

논문

장기간 수치모의를 기반으로 지속적인 구름시딩에 의한 강수량 증가 영향

Impact of Continuous Cloud Seeding on Precipitation Increase Based on Long-term Numerical Simulations

강채연^{1),2)}, 임윤규³⁾, 송상근^{2),*}, 문수환³⁾, 선대현⁴⁾

¹⁾기상청 수치모델링센터 수치모델개발과, ²⁾제주대학교 지구해양학과, ³⁾국립기상과학원 기상응용연구부, ⁴⁾(재)차세대수치예보모델개발사업단

Chae-Yeon Kang^{1),2)}, Yun-Kyu Lim³⁾, Sang-Keun Song^{2),*}, Soo-Hwan Moon³⁾, Dae-Hyun Sun⁴⁾

¹⁾Numerical Model Development Division, Numerical Modeling Center, Korea Meteorological Administration, Daejeon, Republic of Korea

²⁾Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju, Republic of Korea

³⁾Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Republic of Korea

⁴⁾Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems (KIAPS), Seoul, Republic of Korea

접수일 2024년 8월 12일
수정일 2024년 9월 19일
채택일 2024년 9월 19일

Received 12 August 2024
Revised 19 September 2024
Accepted 19 September 2024

*Corresponding author

Tel : +82-(0)64-754-3431

E-mail : songsk@jejunu.ac.kr

Abstract This study investigated the effect of 6-hour continuous cloud seeding (using AgI and CaCl₂) on precipitation in three areas in South Korea: a central area (Korea Meteorological Administration, KMA) and two dam basins (Boryeong Dam, BRD, and Doam Dam, DAD). This analysis was based on long-term numerical simulations conducted throughout 2021. The Morrison microphysics scheme in the Weather Research and Forecasting (WRF) model was modified to quantitatively estimate the amount of artificial rainfall (AR), defined as the difference in precipitation between simulations with cloud seeding (SEED) and without cloud seeding (UNSD). Additionally, the probability distributions and durations of AR occurrence due to the 6-hour seeding in the three areas (KMA, BRD, and DAD) were analyzed. The effects of the 6-hour seeding on precipitation (i.e., the amount of AR) were greatest in summer and least in winter across all three areas during the study period. The mean duration of AR occurrence was estimated to be approximately 5 hours in the KMA area, 5 hours in the BRD area, and 7 hours in the DAD area. The mean 300-minute accumulated AR (SEED-UNSD) was largest in July in the KMA area (0.29 mm) and in August in the BRD and DAD areas (0.40 mm and 0.32 mm, respectively), while the smallest value (about 0.02 mm) occurred in December across all three areas. The high AR in summer is likely due to the combined effects of abundant moisture from the summer monsoon climate and the enhanced growth of cloud droplets from continuous seeding. Conversely, the low AR in winter is likely due to reduced seeding effectiveness caused by overseeding. In addition, the probability of AR occurrence was highest in winter compared to other seasons, because the area of influence was more widely distributed due to stronger winter winds.

Key words: Continuous cloud seeding, Artificial rainfall, Long-term numerical simulations, AgI, CaCl₂

1. 서론

인공강우는 빙정핵 역할을 하는 요오드화은(AgI) 과 응결핵 역할을 하는 염화칼슘(CaCl₂), 염화나트륨

(NaCl) 등 흡습성 물질을 구름에 인위적으로 살포하여 구름입자의 성장과 충돌·병합 과정을 촉진시켜 비를 내리게 하는 기상조절 기술을 의미한다(Kang *et al.*, 2023; Kim *et al.*, 2020). 과거부터 우리나라를 포함

한 세계 각국에서 인공강우 기상조절의 항공 및 지상 실험이 활발하게 진행되어 왔다(Kong *et al.*, 2021; Cha *et al.*, 2019; Rasmussen *et al.*, 2018; Tessendorf *et al.*, 2012). 또한, 2000년대 들어 첨단 기상관측 기기와 수치모델의 예측성능이 향상됨에 따라, 기상모델의 미세물리과정에 시딩물질 모듈을 추가하여 인공강우 효과를 정량적으로 평가하는 연구가 활발히 진행되고 있다(Sadeghi and Yaghoubi, 2024; Kang *et al.*, 2023; Lim *et al.*, 2023, 2022; Pourghasemi *et al.*, 2022; Chae *et al.*, 2018). 그러나 여전히 국내 인공강우 실험 및 수치모의 연구는 국외의 여러 선진 기상 국가에 비해 다소 부족한 실정이다.

인공강우 기상조절에 관한 국외 연구를 보면, 2015년 3월 이란 중부의 산지(Shirkouh)에서 중규모 기상 모델(Weather Research and Forecast, WRF)의 미세물리과정(Thompson scheme)에 AgI 물질의 모듈을 적용한 결과, 24시간 누적 강수량이 약 9.5% 증가한 연구결과가 보고되었다(Pourghasemi *et al.*, 2022). Sadeghi and Yaghoubi (2024)은 인공증우 효과를 극대화 하기위해 Cloud Seeding Strategic Model (CSSM) 모델을 개발하여 인공강우 효과가 기존보다 평균 약 15% 증가함을 밝힌 바 있다. 우리나라의 경우, WRF 모델 내 기존의 미세물리과정 Morrison Scheme에 시딩물질 AgI 모듈을 추가하여 인공증설을 모의한 바 있다(Chae *et al.*, 2018). Lim *et al.* (2022)은 우리나라 중부지방을 대상으로 황사 발생 시 약 1.5mm의 인공강우 효과를 모의하였으며, 이에 따라 PM₁₀ 농도가 최대 약 22% 감소하여 인공강우에 의한 미세먼지 농도 저감효과를 분석한 바 있다. 최근에 Lim *et al.* (2023)은 국내 최초로 다중항공기 실험을 수행한 결과, 항공관측자료 및 지상레이더자료 분석, 인공강우 수치모델, 강수성분 분석 등 다양한 검증을 통해 6시간 누적 강수량 3.7 mm 정도 인공증우 효과를 산출하였다.

최근 들어, 전 세계적으로 기후변화로 인해 가뭄 피해와 수자원 부족, 대기오염 증가, 산불 발생빈도 및 대형 산불발생 가능성 증가 등 심각한 수준의 환

경문제를 겪고 있다(Mishra *et al.*, 2019; Amatulli *et al.*, 2013). 우리나라의 경우, 대부분 아시아 여름몬순 계절에 집중적으로 강수가 발생하는 반면, 봄과 가을에는 비교적 강수량이 적어서 농업 등 주요 관련 산업에 큰 피해를 줄 뿐만 아니라 생활 가뭄으로 이어질 가능성이 있다고 한다(Song *et al.*, 2021). 또한 다양한 원인(배출량 및 기상조건 등)으로 인해 주로 봄과 겨울에 수도권을 비롯하여 전국적으로 고농도 미세먼지 발생이 증가하고 있는 실정이다(NIER, 2022). 이 외에도 우리나라의 산불 발생은 10월부터 증가하기 시작하여 1월 이후로 급격히 증가하는 추세이며, 최근 20년간(2002~2021년) 봄과 겨울의 건조한 날씨와 적은 강수량으로 인해 산불 발생이 빈번하고 연소면적도 가장 크다(Sun *et al.*, 2023; Sung *et al.*, 2010). 따라서 우리나라는 이와 같은 문제를 해결하기 위한 방안, 즉 가뭄 해소 및 수자원 확보, 산불 예방, 미세먼지 농도저감 등의 목적으로 인공강우 기상조절 연구를 수행하고 있다(Ro *et al.*, 2024; Lim *et al.*, 2023). 그러나 대부분의 인공강우 관측 및 수치모의 연구는 주로 특정 지역에 한해서 단시간(1시간)의 시딩물질 살포에 의한 인공강우 연구에 국한되어 있으며, 아울러 항공실험에서 현실적인 실험조건(기상 항공기 운영시간, 비행 공역확보문제, 시딩물질 적재 중량 등)을 적용하는 데 한계가 있다(Lim *et al.*, 2022; Hill, 1979).

