 통해 구름 물리학과 강수 생성 과정을 심층적으로 연구하고 있다. 주요 목표는 구름 속 미세 물리적 과정을 이해하고, 이를 날씨 예측 모델에 반영하여 예측 정확성을 높이는 것이다. CLOUDLAB은 드론과 같은 무인 항공기(UAV)를 이용해 구름 속에 빙정핵 물질인 요오드화은을 살포하고, 살포 후 구름의 변화를 실시간으로 관측한다. 드론은 구름의 구조, 풍향, 풍속, 온도를 고려하여 정확한 위치에 씨뿌리기를 수행하며, 살포 후에는 HOLIMO (HOLographic Imager for Microscopic Objects)와 같은 첨단 장비로 구름 입자의 크기와 형태를 분석한다. 또한, HoloBalloon이라는 계류식 풍선(tethered balloon) 시스템을 이용해 최대 1,000m 높이까지 상승하며 구름의 입자 분포와 미세물리 특성을 정밀하게 측정한다. Ka-band 구름 레이더, 라이다, 운고계를 활용해 구름의 반사도, 연직 구조, 강수 형성을 실시간으로 모니터링하며, 이를 통해 씨뿌리기의 효과를 정량화한다(그림 6). CLOUDLAB 프로젝트는 무인 항공기와 계류식 풍선 시스템을 결합한 혁신적인 접근을 통해, 기존 항공기 기반 실험에서의 비용 문제와 접근성 한계를 극복하고 더욱 정밀하고 지속적인 관

그림 5. 혼합상 구름과 대기경계층에 대한 개념적 표현(숫자 라벨은 각 UAEREP 지원 주기(1~4)에 따라 색상으로 구분. 11개의 UAEREP 프로젝트는 각 국가(국기), 기관명, 프로젝트 제목(위에서 아래 순)으로 제시) (Wehbe et al., 2023)

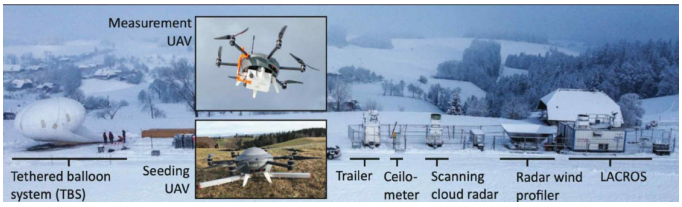


> “항공기를 이용한 인공강우 실험은 미국, 중국, UAE, 유럽 등 여러 국가에서 다양한 기상조절 목표 달성을 위해 수행”

측을 가능하게 했다. 이는 인공강우 실험의 신뢰성과 효율성을 한층 높이는 데 기여하고 있다.

항공 관측의 중요성은 이러한 모든 실험에서 두드러지게 나타난다. 항공기에 장착된 레이더, 라이다, 입자 탐지기, 온도 및 습도 센서는 구름의 구조와 물리적 특성을 실시간으로 분석하고, 씨뿌리기의 효과를 정량화하는 데 필수적이다. 이러한 관측 기술은 인공강우 실험의 정밀성과 신뢰성을 높이며, 실험 결과를 과학적으로 검증하는 데 중요한 역할을 한다. 또한, 항공기를 이용한 관측은 지상 기반 관측으로는 확인하기 어려운 고도와 위치에서의 구름 특성을 파악할 수 있어, 기상조절 기술의 최적화와 실용화에 크게 기여하고 있다.

그림 6. CLOUDLAB 현장 실험 기간 동안 주요 사이트에 설치된 계측 장비의 개요(계류식 풍선 시스템, 씨뿌리기 및 측정을 수행하는 무인 항공기(UAV), 다양한 지상 기반 원격 탐사 장비들이 포함)(Henneberger et al., 2023)



이처럼 항공기를 이용한 인공강우 실험은 미국, 중국, 아랍에미리트, 유럽을 비롯한 여러 국가에서 다양한 기상조절 목표를 달성하고자 수행되었다. 각국의 실험은 강수량 증가, 가뭄 완화, 태풍 약화, 우박 억제, 안개 소멸 등에서 유의미한 성과를 보였으며, 기후변화와 물 부족 문제 해결을 위한 중요한 기술적 수단으로 자리 잡고 있다. 앞으로도 항공기 기반 인공강우 실험은 지속적으로 발전할 것이며, 더욱 정밀하고 효율적인 기상조절 기술을 개발하는 데 기여할 것이다.

그림 7. 대한민국 기상항공기 나라호의 정면(좌)과 측면(우) 사진(국립기상과학원)

III. 대한민국 기상청 항공기와 인공강우 실험 현황

구름은 고도가 높은 곳에 존재하기 때문에 직접(in-situ) 관측을 위해 주로 항공기가 사용된다. 대한민국 기상청 국립기상과학원은 2018년부터 다목적 기상항공기인 나라호(그림 7)를 운영하고 있

다. '나라호'는 '날아[나라]'라는 발음에 기반하여, 국가기관 항공기가 하늘 높이 비상함을 상징한다. 기종은 Beechcraft King Air 350HW이며, 최대 비행 고도는 약 10km로, 한 번에 약 5~6시간 비행이 가능하다. 나라호의 주요 제원과 성능은 표 1에 제시되어 있다.

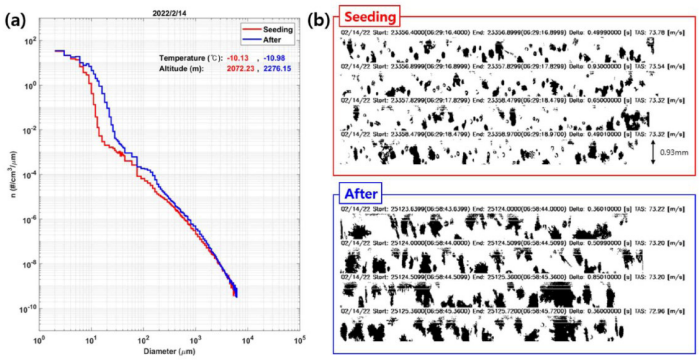
표 1. 대한민국 기상항공기 나라호 주요 제원 및 성능(국립기상과학원)

항목	구름 챔버
기종	Beechcraft King Air 350HW
형식	쌍발 터보프롭(Twin Turboprop)
높이/길이/폭	4.37 m / 14.22 m / 17.65 m
순항 속도	580 km/h
최대 비행가능고도	32,000 ft (10 km)
최대 임무비행시간	5.5시간
탑승자	총 5명(조종사 2명, 장비운용자 2명, 연구자 1명)

나라호는 고층 대기 및 해양과 같이 사람이 직접 접근하기 어려운 공백 지역의 시·공간적 기상 상황을 관측하고, 위험기상 선행관측, 온실가스 및 환경기상 감시, 기상조절 실험 등 다양한 임무를 수행한다. 표 2는 나라호에 탑재된 주요 관측 장비 목록을 보여준다. 기상조절 실험에 사용되는 주요 장비로는 불꽃형 연소탄 점화 장치, 투하형 연소탄 점화 장치, 기본기상요소측정장비(Aircraft-Integrated Meteorological Measurement System; AIMMS-20), 구름응결핵 측정기, 구름입자 측정기(Cloud Combination Probe; CCP), 강수입자 측정기(Precipitation Imaging Probe; PIP), 그리고 항공구름 관측 레이더 등이 있다. 이를 활용하여 국립기상과학원은 인공강우 실험을 활발히 수행하고 있다.

이 중 인공강우 실험 분석에 특히 중요한 장비는 AIMMS-20, CCP, PIP, 그리고 레이더이다. 이 장비들을 통합적으로 사용하면 2~6,200 μm 범위의 입자 크기와 수농도를 연속적으로 관측할 수 있어, 구름 및 강수 입자의 크기 분포를 상세히 파악할 수

그림 8. 나라호를 활용하여 수행한 인공강우 실험 결과(씨뿌리기 중·후 (a) CDP, CIP, PIP를 사용하여 산출한 평균 구름입자 크기분포, (b) CIP를 통해 관측한 구름입자 이미지)



“최근 씨뿌리기 고도 제약과 접근성 문제 해결을 위해 무인 항공기 기술이 인공강우 실험에 활용”

있다. 이러한 관측 자료를 통해 기상조절 실험 전후의 구름 및 강수 입자 크기 분포 변화를 비교하고, 실험의 효과를 정량적으로 검증할 수 있다.

그림 8은 2022년 2월 14일, 강원도 평창군 인근 상공 약 2 km에서 나라호를 활용한 인공강우 실험 결과를 보여준다. 씨뿌리기 물질로는 요오드화은이 사용되었다. 씨뿌리기 실험 중·후의 온도와 고도는 유사했지만, 실험 후에는 10 μm 이상 크기의 구름 입자 수농도가 증가하였다. 또한, 강수입자 측정기를 통해 관측된 이미지에서도 입자 크기가 증가한 것이 확인되었다. 이는 씨뿌리기 물질에 의해 구름 입자가 성장하면서 발생한 인공강우 효과를 시사한다.

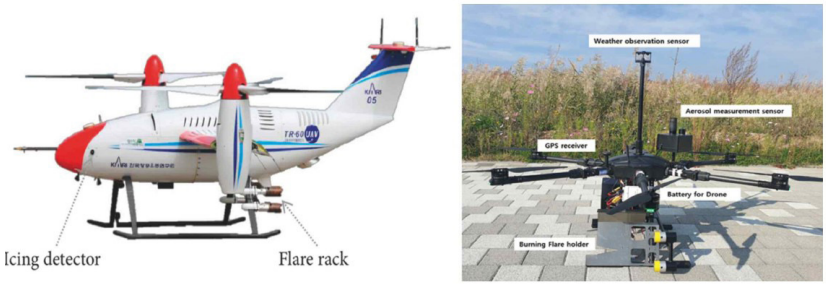
최근에는 씨뿌리기 고도의 제약과 접근성 문제를 해결하기 위해 무인 항공기 기술이 인공강우 실험에 활용되고 있다. 무인 항공기를 이용하면 고도의 제약은 있지만 특정 소규모 지역의 구름을 대상으로 지속적으로 실험할 수 있으며, 기상항공기보다 비용이 저렴하다. 또한, 군집 비행을 통해 다수의 무인 항공기를 동시에 운영하면 보다 넓은 지역에서 효율적으로 실험할 수 있다(Koo et al., 2024). 이러한 이유로 많은 국가에서 무인 항공기를 하층운 대상 인공강우 및 안개 저감 실험에 활용하고 있다 (Gil et al., 2020).

국립기상과학원도 이러한 흐름에 맞춰 TR-60 틸트로터 무인 항공기와 기상조절용 드론을 도입하여 운영하고 있다(그림 9). 2019년, 항공우주연구원이 개발한 무인 항공기와 국립기상과학원의 나라호를 활용해 한반도 남부 지역에서 염화칼슘을 씨뿌리기 물질로 사용한 인공강우 실험이 수행되었다(Jung et al., 2022). TR-60 틸트로터 무인 항공기를 통해 염화칼슘을 살포하고, 나라호, 지상 레이더, 자동기상관측시스템(automatic weather system; AWS)을 활용해 실험 결과를 검증하였다.

그림 10은 2019년 4월 25일, 무인 항공기와 나라호를 활용한 인공강우 실험 결과를 보여준다. 무인 항공기는 상공 760 m에서 염화칼슘을 살포하였고, 나라호는 실험 전후 구름의 미세물리 특성 변화를 연속적으로 관측하였다(그림 10(a)). 실험 후, 10 μm 이상의 구름 입자 수농도가 증가하였으며, 목표지역인 보성에서 레이더

> 국립기상과학원은 인공강우 및 안개 저감 실험에 활용할 수 있는 드론 기술 및 운영 기술을 개발하고 있다.

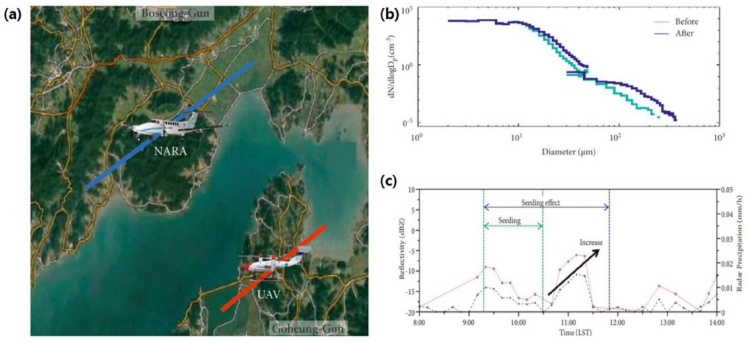
그림 9. (좌) 기상조절 실험을 위한 항공우주연구원 개발 무인 항공기(Jung et al., 2022). (우) 국립기상과학원 기상조절용 실험 드론(Koo et al., 2024)



반사도와 강수량이 증가하였다(그림 10(b, c)). 이 결과는 나라호와 무인 항공기를 결합한 인공강우 실험의 가능성을 입증하였다.

최근 국립기상과학원은 인공강우 및 안개 저감 실험에 활용할 수 있는 드론 기술 및 운영 기술을 개발하고 있다(Koo et al., 2024). 기후 위기 속에서 물 수요의 불확실성과 빈번한 위험 기상을 해결하기 위해 기상조절 실험은 필수적이다. 나라호에 이어 무인 항공기를 활용하면서 지상부터 상층까지 연직적으로 정밀한 실험이 가능해 졌으며, 항공구름 관측 레이더 등 다양한 항공 관측 장비를 통해 구름 내 미세물리적 특성을 정밀하게 분석할 수 있게 되었다. 이는 실험 결과의 신뢰성을 높이는 데 중요한 역할을 한다.

그림 10. 나라호와 UAV를 활용한 인공강우 실험 결과((a) 나라호와 UAV의 비행 경로, (b) 씨뿌리기 전후 CDP와 CIP를 사용하여 산출한 평균 구름입자 크기분포, (c) 목표 지역(보성)의 레이더 반사도(빨간색)와 강수량(파란색) 변화)(Jung et al., 2022)



“ 중국은 최첨단 기상조절 시스템 구축에 투자, 일본은 날씨 제어 및 조절 기술 개발에 박차 중 ”

IV. 전망 및 제언

인류는 심각한 기후변화 시대에 직면하고 있다. 이에 따라 기후변화에 적응하기 위한 일환으로 최근 지구공학(geoengineering) 연구와 시도가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 특히, 주변국인 중국과 일본의 기상조절에 대한 강력한 의지는 주목할 만하다. 중국은 2025년까지 최첨단 기상조절 시스템을 구축하기 위해 막대한 예산을 연구 개발에 투자하고 있으며(중국인민공화국 국무원, 2020), 일본은 2019년부터 Moonshot 연구개발 프로그램(일본 내각부, 2019)을 통해 2050년까지 날씨 제어 및 조절 기술을 개발하고자 한다. Moonshot 프로그램은 일본 내각부의 과학기술혁신본부가 주도하며, 사회가 직면한 도전적 문제를 해결하고 혁신적인 미래사회를 실현하는 것을 목표로 10개의 혁신적인 주제를 설정하고 있으며. 그중 8번째 주제는 태풍, 집중호우, 폭설과 같은 극단적 기상 현상을 제어하고, 이를 통해 재해를 최소화하며 지속 가능한 사회를 구축하는 것이다. 일본은 이 목표를 달성하기 위해 인공강우, 구름 씨뿌리기, 태풍 제어 기술 등의 연구를 추진하고 있다.

호주는 산호초 백화 현상을 방지하기 위해 Marine Cloud Brightening 프로젝트를 진행 중이다. 이 프로젝트는 항공기를 활용해 해양 상공의 구름의 반사도를 증가시켜 해수면 온도를 낮추는 연구를 수행하고 있다(Tollefson, 2021). 이처럼 여러 국가가 다양한 기상조절 기술을 개발하며 기후변화에 적극적으로 대응하고 있으며, 이러한 기상조절 기술의 실효성과 잠재적 위험을 평가하기 위해 과학적 근거 마련과 철저한 실험 준비 및 검증이 필요하다는 논의가 활발히 이루어지고 있다(Feingold et al., 2024).

SNOWIE 프로젝트의 결과는 인공강우 기술의 실효성에 대한 의구심을 해소했으며, 인공강우의 효율성을 극대화하기 위한 후속 연구의 필요성을 분명히 했다. 인공강우 실험의 성공을 위해서는 여러 항공기를 동시 운영하고, 지상 관측과 항공기 관측을 결합하며, 레이더, 라이다, 구름 입자 관측기 등 첨단 장비를 투입하여 실험의 정밀도를 높여야 한다. 또한, 무인 항공기를 활용해 항공기의 접근이 어려운 지역의 공백을 보완하고, 수치예보 모델을 통해 정확한 실험 시점을 예측하며, 구름

> “전문인력 확충과 다목적 항공기가 아닌 인공증우 전용 항공기 도입이 절실”

물리학에 기반한 체계적인 실험 설계와 검증이 뒷받침되어야 한다. 이러한 요소들이 종합적으로 결합될 때, 인공강우 실험의 신뢰성과 효율성이 극대화될 수 있다.

성공적인 인공강우 실험을 수행하기 위해서는 오랜 기간 축적된 실험 수행과 결과 분석의 경험을 보유한 전문 인력이 필수적이다. 대한민국 기상청 국립기상과학원은 제한된 인력과 자원에도 불구하고 인공강우 연구와 기술 개발에서 짧은 기간 동안 괄목할 만한 성과를 이루었다. 그러나 지속적이고 발전된 기술 확보를 위해서는 전문 인력의 확충이 반드시 필요하며, 다목적 항공기가 아닌 인공증우 전용 항공기의 도입이 절실하다.

또한, 인공강우 실험에 학계가 적극적으로 참여하고, 이를 통해 양성된 전문 인력이 기상청으로 유입되는 선순환 구조를 마련해야 한다. 이를 위해 국가 차원에서 기상조절센터를 설립하고 운영할 것을 제언한다. 기상조절센터는 국가기상위성센터나 기상레이더센터와 같이 체계적이고 지속적인 기상조절 연구를 수행하고, 실험 데이터를 분석하며, 전문 인력을 양성하는 중심 역할을 담당할 것이다.

