

ORIGINAL ARTICLE

## 항공 구름관측 레이더를 활용한 인공강우 실험효과 분석

노용훈 · 장기호\* · 임윤규 · 김유진 · 신혜민<sup>1)</sup> · 김승범

국립기상과학원, <sup>1)</sup>씨너항공

### Analysis of the Cloud Seeding Effect Using an Airborne Cloud-Observation Radar

Yonghun Ro, Ki-Ho Chang\*, Yun-kyu Lim, Yujin Kim, Hye-min Shin<sup>1)</sup>, Seungbum Kim

Research Scientist, Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju-do 63568, Korea

<sup>1)</sup>Meteorological Division, Sunny Air Inc., Seoul 07807, Korea

#### Abstract

The verification of the cloud seeding effect is a popular research topic worldwide. To directly observe changes in seeded clouds, an airborne cloud-observation radar was installed on a weather aircraft. This study analyzed the observational characteristics of airborne cloud radar based on cloud seeding experiments conducted in South Korea. Two cloud observation methods were considered: the conventional single-direction observation and a multi-directional approach that considers wind direction change during the experiment. To compare the observation performance of the airborne radar, ground-based weather radar data before and after the experiments and changes in the radar cloud characteristics during the numerical simulation were analyzed. The radar reflectivity increased by approximately 10 dBZ in the seeded clouds compared with their state before the experiment. This is a meaningful finding, as it is consistent with similar studies abroad, where seeded clouds intensified into a typical plume shape, as confirmed by the airborne radar. The multi-directional cloud observation method, which considers wind variations, was effective in tracking seeded clouds and observing their characteristic changes. These findings help verify the effects of cloud seeding in numerical simulations and demonstrate the excellent observation performance of airborne radar for optimal experimental design and analysis, particularly under complex topographical conditions such as those found in South Korea.

**Key Words** : Cloud seeding, Airborne cloud-observation radar, Weather aircraft, Weather radar, Numerical simulation

#### 1. 서론

전 세계적으로 인공강우 실험이 널리 수행됨에 따라 다양한 방법으로 그 효과를 검증하려는 시도가 이루어지고 있다. 대표적인 방법은 장기간의 기후 특성을 분석하여 인공강우 실험으로 증가한 강수량을 결정

하는 것이지만(Rosenfeld and Farbstein 1992; Rasmussen et al., 2018), 실험 사례가 많지 않은 국가에서는 이러한 방법으로는 효과를 결정하기 어렵다. 또한, 인공강우 실험 대상은 구름이기 때문에 지상에서 실험에 의한 변화를 파악하는 것은 간단한 문제가 아니다(Geerts et al., 2010; Reynolds 2015;

Received 12 September, 2025; Revised 24 November, 2025;

Accepted 15 December, 2025

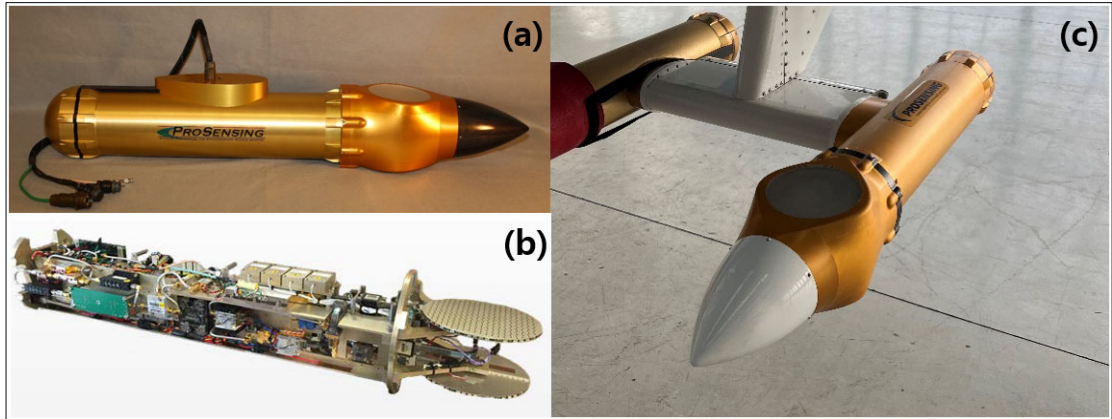
\*Corresponding author : Ki-Ho Chang, Research Scientist, Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju-do 63568, Korea

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.



**Fig. 1.** Photographs of the Ka-band precipitation radar (KPR): (a) outer structure, (b) internal electronic components, and (c) KPR mounted on the aircraft.

**Table 1.** KPR specifications

Contents	Scale
Frequency	35.61~35.70 GHz
Detection range	15 km above and below aircraft km
Range resolution	30, 60, 75 m
Detection speed	$\pm 21$ m/s @ 100 $\mu$ s
Antenna gain	32.5 dBi
Antenna beam width	$\sim 4.5$ deg
Transmit pattern	Up only, Down only, Interleaved up/down

Pokharel et al., 2017). 구름 챔버는 구름 미세물리 과정을 상세히 관측할 수 있으나, 실제 대기와 동일한 강수 조건을 모두 재현하기는 어렵다(Mason, 1962; Malinowski et al., 1998; Stratmann et al., 2004; Cha et al., 2024).

국내의 경우 국립기상과학원을 중심으로 인공강우 실험이 활발히 수행되고 있고, 실험 효과 검증을 위해 다양한 방법을 시도하고 있다. 대표적으로는 자동기상 관측시스템(Automatic weather system, AWS)와 광학우계 같은 지상 관측망, 레이더 관측망, 항공기에 설치된 구름물리 관측장비를 이용하여 구름과 강수 입자의 상태 변화를 관측하고 있다. 또한, 실험 사례별로 인공강우 영향 지역과 비영향 지역을 구분하여 증우량을 산출하거나(Ro et al., 2023), 영향 지역의 강수를 채취하여 실험 물질의 성분 검사를 통해 인공강우 영향을 검증하고 있다(Ku et al., 2023). 그러나 이러한

방법들은 대기 중에서 일어나는 구름의 변화를 직접적으로 확인하기 어렵다.

시간별 인공강우 실험 구름의 변화를 관측하기 위해 미국의 Pro Sensing Inc.와 와이오밍대학교는 공동으로 Ka-밴드 대역의 항공 구름관측 레이더(Ka-band precipitation radar, KPR)를 개발하였다(Pazmany and Haimov, 2018). 국내에서는 국립기상과학원에서 2023년 기상항공기에 KPR을 설치하였고, 구름 관측을 위해 적극적으로 활용해 왔다. KPR은 인공강우 실험물질의 시딩 전후 나타난 구름의 연직 변화를 관측할 수 있고, 항공기가 이동함에 따라 구름을 추적하면서 관측할 수 있는 이점이 있다. 따라서 실험효과 검증을 위한 관측장비로서의 기대가 점차 증가하고 있고, 활용 측면에서 관측성능에 대한 검증이 필요하다.

