



논문

2021년 봄철 흡습성 에어로졸 입자의 시딩에 의한 인공증우 효과 및 민감도 분석

Effect of Cloud Seeding Using Hygroscopic Aerosol Particles on Artificial Rainfall Enhancement and Its Sensitivity Analysis in Spring 2021

강채연¹⁾, 송상근^{1),2),*}, 문수환³⁾, 임윤규³⁾, 장기호³⁾, 채상희³⁾

¹⁾제주대학교 지구해양융합학부 지구해양전공, ²⁾제주대학교 지구해양과학과,
³⁾국립기상과학원 기상응용연구부

Chae-Yeon Kang¹⁾, Sang-Keun Song^{1),2),*}, Soo-Hwan Moon³⁾, Yun-Kyu Lim³⁾,
Ki-Ho Chang³⁾, Sanghee Chae³⁾

¹⁾Faculty of Earth and Marine Convergence/Earth and Marine Science Major,
Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea

²⁾Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea

³⁾Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju 63568, Republic of Korea

접수일 2023년 4월 13일
수정일 2023년 5월 8일
채택일 2023년 5월 15일
Received 13 April 2023
Revised 8 May 2023
Accepted 15 May 2023
*Corresponding author
Tel : +82-(0)64-754-3431
E-mail : songsk@jejunu.ac.kr

Abstract This study investigated the seeding effect of hygroscopic aerosol particles (CaCl₂ and NaCl) on artificial rainfall enhancement (ARE) around the Boryeong Dam (BRD) region located in Chungnam Province in spring (April) 2021. In addition, a sensitivity analysis on the ARE changes caused by the changes in seeding duration and amount of CaCl₂ and NaCl was conducted in the study area. This analysis was performed by two sets of simulation experiments: (1) meteorological model simulation with (i.e., SEED) and (2) without a modified Morrison microphysics scheme for CaCl₂ and NaCl (i.e., UNSD). The model study indicated the possibility that the seeding of hygroscopic materials around the BRD can affect the ARE in its surrounding/downwind regions. The mean 180 min-accumulated ARE between the SEED and UNSD (SEED-UNSD) due to CaCl₂ seeding was 0.44 mm in the study area (15.5% increase relative to 2.84 mm of the UNSD), with the largest ARE of 2.95 mm (35.5% increase relative to 8.32 mm) in regions located northeast of the BRD along southwesterly winds. For NaCl, the mean 180 min-accumulated ARE was 0.47 mm (16.9% increase relative to 2.77 mm), with the largest ARE of 3.93 mm (43.4% increase relative to 9.04 mm) in the same region as CaCl₂. The magnitudes of 60 min- and 120 min-accumulated AREs were smaller than those of the 180 min-accumulated ARE. In the sensitivity analysis, the increases in CaCl₂ seeding duration (2- and 3-fold) resulted in significant changes (a factor of 3 increase) in the mean 180 min-accumulated ARE in the study area, but there were no distinct changes in case of increased NaCl seeding duration. Unlike the seeding duration, the AREs of both CaCl₂ and NaCl were not sensitive to increases in their seeding amount (2- and 3-fold), possibly due to overseeding.

Key words: Artificial rainfall enhancement, Hygroscopic seeding, Sensitivity analysis, CaCl₂, NaCl, Boryeong Dam

1. 서론

과거 30여 년 (1986~2015년) 동안 우리나라의 연평균 강수량은 1,300 mm로 전 세계 평균 강수량 (813 mm)의 약 1.6배로 높은 수준이지만, 대부분의 강수량

은 아시아 여름몬순 계절 (6월 25일~9월 25일)에 집중되어 있고, 60% 이상은 해양에서 나타난다 (Jin *et al.*, 2023; K-water and Ministry of Environment, 2020). 이로 인해 다른 계절 (특히 봄철)에는 물 부족 현상 및 가뭄 발생이 지속적으로 증가하고 있다. 이러한 문제

를 해결하기 위하여 댐건설, 지하수개발, 강변여과수, 해수담수화, 해양심층수 등 미래수자원 확보를 위한 많은 기술이 발전되어 왔지만, 최근 인공강우 기상조절 기술이 환경적 및 경제적으로 가장 효과적인 대안 중 하나로 제시되고 있다(Cha *et al.*, 2019). 인공강우는 구름은 있으나 구름씨 역할을 하는 빙정핵 또는 구름응결핵(CCN, cloud condensation nuclei)이 적어 구름방울이 빗방울로 성장하지 못할 때, 인위적으로 구름시딩(cloud seeding) 물질을 살포함으로써 구름의 발달과 응결을 촉진시켜 강수를 내리게 하는 기술이다. 한랭 구름(0°C 이하)에서는 빙정핵 역할을 하는 요오드화은(AgI), 드라이아이스 등을 살포하여 구름속 과냉각 물 입자를 얼음으로 바꿔 빙정을 생산 및 강화시켜 강수를 발생시킨다. 또한 온난 구름(0°C 이상)에서는 응결핵 역할을 하는 염화칼슘(CaCl_2), 염화나트륨(NaCl) 등의 흡습성 물질(에어로졸 입자)을 살포하여 충돌 및 병합 과정을 촉진시켜 강수를 유발시킨다.

인공강우에 대한 많은 연구는 주로 가뭄 해소, 수자원 확보 기술개발을 위한 목적과 안개소산, 태풍의 세력 약화 등 기상방재를 위한 목적으로 이루어져 왔다. 이와 관련하여 지상 및 항공 실험을 기반으로 한 관측 연구와 구름 미세물리과정을 통한 수치모의 연구가 지속적으로 수행되어 왔다(Ku *et al.*, 2020; Cha *et al.*, 2019; Ćurić *et al.*, 2019; Xue *et al.*, 2013). Xue *et al.* (2013)은 Thompson 미세물리방안에 AgI 모듈을 반영하여 실시간 자료동화 시스템(RTFDDA - WRF, Real-Time Four Dimensional Data Assimilation - Weather Research & Forecasting)을 수행한 결과, 최대 약 2.0 mm의 인공증우 효과를 보였다. Ćurić *et al.* (2019)에 따르면, 인공강우(증우·증설) 수치모의에서 CSNT(core/shell sodium chloride (NaCl)/titanium dioxide (TiO_2) nanostructure) 물질의 시딩으로 인해 10~20 mm 정도의 인공증우량이 나타났다. 이외에도, Chae *et al.* (2018)은 기존 Morrison 미세물리방안(Morrison *et al.*, 2009)에 AgI 모듈을 적용하여 시딩 기간의 바람장을 고려한 AgI 시·공간 분포 및 인공증설을 모의하

였다. Cha *et al.* (2019)에 따르면, 2008~2018년 동안 대관령 지역의 항공 실험(총 54회)에서 AgI에 의한 인공증설량은 최소 0.1 cm~최대 1.8 cm, CaCl_2 에 의한 인공증우량은 0.5~2 mm로 나타났다. 최근 들어, 2019년 강원도 평창 및 강릉 일대에서 수행된 국제공동연구에서 AgI 시딩 이후 구름 입자 크기별 평균 수농도가 59~82%로 증가한 것을 확인하였다(Ku *et al.*, 2020). 그러나 인공강우의 효과를 보다 정확하게 평가하기 위해서는 다양한 기상조건에서의 시딩을 통해 우리나라에 최적화된 강수량 증대 기술개발이 필요하다는 것을 강조하였다.

최근 들어, 다양한 원인으로 자주 발생하는 고농도 미세먼지 오염을 해결하기 위한 대처방안으로 인공강우(증우)의 중요성이 거론되고 있다(Song and Yum, 2019). 또한 인공강우의 세정작용에 의한 미세먼지 저감 등 대기환경 및 환경오염관리 측면에서 관측 실험과 모델링 연구가 수행되었다(Ku *et al.*, 2023; Lim *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2022). Lim *et al.* (2022)에 따르면, 우리나라 중부지방을 중심으로 인공강우 수치모의를 통한 강수 세정작용이 PM_{10} 농도 감소(최대 22% 저감)에 영향을 주었으며, 넓은 범위에 걸쳐 유효한 수준으로 나타났다. 하지만 여전히 수치모델의 불확실성 또는 오차, 습성침적 과정 모의 등에 따른 한계가 있어 보다 정교한 수치모의 연구가 필요하다고 언급하였다. 또한 중국 양쯔강 삼각주 지역에서 인공강우(증우)가 오염물질 농도를 줄여 대기오염현상을 억제할 수 있다는 연구 결과도 있었다(Wu *et al.*, 2022). 최근 Ku *et al.* (2023)은 우리나라 서해지역의 인공강우 실험에서 시딩(seeding) 후에 구름, 이슬비, 강수 입자의 평균 수농도가 모두 증가하였고, 자연 강수와 시딩에 의한 인공증우의 복합적인 효과가 PM_{10} 농도 감소의 원인을 밝혔다.

