

## 혁신적인 기상·기후기술 연구 및 개발을 위한 한국형 구름물리실험챔버(K-CPEC)의 현재와 미래

차주완<sup>1</sup>, 염성수<sup>2</sup>, 엄준식<sup>3</sup>, 김영미<sup>1</sup>, Miloslav Belorid<sup>1</sup>, 김부요<sup>1</sup>, 백정은<sup>1</sup>, 김승범<sup>1</sup>,  
박민수<sup>2</sup>, 이승수<sup>2</sup>, 서표석<sup>2</sup>, 안찬우<sup>2</sup>, 김상겸<sup>2</sup>, 박성민<sup>3</sup>, 장성현<sup>3</sup>, 김정규<sup>3</sup>, 한수지<sup>3</sup>, 김준식<sup>3</sup>, 이상민<sup>3</sup>

<sup>1</sup>국립기상과학원 기상응용연구부

<sup>2</sup>연세대학교 대기과학과

<sup>3</sup>부산대학교 대기과학과

본 연구는 국립기상과학원에서 개발한 한국형 구름물리실험챔버(K-CPEC: Korea Cloud Physics Experiment Chamber)의 설계와 성과를 소개하고, 이를 활용한 기상기후기술 개발의 현재와 향후방향에 대해 소개하자 한다.

현재, K-CPEC는 대형 동적벽(Dynamic Wall) 기반의 이중 구조 실험 챔버로, 구름과 에어로졸의 미세물리 과정을 정밀하게 연구할 수 있는 혁신적인 시설이다. 이 챔버는 인공강우, 기상 재해 대응, 기후 예측 기술 개선, 관측 장비 성능 평가, 환경 문제 해결 등 다양한 응용 가능성을 제공하며, 기상기후 연구의 중요한 도구로 자리 잡고 있다. K-CPEC는 구름 챔버와 에어로졸 챔버로 구성되어 있으며, 구름 챔버는 온도, 습도, 압력을 정밀하게 조절하여 다양한 구름 형성과 강수 과정을 실험적으로 모사할 수 있다. 챔버의 온도 범위는  $-70^{\circ}\text{C}$ 에서  $60^{\circ}\text{C}$ 까지, 압력 범위는 1,013hPa에서 30hPa까지 조절 가능하며, 동적벽 설계를 통해 실험의 정확도를 높였다. K-CPEC의 구름 및 에어로졸 챔버는 다양한 대기 조건에서 에어로졸과 구름 간의 상호작용을 실험할 수 있어 기상·기후 연구의 핵심 역할을 한다.

이 챔버에는 Cloud and Aerosol Spectrometer (CAS), Cloud Imaging Probe (CIP), Portable Ice Nucleation Experiment (PINE), Particle Image Velocimetry(PIV) 등 첨단 장비가 설치되어 있어, 구름 응결, 빙정 생성 등 구름 미세물리학의 과정을 정밀하게 분석할 수 있다. 이를 통해 구름과 에어로졸 간의 상호작용을 이해하고, 기상 및 기후 모델의 예측 정확도를 개선하는데 필요한 핵심 데이터를 제공 할 수 있다.

향후방향으로, 비균질성(heterogenous) 냉각실험에서는 구름 챔버와 에어로졸 챔버의 벽면 온도와 팽창을 조절하여 입자의 크기와 분포 변화를 관찰하고, 이를 통해 전세계적으로 불확실도가 가장 높은 빙정 생성 과정을 상세히 분석 할 수 있는 기술을 개발 할 것이다. 또한 균질(Homogenous) 냉각 실험을 통해서도 온도와 압력 변화에 따른 구름 형성과 응결 과정을 평가하여, 기상 예측 모델의 정확성 향상에 기여할 예정이다. 따라서 최종적인 K-CPEC의 목표는 국내외 연구 협력을 통해 구름물리학 연구를 확장하고 이류 기반으로 국내 인공강우의 원천기술을 확보하며, 기상 재해 대응, 환경 문제 해결, 산업 기술 발전 등 다양한 분야에 걸쳐 중요한 과학적 기여를 할 수 있는 세계적인 개방형 구름물리실험 연구플랫폼으로 역할을 수행 할 수 있는 기술을 확보하는 것이다.