이에 본 연구에서는 인공강우 실험 사례에 대한 실험 전후 KPR 구름 변화를 분석하고자 한다. 국립기상

과학원에서 수행된 인공강우 실험 중 세 개 사례를 선정하여 기존의 항공 관측방법 대비 본 연구에서 제시한 새로운 관측방법을 적용한 경우의 인공강우 실험전후 구름변화를 비교하고, 실험 검증을 위한 KPR의 성능을 확인하려 한다. 2장에서는 KPR에 대한 상세한 장비 성능 및 관측방법을 소개하고, 3장에서 사례분석 결과를 다루려 한다. 4장에서는 연구결과를 정리하고 KPR을 활용한 구름관측의 의의와 향후 활용방안에 대해 논의하려 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 관측장비

항공 구름관측 레이더(KPR)는 지상 레이더의 지형적 차폐, 원거리 관측에 대한 해상도 저하 등의 문제를 해결하면서 구름 내부의 물리적 변화를 추적·관측할 목적으로 2013년경 처음 개발되었다. 미국 와이오밍대학교는 2016년 King Air 항공기에 KPR을 장착하여 구름관측 테스트 비행을 수행하였고(Pazmany and Haimov, 2018), 이후 KPR은 인공강우 효과 검증을 위해 SNOWIE (Seeded and Orographic Winterime Clouds: the Idaho Experiment)와 같은 다양한 필드 캠페인에 사용되었다(Grasmick et al., 2022). 중국에서도 2010년대 초반부터 인공강우 실험 분석에 KPR과 유사한 Ka-band 대역의 레이더를 사용해 왔다(Shang et al., 2012). 국내에서는 2017년 기상항공기가 도입된 이후, KPR을 추가로 탑재하기 위한 계획이 수립되었으며 2023년 4월 처음으로 기상항공기 좌측 날개 하단부에 설치되었다. 고정형 지상 레이더와 달리 KPR은 항공기의 이동에 따라 구름 내부를 관측할 수 있고, 비행 고도에서 상하 방향으로 전파를 송·수신하여 지상으로 향하는 강수뿐 아니라 상층 구름도 동시에 관측할 수 있다. KPR의 내부 구조와 외형, 그리고 기상항공기에 장착된 모습은 Fig. 1에, 국내 설치 장비의 주요 사양은 Table 1에 각각 제시하였다.

Fig. 1(a)와 1(c)에 나타난 바와 같이 KPR은 소형 관측장비로써 항공기에 용이하게 장착·탈착할 수 있으며, 유선형 외형을 가져 항공기 운항에 거의 영향을 미치지 않는다. 안테나는 KPR 전면부에 위치하며, Fig. 1(b)에 보인 것처럼 내부에 원형 패널 형태로 설치되어 상하 방향으로 전자기파를 송·수신할 수 있다. 또한

전기적 신호를 처리하기 위해 본체 내부에는 안테나와 연결된 여러 전자 부품과 배선이 내장되어 있다. Table 1에 나타난 사양에서 볼 수 있듯이 KPR은 항공기 고도에서 상하 15 km까지 관측이 가능하며, 최대 30 m의 수직 해상도로 구름의 연직 변화를 정밀하게 탐지할 수 있다. 관측은 1초에 100회 속도로 상·하 교대로 전자기파를 송·수신하는 방식으로 수행된다.

구름관측 레이더는 항공기 위치에서 상·하 방향으로 반사도(Reflectivity), 시선속도(Radial velocity), 스펙트럼 폭(Spectrum width)의 세 인자를 관측한다. 반사도는 레이더에서 방출된 전자기 에너지에 대해 목표체로부터 되돌아온 신호의 비율로 정의되며, 강수 관측에서는 단위 체적 내 직경 약 1 mm 크기의 물방울 수에 비례하는 강수 입자 분포의 세기를 의미한다. 시선속도는 목표체가 레이더를 기준으로 접근하거나 멀어지는 속도를 나타내며, 시선 방향에 대한 공기 입자의 상대 운동을 반영한다. 스펙트럼 폭은 동일한 관측 구역 내 속도의 분산을 나타내는 변수로, 대기 중 난류나 미세규모 운동의 영향을 진단하는 데 활용된다.

### 2.2. 관측 및 분석방법

인공강우 실험 효과를 검증하기 위해 본 연구에서는 항공 구름관측 레이더(KPR)의 두 가지 관측 방법을 적용하였다. 첫 번째 방법은 Fig. 2와 같이 기존 연구에서 수행된 관측 방법으로 시딩 라인과 수직하게 한 방향으로만 관측하는 것이다.

이 방법은 가장 단순한 관측 방법으로 시딩 전 풍상측으로 비행하면서 다가오는 구름을 직선으로 관측한 후(Fig. 2-①), 관측라인과 수직한 방향으로 시딩 실험을 수행한다(Fig. 2-②). 실험이 종료되면, 실험 전과 같은 관측 경로에서 풍하측으로 직선으로 이동하면서 구름의 변화를 관측하는 것이다(Fig. 2-③). 이 방법은 설계가 간단하고 항공기의 비행가능시간 내에 인공강우 실험과 구름관측을 수행하기 용이하나 이는 한 방향으로만 구름관측을 수행하기 때문에 실험 전후 풍향이 일정하다는 가정이 전제한다. 그러나 국내의 경우 지형과 강수 시스템 특성 등으로 시간에 따라 구름의 이동방향이 변할 수 있기 때문에 이러한 관측방법만으로는 인공강우 효과를 검증하기 어렵다. 따라서 이 연구에서는 실험 중 구름의 이동 방향 변화를 고려한 관측 방법을 Fig. 3과 같이 제안하였다.

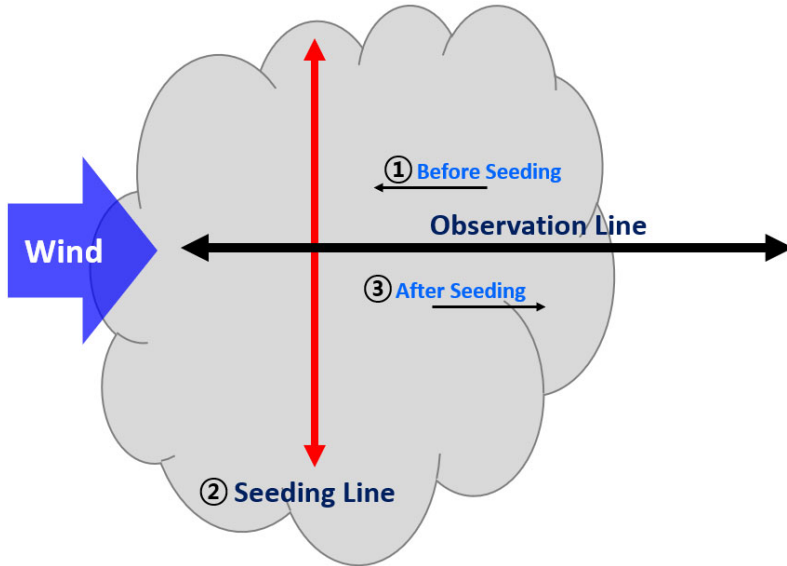


Fig. 2. Schematic of the single-direction KPR observation method, in which the aircraft observes the target cloud along a single straight path perpendicular to the seeding line.

