

ORIGINAL ARTICLE

국내 첫 대형 구름물리실험 챔버기술개발 연구(I): 구름물리실험챔버 시스템 설계 및 상세 구름챔버 구조해석 결과

차주완* · 김영미 · Miloslav Belorid · 김부요 · 백정은 · 김승범 · 이경미 · 조창범¹⁾ · 이승복²⁾

국립기상과학원, ¹⁾기상청, ²⁾㈜더웨일

Development of Korea's First Large Scale Advanced Cloud Physics Experimental Chamber (I): Design of the Cloud Physics Experimental Chamber System and Detailed Structural Analysis of the Cloud Chamber

Joo Wan Cha*, Youngmi Kim, Miloslav Belorid, Bu-Yo Kim, Jungeun Baek, Seungbum Kim, Kyoungmi Lee, Changbeom Cho¹⁾, Seoungbok Lee²⁾

National Institute of Meteorological Science, Jeju 63568, Korea

¹⁾Korea Meteorological Administration, Daejeon 35208, Korea

²⁾The Whale Inc, Gyeong-gido 18577, Korea

Abstract

In this study, we introduce the Korea Cloud Physics Experimental Chamber (K-CPEC), a novel apparatus developed to advance research on cloud-aerosol interactions. Designed to overcome the limitations of existing cloud chambers, K-CPEC features a dual-structure system with precise control over temperature, pressure, and humidity, maintaining accuracy within $\pm 0.3^\circ\text{C}$, $\pm 0.3\text{ hPa}$, and $\pm 2\%$, respectively. The versatile design of the chamber allows applications in meteorology, climate science, industry, and environmental studies, supporting research on weather modification, climate modeling, weather instrumentation, and pollution control. The performance assessments confirmed the capability of K-CPEC to simulate diverse atmospheric conditions and meet the essential requirements for cloud formation experiments. This chamber is poised to enhance the understanding of cloud-aerosol dynamics, and contribute significantly towards improved climate modeling and prediction accuracy across various research fields.

Key words : Cloud physics, Experimental chamber, Atmospheric science, Chamber design, Weather research, Climate modeling

1. 서론

구름은 지구의 기후 시스템에서 중요한 역할을 하며, 기후 모델링과 날씨 예측의 정확성에 큰 영향을 미친다

(Stephens, 2005; Soden and Held, 2006; Webb and Lock, 2013; Vial et al., 2013). 국내에서도 구름 및 강수 관측에 대한 관측기술들이 꾸준히 연구되고 있다 (Cha et al., 2023). 특히, 구름의 복사적 역할이 지

Received 12 November, 2024; Revised 23 November, 2024;

Accepted 26 November, 2024

*Corresponding author : Joo Wan Cha, National Institute of Meteorological Science, Jeju 63568, Korea
Phone : +82-64-780-6665
E-mail : jwcha@korea.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

표 에너지 균형에 미치는 영향을 분석한 연구에서는 구름이 지표 에너지 균형에 미치는 복사적 영향을 분석하여, 기후 모델링의 정확성 향상에 기여한다(Lee and Song, 2010). 또한, 에어로졸과 구름의 상호작용이 강수에 미치는 영향을 분석한 연구에서는 에어로졸과 구름의 상호작용이 강수에 미치는 영향을 분석하여, 기후 시스템에서의 구름 역할을 심층적으로 이해하였다(Park et al., 2019). 한반도 지역에서 에어로졸, 구름, 강수의 특성을 조사한 연구에서는 한반도 지역에서 에어로졸, 구름, 강수의 특성을 조사하여, 기후 변화에 대한 구름의 영향을 분석하였다(Jung et al., 2022). 이 연구들은 구름이 기후 시스템에서 수행하는 다양한 역할과 그에 따른 기후 모델링 및 예측의 정확성 향상에 필수적인 요소임을 보여준다.

구름 연구에서 구름챔버는 구름 형성과 특성을 실험적으로 재현하고 분석하는 핵심 도구로 활용된다. 이 핵심 도구들 중 단일 팽창형 구름챔버는 급격한 팽창을 통해 온도와 기압을 낮추어 구름을 형성하는 방식을 사용한다. 독일의 AIDA(Aerosol interaction and dynamics in the atmosphere) 챔버는 이러한 단일 팽창 방식을 채택하여 에어로졸과 구름의 상호작용을 연구하는 데 사용되고 있다(Möhler et al., 2003; Höpfner et al., 2019; Wagner et al., 2020; Möhler, et al., 2021; Wagner et al., 2021). 일본 기상연구소의 구름챔버 또한 단일 팽창형으로 설계되어 빙정핵 형성 과정을 실험적으로 재현하고 있다(Tajiri et al., 2013). 최근 AIDA mini는 독일 카를스루에 연구소에서 개발한 소형 구름챔버로, 기존 AIDA 챔버와 달리 이중구조형 소형 구름챔버(Vogel et al., 2022)이다. 이 챔버는 소규모 실험에 적합하게 설계되어, 에어로졸과 구름의 상호작용을 연구하는 데 활용된다. 특히, 혼합상 구름의 형성과 빙정핵화 과정을 실험적으로 재현하고 분석하는 데 중점을 둔다. AIDA mini는 온도, 습도, 기압 등의 환경 조건을 정밀하게 제어할 수 있어, 다양한 대기 조건에서의 구름 형성 메커니즘을 연구하는 데 유용하다.

반면, 대류형 구름챔버는 대류를 유도하여 구름을 생성하는 방식을 사용한다. 미국 미시간 공과대학교의 Pi 챔버는 난류 환경에서 에어로졸-구름 상호작용을 연구하기 위해 개발된 대류형 구름챔버로, 구름 미세물리학과 난류의 상호작용을 연구하는 데 활용되고 있다(Chang et al., 2016). 이와 같은 다양한 유형의 구름챔

버를 활용한 연구는 구름의 형성과 변화에 대한 심층적인 이해를 제공하며, 기후 모델링과 날씨 예측의 정확성을 향상 시키는데 기여하고 있다.

본 연구에서 새롭게 설계하고자 하는 이중구조 구름 챔버가 해결하고자 하는 주요 문제점들은 다음과 같다. 첫째, 기존 단일팽창식 이중구조형 구름챔버에 의해서 생성된 입자크기는 최대는 200 μm 이하의 빙정만을 만들 수 있어, 실제 대기환경 의해 발생 할 수 있는 다양한 입자들의 크기별 특성을 실험 할 수 없다. 둘째로, 구름 챔버의 활용성에 있어, 대부분 구름챔버는 크기가 작아 구름물리 실험만 가능하고, 구름챔버 내 실제 야외에서 구름물리관측하는 기상기후관측 센서들을 설치하여 다양한 기상환경을 시뮬레이션한 후 이 센서들의 성능을 평가 할 수 없다. 즉 다양한 기상조건을 만들어 관측장비를 평가하기에는 너무 크기가 작아 구름물리실험 외에는 활용도가 떨어진다는 것이다. 따라서, 국내에서 새롭게 설계한 구름챔버는 보다 폭넓은 환경 조건에서 구름 형성을 모사할 수 있도록 하며, 최신 이중구조형 구름챔버임에도 기존 유사한 챔버 보다 실험공간을 최대화하여 최대한 많은 분야에서 구름챔버가 활용 될 수 있게 하고자 하였다. 이를 통해 구름과 관련된 기후 과학의 미해결 문제에 대한 이해를 한 단계 더 발전시킬 수 있을 것이다.

따라서 본 연구의 구름물리실험챔버는 다목적활용이 가능한 구조와 설계를 갖추기 위한 제작기술을 개발하였다. 즉, 구름물리실험챔버는 그 활용성이 매우 다양하여 여러 분야에 걸쳐 중요한 기여를 할 수 있다. 본 연구에서 개발한 챔버는 재해대응, 기상·기후, 산업, 환경 등 다양한 분야에서 실질적인 활용 가능성을 가진다.

- 1. 재해분야:** 본 챔버는 인공강우기술 개발에 기여함으로써 가뭄, 산불, 미세먼지 및 안개 저감 등과 같은 재해에 대응하기 위한 원천기술을 제공할 수 있다. 이 기술은 최근 기후변화에 의해 증가 될 수 있는 물 부족, 대형산불 등에 대해 지구공학적인 적극대응 기술로, 국내 뿐 만 아니라 전세계적으로 많은 기술 개발을 시도되어 지고 있다(Kim et al., 2019; Cha et al., 2019; Friedrich et al., 2021).
- 2. 기상·기후분야:** 기상 및 기후 예보기술의 향상을 위해 최신 구름미세물리과정은 산출하는 데 활용될 수 있다. 이 챔버는 구름 형성과 빙정 생성을 정밀하게 모사함으로써, 기상 모델의 예측력을 향상시키는 데

필요한 데이터를 제공한다. 이를 통해 기후 변화 연구의 정확성을 높이고, 미래 기후 변화에 대한 이해를 깊이 있게 할 수 있다(Wang et al., 2024).

3. **산업분야:** 구름과 강우 관측 분야에서 사용되는 기상 및 환경 관측장비의 성능을 객관적으로 평가할 수 있는 기술을 제공한다. 특히, 기상관측 장비의 신뢰성을 평가하고 검증하는 데 중요한 역할을 하며, 이를 통해 산업계에서는 더욱 정확한 기상 데이터를 바탕으로 다양한 제품과 서비스의 품질을 개선할 수 있다(Kumar et al., 2018).
4. **환경분야:** 미세먼지의 세정 효과를 평가하거나 도로 살얼음, 항공기 착빙 등 위험 기상의 원인을 규명하는 기초 기술로 활용될 수 있다. 이 기술은 대기 오염 저감, 교통 안전성 향상, 항공기 운항 안전성 확보 등 다양한 환경적 문제를 해결하는 데 중요한 기초 자료를 제공할 수 있다(Dépée et al., 2021).

이와 같이 본 연구에서 개발한 한국형 구름물리실험 챔버(Korea-Cloud Physics Experiment Chamber, 이하 K-CPEC)는 여러 분야에서 중요한 역할을 수행할 수 있는 다목적 연구 장비로서, 그 활용성과 기여도를 높일 수 있게 설계되었다. 이번 연구에서는 1차적으로 세계적 수준의 구름물리실험챔버 설계 기술개발을

설명하고 차후 연속인 연구논문에서 각 분야별 활용된 연구사례를 순차적으로 발표 할 예정이다.

