

ORIGINAL ARTICLE

공군수송기와 기상항공기를 연계한 인공강우 사례실험 분석

임윤규 · 장기호* · 노용훈 · 구정모 · 채상희 · 구해정 · 김민후 · 박동오 · 정운선 · 이광재¹⁾ · 김선희¹⁾ · 차주완 · 이용희

국립기상과학원 기상응용연구부 ¹⁾국립기상과학원 관측연구부

Analysis of Cloud Seeding Case Experiment in Connection with Republic of Korea Air Force Transport and KMA/NIMS Atmospheric Research Aircrafts

Yun-Kyu Lim, Ki-Ho Chang*, Yonghun Ro, Jung Mo Ku, Sanghee Chae, Hae-Jung Koo, Min-Hoo Kim, Dong-Oh Park, Woonseon Jung, Kwangjae Lee¹⁾, Sun Hee Kim¹⁾, Joo Wan Cha, Yong Hee Lee
Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences, KMA, Jeju 63568, Korea
¹⁾*Observation Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, KMA, Jeju 63568, Korea*

Abstract

Various seeding materials for cloud seeding are being used, and sodium chloride powder is one of them, which is commonly used. This study analyzed the experimental results of multi-aircraft cloud seeding in connection with Republic of Korea Air Force (CN235) and KMA/NIMS(Korea Meteorological Administration/National Institute of Meteorological Sciences) Atmospheric Research Aircraft. Powdered sodium chloride was used in CN235 for the first time in South Korea. The analysis of the cloud particle size distributions and radar reflectivity before and after cloud seeding showed that the growth efficiency of powdery seeding material in the cloud is slightly higher than that of hygroscopic flare composition in the distribution of number concentrations by cloud aerosol particle diameter (10 ~ 1000 μm). Considering the radar reflectivity, precipitation, and numerical model simulation, the enhanced precipitation due to cloud seeding was calculated to be a maximum of 3.7 mm for 6 hours. The simulated seeding effect area was about 3,695 km^2 , which corresponds to 13,634,550 tons of water. In the precipitation component analysis, as a direct verification method, the ion equivalent concentrations (Na^+ , Cl^- , Ca^{2+}) of the seeding material at the Bukgangneung site were found to be about 1000 times higher than those of other non-affected areas between about 1 and 2 hours after seeding. This study suggests the possibility of continuous multi-aircraft cloud seeding experiments to accumulate and increase the amount of precipitation enhancement.

Key words: Cloud seeding, Numerical model, Radar reflectivity, Ion equivalent concentration, Sodium chloride powder, Seeding flare

Received 22 September, 2023; Revised 20 November, 2023;

Accepted 23 November, 2023

*Corresponding author : Ki-Ho Chang, Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences, KMA, Jeju 63568, Korea

Phone : +82-64-780-6664

E-mail : khchang@korea.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

인공강우 기술은 빙정핵 작용을 하는 요오드화은(AgI) 또는 염화칼슘(CaCl₂), 염화나트륨(NaCl)과 같이 흡습성 성질을 가진 물질을 구름에 인위적으로 살포하여 구름입자 성장을 가속화하여 강수 효율을 증가시키는 기술을 일컫는다(Kim et al., 2020b). 이미 많은 나라에서 다양한 목적으로 인공강우에 따른 경제적인 효과를 제시하고 있다(Tessendorf et al., 2019; Kim et al., 2020a). 특히, 항공기를 이용한 인공증우 기술은 넓은 지역에 비교적 적은 비용으로 환경문제를 최소화하여 강수를 유발시킬 수 있는 방안 중 하나이다(Korneev et al., 2017).

인공강우의 평가 방법으로는 실험실 실험, 현장관측 및 수치 모델링 등이 포함될 수 있는데, 실험실 실험에는 시딩물질 평가(Bruintjes et al., 2012)와 구름챔버의 활용연구(DeMott et al., 1995; Möhler, et al., 2003; Tajiri et al., 2013) 등이 있다. 현장관측은 일반적으로 인공강우 효과가 나타난 지역과 아닌 지역을 대상으로 지상강수량을 비교하는 직·간접적 효과를 평가하고(Zipori et al., 2012), 통계 분석을 활용한 연구가 진행된 바 있다(Delene et al., 2011). 수치모델을 이용한 평가 방법으로는 구름물리모수화 방안에서 시딩물질에 대한 반응식을 추가하여 구름입자의 성장에 따른 강수량 변화를 모의하는 인공증우 수치모델을 활용한 방법이 있다(Chae et al., 2018).

미국 노스다코타주에서는 1977년부터 농작물의 우박 피해 억제와 인공증우 목적으로 항공기를 활용한 인공강우를 현업으로 실시하고 있다. 최근 연구에 따르면 지상 강우량계 자료를 이용하여 실시 이전과 이후의 증우 비율을 각 실험 대상지역과 비대상지역에 비교하여 그 차이를 분석하였는데, 인공강우 실험지역에서 약

1~12% 더 높은 강우량을 기록하였다(Tuftedal et al., 2022). French et al.(2017)은 미국 아이다호 프로젝트에서 레이더와 항공기에 장착된 구름물리 관측기기 측정값으로 빙정핵 씨뿌리기로 인한 얼음 결정의 생성, 성장 및 지상 강설 과정을 보여줌으로써, 인공강우 효과에 의한 객관적인 자료를 도출하였다.

우리나라의 인공강우 연구는 주로 기상청에서 실험 방법에 따른 효과검증 및 실험기술에 대한 연구축적을 목적으로 수행되고 있다(Cha et al., 2019; Jung et al., 2022). 인공증우 수치모델을 활용한 연구로 Kang et al.(2023)은 인공강우 실험조건의 변화에 따른 민감도분석 연구를 진행하였다. 또한 Lim et al.(2022)은 인공강우에 의한 미세먼지 저감효과 분석을 위해 수치모델을 이용하여 2021년 3월 29일 황사 사례일을 대상으로 기존 기상항공기(NARA)를 이용한 인공증우시에 따른 미세먼지 저감률이 최대 22%, 미세먼지 저감 영향면적은 인공증우 면적의 6.4배로 그 효과가 매우 크다고 하였다. 또한 Ku et al.(2023)은 인공강우 항공 실험에 따른 인공증우 지역의 미세먼지(PM₁₀) 농도가 감소하는 경향을 보여 인공강우에 의한 미세먼지 저감 가능성을 관측자료 기반으로 분석하여 제시하였다. Ro et al.(2020)은 지상 레이더자료를 기반으로 인공강우 효과를 체계적으로 분석할 수 있는 절차를 마련하였다. 또한 인공강우 구름물리연구를 위해 광학우적계의 현장관측자료와 구름물리과정 개념모델 등을 이용하여 강수과정에서 발생하는 다양한 구름 미세 물리과정을 추정하는 연구도 진행되고 있다(Cha et al., 2023).

인공강우를 위한 구름씨앗에 해당하는 물질로 흡습성 물질인 염화칼슘과 염화나트륨 등이 온구름 대상으로 활용되고 있고 빙정핵으로 작용하는 요오드화은 등이 냉구름을 대상으로 사용되고 있다. 이러한 구름씨앗 물질을 구름에 살포하기 위해 연소탄 또는 분말 형태로

Table 1. Comparison of characteristics of NARA and CN235 aircraft

Contents	NARA	CN235
Aircraft type	Beechcraft King Air 350 HW	CN235
Engine	PT6A-60A, P&W Turboprop (1,050 hp) × 2	GE CT7-9C3 Turboprop (1,750 hp) × 2
Height/Length/Width	4.37 m / 14.22 m / 17.65 m	8.2 m / 21.4 m / 25.8 m
Maximum take off weight	7,484 kg	15,000 kg
Cruising speed	580 km/h	450 km/h
Range	3,343 km	2,870 km

제작되어 사용되고 있다. 2018년도에 도입된 기상청 기상항공기는 인공강우용으로 불꽃형 연소탄과 투하형 연소탄 거치대가 장착되어 있지만, 분말 형태의 시딩물질 사용은 불가능한 실정이다.

본 연구는 국내 최초로 공군수송기와 기상항공기를 연계한 다중항공기 인공강우 연속실험 결과를 분석한 것으로 실험 사례일(2022년 10월)은 강원도 지역에 지속적인 동풍유입이 있어, 지형성 강제상승에 의한 구름 생성이 유리하게 작용하는 조건이다. 이번 실험에서 공군수송기의 조명탄 투하구를 이용하여 분말형 시딩물질을 국내에서 최초로 인공강우용으로 사용하게 되었다. 공군수송기 내에서 시딩물질을 사출할 수 있도록 사출장비의 전자파인증, 사출속도 등을 고려하여 개발되었다. 인공강우 실험효과 분석을 위해 기상항공기에 장착된 구름물리 센서 관측값, 지상레이더 반사도 및 인공증우 수치모의 등을 활용하였다.

2. 인공강우 항공실험 방법

국립기상과학원은 2018년 기상항공기 도입에 따라 본격적으로 인공강우 항공실험을 체계적으로 진행하게 되었다. 기상항공기에는 다목적(위험기상, 온실기체관측, 환경감시, 기상조절 등) 임무수행을 위한 다양한 관측기기가 장착되어 운영 중이다. 기상항공기를 활용한 기상조절 실험은 국립기상과학원에서 매년 약 20~25회로 산불예방, 가뭄저감, 미세먼지 저감 등의 목적으로 실시하고 있고, 그 효과에 대한 검증분석 연구를 수행하고 있다.

