

아라온 북극해 항해 경로 중 나노입자 물리적  
특성 연구

A study on physical properties of nanoparticles through  
Arctic shipping route of ARAON



한국해양과학기술원  
부설 극지연구소

# 제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “아라온 북극해 항해 경로 중 나노입자 물리적 특성 연구”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2018. 08. 30.

연구책임자 : 박지연

참여연구원 : 박기태, 운영준, 김연태, 강효진,  
최진희,



보고서 초록

과제관리번호	PE17390	해당단계 연구기간	2017.06.01. ~ 2018.06.30	단계 구분	1단계
<b>연구사업명</b>	중 사업명	창의연구사업			
	세부사업명	신진연구자 지원사업			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	아라온 북극해 항해 경로 중 나노입자 물리적 특성 연구			
연구책임자	박 지 연	해당단계 참여연구원수	총 : 6 명 내부 : 3 명 외부 : 3 명	해당단계 연구비	정부: 3,000 천원 기업: 천원 계: 3,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 극지기후과학연구부		참여기업명	해당사항 없음	
국제공동연구	해당사항 없음				
위탁연구	해당사항 없음				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	
<p>○ 대기 중 나노입자 수농도 분포곡선 실시간 모니터링</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 아라온의 북극과 태평양 항해 경로 중 3 nm - 300 nm 크기 범위에 있는 나노입자의 수농도 분포곡선 실시간 측정.</li> <li>- 나노입자의 기원지 추적을 위한 공기역학적 분석.</li> <li>- 나노입자 형성 특성 파악을 위한 이벤트 분류</li> <li>- 공기역학적이 해양에서 기원할 때는 나노 입자의 생성만 나타나는 반면, 공기역학적이 대륙에서 기원할 때는 나노입자의 생성과 성장이 동시에 관찰됨.</li> </ul> <p>○ 대기 중 나노입자의 모양 및 원소성분 파악</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 아라온의 북극과 태평양 항해 경로 중 포집한 나노입자의 모양 및 원소성분을 TEM (Transmission electron Microscopy)과 EDS (Energy Dispersive Spectroscopy)로 분석 및 비교.</li> <li>- 탄소 입자 (C-rich particles), 검댕 입자 (soot particles), 황 입자 (S-rich particles), 실리카 입자 (silicate), 금속 산화물 (metal oxide), 염 입자 (sea salt particles), 미생물 입자 (bioaerosol) 등 다양한 종류의 입자가 관찰됨.</li> </ul>					
색인어 (각 5개 이상)	한글	북극 대기, 나노입자, 생성 및 성장, 모양, 원소성분			
	영어	Arctic atmosphere, nanoparticles, formation and growth, morphology, elemental composition			

# 요 약 문

## I. 제 목

아라온 북극해 항해 경로 중 나노입자 물리적 특성 연구

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 아라온 북극해 항해 경로 중 나노입자의 물리/화학적 특성 연구
- 나노입자의 물리적 특성 장기적 측정결과 부재
- 나노입자의 화학적 성분에 대한 정보 부족

## III. 연구개발의 내용 및 범위

- 북극 에어로졸의 물리적 특성 측정
  - 아라온의 북극과 태평양 항해 경로 중 나노입자의 크기에 따른 수농도 분포곡선 실시간 모니터링
  - 공기역학적 분석
  - 나노입자 이벤트 분류
- 북극 에어로졸의 화학적 특성 측정
  - 아라온의 북극과 태평양 항해 경로 중 나노입자 포집
  - TEM/EDS 분석법을 이용하여 포집된 나노입자의 모양 및 원소성분 파악

## IV. 연구개발결과

- 아라온 항해 경로 중 나노입자의 생성 및 성장 특성 파악
- 아라온 항해 경로에 따른 나노입자의 모양 및 원소성분 분류

## V. 연구개발결과의 활용계획

- 북극 대기 중 나노입자의 크기에 따른 수농도 분포 데이터베이스 확보
- 북극 대기 중 나노입자의 모양 및 원소성분 분석에 대한 데이터베이스 확보.

# S U M M A R Y

## **I. Title**

A study on physical properties of nanoparticles through Arctic shipping route of ARAON

## **II. Purpose and Necessity of R&D**

- A study on physicochemical properties of nanoparticles through Arctic shipping route of ARAON
- Absence of long-term observations for physical properties of nanoparticles
- Limitation of information on chemical composition of nanoparticles

## **III. Contents and Extent of R&D**

- Measurement of physical properties of Arctic aerosols
  - Real-time monitoring of number size distribution of nanoparticles through Arctic and Pacific shipping route of ARAON through Arctic shipping route of ARAON
  - Analysis of backward trajectory
  - Classification of nanoparticle events

## **IV. R&D Results**

- A study on the characteristics of formation and growth of nanoparticles through shipping route of ARAON
- Classification of morphology and elemental composition of nanoparticles through shipping route of ARAON

## **V. Application Plans of R&D Results**

- Obtaining the database for number size distribution of nanoparticles in the Arctic atmosphere
- Obtaining the database for morphology and elemental composition of nanoparticles in the Arctic atmosphere

# C O N T E N T S

Chapter 1 Introduction .....	7
Chapter 2 Current R&D Status in Korea and Other Nations .....	8
Chapter 3 R&D Implementation Contents and Results .....	11
I. Final goal of research .....	11
II. Contents and Results .....	11
Chapter 4 Degree of R&D Achievement and Degree of Contribution to Outside Research Institute .....	20
Chapter 5 Application Plans of R&D Results .....	21
Chapter 6 References .....	22

# 목 차

제 1 장 서론 .....	7
제 2 장 국내외 기술개발 현황 .....	8
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 .....	11
가. 연구개발의 최종목표 .....	11
나. 연구수행 내용 및 결과 .....	11
제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외기여도.....	20
제 5 장 연구개발결과의 활용계획 .....	21
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술 정보 .....	21
제 7 장 참고문헌.....	22

# 제 1 장 서론

## ○ 대기 중 나노입자의 물리/화학적 특성 파악의 필요성

- ▶ 대기 중의 나노입자 (<100 nm)는 지구에 도달하는 태양빛을 흡수/산란시킴으로써 태양빛 복사평형에 중요한 역할을 하고 있으며, 구름형성에 중요한 응축핵으로 작용함으로써 지구기후 변화에 간접적인 영향을 미침.
- ▶ 최근에 높은 수농도와 비표면적으로 인해 상대적으로 높은 반응성을 가진 나노입자에 대한 관심이 증대되고 있음.
- ▶ 대기 중 입자들은 자동차, 화산폭발, 해양 등의 다양한 발생원으로부터 직접 대기 중으로 배출되기도 하고, 일반 대기 중에 존재하는 다양한 기상 물질의 화학 반응에 의해 생성 (nucleation) 되기도 함.
- ▶ 이렇게 생성된 초기나노입자의 크기는 매우 작고 단시간 내에 여러 가지 물리적/화학적 변화 과정을 거치기 때문에 대기 중 나노입자의 물리/화학적 특성을 실시간으로 측정하는 것은 매우 중요함.
- ▶ 특히 북극 항해 기간 중 나노입자의 발생 및 성장 과정을 이해하기 위해서는 SMPS (scanning mobility particle sizer)를 이용하여 나노입자들의 크기 및 수농도 연속 측정 필요.
- ▶ 추가적으로 나노입자 이벤트 발생 시 입자의 모양 및 화학적 성분 파악함으로써 나노입자의 발생원을 예측하는데 중요한 자료로 활용될 수 있음.

## ○ 대기 중 나노입자의 물리적 특성 측정 시스템 구축의 필요성

- ▶ 실시간 나노입자의 측정기술의 부족은 초기 생성된 나노입자의 화학적 성분에 대한 정보부족을 야기함.
- ▶ 기존 북극 대기환경에서 사용하는 입자측정 및 분석 장치 및 관측자료 더불어 에어로졸의 종합적인 분석이 가능하고 한 단계 업그레이드된 나노입자 에어로졸 모니터링 시스템 구축이 요구됨.

