

항공기를 이용한 인공증우(설) 기술과 결과분석

차주완^{1)*} · 정운선¹⁾ · 채상희¹⁾ · 고아름¹⁾ · 노용훈¹⁾ · 장기호²⁾ · 서성규³⁾ ·
하중철¹⁾ · 박동오¹⁾ · 황현준¹⁾ · 김민후¹⁾ · 김경익¹⁾ · 구정모¹⁾

¹⁾기상청 국립기상과학원 응용기상연구과, ²⁾기상청 기상레이더센터 레이더기획팀,
³⁾(주) 디지카

(접수일: 2019년 7월 19일, 수정일: 2019년 11월 9일, 게재확정일: 2019년 11월 17일)

Analysis of Results and Techniques about Precipitation Enhancement by Aircraft Seeding in Korea

Joo Wan Cha^{1)*}, Wooseon Jung¹⁾, Sanghee Chae¹⁾, A-Reum Ko¹⁾, Yonghun Ro¹⁾,
Ki-Ho Chang²⁾, Seongkyu Seo³⁾, Jong-Chul Ha¹⁾, Dongoh Park¹⁾, Hyun Jun Hwang¹⁾,
Min Hoo Kim¹⁾, Kyung Eak Kim¹⁾, and Jung Mo Ku¹⁾

¹⁾Applied Meteorological Research Division, National Institute of Meteorological Science, JeJu, Korea

²⁾Radar Planning Team, Weather Radar Center, Seoul, Korea

³⁾DigiQuay, Seoul, Korea

(Manuscript received 19 July 2019; revised 9 November 2019; accepted 17 November 2019)

Abstract National Institute of Meteorological Sciences has conducted a total 54 cloud seeding experiments with a silver iodide and calcium chloride using aircrafts from 2008 to 2018. The goal of the experiments is to improve the techniques of precipitation enhancement in Korea. The cloud seeding experiments using the silver iodide and calcium chloride were 36 and 18 times, respectively. During the cloud seeding experiments of the silver iodide and calcium chloride, the average values of total cloud amount for two kinds of seeding materials were 9.6 for and 8.1, respectively. The cloud type with the highest occurrence was Nimbostratus (Ns)-Stratus (St) (58%) in the silver iodide cloud seeding experiment. It was Altostratus (As)-Stratocumulus (Sc) (44%) in the calcium chloride cloud seeding experiment. Compared to probability of obtaining cloud seeding effect of the experiments using a leased aircraft, the probability using an atmospheric research aircraft increased from 43% to 63% in the silver iodide cloud seeding experiment and from 29% to 75% in the calcium chloride cloud seeding experiment. However, the increasing tendency was only shown during the one year experiment (2018). To get the meaningful statistical tendency of the cloud seeding effects, it is needed to implement many experiments in several years. Further we have to more clearly understand the characteristics of clouds developing in Korea and implement the cloud seeding experiments under a variety of weather conditions in order to develop the optimized precipitation enhancement technology in Korea.

Key words: Precipitation enhancement, cloud seeding, AgI, CaCl₂, cloud physics

*Corresponding Author: Joo Wan Cha, Applied Meteorological Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Seogwipo, Jeju 63568, Korea.
Phone: +82-64-780-6754, Fax: +82-64-738-6512
E-mail: jwcha@korea.kr

1. 서론

기후변화 등에 의해 수자원에 대한 변동성이 커지고 가뭄발생이 지속적으로 증가하는 경향이 보이고 있다(Sohn et al., 2014). 이에 국가 미래수자원 확보에 대한 많은 기술들이 적용되고 있지만 일반적인 수자원확보 방안으로 댐건설, 지하수개발, 강변여과수, 해수담수화 등의 방법이 있다. 하지만 이들 방법은 비용이 많이 들고 이에 따라 발생하는 환경문제가 있다(Kwak et al., 2003). 비교적 적은 비용과 환경문제를 최소화하여 수자원을 확보하는 방안의 한가지로 인공증우(설)이 대안으로 제시되고 있다.

일반적으로 인공적으로 날씨를 제어하려고 하는 기술이나 활동을 기상조절(Weather Modification)이라고 하며 인공증우나 인공증설, 안개소산, 우박억제, 폭풍우 완화 등이 이에 속한다. 현재 기상조절 기술은 미국, 멕시코, 오스트레일리아, 태국, 이스라엘, 아랍에미리트, 러시아, 중국, 일본, 그리스, 남아프리카공화국 등 세계 많은 국가에서 다양한 연구 프로젝트가 진행 중이다. 이들 국가들에서 진행되었거나 진행 중인 프로젝트에 대한 자세한 정보는 “<https://map.geoengineeringmonitor.org/>”에서 얻을 수 있다. 현재까지 이들 국가에서는 인공증우 및 인공증설뿐만 아니라 우박억제 연구도 넓은 범위에서 진행되고 있음을 알 수 있다.

구름조절에 의한 인공증우 및 인공증설은 Schaefer (1946)와 Vonnegut (1947)에 의해 과냉각 구름 안에 인공 빙정핵을 살포하면 빙정의 수증도를 증가시킬 수 있다는 발견에서 비롯되었다. 특히, 인공증설 실험은 과냉각 수적이 풍부한 혼합운에 항공기를 이용하여 시딩된 빙정핵에서 생성된 작은 빙정(ice crystal)들과 빙정과정 의해 성장한 눈이 지상으로 떨어져 쌓인 눈(Snowpack)에서 수자원을 확보할 수 있음을 보였다. 인공증설 항공실험의 주요 실험 대상인 과냉각 구름은 산악지역의 지형효과에 의해 자주 발생하는 것이 여러 선행연구에서 입증되었다(WMO, 2018). 이러한 구름들에 항공기를 이용하여 인공빙정핵으로 요오드화은(AgI) 연소탄 또는 용액을 직접 구름에 시딩하며, 실험 후 시딩효과를 확인하는 것이 필요하다. 이를 위해 실험 구름에 대한 직·간접적 물리적 관측과 지상에서 실험에 의한 적설량을 정량화하기 위한 여러 노력들이 있었고, 이를 통해 적설량 증가를 위해서 얇은 산악형 구름이 효과적이라는 것이 제시되었다(Hobbs, 1975; Hill, 1982; Rauber and Grant, 1986; Reynolds and Kuciauskas, 1988; Deshler et al., 1990; Pokharel et al., 2017; French et al., 2018; WMO 2018). 그러나 아직까지 목표지역에서 실험에 의한 적설량 증가가 자연적인 것인지 또는 실험에 의한 것인지를

관측을 통해 명확하게 구분하고자 하는 연구가 진행되고 있다(Geerts et al., 2010; Pokharel et al., 2017). 관측에 의한 시딩효과의 물리적 검증을 보완하기 위해 통계분석 방법을 이용한 통계적 검증과 수치모델을 이용한 검증들이 적용되고 있다. 실제로 강수증가를 목적으로 인공증우 항공실험을 세계에서 가장 많이 장기간 현업으로 수행하고 있는 국가 중 하나인 미국, 태국 등은 통계적으로 실험에 의한 연강수량 증가를 제시하고 있다(CWCB, 2015; Cha et al., 2018).

우리나라에서는 1963년 양인기 박사에게 의해 최초로 항공기를 이용한 인공증우(설) 실험이 실시(Yang, 1965)되었고, 2002년 초반까지 우리나라의 인공증우(설) 연구는 가뭄이 발생하면 이에 따른 한시적인 대응책으로써 실시되었지만 단기적인 실험만이 이루어져 국내 인공증우(설) 기술의 경험 및 기술 축적이 미약했다(Weather modification group, 2009). 이후 2008년부터 임대 소형항공기를 이용한 항공살포 실험 및 지상검증 실험이 이뤄졌지만 예산, 인력 등의 한계로 연간 항공기를 이용 인공증우(설) 실험횟수는 아주 제한적이었다. 최근 2017년 11월에 기상항공기가 도입됨에 따라 안정적인 인공증우(설) 실험을 지속적으로 할 수 있는 기반이 마련되었다.

이 연구는 국내에서 실시된 항공기를 이용한 인공증우 및 증설에 대한 방법 및 실험 결과를 분석하였다. 우선 임대 소형항공기를 이용한 2008년부터 2017년 사이에 이루어진 실험과 기상항공기 도입 후 1년간인 2018년에 이루어진 기상항공기 인공증우 및 증설 실험의 결과를 분석하여 향후 관련기술개발의 방향을 제시하고자 한다.

2. 실험방법

국립기상과학원에서 수행하는 인공증설 항공실험의 경우, 한랭구름에서 요오드화은(AgI)을 이용한 빙정핵 및 냉각물질 시딩실험 방법을 주로 이용하고, 온난구름에 대해서는 염화칼슘(CaCl₂)을 주로 이용하였다. 구름씨 시딩은 항공기 양쪽 날개 부분에 장착된 연소탄이 비행경로에 따라 연소되면서 구름씨가 구름 중에 확산 되도록 설계된다(Fig. 1). 임대 항공기는 소형항공기(Cessna 206)의 한계로 한랭구름을 대상으로 할 경우 구름정상에 근접하여 비행하거나 짧은 시간동안(약 5분 이내) 구름 속에 들어가는 형태로 구름씨를 시딩하였다. 온난구름인 경우 운저에 구름씨를 시딩하지만 임대항공기가 소형이므로 구름 내 상승속도나 풍속이 클 경우에 위험성이 높아 난류가 많은 구름에 대한 실험에 대한 한계가 많이 있었다. 기상항공기는 임대항공기와 달리 기상관측장비뿐만 아니라 구름물리관측장비도 탑재되어 있어 인공증우 실험 후 상공



Fig. 1. Images of leased aircraft (CESSNA-206) (left) and Burn-in-place cloud seeding flare (Right).

Table 1. Summary of cloud physical instruments in atmospheric research aircraft.

Instruments	Measurements	
Cloud Condensation Nuclei Counter (CCN-200) (http://www.dropletmeasurement.com/)	Condensation nuclei distribution (0.75~10 μm) (Measurement parameter: CCN number concentration)	
Optical Particle Counter (Sky-OPC) (https://www.grimm-aerosol.com/)	Aerosol particle distribution (0.25~32 μm) (Measurement parameter: aerosol number concentration per particle size)	
Cloud Combination Probe (CCP) (http://www.dropletmeasurement.com/)	Cloud Imaging Probe (CIP)	Cloud droplet distribution (7.5~930 μm), Shape (Measurement parameter: cloud droplet number concentration per particle size and drop shape)
	Cloud Droplet Probe (CDP)	Cloud droplet distribution (2~50 μm) (Measurement parameter: cloud droplet number concentration per particle size)
	LWC-100 (hot wire)	Liquid water content (0~5 g m^{-3}) (Measurement parameter: liquid water)
Precipitation Imaging Probe (PIP) (http://www.dropletmeasurement.com/)	Precipitation particle distribution (100~6,200 μm), Shape (Measurement parameter: rain and ice number concentration per particle size and their shape)	
Water Content Measurement (WCM2000) (http://www.scieng.com/)	Liquid Water Content (< 6 g m^{-3}), Total Water Content (< 10 g m^{-3}) (Measurement parameter: liquid water and total water content)	
Aerial View Camera (AVS-860) (http://www.aerialviewsystems.com/)	Atmosphere, Ground View (Measurement parameter: view Images)	
Aircraft Integrated Meteorological Measuring System (AIMMS-20) (http://www.aerialviewsystems.com/default.htm)	Meteorological data (Measurement parameter: Temperature, Relative humidity, Pressure, Wind direction, Wind speed) Aircraft-State (Measurement parameter: Latitude, Longitude, Altitude, Velocity, Angle etc.)	