앞에서 언급한 바와 같이, 우리나라는 국가적 차원에서 다양한 목적에 따라 인공강우 실험지역을 선정하여 주로 1시간(최근 연속 시딩 수행) 시딩을 통한 항공 및 지상 실험, 수치모의 연구를 수행하고 있다. 즉, 수도권에서는 미세먼지 저감, 충청남도 보령댐 인근에서는 가뭄 해소, 강원도 일대에서는 산불 예방의 목적으로 연구가 이루어지고 있다(https://blog.naver.com/kma_131/222572996128). 따라서 본 연구에서는 각각의 목적에 부합하는 3가지 영역(서울 기상청(KMA), 충남 보령댐(BRD), 강원도 도암댐(DAD))을 선정하여 구름시딩(cloud seeding)을 적용한 인공강우 수치모의를 수행하였다. 2021년 1년을 대상으로

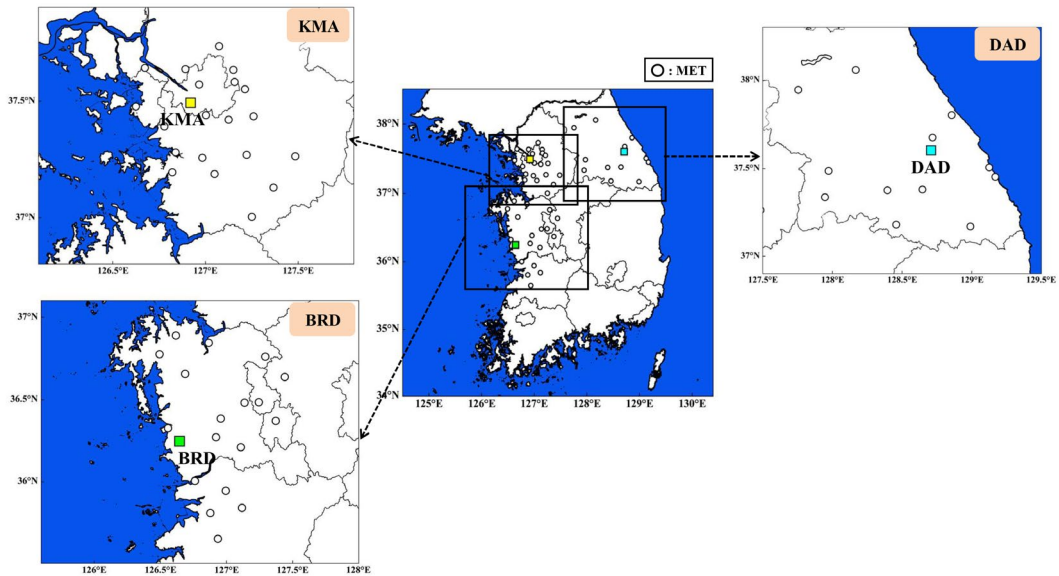


Fig. 1. The model domain for WRF simulations and the geographical locations of several meteorological monitoring sites (open circles; 20 sites in KMA, 18 sites in BRD, and 12 sites in DAD). “KMA”, “BRD”, and “DAD” in figures represent three target areas in this study, Korea Meteorological Administration (yellow rectangle), Boryeong Dam (green rectangle), and Doam Dam (cyan rectangle), respectively.

우리나라에서 현업 운용 중인 인공강우 연속 항공실험 조건에 맞춰, 영역별 6시간 지속적으로 시딩물질 (AgI, CaCl₂)을 살포하여 이에 따른 월별 및 계절별 인공증우량을 산출하고, 1시간 시딩 모의결과와 비교하였다. 또한 각 영역에 대하여 월별 및 계절별 인공증우 발생의 확률분포와 시딩 종료 이후 인공증우가 지속되는 시간을 산정하여 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 대상지역

본 연구에서 인공강우 효과를 평가하기 위해 선정 한 대상지역은 서울에 위치한 기상청 (KMA), 충청남도 보령시에 위치한 보령댐 (BRD), 강원도 대관령에 위치한 도암댐 (DAD) 지역이다(그림 1). 기상청에 따르면, 수도권 지역 (KMA 포함)은 인공강우 항공실험과 실험의 효과를 분석하기 위해, 기상레이더, 우량계, 연직레이더 등, BRD 일대에서는 연직레이더, 집

중관측소, 우량계 등을 이용하고 있다(https://blog.naver.com/kma_131/222572996128). 강원도 일대는 다양한 관측기기 (강수채수기, 입자계수기, 연직구름 관측레이더, 지상기상관측 등)가 잘 갖춰진 대관령 지점에서 인공강우 실험이 수행되고 있다(Lim *et al.*, 2023). 세 영역의 지리·지형적 특성을 살펴보면, KMA는 서울의 중심지역에 위치하고 관측장소의 해발고도는 약 16 m이며, BRD는 서해와 인접해 있고 주변이 산지로 둘러싸여 있어 해발고도 약 80 m에 위치해 있다. 마지막으로, DAD는 다른 지역에 비해 높은 해발고도 (687 m)로서 인근 태백산맥 (평균 약 800 m)의 영향을 상대적으로 크게 받는 지점이다.

2.2 실험설계 및 방법

본 연구에서는 2021년을 대상으로 1년 동안 세 영역 (KMA, BRD, DAD)에 대해 인공강우 수치모의를 수행하였으며, 6시간 연속 구름시딩에 의한 월별 및 계절별 인공증우량을 산출하였다. 우리나라는 현업에서 주로 1시간 시딩 항공실험을 해오다가 최근에

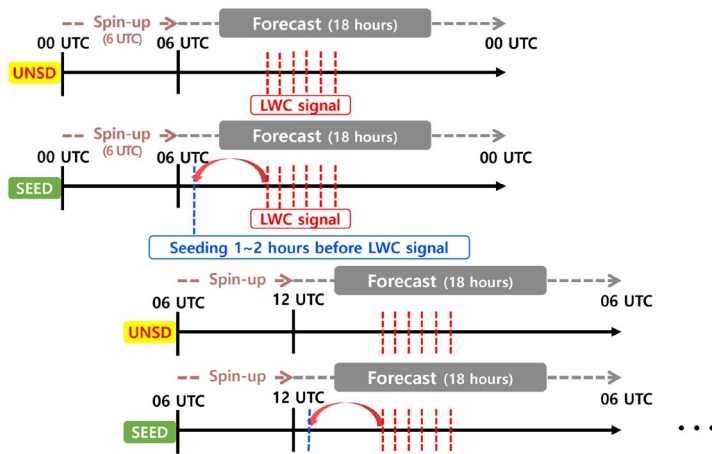


Fig. 2. Structure of the automated system for numerical simulations of artificial rainfall. “SEED” and “UNSD” represent simulations with and without cloud seeding, respectively.

는 6시간 내외의 연속 항공실험을 수행하고 있어, 이 조건을 반영하여 세 영역에 대해 6시간 연속으로 시딩물질(AgI, CaCl₂)을 살포하도록 모델을 설계하였다. 또한 2021년 한 해 동안 세 영역에서 관측된 강수량 자료를 분석한 결과, 장마나 집중호우 등을 제외하고는 6시간을 초과하는 연속 강수가 관측되지 않았다. 수치모의 수행할 때 강수가 거의 없는 경우는 구름의 액체수함량(Liquid water content, LWC)이 매우 부족하여 인공강우 실험에 효과적이지 않기 때문에(Chae and Chang, 2019) 본 연구에서는 최대 6시간 연속 시딩에 대한 인공강우 수치모의를 수행하였다. 본 연구에 이용된 기상모델의 구성과 미세물리과정에 대한 자세한 설명은 2.3절에 제시하고 있다.

인공증우량을 산출하기 위해 구름시딩(AgI, CaCl₂)을 고려한 실험(SEED)과 고려하지 않은 실험(UNSD)으로 나누어 설계하였다. 시딩물질의 양은 선행연구를 참고하여 AgI는 194.4 g/hr, CaCl₂는 2,160 g/hr을 살포하도록 설계하였다(Kang *et al.*, 2023; Ku *et al.*, 2023). 연속 시딩 모델링 과정에서, 먼저 UNSD 실험시 시간별 모든 고도에서 LWC 최고값이 감지되는 첫 시간 이후부터 6시간 연속으로 나타나는 시간대를 찾는다. 시딩물질별 강수에 영향을 주는 반응 시간에 따라 구름에서 강수로 변환하는데 걸

리는 시간이 AgI는 1시간 이내, CaCl₂는 최소 1시간 이상 소요된다(Cha *et al.*, 2019). 따라서 KMA와 BRD의 경우, SEED 실험은 LWC 최고값이 나타나는 상층(약 1~3 km) 격자점에서 바람 성분(u, v)을 이용하여 AgI는 1시간 전, CaCl₂는 2시간 전의 위치를 찾아 그 지점에서 연속 6시간을 시딩하도록 설계하였다(그림 2). 한편, DAD 영역은 해발고도가 높고(풍속이 다른 두 영역보다 강함) 바로 옆에 태백산맥이 위치하고 있는 점을 고려하여 시딩물질에 관계없이 1시간 전의 위치에서 6시간 연속 시딩하도록 구성하였다. 최종적으로, 두 실험 간의 강수량 차이(SEED-UNSD)를 계산하여 인공증우량을 산출하였다. UNSD와 SEED 실험은 각각 6시간의 초기적응시간을 포함하여 총 24시간 수행되도록 설계하였으며, 이러한 실험 설계를 토대로 2021년 1년간 매 6시간 간격으로 연속 수행되도록 자동화 스크립트를 작성하였다(Python 활용). 그리하여 UNSD 실험은 총 1,455 회, SEED 실험은 LWC 신호가 없는 경우와 모델 발산을 제외하고 KMA 1,102회, BRD 1,115회, DAD 1,165 회 모델링을 수행하였다.