2. 연구 방법

2.1. K-CPEC 설계 기술 개발

K-CPEC의 설계와 구축 과정은 다양한 기상 조건을 재현하기 위해 고유한 설계기술이 포함되었다. 국내에서 첫 대형 첨단 구름물리실험챔버인 K-CPEC은 구름 챔버, 에어로졸챔버, 풍동기, 소각실험기 등 다양한 연구인프라가 연결되어 있다 (Fig. 1). K-CPEC의 구름 챔버와 에어로졸챔버의 시스템 구성은 구름 형성과 에어로졸의 상호작용을 실험적으로 연구하기 위한 통합된 연구 인프라 시스템이다. 이 K-CPEC는 두 개의 주요 챔버, 즉 구름챔버와 에어로졸챔버로 구성되며, 각각 다양한 측정 기기 및 실험적 요소들과 연계되어 있다. 구름챔버는 구름 입자와 에어로졸 입자의 생성, 성장 및 성질을 연구하기 위한 공간이다. 이 챔버에는 구름 측정 기기와 에어로졸 측정 기기가 설치되어 있으며, 이를 통해 구름과 에어로졸 입자의 특성을 실험적으로 관측한다. 구름 측정 기기는 구름 입자의 크기, 수분 함량, 그리고 형상과 같은 물리적 특성을 분석하는

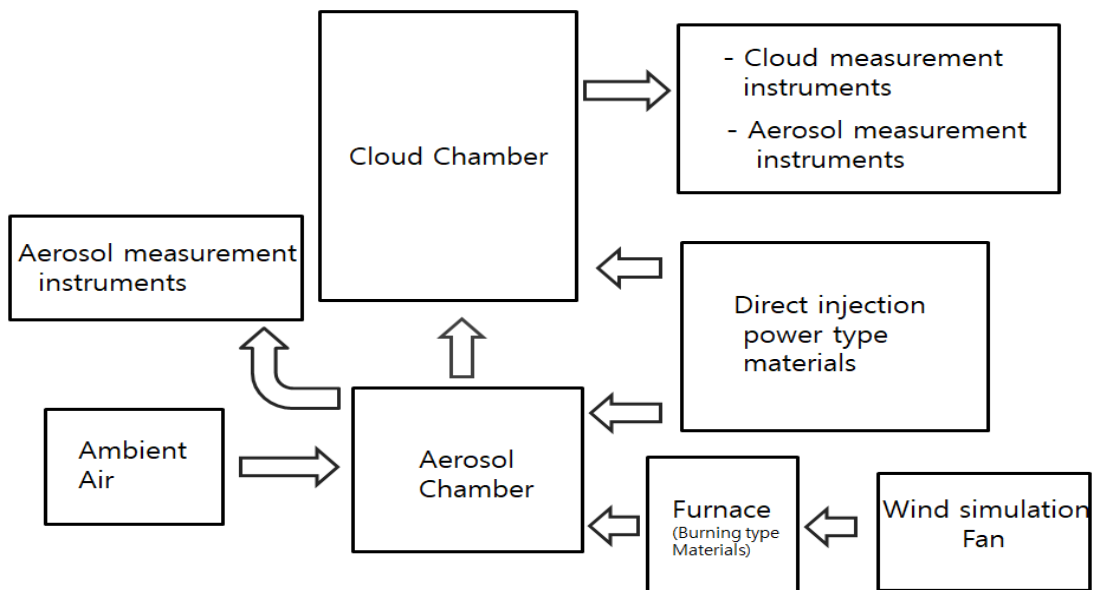


Fig. 1. Schematic diagram of K-CPEC setup, illustrating the interaction between the aerosol chamber, cloud chamber, and various measurement and simulation components.

데 사용되며, 에어로졸 측정 기기는 구름 형성에 중요한 에어로졸 입자의 크기 분포, 농도 및 화학적 특성을 분석한다. 구름챔버는 에어로졸챔버로부터 에어로졸을 공급받아 다양한 환경 조건(예: 온도, 습도)을 조절하여 구름을 형성하는 데 활용된다.

K-CPEC의 에어로졸챔버는 대기 중 또는 외부에 존재하는 다양한 에어로졸 입자를 샘플링하여 여러 가지 물리화학적 특성 및 반응을 관측 할 수 있는 실험 장비이다. 이 챔버는 구름 형성에 중요한 에어로졸을 공급하기 위해 설계되었으며, 대기 중의 공기를 직접 유입하거나 특정 물질을 연소 혹은 직접 주입함으로써 에어로졸을 구름챔버에 공급 할 수 있다. 대기 공기는 외부로부터 직접 공급되어 자연 상태의 에어로졸을 실험에 사용하며, 연소형 물질은 화로를 사용해 태우는 방식으로 에어로졸을 이 챔버에 주입한다. 이를 통해 생성된 에어로졸은 구름챔버로 이동하여 구름 형성에 필요한 핵 역할을 한다. 에어로졸챔버는 화로와 풍동기와 연계되어 있어 구름씨 또는 목표하는 물질의 연소 시 바람의 영향을 시뮬레이션 할 수 있다. 이런 구름씨 물질을 가진 연소탄은 항공실험과 지상실험에서 풍속에 따라 생성되는 입자크기 분포가 달라지기에 이 연소탄의 실험 후 생성된 구름씨 입자크기분포를 관측하여 인공강우 수치모델 적용함으로써 보다 효과적인 인공강우기술을 개발할 수 있다. 에어로졸챔버와 구름챔버 간의 연계는 에어로졸의 생성 및 이동, 그리고 구름 형성과의 상호작용을 정밀하게 조절할 수 있게 한다. 또한 각각의 챔버는 독립적인 측정 기기를 통해 자료를 수집하며, 이를 상호 비교함으로써 에어로졸이 구름 생성 및 물리적 특성에 미치는 영향을 체계적으로 분석할 수 있다. 이와 같은 통합적 구조는 구름 물리학 실험에서 에어로졸의 역할을 규명하고, 대기 중 구름-에어로졸 상호작용의 메커니즘을 보다 정밀하게 연구할 수 있도록 한다.

따라서 국내에서 대부분 대기환경분야의 챔버들은 에어로졸의 특성 분석에 초점이 맞추어져 있고, 이 에어로졸들이 대기로 나왔을 때 기상환경에 의해 생성되는 구름 및 기상변화에 대한 영향 및 효과에 대해서는 실험할 수가 없었다. 하지만 K-CPEC은 에어로졸 생성에서부터 이들의 기상학적 영향에 대해 종합적으로 분석할 수 있는 국내 유일의 연구인프라이다. 향후 대기환경분야에서도 국가적인 연구시설인 K-CPEC의 활용을 통해 많은 연구가 이루어질 수 있을 것이다.

2.2. K-CPEC의 구름챔버 설계 기술

이 구름챔버의 실험공간 기준으로 높이×폭이 5.0 m × 5.0 m(실제크기: 7.5 m × 5.3 m)인 원통형 외부챔버와, 내부챔버 사용 공간은 3.0 m × 3.0 m인 팔각형 모양의 내부챔버로 이루어졌다(Fig. 2). 구름챔버는 SUS304 스테인리스강을 사용하여 제작되었으며, 외부 온도 영향을 최소화하기 위해 200 mm 두께의 폴리우레탄 폼을 단열재로 사용하였다. 챔버는 R-507 및 R-23 냉매를 사용하여 -70℃에서 +60℃까지 온도 범위를 유지하는 냉각 및 가열 시스템을 갖추고 있다. 이 설계는 다양한 기상 조건을 실험실에서 재현하기 위한 최적의 환경을 제공하며, 실험의 정확성과 반복성을 보장한다.

본 연구의 구름챔버는 내외부 이중구조와 이원 냉각 시스템으로 구성된 복합 구조물로, 구름 형성과 에어로졸의 상호작용을 실험적으로 연구하기 위한 핵심 장비이다. 이런 구성은 실험 중 구름 형성과 관련된 다양한 환경 조건을 정밀하게 제어할 수 있게 한다. 구름챔버의 외부 챔버는 구름챔버의 가장 바깥쪽에 위치하며, 내부의 온도와 기압을 유지하고 외부 환경으로부터 단절시켜 내부 환경을 보호하는 역할을 한다. 외부 챔버는 단열재를 포함하고 있어, 내부에서 발생하는 열 변화와 외부에서 유입되는 열변화를 최소화하여, 안정적인 구름 생성 실험 조건을 제공한다. 내부 챔버는, 실험이 실제로 이루어지는 공간이다. 내부 챔버는 이중재질로 되어 있으며, 외부 층은 스테인리스 강으로 제작되어 있으며, 내부 층은 구리로 구성되어 높은 열전도성과 구조적 안전성을 가진다. 이 구조는 챔버 내부의 온도를 정밀하게 제어할 수 있도록 한다.

Fig. 2의 내부 챔버 냉매 시스템은 챔버의 온도를 조절하는 주요 장치로, 냉매의 유입구와 배출구를 통해 내부 온도를 조절 할 수 있게 냉매가 순환한다. 냉매 유입구는 챔버의 다양한 부분으로 냉매를 공급하여 열을 흡수하며, 냉매 배출구는 열을 흡수한 냉매를 외부로 배출하여 지속적인 온도 조절을 가능하게 한다. 냉매의 흐름은 구리 파이프를 통해 이루어지며, 높은 열전도성을 바탕으로 챔버 내부의 열을 효과적으로 전달하고 제거할 수 있게 한다. 내부 챔버 내 안쪽 층에 구리로된 많은 배관들이 연결되어 있고, 이 구리 배관 시스템을 통해 냉매가 순환하며 열을 이동시키고 내부 챔버의 온도를 균일하게 유지한다. 각 구리 배관들은 챔버의 상부 덮개, 상단벽면부, 하단벽면부, 그리고 하부 밑 등 다양한 위

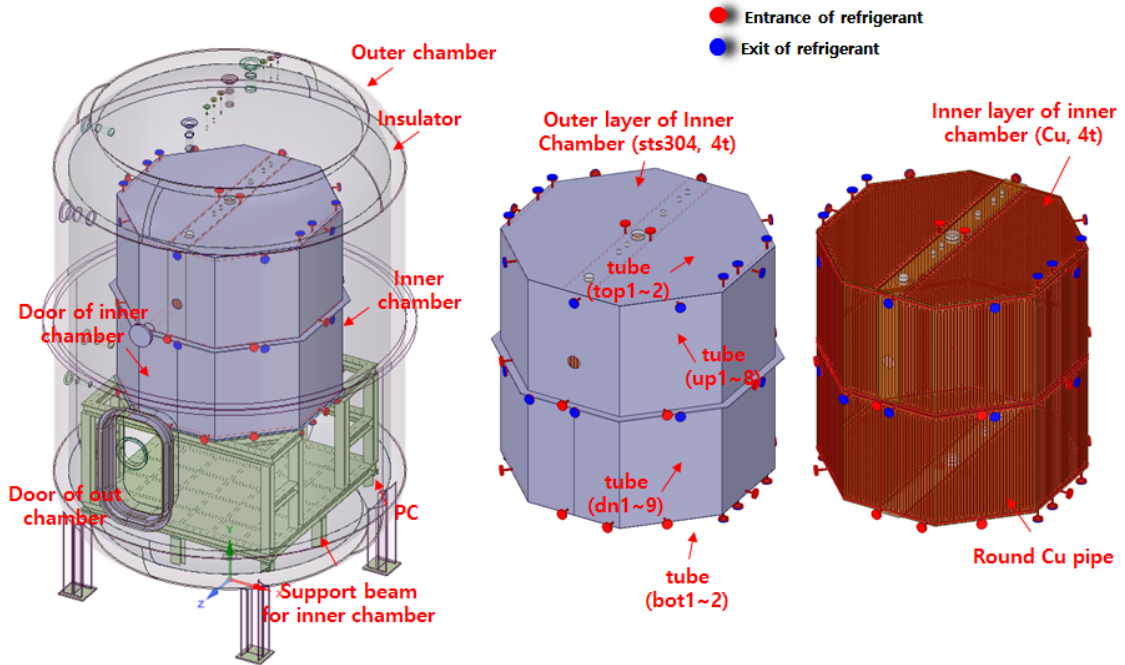


Fig. 2. Structural diagram of K-CPEC depicting the inner and outer chambers, refrigerant flow pathways, and detailed components such as support beams, insulators, and copper piping for thermal regulation.

치에 설치되어 있어 열 전달이 특정 구간에 집중되지 않도록 한다. 이를 통해 챔버 내부의 온도 조건을 정밀하게 조절할 수 있으며, 구름 형성 과정에서 구름이 균질하게 발생 할 수 있게 설계하였다.