본 실험은 기존 기상항공기 뿐만 아니라 공군수송기와 연계하여 인공강우 실험을 진행한 국내최초 사례이다. 공군수송기와 연계는 최근 태국 등에 인공증우 효율성이 좋다고 알려진 분말형 흡습성 시딩물질(염화칼슘(CaCl_2), 염화나트륨(NaCl) 등)에 대한 실험이 필요하였기 때문이다. 기상항공기는 불꽃형연소탄을 기상조절 실험에 사용할 수 있도록 고안되었으며 다양한 관측기들이 내부에 장착되어 항공기 적재중량의 한계 때문에 분말형 시딩물질을 활용한 인공강우 실험에 적합하지 않았다.

따라서 우리나라 공군에서 운영하고 있는 CN235 기종의 조명탄 투하구를 활용한 분말형 시딩물질 항공실험을 2020년부터 기획하여 시딩물질을 안정적으로 배출하는 사출장치 등을 공군과 협의를 통해 개발하여 이

번 실험을 진행하게 되었다. Table 1에 기상항공기와 공군수송기의 재원에 대해서 나타내었다.

항공실험에서 먼저 공군수송기로 분말형 시딩물질인 염화나트륨 혼합물을 시딩하고 연이어 기상항공기로 불꽃형 염화칼슘 연소탄 24발을 시딩하였다. 총 시딩 시간은 2시간 29분으로 공군수송기 1시간 32분, 기상항공기 57분이다. 기존 기상항공기만으로 시딩할 경우는 항공연료와 비행거리 등을 감안했을때, 1시간 정도가 한계이나, 이와같이 다중 항공기 연속실험으로 2시간 이상 시딩시간을 확보하여 기존대비 정량적인 인공강우량 증대를 기대할 수 있다.

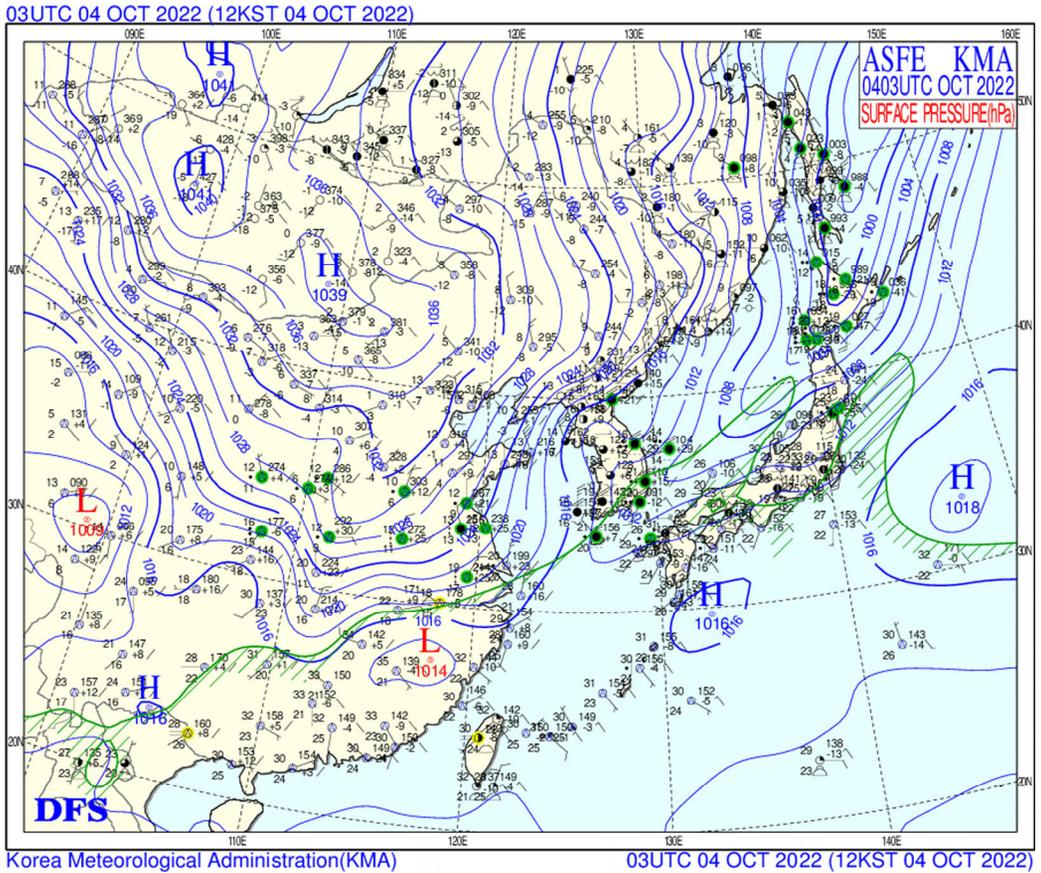
2.1. 실험 사례일

Fig. 1은 실험사례일의 기상조건을 나타낸 것이다. 우리나라 남부지역에 한기가 남하하여 발달한 기단이 나타나고 있고(Fig. 1a), 이에 따라 전라도 및 경상도에 비가 내리고 있으며 점차 남동진 하여 구름대가 사라진다. 기단의 영향과 별개로 강원도는 동풍에 의한 영향으로 구름대(Fig. 1b)가 발달할 수 있는 조건이 된다. 700 hPa 상승속도(Fig. 1c)에서 알 수 있듯이 강원도 강릉 중심의 해안선 일대와 그 앞바다에서는 상승기류가 없어(상승속도 0) 대류성으로 발달한 구름이 아님을 알 수 있고, 850 hPa 유선도(Fig. 1d)에도 나오듯이 북동풍계의 바람 영향으로 차가운 북동쪽 기류가 해상으로부터 유입되어 해기차에 의한 구름이 태백산맥을 넘어가는 현상으로 나타난다. 이러한 강원도 동풍유입 사례는 태백산맥의 지형적 강제상승 요인과 더불어 지속적인 강수발생 메커니즘으로 종종 나타나고 있다.

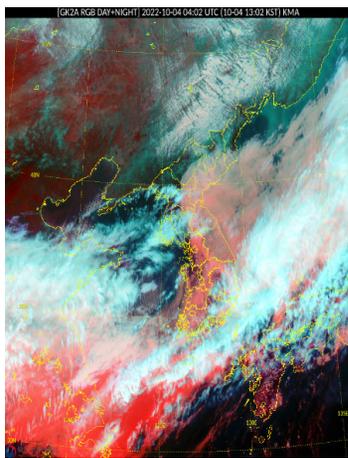
이와 같은 기상조건에서 발달하는 구름은 연직적으로는 2~3 km 규모 수준의 구름성장 한계가 있어 강수입자 성장에 필요한 과포화수증기의 절대량이 부족할 수 있지만, 수평적으로 그 규모가 크게 발달할 수 있고 지속적인 구름발달 메커니즘이 유지될 수 있는 장점이 있기에 인위적인 구름씨앗 살포로 강수성장을 촉진시켜 인공증우 효과를 기대할 수 있다.

2.2. 시딩물질

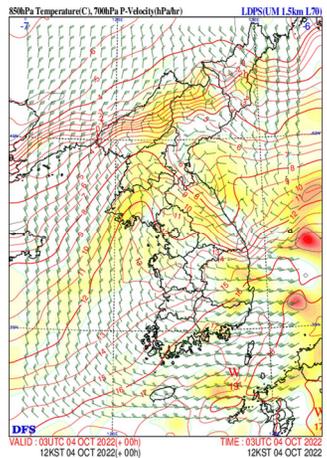
인공강우 항공실험에서 사용하는 시딩물질은 크게 불꽃형연소탄 형태와 분말형 파우더 형식으로 나눌 수 있다. 기상항공기는 인공강우 실험을 위하여 비행기 날개에 각각 12발씩 총 24발의 연소탄을 장착할 수 있고



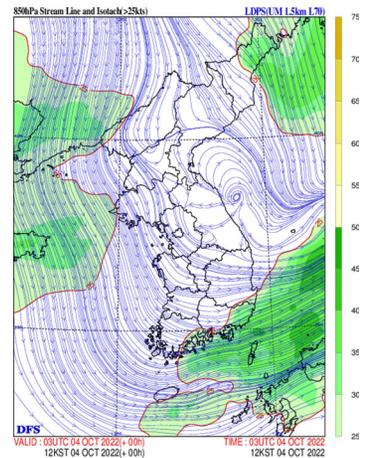
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 1. Synoptic weather map (a), GK2A RGB day+night satellite image (b), UM LDAPS 700 hPa P-velocity (c) and 850 hPa stream line (d) (October 4, 2022).