기상조절 실험은 기후 위기에 대응하는 중요한 기술적 수단이며, 인공강우, 안개 저감, 우박 억제와 같은 다양한 분야에서 활용될 수 있다. 대한민국이 이러한 기술 개발을 선도하고 글로벌 리더로 자리매김하기 위해서는 국가적 차원의 체계적 지원과 과감한 투자가 필수적이며, 이는 대한민국이 기상조절 기술의 선도국이자 기후 변화 대응의 글로벌 리더로 자리매김하는 핵심 전략이 될 것이다.

표 2. 기상항공기 나라호 탑재 관측장비 목록(국립기상과학원)

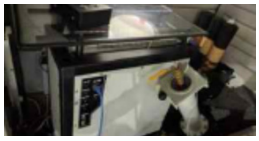
장비	관측 요소	모델명	장비 사진
드롭존데 자료 수신기 (Vaisala AVAPS Ⅱ)	기압, 온도, 습도, 풍향, 풍속	MD21	
공중방사능 탐지 장비 (RSI RSX-3)	감마선	RSX-3	
감시카메라 (High Def. Camera (AVS-800)	대기, 지상 및 해양 영상	AV860 DOME	
해상풍 라디오미터 (Prosensing SFMR)	고도, 기압, 강우강도, 해상풍속	SFMR2005W	
수증기 라디오미터 (Prosensing GVR)	수증기량	GVR-14P	
불꽃형 연소탄 점화장치 (WMI Wing (Burn-In-Place) Flare Racks)	냉·온 구름 및 안개용 연소 (AgI, $CaCl_2$) (총 24개 탑재)	WMI Wing (Burn-In-Place) Flare Racks	
투하형 연소탄 점화장치 (WMI Fuselage (Ejectable) Flare Racks)	냉 구름 및 안개용 연소탄(AgI) (총 102개 탑재)	WMI Fuselage (Ejectable) Flare Racks	

표 2. 기상항공기 나라호 탑재 관측장비 목록(국립기상과학원)

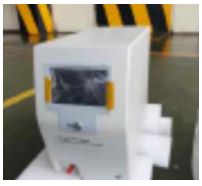
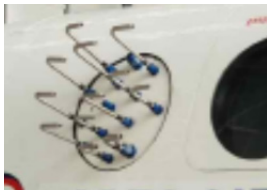
구름응결핵 측정기 (DMT CCN-200)	구름응결핵 수농도	CCN-200 (AAA-0043)	
구름입자 측정기 (DMT CCP CIP+CDP+LWC))	구름입자 크기분포 및 형태	CCP (AAA-0026)	
강수입자 측정기 (DMT PIP)	강수입자 크기분포와 형태	PIP (AAA-0041)	
수함량 측정기 (SEA WCM2000)	액체수함량 (0~6gm^{-3}), 총수함량 (0~10gm^{-3})	WCM-2000	
항공구름 관측레이더 (Prosensing KPR)	반사도, 시선속도, 스펙트럼 폭	KPR	
총응결핵계수기 (TSI W-CPC)	응결핵 개수 (〉2.2 nm)	Model 3789 CPC	
공기흡입구 (Brechtel Iso-Kinetic Inlet)	가스 및 에어로졸 흡입	1200 -IsoKinetic Aerosol Sampling Inlet	
공기흡입구 (WMI Gas Inlet (window))			

표 2. 기상항공기 나라호 탑재 관측장비 목록(국립기상과학원)

광학입자계수기 (Grimm Sky-OPC)	에어로졸 크기별 수농도 (0.25~32 μm, 총 31 구간)	Model 1.129 SKY-OPC	
광산란계수측정기 (TSI Nephelometer)	에어로졸 광산란계수 (450, 550, 700nm)	Model 3563 Integrating phelometer	
탄소에어로졸 관측장비 (DMT SP2)	블랙카본 질량농도 및 입자 수농도 (200~430 nm, 최대 700 nm)	SP2-D (AAA-0142)	
공동감쇠분광기 (Picarro CRDS)	온실가스 (CO, CO_2, CH_4, H_2O) 농도	G2401-m	
질소산화물분석기 (Thermo NOx Analyzer)	질소산화물 (NO, NO_2, NOx)	Model 43i TLE Top level cofig	
이산화황분석기 (Thermo SO_2 Analyzer)	이산화황 (SO_2)	Model 42i TL Top level cofig	
오존분석기 (Thermo O_3 Analyzer)	오존(O_3)	Model 49i Top level cofig	

표 2. 기상항공기 나라호 탑재 관측장비 목록(국립기상과학원)

광흡수계수측정기 (Brechtel TAP)	에어로졸 광흡수계수	Model TAP 2901	
기본기상요소측정장비 (Aventech AIMMS-20)	온도	AIMMS-20 with Air Data Probe in PMS Canister phelometer	
자료수집시스템 (SEA M300)	관측 자료 수집, 처리 및 표출	M-300 DAS	
기온 측정장치 (Rosemount Aerospace Total Temperature Sensor)	온도	102AU1AP	
이슬점 습도 측정장치 (Edgetech Dew Point Hygrometer	이슬점온도, 습도	Dew point Hygrometer	
결빙 탐지장치 (Rosemount Aerospace Icing Detector)	결빙 탐지	Icing Detector 0871LM5	

참고문헌

일본 내각부, 2019: Moonshot research and development program. https://www8.cao.go.jp/cstp/english/moonshot/top.html.

중국인민공화국 기상청, 2018: 60 years of weather modification in China. https://www.cma.gov.cn/en2014/news/Features/201809/t20180913_477849.html.

중국인민공화국 국무원, 2020: China to forge ahead with weather modification service. https://english.www.gov.cn/policies/latestreleases/202012/02/content_WS5fc76218c6d0f7257694125e.html.

Feingold, G., Ghate, V. P., Russell, L. M., Blossey, P., Cantrell, W., Christensen, M. W., Diamond, M. S., Gettelman, A., Glassmeier, F., Gryspeerdt, E., Haywood, J., Hoffmann, F., Kaul, C. M., Lebsock, M., McComiskey, A. C., McCoy, D. T., Ming, Y., Mülmenstädt, J., Possner, A., Prabhakaran, P., Quinn, P. K., Sebastian Schmidt, K., Shaw, R. A., Singer, C. E., Sorooshian, A., Toll, V., Wan, J. S., Wood, R., Yang, F., Zhang, J., and Zheng, X., 2024: Physical science research needed to evaluate the viability and risks of marine cloud brightening. Science advances, 10(12), eadi8594.

Flossmann, A. I., Manton, M., Abshaev, A., Bruintjes, R., Murakami, M., Prabhakaran, T., and Yao, Z., 2019: Review of advances in precipitation enhancement research. Bulletin of the American Meteorological Society, 100(8), 1465-1480.

French, J. R., Fredrich, K., Tessndorf, S. A., Rauber, R. M., Geerts, B., Rasmussen, R. M., Xue, L., Kunkel, M., and Bletrud, D. R., 2018: Precipitation formation from orographic cloud seeding. Proceedings of the National Academy of Sciences, 115(6), 1168-1173.

Friedrich, K.,French, J. R., Tessendorf, S. A., Hatt, M., Weeks, C., Rauber, R. M., Geerts, B., Xue, L, Rasmussen, R. M., Blestrud, D. R., Kunkel, M. L., Dawson, N., and Parkinson, S., 2021: Microphysical characteristics and evolution of seeded orographic clouds. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 60(7), 909-934.

Geerts, B., Pkkharel, B., Friedrich, K., Breed, D., Rasmussen, R., Yang, Y., Miao, Q., Haimov, S., Boe, B., and Kalina, E. 2013: The AgI seeding cloud impact investigation (ASCII) campaign 2012: Overview and preliminary results. Journal of weather modification, 45, 24-43.

Gil, G., Yoo, M., and Park, J., 2020: A Study on the Development of Airworthiness Standards for VTOL UAS. Journal of Aerospace System Engineering, 14(1), 44-53.

Harrison, R. G., Alkamali, A. A., Escobar-Ruitz, V., Nicoll, K. A., Ambaum, M. H., 2024: Providing charge emission for cloud seeding aircraft. AIP Advances, 14(9).

Henneberger, J., F. Ramelli, R. Spirig, N. Omanovic, A. J. Miller, C. Fuchs, H. Zhang, J. Bühl, M. Hervo, Z. A. Kanji, K. Ohneiser, M. Radenz, M. Rösch, P. Seifert, and U. Lohmann, 2023: Seeding of supercooled low stratus clouds with a UAV to study microphysical ice processes: An Introduction to the CLOUDLAB project. Bulletin of the American Meteorological Society, 104(11), E1962-E1979.

Huschke, R. E., 1963: A brief history of weather modification since 1946. Bulletin of the American Meteorological Society, 44(7), 425-429.

Jung, W., Cha, J. W., Ko, A. R., Chea, S., Ro, Y., Hwang, H. J., Kim, B. Y., Ku, J. M., Chang, K. H., and Lee, C., 2022: Progressive and prospective technology for cloud seeding experiment

by unmanned aerial vehicle and atmospheric research aircraft in Korea. Advances in Meteorology, 2022(1), 3128657.

Koo, H.-J., Belorid, M., Hwang, H. J., Kim, M.-H., Kim, B.-Y., Cha, J. W., Lee, Y. H., Baek, j., and Seo, S.-K., 2024: Development and Case Study of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Weather Modification Experiments, Atmosphere, 34(1), 35–53.

NRC, 2003: Critical Issues in Weather Modification Research. National Academies Press, 123 pp.

Pokharel, B. and Geerts, B., 2016: A multi-sensor study of the impact of ground-based glaciogenic seeding on clouds and precipitation over mountains in Wyoming. Part I: Project description. Atmospheric Research, 182, 269-281.

Rauber, R. M., Geerts, B., Xue, L., French, J., Rasmussen, R. M., Tessendorf, S. A., Blestrud, D. R., Kunkel, M. L., Parkinson, S., 2019: Wintertime orographic cloud seeding—A review. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 58(10), 2117-2140.

Schaefer, V. J., 1946: The production of ice crystals in a cloud of supercooled water droplets. Science, 104(2707), 457-459.

Schaefer, V. J., 1968: The early history of weather modification. Bulletin of the American Meteorological Society, 49(4), 337–342.

Tai, Y., Liang, H., Zaki, A., Hadri, N. E., Abshaev, A. M., Huchunaev, B. M., Griffiths, S., Jouiad, M., and Zou, 2017: Core/shell microstructure induced synergistic effect for efficient water-droplet formation and cloud-seeding application. ACS Nano, 11, 12318-12325.

Tessendorf, S. A.,French, J. R., Friedrich, K, Geerts, B, Rauber, R. M., Rasmussen, R. M., Xue, L., Ikeda, K., Blestrud, D. R., Kunkel, M. L., Parkinson, S., Snider, J. R., Aikins, J., Faber, S., Majewski, A., Grasmick, C., Bergmaier, P. T., Janiszeski, A., Springer, A., Weeks, C., Serke, D. J., and Bruintjes, R., 2019: A transformational approach to winter orographic weather modification research: The SNOWIE project. Bulletin of the American Meteorological Society, 100(1), 71-92.

Tollefson, J., 2021: Can clouds save the great barrier reef?. Nature, 596, 476-478.

Vonnegut, B., 1947: The nucleation of ice formation by silver iodide. Journal of applied physics, 18(7), 593-595.

Wehbe, Y., Griffiths, S., Al Mazrouei, A., Al Yazeedi, O., and Al Mandous, A., 2023: Rethinking water security in a warming climate: rainfall enhancement as an innovative augmentation technique. npj Climate and Atmospheric Science, 6(1), 171.

Willoughby, H. E., Jorgensen, D. P., Black, R. A., and Rosenthal, S. L., 1985: Project STORMFURY—A scientific chronicle 1962–1983. Bulletin of the American Meteorological Society, 66, 505–514.

구름물리실험챔버 연구성과

박민수 연세대학교 대기과학과 연구교수 ms_park@yonsei.ac.kr

Ⅰ. 구름물리실험챔버란?
Ⅱ. 구름물리실험챔버의 필요성
Ⅲ. 구름물리실험챔버 연구성과
Ⅳ. 맺음말 및 제언

구름물리실험챔버는 대기 중 구름의 생성, 발달, 소멸과정을 실험실 내에서 재현하기 위한 첨단 시설로, 대기조건의 비재현성과 항공관측의 고비용이라는 인공강우 기술 개발의 한계를 극복할 수 있는 시설이다. 전 세계적으로 구름물리실험챔버 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 국립기상과학원에서도 2022년 한국형 구름물리실험챔버 K-CPEC (Korea Cloud Physics Experimental Chamber)를 완공하여 운영을 시작하였다. 구름물리실험챔버는 구름미세물리 및 인공강우 분야의 연구에 크게 활용될 수 있으며, 인공강우 기술 발전을 위해서는 구름물리실험챔버에 대한 지속적인 지원이 동반되어야 한다. ■

> “구름물리실험챔버란 대기 중 구름의 생성, 발달, 소멸 과정을 실험실 내에서 재현하기 위해 설계된 최첨단 시설”

Ⅰ. 구름물리실험챔버란?

구름물리실험챔버란 대기 중 구름의 생성, 발달, 소멸과정을 실험실 내에서 재현하기 위해 설계된 첨단 시설로, 인위적으로 대기조건을 설정하여 에어로졸의 효과, 구름 응결 과정, 빙정 생성, 그리고 강수 형성을 연구할 수 있는 환경을 제공한다. 구름물리실험챔버는 다음과 같은 요소들로 구성된다.

- 대기조건 조절 시스템: 구름은 다양한 대기조건 하에서 생성된다. 따라서 대기 중의 구름을 재현하기 위해서는 다양한 압력, 온도 등을 챔버 내에서 재현할 수 있어야 한다. 이를 위해 구름물리실험챔버에서는 온도, 압력 등을 조절하는 시스템이 포함되어 있어, 이를 활용하여 구름발생 실험의 초기조건을 설정할 수 있도록 한다.
- 에어로졸 주입 장치: 대기 중 구름이 발생하기 위해서는 수증기뿐만 아니라, 에어로졸의 도움이 필수적이다. 에어로졸이 구름응결핵 또는 빙정핵으로 작용하여, 지구의 대기조건 하에서 구름이 형성될 수 있도록 도와준다. 그리고 인공강우 실험을 위해서는 시딩물질이라 할 수 있는 인위적인 에어로졸 주입이 필수적이다. 에어로졸을 주입할 수 있는 방법으로는 공기와 함께 에어로졸을 샘플링하여 주입하는 방법, 분말 형태의 에어로졸을 주입하는 방법, 물에 에어로졸을 녹인 후 분무하는 방법, 연소탄을 연소하여 주입하는 방법 등이 있다.
- 구름발생 시스템: 구름물리실험챔버이므로 당연히 챔버 내부에서 구름을 발생시킬 수 있어야 한다. 대기 중 구름은 수증기에 대한 포화도가 과포화 상태가 되었을 때 수증기가 에어로졸 표면에 응결하여 발생한다. 포화도는 포화수증기량에 대한 실제수증기량의 비를 나타내므로 과포화상태를 만들기 위해서는 수증기를 실제수증기량을 증가시키거나, 포화수증기량을 감소시켜야 한다. 포화수증기량은 온도와 밀접한 관계를 가지고 있으므로 주로 온도를 조절하여 포화수증기량을 조절한다.
- 관측 장비: 구름물리실험챔버 내에서의 구름 형성과정을 이해하기 위해서는 챔버 내부를 관측하는 것이 매우 중요하다. 챔버 내의 압력, 온도, 습도 등 기상 변

“ 현재 전 세계가 운영 중인 구름물리 실험챔버는 주로 팽창식 챔버 ”

수뿐만 아니라, 에어로졸 및 구름입자들을 실시간으로 관측해야 한다. 에어로졸 및 구름입자들을 관측하는 장비들은 주로 광학적인 방법을 이용하여 입자들의 수, 크기, 모양 등 특성을 관측한다.

현재 전 세계에서 운영되고 있는 구름물리실험챔버는 주로 팽창식 챔버이다. 팽창식 챔버는 챔버 내부의 감압을 통해 단열팽창으로 인한 냉각을 유도하여 챔버내의 공기가 (과)포화 상태에 도달하도록 하여 구름을 발생시키는 챔버이다. 실제 대기에서 공기가 상승하여 단열팽창과정을 거쳐 구름이 생성되는 과정을 재현할 수 있는 챔버라고 할 수 있다. 최초의 팽창식 챔버는 19세기에 개발되었지만, 지속적으로 발전하여 현대에서 사용되고 있다. 현대의 팽창식 챔버는 실제 대기에서 일어나는 단열팽창 과정을 외부의 간섭 없이 최대한 유사하게 재현할 수 있도록 챔버 벽면의 온도를 동적으로 조정하는 기능 등을 추가하여 사용하고 있다. 팽창식 챔버 외에 챔버 내부에서 난류나 대류를 유도하여 구름을 발생시키는 LACIS-T나 π챔버와 같은 구름물리실험챔버도 존재한다(Niedermeier et al., 2020; Chang et al., 2016; Shaw et al., 2020). 이들은 챔버 내의 수증기량과 온도분포를 비균질하게 조성하여 챔버 내에 부분적으로 과포화된 부분을 만들어 특정 부분에서 구름이 생성되도록 하는 구름물리실험챔버이다.

Ⅱ. 구름물리실험챔버의 필요성

인공강우는 대기 중 구름에 에어로졸을 시딩하는 등 인공적인 영향을 주어 강수를 유발하거나 증가시키는 기술이다. 그러나 실제 대기 환경에서만 인공강우 연구를 수행하기에는 다음과 같은 한계가 존재한다.