인공강우 관측 실험에 있어 최적화된 실험조건(시딩 물질 연소량, 살포시간 등)을 설계하기 위해서는, 보다 정교한 수치모델을 이용하여 시딩 물질의 살포와 관련한 인공증우량의 민감도 분석 연구가 중요하다(He *et al.*, 2022; Ling *et al.*, 2013). 2004년 중국 북동

부에서 WRF-1DSC (WRF-one dimensional stratiform cold cloud model) 모델을 이용한 AgI 물질의 시딩 시간, 위치, 양에 대한 민감도 실험에서, 누적 강수량이 크게 감소한 원인은 과도한 시딩 (overseeding)인 것으로 추정되었다 (Ling *et al.*, 2013). He *et al.* (2022)은 대류가 포함된 층운형 구름에서 AgI의 시딩 위치 및 양에 대한 민감도 분석을 통해 기준보다 시딩 양을 줄이거나 과도하게 살포하면 오히려 인공증우의 효과가 감소하는 것을 확인하였다 (He *et al.*, 2022). 한편, 국내에서는 인공강우에 대한 민감도 분석의 수치모의 연구가 거의 수행된 바 없으며, 특히 NaCl 물질에 관한 인공강우 수치모의 및 민감도 연구는 전무하다. 또한 인공강우 연구에 대한 많은 노력이 있었음에도 불구하고, 여전히 구름 미세물리과정의 변화를 이해하고 해석하는 데 어려움이 있어 이에 대한 상세 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 가뭄이 가장 빈번하게 나타나는 봄철에 우리나라 중부지방 (특히, 충청남도 보령댐)으로 저기압이 통과하는 사례를 선정하여, 2가지 흡습성 물질 (CaCl_2 , NaCl)의 시딩에 의한 인공증우 효과를 정량적으로 평가하였다. 또한 시딩 물질의 지속시간과 양 변화에 따른 인공증우량의 민감도를 상세하게 분석하였다. 이러한 결과들은 보다 정확한 인공강우 실험조건을 설계하고 향후 미세먼지 저감 효과와 관련된 다양한 관측 및 모델링 연구에 일조할 것으로 기대된다.

2. 자료 및 방법

2.1 대상지역, 자료 및 방법

본 연구에서는 우리나라 충청남도 보령시에 위치한 보령댐을 중심으로 흡습성 물질 (CaCl_2 , NaCl)에 대한 인공강우 수치모의를 수행하였다 (그림 1). 충남지역은 2000년 이후에 심각한 수준의 가뭄이 자주 발생하는 지역이며, 생공용수를 공급하는 역할을 하는 보령댐에서도 강수량 및 유입량 부족 등에 의해 수자원 이용에 있어 취약함이 확인된 바 있다 (Kang *et al.*,

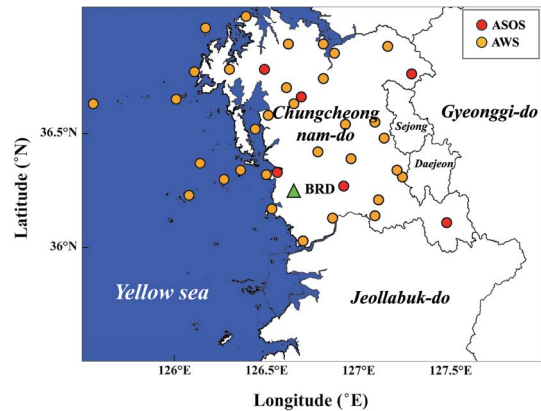


Fig. 1. The model domain for WRF simulations and the geographical locations of 38 meteorological monitoring sites (6 ASOS (red circles) and 32 AWS (orange circles)) and Boryeong dam (BRD, green triangle).

2021). 이외에도, 연구 대상지역 주변으로 2가지 시딩 물질의 살포시간 및 양 변화에 따른 인공증우량의 민감도를 분석하였다. 본 연구에 이용된 인공강우 수치모의 기상모델에 대한 자세한 구성은 2.2절에 제시하였다. 또한 연구 목적을 위해 보다 효율적인 연구기간을 선정하기 위하여, 최근 2021년 1년 동안 인공증우량이 가장 많이 나타난 봄철을 대상으로 종관일기도를 분석하였다. 그 결과, 한반도 충남지역 보령댐을 중심으로 저기압이 통과하면서 연속적으로 (11시간 지속) 강수가 나타난 2021년 4월 3일을 연구 사례일로 선정하였다.

수치모의 검증에 위해, 연구기간 동안 충청남도 일대의 6개 종관기상관측소 (ASOS, Automated Synoptic Observing System)와 32개 방재기상관측소 (AWS, Automatic Weather Station)의 기상자료 (기온, 풍속, 상대습도, 강수량)를 이용하여 통계적 분석을 수행하였다 (그림 1의 관측 지점). 기상요소 중 기온, 풍속, 상대습도의 각 관측값과 모델값에 대해 IOA (index of agreement), RMSE (root mean square error), MBE (mean bias error)를 산정하여 분석에 이용하였다. IOA는 1에 가까울수록 모델값과 관측값 사이에 일치도가 높음을 의미하고, RMSE와 MBE는 0에 가까울수록 오

차가 작음을 의미한다. 또한 양 (+)의 MBE는 과대모의를, 음 (-)의 MBE는 과소모의를 나타낸다. 강수량에 대해서는 선행 연구에서 강수 검증을 위해 널리 사용하고 있는 POD (Probability of detection)와 ETS (Equitable threat score)를 산출하여 분석에 이용하였다 (Gayatri *et al.*, 2022; Jee and Kim, 2017; Lee *et al.*, 2016). POD는 1에 가까울수록 관측강수에 대한 예측강수의 정확도가 높음을 의미하며 (식 (1)), ETS는 -1/3에서 1의 값을 가지며 1에 가까울수록 완벽한 예보임을 의미한다 (식 (2)). 이러한 방법은 3개의 임계값 (≥ 0.1 mm/hr, ≥ 0.5 mm/hr, ≥ 1 mm/hr)에 대한 강수 발생 유무에 따라, 관측과 모델 모두에서 강수가 나타나면 H (Hits), 관측에서만 나타나면 M (Misses), 모델에서는 강수가 나타났지만, 관측에서는 나타나지 않은 경우를 F (False alarms), 마지막으로 모두 강수가 나타나지 않은 경우를 C (Correct negatives)로 분할하여 산출하였다. POD와 ETS에 대한 식은 다음과 같으며, He는 우연에 의한 맞힘을 의미한다.

$$POD = \frac{H}{(H+M)} \quad (1)$$

$$ETS = \frac{(H-He)}{(H+M+F-He)} \quad (2)$$

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

2.2 모델 구성 및 실험 설계

인공강우 수치모의를 위해 이용된 기상모델은 중규모 및 중관규모 차원에서 전 세계적으로 널리 이용되는 WRF (Weather Research & Forecasting) v3.8 모델이다. WRF 모델은 NCAR (National Center of Atmospheric Research)과 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)에서 공동 개발한 완전 압축성 비정수계 (fully compressible non-hydrostatic) 방정식을 이용한다 (<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users>). WRF 모델의 초기 및 경계장은 기상청에서 현업 이용 중인 UM-LDAPS (Unified Model-Local Data Assimilation and Prediction System) 수평해상도 1.5 km 기상장

을 이용하였다 (3시간 간격). UM-LDAPS 기상장은 자료동화기법이 적용된 고해상도 자료이지만, 인공강우를 구현할 수 있는 시딩 물질별 미세물리과정의 모수화 모듈을 포함하고 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 UM-LDAPS를 초기/경계장으로 이용하여 WRF 모델을 수행하였으며, 모델 내 기존의 미세물리과정 모듈을 수정·적용하여 인공증우량을 산출할 수 있도록 설계하였다. 모델 도메인은 수평해상도 1 km의 단일 도메인 (200 × 160)으로 보령댐을 중심으로 하는 서해 영역으로 설정하였으며 (그림 1), 연직 층은 기상변화를 보다 정확하게 모의하기 위해 40개 층으로 구성하였다. 많은 선행 연구를 보면, 모델의 초기 및 경계장의 수평해상도가 대부분 수십 km 이상 (예, 0.25° 및 1° 해상도)으로 낮기 때문에, 도메인 경계에서의 불안정을 줄이고 수치적분의 안정화를 위해 동지격자 (nesting) 기법을 활용한 모델링을 수행해 왔다 (Cho *et al.*, 2023; Gayatri *et al.*, 2022; Song *et al.*, 2019). 하지만 본 연구에 이용되는 UM-LDAPS 경계장은 수평해상도 1.5 km의 고해상도 자료이므로 nesting 없이 단일 도메인 (1 km 해상도)으로 구성하였으며, 서로 간의 해상도 차이가 작기 때문에 수치모델링의 불안정은 크지 않은 것으로 사료된다 (Ku *et al.*, 2020; Yoon, 2019; Chae *et al.*, 2018).

