

북극 에어로졸의 흡습성, 휘발성, 구름형성  
특성에 관한 연구

A study on hygroscopicity, volatility, and CCN  
activity of aerosols in the North Pole

광주과학기술원

# 제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 " 환북극 동토층 환경변화 관측시스템 원천기술 개발 및 변화추이에 관한 연구"과제의 위탁연구"북극 에어로졸의 흡습성, 휘발성, 구름형성 특성에 관한 연구"과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2012. 08. 16

(본과제)	총괄연구책임자	: 이 방 용
	위탁연구기관명	: 광주과학기술원
	위탁연구책임자	: 박 기 흥
	위탁참여연구원	: 김 재 석
	"	: 오 진 관
	"	: Ka Yan Chong
	"	: 이 희 성
	"	: 강 민 수

# 요 약 문

## I. 제 목

북극 에어로졸의 흡습성, 휘발성, 구름형성 특성 연구

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

연구동토층에서 배출되는 다양한 물질들에 의해서 대기 중으로 직접 에어로졸 입자들이 생성되거나 대기 중에 존재하는 여러 기상 물질들과의 반응으로 에어로졸이 생성될 수 있다. 대기 오염물질 중 하나인 미세먼지 (PM<sub>10</sub>)는 지구의 복사열평형, 구름형성의 핵으로 작용하여 간접적으로 기후 변화에 영향을 주고 있으며 시정장애 (visibility impairment)를 일으키는 것으로 알려져 있다. 또한 이러한 미세먼지가 인체에 흡입되었을 때 호흡기 장애 및 폐질환에 크게 영향을 미쳐 국민 건강에는 유해한 물질로 알려져 있다. 미세먼지 발생원 및 이동경로 등을 평가하고 인체 유해성 영향 등을 파악하기 위해서는 빠른 시간 내에 발생입자의 물리적/화학적 특성을 측정하는 기술이 필요하다. 하지만 기존의 발생 입자들의 물리적/화학적 특성을 측정하는 연구는 주로 12-24시간 입자를 포집한 후 실험실 단계에서 이러한 입자들의 특성을 비실시간으로 연구하는 수준이었다. 이러한 기술은 많은 시간이 소모되고 비용이 드는 시료의 전처리 과정이 필요하다는 단점이 있다. 따라서 이러한 단점을 극복할 수 있도록 분석 정확도 및 신속한 분석속도를 보장하면서 환경에 유해한 물질들의 실시간 monitoring 을 위한 경제적이며 간편하고 신속한 측정기술의 개발이 필요하다. 특히 북극지역에서 에어로졸의 발생, 성장, 이동 및 변환 과정을 이해하기 위해서는 이러한 입자들의 크기 및 수 농도를 연속적으로 측정할 필요가 있으며, 에어로졸발생 이벤트 시 입자의 크기별 흡습성 및 휘발성 성분 파악은 입자의 발생원 및 생성 기작을 파악하는데 중요한 자료가 될 수 있다. 또한 이러한 북극 에어로졸의 기후변화 영향을 파악하기 위해서는 입자의 구름형성 특성을 신속하게 측정할 수 있는 기술개발 또한 필요하다.

## III. 연구개발의 내용 및 범위

에어로졸 입자 크기별 흡습성 (hygroscopicity)과 휘발성 (volatility) 및 구름형성응축핵 (CCN; cloud condensation nuclei)을 실시간으로 측정할 수 있는 통합모니터링 시스템을 구축하고 실험실 단계에서 평가하고자 한다.

- 북극 에어로졸의 흡습성 (hygroscopicity)과 휘발성 (volatility)을 실시간으로 측정하기 위하여 HVTDMA (hygroscopicity and volatility tandem differential mobility analyzer) 시스템 및

구름형성응축핵 입자카운터 (cloud condensation nuclei counter) 시스템 구축 및 실험실 테스트 완료.

- 북극 에어로졸 생성과 성장에 영향을 미칠 수 있는 다양한 실험실 제조입자의 (sulfates, nitrates, OC, BC) 화학적 조성별, 크기별, 혼합 상태별 흡습성, 휘발성 구름형성응축핵 특성의 데이터베이스화.

#### IV. 연구개발결과

본 연구를 통해서 북극 에어로졸의 크기, 수 농도, 흡습성, 휘발성, 구름형성 특성을 실시간으로 측정할 수 있는 통합 모니터링 시스템 구축하였다. 특히 개발한 통합 모니터링 시스템은 이동성이 용이하며 자동화된 시스템이다. 기존의 많은 연구를 통해서 특성이 알려진 염화나트륨 (NaCl), 황산암모늄 ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 입자를 이용하여 개발한 시스템의 측정 성능을 평가하였다. 실험을 통해서 염화나트륨과 황산암모늄의 DRH (deliquescence relative humidity)가 76, 79%로 측정되었으며 이는 문헌 값 (75.3, 79.9%) 과 1% 상대습도 범위 내에서 일치하는 것을 알 수 있었다. 또한 상대습도 변화에 따른 입자의 크기별 growth factor (GF) 값은 Kelvin effect를 고려한 이론적인 값과 5%내에서 일치하는 것을 확인하였다. 그리고 구름형성특성을 측정한 결과를 기존 문헌의 값과 비교한 결과 1%내에서 일치하는 것을 확인하였다. 개발한 시스템의 측정 성능을 평가한 후 다양한 성분의 입자를 실험실에서 제조하여 흡습성, 휘발성, 구름형성특성을 측정한 후 결과를 database화 하였다. 흡습성과 휘발성을 측정한 결과 상대습도 85%에서 black carbon, organic carbon 입자는 크기에 관계없이 입자의 크기가 변하지 않는 것을 알 수 있었다. (즉, 흡습성이 없다.) 그러나 sulfate, nitrate 성분의 입자들은 GF가 1.4이상으로 흡습성이 높은 것을 알 수 있었다. 온도 조절장치의 온도가 100°C 일 때, organic carbon, nitrate 성분의 입자들은 크기에 관계없이 모두 휘발하였지만, black carbon, sulfate 성분의 입자들은 휘발하지 않았다. 그리고 구름형성특성을 측정한 결과 organic carbon 성분의 입자들은 상대습도 85%에서 거의 흡습성이 없었지만 구름형성응축핵으로는 작용할 수 있음을 알 수 있었다. 염화나트륨 (NaCl), 황산암모늄 ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 입자들은 쉽게 구름형성응축핵으로 작용하는 성분임을 알 수 있었다.

#### V. 연구개발결과의 활용계획

- 북극 에어로졸 크기 및 수 농도를 현장에서 측정하여 에어로졸/나노입자 집중발생 이벤트를 파악하는데 활용할 예정이다.
- 북극 에어로졸/나노입자 집중 발생 이벤트 기간에 흡습성, 휘발성, 구름형성응축핵 특성을 측정할 계획이다.
- 북극 에어로졸의 흡습성, 휘발성, CCN 수 농도 현장 측정을 통해 에어로졸 발생 전과 비교하여 입자들의 생성조건, 성장기작 및 에어로졸입자의 구름형성 영향 특성 및 기후변화 영향을 규명하는데 활용할 수 있다.

# 영문요약서 (Summary)

## **I. Title**

A study on hygroscopicity, volatility, and CCN activity of aerosols in the North Pole

## **II. Research objectives**

Aerosols can be directly emitted either from the permafrost or formed by gas-to-particle conversion in the ambient atmosphere. Particulate matter less than 10  $\mu\text{m}$  (PM10) in the ambient atmosphere is current interest due to their effects on radiation budget, climate change, visibility, and human health. Rapid measurements of the physicochemical properties of aerosols are essential for better understanding of their sources, particle formation, and growth mechanism including their effects on atmospheric process and human health. In this research, real time measurement techniques to measure hygroscopicity, volatility, and concentration of cloud condensation nuclei were developed. Our system was evaluated by using laboratory-generated aerosols whose material properties were already known.

## **III. Methods**

In this research, the real-time monitoring system which can measure hygroscopicity, volatility, and cloud condensation nuclei of size-resolved aerosols were applied. Our system was examined using laboratory-generated particles.