## ○ 대기 중 나노입자의 특성 장기적 측정의 필요성

- ▶ 향후 북극 대기오염물질 모니터링 네트워크 구축을 위한 기초 데이터 제공.
- ▶ 북극 항해 경로 중 나노입자의 물리/화학적 특성 모니터링을 통해 에어로졸의 기후변화 역할에 대한 과학적 이해 증진.
- ▶ 북극 항해 경로 중 나노입자의 모양 및 화학적 성분에 대한 자료를 데이터베이스화 함으로써 나노입자의 발생원, 생성경로, 성장기작, 해양-대기 순환 등의 역할을 파악하는데 중요한 정보 제공.

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 1. 국내외 기술 수준

#### 가. 세계적 수준

개념정립 단계	●	기업화 단계		기술 안정화 단계	
---------	---	--------	--	-----------	--

- 북극 에어로졸의 화학적 성분 분석에 대한 연구 결과들이 발표되고 있음 (Chang et al., 2011).
- 북극 에어로졸이 다양한 인위적/자연적 발생원으로부터 기원한다는 것을 관찰하였음.

#### 나. 국내수준

##### 아라온 북극항해 경로에 따른 대기 중 나노입자의 수농도 분포곡선 측정 데이터의 부재

- 극지연구소에서 대기 중 입자들의 총수농도 변화에 대한 연구가 중점적으로 이루어져왔고, 크기가 2.5 nm 이상인 입자의 총 수농도와 10 nm 이상의 입자의 총 수농도를 각각 측정하여 이들의 차이로 대기 중 나노입자생성 이벤트를 구분하였음.
- 아라온 항해 경로에 따른 대기 중 나노입자의 크기별 수농도 분포곡선 및 화학적 성분 분석에 대한 데이터가 부족함.
- 특히, nano SMPS를 이용하여 측정가능한 3 nm에서 70 nm 크기 범위에 있는 에어로졸의 수농도 분포곡선을 측정한 결과가 없음.
- 3 nm크기 이상의 나노입자의 수농도 분포 곡선을 실시간 관측하면 대기 중 나노입자의 생성 및 성장 특성을 규명하는데 기여할 수 있음.

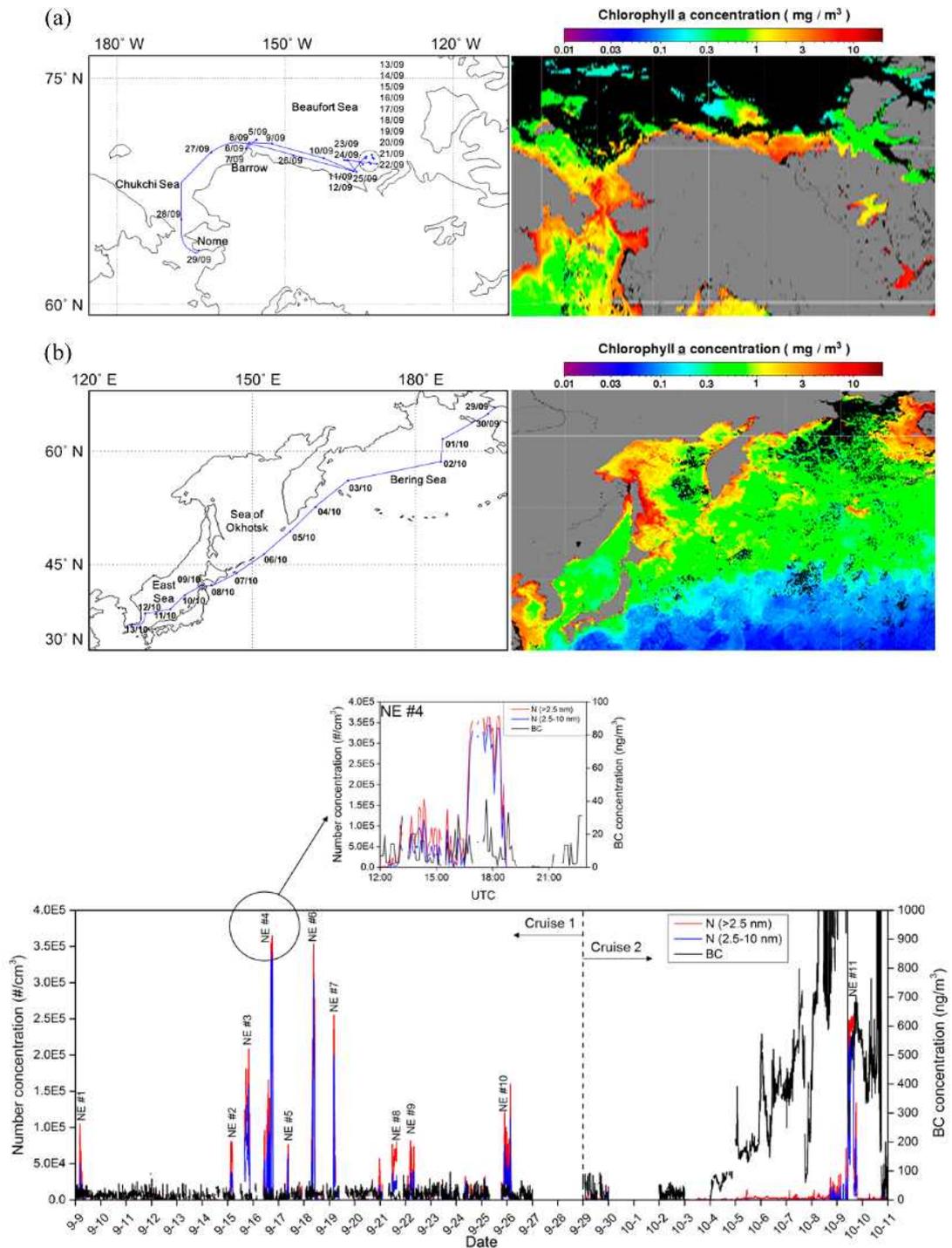
##### 아라온 북극항해 경로에 따른 대기 중 나노입자의 모양 및 원소성분을 구분한 데이터의 부재

- 현재 국내에서 대기 중 나노입자의 모양 및 원소성분을 관측하는 연구가 활발히 진행되고 있으나, 아라온 북극항해 경로 중 나노입자의 모양 및 원소성분을 각 사이트별로 측정된 데이터가 없음.
- TEM/EDS에서 관찰되는 미생물에 대한 이해가 부족하고, 해양과 대기의 상호작용을 통해 생성되는 미생물을 정량/정성 분석을 통해 규명한 데이터가 제한적임.
- 북극 항해 경로 중 나노입자의 모양 및 화학적 성분에 대한 자료를 데이터베이스화 함으로써 나노입자의발생원, 생성경로, 성장기작, 해양-대기 순환 등의 역할을 파악하는데 중요한 정보 제공할 수 있음.