에서 실험효과를 바로 검증할 수 있다. 기상항공기 관측장비 중 구름물리관측 및 인공증우실험에 필요한 관측장비는 대부분 구름 및 강수입자를 관측하는 장비와 구름의 응결핵을 관측하는 장비 등으로 구성되

어 있다(Table 1과 Fig. 2). 인공증우 시딩물질로 요오드화은과 염화칼슘을 사용하였고 항공기 양쪽 날개 부분에 이물질이 포함된 연소탄을 매달아 비행경로에 따라 시딩한다. 기상항공기와 임대항공기의 특성은



Fig. 2. Atmospheric research aircraft and cloud observational instruments of NIMS.

Table 2. Specification of leased and Atmospheric research aircrafts.

Specifics	leased aircraft	Atmospheric research aircraft.
Aircraft type	CESSNA 206	Beechcraft King Air 350HW
Number of passengers for flight experiment	2	5
Height/length/wide	2.4 m/8.2 m/11 m	4.37 m/14.22 m/17.65 m
Maximum Take-off Weight	1,155 kg	7,484 kg
Maximum flight distance	1,180 km	1,550 km
Maximum endurance	7 hours	7 hours
Maximum operating Altitude	About 4 km	About 10 km
Numbers of Instruments for Experiment	0	25

Table 2에서 서술하였다.

2.1 실험 조건 및 절차

국립기상과학원에서 항공기를 이용한 실험은 기술 발달에 따라 단계적으로 이루어졌다. 실험 초기에는 가장 단순한 형태인 산악형 구름에 대한 실험이 2008년부터 2015년까지 주로 이루어졌다. 이 기간에는 대부분 대관령 주변지역의 동풍계열의 바람이 불 때 이루어졌다. 2016년에는 서풍계열의 바람에 대해서도 실험을 수행했고, 2017년에는 경기도와 협업하여 수도권 지역을 대상으로 염화칼슘을 활용한 인공증우실험을 집중적으로 수행하였다. 2018년은 기상항공기를 도입 후 첫 해로서 보다 다양한 기상환경에 따라 인공증우(설) 실험을 수행하여 인공증우 비행실험을 체계화 구축한 첫 해가 되었다.

Table 3은 기본적으로 국내 기상항공기를 이용한 인공증우 실험조건이다(Cha et al., 2018). 기온은 인공증우 시딩 물질에 따라 요오드화은인 경우 주로 -5°C 이

Table 3. Meteorological conditions for aircraft cloud seeding in Korea.

Weather condition (Target regions)	Range
Air temperature at seeding height	$\leq -5^{\circ}\text{C}$ for AgI $\geq 0^{\circ}\text{C}$ for CaCl_2
Liquid Water Content at seeding height	$\geq 0.2 \text{ g m}^{-3}$
Cloud thickness at seeding height	$\geq 1.0 \text{ km}$
Wind speed at seeding height	$\leq 15 \text{ m s}^{-1}$

하인 경우, 염화칼슘인 경우는 0°C 이상일 때 실험을 수행하였다. 풍속은 15 m s^{-1} 이하로 비행관측 및 실험에 적합하고 인공증우 시딩물질이 잘 혼합되어 목표 지역에 강우가 발생 할 가능성이 높은 풍속을 택하였다. 구름의 액체수함량 LWC (Liquid Water Content) 은 0.2 g m^{-3} 이상일 때를 기준으로 하였다. 이 기준을 적용하여 2008년부터 대관령 부근 지역의 연직 프로파일러와 마이크로 라디오미터 등의 관측을 이용하

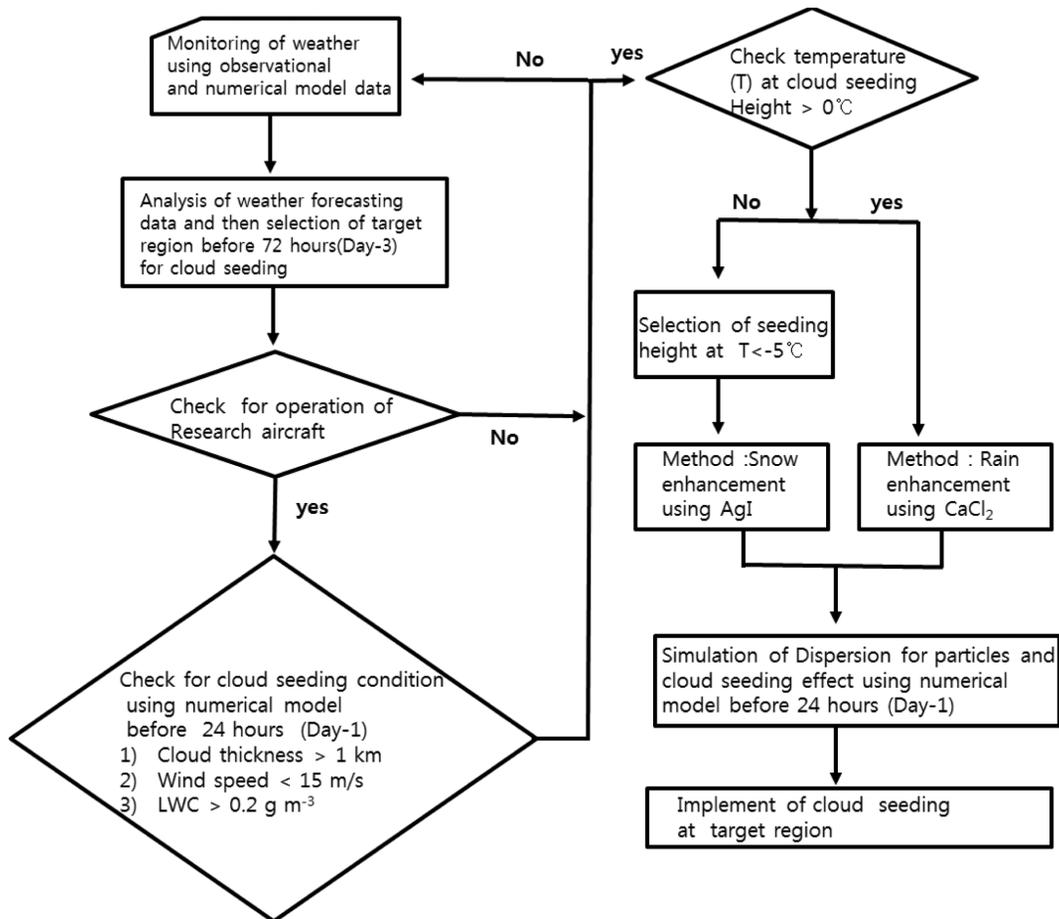


Fig. 3. Flowchart for procedure of cloud seeding experiment using atmospheric research aircrafts.

여 이 지역의 실험조건을 파악하였다. 2014년부터 한국형 인공증우 수치모델을 이용하여 3일 전부터 인공증우 목표지역의 기온, 풍속, 구름액체수량 등을 예측하여 실험에 활용했다. 이 모델이 개발된 이후 시딩 효과가 잘 나타날 것으로 예상되는 구름을 선별하여 실험을 실시할 수 있었다. 특히 최근 인공증우용 수치모델을 이용한 예측시스템 및 기상청 단기예보, 목표지역의 기상조건 모니터링을 통해 보다 세밀하게 인공증우 실험 대상 구름을 선별할 수 있게 되었다.

Figure 3은 국내 인공증우 비행실험을 수행하는 절차를 보여준다. 실험 실시예상일 D-3일부터 단기 수치예보를 통해 기상조건 모니터링을 실시하며, 실험 D-1일 또는 실험 예상 당일 아침에 인공증우용 수치예측시스템을 통해 실험에 의한 강수증가를 확인하고, 실험 당일 2시간 전까지 관측을 포함해서 최종 모니터링을 실시한다. 시딩라인의 고도는 목표지역의 지형고도 및 구름상황을 고려하여 고도를 설정한다. 항

공실험을 위해서는 현장에서 항공기에 탑승하는 실험반과 이를 지원하기 위한 상황반으로 나누어 추진한다. 실험 D-1일까지 실험반과 상황반이 함께 모여 실험 수행여부를 결정하고, D-day에는 실험반이 기상항공기에 탑승하여 실제 대기에서의 구름상황을 파악한 후 인공강우 시딩물질을 살포한다.

2.2 인공증우(설) 실험: 실험설계

2008년 국내 인공증우(설) 초기실험은 대부분 대관령지역을 중심으로 동풍이 있을 경우에 수행하였다(Fig. 4). Figure 4a는 대관령 등 강원도 산악지역을 대상으로 지형효과를 고려한 실험설계 모식도이다. 이 지역에서 동풍에 의해 발생하는 구름은 대관령지역서는 지형효과에 의한 강우나 강설이 나타난다. 인공증우(설) 효과에 대한 검증은 임대항공기를 이용할 때에는 지상 및 레이더 관측자료를 가지고 검증할 수 있도록 설계하였다. 기상항공기 도입 후 지상 및 레이