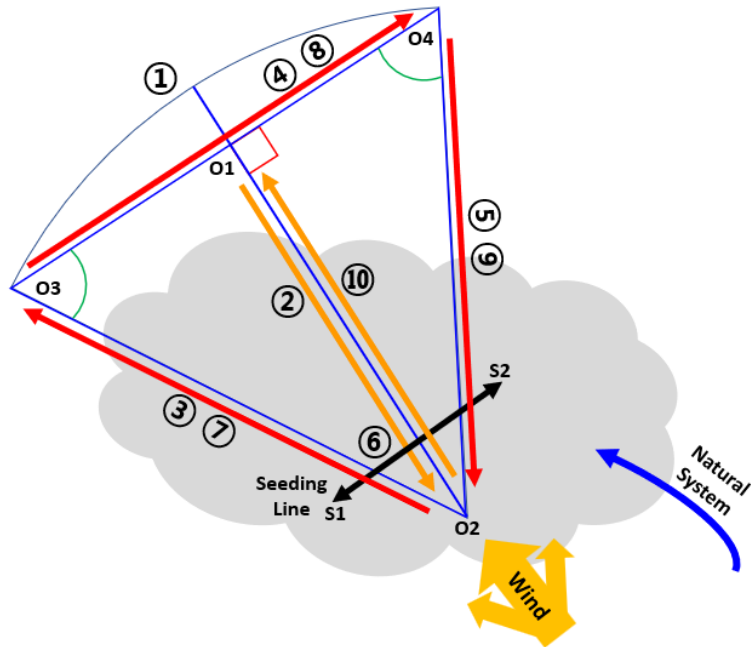


Fig. 3. Schematic of the new KPR observation method, which consists of two to three observation paths designed to account for wind-direction changes during cloud seeding experiments. The orange lines (②, ⑩) indicate one-way observation paths, the red lines (③, ④, ⑤, ⑦, ⑧, ⑨) indicate two- to three-way observation paths, and the black line (⑥) indicates the seeding line.

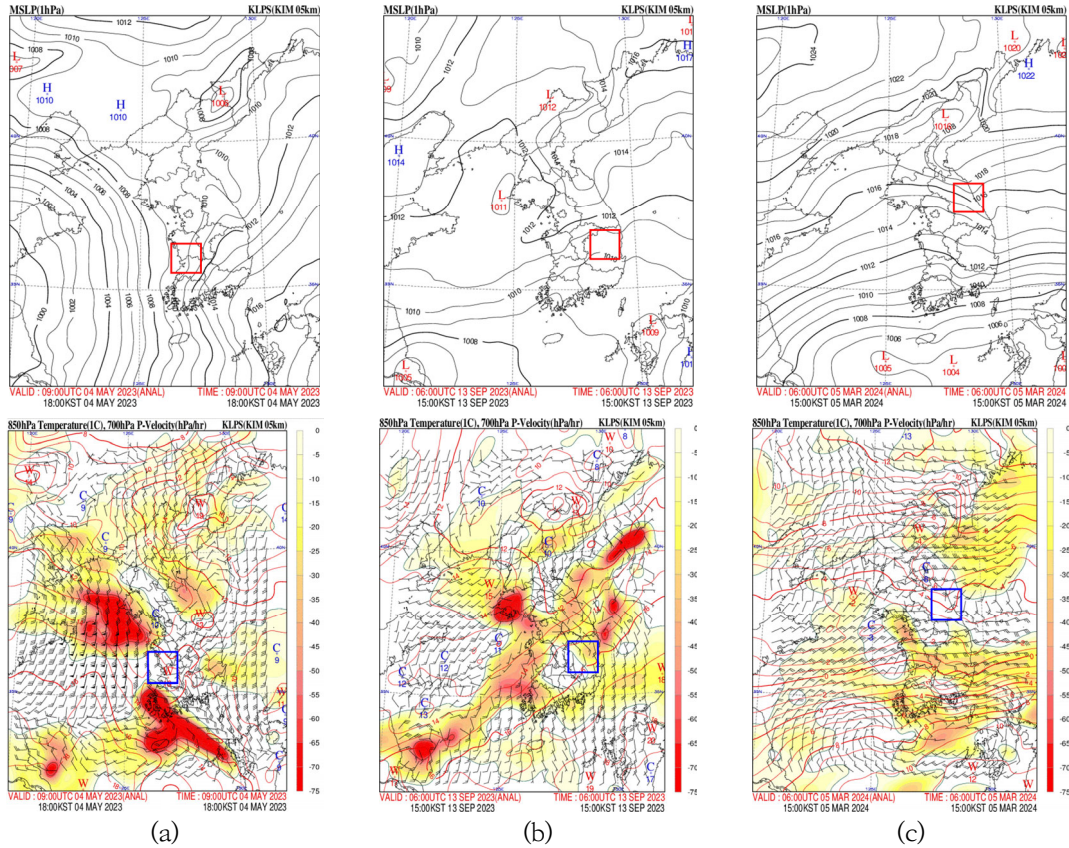


Fig. 4. Weather charts (top panels) and updraft fields (bottom panels) at the 700 hPa pressure level from Korean local prediction system (KLPS) in Korean integrated model (KIM) for the three events. The red and blue boxes indicate the areas of the cloud seeding experiments. Panels (a), (b), and (c) correspond to Events 1, 2, and 3, respectively.

Fig. 3의 관측 방법은 Fig. 2의 단일 직선 관측에서 발전된 형태로, 구름의 이동 방향 변화를 고려하여 두 세 개의 관측라인을 추가한 것이다. 먼저 항공기가 대상 구름으로 접근하면(Fig. 3-①), 시딩 라인과 수직한 방향으로 실험 전 직선 관측을 수행하고(Fig. 3-②), 이후 풍향 변화를 반영하여 그림과 같이 삼각형 형태로 다른 방향의 관측을 추가로 실시한다(Fig. 3-③~⑤). 이때 반드시 세 개의 라인을 모두 관측할 필요는 없으며, 구름의 분포 범위와 이동 양상에 따라 두세 개의 경로를 선택적으로 설정하면 된다. 그런 후 구름 시딩을 하고(Fig. 3-⑥) 앞서 수행한 관측 경로를 가능한 반복하여(Fig. 3-⑦~⑩) 실험 전후의 구름 변화를 시간에 따라 검증한다. 이러한 관측 방식은 Fig. 2의 단일 방향 관측에 비해 항공기 운항 시간의 부담은 크

지만, 여러 대의 항공기를 활용한 대규모 인공강우 실험 검증에 적합하다. 또한 실험 중 풍계가 변화더라도 목표 구름을 추적하며 관측할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 이와 같은 두 가지 관측 방법을 적용한 인공강우 실험 사례를 선정하여, 실험 전후 항공 구름 관측 레이더로 관측된 구름 특성 변화를 분석하고, 인공강우로 인한 강수 강화 효과를 레이더 자료를 통해 검증하였다.