- Hygroscopicity and volatility tandem differential mobility analyzer (HVTDMA) system and cloud condensation nuclei counter system were developed to measure hygroscopicity and volatility of Arctic aerosols. These two systems in the laboratory were then evaluated.
- Database of hygroscopicity and volatility including properties of CCN for various laboratory-generated particles whose compositions and sizes were given was established.

## IV. Results

We measured deliquescence relative humidity (DRH), growth factor (GF), and CCN activity ratio of NaCl and  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  particles to estimate our system. DRH of these particles were 76 and 79% respectively, which are close to the theoretical DRH values. Furthermore, the measured GFs of NaCl and  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  particles at 85% RH were consistent with previously reported values and theoretical values within 4-5%. Soot and organic carbon particles were non- or less-hygroscopic at 85% RH regardless of their sizes. However, GFs of sulfate and nitrate particles were higher than 1.4. In terms of volatility, organic acid particles were completely volatile, whereas black carbon and sulfate particles were nonvolatile at the temperature of 100 °C. In terms of CCN activation properties, organic carbons were non-hygroscopic at 85% RH, whereas they were able to act as cloud condensation nuclei. In addition, we found that both NaCl and  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  particles were easily able to act as CCN.

## V. Application plans

- Aerosol and/or nano-particle formation events can be identified by measuring number size distribution of the Arctic aerosols in real time.
- We will measure hygroscopicity, volatility, and properties of cloud condensation nuclei during formation events.
- By measuring hygroscopicity, volatility, and concentration of CCN in the Arctic, we are able to estimate their source, aerosols formation and/or growth mechanism, and their effects on atmospheric process.

# 영문목차 (Contents)

Chapter I. Introduction

Chapter II. International and domestic trend of current technology

Chapter III. Results from current research

Chapter IV. Goal achievement and contribution to related area

Chapter V. Application plans

Chapter VI. Reference

# 목 차

제 1 장 서 론

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 6 장 참고문헌



# 본 문

## 제 1 장 서 론

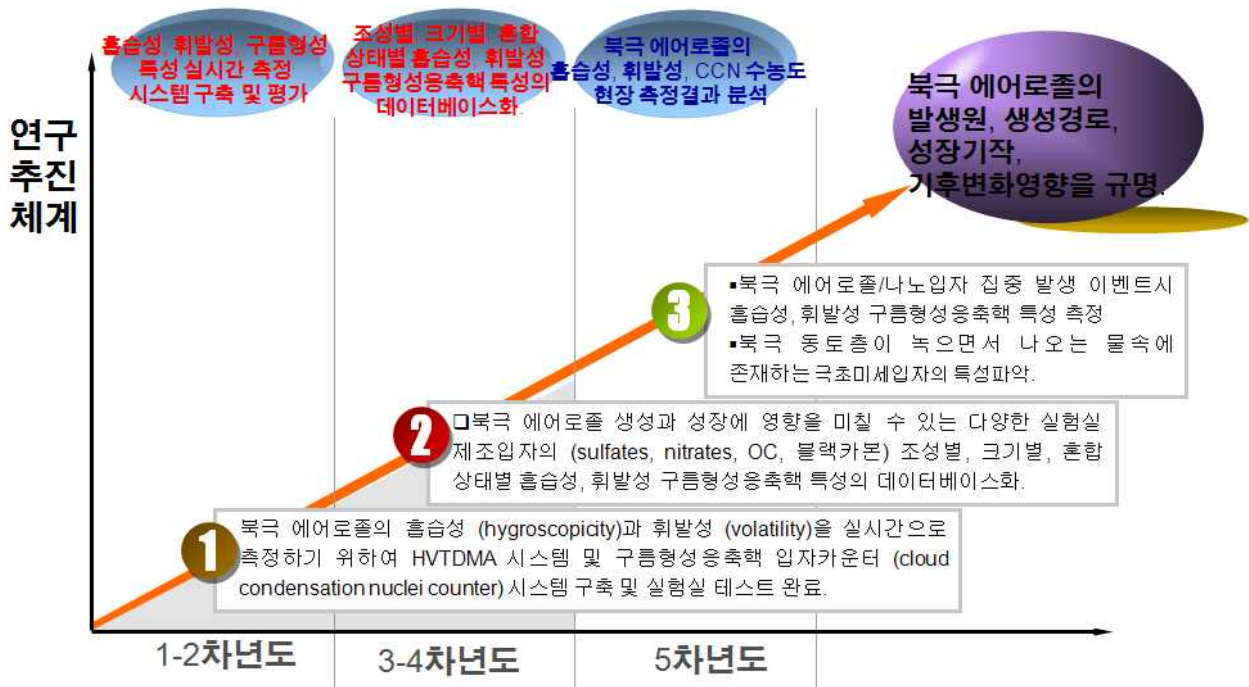
### 제 1 절 연구개발 목적 및 필요성

영구동토는 2년 이상 계속해서 0 °C 이하의 온도를 유지하는 영구적으로 얼어 있는 땅을 말한다. 북반구 육지의 24%를 차지하며 면적은 2,279만 km<sup>2</sup> 이며, 북부 시베리아에서는 1,525m 깊이까지 나타난다. 영구동토는 알래스카의 85%, 소련과 캐나다의 50%에 걸쳐 나타난다. 지구 온난화를 영향으로 이 영구동토층이 녹으면서 지표면에 있는 식생들에 영향을 줄 수 있다. 또한 영구동토층에 배출되는 이산화탄소, 메탄 등의 가스 물질에 의해서 대기 중으로 직접 에어로졸 입자들을 생성하거나 대기 중에 존재하는 다양한 기상 물질들과의 반응으로 에어로졸을 생성할 수 있다. 대기오염물질 중 하나인 미세먼지 (PM<sub>10</sub>)는 지구의 복사열평형, 구름형성의 핵으로써 작용함으로써 간접적으로 기후 변화에 영향을 주고 있으며 시정장애 (visibility impairment)를 일으키는 것으로 알려져 있다. 또한 이러한 미세먼지가 인체에 흡입되었을 때 호흡기 장애 및 폐질환에 크게 영향을 미쳐 국민의 건강에 유해한 물질로 알려져 있다. 현재 정부는 이러한 미세먼지 (10 um 보다 작은 입자, PM<sub>10</sub>)의 총질량만을 측정하여 규제하고 있다 (환경정책기본법시행령 제 2조). 미세먼지 발생원 및 이동경로 등을 평가하고 인체의 유해성 영향 등을 파악하기 위해서는 빠른 시간 내에 발생입자의 물리적/화학적 특성을 측정하는 기술이 매우 절실 하다고 할 수 있겠다.

에어로졸은 다양한 휘발성이 있는 탄소계열 성분과 흡습성이 다른 무기성분을 포함 할 가능성이 고 있고 다양한 형태의 모양을 가지며 발생조건에 따라 다양한 크기 및 성분의 입자가 배출된다. 이때 발생하는 입자의 특성에 대한 연구는 12-24시간 입자를 포집한 후 실험실 단계에서 이러한 입자들의 물리적/화학적 특성을 비실시간으로 연구하는 수준이라고 할 수 있겠다. 이러한 기술은 많은 시간이 소요되면 비용이 드는 시료의 전처리 과정이 필요하다고 할 수 있겠다. 즉, 대표성을 띄는 시료채취, 추출, 복잡한 정제과정의 실험절차를 거치며 많은 시간과 노력 및 고비용을 필요로 하고 또한 고가의 분석기기와 숙련된 인력을 필요로 한다. 따라서 이런 단점을 극복할 수 있도록 분석 정확도 및 신속한 분석속도를 보장하면서 환경에 유해한 물질들의 실시간 모니터링을 위해 경제적이며 간편하고 신속한 측정기술 개발이 필요한 상황이다. 과거의 배출통제 (End of Pipe) 개념에서 벗어나 새로운 환경 패러다임인 사전예방정책 핵심기술로의 전환으로 환경오염을 효과적으로 인식하고 오염 예방 및 오염 발생 시 신속하고 적절한 대책수립, 오염저감을 위한 노력 등의 효과적인 관리가 필요하다. 이를 위해 기본적으로 입자를 경제적이며 신속하고 정확하게 측정, 평가하는 환경 기술을 개발하는 것이 매우 절실하게 요구된다. 신속한 현장 오염측정기술의 중요성에 대해서는 많은 공감과 필요성이 인식되고 있으나, 국내의 연구개발 수준은 매우 미흡하다고 할 수 있다. 특히 북극지역에서 에어로졸의 발생, 성장, 이동 및 변환 과정을 이해하기 위해서는 이러한 입자들의 크기 및 수 농도를 연속적으로 측정할 필요가 있으며 에어로졸발생 이벤트 시 입자의 크기별 흡습성 및 휘발성 성분 파악은 입자의 발생원 및 생성 기작을 파악하는데 중

