



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

기상 및 대기질 모델링을 이용한
인공강우 민감도 분석과 미세먼지
영향 평가

姜 綵 蓮

濟州大學校 大學院

地球海洋融合學部 地球海洋專攻

2024年 2月



기상 및 대기질 모델링을 이용한 인공강우 민감도 분석과 미세먼지 영향 평가

이 논문을 이학 석사 학위논문으로 제출함

강 채 연

제주대학교 대학원

지구해양융합학부 지구해양전공

지도교수 송 상 근

강채연의 이학 석사 학위논문을 인준함

2023년 12월

심사위원장

문 재 홍



위 원

송 상 근



위 원

김 태 균



목 차

List of Tables	ii
List of Figures	iv
요약	1
제 1 장 서 론	3
제 2 장 재료 및 방법	6
2.1. 대상지역 및 사례일 선정	6
2.2. 모델 구성 및 입력자료	11
2.2.1. 기상 모델	11
2.2.2. 대기질 모델	21
제 3 장 결과 및 고찰	25
3.1. 계절별 인공강우 효과 및 민감도 분석	25
3.1.1. 봄 사례	27
3.1.2. 여름 사례	33
3.1.3. 가을 사례	38
3.1.4. 겨울 사례	43
3.1.5. 계절별 인공강우 민감도 분석 및 검증	48
3.2. 인공강우에 의한 미세먼지 영향 평가	56
3.2.1. 시·공간 영향 분석	56
3.2.2. 미세먼지 농도 변화에 대한 구성성분 분석	64
제 4 장 요약 및 결론	68
참 고 문 헌	70
Abstract	77

List of Tables

Table 1. Relationship between counts of forecast/event pairs for the categorical verification situation as displayed in contingency table.	10
Table 2. Details of the grid and physical options used in the WRF model for 1-h seeding.	17
Table 3. Same as Table 2 except for 6-h seeding.	17
Table 4. Summary of the sensitivity experiments to changes in seeding amount and duration by CaCl ₂	20
Table 5. Details of the grids and physical options used in the WRF and CMAQ models.	24
Table 6. Mean values of the accumulated artificial rainfall (mm), cloud and rain water mixing ratio (g/kg) for 1-h and 6-h seeding in spring.	32
Table 7. Mean values of the accumulated artificial rainfall (mm), cloud and rain water mixing ratio (g/kg) for 1-h and 6-h seeding in summer.	37
Table 8. Mean values of the accumulated artificial rainfall (mm), cloud and rain water mixing ratio (g/kg) for 1-h and 6-h seeding in autumn.	42
Table 9. Mean values of the accumulated artificial rainfall (mm), cloud and rain water mixing ratio (g/kg) for 1-h and 6-h seeding in winter.	47
Table 10. Comparison of mean vlaues of the accumulated artificial rainfall and increase rate (%) by seeding for 1-h and continuous 6-h by season.	

.....	50
Table 11. The 180 min-accumulated artificial rainfall (mm) and its increase rate due to increases (2- and 3-fold) in seeding duration and amount of CaCl ₂	51
Table 12. Statistical evaluation of the meteorological variables (air temperature, wind speed, relative humidity, and precipitation) between the observed and 1-h cloud seeding model-simulated values at 8 meteorological monitoring sites (as shown in Fig. 1) during the simulation period.	54
Table 13. Same as Table 12 except for 6-h seeding.	55
Table 14. Changes in artificial rainfall, PM ₁₀ , PMC, and PM _{2.5} concentrations during 6-h of continuous cloud seeding.	60
Table 15. Averaged spatiotemporal reduced concentrations of PM ₁₀ , PMC, and PM _{2.5} and decrease rate to PM ₁₀	65
Table 16. Changes in SIA, SOA, POA, and Insoluble concentrations during 6-h of continuous cloud seeding.	67

List of Figures

Fig. 1. The model domain for WRF simulations and the geographical locations of 8 meteorological monitoring sites (4 ASOS (red circles) and 4 AWS (orange circles)) and Boryeong dam (BRD, green triangle).	7
Fig. 2. Nested model domain for WRF (solid frame) and CMAQ (dotted frame) simulations and Boryeongdam (BRD, green triangle).	8
Fig. 3. Flow chart of WRF-ARW modeling system (ARW, 2017).	12
Fig. 4. Experimental designs for cloud seeding.	20
Fig. 5. Flow chart of CMAQ modeling system.	22
Fig. 6. Surface synoptic chart seasonal cases at 2021.	26
Fig. 7. Spatial distribution of the difference in accumulated artificial rainfall (mm) between SEED and UNSD from the start of seeding to the end of seeding and 60, 120, and 180 minutes after the seeding end CaCl ₂ material in spring. Black lines indicate the number concentration of CaCl ₂	29
Fig. 8. Spatial distribution of the difference in accumulated artificial rainfall (mm) between SEED and UNSD from the start, 3-h seeding, to the end, and 60, 180, and 300 minutes after the seeding end after the seeding end CaCl ₂ material in spring. Black lines indicate the number concentration of CaCl ₂	30
Fig. 9. Spatial distribution of the difference (SEED-UNSD) in accumulated artificial rainfall, cloud and rain water mixing ratio in spring.	31
Fig. 10. Spatial distribution of the difference in accumulated artificial rainfall (mm) between SEED and UNSD from the start of seeding to the end of seeding and 60, 120, and 180 minutes after the seeding end CaCl ₂ material in summer. Black lines indicate the number concentration of CaCl ₂	34

- Fig. 11. Spatial distribution of the difference in accumulated artificial rainfall (mm) between SEED and UNSD from the start, 3-h seeding, to the end, and 60, 180, and 300 minutes after the seeding end after the seeding end CaCl_2 material in summer. Black lines indicate the number concentration of CaCl_2 35
- Fig. 12. Spatial distribution of the difference (SEED-UNSD) in accumulated artificial rainfall, cloud and rain water mixing ratio in summer. ... 36
- Fig. 13. Spatial distribution of the difference in accumulated artificial rainfall (mm) between SEED and UNSD from the start of seeding to the end of seeding and 60, 120, and 180 minutes after the seeding end CaCl_2 material in autumn. Black lines indicate the number concentration of CaCl_2 39
- Fig. 14. Spatial distribution of the difference in accumulated artificial rainfall (mm) between SEED and UNSD from the start, 3-h seeding, to the end, and 60, 180, and 300 minutes after the seeding end after the seeding end CaCl_2 material in autumn. Black lines indicate the number concentration of CaCl_2 40
- Fig. 15. Spatial distribution of the difference (SEED-UNSD) in accumulated artificial rainfall, cloud and rain water mixing ratio in autumn. 41
- Fig. 16. Spatial distribution of the difference in accumulated artificial rainfall (mm) between SEED and UNSD from the start of seeding to the end of seeding and 60, 120, and 180 minutes after the seeding end CaCl_2 material in winter. Black lines indicate the number concentration of CaCl_2 44
- Fig. 17. Spatial distribution of the difference in accumulated artificial rainfall (mm) between SEED and UNSD from the start, 3-h seeding, to the end, and 60, 180, and 300 minutes after the seeding end after the seeding end CaCl_2 material in winter. Black lines indicate the number concentration of CaCl_2 45

Fig. 18. Spatial distribution of the difference (SEED-UNSD) in accumulated artificial rainfall, cloud and rain water mixing ratio in winter.	46
Fig. 19. Spatial distributions of the differences in 180 min-accumulated artificial rainfall (mm) between SEED and UNSD after CaCl ₂ seeding for (a) Exp_D2, (b) Exp_D3, (c) Exp_A2, and (d) Exp_A3.	51
Fig. 20. Surface synoptic chart at 18 UTC on 29 April, 2021.	58
Fig. 21. Time series plot of the observed precipitation, PM ₁₀ , and PM _{2.5} at meteorological and air quality monitoring site (near BRD) during the study period (from 00 UTC on April 25 to 00 UTC on April 29).	58
Fig. 22. Spatial distribution of the difference (SEED-UNSD) artificial rainfall (mm), PM ₁₀ and PM _{2.5} concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) in study period.	59
Fig. 23. Temporal variation in artificial rainfall and the concentrations of PM ₁₀ and PM _{2.5} in the affected areas.	62
Fig. 24. Temporal variation in artificial rainfall and the concentrations of PM ₁₀ and PM _{2.5} in the unaffected areas.	63
Fig. 25. Bar plot of the decrease in concentration of PMC and PM _{2.5} as PM ₁₀ concentration decrease over time.	65
Fig. 26. Pie chart of each component (SIA, SOA, POA, other) decrease rate (%) to the reduction in PM _{2.5} concentration.	66

기상 및 대기질 모델링을 이용한 인공강우 민감도 분석과 미세먼지 영향 평가

강 제 연

제주대학교 대학원 지구해양융합학부 지구해양전공

요약

본 연구에서는 충청남도 보령시에 위치한 보령댐을 대상으로 시딩물질별(AgI, CaCl₂) 2021년 계절별 인공강우 효과를 비교분석하고, 시딩 시간 및 시딩 지속시간, 양 변화에 따른 민감도 분석을 수행하였다. 또한 연속시딩에 의한 미세먼지 영향분석 및 평가하였다. 위의 분석은 시딩물질 살포를 고려하지 않은 실험(UNSD)과 고려한 실험(SEED) 두 가지 실험을 통해 수행되었다. 1시간 시딩의 경우, SEED 실험과 UNSD 실험간의 시딩 종료 후 평균 180분 누적 인공증우량(SEED-UNSD)은 봄, 여름, 가을, 겨울 순으로 높게 나타났다(각각 0.45 mm, 0.31 mm, 0.15 mm, 0.02 mm). 6시간 연속시딩의 경우, 시딩 종료 후 300분 누적(시딩 시작부터 총 11시간) 인공증우량은 봄(2.30 mm)에 가장 높게 산출되었으며, 다음으로 겨울(1.30 mm), 여름(1.22 mm), 가을(0.97 mm) 순으로 나타났다.

먼저 시딩 시간 변화에 따른 민감도 분석 결과, 6시간 연속시딩이 1시간 시딩에 비하여 봄 약 4~65배, 여름 5~21배, 가을 7~11배, 겨울에는 약 65배 이상의 인공증우 효과가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한 시딩 지속시간 및 양을 변화시킨 결과, 지속시간을 증가시킨 실험(Exp_D2, Exp_D3)에서 시딩 종료 후 180분 누적 인공증우량이 각각 1.44 mm, 1.43 mm로 산출되어 기준실험(0.45 mm)에 비해 약 3배 이상 인공증우 효과가 나타났다. 반면에 시딩 양을 변화시킨 실험(Exp_A2, Exp_A3)에서는 기준실험과 거의 유사한 수준의 인공증우 효과가 나타났다. 이는 너무 많은 양을 살포하여 overseeding이 발생한 것으로 추정된

다. 인공강우에 따른 미세먼지 농도 분석 결과, 인공강우 효과가 뚜렷하게 나타난 지역에서 미세먼지 농도 감소가 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 영항 지역에서의 평균 인공증우량이 0.02 mm ~ 0.19 mm로 산출되었을 때 동일 지역에서 미세먼지 농도 감소 정도는 PM₁₀의 경우 약 -1.95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ~ -9.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자(PMC)는 -0.96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ~ -4.32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 미세입자(PM_{2.5})는 -0.99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ~ -5.24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도의 수준으로 나타났다(평균 저감율: 각각 26.7%, 29.7%, 24.7%). 이를 통해 여러 선행연구 결과와 유사하게 조대입자가 인공강우에 의한 농도 변화가 크게 나타나는 것을 확인하였다. 그러나 미세입자의 저감율도 무시할 수 없는 수준으로 나타나 PM_{2.5} 농도 감소 시 각 구성성분별 차지하는 저감율을 분석한 결과, 대부분 수용성 에어로졸(주로 SIA, SOA 등)이 약 55% 정도로 나타나 인공강우에 의한 영향을 크게 받는 것을 사료된다.

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, 기후 및 지형적인 원인으로 인하여 대부분 여름철에 강수가 집중되어 특히 봄철에는 물 부족 및 가뭄 현상이 심각하게 나타나고 있다(K-water and Ministry of Environment, 2020). 이를 해결하기 위한 방법으로 댐건설, 지하수개발, 강변여과수, 해수담수화 등 수자원 확보를 위한 많은 기술 중에서도 최근 인공강우 기상조절 기술이 환경 및 경제적으로 가장 효과적인 대안으로 제시되었다(Cha et al., 2019). 인공강우는 구름은 존재하지만 구름씨 역할을 하는 빙정핵이나 구름응결핵(CCN, cloud condensation nuclei)이 적어 빗방울로 성장하지 못할 때, 인위적으로 시딩물질을 살포하여 구름의 발달 및 응결 과정을 강화하여 강수를 증가시키는 기술을 의미한다(Kim et al., 2020). 0°C 이하의 한랭구름에서는 빙정핵 역할을 하는 요오드화은(AgI), 드라이아이스를 살포하여 구름 속 과냉각 수적을 얼음으로 바꿔 빙정을 생산 및 강화시켜 강수를 발생시킨다. 또한 0°C 이상의 온난구름에서는 응결핵 역할을 하는 흡습성 물질(염화칼슘(CaCl₂), 염화나트륨(NaCl) 등)을 살포하여 충돌·병합 과정을 촉진시켜 강수를 유발한다. 이러한 인공강우 기상조절 기술을 적용한 다양한 실험(지상 및 항공)이 과거부터 수행되어 왔음에도 불구하고, 관측의 어려움이나 장비의 부족에 의해 인공강우 실험의 효과를 명확하게 평가하는데 한계가 있다. 따라서 관측의 한계점을 보완하고 인공강우 실험설계에 중요한 적정조건을 최적화하기 위하여 고해상도 수치예측모델을 활용한 인공강우 기술개발 연구의 필요성이 증대하고 있다.

인공강우 수치모의 연구는 컴퓨터 기술 및 수치모델의 예측 성능이 향상됨에 따라 기상모델의 구름미세물리과정에 시딩 관련 모듈을 추가 및 적용하여 인공강우의 효과를 정량적으로 분석하는 연구가 활발하게 수행되어 왔다(Xue et al., 2013; Chae et al., 2018; Cha et al., 2019; Ku et al., 2020). Xue et al. (2013)은 Thompson 미세물리방안에 AgI 모듈을 적용한 실시간 자료동화 시스템

(RTFDDA - WRF, Real-Time Four Dimensional Data Assimilation - Weather Research & Forecasting)을 수행하여 최대 2.0 mm의 인공증우 효과를 나타낸 바 있다. Chae et al. (2018)에 따르면, 기존의 Morrison 미세물리방안(Morrison et al., 2019)에 AgI 모듈을 적용하여 시딩 기간의 바람장을 고려한 인공증설을 모의하였다. 또한 Cha et al. (2019)에서는 2008~2018년 동안 대관령 지역의 항공 실험에서 AgI에 의한 인공증설량이 약 0.1 cm ~ 1.8 cm, CaCl₂에 의한 인공증우량이 0.5 mm ~ 2 mm로 나타났다. 최근 2019년에는 강원도 평창과 강릉 일대에서 수행된 연구에서 AgI 물질을 시딩한 이후에 구름 입자 크기별 평균 수농도가 최대 82% 증가한 것을 확인한 바 있다(Ku et al., 2020).

우리나라의 인공강우 수치모의 연구는 주로 국가연구기관을 중심으로 진행되어왔다. 국립기상과학원에서 강수 발달의 충돌·병합 과정을 수치모의 가능하도록 미세구름조절모델(MCM, modified cloud modification v1.0)을 개발하여 인공강우 수치모델 개발의 기반을 구축한 바 있다(장기호 등, 2008). 2013년 이후로는 기상모델 내에서 Morrison 구름미세물리방안을 수정하여 시딩물질(AgI, CaCl₂) 입자의 살포를 적용할 수 있도록 인공강우 모듈을 개발 및 적용하였다. 이를 통해 구름과 강수 발달에 대한 영향 및 인공증우 효과를 정량적으로 분석하는 연구를 진행하여 왔다(Chae et al., 2018). 하지만 인공강우 수치모의에서 시딩물질(빙정핵, 응결핵)의 크기 분포(size distribution)에 대한 정량적인 이해가 부족하여 구름미세물리과정을 정확하게 이해하고 해석하는데 어려움이 있다. 뿐만 아니라 기존의 인공강우 수치모의 연구가 대부분 짧은 시간(1시간) 동안 수행하도록 모델을 수행하여, 대기확산에 따른 인공증우 효과를 분석하는데 한계가 있다(Hill, 1979). 따라서 최적화된 구름미세물리방안을 고해상도 기상모델에 적용하여 시딩에 의한 구름 및 강수 과정을 보다 정확하게 이해하고, 정확한 인공증우량 산출 및 여러 시간 연속적으로 구름시딩에 의한 인공증우 효과를 분석하는 연구가 필요하다.

인공강우 수치모의는 대부분 수자원 확보, 안개 소산, 태풍의 세력 약화 등의 가뭄 해소 및 기상 방재의 목적으로 주로 수행되어 왔다. 최근 들어, 다양한 원인에 의하여 고농도 미세먼지 현상이 발생되고 있다(Peterson et al., 2019; Hur et al., 2021). 이런 고농도 미세먼지 오염을 해결하기 위한 대처방안으로 인공강

우 연구의 중요성이 거론된 바가 있다(Song and Yum, 2019). 이에 따라, 인공강우의 세정효과에 의한 미세먼지 저감에 관한 관측 및 수치모의 연구가 수행되었다(Lim et al., 2022; Ku et al., 2023). Lim et al. (2022)에 따르면, 황사 발생 사례에 대하여 우리나라 중부지방을 중심으로 인공강우 수치모의에 의해 인공증우량이 산출되었고, 이에 대해 PM₁₀ 농도가 최대 22% 감소하였으며 넓은 범위에 걸쳐 유효하게 나타났다. 그러나 여전히 수치모델의 불확실성과 오차, 습식침정 과정 모의 등의 한계가 존재하여 보다 정확한 인공강우 수치모의가 필요하다고 언급하였다. 또한 우리나라 서해 지역을 대상으로 한 인공강우 실험에서 시딩 이후 구름, 이슬비, 강수 입자의 수농도가 증가하였으며, 이로 인해 PM₁₀의 농도가 감소하였는데, 이는 자연 강수와 시딩에 의한 인공강우의 복합적인 효과가 원인임을 밝힌 바 있다(Ku et al., 2023).

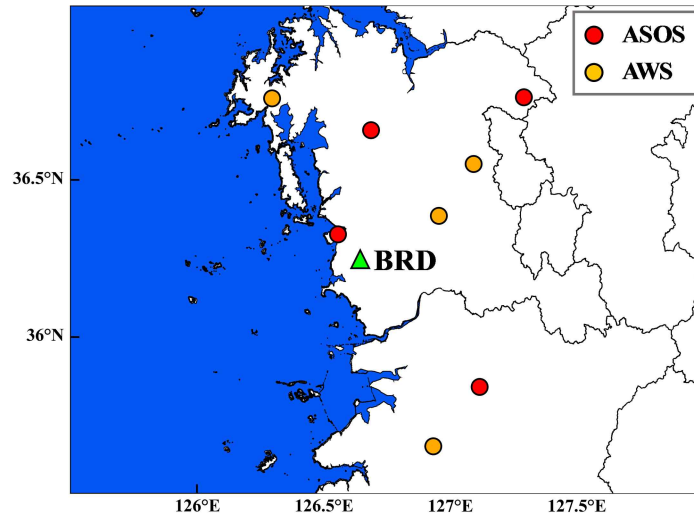
본 연구에서는 저기압 및 전선이 한반도를 통과하는 계절별 사례를 선정하여 우리나라 중부지방(특히, 충청남도 보령댐)을 대상으로 보다 정교한 미세물리과정을 고해상도 기상모델에 적용하여 다양한 물질(AgI, CaCl₂)의 시딩에 의한 구름 및 강수 과정 변화를 정확하게 이해하고, 인공증우 효과를 정량적으로 산출하였다. 또한 연속적으로 장시간 시딩물질을 살포하여 인공강우 효과를 비교분석하였다. 추가적으로 인공증우 효과가 가장 뚜렷하게 나타난 봄철을 대상으로 시딩 지속시간 및 양 변화 따른 민감도 분석을 수행하여 최적화된 적정조건을 산출하였다. 이러한 인공강우 수치모의를 통해 산출된 인공증우량의 세정효과에 의하여 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5} 등) 농도에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

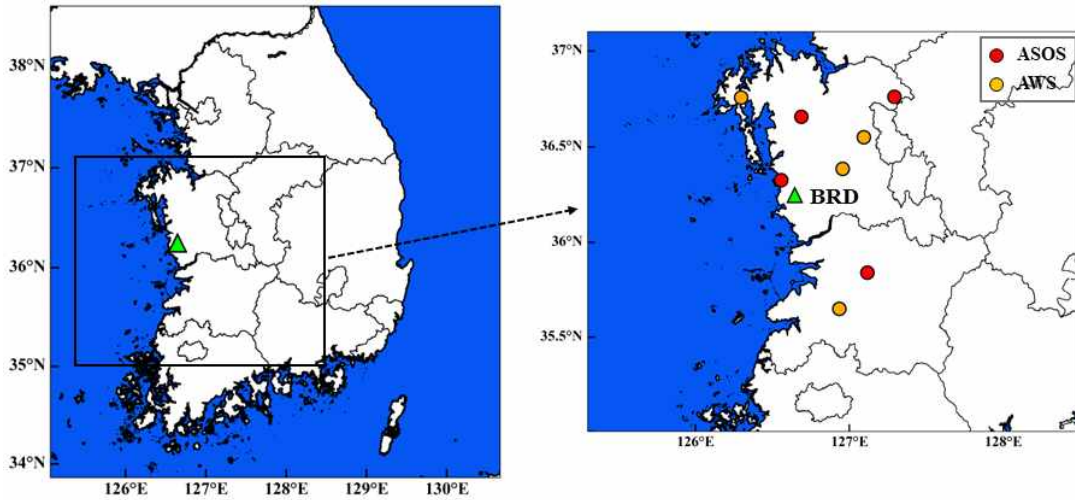
2.1. 대상 지역 및 사례일 선정

본 연구에서는 우리나라 충청남도 보령시에 위치한 보령댐을 중심으로 다양한 시딩물질(AgI, CaCl₂)을 이용하여 1시간 시딩과 대기확산을 고려한 연속적인(6시간) 시딩을 적용한 인공강우 수치모의를 수행하였다(Fig. 1). 충청남도 지역은 2000년 이후에 심각한 수준의 가뭄이 자주 발생했으며, 생·공용수를 공급하는 역할을 하는 보령댐에서도 강수량 및 유입량 부족 등의 한계로 수자원 이용에 어려움이 있다고 밝혀진 바 있다(Kang et al., 2021). 본 연구에서 인공강우 수치모의에 의한 계절별 효율적인 연구 기간을 선정하기 위하여 2021년 지상일기도를 분석하여 한반도에 저기압/전선이 통과하며 강수가 발생한 사례를 선정하였다. 각 계절별 사례일(평균 강수량)은 봄철은 4월 3일(1.90 mm), 여름철은 7월 3일(2.72 mm), 가을철은 9월 7일(0.2 mm), 마지막으로 겨울철은 1월 21일(1.75 mm)로 선정하였다.

보령댐 지역을 대상으로 한 인공강우 수치모의를 통해 인공증우량을 산출하고, 이를 통해 세정효과에 의한 미세먼지의 영향 평가를 수행하였다(Fig. 2). 인공강우에 의한 미세먼지 영향을 분석하기 위한 연구 사례일은 저기압·전선이 우리나라를 통과하며, 강수량이 1~3 mm 이내이고, PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도가 다소 높을 때(각각 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 내외), 두 가지 조건을 동시에 충족하는 사례일인 4월 27일을 포함하는 4월 25일 00 UTC ~ 29일 00 UTC, 총 4일에 대하여 분석하였다. 본 연구에 이용된 인공강우 수치모의 기상 및 대기질 모델에 대한 구성은 2.2절에 상세하게 제시하였다.