인공강우 수치모의에서 SEED와 UNSD의 강수량 차이(SEED-UNSD)는 시딩물질의 양이나 수증기의 위치에 따라 증우 및 감우 효과가 혼재되어 나타날

수 있다. 즉, 수증기가 충분한 지역에 시딩물질을 살포하면 인공증우가 발생할 수 있으나, 수증기가 부족한 지역에서는 오히려 과도한 시딩(overseeding)으로 인해 구름방울의 성장이 억제되어 강수량이 감소할 수 있다(He *et al.*, 2022). 연구기간(2021년 1년) 동안 전체 대상영역에서 증우 및 감우 효과를 명확히 구분하고, 증우 효과의 지속시간을 정량적으로 산출하기 위해서 적절한 임계값 설정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 모델 도메인(그림 1)의 인공강우 영향 범위(모델 경계 제외)에 대한 인공증우 발생 격자의 비율이 최소한 50%는 초과해야만 증우 효과가 확실한 것으로 가정하였다. 이에 따라 6시간 연속 시딩 종료 이후 인공증우 효과가 얼마 동안 지속되는지를 살펴 보기 위해, 인공증우의 공간 격자 비율이 연이어 50%를 초과하는 시간대를 모두 산출하였다. 따라서 대상 영역의 월별 평균 지속시간을 계산한 후, 세 영역 모두 공통으로 포함하는 평균 지속시간의 누적 인공증우량을 산출하였다. 이 외에도 연속 시딩에 의한 인공증우 발생의 확률분포를 산출하기 위해, 연구기간(2021년 1년) 동안 수행한 수치모의를 기반으로 모델 도메인의 모든 공간 격자에 대한 인공증우 발생 격자의 비율을 백분율(%)로 계산하고, 월별 및 계절별 특성을 분석하였다.

수치모델링 검증을 위하여 (실제 대기 상태인 UNSD 결과 이용), 연구기간 동안 대상영역(KMA, BRD, DAD)에 위치한 중관기상관측소(Automated Synoptic Observing System)와 방재기상관측소(Automatic Weather Station)의 시간별 기상자료(기온, 풍속, 상대습도, 강수량)를 이용하여 통계분석을 수행하였다(그림 1의 관측지점). 분석에 이용된 관측지점은 영역별로 산맥, 강 등의 주변 지리·지형적 장애물의 영향을 받는 지점을 제외하고, KMA는 20개, BRD는 18개, DAD는 12개 지점을 선정하였다. 기상요소 중 기온, 풍속, 상대습도는 시간별 관측값과 모델값에 대해 평균 제곱근 오차(root mean square error, RMSE), 평균 편향 오차(mean bias error, MBE), 일치도(index of agreement, IOA)를 산출하여 모델의 예측 정확도를

평가하였다. 강수 검증을 위해서는 많은 선행연구에서 널리 사용하고 있는 공정임계성공지수(Equitable threat score, ETS)와 탐지확률(Probability of detection, POD)을 산출하였다(Kang *et al.*, 2023; Gayatri *et al.*, 2022; Jee and Kim, 2017; Lee *et al.*, 2016). ETS는 $-1/3$ 에서 1의 값을 가지며 1에 가까울수록 완벽한 예보임을 의미하며(식(1)), POD는 1에 가까울수록 강수의 예측정확도가 높음을 의미한다(식(2)). 이는 5개의 임계값(≥ 0.1 mm/hr, ≥ 0.5 mm/hr, ≥ 1 mm/hr, ≥ 5 mm/hr, ≥ 10 mm/hr)에 대한 강수 발생 유무에 따라 관측과 모델에서 모두 강수가 나타나면 H(Hits), 관측에서만 나타나면 M(Misses), 모델에서 강수가 나타났으나 관측에서 나타나지 않은 경우를 F(False alarms), 모두 강수가 나타나지 않은 경우를 C(Correct negatives)로 분할하여 산출하였다. ETS와 POD는 다음과 같은 식을 통해 계산하였다(He: 우연에 의한 맞힘을 의미).

$$ETS = \frac{(H - He)}{(H + M + F - He)} \quad (1)$$

$$He = \frac{(H + M)(H + F)}{(H + M + F + C)}$$

$$POD = \frac{H}{(H + M)} \quad (2)$$

2.3 모델 구성

본 연구에서 2021년 1년간 연속 구름시딩의 인공강우 수치모의를 위해 적용된 모델은 중규모 및 중관 규모에서 전 세계적으로 널리 이용되고 있는 WRF v3.8 기상모델이다. WRF v3.8 모델의 특성에 관한 자세한 정보는 여러 선행연구(Ko *et al.*, 2024; Sun *et al.*, 2023; Bhautmage *et al.*, 2022; Song *et al.*, 2022)와 모델의 User's Guide에 잘 나타나 있다(<https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>). WRF 모델의 도메인은 남한 전체를 단일 도메인(160×170)으로 설정하고(그림 1과 표 1), 수평해상도는 3 km, 연직 층은 40개 층으로 구성하여 기상변화를 보다 정확하게 모의하도록 구성하였다. 또한 이 모델의 초기/경계장은 기

Table 1. Details of the grid and physical options used in the WRF model.

WRF v3.8	D1
Horizontal grid	160 × 170
Horizontal resolution	3 km
Vertical layers	40 layers
Initial & Boundary layer	Unified Model-Global Data Assimilation and Prediction System (UM-GDAPS)
Microphysics	Morrison scheme (Morrison <i>et al.</i> , 2009) with AgI and CaCl ₂ cloud-seeding parameterization
Radiation (Long / Short)	Rapid Radiative Transfer Model (Mlawer <i>et al.</i> , 1997)/Goddard shortwave scheme (Chou and Suarez, 1994)
Land surface	Noah-Land Surface Model (Ek <i>et al.</i> , 2003)
Land-use/Topography	KLAND/Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)
Sea surface temperature	Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center (6 hour)
Planetary boundary layer	Yonsei University scheme (YSU) (Hong <i>et al.</i> , 2006)

상청 현업 운용 UM-GDAPS (Unified Model-Global Data Assimilation and Prediction System) 기상장을 이용하였으며 (수평해상도 10 km, 6시간 간격), UM-GDAPS의 토양수분에서 물의 밀도와 각 토양층의 두께를 정확하게 고려하여 입력자료를 재산정하여 이용하였다. 이 외에도 WRF 모델에 이용된 토지피복도 (land-use), 지형고도 (topography), 해수면온도 자료와 관련하여 표 1에 자세히 제시하였다.

인공강우 수치모의를 위한 WRF 모델 내 미세물리 과정은 여러 선행연구에서 널리 이용하고 있는 기존의 Morrison scheme (Morrison *et al.*, 2009)에 시딩물질 (AgI, CaCl₂ 등) 관련 모듈을 적용하여 수정된 Morrison scheme을 이용하였다 (Kim *et al.*, 2016). 즉, 수정된 Morrison scheme은 기존 scheme의 5가지 물리/역학 소스 프로그램 (mp_morr.F, mp_driver.F, solve_em.F, phy_init.F, start_em.F)에 각 시딩물질 (AgI, CaCl₂)에 대한 모듈을 추가 및 수정하는 과정을 포함한다. 시딩물질별 모듈을 적용하는 구체적인 방법은 선행연구 (Kang *et al.*, 2023)에 제시되어 있다. 또한 이렇게 수정된 scheme은 시딩물질의 확산, 구름 방울로의 전환 등을 통해 강수 및 얼음 입자를 증가시켜 인공강우를 생성하도록 설계되었다 (Lim *et al.*, 2022; Abdul-Razzak and Ghan, 2000; Chae *et al.*, 2018). WRF 모델에 이용된 다른 물리 옵션 (예, 지표면 물리상태, 장파 및 단파 복사, 대기경계층 등)의 상세 정보는 표 1에 제시하였다. 이 외에도 최근 2022년

국립기상과학원에 구축된 구름물리실험챔버의 OPC (Optical Particle Counter) 관측을 기반으로 시딩물질별 bimodal 형태의 로그노말 (Log-normal) 분포에 따라 입자 크기에 따른 기하평균 반경, 기하표준편차, 수농도를 계산하여 인공강우가 발생하도록 모듈을 수정 및 추가하였다 (Lim *et al.*, 2023). AgI의 경우, 작은 입자에서 (Activation)의 기하평균 반경과 기하표준편차는 0.052×10^{-6} m와 2.04, 큰 입자 (Auto-conversion)에서는 각각 1.30×10^{-6} m와 2.50을 적용하였다. CaCl₂는 작은 입자에서 0.135×10^{-6} m와 1.412, 큰 입자에서 0.50×10^{-6} m와 2.511를 각각 적용하였다. 또한 AgI의 작은 입자와 큰 입자의 수농도는 7.2×10^7 m⁻³, 1.8×10^6 m⁻³, 그리고 CaCl₂는 각각 3.5×10^{10} m⁻³, 1.73×10^8 m⁻³을 적용하였다. Kim *et al.* (2016)과 Meyers *et al.* (1995)의 인공강우 연구에 적용된 AgI의 수농도는 1.0×10^7 m⁻³~ 4.0×10^7 m⁻³로 본 연구의 AgI 수농도와 유사한 수준이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수치모델링 검증

본 연구에서는 인공강우 수치모델 (WRF) 결과의 신뢰도를 평가하기 위해, 2021년 1년간 세 영역 (KMA 20개 지점, BRD 18개 지점, DAD 12개 지점)의 주요 기상요소 (기온, 풍속, 상대습도, 강수량)의 시간

Table 2. Statistical evaluation of meteorological variables (air temperature, wind speed, relative humidity, and precipitation) between observed and model-simulated values at several monitoring sites (20 sites in KMA, 18 sites in BRD, and 12 sites in DAD; Fig. 1) in South Korea during the year 2021.