요한 자료가 될 수 있다. 또한 이러한 북극 에어로졸의 기후변화 영향을 파악하기 위해서는 입자의 구름형성 특성을 신속하게 측정할 수 있는 기술개발이 절실하다고 할 수 있다. 결과적으로 본 연구에서 개발하고 구축할 통합측정 시스템을 이용하여 북극에어로졸의 집중발생 시 (nucleation) 실시간으로 입자들의 흡습성, 휘발성, 구름형성 특성을 측정하고 에어로졸의 발생 전·후를 비교하여 북극에어로졸의 물리-화학적 특성을 파악하고자 한다. 또한 북극에어로졸의 생성조건, 성장기작 및 기후변화 영향도 규명하고자 한다.

## 제 2 절 연구개발의 추진체계



## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 제 1 절 국내외 기술개발 및 연구 현황

본 연구와 관련된 국외 기술개발현황은 개념정립 단계이며 국내에서 북극 에어로졸의 연구는 극지 연구소에서 남극 세종기지에서 주로 수행되었지만 대기 중 입자들의 수 농도의 변화에 대한 연구에 국한되었다. 하지만 입자들의 수 농도 변화 측정을 가지고는 입자들의 생성원, 성장기작 등 극지역 에어로졸의 화학적 특성을 명확하게 이해하는데 어려움이 있고 구름형성을 통한 북극에어로졸의 기후변화 영향을 파악할 수 없다. 본 연구와 관련된 에어로졸의 흡습성, 휘발성, 구름형성 특성을 실시간으로 동시에 측정하는 연구는 국내에서 전무하다고 할 수 있다.

#### 1. 국내외 연구현황

연구수행 기관	연구개발의 내용	연구개발성과의 활용현황
극지연구소	북극 에어로졸의 수농도 측정, 미량기체들의 조성 관측	북극 및 남극반도에서의 에어로졸의 기후변화 관찰

### 제 2 절 본 연구관련 연구개발 실적

#### 1. 본 연구기관 (광주과학기술원) 연구개발 내용 1

##### (가) 연구과제명

- 실시간 나노입자 흡습성과 휘발성 측정기술 개발을 통한 대기 중 나노입자 생성 및 성장 연구

##### (나) 기술 분류

- 환경부 차세대사업 원천기술사업, 연구기간: 2년 (2006.4.1-2008.3.31)

##### (다) 선행연구결과

- 물성이 알려진 다양한 나노입자를 실험실에서 제조하여 본 연구에서 개발 될 실시간 나노입자 흡습성 및 휘발성 측정시스템에 적용하고 이론적인 입자들의 흡습성과 휘발성을 실험적 결과와 비교 분석 함으로써 개발된 측정시스템의 정확성과 정밀도 분석 완료.

- 한반도내 다양한 지역에서 나노입자의 물리적/화학적 특성을 측정하고 나노입자의 화학적 조성의 지역적 또는 시간적 변화와 차이를 측정함.

- 대기 중 나노입자 집중발생시 (nanoparticle burst; nucleation)의 나노입자의 흡습성과 휘발성을 측정하고 발생 전과 비교하여 나노입자의 생성기작과 생성조건을 규명하고 화학적 조성을 예측함.

##### (라) 연구 성과

- 환경부 차세대핵심환경기술개발사업 우수논문50선, 2007년도 우수논문50선 선정, 2007 (환경부 차세대

사업과제 수행)

- 환경부 차세대핵심환경기술개발사업 우수논문50선, 2006년도 우수논문50선 선정, 2006 (환경부 차세대 사업과제 수행)

## 2. 본 연구기관 (광주과학기술원) 연구개발 내용 2

(가) 연구과제명

- 대기 중 미세먼지 및 나노입자와 토양에 함유된 다양한 중금속 오염물질의 원소성분을 실시간으로 동시 분석이 가능한 다목적 통합형 레이저 유도 플라즈마 분광분석시스템 개발

(나) 기술 분류

- 한국연구재단 특정기초연구, - 연구기간: 3년 (2007.5.1-2010.2.28)

(다) 선행연구결과

- 레이저 유도 플라즈마 분광분석시스템을 개발하여 입자의 화학적 원소성분을 거의 실시간으로 측정하는 시스템을 개발 하였고 실제 대기 중 입자의 화학적 원소분석 (즉, 중금속 분석)과 토양내 중금속 검출 및 분석에 활용함.

(라) 선행연구와의 차별성과 후속연구의 필요성

- 레이저 유도 플라즈마 분광분석시스템을 이용한 대기 중 입자의 화학적 원소성분 측정은 입자의 중금속 성분을 파악하는데 유용한 기술이며 입자의 통합적인 화학적 성분을 파악하기에는 제한적이라고 할 수 있겠다. 본 연구에서 제안한 에어로졸 측정시스템의 경우 다양한 유기, 무기 물질의 성분을 정량화 할 수 있어 보다 종합적인 입자분석이 가능. 나노입자 검출의 한계, 정량화 기술 부족

(마) 연구 성과

- 2010 교과부 R&D사업 대표 우수성과 100선 선정.

## 3. 본 연구기관 (광주과학기술원) 연구개발 내용 3

(가) 연구과제명

- 레이저와 CCD카메라를 이용하여 구름형성응축핵 실시간 입자카운터를 개발하고 응축핵 모니터링을 통한 대기 중 에어로졸의 기후변화 역할 연구

(나) 기술분류

- 한국과학재단 기초연구사업, 연구기간: 1년 (2009.5-2010.4)

(다) 선행연구결과

- 대기 중 에어로졸입자의 구름형성응축핵 특성을 실시간으로 측정할 수 있는 CCD 카메라와 레이저를 이용한 구름형성응축핵 입자카운터 개발
- 구름형성응축핵 입자카운터를 이용하여 실험실에서 제조한 NaCl,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  입자들의 크기와 농

도에 따른 구름형성응축핵 특성을 파악

- 표준입자 (PSL)를 이용하여 개발한 구름형성응축핵 입자카운터의 측정 성능 평가
- 광주지역 대기 중 에어로졸 입자의 구름형성응축핵 특성을 실시간으로 측정
- 황사 관측 기간 동안 황사 입자들의 구름형성응축핵 특성을 실시간으로 측정

(라) 연구 성과

- 특허출원, "구름형성응축핵 카운터 및 구름형성응축핵의 실시간 카운팅 방법", 10-2010-0006957

### 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

#### 제 1 절 북극에어로졸의 크기, 수농도, 흡습성, 휘발성, 구름형성 특성을 실시간으로 측정할 수 있는 통합 시스템 구축

연구 범위	연구수행방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
북극에어로졸의 흡습성, 휘발성, 구름형성 특성을 실시간으로 측정이 가능하도록 이동성 및 자동화된 측정시스템 구축	실험적 접근방법	입자분리기 (DMA), 입자계수기 (CPC), 가습기, 열관으로 구성된 HVTDMA 시스템과 CCD 카메라, He-Ne laser를 검출기로 이용하는 구름형성응축핵 계수기 (CCN counter) 시스템을 구축하였다.
물성이 알려진 황산암모늄 ((NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) 와 염화나트륨 (NaCl)입자를 이용하여 구축된 시스템 평가	이론 및 실험적 접근 방법	구축된 시스템을 이용하여 물성이 알려진 성분의 입자들의 흡습성, 휘발성, 구름형성 특성을 측정하였고 이론적인 값들과 비교하였다.
북극에어로졸의 생성과 성장에 영향을 미칠 수 있는 입자들을 실험실 제조하여 흡습성, 휘발성, 구름형성 특성 데이터베이스화	실험적 접근 방법	북극에어로졸의 생성과 성장에 영향을 미칠 수 있는 sulfate, nitrate, OC 등 다양한 입자들을 이용하여 흡습성, 휘발성, 구름형성 특성 데이터베이스화를 완성하였다.