## 2. 국내외 연구현황

### 가. 국내 동향

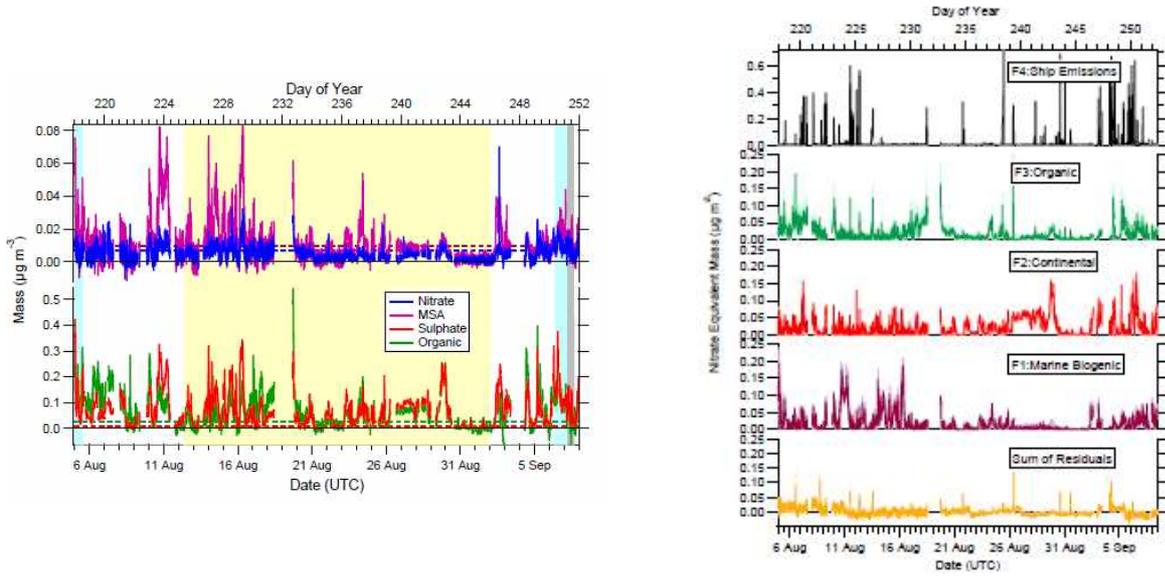
- 극지연구소에서 대기 중 입자들의 수농도 변화에 대한 연구가 중점적으로 이루어짐.
- 입자들의 수농도 변화 측정 자료만으로는 입자들의 생성기원, 성장기작 등 극지 에어로졸의 화학적 특성을 명확하게 이해하는데 어려움이 있음.
- 2013년 아라온 항해 경로에 따른 대기 에어로졸의 물리/화학적 특성을 이해하기 위한 실험이 수행되었고, 북극 에어로졸의 특성을 종합적인 이해 및 장기예측을 수행하기 위해서는 지속적인 모니터링을 통한 데이터 확보가 요구됨 (Kim et al., 2015)



나. 국외 동향

□ 북극 에어로졸의 화학적 성분 및 발생원 파악

- 북극 에어로졸의 화학적 성분 분석에 대한 연구 결과들이 발표되고 있음 (Chang et al., 2011).
- 북극 에어로졸이 다양한 인위적/자연적 발생원으로부터 기원한다는 것을 관찰하였음.



# 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

## 가. 연구개발의 최종목표

○아래온 북극해 항해 경로 중 나노입자의 생성 및 성장 특성을 파악하고자 함.

## 나. 연구수행 내용 및 결과

### □ 북극 에어로졸의 물리적 특성 측정

- 나노입자 물리적 특성 실시간 관측 시스템 구축
  - 아래온 대기관측 실험실에 나노입자 물리적 특성 실시간 측정 시스템 구축 (그림 1).
  - SMPS를 이용하여 20 nm 에서 300 nm 크기 범위에 있는 에어로졸의 수농도 분포 곡선을 측정하고, 나노 SMPS를 이용하여 3 nm 에서 70 nm 크기 범위에 있는 에어로졸의 수농도 분포 곡선을 측정함.
  - OPC를 이용하여 300 nm 에서 10  $\mu\text{m}$  크기 범위에 있는 에어로졸의 수농도 분포 곡선을 측정함으로써, 아래온 북극 항해 경로 중 3 nm 에서 10  $\mu\text{m}$  크기 범위에 있는 에어로졸의 수농도 분포 곡선을 3분 단위로 측정함.
  - CPC 3772를 이용하여 10 nm 크기 이상의 에어로졸의 총 수농도를 측정하고, CPC 3776을 이용하여 2.5 nm 크기 이상의 에어로졸의 총 수농도를 측정함.
  - CCN 카운터를 이용하여 구름형성응결핵의 수농도를 측정함.
  - 항해 경로 중 인위적 오염원의 영향을 파악하기 위해서 Aethalometer를 이용하여 블랙카본 (검댕)이 농도를 연속 관측함.

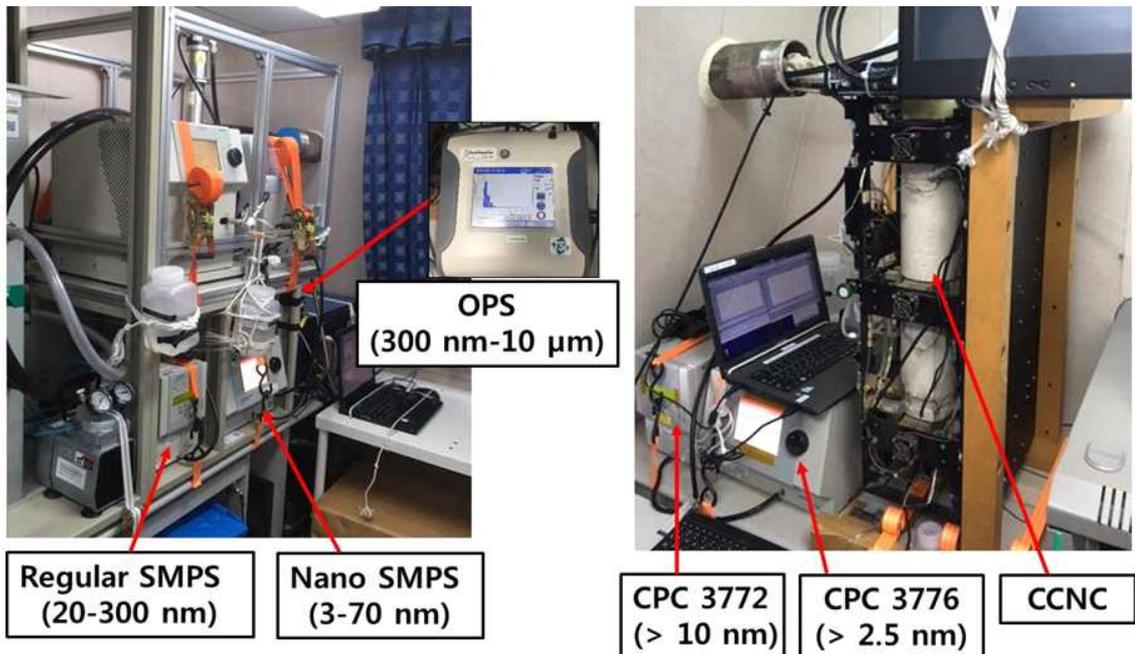


그림 1. 나노입자 물리적 특성 측정 시스템 구축 사진

○ 공기역학적 분석

- 아라온 호는 미국 알래스카 척치 해 (Chukchi sea)와 보퍼트 해 (Beaufort sea)를 향해하였고, 항해 기간은 2017년 8월 26일부터 2017년 9월 16일까지 임.
- 공기역학적 분석을 크게 해양기원, 대륙기원, 빙하기원으로 나뉘어 짐 (그림 2).
- 보퍼트 해 항해 시에는 북극해, 빙하, 미국 알래스카 대륙의 영향을 많이 받는 반면, 태평양 해 항해 시에는 태평양 해 아시아 대륙의 영향을 많이 받는 것을 확인 함.