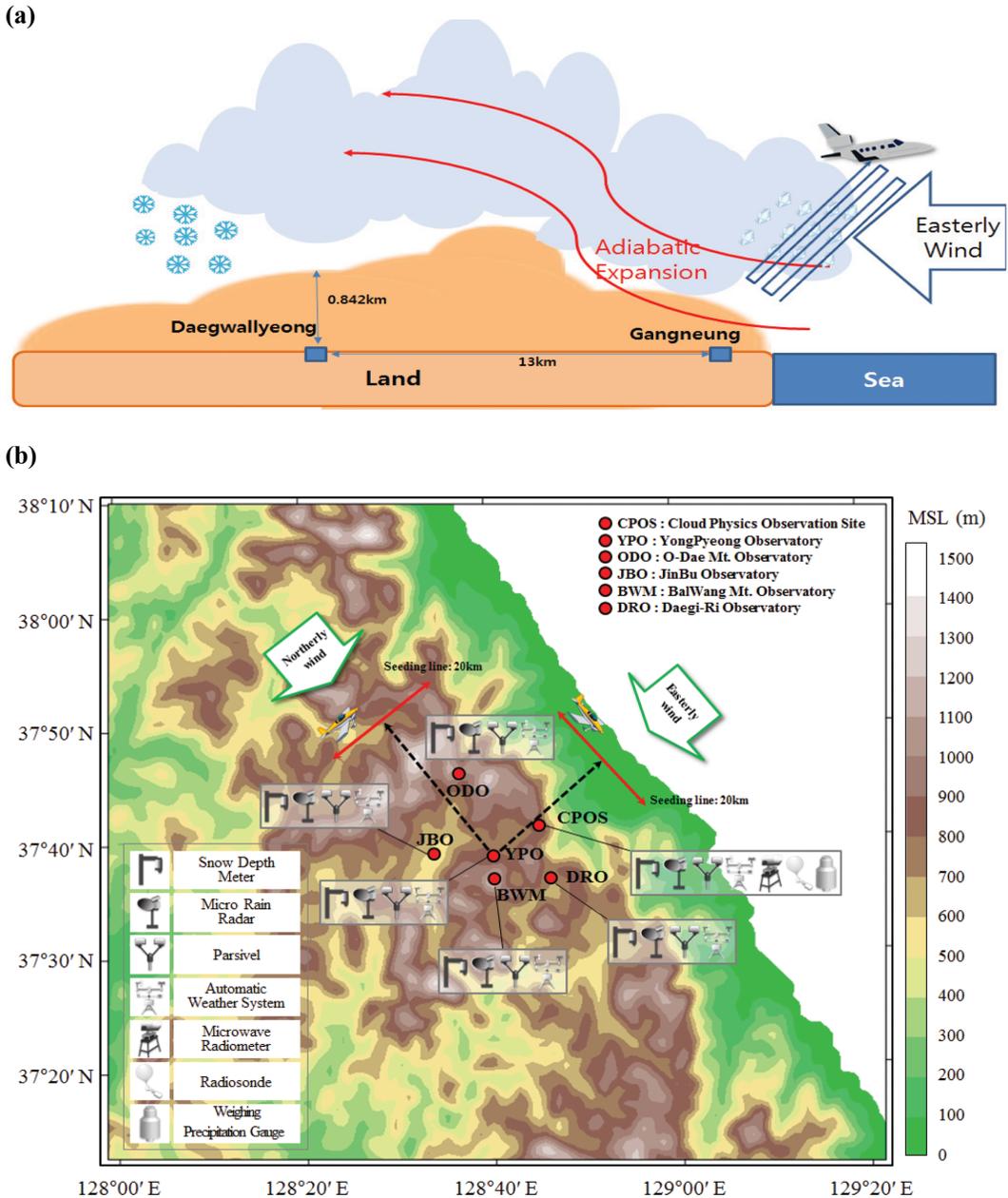


Fig. 4. (a) Cartoon of aircraft cloud seeding method at Daegwallyeong and (b) Observational concept in the aircraft cloud seeding experiment for snowfall enhancement from 2015 to 2018.

더 관측자료뿐만 아니라 기상항공기를 이용한 검증 실험도 가능하여 보다 많은 인공증우(설) 검증자료가 확보될 수 있었다.

2.3 인공증우(설) 실험 : 비행실험의 시딩 및 검증방법
 실험 실시조건의 최종 모니터링을 통해 실험실시가

결정되면 실험항공기의 비행경로 및 시딩라인의 위치를 결정하여 항공기 조종사에게 알려준다. 시딩은 일반적으로 목표지점의 풍상 측에서 유입되는 풍향에 직교하여 왕복하면서 연소탄을 시딩하는 교차시딩 방식을 많이 사용한다(Figs. 4b, 5). 여기서 중요한 것은 시딩의 효과가 잘 나타나도록 시딩라인의 위치를 결

정하는 것이며, 이러한 결정을 위해 다음과 같은 수식은 경험식을 사용했다.

$$\text{항공시딩위치} = \text{평균 수평풍속} \times \frac{a_1 - a_2}{b} \quad (1)$$

여기에서 항공시딩위치(Calculated seeding point)는 시딩라인의 중간점이고, 평균 수평풍속은 지상에서 시딩고도까지의 연직 평균 수평풍속이다. 이 연직평균 수평풍속은 수치모델에서 구해지는 값으로 산악지역의 구름 상승속도 등이 고려된 연직별 수평풍속의 평균값이 되는 것이다. a_1 은 시딩고도이고, a_2 는 목표지점의 고도이다, b 는 눈 또는 얼음입자의 낙하속도이다. a_1 은 실험대상 구름마다 시딩고도가 다르고, a_2 는 동일한 지점을 목표로 한다면 상수가 된다. b 의 값은 국가 또는 연구자에 따라 다르며, 일반적으로 눈의 평균 낙하속도인 1 m s^{-1} 를 많이 사용한다. 인공증우 및 증설실험 시 눈과 비의 평균 낙하속도인 1 m s^{-1} 로 고려하여 사용하였다. 이러한 계산은 실험 후 수치모델에 의해 수직 및 수평 확산 시뮬레이션을 통해 정확

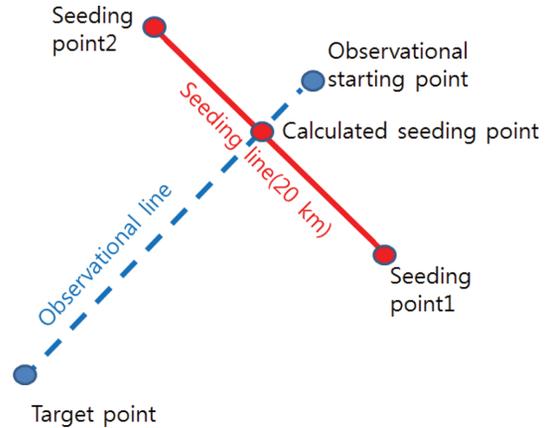


Fig. 5. Aircraft flight strategy for cloud seeding in Korea.

도를 재평가한다. 현재까지의 경험으로는 수치모델과 비교를 해봤을 때 이러한 계산은 시딩물질을 목표지역에 잘 확산될 수 있게 하였다. 위의 수식을 통해 목

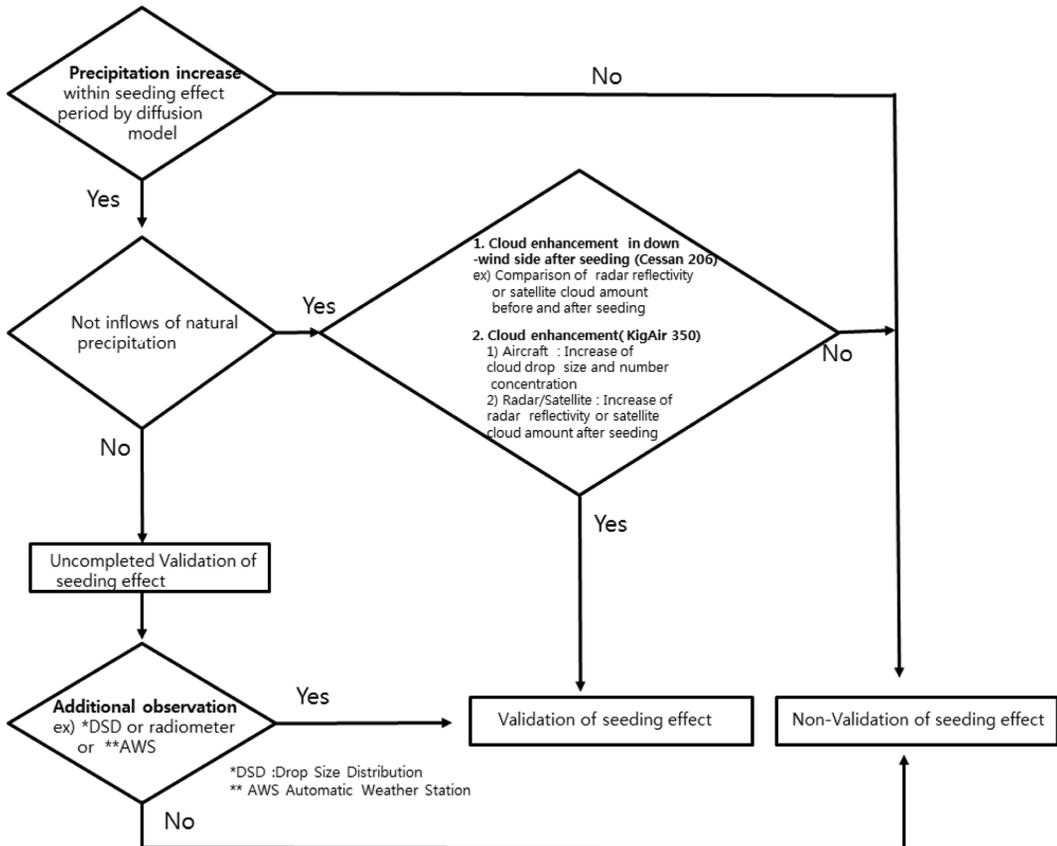


Fig. 6. Flow chart for verification of cloud seeding by aircraft in Korea.

Table 4. Summary of aircraft cloud seeding with AgI from 2008 to 2018.

Year	No.	Date	¹⁾ H	Region	²⁾ M	Experiment condition			
						³⁾ WD	⁴⁾ WS	⁵⁾ T	⁶⁾ Ht
2008	1	3. 3	1707~1810	Yongpyong	AgI Liquid-N ₂	Northeast	3	-8	3
	2	3. 4	1403~1459	Yongpyong	AgI Liquid-N ₂	Northeast	3	-20	2.8
	3	3. 14	1215~1239	Yongpyong	Liquid-N ₂	Northeast	3	-5	2.1
2009	4	2. 23	1014~1119	Yongpyong	AgI Liquid-N ₂	Northeast	3	-4	22
	5	3. 23	0040~0027	Yongpyong	AgI	Northwest	8	-8	2.8
	6	3. 23	0101~0121	Taebaek	AgI	Northwest	8	-8	2.8
	7	3. 30	2140~2202	Yongpyong	AgI	Southwest	7	-12	2.8
	8	3. 30	2258~2320	Taebaek	AgI	Southwest	8	-13	2.8
2010	9	2. 10	1825~1849	Yongpyong	AgI	Southwest	4	-6	2.4
	10	2. 12	1600~1608	Suwon	AgI	South	3	-14	2
	11	2. 12	1805~1823	Andong	AgI	Southwest	4	-14	2.6
	12	2. 16	1756~1815	Yongpyong	AgI	Southwest	4	-18	2.2
	13	3. 7	1637~1658	Yongpyong	AgI	East	3	-12	2
	14	3. 7	1746~1810	Yongpyong	AgI	East	3	-12	2
	15	3. 8	1520~1542	Yongpyong	AgI	East	5	-8	2.4
	16	3. 8	1634~1648	Yongpyong	AgI	East	4	-8	2.2
2011	17	2. 28	1417~1421	Yongpyong	AgI	Northeast	5	-2	2
	18	3. 25	1546~1550	Yongpyong	AgI	Northwest	10	-22	3.5
2012	19	2. 26	1531~1535	Yongpyong	AgI	Northeast	3	-18	2.4
	20	3. 2	1652~1712	Yongpyong	AgI	Northeast	4	-11	2.8
2013	21	3. 13	1753~1817	Yongpyong	AgI	North	6	-8.5	2.8
2015	22	12. 18	1307~1347	Boryeong	AgI	Northwest	6	-6	1.5
2016	23	1. 29	1252~1336	Yongpyong	AgI	Northeast	7	-6	2.2
	24	1. 29	1953~2040	Yongpyong	AgI	Northwest	1	-6	2
	25	2. 6	1521~1555	Yongpyong	AgI	Northwest	7	-6	2.5
	26	2. 20	1355~1431	Yongpyong	AgI	North	4	-14	2.9
	27	3. 9	1316~1400	Yongpyong	AgI	Northwest	4	-17	2.1
	28	3. 9	1831~1907	Yongpyong	AgI	West	6	-13	1.8
2018	29	1. 30	1709~1801	Yongpyong	AgI	Southwest	25	-15	2.0
	30	3. 21	1607~1714	Yongpyong	AgI	Northeast	13	-8	2.0
	31	10. 17	1133~1247	Yongpyong	AgI	Southwest	5	-3	2.4
	32	10. 18	1131~1241	Yongpyong	AgI	Northeast	8	-3	2.4
	33	11. 7	1159~1251	Yongpyong	AgI	Southwest	5	-3	2.7
	34	11. 21	1150~1232	Yongpyong	AgI	Southwest	15	-9	3
	35	12. 4	1056~1134	Yongpyong	AgI	West	15	-4	3
	36	12. 11	1114~1206	Yongpyong	AgI	Southwest	19	-11	3

1) H: LST, 2) M: Chemical material, 3) WD: Wind Direction, 4) WS: Wind Speed ($m s^{-1}$), 5) T: Temperature ($^{\circ}C$), 6) Ht: Height (Km).