#### 1. 북극에어로졸의 흡습성, 휘발성을 실시간으로 측정하기 위한 이동성이 우수하고 자동화된 HVTDMA 시스템 구축

아래 그림과 같이 북극 에어로졸의 흡습성과 휘발성의 실시간 측정이 가능하며 이동성이 용이하며 자동화된 HVTDMA (hygroscopicity and volatility tandem differential mobility analyzer) 시스템을 구축하였다. HVTDMA 시스템은 입자분리기 (DMA), 상대습도 조절장치, 온도조절장치, 입자계수기 (CPC)로 구성된다. 첫 번째 DMA는 원하는 크기의 북극에어로졸을 전기장내의 동력학을 이용하여 선택하는 역할을 한다. 선택된 일정 크기를 갖는 에어로졸은 상대습도 조절장치 (humidifier) 나 온도조절장치 (heated tube)를 통과한다. 통과된 에어로졸은 그들의 흡습성과 휘발성에 따라 선택한 입자의 크기와 비교하여 입자들의 크기가 변한다. 이 입자들의 크기 변화를 두 번째 DMA와 입자계수기를 이용하여 측정하므로 입자들의 흡습성과 휘발성을 파악할 수 있다. 흡습성과 휘발성을 파악함으로써 간접적으로 입자들의 화학적 특성을 예측할 수 있어 에어로졸의 생성과 성장 기작을 알 수 있다.

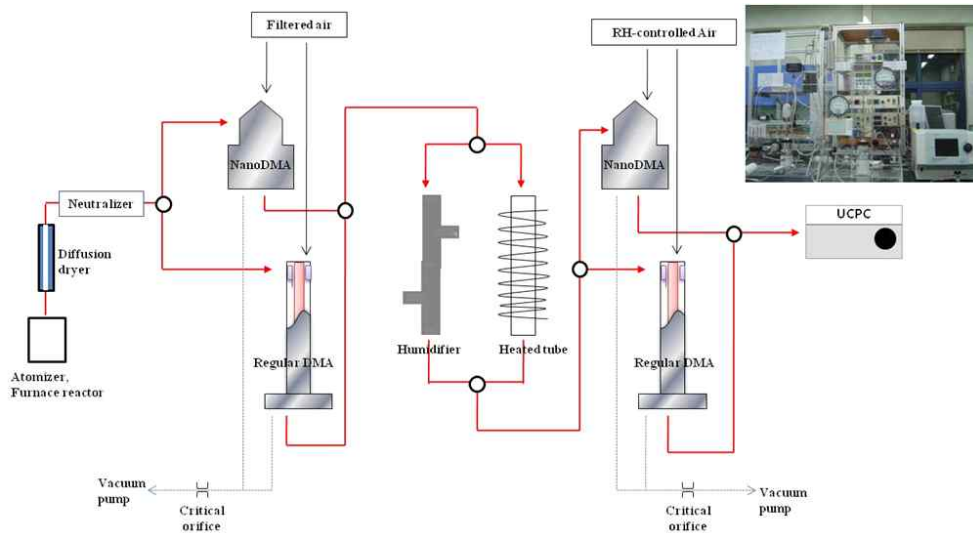


그림. 본 연구에서 구축한 HVTDMA 시스템의 개략도 및 실제사진

## 2. 북극에어로졸의 구름형성 특성을 실시간으로 측정하기 위한 구름형성응축핵 계수기 (cloud condensation nuclei counter) 시스템 구축

북극에어로졸의 구름형성 특성을 실시간으로 측정하기 위하여 본 연구에서는 He-Ne laser 와 CCD 카메라를 이용한 구름형성응축핵 계수기 (CCN counter) 시스템을 구축하였다. 구축한 시스템의 개략도와 실제사진은 아래그림과 같다. CCN counter 측정시스템은 과포화기, 측정기, 분석장치로 구성된다. 과포화도는 과포화기의 온도 구배에 따라서 결정되며 과포화기를 통과한 입자들 중 구름형성응축핵으로 작용하는 입자들은 크기가 커져서 측정기에서 측정된다. 이를 LabVIEW 소프트웨어를 기초로 자체개발한 image 분석 프로그램을 이용하여 구름형성응축핵의 수 농도를 측정하게 된다.

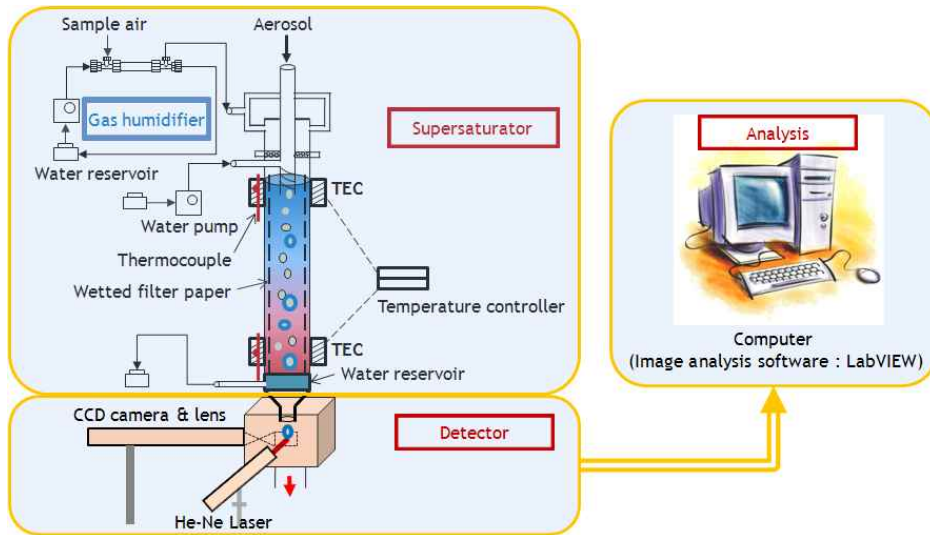


그림. 본 연구에서 구축한 실시간 구름형성응축핵의 수농도 측정을 위한 CCN counter 개략도

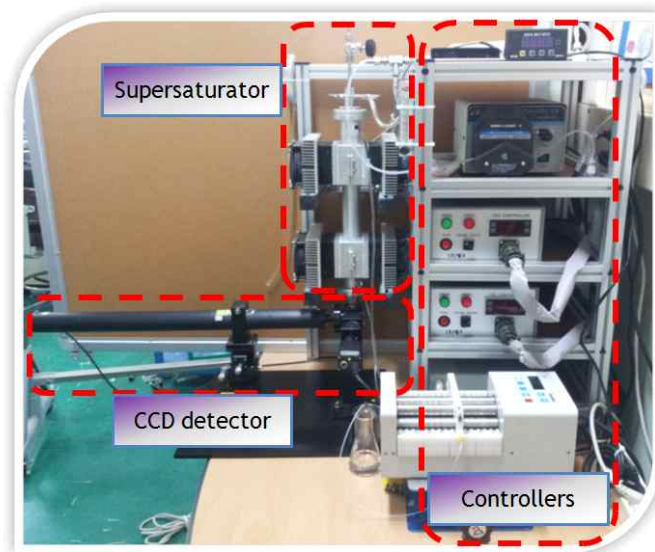


그림. 본 연구에서 구축된 CCN counter 실제사진

## 제 2 절 구축된 HVTDMA, CCN counter 통합 시스템의 성능평가

1. 물성이 알려진 염화나트륨 ( $\text{NaCl}$ ), 황산암모늄 ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) 입자를 이용한 HVTDMA 시스템의 성능 평가