Table 1에서 보다 구체적인 구름챔버의 규격과 성능을 정리하였다. 특히, 구름챔버는 정밀한 온도 및 기압 제어를 위해 다양한 조건을 설정할 수 있도록 설계되었다. 구름챔버 내 온도의 균일도는 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 이내로 유지하게 했고, 온도 하강 시간은 $+60^{\circ}\text{C}$ 에서 -70°C 로 변화하는 데 45분, 온도 상승 시간 역시 동일하게 -70°C 에서 $+60^{\circ}\text{C}$ 로 변화하는 데 45분 내에 수행 될 수 있게 설계되었다. 이러한 온도 변화는 100 m당 약 0.98°C 의 비율로 이루어지게 설계된 것이다. 이 구름챔버의 냉각 방식은 이원 냉각방식 및 간접 냉각방식을 사용하여 안정적이고 균일한 온도 조절을 가능하게 한다. 1차 냉매로 R-507과 R-23이 사용되며, 2차 냉매로는 NOVEC 7200이 사용된다. 기압 제어 범위는 1.013 hPa에서 30 hPa까지로, 진공펌프와 제어 밸브를 통해 정밀한 기압 조절이 가능하다. 이러한 기압 조절을 통

해 구름 형성 과정에서 다양한 대기 조건을 모사할 수 있다. 가습량은 최대 60 kg/hr로 설정할 수 있으며, 초기에는 스팀보일러를 사용하여 가습이 이루어졌다. 그러나 스팀보일러 방식은 구름챔버 내 온도 상승을 유발하여 특정 실험에 비효율적인 면이 있었다. 이에 따라 2023년도부터는 나피온 멤브레인 튜브를 통과시켜 수증기를 발생시키는 방식을 채택하여 가습 시스템을 개선하였다. 이와 같이 다양한 제어 시스템을 통해 구름 챔버는 구름 형성과 성장에 필요한 복잡한 온도, 기압, 습도 조건을 재현할 수 있으며, 실험적인 연구에 필요한 다양한 환경을 구현할 수 있다.

2.3. K-CPEC의 에어로졸챔버 및 풍동기와 화로 설계 기술

에어로졸챔버는 구름챔버와 함께 구름 및 에어로졸 상호작용을 연구하기 위한 주요 실험 장비 중 하나이다(Fig. 3). Table 2를 보면, 에어로졸챔버의 실험 공간 기준으로 크기는 외경 3.0 m × 3.0 m(실제크기 4.3 m × 3.0 m)로 설계되었으며, 두께 12 mm의

Table 1. Specifications of the K-CPEC, including dimensions, shape, volume, material, temperature range, pressure range, and heating/cooling capabilities

Cloud Chamber of K-CPEC		
Size	Outer chamber	Usable size : 5 m x 5 m Realistic size : 7.5 m x 5.3 m
	Inner chamber	3 m x 3 m
Shape	Outer chamber	Cylinder
	Inner chamber	Octagonal prism
Volume	Inner chamber	21 m ³
Material	Outer chamber	Stainless steel
	Inner chamber	Copper (Cu) / Stainless steel
Temperature range	Range	60 to -70°C
	Static stability margin	≤ ±0.3°C
	Dynamic stability margin	≤ ±0.5°C
Pressure range	Range	1,013 to 30 hPa
	Margin of error	≤ ± 0.3 hPa
Heating/cooling time	Inner chamber	≤ 45 min (-70 to 60°C)
		≤ 45 min (60 to -70°C)

Table 2. Specifications of the aerosol chamber of K-CPEC, detailing its size, material, and pressure range capability

Aerosol chamber of K-CPEC		
Size	Usable size : 3 m x 3 m Realistic size : 4.5 m x 3.0m	
	Stainless steel	
Pressure range	Range	1,013 to 30 hPa
	Margin of error	≤ ± 0.3 hPa

SUS304 재질 강판으로 구성되어 있다. 기압 제어 범위는 구름챔버와 같이 1,013 hPa에서 30 hPa까지 가능하며, 진공펌프와 제어 밸브를 사용하여 정밀하게 조절되게 설계하였다. 에어로졸챔버 상단에는 에어 샘플러 임팩터(Air sampler impactor)가 설치되어 있으며, 이를 통해 외부 공기로부터 에어로졸 샘플을 채취하여 구름챔버로 주입할 수 있다. 이러한 구조를 통해 대기 중 에어로졸의 특성과 그들이 구름 형성에 미치는 영향을 실험적으로 연구할 수 있다.

또한, 화로(Furnace)와 풍동기(Wind tunnel) 시스템은 구름챔버와 에어로졸챔버를 더욱 다양하게 활용될 수 있게 제작 되었다. 풍동기에서 만들어진 바람이 화로 내의 바람을 유입 시켜(출구 노즐 면적: 폭 250 mm × 높이 250 mm) 최대 풍속이 100 m s⁻¹에 도달하게 할 수 있다. 풍속은 인버터 제어 방식을 통해 정밀

한 풍속 조절이 가능하다. 이러한 풍동 시스템은 보다 현실적인 인공강우 구름씨 연소탄실험 조건을 제공하며, 이 실험을 통해 관측되는 연소탄의 빙정핵 또는 응결핵의 입자크기분포 관측자료는 구름 형성 과정에서의 물리적 상호작용을 정밀하게 분석하는 데 기여한다. 구름챔버와 에어로졸챔버는 독립적인 측정 장비를 통해 각각 자료를 수집하며, 또한 각각의 자료들을 상호 비교함으로써 에어로졸이 구름 생성 및 물리적 특성에 미치는 영향을 체계적으로 분석할 수 있다. 이와 같은 통합적 구조는 구름물리학 실험에서 에어로졸의 역할을 규명하고, 대기 중 구름-에어로졸 상호작용의 메커니즘을 보다 정밀하게 연구할 수 있도록 한다.

3. 결 과

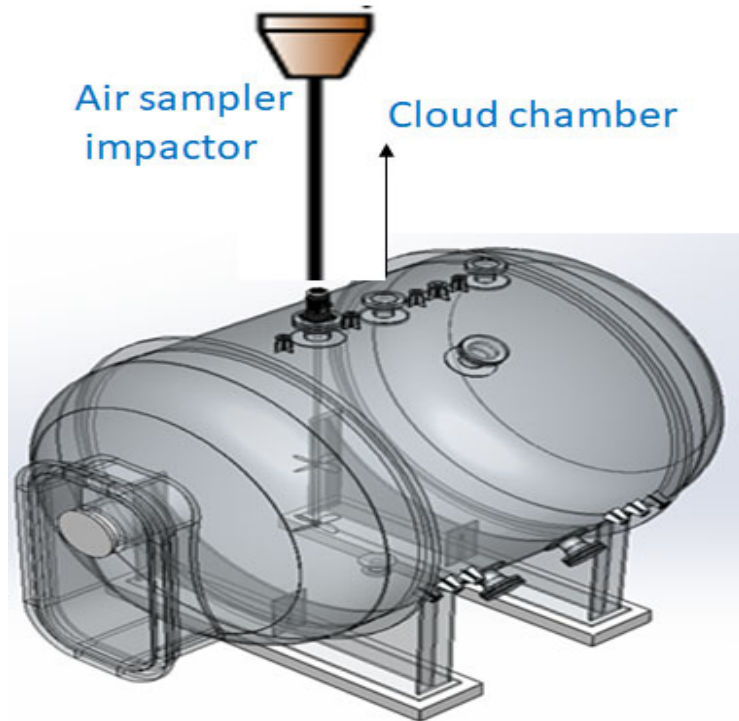


Fig. 3. Illustration of the aerosol chamber of K-CPEC setup with an air sampler impactor mounted for collecting aerosol samples during experiments.

3.1. 구름 및 에어로졸 챔버구축을 위한 기압 및 온도 성능 수치모의 테스트

3.1.1. 기압제어 성능 수치모의 모의테스트

K-CPEC의 구축 전에 구름챔버의 원활한 실험이 가능한지를 알아보기 위해 2장에서 설계 기준으로 가장 기본적인 기압과 온도 제어에 대한 가상의 수치모의를 사전에 수행하였다(Figs. 4 and 5). Fig. 4(a)에서, 구름 챔버의 기압조절 성능에 대한 챔버 내부의 안정된 기압 유지 능력을 수치적으로 평가한 결과, 요구 되어지는 목표 기압값에 거의 정확히 수행할 수 있는 능력을 입증하였다. 챔버 내부의 기압은 설정된 목표값인 1,013 hPa에서 30 hPa까지 안정적으로 제어 가능하며, 기압 변화 과정에서도 ± 0.3 hPa 이내의 정확도를 유지할 수 있음을 보였다. 특히, Fig. 4(a)에서 확인된 구름챔버의 기압 변화 양상은 챔버가 기압 변화에 대해 적절하게 조절할 수 있는 능력을 명확히 보여주었다. 이는 구름물리 실험 조건을 안정적으로 유지하는 데 중요한 역할을 한다.

K-CPEC의 에어로졸챔버에 대한 기압 성능 평가에

서도 유사한 안정성을 확인할 수 있었다(Fig. 4(b)). 기압 변화 테스트 결과, 에어로졸챔버는 1,013 hPa에서 30 hPa까지 설정된 기압 범위에서 지속적으로 목표값을 유지하였다. 기압 성능 평가 그림에서는 기압이 변동하는 동안에도 목표값에 도달한 후 안정적으로 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 이 평가에서는 목표한 기압 제어 성능보다 훨씬 빠른 시간 내 기압이 조절될 수 있음을 알 수 있었다. 이는 에어로졸 입자의 농도 및 분포를 조절하는 실험에서 안정적인 기압 환경을 제공하는 데 필수적인 요소이다.

3.1.2. 기온제어 성능 수치모의 테스트

Fig. 5(a)는 구름챔버에서 기온 상승 시 요구되는 성능과 설계된 냉각 시스템에 의한 기온 상승의 수치적 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 실험에서 측정된 실제 히팅율(Heat up rate)온도는 -70°C 에서 $+60^{\circ}\text{C}$ 까지의 범위로, 기온 상승 과정을 보인 것이다. Fig. 5(a)의 빨간선은 $0.98^{\circ}\text{C } 100 \text{ m}^{-1}$ 의 기온 상승선 인데 이 선은 챔버 내에서 요구된 성능, 즉 목표로 하는 기온 상승 속도