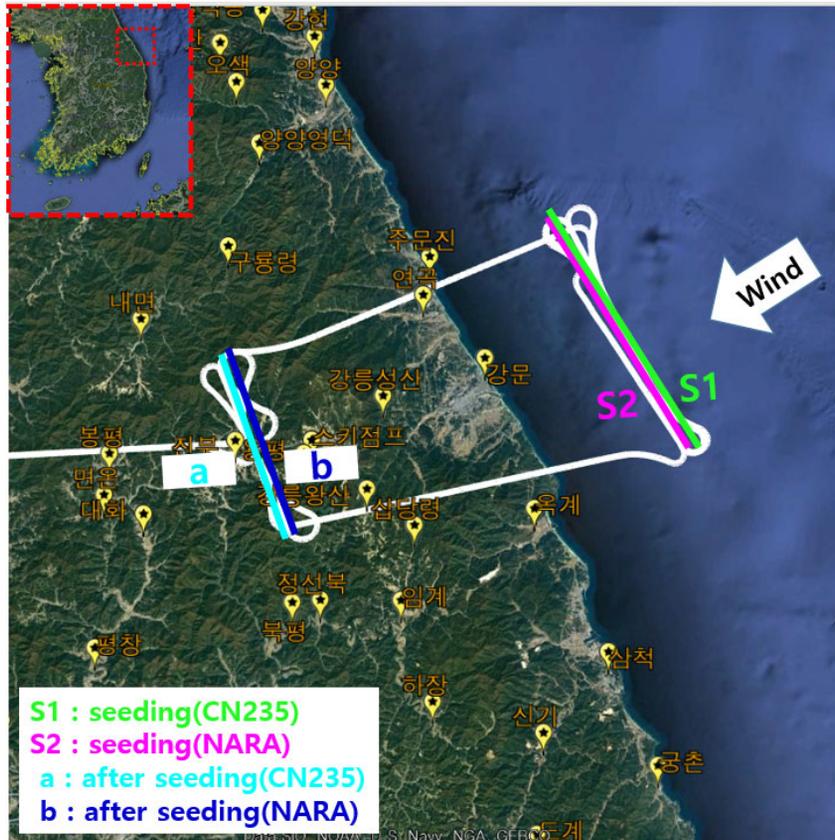


Fig. 2. Seeding lines (S1, S2) and observation routes (a, b) of air force aircraft (CN235) and KMA aircraft (NARA) on the case day of October 4, 2022.

록 고안되었다. 여기에 장착할 수 있는 연소탄은 흡습성 물질인 염화칼슘 연소탄과 빙정핵 물질인 요오드화은 연소탄이 있으며, 본 실험에서는 염화칼슘 고체분말 중량 100 g 이상인 염화칼슘 연소탄 24발을 사용하였다. 이와 더불어 공군수송기에서는 분말형 시딩물질인 염화나트륨 혼합물 1.5톤이 사용되었다. 순도 99% 이상의 염화나트륨 입자를 미분(평균직경 약 100 μm) 처리하여 자이언트구름응결핵(GCCN)으로 작용하도록 하고, 시딩물질 보관중에 자체 응고를 억제하기 위해 식품 첨가제로 사용되고있는 제삼인산칼슘을 약 5% 첨가하여 혼합물 형태로 제작하였다.

2.3. 시딩경로

2022년 10월 4일 오전부터 공군수송기에 분말형 시

딩물질인 염화나트륨 혼합물 1.5 톤을 적재하고 13시 7분에 서울공항에서 이륙하여 Fig. 2에 나타난 시딩지역 (S1)에 13시 48분에 도착하였다. 본 실험과 같이 강원도 산불예방을 위한 목적의 인공강우 실험의 경우, 실험 효과를 측정할 수 있는 관측기기(강수채수기, 연직구름 관측레이더(MRR), 입자계수기(CPC), 자동기상관측장비(AWS) 등)가 잘 갖추어진 대관령 구름물리관측소를 목표지점으로 설정하여 진행하고 있다.

따라서 시딩라인(S1)은 목표지점인 대관령의 풍상측 약 1시간 거리에 해당하는 지점에서 수직방향으로 약 40 km에 해당하는 거리로 설정하였다. 풍상측 1시간 거리는 시딩물질이 반응하여 강수성장 및 지상낙하까지 고려한 시간을 의미한다. Sarah et al.(2018)은 미국 아이다호 수자원확보를 위한 겨울철 인공강우 실험

에서 시딩후 레이더반사도에 나타난 시딩효과가 약 20 ~ 50 km 풍하측 범위에서 나타난 것을 밝힌바 있다. 이때의 시딩고도에서의 풍속이 약 $20 \sim 30 \text{ ms}^{-1}$ 이었으므로 시딩물질의 반응후 강수 성장시간을 고려하면 17 ~ 42분에 달하는 것을 알 수 있다.

본 실험에서 고려한 1시간의 풍상측 거리는 해당 구름의 과냉각수적량, 풍속, 연직운동량 등 강수성장에 필요한 정확한 반응시간은 측정하기 어렵기 때문에 보다 간편히 활용할 수 있도록 풍속에 근거하여 보편적인 값을 적용한 것이다. 공군수송기 시딩은 고도 1.6 km 에서 13시 48분부터 15시 20분까지 시딩라인(S1)을 왕복 비행하면서 수행되었고 분당 16.3 kg의 염화나트륨 혼합물이 사출되었다. 총 1.5 톤 염화나트륨 혼합물 사출이 완료되고 공군수송기는 약 1 km 고도를 상승하여 항공 촬영을 수행하고 복귀하였다. 그 이후 기상항공기가 김포공항에서 15시 33분에 이륙하여 16시 29분에 관측비행(a)을 먼저 수행하고 57분 동안 불꽃형 염화칼슘연소탄 24발을 왕복시딩(S2)하였다. 그 후 17시 26분부터 18시 28분까지 관측비행(b)을 수행하고 복귀하였다.

3. 인공강우 효과 검증방법

본 연구에서 인공강우 효과 검증을 위해 사용한 방법은 네 가지로 첫째, 기상항공기에 탑재된 구름물리관측 장비에 나타난 구름물리특성 분석이다. 두번째, 지상레이더반사도 자료의 시·공간적 변화분석이다. 세번째, 인공증우 수치모델에 나타난 시딩물질의 확산범위와 지상강우량 변화량 분석이다. 마지막은 강수성분 이온 분석을 통한 인공강우 시딩물질의 직접적 영향 검증이다(NIMS, 2022; NIMS, 2023). 최종적으로 인공증우량 산정은 종관기상장, 풍계, 자연강수, 지형효과, 지상강우량, 레이더반사도, 인공증우 수치모델 등을 종합적으로 고려하여 인공강우의 효과가 나타난 지역과 아닌 지역의 지상강수량 차이로 나타낸다(Ro et al., 2023).

3.1. 항공관측자료 분석

본 연구에서 인공강우에 의한 구름물리 특성변화를 살펴보기 위해 기상항공기(NARA)에 장착된 구름입자 측정기(CCP, Cloud Combination Probe)와 강수입자 측정기(PIP, Precipitation Imaging Probe)를 이용하였다. CCP는 Hot-wire Liquid Water Content

Sensor(LWC-100), Cloud Droplet Probe(CDP), Cloud Imaging Probe(CIP)의 총 3개의 구름물리 관측센서가 통합된 것이다. 각 관측센서에 필요한 설치 공간, 케이블 연결, 데이터 시스템을 최소화하여 항공관측에 적합하도록 설계된 복합 관측장비이다. CDP의 입자크기(지름) 측정범위는 $2 \sim 50 \mu\text{m}$ 이고, CIP는 $12.5 \mu\text{m} \sim 1.55 \text{ mm}$ 의 측정범위를 가지고 있다. 통합적으로 CCP를 사용하여 구름의 초대입자 크기 관측이 가능하다. 구름입자가 성장한 강수입자 크기는 PIP를 이용하여 측정할 수 있다. PIP는 2차원 이미징을 표출하는 1차원적 크기($100 \mu\text{m} \sim 6.2 \text{ mm}$)를 측정하는 장비로 레이저와 다이오드 배열로 구름입자의 이미지를 측정한다(NIMS, 2019).

3.2. 인공증우 수치모델

기상청에서는 인공증우 실험을 통한 시딩물질의 확산과 그 영향을 분석하기 위하여 WRF (Weather Research & Forecasting) 모델에 기반한 인공증우(설) 수치모델을 개발하여 운영하고 있다(Kim et al., 2015; Chae et al., 2018). 인공증우 수치모델은 WRF 모델의 Morrison 미세물리방안(Morrison et al., 2005)에 시딩물질(CaCl_2 , AgI)의 물리적 특성이 로그 정규함수에 따라 강수 및 얼음입자의 수농도로 산출될 수 있도록 수정한 것이다. 인공증우 수치모델의 초기장과 경계장 생성을 위해 기상청에서 운영중인 UM (Unified Model) LDAPS (Local Data Assimilation Prediction System) 분석장 자료를 이용하였다. 수치모델의 도메인은 본 연구 대상지역인 강원도를 중심으로 264×332 격자(수평해상도 1 km), 연직 40 개층으로 구성하였다(Fig. 5 도메인 참고). 모델의 물리 모수화는 YSU 경계층, Noah LSM 지표, Goddard 단파 복사, RRTM 장파 복사 방안을 채택하였다.

3.3. 지상레이더 자료 분석

본 연구에서는 국내 설치된 이중편파 기상레이더 자료를 이용하여 시딩효과를 정량적으로 검증하고자 하였다. Ro et al.(2023)에 의해 제시된 방법을 이용하여 진행하였다. 우선, 시딩전에는 유입강수나 구름분포를 파악하고 이동방향을 확인하여 풍계에 따른 시딩물질의 확산범위를 산정한다. 또한, 시딩라인 주변 레이더 에코를 분석하여 구름의 물리적 특성 변화를 확인한다.