하고, 중간점으로부터 좌우로 10 km씩 설정하여 총 20 km의 시딩라인을 설정한다. 시딩 중간점에서 목표 지역까지의 직선거리는 (1) 식에서 구해진다(Fig. 5).

인공증우(설) 실험검증은 입대항공기를 이용한 경우와 기상항공기 도입 후 약간의 차이를 두었다(Fig. 6). 입대항공기를 이용한 인공증우 비행실험 시 2008년부

Table 5. Summary of aircraft cloud seeding with CaCl₂ from 2008 to 2018.

Year	No.	Date	¹⁾ H	Region	²⁾ M	Experiment condition				
						³⁾ WD	⁴⁾ WS	⁵⁾ T	⁶⁾ Ht	
2010	1	4. 23	0848~0900	Around Seoul	CaCl ₂	Northwest	4	5	0.5	
2011	2	3. 14	1540~1559	Dangjin	CaCl ₂	Northwest	5	4	0.5	
2014	3	8. 27	1448~1502	Wonju	CaCl ₂	Northeast	1.4	14	1.5	
2016	4	6. 21	1227~1247	Yongpyong	CaCl ₂	West	4	16	1.8	
	5	6. 21	1341~1359	Yongpyong	CaCl ₂	West	4	16	1.8	
2017	6	5. 4	1756~1818	Hwaseong	CaCl ₂	Southwest	6	6	2.6	
	7	5. 23	1254~1325	Hwaseong	CaCl ₂	Southwest	3	14	1.6	
	8	5. 31	1530~1550 1612~1631	Pyeongtaek Asan	CaCl ₂	Southwest	7	17	1.2	
	9	6. 1	0950~1006 1021~1037	Osan, Yeosu	CaCl ₂	West	6	14	0.6	
	10	6. 12	1736~1756 1825~1848	Gosam, Chungju	CaCl ₂	Southeast	3	10	2.2	
	11	6. 29	1450~1510 1533~1552	Anseong, Cheongju	CaCl ₂	South	4	16	1.6	
	12	11. 28	1656~1711 1744~1800	Suwon	CaCl ₂	West	6	4	1.5	
	13	12. 2	1529~1546 1624~1640	Suwon	CaCl ₂	West	8	-2	1.6	
	14	12. 3	1622~1639 1705~1717	Suwon	CaCl ₂	Northwest	8	2	0.7	
	2018	15	3. 29	1200~1256	Suwon	CaCl ₂	Southwest	1	10	0.6
		16	9. 19	1526~1605	Yongpyong	CaCl ₂	West	4	6	2.3
		17	10. 4	1301~1344	Yongpyong	CaCl ₂	Northeast	12	7	1.8
		18	12. 3	1322~1406	Yongpyong	CaCl ₂	Southwest	12	4	2.1

1) H: LST, 2) M: Chemical material, 3) WD: Wind Direction, 4) WS: Wind Speed (m s⁻¹), 5) T: Temperature (°C), 6) Ht: Height (Km).

터 2013년까지는 실험 전후 지상에서의 강수량변화와 강수입자 크기별 수농도의 변화, 항공기내 항공레이더를 이용한 연직강수량 변화 등을 고려하여 실험 검증여부를 판단하였다. 즉 시딩물질의 확산시간 등을 단순히 풍향과 풍속을 고려해 시딩물질의 도착시간을 계산하여 실험효과와 검증에 활용하였다. 2014년부터 인공강우 수치모델연구가 시작되면서 시딩물질의 확산을 보다 객관적으로 계산할 수 있었다(Chae et al., 2018). 따라서 수치모델링에 의한 검증은 2014년 이후부터 입대항공기 및 기상항공기 실험에 활용되었다. Figure 6에서 입대항공기를 이용한 인공증우 실험 실험검증은 이 모델에서 시딩물질이 목표지역으로 확산된 시간 내에 강수가 있어야 일차적으로 효과가 있는 것으로 고려하였다. 그리고 실험 후 자연강수의 영향이 없어야 하고 실험 후 풍하측에서 구름 발달의 변화를 확인하면 실험효과가 있는 것으로 판단하였다. 실험 후 자연강수의 영향을 받을 경우 일기

도, 지상의 다양한 장비(마이크로 라디오미터 또는 강수입자 크기에 따른 수농도 등), 실험지역 주변의 AWS 강수관측 분포 등을 고려하여 실험효과 여부를 자세히 분석한 후 최종적으로 실험효과 검증의 성공여부를 토의한 후 결정한다. Figure 6에서 기상항공기 도입 후에는 기상항공기는 상층에 있는 구름입자 크기별 수농도와 이미지 등을 관측할 수 있어 실험 검증으로 대기 중의 구름 및 강수입자 변화 여부를 실험 검증에 활용하였고 이는 실험 후 검증에 보다 객관적인 정보를 확보할 수 있게 해주었다.

3. 실험 결과

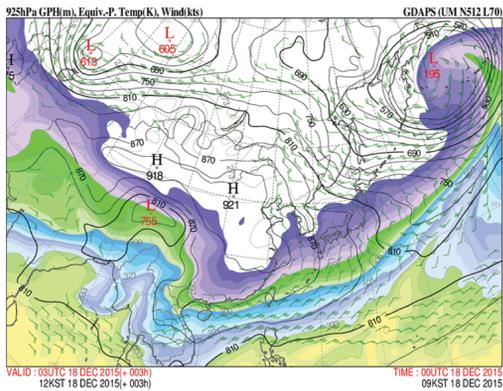
3.1 인공증우(설) 실험 시 구름 및 기상 현황 분석

목표지역을 주로 강원도지역과 수도권지역을 대상으로 2008년부터 2018년까지 요오드화은 등을 이용한 인공증설 항공실험은 36회 그리고, 염화칼슘을 이

Table 6. Analysis of meteorological data and seeding height for cloud seeding by aircraft from 2008 to 2018.

		Total cloud amount (#/10)	Amount of middle & low level cloud (#/10)	Amount of lowest level cloud (m)	Wind speed ($m s^{-1}$)	Temperature ($^{\circ}C$)	Seeding height (m)
AgI Seeding	Mean	9.6	7.5	1,018	6.7	-9	2,447
	STDEV	1.6	1.8	448	5.0	5	438
CaCl ₂ Seeding	Mean	8.1	5.3	1,249	5.5	9	1,423
	STDEV	2.3	2.4	933	3.1	6	643

(a)



(b)

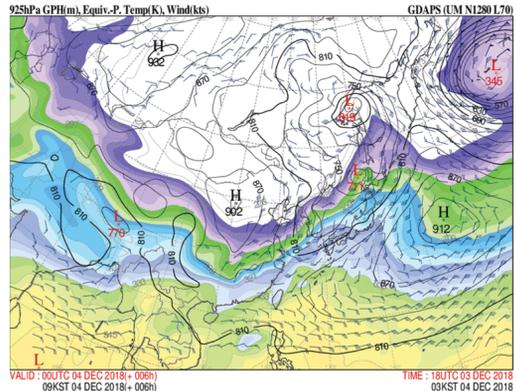


Fig. 7. Weather chart for synoptic scale classification of cloud seeding experiment from 2008 to 2018 ((a) Type 1: Expansion of continental high pressure system and (b) Type 2: Impact of low pressure system).

용한 인공증우 항공실험은 18회로 총 54회의 실험이 수행되었다. 2008년부터 2015년까지 8년간 25회가 수행된 반면 2016년부터 2018년까지 3년간 29회가 수행되었다. 특히 2018년 기상항공기를 도입 후 1년간 12회를 수행할 수 있었다(Table 4; Table 5). 이는 기상항공기가 향후 국내 인공증우 실험을 체계적이고 다양한 기상조건에 많은 실험을 할 수 있는 기반을 제공해 줄 수 있음을 의미한다.

요오드화는 시딩실험을 월별로 보면 총 36회 중 1월에서 3월 사이에 77%, 10월에서 12월까지 23%였고 나머지 월은 수행되지 않았다. 염화칼슘 시딩실험은 총 18회 중 6월에 28%, 3~5월 사이에 34%, 9~11월 사이 23%, 12월에 17% 수행되었다. 구름이 하늘 전체를 덮을 경우에 운량을 10이라고 하면 요오드화는 시딩실험 시 평균 운량은 9.6이었고, 평균 하층운량은 7.5였으며, 평균최저운고는 1,018 m였다. 염화칼슘 시딩실험 시에는 평균운량 8.1, 평균 하층운량 5.3, 평균 최저운고는 1,249 m였다. 요오드화는 시딩실험이 염화칼슘 시딩실험 때 보다 평균운량이 많았고, 평균 최저운고는 낮았다(Table 6). 운형은 요오드화는 시딩실험에서 난층운(Ns)-층운(St) 58%, 고층운(As)-층적운(Sc) 19%, 층운(St) 8%, 층적운(Sc) 6%, 나머지

고층운(As), 고층운(As)-층운(St), 권운(Ci)-고층운(As)이 각각 3%였다. 염화칼슘 시딩실험에서는 고층운(As)-층적운(Sc)가 44%, 고층운(As) 28%, 권운(Ci)-고적운(Ac)이 11%, 나머지 권운(Ci)-적운(Cu), 권운(Ci)-층적운(Sc), 권운(Ci)이 각각 6%였다. Ci 발생 때 실험은 무인기와 공동연구를 위한 테스트실험이라 정확히 인공강우 실험 목적만을 하지 않아 중하층 구름이 없어도 불구하고 무인기와 공동연구를 위해 유인기인 기상항공기와 무인기의 공동 비행가능성을 보기 위하여 추진한 사례이다.