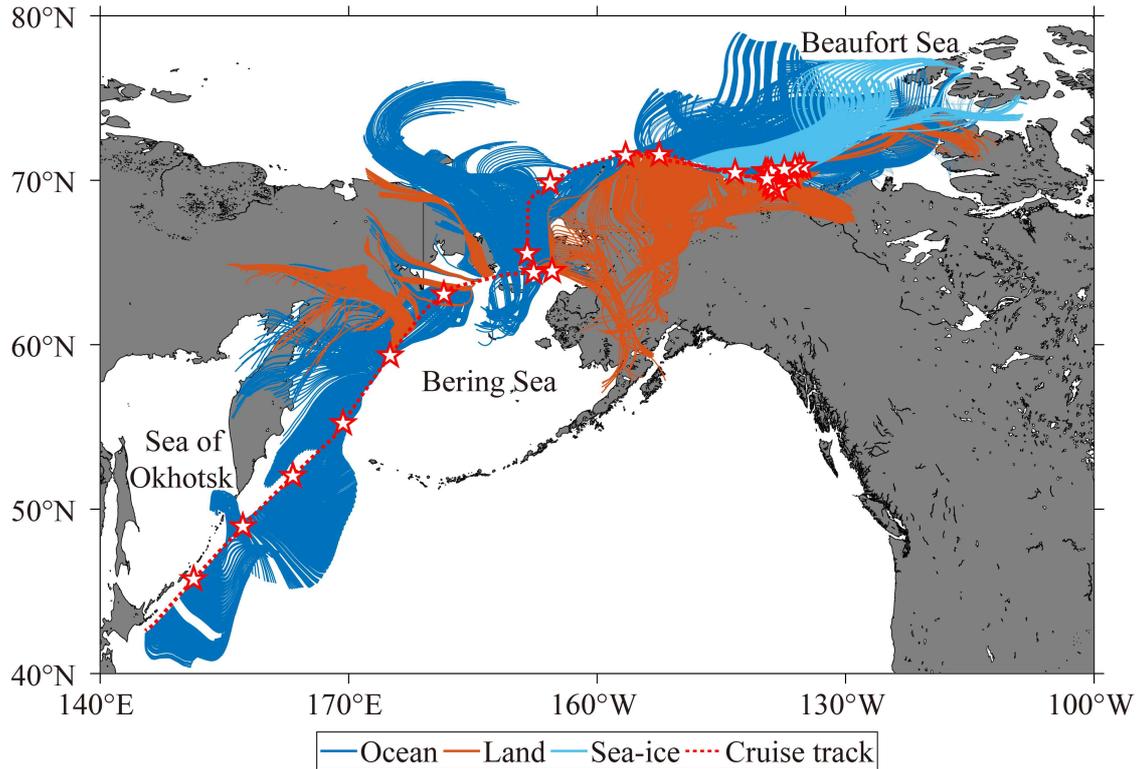


그림 2. 아라온 북극해와 태평양 항해 경로 중 공기역학적 분석

○ 대기 중 나노입자 물리적 특성 실시간 측정 결과

- 아라온 북극해와 태평양 항해 경로 중 나노입자 수농도 분포 곡선을 실시간으로 모니터링 하였고 (그림 3 (a)와 (b)), 그림 3 (a)는 SMPS를 이용하여 측정된 20 nm 에서 300 nm 크기 범위에 있는 에어로졸의 수농도 분포 곡선을 contour plot으로 나타낸 결과이고, 그림 3 (b)는 나노 SMPS를 이용하여 측정된 3 nm 에서 70 nm 크기 범위에 있는 에어로졸의 수농도 분포 곡선을 contour plot으로 나타낸 결과 임.
- 8월 31일부터 9월 4일 기간 동안에는 나노입자가 생성되었지만 성장이 나타나지 않았고, 9월 5일 생성된 입자가 약 100 nm 까지 성장하는 것을 나타내는 반면, 9월 5일부터 9월 12일 기간에는 입자의 생성 및 성장 모두 발견되지 않음.
- 9월 13일부터 9월 21일 까지 나노입자와 생성과 성장이 연속적으로 관측되었고, 9월 20일 이후에는 약 80 nm와 200 nm 크기 이상의 큰 입자들이 bimodal 형태로 나타나는 것을 관찰하였고, 이는 해양염에 의해서 생성되는 전형적인 해양기원 입자의 수농도 분포곡선과 유사함.
- 그림 3 (c)는 CPC에 의해서 관측 된 대기 중 에어로졸의 총 수농도를 나타내고, 입자의 성장과 생성이 동시에 나타나는 9월 13일부터 9월 21일 에어로졸의 총 수농도가 높게 관측되었음.
- 그림 3 (d)는 인위적인 오염원의 영향을 나타내는 블랙카본의 질량농도 관측 결과를 나타내고,

본 연구에서는 배의 엔진에서 배출되는 인위적 오염원이 나노입자 물리적 특성 분석에 미치는 영향을 최소화하기 위해서 블랙카본의 농도가  $100 \text{ ng/m}^3$  이상인 경우 동시간대에 모든 데이터(수농도 분포 곡선, 총 수농도, 구름형성응결핵 농도)를 제거하였음.

- 그림 3 (e)는 구름형성응결핵의 수농도를 나타내고, 전형적인 해양기원 입자의 수농도 분포곡선이 나타나는 9월 20일 이후 구름형성응결핵의 수농도가 상대적으로 높게 관측되었고, 이는 해양으로부터 생성된 해양 염 입자들의 흡습성이 매우 높기 때문인 것으로 예측됨.

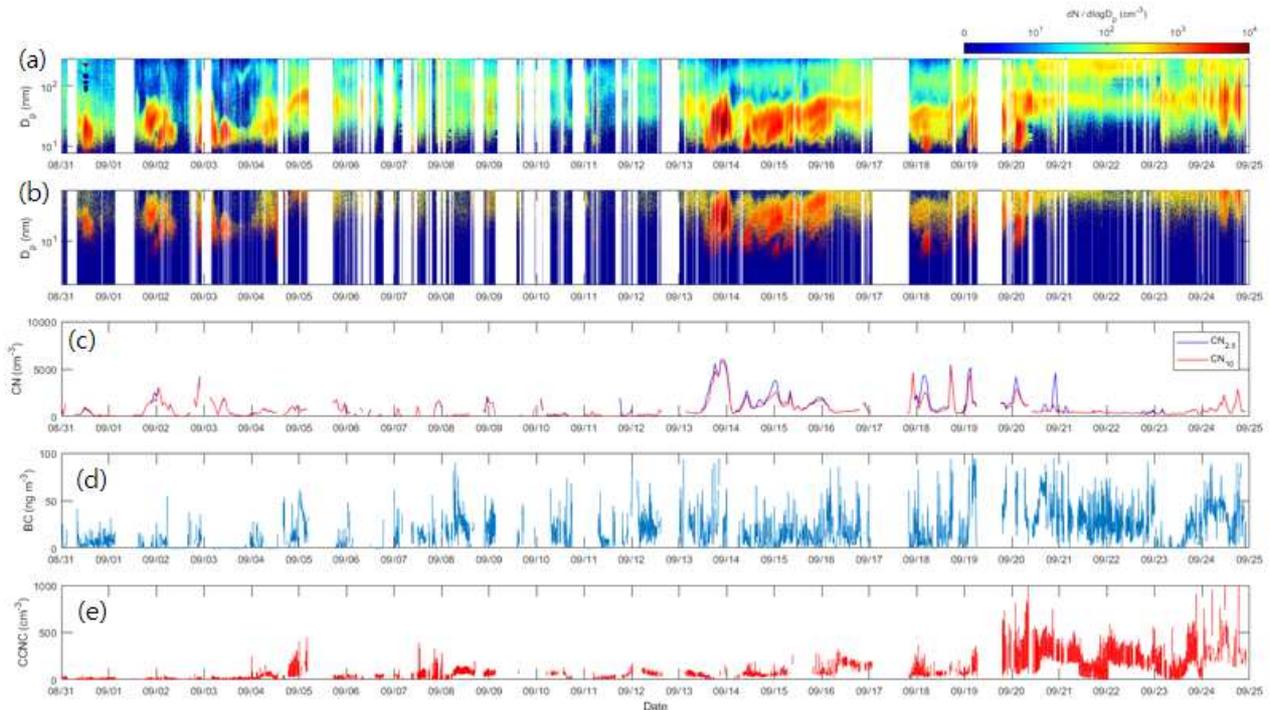


그림 3. 아라온 북극해와 태평양 항해 경로 중 (a와 b) 수농도 분포곡선, (c) 에어로졸의 총 수농도, (d) 블랙카본 농도, (e) 구름형성응결핵의 농도 실시간 모니터링 결과