인공강우 수치모의를 위해 이용된 WRF 모델의 상세 물리적 옵션은 표 1에 제시하였다. 물리 옵션 중 미세물리과정은 선행 연구에서 많이 사용하고 있는 Morrison scheme (Kim *et al.*, 2016; Morrison *et al.*, 2009)에 CaCl₂와 NaCl의 모듈을 적용하여 수정된 Morrison scheme (MMS, Modified Morrison scheme)을 이용하였다. MMS는 시딩 물질별로 로그노말 (Log-normal) 수식에 따라 수농도 (number concentration)로 계산하여 강수 및 얼음 입자를 증가시켜 인공강우를 생성하도록 설계되었다 (Lim *et al.*, 2022; Abdul-Razzak and Ghan, 2000). 나머지 물리 옵션으로, 지표면 물리상태의 모수화는 Noah-LSM (Noah-land surface model, Ek *et al.*, 2003), 장파 및 단파 복사에 대해 각각 RRTM (Rapid Radiative Transfer Model, Mlawer

et al., 1997)과 Goddard (Chou and Suarez, 1994) 방안, 대기경계층 모수화는 YSU (Yonsei University) 방안을 사용하였다 (Hong *et al.*, 2006). 이외에도, WRF 모델에 이용된 토지피복도와 지형고도는 수평해상도 1 sec 인 환경부 토지피복도 KLAND와 ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, <https://asterweb.jpl.nasa.gov>) 자료를 각각 사용하였다 (표 1). 또한 기상모델의 예측정확도를 향상시키기 위해서 대기-해양 상호작용과 관련된 해수면온도의 변화를 고려할 수 있도록 FNMOC (Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center, <https://www.metoc.navy.mil/fnmoc/fnmoc.html>) 자료를 이용하여 모델을 수행하였다.

WRF 모델 내 MMS를 적용하는 과정으로, 기존 Morrison scheme의 5가지 물리/역학 소스 프로그램 (mp_morr.F, mp_driver.F, solve_em.F, phy_init.F, start_em.F)에 시딩 물질별 (CaCl₂, NaCl) 관련 모듈을 추가하여 모델을 수행하였다. 첫째, mp_morr.F에서 시딩 물질별 Bimodal 형태의 입자 크기 분포 (size distribution)를 통해 작은 입자에 대해서는 Activation, 큰 입자에 대해서는 Auto-conversion으로 구분하여 각 물질에 대한 연산과정 (크기 분포 및 농도, 기하평균 반경, 기하표준편차, 보정계수 등)을 적용하였다. Activation은 과포화 (super-saturation)에 의해 생성되는 구름을 계산하는 과정이고, Auto-conversion은 구름방울 또는 큰 응결핵이 빗방울로 바뀌는 과정을 의미한다 (Guo *et al.*, 2022; Rosenfeld *et al.*, 2010). 이러한 입

자 크기 분포에 따라 선택적으로 계산되어 응결핵이 빗방울로 성장하지 못할 만큼 작을 때, 인위적으로 응결핵 역할을 하는 물질을 살포함으로써 물방울의 성장 및 충돌·병합 과정을 촉진시켜 인공강우를 유발시키도록 프로그램을 작성하였다. 이때 CaCl₂의 입자 크기에 따른 기하평균 반경과 기하표준편차는 선행 연구를 참고하여 작은 입자에서는 0.135×10^{-6} m, 1.142, 큰 입자에서는 0.5×10^{-6} m, 2.511을 각각 이용하였다 (Bruitjes *et al.*, 2012). NaCl의 경우, 2022년 국립기상과학원의 OPC (Optical Particle Counter) 관측 (대관령, 제주)을 기반으로 작은 입자에서는 0.1308×10^{-6} m, 1.317, 큰 입자에서는 0.8459×10^{-6} m, 2.006을 적용하였다. 둘째, mp_driver.F는 연산과정이 적용된 mp_morr.F를 다음 단계인 solve_em.F로 전달하는 역할을 한다. 셋째, solve_em.F에서는 기존 Morrison scheme에서 추가로 수정된 변수 (연산과정)를 이용하여 수치적분을 수행한다. 넷째, phy_init.F에서는 시딩과 관련된 제어변수 (시딩 시간, 고도, 위·경도, 시딩 양)를 설정하여 적정 조건에서 흡습성 물질을 살포하도록 설계한다. 마지막으로, start_em.F에서 모델의 초기 입력장을 생성하고, 최종적으로 MMS를 적용한 WRF 모델을 수행한다.

수치모의를 통한 인공증우량을 산출하기 위하여 시딩 물질의 살포가 고려된 실험 (SEED)과 고려되지 않은 실험 (UNSD)으로 구성하였으며, 6시간의 초기적응시간 (spin-up time)을 포함하여 총 18시간에 대해 모델링을 수행하였다. 먼저 UNSD 실험에서 각 시간

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

WRF v3.8	D1
Horizontal grid	200 × 160
Horizontal resolution	1 km
Vertical layers	40 layers
Initial & Boundary layer	Unified Model-Local Data Assimilation and Prediction System
Microphysics	Morrison scheme (Morrison <i>et al.</i> , 2009) with CaCl ₂ and NaCl 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)

Table 2. Summary of the sensitivity experiments to changes in seeding amount and duration.

Experiments	CaCl ₂ amount (g/hr)	NaCl amount (g/hr)	Seeding duration (min)
CTRL	2,160	1,000,000	60
Exp_D2	2,160	1,000,000	120
Exp_D3	2,160	1,000,000	180
Exp_A2	4,320	2,000,000	60
Exp_A3	6,480	3,000,000	60

의 모든 고도에서 액체수함량(LWC, liquid water content)의 최고값이 나타나는 시간, 고도(1~3 km 내에서), 위·경도를 산출하였고, 물질별 시딩 위치는 바람 성분(u, v)을 이용해서 결정하였다(2019년 국립기상과학원 특허 “구름액체물량을 고려한 항공 실험용 인공강우 시딩라인 산출 방법 및 표출 시스템” 참고). 일반적으로 흡습성 물질은 강수에 영향을 미치는 반응 속도에 따라 구름에서 반응하는 시간이 최소 1시간 이상 소요되므로(Cha *et al.*, 2019), 이를 고려하여 LWC 최고값이 나타나는 지점에서부터 2시간 전의 위치를 찾아 그 지점에서 시딩을 수행하도록 설계하였다(SEED 실험). 최종적으로, SEED와 UNSD 실험의 차이(SEED-UNSD)를 계산하여 인공증우량을 산출 및 평가하였다. 이외에도, 시딩 종료 후 3시간까지는 흡습성 물질이 구름과 강수를 형성시키는 데 충분한 시간이라는 선행 연구(Jung *et al.*, 2022)의 결과를 참고하여, 본 연구에서는 시딩 종료 후 60분, 120분, 180분의 누적 인공강우를 산출하여 분석에 이용하였다.