본 연구에서는 이와 같은 두 개의 관측 방법을 적용한 인공강우 실험 사례를 선정하여 실험 전후 항공 구름관측 레이더에 나타난 구름 특성 변화를 분석하고, 인공강우 효과로 발생한 강수 강화 현상을 레이더 자료를 이용하여 검증하고자 한다. 레이더로 관측된 구름에 인공강우 시딩 영향이 반영된 것을 구분하기 위해

본 연구에서는 실험 후 수치모델에서 모의된 증우분석 결과를 참고하였다. 수치모델은 기상청에서 인공강우 효과를 분석하기 위해 WRF (Weather Research & Forecasting) 기반으로 개발된 모델(Kim et al., 2015; Chae et al., 2018)을 이용하였다. 이는 Morrison 미세물리방안(Morrison et al., 2005)에서 시딩물질의 물리적 특성이 강수와 얼음입자 수농도로 산출되도록 수정된 모델이다.

### 3. 사례분석

#### 3.1. 실험 기상조건 및 항공관측 경로

앞의 두 가지 관측 방법을 적용하여 인공강우 실험을 수행한 사례 3개를 선정하였다. 2023년 5월 4일(Event 1), 9월 13일(Event 2)과 2024년 3월 12일(Event 3) 사례이다. Event 1은 국내에서 KPR이 도입된 초기에 관측되었던 사례로 충남 서해 인근 지역에서 인공강우 실험 전후 구름 변화를 비교할 목적으로 관측되었다. Event 2는 경북지역, Event 3은 강원도 지역의 인공강우 실험을 검증할 목적으로 관측되었다. 각 사례별 기상 현황은 Fig. 4와 같고, 인공강우 실험에 대한 기상 조건을 정리하면 Table 2와 같다.

Fig. 4에서 한반도에 분포한 기압계를 보면 세 개 사례 모두 저기압의 강수대 영향을 받을 때 인공강우 실험이 수행된 것을 알 수 있다. Event 1의 경우 중국에서 밀려오는 저기압 영향으로 한반도는 서해쪽에 북서-남동의 대각선 방향으로 분포한 강수대 영향을 받았고, 실험지역 남쪽으로 강한 강수가 나타나면서 강수대는 점차 북동쪽으로 이동하였다. Event 2에서 한반도는 서해상 남쪽부터 북동쪽으로 발달한 저기압의 영향을 받아 대각선으로 분포한 강수대가 통과하였으며, 인공강우 실험 전후 강수대는 점차 동쪽으로 이동한 것으로 나타났다. Event 3에서도 한반도는 남쪽과 북쪽에 위치한 저기압의 영향을 받아 실험지역에 강수대가 발달하였으며 점차 동해상으로 이동하였다. 700 hPa 고도의 상승속도를 보면 실험 지역 주변으로 강한 상승기류가 발생하였고, 인공강우 실험에 영향을 준 것을 알 수 있다. Table 2를 보면, Event 1, 2는 따뜻한 구름에 흡습성 물질( $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NaCl}$ )을 사용한 실험이었고, Event 3은 차가운 구름에 빙핵형 물질( $\text{AgI}$ )를 활용한 실험이었다. 또한, Event 1, 2는 남풍 계열의 시스템에 인공강우 실험을 한 사례였고,

Event 3은 북동풍 계열로 나타났다. 인공강우 실험물질을 살포한 고도는 Event 2의 경북지역에서 2.4 km로 가장 높게 나타났고, 모든 사례에 대해 대체로 2 km 내외로 나타났다. 이와 같은 세 개 실험 사례에 대한 항공기의 시딩 경로와 관측경로 및 수치모의에 나타난 실험 후 증우효과를 비교하여 나타내면 Fig. 5와 같다.

Fig. 5(위)의 항공기 관측경로를 보면, Event 1과 3은 한 방향으로 실험 전후 각 1회만 수행한 사례이다. 이는 인공강우 실험 전후 풍계 변동이 크게 나타나지 않은 사례로 한 방향으로만 왕복 관측을 시도한 사례이다. 관측 거리는 Event 1이 68.2 km, Event 3은 38.6 km로 나타났다. 관측 방법은 인공강우 실험 전 실험물질 살포지역으로 직선으로 이동하면서 관측하였고, 이후 관측라인과 수직하게 실험을 수행한 후 다시 실험 전과 동일한 구간을 관측하였다. 반면, Event 2는 실험 중 풍향이 남에서 남동으로 변화되어 O1-O4 (39.2 km)와 O1-O2 (32.8 km) 두 방향 교대로 관측을 수행한 사례이다. 실험을 수행하기 전에는 O1-O4 구간을 관측하였고, 실험을 수행한 후 다시 동일 구간을 관측하다가 풍계 변동을 고려하여 O1-O2 구간도 병행하여 관측을 수행한 것이다. Fig. 5(아래)의 수치모의 결과를 보면 인공강우 실험 영향지역의 강수변화(청~적색 음영부분)와 시딩물질의 확산 범위(등치선)를 함께 나타낸다. 단일 방향으로 관측을 수행했던 Event 1은 관측지역 주변 줄포(JUP)부터 보령령(BRD) 관측소까지와 서해 주변에서 인공강우 효과가 예상되었고, Event 3도 시딩라인 남동쪽에 위치한 강릉성산(GNSS)과 삼당령(SDR) 관측소 주변에서 인공강우 실험 효과가 모의되었다. 실험중 풍계가 변한 Event 2에서는 영주(YJU)와 안동(AND)을 포함하여 시딩라인의 북쪽 지역에서 인공강우 효과가 예상되었다.