- 대기조건의 비재현성: 실제 구름의 강수 여부나 강수량에 영향을 주는 요인은 기압, 온도, 습도, 에어로졸의 특성 등 다양한 변수를 포함한다. 실제 대기에서 동일한 변수를 가지는 구름을 찾는 것은 불가능에 가까우므로, 실험의 재현성

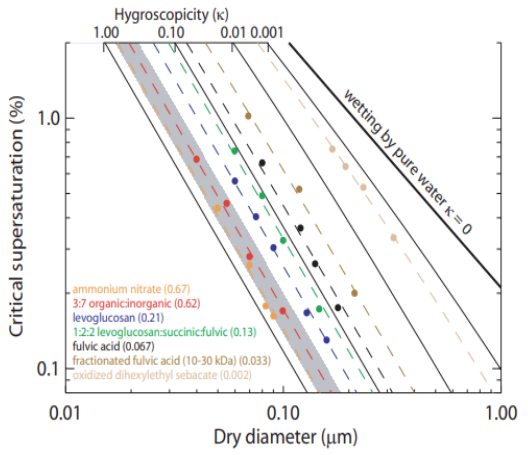
> “실험자가 원하는 대기조건을 형성하여 반복적인 실험을 수행할 수 있는 실험실 기반 연구가 경제적 및 효율적”

이 낮아진다. 실제 구름을 대상으로 인공강우 실험을 수행하였을 때 변인통제가 불가능하므로, 강수량의 변화가 인공강우 실험에 의한 것인지 확언하기 어렵다.

- 대기조건 설정의 어려움: 구름은 다양한 기압, 온도, 습도 조건에서 생성된다. 따라서 효과적인 연구를 수행하기 위해서는 원하는 대기조건을 설정할 필요가 있다. 그러나 자연환경에서는 실험자가 원하는 대기조건을 형성하는 것이 어렵기 때문에, 실험 수행에 한계가 있다.
- 인공강우 실험의 비용: 실제 구름을 대상으로 한 인공강우 실험 및 관측은 항공기를 사용한 고고도에서의 실험 및 관측이 필수적이다. 이는 인공강우 실험의 비용을 크게 증가시킨다. 막대한 비용이 소요되기 때문에 구름의 생성, 발달, 소멸과정을 지속적으로 관측하는 것은 매우 어렵다.

따라서 실험자가 원하는 대기조건을 형성하여 반복적인 실험을 수행할 수 있는 실험실 기반 연구가 경제적이며, 효율적이다. 실험실 기반 연구로는 먼저 구름물리실험챔버를 사용하지 않고 시딩물질의 특성을 분석하는 방법이 있다. 구름은 크게 빙정입자가 포함되지 않은 따뜻한 구름과 빙정입자가 포함되어 있는 찬 구름으로 구분할 수 있다. 따뜻한 구름의 경우 에어로졸이 구름응결핵으로 작용하여 구름물방울을 형성하므로 시딩물질의 구름응결핵 특성이 중요하다. 에어로졸이 구름응결핵으로 작용할 수 있는지 여부는 대기 중 과포화도, 크기, 흡습성에 따라 달라진다. 따라서 시딩물질의 크기와 흡습성을 측정하는 것은 구름응결핵 특성을 분석하는 것이라 할 수 있다. Petters and Kreidenwies (2007)는 에어로졸의 흡습성을 나타내는 단일 지표 κ를 제시하고 여러 물질의 κ값을 보고하였다(그림 1).

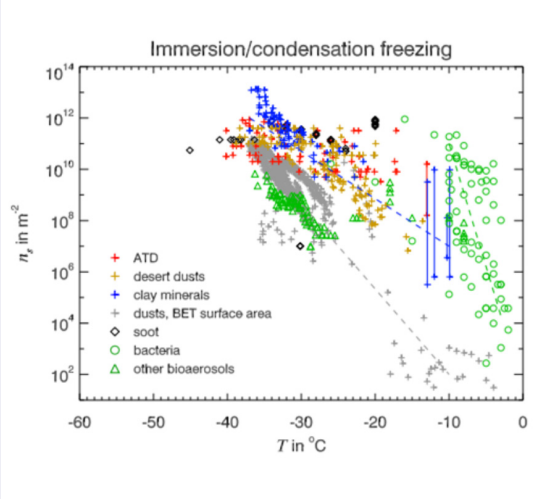
그림 1. 순수 화합물, 유기 혼합물 및 유기-무기 혼합물에 대한 critical supersaturation(s_c)-dry diameter(D_d) 데이터로 에어로졸의 흡습성(κ)을 나타냄(Petters and Kreidenweis, 2007. 자료는 Svenningsson et al., 2006; Dinar et al., 2006; Petters et al., 2006)



> 구름입자 분포 및 성장과정 재현과 관측 위해서 구름물리실험챔버는 필수적으로 요구

찬 구름의 경우 구름입자의 성장 및 강수로의 발달에 있어 빙정입자가 매우 중요하다. 얼음에 대한 포화도가 물에 대한 포화도보다 높기 때문에, 빙정입자가 생성되면 물방울에 비해 훨씬 빠르게 입자가 성장할 수 있기 때문이다. 그러나 실제 구름에서는 0℃ 이하의 온도라 할지라도 빙정핵이 없으면 물방울이 얼어붙지 못하고 과냉각수적 상태로 존재한다. 따라서 찬 구름의 경우 과냉각수적을 얼어붙게 만드는 빙정핵의 역할이 매우 중요하므로, 시딩물질의 빙정핵 특성이 매우 중요하다고 할 수 있다. 에어로졸이 빙정핵으로 작용할 수 있는지 여부는 대기 중 온도와 에어로졸의 종류에 크게 영향을 받는다. 에어로졸의 종류와 온도에 따른 빙정핵 작용 효율을 나타내는 지표로 INAS(Ice Nucleation Active Surface) Density가 많이 사용되므로(DeMott, 1995; Connolly et al., 2009), 시딩물질의 INAS density를 측정하는 것은 빙정핵 특성을 분석하는 것이라 할 수 있다. Hoose and Möhler (2012)는 선행연구들의 결과를 수집하여 다양한 물질들의 INAS density를 보고하였다(그림 2).

그림 2. 다양한 물질들의 INAS density(Hoose and Möhler, 2012)



에어로졸의 흡습성과 INAS density를 제시한 선행연구들은 많은 수가 구름물리실험챔버를 활용하여 진행하였지만, 구름물리실험챔버를 사용하지 않고 단순히 구름응결핵계수기 또는 빙정핵 계수기만을 사용해서도 측정이 가능하다. 그러나 흡습성과 INAS density는 단순히 에어로졸의 구름응결핵 또는 빙정핵으로의 작용 가능성만을 나타낸 것으로 구름물방울 혹은 빙정입자로 활성화되어 성장하는 것은 별개의 이야기이다. 실제 구름에서는 에어로졸이 구름물방울 혹은 빙정입자로 활성화된 후 응결(condensation), 승화(deposition), 충돌(collision) 등의 과정을 거쳐 강수입자로 성장한다. 따라서 단순히 에어로졸의 구름입자로의 활성화뿐만 아니라, 이후의 분포 및 성장과정을 재현 및 관측하기 위해서는 구름응결핵 계수기나 빙정핵 계수기보다 규모가 큰 구름물리실험챔버가 필수

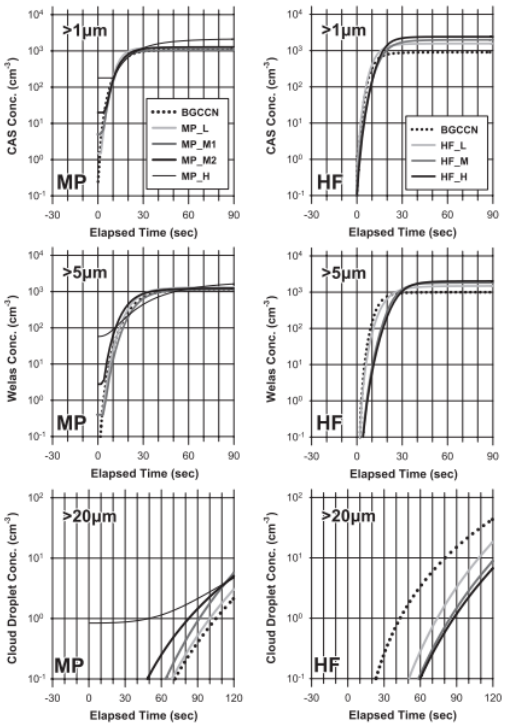
> “구름물리실험챔버를 활용한 인공강우 연구는 아시아를 중심으로 전 세계에서 활발히 수행”

적이다. 구름물리실험챔버의 크기가 클수록 보다 큰 규모의 구름물리 과정을 재현 및 관측할 수 있다. 그리고 최근 활발히 연구가 진행되고 있는 시딩물질 없는 인공강우 방법을 실험실 환경에서 재현하기 위해서는 구름물리실험챔버가 필수적이다.

Ⅲ. 구름물리실험챔버 연구성과

구름물리실험챔버를 활용한 인공강우 연구는 아시아를 중심으로 전 세계에서 활발하게 수행되고 있다. 일본 기상연구소(Meteorological Research Institute; MRI)에서는 구름물리실험챔버(MRI 챔버)를 구축하였고, 구름물리실험챔버를 활용한 인공강우 실험을 수행하여 결과를 일본 내 학술지에 게재한 바 있다(Tajiri et al., 2015). 염화나트륨(NaCl)이 주물질인 마이크로파우더와 과염소산칼륨($KClO_4$)이 주물질인 연소탄을 각각 사용하여 구름발생실험을 수행하였다. 염화나트륨 마이크로파우더를 주입하였을 때는 주입하지 않았을 때보다 직경이 20μm 이상인 큰 크기의 구름물방울들이 많이 생성된 것을 확인하였다(그림 3). 그러나 마이크로 파우더를 지나치게 많이 주입하였을 때는 구름물방울의 평균 크기가 감소하는 과대시딩(overseeding)을 야기할 수 있음을 확인하였다. 반면 과염소산칼륨이 주물질인 연소탄을 연소하여 생성된 에어로졸을 주입하였을 때는 직경이 5μm 이상인 작은 크기의 구름물방울들은 많이 생성되었지만 직경이 20μm 이상인 큰 구름물방울들은 오히려 연소탄 물질을 주입하지 않았을 때보다 적게 생성되었다. 연소탄의 연소과정에서 배출되는 에어로졸들은 크기가 작고 수가 많기 때문으로서 구름물방울 수는 늘어나지만 구름물방울 간의

그림 3. 마이크로파우더(MP)와 흡습성 연소탄(HF)을 사용하였을 때 구름물리실험챔버 내부의 시간에 따른 구름입자 수농도(Tajiri et al., 2015)



> “새로운 인공강우 물질 개발과 성능 평가는 구름물리 실험챔버의 큰 장점”

수증기 경쟁이 심해지면서 성장이 느려지는 것을 보여준다. 또한 구름물리실험챔버를 활용하여 여러 종류의 아이오딘화은(AgI) 입자의 INAS density를 관측 및 제시하여 AgI 입자가 상대적으로 높은 온도에서도 빙정핵으로 잘 작용할 수 있음을 확인하였다(그림 4).

새로운 인공강우 물질을 개발하고, 그 성능을 평가할 수 있다는 것은 구름물리실험챔버의 큰 장점이다. Tai et al. (2017)은 새로운 시딩 물질로 코어/쉘 구조의 염화나트륨(NaCl)/이산화타이타늄(TiO_2)(CSNT) 입자를 제시하였다. CSNT 입자는 코어/쉘 형태로 NaCl이 코어(핵)이고 TiO_2가 쉘(껍질)인 입자로 순수한 NaCl 입자보다 낮은 습도에서도 조해될 수 있으며, 더 많은 수증기를 흡착할 수 있다고 보고하였다. 또한 CSNT 입자의 성능을 평가하기 위해 구름물리실험챔버를 활용하였다. 구름물리실험챔버에서 배경대기, 순수한 NaCl 입자, CSNT 입자를 각각 활용하여 구름입자를 발생시킨 결과 CSNT 입자를 챔버에 투입한 후, 구름물방울의 농도와 크기가 순수한 NaCl 입자보다 더 증가한 것을 확인하였다(그림 5).

그림 4. 세 종류의 AgI 입자들의 INAS density를 온도에 따라 나타낸 그래프(Tajiri et al., 2015)

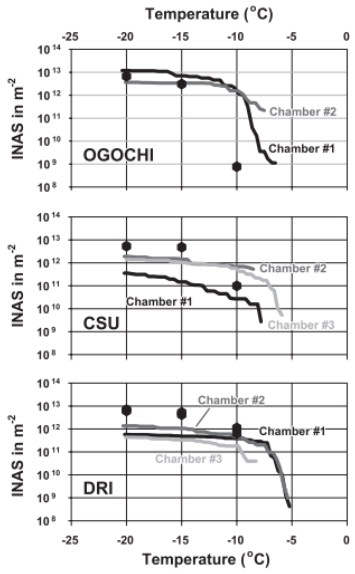
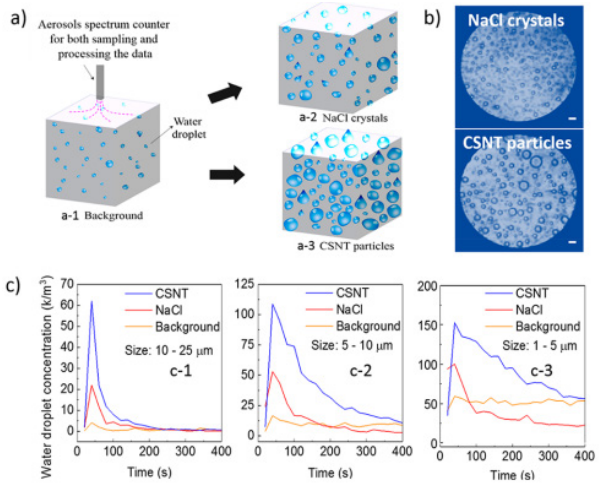


그림 5. 구름 챔버 실험을 통한 CSNT 입자의 시딩 물질로서의 효율성 평가((a) 다른 클라우드 시딩 물질에 따른 강우 증대 성능을 그림으로 표현, (b) 정해진 영역에서 순수 NaCl 결정과 CSNT 입자가 생성한 물방울 크기를 광학 현미경으로 비교, (c) 구름 챔버 내 다양한 크기 범위의 구름물방울농도)(Tai et al., 2017)



미국과 유럽 여러 나라의 구름물리실험챔버를 보유한 기관에서는 구름물리실험챔버를 인공강우의 직접적인 연구에 활용하기보다는 주로 구름의 미세물리적 특성에 대한 이해도를 향상시키는 것에 활용하고 있다. 그러나 이러한 구름의 미세물리적 특성에 대한 이해도 향상은 당연히 인공강우 분야에서도 활용이 가능하다. 하나의 예로 Connolly et al. (2012)에서는 영국의 구름물리실험챔버인 MICC를 이용하여 챔버 내 빙정 입자들의 부착과정을 관측하였다. 구름챔버의 중부와 하부에 구름입자의 이미지를 관측할 수 있는 관측장비 CPI를 설치하고, 상층에 빙정핵을 주입하여 빙정 입자가 낙하하면서 부착되는 과정을 관측하였다. 빙정 입자가 낙하함에 따라 점점 수증기를 더 흡수하고 성장하여 빙정의 크기가 더 커졌고, 일부 빙정은 부착(aggregation) 과정을 거쳐 더 큰 구조를 형성하였다(그림 6, 7). 구름 입자가 강수입자로 성장하기 위해서는 구름 입자들의 충돌(collision), 병합(coalescence), 결착(riming), 부착(aggregation) 등의 과정이 매우 중요하다. 따라서 구름 입자들의 충돌, 병합, 결착, 부착 등을 관측할 수 있는 구름물리실험챔버 연구는 필수적이라 할 수 있다.