풍속과 기온 비교 시 요오드화는 시딩실험은 $6.7 m s^{-1}$, $-9.9^{\circ}C$ 였고, 염화칼슘 시딩실험은 $5.5 m s^{-1}$, $9.1^{\circ}C$ 였다. 풍향은 요오드화는 시딩실험 시 북동풍과 동풍과 같은 동풍계열이 39%였고, 남서풍, 서풍, 북서풍과 같은 서풍계열은 51%였으며 북풍과 남풍은 각각 6%, 3%였다. 염화칼슘 시딩실험인 경우 남서풍, 서풍, 북서풍과 같은 서풍계열이 78%로 대부분을 차지했고, 북동풍, 남동풍 동풍계열은 17%이고 남풍이 5%였다. 요오드화는 시딩실험은 강원도 대관령이나 용평을 대상으로 동풍 시 발생하는 구름을 목표로 대부분 수행되었다. 염화칼슘 시딩실험은 강원도 뿐만 아니라 수도권을 대상으로 실험하였기에 서풍 시 발생하는 구

름을 목표로 수행하였다.

중관기상 특성 분석을 위해 지상 및 850 hPa 일기도와 위성 및 레이더 등의 자료를 참고하였다. 다양한 형태의 기압패턴에 따른 구름발원을 분류할 수 있으나 가장 단순히 분류될 수 있는 것이 대륙성 고기압 확장에 의한 국내 구름발생과 저기압 영향에 의한 구름발생으로 크게 2가지로 나누어 보았다(Fig. 7). 즉 중국, 시베리아 등 내륙에서 발생하는 고기압의 확장으로 국내 구름이 발생하는 경우와 한반도 부근 해상이나 중국 등 대륙에서 발생하는 저기압에 의해 발생하는 구름의 경우로 최대한 단순히 분류하였다. 요오드화는 시딩실험에서 대륙성 고기압의 확장에 의한 구름생성 사례가 36회 중 56%였고 저기압 영향에 의한 구름생성 사례는 44%였다. 반면 염화칼슘 시딩실험은 저기압영향에 의한 구름생성 사례가 18회 중 56%를 차지하게 되었고 대륙성 고기압의 확장에 의한 구름생성 사례는 44%였다.

3.2 인공증우(설) 실험 결과

인공증우 및 증설 검증 절차는 Fig. 6a에 절차에 따라 2008년부터 2017년 까지 임대항공기를 이용하여 실험을 수행하였다. 2008년부터 2013년까지는 인공증우용 수치모델이 개발되기 전이라 수치모델검증을 제외한 지상 및 레이더관측자료 등에 의한 검증이 이루어졌다. 2018년에는 기상항공기 도입 후 첫 해였고, 인공증우(설) 항공실험 검증절차를 Fig. 6b에 약간의 수정을 했다. 왜냐하면 기상항공기는 임대항공기에 탑재되지 않은 구름물리관측장비들을 가지고 있어 실험 후 바로 상층에서 검증할 수 있기 때문이다. 인공증설 검증절차를 적용한 대표적인 사례로 2016년 2월 6일 요오드화은을 이용한 시딩실험과 기상항공기를 도입 후 요오드화은 시딩실험인 2018년 10월 17일 사례를 통해 실험검증 절차에 대한 상세한 소개를 하고자 한다.

3.2.1 인공증우(설) 실험 사례

3.2.1.1 2016년 시딩실험 사례

임대항공기를 이용한 요오드화은 시딩실험이 2016년 2월 6일 평창지역에서 수행되었다. 처음 동풍이 예상되었으나, 북쪽의 고기압이 확장하면서 북풍계열의 풍향이 관측되었다. 용평(YPO), 대관령(CPOS), 오대산(ODO) 구름물리관측소가 주요 목표지역이었다. 시딩라인과 YPO 간의 거리로서 약 25 km이며, 강릉 수직측풍기 자료로 산출한 지상에서 예상시딩고도 2 km 까지 평균 풍향·풍속을 기반으로 시딩 후 약 1시간 뒤에 목표지역 지상에 강수증가가 나타나도록 설정하였다(Fig. 8). 요오드화은 시딩효과시간에 대해서는 여러 가지 논의가 있으나, 일반적으로 시딩 후 1시간 뒤 목

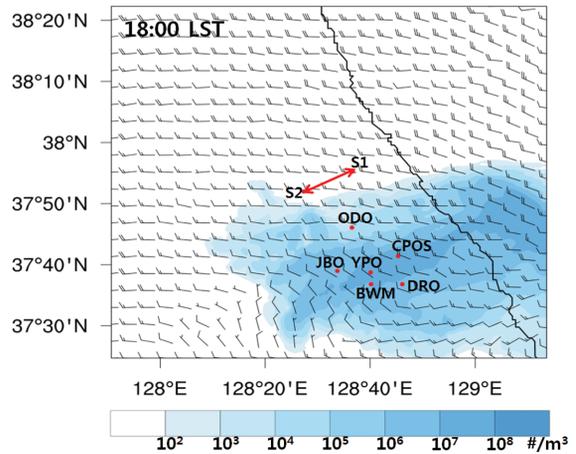


Fig. 8. Diffusion of seeding agent as a function of time by diffusion model after seeding on 6 February 2016. The red double arrow is the seeding line (YPO: YongPyong, CPOS: Daegwallyeong, ODO: O-dae Mt., and GN: Gangneung).

표지상에서 강수증가가 잘 나타나는 것으로 알려져 있다(Deshler et al., 1990; Brintjes, 1999). 2월6일 1520 LST부터 1555 LST까지 35분 동안 8발의 요오드화은 연소탄을 시딩하였다. 실제 시딩고도는 1.8~2.1 km 사이였으며, 시딩고도의 온도는 -14°C , 지상에서 시딩고도까지의 평균 수평 풍속은 7 m s^{-1} 이었다.

이번 연구에 사용된 인공증우실험용 수치모델의 입력장과 경계장은 UM LDAPS 분석장(수평해상도 1.5 km, 3시간 간격)을 사용하였다. 인공증설 Weather and Research Forecasting (WRF) model ver3.4에 AgI 살포모듈을 설치하였다. 실제로 수행 되어진 시딩라인에 해당하는 GPS 자료를 이용하여 시딩정보 입력자료를 생성하여 모델을 구동한 결과물을 분석하였다. 모델 결과물에서 SEED는 시딩정보에 따른 시딩모의를 의미하고, NOSEED는 시딩모의가 안된 일반전인 모의 결과물이다. 시딩 후 1시간 내에서는 북서풍에 의해 시딩물질이 오대산 구름물리관측소(ODO)를 지나 YPO로는 확산되지 않고, YPO보다 남동쪽 풍하 측에 위치한 CPOS로 먼저 확산되는 것을 확인되었으나 점차 YPO를 포함한 목표지역 전체로 확산되었다. 이 모델에 대한 더욱 자세한 내용은 Chae et al. (2018) 논문에서 서술되어 있다.

실험 전·후 강릉 지상 S-band 레이더를 통해 CPOS에 자연강수의 유입이 없는 것으로 확인되었다(Fig. 9). 시딩효과를 확인하기 위하여 확산모델의 시딩물질 확산을 토대로 시딩라인으로부터 가까운 풍하 측에 위치한 ODO와 보다 더 풍하 측에 위치한 주요 목표지역이었던 CPOS의 관측 자료들을 비교하였다. Fig. 10은 광학우적계(PARSIVEL (PARticle SIze and

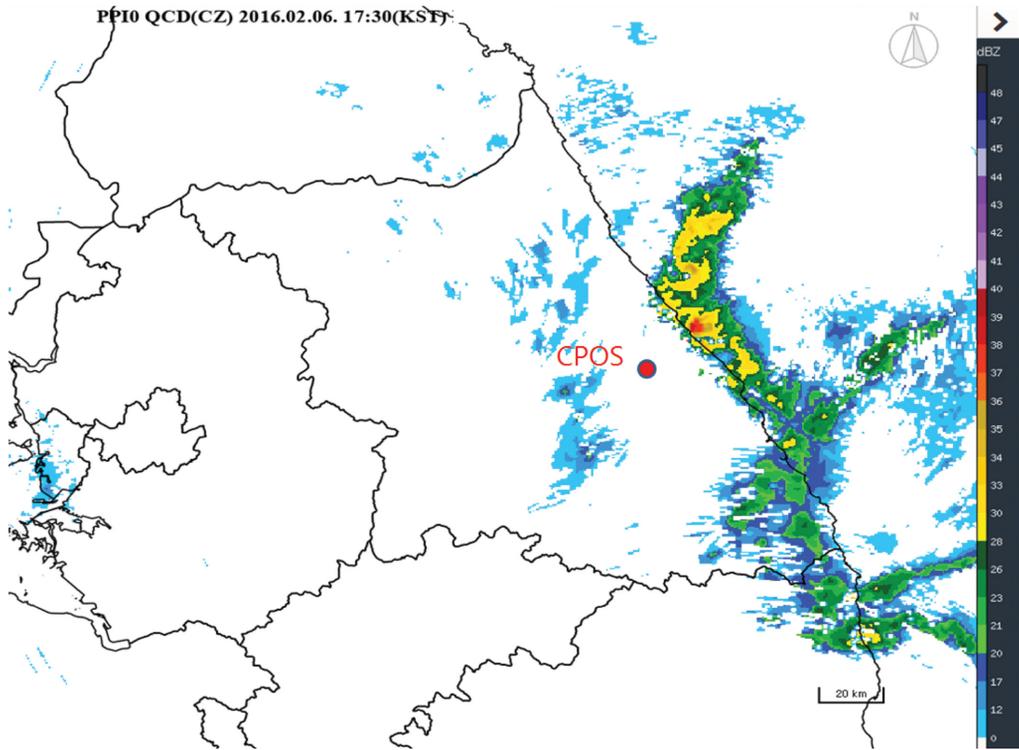


Fig. 9. Radar reflectivity (PPI 0) measured by S band radar at 1730 LST on 6 February 2016 (Http:// ras.kma.go.kr).

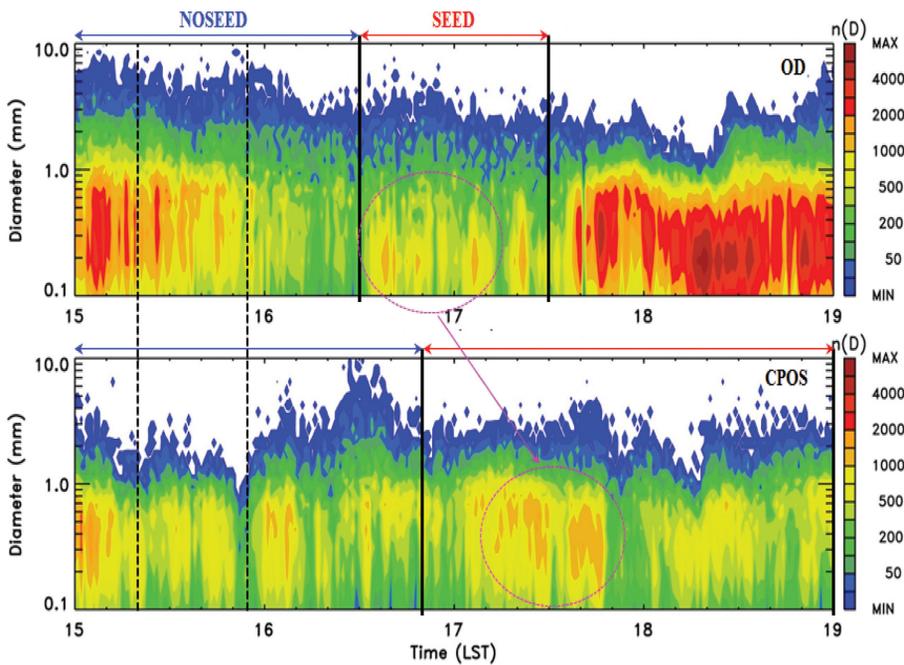


Fig. 10. Size distribution of precipitation particles measured by PARSIVEL disdrometer on 6 February 2016 at ODO (upper panel) and CPOS (lower panel).