Key words: K-CPEC, 한국형 구름물리실험챔버, 기상기후기술, 기상조절, 에어로졸-구름 상호작용, 기후 변화

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

## 한국형 구름물리실험챔버(K-CPEC)를 이용한 구름 생성 실험 및 최적 실험 환경 구축 전략

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

<sup>1</sup>부산대학교 BK21 지구환경시스템 교육연구단, 지구환경시스템학부 대기과학전공

<sup>2</sup>국립기상과학원 기상응용연구부

<sup>3</sup>연세대학교 대기과학과

<sup>4</sup>부산대학교 대기환경과학과

<sup>5</sup>부산대학교 고분자공학과

구름의 생성, 성장, 소멸 과정은 온도, 습도, 기압 등 다양한 대기 조건 및 구름 응결핵 또는 빙정핵 역할을 하는 에어로졸 특성과 밀접하게 연관되어 있다. 따라서 구름 미세물리 과정을 심층적으로 이해하기 위해서는 다양한 대기 환경 조건에서의 체계적인 분석이 필수적이다. 이를 위해 국립기상과학원에서는 구름과 에어로졸 특성을 분석하기 위한 실험적 도구로 한국형 구름물리실험챔버(Korea Cloud Physics Experimental Chamber; K-CPEC)를 운영하고 있다. K-CPEC은 구름챔버와 에어로졸 챔버로 구성되어 있으며, 폭넓은 온도, 기압, 상대습도 범위에서 다양한 대기조건을 재현할 수 있는 실험적 플랫폼을 제공한다.

K-CPEC의 구름챔버는 냉매를 사용한 벽면 온도 제어와 감압을 이용한 단열팽창을 통해  $-70^{\circ}\text{C}$ 에서  $60^{\circ}\text{C}$ 까지의 온도 조절이 가능하며, 압력은 30hPa에서 1013hPa까지 조절되어 실제 대기의 열역학적 조건을 재현한 실험을 수행할 수 있다. 또한, 에어로졸 발생 장치 및 에어로졸 챔버를 통해 구름 응결핵 및 빙정핵으로 작용하는 다양한 에어로졸을 주입하여 다양한 대기 환경에서 구름 발생 실험을 진행할 수 있다. 이러한 실험에서 안정적이고 신뢰성 있는 결과 도출과 재현성 확보를 위해서는 챔버 내부의 열역학적 조건을 균질하게 유지하고, 이를 정밀하게 관측할 수 있는 관측 장비의 안정적인 운용이 필수적이다.

본 연구에서는 K-CPEC을 이용하여 다양한 대기 조건에서 수행된 액체상, 혼합상, 및 얼음상 구름 생성 실험의 절차 및 분석결과를 제시한다. 실험 과정은 단계별로 구분하여, 챔버 내부의 열역학적 조건 균질성을 평가하고, 동일 변수를 측정하는 관측 장비 간의 일관성과 잠재적 오차 범위를 분석하였다. 이러한 분석을 기반으로, 최적의 실험 환경 구축을 위한 개선 방안과 K-CPEC의 효과적인 활용을 위한 구체적인 전략을 제안한다.

Key words: 한국형 구름물리실험챔버, 구름 발생 실험, 구름 미세물리 과정

※ 이 연구는 기상청 국립기상과학원 기상조절 및 구름물리 연구(KMA2018-00224), 연구재단(2020R1A2C1013278), 교육부(2020R1A6A1A03044834)의 지원으로 수행되었습니다.