(a) 1-h cloud seeding



(b) 6-h continuous cloud seeding

Fig. 1. The model domain for WRF simulations and the geographical locations of 8 meteorological monitoring sites (4 ASOS (red circles) and 4 AWS (orange circles)) and Boryeong dam (BRD, green triangle).

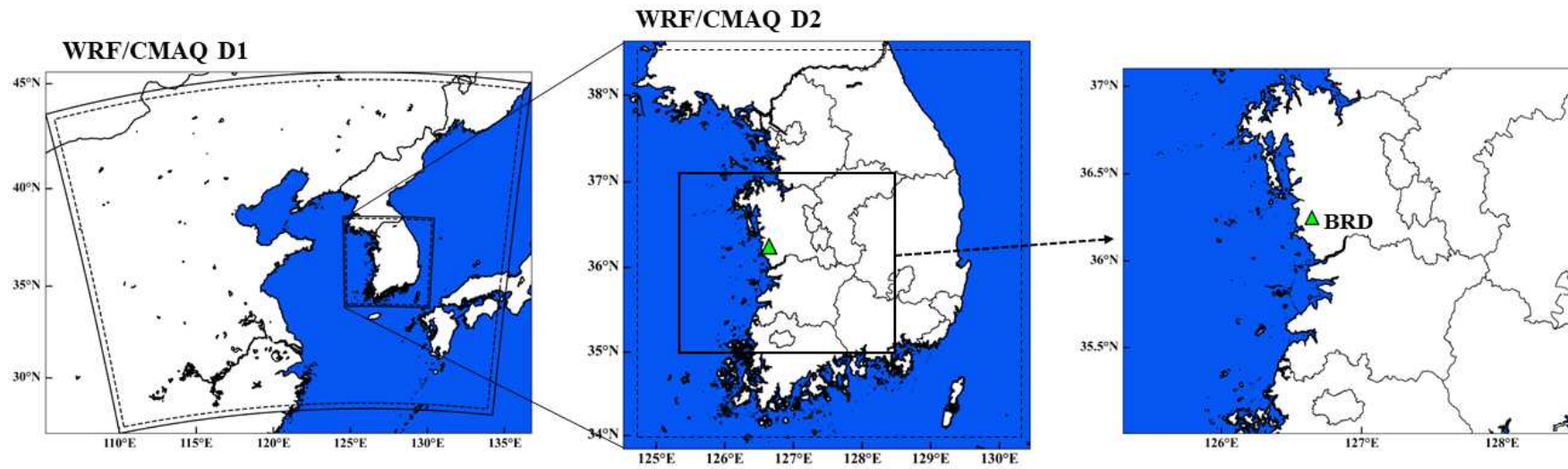


Fig. 2. Nested model domain for WRF (solid frame) and CMAQ (dotted frame) simulations and Boryeongdam (BRD, green triangle).

본 연구의 수치모의 검증을 위해, 연구기간 동안 대상지역(충남 보령댐) 주변의 4개 종관기상관측소(ASOS, automated synoptic observing system)와 4개 자동기상자료(AWS, automatic weather station)의 기상요소(기온, 풍속, 상대습도, 강수량)에 대한 통계분석을 수행하였다(Fig. 1의 관측 지점). 기상요소 중 기온, 풍속, 상대습도는 관측값 및 모델값에 대해 일치도(IOA, index of agreement), 평균 제곱근 편차(RMSE, root mean square error), 평균 편차(MBE, mean bias error)를 계산하여 분석에 이용하였다. IOA는 1에 가까울수록 모델값과 관측값 사이에 일치도가 높음을 의미하고(식 (1)), RMSE와 MBE는 0에 가까울수록 오차가 작음을 의미한다(식 (2)와 (3)). 또한 양(+의 MBE는 과대모의, 음(-)의 MBE는 과소모의를 의미한다.

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|M_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)}{n} \quad (3)$$

여기서, P_i 와 O_i 는 시간별 모델값과 관측값, \bar{O} 는 관측값의 평균을 나타내고, N 은 자료의 개수를 나타낸다. 또한 강수량의 경우는 선행 연구에서 강수 검증을 위해 널리 사용되고 있는 탐지확률(POD, probability of detection)과 공정임계지수(ETS, equitable threat score), 정확도(Accuracy)를 이용하였다(Lee et al., 2016; Jee and Kim, 2017; Gayatri et al., 2022, Kang et al., 2023). POD와 Accuracy는 0과 1 사이의 값을, ETS는 -1/3에서 1 사이의 값을 가지며 모두 1에 가까울수록 완벽한 예보임을 의미한다(식 (4)와 (5), (7)). 관측과 모델예측 모두에서 강수가 나타나면 H (Hits), 관측에서만 나타나면 M (Misses), 모델예측에서는 강수가 나타났지만, 관측에서는 나타나지 않은 경우를 F (False alarms), 마지막으로 모두 강수가 나타나지 않은 경우를 C (Correct negatives)로 분할하여 산출하였다 (Table 1). 이러한 방법은 임계값(threshold)에 따라 강수 유무를 판단하는데 사용

되며, 총 4개의 임계값(≥ 0.1 mm/hr, ≥ 0.5 mm/hr, ≥ 1 mm/hr, ≥ 2 mm/hr)으로 구분하였다. 분할표를 근거로 POD와 ETS는 다음과 같은 식으로 계산하였으며, He는 우연에 의한 맞힘을 의미한다(식 (6)).

$$\text{POD} = \frac{H}{H+M} \quad (4)$$

$$\text{ETS} = \frac{H - He}{H+M+F+He} \quad (5)$$

$$\text{He} = \frac{(H+M)(H+F)}{H+M+F+C} \quad (6)$$

$$\text{Accuracy} = \frac{H+C}{H+M+F+C} \quad (7)$$

Table 1. Relationship between counts of forecast/event pairs for the categorical verification situation as displayed in contingency table.

Observed	Model	
	Yes	No
Yes	H (Hits)	M (Misses)
No	F (False alarms)	C (Correct negatives)

2.2. 모델 구성 및 입력자료

2.2.1. 기상 모델

본 연구에서 이용된 인공강우 수치예측모델은 중규모 기상현상에서 전 세계적으로 널리 사용되고 있는 WRF-ARW (Weather Research & Forecasting model - Advanced Research WRF) version 3.8 모델이다(Skamarock and Klemp, 2008). WRF 모델은 미국 NCAR (National Center of Atmospheric Research)와 공동으로 개발하였으며(<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users>), 기상과 관련된 연구뿐만 아니라 협업 연구 모두 적용할 수 있도록 설계된 모델이다. 이 모델은 NMM (Non-hydrostatic mesoscal model) 코어와 ARW 코어의 두 가지 코어로 구분된다. NMM 코어는 NCEP에서 개발하여 주로 미국지역에 적합하게 설계되어 현업용으로 주로 이용되고, ARW 코어는 NCAR에서 개발하여 범용적으로 사용이 가능하다는 특징이 있다(Bernardet et al., 2009). 또한 이 모델은 병렬계산에 효과적이고 최신 기술을 이용한 수치계산을 모의할 수 있는 물리항을 가지고 있어서 이상적인 모의가 가능하며, 자료동화 및 예보 연구 등 다양한 연구 목적에 맞게 사용이 가능하다. WRF-ARW는 완전 압축성 비정수계(Fully compressible non-hydrostatic) 방정식을 이용하는 모델이며, 수평 격자는 Arakawa-C 격자체계를 이용하고, 연직 격자는 Eulerian 질량 좌표계를 사용한다(Skamarock and Klemp, 2008). Fig. 3은 WRF 모델링 시스템의 전체적인 흐름도를 나타낸다. WRF 모델은 전처리 과정인 WPS (WRF Preprocessing System) 과정과 모델링 수행 단계로 구분된다. 먼저 WPS 과정은 GEOGRID, UNGRIB, METGRID의 3가지 단계로 구성되어있다. GEOGRID는 모델링 영역을 선정하는 단계로, 지형 경계 자료를 생성하고, UNGRIB는 GFS (Global Forecast System), FNL (Global Final Analysis), UM (Unified Model) 등과 같은 전지구 기상자료로부터 기상장을 생성한다. 마지막으로 METGRID는 GEOGRID 과정을 통해 생산된 지형자료와 UNGRIB를 통해 생산된 기상자료를 수평적으로 내삽하여 WRF 모델의 수행 단계에 입력자료로 이용된다. 이렇게 전처리 과정(WPS)을 통해 생성된 초기·경계 자료는 모델 수행단계의 입력자료로 이용되고, REAL 단계를 거쳐 연직적인 내삽과정을 통해 모델의 초기·경계 조건의 입력장이 생성된다. 마지막으로, WRF

모델 수행 과정에서는 REAL 과정에서 생성된 초기·경계 조건은 수치적분하여 사례일의 기상상태를 모의한다(WRF-ARW V3: User's Guide, 2017).

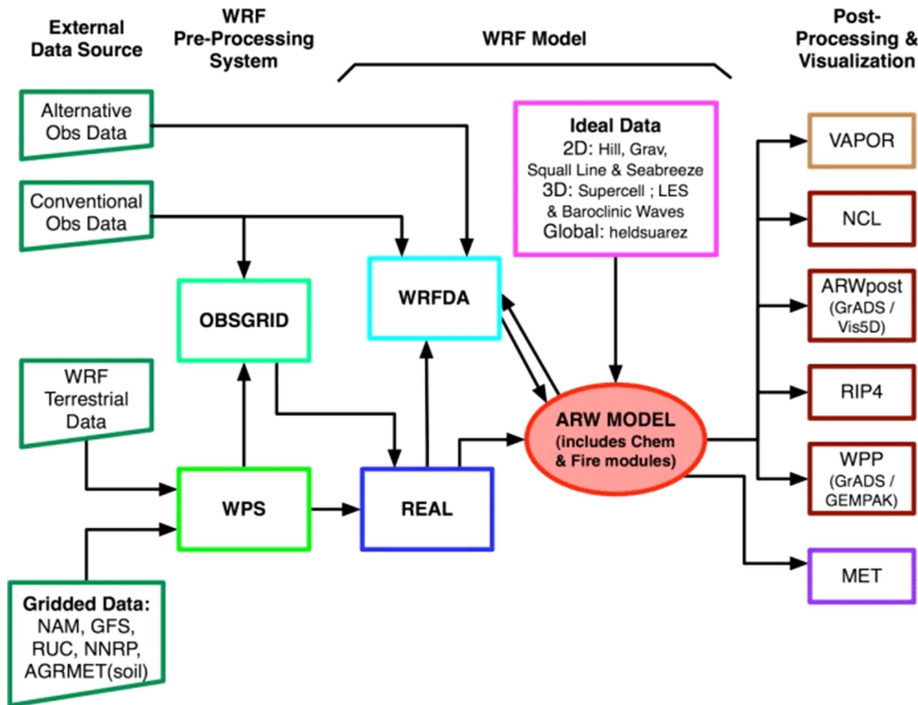


Fig. 3. Flow chart of WRF-ARW modeling system (ARW, 2017).

실제 인공강우 항공 실험에서 수행하는 시딩 시간과 동일한 조건으로 1시간 시딩과 6시간 연속시딩의 인공증우 효과를 분석하였다. 이를 위해 수치모의 영역을 Fig. 1과 같이 설정하였으며, 각각의 물리옵션에 대하여 다음과 같이 구성하였다. 먼저, 1시간 시딩에 대한 WRF 모델의 초기·경계 자료는 기상청 현업 운영 중인 3시간 간격의 고해상도 기상장으로 국지 규모에 대한 UM-LDAPS (Unified Model-Local Data Assimilation and Prediction System)로 수평해상도 1.5 km 자료를 이용하였다. UM-LDAPS 기상장은 고해상도 자료이지만, 인공강우를 구현할 수 있는 시딩물질에 대한 미세물리과정의 모듈을 포함하고 있지 않아서 본 연구에서는 고해상도 기상자료를 이용하여 모델 내에 기존의 미세물리과정 모듈을 수정·적용시켜 인공증우량을 산출할 수 있도록 설계하였다. 수치모의 수행 영역은 Fig. 1(a)와 같이 LCP (Lambert conformal projection) 좌표계를 토대로 보령

댐을 중심으로 충청남도 일대를 모두 포함하는 영역으로 1개의 도메인(200×160)으로, 수평해상도는 1 km로 설정하였다. 여러 선행연구에서는 도메인의 경계에서 오는 불안정을 줄이고 수치적분의 안정화를 위하여 등지격자(nesting) 기법을 활용한 모델링을 수행해왔지만, 이는 모델의 초기·경계장의 수평해상도가 대부분 0.25° 및 1° 로 낮기 때문으로 사료된다(Song et al., 2019; Cho et al., 2023, Sun et al., 2023). 본 연구에 이용되는 UM-LDAPS 기상장은 수평해상도 1.5 km의 고해상도 자료이므로 단일 도메인(1 km)과의 해상도 차이가 작기 때문에 수치모델링의 불안정은 크지 않을 것으로 판단하여 nesting을 하지 않고 모델링을 수행하였다(Chae et al., 2018; Yoon, 2019; Ku et al., 2020; Kang et al., 2023).

모델 수행에서 대기 상하층의 기상변화를 보다 정확하게 모의하기 위해 연직으로 총 40개 층을 구성하였다(Sigma level = 1.000, 0.995, 0.985, 0.973, 0.960, 0.949, 0.934, 0.917, 0.897, 0.880, 0.869, 0.858, 0.847, 0.836, 0.825, 0.814, 0.804, 0.793, 0.783, 0.773, 0.762, 0.752, 0.742, 0.732, 0.723, 0.713, 0.703, 0.694, 0.684, 0.675, 0.555, 0.483, 0.412, 0.371, 0.298, 0.200, 0.185, 0.121, 0.015, 0.000). 기상모델 수행에서 대상지역인 충남 보령댐 주변의 지리·지형적 특성을 상세하게 반영하기 위하여 고해상도 토지피복도(1 sec) KLAND와 지형고도(1 sec) ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)를 이용하였다. 이외에도 기상모델의 예측정확도를 향상시키기 위해 대기-해양 상호작용 고려에 대한 고해상도($0.25^\circ \times 0.25^\circ$) 해수면온도 자료인 FNMOC (Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center)을 이용하였다.

Table 2는 1시간 시딩의 효과를 분석하기 위한 인공강우 수치모의의 상세 물리적 옵션을 나타낸다. 즉, 토양 온도, 토양 수분, 부분 적설 등 지표면 물리상태의 변화에 따른 기상예측의 정확도를 향상시키기 위해 Noah-LSM (Noah land surface model)을 적용하였으며, 대기경계층 모수화는 YSU (Yonsei University) Scheme을 이용하였다(Hong et al., 2006). 장파 및 단파 복사과정은 각각 RRTM (Rapid Radiative Transfer Model)과 NASA Goddard 방안을 이용하였다(Chou and Suarez, 1994). 마지막으로, 미세물리과정은 여러 선행연구에서 많이 사용되고 있는 Morrison Scheme (Morrison et al., 2009)을 적용하였는데, 이는 대기 수상에 대하여 수농도와 질량농도를 예단할 수 있는 특징을 가지고 있다. 본 연구

에서는 기존의 Morrison Scheme에 시딩물질(AgI, CaCl₂ 등)에 대한 모듈을 적용하여 수정된 Morrison Scheme (MMS, Modified Morrison Scheme)을 이용하였다. MMS는 시딩물질별 로그노말(Log-normal) 수식에 따라 입자별 수농도(number concentration)를 산출하여 강수 및 얼음 입자를 증가시켜 인공강우 수치모의를 수행하였다(Abdul-Razzak and Ghan, 2000; Lim et al., 2022).

WRF 모델 내에서 MMS를 적용하는 과정은 5가지의 물리/역학 프로그램(mp_morr.F, mp_driver.F, solve_em.F, phy_init.F, start_em.F)에 시딩물질별(AgI, CaCl₂) 관련 모듈을 추가 및 적용하여 모델을 수행하였다. 먼저, mp_morr.F 단계에서는 시딩물질별 Bimodal 형태의 입자 크기 분포(size distribution)를 통해 1 μm를 기준으로 작은 입자에 대해서는 “Activation” 과정과 큰 입자에 대해서는 “Auto-conversion” 과정으로 구분하여 각각의 물질에 대한 연산과정(입자 크기 분포 및 농도, 기하평균 반경, 기하 표준편차, 보정 계수 등)을 적용하였다. 입자 크기 분포에 대하여 Activation은 과포화에 의하여 생성되는 구름을 계산하는 과정이며, Auto-conversion은 구름방울 또는 충분히 큰 응결핵이 곧바로 빗방울로 바뀌는 과정을 의미한다(Rosenfeld et al., 2010; Guo et al., 2022). 입자 크기 분포에 따라 모델 내에서 선택적으로 계산되어 응결핵이 빗방울로 성장하지 못할 만큼 작을 경우에 인위적으로 응결핵 역할을 하는 물질을 살포하여 물방울의 성장 및 충돌·병합과정을 촉진시켜 인공강우를 발생할 수 있도록 모듈을 수정 및 적용하였다. 이때 시딩물질(AgI, CaCl₂)의 입자 크기에 따른 기하평균 반경과 기하 표준편차는 선행연구를 참고하여 아래에 제시한 식 (1)과 (2)를 통해 산출하였다(Abdul-Razzak and Ghan, 2000; Bruintjes et al., 2012). AgI 물질의 경우, 작은 입자(Activation)에서 각각 0.052×10^{-6} m와 2.04, 큰 입자(Auto-conversion)에서는 1.3×10^{-6} m와 2.5를 이용하였다. CaCl₂ 물질의 경우는 작은 입자에서 각각 0.135×10^{-6} m, 1.142이고, 큰 입자에서는 0.5×10^{-6} m, 2.511을 각각 이용하였다. mp_driver.F에서는 연산과정이 적용된 mp_morr.F 단계를 불러와 solve_em으로 전달하여 solve_em.F 과정에서 기존의 미세물리과정에서 시딩에 대하여 추가로 수정된 변수(연산과정)를 이용하여 수치적분을 수행한다. 다음으로 phy_init.F에서 시딩의 제어변수(seeding time, seeding height level, longitude, latitude, seeding 물질의 양)를 읽어들인다. start_em.F 단계에서 WRF 초기 입력

장 생성 및 시딩물질 살포에 대한 모델링을 수행하여 인공증우 효과를 분석할 수 있다.

① 기하평균 반경

$$\frac{dn}{dr} = \sum_{i=1}^I \frac{N_i}{\sqrt{2\pi \ln \sigma_i}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{\ln^2(r/r_{mi})}{\ln^2 \sigma_i}\right) \quad (1)$$

N_i = The total number concentration of aerosol mode i (cm⁻³)

r_{mi} = Geometric mean dry radius of aerosol mode i

σ_i = Geometric mean standard deviation of aerosol mode i

r = Radius of aerosol particle

D = Diameter of aerosol particle

μ_i = Geometric mean dry diameter of aerosol mode I

② 기하 표준편차

$$\sigma = \exp \left[\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\ln r_i - \ln \mu_g)^2}{n}} \right] \quad (2)$$

다음으로, 연속시딩에 대한 효과를 분석하기 위하여 시딩물질을 6시간 동안 연속적으로 살포하기 때문에 수평해상도 1 km로 설정하는 것은 대기확산을 고려할 수 없다는 한계가 있어서 남한 영역을 모두 포함하는 수평해상도 3 km의 단일 도메인(160 × 170)으로 구성하였다. 그리고 1시간 시딩과 비교하기 위하여 동일하게 보령댐을 대상으로 확장시켜 분석하였다(Fig. 1(b)). 또한 모델 수행에서 초기·경계 자료는 기상청 현업 운영 중인 6시간 간격의 고해상도 기상장인 전지

구 규모의 UM-GDAPS (Unified Model-Global Data Assimilation and Prediction System)로 수평해상도 10 km 자료를 이용하였다. 이외의 모델링에 이용된 물리 옵션은 1시간 시딩과 동일하게 구성하였으며, 상세한 격자 정보 및 초기·경계조건은 Table 3에 제시하였다.

Table 2. Details of the grid and physical options used in the WRF model for 1-h seeding.

D1	
Horizontal grid	200 × 160
Horizontal resolution	1 km
Vertical layers	40
Initial & Boundary Layer	UM-LDAPS (3 hour)
Microphysics	Modified Morrison Scheme (MMS)
Radiation (Long/Short)	RRTM (Mlawer et al., 1997)/ Goddard shortwave scheme (Chou and Suarez, 1994)
Land surface	Noah LSM (Ek et al., 2003)
Land-use / Topography	KLAND/ASTER (1s)
Planetary boundary layer	YSU (Hong et al., 2006)
Sea surface temperature	FNMOG (0.25°, 6 hour)

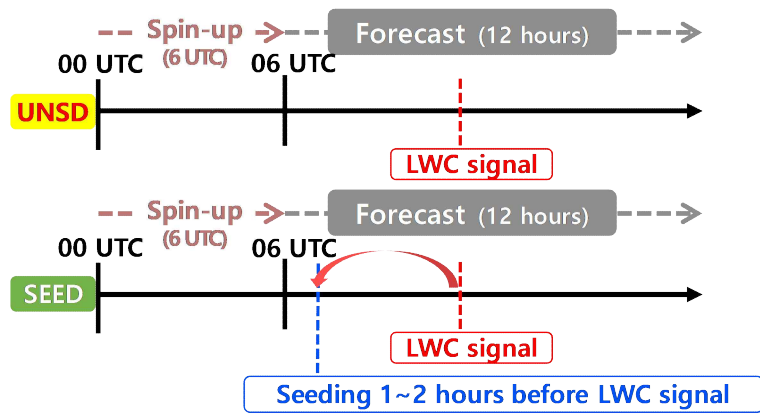
Table 3. Same as Table 2 except for 6-h seeding.

D1	
Horizontal grid	160 × 170
Horizontal resolution	3 km
Vertical layers	40
Initial & Boundary Layer	UM-GDAPS (6 hour)
Microphysics	Modified Morrison Scheme (MMS)
Radiation (Long/Short)	RRTM (Mlawer et al., 1997)/ Goddard shortwave scheme (Chou and Suarez, 1994)
Land surface	Noah LSM (Ek et al., 2003)
Land-use / Topography	KLAND/ASTER (1s)
Planetary boundary layer	YSU (Hong et al., 2006)
Sea surface temperature	FNMOG (0.25°, 6 hour)

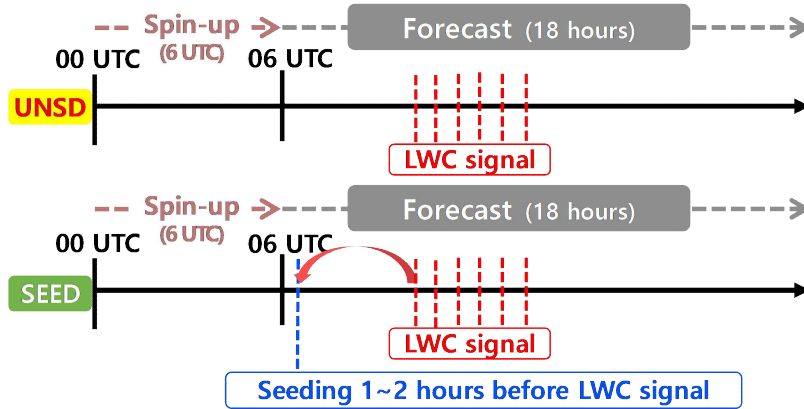
본 연구에서는 두 실험(1시간 및 6시간 연속시딩)에서 인공증우량을 산출하기 위해서 MMS를 적용한 후 시딩물질의 살포가 고려되지 않은 실험(UNSD)과 고려된 실험(SEED)으로 구성하였으며, 1시간 시딩은 6시간의 초기적응시간(spin-up time)을 포함하여 총 18시간에 대해 수행하였다(Fig. 4(a)). UNSD 실험 결과에서 임의의 건조 내에 포함된 구름 수분을 액화시켰을 때의 단위 체적당 물의 질량을 의미하는 액체수함량(LWC, liquid water content)이 0.1 g/m^3 이상으로 나타났을 때, 1~3 km 고도에서 최댓값이 나타나는 시간과 위·경도를 계산하여 물질별 시딩 위치를 산출하여 SEED 실험을 수행하였다. 6시간 연속시딩은 1시간 시딩보다 더 많은 시간에 걸쳐 시딩하므로 6시간의 spin-up을 포함하여 총 24시간에 대해 수치모의하였다(Fig. 4(b)). 6시간 연속시딩의 경우, UNSD 수행시 각 시간의 모든 고도에서 LWC가 0.1 g/m^3 이상으로 나타난 처음 시간대부터 연속적으로 6시간 시딩물질을 살포하도록 SEED 실험을 설정하였다. 또한, 시딩물질의 살포 위치는 보령댐을 중심으로 u, v 성분을 이용하여 강수에 영향을 미치는 반응속도에 따라 구름에서 반응하는 시간이 AgI는 1시간 이내, 흡습성 물질인 CaCl_2 는 최소 1시간 이상이라는 선행연구를 참고하여(Cha et al., 2019), AgI 물질은 LWC 신호(signal)가 감지된 시점부터 1시간 전의 위치, CaCl_2 물질은 2시간 전의 위치를 찾아 시딩물질을 살포하도록 설계하였다. 최종적으로, SEED 실험과 UNSD 실험의 차이(SEED-UNSD)를 계산하여 인공증우량을 산출하였고, UNSD 대비 인공증우율($\text{SEED-UNSD}/\text{UNSD} \times 100$)을 계산하였다. 위와 같은 모델설계를 통하여 선정된 사례일은 1시간 시딩의 경우, 봄: 2021년 4월 3일 00 UTC ~ 18 UTC, 여름: 2021년 7월 3일 12 UTC ~ 4일 06 UTC, 가을: 2021년 9월 7일 06 UTC ~ 8일 00 UTC, 겨울: 2021년 1월 21일 06 UTC ~ 22일 00 UTC이다. 6시간 연속시딩의 경우에는 봄, 여름, 가을, 겨울 순으로 2021년 4월 3일 00 UTC ~ 4일 00 UTC, 2021년 7월 3일 12 UTC ~ 4일 12 UTC, 2021년 9월 7일 06 UTC ~ 8일 06 UTC, 2021년 1월 21일 06 UTC ~ 22일 06 UTC로 선정하였다.