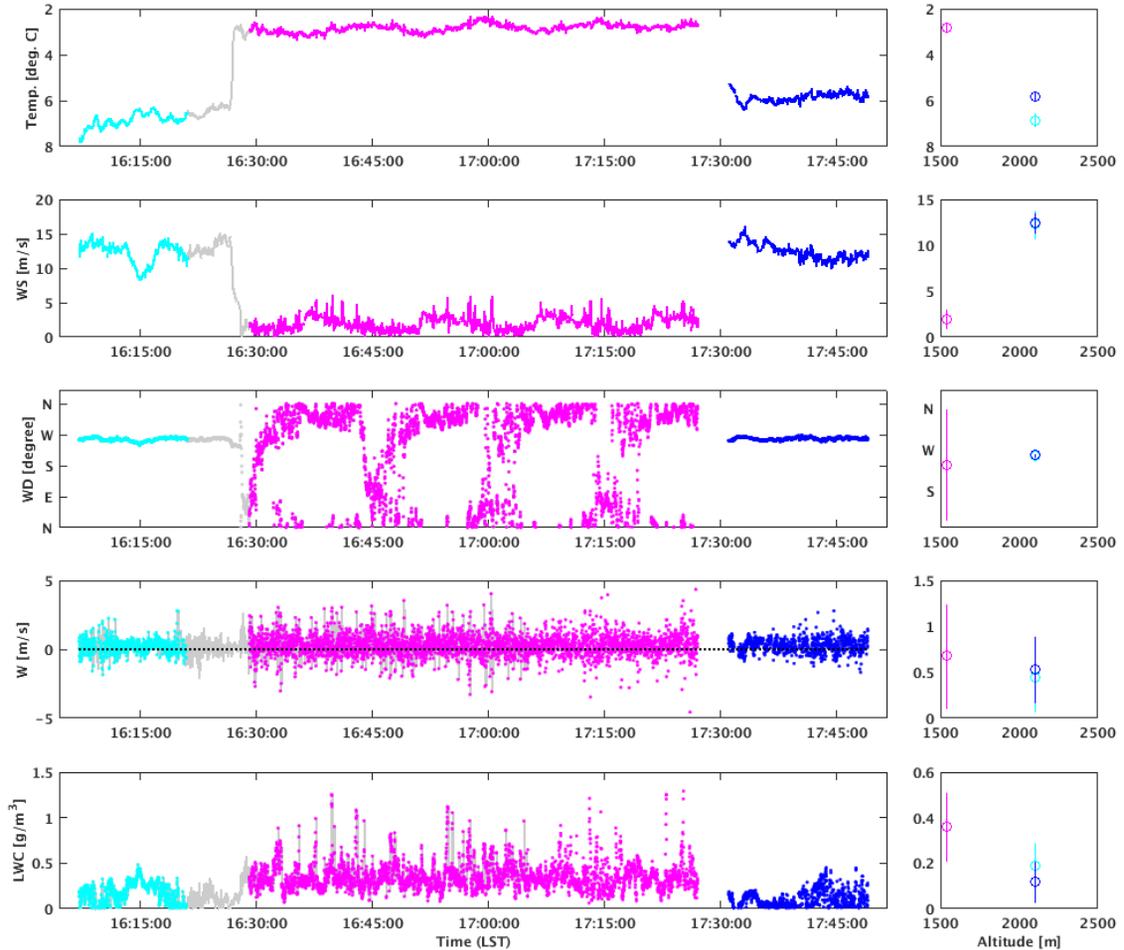


Fig. 3. Time series of AIMMS observations mounted on a KMA aircraft (NARA) (after seeding of CN235 (sky), seeding (purple), and after seeding of NARA (blue)).

시딩물질 확산 구간에서 일시적으로 나타나는 반사도 에코를 시딩효과와 자연강수의 영향으로 판단한다. 이때 순수 자연강수의 영향과 인공강우 시딩효과가 혼합된 강수 에코의 변화가 나타났는지를 구분한다. 이를 위해 레이더 반사도의 시간별 추이를 추가로 분석하여 자연강수의 유입이 없을 때는 일시적으로 감지된 반사도를 순수한 시딩효과로 판단하고 자연강수의 유입이 있을 때는 수치모델 상의 시딩물질 영향 시간대에 나타난 자연강수 구름의 최대 반사도와 평균 반사도와의 차이를 시딩효과로 판단한다.

3.4. 강수성분 분석

인공강우 효과의 직접적 검증방법의 하나로 지상 강수량을 직접 채수하여 그 성분을 조사하여 시딩물질 (Ca^+ , Na^+ , Cl^- 등)에 해당하는 요소 특성을 분석하는 것이다. 국립기상과학원에서는 인공강우 실험 설계시 예상 효과지점과 비효과지점을 사전에 선정하여 실험 시작 2시간 전부터 1시간 간격으로 자동으로 총 6회(6시간) 강수를 채수하도록 자동강수채수기를 설치한다. 인공강우 실험이 끝난 뒤 시간별 강수 채수 샘플을 수거하여 한국환경공단에 이온, 중금속 등 1차 성분분석을 의뢰하여 그 결과를 바탕으로 실험조건별 상세분석을 자체에서 실시하고 있다.

Table 2. AIMMS (Aircraft-Integrated Meteorological Measurement System) measurement data installed on NARA

Components	After CN235 (a)	Seeding (S2)	After NARA (b)
Height (m)	2,103 (±3)	1,542 (±2)	2,102 (±4)
Air temperature (°C)	6.86 (±0.3)	2.83 (±0.2)	5.85 (±0.2)
Wind speed (ms-1)	12.29 (±1.6)	1.96 (±1.0)	12.45 (±1.2)
Vertical wind speed (ms-1)	0.44 (±0.37)	0.68 (±0.57)	0.53 (±0.36)
Liquid water contents (gm-3)	0.19 (±0.10)	0.36 (±0.15)	0.12 (±0.10)

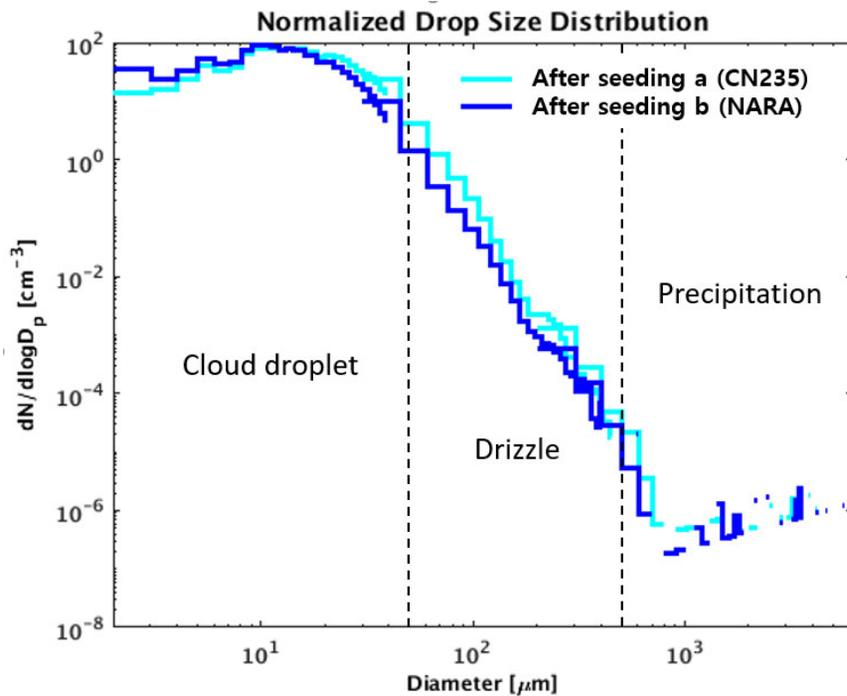


Fig. 4. Log-normal number concentration according to Normalized drop size distribution with aerosol particle diameter.

4. 분석 결과

4.1. 구름물리 특성

Fig. 3은 본 실험사례의 항공기 이동경로(Fig. 2 참고)에 따른 기상요소(기온, 풍속, 풍향, 연직상승속도, 액체수함량) 시계열을 나타낸 것으로 공군수송기(하늘색)와 기상항공기(푸른색)의 인공증우 영향효과로 추정되는 시점에서의 측정값이다. 두 경우 모두 태백산맥 서쪽지역의 유사한 지리적 위치 상공에서 측정된 것으로 그 측정시간에서 약 1시간정도 차이가 있을뿐, 기

온, 바람, 연직상승속도 및 액체수함량 관측값이 크게 차이가 나타나지 않고 있다. 이와 달리 분홍색은 시딩 중인 기상항공기의 측정값으로 시딩 후(하늘색, 푸른색)에 해당하는 지점과 지리적 위치의 차이가 있고 또한 기온 및 바람 관측요소에서도 서로 다른 기상환경임을 알 수 있다.

Table 2는 본 실험사례의 항공기 이동경로에 따른 기상요소 평균값을 나타낸 것으로 공군수송기와 기상항공기 시딩후의 기상요소를 비교할때, 관측고도와 바람은 거의 유사함을 알 수 있지만, 기온에서 공군수송기