본 연구에서는 인공강우 실험에 있어 흡습성 물질(CaCl₂, NaCl)의 시딩조건에 따른 인공증우량의 민감도를 분석하였으며, 다음과 같이 실험조건을 나누어 수행하였다. 각 물질에 대해 시딩 양을 고정하고 지속 시간을 조절한 실험(Exp_D2: 지속시간 2배, Exp_D3: 지속시간 3배)과 시딩 지속시간을 고정하고 양을 조절한 실험(Exp_A2: 양 2배, Exp_A3: 양 3배)으로 구분하였다. 또한 민감도 실험의 결과와 시딩 지속시간과 양 변화를 고려하지 않은 기본 기준 실험(CTRL)의 결과를 비교하여 인공증우의 효과를 정량적으로 평가하였다. 기준 실험에서, CaCl₂ 물질의 시딩 양은 선행 연구(Ku *et al.*, 2023)를 참고하여 2,160 g/hr를 살포하

도록 설계하였으며, NaCl의 시딩 양은 국립기상과학원에서 진행하고 있는 항공 실험을 기반으로 실제 항공기의 시딩 양을 참고하여 1,000,000 g/hr를 살포하도록 설계하였다. 또한 두 물질의 시딩 시간은 실제 항공 실험과 동일하게 1시간으로 설정하여 모델을 수행하였다(Lim *et al.*, 2022). 시딩 물질별 기준 실험과 민감도 실험에 대한 상세한 정보는 표 2에 제시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수치모델링 검증

본 연구에서는 흡습성 시딩 물질에 의한 인공증우의 민감도 분석에 앞서, 기상모델의 예측 정확도를 평가하기 위해 전체 모델링 기간(2021년 4월 3일 00 UTC~18 UTC) 동안 전체 38개 지점의 기상요소(기온, 풍속, 상대습도, 강수량)에 대해 통계검증(IOA, RMSE, MBE, POD, ETS)을 수행하였다(표 3). 전체 모의 기간이 다소 짧아(18시간) 통계적 검증의 신뢰도를 확보하기 위해, 최대한 많은 관측지점을 선정하여 모델 결과와 비교하였다(Ahn *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2015). 전 지점에서 기온, 풍속, 상대습도의 IOA는 각각 0.91, 0.74, 0.72로 나타나 대체로 높은 일치도를 보였으며, RMSE의 경우 각각 1.79°C, 1.83 m/s, 9.32%로 모의되었다. 이외에도, 전 지점의 MBE에 대하여 기온은 0.43°C, 풍속은 0.70 m/s로 추정되어 둘 다 약한 과대모의, 상대습도는 -5.33%로 과소모의 경향을 보였다. 이러한 결과들은 여러 선행 연구의 통계적 검증(IOA, RMSE, MBE) 결과와 대체로 유사한 범위의 수치임을 확인하였다(Song *et al.*, 2022; Cho *et al.*, 2021;

Table 3. Statistical evaluation of the meteorological variables (air temperature, wind speed, relative humidity, and precipitation) between the observed and model-simulated values at 38 meteorological monitoring sites (as shown in Fig. 1) during the simulation period.

[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
All sites	0.907	1.788	0.432	0.739	1.828	0.704	0.718	9.324	-5.325

[B] Precipitation

	Threshold (mm hr)	All sites
POD ^d	≥ 0.1	0.609
	≥ 0.5	0.498
	≥ 1	0.478
ETS ^e	≥ 0.1	0.201
	≥ 0.5	0.161
	≥ 1	0.201

^aIOA: index of agreement, ^bRMSE: root mean square error, ^cMBE: mean bias error, ^dPOD: probability of detection, ^eETS: equitable threat score.

Mun *et al.*, 2020; Jeong *et al.*, 2016).

강수량의 통계검증 결과를 보면(표 3), 전체 지점에 대한 POD는 임계값 ≥ 0.1 mm/hr에서 0.61, ≥ 0.5 mm/hr에서 0.50, ≥ 1 mm/hr에서 0.48로 산출되었으며, ETS는 임계값 ≥ 0.1 mm/hr에서 0.20, ≥ 0.5 mm/hr에서 0.16, ≥ 1 mm/hr에서 0.20이 나타났다. 이러한 강수량 검증 결과는 여러 선행 연구들의 결과와 서로 비슷한 수준임을 확인할 수 있었다. 예를 들어, 2014년 3~10월 경기도 지역의 수치모의 결과에서 POD는 최저 0.47~최고 0.94, ETS는 최저 0.12~최고 0.55가 나타났다(Lee *et al.*, 2016). 또한 2011년 여름철 우리나라 주요 도시(서울 등)에 대해 POD는 최저 0.55~최고 0.90, ETS는 최저 0.14~최고 0.34가 나타났다(Jee and Kim, 2017). 최근 Gayatri *et al.* (2022)의 연구에 따르면, 2018년 여름철 India의 도시지역(Solapur)을 대상으로 한 강수량 모의 결과에서 POD는 최저 0.34~최고 0.36, ETS 최저 0.15~최고 0.25를 산출하였다. 따라서 본 연구의 통계적 분석은 대상지역에서 인공증우량을 산출하고 시딩 물질에 의한 인공증우의 민감도를 평가하는 데 있어 합리적인 모의 결과를 도출함을 확인할 수 있다.

3.2 CaCl₂에 의한 인공증우량 산출 및 민감도 분석

대상지역인 충남 보령댐을 기준으로 CaCl₂ 물질을 이용하여 인공강우 수치모의를 수행한 결과에 대해 시딩 종료 후 3가지 시간대로 구분하여 분석하였다(그림 2). 즉, 시딩 종료 후 60분, 120분, 180분에 대한 누적 인공증우량의 공간분포를 산출하여 그 효과를 비교하였다. 2.2절에서 언급하였듯이, 인공증우량은 SEED 모의의 강수량에서 UNSD 모의의 강수량을 뺀 차이를 의미한다(SEED-UNSD). 전반적으로, 시딩 물질 수농도(그림 2의 점선 실선)의 공간분포를 통해 남서에서 북동 방향으로의 바람을 따라 CaCl₂의 이동 경로를 확인할 수 있고, 이동경로를 따라 인공증우의 효과가 뚜렷하게 나타났다. 대상지역 내 평균 인공증우량은 60분 후에는 0.034 mm, 120분 후에는 0.30 mm, 180분 후에는 0.44 mm로 나타났으며, UNSD 대비 인공증우율은 각각 2.2%, 15.7%, 15.5%로 산출되었다. 특히, 보령댐 주변 및 북동쪽(예, 세종시) 방향으로 각 시간대(60분, 120분, 180분)의 최고 누적 인공증우량은 각각 0.59 mm, 1.77 mm, 2.95 mm로 모의되었다. 또한 대상지역에서 60분 및 120분의 누적 인

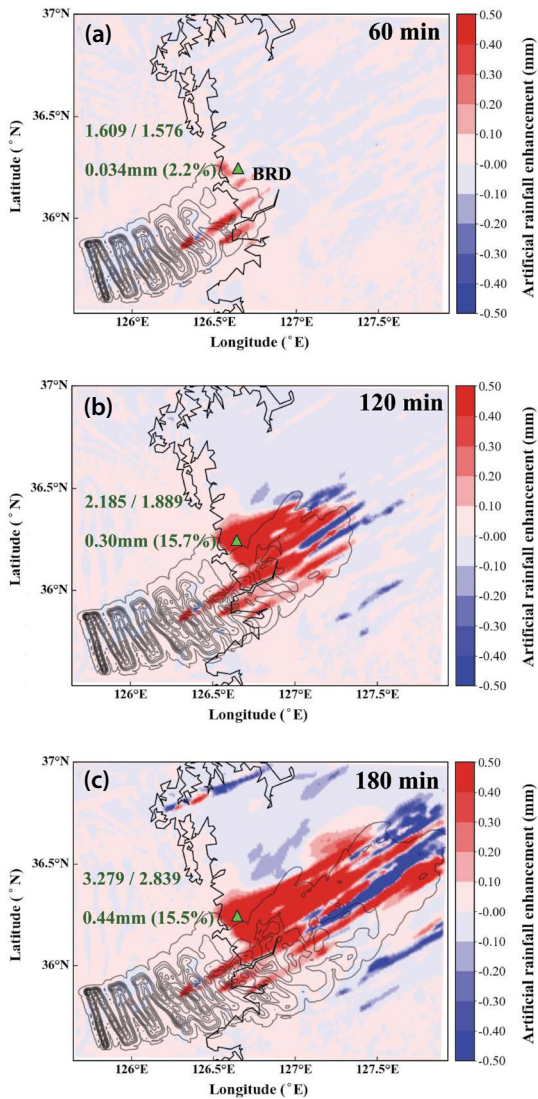


Fig. 2. Spatial distributions of the differences in (a) 60 min-, (b) 120 min-, and (c) 180 min-accumulated artificial rainfall enhancement (mm) between SEED and UNSD after CaCl_2 seeding. Black lines indicate the number concentration of CaCl_2 .

