

대기물리 분과 / 대기물리 1-1

# 인공강우실험에 의한 산림연료습도 증대효과와 산불예방 가능성 평가

차주완, 구해정, 김부요, 임윤규, 노용훈, 장기호, 황현준, 김민후, 채상희, 김규량, 김승범

국립기상과학원 기상응용연구부

2024년 강원도지역에서 실시된 인공강우 항공실험은 산불 위험 관리 차원에서 산림연료습도(Fuel Moisture Content, FMC) 변화에 미치는 효과를 검증하기 위해 수행되었다. 산림 연료습도는 산불 발생과 직결되는 핵심 지표로, 약 10% 이하일 경우 작은 불씨도 대형 산불로 확산될 수 있을 정도로 위험하다. 본 연구는 총 43회 항공기 시딩(cloud seeding) 실험 중 실험 전 최대한 유사한 산림연료습도 조건인 11회사례를 대상으로 시딩 전후 연료습도 및 기상조건을 비교·분석하여, 인공강우의 산불 예방 효과를 통계적으로 평가하였다.

실험에서는 주로 CaCl<sub>2</sub>연소탄을 사용하였으며, 시딩 시간, 자연강수량, 상대습도, 기온, 풍속 등을 함께 수집하였다. 분석 방법으로는 시딩 전 3시간과 시딩 후 24/48/72시간의 연료습도 자료를 쌍으로 비교하는 대응표본 t-검정을 적용하였고, 강수량과 상대습도의 영향을 보정하기 위해 이중차분(DID) 회귀모형 및 공변량조정(ANCOVA)을 병행하였다. 분석 결과, 11회 중 7회에서 시딩지역의 연료습도가 비영향지역보다 유의하게 높게 나타났다. 예를 들어 6월 1일 실험에서는 시딩 후 2.5 mm 강수가 발생하며 시딩지역 FMC가 8.9%에서 17.9%로 증가하여 비영향지역 대비 약 3% 포인트 높았고, DID 분석에서도 24시간 효과가 +3.4% 포인트로 통계적으로 유의하였다. 9월 14~15일 사례에서는 장시간 시딩과 10 mm 이상의 강수가 병행되어 영향지역 FMC가 23% 내외로 유지된 반면 비영향지역은 감소 추세를 보여 DID 효과가 약 +2% 포인트로 나타났다. 10월 22일 실험 역시 시딩과 강수가 복합적으로 작용하여 영향지역 FMC가 비영향지역보다 4%포인트 높았다. 전체 실험을 통합한 DID 분석에서는 시딩 후 24시간, 48시간, 72시간 동안의 평균 효과가 각각 +1.7% 포인트, +1.1% 포인트, +0.9%포인트로, 시간이 지남에 따라 감소하는 경향을 보였다. 또한 FMC 증가는 강수량 및 상대습도와 양의 상관성을, 기온과는 음의 상관성을 보여 시딩 효과가 기상 조건에 크게 좌우됨을 확인하였다. 종합하면, 항공기 인공강우 실험은 적절한 기상 조건에서 산림 연료습도를 증가시켜 산불 위험을 완화하는 데 기여할 수 있다는 가능성에 대한 통계적 유의성을 분석하였다. 그러나 구름 수분량과 강수 시스템 존재 여부가 효과를 결정하는 핵심 요인으로, 건조한 조건에서는 효과가 제한적이었다. 따라서 향후 인공강우 실험은 사전 기상 예측을 기반으로 수분이 충분한 구간을 목표로 하고, 시딩 영향지역과 대조지역의 엄밀한 구분을 통해 효과를 정량화하는 체계적 접근이 요구된다.

**Keywords:** 인공강우, 기상조절, 산림연료습도

※ 이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상조절 및 구름물리 연구」 (KMA2018-00224)의 지원으로 수행되었습니다.