본 연구를 통해서 구축된 북극 에어로졸의 흡습성, 휘발성, 구름형성 특성을 실시간으로 측정할 수 있는 통합시스템의 성능을 평가하기 위해서 많은 연구를 통해서 그 특성이 알려진



NaCl,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  입자를 이용하여 흡습성을 측정하였다. 흡습성은 deliquescence relative humidity (DRH)와 growth factor (GF)로 구축한 시스템으로 측정된 값과 이론적인 값을 비교하였다. 참고문헌에서 (Tang and Munkelwitz, 1993) NaCl과  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  입자들의 DRH 값은 각각 75.3, 79.9 % 이다. 본 연구에서 실험을 통해서 얻은 NaCl과  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  입자들의 DRH값은 76, 79%로 문헌 값과 1%정도 차이를 보였지만, 이는 상대습도를 측정하는 측정기의 측정오차를 감안하면 거의 일치하는 것으로 볼 수 있다. 상대습도의 변화에 따른 크기별 GF를 측정된 결과 Kelvin effect를 고려한 이론값과 실험값이 5%내에서 일치하였으며, 이를 통해서 본 연구에서 구축한 HVTDMA 시스템의 측정 성능이 높은 것을 알 수 있었다.

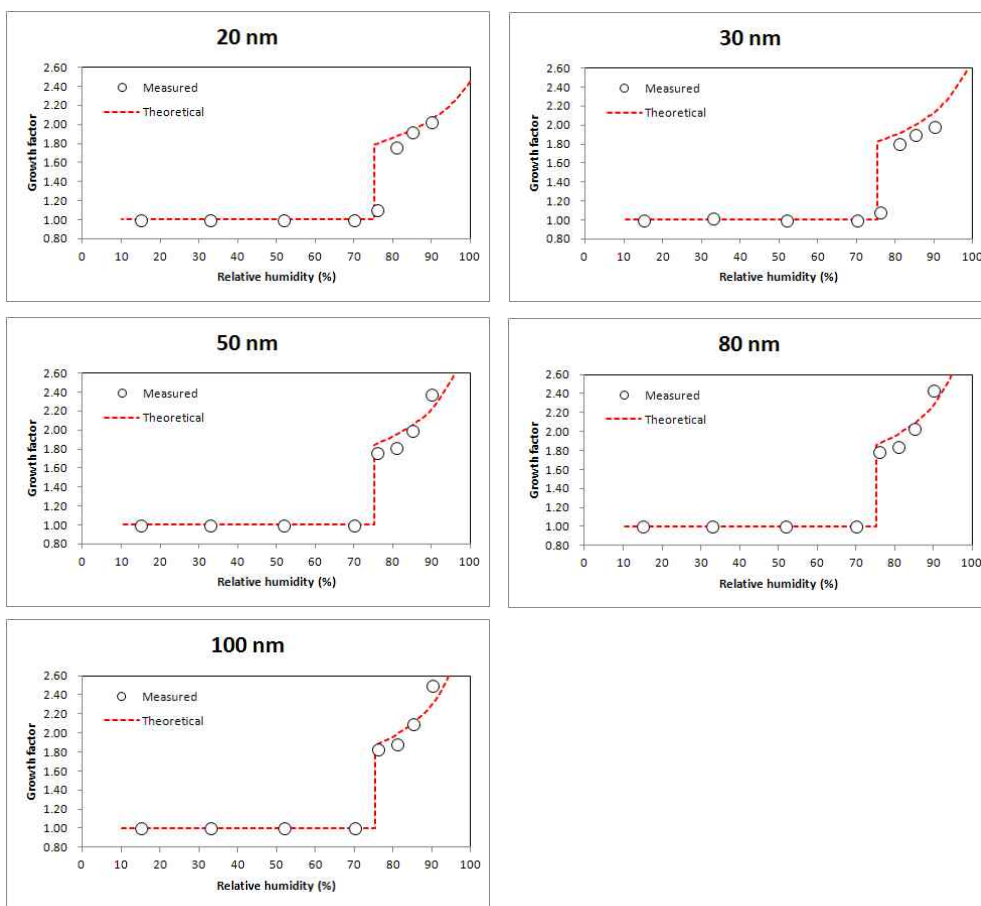
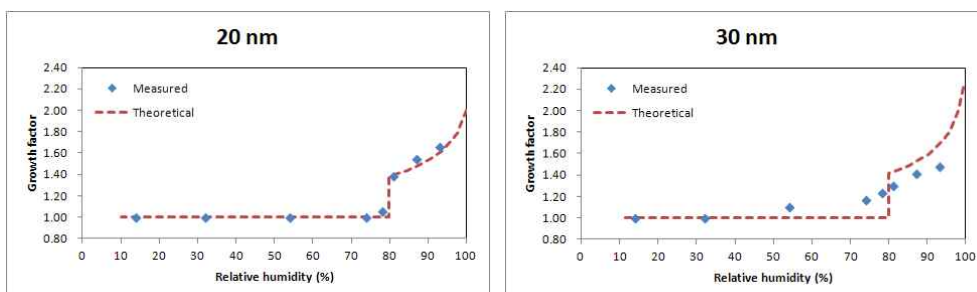


그림. 상대습도 변화에 따른 NaCl 입자들의 GF 측정값과 이론값의 비교



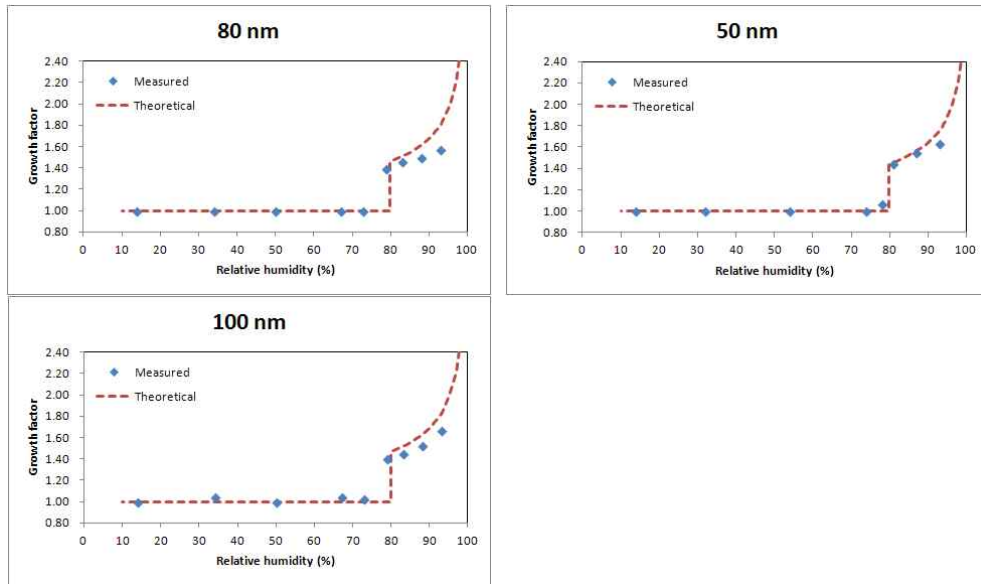


그림. 상대습도 변화에 따른  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  입자들의 GF 측정값과 이론값의 비교

## 2. 물성이 알려진 염화나트륨 (NaCl), 황산암모늄 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 입자를 이용한 CCN counter 시스템의 성능 평가

본 연구에서 구축한 CCN counter의 과포화도는 과포화기의 온도구배로 결정한다. 과포화기의 온도구배를 3, 5, 7°C로 하여 실험을 수행하였으며  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  입자를 이용하였다. 선택한 크기 입자의 총 수 농도 중 50%의 입자가 CCN으로 작용할 때의 크기 (CN/CCN ~ 0.5)를 activation diameter라고 하는데, 이 activation diameter와 Köhler equation을 이용하여 온도 구배에 따라 얻은 과포화도는 0.22, 0.55, 0.78%였다. 과포화기 온도구배에 따른 과포화도를 결정하고 NaCl,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  입자를 이용하여 CCN counter의 측정성능을 평가하였다. 실험실에서 제조한 NaCl,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  입자들의 측정결과 값은 Köhler equation을 이용해서 얻은 결과와 기존 문헌 (Cruz and Pandis, 1997; Corrigan and Novakov, 1999; Giebl et al., 2002; Raymond and Pandis, 2002; Pradeep Kumar et al., 2003) 에서 측정결과를 이용하여 비교하였다. 비교결과 측정값이 이론값과 1% 내에서 일치하는 것을 일치하는 것으로 구축한 시스템의 높은 측정성능을 확인하였다.