그림 6. MICC 챔버 중단에서 CPI로 관측한 빙정 이미지(좌상단부터 -30℃, -25℃, -20℃, -15℃, -10℃, -5℃ 대기 조건에서의 빙정 사진)(Connolly et al., 2012)

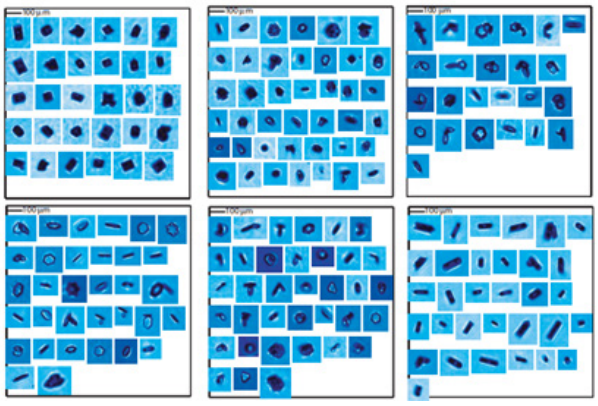
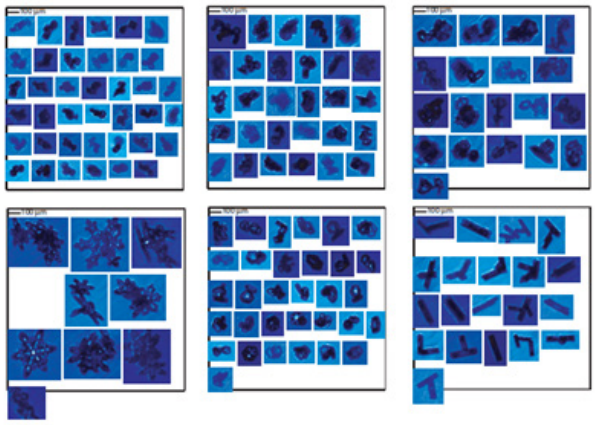


그림 7. MICC 챔버 하단에서 CPI로 관측한 빙정 이미지(좌상단부터 -30℃, -25℃, -20℃, -15℃, -10℃, -5℃ 대기 조건에서의 빙정 사진)(Connolly et al., 2012)



구름물리실험챔버를 활용하면 시딩물질을 사용하지 않는 인공강우 방법에 대한 연구도 수행이 가능하다. Wang et al. (2020)는 전기장을 활용한 구름물방울의 응집에 대한 연구를 수행하였다. 구름물리실험챔버 내부에 바늘 전극을 설

그림 8. 코로나 방전(-30 kV) 전(a)과 후(b, c, d)의 배경 물방울 운동 상태(Wang et al., 2020)

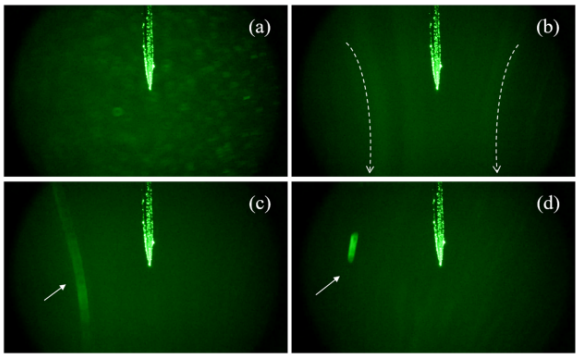
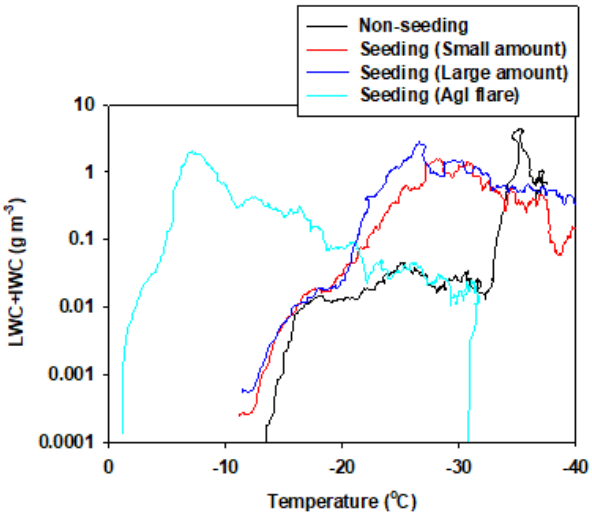


그림 9. K-CPEC을 활용한 찬 구름 발생 실험 결과(시딩물질을 주입하지 않았을 때, 시딩물질로 애리조나 시험용 먼지를 소량 주입하였을 때, 애리조나 시험용 먼지를 많이 주입하였을 때, AgI 연소탄에서 배출된 에어로졸을 주입하였을 때의 액체수함량(liquid water content)과 얼음수함량(ice water content)의 합을 온도에 대해 나타냄.)(국립기상과학원, 2024)

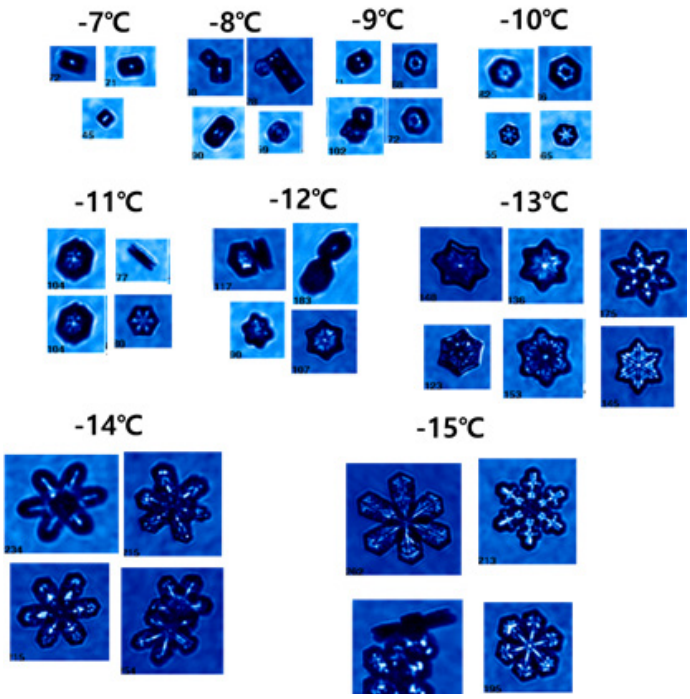


치하고 고전압을 주어 강한 전기장을 만들었다. 강한 전기장으로 활성화된 코로나 방전이 물방울의 응결 과정을 가속화하며, 심지어 불포화상태에서도 구름물방울을 형성할 수 있었다. 게다가 코로나 방전은 구름물방울의 움직임을 유도하여 구름물방울끼리의 충돌 빈도를 높여 구름물방울들의 성장을 가속화시킴을 확인하였다. 그림 8은 코로나 방전으로 전기장 생성 전후 배경 물방울의 운동 상태를 나타낸다. 코로나 방전 이전(그림 8(a))에는 물방울이 브라운 운동에 의해 무작위적으로 움직이고 있으나, 코로나 방전 이후에는 와류 고리(vortex ring)가 생성되고, 물방울들의 충돌과정이 활발해져 큰 구름물방울이 형성된다.

국내 국립기상과학원에서도 한국형 구름물리실험챔버(K-CPEC)를 활용하여 인공강우 연구를 수행하고 있다. 그림 9는 K-CPEC을 활용한 찬 구름 발생 실험의 결과를 나타낸 것이다(국립기상과학원, 2024). 구름 발생 실험 도중 챔버 내부의 구름입자들의 수 크기분포로부터 액체수함량과 얼음수함량의 합을 추정하여 온도에 대해 나타내었다. 액체수함량과 얼음수함량의 합은 구름입자들의 질량농도를 나타낸다. 즉 액체수함량과 얼음수함량의 합이 높을수록 많은 양의 수증기가 구름입자로 응결 혹은 승화되었다는 것을 의미하며 액체수함량과 얼음수함량의 합이 급증하는 시점이 구름입자들이 크게 성장하는 시점이라 할 수 있다. 시딩물질을 주입하지 않았을 때는 구름입자의 질량농도가 낮은

상태를 유지하다가 균질결빙이 시작되는 온도인 약 −35℃ 정도에 도달해야 비로소 구름물방울들이 빙정입자로 얼어붙어 큰 크기로 성장한다. 그러나 빙정핵으로 작용하기 좋은 미국 애리조나 사막의 모래로 만든 애리조나 시험용 먼지를 주입하였을 때는 빙정핵에 의해 과냉각 수적이 −20℃ 부근의 상대적으로 높은 온도에서 얼어붙기 시작한다. 빙정은 구름물방울에 비해 훨씬 빠르게 성장하기 때문에 빙정들이 빠르게 성장하여 구름입자의 질량농도가 급증한다. 애리조나 시험용 먼지를 더 많이 주입하였을 때는 액체수함량+얼음수함량이 증가하는 온도가 소폭 상승하여 더 빠른 시점에서 구름입자들이 성장함을 확인하였으나, 그 차이는 크지 않았다. 그러나 거의 0℃에 가까운 높은 온도에서도 빙정핵으로 작용하기 좋다고 알려진 AgI 입자를 주입하였을 때는 액체수함량+얼음수함량이 증가하는 온도가 약 −5℃로 대폭 상승하였다. 상대적으로 높은 온도에서 얼음입자가 생성되어 기둥, 판, 별 모양의 구름 입자가 선명하게 관측되었다(그림 10). 한반도의 구름 온도는 계절와 장소에 따라 다양하다. 찬 구름이라 할지라도 구름의 온도가 -10℃ 이상인 경우도 빈번하게 관측된다. 따라서 찬 구름의 경우 시딩물질의 농도보다 시딩물질이 어느 온도에서 빙정핵으로 작용할 수 있는지, 즉 시딩물질의 종류가 더 중요하다는 것을 확인하였다.

그림 10. AgI 연소탄에서 배출된 에어로졸을 주입하였을 때 CPI로 측정한 온도별 빙정 이미지(국립기상과학원, 2024)



“국립기상과학원에서도 K-CPEC을 구축하여 인공강우 연구를 지속할 수 있는 근간을 마련”

Ⅳ. 맺음말 및 제언

지금까지 국내외에서 구름물리실험챔버를 활용한 인공강우 연구를 간략하게 소개하였다. 구름이 생성되어 발달하는 과정을 이해하기 위해서는 에어로졸이 구름응결핵 혹은 빙정핵으로 작용하여 구름을 생성하는 과정부터 구름입자들이 수증기를 흡수하고 구름입자들끼리 서로 충돌하여 입자들이 성장하는 과정까지 구름물리과정의 전반적인 이해도 향상이 필요하다. 따라서 인공강우 연구를 위해서는 에어로졸의 구름입자 활성화부터 구름입자들 간의 충돌까지 다양한 규모에서의 연구가 수행되어야 한다. 또한 인공강우의 성능을 평가하기 위해서는 원하는 대기조건을 재현하여 반복 실험할 수 있는 실험실 기반의 연구가 필수적이다. 이러한 실험을 위해서는 구름물리실험챔버가 적격이다.

인공강우를 포함한 구름에 관련된 과학적 질문들의 공간적 규모는 매우 다양하다. 따라서 이러한 과학적 질문들을 해결하기 위해서는 하나의 구름물리실험챔버만으로는 불가능하며, 다양한 규모와 특성을 가진 구름물리실험챔버들을 사용한 공동연구가 수행되어야 한다. 구름 연구 분야에서 가장 명망 있는 학회인 ICCP(International Conference on Clouds and Precipitation)가 2024년 7월 제주국제컨벤션센터에서 개최되었으며, 학회와 연결되어 학회 직전에 구름챔버 워크숍 및 구름 관측장비 워크숍이 국립기상과학원에서 개최되었다(그림 11). 학회 및 워크숍에 참여한 전 세계 구름물리 분야 전문가들에게 K-CPEC을 소개하였으며, 국제 구름챔버 커뮤니티에 참여하여 국제공동연구 수행을 위한 기반을 마련하였다. 향후 K-CPEC 연구진도 국제 구름챔버 커뮤니티의 일원으로서 인공강우를 포함한 여러 구름관련 공동연구를 수행할 수 있을 것으로 기대하는 바이다.

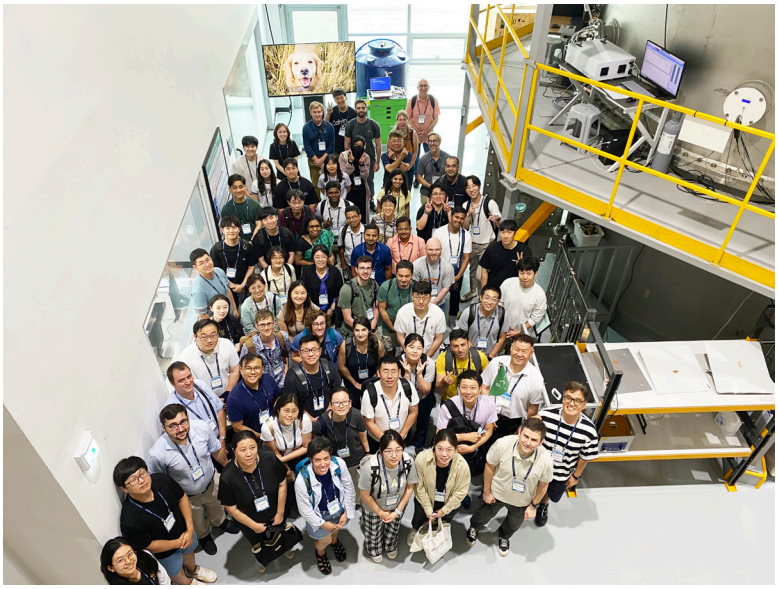
인공강우의 효과를 검증하고 효율성을 증대시키기 위해서는 지속적인 연구수행이 필요하다. 국립기상과학원에서도 구름물리실험챔버인 K-CPEC을 구축하여 인공강우의 실험실 기반 연구를 지속적으로 수행할 수 있는 근간을 마련하였다. 위에서 기술한 바와 같이 국외의 여러 구름물리실험챔버를 보유한 기관에서는 인공강우뿐만 아니라, 구름미세물리 연구가 활발하게 수행되고 있으며 이러한 구름미세

> “ 기상청은 구름물리 실험챔버의 운영 및 개조작업을 전담할 전문인력 확보 위해 지원해야 할 것 ”

물리 연구는 향후 인공강우 실험의 초석이 된다. 따라서 인공강우는 물론 구름미세물리 연구에도 기상청과 유관부처의 지속적이고 아낌없는 지원을 기대하는 바이다. 국내의 구름물리실험챔버 연구는 이제 막 걸음마를 뗀 시점이다. 구름물리실험챔버 운영 초기에는 기대한 것만큼 성과가 나오지 않을 수 있다. 그러나 천리길도 한 걸음부터이고 모든 일은 초석이 중요한 법이다. 따라서 구름물리실험챔버와 같은 큰 규모의 연구시설이 지속적으로 유지되고 활용될 수 있도록 지속적인 지원이 필요하다.

현재 구름물리실험챔버 활용을 선도해나가고 있는 Aerosol Interaction and Dynamics in the Atmosphere (AIDA) 챔버를 보유한 독일의 Karlsruhe Institute of Technology (KIT)와 Pi (π) 챔버를 보유한 미국의 Michigan Technological University (MTU) 등의 기관에서는 연구인력 외에 구름물리실험챔버의 운영 및 개조작업을 전담할 수 있는 전문인력이 별도로 존재하여 보유한 구름물리실험챔버를 지속적으로 발전시키고 있다. 전기, 기계 분야 등의 공학적 전문지식을 가지고 있는 전문인력이 존재해야 연구인력이 새롭게 구상한 연구를 실현할 수 있도록 챔버를 개조할 수 있으며, 연구인력이 연구에 전담할 수 있다. 기상청에서는 구름물리실험챔버의 운영 및 개조작업을 전담할 수 있는 전문인력을 확보할 수 있도록 지원할 것을 제언하는 바이며 이러한 전문인력 확보가 국내 인공강우 기술 발전에 크게 기여할 수 있다고 확신한다.

그림 11. ICCP 2024동안의 K-CPEC 견학 사진(https://iccp2024.kr/)



참고문헌

국립기상과학원, 2024: 구름물리실험챔버기반 구름-에어로졸 미세물리과정 연구 및 활용기술 개발(II), 139pp.

Chang, K. and Coauthors, 2016: A laboratory facility to study gas–aerosol–cloud interactions in a turbulent environment: The *Π* chamber. Bull. Am. Meteorol. Soc., 97, 2343–2358.

Connolly, P. J., Emersic, C., and Field, P. R., 2012: A laboratory investigation into the aggregation efficiency of small ice crystals. Atmos. Chem. Phys., 12, 2055–2076.

Connolly, P. J., Möhler, O., Field, P. R., Saathoff, H., Burgess, R., Choularton, T., and Gallagher, M., 2009: Studies of heterogeneous freezing by three different desert dust samples. Atmos. Chem. Phys., 9, 2805–2824.

DeMott, P. J., 1995: Quantitative descriptions of ice formation mechanisms of silver iodide-type aerosols. Atmos. Res., 38, 63–99.

Dinar, E., Taraniuk, I., Graber, E. R., Katsman, S., Moise, T., Anttila, T., Mentel, T. F., and Rudich, Y., 2006: Cloud Condensation Nuclei properties of model and atmospheric HULIS. Atmos. Chem. Phys., 6, 2465–2482.

Hoose, C. and Möhler, O., 2012: Heterogeneous ice nucleation on atmospheric aerosols: a review of results from laboratory experiments. Atmos. Chem. Phys., 12, 9817–9854.

Niedermeier, D., Voigtländer, J., Schmalfuß, S., Busch, D., Schumacher, J., Shaw, R. A., and Stratmann, F., 2020: Characterization and first results from LACIS-T: A moist-air wind tunnel to study aerosol–cloud–turbulence interactions. Atmos. Meas. Tech., 13, 2015–2033.

Petters, M. D., Prenni, A. J., Kreidenweis, S. M., DeMott, P. J., Matsunaga, A., Lim, Y. B., and Ziemann, P. J., 2006: Chemical aging and the hydrophobic-to-hydrophilic conversion of carbonaceous aerosol. Geophys. Res. Lett., 33.

Petters, M. D. and Kreidenweis, S. M., 2007: A single parameter representation of hygroscopic growth and cloud condensation nucleus activity. Atmos. Chem. Phys., 7, 1961–1971, https://doi.org/10.5194/acp-7-1961-2007.

Shaw, R. A. and Coauthors, 2020: Cloud–aerosol–turbulence interactions: Science priorities and concepts for a large-scale laboratory facility. Bull. Am. Meteorol. Soc., 101, E1026–E1035.

Svenningsson, B. and Coauthors, 2006: Hygroscopic growth and critical supersaturations for mixed aerosol particles of inorganic and organic compounds of atmospheric relevance. Atmos. Chem. Phys., 6, 1937–1952.

Tai, Y. and Coauthors, 2017: Core/shell microstructure induced synergistic effect for efficient water-droplet formation and cloud-seeding application. ACS Nano, 11, 12318–12325.

Tajiri, T., Yamashita, K., Saito, A., and Murakami, M., 2015: MRI cloud chamber experiments: Cloud condensation nuclei and ice nuclei abilities of cloud seeding materials. Earozoru Kenkyu, 30, 14–23.

Wang, P., Li, C., Zhang, M., Li, J., Liu, Z., Yang, Y., Yu, K., and Pan, Y., 2020: Synergistic effect of charges and electric field: water droplet condensation and coalescence in a sub-saturated cloud chamber. Plasma Sources Sci. Technol., 29, 45005.

