TSPN15081-080-12

북극해 에어로졸 특성 연구 및 동토자료 비교

Characterization of aerosols over the Arctic Ocean and comparison of permafrost data

KOPRI
극지연구소

광주과학기술원

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “환북극 동토층 환경변화 관측시스템 원천기술 개발 및 변화 추이에 관한 연구”과제의 위탁연구“북극해 에어로졸 특성 연구 및 동토자료 비교”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2016. 07. 15

(본과제) 총괄연구책임자 : 이 방 용

위탁연구기관명 : 광주과학기술원

위탁연구책임자 : 박 기 홍

위탁참여연구원 : 김 기 백

“ : 조 희 주

“ : 이 희 성

“ : Ka Yan Chong

“ : 강 민 수

“ : 채 호 승

“ : 김 도 형

“ : 서 아 롬

“ : 맹 현 옥

KOPRI 극지연구소

보고서 초록

위탁연구과제명	북극해 에어로졸 특성 연구 및 동토자료 비교				
위탁연구책임자	박 기 홍	해당단계 참여연구원수	9 명	해당단계 연구비	150,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	광주과학기술원/지구·환경공학부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		

요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)	보고서 면수	40

- 쇄빙연구선 아라온호의 (ARAON) 11,937 km 연구항해 구간을 따라 북극해와 태평양상에서 에어로졸의 다양한 물리화학적 특성 연속 측정 및 비교 분석.
- 에어로졸 크기에 (nm) 따른 수농도 (#/cm3) 분포 특성 (number size distribution), 흡습성 (hygroscopicity), 휘발성 (volatility), 혼합상태 (mixing state), 입자의 형태 (particle morphology) 및 원소성분 (elemental composition) 등 다양한 에어로졸 특성들을 종합적으로 분석.
- 활발한 Oceanic biological activity에 의한 Organic compounds가 새로운 입자 생성 및 성장에 중요한 역할을 하는 것을 규명.
- 에어로졸이 기후변화에 미치는 영향 파악.
- 에어로졸의 발생원과 생성기작 및 이동특성 분석.
- Air mass에 따른 에어로졸의 number size distribution 특성 변화 확인.
- Continental/anthropogenic source 영향에 의해 에어로졸의 질량 및 BC (black carbon) 농도 증가 확인.
- 북극해, 태평양, 그리고 동토층에서 획득한 에어로졸 물리화학적 특성 데이터 비교 분석.
- 계절적인 기온상승, 대기정체 경향, 태양 복사 등의 요소와 NPF (new particle formation) event의 상호관계 연구.
- 광범위 에어로졸 모니터링망 구축을 위한 기본 데이터 산출.

KOPRI 극지연구소

색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	북극 에어로졸, 흡습성, 휘발성, 혼합상태, 입자생성, 입자성장, 이동경로, 기후변화.
	영 어	Arctic aerosol, hygroscopicity, volatility, mixing state, particle formation, particle growth, transport pathway, climate change.