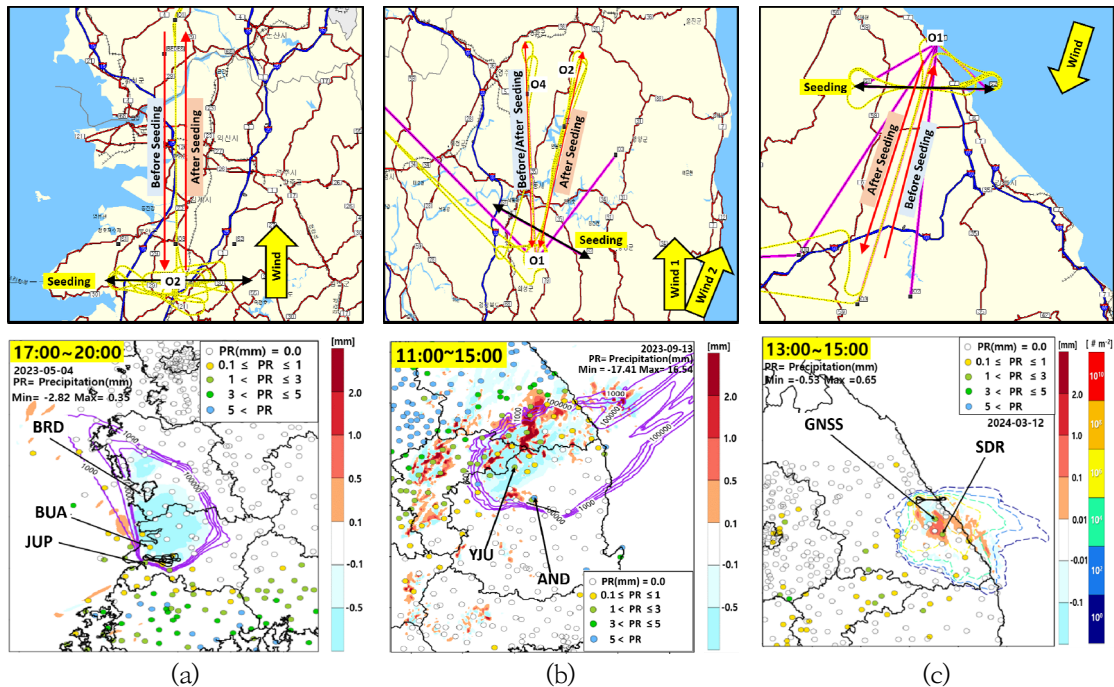
#### 3.2. 레이더 관측 결과

인공강우 세 개 실험 사례에 대해 항공기 관측구간의 구름 특성을 비교하였다. 레이더 관측 결과를 비교하기 위해 S밴드 기상레이더 자료를 함께 분석하였고, 실험 전후 관측구간에서의 반사도 변화를 분석하였다. 먼저 단일 방향으로만 관측을 수행했던 Event 1과 3의 반사도 변화를 나타내면 Fig. 6과 같다.

**Table 2.** Weather conditions and basic information for the three experimental cases

Event	Date	Target area	Cloud type	Seeding material	Seeding height (km)	Wind speed (m/s) / Direction	Temp. (°C)
1	20230504	Chungnam	Sc	CaCl <sub>2</sub>	1.95	10.9 / S	14.7
2	20230913	Kyungbuk	S	NaCl	2.40	10.5 / S, SW	8.7
3	20240312	Gangwon	Sc	AgI	1.92	4.0 / NE	-8.4

(Sc: strati-cumulus, S: stratus)



**Fig. 5.** Aircraft observation paths (top panels) and numerical simulations showing the cloud-seeding effects (bottom panels) for the three events. Panels (a), (b), and (c) correspond to Events 1, 2, and 3, respectively.

Fig. 6(a)와 (b)에 나타난 바와 같이, Event 1에서는 시딩 전 북서-남동 방향으로 분포하던 자연 강수가 시딩 후 북동쪽으로 이동하며 O2에서 O1 방향으로 진행하였다. 시딩 전 관측은 O1→O2 구간에서 16:56:53-17:08:43에 수행되었고, 시딩은 O2 부근에서 17:12:36-18:04:35에 동서 방향으로 이루어졌다. 이후 O2→O1 구간을 18:07:52-18:17:22에 재관측하였다. Fig. 6(b)의 결과에서 시딩 후 강수 구름의 유입과 함께 항공 레이더 반사도가 평균 약 5-10 dBZ 증가한 것으로 확인되었다. 풍속(10.9 m/s)과 시딩 시간(약 52분)을 고려하면, 시딩 초기에 살포된 물질은

O2에서 약 33.7 km까지 이동한 것으로 추정된다. 이는 Fig. 6(b)의 적색 박스로 표시된 영역과 일치하며, 시딩 효과가 혼합된 구름이 이 구역에서 강화된 것으로 해석된다. Fig. 5(a)의 수치 모의 결과에서도 줄포 인근에서 강수가 집중된 양상이 나타나, 관측과 모델 간의 일관성이 확인되었다.

Fig. 6(c)와 (d)는 Event 3의 결과를 보여준다. 시딩 전에는 실험 지역 주변으로 자연 강수가 유입된 상태였으며, 이후 남동쪽으로 이동하였다. 시딩 전 관측은 O3→O1 구간에서 11:44:41-11:52:41에 수행되었고, 시딩은 O1 부근에서 11:55:23-13:31:48 사이에 이루어

졌다. 이후 O1→O3 구간을 13:38:16-13:45:16에 재 관측하였다. Fig. 6(d)에서 시딩 후 O3 인근 하층 구름의 반사도가 시딩 전 대비 약 10 dBZ 증가하였으며, 이는 Fig. 5(c)에서 강릉성산 부근의 증우 영향 지역과 일치하였다. 풍속(4.0 m/s)과 시딩 시간(100분)을 고려할 때, 살포된 물질은 O1에서 약 24 km 이동한 것으로 추정된다. 비록 강화된 구역이 완전히 일치하지는 않지만, 관측 경로(O1-O3)가 남서쪽으로 휘어진 점을 고려하면 적색 박스 부근이 시딩 영향권에 포함된 것으로 해석된다.