○ 대기 중 나노입자 생성 이벤트 분류

- 대기 중 나노입자 생성 이벤트를 분류하기 위해서 아라온 북극해와 태평양 항해 경로 중 수농도 분포곡선과 공기역학적 결과 비교함 (그림 4).
- 8월 31일부터 9월 4일 기간 동안 공기역학적이 해양과 빙하에서 기원하였을 때 나노입자가 생성되었지만 성장이 나타나지 않았고, 9월 5일 공기역학적이 대륙에서 기원하였을 때 9월 4일 생성된 나노입자가 약 100 nm 까지 성장하는 것을 나타내었음.
- 반대로 9월 5일부터 9월 12일 기간 동안 공기역학적이 해양과 빙하에서 기원하였을 때는 나노입자와 생성 모두 관찰되지 않았고, 이는 공기가 해양과 빙하에서 기원할 때 입자가 항상 생성되는 것은 아니라는 것을 의미함.
- 9월 13일부터 9월 21일 까지 공기역학적이 주로 대륙에서 기원하였을 때 나노입자와 생성과 성장이 연속적으로 관측되었고, 이는 대륙에서 기원한 다양한 종류의 휘발성 가스들이 나노입자의 생성 및 성장에 영향을 미칠 수 있다는 것을 나타냄.
- 9월 20일 이후 공기역학적이 태평양에서 기원하였을 때 bimodal 형태로 나타났고 입자의 총 수농도가 매우 낮은 것을 확인하였고, 이는 공기가 해양에서만 기원하였을 때 나노입자가 생성 및 성장되지 않고, 상당히 큰 입자 (약 80 nm와 200 nm)가 생성되는 것을 제시함.

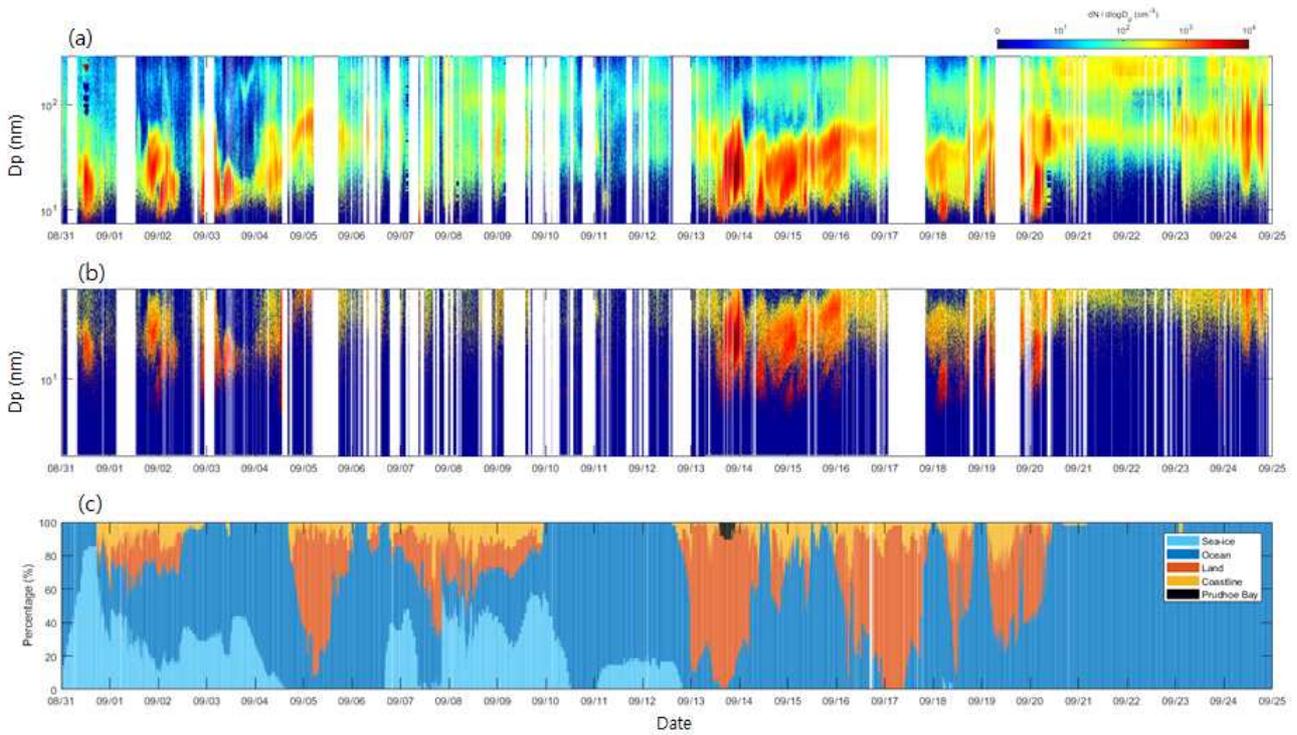


그림 4. 아라온 북극해와 태평양 항해 경로 중 (a와 b) 수농도 분포곡선과 (c) 공기역학적 분석 결과 비교

#### □ 북극 에어로졸의 화학적 특성 측정

##### ○ 나노입자 화학적 특성 분석 시스템 구축

- 아라온 항해 기간 동안 대기 입자 포집은 2017년 7월 21일부터 2017년 9월 28일까지 수행됨.
- 북극해 항해는 1) 한국에서 Nome까지 이동항해 (2017/07/21 - 2017/08/03), 2) Nome에서 Barrow까지 연구1항차(2017/08/06 - 2017/08/25), Barrow에서 Nome까지 연구2항차 항해 후 (2017/08/27-2017/ 09/16), Nome에서 다시 한국까지의 귀국항해(2017/09/17-2017/09/28)로 진행되었음.
- 대기 중 입자의 모양 및 원소성분 분석을 위해 2.5 $\mu$ m Cyclone sampler (그림 5) 를 사용하여 TEM Grid 위에 입자를 24시간 동안 포집하였고, 포집된 입자는 투과전자현미경을 사용하여 입자 형태 및 원소성분을 분석하였음.
- 따라서 2017년 아라온 항해를 태평양 (7월), 북극해 (외해), 북극해 (연안), 태평양 (9월)으로 나누어 대기 중 나노입자의 노양과 원소 성분을 분석 및 분류하였음.
- 추가적으로 동일 기간 동안 해양과 대기의 상호작용을 이해하기 위해서 표층수 해양 샘플링과 대기 중 에어로졸의 포집을 동시에 수행하였음.
- 바닷물 속 미생물의 수농도를 측정하기 위하여 표층수 바닷물을 샘플링 하였고, 대기 중 박테리아 포집을 위해 24시간 동안 버튼에어로졸샘플러 (Button aerosol sampler) (그림 5)가 사용되었음.
- 버튼에어로졸샘플러로 포집한 필터를 용액에 녹여 입자를 추출한 후, 형광염색 하여 형광현미경 방법으로 전체 박테리아 수농도를 카운팅 하였고, 해수 샘플링 방법 또한 대기 입자 분석 방법과 같이 분석함으로써 대기와 물 속 미생물의 수농도를 동시에 측정함.