시딩 양은 실제 인공강우 항공 실험 및 선행 연구(Ku et al., 2023)를 참고하여 AgI는 194.4 g/hr , CaCl_2 는 $2,160 \text{ g/hr}$ 로 설정하였다. 인공강우 효과를 분석하기 위해 시딩 종료 후 3시간까지는 흡습성 물질이 구름과 강수를 형성시키는데 충분한 시간이라는 선행연구를 참고하여(Jung et al., 2022), 1시간 시딩의 경우는

시딩이 시작되는 시점부터 1시간 후를 종료 시점으로 하고, 종료된 이후 60분, 120분, 180분간 누적된 강수량을 산출하여 분석하였다. 6시간 시딩의 경우에는 시딩이 시작되는 시점부터 시딩 3시간 후, 시딩 6시간 후를 종료 시점, 시딩이 종료된 이후 60분(시딩 시작 이후부터 총 7시간), 180분(총 9시간), 300분간(총 11시간) 누적된 강수량을 분석하였다. 뿐만 아니라, 1시간 시딩 결과 인공증우 효과가 가장 뚜렷하게 나타났던 봄철을 대상으로 CaCl_2 물질을 이용하여 지속시간 및 양 변화에 따른 인공증우량의 민감도를 분석하였다. 즉, 시딩 양을 고정하고 지속시간을 2배와 3배로 조절한 실험(Exp_D2, Exp_D3)과 시딩 지속시간을 고정하고 양을 2배 및 3배로 조절한 실험(Exp_A2, Exp_A3)으로 구분하였다. 이러한 여러 실험의 결과와 1시간 시딩에 대한 기준 실험(CTRL)의 결과를 비교분석하여 인공증우 효과를 평가하였다. 민감도 실험에 대한 상세한 정보는 Table 4에 제시하였다.



(a) 1-h seeding



(b) 6-h continuous seeding

Fig. 4. Experimental designs for cloud seeding.

Table 4. Summary of the sensitivity experiments to changes in seeding amount and duration by CaCl₂.

	Amount (g/hr)	Duration (min)
CTRL	2,160	60
Exp_D2	2,160	120
Exp_D3	2,160	180
Exp_A2	4,320	60
Exp_A3	6,480	60

2.2.2. 대기질 모델

인공강우에 의한 미세먼지 농도 변화를 분석하기 위해 수행한 대기질 수치모델은 미국 환경보호국(US EPA, environmental protection agency)에서 개발한 CMAQ (Community Multiscale Air Quality Modeling System) version 5.3.2 모델이다. CMAQ 모델은 3차원 광화학 수송 모델로 대류권 내의 오존이나 미세먼지를 포함하는 주요 가스상 및 입자상 대기오염물질을 모의할 수 있으며, 다양한 규모(Multi-scale)에 대한 동시 수치모의가 가능하다(Byun and Ching, 1999; Byun and Schere, 2006). 이 모델은 여러 모듈 구조로 구성되어 있어서 각 전처리 프로그램 간의 호환이 쉽고 효율적으로 모델을 업데이트 시킬 수 있다는 장점이 있다. 또한, 수치모의 과정에서 화학 메커니즘, 수평확산 및 수직확산 등 대기오염물질의 이동을 계산하는 chemical solver를 선택적으로 사용이 가능하다. CMAQ 모델의 구성 및 실행 과정은 Fig. 5와 같으며, 5개의 주요 전처리 과정과 1개의 화학수송모델(CCTM, CMAQ chemical transport model)로 구성되어 있다. 기상 모델링을 통해 생성된 기상자료를 CCTM 수행에 필요한 입력자료 형식으로 전환하는 MCIP (Meteorology-Chemistry Interface Preprocessor) version 5.1, 광해리율 산출을 위한 JPROC (Photolysis Rate Processor), 초기농도 조건을 생성하는 ICON (Initial CONditions processor)과 경계농도 조건을 생성하는 BCON (Boundary CONditions processor), 해양 및 육지의 지표 형태를 구분하는 OCEAN 등이 있다. CCTM은 이러한 5가지 전처리 과정과 배출량 자료를 입력자료로 구성하여 대기오염물질의 화학반응, 수송·이류, 침적 과정을 고려하여 매 시간별 대기오염물질 농도를 계산한다(U.S. EPA, 1999, <https://www.cmascenter.org/cmaq/>).

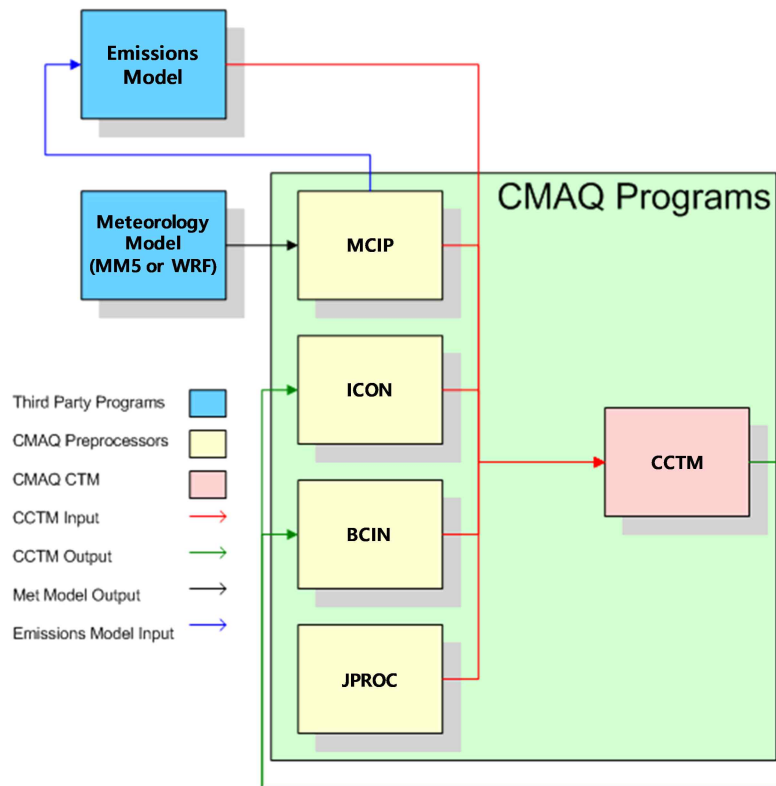


Fig. 5 Flow chart of CMAQ modeling system.

대기질 모델을 수행하기 위해 필요한 대상영역의 기상장은 WRF 기상모델의 결과를 이용하였다. 또한 미세먼지 농도 변화를 정확하게 분석하기 위해서는 중국 등 거대 배출원으로부터의 외부 수송 효과를 고려해야 하므로 전체 도메인(영역)을 중국, 우리나라를 포함하는 동아시아 영역으로 설정하였다(Fig. 2). 즉, 동아시아 영역의 도메인 1(1D, 270 × 211 (9km))과 남한 영역의 도메인 2(1D, 169 × 172 (3km))로 구성하였다. 동아시아 영역에서 격자규모의 구름을 모의하기 위하여 적운모수화 Kain-Frisch Scheme을 적용하였으며, 모든 도메인에 수정된 Morrison Scheme (MMS)을 적용하였다(Table 5[A]). 대기질 모델의 도메인은 기상 모델 결과의 경계 오차를 줄이기 위하여 MCIP 전처리 과정을 통해 WRF 도메인을 기준으로 각 도메인을 동서남북 각각 3 격자씩 줄여서 설정 및 CMAQ 모델의 입력자료 형태로 변환하였다. MCIP 과정의 경우, 인공강우에 의한 미세먼지 농도 변화를 살펴보기 위해 기상 모델의 UNSD 및 SEED 실험을 각각 CMAQ 모델에 적용하여 두 실험(CMAQ_{UNSD}, CMAQ_{SEED})의 미세먼지 농도 차이

를 계산하였다. 이외에도 CMAQ 모델의 초기·경계조건 구성을 위해 동아시아 영역에 대해서는 EPA에서 제공하는 대기오염물질 프로파일 자료를 이용하였고 (Stockwell et al., 1990), 남한 영역에 대해서는 상위 도메인의 모델링 결과를 ICON 및 BCON 모듈에 입력장으로 사용하여 초기·경계 입력자료를 생성하였다. CMAQ 모델링에 사용된 화학 메커니즘은 CB6r3 (Carbon Bond 6, Luecken et al., 2019)이고, 에어로졸 산정 모듈은 AERO7, 3D Advection은 WRF_CONS, 수평 및 연직확산은 Multiscale과 ACM2_M3Day Scheme을 사용하였다(Table 5[B]).

본 연구에서 배출량 자료의 효과적인 처리를 위해서 MATLAB 프로그램을 이용하여 인위적 및 자연적 배출량의 합으로 구성되었으며, 각각의 영역에 맞추어 재격자화 하였다(Cho et al., 2021). 동아시아 영역의 인위적 배출량은 EDGAR-HTAP (Emission Database for Global Atmospheric Transport of Air Pollution) version 6.1 자료로 수평해상도는 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 이며, $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_x , CO, NMVOC, BC, OC, NH_3 등의 배출 인벤토리를 사용하여 월별 형태로 자료를 제시한다(Carmichael et al., 2002). 남한 영역의 인위적 배출량은 환경부 국가미세먼지정보센터에서 제공되는 CAPSS (Clean Air Policy Supporting System) 2019년 자료를 사용하였으며, 배출 인벤토리는 TSP, PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_x , SO_x , VOC, CO, BC, NH_3 가 있다. CAPSS 자료는 주로 연료 연소, 생산 공정, 이동 오염원, 폐기물 처리, 산불 및 화재 부문의 분류 코드(SCC, source classification codes)에 따라 1년 단위로 산정된 배출량(kg/year)이며, 공간적으로는 전국을 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 격자별로 산출되어 있다. 이외에도 전체 연구 영역에 대한 자연 배출량(Biogenic emission) 부분은 MEGAN v2.1 모델을 적용하였으며 (Guenther et al., 2012), 식생자료 및 기상변화에 따른 시간별 산정된 배출량을 이용하였다. 위와 같은 과정 처리를 통해 최종적으로 각 모델링 영역에 포함된 인위적 및 자연적 배출량을 합산하여 CMAQ-ready emission input을 생성하였다.

본 연구에서는 강수 및 미세먼지 농도를 이용하여 적정조건을 충족하는 사례 일에 대해 기상 및 대기질 수치모의를 수행했으며, 초기적응기간 48시간과 예보기간(강수 발생 기간 및 이후 분석 기간 포함) 48시간으로 총 4일에 대해 수치모의를 수행하였다. 기상 모델 UNSD 및 SEED 실험의 결과를 CMAQ에 적용하여

인공강우 세정효과로 인한 미세먼지 농도 변화를 분석하였으며, 시딩이 시작된 이후부터 시딩이 종료되는 시점까지 시간별로 강우강도 및 미세먼지 농도를 산출하여 인공증우 효과와 인공강우에 의한 미세먼지 농도 변화를 분석하였다.

Table 5. Details of the grids and physical options used in the WRF and CMAQ models.

[A] WRF

	D1 (Northeast Asia)	D2 (South Korea)
Horizontal grid	270 × 211	169 × 172
Horizontal resolution	9 km	3 km
Vertical layers	40	
Initial & Boundary Layer	UM-GDAPS (6 hour)	
Microphysics	Modified Morrison Scheme (MMS)	
Cumulus	Kain-Frisch Scheme for D1 (Kain, 2004)	
Radiation (Long/Short)	RRTM (Mlawer et al., 1997)/ Goddard shortwave scheme (Chou and Suarez, 1994)	
Land surface	Noah LSM (Ek et al., 2003)	
Land-use / Topography	KLAND/ASTER (1s)	
Planetary boundary layer	YSU (Hong et al., 2006)	
Sea surface temperature	FNMOG (0.25°, 6 hour)	

[B] CMAQ

	D1 (Northeast Asia)	D2 (South Korea)
Horizontal grid	267 × 208	166 × 169
Horizontal resolution	9 km	3 km
Vertical layers	39	
Chemical mechanism	Cb6r3_aq	
Aerosol mechanism	AERO7	
Gas-phase chemistry	Euler Backward Iterative (EBI) solver	
3-D advection	WRF_CONS	
Diffusion (horizontal/vertical)	Multiscale/ACM2_M3Dry	

3. 결과 및 고찰

3.1. 계절별 인공강우 효과 및 민감도 분석

2.1절에서 제시하였듯이, 본 연구에서는 계절별 인공강우 효과를 분석하기 위해 지상일기도를 참고하여 한반도에 저기압/전선 통과 사례를 선정하였다(Fig. 6). 2.2.1절에서 언급한 바와 같이, 1시간 시딩은 봄 2021년 4월 3일 00 UTC ~ 18 UTC, 여름철 2021년 7월 3일 12 UTC ~ 4일 06 UTC, 가을 2021년 9월 7일 06 UTC ~ 8일 00 UTC, 겨울 2021년 1월 21일 06 UTC ~ 22일 00 UTC이다. 6시간 연속시딩의 경우는 봄, 여름, 가을, 겨울 순으로 2021년 4월 3일 00 UTC ~ 4일 00 UTC, 2021년 7월 3일 12 UTC ~ 4일 12 UTC, 2021년 9월 7일 06 UTC ~ 8일 06 UTC, 2021년 1월 21일 06 UTC ~ 22일 06 UTC이다. 4계절 모두 온대성저기압이 우리나라를 통과하면서 강수가 발생한 날을 사례일로 선정하여, UNSD와 SEED 실험의 강수량과 인공증우량(SEED-UNSD)을 산출하였다. 계절별 사례에 대한 분석은 2.2.1절에서 설명한 바와 같이 1시간 시딩 실험에 대해서는 시딩 시작부터 총 5시간 동안 즉, 시딩 시작 시간, 시딩 종료 시간, 시딩 종료 후 60분, 120분, 180분에 대하여 누적 인공증우량을 산출하였다. 6시간 연속시딩 실험은 시딩 시작 시간, 3시간 시딩 시간, 시딩 종료 시간(6시간 시딩 시간), 시딩 종료 후 60분(시딩 시작 이후부터 총 7시간 누적), 180분(총 9시간 누적), 300분간(총 11시간 누적)에 대한 누적 인공증우량을 계산하였다. 누적 증우량에 대한 공간 분포에서 검정색 실선은 시딩물질의 살포 및 이동 경로를 의미하고, 각 계절별 1시간 시딩과 6시간 연속시딩 결과의 인공증우량 산출 및 두 실험의 비교분석을 통해 인공증우 효과를 평가하였다.

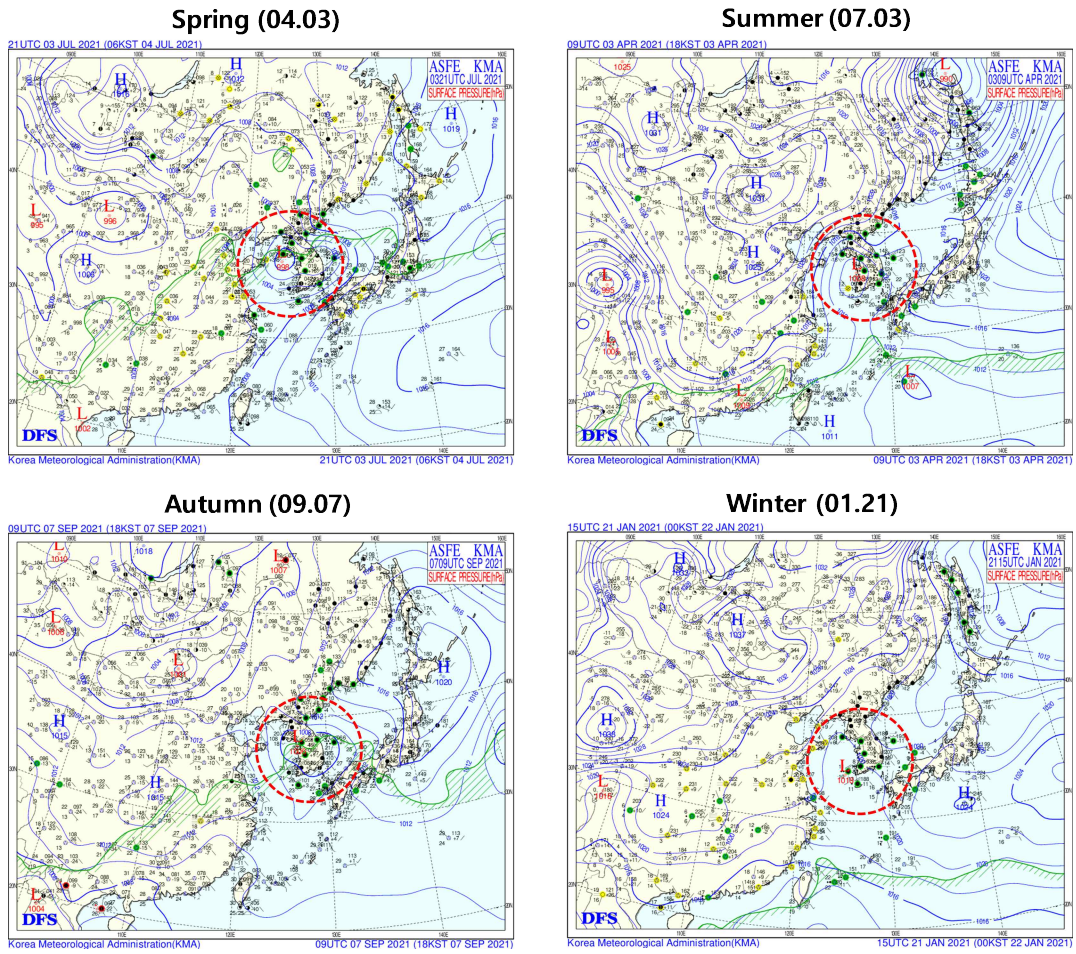


Fig. 6. Surface synoptic chart seasonal cases at 2021.

3.1.1. 봄 사례

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 1시간 및 6시간 연속시딩에 대한 인공강우 수치모의를 통한 인공증우량의 공간분포를 각각 나타낸다. 전반적으로 시딩물질의 이동경로를 따라 인공증우의 효과가 뚜렷하게 나타남을 확인할 수 있다. 먼저, 1시간 동안 CaCl_2 물질을 살포하여 수치모의한 결과(Fig. 7), 시딩 종료 후 60분, 120분, 180분의 UNSD 실험의 공간 전체 평균 누적강수량은 2.0 mm, 2.28 mm, 3.14 mm이고, SEED의 평균 누적 강수량은 2.04 mm, 2.57 mm, 3.59 mm로 산출되었다. 이에 따라 SEED와 UNSD의 차이인 인공증우량(SEED-UNSD)은 각각 0.03 mm, 0.30 mm, 0.45 mm이며, 이에 대한 인공증우율은 각각 1.6%, 13.1%, 14.4%로 산출되었다. 또한 CaCl_2 물질을 6시간 연속시딩을 수행하였을 경우(Fig. 8), 시딩 종료 후 60분(시딩 시작 이후부터 총 7시간), 180분(총 9시간), 300분(총 11시간)의 UNSD의 평균 누적강수량은 각각 3.91 mm, 4.49 mm, 5.74 mm이고, SEED는 각각 5.89 mm, 6.57 mm, 8.03 mm로 이에 따른 인공증우량(증우율)은 각각 1.89 mm (50.6%), 2.08 mm (46.4%), 2.30 mm (40.0%)로 산출되었다.

인공증우 효과를 보다 상세히 분석하기 위하여 구름 혼합비(Cloud water mixing ratio)와 비 혼합비(Rain water mixing ratio)의 공간분포를 추가로 분석하였다(Fig. 9). 1시간 시딩에 대하여 시딩 종료 후 180분 누적 인공증우량, 구름 혼합비, 비 혼합비를 분석하였으며(Fig. 9(a)), 6시간 연속시딩에 대하여는 시딩 종료 후 300분에 대해 분석하였다(Fig. 9(b)). 두 실험의 공간분포에서 알 수 있듯이, 보령댐을 중심으로 대부분의 지역에서 인공증우 효과가 뚜렷하게 나타났으며, 일부 지역에서는 감우 효과가 나타났다. 또한 인공증우 효과가 뚜렷하게 나타나는 지역에서 구름 혼합비가 감소하고(음(-)의 값) 비 혼합비가 증가하는(양(+))의 값을 보였다. 이는 보령댐 부근에서 시딩물질에 의한 moisture flux가 증가됨에 따라서 구름방울이 성장하고, 성장된 구름방울이 빗방울로 전환되는 과정을 통해 구름 혼합비 감소, 비 혼합비 증가가 나타난 것으로 사료된다. 1시간 및 6시간 연속시딩에 의한 인공증우 효과, 구름 혼합비 및 비 혼합비를 정량적으로 분석하여 Table 6에 나타내었다. 먼저, 1시간 시딩의 결과는 평균 인공증우량이 0.45 mm일 때, 구름 혼합비 -2.73 g/kg, 비 혼합비 1.97 g/kg로 나타났다. 6시간 시딩의 경우는 평균 인공증우량이 2.30 mm이고, 구름 혼합비는 -38.5

g/kg, 비 혼합비는 13.5 g/kg로 산출되어 인공증우량과 구름 혼합비는 음의 상관관계, 비 혼합비는 양의 상관관계를 보였다.