공중우량은 전반적으로 180분의 누적 인공증우량에 비해 작게 산출되었다. 따라서, 시딩 물질에 대한 민감도는 180분 누적 인공증우량에 대하여 중점적으로 분석하였다.

본 연구에서는 인공증우 효과의 원인을 상세히 파

악하기 위해서, 구름 혼합비(Cloud water mixing ratio)와 비 혼합비(Rain water mixing ratio)의 공간분포를 인공증우량과 함께 비교하였다. 그림 3은 CaCl_2 물질의 시딩 종료 후 60분, 120분, 180분에 대한 SEED와 UNSD의 구름 혼합비 차, 비 혼합비의 차를 각각 나타낸다. 그림 2에 알 수 있듯이 인공증우의 효과는 대상지역인 보령댐 주변에서 매우 뚜렷한 반면, 일부 지역에서는 감우 효과가 나타났다. 이와 같이 인공증우량이 뚜렷한 지역에서 구름 혼합비가 감소하고 비 혼합비가 증가하는 패턴을 보였다(그림 3). 이것은 보령댐 및 주변 지역에서 CaCl_2 물질의 시딩에 의해 수분 속(moisture flux)이 증가하여 이에 따라 구름방울이 성장되고, 이 성장된 구름방울이 빗방울로 전환됨에 따라 구름 혼합비는 감소하고 비 혼합비는 증가한 것으로 사료된다(Chae *et al.*, 2018).

그림 4와 5는 CaCl_2 물질의 시딩 지속시간과 양 변화에 따른 3시간(180분) 누적 인공증우량의 민감도에 대한 공간분포와 정량 분석 결과를 각각 나타낸다. 2.2절에서 언급하였듯이, 민감도 실험의 결과는 시딩 지속시간과 양 변화를 고려하지 않은 기준 실험(CTRL)의 결과와 비교하였다. CaCl_2 물질의 시딩 양을 고정하고 지속시간을 2배, 3배로 늘린 Exp_D2와 Exp_D3 실험의 인공증우량(SEED와 UNSD 차이)의 공간분포(그림 4(a)와 4(b))는 CTRL 실험(그림 2(c))에 비해 증우 효과가 나타난 영역(또는 면적)이 더 크게 확장된 모습을 확인할 수 있다. 반면, CaCl_2 물질의 시딩 지속시간을 고정하고 양을 2배, 3배로 늘린 Exp_A2와 Exp_A3의 공간분포(그림 4(c)와 4(d))는 CTRL 실험(그림 2(c))에 비해 큰 차이가 없이 거의 유사한 분포 패턴이었다. 이외에도, Exp_D2와 Exp_D3에서 대상지역의 평균 인공증우량은 각각 1.32 mm, 1.33 mm로 추정되어 CTRL 실험(0.44 mm)에 비해 약 3배의 증우 효과가 나타났다(그림 5). 또한 두 실험의 인공증우율이 각각 52.1%, 53.0%로 나타나 CTRL 실험(15.5%)에 비해 모두 증가하였다. 과거 Hill (1979)의 연구에 따르면, 시딩 물질의 살포 이후 1시간 내에는 대상지점까지 잘 확산되지 않고 오히려 축적되어

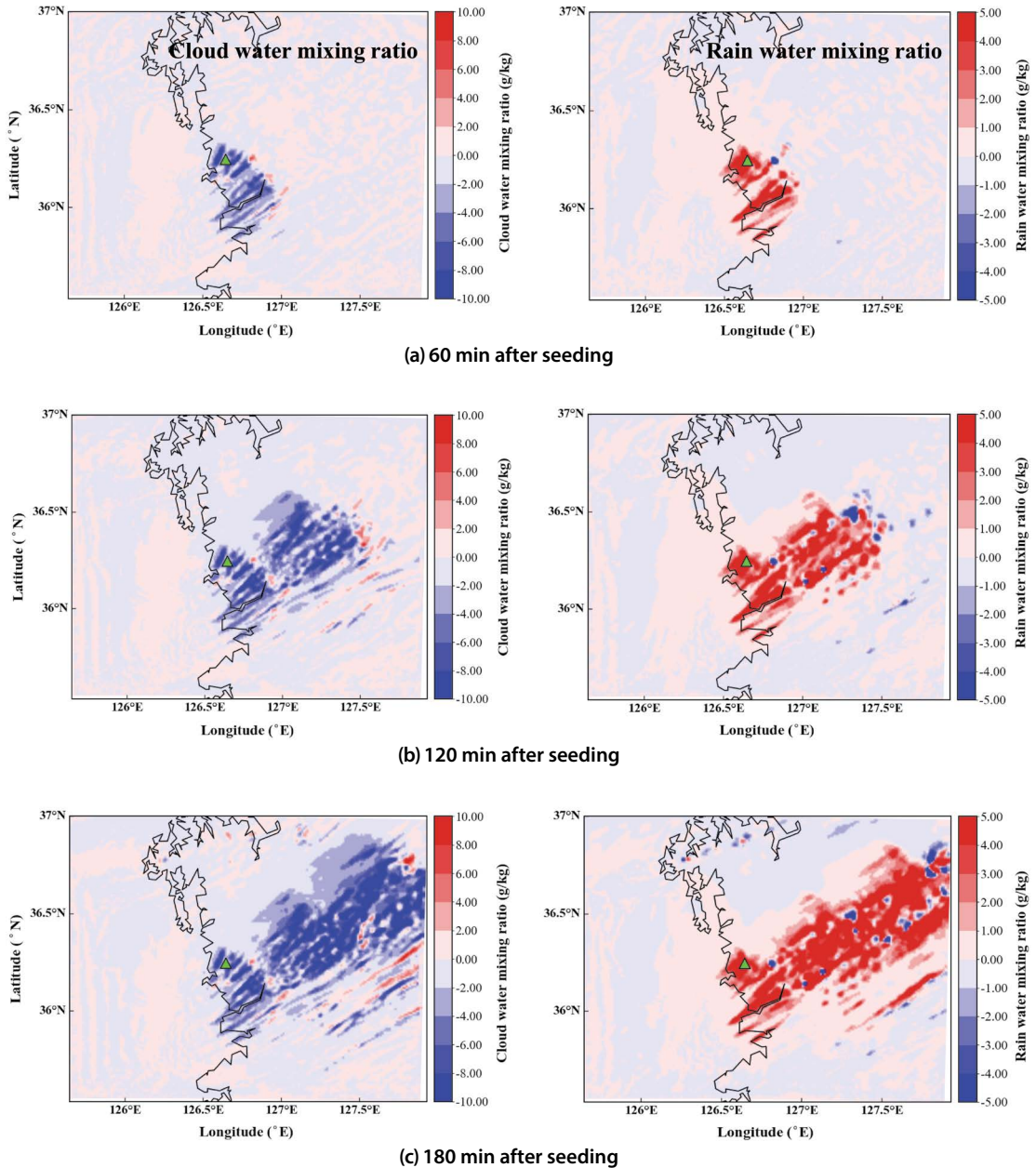


Fig. 3. Spatial distributions of the differences in cloud mixing ratio (g/kg) and rain water mixing ratio (g/kg) between SEED and UNSD during (a) 60 min-, (b) 120 min-, and (c) 180 min after CaCl_2 seeding.

overseeding의 영향으로 인공증우가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 따라서 시딩 지속시간을 더 길게 늘려줌으로써 시딩 물질의 확산이 더 잘 이루어져 인공증우의

효과가 커진 것으로 사료된다.