주요국가별 인공강우 기술 및 현황

차주완 국립기상과학원 기상연구관 jwcha@korea.kr

해 외 기 술 동 향

서론

기상조절은 수자원 확보, 농업 생산성 향상, 미세먼지 저감, 안개저감, 산불예방 등 다양한 목적을 가지고 여러 나라에서 연구·운영되고 있다. 이 기술은 국가별 필요에 따라 다양한 전략과 접근 방식을 통해 발전해 왔으며, 각국의 기후 및 지리적 특성에 맞춰 적응해 왔다. 이 글에서는 미국, 태국, 중국, 아랍에미리트(UAE), 한국 등 주요 국가들의 인공강우 기술 운영 현황을 분석하여 각국의 기술적 접근을 비교하고자 한다. 특히 미국의 경우에는 가장 선진적인 기술과 운영형태를 가지고 있고, 최근에 미국 노스다코다와 업무협약을 맺어 많은 관련 정보가 있기 때문에 다른 국가들에 비해 상세히 기술하고자 한다. 이를 통해 우리나라의 인공강우 정책 방향성을 모색하고 기술적 발전의 가능성을 탐색할 수 있다. 또한, 각국의 인공강우 기술이 기

후변화와 수자원 관리에 미치는 영향을 분석하여, 보다 효과적인 기상기술 정책을 수립하는 데 기여하고자 한다.

국가별 기술 및 현황

2.1 미국 및 캐나다

미국 서부와 캐나다 일부 지역에서는 인공강우 및 기상조절 기술을 통해 기후 문제에 대응하고 있다. 이들 지역의 주요 기상조절 프로그램과 활동을 주별로 살펴보면 다음과 같다.

1) **캐나다 (알버타 주)** : 캐나다 알버타 주에서는 우박 억제(Hail suppression) 프로그램을 운영하고 있다. 이 프로그램은 우박으로 인한 농업 피해를 줄이는 것을 목적으로 하며, 효과적인 기상조절을 통해 농작물 보호에 중요한 기여를 하고 있다.

2) **미국 북부(노스다코타 주)**: 노스다코타 주에서는 인공증우(Precipitation enhancement)와 우박 억제(Hail suppression) 활동이 동시에 이루어지고 있다. 물 자원 확보와 농업 보호를 위한 이 프로그램들은 우박 발생을 억제하여 농작물 보호와 생산성 향상에 중점을 두고 있다.

3) **미국 아이다호 주**: 눈 강화(Snow enhancement) 프로그램을 통해 겨울철 강설량을 늘리고, 이를 통해 수자원 확보와 겨울철 레저 산업에 기여하고 있다.

4) **오리건 주**: 안개 제거(Fog dispersion) 활동을 통해 특정 지역의 안개를 제거하여 교통안전과 시야 개선을 도모하고 있다.

5) **네바다 주**: 인공강우 증대 프로그램을 운영하여 물 자원 부족 문제를 해결하고 있으며, 특히 농업 및 도시 물 공급을 위한 대책으로 사용되고 있다.

6) **캘리포니아 주**: 인공강우 증대를 통해 가뭄을 극복하고, 농업 생산성을 향상시키기 위한 활동을 진행 중이다.

7) **유타 주**: 눈 강화 활동을 통해 겨울철 눈 자원을 증대시켜 농업용수와 도시 물 공급을 돕고 있다.

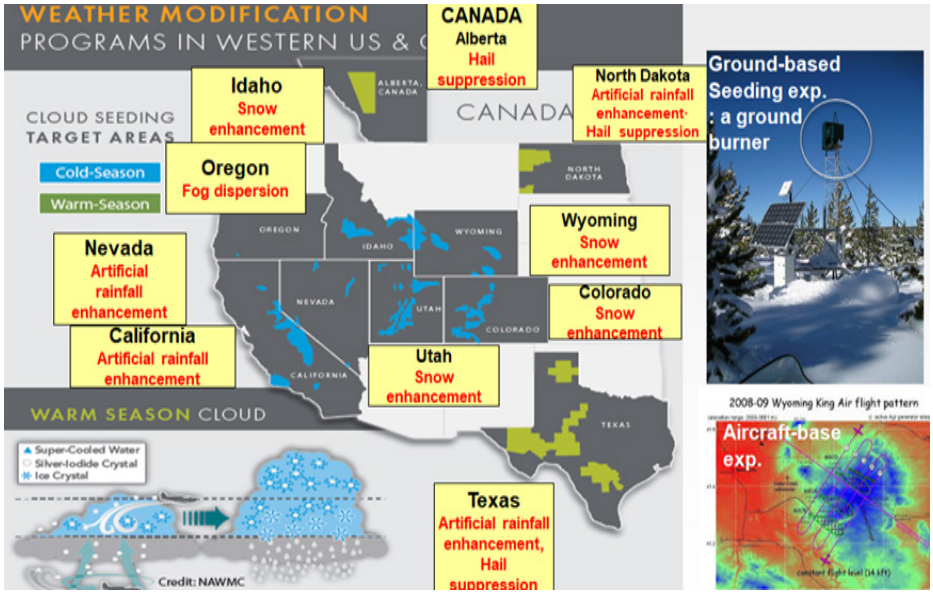
8) **와이오밍 주**: 눈 강화 프로그램을 통해 눈 자원을 확보하고 있으며, 이는 주로 농업과 겨울철 관광 산업에 긍정적인 영향을 미치고 있다.

9) **콜로라도 주**: 눈 강화를 통해 산간 지역의 수자원 확보와 겨울철 레저 활동을 촉진하고 있다.

10) **텍사스 주:** 인공강우 증대와 우박 억제 프로그램을 통해 극심한 가뭄과 우박 피해에 대응하고 있으며, 농업 보호와 수자원 관리를 위해 중요한 역할을 하고 있다.

이러한 미국의 기상조절 방식으로 미국 서부 지역에서 시행되는 기상조절 실험은 지상 기반 실험(Ground-based Seeding)과 항공기 기반 실험(Aircraft-based Seeding)으로 나뉜다. 지상 기반 실험은 지상에 설치된 장비를 통해 구름 씨를 뿌리는 방식으로, 특정 위치에서 고정된 장비(예: 연소기)를 사용하여 인공강우를 유도한다. 이는 주로 고지대나 일정 지역에서 효과적으로 강우를 유도하기 위해 사용된다. 항공기 기반 실험은 항공기를 이용해 대기 중에 구름 씨를 뿌리는 방식으로, 고도와 구름 상태에 따라 보다 넓은 지역에 걸쳐 강우를 유도할 수 있다. 이 방식은 다양한 고도에서 구름에 접근하여 강우를 촉진하는 데 매우 효과적이다. 계절에 따라 방법은 달라진다. 겨울(Cold-Season)과 여름(Warm-Season) 동안 목표로 하는 구름에 대해 각 계절의 기상 조건에 맞추어 인공강우 활동이 계획되고 운영되며, 사용되는 물질도 달라진다. 주로 초냉각수(Super-Cooled Water), 요오드화은(Silver-Iodide Crystal), 얼음결정(Ice Crystal) 등이 구름 씨뿌리기에 사용되며, 이러한 물질들은 각 기상 조건에 맞춰 적절히 사용된다(그림1).

그림 1. 미국 및 캐나다 지역의 인공강우현황



2.1.1. 미국(노스다코타 주)

미국의 노스다코타 주는 1946년에 인공강우 항공실험을 시작하였으며, 현재 주정부의 기상자원위원회와 민간 기상조절 회사인 WMI가 주도하여 운영하고 있다. 1961년부터는 상업적인 운영을 개시하여 약 15년간 연구를 통해 기술을 고도화해 왔다. 현재 주요 목표는 물 자원의 안정적 확보와 농업 생산성 유지, 그리고 우박 억제를 통한 농작물 보호이다. 미국의 인공강우 기술은 주로 가뭄이 잦은 지역에서 수자원 자원을 효과적으로 확보하기 위한 수단으로 사용되고 있으며, 이를 통해 지역 농업 생산성과 경제적 안정성을 높이고 있다. 특히 미국의 인공강우 실험은 주로 북부와 남부 두 지역에서 이루어지며, 실험 전용 항공기 5대가 사용된다. 이 항공기들은 3대씩 한 조를 이루어 순환식으로 연속 실험을 수행한다. 이러한 방식은 기상 조건이 적절한 시기를 최대한 활용하여 강우를 유도하는 데 효과적이다. 연간 항공기 운영시간은 약 253시간이며, 최대 연속 실험시간은 24시간이다. 사회경제적 효과로는 연 증우량이 5~10% 증가하고, 우박 발생이 45% 감소하며, 밀 수확량이 6% 증가한 것으로 평가된다. 이러한 효과는 특히 농작물 보호와 농업 생산성 증대에 크게 기여하며, 미국 농업 경제에 중요한 역할을 하고 있다. 미국은 또한 인공강우의 사회적 수용성을 높이기 위해 지속적인 홍보와 교육 프로그램을 운영하고 있으며, 이를 통해 인공강우 기술에 대한 부정적인 인식을 개선하고 있다.

2.2. 중국

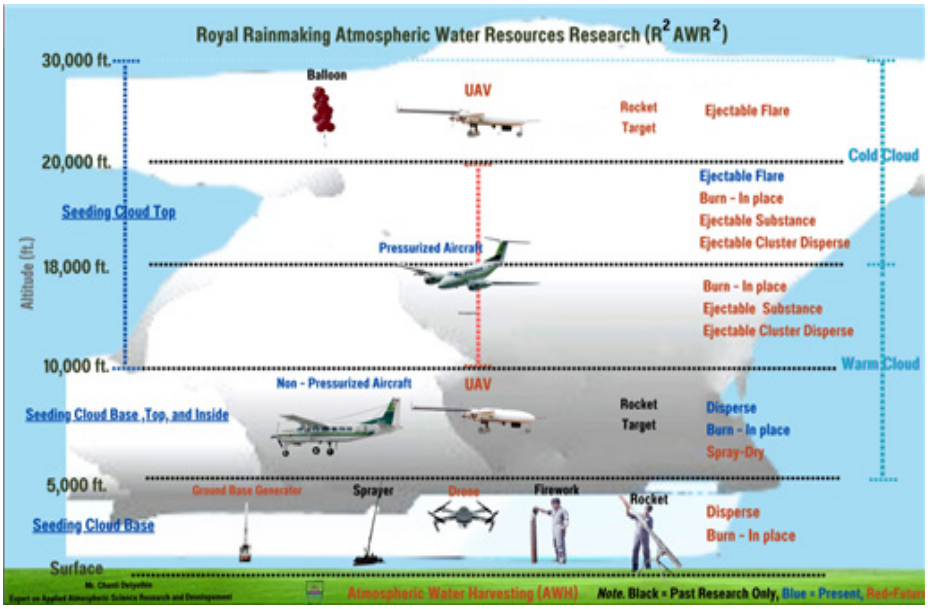
중국은 1958년에 인공강우 항공실험을 시작하였으며, 중국기상청 산하 기상조절센터에서 운영을 담당하고 있다. 중국은 인공강우 기술을 매우 적극적으로 발전시켜 왔으며, 효율적이고 환경친화적인 기술 개발을 목표로 하고 있다. 중국의 인공강우 기술은 국가적 차원에서의 수자원 확보와 기후변화 대응을 위해 매우 중요한 역할을 하고 있으며, 이를 통해 농업 생산성 증대와 생태계 보호에도 기여하고 있다. 2007년부터 본격적인 상업 운영을 시작하여 현재까지 50년 간의 연구와 기술 개발을 통해 기술적 우위를 확보해 왔다. 중국의 인공강우 실험은 30개의 성에서 이루어지며, 실험 전용 항공기 58대를 보유하고 있다. 이는 세계에서 가장 큰 규모의 인공강우 운영 중 하나로, 광범위한 지역에서 강우를 유도하여 수자원을 확보하고 있다. 3대씩 한 조를 이루어 순환식으로 연속 실험을 수행하며, 연간 항공기 운영시간은 약 2,800시간에 달한다. 이러한 노력으로 100억 톤 이상의 연 증우량을 확보하고 있으며, 2022년에는 5,000억 위안의 경제적 효과를 창출하였다. 최근 중국은 유인항공기의 효과를 보완할 수 있는 다양한

크기의 무인기 개발에 투자하고 있다. 무인기는 복잡한 지형이나 고원 지역의 안개 소산에 사용하기 효과적이다. 사회경제적 효과로는 연 증우량이 100억 톤에 달하며, 2022년에는 5,000억 위안 위안의 경제적 효과를 창출했다. 중국은 또한 인공강우를 통해 가뭄 완화, 농업 생산성 증대, 생태계 복원 등 다각적인 효과를 기대하고 있으며, 이러한 성과를 통해 인공강우 기술을 지속적으로 발전시키고 있다.

2.3 태국

태국은 1955년부터 인공강우 기술을 도입하여 운영하고 있다. 태국의 인공강우농업항공국이 운영을 담당하고 있다. 주요 목적은 가뭄 예방과 농업 지원을 위한 수자원 확보이다. 태국은 물 부족 문제가 심각한 국가 중 하나로, 인공강우 기술을 통해 이러한 문제를 해결하고자 노력하고 있다. 1993년부터는 지속가능한 관리 체계를 구축하여 효율적인 물 자원 관리에 기여하고 있다. 태국의 인공강우 실험은 전국 7개 지역에서 이루어지며, 30대의 항공기를 사용하여 순환식 연속 실험을 실시하고 있다. 이는 태국 전역의 다양한 기상 조건에 맞춰 강우를 유도하

그림 2. 태국의 구름종류별, 고도별 인공강우 실험 전략



기 위한 것이다. 태국은 구름의 종류, 고도에 따라서 구름씨 물질과 방법을 달리한다(그림 2). 태국 고유의 샌드위치 기법을 개발하여 구름의 발달·성장단계에 따라 구름씨 살포 위치를 변경하여 인공증우 효과를 극대화하였다. 이는 태국의 기상 조건에 맞춘 강력한 운영 체계로, 지역 농업 생산성 향상과 물 자원 관리에 기여하고 있다. 연간 항공기 운영시간은 약 18,000시간으로, 적극적인 인공강우를 수행한다. 이는 태국의 기상 조건에 맞춘 강력한 운영 체계로 지역 농업 생산성 향상과 물 자원 관리에 기여하고 있다.

2.4 아랍에미리트(UAE)

UAE는 1999년부터 인공강우 기술을 도입하여 운영하고 있으며, 국가기상센터에서 관리하고 있다. UAE의 주요 목표는 기후변화에 대응하기 위한 물 안보 강화 및 산림 보호이다. UAE는 건조한 기후와 극심한 물 부족 문제를 겪고 있어 인공강우 기술을 통해 이러한 문제를 해결하고 있다. 2014년부터 본격적인 상업 운영을 시작하여 기술 발전에 기여하고 있으며, 특히 기후변화 대응 방안으로서 인공강우의 중요성을 강조하고 있다. UAE의 인공강우 실험은 전국 단

그림 3. UAE의 국제인공증우포럼 참가연구자

위로 이루어지며, 4대의 항공기를 보유하고 있다. 4대씩 한 조를 이루어 주·야간 연속 실험을 수행하며, 연간 항공기 운영시간은 약 350시간이다. 이는 UAE의 기후 특성에 맞춘 강우 유도를 통해 물 자원을 확보하려는 시도로써 매우 중요한 환경적 역할을 하고 있다. 최대 연속 실험시간은 36시간이며, 연 증우량은 23% 증가한 것으로 평가된다. 또한 인공강우를 통해 대기 중 에어로졸 농도를 감소시키는 효과도 보고되었다. 이는 대기질 개선과 더불어 기후변화에 대한 대응책으로서의 효과를 보여주고 있으며, UAE 정부는 이러한 성과를 바탕으로 인공강우 기술을 더욱 발전시키고 있다. 또한 전 세계 인공강우 전문가들과 협력프로젝트를 수행하여 최첨단 인공강우기술의 개발에 많은 예산과 연구인력 양성을 추진 중에 있다(그림 3).

2.5. 한국

한국은 2008년에 인공강우 기술을 도입하여 운영하고 있으며, 현재 국립기상과학원의 응용기상연구부가 주도하여 실험을 수행하고 있다. 한국의 주요 목표는 산불 예방과 산악 건조 지역의 해소를 통해 산림 보호를 강화하는 것이다. 이는 한국의 산림 보호 정책과 연계되어 산불로 인한 피해를 최소화하고 생태계를 보전하려는 노력의 일환으로 진행되고 있다. 2024년에는 실증 단계에 진입하여 기술의 실용성과 효과를 검증하고 있다. 한국의 인공강우 실험은 강원도와 경북지역에서 이루어지고 있으며 실험규모는 크지 않으나, 분석결과에서 실험효과를 확인하였다. 최근(2020~2023) 인공강우 실험 결과 연 증우량이 1.7% 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 산불예방과 산림보호를 위한 다중항공기 연속실험 실증 연구 단계(2024~2028년)로 진입하였다. 2024년 실험전용기 2대로 연간 23회의 실험을 100회 이상으로 증가시켜 효과 확보에 매진하고 있다. 또한 인공강우 기술의 사회적 인식을 높이기 위해 다양한 교육 및 홍보 프로그램을 운영하고 있으며, 이를 통해 인공강우 기술에 대한 국민적 이해를 증진시키고 있다.

결론

주요 국가들의 인공강우 기술은 각기 다른 목적과 운영 방식으로 발전해 왔다. 미국은 농업 생산성 유지와 우박 억제, 태국은 가뭄 예방과 농업 지원, 중국은 대규모 수자원 확보, UAE는 기후변화 대응, 한국은 산불 예방을 주목적으로 삼고 있다. 이러한 국가별 사례를 통해 한국은 보

다 장기적인 연구와 투자 확대를 통해 인공강우 기술의 실용성을 높이고, 다른 국가들의 성공 사례를 벤치마킹하여 기후변화에 대비할 수 있는 기술적 대응력을 강화해야 할 것이다. 또한, 인공강우 기술의 사회적 수용성을 높이기 위한 지속적인 교육과 홍보가 필요하며, 이를 통해 국민적 이해와 지지를 얻는 것이 중요하다. 인공강우 기술은 기후변화와 물 부족 문제에 대한 중요한 해결책 중 하나로, 각국의 경험과 성과를 바탕으로 보다 효율적이고 지속 가능한 방향으로 발전해 나가야 할 것이다.