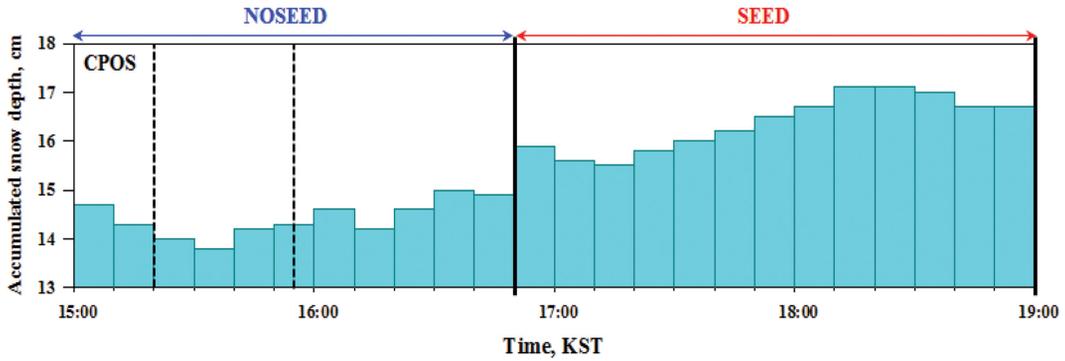


Fig. 11. Accumulated snow depth of ultrasonic snow depth meter at CPOS on 6 February 2016.

VELocity) disdrometer)의 강수입자 크기분포를 나타낸 것이며, ODO에서는 실험기간 외 시간인 약 18시 이후로 자연강수의 유입이 되어 강수입자의 수농도가 증가하였다. 그러나 CPOS에서는 자연강수의 유입이 관측되지 않았기에 ODO와 CPOS의 비교를 통해 실험효과를 설명하고자 한다. Figure 10에서 점선으로 표시한 시간이 목표지역인 CPOS와 ODO 지점 보다 풍상 측인 시딩라인에서 요오드화는 시딩을 수행한 시간이다. NOSEED는 확산모델의 결과에 따라 살포된 물질이 CPOS와 ODO에 도달하기 전의 구간을 나타낸 것이다. SEED는 확산모델의 결과에 따라 시딩 물질인 요오드화은이 각 관측지점인 COPS와 ODO에 영향을 미치는 기간으로 수농도가 1000 m^{-3} 이상 분포하는 기간이다. Figure 11은 Fig. 10 중 CPOS에서 관측된 적설의 변화량을 관측한 것이다. 따라서 Fig. 11의 NOSEED와 SEED 기간에 CPOS에서 적설변화이고, Fig. 10의 CPOS에서 NOSEED와 SEED 기간의 강수입자크기별 수농도를 나타내는 것이다. 시딩라인에서 가까운 풍하 측에 위치한 ODO와 보다 더 풍하 측에 위치한 CPOS는 15 km의 거리 차이가 있고, 풍속 7 m s^{-1} 를 고려할 때 구름의 이동시간은 대략 35분 정도가 소요된다. NOSEED 기간 동안 ODO에서 CPOS로 구름이 이동하면서 전체적으로 강수입자의 수농도가 감소하였으며, 특히 1 mm 이하의 작은 강수입자의 수농도가 확연히 감소하는 경향이 나타났다. 반면에, SEED 기간 동안은 ODO에서 CPOS로 이동하면서 1 mm 부근 및 이하의 강수입자가 증가하는 것이 보였으며(Fig. 10의 보라색점선 원), 시딩 후 2시간이 경과하는 SEED 후반부에서는 다시 ODO에 비해 CPOS의 강수입자 수농도가 감소하였다. 즉 ODO에서 시딩 후 2시간이 경과 시 강수입자의 증가는 자연강수의 영향이 있었고 CPOS에서는 자연강수의 영향이 없어 SEED 기간에만 갑작스런 강수입자 수농도의 증가가 있었다. 그리고 연직강우레이더의

반사도에서도 이와 같은 유사한 경향이 나타났다(Not shown).

Figure 11은 주요 목표지역인 CPOS 지점에 설치된 초음파적설계에서 관측된 10분 누적적설량에 대한 시계열이다. 누적 시계열값 중 감소가 보이는 것은 바람 등 기상조건에 의해 쌓여 있던 눈이 제거된 것이다. 따라서 향후 보다 정확한 관측을 위해서는 바람막이 등 관련 부대시설이 필요하다. 하지만 이 시딩효과 분석 실험에서는 이를 고려하더라도 실험 후 누적값이 지속적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이처럼 광학우적계의 결과와 유사하게 시딩영향 받기 전인 1500~1700 LST 보다 1700~1800 LST 사이에서 다른 기간들과 달리 적설량이 일정하게 상승하는 경향이 나타났으며, 누적적설량을 기반으로 SEED와 NOSEED 기간의 신적설량을 비교했을 시 SEED 기간 동안 1.8 cm의 신적설량 증가가 확인되었다. 그리고 WRF 모델을 통한 수치모의 결과, 요오드화는 시딩을 적용한 것과 적용하지 않은 것을 비교했을 때 시딩 후 약 2시간 뒤에 CPOS 인근 지역에서 강수증가가 나타나는 것이 확인되었다(Fig. 12). Figure 12는 18시에 WRF 수치모의에 의한 누적강수량 결과이다. 이러한 WRF 수치모의 결과와 관측자료 비교 분석 결과를 종합해 볼 때 시딩 후 약 1~2시간 뒤인 1700~1800 LST 사이에 CPOS의 광학우적계에서 작은 강수입자의 수농도가 증가하였고, 유사한 시간대에 CPOS 초음파적설계의 누적적설량이 일정하게 증가하였으며, 시딩물질의 영향을 받은 SEED 기간과 받지 않은 NOSEED 기간의 신적설량의 차이가 1.8 cm이었다. 즉, WRF 수치모의 결과 시딩 후 약 2시간 뒤 CPOS 인근의 강수증가가 관측 결과를 뒷받침할 뿐만 아니라, 기상청의 강릉 지상 S-band 레이더 자료를 통해 실험 기간 전·후 CPOS로 자연강수의 유입이 없는 것으로 확인되어 SEED 기간의 1.8 cm 신적설 증가는 시딩효과이다.

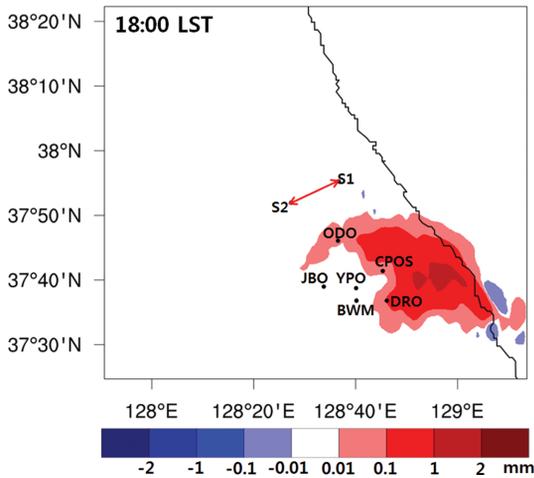


Fig. 12. Result of WRF model simulation in 1800 LST 6 Feb. 2016. Red double arrow is the seeding line (Color bar unit: mm).

3.2.1.2 2018년 시딩사례

기상항공기를 이용한 사례인 2018년 3월 21일은 강원도 평창군 일대에서 인공증설 항공실험을 수행하였다. 시딩물질은 요오드화은 연소탄을 사용하였고, 총 24발 중 16발(2.4 kg) 시딩하였다. 실험 방법은 2.0 km 고도에 부분적으로 발달한 하층운을 대상으로 시딩물질을 살포하였고, 목표 구름의 시딩 전과 후의 변화를 관측하였다. 임대항공기와는 달리 기상항공기가 도입됨에 따라 실험 중 기상현황에 대한 상세정보를 파악할 수 있게 되었다. Figure 13의 위 그림은 기상항공기 총 이동 경로이다. 시딩 시간은 16시 7분부터 17시 14분이었고 시딩 고도에서는 기온은 -8°C 였다. 주풍은 북동풍이며 시딩시 평균풍속은 13 m s^{-1} 였다. Figure 13의 위 그림은 시딩 후 A 구역(파랑색), B 구역(연두색), C 구역(빨간색)에서 시딩라인으로부터 풍하측 방향으로 거리에 따라 A, B, C 구역으로 나누어 시딩 전·후를 비교분석하였다. Figure 13 아래 그

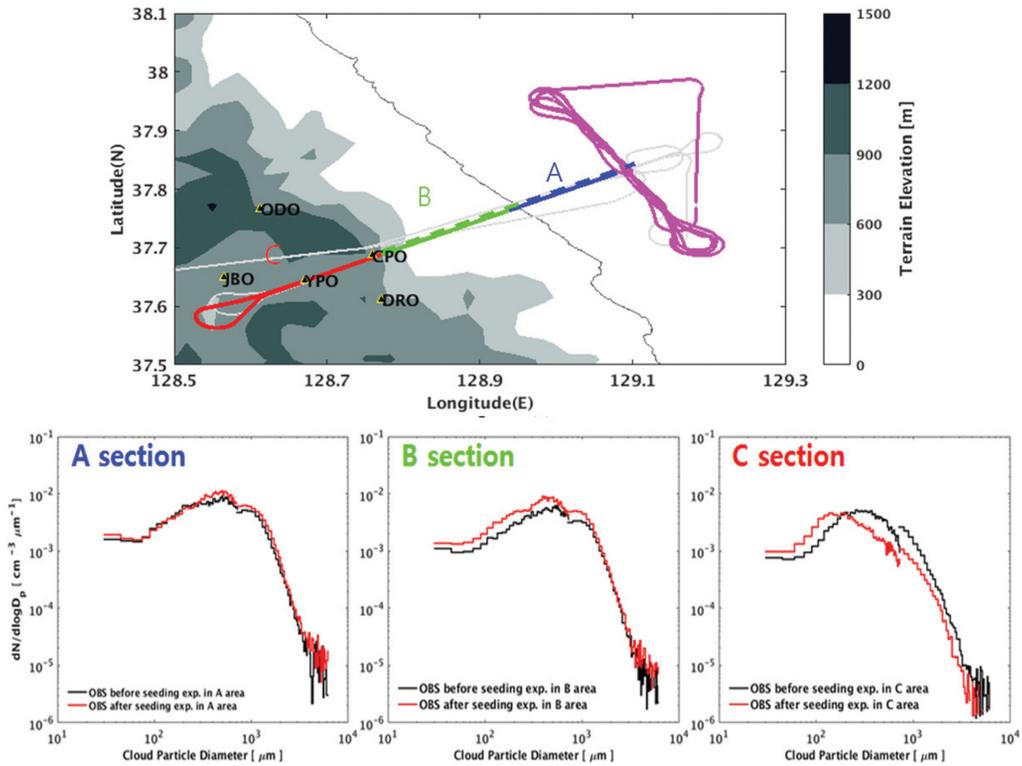


Fig. 13. Flight path (top panel) of the before (solid line), after seeding (dotted line), and mean particle size distributions of cloud and precipitation (bottom panel) by each section (A, B, C) at the seeding height. The black and red lines mean the before and after seeding, respectively; Seeding line (solid pink line) at top panel. * Flight times of A: 15:41:17~15:43:34, 15:59:13~16:01:50 (before seeding)/17:20:57~17:23:08, 17:37:25~17:40:10 (after seeding). * Flight times of B: 15:43:35~15:46:32, 15:55:31~15:59:12 (before seeding)/17:23:09~17:25:59, 17:33:45~17:37:24 (after seeding). * Flight times of C: 15:46:33~15:55:30 (before seeding)/17:26:00~17:33:44 (after seeding).