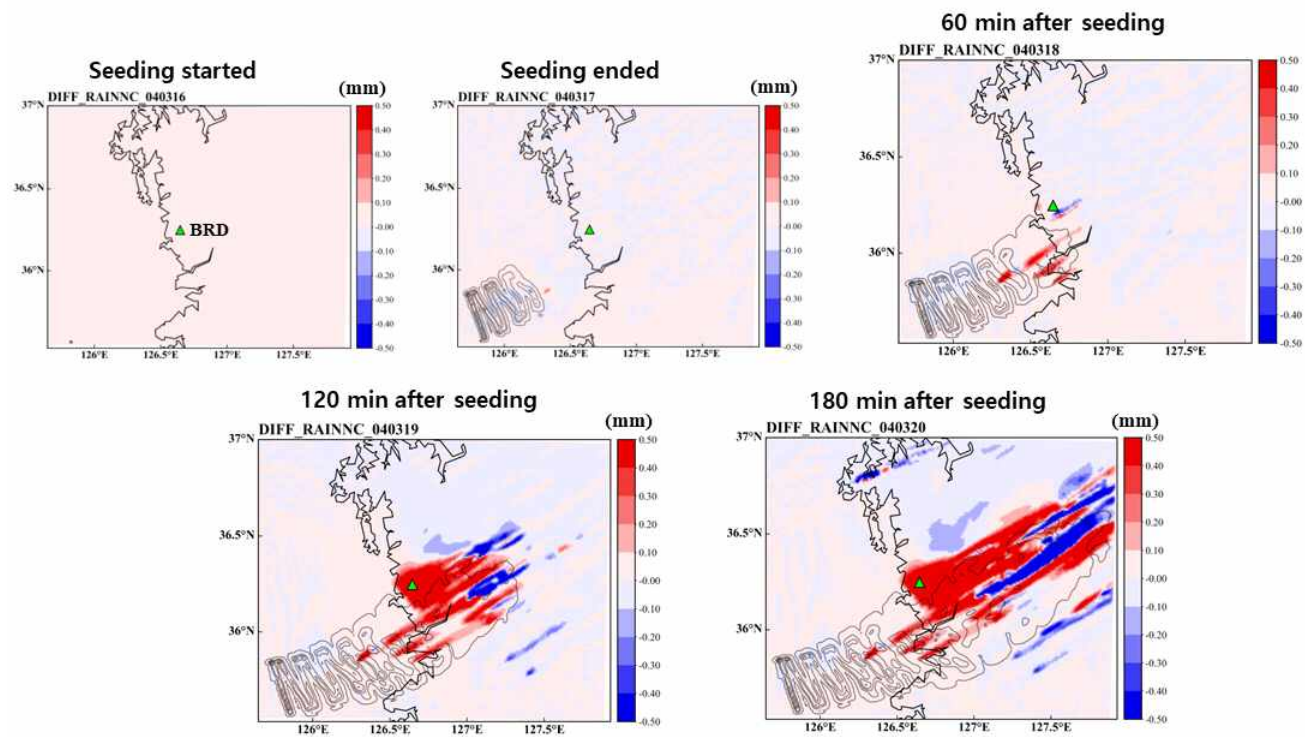


Fig. 7. Spatial distribution of the difference in accumulated artificial rainfall (mm) between SEED and UNSD from the start of seeding to the end of seeding and 60, 120, and 180 minutes after the seeding end CaCl₂ material in spring. Black lines indicate the number concentration of CaCl₂.

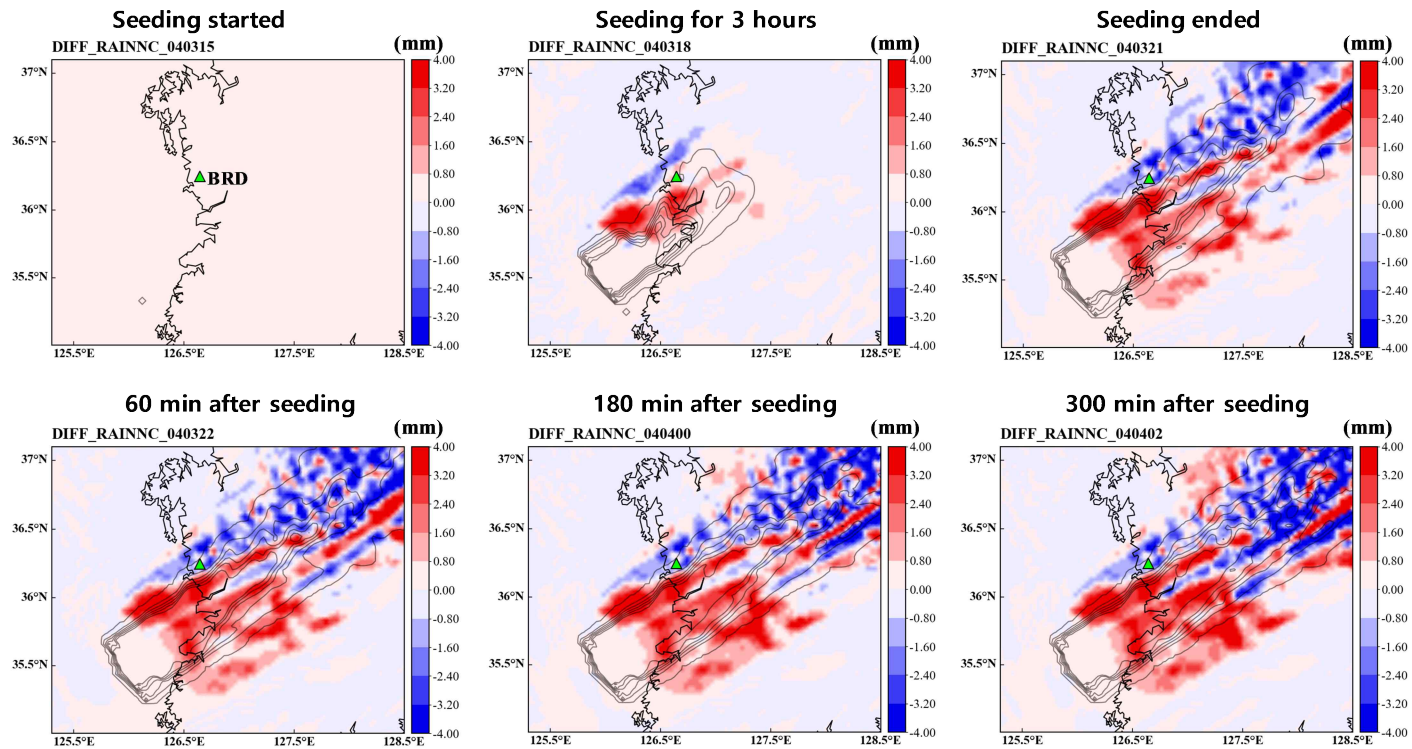
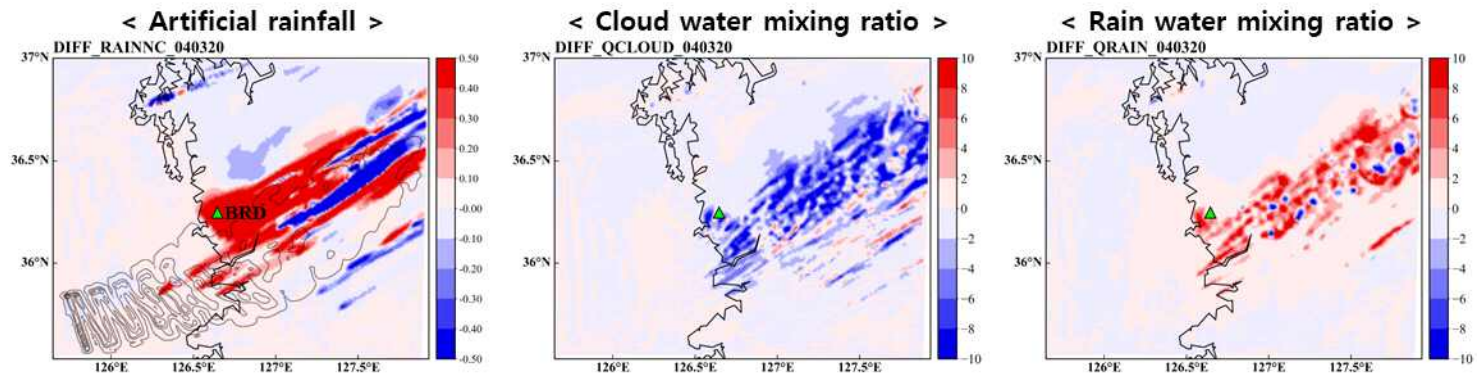
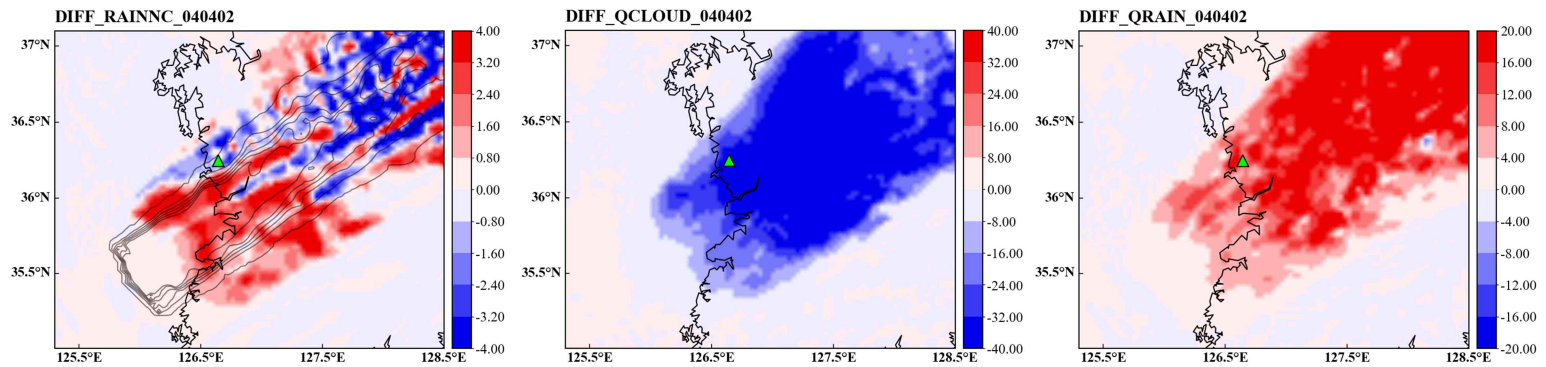


Fig. 8. Spatial distribution of the difference in accumulated artificial rainfall (mm) between SEED and UNSD from the start, 3-h seeding, to the end, and 60, 180, and 300 minutes after the seeding end after the seeding end CaCl₂ material in spring. Black lines indicate the number concentration of CaCl₂.



(a) 1-h seeding



(b) 6-h seeding

Fig. 9. Spatial distribution of the difference (SEED-UNSD) in accumulated artificial rainfall, cloud and rain water mixing ratio in spring.

Table 6. Mean values of the accumulated artificial rainfall (mm), cloud and rain water mixing ratio (g/kg) for 1-h and 6-h seeding in spring.

	Artificial precipitation (mm)		Cloud water mixing ratio (g/kg)		Rain water mixing ratio (g/kg)	
	Mean	rate (%)	Mean	Max	Mean	Max
1-h ^a	3.14/3.59/0.45 ^c	14.4	15.8/13.0/-2.73	38.4/31.4/5.44	3.71/6.48/1.97	26.8/36.3/31.9
6-h ^b	5.74/8.03/2.30	40.0	79.6/41.1/-38.5	139/116/-1.51	7.50/21.0/13.5	43.1/96.1/56.4

^a1-h: accumulated for after seeding 180 min

^b6-h: accumulated for after seeding 300 min

^cUNSD/SEED/Diffence (SEED-UNSD)

3.1.2. 여름 사례

여름철에는 1시간 및 6시간 연속시딩 모두 CaCl_2 물질을 이용하여 인공강우 수치모의를 수행하였다. 먼저 1시간 동안 시딩한 경우(Fig. 10), 시딩물질의 이동 경로를 따라 인공증우 효과가 뚜렷하게 나타났다. 인공증우 효과에 대해 정량적으로 분석한 결과, 시딩 종료 후 60분의 UNSD 및 SEED의 평균 누적강수량은 각각 0.02 mm, 0.08 mm이고, 120분의 평균 강수량은 각각 0.04 mm, 0.22 mm, 180분은 각각 0.08 mm, 0.39 mm로 산출되었다. 이에 따른 인공증우량은 각각 0.06 mm, 0.18 mm, 0.31 mm로 나타나 이들의 UNSD 대비 인공증우율은 각각 344%, 427%, 394%로 산출되었다. 6시간 연속시딩의 경우(Fig. 11), 전반적으로 보령댐 부근에서 인공증우 효과가 뚜렷하게 나타나는 것을 확인하였다. 이에 대해 UNSD의 시딩 종료 후 60분, 180분, 300분(시딩 시작 이후부터 7시간, 9시간, 11시간)의 평균 누적강수량은 각각 0.28 mm, 0.34 mm, 0.43 mm이고, SEED는 각각 1.25 mm, 1.52 mm, 1.64 mm로 산출되었다. 이들의 인공증우량은 각각 0.97 mm, 1.18 mm, 1.22 mm이며, 이에 따른 인공증우율은 각각 343%, 346%, 285%로 나타났다.

인공증우 효과와 구름 및 비 혼합비의 공간분포를 추가적으로 분석한 결과(Fig. 12), 1시간 시딩 종료 후 180분 누적 인공증우량, 구름 혼합비, 비 혼합비를 보면(Fig. 12(a)), 인공증우 효과가 뚜렷하게 나타나는 지역에서 구름 혼합비 감소하고, 비 혼합비 증가하는 패턴이 유사하게 나타났다. 6시간 연속시딩 종료 후 300분 누적 결과(Fig. 12(b)), 대부분 인공증우 효과가 나타난 지역과 보령댐의 북동쪽에서 구름 혼합비 감소 및 비 혼합비 증가 경향이 더욱 뚜렷하게 나타났다. 이에 대한 정량적인 분석 결과(Table 7), 1시간 시딩에 대해 3시간 누적, 6시간 연속시딩에 대하여 300분(시딩 시작 이후부터 총 11시간) 평균 누적 인공증우량은 각각 0.31 mm, 1.22 mm로 산출되었다. 이 때의 구름 혼합비는 각각 -3.29 g/kg, -13.7 g/kg으로 강한 음의 상관성이 나타났으며, 비 혼합비는 각각 1.58 g/kg, 4.67 g/kg으로 강한 양의 상관성을 확인할 수 있었다.

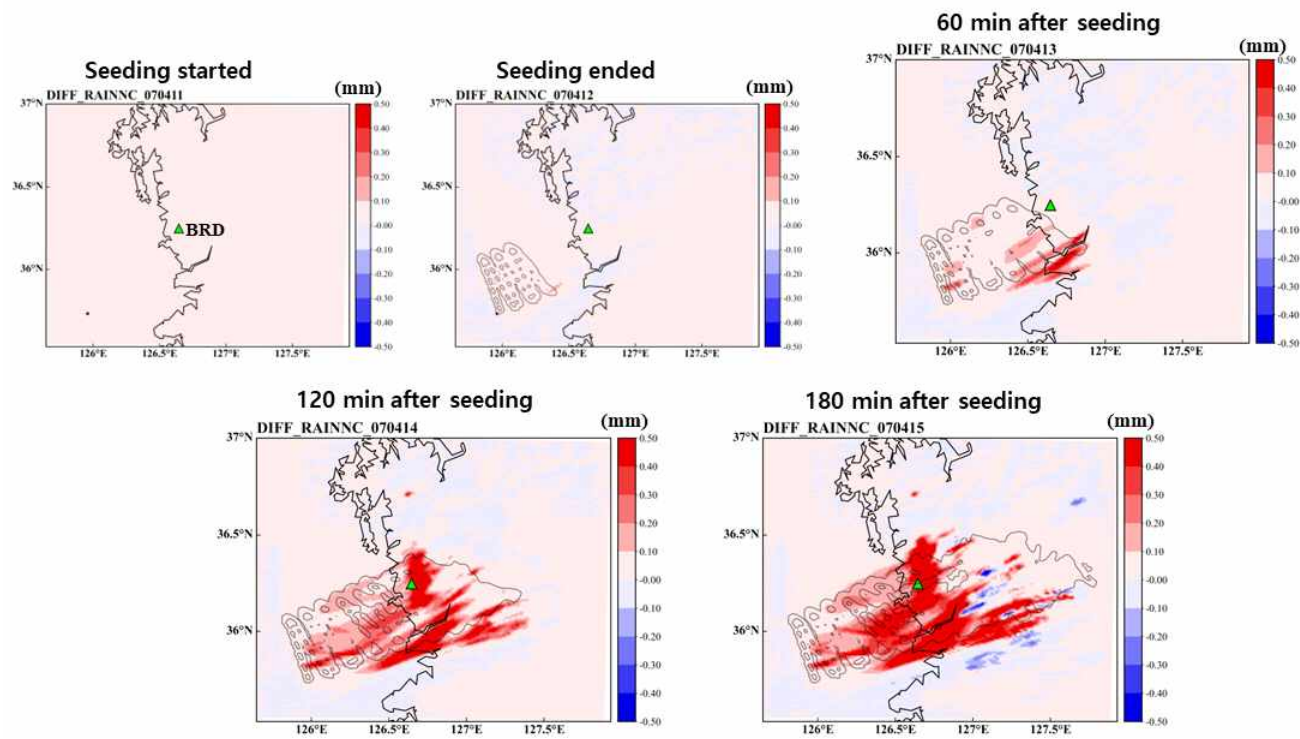


Fig. 10. Spatial distribution of the difference in accumulated artificial rainfall (mm) between SEED and UNSD from the start of seeding to the end of seeding and 60, 120, and 180 minutes after the seeding end CaCl₂ material in summer. Black lines indicate the number concentration of CaCl₂.

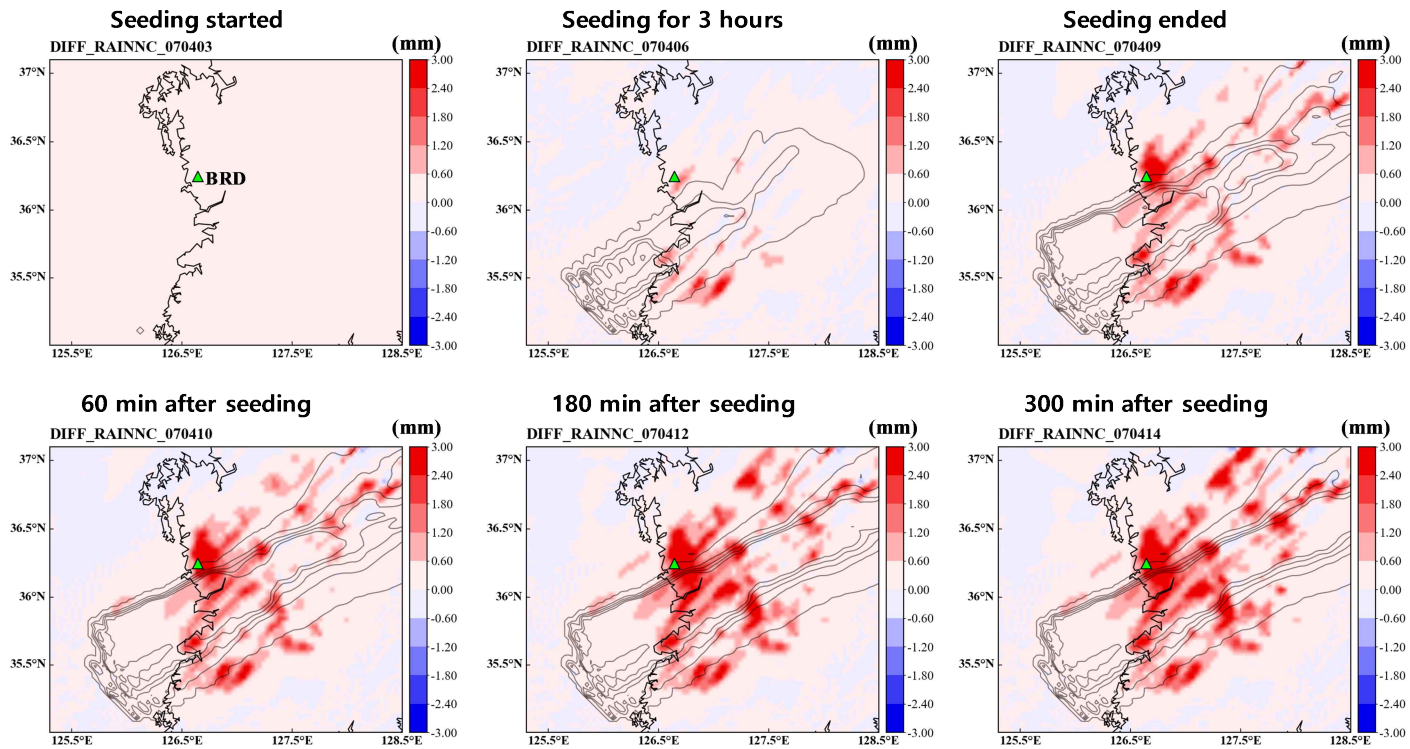
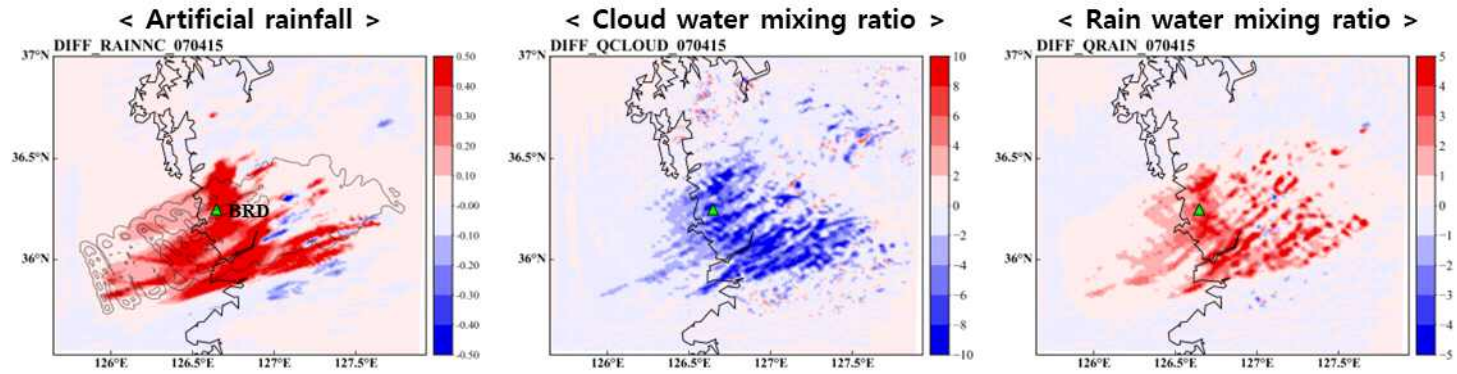
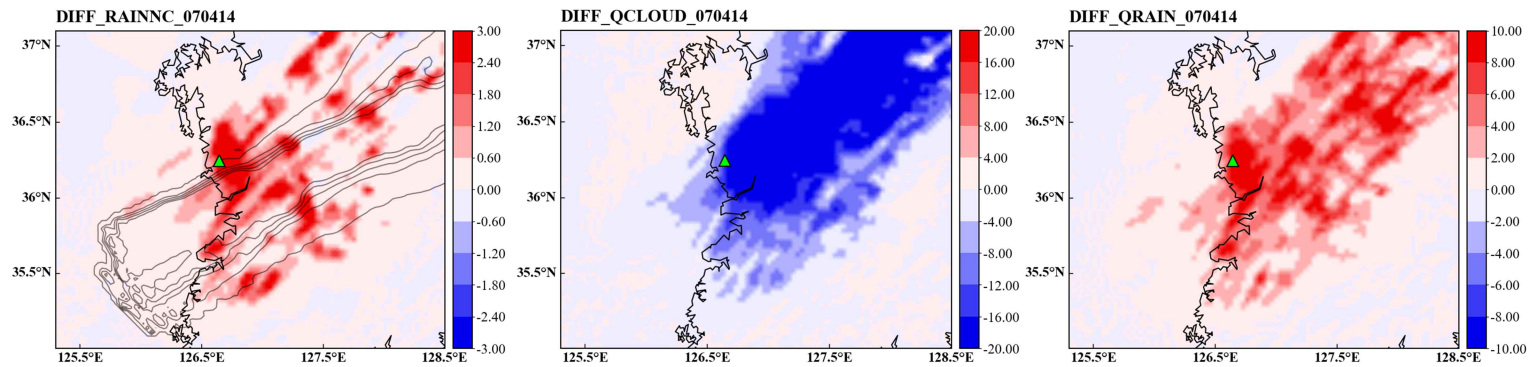


Fig. 11. Spatial distribution of the difference in accumulated artificial rainfall (mm) between SEED and UNSD from the start, 3-h seeding, to the end, and 60, 180, and 300 minutes after the seeding end after the seeding end CaCl₂ material in summer. Black lines indicate the number concentration of CaCl₂.