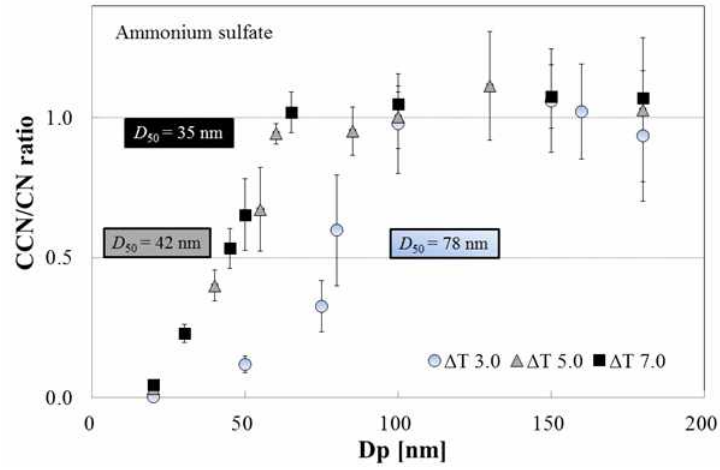


그림.  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  입자를 이용한 CCN counter의 과포화도 결정

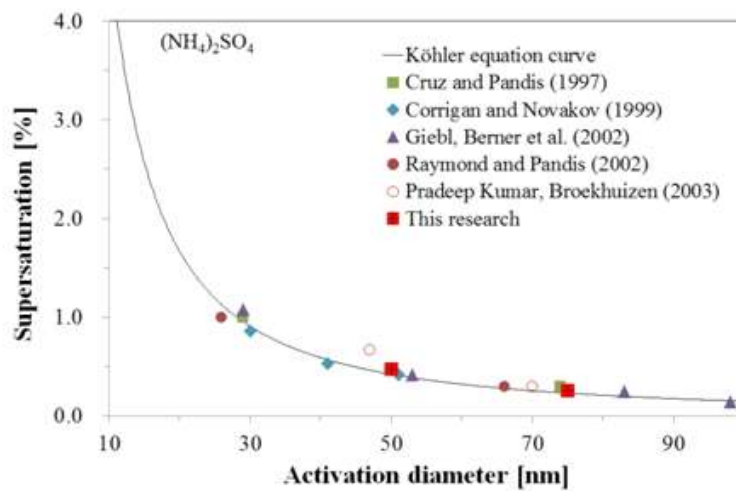
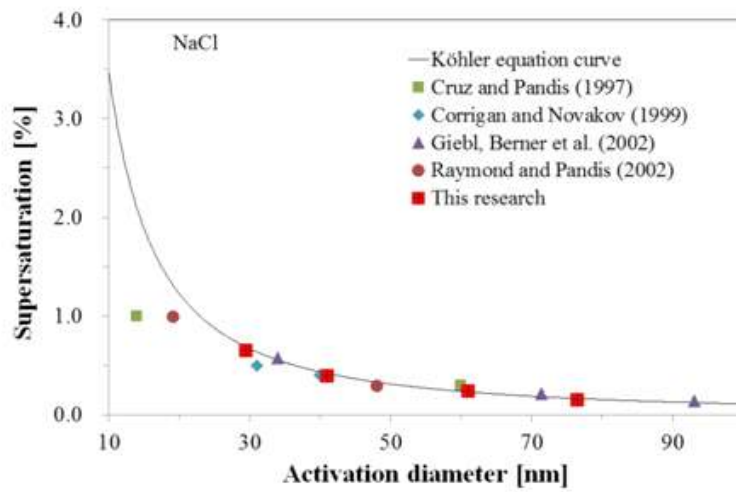
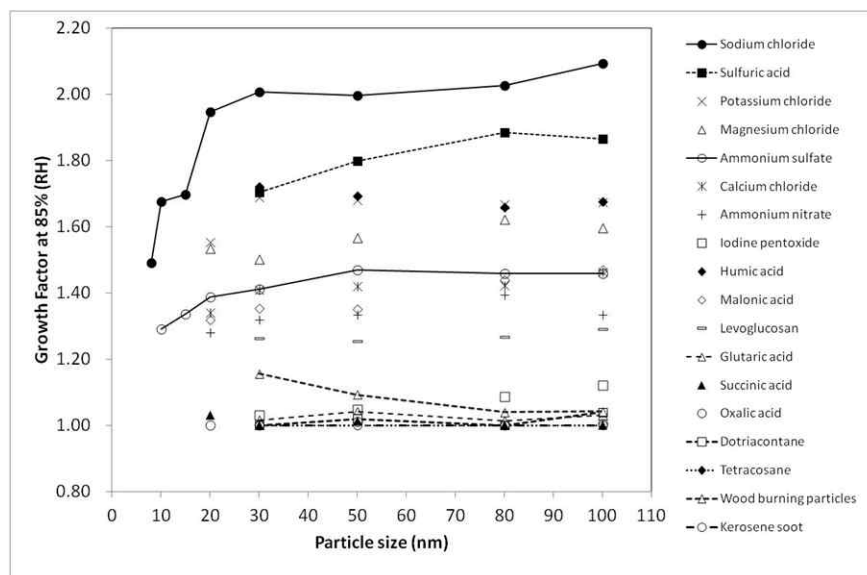


그림. NaCl,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  입자들의 activation diameter 변화에 따른 과포화도 비교

### 제 3 절 북극에어로졸의 생성과 성장에 영향을 미칠 수 있는 다양한 성분의 입자들의 흡습성, 휘발성, 구름형성 특성 database화

북극에어로졸의 생성과 성장에 영향을 미칠 수 있는 black carbon, organic carbon, sulfate, nitrate 등의 화학적 조성을 알고 있는 다양한 입자를 실험실에서 제조하여 그들의 흡습성과 휘발성의 측정하고 결과를 database화 하였다. 미세입자는 atomizer를 이용하여 용액상태로 존재하는 입자를 연속적인 건조과정을 통해 원하는 submicron 입자를 부유시켜 HVTDMA 시스템으로 보내 그들의 흡습성과 휘발성을 측정하였다. 크기가 30 nm 보다 작은 나노입자의 경우에는 evaporation-condensation 방법으로 나노입자를 제조할 수 있는 furnace reactor 장치를 이용하였다. 입자크기에 대한 영향을 파악하기 위해서는 원하는 입자만을 선택 분리할 수 있는 DMA를 활용하여 단일크기의 입자를 생성시킨 뒤 흡습성과 휘발성을 파악하였다. 이와 같은 방법으로 특정 크기의 입자와 화학적 조성을 알고 있는 입자를 제조하여 입자 종류별 특성을 데이터베이스화 하였다. 다양한 입자의 흡습성과 휘발성을 측정한 결과 상대습도 85%에서 black carbon, organic carbon 입자는 크기에 관계없이 입자의 크기가 변하지 않는 것을 알 수 있었다. (즉, 흡습성이 없다.) 그러나 sulfate, nitrate 성분의 입자들은 GF가 1.4이상으로 흡습성이 높은 것을 알 수 있었다. 온도 조절장치의 온도가 100°C 일 때, organic carbon, nitrate 성분의 입자들은 크기에 관계없이 모두 휘발하였지만, black carbon, sulfate 성분의 입자들은 휘발하지 않았다.