림의 입자크기분포는 CIP와 PIP로 관측된 A, B, C 각각 구간의 평균 크기분포이며 검정색 선은 시딩 전, 빨간색 선은 시딩 후 관측을 의미한다. 한편, 시딩물질 영향범위에 해당하는 B 구역은 시딩 전 대비 시딩 후에 직경이 1000 μm 이하인 입자의 수농도가 증가하였다(Pokharel et al., 2017). 실험 목표지역(용평인근)이며 시딩물질 영향범위에 있는 C 구역은 시딩 후에 직경이 200 μm 이하의 입자 수농도는 증가하고, 200 μm 이상의 입자는 감소하였다. 결과적으로 항공관측 시의 시딩에 의한 입자($D=200\sim1000 \mu\text{m}$) 수농도 증가는 B 구역에서 가장 높고, 목표지역 상공의 C 구역에서는 적었다. A, B, C 구역별 시딩 전과후 CIP와 PIP 평균입자수농도는 A 구역에서 시딩 전 $0.00602 \text{ cm}^{-3}/0.00160 \text{ cm}^{-3}$ (CIP/PIP)에서 시딩 후 $0.00688 \text{ cm}^{-3}/0.00201 \text{ cm}^{-3}$ (CIP/PIP)이고, B 구역에서 시딩 전

$0.00382 \text{ cm}^{-3}/0.00107 \text{ cm}^{-3}$ (CIP/PIP)에서 시딩 후 $0.00561 \text{ cm}^{-3}/0.00147 \text{ cm}^{-3}$ (CIP/PIP)이고, C 섹션에서 시딩 전 $0.00358 \text{ cm}^{-3}/0.00058 \text{ cm}^{-3}$ (CIP/PIP)에서 시딩 후 $0.00333 \text{ cm}^{-3}/0.00025 \text{ cm}^{-3}$ (CIP/PIP)였다. 이 관측에서는 CIP가 부분적인 오류가 있었지만 이를 고려하더라도 시딩 효과에 대한 부분에 있어 시딩 전과후의 차이를 보였다. 이 사례에 대한 항공기상 관측의 지상, 레이더 등의 자세한 설명은 출간된 국립기상과학원 2018보고서(NIMS, 2018)에 보다 자세히 서술되어 있다.

3.2.2 2008~2018년 항공기를 이용한 인공증우 실험 분석결과

인공증우(설) 검증을 위해 일기도, 기상청 레이더 및 위성 관측자료, 목표지역 및 그 주변지역의 AWS

Table 7. Results of aircraft cloud seeding (AgI) experiment from 2008 to 2018.

Year	No.	Date	Precipitation enhancement	Diffusing method	Cloud enhancement by cloud seeding	Aircraft measurement		
						CDP	CIP	PIP
2008	1	3. 3	-	Manual	-	-	-	-
	2	3. 4	0.9 cm (¹ S)	Manual	1) Reflectivity of aircraft radar(\uparrow) 2) Reflectivity of Micro Rain Radar(\uparrow) 3) No-C of Precipitation particle(\uparrow)	-	-	-
	3	3. 14	-	Manual	-	-	-	-
2009	4	2. 23	-	Manual	-	-	-	-
	5	3. 23(I)	0.6 mm (² R)	Manual	1) Reflectivity of aircraft radar(\uparrow) 2) Reflectivity of Micro Rain Radar(\uparrow) 3) No-C of Precipitation particle(\uparrow)	-	-	-
	6	3. 23(II)	-	Manual	-	-	-	-
	7	3. 30(I)	-	Manual	-	-	-	-
	8	3. 30(II)	0.5 mm (R)	Manual	1) Reflectivity of aircraft radar(\uparrow)	-	-	-
2010	9	2. 10	0.5 mm (R)	Manual	-	-	-	-
	10	2. 12	-	Manual	-	-	-	-
	11	2. 12	-	Manual	-	-	-	-
	12	2. 16	-	Manual	-	-	-	-
	13	3. 7(I)	1 cm (S)	Manual	1) Reflectivity of Micro Rain Radar(\uparrow) 2) No-C of Precipitation particle(\uparrow)	-	-	-
	14	3. 7(II)	1.4 cm (S)	Manual	1) Reflectivity of Micro Rain Radar(\uparrow) 2) No-C of Precipitation particle(\uparrow)	-	-	-
	15	3. 8(I)	-	Manual	-	-	-	-
	16	3. 8(II)	0.9 cm (S)	Manual	1) Reflectivity of Micro Rain Radar(\uparrow) 2) No-C of Precipitation particle(\uparrow)	-	-	-
2011	17	2. 28	0.5 mm (R)	Manual	1) Reflectivity of Micro Rain Radar(\uparrow) 2) No-C of Precipitation particle(\uparrow)	-	-	-
	18	3. 25	-	Manual	-	-	-	-
2012	19	2. 26	1.8 cm (S)	Manual	1) Reflectivity of Micro Rain Radar(\uparrow) 2) Reflectivity of aircraft radar(\uparrow) 3) No-C of Precipitation particle(\uparrow)	-	-	-
	20	3. 2	-	Manual	-	-	-	-

Table 7. Continued.

Year	No.	Date	Precipitation enhancement	Diffusing method	Cloud enhancement by cloud seeding	Aircraft measurement		
						CDP	CIP	PIP
2013	21	3. 13	1.6 cm (S)	Manual	1) Reflectivity of Micro Rain Radar(↑) 2) No-C of Precipitation particle(↑)	-	-	-
2015	22	12. 18	0.6 cm (S)	Model	1) No-C of Precipitation particle(↑)	-	-	-
2016	23	1. 29(I)	-	Model	-	-	-	-
	24	1. 29(II)	-	Model	-	-	-	-
	25	2. 6	1.8 cm (S)	Model	1) Reflectivity of Micro Rain Radar(↑) 2) No-C of Precipitation particle(↑)	-	-	-
	26	2. 20	-	Model	-	-	-	-
	27	3. 9.(I)	0.4 cm (S)	Model	1) Reflectivity of Micro Rain Radar(↑) 2) No-C of Precipitation particle(↑)	-	-	-
	28	3. 9.(II)	-	Model	-	-	-	-
	29	1. 30.	0.1 cm (S)	Model	1) Reflectivity of Micro Rain Radar(↑) 2) No-C of Precipitation particle(↑)	⁴⁾ N(↓)	N(↓)	N(↑)
	30	3. 21	1.2 cm (S)	Model	1) Reflectivity of Micro Rain Radar(↑) 2) No-C of Precipitation particle(↑)	-	N(↑)	N(↑)
	31	10.17	0.5 mm (R)	Model	1) Reflectivity of Micro Rain Radar(↑) 2) No-C of Precipitation particle(↑)	N(↑)	N(↑)	
2018	32	10.18	-	Model		N(↓)	N(↑)	N(↑)
	33	11.7	0.5 mm (R)	Model	1) Reflectivity of Micro Rain Radar(↑) 2) No-C of Precipitation particle(↑)	N(↑)	N(↑)	N(↑)
	34	11.21	-	Model	-	N(↓)	N(↓)	N(↓)
	35	12.4	-	Model	-	N(↓)	N(↓)	N(↓)
	36	12.11	1.5 cm (S)	Model	1) Reflectivity of Micro Rain Radar(↑) 2) No-C of Precipitation particle(↑)	N(↓)	N(↑)	N(↑)

1) S: Snow depth, 2) R: Rainfall amount, 3) No-C: Number concentration at surface, 4) N: Number concentration at seeding height.

강수관측자료 등과 목표지역의 구름물리관측자료를 Fig. 6과 같은 검증절차 시 종합적으로 고려하여 검증이 이루어졌다. 2008년부터 2018년까지의 항공기를 이용한 실험에 Fig. 5의 사례검증 절차를 적용한 결과는 Table 7과 Table 8이다. Table 7은 요오드화는 시딩실험 결과이고, Table 8은 염화칼슘 시딩실험결과이다. 2008년부터 2013년까지는 시딩물질의 확산을 관측 고도의 풍향과 풍속, 단순한 평균 낙하속도 1 m s^{-1} 를 고려하여 계산하였다. 이를 검증하기 위해 임대항공기 구름응결핵계수기(CPC)를 탑재하여 시딩 전후의 응결핵 수농도를 검증해본 결과 시딩 후에 풍하측에서 응결핵 수농도가 증가함을 관측할 수 있었다(NIMS, 2009). 이처럼 단순한 계산을 통해서 인공증우용 수치모델이 개발되기 전까지 시딩물질의 확산시간과 지역을 산출하여 활용하였다. 또한 기본적으로 인공증우 및 증설 결과는 자연강수의 영향이 있었을 경우는 제외하였고, 자연강수가 있었다라고 자연강수의 유입 전 시딩실험 효과를 고려한 결과이다.

Table 7의 요오드화는 시딩실험에서 2008년과 2010

년에는 임차한 항공레이더를 임대항공기에 탑재하여 시딩 실험 후 연직적인 레이더반사도를 관측할 수 있었다, 특히, 2008년 3월 4일 실험에서 시딩 후 항공레이더에 의해 시딩효과를 명확히 볼 수 있는 반사도의 증가(약 10 dBZ)를 확인할 수 있었다(NIMS, 2008). 이는 요오드화 시딩 후 반사도의 증가에 의한 구름발달과 강수가 가능하다는 증거를 제시한 좋은 사례연구 결과였다. 하지만 2012년 이후 임차한 항공레이더를 활용할 수 없어 기상항공기 도입 전인 2017년까지 주로 지상관측, 레이더반사도, 위성 등의 관측 자료를 활용하여 검증절차에 따른 시딩실험 결과를 분석하였다. 2018년부터 기상항공기를 이용한 요오드화는 시딩실험 결과를 분석할 수 있었다. 시딩물질 확산시간과 지역을 기준으로 목표지역에 기상레이더와 위성 및 일기도를 분석하였고, 특히 목표지역에 구름물리 관측장비가 있을 경우 이들의 변화에 의한 구름발달 여부를 확인할 수 있었다. 대부분 유의미한 시딩효과를 보인 사례의 항공관측에서는 구름입자 관측범위 전구간에서 입자수농도가 증가하였고(30차, 31차, 33

Table 8. Results of aircraft cloud seeding (CaCl₂) experiment from 2008 to 2018.