[A] Air temperature, wind speed, and relative humidity									
	Air temperature (°C)			Wind speed (m/s)			Relative humidity (%)		
	IOA ^a	RMSE ^b	MBE ^c	IOA ^a	RMSE ^b	MBE ^c	IOA ^a	RMSE ^b	MBE ^c
KMA	0.99	2.01	0.65	0.67	1.65	1.16	0.89	12.97	-3.56
BRD	0.99	1.88	0.49	0.71	1.67	1.15	0.87	12.82	-1.58
DAD	0.99	2.27	-0.02	0.72	1.73	1.19	0.87	14.61	-0.44

[B] Precipitation				
	Threshold (mm hr ⁻¹)	KMA	BRD	DAD
POD ^d	≥0.1	0.799	0.786	0.888
	≥0.5	0.690	0.676	0.845
	≥1	0.665	0.630	0.829
	≥5	0.594	0.600	0.783
	≥10	0.592	0.516	0.762
ETS ^e	≥0.1	0.420	0.428	0.476
	≥0.5	0.438	0.416	0.519
	≥1	0.428	0.398	0.524
	≥5	0.381	0.409	0.452
	≥10	0.374	0.353	0.441

^aIOA: index of agreement, ^bRMSE: root mean square error, ^cMBE: mean bias error, ^dPOD: probability of detection, ^eETS: equitable threat score. "KMA", "BRD", and "DAD" represent Korea Meteorological Administration, Boryeong Dam, and Doam Dam, respectively.

별 관측 및 모델링 자료를 이용하여 통계검증 (IOA, RMSE, MBE, POD, ETS)을 수행하였다(표 2). 먼저 세 영역에서 기온, 풍속, 상대습도의 RMSE는 각각 1.88 (BRD)~2.27°C (DAD), 1.65 (KMA)~1.73 m/s (DAD), 12.82 (BRD)~14.61% (DAD)로 모의되어 대체로 낮은 오차를 보였다(표 2[A]). 또한 KMA와 BRD 영역에서 기온의 MBE는 각각 +0.65°C와 +0.49°C, 풍속의 MBE는 +1.16 m/s와 +1.15 m/s로 모두 약한 과대모의가 나타난 반면, 상대습도는 각각 -3.56%와 -1.58%로 추정되어 약한 과소모의 경향이 있었다. 그러나 DAD 영역의 MBE는 두 영역과 달리 기온은 -0.02°C로 매우 약한 과소모의, 풍속은 +1.19 m/s로 약한 과대모의, 상대습도는 -0.44%로 매우 약한 과소모의가 나타났다(표 2[A]). 마지막으로 세 영역에서 기상요소의 IOA는 각각 0.99 (기온), 0.67~0.72 (풍속), 0.87~0.89 (상대습도)로 산출되었다.

강수량의 통계검증 결과를 보면(표 2[B]), KMA 영역의 전체 20개 지점에 대한 POD는 5개 임계값 (≥0.1 mm, ≥0.5 mm, ≥1 mm, ≥5 mm, ≥10 mm)에 대해 최저 0.59~최고 0.80으로 나타났으며, ETS는 5개 임계값에 대해 최저 0.37~최고 0.44로 산출되었다. 이와 유사하게, BRD 영역에서 (18개 지점)의 POD는 최저 0.52~최고 0.79, ETS는 최저 0.35~최고 0.43으로 나타났다. 마지막으로 DAD 영역(12개 지점)의 경우, POD는 최저 0.76~최고 0.89, ETS는 최저 0.44~최고 0.52로 나타나 세 지점 중 가장 높은 신뢰도를 보였다. 세 영역 모두 임계값이 커질수록 대부분 POD와 ETS 값이 감소하는 경향을 보였는데, 이는 시간당 강수량이 적을수록(작은 임계값) 사용된 자료의 수가 많아져 상대적으로 강수 탐지확률이 높아진 것으로 판단된다(표 2[B]).

세 영역에서의 강수량 검증 결과는 여러 선행연구들의 결과와 비교해 볼 때 서로 유사한 수준으로 확

Table 3. Monthly variations in the mean durations (hour) of artificial rainfall occurrence in three areas (KMA, BRD, and DAD) during the study period.

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
KMA	4.7	2.5	2.6	5.1	5.3	5.3	6.1	5.9	4.9	6.4	2.7	4.3	4.6
BRD	3.9	3.6	3.8	4.6	4.8	6.3	6.0	6.1	6.4	5.4	4.7	3.6	4.9
DAD	7.0	5.8	6.4	6.4	7.3	7.3	8.3	8.2	9.1	8.7	6.0	4.5	7.1

인되었다. Lee *et al.* (2016)은 2014년 3~10월 경기도 지역을 대상으로 WRF/Noah-MP 결합모델을 이용한 결과에서 POD는 최저 0.47~최고 0.94, ETS는 최저 0.12~최고 0.55로 산출한 바 있다. 또한 2011년 여름철 우리나라 주요 도시에서의 POD는 최저 0.55~최고 0.90, ETS는 최저 0.14~최고 0.34가 나타났다(Jee and Kim, 2017). 최근 Pytharoulis *et al.* (2023)의 연구에 따르면, 그리스 Macedonia 중부지방에서 집중 강수 사례에 대해 수치모의(WRF-ARW 모델)한 결과, POD는 최저 0.62~최고 0.87, ETS 최저 0.24~최고 0.73가 추정되었다. 따라서 본 연구에서 수행된 통계적 검증은 세 영역을 대상으로 인공강우의 정량 분석 및 효과를 평가하기 위한 합리적인 수치모의 결과라 사료된다.

3.2 인공증우량의 월/계절 변화 분석

본 연구에서는 인공증우량을 산출하기 앞서, 연구기간(2021년) 동안 세 영역에서 시딩 종료 이후 인공증우 영향(효과)이 얼마나 지속되는지를 월별로 분석하였다(표 3). 전반적으로, 세 영역에서의 인공증우 발생 지속시간은 서로 다른 특징을 보였다. 먼저 KMA 영역에서의 평균 지속시간은 약 5시간으로 추정되며, 10월에 6시간으로 가장 길게 2월에 3시간으로 가장 짧은 지속시간이 나타났다. BRD에서도 KMA와 유사하게 평균 지속시간은 약 5시간으로 나타났고, 9월에 6시간 정도로 가장 길게 12월에 4시간으로 가장 짧았다. 마지막으로, DAD에서의 평균 지속시간은 약 7시간으로 세 영역 중에서 가장 길게 나타났으며, 9월에 9시간으로 가장 긴 지속시간, 12월에 5시간으로 가장 짧은 지속시간이 추정되었다. DAD에서 상대적으로 긴 지속시간이 발생한 원인은

이 지역의 해발고도(약 687 m)보다 주변 태백산맥의 고도(평균 약 800 m)가 더 높아, 시딩물질이 지리·지형적 영향으로 인해 더 오랜 시간 머무르게 되었기 때문으로 추정된다. 한편, 이러한 지리·지형적 영향에도 불구하고 DAD는 다른 두 영역과 함께 바람이 강한 겨울에 지속시간이 가장 짧게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 세 영역에서 추정된 최소한의 평균 지속시간(5시간, 300분)을 기반으로 누적 인공증우량을 산출하여 분석에 이용하였다. 참고로 Jung *et al.* (2022)은 시딩물질에 의한 인공강우 효과가 1시간 시딩 종료 후 약 3시간 정도 지속될 수 있다는 연구결과를 밝힌 바 있다.

그림 3과 표 4는 세 영역(KMA, BRD, DAD)을 대상으로 300분 누적 인공증우량(SEED와 UNSD의 강수량 차이)과 인공증우율의 월별 및 계절별 변화를 각각 나타낸다. 여기서, 인공증우율은 UNSD에서 모의된 강수량에 대한 인공증우량의 비율을 백분율(%)로 나타낸 것을 의미한다($(SEED-UNSD) / UNSD \times 100$). 먼저 그림 3을 보면, 세 영역 모두 6~8월의 여름에 평균적으로 인공증우량이 가장 많고, 1~2월과 12월의 겨울에 적은 편이었다. 특히, BRD와 DAD 영역에서는 8월에 각각 평균 약 0.40 mm (99%-tile: 8.4 mm), 0.32 mm (99%-tile: 5.9 mm)로 가장 많았고, KMA 영역에서는 7월에 평균 약 0.29 mm (99%-tile: 6.2 mm)로 많았다. 또한 모든 영역에서 12월에 평균 약 0.02 mm로 가장 적은 인공강우가 발생하였다. 한편, 세 영역의 인공증우율은 7월에 대부분 높게 (KMA: 96.9%, BRD: 64.4%, DAD: 63.1%) 나타났으며, 뿐만 아니라 12월에도 상당히 높은 수준이었다 (KMA: 125%, BRD: 134%, DAD: 62.9%). 인공증우량이 상대적으로 매우 적은 12월에 증우율이 높은 이유

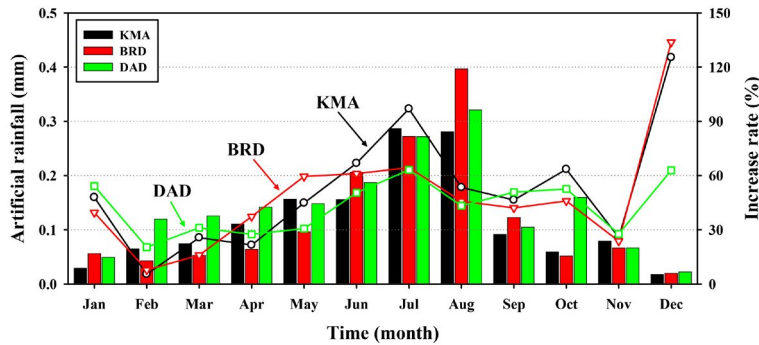


Fig. 3. The 300-minute accumulated artificial rainfall (mm) and its increase rate in three areas (KMA, BRD, and DAD) during the study period. The increase rate of artificial rainfall was calculated as the percentage of artificial rainfall (SEED minus UNSD) relative to precipitation in the UNSD simulation.