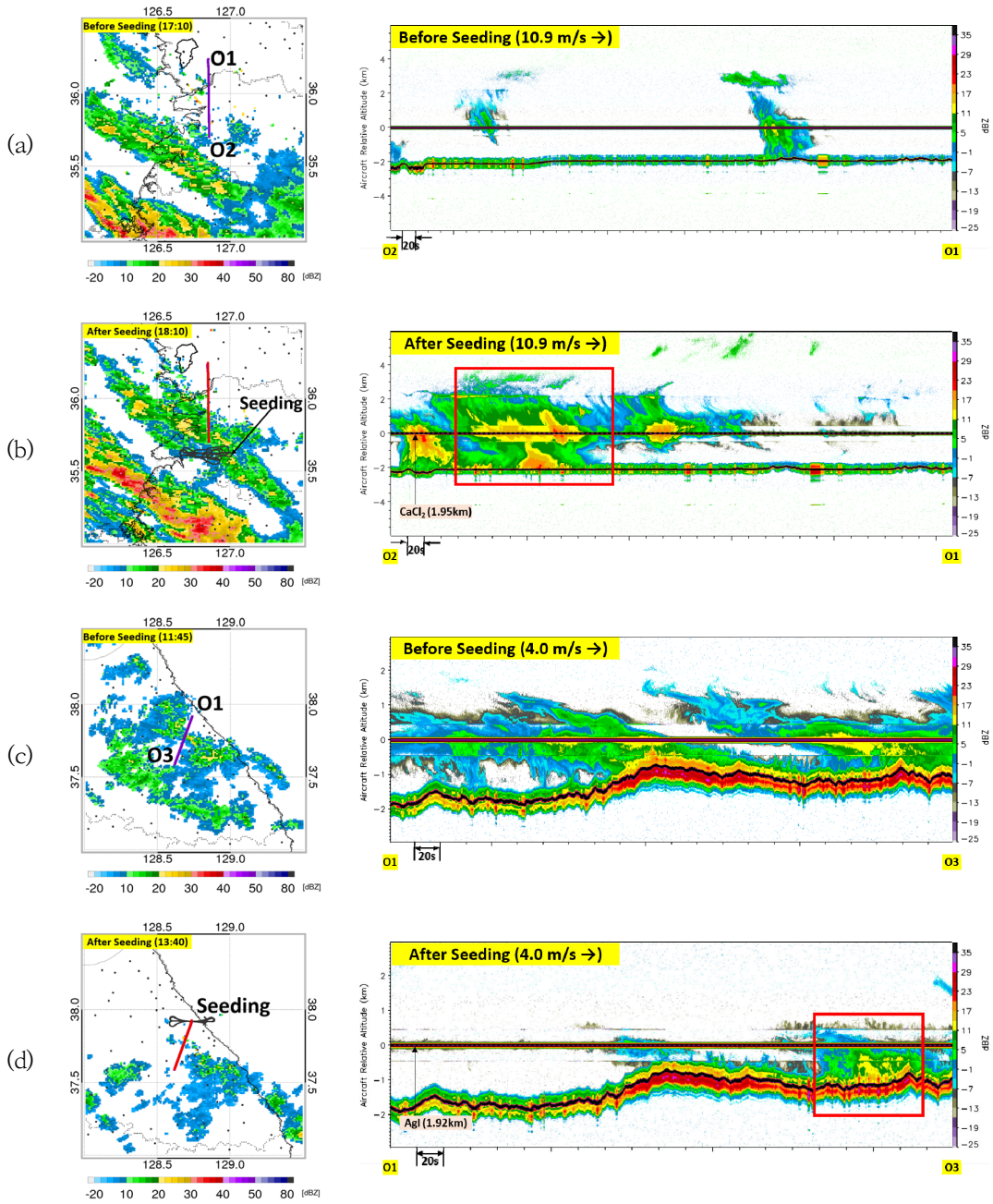
Event 3의 경우 산악지형에서 실험이 수행되어 항공 레이더 영상에서 관측 고도 변화가 뚜렷하게 나타났다. 유입된 강수가 지형효과로 강화되었을 가능성도 있으나, Fig. 6(d)의 적색 박스에서는 지상에서 시딩 고도까지 강수가 플룸(Plume) 형태로 상승하는 모습이 확인되었다. 이러한 양상은 전형적인 인공강우 효과의 특징으로, 해외 분석사례(Geerts et al., 2010; Tessendorf et al., 2019; Li et al., 2022)에서 시딩 후 풍하층에서 일어나는 구름변화와 일치한다. 즉, 시딩 고도에서 하층으로 실험 물질이 확산되며 강수가 플룸 형태로 강화된 현상이 항공 레이더에 포착된 것이다.

이 분석 결과들은 인공강우 실험 후 수치 모의에서 나타난 증우 효과를 항공 레이더 자료로 직접 검증할 수 있음을 보여준다. 다만, Event 1과 3의 경우와 같이 실험 물질이 대기 중에서 한 방향으로만 확산되지는 않으며, Fig. 5에 나타난 것처럼 증우 지역도 공간적으로 다양하게 분포할 수 있다. 따라서 단일 방향의 관측만으로 인공강우 효과를 완전히 규명하기는 어렵다. 이에 본 연구에서는 Event 2와 같이 실험 중 풍계가 변화한 조건에서 다방향 항공 레이더 관측을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 제시하였다.

Event 2 실험은 앞의 두 사례와 달리 기상항공기로 항공관측을 수행하고 다른 항공기로 시딩을 수행한, 총 두 대의 항공기를 이용한 인공강우 실험 사례이다. 이에 따라 항공기간 비행 안전에 따른 시·공간적 이격 조건을 고려하여 인공강우 실험이 수행되었다. 비행 제한에 따라 O1-O4, O1-O2 관측에 대해 각 구간별 왕복 관측이 특정 시간대에 균등하게 수행되지 못한 점을 고려하여 본 연구에서는 한 쪽 진행방향에 대한 관측 결과를 분석하였다. Fig. 7(a), (b)는 모두 O4→O1으로 이동하면서 관측을 한 것으로 관측시간은 시

딩 전 10:24:29~10:29:19, 시딩 후 11:23:44~11:28:44로 나타났다. Fig. 7(c), (d) 모두 O1→O2로 관측을 수행한 것으로 각 관측시간은, 10:34:09→10:37:59, 11:33:24~11:37:24로 나타났다. 아울러 시딩은 10:33:00~11:00:00에 수행되었다. Fig. 7(a), (c)의 레이더 공간 분포를 보면, 시딩 전부터 인공강우 실험 지역 주변으로 자연강수가 유입되었고, 점차 북쪽과 북동쪽 방향으로 이동한 것으로 나타났다. 시딩 후에는 Fig. 5(b)와 같이 시딩라인 주변에 위치한 안동 인근에서 레이더 강수가 상대적으로 크게 관측되었다. 전반적으로 시딩 전 Fig. 7(a)의 O1 부근에 있던 자연강수가 O4로 이동하면서 Fig. 7(b)와 같이 시딩물질과 혼합되어 반사도가 적색박스와 같이 5~10 dBZ 정도 상대적으로 증가한 것으로 나타났다. 풍속 10.5 m/s, 시딩 초기와 시딩후 O1→O4 관측까지 시간차가 50분인 것을 고려하면 O1 부근에 위치했던 강수 구름이 31.5 km 정도 이동한 것으로 예상되며, 이는 Fig. 7(b)의 적색박스 내에 분포한 시스템 중 상대적으로 강하게 구름의 위치와 유사하게 나타난다. Fig. 7(c)에서는 관측구간에서 강수 구름이 거의 감지되지 않은 것을 알 수 있고, 이는 시딩전 풍계가 O1→O4로 일정했던 것을 보여준다. 그러나 시딩후 풍향이 북에서 북동으로 변화됨에 따라 Fig. 7(b) 적색박스에서 나타났던 시딩영향의 구름의 Fig. 7(d)와 같이 O2 부근에서도 관측되었다. 특히, 적색 박스의 크기가 Fig. 7(b)보다 넓어진 점을 토대로 풍계 변동에 따라 시스템 대부분이 O2 지점 주변에 영향을 준 것을 알 수 있다.

이러한 분석결과를 앞의 두 사례와 비교하면, Event 2는 풍계 변동을 고려한 항공기 관측 방법이 시딩영향을 받은 구름을 추적하면서 시간에 따른 변화를 관측할 수 있는 이점이 있음을 보여주었다. 또한 Event 2는 앞의 두 사례와 달리 실험 지역에 강수구름이 상대적으로 덜 유입되어 시딩효과가 크게 관측되지는 않았지만, 이러한 관측 방법은 수치모의에서 다양한 지역으로 발생할 수 있는 인공강우 효과를 검증하는데 유리한 점을 확인시켜 준다. 국내의 경우 인공강우 실험에 투입할 수 있는 항공기와 인프라가 제한적이고, 공역확보 문제, 비행안전 고려 등 다양한 요소가 실험수행에 영향을 주기 때문에 이러한 관측방법은 효과검증을 위한 최적의 전략을 수립하는데 있어 의의가 크다.