대기물리 분과 / 대기물리 1-2

# 약한 이슬비가 내리는 층적운의 층적운-적운 전환 모의에서 수치 모델 해상도에 대한 의존성: 라그랑지안 큰 에디 모사

이한별, 이현호

공주대학교 대기과학과

지구 해양의 약 25%를 덮고 있는 층적운은 태양 복사를 효과적으로 반사하여 지구 복사 수지를 조절하는 역할을 한다. 구름 꼭대기의 복사냉각, 건조공기 유입과 약한 이슬비와 같은 다양한 물리적 과정이 층적운의 발달 과정에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으나, 이러한 물리적 과정은 수치 모델의 공간 해상도 변화에 따라 다르게 나타나, 수치 실험 결과를 해석하기 어렵게 한다.

본 연구에서는 약한 이슬비가 동반되는 층적운에서 나타나는 층적운-적운 전환(Stratocumulus-Cumulus Transition; SCT) 과정을 수치적으로 모의하고, 수치 모델의 공간 해상도 변화에 따라 나타나는 물리적 특성의 민감도와 수렴 경향을 살펴보고자 하였다. 이를 위해 시간에 따라 모의 영역이 움직이는 라그랑지안 큰 에디 모사(Large-eddy simulation; LES) 모형을 이용하여 수평( $\Delta x = 70, 35, 17.5 \text{ m}$ ) 및 연직( $\Delta z = 15, 10, 5 \text{ m}$ ) 격자 간격을 개별적으로 조합하여 9가지 해상도로 이상화된 LES를 수행하였다. 약한 이슬비가 내리는 층적운이 형성되는 동일한 대기 조건에서 수평 및 연직 격자 해상도를 바꾼 결과, 각 방향의 해상도 변화가 구름 꼭대기와 바닥에 상반된 반응을 유도했다. 수평 격자 간격을 세밀하게 한 경우, 구름 꼭대기와 바닥 높이 모두 높아지는 경향을 보였고, 특히 바닥의 변화 폭이 크게 나타났다. 이는 구름 꼭대기의 상승 운동 증가와 구름 바닥 부근의 액체상 두께(liquid water path, LWP) 감소와 연관되어, 결과적으로 구름 분율과 강수량 감소가 나타났기 때문이다. 또한, 강수가 거의 발생하지 않는 경우에도 구름 분율이 감소하는 결과를 보였는데, 이는 강수 외에 다른 요인이 SCT에 작용할 수 있음을 보여준다. 한편, 연직 격자 간격이 세밀해질수록 구름 꼭대기와 바닥 높이가 낮아지고 LWP와 강수량이 증가했는데, 이는 수평 해상도 변화와는 반대되는 결과이다. 본 연구 결과는 층적운-적운 전환의 모의에서 해상도 변화에 따른 연직 혼합과 구름 내 수분 차이가 구름 구조 변화에 결정적인 요인으로 작용할 수 있음을 시사한다.

**Keywords:** 층적운-적운 전환, 라그랑지안 수치 모형, 큰 에디 모사(LES), 격자 해상도

※ 이 논문은 기상청의 재원으로 한국기상산업기술원의 기상기후데이터 융합분석 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

대기물리 분과 / 대기물리 1-3

# Cloud-resolving model Radar SIMulator(CR-SIM)을 활용한 구름 미세물리 모수화 방안의 미세물리 과정 비교 및 검증

박선영<sup>1</sup>, 임교선<sup>2</sup>, Mariko Oue<sup>3</sup>, 방원배<sup>2</sup>, 이규원<sup>2</sup>, 이용희<sup>4</sup>

<sup>1</sup>경북대학교 대기원격탐사연구소  
<sup>2</sup>경북대학교 대기과학과, 대기원격탐사연구소  
<sup>3</sup>스토니브룩대학교 해양대기과학부  
<sup>4</sup>기상청 수치모델링센터