Table 4. Seasonal mean values of 300-minute accumulated artificial rainfall (mm) in three areas (KMA, BRD, and DAD) during the study period. The values in parentheses represent the percentage of artificial rainfall (SEED minus UNSD) relative to precipitation in the UNSD simulation (i.e., the increase rate of artificial rainfall).

	KMA	BRD	DAD
Spring	0.13 (33.0%)	0.08 (38.1%)	0.14 (29.7%)
Summer	0.25 (68.2%)	0.30 (53.3%)	0.26 (49.8%)
Autumn	0.08 (46.2%)	0.09 (39.3%)	0.12 (47.7%)
Winter	0.03 (10.0%)	0.04 (16.4%)	0.06 (27.3%)

는 UNSD 실험에서 적게 모의된 강수량 (KMA와 BRD: 약 0.01 mm, DAD: 약 0.04 mm) 대비 두 실험 간의 강수량 차이 (인공증우량)가 커서 증우율이 높아진 것으로 사료된다.

표 4에 나타나듯이, 세 영역에서 인공증우량의 계절 평균은 월평균 변화 패턴과 유사하였다. KMA 영역의 계절 평균 인공증우량 (그리고 인공증우율)은 여름에 0.25 mm (68.2%)로 가장 많았으며, 다음으로 봄에 0.13 mm (33.0%), 가을에 0.08 mm (46.2%), 그리고 겨울에 0.03 mm (10.0%)로 가장 증우량이 적었다. BRD 영역의 경우, 여름에 0.30 mm (53.3%)로 가장 많은 증우량과 높은 증우율을 보였으며, 가을과 봄에 각각 0.09 mm (39.3%), 0.08 mm (38.1%)로 비슷하였다. 겨울에는 KMA와 유사하게 0.04 mm (16.4%)로 가장 적은 증우량과 낮은 증우율이 산출되었다. 마지

막으로, DAD에서도 역시 여름에 가장 많은 인공증우량 (0.26 mm, 49.8%)이 나타났으며, 봄과 가을에 각각 0.14 mm (29.7%), 0.12 mm (47.7%) 정도, 그리고 겨울에 0.06 mm (27.3%)로 가장 적었다. 여름철 인공증우량이 많은 원인은 우리나라가 여름 몬순 기후의 영향을 받아 다량의 수증기가 유입되는 대기 상태이고 (Song *et al.*, 2021), 연속 구름시딩을 통해 구름방울의 성장 및 충돌·병합 과정을 촉진시켜 많은 강수 (인공강우 포함)를 유발할 수 있기 때문으로 사료된다 (Kim *et al.*, 2020). 반면, 겨울에 적은 이유는 대륙성 고기압의 영향으로 비교적 수증기량이 적은 건조 날씨가 지속되면서, 연속적으로 과도한 양의 시딩 (overseeding)으로 인해 구름방울의 성장이 억제되어 오히려 강수량 감소가 유발된 것으로 추정된다 (He *et al.*, 2022; Jin *et al.*, 2013).

앞에서 언급한 바와 같이, 현재 우리나라에서는 다양한 목적 (가뭄 해소, 산불 예방 등)에 따라 인공강우 실험이 수행되고 있으며, 특히 가뭄으로 인한 수자원 확보 문제가 매우 심각하여 가뭄 해소를 위한 실험이 가장 많이 이루어지고 있다 (Lim *et al.*, 2023; Ma *et al.*, 2023). BRD 영역은 우리나라에서 가뭄 해소를 목적으로 항공실험이 진행되는 지역이므로, 해당 지역을 대상으로 6시간 연속 시딩에 의한 강수 증가를 자세히 살펴보기 위해 추가로 1시간 시딩에 의한 인공증우량을 산출하여 비교하였다 (그림 제외). 정확한

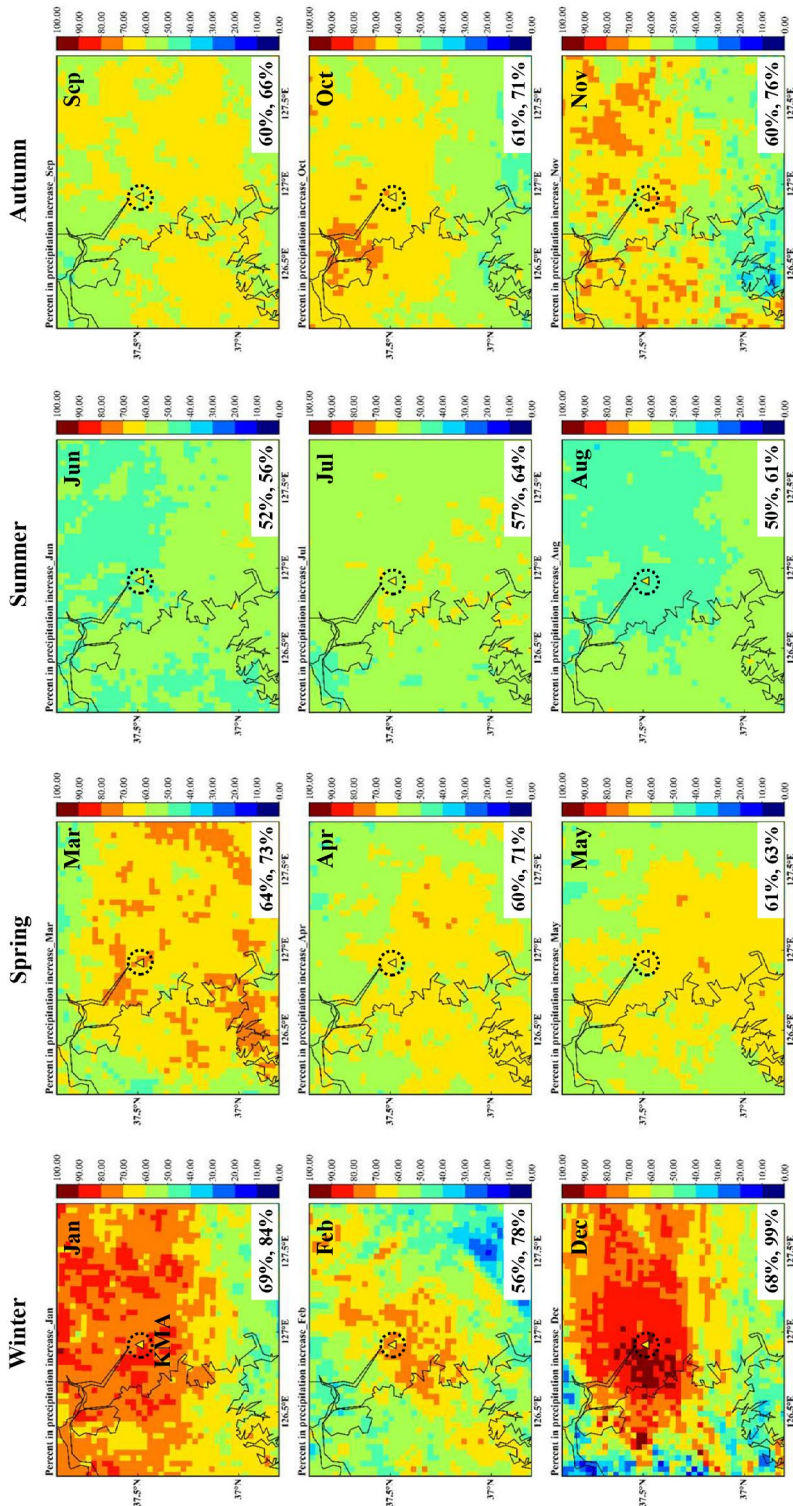


Fig. 4. Monthly variations in the spatial distribution of the probability (%) of artificial rainfall occurrence in the KMA area. Two values in each figure represent the spatial mean of the probability of artificial rainfall occurrence and the maximum value in the central area (dotted circle), respectively.