요 약 문

Ⅰ. 제 목

북극해 에어로졸 특성 연구 및 동토자료 비교

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

북극은 지구기후변화에 민감하게 영향을 받으며 연구적으로 지구상에서 중요한 장소로 여겨지고 있다. 북극에서 연간 평균 온도가 가장 큰 폭으로 상승된 것이 관측되었으며 증가한 온실가스 농도와 Arctic ozone budget 변화 뿐 아니라 인위적인 활동으로 인하여 발생된 Light-absorbing 에어로졸들이 북극까지 이동하여 북극의 온난화 문제를 야기시킬 수 있다고 보고되어지고 있다. 인위적 발생 에어로졸들은 북극지역의 대기나 눈과 얼음에서 발견될 뿐 아니라 Arctic Haze라고 알려진 가시거리 감소현상의 원인이 되고 있다. 최근 Arctic sea ice가 줄어들고 있는 상황으로 인하여 북극 에어로졸 특성이 해양조건에 따라 더욱 밀접하게 영향을 받을 수 있게 되었기 때문에 이들의 관계를 이해하는 데에 있어 그 중요성이 더욱 부각되고 있다. 비록 북극 에어로졸의 Number size distribution 측정과 비실시간 화학적/형태학적 연구가 선행되었었지만 이러한 연구들만으로는 에어로졸의 발생원, 생성기작, 이동경로, 그리고 기후변화에 미치는 영향을 충분히 이해하기에는 무리가 따르고 있는 상황이다. 따라서 본 연구에서는 북극에어로졸에 대한 이해도를 높이고 기존 연구의 한계점을 극복하기 위해서 북극에어로졸의 크기분포, 흡습성, 휘발성, 혼합상태, 화학적 원소성분 등과 같은 다양한 물리화학적인 특성들을 연속 측정하고 북극해와 동토층 현장에서 획득한 에어로졸 특성 측정 데이터들을 비교 분석하였다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

2013년 9월 7일부터 2013년 10월 13일까지의 쇄빙연구선 아라온 항해 경로를 따라 (북극해, 태평양, 동해) 에어로졸의 Number size distribution, 흡습성 (hygroscopicity), 휘발성 (volatility), 혼합상태 (mixing state), 형태학적 특성 (morphological property), 화학적 원소성분 (elemental composition) 등을 측정하여 다양한 에어로졸의 물리화학적 특성을 종합적으로 분석하였다. 그리고 2015년 4월 1일부터 2015년 8월 31일까지 북극 다산기지에 근접한 Gruvebadet 대기 관측소에서 에어로졸 크기분포, 형태학적 특성, 화학적 원소성분을 측정하여 북극해와 동토층에서 획득한 에어로졸 특성 관측 자료들을 비교분석하였다. 에어로졸이 지구

기후변화에 미치는 영향을 연구하였으며 에어로졸의 발생원과 생성기작 및 이동특성 등을 분석하였다. 측정된 자료들을 활용하여 인위적 또는 자연발생적 에어로졸 특성을 분리하였고 광범위 에어로졸 모니터링망 구축을 위한 기본 데이터를 산출하였다.

구 분	연 구 내 용
2단계 1차년도(2013)	쇄빙연구선 아라온의 항해구간을 따라 흡습성, 휘발성, 혼합상태 등 다양한 에어로졸의 물리화학적 특성 집중 측정
2단계 2차년도(2014)	에어로졸의 물리화학적 특성 데이터 비교 분석
2단계 3차년도(2015)	북극 에어로졸 크기(나노입자)와 수농도 연속적 장기측정, 화학적 원소성분 및 형태학적 특성 연구 수행

Ⅳ. 연구개발결과

북극해와 (Cruise 1) 태평양상에서 (Cruise 2) 아라온 항해경로에 (11,937 km) 따른 에어로졸 특성 변화를 모니터링 하였다. Cruise 1에서 빈번한 입자 생성 이벤트가 관측되었다. Air mass에 따른 에어로졸의 Number size distribution 변화와 함께 Continental/anthropogenic source 영향에 의해 입자 질량과 BC 농도가 증가하는 경향을 확인하였다. 에어로졸의 흡습성과 휘발성 그리고 Chlorophyll-a 농도 측정 데이터를 종합적으로 분석한 결과 해상에서의 Biological organic compound들이 입자 생성과 성장에 중요한 역할을 하는 것으로 밝혀졌다. 에어로졸 특성 연속 모니터링 기간 동안 Internal mixing 상태가 주로 발견되었으며 간헐적으로 External mixing 상태가 관측되었다. TEM/EDS를 이용한 형태학적 및 화학적 구성성분 분석을 통하여 에어로졸들은 크게 C-rich mixture, S-rich mixture, C/S-rich mixture, Na-rich mixture, C/P-rich mixture, 그리고 Mineral-rich mixture로 구분이 되었다. Gruvebadet 대기관측소에서 Number size distribution이 측정되었으며 새로운 입자 생성 이벤트들이 (New particle formation event) 관측되었다. 기온상승으로 인한 입자 생성관련 전구물질 배출량 증가, 대기정체 경향, 태양복사와 같은 요소들이 새로운 입자 생성 이벤트에 영향을 주는 것으로 확인이 되었다.