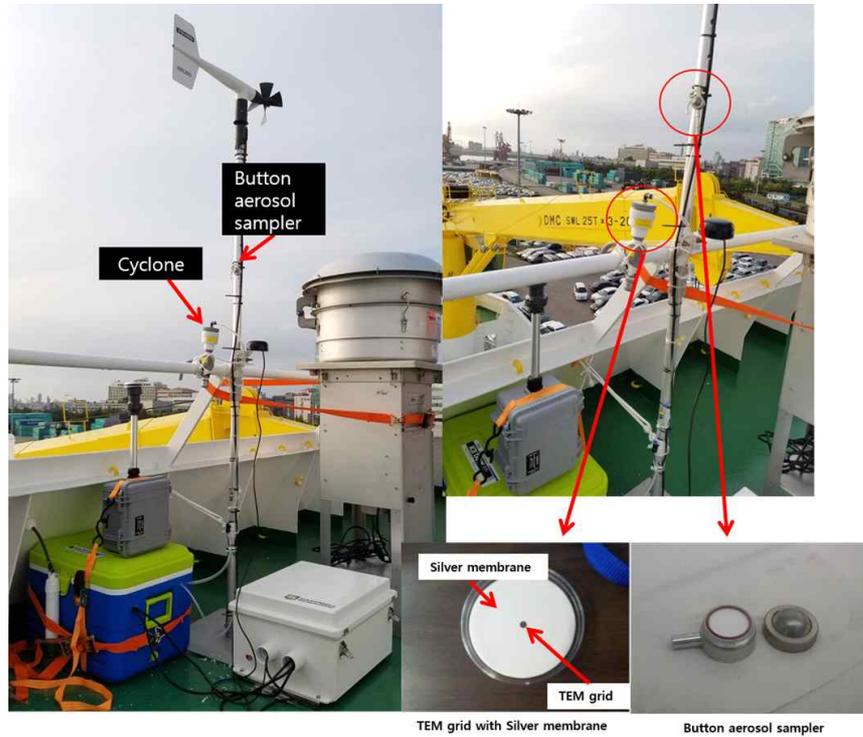


그림 5. 나노입자 화학적 특성 분석 시스템

○ 나노입자의 모양 및 원소성분 분석 결과

- 대기 중 나노입자는 모양 및 원소성분에 따라서 크게 8가지 입자로 분류됨 (그림 6).
- C rich 입자: 입자의 모양에 상관없이 (구형 또는 비구형) 입자로 EDS 분석에서 탄소가 매우 높은 비율로 나타나는 입자를 나타냄.
- 다른 종류의 원소를 포함하는 C rich 입자: 탄소성 입자에 다양한 종류의 원소 (Na, S, Cl, K 등)들이 섞여있는 상태로 존재하는 입자를 의미함.
- S rich 입자: 황은 휘발성이 매우 높기 때문에 TEM/EDS 분석 시 노출되는 높은 빔 때문에 기포들이 뭉쳐있는 반투명한 형태를 가지고, EDS 분석에서 황이 가장 높은 비율을 차지함. 이러한 특성을 나타내는 황 입자는 일반적으로 대기 중 가스상 물질들이 광화학 반응을 통해 입자로 변화는 과정을 통해 생성됨.
- Si rich 입자: 입자의 모양에 상관없이 지각을 구성하는 주요 성분이 Si를 포함하는 입자를 의미함.
- NaCl 또는 Na rich 입자: 바다 표면과 바람의 상호작용에 의해서 초래되는 물방울 파괴 메커니즘에 의해서 물 속 해양 염이 대기 중으로 직접적으로 배출됨으로써 생성되는 해양염 입자로 해양기원 입자의 지표로 사용될 수 있음.
- Metal rich 입자: Al, Fe 등과 같은 다양한 산화물을 포함하는 입자를 나타냄.
- P-containing 입자: 원소성분으로 미생물을 구성하는 인을 포함하고 둥근 막대모양을 하는 입자를 의미하며, 특히 해양 대기 관측에서는 물 속의 박테리아가 일차적 해양 에어로졸 생성 메커니즘에 의해서 대기 중으로 배출되면서 대기 중에 바이오 에어로졸로 부유할 가능성이 높음.
- 기타: 7가지 입자로 분류되지 않는 입자들을 총칭함.

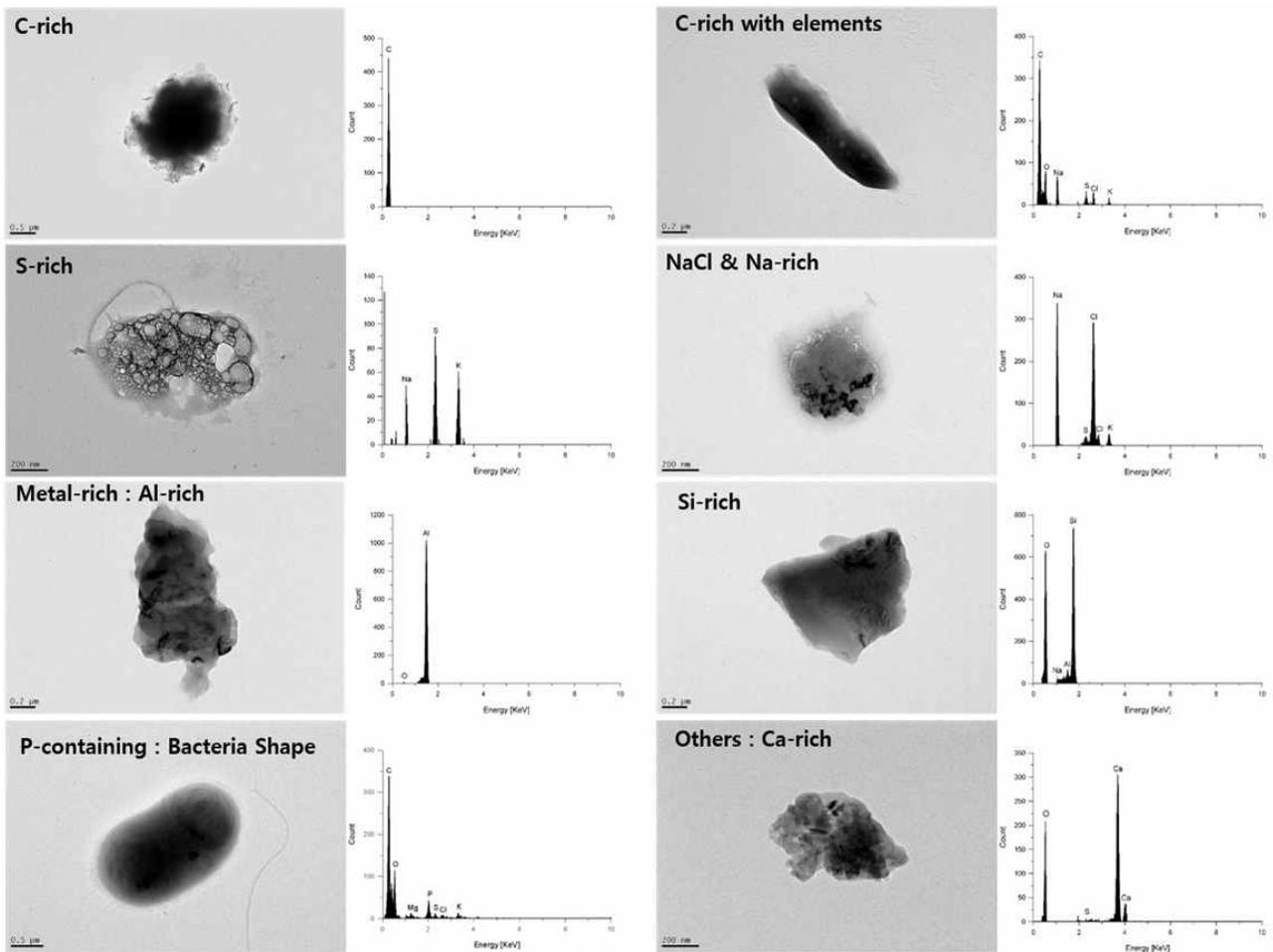


그림 6. TEM/EDS 로 분석한 대기 중 나노입자의 주요 모양 및 원소성분 분석

○ 나노입자의 모양 및 원소성분 분석 결과

- 대기 중 나노입자는 모양 및 원소성분에 따라서 크게 8가지 입자로 분류 (그림 6) 되었고, 각 사이트별로 분류된 나노입자의 모양 및 원소성분을 비교함 (그림 7).
- 7월 태평양 대기 샘플 (한국에서 Nome로 이동하는 항해), 북극해 외양 대기 샘플 (동시베리아 해 항해), 북극해 연안 대기 샘플 (보퍼트 해 항해), 9월 태평양 대기 샘플 (Nome에서 한국으로 이동하는 항해)에 대해 각각 135개, 64개, 178개, 103개의 나노입자의 모양 및 원소성분을 분석/비교하였음.
- 7월 태평양 항해 대기 샘플, 북극해 외양 대기 샘플, 북극해 연안 대기 샘플, 9월 태평양 대기 샘플에 대해서 8가지 종류의 입자가 모두 관찰되었음.
- 특히, C rich 나노입자는 태평양 항해 대기 샘플에서 상대적으로 높게 나타났고, 이는 태평양 사이트가 북극해 사이트보다 아시아 대륙의 영향을 강하게 받아서 발생한 인위적인 오염원으로 인한 입자들일 것으로 예상됨.
- S rich 입자는 9월 태평양 대기에서 17%로 상대적으로 매우 높은 비율을 나타내었고, 동 사이트인 7월 태평양 대기에서는 S rich 입자의 비율이 3%로 낮게 나타난 것에 대해서는 추가적인 연구가 필요함.
- P-containing 입자는 7월 태평양 대기와 북극해 외양 대기에서 상대적으로 높게 나타난 반면, 북극해 연안대기와 태평양 대기에서는 나타나지 않음.