(a) 1-h seeding



(b) 6-h seeding

Fig. 12. Spatial distribution of the difference (SEED-UNSD) in accumulated artificial rainfall, cloud and rain water mixing ratio in summer.

Table 7. Mean values of the accumulated artificial rainfall (mm), cloud and rain water mixing ratio (g/kg) for 1-h and 6-h seeding in summer.

	Artificial precipitation (mm)		Cloud water mixing ratio (g/kg)		Rain water mixing ratio (g/kg)	
	Mean	rate (%)	Mean	Max	Mean	Max
1-h ^a	0.08/0.39/0.31 ^c	394	7.55/4.26/-3.29	30.2/28.4/6.64	0.18/1.76/1.58	4.47/15.6/15.0
6-h ^b	0.43/1.64/1.22	285	29.8/16.1/-13.7	64.2/38.9/1.42	0.62/5.30/4.67	3.42/16.7/15.9

^a1-h: accumulated for after seeding 180 min

^b6-h: accumulated for after seeding 300 min

^cUNSD/SEED/Diffence (SEED-UNSD)

3.1.3. 가을 사례

가을철에도 여름철과 동일하게 1시간 및 6시간 연속시딩 모두 CaCl_2 물질을 이용하여 인공강우 수치모의를 수행하였다. 1시간 시딩 결과에 대한 인공강우 수치모의한 결과(Fig. 13), 시딩 종료 후 60분의 SEED (UNSD)의 평균 누적 강수량은 0.10 mm (0.09 mm), 120분은 0.17 mm (0.09 mm), 180분은 0.29 mm (0.15 mm)로 산출되었다. 각각의 인공증우량(증우율)은 약 0.01 mm (10.2%), 0.08 mm (85.2%), 0.15 mm (99.3%)로 나타났다. 6시간 연속시딩 결과(Fig. 14), 전반적으로 보령댐 부근과 내륙쪽에서 인공증우 효과가 뚜렷하게 나타났다. 이에 대하여 시딩 종료 후 60분 후(시딩 시작 이후부터 총 7시간) UNSD 및 SEED의 평균 누적 강수량은 각각 0.46 mm, 1.26 mm이고, 180분 후에는 각각 0.50 mm, 1.42 mm, 마지막으로, 300분 후에 각각 0.52 mm, 1.48 mm로 나타났다. 이에 따른 각각의 증우량은 각각 0.80 mm, 0.92 mm, 0.97 mm이며, 인공증우율은 각각 175%, 184%, 187%로 산출되었다.

또한, 인공증우 효과와 구름 및 비 혼합비의 공간분포를 추가적으로 분석한 결과(Fig. 15), 1시간 시딩 종료 후 180분 누적과 6시간 연속시딩 종료 후 300분 누적에 대한 인공증우량, 구름 혼합비, 비 혼합비를 보면, 두 실험 모두에서 인공증우 효과가 나타나는 지역과 유사한 지역에서 구름 혼합비가 감소하고, 비 혼합비가 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 이에 대한 정량적 분석 결과(Table 8), 1시간 시딩에 대해 시딩 종료 후 180분 평균 누적 인공증우량은 0.15 mm, 구름 및 비 혼합비는 -1.98 g/kg, 0.85 g/kg으로 나타났으며, 6시간 연속시딩 종료 후 300분 누적의 인공증우량은 0.97 mm, 구름 혼합비 -7.48 g/kg, 비 혼합비 5.38 g/kg으로 두 실험 모두에서 인공증우량과 구름 혼합비는 음의 상관성, 비 혼합비는 양의 상관성이 나타남을 확인하였다.

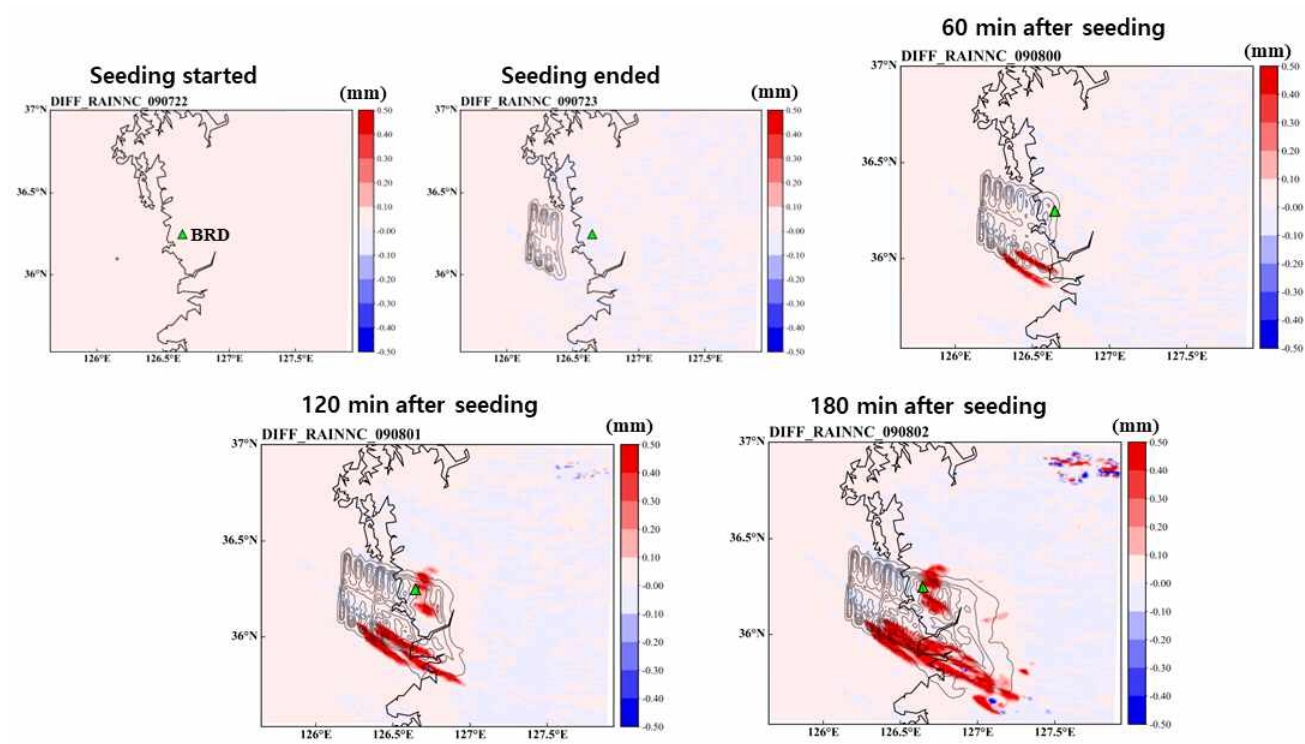


Fig. 13. Spatial distribution of the difference in accumulated artificial rainfall (mm) between SEED and UNSD from the start of seeding to the end of seeding and 60, 120, and 180 minutes after the seeding end CaCl₂ material in autumn. Black lines indicate the number concentration of CaCl₂.

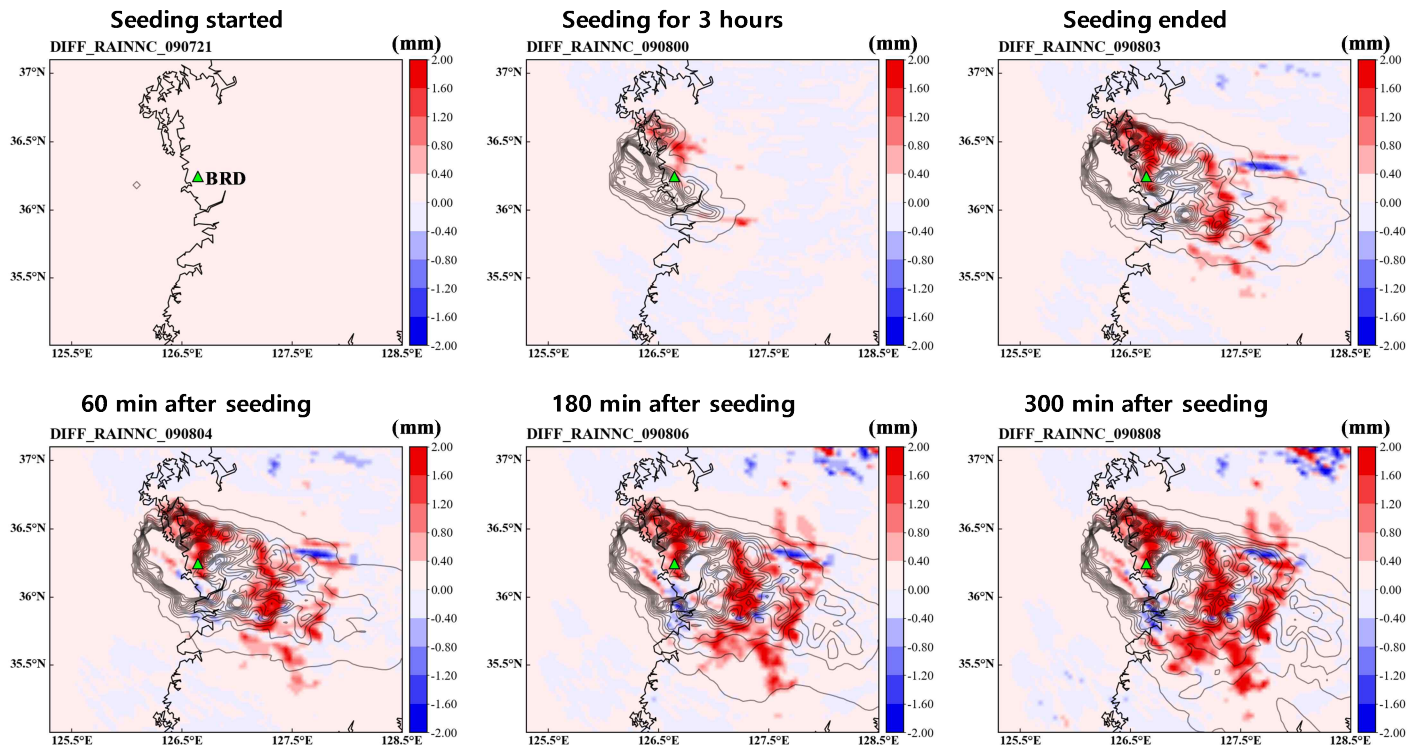
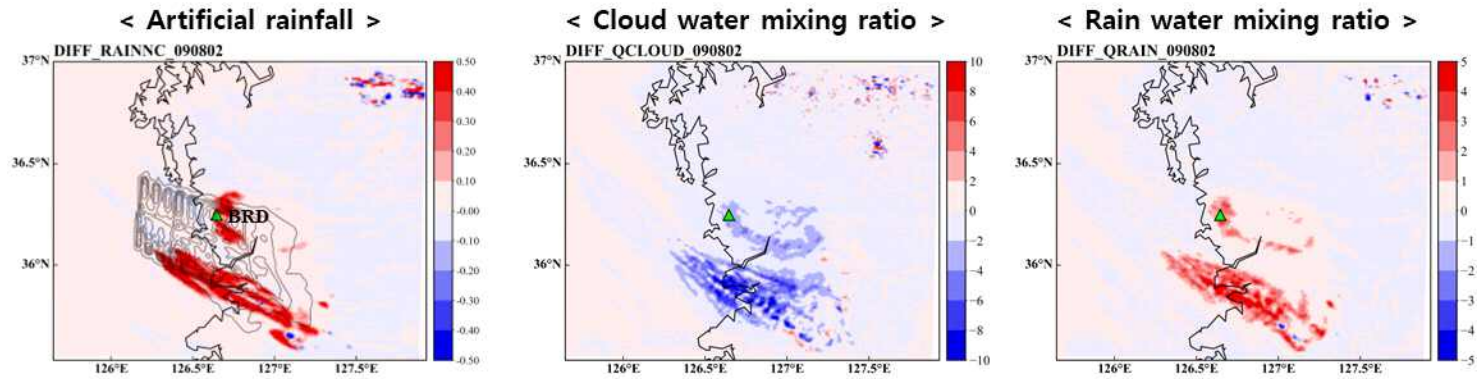
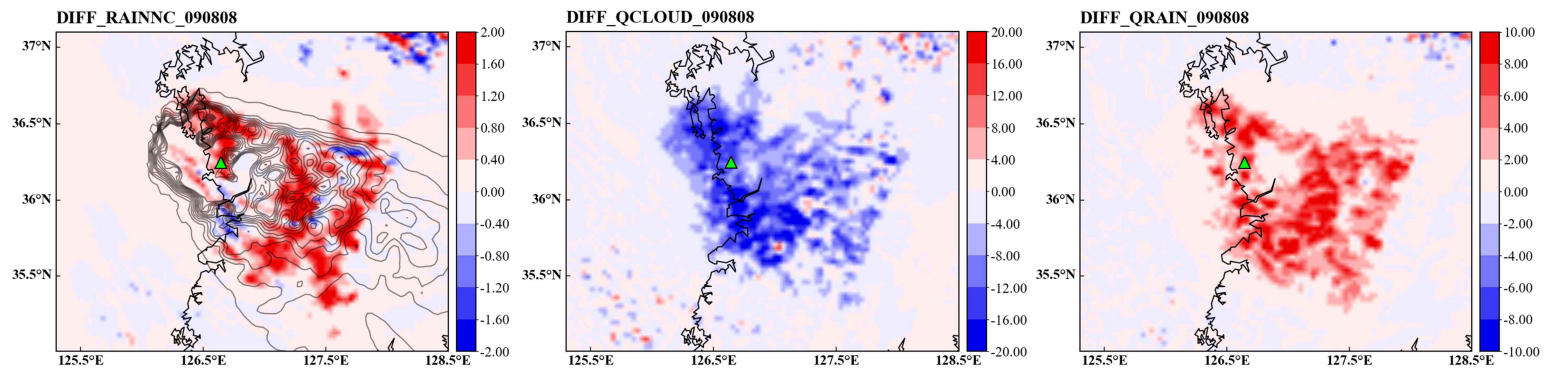


Fig. 14. Spatial distribution of the difference in accumulated artificial rainfall (mm) between SEED and UNSD from the start, 3-h seeding, to the end, and 60, 180, and 300 minutes after the seeding end after the seeding end CaCl₂ material in autumn. Black lines indicate the number concentration of CaCl₂.



(a) 1-h seeding



(b) 6-h seeding

Fig. 15. Spatial distribution of the difference (SEED-UNSD) in accumulated artificial rainfall, cloud and rain water mixing ratio in autumn.

Table 8. Mean values of the accumulated artificial rainfall (mm), cloud and rain water mixing ratio (g/kg) for 1-h and 6-h seeding in autumn.

	Artificial precipitation (mm)		Cloud water mixing ratio (g/kg)		Rain water mixing ratio (g/kg)	
	Mean	rate (%)	Mean	Max	Mean	Max
1-h ^a	0.15/0.29/0.15 ^c	99.3%	6.18/4.19/-1.98	23.1/25.7/5.12	0.18/1.03/0.85	6.89/13.5/11.7
6-h ^b	0.52/1.48/0.97	187%	16.6/9.15/-7.48	55.2/46.4/14.8	0.58/5.16/4.58	5.39/30.6/30.5

^a1-h: accumulated for after seeding 180 min

^b6-h: accumulated for after seeding 300 min

^cUNSD/SEED/Diffence (SEED-UNSD)

3.1.4. 겨울 사례

마지막으로, 겨울 사례의 CaCl_2 물질을 1시간 시딩한 결과(Fig. 16), 시딩 종료 후 60분, 120분, 180분의 UNSD 실험의 공간 전체 평균 누적강수량은 각각 0.002 mm, 0.003 mm, 0.006 mm이고, SEED는 각각 0.004 mm, 0.008 mm, 0.027 mm로 산출되었다. 이에 따라 SEED와 UNSD의 편차인 인공증우량은 각각 0.001 mm, 0.004 mm, 0.021 mm이며, 이들의 UNSD 대비 인공증우율은 각각 44.1%, 109%, 320%로 산출되었다. 다른 계절에 비해 인공증우량은 매우 작은 수준이지만, UNSD의 수치가 너무 작아 상대적으로 인공증우율이 높게 산출된 것으로 사료된다. CaCl_2 물질을 이용하여 6시간 연속시딩을 수행한 결과를 보면(Fig. 17), 대체로 보령댐을 중심으로 시딩물질의 이동 경로를 따라 인공증우 효과가 뚜렷하게 나타났다. 이에 대해 정량적으로 분석한 결과, 시딩 종료 후 60분의 UNSD 및 SEED의 평균 누적강수량은 각각 1.23 mm, 2.31 mm이고, 180분은 각각 1.38 mm, 2.62 mm, 300분은 각각 1.46 mm, 2.76 mm로 나타났다. 이에 따른 인공증우량은 각각 1.08 mm, 1.24 mm, 1.30 mm로 산출되었으며, 인공증우율은 각각 88.1%, 90.3%, 89.5%로 확인되었다.

다른 계절과 동일하게 겨울철도 인공증우 효과를 보다 상세하게 분석하기 위해 구름 및 비 혼합비의 공간분포를 분석하였다(Fig. 18). 1시간 시딩 종료 후 180분 누적 인공증우량, 구름 혼합비, 비 혼합비를 보면(Fig. 18(a)), 인공증우 효과가 뚜렷하게 나타나는 지역에서 구름 혼합비가 감소하고, 비 혼합비가 증가하는 패턴이 나타났지만, 인공증우 효과가 매우 미미하게 나타나 구름 및 비 혼합비 또한 다소 나타난 것으로 추정된다. 6시간 연속시딩의 경우에는 인공증우 효과가 나타난 지역과 시딩물질의 이동경로에서 구름 혼합비가 감소하고, 비 혼합비가 증가하는 패턴이 나타났다(Fig. 18(b)). 이에 대한 정량적인 분석 결과(Table 9), 1시간 시딩 종료 후 180분 누적, 6시간 연속시딩 종료 후 300분(시딩 시작 이후부터 총 11시간)의 평균 누적 인공증우량은 각각 0.021 mm, 1.30 mm로 산출되었다. 이 때의 구름 혼합비는 각각 -0.10 g/kg, -29.3 g/kg으로 음의 상관성이 나타났으며, 비 혼합비는 각각 0.28 g/kg, 5.38 g/kg으로 양의 상관을 확인할 수 있었다.

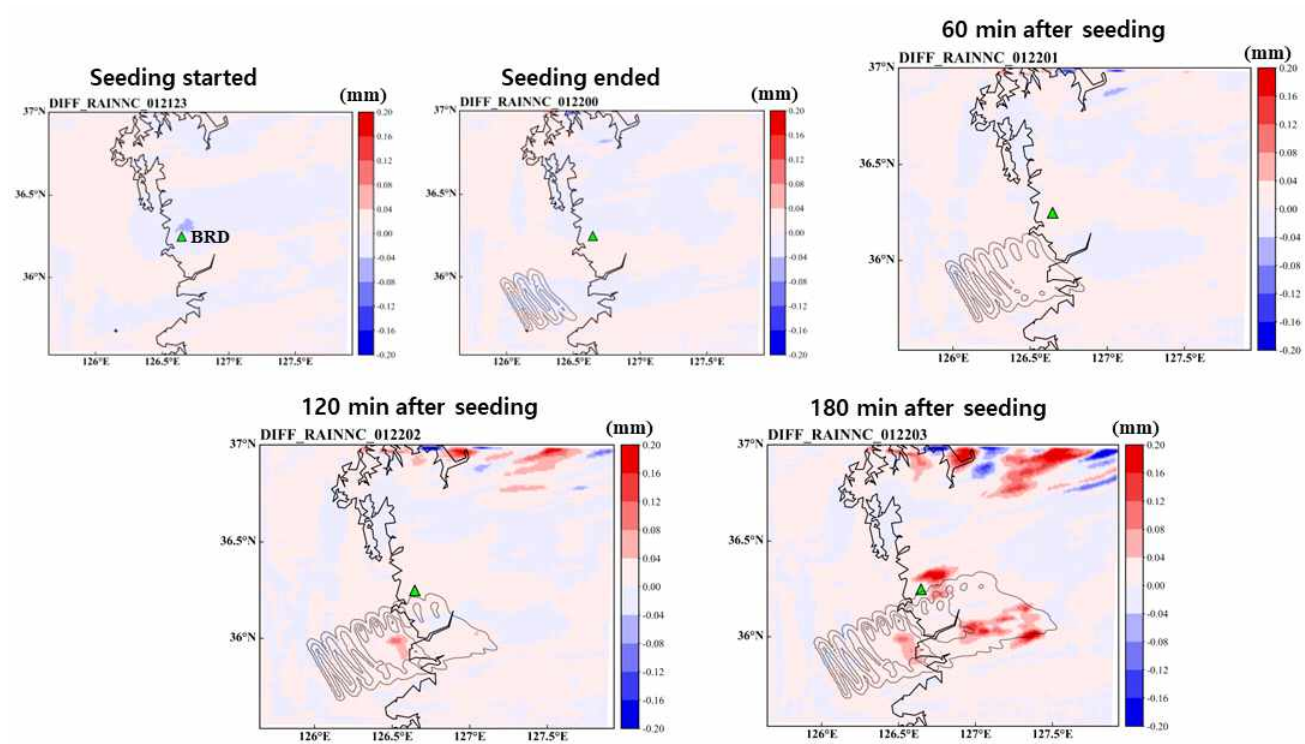


Fig. 16. Spatial distribution of the difference in accumulated artificial rainfall (mm) between SEED and UNSD from the start of seeding to the end of seeding and 60, 120, and 180 minutes after the seeding end CaCl₂ material in winter. Black lines indicate the number concentration of CaCl₂.