이중편파 기상 레이더는 수치 예보 모델의 미세물리 모의 결과를 검증하는 데 활용될 수 있다는 장점을 지니지만, 레이더 관측값과 모델 결과를 직접 비교하기 어렵다는 문제가 있다. 레이더 시뮬레이터는 모델 모의 결과를 바탕으로 다양한 레이더 및 라이다 변수를 산출할 수 있어, 이를 통해 미세물리 과정 모의의 정성적 검증이 가능하다. Cloud-resolving model Radar SIMulator (CR-SIM; Oue et al., 2020)은 고해상도 모델 기반의 T-matrix 산란 계산을 적용하여 다양한 주파수의 이중편파 레이더 변수를 산출할 수 있으며, 구름 미세물리 모수화 방안 검증에 유용하게 활용될 수 있다. 최근 새롭게 개발된 구름미세물리 모수화 방안 Kyungpook National University Double-Moment 6-class (KDM6; Park et al., 2024)은 Weather Research and Forecasting (WRF) Double-Moment 6-class (WDM6; Lim and Hong, 2010)를 기반으로 새롭게 개발 되었으며, 한국형 수치예보모델(KIM) 초단기 예보 시스템에 적용되어 운용 중이다. 본 연구에서는 WDM6과 KDM6 방안을 CR-SIM에 접합하고, WRF모델을 이용해 겨울철 강설 사례 실험을 수행하였다. 이어서 CR-SIM으로부터 산출된 레이더 변수를 활용하여 모델 모의 결과를 분석 및 검증 하였다. 특히 지상 기반 관측 자료를 활용한 비교 검증을 통해 실제 강설 사례의 미세물리 과정과 모델 기반 모의 과정을 비교하였다. 본 연구는 CR-SIM에 접합된 WRF 모델 구름 미세물리 모수화 방안들의 레이더 기반 산출 변수 분석을 통해, 각 방안별 미세물리 과정의 차이를 제시하고자 한다.

**Keywords:** KDM6, ICE-POP 2018, 레이더 시뮬레이터, 미세물리 과정, 모수화방안

※ 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. RS-2025-02242970) 및 수치모델링센터 『수치예보 및 자료응용 기술 개발』 과제(KMA2018-00721)의 일환으로 수행된 연구임.

## 2020-2025년 봄철 서해에서 관측된 에어로졸 및 구름응결핵의 특성

서표석<sup>1</sup>, 박민수<sup>1</sup>, 안찬우<sup>1</sup>, 염성수<sup>1,2</sup>, 박진수<sup>3</sup>, 최진수<sup>3</sup>, 성민영<sup>3</sup>, 유희정<sup>4</sup>, 오상민<sup>4</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 대기과학과

<sup>2</sup>한국과학기술연구원 기후·환경연구소

<sup>3</sup>국립환경과학원 대기환경연구과

<sup>4</sup>국립기상과학원 지구대기감시연구과

대기 중 에어로졸은 태양 복사 에너지를 직접 산란·흡수할 뿐만 아니라 구름응결핵으로 작용하여 구름의 특성을 변화시킴으로써 기후에 간접적인 영향을 미친다. 그러나 동아시아 지역에서는 최근 인위적 에어로졸 배출이 급격히 변화하였음에도 불구하고 구름응결핵에 대한 장기적이고 연속적인 관측이 부족하여, 기후 예측을 위한 에어로졸-구름 상호작용 정량화에 큰 불확실성이 존재한다. 이에 본 연구에서는 국립기상과학원 소속 기상관측선인 기상1호에 탑승하여 2020년부터 2025년까지 매년 봄 서해에서 에어로졸 및 구름응결핵 수농도( $N_{CN}$ ,  $N_{CCN}$ ), 에어로졸 수 크기분포,  $PM_{2.5}$  질량농도와 화학성분별 질량농도를 관측하였다.

관측 결과, 서해는 중국과 한국의 대륙적 영향을 강하게 받는 지역으로,  $N_{CN}$ 과 과포화도 0.4%에서의  $N_{CCN}$ 은 각각 약 3500-7500  $cm^{-3}$ , 1500-3200  $cm^{-3}$  범위로 나타나 일반적인 다른 해양 지역 관측값보다 높게 나타났다. 역계적 분석 결과 중국 기원 고농도  $PM_{2.5}$  장거리 수송 사례에서는 질산염 농도가 급격히 증가하였으며, 이와 함께 에어로졸의 평균 직경과  $N_{CCN}/N_{CN}$  비율이 상승하였다. 반면, 기타 조건에서는 유기물과 황산염의 기여가 상대적으로 두드러졌다. 위도에 따라서도 에어로졸의 특성은 다르게 나타났는데, 본 관측이 주로 진행된 영역인 경도 124.28° 부근 항로에서 위도가 높을수록 에어로졸 수농도와 화학성분별 질량농도가 높아지는 경향을 보였다.