**Fig. 6.** Comparison of radar spatial distributions (left panels) and KPR reflectivity (right panels) for Events 1 and 3. The red boxes indicate clouds affected by mixed seeding effects. Panels (a) and (b) show radar observations before and after seeding for Event 1, while panels (c) and (d) present the same for Event 3.

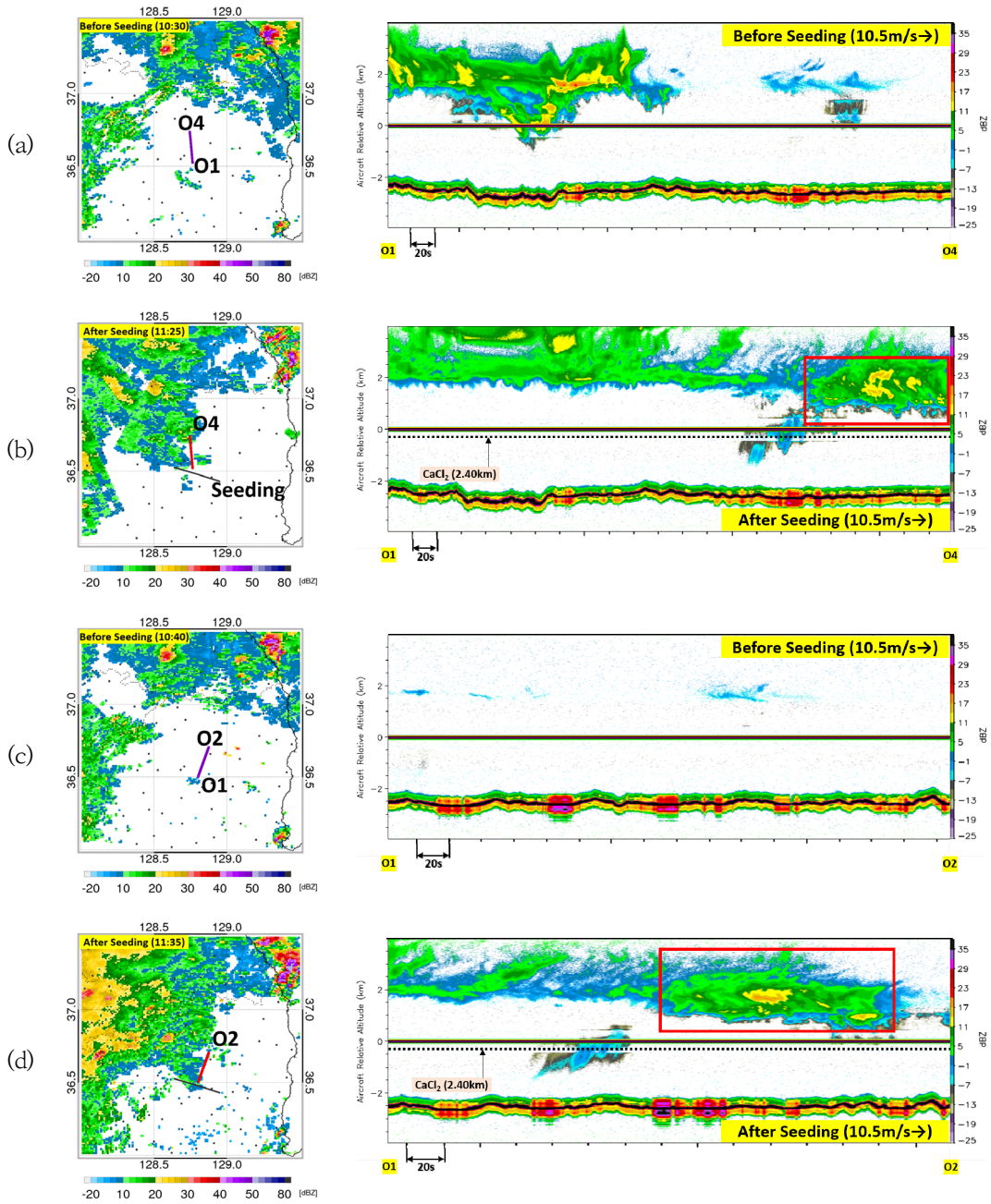


Fig. 7. Same as Fig. 6, but for Event 2. Panels (a) and (b) show radar observations before and after seeding along the O1-O4 path, while panels (c) and (d) present the same along the O1-O2 path.

#### 4. 결론

본 연구에서는 인공강우 실험 사례를 대상으로 항공 레이더(KPR)의 구름관측 특성을 분석하였다. 관측 방법으로는 기존의 단일 방향 관측과 실험 중 풍계 변동을 고려한 다방향 관측을 함께 적용하였다. 분석 대상은 2023~2024년 국립기상과학원에서 수행된 세계의 인공강우 실험 사례이며, 두 사례는 단일 방향 관측, 한 사례는 풍계 변동을 반영한 새로운 관측 방식을 적용하였다. KPR 관측 결과는 지상 기상레이더 자료와 비교·분석하였고, 수치모의에서 나타난 영향 시간 동안의 구름 특성 변화를 함께 검토하였다. 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

관측 방법은 시딩 라인에 수직한 단일 경로를 따라 실험 전후 왕복 관측을 수행하는 방식과, 구름의 이동 방향 변화를 고려해 여러 경로를 설정하는 방식의 두 가지로 구분된다. 전자의 경우 한정된 시간 내에 실험과 검증을 병행할 수 있어 효율적이지만, 실험 전후 풍향이 일정해야 한다는 제약이 있다. 반면 다방향 관측 방식은 운항 시간이 많고 절차가 복잡하지만, 실험 중 풍계가 변하더라도 목표 구름을 추적하며 관측할 수 있는 장점이 있다.

단일 방향 항공 관측이 수행된 두 사례(Event 1, 3)에서는 시딩 후 항공 레이더 반사도가 약 10 dBZ 정도 증가하였으며, 수치모의 및 지상 레이더 분석 결과와 일치하는 플룸(Plume) 형태의 구름 강화가 확인되었다. 이러한 증가는 자연적 강수 강화나 지형 효과의 영향을 배제하더라도 시딩 효과를 반영한 결과로 해석된다. 따라서 항공 레이더를 활용해 인공강우 실험의 미세한 구름 변화를 직접 검증할 수 있음을 보여준다.