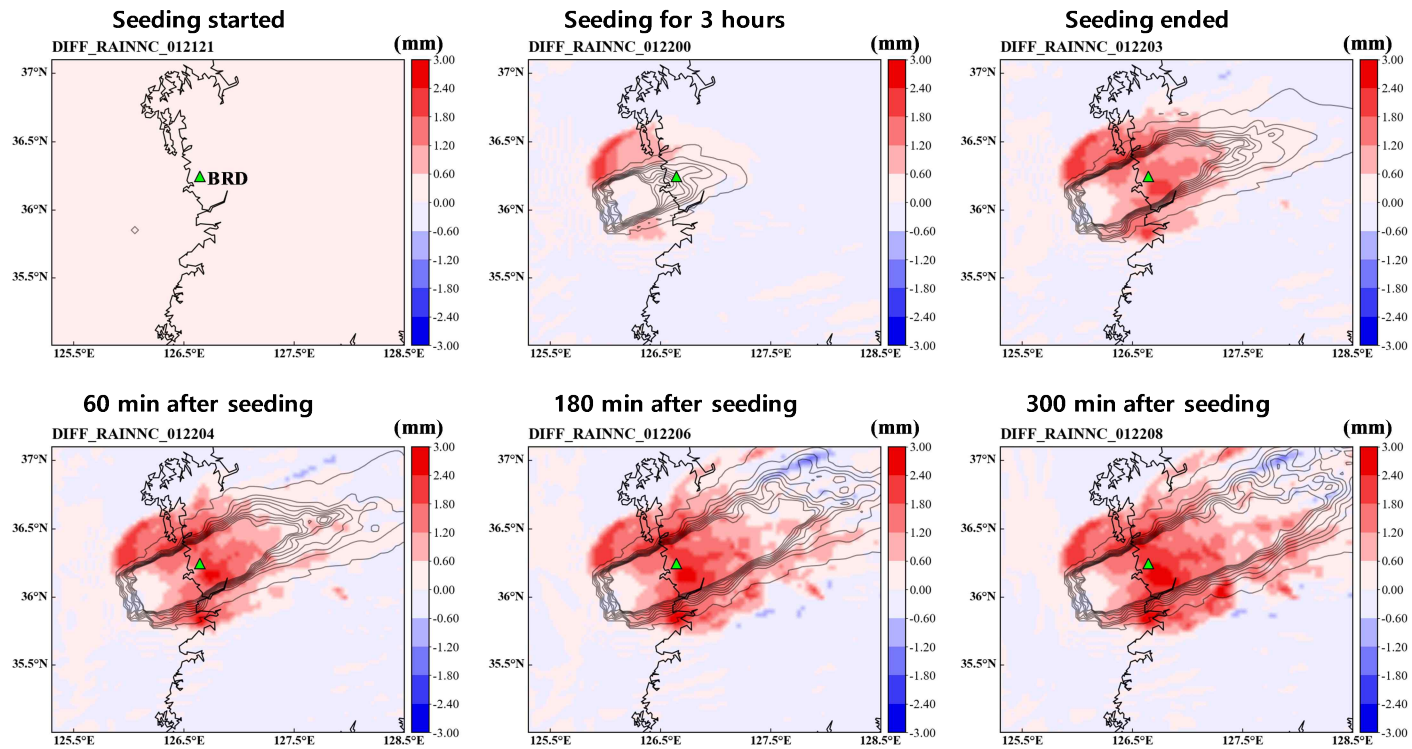
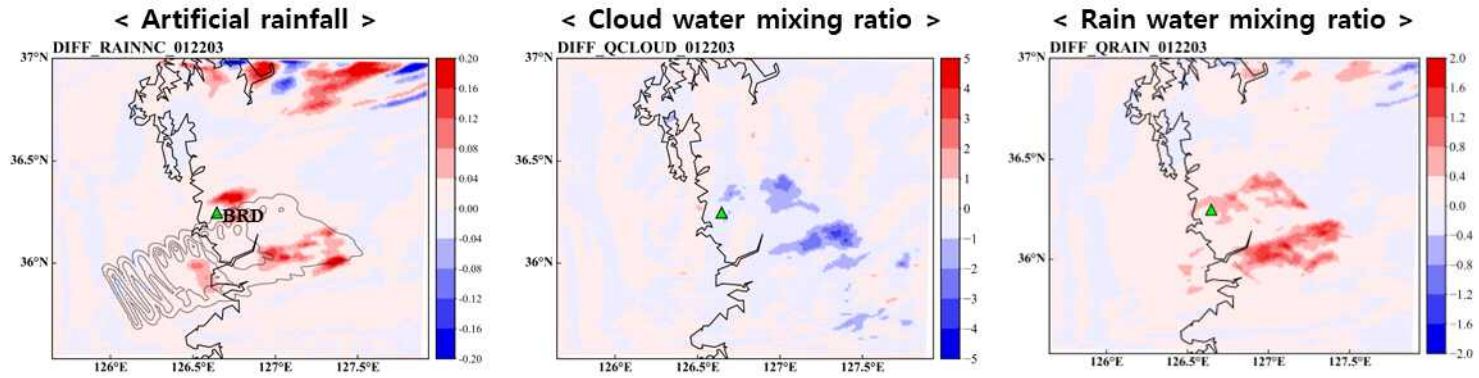
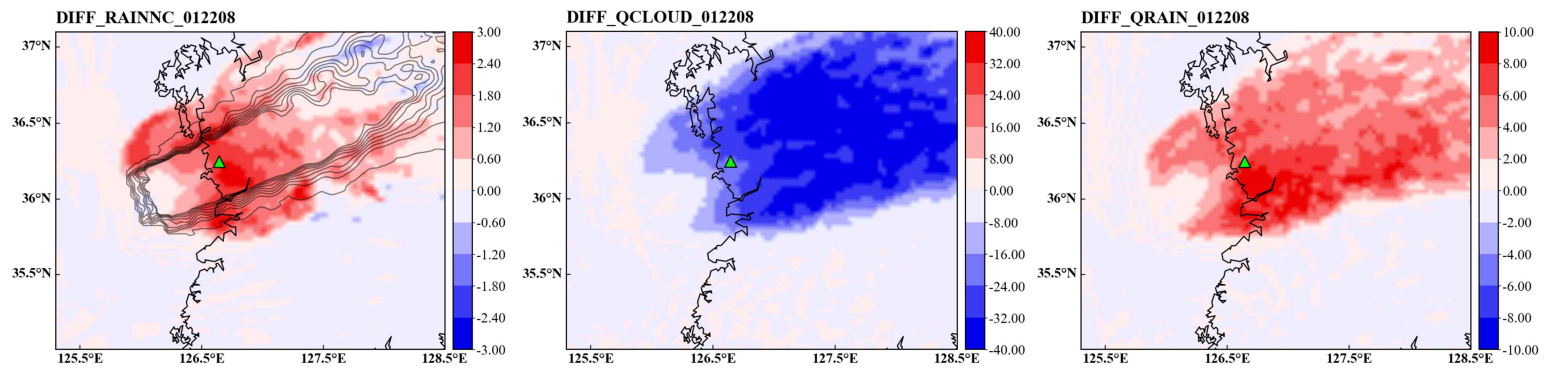


Fig. 17. Spatial distribution of the difference in accumulated artificial rainfall (mm) between SEED and UNSD from the start, 3-h seeding, to the end, and 60, 180, and 300 minutes after the seeding end after the seeding end CaCl_2 material in winter. Black lines indicate the number concentration of CaCl_2 .



(a) 1-h seeding



(b) 6-h seeding

Fig. 18. Spatial distribution of the difference (SEED-UNSD) in accumulated artificial rainfall, cloud and rain water mixing ratio in winter.

Table 9. Mean values of the accumulated artificial rainfall (mm), cloud and rain water mixing ratio (g/kg) for 1-h and 6-h seeding in winter.

	Artificial precipitation (mm)		Cloud water mixing ratio (g/kg)		Rain water mixing ratio (g/kg)	
	Mean	rate (%)	Mean	Max	Mean	Max
1-h ^a	0.006/0.03/0.02 ^c	320%	14.4/13.4/-0.10	27.3/24.2/4.23	0.06/0.34/0.28	0.24/2.06/1.97
6-h ^b	1.46/2.76/1.30	89.5%	56.2/26.9/-29.3	96.8/81.6/0.96	2.34/7.72/5.38	7.51/17.5/11.0

^a1-h: accumulated for after seeding 180 min

^b6-h: accumulated for after seeding 300 min

^cUNSD/SEED/Diffence (SEED-UNSD)

3.1.5. 계절별 인공강우 민감도 분석 및 검증

보다 최적화된 인공강우 실험의 적정조건을 산출하기 위하여 1시간 시딩과 6시간 연속시딩 결과를 동일한 영역에 대해 계산하여 시딩 시간 변화에 따른 계절별 민감도 분석을 수행하였다(Table 10). 먼저 봄은 3.1.1절에서 언급하였듯이, 1시간 시딩 종료 후 60분과 180분의 UNSD 누적강수량은 각각 2.0 mm, 3.14 mm, SEED는 각각 2.04 mm, 3.59 mm로 나타났다. 이에 따른 누적 인공증우량은 각각 0.03 mm, 0.45 mm, 증우율은 1.6%, 14.4%로 산출되었다. 6시간 연속시딩의 종료 후 60분 누적 강수량은 UNSD 및 SEED 실험에서 각각 5.77 mm, 7.27 mm, 180분 누적 강수량은 각각 7.02 mm, 9.01 mm로 산출되었다. 이들의 인공증우량은 각각 1.95 mm, 1.99 mm이며, 각각의 증우율은 33.9%, 28.4%로 나타났다. 이를 통해 연속적으로 시딩을 수행하는 것이 1시간 시딩에 비해 약 4배~65배 정도 인공증우 효과가 크게 나타남을 확인하였다. 여름은 3.1.2절에서 언급한 바와 같이, 시딩 종료 후 60분의 UNSD 및 SEED는 0.02 mm, 0.08 mm이고, 180분은 각각 0.08 mm, 0.39 mm로 산출되었다. 각각의 누적 인공증우량은 0.06 mm, 0.31 mm로 나타났으며, 6시간 연속시딩 종료 후 60분과 180분 누적 강수량의 SEED (UNSD)는 각각 1.71 mm (0.44 mm), 2.14 mm (0.56 mm)로 이에 대한 인공증우량(증우율)은 1.27 mm (287%), 1.59 mm (283%)로 나타나 연속적으로 1시간 시딩의 인공증우 효과보다 약 5배~21배 정도 높은 것으로 추정되었다. 가을에는 3.1.3절에서 언급한 바와 동일하게 1시간 시딩 종료 후 60분 및 180분 후 SEED (UNSD)의 누적 강수량은 각각 0.10 mm (0.09 mm), 0.29 mm (0.15 mm)로 이 때의 인공증우량은 각각 0.01 mm, 0.15 mm로 산출되었다(증우량 : 각각 10.2%, 99.3%). 연속시딩 종료 후 60분과 180분 누적 강수량의 UNSD와 SEED는 각각 0.50 mm, 1.48 mm와 0.52 mm, 1.55 mm로 이에 대한 인공증우량은 각각 0.97 mm, 1.03 mm로 산출되어(증우율: 각각 195%, 200%), 1시간 시딩의 효과에 비해 크게 나타났다(약 7배~11배). 마지막으로 겨울 사례에서는 3.1.4절에서 언급하였듯이, 1시간 시딩 종료 후 60분과 180분의 UNSD 누적 강수량은 각각 0.002 mm, 0.006 mm로 나타났고, SEED는 각각 0.004 mm, 0.027 mm로 나타났다. 누적 인공증우량 및 증우율은 0.001 mm, 0.21 mm와 44.1%, 320%로 나타났다. 연속시딩 종료 후 60분과 180분 누적 강수량의 UNSD와 SEED는

각각 1.24 mm, 2.41 mm, 1.27 mm, 2.63 mm로 이에 대한 인공증우량(증우율)은 1.17 mm (94.2%), 1.36 mm (107%)로 나타나 6시간 연속시딩이 1시간 시딩에 비해 최소 65배 이상의 인공증우 효과가 나타난 것으로 사료된다. 따라서 본 연구를 통해 6시간 연속시딩이 1시간 시딩에 비하여 4배 ~ 65배 이상 정도의 큰 인공증우 효과가 나타나는 것을 확인하였다.

2.2.1절에서 언급하였듯이, 사계절 중 인공증우 효과가 가장 뚜렷한 2021년 봄철 사례(4월 3일)에 대해 시딩 지속시간 및 시딩 양을 조절한 민감도 분석을 수행하였다. Fig. 19는 시딩 양을 고정하고 지속시간을 CTRL 실험에 비해 2배(Exp_D2, (a))와 3배(Exp_D2, (b)), 또한 시딩 지속시간을 고정하고 시딩 양을 2배(Exp_A2, (c))와 3배(Exp_A2, (d))로 증가한 실험의 시딩 종료 후 180분 누적 공간분포를 각각 나타낸다. 시딩 지속시간을 변화시킨 실험(Exp_D2, Exp_D3)에서 CTRL 실험(Fig. 7)에 비해 인공증우 효과가 뚜렷한 영역이 더 크게 확장된 모습을 보였다(Fig. 19(a)와 (b)). 그러나 시딩 양을 변화시킨 실험(Exp_A2, Exp_A3)에서는 CTRL 실험(Fig. 7)과 거의 유사한 패턴이었다. 정량적으로 살펴보면(Table 11), CTRL 실험의 인공증우량은 0.45 mm로 나타났고, Exp_D2와 Exp_D3에서는 각각 1.44 mm, 1.43 mm로 산출되어 CTRL 실험에 비하여 약 0.9 mm 정도 더 많은 인공증우 효과가 나타나는 것을 확인하였다. 이에 대한 인공증우율은 각각 56.2%, 55.7%로 CTRL 실험(14.4%)에 비해 인공증우 효과가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 선행연구에 따르면, 시딩물질이 살포 이후 1시간 내에는 대상 영역까지 확장되지 못하고 오히려 축적되어 overseeding의 영향으로 인공증우 효과가 뚜렷하게 나타나지 않은 것으로 사료된다(Hill, 1979; Kang et al., 2023). 따라서 지속시간을 길게 늘려줌에 따라 시딩물질의 확산이 잘 이루어져 인공증우 효과가 보다 커진 것으로 추정된다. 그러나 Exp_A2와 Exp_A3의 경우, 평균 인공증우량이 각각 0.45 mm, 0.43 mm로 CTRL 실험과 거의 유사한 수준으로 나타났다. 이에 대한 인공증우량 또한 각각 14.6%, 14.2%로 차이는 미미한 정도로 나타났다. 이처럼 시딩 양을 늘려준 실험은 너무 많은 양을 살포하여 오히려 작은 입자가 과도하게 생성되어 강수로 성장하지 못하고 증발하여 오히려 강수의 감소를 유발시키는 overseeding의 영향으로 추정된다(Vallero, 2014; He et al., 2022; Kang et al., 2023).

Table 10. Comparison of mean vlaues of the accumulated artificial rainfall and increase rate (%) by seeding for 1-h and continuous 6-h by season.

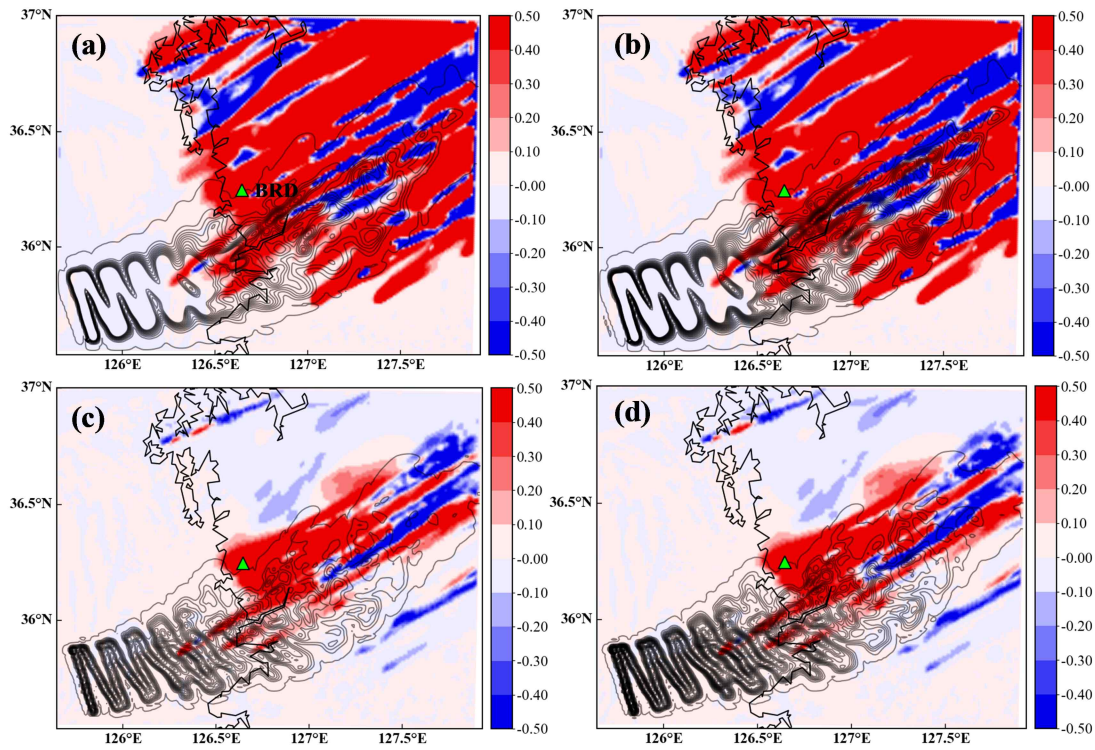
	Spring		Summer		Autumn		Winter	
	60 min	180 min	60 min	180 min	60 min	180 min	60 min	180 min
1-h ^a	2.00/2.04/0.03 ^c 1.6% ^d	3.14/3.59/0.45 14.4%	0.02/0.08/0.06 344%	0.08/0.39/0.31 394%	0.09/0.10/0.01 10.2%	0.15/0.29/0.15 99.3%	0.002/0.004/0.001 44.1%	0.006/0.027/0.021 320%
6-h ^b	5.77/7.72/1.95 33.9%	7.02/9.01/1.99 28.4%	0.44/1.71/1.27 287%	0.56/2.14/1.59 283%	0.50/1.48/0.97 195%	0.52/1.55/1.03 200%	1.24/2.41/1.17 94.2%	1.27/2.63/1.36 107%

^a1-h: accumulated for after seeding 180 min

^b6-h: accumulated for after seeding 180 min

^cUNSD/SEED/Diffence (SEED-UNSD)

^dIncrease rate (%)



*Source : Kang et al. (2023)

Fig. 19. Spatial distributions of the differences in 180 min-accumulated artificial rainfall (mm) between SEED and UNSD after CaCl_2 seeding for (a) Exp_D2, (b) Exp_D3, (c) Exp_A2, and (d) Exp_A3.

Table 11. The 180 min-accumulated artificial rainfall (mm) and its increase rate due to increases (2- and 3-fold) in seeding duration and amount of CaCl_2 .

Experiments	CTRL		Exp_D2		Exp_D3		Exp_A2		Exp_A3	
	DIFF	rate	DIFF	rate	DIFF	rate	DIFF	rate	DIFF	rate
Mean	0.45	14.4%	1.44	56.2%	1.42	55.7%	0.45	14.6%	0.43	14.2%

본 연구에서 인공증우 효과 및 민감도 분석의 신뢰성을 위해 기상 모델의 예측정확도를 평가하였다. 계절별 1시간 시딩과 6시간 연속시딩의 모델링 기간 동안 8개 기상관측지점의 기상요소(기온, 풍속, 상대습도, 강수량)에 대해 통계검증(IOA, RMSE, MBE, POD, ETS, Accuracy)을 수행하였다(Table 12~13).

1시간 시딩에 대한 8개 전체 지점에서 모든 계절에 대해 기온, 풍속, 상대습도의 IOA는 각각 약 0.8~0.9(여름 제외), 0.5~0.7, 0.5~0.8 이상으로 나타났으며, 각각에 대한 RMSE는 1.8°C, 2.6 m/s, 17% 이내로 모의되었다. 이외에도 MBE에 대해 기온은 1°C 이내, 풍속은 2 m/s 이내로 약한 과대모의 경향이 나타났으며, 상대습도는 -15% 이내로 과소모의 경향을 보였다(Table 12[A]). 강수량 통계검증의 경우(Table 12[B]), 모든 계절의 POD는 임계값 ≥ 0.1 mm/hr에서 0.02 (가을) ~ 0.51 (봄), ≥ 0.5 mm/hr에서 0.32 (여름) ~ 0.46 (봄), ≥ 1 mm/hr에서 0.26 (여름) ~ 0.51 (봄), ≥ 2 mm/hr에서 0.30 (여름) ~ 0.42 (봄)로 나타났다. ETS는 ≥ 0.1 mm/hr에서 -0.044 (가을) ~ 0.16 (여름), ≥ 0.5 mm/hr에서 -0.006 (가을) ~ 0.21 (여름), ≥ 1 mm/hr에서 -0.005 (가을) ~ 0.27 (봄), ≥ 2 mm/hr에서 0.19 (봄) ~ 0.24 (여름)으로 산출되었다. 마지막으로 Accuracy는 모든 계절과 모든 임계값에서 대부분 0.55~0.99 정도의 높은 정확도를 확인하였다.

6시간 연속시딩에 대한 모든 계절에 대해 기온, 풍속, 상대습도의 IOA는 각각 약 0.8~0.9, 0.51~0.56, 0.7~0.9 이상, RMSE는 각각 1.6°C, 3 m/s, 9% 이내로 모의되었고, MBE에 대해 기온은 0.7°C 이내, 풍속은 2.4 m/s 이내로 약한 과대모의 경향이 나타났으며, 상대습도는 -4.6% 이내로 약한 과소모의 경향이 나타났다(Table 13[A]). 강수량 통계검증의 경우, 모든 계절의 POD는 임계값 ≥ 0.1 mm/hr에서 0.11 (가을) ~ 0.62 (겨울), ≥ 0.5 mm/hr에서 0.34 (겨울) ~ 0.37 (여름), ≥ 1 mm/hr에서 0.29 (겨울) ~ 0.48 (여름), ≥ 2 mm/hr에서 0.36 (봄) ~ 0.45 (여름)로 나타났다. ETS는 ≥ 0.1 mm/hr에서 0.05 (가을) ~ 0.26 (겨울), ≥ 0.5 mm/hr에서 -0.01 (가을) ~ 0.28 (여름), ≥ 1 mm/hr에서 0.22 (겨울) ~ 0.40 (여름), ≥ 2 mm/hr에서 0.18 (봄) ~ 0.41 (여름)으로 산출되었다(Table 13[B]). 마지막으로 Accuracy는 1시간과 유사하게 모든 계절 및 임계값에서 0.6~1 정도로 높은 정확도가 나타났다.

본 연구에서의 통계검증 결과들은 여러 선행 연구의 결과와 대체로 유사한 수

치임을 확인하였다(Mun et al., 2020; Cho et al., 2021; Song et al., 2022). 또한 여러 선행연구의 강수 검증 결과를 보면, 이승재 등(2016)은 2014년 3~10월 경 기도에서 POD는 0.47 ~ 0.94, ETS는 0.12 ~ 0.55로 추정하였으며, Jee and Kim. (2017)은 2011년 여름철 우리나라 주요 도시에서 POD 0.55 ~ 0.90과 ETS 0.14 ~ 0.34를 나타냈다. 최근 연구에 따르면(Gayatri et al., 2022), 2018년 여름 철 India의 도시지역(Solapur)에서 POD는 0.34 ~ 0.36, ETS는 0.15 ~ 0.25가 산 출되었다. 이외에도 국립기상과학원(2022)에서 2021년 보령댐 영역을 대상으로 POD 0.18 ~ 0.83와 ETS -0.005 ~ 0.69를 발표한 바 있다. 종합적으로, 본 연구 에서 수행된 통계적 검증은 대상지역의 인공강우 장기 수치모의 및 인공증우 효 과를 평가하기 위한 합리적인 기상 수치모의 결과라 사료된다.

Table 12. Statistical evaluation of the meteorological variables (air temperature, wind speed, relative humidity, and precipitation) between the observed and 1-h cloud seeding model-simulated values at 8 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	RMSE	MBE	IOA	RMSE	MBE
Spring	0.894	1.61	0.91	0.627	1.47	0.82	0.792	10.51	-5.61
Summer	0.675	1.66	1.14	0.679	2.56	2.09	0.736	8.16	-5.76
Autumn	0.814	1.35	0.77	0.498	2.07	1.64	0.636	8.519	-6.27
Winter	0.791	1.76	0.97	0.477	1.51	1.22	0.529	16.98	-15.03

[B] Precipitation

	Threshold (mm/hr)	Spring	Summer	Autumn	Winter
POD ^d	≥ 0.1	0.51	0.40	0.02	0.16
	≥ 0.5	0.46	0.32	-	-
	≥ 1	0.51	0.26	-	-
	≥ 2	0.42	0.30	-	-
ETSe	≥ 0.1	0.12	0.16	-0.044	0.02
	≥ 0.5	0.14	0.21	-0.006	-
	≥ 1	0.27	0.19	-0.005	-
	≥ 2	0.19	0.24	-	-
Accuracy	≥ 0.1	0.59	0.64	0.64	0.55
	≥ 0.5	0.60	0.72	0.86	0.57
	≥ 1	0.72	0.79	0.97	0.75
	≥ 2	0.74	0.84	0.99	0.90

^aIOA: index of agreement

^bRMSE: root mean square error

^cMBE: mean bias error

^dPOD: probability of detection

^eETS: equitable threat score

Table 13. Same as Table 12 except for 6-h seeding.