## 대류 구름 챔버의 환경 조건에 따른 LWC 연직 프로파일 변화

김상겸<sup>1</sup>, 라인엽<sup>1</sup>, 염성수<sup>1</sup>, Wojciech Grabowski<sup>2</sup>, 김용준<sup>3</sup>

<sup>2</sup>National Center for Atmospheric Research

<sup>3</sup>GLOCAL Modeling&Simulation

대기 모델링을 하기 위해서는 구름의 형성, 발달, 소멸 과정을 모두 이해하는 것이 중요하다. 하지만 구름의 직접 관측은 제약이 많기 때문에 챔버를 이용하여 지상에서 구름의 생성과 소멸을 재현해볼 수 있다. 대류 구름 챔버 수치모델은 이러한 챔버 내부에서 발생하는 구름 미세물리 과정을 모의하고 각 격자점에서의 변수 값을 계산할 수 있기 때문에 이를 바탕으로 실제 챔버 내에서 일어나는 구름 미세물리 현상들을 연구할 수 있다. 본 연구에서 사용하는 모델은 babyEULAG (3D nonhydrostatic anelastic Eulerian-semi-Lagrangian model)으로써, 구름 방울의 성장과 소멸을 시뮬레이션하고 구름 미세물리 변수들의 변화를 확인한다. 모델에서 구름 방울은 SD (SuperDroplet)으로 다루었으며, 하나의 SD는 같은 특성을 갖는 여러 개의 구름 방울들을 대표한다. 이러한 SD들은 모델 내부의 환경에 따라 각자 움직이고, babyEULAG 모델에서는 각각의 SD들을 모두 라그랑지안 방법으로 추적할 수 있다. 또한 모델 내부의 압력장이나 온도장 등은 오일러리안 방법으로 각 격자점에서 계산되며, 각 격자점의 변수들은 주변의 SD들에 의해 영향을 받는다. 이번 연구에서는 벽의 상대습도, 챔버의 종횡비 등을 변경하며 액체수함량 (LWC) 연직 파일이 어떻게 변화하는지 확인하였다. 모델 경계 조건을 포화 상태로 (상대습도 100%), 챔버의 종횡비를 0.5로 (연직 길이 4m, 수평 길이 2m 등 비율이 0.5가 되도록 설정) 설정한 경우 액체수함량은 고도에 따라 일정한 값을 갖는다. 하지만 모델 경계 조건이 불포화 상태로 변경되거나 (상대습도 100% 미만), 챔버 모델의 종횡비가 0.5 미만으로 감소하게 되면 액체수함량의 연직 프로파일은 고도에 따라 증가하는 그래프를 보인다. 추가적으로 SD가 모델 벽에 다가갔을 때 벽에 붙어서 없어지는 것을 구현하기 위해 해당 효과를 모델 코드에 추가하여 비교 분석하였다. 이와 같이 구름 미세물리 변수들에 대한 연구는 구름 챔버 모델링뿐만 아니라 구름 미세물리 과정에 대한 이해를 더욱 높여줄 것으로 기대된다.

Key words: 구름 챔버 모델, 구름 미세물리 과정, SuperDroplet, 액체수함량 연직 프로파일

※ 이 연구는 연세 시그니처 연구 클러스터 프로그램 (2024-22-0162)의 지원과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (NO.NRF-2021R1A2B5B02002458).

## 한국형 구름물리실험챔버(K-CPEC)를 통해 수행한 heterogeneous freezing 실험의 예비분석 결과

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

<sup>1</sup>연세대학교 대기과학과

<sup>2</sup>국립기상과학원 기상응용연구부

<sup>3</sup>부산대학교 BK21 지구환경시스템 교육연구단, 지구환경시스템학부 대기과학전공

<sup>4</sup>부산대학교 대기환경과학과

<sup>5</sup>부산대학교 고분자공학과

국립기상과학원은 한국형 구름물리실험챔버(Korea Cloud Physics Experimental Chamber; K-CPEC)을 2022년에 구축완료하였다. K-CPEC은 대기 중에서 발생할 수 있는 다양한 구름 물리 과정과 항공기를 이용한 실제 기상조절 실험의 지상 실험 장치로서 활용되기 위해 건설되었다.