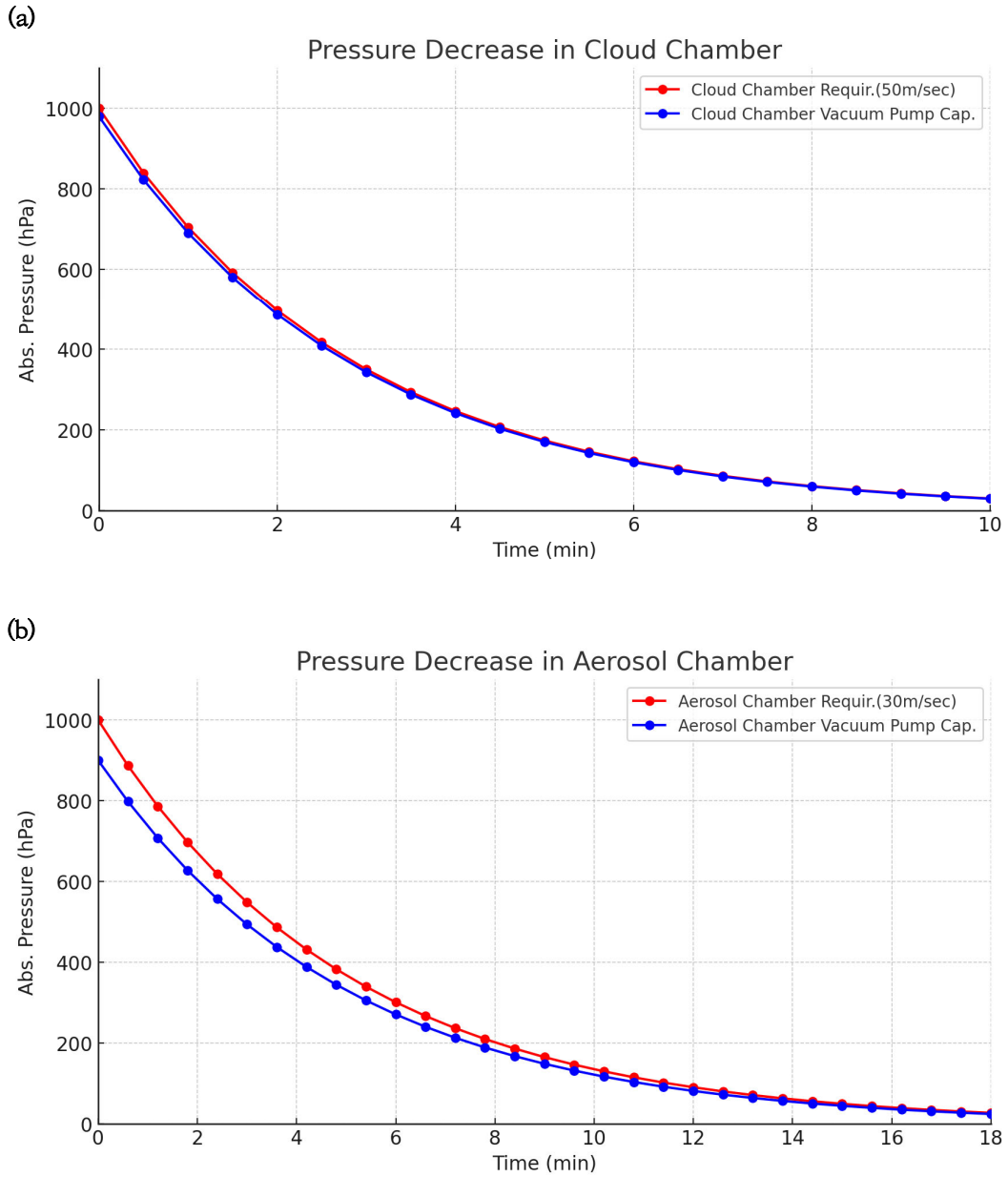


Fig. 4. Pressure decrease curves for (a) cloud chamber and (b) aerosol chamber, comparing the required pressure reduction rate with the actual capacity of the vacuum pump over time.

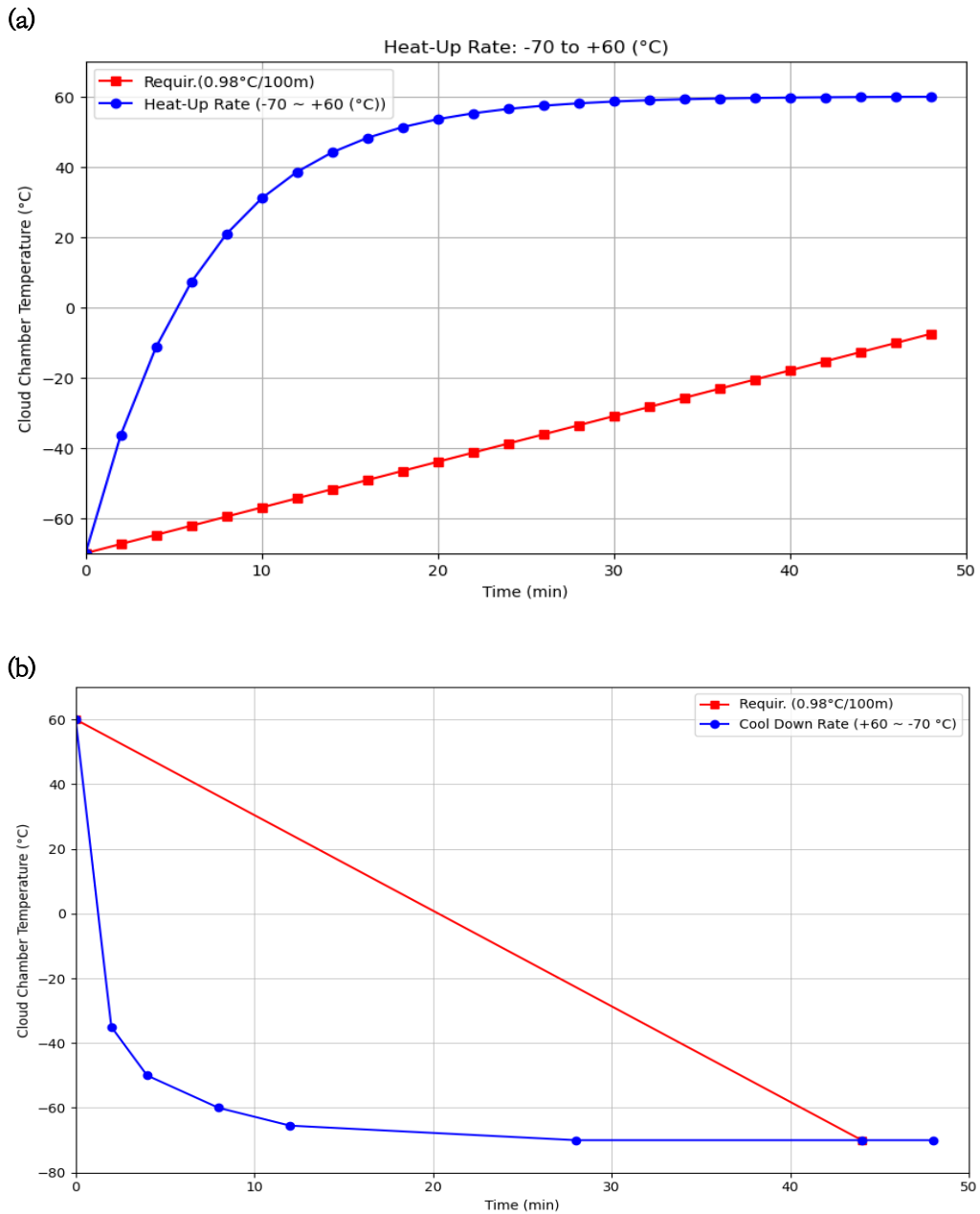


Fig. 5. Temperature change rates of cloud chamber for (a) heating from -70°C to 60°C and (b) cooling from 60°C to -70°C, showing the actual rates compared to the required gradient of 0.98°C per 100 m.

를 나타낸다. 파란색 선은 실제로 설계된 냉각 시스템에 의해 측정된 기온 상승 속도를 나타낸다. 파란색 선은 초기에는 급격한 기온 상승을 보이다가 시간이 지남에 따라 점점 완만해지는 형태를 가지고 있다. 특히 24분 이후부터는 기온이 서서히 평행에 도달하면서 점진적으로 $+60^{\circ}\text{C}$ 에 도달하게 된다. 이는 설계된 냉각 시스템이 목표 성능에 부합하고 있음을 잘 보여준다. Fig. 5(b)는 구름챔버에서 기온 하강 시 냉각 시스템의 성능 분석을 위해 시간에 따른 기온 변화를 측정된 결과, 초기 기온 60°C 에서 최종 -70°C 까지의 냉각 과정에서 특징적인 열전달 패턴이 관찰되었다. 실험에서 측정된 실제 냉각률(Cool down rate)은 초기 10분 동안 급격한 기온 하강을 보였으며, 이후 점진적으로 안정화되는 지수함수적 감쇠 특성을 나타냈다. 기준이 되는 요구 냉각률($0.98^{\circ}\text{C } 100^{-1}$)과 비교했을 때, 실제 냉각 과정은 초기에 더 빠른 냉각 속도를 보였다. 특히 시스템이 약 15분 경과 시점부터 안정화 단계에 진입하기 시작하여, 30분 이후에는 거의 평행 상태에 도달하는 것으로 관찰되었다. 이렇게 요구되는 선형적 냉각 패턴 ($0.98^{\circ}\text{C } 100^{-1}$)과는 차이를 보이는 것으로, 실제 열역학적 냉각 과정에서 나타나는 자연적인 현상으로 해석된다. 이 냉각 특성은 시스템의 초기 급속 냉각 능력이 우수하며, 저온 영역에서도 안정적인 기온 유지가 가능함을 시사한다. 본 실험 결과는 냉각 시스템의 설계 최적화 및 성능 예측에 있어 중요한 기초 데이터로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

3.2. 구름챔버 설계에 따른 구조해석 및 열전달 수치모의

구름챔버의 구조 해석 및 열전달 시뮬레이션은 Abaqus/CAE 2019 소프트웨어를 사용하여 수행되었다. 이 소프트웨어는 다쏘시스템즈 시뮬리아 제품으로, 광범위한 산업 애플리케이션에 걸쳐 일상적이거나 정교한 엔지니어링 문제를 해결하기 위한 강력하고 완전한 솔루션을 제공한다. Abaqus는 특히 자동차 산업의 엔지니어링 작업 그룹에서 공통된 모델 데이터 구조와 통합된 솔버 기술을 활용하여 차량의 전체 부하, 동적 진동, 밀터바디 시스템, 충격/충돌, 비선형 상태, 열 결합, 음향 구조 결합 등의 복잡한 문제를 분석하는 데 사용된다. 구름챔버의 설계 과정에서 유한요소해석(FEA)과 다중물리해석을 활용하여 선형 및 비선형 구조 해석, 열-전기 결합, 그리고 전자기 해석 등의 다양한 시뮬레이션을 수행할 수 있다.

Abaqus/CAE를 통해 구름물리실험챔버의 내열성, 복잡해 등의 다양한 재질 특성을 고려한 사전 수치 테스트를 하였고, 유연 다물체 동역학, 제어 및 조인트 거동, 접촉, 파손 및 파괴 현상까지도 모델링하여 분석하였다. 이러한 해석을 통해 구름챔버와 관련된 구조적 안정성, 열 전달 효율성, 그리고 접촉 및 파손 가능성 등을 종합적으로 평가하였다. 또한, 자동화된 워크 플로우를 통해 모델링과 결과 분석의 효율성을 높였으며, Abaqus와 연동할 수 있는 다양한 산업군의 소프트웨어를 통해 협력적 연구를 진행하였다.

구름물리챔버의 열전달 특성은 이 소프트웨어를 활용하여 열해석을 수행하였다. 해석 영역은 구름물리챔버의 상세 설계 전체를 포함하였으며, 챔버 내부는 절대압 3,000 Pa 조건에서 운전되도록 설정하였다. 냉매 순환 시스템은 총 21개의 유로로 구성되어 있으며, 전체 유량은 $55 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ 로 설정하였다. 각 유로는 2.75 CMH (Cubic meters per hour)의 동일한 유량으로 설계되었으나, 도어부에 위치한 2개의 유로는 예외적으로 1.38 CMH로 차등 적용하였다. 초기 조건으로 챔버 내부 기온은 60°C 로 설정하였으며, 과도상태 해석을 통해 시간에 따른 기온 변화를 분석하였다. 냉매의 유입 온도는 초기 설계 조건에 따라 조절되도록 하였으며, 챔버 내부 공간에 설치된 16개의 온도 센서를 통해 공간 온도 분포의 균일성을 검증하였다. 특히, 센서 간 온도 편차가 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 이내로 유지되는지를 중점적으로 확인하였다. 이 해석 조건은 구름물리챔버의 열적 안정성과 온도 균일도 확보를 위한 설계 타당성 검증에 활용되었다.