염화물을 제외한 화학성분별 질량농도는 풍속이 낮은 정체 조건에서 높은 값을 보였으나,  $N_{CN}$ 은 전구기체로부터 작은 크기의 입자가 생성·성장하는 현상인 New Particle Formation (NPF)의 영향으로 풍속이 큰 조건에서 증가하였다.  $N_{CCN}$ 은  $N_{CN}$ , 입자 크기 및 화학조성의 복합적인 영향을 받아 풍속과의 상관성이 약하였고, 이에 따라  $N_{CN}$  및 화학 성분별 질량 농도와는 다른 경향을 보였다.

본 연구 결과는 동아시아 배경 에어로졸 및 CCN 특성의 최근 변화를 이해하는 데 기여할 것으로 기대되며, 보다 상세한 분석 결과는 학회에서 논의할 예정이다.

**Keywords:** 에어로졸, 구름응결핵,  $PM_{2.5}$ , 서해, 선박관측

※ 이 연구는 선박관측을 통한 서해상 대기질 현황 파악(II)(2025-11-0284)의 지원과 연세시그니처 프로그램 (2024-22-0162)의 지원으로 수행되었습니다.

대기물리 분과 / 대기물리 1-5

# 얇은 적운 사례를 통한 구름미세물리 모수화 방안 내 자동변환 모수화 변경의 효과 분석

도유정<sup>1,2</sup>, 임교선<sup>3</sup>, 이준홍<sup>4</sup>, 오동건<sup>5</sup>, 이정은<sup>3</sup>, 이규원<sup>3</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 기초과학연구원

<sup>2</sup>서울대학교 기후예측연구센터

<sup>3</sup>경북대학교 대기과학과, BK21 위험기상 교육연구팀, 대기원격탐사연구소

<sup>4</sup>경북대학교 대기원격탐사연구소

<sup>5</sup>한국에너지기술연구원 신재생빅데이터연구실

작은 구름방울이 더 큰 빙방울로 성장하는 자동변환 미세물리 과정은 강수의 초기 발달에 핵심적인 과정이다. 따라서 정확한 강수를 모의하기 위해서는 구름미세물리 모수화의 자동변환 과정을 현실적으로 모수화하는 것이 중요하다. 이를 위하여 선행 연구들은 입자 크기 분포의 분산과, 난류, 혹은 이 두 가지 영향을 모두 고려하여 자동변환 모수화를 정교화하는 방안을 제시하였다. 본 연구에서는 입자 크기 분포의 분산과 난류에 의한 충돌 증가의 영향을 모두 고려한 새로운 자동변환 모수화를 Kyungpook National University (KNU) Double-Moment 6-class (KDM6) 구름미세물리 모수화 방안에 이식하였다. 새로운 자동변환 모수화가 구름 및 강수 모의에 미치는 효과를 이해하기 위하여 Korea Precipitation Observation Program: international collaborative experiments for Mesoscale convective system in Seoul metropolitan area (KPOP-MS) 기간 중 관측된 얇은 적운 사례를 모의하고 분석하였다. 실험을 위하여 선정된 사례는 인천국제공항이 위치한 영종도 주변 지역에서 약한 강수를 동반한 얇은 적운이 형성된 2023년 9월 2일 사례이다. 실험은 WRF 버전 4.5.2를 이용하여 수행하였으며, 실험 영역은 인천국제공항을 중심으로 하며 9km, 3km, 1km의 수평 해상도를 가지는 세 개의 도메인을 단방향 격자화 기법으로 구축하였다. 상세 미세물리 과정을 분석한 결과, 새로운 자동변환 모수화를 적용한 실험의 자동변환율이 기존 방안을 적용한 실험에 비해 감소하여 대기 중 구름 혼합비는 증가하고 지표 강수량은 감소하였다. 이러한 변화는 기존 방안에서 나타난 과도한 지표 강수 모의를 완화하였고 지표 강수 분포 또한 관측과 유사하게 개선하였다. 또한 서로 다른 행성경계층 모수화 방안인 Shin-Hong Scale-aware scheme과 Mellor-Yamada Nakanishi Niino (MYNN)을 적용하였음에도 새로운 자동변환 모수화를 적용한 실험에서 강수 감소 경향이 일관되게 나타났다.