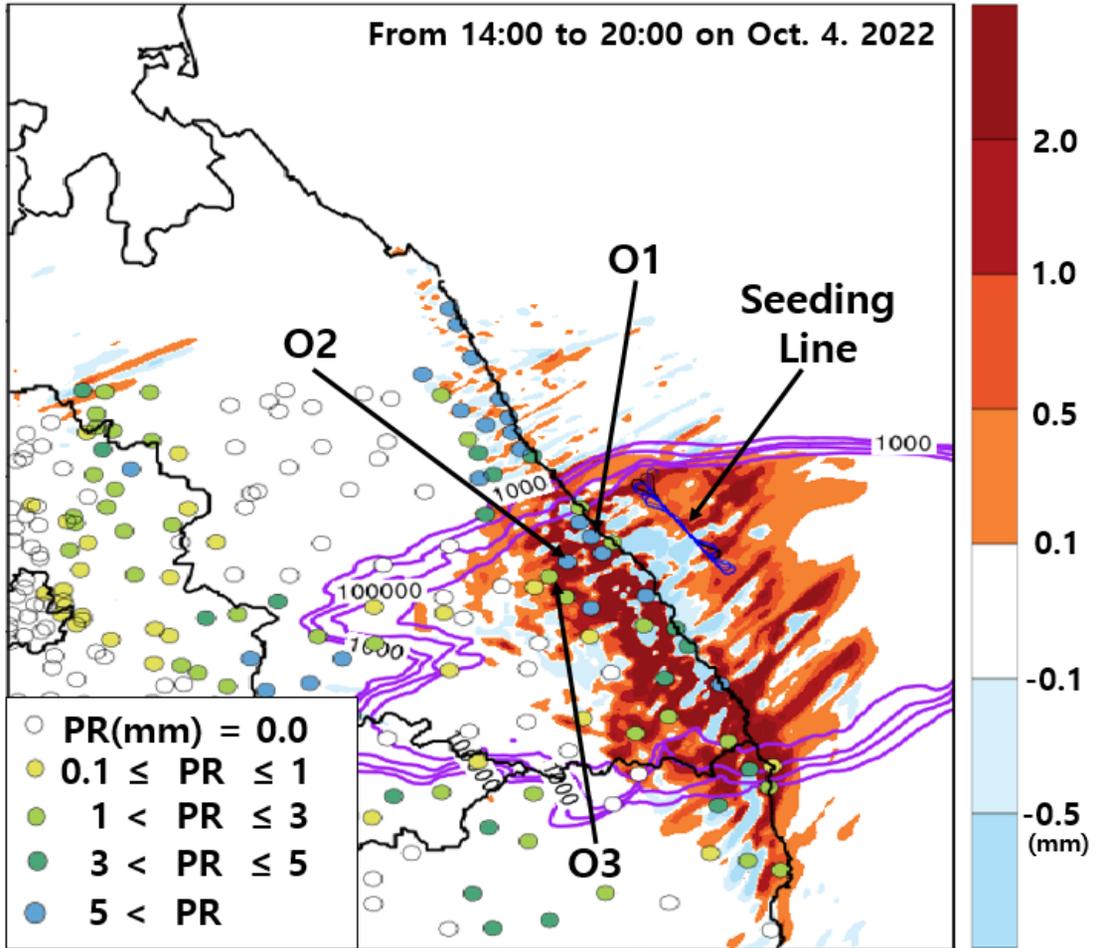


Fig. 5. Horizontal distribution of accumulated AWS precipitation (circle) and simulated rain enhancement (Shaded red) from 14:00 to 20:00 (purple line is 6hours (13-20 KST) averaged seeding material number concentration(#m⁻³), O1: Gangneung, O2: Gangneungseongsan, O3: Daegwallyeong observation sites).

가 약 1°C 높은 환경이고 상승속도가 약 0.1 ms⁻¹ 낮은 값을 보이고 있다. 반면에 액체수함량(LWC)의 경우 공군수송기 관측환경에서 0.19 gm⁻³, 기상항공기는 0.12 gm⁻³로 나타나 분말형 시딩물질을 살포한 공군수송기에서 높은값을 보였다.

Fig. 4에 CCP와 PIP 장비를 이용하여 측정된 구름입자 크기별 수농도를 나타내었다. 공군수송기에는 구름물리관측 장비가 없기 때문에 1차 공군수송기 시딩임무가 종료된 후 2차로 시딩임무로 나선 기상항공기가 1차 임무종료 1시간 후에 공군수송기 효과검증을 위한 관측비행(하늘색)을 하였고, 그 이후 2차 시딩임무를 수

행하고 공군수송기 효과검증과 동일한 지역에서 2차 관측비행(파란색)을 수행한 것이다. 강원도 동풍 유입이 지속적으로 이루어지고 있는 상황에서 그 유입량 등 환경변화가 없다는 가정하에 분말형 시딩물질과 불꽃형 연소탄의 구름입자 성장효율을 고려해보았다. Fig. 4에 나타난 입자직경별 수농도 크기에서 10 ~ 1000 μm 범위 공군수송기에 의한 분말형 시딩물질의 구름입자 성장 효율이 기상항공기의 불꽃형 연소탄 보다 좋은 것을 알 수 있다. 만약 두 항공기 실험전에 동일한 지역에서 관측이 이루어 졌다면 보다 객관적인 분석이 가능할 것이나, 기상항공기의 운영시간(최대 4시간 비행) 제약에

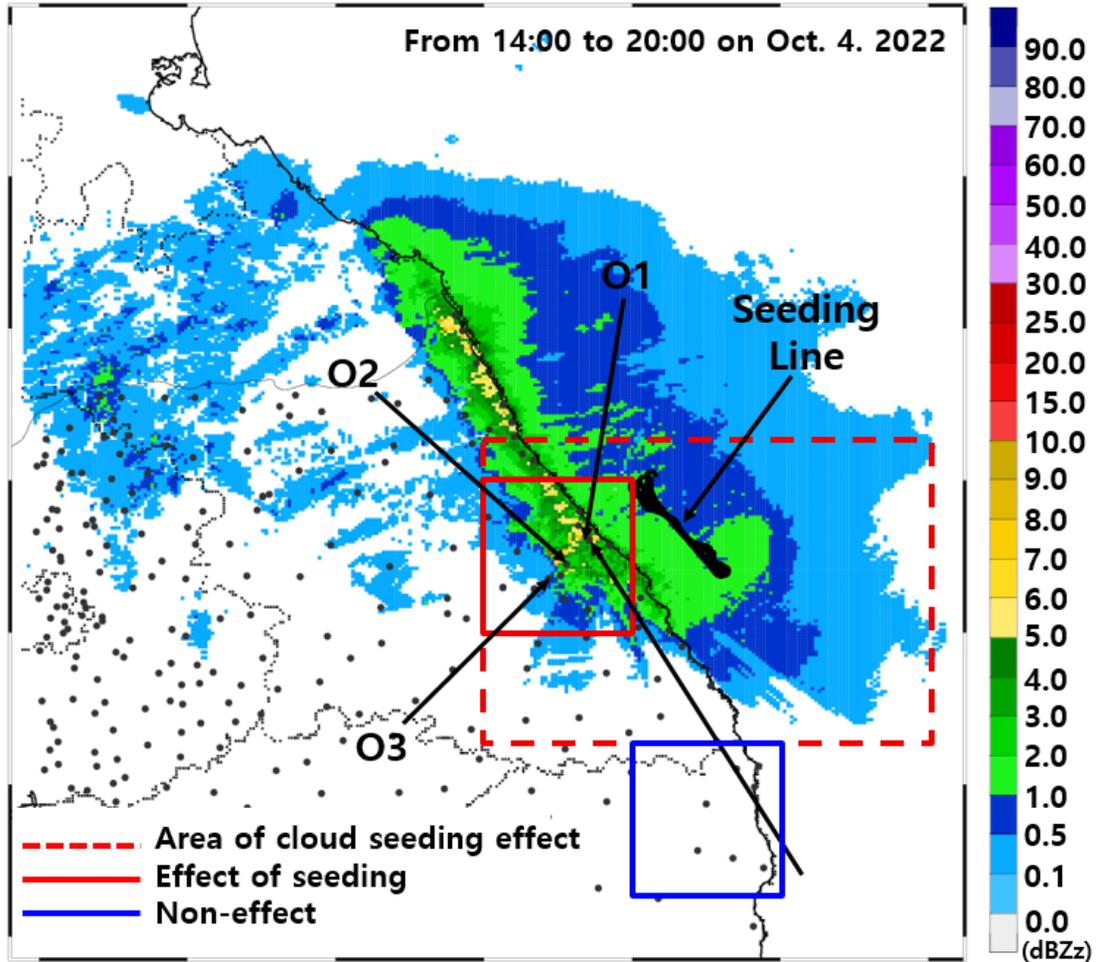


Fig. 6. Horizontal distribution of accumulated radar reflectivity from 14:00 to 20:00 (O1: Gangneung, O2: Gangneungseongsan, O3: Daegwallyeong observation sites).

따른 문제가 있다. 추후 여러대 항공기를 활용한 인공강우 실험을 통해서 이러한 문제점을 보완하여 보다 객관적인 결과를 도출할 필요가 있을것으로 판단된다.

4.2. 인공증우 수치모의

본 실험을 통한 인공증우 수치모의 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 수치모의에서 시딩물질 살포는 항공기의 위치정보를 기반으로 시딩 시작 시간과 종료 시간에 맞추어 수치모델에 반영하였다. 공군수송기와 기상항공기의 시딩이 모두 끝난 뒤 14시 부터 20시 까지 인공강우에 따른 효과 시간으로 설정하여 그 시간동안 AWS

누적 지상강우량과 수치모의에 의한 누적 증우량을 산정하였다. 보라색 라인을 시딩물질의 수농도 1000개 이상 나타나는 범위를 나타낸 것이다. 시딩은 강릉 앞바다 상공 약 1.5 km 고도에서 수행되었고 이 고도의 바람은 북동풍으로 시딩물질이 강릉해안 방향으로 확산되어 태백산맥을 넘어 대관령까지 확산될 수 있는 여건이 된다. 700 hPa 고도의 상층 바람은 남서풍으로, 해당고도까지 확산된 시딩물질이 다시 동쪽 해양 방향으로 확산될 수 있는 여건이 되기 때문에 Fig. 5에 나타난 시딩물질 수농도의 확산범위가 강원도 내륙과 강릉 앞바다까지 퍼져 있는것을 알 수 있다.