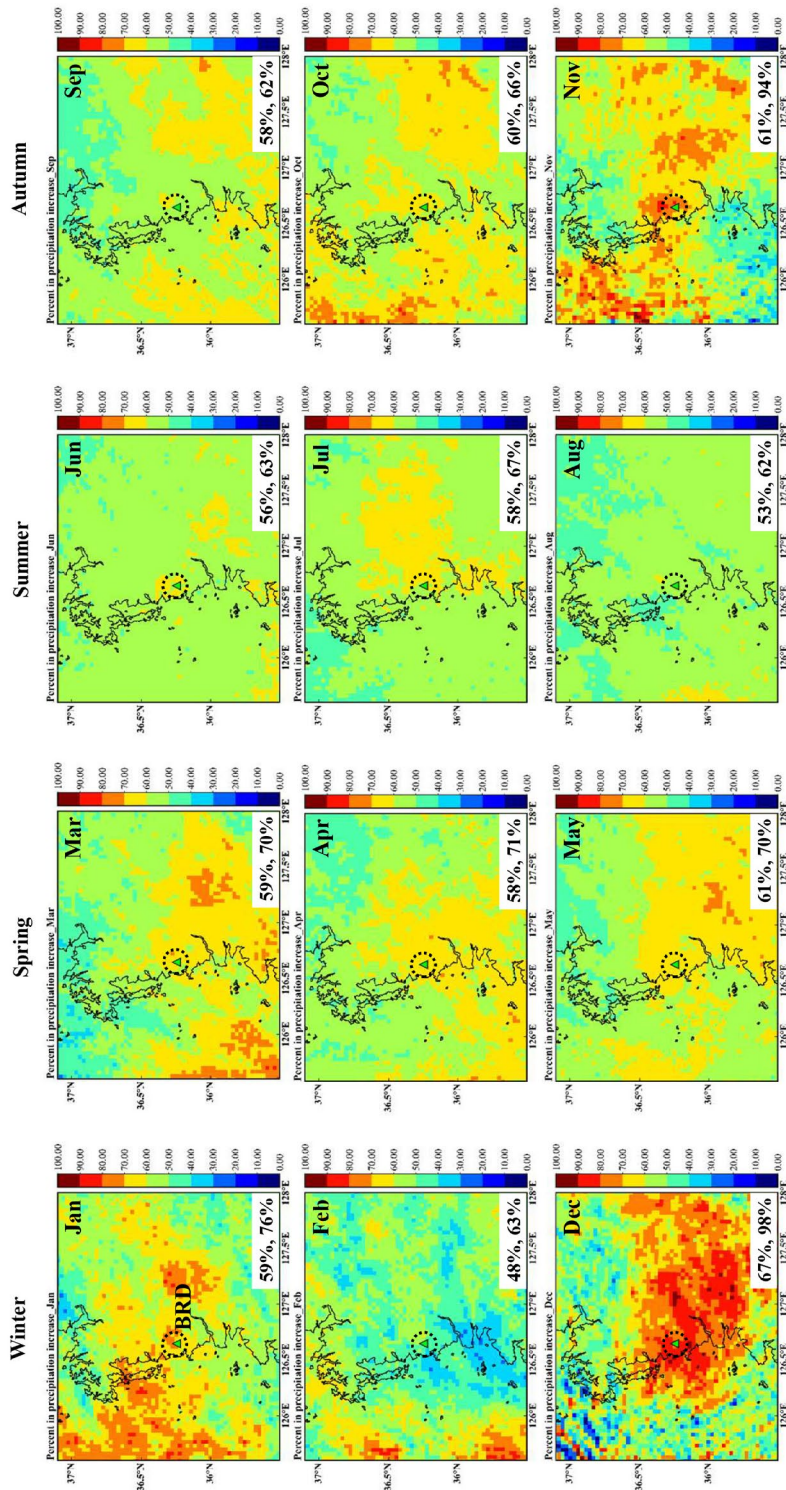


Fig. 5. Same as Fig. 4, except for the BRD area.

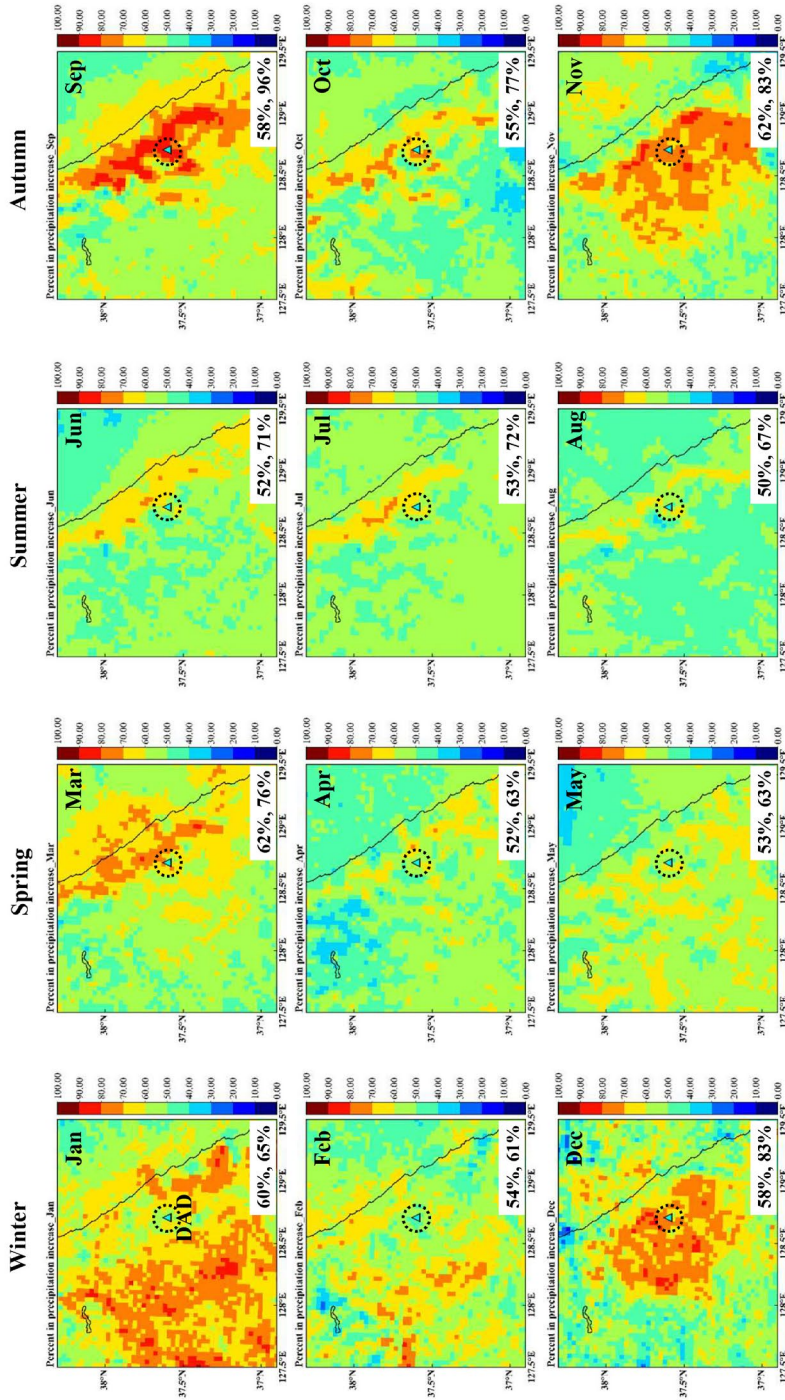


Fig. 6. Same as Fig. 4, except for the DAD area.

분석을 위해, 두 실험(6시간 연속 및 1시간 시딩) 모두 시딩 종료 이후 180분 누적 인공증우량(SEED-UNSD)을 서로 비교하였다(Jung *et al.*, 2022). BRD 영역에서 1시간 시딩에 의한 누적 인공증우량은 6시간 연속 시딩 결과와 유사하게 여름에 가장 많고 겨울에 가장 적었다. 1시간 시딩 결과는 최소 0.003 mm (1월)~최대 0.23 mm (8월)이며, 6시간 연속 시딩 결과는 최소 0.02 mm (12월)~최대 0.36 mm (8월)의 인공증우 효과가 나타났다. 또한 계절 평균을 살펴보면, 6시간 연속 시딩에 의한 누적 인공증우량은 1시간 시딩에 비해 겨울에 약 3.2배로 가장 컸으며, 다음으로 봄(2.3배), 여름(1.7배), 가을(1.1배) 순이었다. 겨울은 앞서 설명한 바와 같이 대륙성 고기압의 영향으로 수증기가 적어, 두 실험(6시간 연속 및 1시간 시딩) 모두 인공증우량이 가장 적었다. 즉, 1시간 시딩에서는 수증기가 부족해 인공증우량이 많지 않았으나, 시간을 6시간 연속으로 늘려 시딩함으로써 증우량이 증가하여 두 실험 간의 상대적인 차이가 크게 나타난 것으로 사료된다. 그러나 시딩물질의 살포 시간을 길게 늘린다고 해서 인공증우량이 비례적으로 증가하는 것은 아니었다. 이는 수증기가 충분할 때 시딩 시간을 늘리면 구름방울이 성장하여 인공증우가 발생하기도 했지만, 일부 지역에서는 과도한 시딩(over-seeding)으로 인해 오히려 강수량 감소가 나타났기 때문이다(Kang *et al.*, 2023; He *et al.*, 2022).