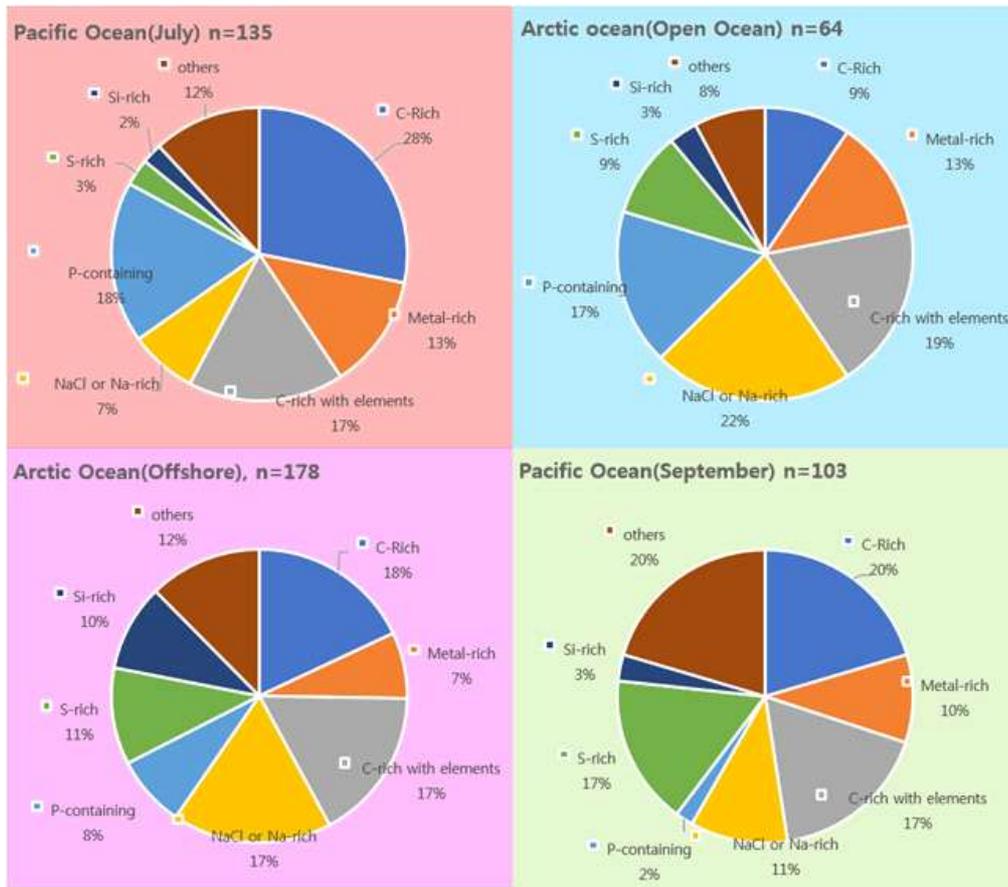


그림 7. 각 사이트별로 분류된 나노입자의 모양 및 원소성분을 비교

○ 나노입자의 모양 및 원소성분 분석 결과

- 대기 중 나노입자는 모양 및 원소성분에 따라서 크게 8가지 입자로 분류 (그림 6) 되었고, 각 사이트별로 분류된 나노입자의 모양 및 원소성분을 비교함 (그림 7).
- 7월 태평양 대기 샘플 (한국에서 Nome로 이동하는 항해), 북극해 외양 대기 샘플 (동시베리아 해 항해), 북극해 연안 대기 샘플 (보퍼트 해 항해), 9월 태평양 대기 샘플 (Nome에서 한국으로 이동하는 항해)에 대해 각각 135개, 64개, 178개, 103개의 나노입자의 모양 및 원소성분을 분석/비교하였음.
- 7월 태평양 항해 대기 샘플, 북극해 외양 대기 샘플, 북극해 연안 대기 샘플, 9월 태평양 대기 샘플에 대해서 8가지 종류의 입자가 모두 관찰되었음.
- 특히, C rich 나노입자는 태평양 항해 대기 샘플에서 상대적으로 높게 나타났고, 이는 태평양 사이트가 북극해 사이트보다 아시아 대륙의 영향을 강하게 받아서 발생한 인위적인 오염원으로 인한 입자들일 것으로 예상됨.
- S rich 입자는 9월 태평양 대기에서 17%로 상대적으로 매우 높은 비율을 나타내었고, 동 사이트인 7월 태평양 대기에서는 S rich 입자의 비율이 3%로 낮게 나타난 것에 대해서는 추가적인 연구가 필요함.
- P-containing 입자는 7월 태평양 대기와 북극해 외양 대기에서 상대적으로 높게 나타난 반면 북극해 연안대기와 태평양 대기에서는 나타나지 않았고, 해양과 대기의 상호작용에 의해서 대기 중으로 배출되는 미생물의 영향을 파악하기 위해서 정량분석을 수행함 (그림 8).