CaCl_2 물질의 시딩 양에 대한 민감도 분석 결과는 시딩 지속시간에 대한 결과와 상이하게 나타났다. 즉,

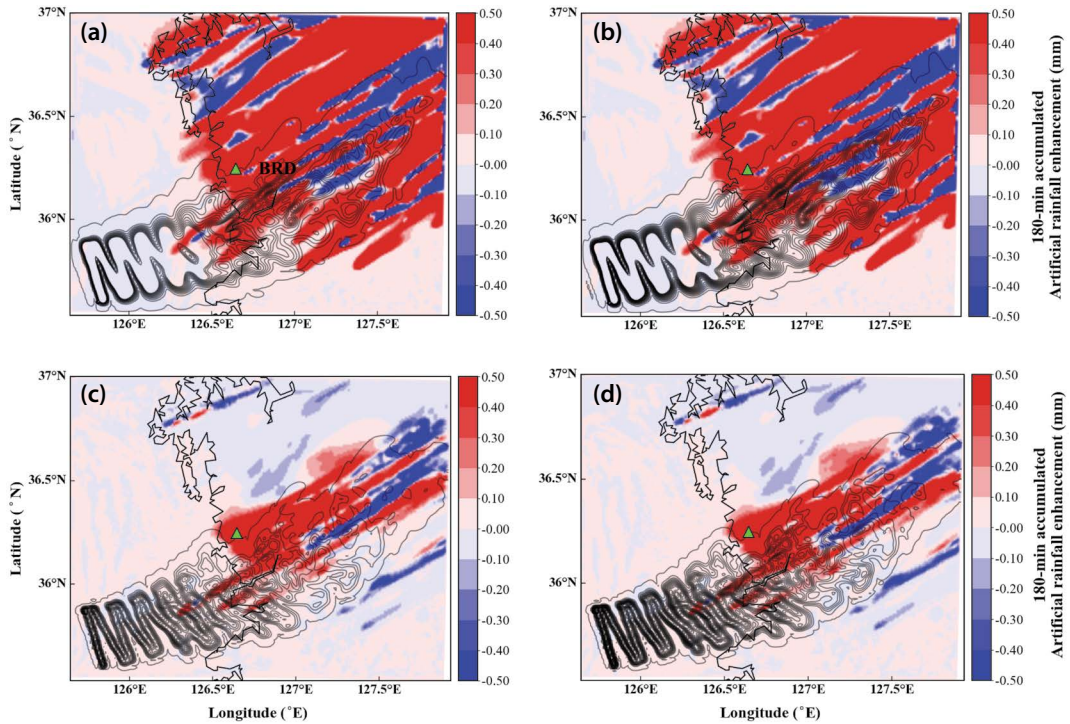


Fig. 4. Spatial distributions of the differences in 180 min-accumulated artificial rainfall enhancement (mm) between SEED and UNSD after CaCl_2 seeding for (a) Exp_D2, (b) Exp_D3, (c) Exp_A2, and (d) Exp_A3. Black lines indicate the number concentration of CaCl_2 .

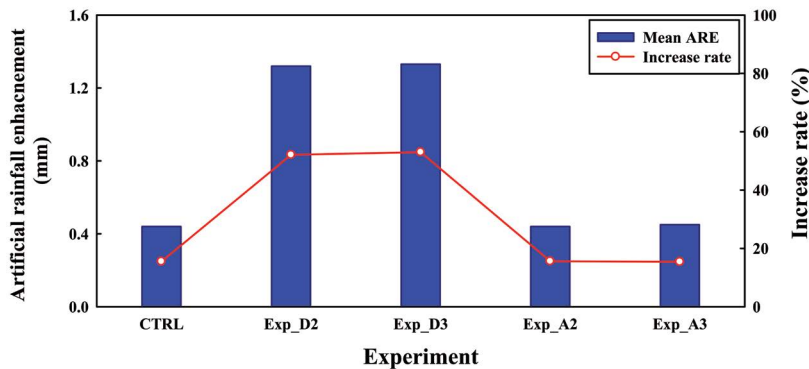


Fig. 5. The 180 min-accumulated artificial rainfall enhancement (ARE) and its increase rate due to increases (2- and 3-fold) in seeding duration and amount of CaCl_2 .

CTRL 실험에 비해 지속시간을 늘렸을 때(Exp_D2, Exp_D3)는 인공증우의 효과가 뚜렷한 반면, 시딩 양을 늘렸을 때(Exp_A2, Exp_A3)는 거의 차이가 없었

다(그림 5). 예를 들어, Exp_A2과 Exp_A3 실험에서 대상지역의 평균 인공증우량은 각각 약 0.44 mm, 0.45 mm로 나타나 CTRL 실험(0.44 mm)과 거의 같은 수

준이었으며, 두 실험의 인공증우율 또한 각각 15.6%, 15.4%로 나타나 CTRL 실험(15.5%)에 비해 변화가 나타나지 않았다. 이처럼 시딩 양 변화에 대한 실험은 너무 많은 양으로 오히려 overseeding이 발생하였을 가능성이 있으며, 과도한 시딩 양으로 인해 작은 입자가 다량으로 생성되어 강수로 성장하지 못하고 증발하여 오히려 강수량의 감소를 유발시킨 것으로 추정된다 (He *et al.*, 2022).

3.3 NaCl에 의한 인공증우량 산출 및 민감도 분석

그림 6은 시딩 물질 NaCl에 대한 60분, 120분, 180분 누적 인공증우량(SEED-UNSD)의 공간분포를 나타낸다. NaCl의 농도 및 인공증우의 공간분포는 CaCl₂의 패턴과 유사하게 대체로 보령댐 주변과 북동쪽 방향으로 매우 뚜렷하였다. 대상지역의 시간대별(60분, 120분, 180분) 누적 인공증우량은 각각 0.06 mm, 0.33 mm, 0.47 mm로 산출되었으며, UNSD 대비 인공증우율은 각각 3.97%, 17.2%, 16.9%로 나타났다. 시간대별 최고 누적 인공증우량은 0.73 mm, 2.38 mm, 3.93 mm였으며, 공간적으로 CaCl₂에 대한 실험과 유사한 영역에서 나타났다. 또한 CaCl₂와 마찬가지로, NaCl에 대한 60분, 120분 누적 인공증우량은 180분 누적 증우량에 비해 작게 모의되었다. 이외에도, NaCl에 대한 구름 혼합비의 차와 비 혼합비의 차에 대한 공간분포는 CaCl₂의 패턴과 비슷하게 인공증우량이 뚜렷한 지역에서 구름 혼합비가 감소하고 비 혼합비가 증가하는 모습을 확인할 수 있었다(그림 제외).

그림 7과 8은 NaCl 물질의 시딩 지속시간 및 양 변화에 따른 180분 누적 인공증우량의 민감도 실험 결과를 나타낸다. CTRL 실험 결과(그림 6(c))와 비교해 보면, 시딩 양을 고정하고 지속시간을 증가시킨 Exp_D2와 Exp_D3, 지속시간을 고정하고 양을 증가시킨 Exp_A2와 Exp_A3 실험 모두에서 인공증우량의 공간 패턴은 큰 변화가 나타나지 않았다(그림 7). 정량적인 수치를 보면(그림 8), Exp_D2와 Exp_D3 실험의 인공

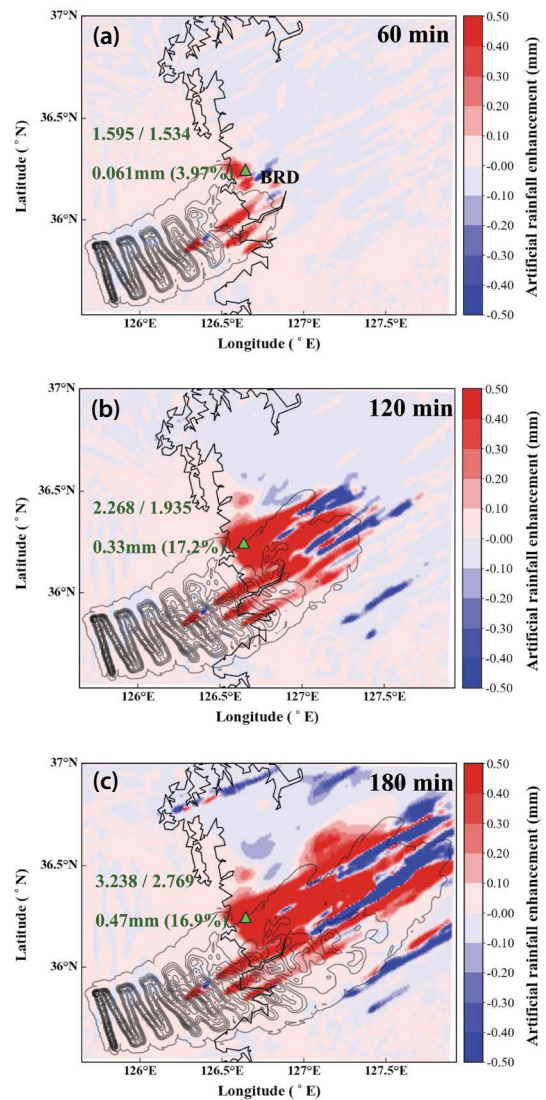


Fig. 6. Spatial distributions of the differences in (a) 60 min-, (b) 120 min-, and (c) 180 min-accumulated artificial rainfall enhancement (mm) between SEED and UNSD after NaCl seeding. Black lines indicate the number concentration of NaCl.