**Keywords:** WRF, KDM6, 자동변환, 구름미세물리 모수화, 얇은 적운

※ 이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다. (RS-2023-00208394, RS-2025-02242970).

대기물리 분과 / 대기물리 1-6

# 한국형 구름물리실험챔버(K-CPEC) 내 온도 균질성 평가: 구름 발생 실험 단계별 공간적 온도 차이의 정량적 분석

엄준식<sup>1,2,3</sup>, 박성민<sup>2</sup>, 김정규<sup>2</sup>, 박민수<sup>4</sup>, Belorid Miloslav<sup>5</sup>, 차주완<sup>5</sup>, 김영미<sup>5</sup>,  
김부요<sup>5</sup>, 김승범<sup>5</sup>, 이재준<sup>6</sup>, 안찬우<sup>4</sup>, 서표석<sup>4</sup>, 염성수<sup>4</sup>, 장성현<sup>2</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 대기환경과학과

<sup>2</sup>부산대학교 BK21 지구환경시스템 교육연구단, 지구환경시스템학부 대기과학전공

<sup>3</sup>부산대학교 환경연구원

<sup>4</sup>연세대학교 대기과학과

<sup>5</sup>국립기상과학원 기상응용연구부

<sup>6</sup>부산대학교 고분자공학과

국립기상과학원은 구름의 생성, 성장, 소멸에 이르는 전 주기의 미세물리 과정을 정량적으로 이해하기 위해 한국형 구름물리실험챔버(Korea Cloud Physics Experimental Chamber, K-CPEC)를 구축하여 운영하고 있다. K-CPEC는 내부와 외부 챔버로 이루어진 이중 구조로 설계되었으며, 내부 챔버는 부피 22.4 m<sup>3</sup>의 넓은 공간을 제공한다. 벽면 온도 제어와 감압 시스템을 통해 내부 온도와 기압 조건을 각각 -70~60 °C와 30~1013 hPa 범위에서 정밀하게 조절할 수 있어 실제 대기의 다양한 구름 환경을 재현할 수 있다. 이러한 특성으로 K-CPEC은 구름의 미세물리적 및 복사 특성을 규명하기 위한 핵심 연구 기반으로 활용되고 있다. 구름 발생 실험에서 내부 온도의 균질성은 실험 신뢰성을 확보하는 데 필수적이며, 온도가 불균질할 경우 의도치 않은 대류 발생으로 목표 조건을 안정적으로 유지하기 어려워 실제 대기 관측과의 직접 비교에도 제약이 따른다.

본 연구는 챔버 내 여러 지점에서 공간적 온도 차이를 측정하여 구름 발생 실험 단계별 온도 균질성을 정량적으로 평가하였다. 이를 위해 내부 챔버에 수평 및 수직 방향으로 15개의 열전대를 설치하고 반복 실험을 수행하였다. 구름 발생 실험은 (1) 교반기를 이용한 내부 공기 혼합, (2) 초기 대기 조건 (기압, 온도, 습도) 설정, (3) 감압에 의한 팽창 냉각과 구름 생성, (4) 다음 실험을 위한 건조공기 주입의 네 단계로 구성되었으며, 각 단계별 온도 균질성을 분석하였다. 실험 결과, 공기 혼합 단계에서 최대 수평 온도 차이는 0.09 °C로 낮았으나, 감압 단계에서는 최대 0.92 °C까지 증가하였다. 특히 감압 시 챔버 공기가 천장 개구를 통해 외부 챔버로 배출되면서 해당 부근에서 강한 팽창 냉각이 발생하여 공간적 불균질성이 확대되었다. 본 연구는 단계별 공간적 온도 차이를 체계적으로 정량화함으로써 K-CPEC에서 수행하는 구름 생성 실험의 신뢰성과 해석 정확성을 향상시키는 데 기여한다.

**Keywords:** K-CPEC, 온도 균질성, 구름 발생 실험

※ 이 연구는 기상청 R&D 기상조절과 구름물리(KMA2018-00224)와 한국연구재단(RS-2025-00572970, RS-2020-NR049592)의 지원으로 수행되었습니다.