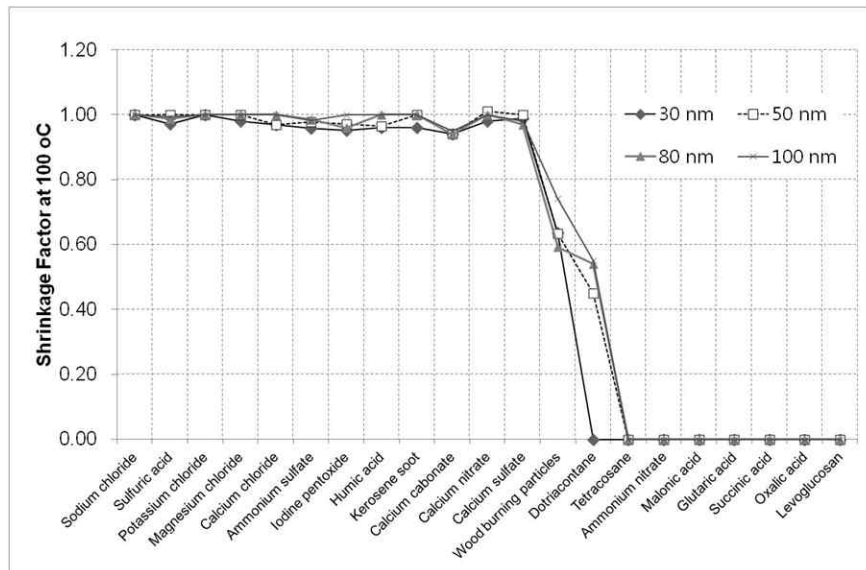


그림. 다양한 실험실 제조입자를 이용한 흡습성, 휘발성 database

20~250 nm 크기 범위의 다양한 성분의 입자들을 제조하여 과포화도 0.22, 0.55, 0.78%에서 성분에 따른 구름형성 특성을 측정하였다. 측정결과 sodium chloride 성분의 입자들이 작은 크기에도 쉽게 CCN으로 작용하는 것을 알 수 있었고 그 뒤로 ammonium sulfate, ammonium nitrate 성분입을 알 수 있었다. 구름형성 특성은 입자들의 흡습성 결과와도 유사하였다. 하지만 organic carbon 성분의 입자들은 상대습도 85%에서 거의 흡습성이 없었지만 구름형성응축핵으로는 작용할 수 있음을 알 수 있었고 용해도가 클수록 더 작은 크기에서 활성이 되었다. 그 외에 Dioctyl phthalate (DOP), octacosane, tetracosane, black carbon 성분의 입자들은 크기에 관계없이 과포화도 0.78%에서도 구름형성응축핵으로 작용하지 않았다.

표. 다양한 입자들의 구름형성 특성 database

Species	Activation diameter (nm)		
	S = 0.22%	S = 0.55%	S = 0.78%
Sodium chloride	66	35	28
Ammonium sulfate	78	42	35
Ammonium nitrate	82	45	37
Oxalic acid	80	47	39
Malonic acid	106	58	46
Succinic acid	112	61	48
Glutaric acid	120	65	52
Adipic acid	126	68	54
Humic acid	120	68	56
Arizona road dust	221	137	89
Diocetyl phthalate Octacosane Tetracosane Black carbon	No activation		

#### 제 4 절 연구내용 요약

연구 내용	연구 결과
북극에어로졸의 흡습성, 휘발성, 구름형성 특성을 실시간으로 측정할 수 있는 HVTDMA, CCN counter 시스템 구축	북극에어로졸의 흡습성, 휘발성, 구름형성 특성을 실시간으로 측정할 수 있으며 이동성이 용이하며 자동화된 통합시스템인 HVTDMA, CCN counter 시스템을 구축하였다.
실험실 제조입자를 이용한 구축시스템의 성능평가	염화나트륨, 황화암모늄 입자들을 이용하여 HVTDMA, CCN counter 시스템의 측정성능을 평가한 결과 이론값과 측정값이 5%이내에서 일치하는 것을 확인하였다.
다양한 실험실 제조입자들의 흡습성, 휘발성, 구름형성 특성 database화	다양한 크기의 다양한 성분의 입자들을 실험실에서 제조하여 입자들의 흡습성, 휘발성, 구름형성 특성을 database화 한 결과 sulfate, nitrate 성분들은 흡습성과 구름형성 특성이 높은 것을 알 수 있었다. 그러나 black carbon 성분의 입자들은 흡습성, 휘발성, 구름형성 특성이 없는 것을 알 수 있었다.

## 제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

### 제 1 절 1차년도 연구개발 목표

북극 에어로졸의 흡습성 (hygroscopicity)과 휘발성 (volatility)을 실시간으로 측정하기 위하여 HVTDMA (hygroscopicity and volatility tandem differential mobility analyzer) 시스템 및 구름형성응축핵 입자카운터 (cloud condensation nuclei counter) 시스템을 기반으로 하는 통합시스템 구축 및 실험실 입자를 이용한 구축한 통합시스템의 테스트 완료를 목표로 하였다.

#### 1. 연구개발목표 달성도

목 표	달 성 도(%)	내 용
북극에어로졸의 흡습성, 휘발성, 구름형성 특성을 실시간으로 측정할 수 있는 시스템 구축 및 평가	100	북극에어로졸의 흡습성, 휘발성을 실시간으로 측정할 수 있는 HVTDMA 시스템과 구름형성 특성을 측정할 수 있는 CCN counter를 구축
다양한 실험실 제조입자를 이용한 흡습성, 휘발성, 구름형성특성 데이터베이스화	100	sulfate, nitrate, sea-salt, organic carbon 등 다양한 실험실 제조입자를 크기별, 조성별 흡습성, 휘발성, 구름형성응축핵 특성의 데이터베이스화 완료

#### 2. 평가의 착안점에 따른 목표달성도에 대한 자체평가

평가의 착안점	자 체 평 가
북극에어로졸의 흡습성, 휘발성, 구름형성 특성을 실시간 측정이 가능하고 이동성이 우수하며 자동화된 시스템 구축여부	북극에어로졸의 흡습성, 휘발성, 구름형성 특성을 측정할 수 있는 통합시스템을 개발하였으며, 개발된 측정시스템은 LabVIEW 소프트웨어를 통하여 제어가 가능한 자동화된 시스템이다. 그리고 rack을 이용하여 시스템을 개발하였기 때문에 이동성도 우수하다.
북극에어로졸 생성과 성장에 영향을 미치는 다양한 실험실 제조입자의 흡습성, 휘발성, 구름형성 특성 데이터베이스화	북극에어로졸의 생성과 성장에 영향을 미치는 sulfate, nitrate, OC, sea-salt 성분 등 다양한 크기의 입자를 실험실에서 제조하여 흡습성, 휘발성, 구름형성 특성 데이터베이스를 만들었다.

## 제 2 절 대외 기여도

### 1. 기술적인 측면

- 가. 기존 대기환경에서 사용하던 입자측정 및 분석 장치와 더불어 북극환경에서 에어로졸입자의 종합적 분석이 가능하고 한 단계 upgrade된 에어로졸 모니터링 시스템 구축할 수 있을 것이다.
- 나. 북극환경에서 다양하게 존재하는 에어로졸 입자로 인한 환경적 피해를 최소화할 위한 실시간 감시기술 개발에 기여할 것이다.
- 다. 다양한 크기 (나노크기에서 마이크로미터크기)와 종류의 입자의 특성을 실시간으로 직접적으로 측정하는 기술은 대기환경측정사업, 반도체/부품 제조공정사업 (반도체 제조공정에서 발생하는 오염입자 모니터링), 나노입자 활용사업 (나노물질 제조공정 및 생산 품의 품질관리), 클린디젤 자동차 (자동차 배기입자 화학적 성분 실시간 모니터링) 등과 연관된 다양한 기업에 공통적으로 활용될 수 있을 것이다.
- 라. 산/학/연을 포함하여 대기 에어로졸 측정 전문가 그룹 (대기오염물질 모니터링 기술 개발 기업), 수계 (물, 바닷물) 속 입자제어 및 모니터링 전문가 그룹 (정수기, 담수화 사업), 자동차 입자 배출 연구 전문가 그룹 (그린자동차 생산기업), 반도체 제조공정 중 오염입자 제어 전문가 그룹 (반도체생산 기업), 공장배출 오염입자 제거 전문가 그룹 (산업환경오염 모니터링 기관), 실내 대기오염입자 제어 전문가 그룹 (공기정화기, 이온발생기, 공기청정기 기업 등)과 개방형 혁신 연구를 위한 입자실시간 모니터링 전문가 네트워크를 구성할 것으로 기대된다.