증우량은 각각 0.472 mm, 0.471 mm로 나타나 CTRL 실험(0.47 mm)과 차이가 없었으며, UNSD 대비 인공증우율 또한 모든 실험에서 약 16.9%로 같게 나타났다. 또한 Exp_A2와 Exp_A3에서의 인공증우량은 각각 0.476 mm, 0.483 mm로 CTRL 실험과 거의 같은 수

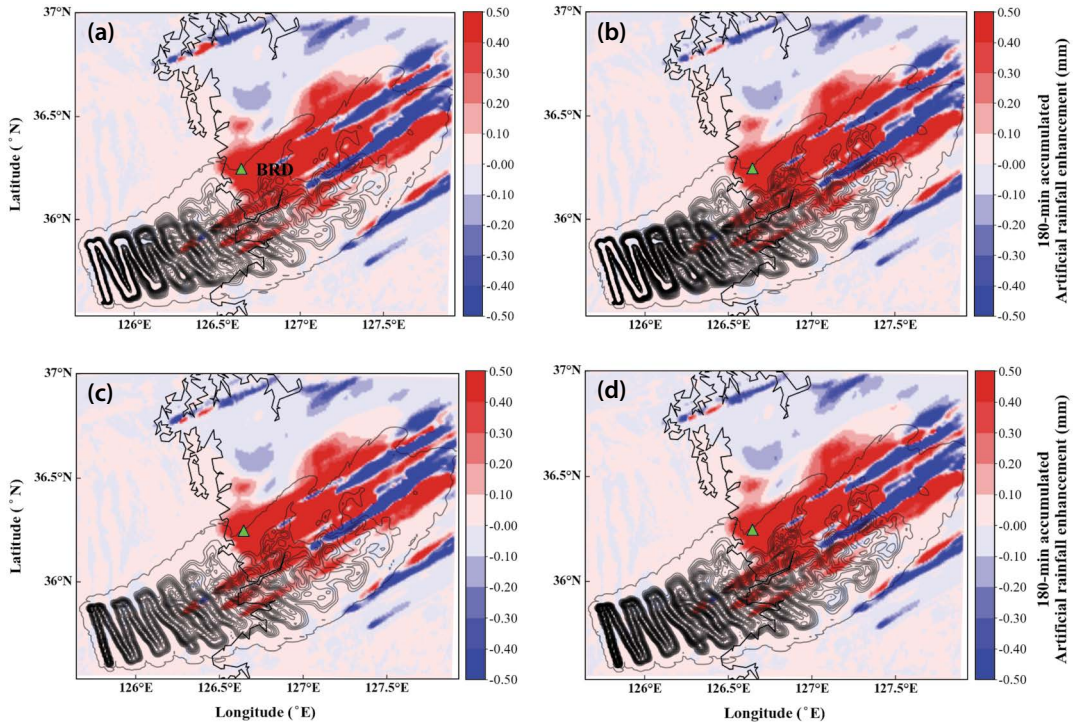


Fig. 7. Spatial distributions of the differences in 180 min-accumulated artificial rainfall enhancement (mm) between SEED and UNSD after NaCl seeding for (a) Exp_D2, (b) Exp_D3, (c) Exp_A2, and (d) Exp_A3. Black lines indicate the number concentration of NaCl.

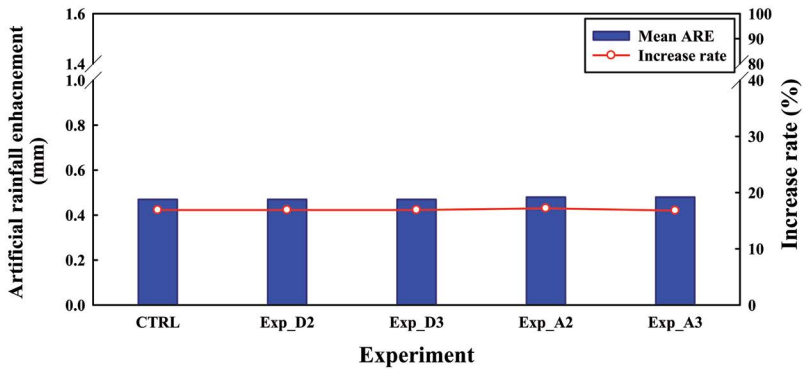


Fig. 8. The 180 min-accumulated artificial rainfall enhancement (ARE) and its increase rate due to increases (2- and 3-fold) in seeding duration and amount of NaCl.

준이었으며, 두 민감도 실험에 대한 인공증우율도 각각 17.2%, 16.8%로 나타나 CTRL 실험과 큰 차이가 없었다. CaCl₂의 민감도 실험과 달리, NaCl에 대한 모든

민감도 실험의 결과는 인공증우의 효과가 거의 나타나지 않았는데, 이것은 기본적으로 NaCl 물질의 과도한 시딩 양으로 인해 구름 입자가 비로 형성될 만

큼 충분히 성장하지 못하는 overseeding의 영향으로 추정된다(Vallero, 2014).

4. 결 론

본 연구에서는 2021년 봄철 우리나라 충청남도 보령시에 위치한 보령댐을 대상지역으로 흡습성 시딩 물질(CaCl_2 , NaCl)에 대한 인공증우 효과를 분석하였으며, 두 물질의 시딩 지속시간과 양 변화(각각 2배와 3배)에 의한 민감도 분석을 수행하였다. 전반적으로, 연구기간 동안 대상지역인 보령댐과 북동쪽에 위치한 지역(남서풍의 영향)에서 두 물질에 대한 인공증우의 효과가 가장 뚜렷하였으며, 180분 누적 인공증우량이 60분, 120분 누적 증우량에 비해 더 많았다. 대상지역에서 CaCl_2 시딩에 의한 180분 누적 인공증우량은 평균 0.44 mm (최대 2.95 mm), 인공증우율은 15.5% (최고 35.5%)였으며, NaCl 에 대한 180분 누적 인공증우량은 평균 0.47 mm (최대 3.93 mm), 인공증우율은 16.9% (최고 43.4%)로 추정되었다. 또한 CaCl_2 의 시딩 지속시간을 2배와 3배로 늘렸을 경우, 둘 다 기준 실험에 비해 약 3배의 인공증우량이 나타났으며, 지속시간을 3배로 늘렸을 때는 지속시간 2배 했을 때와 비교하여 큰 변화가 없었다(거의 유사 패턴). 이에 대한 인공증우율은 기준 실험(15.5%)에 비해 높게(각각 52.1%, 53.0%) 추정되었다. 반면, 시딩 양의 증가에 대해서는 민감한 변화가 나타나지 않았으며, 인공증우율 또한 기준 실험과 거의 같은 수준이었다. CaCl_2 와 달리, NaCl 의 시딩 지속시간과 양 모두를 증가시켰을 때는 인공증우 효과가 거의 나타나지 않았는데, 이것은 너무 많은 양을 살포함으로써 overseeding이 발생한 것으로 추정된다.