Fig. 6은 구름물리실험챔버의 열전달 특성을 평가하기 위해 Abaqus/CAE 2019를 이용한 시뮬레이션을 결과이다. 챔버 내부의 기온 분포를 정밀하게 분석하기 위해 총 16개의 센서로 구성된 3차원 온도 측정 네트워크를 구축하였다. 온도센서 배치는 정중앙(온도센서 1), 하단부(온도센서 2~6), 중단부(온도센서 7~11), 상단부(온도센서 12~16)의 높이별 구조로 설계되어 공간적 온도 분포를 효과적으로 모니터링할 수 있도록 설계하였다. 이 설계를 기준으로 Fig. 6(a)~(d)는 구름물리실험 챔버의 냉각 과정 동안 챔버 벽면온도 변화의 공간분포를 보다 시각적으로 표현한 시뮬레이션한 결과이다. 이 그림은 시뮬레이션에서 4개의 시간 구간(48초(Fig. 6(a)), 309초(Fig. 6(b)), 1,068초(Fig. 6(c)), 2,700초(Fig. 6(d)) 동안의 벽면온도 분포를 네 개의 패턴으로 나

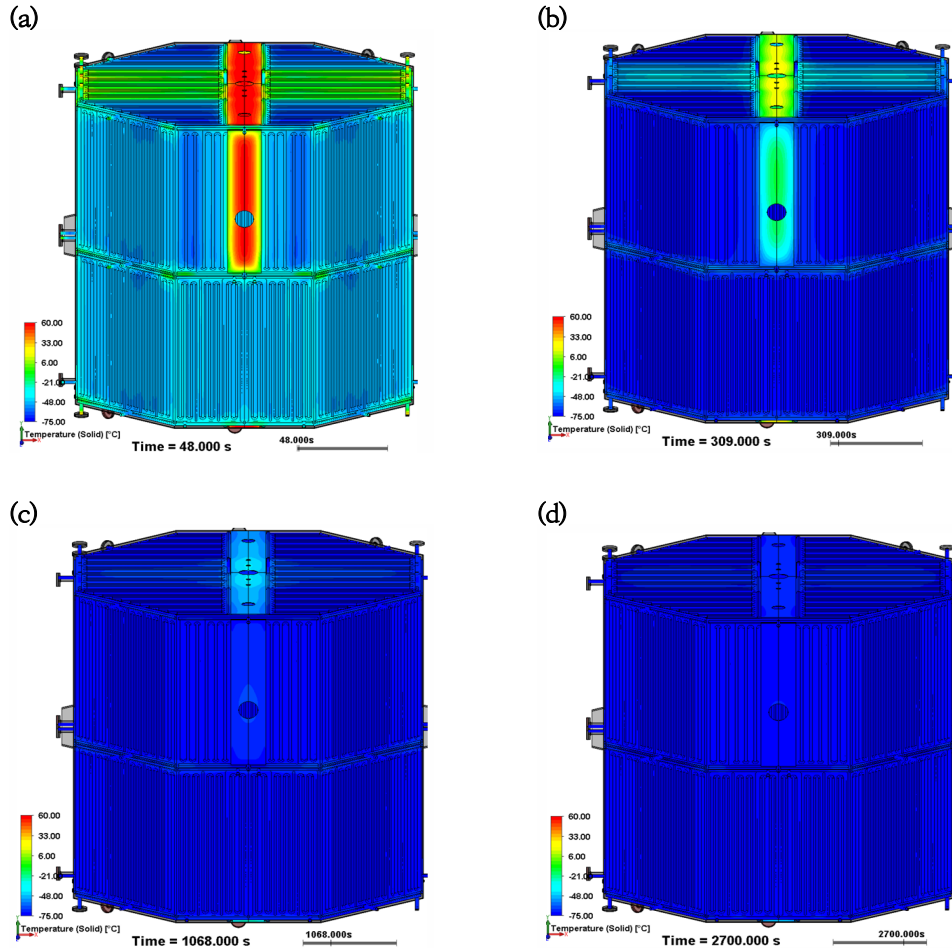


Fig. 6. (a) Chamber wall temperature distribution at 48 seconds showing initial cooling. (b) Distribution at 309 seconds showing continued cooling. (c) Distribution at 1,068 seconds showing further cooling. (d) Distribution at 2,700 seconds showing final stabilization.

누어 나타내고 있다. 각 패널은 섭씨 온도(-75°C에서 +60°C까지)를 색으로 표현하여, 챔버 벽면 내 온도 변화 과정을 시각적으로 쉽게 확인할 수 있다. Fig 6(a)는 냉각이 시작된 후 48초가 경과한 시점의 챔버 벽면 내부 온도 분포를 보여준다. 챔버 상단 중앙에서 아래로 이어지는 부분이 33°C에서 60°C에 이르는 높은 온도를 유지하고 있다. 나머지 영역은 대부분 -21°C에서 6°C 사이의 온도를 보인다. 빨간색과 노란색으로 표시된 부분은 아직 냉각이 미치지 않은 고온의 영역을 나타낸다. 냉각 시작 후 309초 후(Fig 6(b))에는 냉각이 진행됨에 따라 챔버 내부의 벽면온도 분포가 더욱 균일해

진 모습을 확인할 수 있다. 중앙 기둥 부분은 이전보다 온도가 크게 낮아져 -21°C에서 6°C 범위를 보이며, 챔버 전체적으로도 대체로 -75°C에서 6°C 범위의 온도를 유지하고 있다. 이는 냉각 메커니즘이 효과적으로 작동하고 있음을 의미한다. 냉각 시작 후 1,068초 후(Fig 6(c))인 시점에서는, 챔버 벽면 대부분이 매우 낮은 온도 상태에 도달한 것을 볼 수 있다. 벽면온도 분포는 훨씬 균일해졌고, 대부분의 영역은 -75°C에서 -48°C 사이의 짙은 파란색으로 나타났다. 마지막으로 2,700초 시점(Fig 6(d))에서는 챔버 벽면온도가 정류 상태에 도달했음을 보여준다. 챔버 벽면 전체가 약 -75°C의 균일

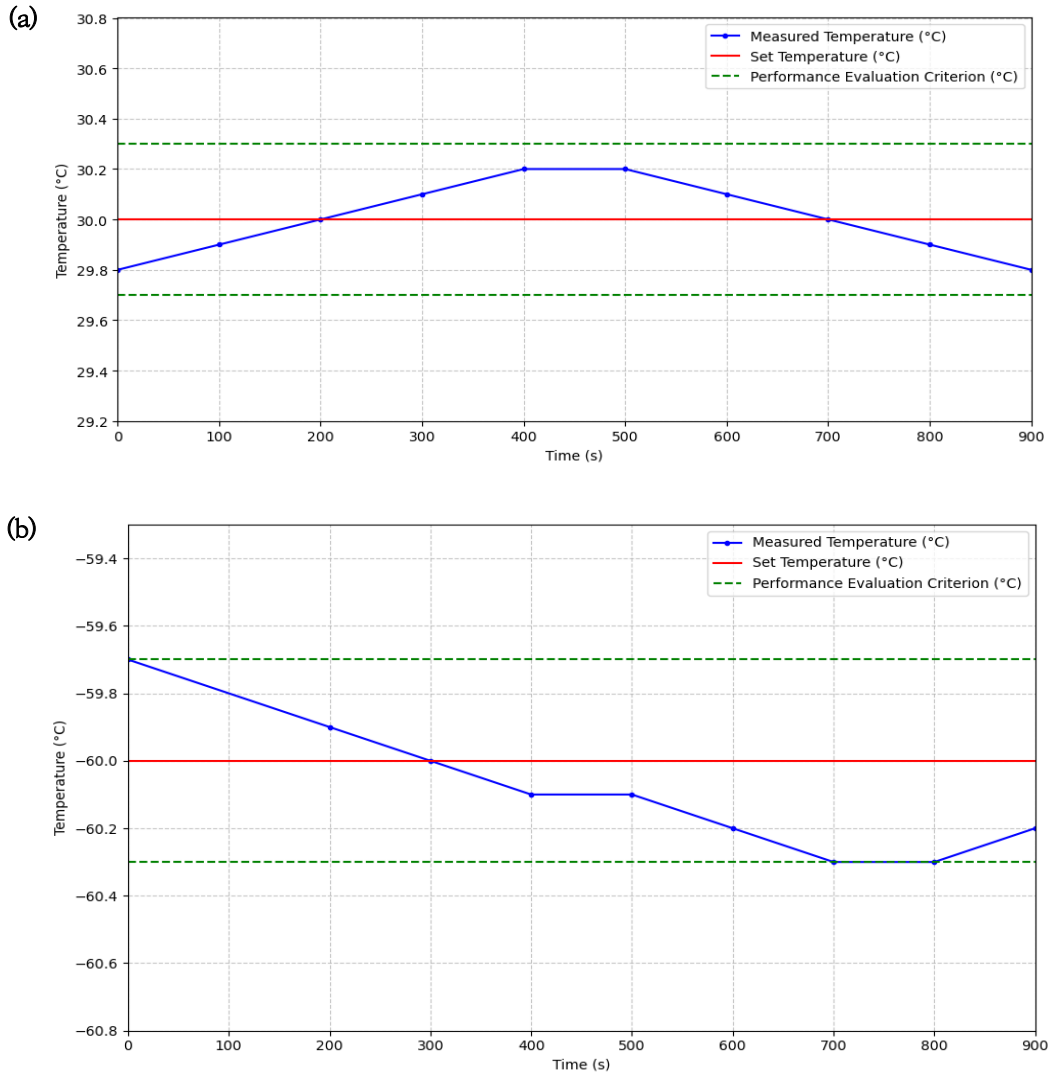


Fig. 7. Temperature variation in the cloud chamber at a single point in the chamber center for (a) a set point of 30°C and (b) -60°C, comparing the measured temperatures to the target temperatures over time.

한 온도 상태를 유지하며, 온도 변화가 거의 보이지 않는다.

이 시뮬레이션 결과 초기에는 챔버 내에서 열적 경사가 관찰되었으며, 특히 중앙 축을 따라 고온의 영역이 존재했다. 시간이 지나면서 냉각 메커니즘이 점차 온도 차이를 해소하며, 챔버 전체의 온도가 균일해졌다. 이러한 시각화 결과는 구름챔버의 구름생성 실험에서 사용될 챔버의 냉각 장치의 효율성과 일관성을 잘 드러내고 있다.