K-CPEC은 에어로졸 챔버와 구름 챔버로 나누어져 있어 외부 공기의 에어로졸을 이용한 heterogeneous freezing 실험 및 지상에서의 인공강우 시딩물질에 대한 분석이 가능하다. 그뿐만 아니라 구름 챔버의 경우 이중 구조로 구성되어 있으며, 구름 챔버 내부의 경우 감압을 통해 압력을 1013 hPa부터 30 hPa까지 조절 가능하고, 냉매를 통한 벽면 온도 조절과 감압을 통한 단열 팽창 방식으로 온도를 60°C부터 -70°C까지 조절 가능하여 다양한 열역학 환경에서의 구름응결과 빙정생성에 대한 실험이 가능하다.

본 연구에서는 외부 공기의 에어로졸을 이용한 heterogeneous freezing 실험을 수행하여 K-CPEC의 성능을 시험해 보고자 하였다. heterogeneous freezing 실험은 에어로졸 챔버에서 외부 공기의 에어로졸을 흡입한 후, 이를 구름 챔버로 주입하고 구름 챔버에서 벽면 온도 조절 및 단열팽창 방식으로 챔버 내부의 공기를 냉각하여 heterogeneous freezing 과정을 발생시키는 방법으로 진행되었다. OPC (Optical Particle Counter, Palas사), CPI (Cloud Particle Imager, SPEC사)를 이용하여 챔버 내부에 생성된 구름입자를 관측한 결과, 선행연구에서 보고한 기온에 따른 빙정의 모양과 유사한 결과를 보였다. 추가적인 실험으로 K-CPEC에 에어로졸을 추가적으로 주입하는 실험을 수행할 예정이다. 다양한 에어로졸의 종류와 수농도 실험을 수행하여, 구름생성 이전의 에어로졸 수 크기분포를 관측하고 이에 따른 구름입자의 변화를 분석할 예정이며 분석 결과를 본 학회에서 발표할 예정이다.

Key words: 구름물리실험챔버, heterogeneous freezing, 에어로졸, 구름생성

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

## 외부 공기 유입에 대한 얇은 적운의 하위영역에서의 미세물리적 반응

지승배, 염성수

연세대학교 대기과학과

응결성장이론에 따른 구름방울 크기 스펙트럼의 변화와 실제 관측되는 스펙트럼의 변화에는 차이가 있다. 이 차이를 설명할 것으로 기대되는 구름 외부 건조 공기의 구름 내 유입 및 혼합 과정에 대한 연구가 이어져 오고 있다. 하지만 현재까지의 유입 연구에서는 주로 개별 구름에 대한 전체적인 영향을 평가하였고, 개별 구름의 세부적인 하위영역(구름 코어, 코어 주변부, 구름 경계)에서의 유입의 영향에 대한 연구는 상대적으로 매우 부족하였다. 본 연구에서는 Rain in Cumulus Over the Ocean (RICO) 캠페인 동안 관측된 얇은 적운을 하위영역으로 나누어 각 영역에 대한 유입율을 추정하였다. 유입율과 크기 스펙트럼의 미세물리 특성 [평균 반경 ( $r_m$ ), 반경 표준편차 ( $O_r$ ), 상대 분산 ( $\epsilon$ )] 간의 상관성 분석을 진행하였다. 하위영역에 관계없이 유입율이 증가할수록  $r_m$ 과  $O_r$ 이 감소하였으나, 구름 코어에서 경계 영역으로 갈수록 유입율의 변화에 대한 미세물리 특성의 변화율이 감소하였다. 경계 영역에서는 유입율과  $\epsilon$ 간의 상관성이 거의 나타나지 않았다. 이러한 관계를 형성시키는데 기여가 큰 구름방울의 크기 범위는 구름 코어에서 경계 영역으로 갈수록 크기가 큰 구름방울에서 작은 구름방울로 이동하였다. 동일한 구름 내에서도 구름방울 크기 스펙트럼의 확장 정도를 주요하게 결정하는 다른 크기 범위에 속한 구름방울의 역할이 하위영역에 따라 전환되는 현상에 대해서는 추가적인 논의가 필요하다. 본 연구의 결과는 외부 공기 유입이 얇은 적운 내 미세 구조에 미치는 영향에 대한 새로운 통찰을 제공하며, 보다 정확한 유입율 모수화의 가능성을 제시할 것이다.