수치모의 결과에 따르면 인공증우 효과가 주로 강원도와 경북지역 해안선 부근에서 나타나고 있으며 특히, 북강릉(O1), 강릉성산(O2), 대관령(O3) 일대에 각각 2.7, 4.4, 0.9 mm로 산정되었고 이때 AWS 지상강우량은 7.4, 13.0, 3.0 mm로 나타났다. 강우량에 있어서 관측값에 비해 모의값이 약 3배 정도 저평가 되는 경향이 있지만, 지점별 농도 분포 비율은 관측값과 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 본 사례일의 수치모의 결과에서 인공증우 효과가 저평가 되어 나타나는 것은 불꽃형 연소탄(직경 < 1 μm)을 사용한 인공강우 실험 위주로 수치모의가 개발되었기에, 분말형 시딩물질과 같은 거대응결핵(직경 > 10 μm)이 수적으로 빠르게 반응하는 과정이 수치모의에 적절하게 반영되지 않은 것으로 판단된다.

4.3. 레이더 반사도

인공증우 효과를 수치모의와 레이더 자료를 활용하여 분석하기 위해서 Ro et al.(2020)이 제시한 방법으로 시딩영향영역과 비시딩영역을 정의하였다(Fig. 6). 수치모의 효과영역(적색점선박스)은 수치모의에서 인

공증우 효과가 뚜렷하게 나타나는 영역을 설정한 것이고 시딩영향영역(적색박스)은 수치모의 효과영역 내 레이더 강우 에코가 큰 대관령 주변 지역으로 설정하였다. 비시딩영역은 시딩영향영역에 영향을 미친 종관시스템과 유사한 조건이나, 시딩물질의 영향이 없는 지역에서 산지 효과의 영향이 적은 지역을 선정하였다. 목표지역이 산악 지형인 것을 고려하여 시딩영향영역 평균 고도 대비 100 m 이상 차이 나는 지점과 누적강수량이 0.1 mm 미만인 지점을 제외하고 해안선에 분포한 AWS 지상강우량을 분석하였다(Fig. 6의 검은점 지점). 시딩영향영역(북강릉, 강릉, 주문진, 강릉, 연곡)에서 비영향영역(울진, 평해, 소곡, 죽변) 평균강수량을 뺀 값으로 AWS 지상 강수량은 6시간 누적 3.7 mm 증우, 레이더는 4.53 mm 증우로 나타났다. 3.7 mm 인공증우량은 최근 국립기상과학원의 3년간 최대 인공증우량 3.5 mm를 갱신한 값으로 인공증우량 증대를 위해 다중항공기 연속 시딩물질 살포에 대한 가능성을 시사한다. 그리고 수치모의에 의한 누적 증우량이 6시간 동안 0.1 mm 이상 나타난 육지면적이 약 3,695 km²이고, 강수의 밀도를(1,000 kg·m⁻³) 고려했을 때 면적강수량은 약 13,634,550톤으로 산출되었다.

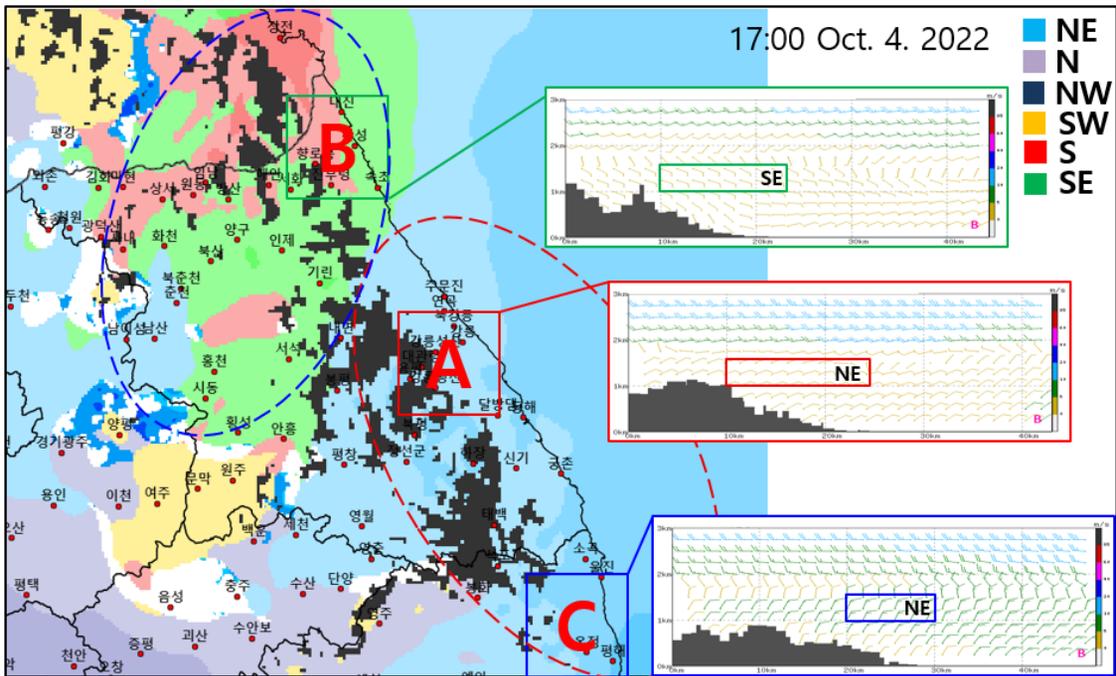


Fig. 7. WISDOM wind direction image and wind vector by altitude at points (A, B, C) at 17:00 LST on October 4, 2022.

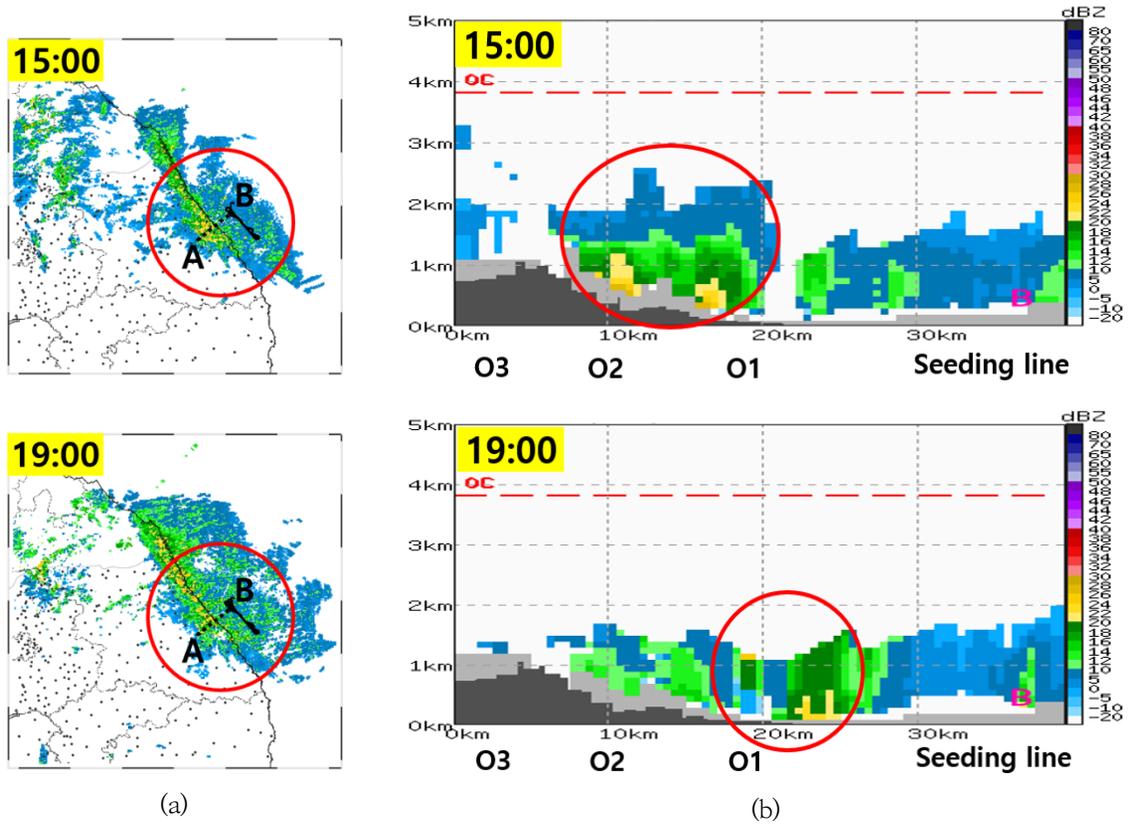


Fig. 8. Radar reflectivity according to the horizontal (a) and vertical cross section (b) (O1: Gangneung, O2: Gangneungseongsan, O3: Daegwallyeong observation sites).

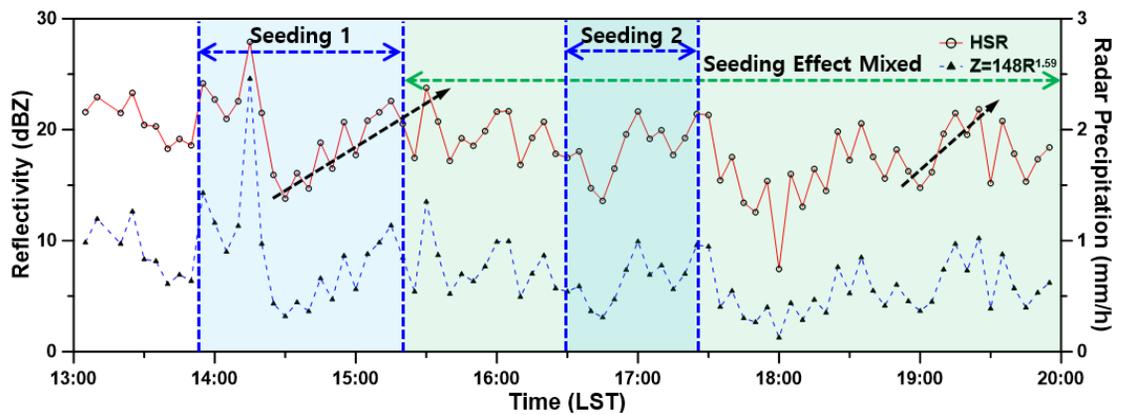


Fig. 9. Time series of radar reflectivity and precipitation at Gangneungseongsan region (black dotted arrow: increasing trend of reflectivity).