본 연구에서는 모델의 고해상도 입력자료(UM-LDAPS 초기 및 경계장, 토지피복도, 지형고도 등)와 OPC 관측 자료 활용을 통한 시딩 물질의 입자 크기 분포(Activation, Auto-conversion)를 적용하여 대상 지역의 인공증우량을 추정하고 시딩 지속시간과 양

변화에 따른 인공증우량의 민감도를 분석하였다. 또한 선행 연구와 달리 2가지 흡습성 물질(CaCl_2 , NaCl)에 대한 수치모의 및 민감도 분석 결과는 향후 인공증우 수치모의 기술의 실용화 및 발전에 기여하고, 최적의 인공강우 관측 실험조건을 설계하는 데 일조할 것으로 기대되는 바 의미 있는 연구라 사료된다. 아울러 민감도 분석을 통해 얻어지는 자료들은 최적의 인공강우 실험조건을 설정하거나, 더 나아가서는 대기질(미세먼지) 저감 및 대기환경 관리 측면에 있어 중요한 기초 정보로 활용될 것으로 기대된다. 그러나 다양한 기상조건(운량, 풍속 등)에 대한 민감도 연구를 수행하지 못하여 좀 더 객관적이고 일반적인 해석을 하기에는 다소 한계가 있었다. 이러한 한계점을 보완하여 다양한 사례 연구를 수행한다면, 대상지역에서의 구름 및 강수 발달과정 등 미세물리 현상을 좀 더 정확하게 이해할 뿐만 아니라 보다 효과적인 인공증우량을 추정하는 데 기여할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 기상청 국립기상과학원 기상조절 및 구름물리 연구(KMA 2018-00224)의 지원으로 수행되었습니다. 또한 이 논문은 2020년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2020R1A2C2011081). NaCl 물질의 입자 크기 분포별 입력자료를 생성하기 위한 OPC 관측 자료를 제공해준 국립기상과학원의 Belorid Miloslav 연구원, 황현준 연구원, 김민후 연구원께 깊이 감사드립니다.

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>

- Ahn, H., Oh, E.J., Lee, Y.-J. (2020) Verification of Accuracy of Ultra-short-term Forecast Data by the Korea Meteorological Administration for Predicting Building Performance, *KIEAE Journal*, 20(5), 143-149. <https://doi.org/10.12813/kieae.2020.20.5.143>
- Bruintjes, R.T., Salazar, V., Semeniuk, T.A., Buseck, P., Breed, D.W., Gunkelman, J. (2012) Evaluation of Hygroscopic Cloud Seeding Flares, *The Journal of Weather Modification*, 44(1), 69-94. <https://doi.org/10.54782/jwm.v44i1.85>
- 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, 8453460. <https://doi.org/10.1155/2018/8453460>
- Cho, S.-B., Song, S.-K., Moon, S.-H. (2021) Effect of Analysis Nudging Data Assimilation on the PM_{2.5} Concentration Simulation during a Haze Event in the Seoul Metropolitan Area in 2019, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(2), 231-247, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.2.23>
- Cho, S.-B., Song, S.-K., Shon, Z.-H., Moon, S.-H. (2023) Evaluation of Air Quality Simulation with a Coupled Atmosphere-Ocean Model: A Case Study on Natural Marine and Biogenic Emissions, *Science of The Total Environment*, 882, 163021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163021>
- 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.
- Čurić, M., Lompar, M., Romanic, D. (2019) Implementation of a Novel Seeding Material (NaCl/TiO₂) for Precipitation Enhancement in WRF: Description of the Model and Spatiotemporal Window Tests, *Atmospheric Research*, 230, 104638. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104638>
- 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), 8851. <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>
- Guo, J., Luo, Y., Yang, J., Furtado, K., Lei, H. (2022) Effects of Anthropogenic and Sea Salt Aerosols on a Heavy Rainfall Event during the Early-summer Rainy Season over Coastal Southern China, *Atmospheric Research*, 265, 105923. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105923>
- 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>
- Jeong, J.-H., Oh, I., Kang, Y.-H., Bang, J.-H., An, H., Seok, H.B., Kim, Y.-K., Hong, J., Kim, J. (2016) WRF Modeling Approach for Improvement of Air Quality Modeling in the Seoul Metropolitan Region: Seasonal Sensitivity Analysis of the WRF Physics Options, *Journal of Environmental Science International*, 25(1), 67-83. <https://doi.org/10.5322/JESI.2016.25.1.67>
- Jin, Y., Lee, S., Kang, T., Park, J., Kim, Y. (2023) Capacity Optimization of Rainwater Harvesting Systems Based on a Cost-benefit Analysis: A Financial Support Program Review and Parametric Sensitivity Analysis, *Water*,

- 15(1), 186. <https://doi.org/10.3390/w15010186>
- 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, 3128657. <https://doi.org/10.1155/2022/3128657>
- Kang, S.Y., Lee, J.K., Lee, Y.S., Lee, H.S. (2021) Analysis of Drought Propagation on Boryung dam Watershed Using Diverse Drought Indices, *Proceeding of 2021 Annual Conference of Korean Society of Civil Engineers*, Gwangju, 106-107.
- 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, E.H., Ahn, K.D., Lee, H.-C., Ha, J.-C., Lim, E. (2015) A Study on the Effect of Ground-based GPS Data Assimilation into Very-short-range Prediction Model, *Atmosphere*, 25(4), 623-637. <https://doi.org/10.14191/Atmos.2015.25.4.623>
- Ku, J.M., Ko, A.-R., Chae, S., Hwang, H.J., Ro, Y., Jung, W. (2020) Analysis of Cloud Seeding Experiment by Aircraft: A Case Study of an International Joint Experiment in 2019, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 20(6), 67-78, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2020.20.6.67>
- 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>
- K-water, Ministry of Environment (2020) Water and Future. https://www.kwater.or.kr/gov3/sub03/annoView.do?seq=3455&s_mid=54
- Lee, S.-J., Song, J., Kim, Y.-J. (2016) The NCAM Land-Atmosphere Modeling Package (LAMP) version 1: Implementation 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>
- Ling, J., Heng-Chi, L., Fan-You, K., Jie-Fan, Y., Zhao-Xia, H. (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>
- 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>
- Mun, J., Jeon, W., Lee, H.W. (2020) Impact of Different Meteorological Initializations on WRF Simulation During the KORUS-AQ Campaign, *Journal of Environmental Science International*, 29(1), 33-34, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JESI.2020.29.1.33>
- Rosenfeld, D., Axisa, D., Woodley, W.L., Lahav, R. (2010) A Quest for Effective Hygroscopic Cloud Seeding, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(7), 1548-1562. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2307.1>
- Song, J.I., Yum, S.S. (2019) An Assessment of the Effectiveness of Cloud Seeding as a Measure of Air Quality Improvement in the Seoul Metropolitan Area, *Atmosphere*, 29(5), 609-614, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14191/Atmos.2019.29.5.609>
- 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, S.-K., Shon, Z.-H., Kang, Y.-H., Kim, K.-H., Han, S.-B., Kang, M., Bang, J.-H., Oh, I. (2019) Source Apportionment of VOCs and Their Impact on Air Quality and Health in the Megacity of Seoul, *Environmental Pollution*, 247, 763-774. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.102>
- Vallero, D.A. (2014) *Fundamentals of Air Pollution*, 5th ed. Academic press, 683-753pp.
- Wu, Y., Wang, Y., Zhou, Y., Liu, X., Tang, Y., Wang, Y., Zhang, R., Li, Z. (2022) The Wet Scavenging of Air Pollutants through

Artificial Precipitation Enhancement: A Case Study in the Yangtze River Delta, *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1027902>

- Xue, L., Tessendorf, S.A., Nelson, E., Rasmussen, R., Breed, D., Parkinson, S., Holbrook, P., Blestrud, D. (2013) Implementation of a Silver Iodide Cloud-seeding Parameterization in WRF. Part II: 3D Simulations of Actual Seeding Events and Sensitivity Tests, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(6), 1458-1476. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0149.1>
- Yoon, S.S. (2019) Adaptive Blending Method of Radar-based and Numerical Weather Prediction QPFs for Urban Flood Forecasting, *Remote Sensing*, 11(6), 642, 1-19. <https://doi.org/10.3390/rs11060642>

Authors Information

- 강채연 (제주대학교 지구해양융합학부 지구해양전공 석사과정)
(cogd0709@jejunu.ac.kr)
- 송상근 (제주대학교 지구해양과학과 교수)
(songsk@jejunu.ac.kr)
- 문수환 (국립기상과학원 기상응용연구부 연구원)
(shmoon9677@korea.kr)
- 임윤규 (국립기상과학원 기상응용연구부 연구사)
(imyunkyu@korea.kr)
- 장기호 (국립기상과학원 기상응용연구부 연구관)
(khchang@korea.kr)
- 채상희 (국립기상과학원 기상응용연구부 연구원)
(youto0901@korea.kr)