기상조절 주요 현업국가의 조직과 예산

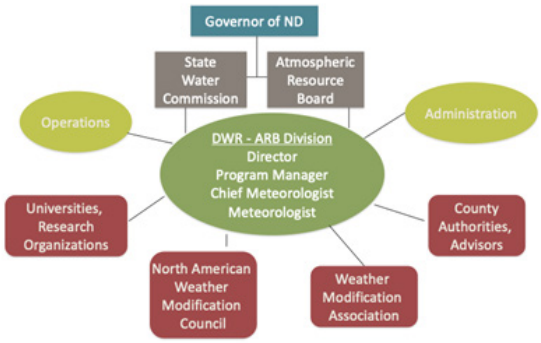
김영미 국립기상과학원 기상연구사 kymi19@korea.kr

최근 국제선에서 장거리 노선에서 제공하던 컵라면 서비스를 중단하였다. 난기류에 의한 사고 증가로 승객과 승무원의 안전을 위해 결정한 조치이다. 이처럼 기후변화로 인한 극한 기상현상 증가는 우리의 삶에 직간접적으로 연결된다. 2022년, 2023년 강원, 경북 지역에 발생한 대형산불로 수많은 이재민이 발생했으면 수백 헥타르의 산림이 파괴되었다. 우리나라뿐만 아니라, 세계 곳곳에서는 대형 산불, 가뭄, 폭설과 폭우로 많은 사회경제적 피해를 겪고 있으며 이를 대응하기 위한 많은 방법을 고안하고 있다. 기상조절은 그러한 방법 중의 하나로 우리나라에서는 산불 예방을 위해 인공증우 실험을 추진하고 있다. 여기서는 우리나라의 인공증우 실용화를 위한 준비를 위해 기상조절을 현업화하여 운영 중인 미국 노스다코타 주, 중국, 태국을 중심으로 그 조직과 예산 규모를 살펴보고자 한다. ■

1. 조직과 예산 현황

(1) 민간 중심의 인공강우, 미국 노스다코타

〈노스다코타 대기조직위원회 구성〉



미국 노스다코타 주는곡물수확 증대를 위해 관·산·학 협력으로 우박억제와 인공증우를 위한 기상조절을 수행한다. 우박 발생이 많은 6~8월에 주로 이루어지며 이 기간 동안은 24시간 교대 근무로 운영한다. 노스다코타 주의 특징은 관·산·학의 역할 구분이 뚜렷하다는 것이다. 주 운영 기관은 대기자원위원회(NDARB)이며, 이를 통해 실용화된 인공강우 기술의 실행과 연구가 이루어지고 있다. 기상조절 운영 주체는 대기자원위원회이고, 이 위원회는 노스다코타 주정부에서 주도하며, 기상조절 실험 운영과 관리를 하고 있다. 대기자원위원회는 기상조절협회(WMA), 대학 등 다양한 기관과 협력하여 운영되고 있다. NDARB 조직은 노스다코타 주지사(Governor of ND)의 지휘 아래 운영되며, 주요 부서로는 State Water Commission과 Atmospheric Resource Board가 있다. 이들은 자원 관리와 행정을 담당하며, Operations, Administration, Universities 및 북미 기상조절 위원회(North American Weather Modification Council) 등과 협력하여 인공강우 프로그램을 실행한다. NDARB 조직은 다양한 기상 조건을 분석하고, 기상조절 기술을 운영하는 데 중요한 역할을 수행하고 있다. 노스다코다 주에서의 인공강우 운영 체계 및 실험 주기는 매년 여름(6월~8월) 동안 기상 조건이 적합할 경우 인공강우 실험을 수행한다. 이러한 주기적인 실험은 가뭄 및 우박 등 극심한 기후 상황에 대비하기 위해 이루어진다.

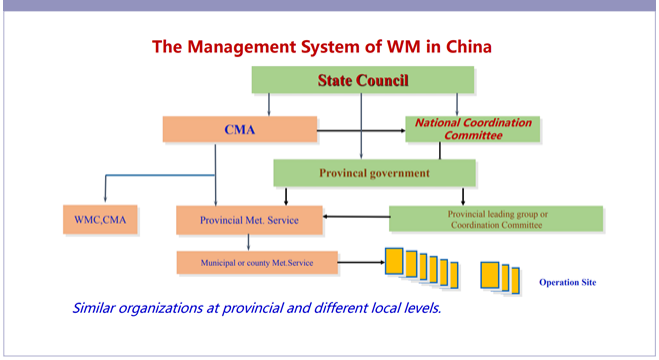
기상조절회사인 WMI는 항공실험과 항공기 유지관리 등 항공실험 실무를 담당한다. 대학은 조종사, 기상학자 등 기상조절 전문인력을 양성하며 기상조절에 필요한 관측기기 등을 개발한다. 업무 수행의 주체인 WMI는 1961년에 설립되었으며 현재 4대 비행기와 50여 명의 인력을 업무에 투입한다. 이때 대학의 인턴이 참여한다.

노스다코타는 6~8월 동안 상시 모니터링하여 조건이 발생하면 바로 비행기를 띄워 구름씨를 살포한다. 상시 모니터링을 위해 기상조절 현업상황실을 운영하고 있으며 여기에는 주정부의 직원이 근무한다. 공항에서는 주정부의 기상직과 WMI 직원, 인턴이 함께 근무하며 상황을 대기한다. 주정부는 목표지역의 예보와 실험계획, 기록 보관 등을 주관하고 WMI의 조종사는 항공기에서의 현장을 총괄하는 역할을 한다. 항공기 5대, 지역 공항 4대를 운영하고 있다. 2023년 운영비는 140만 달러(약 20억 원)의 예산을 기상조절에 투자한다. 이 중 66%는 참여 카운티의 세금으로 충당한다. 노스다코타 주는 이러한 조직과 예산을 투입하여 연 5~10% 증우, 우박피해 45% 감소, 밀 수확량 6% 증가라는 효과를 거두었다.

(2) 체계적인 법, 국가의 조직적 지원에 의한 인공강우, 중국

중국의 기상조절은 식량 안보, 우박억제, 수자원 확보, 산불 예방, 습지 보호, 주요 행사 지원 등을 목적으로 수행한다. 1958년에 인공증우를 목적으로 최초 실험을 시도한 이후 현재는 57대 항공기, 수천 개의 로켓과 지상실험기로 삼차원 체계를 운영하고 있다. 업무의 주체는 중국기상조절센터로 2006년 중국 기상청의 센터로 조직되었으며, 2021년에 산하 조직으로 승격하였다.

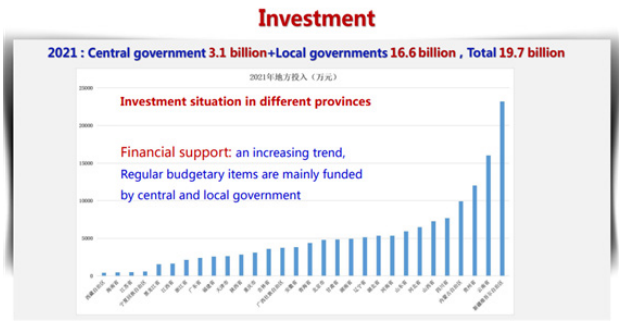
〈중국의 기상조절 관리체계〉



중국은 국가 중심으로 기상조절 업무를 조직적으로 운영하며 막대한 예산을 투자한다. 2021년 중국 중앙정부는 31억 위안을, 지방정부는 166억 위안을 기상조절에 투입했다. 우리나라 1조 4,000억 원에 해당하는 예산이다. 많은 예산을 투입하는 만큼 다른 나라에 비해 법, 제도, 조직의 규모가 체계적이고 크다. 1999년에 기상법을 통해 기상조절 활동의 기본 틀을 마련하였

고, 2022년에는 기상조절관리 규정이 채택되어 중국 국무원(state Council)을 통해 인공강우의 운영과 관리를 수행하고 있다. 국무원은 기상조절의 운영계획, 운영 요청, 장비 및 시설에 대한 사항을 다룬다. 중국기상청은 인공강우의 관리 및 지침을 제공하고 연간 운영계획을 수립한다. 또한 인공강우 전문인력을 확보하기 위한 훈련 및 역량개발 등의 업무를 수행한다. 지방정부는 중국기상청의 지원하에 인공강우 실무를 담당한다. 또한 중국 과학기술부, 중국 과학아카데미, 재정부, 공안부 등 22개의 기관이 참여한 기상조절의 국가협력위원회는 인공강우 수행에 필요한 장비 공급, 안전관리, 운영장소 제공 등 필요한 자원을 제공하기 위해 협력한다. 기상조절 현장의 관리, 항공기 및 지상장비 운영규칙 등 30개 이상의 운영규칙과 지역별로 특화한 지방 표준 관리기준을 가지고 있으며, 안전을 위한 관리시스템을 운영하고 있다.

〈2021년 중국의 예산 규모〉



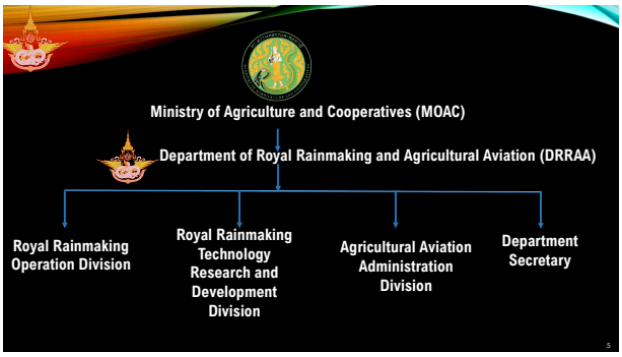
중국은 이러한 조직과 예산 투입을 통해 50만㎢의 영역이 우박으로부터 보호되었으며 이는 연간 5,000억 위안의 경제적 이득을 가져왔다.

(3) 국왕 주도의 인공강우, 태국

태국은 국왕의 주도하에 1955년 인공강우 계획을 최초로 수립하였다. 국민의 수요와 연구개발을 통해 1973년 인공조절 기술을 설립하고 1975년 인공강우 연구소를 설립하였다. 이후 몇 번의 조직 확대와 승급을 거쳐 2013년 인공강우농업항공국(DRRAA: Department of Royal Rainmaking and Agricultural Aviation)으로 승격하면서 현재의 조직체계를 갖추었다. 농업지원, 수자원관리, 산림보호, 미세먼지 저감 등을 다양한 목적으로 30대의 비행기로 연간 18,000회의 실험을 수행한다. 2020년부터 항공기 접근이 어려운 북쪽 지역에서는 3대의 지상 연소기를 현업에 사용하고 있다. 이를 위한 연 투자규모는 2022년 기준 130억 원이다.

DRRAA의 본부에서는 전체 관리와 운영의 총괄을 담당한다. 주요 정책을 수립하고 각 지역센터와의 협력을 조율한다. 운영부에서는 지역별 강우 필요성에 따라 인공강우 업무를 직접

〈태국 왕립인공강우농업항공국 조직도〉



수행한다. 기술연구개발부는 구름씨 물질 개발 등 인공강우 기술 개선 및 신기술 개발을 담당한다. 농업항공관리부는 항공기를 관리하고 운영하며 기조절과 관련한 항공기술을 지원한다. 태국 전역은 7개의 센터로 관리하며 지역별 강우 요구에 따라 업무를 수행한다.

태국은 자체 구름씨 물질 개발, 운영 등을 통해 샌드위치 기법이라는 독자적인 인공강우 기술을 개발하였다. 이는 구름의 발달과정에 따라 구름씨 살포위치와 종류를 변경하는 기술이다. 이러한 노력들로 태국은 10~15%의 연 증우량을 확보하였으며 방콕의 미세먼지 완화에 기여했다.

2. 요약 및 제언

미국 노스다코타 주의 기상조절은 관·산·학이 협력하여 민간주도로 운영한다는 특징을 가지고 있다. 중국은 국가 주도로 관련 부처의 지원하에 주 정부와 지방정부의 막대한 예산이 투자된다. 태국은 국왕이 주도적으로 시작하여 하나의 기관에서 체계적으로 운영한다. 중국과 태국은 농업지원을 주요 목적으로 하며 각 지역별 특성을 고려한 업무를 추가로 실시하며 1년 내내 업무를 수행한다. 미국은 우박이 많이 발생하는 6~8월에 주로 실시한다.

우리나라는 2024년 산불예방을 목적으로 인공강우 실용화로 가기 위한 실증단계에 도입했다. 미국 노스다코타를 벤치마킹한 상황실을 처음으로 마련하였고 국외에서 전용항공기 2대를 임대하였다. 2025년에는 한 대 더 도입하여 3대의 비행기를 이용하여 3~6시간 동안 연속실험이 가능할 예정이다. 기상청 국립기상과학원 기상응용연구부의 한 개 팀에서 소수의 인력으로 모든 업무를 수행하고 있다. 2024년 투자한 예산은 73억 원으로 이 중 항공기 임대비용이 38억 원이다. 앞서 언급한 다른 나라들에 비해 매우 적은 규모이다.

우리나라 실용화를 위해서는 최소 3대의 항공기, 운영 기술뿐만 아니라, 이를 위한 조직도 필

요하다. 태국과 중국도 연구단계에서는 하나의 부서업무로 수행하였으나 현업 운영을 단계인 현재는 하나의 독립기관인 인공강우농업항공국(태국), 기상조절센터(중국)를 보유하고 있다. 특히 중국 기상조절센터의 경우 중국기상청 내부 기관에서 2021년 산하기관으로 승격하였다. 우리나라도 실용화 국가로 가기 위해서는 인공강우 전담 조직이 필요하다. 이를 위해 조직 마련을 위한 법, 제도 마련, 예산확보가 동시에 이루어져야 한다.

기후변화로 인해 대형산불 발생 증가 등, 극한 기상 현상이 증가할 것으로 전망하는 상황에서 국민의 안전과 재산보호를 위한 인공강우 실용화는 필연적이다. 이 글에서 언급한 세 국가의 조직과 예산 규모는 우리에게 시사하는 바가 크다. 이 국가들도 현재의 모습을 갖추는데 수십 년의 세월이 걸렸다. 우리나라는 이제 실용화를 위한 첫발을 디딘 만큼 국민과 관련 부처의 많은 지원과 관심이 필요하다.

기상기술정책지 발간 목록

창간호, 제1권 제1호(통권 창간호), 2008년 3월			
칼 럼	• 기후변화 대응을 위한 기상청의 역할	권원태	3-11
정책초점	• 기후변화감시 발전 방향	김진석	12-18
	• 미국의 기상위성 개발현황과 향후전망	안명환	19-38
	• 기상산업의 위상과 성장가능성	김준모	39-45
	• 최적 일사 관측망 구축방안	이규태	46-57
	• 국가기상기술로드맵 수립의 배경과 의의	김백조, 김경립	58-61
논 단	• A New Generation of Heat Health Warning Systems for Seoul and Other Major Korean Cities	L.S. Kalkstein, S.C. Sheridan, Y.C.Au	62-68
해외기술동향	• 프랑스의 에어로솔 기후효과 관측 기술	김상우	69-79
	• 일본의 우주기상 기술	김지영, 신승숙	80-84

기상산업의 현황과 전략, 제1권 제2호(통권 제2호), 2008년 6월			
칼 럼	• 기후변화시대, 기상산업 발전상	봉종헌	1-3
정책초점	• 기상산업의 중요성과 전략적 위치	이중우	5-13
	• 기후변화가 산업에 미치는 경제적 영향과 적응대책	한기주	14-22
	• 기후경제학의 대두와 대응 전략	임상수	23-33
	• 기후변화와 신재생에너지 산업	구영덕	34-45
	• 기상산업 육성을 위한 정책대안 모색	김준모, 이기식	46-54
	• 미국 남동부의 응용기상산업 현황	임영권	55-64
	• 최근 황사의 특성 및 산업에 미치는 영향	김지영	65-70
논 단	• A brief introduction to the European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research (COST)	Radan Huth	71-81
	• 우주환경의 현황과 전망	안병호	82-92
해외기술동향	• 유럽의 기후변화 시나리오 불확실성 평가 : EU(유럽연합) 기후변화 프로젝트를 중심으로	임은순	93-103
	• 미국 NOAA의 지구 감시 현황	전영신	104-107

항공기 관측과 활용, 제1권 제3호(통권 제3호), 2008년 9월			
칼 럼	• 기상 관측·연구용 항공기 도입과 활용	정순갑	1-4
정책초점	• 무인항공기 개발 현황 및 응용 방안	오수훈, 구삼옥	6-18
	• 해외 기상관측용 항공기 운영 및 활용 실태	김금란, 장기호	19-34
	• 항공기를 이용한 대기물리 관측 체계 수립 방안	오성남	35-45
	• 효과적인 항공기 유지 관리 방안	김영철	46-56
	• 공군에서의 항공관측 현황과 전망	김종석	57-66
	• 항공기를 이용한 대기환경 감시	김정수	67-74
	• 항공/위성 정보를 활용한 재해 피해 조사	최우정, 심재현	75-84
논 단	• 유/무인항공기를 이용한 기후변화 감시	윤순창, 김지영	85-93
해외기술동향	• 미국의 첨단 기상관측 항공기(HIAPER) 운영 현황	김지영, 박소연	94-99
	• 미국의 탄소 추적자 시스템 개발 현황 및 전략	조천호	100-108
	• 미국의 우주기상 예보와 발전 방향	곽영실	109-117
뉴스 포커스	• 한국, IPCC 부의장국에 진출	허 은	118-119