Year	No.	Date	Precipitation enhancement	Diffusing method	Cloud enhancement by cloud seeding	Aircraft measurement			
						CDP	CIP	PIP	
2010	1	4. 23	1.5 mm (R)	Manual	1) Reflectivity of S-band radar(↑) 2) Cloud detection of Satellite	-	-	-	
2011	2	3. 14	-	Manual	-	-	-	-	
2014	3	8. 27	-	Model	-	-	-	-	
2016	4	6. 21(I)	-	Model	-	-	-	-	
	5	6. 21(II)	-	Model	-	-	-	-	
2017	6	5. 4	Rain detection	Model	1) Reflectivity of S-band radar(↑) 2) Cloud detection of Satellite	-	-	-	
	7	5. 23	-	Model	-	-	-	-	
	8	5. 31	0.5 mm (R)	Model	1) Reflectivity of S-band radar(↑) 2) Reflectivity of Micro rain radar(↑) 3) Cloud detection of Satellite	-	-	-	
	9	6. 1	-	Model	-	-	-	-	
	10	6. 12	2 mm (R)	Model	1) Reflectivity of S-band radar(↑) 2) Reflectivity of Micro rain radar(↑) 3) Cloud detection of Satellite	-	-	-	
	11	6. 29	-	Model	-	-	-	-	
	12	11. 28	-	Model	-	-	-	-	
	13	12. 2	-	Model	-	-	-	-	
	14	12. 3	-	Model	-	-	-	-	
	15	3. 29	-	Model	-	³ N(↑)	N(↑)	N(↑)	
	16	9. 19	0.5 mm (R)	Model	1) Reflectivity of Micro Rain Radar(↑) 2) ² No-C of Precipitation particle(↑)	N(↑)	N(↑)	N(↑)	
	2018	17	10. 4	0.5 mm (R)	Model	1) Reflectivity of Micro Rain Radar(↑) 2) No-C of Precipitation particle(↑)	Not observation		
		18	12. 3	1 mm (R)	Model	1) Reflectivity of Micro Rain Radar(↑) 2) Reflectivity of S-band radar(↑) 3) No-C of Precipitation particle(↑)	N(↑)	N(↑)	N(↑)

1) R: Rainfall amount, 2) No-C: Number concentration at surface, 3) N: Number concentration at seeding height.

차), 유의미한 검증자료가 나오지 않은 경우(34차, 35차)에서는 구름입자관측 전 구간에서 오히려 입자 수 농도가 감소하였다. 2018년 항공관측자료에 대한 구체적인 실험 전과후의 특성은 국립기상과학원 2018년 보고서(NIMS, 2018)에 보다 자세히 서술되어 있다. 32차와 36차 실험에서 두 경우 모두 자연강수가 있었지만 32차에서는 목표지역의 레이더반사도나 지상 강수입자 수농도가 시딩 실험전과 유사하거나 감소하였고, 36차 실험인 경우는 이 두 요소가 시딩물질 확산 구간에 급격히 증가하였다. 현재까지의 실험기준으로 19차 실험에서 최대 1.8 cm의 인공증설이 확인되었고, 요오드화는 시딩실험에서 기상항공기 도입 후 입대항공기 대비 유의미한 실험분석결과를 낼 수 있는 확률이 43%에서 63%로 약 20% 증가하였다. 이는 기상항공기에 산출되는 다양한 구름관측특성을 이해함으로

써 실험의 효율성을 높이고 있음을 알 수 있다(NIMS, 2018).

Table 8의 염화칼슘 시딩실험에서 기상항공기를 이용한 염화칼슘 시딩실험 후 관측된 구름입자의 수농도는 입자크기별 관측구간에서 거의 모두 수농도가 증가하는 경향을 보였다. 이는 염화칼슘인 경우 바람에 의해 구름에서 반응하는 시간이 요오드화는 보다는 많은 시간이 필요하지만 염화칼슘 연소탄에서 발생하는 인위적 응결핵 수농도가 요오드화는 연소탄에 발생시키는 빙정핵 수농도 보다 많아 충분한 조건이 된다면 구름발달에 더 많은 영향을 줄 수 있을 것이다. 최대 인공증우량 사례로, 염화칼슘 시딩실험 10차에서 최대 2 mm의 인공증우실험결과 나왔다. 2018년을 기준으로 입대항공기를 이용한 실험 14회 중 4회에서 유의미한 결과(29%)를 내었고, 기상항공기를 이

용한 실험 4회 중3회에서 유의미한 결과(75%)를 내어 입대항공기 실험대비 45%의 유의미한 실험횟수의 증가를 보였다. 하지만 아직 국내에서는 온난한 구름에 대한 흡습성물질의 인공증우실험이 한랭한 구름에 대한 빙정핵물질의 인공증설실험 보다 실험횟수가 적어 향후 흡습성물질에 의한 인공증우 실험도 체계적으로 수행되어야 할 것이다.

4. 결 론

국립기상과학원은 2008년부터 체계적인 인공증우 및 증설 항공실험을 위하여 입대항공기(2008년~2107년)와 기상항공기(2018년~)를 이용하여 요오드화은과 염화칼슘을 이용하여 실험을 총 54회 수행하였다. 요오드화은을 이용한 시딩실험은 36회였고 염화칼슘을 이용한 시딩실험은 18회로, 특히 2018년 기상항공기를 이용한 인공증우 및 증설 등 인공증우실험은 한해 내에 실험할 수 있는 횟수를 증가시켰고 이로 인해 유의미한 실험결과를 산출할 수 있는 확률을 높이는 데 기여를 하였다. 또한 국내 항공기를 이용한 인공증우 및 증설 실험은 주로 대류가 활발하지 않은 구름을 대상으로 실험을 수행하였지만 기상항공기기도 도입되어 입대 소형항공기 보다 다양한 기상조건에서도 실험을 할 수 있게 되어 국내 구름에 적합한 인공증우 실험이 향후 수행될 수 있을 것이다. 그리고 국내 항공기를 이용한 실험설계 및 검증방법 등은 아직 많은 연구가 필요한 부분이다. 인공증우 업무를 정규화하여 수행하는 미국, 중국, 러시아, 태국 등 인공증우 선진기술을 확보한 국가에서는 각국에 최적화된 인공증우 기술개발을 지속적으로 추진하고 있다. 국내에 최적화된 선진 인공증우기술을 확보하기 위해서는 국내에서 발생하는 구름의 특성을 관측과 모델을 이용하여 보다 심도 있게 연구하고, 지속적인 인공증우 실험 등 객관적이고 체계적인 기술 개발이 필요하다.

감사의 글

본 논문을 위해 10여년간 국립기상과학원 기상조절 연구업무를 수행해주신 많은 연구자 분들께 드립니다. 이 연구는 국립기상과학원 『기상항공기 활용기술 개발 연구』(1365003069)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Bruintjes, R. T., 1999: A review of cloud seeding experiments to enhance precipitation and some new prospects. *Bul. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 805-820.
- Cha, J. W., and Coauthors, 2018: Principle and Application of Precipitation Enhancement. NIMS tech. note, 11-1360620-000133-01, 92 pp (in Korean).
- Chae, S., K.-H. Chang, S. Seo, J.-Y. Jeong, B.-J. Kim, C. K. Kim, S. S. Yum, and J. Kim, 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. Meteor.*, **2018**, 8453460, doi:10.1155/2018/8453460.
- CWCB, 2015: Inventory and assessment of Colorado weather modification programs: a summary of current programs and opportunities for enhancements. CWCB Reports, Colorado Water Conservation Board, 300 pp.
- Deshler, T., D. W. Reynolds, and A. W. Huggins, 1990: Physical response of winter orographic clouds over the Sierra Nevada to airborne seeding using dry ice or silver iodide. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **29**, 288-330.
- French, J. R., K. Friedrich, S. A. Tessendorf, R. M. Rauber, B. Geerts, R. M. Rasmussen, L. Xue, M. L. Kunkel, and D. R. Blestrud, 2018: Precipitation formation from orographic cloud seeding. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **115**, 1168-1173, doi:10.1073/pnas.1716995115.
- Geerts, B., Q. Miao, Y. Yang, R. Rasmussen, and D. Breed, 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, doi:10.1175/2010JAS3496.1.
- Hill, G. E., 1982: Analysis of precipitation augmentation potential in winter orographic clouds by use of aircraft icing reports. *J. Appl. Meteorol.*, **21**, 165-170.
- Hobbs, P. V., 1975: The nature of winter clouds and precipitation in the Cascade Mountains and their modification by artificial seeding. Part I: Natural Conditions. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **14**, 783-804.
- Kwak, S. J., S. H. Yoo, and S. Han, 2003: Investigating public preferences for dam construction impacts in seven metropolitan areas: applying the analytic hierarchy process. *J. Kor. Region. Sci. Assoc.*, **19**, 1-20 (in Korean).
- NIMS, 2008: Advanced Research on Industrial Meteorology(I), National Institute of Meteorological Sciences Rep., 11-1360395-000065-01, 352 pp (in Korean).
- _____, 2009: Advanced Research on Industrial Meteorology(II), National Institute of Meteorological Sciences Rep., 11-1360395-000184-10, 343 pp (in Korean).
- _____, 2018: Development of Application Technology on Atmospheric Research Aircraft, National Institute of Meteorological Sciences Rep., 11-1360620-000122-

- 10, 122 pp (in Korean).
- Pokharel, B., B. Geerts, X. Jing, K. Friedrich, K. Ikeda, and R. Rasmussen, 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, doi: 10.1016/j.atmosres.2016.08.018.
- Rauber, R. M., and L. O. Grant, 1986: The characteristics and distribution of cloud water over the mountains of Northern Colorado during wintertime storms. Part II: Spatial distribution and microphysical characteristics. *J. Climate Appl. Meteor.*, **25**, 489-504.
- Reynolds, D. W., and A. P. Kuciauskas, 1988: Remote and in situ observations of Sierra Nevada winter mountain clouds: relationships between mesoscale structure, precipitation and liquid water. *J. Appl. Meteorol.*, **27**, 140-156.
- Schaefer, V. J., 1946: The production of ice crystals in a cloud of supercooled water droplets. *Science*, **104**, 457-459.
- Sohn, K H., D. H. Bae, and J. H. Ahn, 2014: Projection and analysis of drought according to future climate and hydrological information in Korea. *J. Kor. Water Resources Assoc.*, **47**, 71-82.
- Vonnegut, B., 1947: The nucleation of ice formation by silver iodide. *J. Appl. Phys.*, **18**, 593-595.
- Weather modification Group, 2009: *Weather modification*. Kimyoung-Sa, 196 pp (in Korean).
- WMO, 2018: Peer Review Report on Global Precipitation Enhancement Activities. World Meteorological Organization rep., WWRP 2018-1, 129 pp.
- Yang, I. K., 1965: Basic investigation and preliminary Field test for Precipitation Enhancement. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **1**, 8-13.