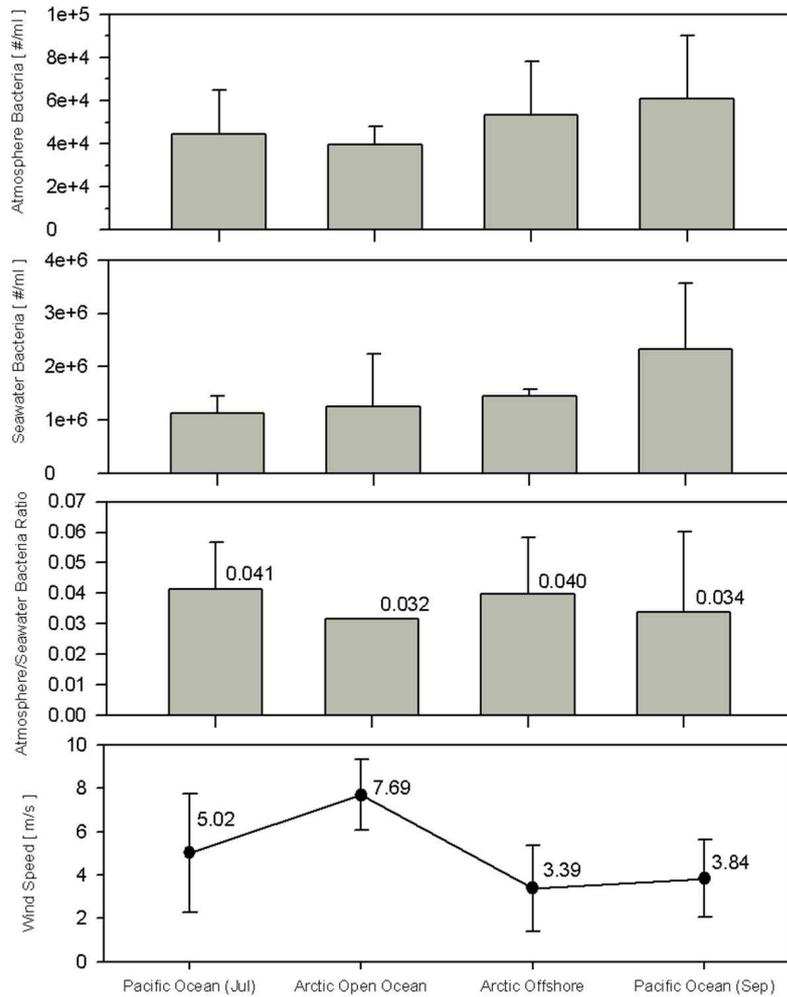


그림 8. 각 사이트별 (a) 대기 중 미생물 수농도, (b) 바닷물 속 미생물 수농도, (c) 대기와 해수의 수농도 비율, (d) 풍속

○ 해양-대기 상호작용 분석

- 해양 에어로졸은 해양 연안에서 생물학적 휘발성 유기 화합물에 의하여 생성되는 이차적 해양 에어로졸과 바다 표면과 바람의 상호작용에 의하여 초래되는 물방울의 파괴 메커니즘에 의하여 발생하는 일차적 해양 에어로졸 (sea spray 에어로졸)로 구분되며, 크게 Jet drop과 Film drop 두 가지로 나뉘어 짐.
- Film drop의 경우 물방울과 경계면 사이의 필름이 터지면서 발생하는 작은 물방울을 나타내며 대부분 서브마이크론 크기의 입자가 생성되는 반면, Jet drop의 경우 물방울이 터지면서 물방울 안에서 워터젯트가 수직으로 상승하면서 생성되는 물방울을 나타내며 주로 마이크론 크기의 입자가 생성됨.
- 일반적으로 바닷물은 용해성 물질 (해양 염과 용해성 유기물질)과 불용성 물질 (박테리아, 바이러스, 조류 및 이들의 사체, 점토광물 등)을 포함하고, 이들은 물방울 파괴 메커니즘에 의하여 물속에서 대기 중으로 직접적으로 배출됨.
- 이렇게 생성된 해양 에어로졸은 해양 염이 주요 구성성분 이지만, 특히 서브마이크론 크기 범위에서는 유기물질 또한 중요한 성분으로 고려되고, 기존 문헌에서는 바닷물의 생물학적 활동이

활발할 때, 불용성 유기 물질이 해양 입자 또는 일차적 해양 입자의 화학적 성분의 73%까지 차지한다고 보고된다 (O'Dowd et al., 2004; Facchini et al., 2008).

- P-containing 입자는 7월 태평양 대기과 북극해 외양 대기에서 상대적으로 높게 나타났고, 해양과 대기의 상호작용에 의해서 대기 중으로 배출되는 미생물의 영향을 파악하기 위해서 각 사이트별 대기 중 미생물 수농도, 바닷물 속 미생물 수농도, 대기와 해수의 수농도 비율, 풍속을 비교하였음 (그림 8).
- 바닷물과 대기 중 미생물의 수농도는 9월 태평양 대기 샘플에서 가장 높게 나타난 반면 (그림 8 (a)와 (b)), 대기 중 미생물과 바닷물 속 미생물의 비율은 7월 태평양 대기 샘플에서 가장 높게 나타남 (그림 8 (c)).
- 이는, TEM/EDS 분석에서도 7월 태평양 대기 샘플에서 P-containing 입자가 가장 높은 농도로 존재하는 것과 동일한 결과가 관찰되었고, 이는 7월 태평양 해양에서 P-containing 입자의 높은 비율이 해양-대기 상호작용에 의해서 발생했을 수 있다는 가능성을 제시함.



## 제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

가. 연구기간 : 총 1년 (2017.07.01. ~ 2018.06.30.)

나. 목표 달성도

총연구기간내 연차별 목표 대비 달성율(%)					
구분	연차별 달성내용				연차별 계획대비 연구실적 달성율(B) (%)
	세부연구목표	연구내용	가중치 (A)	달성실적	
1년차 (2017)	북극해 항해 경로 중 나노입자의 크기에 따른 수농도 분포곡선 실시간 모니터링	- nano SMPS와 SMPS를 이용하여 대기 중 나노입자의 수농도 분포곡선 모니터링	0.5	- 북극해와 태평양 해 대기 중 나노입 자의 실시간 수농도 분포곡선 자료 획득	100
	나노입자의 모양 및 원소성분 파악	- 사이클론 샘플러를 이용한 대기 중 나노입자 필터 포집 - TEM/EDS를 이용하여 포집된 나노입자의 모양 및 원소성분 분석	0.3	- 대기 중 나노입자는 모양 및 원소성 분에 따라서 크게 8가지 입자로 분 류 - 각 사이트별 (태평양, 북극해 외양, 북극해 연안) 나노입자 모양/원소성 분 비교	100
	다양한 기상학적 자료를 활용한 나노입자 이벤트 분류	- 공기역학적 분석 - 공기역학에 따른 나노입자 생성 및 성장 특성 파악	0.2	- 북극해 대기 중 나노입자의 성 장 및 성장 특성 이해 - 공기역학적 (해양 기원, 빙하기원, 대 륙기원) 에 따른 나노입자의 생성 및 성장 특성 파악 규명	100
	계		1.0		100

다. 대외기여도

(1) 과학 분야

- 기존 대기환경에서 사용하던 입자측정 및 분석 장치와 더불어 북극항해경로 중 나노입자의 종합적 분석이 가능하고 한 단계 업그레이드된 나노입자 모니터링 시스템 구축.
- 북극 항해 경로 중 다양하게 존재하는 나노입자로 인한 환경적 피해를 최소화를 위한 실시간 모니터링기술 개발에 기여.

(2) 사회/경제적 분야

- 북극 항해 경로 중 나노입자의 대표적인 구성요소 및 발생원을 파악함으로써 기후변화 영향을 주는 에어로졸 측정 자료 및 결과 확보.

## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

### 가. 연구개발결과의 국제 사회 활용 방안

본 연구에서 도출된 결과의 국제 학회 발표 및 논문화

### 나. 연구개발결과의 추후 연구 활용 방안

- 나노입자의 샘플링 사이트 및 시간별 특성을 규명하여 향후 입자 저감 계획 수립에 활용될 것으로 기대.
- 기존의 입자 측정 및 분석 장치와 더불어 대기 중 오염물질인 나노입자의 종합적인 분석 가능.
- 한 단계 발전된 나노입자 통합 모니터링 시스템 구축가능.
- 아라온 북극해 항해 경로에 따른 대기 중 나노입자의 모양 및 원소성분 분석에 대한 데이터베이스 확보.
- 아라온 북극해 항해 경로에 따른 대기 중 나노/극초미세/초미세 입자의 크기에 따른 수농도 분포 데이터베이스 확보.

## 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

해당사항 없음

## 제 7 장. 참고문헌

- Chang, R. Y. W., Leck, C., Graus, M., Müller, M., Paatero, J., Burkhardt, J. F., Stohl, A., Orr, L. H., Hayden, K., Li, S. M., Hansel, A., Tjernström, M., Leaitch, W. R., and Abbatt, J. P. D. (2011). Aerosol composition and sources in the central Arctic Ocean during ASCOS. *Atmos. Chem. Phys.*, 11 (20), 10619–10636.
- Facchini, M. C., Rinaldi, M., Decesari, S., Carbone, C., Finessi, E., Mircea, M., Fuzzi, S., Ceburnis, D., Flanagan, R. and Nilsson, E. D. (2008). Primary Submicron Marine Aerosol Dominated by Insoluble Organic Colloids and Aggregates. *Geophys. Res. Lett.*, 35(L17814), doi:10.1029/2008GL034210.
- Kim, G., Cho, H.-j., Seo, A., Kim, D., Gim, Y., Lee, B. Y., Yoon, Y. J., and Park, K. (2015) Comparison of Hygroscopicity, Volatility, and Mixing State of Submicrometer Particles between Cruises over the Arctic Ocean and the Pacific Ocean. *Environ Sci. Technol.* 49, (20), 12024–12035.
- O’Dowd, C. D., Facchini, M. C., Cavalli, F., Ceburnis, D., Mircea, M., Decesari, S., Fuzzi, S., Yoon, Y. J. and Putaud, J.-P. (2004). Biogenically Driven Organic Contribution to Marine Aerosol. *Nature*, 431, 676 - 680, doi:10.1038/nature02959.





### 주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