기상기술정책지 발간 목록

전지구관측시스템 구축과 활용, 제1권 제4호(통권 제4호), 2008년 12월			
칼 럼	• 전지구관측시스템(GEOSS) 구축과 이행의 중요성	정순갑	1-4
정책초점	• GEO/GEOSS 현황과 추진 계획	엄원근	6-21
	• GEOSS 구축을 위한 전략적 접근 방안	김병수	22-31
	• GEO 집행위원회에서의 리더십 강화 방안	허 은	32-39
	• 국내의 분야별 GEOSS 구축과 발전 방안	신동철	40-41
	- 재해 분야	박덕근	42-44
	- 보건 분야	이희일	45-47
	- 에너지자원 분야	황재홍, 이사로	48-50
	- 기상 및 기후 분야	이병렬	51-53
	- 수문 및 수자원 분야	조효섭	54-56
	- 생태계와 생물다양성 분야	장임석	57-58
	- 농업 분야	이정택	59-62
	- 해양 분야	김태동	63-67
	- 우주 분야	김용승, 박종욱	68-71
논 단	• Taking GEOSS to the nest level	José Achache	72-75
해외기술동향	• GEOSS 공동 인프라(GCI) 구축 동향	강용성	76-83
	• 최근 주요 선진국의 GEO 구축 현황	이경미	84-95
뉴스 포커스	• 한국, GEO 집행 이사국 진출	이용섭	96-97

기상장비의 녹색산업화 전략, 제2권 제1호(통권 제5호), 2009년 3월			
칼 럼	• 녹색산업으로서의 기상장비 산업 육성 정책 방향	전병성	1-2
정책초점	• 기상장비의 산업여건과 국산화 전략	김상조	4-13
	• 기상장비 수출 산업화를 위한 성공전략	이종국	14-21
	• 기상레이더 국산화 추진 방안	장기호, 석미경, 김정희	22-29
	• 기상라이더의 상용화 현황과 육성 방안	조성주	30-41
	• 기상장비의 시장성 확보 전략 및 방향	이부용	42-51
논 단	• 외국의 기상레이더 개발 동향과 제언	이규원	52-72
해외기술동향	• 유럽의 기상장비 산업 현황: 핀란드 바이살라를 중심으로	방기석	73-80
	• 세계의 기상장비 및 신기술 동향	김지영, 박소연	81-89

기후변화와 수문기상, 제2권 제2호(통권 제6호), 2009년 6월			
칼 럼	• 기후변화에 따른 수문기상 정책 방향	전병성	1-2
정책초점	• 기후변화와 물환경정책	김영훈	4-15
	• 기후변화에 따른 물 관리 정책 방향	노재화	16-27
	• 기후변화에 따른 하천 설계빈도의 적정성 고찰	김문모, 정창삼, 여운광, 심재현	28-37
	• 수문기상정보를 활용한 확률강우량 산정 방안	문영일, 오태석	38-50
	• 수문기상학적 기후변화 추세	강부식	51-64
	• 기상정보 활용을 통한 미래의 물관리 정책	배덕효	65-77
	• 이상가뭄에 대응한 댐 운영 방안	차기욱	78-89
논 단	• 기후변화의 불확실성 해소를 위한 대응방안	양용석	90-110
해외기술동향	• 미국의 기상-수자원 연계기술 동향	정창삼	111-121
	• NOAA의 수문기상 서비스 및 연구개발 현황	김지영·박소연	122-131
	• 제5차 세계 물포럼(World Water Forum) 참관기	김용상	132-140

기상기술정책지 발간 목록

기상·기후변화와 경제, 제2권 제3호(통권 제7호), 2009년 9월			
칼 럼	• 기상정보의 경제적 가치 제고를 위한 정책 방향	전병성	1-2
정책초점	• 기후변화에 따른 에너지정책	박현종	4-18
	• 기후변화 대응이 경제에 미치는 영향	박종현	19-29
	• 기후변화가 농업경제에 미치는 영향	김창길	30-42
	• 기상 재난에 따른 경제적 비용 손실 추정	김정인	43-52
	• 기상산업 활성화와 과제	이만기	53-59
	• 날씨 경영과 기상산업 활성화를 위한 정책 제언	김동식	60-69
논 단	• 기후변화와 새로운 시장	이명균	70-78
해외기술동향	• 기상정보의 사회·경제적 가치와 편익 추정	김지영	79-85
	• 강수의 경제적 가치 평가 방법론	유승훈	86-96
뉴스 포커스	• 기상정보의 경제적 가치 평가 워크숍 개최 후기	이영곤	97-103

날씨·기후 공감, 제2권 제4호(통권 제8호), 2009년 12월			
칼 럼	• 날씨공감포럼의 의의와 발전방향	전병성	1-2
정책초점	• [건강] 지구온난화가 건강에 미치는 영향	고상백	4-19
	• [해양] 기후변화에 있어서 해양의 중요성과 정책방향	이재학	20-29
	• [산림] 기후변화에 따른 산림의 영향과 정책방안	차두송	30-41
	• [관광] 기후변화 시대의 관광 활성화 정책방향	김의근	42-50
	• [도시기후] 대구의 도시 기후 및 열 환경 특성	조명희, 조윤원, 김성재	51-60
	• [에너지] 태양에너지 소개와 보급의 필요성	김정배	61-72
	• [디자인] 생활디자인과 기후·기상과의 연계방안	김명주	73-88
논 단	• 국민과의 '소통' – 어떻게 할 것인가?	김연종	89-97
뉴스 포커스	• 날씨공감포럼 발전을 위한 정책 워크숍 개최 후기	김정윤	98-101

기후변화와 산업, 제3권 제1호(통권 제9호), 2010년 3월			
칼 럼	• 기후변화에 따른 기상산업의 성장가능성과 육성정책	박광준	1-2
정책초점	• 기상이변의 경제학	이지훈	4-11
	• 기후변화 영향의 경제적 평가에 관한 소고	한기주	12-21
	• 기후변화 정책에 따른 산업계 영향 및 제언	이종인	22-32
	• 기후변화예측 관련 기술 동향 및 정책 방향	이상현, 정상기, 이상훈	33-45
	• 기후변화와 건설 산업	강운산	46-56
	• 코펜하겐 어코드와 탄소시장	노종환	57-66
	• 기후변화, 환경산업 그리고 환경경영	이서원	67-77
	• 이산화탄소(CO_2) 저감기술 개발동향: DME 제조기술	조원준	78-84
논 단	• 기후변화와 정보통신 산업의 상관관계: 그린 IT를 중심으로	양용석	85-99
	• 기후변화 대응을 위한 산업계 및 소비자의 책임	김창섭	100-109
뉴스 포커스	• 기후변화미래포럼 개최 후기	김정윤	110-115

기상기술정책지 발간 목록

국가 기후정보 제공 및 활용 방안, 제3권 제2호(통권 제10호), 2010년 6월			
칼 럼	• 국가기후자료 관리의 중요성	켄 크로포드	1-2
정책초점	• 기후변화통합영향평가에대한 국가기후정보의 역할	전성우	4-11
	• 친환경 도시 관리를 위한 기후 정보 구축 방안	권영아	12-22
	• 기상정보의 농업적 활용과 전망	심교문	23-32
	• 기상자료 활용에 의한 산불위험예보 실시간 웹서비스	원명수	33-45
	• 경기도의 기상·기후정보 활용	김동영	46-57
	• 국가기본풍속지도의 필요성	권순덕	58-62
	• 국가기후자료센터 구축과 기상산업 활성화	김병선	63-74
	• 국가기후자료센터 설립과 민간의 역할 분담	나성준	75-83
	• 가치있는 기후정보	김윤태, 정도준	84-99
논 단	• 기상청 기후자료 활용 증대 방안에 관한 제언	최영은	100-110
뉴스 포커스	• 국가기후자료센터의 역할	임용한	111-119

장기예보 정보의 사회경제적 가치와 활용, 제3권 제3호(통권 제11호), 2010년 9월			
칼 럼	• 장기예보 투자 확대해야	박정규	1-2
정책초점	• 전력계통 운영 분야의 기상정보 활용	정응수	4-15
	• 기상 장기예보에 대한 소고	박창선	16-23
	• 패션머천다이징과 패션마케팅에서 기상 예보 정보의 활용	손미영	24-33
	• 장기예보의 사회·경제적 가치와 서비스 활성화 방안	김동식	34-43
	• 기상 장기예보의 농업적 가치와 활용	한점화	44-53
	• 장기예보 정보의 물관리 이수(利水) 측면에서의 가치와 활용	우수민, 김태국	54-64
	• 기상예보와 재해관리	박종윤, 신영섭	65-81
	• 장기예보 업무의 과거, 현재, 그리고 미래	김지영, 이현수	82-89
해외기술동향	• 영국기상청(Met Office) 해들리센터(Hadley Centre)의 기후 및 기후 영향에 관한 서비스 현황	조경숙	90-101
	• WMO 장기예보 다중모델 앙상블 선도센터(WMO LC-LRFMME)	윤원태	102-106
뉴스 포커스	• 영국기상청과의 계절예측시스템 공동 운영 협정 체결	이예숙	107-109

사회가 요구하는 미래기상서비스의 모습, 제3권 제4호(통권 제12호), 2010년 12월			
칼 럼	• 시대의 요구에 부응하는 기상·기후서비스	권원태	1-3
정책초점	• 기상학의 역사	윤일희	6-16
	• 지질학에서 본 기후변동의 과거, 현재, 그리고 미래	이용일	17-29
	• 예보기술의 성장 촉진을 위한 광각렌즈	변희룡	30-44
	• 전쟁과 기상	반기성	45-55
	• 날씨와 선거	유현종	56-64
	• 기후변화와 문학	신문수	65-74
	• 기후변화와 문화 I (문명의 시작과 유럽문명을 중심으로)	오성남	75-87
	• 비타민 D의 새로운 조명	김상완	88-96
	• G20서울정상회담과 경호기상정보 생산을 위한 기상청의 역할	이선제	97-105
논 단	• 기상정보의 축적과 유통 활성화를 통한 국부 창출	김영신	106-115
	• 날씨의 심리학	최창호	116-122
해외기술동향	• 기상정보의 사회·경제적 평가에 관한 해외동향	김정윤, 김인겸	123-130

기상기술정책지 발간 목록

신규 시장 창출을 통한 기상산업 육성 방안, 제4권 제1호(통권 제13호), 2011년 6월			
발간사	• G20 국가에 걸맞는 기상산업 발전 방향	조석준	1-3
칼 럼	• 대학과 공공연구소의 기상기술 이전 활성화 및 사업화 촉진을 위한 기술이전센터(TLO) 발전 방안	박종복	4-13
	• 새로운 기상산업 시장창출과 연계된 금융시장 활성화에 대한 소고 – 보험산업의 입장에서	조재린, 황진태	14-23
정책초점	• 신규 기상시장 창출을 통한 기상산업 육성 방안 연구	국립기상연구소 정책연구과	26-63

도시기상관측 선진화방안, 제4권 제2호(통권 제14호), 2011년 12월			
발간사	• 도시기상 선진화, 미래의 약속입니다.	조석준	1-3
칼 럼	• 도시기후 연구의 과거, 현재, 미래	최광용	6-18
	• 기후변화로 인한 도시 재해기상의 특성 변화 및 기상관측 선진화 방안	박민규, 이석민	19-30
	• 도시열섬의 환경평가와 도시기상관측시스템 구축방안	김해동	31-42
	• 수치모델을 이용한 도시기상 연구의 현재와 한계	이순환	43-50
	• 도시 기상 관측 연구 현황	박영산	51-62
정책초점	• 도시기상 관측 선진화 방안 연구	이영곤	64-73

원격탐측기술(레이더, 위성, 고층) 융합정책 실용화 방안, 제5권 제1호(통권 제15호), 2012년 6월			
칼 럼	• 원격탐측의 융합정책과 기상자원 가치 확산	Kenneth Crawford	3-8
정책초점	• 레이더-위성 융합 강수정보 생산 기술	신동빈	10-18
	• 위성과 첨단기술 융합을 통한 미래 기상서비스 발전 방향	은종원	19-27
	• 라이다 관측기술 활용 방안	김덕현	28-41
	• 위성기술을 이용한 수문분야의 융합 정책	배덕효, 이병주	42-53
	• 위성자료의 해양 환경감시 활용	황재동	54-65
논 단	• 우리나라의 융합기술발전 정책 방향	이상현	66-72
해외기술동향	• 일본의 원격탐사 활용 및 융합정책	윤보열, 장희욱, 임효숙	73-85
포 커 스	• 레이더 융합행정 포럼 : 레이더운영과	송원화	86-93

해양기상서비스의 현황 및 전망, 제5권 제2호(통권 제16호), 2012년 12월			
칼 럼	• 해양기상서비스의 의미 및 가치 확산	박관영	3-7
정책초점	• 해양기상 융합서비스의 필요성	김민수	10-20
	• 수자원 변동에 따른 해양기상서비스의 강화	김희용	21-29
	• 해양기상정보 관리의 선진화 방안	정일영	30-39
	• 해양기상·기후변화 대응을 위한 정책제언	양홍근	40-47
논 단	• 해양기상서비스 현황과 정책 방향	김유근	48-57
해외기술동향	• 선진 해양기상기술 동향	우승범	58-67
포 커 스	• 제4차 WMO/IOC 해양학 및 해양기상 합동기술위원회(JCOMM) 총회	해양기상과	68-73

기상기술정책지 발간 목록

국민의 행복 증진을 위한 "기상기후서비스 3.0", 제6권 제1호(통권 제17호), 2013년 6월			
칼 럼	• 국민이 원하는 기상기후서비스	이일수	3-4
정책초점	• 기상기후분야 과학과 서비스 발전 방향	전종갑	6-14
	• 지진조기경보 역량 강화를 위한 정책적 제언	최호선	15-30
	• 기상기후 서비스 혁신을 위한 기술경영 전략	박선영	31-47
	• 자연재해 대응 서비스 기술 및 정책변화	허종완, 손홍민	48-59
논 단	• 수요자 맞춤형 서비스를 위한 기상기술 고도화 방안	김영준	60-72
포 커 스	• 국민행복서비스 포럼 개최 후기	국립기상연구소 정책연구과	73-78

빅데이터 활용 기상융합서비스, 제6권 제2호(통권 제18호), 2013년 12월			
칼 럼	• 정부3.0에 따른 기상기후 빅데이터 활용	고윤화	3-4
정책초점	• [정책] 정부3.0 지원을 위한 빅데이터 융합전략	안문석	6-13
	• [정보] 스마트국가 구현을 위한 빅데이터 활용방안	김현곤	14-31
	• [서비스] 빅데이터 분석 기반 기상예보의 신뢰도 향상 방안	이기광	32-46
	• [경영] 빅데이터 기반 날씨경영 성과 제고 방안 – 공항기상정보 활용사례 –	방기석	47-58
	• [농업] 기후변화시나리오 활용 농업 기상 과학 융합 전략	김창길, 정지훈	59-76
	• [재난] 재난관리의 새로운 해결방안, 빅데이터	최선화, 김진영, 이종국	77-87
논 단	• 기상기후데이터를 품은 빅데이터	이재원	88-97
	• 한국형 복지국가의 전략적 방향성안	안상훈	98-111

기상기후 빅데이터와 경제, 제7권 제1호(통권 제19호), 2014년 6월			
칼 럼	• 기상기후 빅데이터를 활용한 날씨경영	고윤화	3-4
정책초점	• 기상기후정보의 사회경제적 역할	안중배	6-11
	• 미래 재난재해 해결을 위한 기상기후 서비스	김도우, 정재학	12-19
	• 빅데이터의 사회경제적 파급효과	김진화	20-30
	• 기상기후 빅데이터의 산업경영 활용과 전략	김정인	31-41
	• 기상기후 빅데이터 기반 기상산업육성	송근용	42-56
논 단	• 빅데이터 기반의 미래 산업	황종성	57-71
	• 기상기후정보 효율성 제고를 위한 융복합 연구	이성종	72-77
포 커 스	• 위험기상에 따른 기상기후 빅데이터 활용	국립기상연구소 정책연구과	78-93

위성 기술과 활용, 제7권 제2호(통권 제20호), 2014년 12월			
칼 럼	• 위성을 활용한 전지구적 관측 방안	고윤화	3-4
정책초점	• 기상위성 운영기술의 선진화 방안	김방엽	6-15
	• 관측위성기술의 현황 및 전망	김병진	16-24
	• 연구개발용 위성의 현업 활용성 제고 방안	안명환	25-43
	• 위성을 이용한 국가재난감시 체계 구축	윤보열, 염종민, 한경수	44-56
	• 위성영상서비스 시장 빅뱅과 새로운 관점	조황희	57-67
논 단	• 우주기상의 연구 현황 및 발전 방향	김용하	68-81
해외기술동향	• 기상위성 기술·정책 정보 동향	국가기상위성센터 위성기획과	82-92
	• 위성기반 작전기상 소개	안숙희, 김백조	93-100

기상기술정책지 발간 목록

장마의 사회경제적 영향, 제8권 제1호(통권 제21호), 2015년 6월			
칼 럼	• 장마와 날씨경영	고윤화	3-5
정책초점	• 수자원 확보에 있어서 장마의 역할	박정수	8-16
	• 장마가 농업생산에 미치는 영향	최지현	17-24
	• 장마의 변동성과 예측성 향상	서경환	25-30
	• 장마기간 유통산업 영향 및 전략	김정윤	31-40
	• 장마철 유의해야할 건강 상식	이준석	41-51
논 단	• 장마-몬순 예측기술 향상 방안	하경자	52-59
해외기술동향	• 동아시아 여름강수 예측기술 현황	권민호	60-65

겨울철 위험기상의 영향과 대응, 제8권 제2호(통권 제22호), 2015년 12월			
칼 럼	• 겨울철 위험기상 예보의 중요성	고윤화	3-4
정책초점	• 겨울철 위험기상을 위한 에너지 정책	김두천	6-17
	• 한국의 동절기 도로제설 현황	양충헌	18-29
	• 한파가 농업에 미치는 영향	심교문	30-41
	• 겨울철 한파 대비 건강관리	송경준	42-56
논 단	• 겨울철 위험기상의 예측능력 향상	김주홍	57-68
	• 미래 겨울철 위험기상의 변화	차동현	69-75