3.3 인공증우 발생 확률분포 분석

그림 4~6은 연구기간(2021년) 동안 세 영역(KMA, BRD, DAD)에서의 수치모델링 결과를 통해 산정된 인공증우 발생 확률분포의 월변화를 각각 나타낸다. 2.2절에서 언급하였듯이, 인공증우 발생 확률은 1년 동안 수행한 수치모의를 기반으로 모델 도메인의 모든 공간 격자에 대한 인공증우 발생 격자의 비율을 백분율(%)로 계산한 것이다. KMA와 BRD에서의 인공증우 발생 확률은 주로 겨울(각각 2월 제외)에 그리고 DAD는 늦가을(11월)~겨울에 넓은 영역에 걸쳐 높은 편이고, 세 영역 모두 여름에 낮은 분포를 보였다. 대체로 겨울에 인공증우 발생 확률이 높은 이

유는 다른 계절에 비해 겨울철 강한 바람으로 인공증우 발생의 영향 범위가 더 넓은 영역까지 확산되어 나타났기 때문으로 사료된다. 세 영역의 계절별 평균 풍속을 살펴보면(KMA, 2021), 먼저 KMA 부근에서는 겨울에 약 2.2~2.6 m/s로 가장 강한 바람이, 여름에 약 1.8~1.9 m/s로 가장 약한 바람이 관측되었다. BRD 부근에서는 겨울에 약 1.6~2.0 m/s로 바람이 강했고, 여름과 가을에 각각 1.4~1.6 m/s, 1.3~1.5 m/s로 가장 약했다. 해발고도가 높은 DAD 역시 겨울에 약 2.8~3.1 m/s로 가장 강한 바람이, 여름에 약 1.4~1.8 m/s로 상대적으로 가장 약한 바람이 불었다. 또한 이 영역에서는 늦가을(11월)에도 약 2.7 m/s 이상으로 다소 강한 바람이 불어 인공증우 발생 확률이 넓은 범위에 걸쳐 높게 나타난 것으로 사료된다.

세 영역에 대해 정량적 분석 결과를 보면, 전반적으로 영역별 중심지점 주변(그림 4~6, 점선 동그라미)에서 인공증우 발생 확률이 상대적으로 가장 높게 추정된 것을 볼 수 있다. 먼저 KMA의 중심 주변에서는 6월을 제외하고 모두 61% 이상(최고값은 12월에 99%)의 발생 확률을 보였으며, 전체 공간의 평균은 최저 50% (8월)~최고 69% (1월)의 발생 확률이 나타났다(그림 4). BRD의 중심 주변에서는 모든 월에 대해 62% 이상(최고값은 12월에 98%)의 확률 분포가 나타났으며, 공간적으로 평균값은 이 지역의 2월을 제외하고 최저 53% (8월)~최고 67% (12월)로 나타났다(그림 5). 마지막으로, DAD의 중심지점 주변에서는 모든 월에 대해 61% 이상(최고값은 9월에 96%)의 발생 확률을 보였으며, 공간 평균은 최저 50% (8월)~최고 62% (3월)로 다른 두 영역(KMA와 BRD)에 비해 조금 낮은 발생 확률이었다(그림 6).

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 장기(2021년 1년간) 수치모의를 기반으로 세 영역(KMA, BRD, DAD)에서의 6시간 연속 시딩에 따른 강수량 증가를 분석하였으며, 두 실험 간 인공증우량(SEED-UNSD) 산출과 인공증우 발

생 확률분포를 살펴보았다. 전반적으로, 세 영역 모두 300분 누적 인공증우량은 여름(7~8월)이 가장 많았고(KMA는 7월에 평균 0.29 mm, BRD와 DAD는 8월에 각각 0.40 mm, 0.32 mm), 겨울에 가장 적은 양이 나타났다(세 영역 모두 12월에 평균 0.02 mm). 여름에 인공증우량이 가장 많은 것은 우리나라의 여름 몬순 기후로 인한 다량의 수증기 공급과 연속 시딩을 통한 구름방울의 성장 및 축진이 주요 원인으로 사료되며, 겨울에 가장 적은 것은 대륙성 고기압으로 인한 건조한 날씨(적은 수증기량) 조건에 과도한 양의 시딩(overseeding)으로 발생한 강수량 감소가 영향을 준 것으로 사료된다. 또한 BRD 영역에서 6시간 연속 및 1시간 시딩 결과(같은 조건에서)를 비교하면, 시딩 시간이 길어질수록 비례적으로 증우량이 증가하지는 않았으나, 6시간 연속 시딩이 대체로 1시간 시딩에 비해 인공증우 효과가 뚜렷하게 나타났다(겨울: 3.2배, 봄: 2.3배, 여름: 1.7배, 가을: 1.1배). 이 외에도 인공증우 발생의 확률분포를 보면, KMA와 BRD는 주로 겨울에 DAD는 늦가을~겨울에 넓은 영역에 걸쳐 높게 나타났고, 세 영역 모두 여름에 가장 낮은 분포를 보였다. 겨울에 발생 확률이 높게 나타난 것은 다른 계절에 비해 강한 풍속으로 인한 인공증우 발생의 영향 범위가 더 넓게 확산되어 나타났기 때문으로 사료된다.

기존의 인공강우 수치모의 연구는 대부분 특정 지역에서 짧은 시간(주로 1시간) 동안 시딩하여 모델을 수행하므로, 대기확산에 따른 인공증우의 뚜렷한 효과를 평가하는데 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 한계점을 극복하기 위한 방안으로, 다양한 영역(KMA, BRD, DAD)에서 6시간 연속 시딩을 통해 인공증우량을 산출하고 그 효과를 살펴보았다. 이러한 연구결과는 향후 최적의 인공강우 실험조건(시딩 시간 및 사례일 선정, 시딩물질 연소량 등)을 설계하는데 일조할 것으로 기대되어 의미 있는 연구라 사료된다. 그러나 수치모델의 불확실성과 함께 시딩물질(빙정핵, 응결핵)의 크기 분포(size distribution)에 대한 정확성이 다소 부족하여 구름미세물리과정의 변화를

해석하는데 어려움이 있었다. 따라서 향후 연구를 통해 이러한 점을 보완하고 좀 더 정확한 인공증우량을 산출하게 된다면, 국가적 차원에서 진행하고 있는 인공강우 실험의 다양한 목적(미세먼지 저감, 가뭄 해소 및 수자원 확보, 산불 예방 등) 달성을 위한 중요한 기초 정보를 제공할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 기상청 국립기상과학원 기상조절 및 구름물리 연구(KMA 2018-00224)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Abdul-Razzak, H., Ghan, S.J. (2000) A parameterization of Aerosol Activation: 2. Multiple Aerosol Types, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D5), 6837-6844. <https://doi.org/10.1029/1999JD901161>
- Amatulli, G., Camia, A., San-Miguel-Ayanz, J. (2013) Estimating Future Burned Areas under Changing Climate in the EU-Mediterranean Countries, *Science of The Total Environment*, 450, 209-222. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.014>
- Bhautmage, U.P., Fung, J.C.H., Pleim, J., Wong, M.M.F. (2022) Development and Evaluation of a New Urban Parameterization in the Weather Research and Forecasting (WRF) Model, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2021JD036338. <https://doi.org/10.1029/2021JD036338>
- Cha, J.W., Jung, W., Chae, S.H., Ko, A.-R., Ro, Y., Chang, K.H., Seo, S., Ha, J.C., Park, D., Hwang, H.J., Kim, M.H., Kim, K.E., Ku, J.M. (2019) Analysis of Results and Techniques about Precipitation Enhancement by Aircraft Seeding in Korea, *Atmosphere*, Korean Meteorological Society, 29(4), 481-499, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14191/Atmos.2019.29.4.481>
- Chae, S., Chang, K.-H., Seo, S., Jeong, J.-Y., Kim, B.-J., 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, *Advances in Meteorology*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/8453460>
- Chae, S., Chang, K.-H. (2019) Method and Display System for Calculating Artificial Rainfall Seeding Lines for Aviation Experiments Considering Cloud Liquid Water Content, Patent No. 10-2008698, Korean Intellectual Property Office.
- Chou, M.-D., Suarez, M.J. (1994) An Efficient Thermal Infrared Radiation Parameterization for use in General Circulation Models, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt (Maryland), November 8, 1994, USA, 84pp.
- Ek, M.B., Mitchell, K.E., Lin, Y., Rogers, E., Grunmann, P., Koren, V., Gayno, G., Tarpley, J.D. (2003) Implementation of Noah Land Surface Model Advances in the National Centers for Environmental Prediction Operational Mesoscale Eta Model, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D22). <https://doi.org/10.1029/2002JD003296>
- Gayatri, K., Sandeep, J., Murugavel, P., Chowdhuri, S., Konwar, M., Dinesh, G., Todekar, K., Bankar, S., Dixit, S.A., Malap, N. (2022) Evaluation of High-resolution WRF Model Forecasts and Their Use for Cloud Seeding Decisions, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 228, 105825. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2022.105825>
- He, H., Liu, X.E., Xue, L., Gao, Q. (2022) Mesoscale Numerical Simulation on the Precipitation Enhancement of Stratiform Clouds with Embedded Convection, *Atmospheric Research*, 286, 106672. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106672>
- Hill, G.E. (1979) Research on Increased Winter Orographic Precipitation by Cloud Seeding (FY 1979) Development of Cloud Seedability Criteria, Atmospheric Water Resources Series UWRL/A-79/01, Utah Water Research Laboratory, Utah State University, Logan, Utah. 73pp.
- Hong, S.Y., Noh, Y., Dudhia, J. (2006) A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes, *Monthly Weather Review*, 134(9), 2318-2341. <https://doi.org/10.1175/MWR3199.1>
- Jee, J.-B., Kim, S. (2017) Sensitivity Study on High-resolution WRF Precipitation Forecast for a Heavy Rainfall Event, *Atmosphere*, 8(6), 96. <https://doi.org/10.3390/atmos8060096>
- Jin, L., Lei, H.-C., Kong, F.-Y., Yang, J.-F., Hu, Z.-X. (2013) Cloud Seedability Study with a Dual-model System, *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 6(4), 197-202. <https://doi.org/10.3878/j.issn.1674-2834.12.0105>
- Jung, W., Cha, J.W., Ko, A.-R., Chae, S., Ro, Y., Hwang, H.J., Kim, B.-Y., Ku, J.M., Chang, K.-H., Lee, C. (2022) Progressive and Prospective Technology for Cloud Seeding Experiment by Unmanned Aerial Vehicle and Atmospheric Research Aircraft in Korea, *Advances in Meteorology*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/3128657>
- Kang, C.-Y., Song, S.-K., Moon, S.-H., Lim, Y.-K., Chang, K.-H., Chae, S. (2023) Effect of Cloud Seeding Using Hygroscopic Aerosol Particles on Artificial Rainfall Enhancement and Its Sensitivity Analysis in Spring 2021, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(3), 335-350, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.3.335>
- Kim, C.K., Yum, S.S., Park, Y.-S. (2016) A Numerical Study of Winter Orographic Seeding Experiments in Korea Using the Weather Research and Forecasting Model, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 128, 23-38. <https://doi.org/10.1007/s00703-015-0402-4>
- Kim, B.Y., Cha, J.W., Ko, A.R., Jung, W., Ha, J.C. (2020) Analysis of the Occurrence Frequency of Seedable Clouds on the Korean Peninsula for Precipitation Enhancement Experiments, *Remote Sensing*, 12(9), 1487. <https://doi.org/10.3390/rs12091487>
- Ko, E.-A., Song, S.-K., Moon, S.-H., Shon, Z.-H., Kim, T., Lee, S.S. (2024) A Case Study on the Impact of Real-time Land Cover Changes in the Intertidal Zone on Coastal Meteorological Predictions using a Coupled Atmosphere Ocean Model, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 136(2), 14. <https://doi.org/10.1007/s00703-024-01009-z>
- Kong, M., Wang, G., Wu, Y., Liu, G., Gu, Y., Wu, W. (2021) A Nationwide Analysis of Water Scarcity and Cloud Seeding Demand Levels from Analyzing Water Utilization Data, Agricultural Drought Maps, and Local Conditions in China Mainland. *Earth and Space Science*, 8(6), e2020EA001477. <https://doi.org/10.1029/2020EA001477>
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2021) Annual Climatological Report.
- 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-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s13143-023-00315-7>
- Lee, S.-J., Song, J., Kim, Y.-J. (2016) The NCAM Land-Atmosphere Modeling Package (LAMP) Version 1: Imple-