3.3. K-CPEC의 현장 성능평가

Fig. 7(a)은 K-CPEC의 기온 변화를 설정온도와 비교한 결과이다. 챔버 내 기온 측정 위치는 내부챔버의 중앙 점을 기준으로 하였다. 냉각이 시작된 후 챔버 내부의 실제 기온이 설정값 주변에서 미세하게 변동하는 양상을 보였다. Fig. 7(a)의 설정 온도는 30.0°C로 하였고, 실제 측정된 기온은 설정값을 중심으로 약 ±0.2°C의 변동을 보였으며, 이는 챔버 성능 검사요청 기준인 ±0.5°C 내

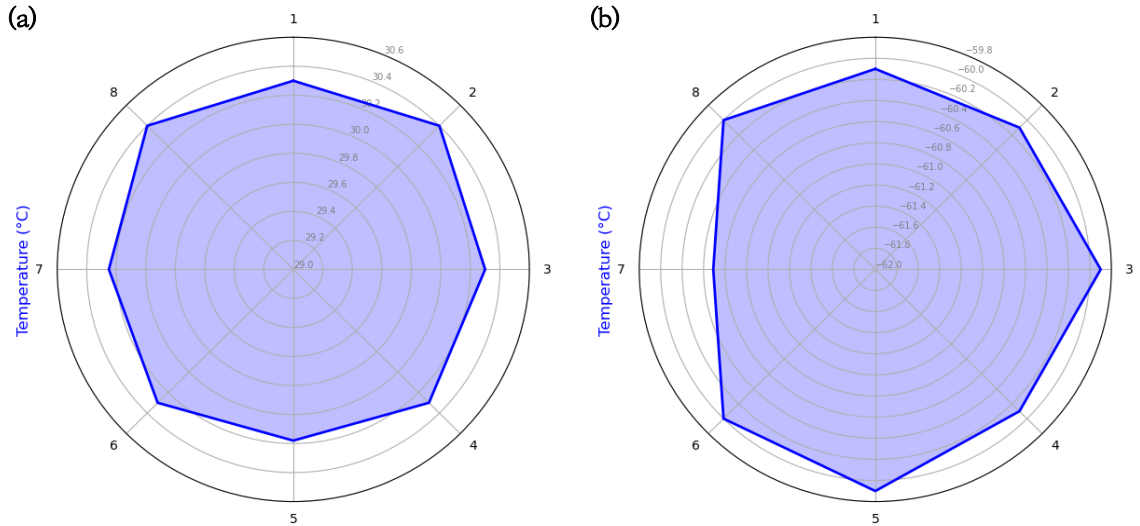


Fig. 8. Temperature homogeneity in the cloud chamber at eight locations: (a) shows the variation at a set point of 30°C, and (b) at -60°C.

의 변동폭에 해당하여 챔버 요구 성능을 만족하였다. 초기 약 100초 동안의 냉각 과정에서 측정된 기온은 설정값보다 다소 낮은 수준에서 시작하였고, 이후 300초에서 500초 사이에 설정온도에 도달하며 약간의 과열 및 과냉을 반복하면서 변동했다. 이러한 변동폭은 챔버 성능 온도 변동폭 요구 조건인 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 내에 만족하는 것으로 보인다. 특히, 이 그림에서 최고점과 최저점은 각각 약 30.2°C 와 29.8°C 를 기록하였으며, 이는 설정 온도 대비 약 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 범위에서 변동하였음을 의미한다. 이러한 변동은 챔버의 요구 성능을 만족하였으며, 구름 생성 실험에 적합한 조건을 제공한다는 것을 의미한다.

Fig. 7(b)에서는 극저온 환경에서 구름챔버의 기온 제어 특성을 관찰하기 위해 설정기온 -60.0°C 를 기준으로 약 900초 동안의 기온 변화를 측정하였다. 실험 결과, 측정된 기온은 초기값 -59.7°C 에서 시작하여 점진적으로 감소하는 경향을 나타내었으며, 전체 실험 과정은 특성에 따라 세 단계로 구분할 수 있었다. 초기 단계(0~400초)에서는 -59.7°C 의 시작점으로부터 거의 선형적인 감소 패턴을 보였으며, 해당 구간에서는 목표 온도인 -60.0°C 에 도달하기 위한 안정적인 냉각 특성이 관찰되었다. 중간 단계(400~600초)에서는 기온이 -60.1°C 에서 -60.2°C 사이에서 변화하며, 초기 단계와 비교하여 현저히 감소된 냉각 속도를 나타내었다. 이는 시스템이 설정온도 근처에서 안정화 단계에 진입했

음을 시사한다. 후기 단계(600~900초)에서는 약 700~800초 구간에서 최저 온도인 -60.3°C 까지 도달하였으며, 이후 미세한 온도 상승이 관찰되어 최종적으로 -60.2°C 에서 실험이 종료되었다. 이러한 온도 변화 패턴은 시스템이 열평형 상태에 도달하는 과정을 잘 보여주고 있다. 전체 실험 기간 동안 측정된 온도는 설정 온도(-60.0°C)를 기준으로 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 이내의 편차를 유지하였다. 특히 실험 후반부에서 관찰된 안정적인 기온 제어 특성은 본 시스템이 극저온 환경에서도 효과적인 온도 제어 성능을 보유하고 있음을 입증한다. 이러한 결과는 향후 극저온 환경에서의 정밀 기온제어가 요구되는 응용 분야에 유용한 기초 데이터로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 8의 구름챔버 내 기온도 균일도 측정은 60°C 에서 -70°C 범위에서 상승속도는 5 m s^{-1} 를 기준으로, 성능평가 대상 기온은 30°C 와 -60°C 두 가지 조건을 선택하여 진행되었다. Fig. 8(a)는 설정온도 30°C 에서의 챔버 내 기온의 균일도 분석하였다. 8개의 벽면 지점에서 기온을 측정 한 결과, 대체로 29.8°C 에서 30.4°C 사이로 측정된 값들이 분포하며, 평균적으로는 30°C 근처에서 안정된 온도 균일도를 유지하고 있다. 이 변동폭이 $\pm 0.4^\circ\text{C}$ 범위 내에서의 변동을 나타낸다. Fig. 8(b)는 설정온도 -60°C 에서의 기온 균일도 분석하였다. 이 그림 역시 8개 지점에서 측정된 결과, -60.49°C

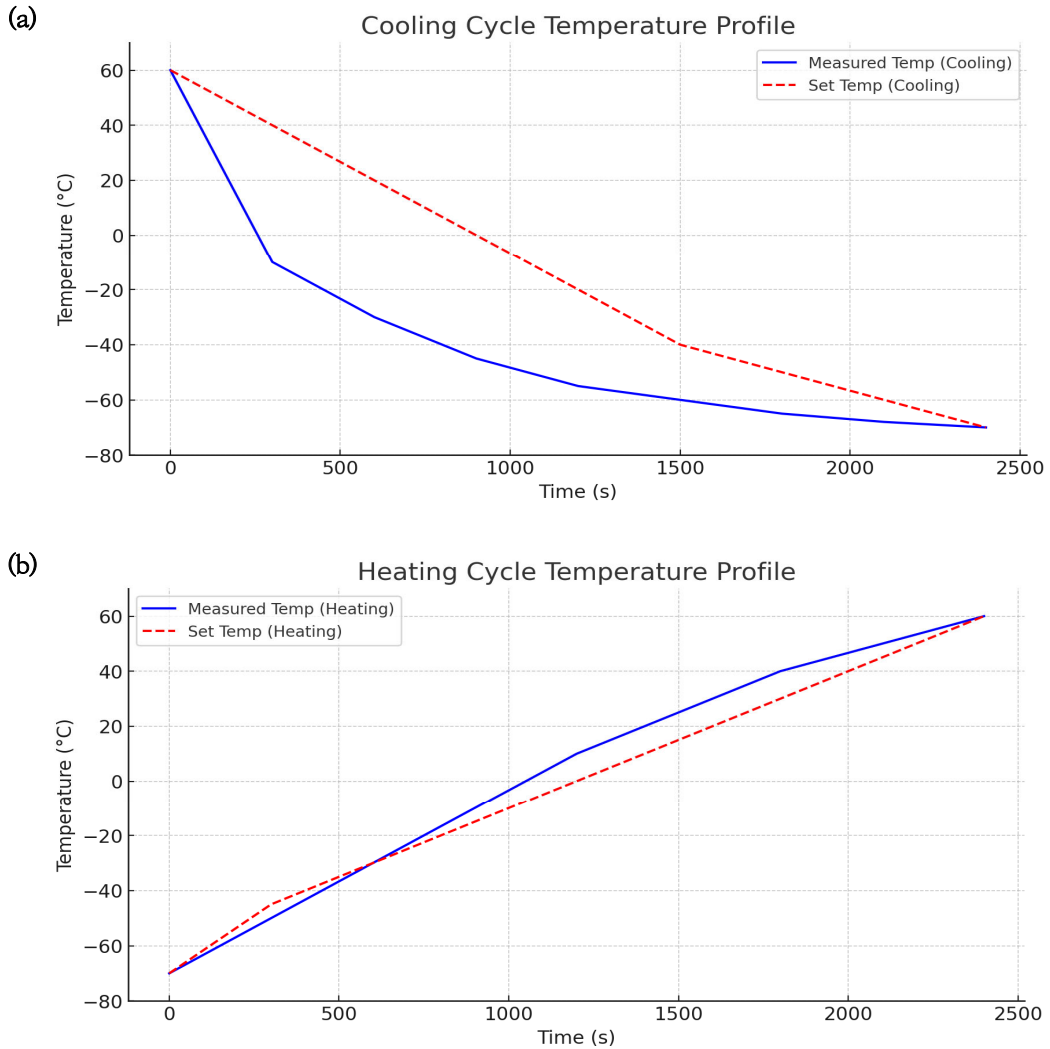


Fig. 9. Temperature profiles for the cloud chamber during (a) the heating cycle from -70°C to 60°C over approximately 2500 seconds, and (b) the cooling cycle from 60°C to -70°C over the same duration.

에서 -59.8°C 사이로 온도가 분포하며, 평균적으로는 -60°C 에 가까운 값으로 나타난다. 즉, 각 지점에서의 온도 변동이 -60°C 근처에서 안정적으로 유지되고 있음을 알 수 있다. 따라서 설정한 온도에서 챔버 내 기온의 균일도는 구름실험 요구조건인 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 의 기준 내에서 구름 생성실험에 안정된 환경임을 시사한다. 이는 구름챔버가 목표 온도에서 균일한 기온 분포를 유지하는데 성공적이라는 것을 시사하며, 기온제어 성능의 신뢰성을 뒷받침한다.

Fig. 9는 실험에서 구름물리실험 챔버의 기온제어 성능을 평가하기 위해 냉각과 가열 사이클 동안 설정된 목표 온도와 실제 측정된 온도를 비교하였다. 두 가지 사이클 모두에서 챔버 내부의 기온이 목표 범위에 도달하는 과정을 상세히 분석하였다. Fig. 9(a)의 냉각 사이클 동안 챔버는 60°C 에서 -70°C 까지 선형적으로 온도를 낮추는 것을 목표로 설정하였다. 냉각 과정에서 실제 기온은 설정된 목표보다 더 급격하게 하강하는 경향을 보였으며, 전체적으로 설정 온도에 근접하게 유지되었다. 초

기 100초 동안 설정 기온보다 다소 낮은 온도에서 시작하였고, 이후 목표 기온에 도달하면서 약간의 변동을 보였으나 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 내의 변동폭에 만족하여 챔버 성능 기준을 충족하였다. 특히, 냉각 시간 측면에서 실험 결과는 매우 긍정적이었다. 기온 하강 시간은 요구된 45분 이내에 이루어져야 하며, 실제 하강 시간은 44분 32초로 기록되었다. 이는 챔버의 냉각 성능이 성능 요구 조건을 성공적으로 충족함을 의미한다. 이러한 결과는 챔버 내부에서 열전달이 효과적으로 이루어졌음을 알 수 있고, 구름 생성 실험에 적합한 안정적인 기온 조건을 제공할 수 있음을 보여준다. Fig. 9(b)인 가열 사이클의 경우, 초기 온도는 약 -70°C 에서 시작하였으며 목표 온도는 60°C 였다. 이 그림에 따르면, 측정된 기온은 설정된 목표 온도보다 다소 빠르게 상승하는 경향을 보였다. 이는 챔버의 가열 시스템이 열전달 면에서 매우 효율적으로 작동하고 있음을 의미하며, 목표 기온에 빠르게 도달하였다. 가열 과정에서의 온도 상승 시간 역시 45분 이내에 목표 기온에 도달해야 한다는 성능 기준을 충족하였다. 실제 측정 기온은 시간 축이 44분 33초만에 목표 기온에 도달하였으며, 이는 성능 요구 조건보다 더 빠르게 목표를 달성한 결과이다. 이러한 성능은 챔버의 기온 제어 시스템이 실험에 적합한 조건을 유지하는 데 충분히 안정적임을 입증한다. 이러한 결과는 구름챔버가 구름 생성 실험에 필요한 안정적인 온도 제어 성능을 제공할 수 있음을 알 수 있고, 전체 시스템의 신뢰성과 정밀도를 보증하는 중요한 자료로 활용될 수 있다. 따라서, 이 구름챔버는 구름물리 관련 실험에서 신뢰할 수 있는 데이터 수집을 위한 중요한 도구로서 기능할 수 있다.