영향예보의 현황 및 응용, 제9권 제1호(통권 제23호), 2016년 6월			
칼 럼	• 영향예보를 통한 기상재해 리스크 경감	고윤화	3-4
정책초점	• 영향예보 비전과 추진 방향	정관영	6-22
	• 재해기상 영향예보시스템 현황 소개	최병철	23-31
	• 영향예보 지원을 위한 수치예보 개발 방향	김동준	32-40
	• 영향예보를 위한 수문기상정보 지원	이은정	41-51
논 단	• 재해영향예보의 효과	손철, 김건후	52-63
포 커 스	• 확률 예보를 위한 앙상블예측 기술 소개 및 현황	강지순	64-74

인공지능을 접목한 기상 분야 활용, 제9권 제2호(통권 제24호), 2016년 12월			
칼 럼	• 기상서비스를 변화시키는 인공지능	고윤화	3-4
정책초점	• 인공지능의 발달이 몰고 오는 변화상	진석용	6-20
	• 4차 산업혁명과 기상예보시스템의 혁신	최혜봉	21-30
	• 인공지능 시대를 살아가기 위한 인간 능력은?	구본권	31-50
	• 인공지능의 기상정책 개발 활용	국립기상과학원	51-63
논 단	• 인공지능 도입으로 정확도를 혁신하는 기상예보	고한석	64-77

기상기술정책지 발간 목록

영향예보 서비스 확대, 제10권 제1호(통권 제25호), 2017년 6월			
칼 럼	• 영향예보 서비스 개발과 활성화	고윤화	3-4
정책초점	• 영향예보 서비스 확대를 위한 제언	예상욱	6-17
	• 교통안전관리를 위한 도로기상정보 활용	손영태	18-30
	• 태풍 재해 리스크 관리를 위한 영향예보	이은주	31-40
	• 기상, 기후 그리고 숲과 사람	박주원	41-55
	• KISTI 재난대응 의사결정지원시스템(K-DMSS) 소개	조민수	56-70
논 단	• 기상예측정보를 활용한 농경지 물사용 영향예보	최진용, 홍민기, 이성학, 이승재	71-81
	• 화재 기상예보 서비스	류정우, 권성필	82-92
포 커 스	• 오픈데이터와 일본기상비즈니스 컨소시엄	정효정	93-107

4차 산업혁명과 미래 기상기술, 제10권 제2호(통권 제26호), 2017년 12월			
칼 럼	• 기후변화 저감을 위한 미래 기상기술	남재철	3-4
정책초점	• 4차 산업혁명과 미래 기후변화 대응기술	김형주	6-15
	• 4차 산업혁명 시대의 기후변화 대응	채여라	16-25
	• 인공지능 기술 발전을 위한 제도 및 정책	김윤정	26-43
	• 기후변화 대응을 위한 에너지 정책	전재완	44-54
논 단	• 기후변화에 대응하기 위한 농업과 과학기술의 융합	이현숙	55-65
포 커 스	• 4차 산업혁명과 미래 전문직	윤상후	66-73

여름철 위험기상의 영향과 대응, 제11권 제1호(통권 제27호), 2018년 6월			
칼 럼	• 국민의 안전을 위협하는 여름철 폭염과 대응	남재철	3-4
정책초점	• 기후변화로 심화되는 폭염 대응을 위한 경보체계의 개발	이명인	6-18
	• 재난정보관리 표준화 기술 개발	김병식	19-34
	• 지표홍반자외선정보 제공 및 향후 대응	박상서	35-43
	• 스마트 폭염대응을 위한 기상 전문가의 역할	권용석	44-53
	• 인공지능을 활용한 재해기상 저감·예측 기술	김동훈	54-69
논 단	• 미래 여름철 기온변화에 의한 건강영향 예측	이재영, 김호	70-77
포 커 스	• 폭염 피해와 정책 동향	김도우	78-85

기상정보 활용 확대와 기상청의 역할, 제12권 제1호(통권 제28호), 2019년 6월			
칼 럼	• 날씨, 국민 생활의 시작과 끝	김종석	3-4
정책초점	• 기상조건에 따른 이동수요의 변화	이재호, 전재영	6-14
	• 기상데이터로 알려주는 국민건강 알람서비스	한성욱, 전예슬	15-23
	• 신재생에너지 발전량 예측에서의 기상정보 활용	이영미, 박다빈	24-32
	• ICT수목원과 기상기술	이상용	33-43
	• 기후변화가 농작물 생산에 미치는 영향과 대응	문경환	44-57
	• 4차 산업혁명 기술을 활용한 친환경 건축/도시 설계 기술	이호영	58-69
	• 실시간 수(水)재해 예측을 위한 기상정보 활용 방안	이병주	70-80
포 커 스	• 복합재난대응 연구사례 중 도심지 침수 현상을 중심으로	백용, 이동섭, 김형준	81-87

기상기술정책지 발간 목록

겨울철 위험기상의 사회경제적 영향, 제12권 제2호(통권 제29호), 2019년 12월			
칼 럼	• 겨울철 안심사회 건설과 기상청의 기여	김종석	3-4
정책초점	• 도로에서의 기상정보 활용 및 시스템 구축 사례	윤덕근	6-16
	• 정확한 산불위험 예보를 위한 노력	이병두	17-24
	• 기해년 4월 산불 이후, 「산불극복 뉴딜 전략」 제안	김경남	25-39
	• 미세먼지 개선을 위한 국가 정책 및 기술 방향	심창섭	40-48
	• 2019년 겨울철 대설·한파 종합대책	최병진	49-59
	• 건강한 겨울나기, 겨울철 질환에 대한 예방 및 대응	임도선	60-68
논 단	• 서울시 미세먼지 저감정책의 효과: 차량 배출량 관점	허창회	69-80

중규모 대류계 기상현상의 이해와 대응, 제13권 제1호(통권 제30호), 2020년 6월			
칼 럼	• 호우 피해, 아는 만큼 대비할 수 있다	김종석	3-4
정책초점	• 코로나, 4차 산업혁명, 그리고 대기 관측	홍진규	6-23
	• 도시 돌발홍수 관리를 위한 수문과 기상 기술의 융합	황석환, 이동률	24-40
	• 기후변화 대응과 소하천 계측기술	정태성	41-52
논 단	• 돌발 기상 예보와 과제	이우진	53-65
	• 중규모 대류계의 예측	이동규	66-79
	• 위성원격탐사 기반의 한반도 하계 강우특성 진단	손병주	80-90
	• 중규모 대류계 연구를 위한 국지기상관측 제언	이규원	91-105
포 커 스	• 집중호우 등 풍수재 사고와 담보보험	이보영	106-112

유관 부처 기상정보 관측·예측기술 현황, 제13권 제2호(통권 제31호), 2020년 12월			
칼 럼	• 소금과 같은 기상서비스, 가치를 더하기 위해 부처협업이 필요한 때입니다	박광석	3-4
정책초점	• 국립해양조사원 해양예보서비스 현황	이준식	6-16
	• 동해연안 원전주변 해양환경변화 실시간 모니터링시스템	신충훈	17-31
	• 도로기상정보를 활용한 도로살얼음 사고예방 사례와 제언	경기원	32-43
	• 해양로봇을 활용한 해양 공간 조사와 활용	권오순	44-54
	• 국가대기오염측정망 운영과 명예대기관리원 제도	박지해	55-63
	• 식물계절 현장 관측자료를 활용한 산림생태계의 기후변화 영향 예측	손성원	64-72
	• 드론과 위성을 활용한 디지털 농업관측기술	홍석영	73-86
	• 홍수관리를 위한 기상 관측 및 정보 활용 현황	현명숙	87-98

미래 도심항공교통(UAM) 준비를 위한 지식·기술 그리고 정책, 제14권 제1호(통권 제32호), 2021년 6월			
칼 럼	• 도심항공모빌리티(UAM) 성공을 위한 필수 정보 '기상정보'	박광석	3-4
정책초점	• 도심항공교통을 위한 기상관측 제언	이규원	6-19
	• 도심항공기상을 위한 중미기상학	강성락	20-31
	• 안전한 UAM을 향한 제언	홍진규	32-41
	• 도심항공교통(UAM) 안전을 위한 바람시어 및 돌풍감지시스템	박문수	42-55
논 단	• K-UAM 사업으로의 도시대기과학 연구 활용	김재진	56-66
포 커 스	• UAM 운항 지원을 위한 항공기상 자료 관련 제언	구성관	67-76

기상기술정책지 발간 목록

2050 탄소중립 대응 전략, 제14권 제2호(통권 제33호), 2021년 12월			
칼 럼	• 탄소중립을 위한 청량음료 한 모금	박광석	3-4
정책초점	• 2050년 탄소중립 달성 전략	노동운	6-18
	• 2050 탄소중립 추진전략(에너지기술)	김현구	19-25
	• '2050 탄소중립'과 기후변화 과학	전의찬	26-32
	• 탄소중립 이행을 위한 신재생에너지 발전 분야의 이음새 없는(Seamless) 기후예측정보의 활용 제언	오지현	33-44
	• 2050 탄소중립 달성을 위한 생태계의 역할	이동근	45-55
	• 탄소중립대응을 위한 탄소흡수원 관리	이우균	56-65
포 커 스	• 기후위기 극복을 위한 탄소중립과 기후변화 적응	박진한	66-74

기상특보의 사회경제적 효과, 제15권 제1호(통권 제34호), 2022년 6월			
칼 럼	• 기상재해 리스크 경감을 위한 기상청의 도전	유희동	3-4
정책초점	• 폭염특보 현황 및 선진화	이명인	6-20
	• 폭염과 건강영향, 그리고 대응정책	홍윤철	21-29
	• 폭염(열파)이 국민 건강에 미치는 영향을 고려한 폭염특보 개선 방향 제언	최광용	30-41
	• 호우특보와 재난관리	조재웅	42-54
	• 도시 기후변화 재해취약성분석 제도의 이해와 기상분야 과제	권용석	55-62
논 단	• 변화하는 기후에 달라지는 태풍: 시사점과 대응방안	문일주	63-73
포 커 스	• 자연재난에 안전한 지자체 구축을 위한 기상특보의 활용	허종배	74-83

지진·화산·지진해일 기술동향 및 추진방향, 제15권 제2호(통권 제35호), 2022년 12월			
칼 럼	• 지진, 더 이상 남의 나라 얘기가 아니다	유희동	3-4
정책초점	• 3차원 속도구조 모델을 이용한 지진 분석과 지진동 예측	이준기	6-16
	• 우리나라 주변 해역에서 발생하는 지진	김광희	17-25
	• 지진해일 모델링의 새로운 도전과 과제	손상영	26-42
	• 지진해일 조기 탐지 및 예·경보를 위한 기술 동향 및 제언	신성원	43-55
	• 화산기술과 화산특화연구센터	윤성효	56-70
포 커 스	• 백두산 화산 재해	이윤수	71-81

선진 기술동향 및 미국 기상예산 분석, 제16권 제1호(통권 제36호), 2023년 6월			
칼 럼	• 기상기술의 퀀텀점프를 가능케 할 양자컴퓨팅 기술	유희동	3-5
정책초점	• 메커니즘 기반의 장마 이해	장은철	8-19
	• 집중관측을 통한 한반도 중규모 강수과정 연구	이규원	20-35
	• 양자컴퓨팅과 일기예보: 장마와 집중호우를 중심으로	방승현	36-47
	• 수치해석기반 기상 및 기후예측을 위한 양자컴퓨팅의 실현 가능성 연구	안도현	48-58
포 커 스	• 미국 해양대기청(NOAA)의 예산구조 분석	김득갑	59-71

기상기술정책지 발간 목록

기후전망·기상조절 기술동향 및 선진국 투자 동향, 제16권 제2호(통권 제37호), 2023년 12월			
칼 럼	• 기후위기 시대, 더욱 안전한 국민의 나라를 위한 기상청의 역할	유희동	3-5
정책초점	• 신속하게, 정의로운 저탄소사회로 전환을 위한 미래 기후전망의 활용과 제언	최영은	8-22
	• IPCC 6차 기후변화 평가보고서 기반 한반도 상세 기후변화 전망	차동현	23-35
	• 기상조절기술 현황 및 전망	김병곤	36-48
	• 구름물리챔버: 미래로 전진을 위한 실험실	엄준식	49-67
포 커 스	• 기상선진국 미국의 기상 관련 예산 분석	김득갑	68-89

해양기후변화 대응과 해양 감시 · 관측 기술, 제17권 제1호(통권 제38호), 2024년 6월			
칼 럼	• 미래를 위한 항해: 해양기상 · 기후 서비스 강화	유희동	3-5
정책초점	• 해양기후변화의 이해와 예측	안중배	8-24
	• 아르고 플로트 기반 전지구 해양감시·관측	김백조, 조형준, 이철규	25-35
	• 웨이브 글라이더(wave glider) 소개 및 활용	김대현	36-49
	• 해양글라이더의 개발과 활용: 국내 사례 및 태풍 예측력 향상 방안	박종진	50-69
포 커 스	• 수요자 중심의 해양기상서비스	박승균	70-83

인공강우 기술의 발전과 기후변화 대응을 위한 활용방안 제2호(통권 제39호), 2024년 12월			
칼 럼	• 비구름을 만드는 '인공강우', 산불 예방을 위한 새로운 대안	장동언	03-02
정책초점	• 인공강설실험의 물리·화학적 통합 검증	김병곤	08-21
	• 인공강우 시뮬레이션 연구 및 현업운영 방향	송상근	22-41
	• 인공강우의 실질적인 효과들	유철상	42-58
	• 모델링을 통해 살펴본 인공강우의 생태보호 효과	나우영	59-72
	• 인공강우를 통한 미세먼지 저감 가능성	박진수	73-85
	• 인공강우를 통한 우박억제 효과	김경익	86-94
	• 인공강우 항공관측의 필요성 및 전망	엄준식	95-115
	• 구름물리실험챔버 연구성과	박민수	130-137
해외기술동향	• 주요국가별 인공강우 기술 및 현황	차주완	138-143
포 커 스	• 기상조절 주요 현업국가의 조직과 예산	김영미	

『기상기술정책』 투고 안내

투고방법

1. 본 정책지는 기상기술 분야와 관련된 정책적 이슈나 최신 기술정보 동향을 다룬 글을 게재하며, 투고된 원고는 다른 간행물이나 단행본에서 발표되지 않은 것이어야 한다.
2. 원고의 특성에 따라 다음과 같은 5종류로 분류된다.
   (1) 칼럼 (2) 정책초점 (3) 논단 (4) 해외기술동향 (5) 뉴스 포커스
3. 본 정책지는 연 2회(6월, 12월) 발간되며, 원고는 수시로 접수한다.
4. 원고를 투고할 때는 투고신청서, 인쇄된 원고 2부, 그림과 표를 포함한 원본의 내용이 담긴 파일(hwp 또는 doc)을 제출하며, 일단 제출된 원고는 반환하지 않는다. 원고접수는 E-mail을 통해서도 가능하다.

원고심사

1. 원고는 편집위원회의 검토를 통하여 게재여부를 결정한다.

원고작성 요령

1. 원고의 분량은 A4용지 10매 내외(단, 칼럼은 A4용지 3~5매 분량)로 다음의 양식에 따라 작성한다.
   1) 워드프로세서는 '아래한글' 또는 'MS Word' 사용
   2) 글꼴 : 신명조
   3) 글자크기 : 본문 11pt, 표·그림 10pt
   4) 줄간격 : 160%
2. 원고는 국문 또는 영문으로 작성하되, 인명, 지명, 잡지명과 같이 어의가 혼동되기 쉬운 명칭은 영문 또는 한자를 혼용할 수 있다. 학술용어 및 물질명은 가능한 한 국문으로 표기한 후, 영문 또는 한문으로 삽입하여 표기한다. 숫자 및 단위의 표기는 SI규정에 따르며, 복합단위의 경우는 윗 첨자로 표시한다.
3. 원고 첫 페이지에 제목, 저자명, 소속, 직위, E-mail 등을 명기하고, 저자가 다수일 경우 제1저자를 맨 위에 기입하고, 나머지 저자는 그 아래에 순서대로 표시한다.
4. 원고의 계층을 나타내는 단락의 기호체계는 Ⅰ, 1, 1), (1), ①의 순서를 따른다.
5. 표와 그림은 본문의 삽입위치에 기재한다. 표와 그림의 제목은 각각 원고 전편을 통하여 일련번호를 매겨 그림은 아래쪽, 표는 위쪽에 표기하며, 자료의 출처는 아랫부분에 밝힌다.
   예) 표 1 표 2 그림 1 그림 2
6. 참고문헌(reference)
   1) 참고문헌 표기 양식
      - 참고문헌은 본문의 말미에 첨부하되 국내문헌(가나다 순), 외국문헌(알파벳 순)의 순서로 정리한다.
      - 저자가 3인 이상일 경우, '등' 또는 'et al.'을 사용한다.
      - 제1저자가 반복되는 경우 밑줄(_)로 표시하여 작성한다.
   2) 참고문헌 작성 양식
      - 단행본 : 저자, 출판년도: 서명(영문은 이탤릭체). 출판사, 총 페이지 수.
      - 학술논문 : 저자, 출판년도: 논문명. 게재지(영문은 이탤릭체), 권(호), 수록면.
      - 학술회의(또는 세미나) 발표논문 : 저자, 발표년도: 논문명, 프로시딩명(영문은 이탤릭체), 수록면.
      - 인터넷자료 : 웹 페이지 주소

METEOROLOGICAL TECHNOLOGY & POLICY

Volume 17, Number 2

33, Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju-do, 63568, Korea
TEL. 064-780-6505 | FAX. 064-738-9071
http://www.kma.go.kr