실험 중 풍계 변동을 고려한 관측(Event 2)에서는 시딩 영향이 나타난 구름을 추적하면서 시간에 따른 구름 특성 변화를 확인하였다. 이는 수치모의에서 예측된 다양한 증수 지역과의 정합성이 높아, 풍계 변화 조건에서도 인공강우 효과를 검증하는 데 유리함을 보여주었다. 특히 국내와 같이 복잡한 지형 조건과 공역 제약이 존재하는 환경에서, 본 연구에서 제안한 다방향 관측 방식은 최적의 실험 계획 수립과 효과 검증에 실질적인 기여를 할 수 있음을 시사한다.

이상의 결과를 통해 인공강우 실험 효과 검증에서 항공 레이더의 활용 가능성과 우수성이 확인되었다. 항공 레이더는 대기 중 시간에 따라 변하는 구름의 구

조를 직접 추적하면서 실험에 의한 강화 양상을 관측할 수 있다는 점에서 과학적 가치가 크다. 물론 항공 레이더는 기상레이더에 비해 관측 범위가 제한되고, 감쇠가 크며 장비가 고가라는 단점이 있으나, 적절한 관측 전략이 수반된다면 인공강우 실험으로 인한 구름 변화를 직접적으로 검증할 수 있는 유력한 도구가 될 것이다. 최근 국내에서도 산불 예방 및 기후 대응을 위한 인공강우 실험에 대한 관심이 높아지고 있으며, 항공 레이더의 실험적·기술적 활용성은 앞으로 더욱 확대될 것으로 기대된다. 또한 항공 레이더는 상하 방향 관측이 가능하므로 구름 내부로 진입하기 어려운 상황이나 위험 기상 조건에서도 안전하게 자료를 확보할 수 있다. 현재 미국과 중국 등 일부 국가에서만 인공강우 실험에 항공 레이더가 활용되고 있으나, 이러한 기술적 접근은 향후 국내 인공강우 연구와 기상현상 관측 전반의 발전에 중요한 기반이 될 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 기상청 국립기상과학원 기상조절 및 구름 물리 연구(KMA2018-00224)의 지원을 받았습니다.

#### REFERENCES

- Cha, J., Kim, Y., Belorid, M., Kim, B., Baek, J., Kim, S., Lee, K., Cho, C., Lee, S., 2024, Development of Korea's first large scale advanced cloud physics experimental chamber (I): Design of the cloud physics experimental chamber system and detailed structural analysis of the cloud chamber, *J. Environ. Sci. Int.*, 33, 957-975.
- Chae, S., Chang, K., Seo, S., Jeong, J., Kim, B., Kim, C. K., Yum, S. S., Kim, J., 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.
- Geerts, B., Miao, Q., Yang, Y., Rasmussen, R., Breed, D., 2010, An Airborne profiling radar study of the impact of glaciogenic cloud seeding on snowfall from winter orographic clouds, *J. Atmos. Sci.*, 67, 3286-3302.
- Grasmick, C., Geerts, B., French, J. R., Haimov, S., Rauber, R. M., 2022, Estimating microphysics properties in ice-dominated clouds from airborne Ka-W-band dual-wavelength ratio reflectivity

- factor in close proximity to in situ probes, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 39, 1815-1833.
- Ku, J. M., Chang, K. H., Chae, S., Ko, A. R., Ro, Y., Jung, W., Lee, C., 2023, Preliminary results of cloud seeding experiments for air pollution reduction in 2020, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 59, 347-358.
- Li, D., Zhao, C., Li, P., Liu, C., Gong, D., Liu, S., Yuan, Z., Chen, Y., 2022, Macro- and micro-physical characteristics of different parts of mixed convective-stratiform clouds and differences in their responses to seeding, *Adv. Atmos. Sci.*, 39, 2040-2055.
- Malinowski, S. P., Zawadzki, I., Banat, P., 1998, Laboratory observations of cloud-clear air mixing at small scales, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 15, 1060-1065.
- Mason, B. J., 1962, The cloud chamber as a tool in cloud physics, *Contemp. Phys.*, 4, 27-48.
- Morrison, H., Curry, J., Khvorostyanov, V., 2005, A New double-moment microphysics parameterization for application in cloud and climate models, Part I: Description, *J. Atmos. Sci.*, 62, 1665-1677.
- Pazmany, A. L., Haimov, S. J., 2018, Coherent power measurements with a compact airborne Ka-band precipitation radar, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 35, 3-20.
- Pokharel, B., Geerts, B., Jing, X., Friedrich, K., Ikeda, K., Rasmussen, R., 2017, A Multi-sensor study of the impact of ground-based glaciogenic seeding on clouds and precipitation over mountains in Wyoming, Part II: Seeding impact analysis, *Atmos. Res.*, 183, 42-57.
- Rasmussen, R. M., Tessendorf, S. A., Xue, L., Weeks, C., Ikeda, K., Landolt, S., Breed, D., Deshler, T., Lawrence, B., 2018, Evaluation of the Wyoming Weather Modification Pilot Project (WWMPP) using two approaches: Traditional statistics and ensemble modeling, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 57, 2639-2660.
- Reynolds, D. W., 2015, Literature review and scientific synthesis on the efficacy of winter orographic cloud seeding, A Report to the U.S. Bureau of Reclamation, Technical Memorandum, 148.
- Ro, Y., Chang, K. H., Chae, S., Lim, Y. K., Ku, J. M., Jung, W., 2023, Estimation of the total amount of enhanced rainfall for a cloud seeding experiment: Case studies of preventing forest fire, drought, and dust, *Adv. Meteorol.*, 2023, 5478666.
- Rosenfeld, D., Farbstein, H., 1992, Possible influence of desert dust on seedability of clouds in Israel, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 31, 722-731.
- Shang, J., Yang, H., Yin, H., Wu, Q., Guo, Y., 2012, First results from field campaign of spaceborne precipitation radar in China: Radar performance analysis, *J. Remote Sens. (Yaogan Xuebao)*, 16, 435-447.
- Stratmann, F., Kiselev, A., Wurzler, S., Wendisch, M., Heintzenberg, J., Charlson, R. J., Diehl, K., Wex, H., Schmidt, S., 2004, Laboratory studies and numerical simulations of cloud droplet formation under realistic supersaturation conditions, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 21, 876-887.
- Tessendorf, S. A., French, J. R., Friedrich, K., Geerts, B., Rauber, R. M., Rasmussen, R. M., Brintjes, R., et al., 2019, A Transformational approach to winter orographic weather modification research: The SNOWIE project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 100, 71-92.
- 
- Research Scientist. Yonghun Ro  
Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences  
royh1@korea.kr
  - Project Manager. Ki-Ho Chang  
Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences  
khchang@korea.kr
  - Research Scientist. Yun-kyu Lim  
Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences  
imyunkyu@korea.kr
  - Researcher. Yujin Kim  
Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences  
yu1120jin@korea.kr@korea.kr
  - Manager. Hye-min Shin  
Meteorological Division, Sunny Air Inc.  
hmshin@sunnyair.kr
  - Department Head. Seungbum Kim  
Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences  
kmaskim@korea.kr