[A] Air temperature, wind speed, and relative humidity

	Air temperature (°C)			Wind speed (m/s)			Relative humidity (%)		
	IOA ^a	RMSE ^b	MBE ^c	IOA	RMSE	MBE	IOA	RMSE	MBE
Spring	0.931	1.58	0.70	0.555	2.57	1.84	0.759	8.96	-4.60
Summer	0.769	1.16	0.75	0.565	2.87	2.38	0.765	4.82	-2.39
Autumn	0.921	1.12	0.58	0.512	1.74	1.44	0.933	5.52	-2.71
Winter	0.907	1.18	0.14	0.528	1.41	0.96	0.719	6.54	-2.89

[B] Precipitation

	Threshold (mm/hr)	Spring	Summer	Autumn	Winter
POD ^d	≥ 0.1	0.54	0.45	0.11	0.62
	≥ 0.5	0.35	0.37	-	0.34
	≥ 1	0.46	0.48	-	0.29
	≥ 2	0.36	0.45	-	-
ETS ^e	≥ 0.1	0.18	0.22	0.05	0.26
	≥ 0.5	0.13	0.28	-0.01	0.17
	≥ 1	0.28	0.40	-	0.22
	≥ 2	0.18	0.41	-	-
Accuracy	≥ 0.1	0.64	0.73	0.77	0.74
	≥ 0.5	0.60	0.81	0.89	0.73
	≥ 1	0.76	0.89	0.98	0.85
	≥ 2	0.79	0.91	1	0.93

^aIOA: index of agreement

^bRMSE: root mean square error

^cMBE: mean bias error

^dPOD: probability of detection

^eETS: equitable threat score

3.2. 인공증우에 의한 미세먼지 영향 평가

3.2.1. 시·공간 영향 분석

인공강우 효과에 의한 미세먼지 영향을 분석하기 위한 사례일은 2.1절에서 언급한 바와 같이 2021년 4월 25일 00 UTC ~ 29일 00 UTC로 선정하였다. 이 사례일에 대하여 지상일기도를 보면(Fig. 20), 사례 내에서 저기압·전선이 한반도를 통과하며 강수가 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 21는 선정한 사례일의 강수 및 미세먼지 농도의 관측값을 나타낸다. 강수가 최대 1.6 mm이며, PM₁₀과 미세입자(fine particles, PM_{2.5})의 평균 농도는 약 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (최고 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상), 약 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (최고 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상)으로 나타나 인공강우에 의한 미세먼지 영향을 평가하기에 적합한 것으로 판단된다. 또한, 6시간 연속시딩을 수행하였을 때, 인공증우 효과가 1시간 시딩에 비해 대부분 크게 나타나 6시간 연속시딩에 의한 미세먼지 영향을 평가 및 분석하였다.

Fig. 22은 사례기간 중 4월 28일에 대해 6시간 연속시딩의 SEED 및 UNSD 실험의 강수량 차이(인공증우량, SEED-UNSD)와 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도의 차이(CMAQ_{SEED}-CMAQ_{UNSD})를 나타낸다. 전반적으로, 인공증우량은 시딩물질의 이동 경로를 따라 보령댐을 포함한 영향 지역(Affected area, 녹색 점선)에서 인공증우 효과가 나타났으며, 비슷한 지역에서 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 농도 감소가 뚜렷하게 나타났다. 반면 비영향 지역(Unaffected area)에서는 인공증우 효과 및 미세먼지의 농도 변화가 거의 나타나지 않았다. 먼저, 4월 28일 05시를 보면(Fig. 22(a)), 영향 지역에서 UNSD와 SEED의 평균 인공강수량은 0.04 mm, 0.16 mm로 나타나, 이에 대한 인공증우량은 평균 0.12 mm, UNSD 대비 인공증우율은 288%로 산출되었다. 이 때의 PM₁₀ 농도는 UNSD 23.47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, SEED 16.61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며, PM_{2.5}는 각각 14.07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 10.50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 산출되었다. 따라서 인공강우에 의한 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 농도 저감은 각각 -6.86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, -3.59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 추정되었다(저감율 : 각각 29.2%, 25.5%). 동일 06시의 경우, 앞의 05시에 비해 인공증우량 및 미세먼지 농도 저감의 분포 패턴이 점점 확장된 모습을 볼 수 있다(Fig. 22(b)). 이 때의 UNSD와 SEED의 평균 강수량은 0.03 mm, 0.22 mm로 산출되어, 이에 대한 인공증우량(증우율)은 0.19 mm (697%)로 산출되었다. PM₁₀ 농도는

UNSD $24.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$, SEED $14.81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 PM_{10} 농도 감소는 $-9.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 산출되었다(저감율: 약 39.2%). $\text{PM}_{2.5}$ 의 경우, UNSD와 SEED 각각 $14.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $9.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 농도 저감 및 저감율은 $-5.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 35.6%로 추정된다. 이외에도 6시간 연속시딩을 수행한 각 시간대의 인공증우량과 미세먼지 농도에 대해 추가적인 분석을 수행하였다(Table 14). 연속적으로 시딩을 수행하는 동안 영향 지역에서 평균 인공증우량은 0.02 mm (03 LST 제외) ~ 0.19 mm로 산출되었으며, 이에 따른 PM_{10} 농도는 $-1.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ~ $-9.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자(coarse particles, PMC)는 $-0.96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ~ $-4.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{2.5}$ 는 $-0.99 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ~ $-5.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도의 농도 감소를 확인할 수 있었다. 전체 시·공간에 대한 평균 인공증우량은 0.10 mm로 추정되었다(인공증우율: 353%). 각 물질(PM_{10} , PMC, $\text{PM}_{2.5}$)에 대한 저감율은 $\text{CMAQ}_{\text{SEED}} - \text{CMAQ}_{\text{UNSD}} / \text{CMAQ}_{\text{UNSD}} \times 100$ 를 통해 계산하였다. 이에 따른 PM_{10} , PMC, $\text{PM}_{2.5}$ 의 전체 평균 농도 저감율은 각각 26.7%, 29.7%, 24.7%로 추정되었다(평균 농도 감소: 각각 $-6.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $-2.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $-3.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$). 조대입자가 미세입자 보다 강수의 영향을 더 많이 받는다는 여러 선행연구의 결과와 유사하게 본 연구에서도 PMC의 저감율이 가장 높게 나타나 조대입자가 인공강수에 의한 영향을 가장 많이 받는 것으로 추정된다(Andronache, 2003; Blanco-Alegre et al., 2018; Han and Um, 2023).

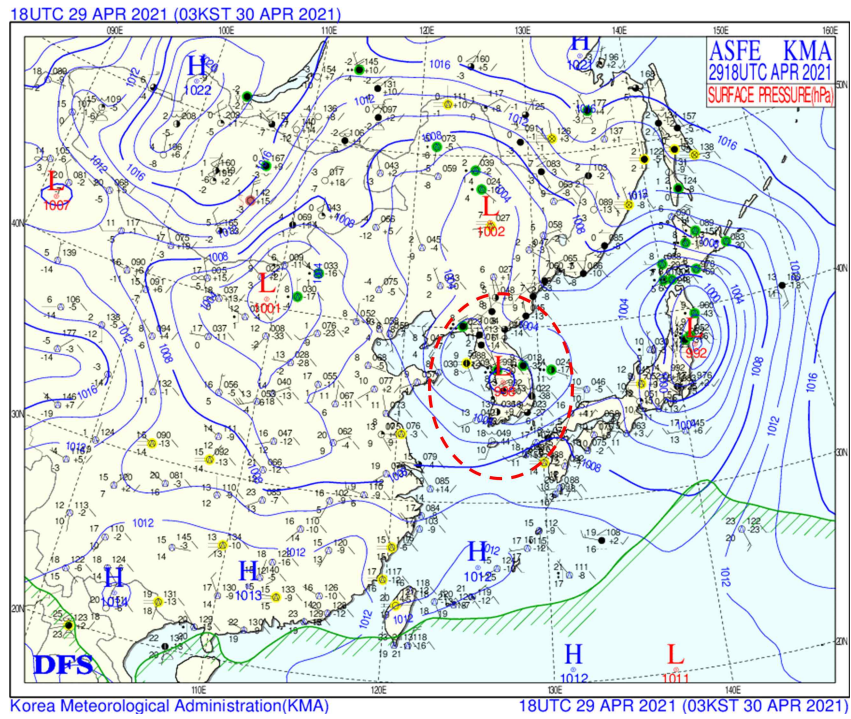


Fig. 20. Surface synoptic chart at 18 UTC on 29 April, 2021.

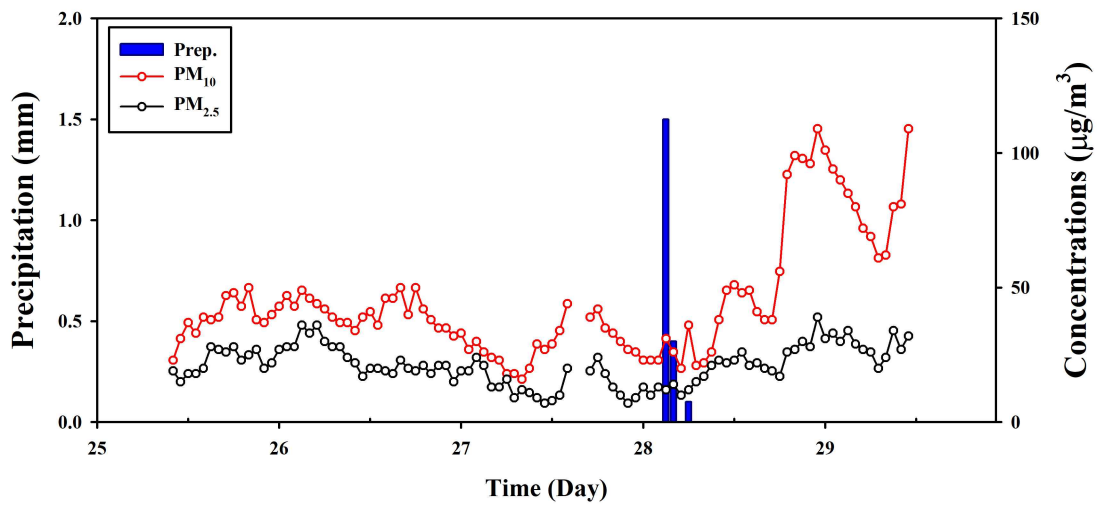
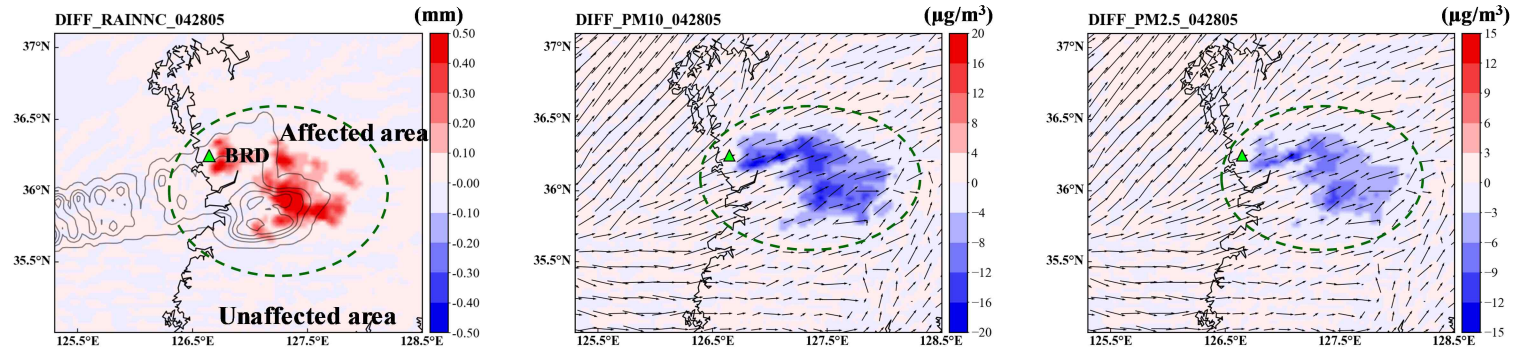
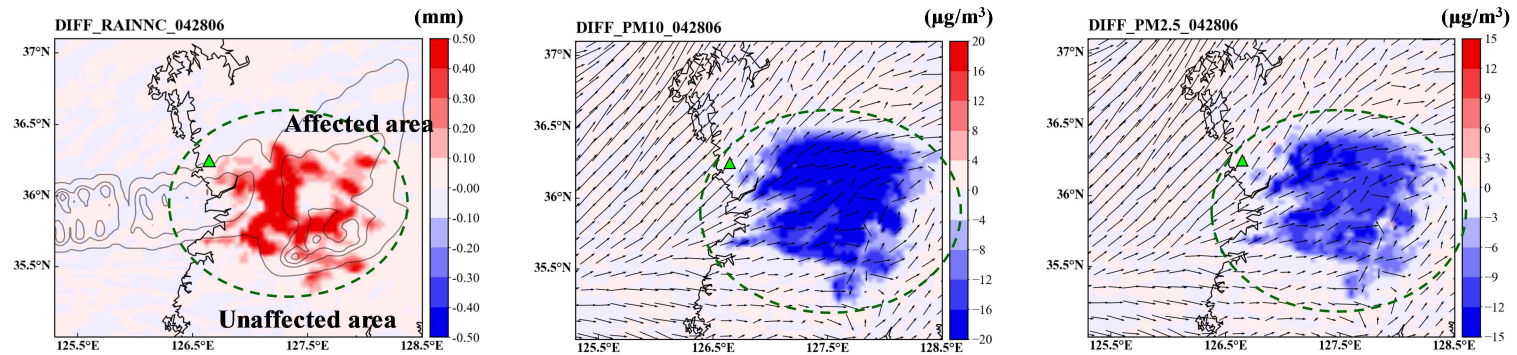


Fig. 21. Time series plot of the observed precipitation, PM_{10} , and $PM_{2.5}$ at meteorological and air quality monitoring site (near BRD) during the study period (from 00 UTC on April 25 to 00 UTC on April 29).



(a) 05 LST on April 28



(b) 06 LST on April 28

Fig. 22. Spatial distribution of the difference (SEED-UNSD) artificial rainfall (mm), PM_{10} , and $PM_{2.5}$ concentrations ($\mu g/m^3$) in study period.

Table 14. Changes in artificial rainfall, PM₁₀, PMC, and PM_{2.5} concentrations during 6-h of continuous cloud seeding.

Time (LST)	Arg. Precipitation (mm)		Avg. PM ₁₀ concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Avg. PMC concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Avg. PM _{2.5} concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	Mean	Increase rate (%)	Mean	Decrease rate (%)	Mean	Decrease rate (%)	Mean	Decrease rate (%)
04.28.03	0.46/0.46/0.0004 ^a	0.08	14.27/14.16/-0.11 ^b	-0.75	6.10/6.04/-0.06 ^b	-0.94	8.17/8.12/-0.05 ^b	-0.60
04.28.04	0.16/0.18/0.02	10.6	19.63/17.68/-1.95	-9.94	8.00/7.03/-0.96	-12.0	11.64/10.65/-0.99	-8.49
04.28.05	0.04/0.16/0.12	288	23.47/16.61/-6.86	-29.2	9.40/6.13/-3.27	-34.8	14.07/10.50/-3.59	-25.5
04.28.06	0.03/0.22/0.19	697	24.37/14.81/-9.57	-39.2	9.66/5.34/-4.32	-44.7	14.71/9.47/-5.24	-35.6
04.28.07	0.04/0.16/0.13	372	24.51/15.91/-8.60	-35.1	9.56/5.88/-3.69	-38.5	14.95/10.03/-4.92	-32.9
04.28.08	0.01/0.05/0.04	398	25.12/20.12/-5.01	-19.9	10.23/8.33/-1.90	-18.6	14.90/11.78/-3.10	-20.8
Mean	0.06/0.15/0.10	353	23.42/17.03/-6.39	-26.7	9.37/6.54/-2.83	-29.7	14.05/10.49/-3.57	-24.7

^aUNSD/SEED/Diffence (SEED-UNSD)

^bCMAQ_{UNSD}/CMAQ_{SEED}/Diffence (CMAQ_{SEED}-CMAQ_{UNSD})

보다 상세한 분석을 위해, Fig. 22에 나타난 영향 지역과 비영향 지역에 대해 인공증우량과 미세먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$)의 농도 변화를 각각 살펴보았다(Fig. 23~ Fig. 24). 먼저, 영향 지역에서 시딩이 시작된(녹색 점선) 이후부터 인공증우 효과(회색 bar)가 나타나기 시작하여 그 효과가 약 5시간 정도 지속적으로 나타났다. 인공증우량은 평균 0.03 mm (최대 1.5 mm) 정도로 나타났으며, 이에 따른 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 농도 감소는 약 5~6시간 동안 지속되며, 평균 각각 $-2.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (최고 $-20 \mu\text{g}/\text{m}^3$), $-1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (최고 $-11 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 정도 감소하는 경향을 보였다(Fig. 23). 반면, 비영향 지역에서는 시딩 시작 시간, 끝나는 시간, 이후 지속적으로 인공증우 효과 및 미세먼지의 농도 변화가 거의 나타나지 않았다(Fig. 24). 결과적으로, 인공증우의 효과가 뚜렷한 지역과 미세먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$) 농도 감소가 나타난 지역이 대부분 유사하게 나타나, 이는 인공증우로 인한 강수의 세정효과가 미세먼지 농도 감소에 영향을 준 것으로 사료된다.

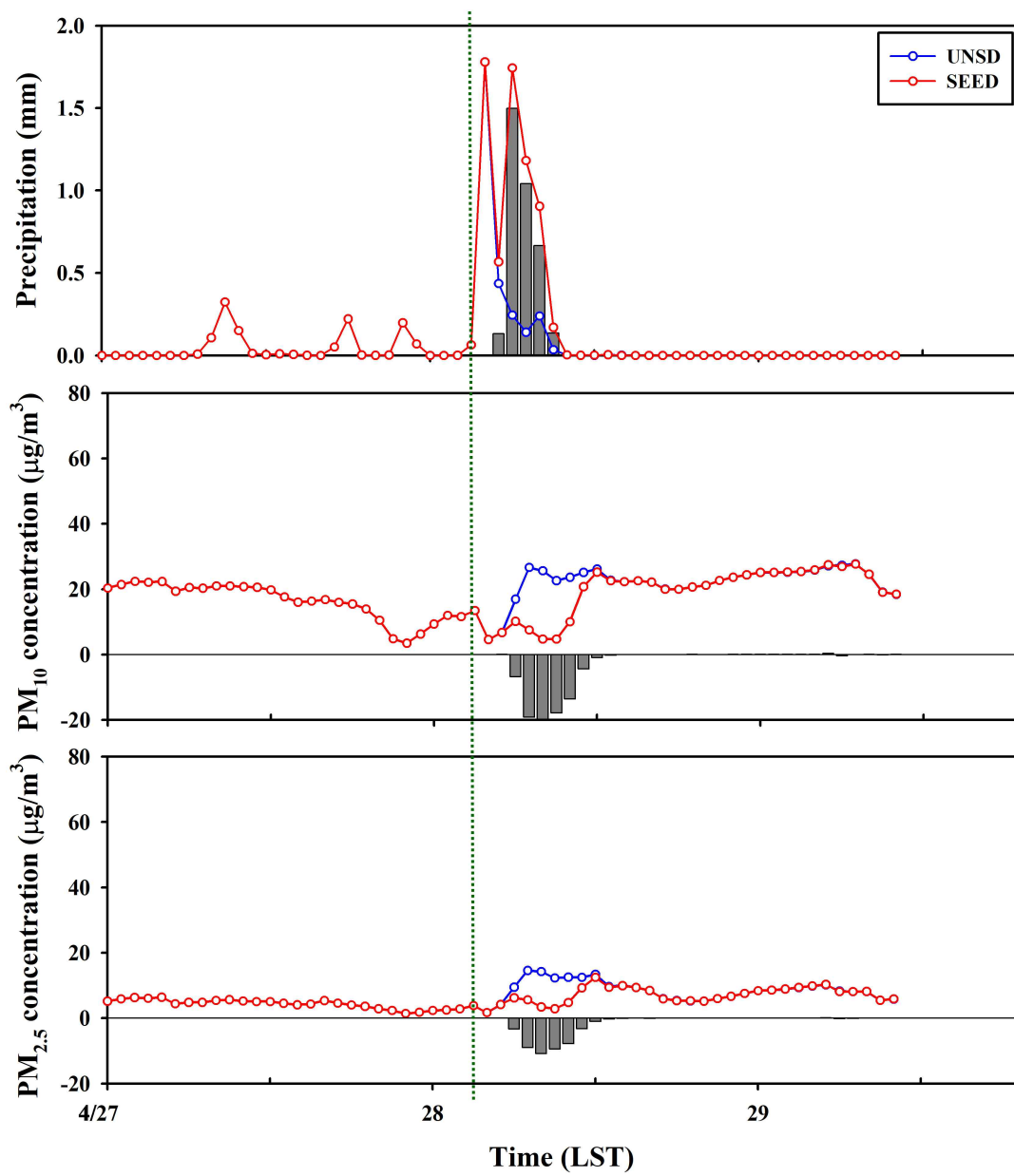


Fig. 23. Temporal variation in artificial rainfall and the concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5} in the affected areas.

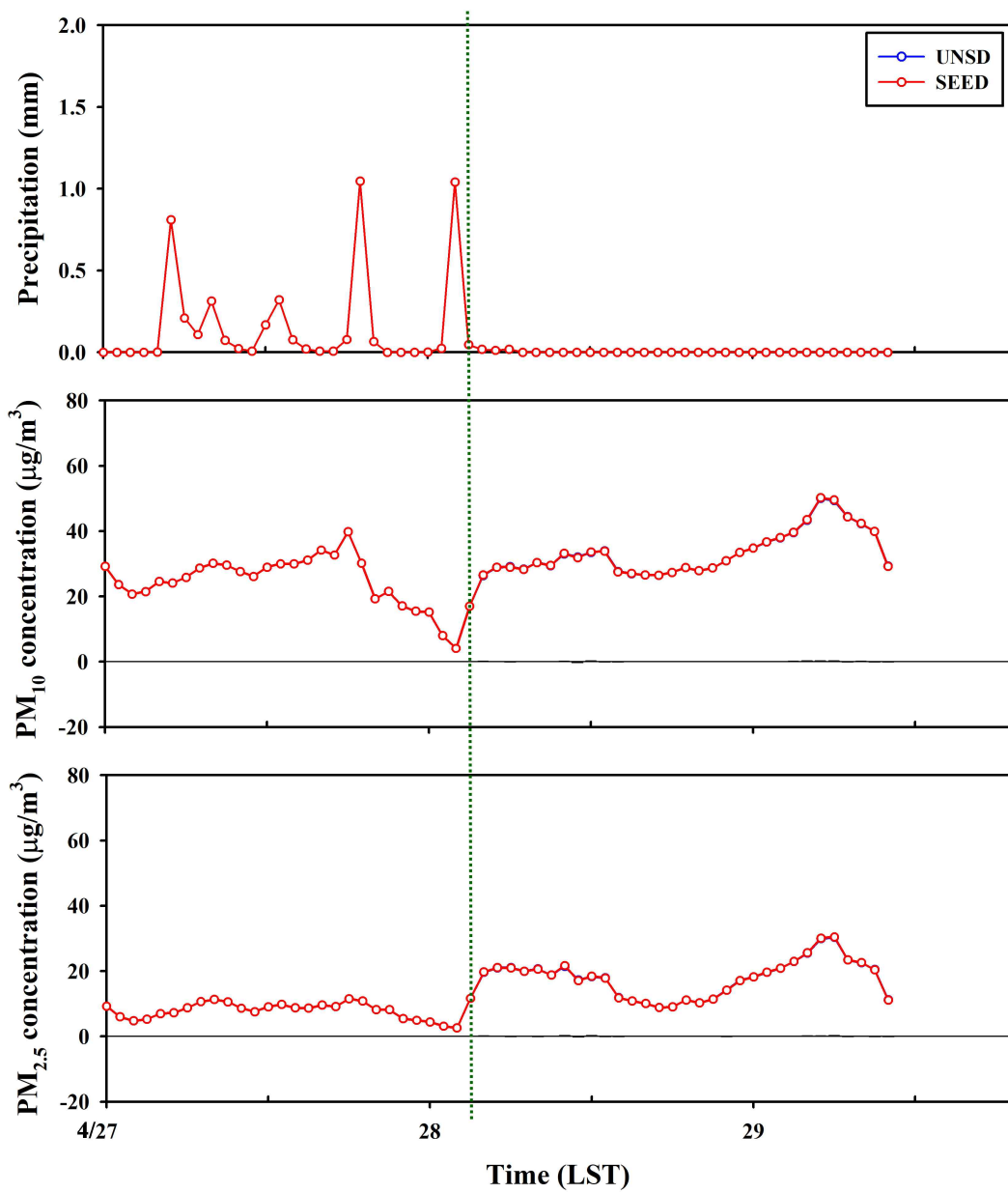


Fig. 24. Temporal variation in artificial rainfall and the concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5} in the unaffected areas.