Fig. 10은 설정기압 제어성능과 1,013 hPa에서 30 hPa까지의 하강 성능을 평가한 결과이다. Fig. 10(a)에서는 챔버 내부 기압을 500 hPa로 설정한 상태에서 시간에 따른 기압 변화를 관측하였다. 초기에는 500.3 hPa에서 시작하여 시간이 경과하면서 기압이 서서히 감소하였고, 약 150초에 도달했을 때 499.8 hPa까지 하강하는 것을 볼 수 있다. 이후 기압은 점진적으로 다시 상승하여 약 250초에 500.3 hPa로 회복한 후, 최종적으로 500 hPa에 가깝게 유지된다. 이러한 변화는 챔버 내부의 기압 제어 시스템이 시간에 따라 미세한 조정을 통해 설정된 기압으로 회귀하는 과정을 보여주고 있다. 이 실험에서는 설정기압인 500 hPa에 대해 기압이 499.8 hPa에서 500.3 hPa 사이에서 변화하며, 최대 변화폭은 0.3 hPa로 측정되었다. 이는 구름챔버의 요구 조건인 설정된 기압에서의 변화폭 0.3 hPa 이내

를 충족하였다. 이러한 결과는 챔버가 실험 목적에 맞는 안정적인 기압 환경을 제공할 수 있음을 의미한다. Fig. 10(b)는 초기 기압 1,013 hPa에서 최종 기압 30 hPa까지 기압을 하강시키는 과정 나타낸 것이다. 이 실험은 챔버가 요구하는 기압 하강 조건을 충족하는지를 확인하기 위해 수행되었으며, 목표 시간은 10분(600초) 이내에 목표 기압에 도달하는 것이었다. 초기 기압은 1,013 hPa로 시작하여, 기압이 시간이 지남에 따라 점차적으로 감소한다. 500초 시점에서는 기압이 거의 30 hPa에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 이는 기압 하강 속도가 안정적이며 점진적으로 목표 기압에 접근하고 있음을 의미한다. 이 챔버 내부의 기압 제어는 구름 형성 실험의 중요한 요소로, 기압을 신속하고 정확하게 조절할 수 있는 능력은 실험 결과의 정확성과 일관성에 큰 영향을 미친다. 본 실험에서는 설정된 기압 목표와 요구 시간 내 달성을 통해, 구름챔버의 기압 조절 능력이 높은 수준의 성능을 보이고 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 구름 생성 실험에서의 챔버 사용 적합성을 입증하며, 향후 다양한 실험 조건에서도 높은 수준의 제어 능력을 기대할 수 있다.

Fig. 11에서 Case 1 (60°C , 약 10% RH)은 빨간색 실선은 기온을, 파란색 점선은 습도(RH(%))를 나타낸다. 이 경우 습도는 $\pm 1.3\%$ 내에서 유지되었음을 확인할 수 있다. 이는 설정된 요구 조건인 $\pm 2\%$ 이내로 습도를 조절할 수 있음을 의미하며, 챔버의 성능이 요구 조건을 충분히 만족함을 입증한다. Case 2 (40°C , 약 95% RH)는 갈색 실선이 기온을, 파란색 점선이 습도를 나타낸다. 이 경우 습도의 변화는 $\pm 1.9\%$ 로 나타났으며, 이 역시 요구된 조건인 $\pm 2\%$ 이내에 속한다. 이는 고습 환경에서도 챔버가 안정적으로 상대 습도를 유지할 수 있음을 보여준다. 본 연구에서는 영하의 기온에서 습도 제어 평가는 영하에서 습도를 정확히 관측하는 정밀장비를 구매 후에 평가할 예정이다.

Table 3은 K-CPEC의 구름챔버 성능 평가 결과 요약한 것이다. 본 연구에서는 K-CPEC의 구름챔버 성능을 다양한 온도, 기압, 습도 조건에서 평가한 것을 전체적으로 요약한 것이다. 챔버의 성능은 각 측정 항목의 요구 조건을 충족하는지를 확인하기 위해 여러 시험 항목을 기반으로 분석되었다. 평가된 주요 항목으로는 기온, 기압, 그리고 습도 유지 능력이 있다. 이 구름챔버의 기온 성능 평가는 고정된 목표점에서의 정적 기온 조건과 전 범위에서의 동적 기온 조건으로 나누어 진행되었다. 정적 기온 평가에서 챔버의 중앙에서 30°C 및 -6

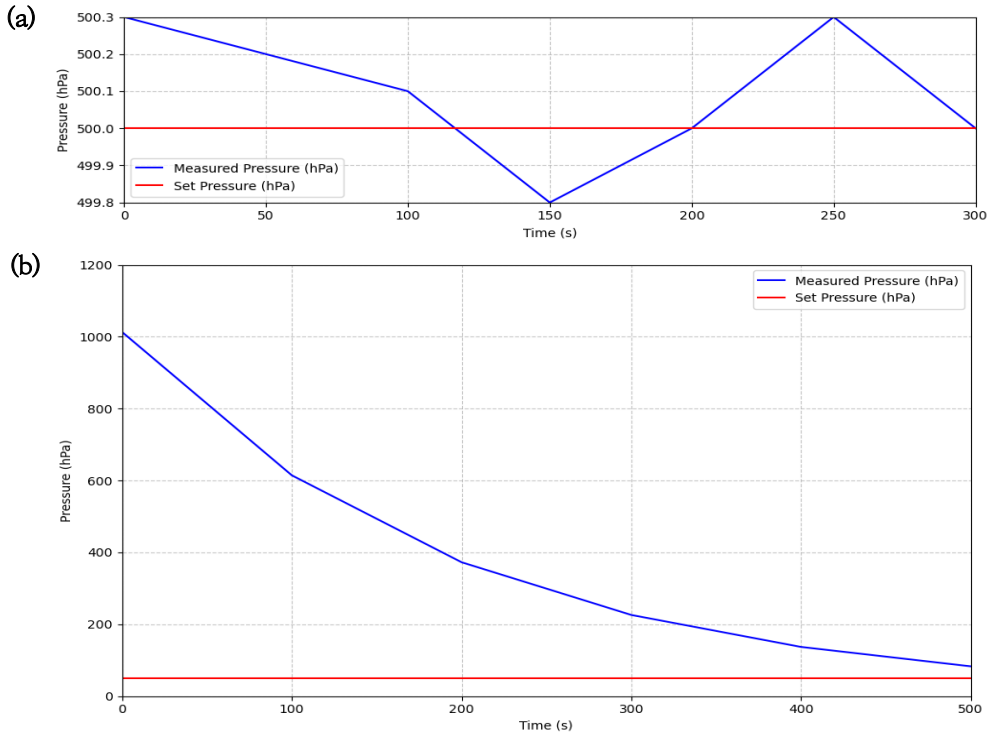


Fig. 10. Pressure stability and control results in the cloud chamber. (a) Pressure variation around the set point of 500 hPa, showing minor fluctuations with a measured pressure range of approximately ± 0.3 hPa from the set target over 300 seconds. (b) Pressure reduction from an initial value of 1,000 hPa to a target pressure of 30 hPa, illustrating the controlled descent over 500 seconds, with the measured pressure following the set pressure target.

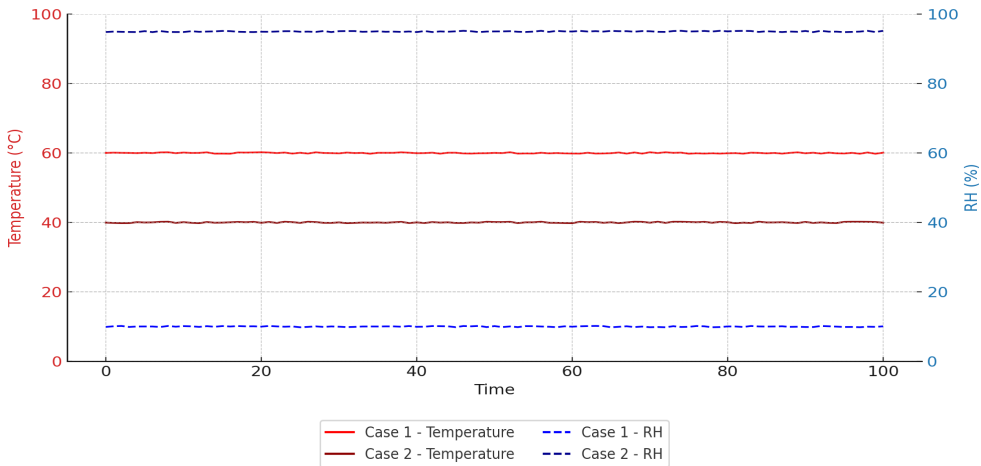


Fig. 11. Temperature and relative humidity profiles for two different experimental conditions in the cloud chamber. Case 1 shows a temperature of 60°C with a relative humidity of approximately 10%, while Case 2 shows a temperature of 40°C with a relative humidity of 95%, demonstrating stable conditions over 100 minutes with minimal variations in both temperature and humidity.

Table 3. Performance test results of K-CPEC cloud chamber, summarizing the temperature, pressure, and humidity control capabilities and accuracy under specified conditions

Measurement item		Specification	Note	Test result	
Range		60°C ~ 70°C			
Temperature	Targeting point	Static	Error range: $\leq \pm 0.3^\circ\text{C}$	1 point at chamber center $\pm 0.3^\circ\text{C}$ @ 30°C $\pm 0.3^\circ\text{C}$ @ 60°C	
	Full scale	Dynamic	Error range: $\leq \pm 0.5^\circ\text{C}$ @ Vertical velocity : 5ms^{-1} , Temp: 30°C, -60°C	12 points at 10cm distance from the chamber wall $\pm 0.42^\circ\text{C}$ @ 30°C $\pm 0.49^\circ\text{C}$ @ 60°C	
	Descending time		Within 45 min (+60°C → -70°C)		44 min 32 sec
	Ascending time		Within 45 min (-70°C → +60°C)		44 min 33 sec
	Range		1.103 hPa ~ 30 hPa		
Pressure	Targeting point		Error range: ± 0.3 hPa @ 50 hPa, 300 hPa	1 point at chamber center ± 0.2 @ 300 hPa ± 0.3 @ 500 hPa ± 0.3 @ 850 hPa	
	Descending time		Within 10 min (1.013 hPa → 30 hPa)		9 min 48 sec
Range		10% ~ 95%			
Humidity	Targeting point		Error range: $\pm 2.0\%$ @ 60°C, 10%, 40°C, 95%	1 point at chamber center $\pm 1.3\%$ @ 60°C, 10% $\pm 1.9\%$ @ 40°C, 95%	