### 2. 경제적 · 산업적 측면

- 가. 측정기기의 이동성과 자동화 시스템 구축을 통해서 향후 측정시스템의 상업화가 가능할 것이다.
- 나. 다양한 매체내 존재하는 입자의 실시간 화학적 성분 측정기술에 활용될 수 있다. 즉, 수계, 바닷물 속 존재하는 입자의 화학적 조성 실시간 측정에 활용될 것으로 기대된다 (담수화 기업, 정수기, 물정화기 제조업체 등).
- 다. 인체에 흡입되었을 때 유해한 입자의 특성을 실시간 규명하여 국민보건 감시기관에서 활용될 수 있을 것이다.
- 라. 한반도에 발생하거나 또는 동아시아 장거리 이동 에어로졸입자 (황사입자)의 대기 중 거동 실시간 파악 및 국제 환경협약 및 대책 수립 기관과 공유할 수 있다.



- 마. 반도체제조 공정에서 발생하는 입자의 실시간 화학적 성분 모니터링에 활용할 수 있다 (반도체 제조기업, 부품 제조업체 등).
- 바. 자동차 배출입자, 농작물 연소입자, 산불 등에서 배출되는 입자의 실시간 종합적 특성 감시기관에서 활용할 수 있다.
- 사. 실내 발생 에어로졸 화학적 조성 실시간 모니터링에 활용될 것으로 기대된다 (공기정화기 제조기업).
- 아. 본 연구에서 개발한 통합형 모니터링 시스템은 다양한 매체내에서 또는 매체간에 입자의 이동, 변화, 거동 특성 파악에도 활용될 수 있다.
- 자. 나노물질의 자연계내 거동 및 환경영향 파악에 활용할 수 있다.
- 차. 입자의 종합적 특성 (화학적 성분, 크기, 농도, 원소, 흡습성, 휘발성)과 기후변화 영향을 실시간으로 일반 국민에게 제공할 것으로 기대된다.
- 카. 미세입자의 종합적 특성을 실시간으로 측정하여 입자로 인한 환경적, 경제적 피해를 최소화할 위한 실시간 감시기술개발에 기여 할 것이다 (일반 대기오염 감시기관에서 활용).
- 타. 유해성 판단을 위한 입자의 화학적 성분 자료 실시간 제공할 것으로 생각된다 (보건의료 업계에서 활용).
- 파. 나노입자를 포함한 입자 제조업체 및 기업에서 원하는 화학적 성분 입자 제조를 위한 중요한 도구로 활용될 수 있다.
- 하. 공장에서 배출되는 입자저감기술 개발기관에서 화학적 성분 실시간 측정에 활용할 수 있다.
- 거. 입자, 파우더 제조 및 나노입자를 활용한 제품 생산기술공정 중 실시간 화학적 조성 모니터링에 활용될 수 있는 기술이다.

## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

본 연구개발을 통해서 구축한 시스템을 통해서 다음과 같은 활용이 가능하겠다.

- 북극 에어로졸 입자의 흡습성과 휘발성을 파악하고 화학적 조성을 간접적으로 예측함으로써 입자의 발생원, 생성경로, 성장기작, 물리/화학적 변화 등의 역할을 파악하는데 중요한 정보를 제공할 수 있다.
- 북극 에어로졸 입자의 구름응축핵 모니터링을 통해 에어로졸의 구름형성 및 기후변화 역할에 대한 과학적 이해증진에 도움이 될 것이다.
- 대기 중 황사, 미세먼지, 극초미세먼지와 나노입자의 발생원, 생성경로, 성장기작 등을 규명하여 환경오염입자 자료제공할 수 있다.
- 한반도에 발생하거나 또는 동아시아 장거리 이동 에어로졸입자 (황사입자)의 대기 중 거동 실시간 파악 및 국제 환경협약 및 대책 수립에 공헌할 수 있다.
- 대기 에어로졸의 종합적인 화학적 성분결과와 구름형성응축특성 자료를 활용하여 기후변화 역할 규명에 활용할 수 있다.
- 미세먼지의 종합적 특성을 실시간으로 측정하여 입자로 인한 환경적, 경제적 피해를 최소화할 위한 실시간 감시기술과 경보기술에 활용할 것으로 기대된다 (일반 대기오염 감시기관에서 활용).
- 공장에서 배출되는 입자 측정 및 제거를 위한 화학적 성분 실시간 감시기술에 활용할 것이다.
- 자동차 배출입자, 농작물 연소입자, 산불 등에서 배출되는 입자의 실시간 종합적 특성 감시기관에서 활용할 수 있다.
- 실내 발생 에어로졸 화학적 조성 실시간 모니터링에 활용할 수 있다 (공기정화기 제조기업).
- 다양한 매체내 존재하는 입자의 실시간 화학적 성분 측정기술에 활용될 수 있음. 즉, 수계, 바닷물 속 존재하는 입자의 화학적 조성 실시간 측정에 활용할 것으로 생각된다 (담수화 기업, 정수기, 물정화기 제조업체 등)
- 반도체제조 공정에서 발생하는 입자의 실시간 화학적 성분 모니터링에 활용할 수 있다 (반도체 제조기업, 부품 제조업체 등)

- 다매체 존재 나노물질의 화학적 성분 실시간 감시로 자연계내 매체간 이동/거동 및 환경 영향 파악에 활용할 수 있다.
- 유해성 판단을 위한 입자의 화학적 성분 자료 실시간 제공하는데 이용할 수 있다 (보건의료업계에서 활용).
- 나노입자를 포함한 입자 제조업체 /화학적 성분 입자 제조를 위한 중요한 도구로 활용될 수 있다.
- 대기 중 방사능 오염물질 감시 및 경보 산업에 활용 될 수 있다.

## 제 6 장 참고문헌

Corrigan, C. and Novakov, T. 1999. Cloud condensation nucleus activity of organic compounds: a laboratory study. *Atmospheric Environment* 33(17): 2661-2668.

Cruz, C. N. and Pandis, S. N. 1997. A study of the ability of pure secondary organic aerosol to act as cloud condensation nuclei. *Atmospheric Environment* 31(15): 2205-2214.

Giebl, H., Berner, A., Reischl, G., Puxbaum, H., Kasper-Giebl, A., Hitzenberger, R. 2002. CCN activation of oxalic and malonic acid test aerosols with the University of Vienna cloud condensation nuclei counter. *Journal of Aerosol Science* 33, 1623-1634.

Pradeep Kumar, P., Broekhuizen, K., Abbatt, J. P. D. 2003. Organic acids as cloud condensation nuclei: Laboratory studies of highly soluble and insoluble species. *Atmospheric Chemistry and Physics* 3, 509-520.

Raymond, T. M. and Pandis, S. N. 2002. Cloud activation of single-component organic aerosol particles. *J. Geophys. Res. Atmos.* 107.

Tang, I. N., Munkelwitz, H. R. 1993. Composition and temperature dependence of the deliquescence properties of hygroscopic aerosols. *Atmospheric Environment - Part A General Topics* 27A(4): 467-473.

## 주 의

1. 이 보고서는 극지연구소 위탁연구기관에서 수행한 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 위탁연구의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.