Fig. 7은 비시딩영역을 선정하기 위해 10월 4일 17시 기상청 종합표출시스템의 WISSDOM (WInd Synthesis System using DOppler Measurements) 바람장(고도 1.4 km)을 사용하였다. WISSDOM은 레이더 기반 태풍 중심 분석을 위해 변분법 기반의 고해상도 3차원 합성 자료이다(Liou et al., 2012). 비시딩지역 후보 두 지역의 고도별 바람벡터를 나타낸 것이다. 시딩영향영역(A)의 북쪽에 위치한 비시딩영역(B)의 풍계는 남동풍으로 종관 풍계가 서로 다른 것을 알 수 있고, 남쪽 비시딩영역(C)이 북서풍으로 유사한 종관풍계 지역임을 알 수 있어 본 사례일의 비시딩지역(C)으로 선정되었다.

Fig. 8은 공군수송기와 기상항공기의 시딩후 레이더 반사도 특성을 살펴본 것으로 시딩지점인 B 지역에서 북동풍 바람 방향으로 15시와 19시 연직단면도를 나타낸 것이다. 공군수송기 시딩(13:48 ~ 15:20)의 영향으로 15시 강릉성산(O2), 북강릉(O1) 주변에서 반사도의 상대적 증가(5 ~ 10 dBZ)가 나타나고 기상항공기 시딩(16:29 ~ 17:26)의 영향으로 19시 북강릉(O1) 주변 지역에서 반사도의 상대적 증가가 나타난다.

Fig. 9는 강릉성산 지역의 레이더반사도와 레이더 강수 시계열을 나타낸 것이다. 공군수송기로 시딩한 Seeding 1구간의 반사도 증가구간(14:30 ~ 15:30)의 반사도가 13.80 ~ 23.78 dBZ로 나타났고, 이때 레이더 강수량은 0.32 ~ 1.35 mmhr⁻¹이다. 기상항공기의 2차 시딩후 반사도 증가구간(19:00~19:25)의 레이더 반사도는 14.77 ~ 21.85 dBZ이고 이때 레이더 강수량은 0.37~1.02 mmhr⁻¹이다. 즉, 강릉성산(O2) 지역의 레이더반사도가 인공증우 실험으로 두 차례 모두 증가하였고 특히, 공군수송기의 분말 시딩물질의 경우가 상대적으로 그 효과가 빠르게 나타나는 경향을 보였다.

4.4. 강수성분 분석

인공강우의 직접적 검증방법으로 강수에 포함된 이온성분 중 본 실험에서 사용한 염화나트륨과 염화칼슘에 대한 이온당량농도를 분석하였다. Fig. 10은 강수채수 지점별 이온성분 8종에 대한 이온당량농도를 나타낸 것이다. 북강릉 지점에서 시딩물질의 이온당량농도(Na⁺, Cl⁻, Ca²⁺)가 다른 세지점(원주, 대관령, 미시령)에 비해 아주 큰폭으로 증가하여 나타나고 있음을 알 수 있다. 특히, 17시 강수채수 결과에서 Na⁺, Cl⁻의 증가 폭이 가장 크게 나타난 것으로 보아 공군수송기에서 실행한 분말형 염화나트륨이 강수성장에 영향을 주었으

며 그 효과가 시딩후 약 1~2시간 사이에서 크게 나타나고 있음을 시사한다. Fig. 11은 시딩물질의 주요 이온당량농도(Na⁺, Cl⁻, Ca²⁺)의 시간별 변화를 나타낸 것이다. Na⁺와 Cl⁻ 농도의 시계열 변화는 공군수송기의 시딩영향으로 해석되며 그 농도가 북강릉 지점에서 시딩 후 1~2시간 사이 가장 크게 나타나고 최대 6시간까지 농도가 다른 세지점에 비해 높은값을 보이는 특징이 있다. Ca²⁺ 농도는 Na⁺와 Cl⁻ 농도에 비해 1/10 수준으로 그 변화가 크지않지만, 다른 지역에 비해 북강릉 지점이 여전히 약 2~4배 높은 비율을 보여주고 있고 특히, 기상항공기 시딩 후 1~2시간 뒤인 18~20시 사이에서 상대적으로 높은값을 보여주는것이 특징이다.

5. 결론

본 연구는 국내 최초로 공군수송기와 기상항공기를 연계한 다중항공기 인공강우 실험결과를 분석한 것으로 다음과 같은 결과를 얻었다.

에어로졸 입자직경별(10 ~ 1000 μm) 수농도 분포에서 분말형 시딩물질의 구름입장 성장 효율이 연소탄 보다 빠른 것으로 나타났다. 그리고 인공증우 효과검증을 위한 수치모의, 레이더반사도, 강수화학성분 분석을 통해 인공증우 효과를 확인하였다. 특히, 6시간 누적 3.7 mm 인공증우 효과와 이에 대한 면적강수량은 약 13,634,550톤으로 산출되었다.

이와같이 다중항공기 연계실험에 대한 인공증우 효과를 직·간접적인 방법으로 검증·분석을 통하여 인공증우량 증대를 위해 연속 항공실험으로 실용적 인공증우량 확보 가능성을 시사하였고, 분말형 시딩물질인 염화나트륨 혼합물의 유용성에 대해서도 알 수 있었다. 하지만, 분말과 연소탄 시딩물질에 대한 효과성 차이 등 분말 타입은 추후 구름물리실험채버, 지상 및 항공실험으로 보다 정량적인 특성 분석이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 관-군 협력 인공강우 항공실험을 통해 이루어졌으며 이를위해 협조해 주신 국방부 장비관리과, 공군본부 작전과, 공군본부 항공무기관리과, 공군 작전사령부, 공군 군수사령부, 공군 제15특수임무비행단 및 주식회사 바테크에 감사드립니다. 이 연구는 기상청 국립기상과학원 기상조절 및 구름물리 연구 (KMA2018-00224) 의 지원을 받았습니다.

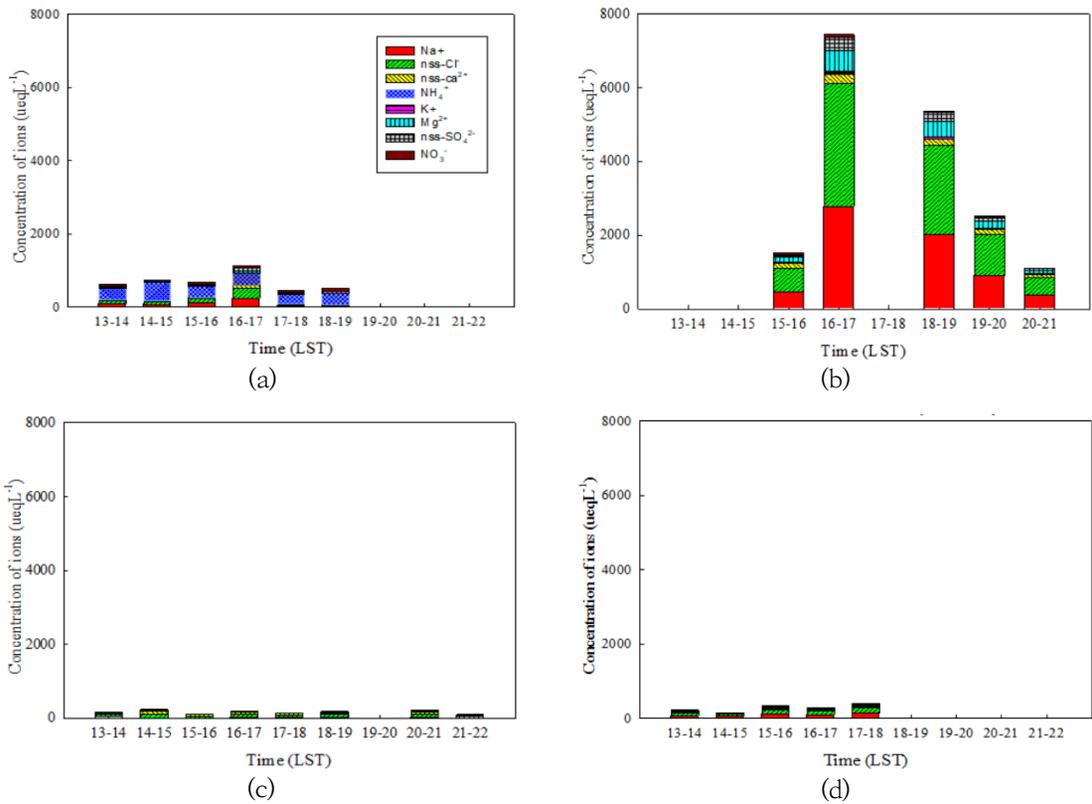


Fig. 10. Ion equivalent concentrations by ion component according to precipitation collection points (a: WonJoo, b: Bukgangneung, c: Daegwallyeong, d: Misilyeong).