Key words: 유입, 구름 미세물리, 얇은 적운, 하위영역



## 영동 산악지역에서 겨울철 인공강설실험의 물리화학적 평가

김병곤<sup>1</sup>, 김태연<sup>1</sup>, 한진현<sup>1</sup>, 뚝 위후이<sup>1</sup>, 박석우<sup>1</sup>,  
김지윤<sup>2</sup>, 임윤규<sup>3</sup>, 장기호<sup>3</sup>

<sup>1</sup>강릉원주대학교 대기환경과학과

<sup>2</sup>부산대학교 대기환경과학과

<sup>3</sup>국립기상과학원 기상응용연구부

최근 구름물리 관측기술 및 모델링 기술의 지속적인 발전에 따라 수자원 확보 및 가뭄 예방을 위한 기상조절기술의 성공 사례들이 학계에서 보고되고 있다. 이와 더불어 전 세계적으로 진행되는 기후변화에 따른 폭염과 가뭄으로 인한 산불발생 및 수자원 부족, 슈퍼 태풍의 발생, 도시 집중호우, 선상 폭우 등의 재해기상이 빈발함에 따라 전통적인 방식의 인공강우(설) 실험 이외에도 재해기상 완화 및 조절을 위한 다양한 노력들이 여러 국가에서 활발하게 진행중에 있다. 이러한 각종 실험들의 지속적인 운영과 진보를 위해서는 우선적으로 기상조절실험의 효과를 정량적으로 그리고 물리적으로 평가하는 방법이 선행되어야 한다.

본 연구에서는 겨울철 영동지역에서 수행된 지형성 구름에 대한 인공강설 실험 결과를 기존의 물리적 평가 이외에 화학 분석을 추가한 통합 인공강설 효과 평가 방법을 제시하고 두가지 사례에 대해 적용하였다. 산악지역에서 인공강설 실험의 성공을 위한 필수 조건은 빙정핵을 과냉각수적이 존재하는 혼합상 구름에 확산 유입시킴으로써 빙정 입자들이 성장·발달하여 강설로 이어져야 한다. 그리고 실험 성공 가능성을 높이기 위해서는 인공강설실험 성공 가능성이 큰(seedable) 구름 조건을 선정하여야 한다. 이를 기반으로 두 가지 약한 한기축적 사례(2020년 2월 26일과 2021년 3월 6일)를 선정하였다. 대관령 주변 실험 구역내에 설치된 적설계, Parsivel, 그리고 Micro Rain Radar와 같은 강설 관측장비를 활용하여 AgI 연소 실험 이후 풍하측 레이더 반사도 증가나 강수 입자들의 성상 변화 및 크기 증가를 분석하였다. 특히, 두 번째 2021년 3월 6일 사례는 1 시간 간격의 강수를 채취한 후 Ag 성분을 분석하여 실험 성공 여부를 추가로 평가하였다. 특히 Ag 성분은 배경 대기중에서 거의 존재하지 않는 조성이기 때문에 Ag 성분의 검출(증가)은 연소 실험의 증거라 할 수 있다.

아직까지 연소실험 시간이 대부분 1시간 이내로 한정되어 있기 때문에 시딩 실험의 반응 시간이나 영향 구역 역시 제한적일 수밖에 없기 때문에 실험가능조건에서 장기간 연소실험이 요구된다. 그리고 지역 고유의 지형적인 특성을 고려한 사례 선정과 기존의 물리적인 평가와 화학 분석이 함께 이루어진다면 고도화된 통합(comprehensive) 평가방법으로써 향후 인공강설 실험 성공가능성을 높이는 데 기여할 것이다.

Key words: 인공강설, 기상조절, 지형성 구름, AgI, 한기축적

※ 이 연구는 국립기상과학원 기상조절 및 구름물리 연구의 지원으로 수행되었습니다.