- mentation and Evaluation, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 18(4), 307-319, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5532/KJAFM.2016.18.4.307>
- Lim, Y.-K., Chang, K.-H., Cha, J.W., Lee, Y.H. (2022) Analysis of PM10 Reduction Effects with Artificial Rain Enhancement Using Numerical Model, *Atmosphere*, 32(4), 341-351, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14191/Atmos.2022.32.4.341>
- Lim, Y.-K., Chang, K.-H., Ro, Y., Ku, J. M., Chae, S., Koo, H.-J., Kim, M.-H., Park, D.-O., Jung, W., Lee, K., Kim, S.H., Cha, J. W., Lee, Y.H. (2023) Analysis of Cloud Seeding Case Experiment in Connection with Republic of Korea Air Force Transport and KMA/NIMS Atmospheric Research Aircrafts, *Journal of Environmental Science International*, 32(12), 899-914, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JESI.2023.32.12.899>
- Ma, J.-H., Yoo, C., Song, S.-U., Na, W., Cho, E., Song, S.-K., Chang, K.-H. (2023) Different Effect of Cloud Seeding on Three Dam Basins, Korea, *Water*, 15(14), 2555. <https://doi.org/10.3390/w15142555>
- Meyers, M.P., DeMott, P.J., Cotton, W.R. (1995) A Comparison of Seeded and Nonseeded Orographic Cloud Simulations with an Explicit Cloud Model, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 34(4), 834-846. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1995\)034<0834:ACOSAN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1995)034<0834:ACOSAN>2.0.CO;2)
- Mishra, V., Tiwari, A.D., Aadhar, S., Shah, R., Xiao, M., Pai, D.S., Lettenmaier, D. (2019) Drought and Famine in India, 1870-2016, *Geophysical Research Letters*, 46(4), 2075-2083. <https://doi.org/10.1029/2018GL081477>
- Mlawer, E.J., Taubman, S.J., Brown, P.D., Iacono, M.J., Clough, S.A. (1997) Radiative Transfer for Inhomogeneous Atmospheres: RRTM, A Validated Correlated-k Model for the Longwave, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14), 16663-16682. <https://doi.org/10.1029/97JD00237>
- Morrison, H., Thompson, G., Tatarskii, V. (2009) Impact of Cloud Microphysics on the Development of Trailing Stratiform Precipitation in a Simulated Squall Line: Comparison of One-and Two-Moment Schemes, *Monthly weather review*, 137(3), 991-1007. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2556.1>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2022) 2021 Air Quality Statistics.
- Pourghasemi, M.A., Memarian, M.H., Zare, A. (2022) Assessment of Possible Precipitation Enhancement by Glaciogenic Cloud Seeding Using WRF: A Case Study, *Russian Meteorology and Hydrology*, 47(7), 553-560. <https://doi.org/10.3103/S106837392207010X>
- Pytharoulis, I., Kartsios, S., Kostopoulos, V., Spyrou, C., Tegoulas, I., Bampzelis, D., Zanis, P. (2023) The High-Resolution Numerical Weather Prediction System of the Agroray Project, *Environmental Sciences Proceedings*, 26(1), 90. <https://doi.org/10.3390/envirosciproc20230206090>
- 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, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57(11), 2639-2660. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0335.1>
- Ro, Y., Chang, K.H., Lim, Y.K., Jung, W., Kim, J., Lee, Y.H. (2024) Analysis of Available Time of Cloud Seeding in South Korea Using Radar and Rain Gauge Data During 2017-2022, *Journal of Environmental Science International*, 33(1), 43-57, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JESI.2024.33.1.43>
- Sadeghi, M., Yaghoubi, S. (2024) Optimization Models for Cloud Seeding Network Design and Operations, *European Journal of Operational Research*, 312(3), 1146-1167. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.07.041>
- Song, S.-K., Shon, Z.-H., Bae, M.-S., Cho, S.-B., Moon, S.-H., Kim, H.-S., Son, Y.-B., Lee, C.-R. (2022) Effects of Natural and Anthropogenic Emissions on the Composition and Toxicity of Aerosols in the Marine Atmosphere, *Science of The Total Environment*, 806, 150928. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150928>
- Song, Y., Lee, H., Song, Y., Park, M. (2021) Development and Application of Estimation Method for the Scale of Damage in Domestic Drought, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 21(6), 275-284, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2021.21.6.275>
- Sun, D.-H., Song, S.-K., Cho, S.-B., Moon, S.-H. (2023) Long-term Trend Analysis in Biomass Burning Emissions and Their Impacts on Aerosols and CO Concentrations in South Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(3), 351-371, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.3.351>
- Sung, M.-K., Lim, G.-H., Choi, E.-H., Lee, Y.-Y., Won, M.-S., Koo, K.-S. (2010) Climate Change over Korea and Its Relation to the Forest Fire Occurrence. *Atmosphere*, 20(1), 27-35, (in Korean with English abstract).

Tessendorf, S.A., Bruintjes, R.T., Weeks, C., Wilson, J.W., Knight, C.A., Roberts, R.D., Peter, J.R., Collis, S., Buseck, P.R., Freney, E., Dixon, M., Pocerlich, M., Ikeda, K., Axisa, D., Nelson, E., May, P.T., Richter, H., Piketh, S., Burger, R.P., Wilson, L., Siems, S.T., Manton, M., Stone, R.C., Pepler, A., Collins, D.R., Bringi, V.N., Thurai, M., Turner, L., McRae, D. (2012) The Queensland cloud seeding research program, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(1), 75-90. <https://doi.org/10.1175/BA0MS-D-11-00060.1>

Authors Information

강채연(기상청 수치모델링센터 수치모델개발과 연구원)
(codus0709@korea.kr)

임윤규(국립기상과학원 기상응용연구부 연구사)
(imyunkyu@korea.kr)

송상근(제주대학교 지구해양과학과 교수)
(songsk@jejunu.ac.kr)

문수환(국립기상과학원 기상응용연구부 연구원)
(shmoon9677@korea.kr)

선대현((재)차세대수치예보모델개발사업단 자료동화실
검증진단팀 원급연구원)
(dhsun@kiaps.org)