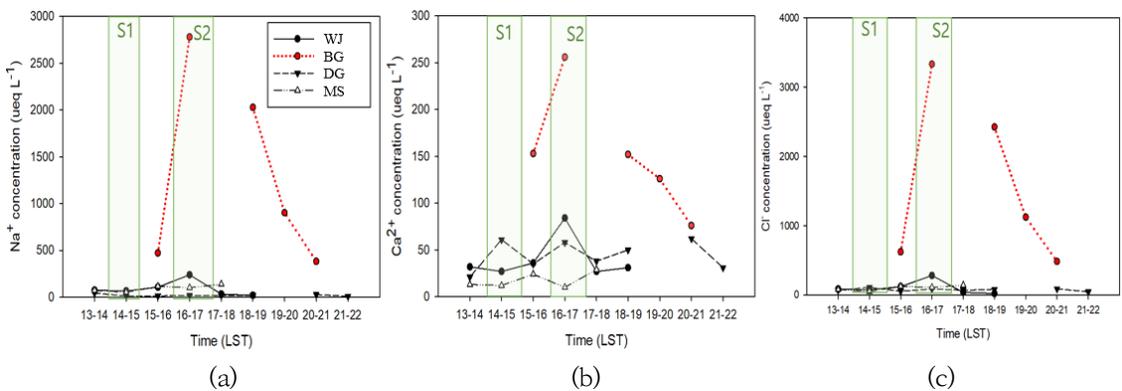


Fig. 11. Time series of major ion equivalent concentrations (a: Na^+ , b: Cl^- , c: Ca^{2+}) of seeding materials(WJ: WonJoo, BG: Bukgangneung, DG: Daegwallyeong, MS: Misilyeong).

REFERENCES

- Bruintjes, R. T., Vidal, S., Trudi, S., Peter, B., Daniel, B., Jim, G., 2012, Evaluation of hygroscopic cloud seeding flares, *J. Weather Modif.*, 44(1), 69-94.
- Cha, J. W., Jung, W. S., Chae, S. H., Ko, A. R., Ro, Y. H., Chang, K. H., Seo, S. S., Ha, J. C., Park, D. H., Hwang, H. J., Kim, M. H., Kim, K. E., Ku, J. M., 2019, Analysis of results and technics about precipitation enhancement by aircraft seeding in Korea, *Atmosphere, Korea*, 29, 481-499.
- Cha, J. W., Koo, H. J., Kim, B. Y., Belorid, M., Hwang, H. J., Kim, M. H., Chang, K. H., Lee, Y. H., 2023, Analysis of rain drop size distribution to elucidate the precipitation process using a cloud microphysics conceptual model and inSitu measurement, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 59, 257-269.
- Chae, S. H., Chang, K. H., Seo, S. K., Jeong, J. Y., Kim, B. J., Kim, C. K., Yum, S. S., Kim, J. W., 2018, Numerical simulations of airborne glaciogenic cloud seeding using the WRF model with the modified morrison scheme over the Pyeongchang region in the winter of 2016, *Adv. Meteorol.*, 2018, 1-15.
- Delene, D., Grainger, C., Kucera, P., Langerud, D., Ham, M., Mitchell, R., Kruse, C., 2011, The second polarimetric cloud analysis and seeding test, *J. Weather Modif.* 43(1), 14-28.
- DeMott, P. J., Super, A. B., Langer, G., Rogers, D. C., McPartland, J. T., 1995, Comparative characterizations of the ice nucleus ability of AgI aerosols by three methods, *J. Weather Modif.*, 27, 1-16.
- French, J. R., Friedrich, K., Tessendorf, S. A., Rauber, R. M., Geerts, B., Rasmussen, R. M., Xue, L., Kunkel, M. L., Blestrud, D. R., 2017, Precipitation formation from orographic cloud seeding, *PNAS*, 115(6), 1168-1173.
- Jung, W. S., Chang, K. H., Cha, J. W., Ku, J. M., Lee, C. K., 2022, Estimation of available days for a cloud seeding experiment in Korea. *J. Environ. Sci. Int.*, 31(2), 117-129.
- Kang, C. Y., Song, S. K., Moon, S. M., Lim, Y. K., Chang, K. H., Chae, S. H., 2023, Effect of cloud seeding using hygroscopic aerosol particles on artificial rainfall enhancement and its sensitivity analysis in spring 2021, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 39(3), 335-350.
- Kim, B. Y., Cha, J. W., Jung, W. S., Ko, A. R., 2020a, Precipitation enhancement experiments in catchment areas of dams: Evaluation of water resource augmentation and economic benefits, *Remote. Sens.*, 12, 3730.
- Kim, B. Y., Cha, J. W., Ko, A. R., Jung, W. S., Ha, J. C., 2020b, Analysis of the occurrence frequency of seedable clouds on the Korean peninsula for precipitation enhancement experiments, *Remote. Sens.*, 12, 1487.
- Kim, B. Y., Lim, Y. K., Cha, J. W., 2022, Short-term prediction of particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) in Seoul, South Korea using tree-based machine learning algorithms, *Atmospheric Pollution Research*, 13(10), 101547.
- Korneev, V. P., Potapov, E. I., and Shchukin, G. G., 2017, Environmental aspects of cloud seeding. *Russian Meteorology and Hydrology*, 42(7), 477-483.
- Ku, J. M., Chang, K. H., Chae, S. H., Ko, A. R., Ro, Y. H., Jung, W. S., Lee, C. K., 2023, Preliminary results of cloud seeding experiments for air pollution reduction in 2020. *Asia-Pacific Journal Atmospheric Sciences*, 59, 347-358.
- Lim, Y. K., Kim, B. Y., Chang, K. H., Cha, J. W., Lee, Y. H., 2022, Analysis of PM₁₀ reduction effects with artificial rain enhancement using numerical models. *Atmosphere Korean Meteorological Society*, 32(4), 341-351.
- Liou, Y. C., Chang, S. F., Sun, J., 2012, An Application of the immersed boundary method for recovering the three-dimensional wind fields over complex terrain using multiple-Doppler radar data, *Mon. Wea. Rev.*, 140, 1603-1619.
- Möhler, O., Stetzer, O., Schaefers, S., Linke, C., Schnaiter, M., Tiede, R., Saathoff, H., Krämer, M., Mangold, A., Budz, P., Zink, P., Schreiner, J., Mauersberger, K., Haag, W., Kärcher, B., Schurath, U., 2003, Experimental investigation of homogeneous freezing of sulphuric acid particles in the aerosol chamber AIDA, *Atmos. Chem. Phys.*, 3, 211-223.
- Morrison, H., Curry, J. A., Khvorostyanov, V. I., 2005, A New double-moment microphysics parameterization for application in cloud and climate models. Part I: Description, *J. Atmos. Sci.*, 62, 1665-1677.
- NIMS, 2019, KMA/NIMS Atmospheric Research Aircraft (NARA) cloud physics observation and weather modification meteorological observation equipment user manual; No. 11-1360620-000149-01; National Institute of Meteorological Sciences: Seogwipo, Korea, 2019, 1-131.
- NIMS, 2022, Research on weather modification and cloud physics. No. 11-1360620-000322-10; National Institute of Meteorological Sciences: Seogwipo, Korea, 2022, 1-87.

- NIMS, 2023, Operational performance report of KMA/NIMS Atmospheric Research Aircraft (NARA) in 2022; No. 11-1360620-000148-10; National Institute of Meteorological Sciences: Seogwipo, Korea, 2023, 1-49.
- Ro, Y. H., Cha, J. W., Chae, S. H., 2020, Verification of precipitation enhancement by weather modification experiments using radar data. *J. Korea Water Resour. Assoc.*, 53(11), 999-1013.
- Ro, Y. H., Chang, K. H., Chae, S., Lim, Y. K., Ku, J. M., Jung, W. S., 2023, Estimation of the total amount of enhanced rainfall for a cloud seeding experiment: case studies of preventing forest fire drought, and dust, *Advances in Meteorology*, 2023, Article ID 5478666, 18.
- Tajiri T., Yamashita, K., Murakami, M., Saito, A., Kusunnoki, K., Orikasa, N., Lilie, L., 2013, A Novel Adiabatic-expansion-Type Cloud Simulation Chamber, *J. of Meteo. Soci. of Japan*, 91(5), 687-704.
- 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., Janiszkeski, A., Springer, A., Weeks, C., Serke, D. J., 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.
- Tuftedal, M. E., Delene, D. J., Detwiler, A., 2022, Precipitation evaluation of the North Dakota Cloud Modification Project (NDCMP) using rain gauge observations, *Atmospheric Research*, 269, 105996.
- Zipori, A., Rosenfeld, D., Shpund, J., Steinberg, D., Erel, Y., 2012, Targeting and impacts of AgI cloud seeding based on rain chemical composition and cloud top phase characterization, *Atmospheric Res.* 114, 119-130.

-
- Researcher. Yun-Kyu Lim
Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences, KMA
imyunkyu@korea.kr
 - Researcher. Ki-Ho Chang
Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences, KMA
khchang@korea.kr
 - Researcher. Yong-Hun Ro
Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences, KMA
royh1@korea.kr
 - Researcher. Jung-Mo Ku
Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences, KMA
jmku1868@korea.kr
 - Researcher. Sang-Hee Chae
Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences, KMA
youto0901@korea.kr
 - Researcher. Hae-Jung Koo
Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences, KMA
kjkoo78@korea.kr
 - Researcher. Min-Hoo Kim
Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences, KMA
pipielf@korea.kr

-
- Researcher. Dong-Oh Park
Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences, KMA
pdo3738@korea.kr
 - Researcher. Woon-Seon Jung
Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences, KMA
wsjung01@korea.kr
 - Researcher. Kwang-Jae Lee
Observation Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, KMA
igleam08@korea.kr
 - Researcher. Sun-Hee Kim
Observation Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, KMA
sunny24@korea.kr
 - Researcher. Joo-Wan Cha
Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences, KMA
jwcha@korea.kr
 - Researcher. Yong-Hee Lee
Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences, KMA
gonos2004@korea.kr