0°C의 고정된 기온을 유지했을 때, 각각 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 의 오차 범위를 나타내었다. 이는 설정된 허용 오차 범위 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 를 충족하여, 챔버가 목표로 하는 기온에 대해 안정적으로 유지할 수 있음을 보여준다. 동적 기온 평가에서는 챔버 내 12개 측정 지점(벽에서 10 cm 거리)에서 온도를 평가하였으며, 기온이 30°C 및 -60°C일 때 오차 범위가 각각 $\pm 0.42^\circ\text{C}$ 와 $\pm 0.49^\circ\text{C}$ 로 관찰되었다. 이는 요구된 오차 범위 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 내에 해당하여, 챔버의 기온 균일성이 충분히 안정적임을 입증하였다. 기온 상승 및 하강 시간 평가에서 온도 하강(60°C → -70°C)과 상승(-70°C → 60°C) 시간 모두 45분 이내의 요구 조건을 만족하였으며, 각각 44분 32초 및 44분 33초가 소요되었다. 이는 기온 변화의 신속성 또한 구름생성 실험에 적합함을 보여준다. 이 구름챔버의 기압 제어 성능은 챔버의 중앙에서 측정된 기압과 목표 기압 간의 오차를 확인하는 방식으로 평가되었다. 목표 기압 유지(50 hPa, 300 hPa, 850 hPa)에서 기압 오차가 각각 ± 0.2 hPa, ± 0.3 hPa, ± 0.3 hPa로 측정되었으며, 이는 요구 조건인 ± 0.3 hPa 이내에 해당했다. 이를 통해 챔버가 다양한 기압 조건에서 높은 정확도로 목표 기압을 유지할 수 있음을 확인하였다. 기압 하강 시간평가에서 초기 기압 1,013 hPa에서 30 hPa까지의 기압 하강은 10분 이내로 요구되었으며, 실험 결과 9분 48초가 소요되어 요

구 조건을 만족하였다. 습도 제어 성능은 온도에 따른 상대 습도를 유지하는 능력을 평가하였다. 온도 조건별 상대 습도 유지에서 60°C에서 10%의 상대 습도를 유지하는 실험에서는 습도 변화폭이 $\pm 1.3\%$ 로 측정되었고, 40°C에서 95%의 상대 습도 조건에서는 변화폭이 $\pm 1.9\%$ 로 관찰되었다. 이는 요구된 범위인 $\pm 2.0\%$ 내에 해당하며, 챔버가 다양한 온도 조건에서도 안정적인 습도를 유지할 수 있음을 나타낸다.

4. 요약 및 결론

이 연구는 한국형 구름물리실험챔버(K-CPEC)의 설계, 개발, 성능 평가를 통해 기후 시스템에서 구름과 에어로졸의 상호작용을 심층적으로 연구하기 위한 새로운 연구 장비의 개발을 목표로 한다. 기존 구름챔버의 한계를 극복하기 위해 K-CPEC은 이중구조와 고성능 냉각 시스템을 채택하여 다양한 기상 조건을 재현할 수 있는 첨단 실험 환경을 제공한다. 이 연구는 K-CPEC의 설계 및 성능 평가에 관한 여러 실험 결과를 통해, 기압, 온도, 습도 제어의 안정성과 정밀도를 검증하였다. 또한 K-CPEC은 구름 형성 실험을 위한 구름챔버와 에어로졸챔버를 포함하며, 특히, 구름챔버는 기온, 기압, 습도 등 다양한 조건을 정밀하게 제어할 수 있는 시스템

을 갖추고 있다. 특히, 기온 제어 시스템은 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 의 오차 내에서 균일한 기온 유지가 가능하며, 기압은 1,013 hPa에서 30 hPa까지 안정적으로 제어된다. 습도 또한 설정값에서 $\pm 2\%$ 내로 조절할 수 있어, 극한 기상 조건을 포함한 다양한 대기 환경을 실험적으로 구현할 수 있다.

K-CPEC은 기상, 기후, 산업, 재해 대응 및 환경 연구에 광범위하게 활용될 수 있다. 예를 들어, 인공강우 기술 개발, 기후 변화 연구, 기상 관측 장비 성능 평가, 항공기 운항 안전성을 위한 착빙, 서리 발생 연구, 미세 먼지 저감 등의 분야에서 K-CPEC가 중요한 기여를 할 수 있다. 본 연구에서 K-CPEC의 구름챔버에 대한 기온, 기압, 습도 제어 성능 평가 결과는, 이 챔버가 기온 상승 및 하강 시간, 기압 하강 속도, 습도 유지 능력 등에서 실험 목적에 부합하는 성능을 보임을 입증하였다. 따라서, K-CPEC는 구름 물리 연구에 필수적인 데이터를 수집하고 다양한 기상 현상에 대한 이해를 돕는 데 중요한 도구로 활용될 수 있다.

결론적으로, K-CPEC의 개발은 기후 모델링과 날씨 예측의 정확성을 향상시키기 위한 구름 물리학 연구에서 매우 중요한 의미를 가지며, 구름과 에어로졸의 상호 작용에 대한 연구에 새로운 장을 열 것이다. 또한 향후 K-CPEC는 다양한 연구 분야에서 다목적 연구 장비로서의 역할을 할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 기상청 국립기상과학원 기상조절 및 구름 물리연구(KMA2018-00224)의 지원으로 수행되었습니다. 구름물리실험챔버 구축에 중요한 기술 및 설계를 지원한 ㈜더웨일에 대해서 많은 감사드립니다.

REFERENCES

- Cha, J. W., Kim, B. Y., Belorid, M., Ro, Y., Ko, A. R., Kim, S. H., Park, D. H., Park, J. M., Koo, H. J., Chang, K. H., Lee, Y. H., Kim, S., 2019, Analysis of results and technics about precipitation enhancement by aircraft seeding in Korea, *Atmosphere*, 29, 481-499, doi:10.14191/Atmos.2019.29.4.481 (in Korean with English abstract).
- Cha, J. W., Koo, H. J., Kim, B. Y., Belorid, M., Hwang, H. J., Kim, M. H., Chang, K. H., Lee, Y. H., 2023, Analysis of rain drop size distribution to elucidate the precipitation process using a cloud microphysics conceptual model and in situ measurement, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 59, 257-269, <https://doi.org/10.1007/s13143-022-00299-w>.
- Chang, K., Bench, J., Brege, M., Cantrell, W., Chandrakar, K. K., Ciochetto, D., Mazzoleni, C., Mazzoleni, L. R., Niedermeier, D., Shaw, R. A., 2016, A Laboratory facility to study gas-aerosol-cloud interactions in a turbulent environment: The II chamber, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(12), 2343-2358.
- Dépée, A., Lemaitre, P., Gelain, T., Monier, M., Flossmann, A., 2021, Laboratory study of the collection efficiency of submicron aerosol particles by cloud droplets - Part I: Influence of relative humidity, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 6945-6962.
- Friedrich, K., French, J. R., Tessorodorf, S. A., Hatt, M., Weeks, C., Rauber, R. M., Geerts, B., Xue, L., Rasmussen, R. M., Blestrud, D. R., Kunkel, M. L., Dawson, N., and Parkinson, S., 2021, Microphysical characteristics and evolution of seeded orographic clouds, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 60, 909-934.
- Höpfner, M., Ungermann, J., Wagner, R., Johansson, S., Stiller, G., Friedl-Vallon, F., Spang, R., Bucci, S., Legras, B., Wohltmann, I., 2019, Ammonium nitrate particles formed in upper troposphere from ground ammonia sources during Asian monsoons, *Nature Geoscience*, 12, 608-612.
- Jung, H. M., Lee, B. H., Choi, D. S., 2022, Aerosol-cloud-precipitation interactions over the Korean Peninsula.
- Kim, D., Jung, I., Shin, H., 2019, Seasonal effects of marine cloud brightening geoengineering on East Asian extreme temperatures, *Proceedings of the Korean Meteorological Society Conference*, April 2019.
- Kumar, A., Kumar, P., 2018, Design and optimization of gas sensor testing chamber, *International Journal on Advances in Systems and Measurements*, 11, 100-105.
- Möhler, O., Stetzer, O., Schaeffers, S., Linke, C., Schnaiter, M., Tiede, R., Saathoff, H., Krämer, M., Mangold, A., Ebert, V., Schurath, U., 2003, Experimental investigation of homogeneous freezing of sulphuric acid particles in the aerosol chamber AIDA, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 3, 211-223.
- Möhler, O., Adams, M., Lacher, L., Vogel, F., Nadolny, J., Fösig, R., Boffo, C., Pfeuffer, T., Hobl, A., Weis,

- M., Vepuri, H. S. K., Hiranuma, N., Murray, B. J., 2021, The portable ice nucleation experiment PINE: A New online instrument for laboratory studies and automated long-term field observations of ice-nucleating particles, *Atmospheric Measurement Techniques*, 14, 1143–1166.
- Lee, K. H., Song, M. S., 2010, Radiative role of clouds in surface energy balance, *Atmos. Env.*, 43, 215–229.
- Park, C. S., Cho, J. E., Lim, H. S., 2019, Sensitivity of precipitation in warm clouds, *J. Atmos. Sci.*, 45, 67–82.
- Tajiri, T., Yamashita, K., Saito, A., Murakami, M., Kusunoki, K., Orikasa, N., Lilie, L., 2013, A Novel adiabatic-expansion-type cloud simulation chamber, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 91, 687–704.
- Stephens, G. L., 2005, Cloud feedbacks in the climate system: A Critical review, *Journal of Climate*, 18, 237–273.
- Soden, B. J., Held, I. M., 2006, An Assessment of climate feedbacks in coupled ocean-atmosphere models, *Journal of Climate*, 19, 3354–3360.
- Vial, J., Dufresne, J. L., Bony, S., 2013, On the interpretation of inter-model spread in CMIP5 climate sensitivity estimates, *Climate Dynamics*, 41, 3339–3362.
- Vogel, F., Lacher, L., Nadolny, J., Saathoff, H., Leisner, T., Möhler, O., 2022, Development and validation of a new cloud simulation experiment for lab-based aerosol-cloud studies, *Review of Scientific Instruments*, 93, 095106.
- Wang, A., Ovchinnikov, M., Yang, F., Schmalfuss, S., Shaw, R. A., 2024, Designing a convection-cloud chamber for collision-coalescence using large-eddy simulation with bin microphysics, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 16, e2023MS003734. <https://doi.org/10.1029/2023MS003734>.
- Wagner, R., Bertozzi, B., Höpfner, M., Höhler, K., Möhler, O., Saathoff, H., Leisner, T., 2020, Solid ammonium nitrate aerosols as efficient ice nucleating particles at cirrus temperatures, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, <https://doi.org/10.1029/2019JD032248>.
- Wagner, R., Ickes, L., Bertram, A. K., Els, N., Gorokhova, E., Möhler, O., Murray, B. J., Umo, N. S., Salter, M. E., 2021, Heterogeneous ice nucleation ability of aerosol particles generated from Arctic sea surface microlayer and surface seawater samples at cirrus temperatures, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 1833–1850.
- Webb, M. J., Lock, A. P., 2013, Coupling between subtropical cloud feedback and the local hydrological cycle in a climate model, *Climate Dynamics*, 41, 1923–1939.
-
- Team leader. Joo Wan Cha
National Institute of Meteorological Science
jwcha@korea.kr
 - Researcher. Youngmi Kim
National Institute of Meteorological Science
kymi19@korea.kr
 - Researcher. Miloslav Belorid
National Institute of Meteorological Science
mbeloid@korea.kr
 - Researcher. Bu-Yo Kim
National Institute of Meteorological Science
kimbuyo@korea.kr
 - Research Assistant. Jungeun Baek
National Institute of Meteorological Science
baekje@korea.kr
 - Director of department. Seungbum Kim
National Institute of Meteorological Science
kmaskim@korea.kr
 - Researcher. Kyoungmi Lee
National Institute of Meteorological Science
leekm80@korea.kr
 - Senior Researcher. Changbeom Cho
Korea Meteorological Administration
cbcho@korea.kr
 - CEO. Seoungbok Lee
The Whale Inc
sblee@thewhale.co.kr