3.2.2. 농도 변화에 따른 구성성분별 비율

Fig. 25는 인공증우 효과가 뚜렷한 영항 지역에서 PM_{10} 농도의 감소가 나타난 시간대에 대해 PMC와 $PM_{2.5}$ 의 농도 감소를 나타낸다. 여기서 PM_{10} 농도 감소량은 PMC와 $PM_{2.5}$ 농도 감소량의 합을 의미한다. 전반적으로 PM_{10} 농도 감소 중 미세입자($PM_{2.5}$)가 차지하는 농도 감소는 조대입자(PMC)와 유사한 수준으로 나타났다. 이는 보령댐 인근의 거대 점오염원과 일부 중국 배출원의 영향으로 인해 $PM_{2.5}$ 농도가 높은 수준이었기 때문으로 사료된다. 모든 시간대에서 PM_{10} 농도 감소 시 PMC와 $PM_{2.5}$ 의 저감율은 27~53%, 47~73%로 산출되었다(Fig. 25). 각 물질(PMC, $PM_{2.5}$)이 차지하는 저감율은 PM_{10} 농도 대비 각 물질의 비율을 의미한다. Table 15는 6시간 연속시딩을 수행한 각 시간대에 해당하는 PM_{10} , PMC, $PM_{2.5}$ 의 시·공간 평균 감소된 농도와 PM_{10} 농도 감소 시 PMC와 $PM_{2.5}$ 가 차지하는 저감율을 나타낸다. 6시간 연속시딩 동안 영항 지역에서 PMC와 $PM_{2.5}$ 의 시공간 평균적으로 감소된 농도는 각각 $-0.06 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim -4.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $-0.05 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim -5.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며, 각각의 저감율은 38.0%~53.9%, 46.1%~62.0% 정도 차지하였다.

3.2.1절에서 설명한 바와 같이 여러 선행연구에서 조대입자가 강수에 의한 영향을 많이 받는 것에 대하여 본 연구에서도 유사한 결과가 나타났지만, $PM_{2.5}$ 의 저감율도 무시할 수 없는 수준으로 높게 나타나 $PM_{2.5}$ 농도 감소 시, 각 구성성분별 차지하는 저감율을 분석하였다. Fig. 26은 $PM_{2.5}$ 농도 감소 시, 2차 무기에어로졸(SIA), 2차 유기에어로졸(SOA), 1차 유기에어로졸(POA), 나머지 성분들(other)이 차지하는 저감율을 나타낸다. $PM_{2.5}$ 농도 감소 시 SIA, SOA, POA, other가 차지하는 저감율은 각각 66.5%, 23.5%, 1.77%, 8.19%로 나타났다.

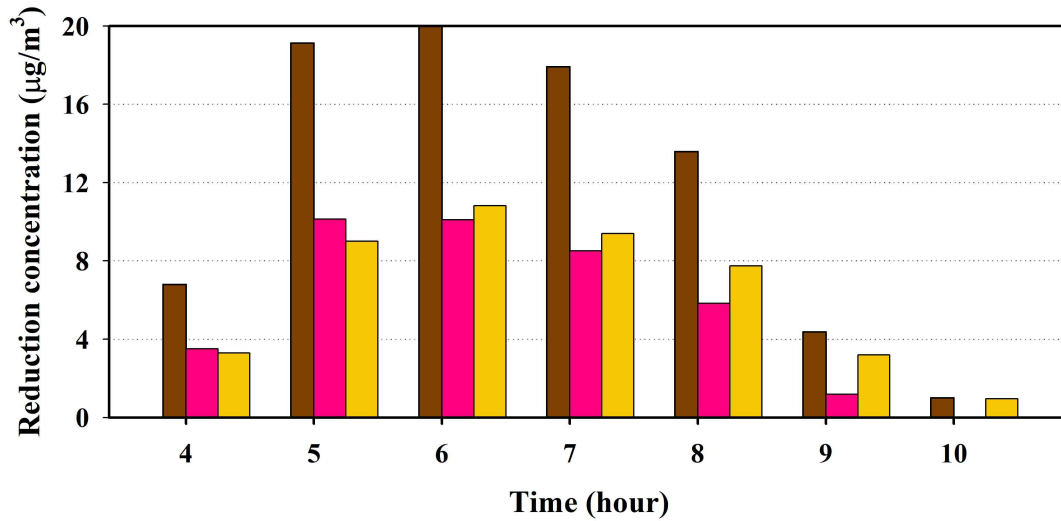


Fig. 25. Bar plot of the decrease in concentration of PMC and PM_{2.5} as PM₁₀ concentration decrease over time.

Table 15. Averaged spatiotemporal reduced concentrations of PM₁₀, PMC, and PM_{2.5} and decrease rate to PM₁₀.

Time (LST)	Avg. PM ₁₀ concentration (µg/m ³)	Avg. PMC concentration (µg/m ³)		Avg. PM _{2.5} concentration (µg/m ³)	
	DIFF ^a	DIFF ^a	Decrease rate(%)	DIFF ^a	Decrease rate(%)
04.28.03	-0.11	-0.06	53.9	-0.05	46.1
04.28.04	-1.95	-0.96	49.4	-0.99	50.6
04.28.05	-6.86	-3.27	47.7	-3.59	52.3
04.28.06	-9.56	-4.32	45.2	-5.24	54.8
04.28.07	-8.60	-3.68	42.8	-4.92	57.2
04.28.08	-5.01	-1.90	38.0	-3.10	62.0

^aDiffence (CMAQ_{SEED}-CMAQ_{UNSD})

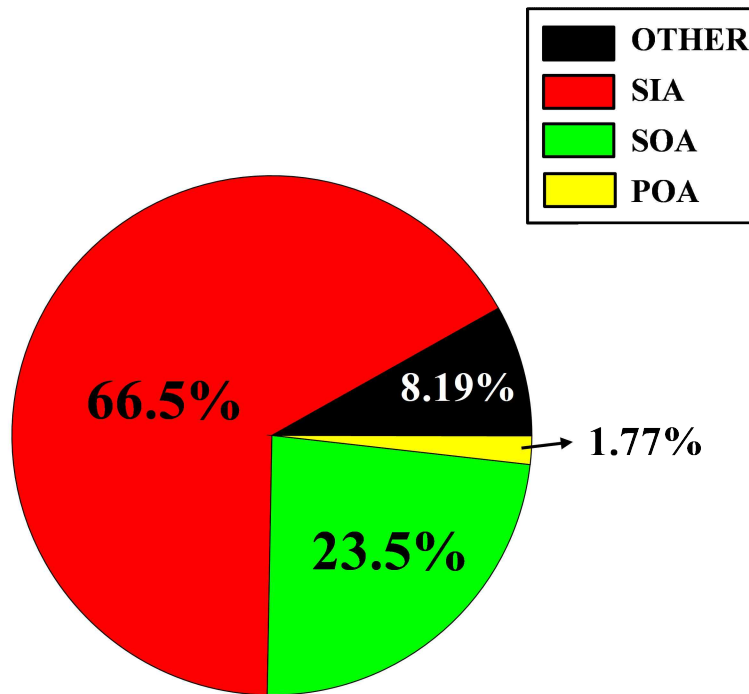


Fig. 26. Pie chart of each component (SIA, SOA, POA, other) decrease rate (%) to the reduction in PM_{2.5} concentration.

전체 시·공간 평균 PM_{2.5}의 구성성분(SIA, SOA, POA, insoluble)을 정량적으로 분석한 결과(Table 16), 각각의 구성성분(SIA, SOA, POA)의 평균 농도 감소는 각각 $-2.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $-0.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $-0.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 산출되었으며, 이에 따른 각각의 저감율은 24.3%, 30%, 28.1%로 나타났다. 일반적인 OC (유기 탄소)는 열/광화학적 탄소 에어로졸 분석기를 통해 분석하지만 측정에 한계가 있다. 따라서 선행연구를 참고하여 OC는 수용성 OC/OC의 비율이 0.7~0.9 정도를 차지하기 때문에 수용성 에어로졸로 가정하여 아래에 제시한 식 (1)을 이용하여 불용성 에어로졸을 계산하였다(Park et al., 2014; Song et al., 2017). 그 결과, 평균 감소 농도가 $-0.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 저감율은 약 30% 정도로 산출되었다. 이를 통해 수용성 에어로졸(주로 SIA, SOA 등)이 인공강우에 의해 약 55% 정도로 농도 감소가 크게 나타난 것으로 사료된다.

$$[\text{Insoluble}] = \{[\text{OC}] \times [\text{OM}]/[\text{OC}]\} - [\text{OC}] \quad (1)$$

Table 16. Changes in SIA, SOA, POA, and Insoluble concentrations during 6-h of continuous cloud seeding.

Time (LST)	Avg. SIA concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Avg. SOA concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Avg. POA concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Avg. insoluble concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	Mean	rate	Mean	rate	Mean	rate	Mean	rate
04.28.03	7.57/7.52/-0.04 ^a	-0.54	1.36/1.35/-0.01 ^a	-0.80	0.08/0.08/-0.0006 ^a	-0.76	0.71/0.70/-0.01 ^a	-0.80
04.28.04	9.41/8.71/-0.70	-7.42	2.31/2.05/-0.27	-11.5	0.15/0.14/-0.02	-10.6	1.20/1.06/-0.14	-11.4
04.28.05	10.6/8.05/-2.59	-24.3	2.82/1.88/-0.94	-33.4	0.21/0.15/-0.07	-30.8	1.46/0.98/-0.49	-33.3
04.28.06	10.7/6.90/-3.76	-35.3	2.95/1.65/-1.29	-43.9	0.24/0.14/-0.10	-41.4	1.54/0.86/-0.67	-43.8
04.28.07	10.9/7.35/-3.53	-32.5	2.97/1.82/-1.14	-38.5	0.24/0.15/-0.09	-36.7	1.55/0.95/-0.60	-38.5
04.28.08	10.2/8.00/-2.24	-21.9	2.96/2.28/-0.68	-22.9	0.24/0.19/-0.05	-20.8	1.54/1.19/-0.35	-22.8
Mean	10.37/7.80/-2.56	-24.3	2.80/1.94/-0.86	-30.0	0.22/0.15/-0.06	-28.1	1.46/1.01/-0.45	-30.0

^aCMAQ_{UNSD}/CMAQ_{SEED}/Diffence (CMAQ_{SEED}-CMAQ_{UNSD})

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 우리나라 충청남도 보령시에 위치한 보령댐을 대상지역으로 선정하여 2021년 중 저기압·전선이 통과하는 계절별 사례에 대해 인공증우 효과를 분석하였다. 또한 시딩 시간 변화(1시간 및 6시간 연속시딩)에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 또한 인공강우에 의한 미세먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$) 영향을 평가 및 분석하였다. 전반적으로, 연구기간 동안 대상지역인 보령댐 부근과 시딩물질의 이동경로를 따라 인공강우 효과가 뚜렷하게 나타나는 패턴을 보였다. 1시간 시딩의 경우, 시딩 종료 후 180분 누적 인공증우량이 봄철(0.45 mm)에 가장 많았으며, 다음으로 여름(0.31 mm), 가을(0.15 mm), 겨울(0.02 mm) 순으로 높게 나타났다. 이에 대한 인공증우율은 여름, 겨울, 가을, 봄(각각 394%, 320%, 99.3%, 14.4%) 순으로 높게 나타났지만, 이는 봄철의 UNSD 강수량이 다른 계절에 비하여 상대적으로 크게 나타나 UNSD 대비 인공증우율이 낮게 산출된 것으로 사료된다. 6시간 연속시딩의 경우, 시딩 종료 후 300분(시딩 시작 이후부터 총 11시간) 누적 인공증우량을 보면, 1시간 시딩과 동일하게 봄철(2.30 mm)에 가장 높게 나타났다. 다음으로 겨울(1.30 mm), 여름(1.22 mm), 가을(0.97 mm) 순으로 산출되었다. 이에 대한 인공증우율은 여름, 가을, 겨울, 봄 순으로 높게 나타났는데(각각 285%, 187%, 89.5%, 40.0%), 1시간 시딩과 유사하게 봄철의 인공증우량이 가장 많았음에도 불구하고, UNSD의 강수량이 높게 나타나 인공증우율이 가장 낮게 산출된 것으로 판단된다.

본 연구에서는 동일한 영역에 대해 1시간 및 6시간 연속시딩의 180분 누적 수치모의 결과를 비교하였을 때, 봄철의 경우에는 약 4배~65배의 인공증우 효과가 크게 나타났으며, 여름철에는 5배~21배, 가을철에는 7배~11배, 마지막으로 겨울철에는 1시간 시딩의 인공증우량이 너무 작아 65배 이상의 인공증우 효과가 나타나는 것을 확인하였다. 또한 1시간 시딩을 기준 실험으로 하여 시딩 지속시간 및 양 변화에 따른 민감도 분석 결과, 시딩 지속시간을 2배와 3배로 늘렸을 때 기준 실험(0.45 mm)에 비해 약 3배의 인공증우 효과가 나타났으며(각각 1.44 mm, 1.43 mm), 시딩 양 증가에 대하여 민감한 변화가 나타나지 않았다. 이는 너

무 많은 양을 살포하여 overseeding이 발생한 것으로 추정된다.

인공증우 효과가 크게 나타났던 2021년 4월 25~29일 사례를 대상으로 인공강우-미세먼지 모델링 결과, 인공증우 효과가 뚜렷하게 나타난 지역(Affected area)에서 미세먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$) 농도가 감소하는 지역이 유사한 공간분포 패턴이 나타나 인공강우의 세정효과로 인해 농도가 감소한 것을 확인할 수 있었다. 그러나, 비영향 지역(Unaffected area)에서는 인공증우 효과 및 미세먼지 농도 변화가 매우 미미하게 나타났다. 영향 지역에 나타난 평균 인공증우량은 0.02 mm (03LST 제외) ~ 0.19 mm이며, 이에 따른 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 및 $PM_{2.5}$ 농도는 $-1.95 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim -9.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $-0.96 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim -4.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $-0.99 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim -5.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도 감소하였으며, 시·공간 전체의 평균 저감율은 약 26.7%, 29.7%, 24.7%로 추정되었다.

본 연구에서는 모델의 고해상도 입력자료(UM-LDAPS, GDAPS 초기·경계장, 토지피복도, 지형고도 등)를 이용하여 시딩물질의 입자 크기 분포를 적용하여 대상지역의 인공증우량을 추정하고 시딩 시간 변화에 따른 민감도를 분석하였다. 또한 인공강우에 의한 미세먼지 영향을 평가하였다. 기존의 인공강우 연구는 1시간 시딩에 대한 연구만 진행되어 왔으며, 연속적으로 시딩을 적용하는 수치모의 연구는 수행된 바 없다. 본 연구의 인공강우 수치모의 결과를 통해 향후 인공강우 수치모의 기술의 실용화 및 인공강우 관측 실험 최적의 조건을 설정하는데 중요한 기초 정보로 활용될 것으로 기대된다. 그러나, 본 연구에서 수행하는 모델링 사례마다 시딩물질을 살포하는 위치인 상층과 지상에서의 풍계가 서로 달라 인공증우에 의한 뚜렷한 영향 지역을 설정하는데 한계가 있었다. 또한, 다양한 기상조건(풍계, 운량 등)에 따른 민감도 연구를 수행하지 못하여 객관적이고 일반적인 해석을 하는 데는 다소 어려움이 있었다. 이외에도 인공강우에 의한 미세먼지 영향 평가를 위한 사례일 선정 시 적절한 강수 및 미세먼지 농도 수준을 동시에 만족하는 경우가 적어 어려움이 있었다. 이러한 한계점을 보완하여 다양한 사례 연구가 수행한다면, 대상 지역에서의 보다 효과적인 인공증우 효과를 추정하는데 기여할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 국립기상과학원, 2022: 인공강우 실험의 예측·실시 절차 및 분석기술 개발
- 장기호, 이명주, 정진임, 장영진, 양하영, 김금란. (2008). 안개소산과 인공증우 (설) 기술. *공기청정기술*, 21(1), 9-20.
- 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.
- Andronache, C. (2003) Estimated variability of below-cloud aerosol removal by rainfall for observed aerosol size distributions, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 3(1), 131-143.
- Bernardet, L., Wolff, J., Nance, L., Loughe, A., Weatherhead, B., Gilleland, E., Brown, B. (2009) Comparison between WRF-ARW and WRF-NMM objective forecast verification scores. In 23rd Conference on Weather Analysis and Forecasting/19th Conference on Numerical Weather Prediction, Omaha, NE. Accessed June (Vol. 13, p. 2016).
- Blanco-Alegre, C., Castro, A., Calvo, A. I., Oduber, F., Alonso-Blanco, E., Fernández-González, D., Valencia-Barrera, R. M., Vega-Maray, A. M., Fraile, R. (2018) Below cloud scavenging of fine and coarse aerosol particles by rain: The role of raindrop size, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144(717), 2715-2726.
- 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.
- Byun, D. W., Ching, J. K. S. (1999) Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System, U.S. Environmental Protection Agency (US EPA), EPA/600/R-99, 30.
- Byun, D., Schere, K. L. (2006) Review of The Governing Equations,

- Computational Algorithms, and Other Components of The Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System, *Applied Mechanics Reviews*, 59(2), 51-77.
- Cha, J. W., Jung, W., Chae, S., Ko, A., 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.
- 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.
- Carmichael, G. R., Calori, G., Hayami, H., Uno, I., Cho, S. Y., Engardt, M., Kim, S. B., Ichikawa, Y., Ikeda, Y., Woo, J. H., Ueda, H., Amann, M. (2002) The MICS-Asia Study: Model Intercomparison of Long-Range Transport and Sulfur Deposition in East Asia, *Atmospheric Environment*, 36(2), 175-199.
- 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.
- 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.
- 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), 8851.
- 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.
- Guenther, A. B., Jiang, X., Heald, C. L., Sakulyanontvittaya, T., Duhl, T. A., Emmons, L. K., Wang, X. (2012) The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 2.1 (MEGAN2. 1): An Extended and Updated Framework for Modeling Biogenic Emissions, *Geoscientific Model Development*, 5(6), 1471-1492.
- 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.
- Han, S., Um, J. (2023) Scavenging Efficiency Based on Long-Term Characteristics of Precipitation and Particulate Matters in Seoul, Korea, *Atmosphere. Korean Meteorological Society*, 33(4), 367-385.
- 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.
- Hill, G. E. (1979) Research on Increased Winter Orographic Precipitation by Cloud Seeding (FY 1979) Development of Cloud Seedability Criteria.
- 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.
- Hur, S.-K., Ho, C.-H., Kim, J., Oh, H.-R., Koo, Y.-S. (2021) Systematic bias of WRF-CMAQ PM10 simulations for Seoul, Korea, *Atmospheric Environment*, 244, 117904.
- Jee, J.-B., Kim, S. (2017) Sensitivity Study on High-resolution WRF Precipitation Forecast for a Heavy Rainfall Event, *Atmosphere*, 8(6), 96.
- 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.
- Kain, J. S. (2004) The Kain-Fritsch Convective Parameterization : An Update, *Journal of Applied Meteorology*, 43(1), 170-181.
- Kang, C.-Y., Song, S.-K., Moon, S.-H., Lim, Y.-K., Chang, K.-H., Chang, C. (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.
- 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, 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.
- 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.
- 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.
- K-water, Ministry of Environment (2020) *Water and Future*.
- 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.
- Lim, Y.-K., Kim, B.-Y., Chang, K.-H., Cha, J. W., Lee, Y. H. (2022) Analysis of PM₁₀ Reduction Effects with Artificial Rain Enhancement Using Numerical Model, *Atmosphere*, 32(4), 341-351.
- Luecken, D. J., Yarwood, G., Hutzell, W. T. (2019) Multipollutant modeling of ozone, reactive nitrogen and HAPs across the continental US with CMAQ-CB6, *Atmospheric environment*, 201, 62-72.
- 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.
- 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.
- 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.
- Park, D. J., Ahn, J. Y., Shin, H. J., Bae, M. S. (2014) Characteristics of PM_{2.5} carbonaceous aerosol using PILS-TOC and GC/MS-TD in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 30(5), 461-476.
- Peterson, D. A., Hyer, E. J., Han, S. O., Crawford, J. H., Park, R. J., Holz, R.,

- Kuehn, R. E., Eloranta, E., Knute, C., Jordan, C. E., Lefer, B. L. (2019) Meteorology influencing springtime air quality, pollution transport, and visibility in Korea, *Elementa-Science of the Anthropocene*, 7, 57.
- 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.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B. (2008) A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications, *Journal of computational physics*, 227(7), 3465-3485.
- 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.
- Song, S. K., Shon, Z. H., & Park, Y. H. (2017) Diurnal and seasonal characteristics of the optical properties and direct radiative forcing of different aerosol components in Seoul megacity, *Science of the Total Environment*, 599, 400-412.
- 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.
- 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.
- Stockwell, W. R., Middleton, P., Chang, J. S., Tang, X. (1990) The Second Generation Regional Acid Deposition Model Chemical Mechanism for Regional Air Quality Modeling, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 95(D10), 16343-16367.
- 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.
- U.S. EPA. (1999) Science Algorithms of the EPA Models 3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System.
- Vallero, D.A. (2014) *Fundamentals of Air Pollution*, 5th ed. Academic press, 683-753pp.
- WRF-ARW V3: User's Guide (2017).
- 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.
- 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.

Sensitivity analysis of artificial rainfall and its effect on particulate matter using meteorological and air quality modeling

Chae-Yeon Kang

Faculty of Earth and Marine Convergence,
Earth and Marine Sciences Major
The Graduate School, Jeju National University

Abstract

This study investigated the seeding effect of seeding material (AgI, CaCl₂) on artificial rainfall around the Boryeong Dam (BRD) region located in Chungnam Province by season at 2021, and a sensitivity analysis on the artificial rainfall changes caused by the seeding time change. In addition, the impact of particulate matter by artificial rainfall was analyzed and evaluated. This analysis was performed by two sets of simulation experiments: (1) meteorological model simulations that considered seeding (i.e., SEED) and (2) without considering seeding (i.e., UNSD). For 1-hour seeding, the mean 180 min-accumulated artificial rainfall between the SEED and UNSD (SEED-UNSD) due to seeding was significant in spring, summer, autumn, and winter (0.45 mm, 0.31 mm, 0.15 mm, and 0.02 mm, respectively). For 6-hour seeding, the 300 min-accumulated artificial rainfall after the end of seeding (totaling 11 hours from the start of seeding) was largest in spring (2.30 mm), followed by winter (1.30 mm), summer (1.22 mm), and fall (0.97 mm).

In the sensitivity analysis of seeding time changes, the seeding for 6-h continuously resulted in a significant artificial rainfall effect, ranging from at

least 4 times to more than 65 times that of 1-h seeding. Also duration and amount changes, the increases in seeding duration (2- and 3-fold) resulted in significant changes (a factor of 3 increase) in the mean 180 min-accumulated artificial rainfall in the study area, but there were no distinct changes in case of increased seeding amount. As for the concentration of fine dust due to artificial rainfall, the simulation results showed that when the average artificial rainfall was 0.02 mm ~ 0.19 mm in the affected area, the concentration of fine dust decreased in the same area, and the degree of decrease was about from $-1.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ to $-9.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for PM_{10} and from $-0.99 \mu\text{g}/\text{m}^3$ to $-5.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for $\text{PM}_{2.5}$.