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

북극해 및 동토층 에어로졸 입자의 종합적인 특성자료를 제공하며 에어로졸의 발생원, 생성경로, 물리적/화학적 변화, 이동경로 등을 파악하고 에어로졸의 기후변화 역할을 규명하는데 필요한 정보와 향후 극지 대기오염물질 모니터링 네트워크 구축을 위한 기본 자료를 제공할 예정이다. 미세입자의 종합적 특성을 실시간으로 측정하여 입자로 인한 환경적, 경제적 피해 최소화를 위한 실시간 감시기술과 경보기술에 활용될 것으로 기대되며 나노물질의 화학적 성분 실시간 감시로 자연계 내의 매체 간 이동과 거동 및 환경영향 파악에 활용할 예정이다.

한반도에 발생하거나 또는 동아시아 장거리 이동 에어로졸입자 (황사입자)의 대기 중 거동 실시간 파악 및 국제 환경협약 및 대책 수립에 필요한 자료를 제공할 것으로 기대된다.

KOPRI
극지연구소

S U M M A R Y

I. Title

Characterization of aerosols over the Arctic Ocean and comparison of permafrost data

II. Purpose and Necessity of R&D

The Arctic is a critical region of the earth that is highly sensitive to small environmental changes in the Earth's climate due to its complex feedback system. The largest increase in an annual mean temperature was observed in the Arctic. This warming trend may be explained by a global increase in the greenhouse gas concentration or changes in the Arctic ozone budget and transport of anthropogenic light-absorbing particles from the lower latitudes. Anthropogenic aerosols that cause the reduction of visibility known as the Arctic Haze have been observed in the Arctic atmosphere, snow, and ice. The extent of Arctic sea ice has decreased during the last few decades, leading to the increasing importance of the marine influence on the Arctic aerosols. Although measurements of number size distribution and chemical/morphological analysis of the Arctic aerosols were previously conducted, various physicochemical properties of aerosols such as number size distribution, hygroscopicity, volatility, and mixing state, elemental composition, etc. should be extensively investigated to better understand aerosols' sources, formation mechanism, transport pathway, and their effects on climate change. In this study, main objectives are to determine various physicochemical properties of the Arctic aerosols and to compare measurement data obtained from the Arctic ocean and permafrost.

III. Contents and Extent of R&D

Aerosols' number size distribution, hygroscopicity, volatility, mixing state, morphological property, elemental composition, etc. were extensively investigated on board the ARAON ice breaker ship over the Arctic Ocean, the Pacific Ocean and East sea (9/7/2013-10/13/2013). In addition, the measurements of number size distribution, morphology and elemental composition of aerosols were made at the

Gruvebadet station that is located near Dasan Korean Arctic station (4/1/2015-8/31/2015). Aerosol measurement data obtained from the Arctic ocean and Permafrost were compared. Research on climate change was conducted using hygroscopicity data measured in this study. The sources, formation mechanism, transport pathway of aerosols were examined. Based on the data, aerosol properties emitted from natural and anthropogenic sources were classified and then characterized. Basic data for construction of extensive aerosol monitoring network were produced.

IV. R&D Results

Ship-borne measurements (ARAON ice breaker ship) of ambient aerosols were conducted during an 11,937 km cruise over the Arctic Ocean (cruise 1) and the Pacific Ocean (cruise 2). A frequent nucleation event was observed during cruise 1 under marine influence. The number size distribution varied according to air mass. Concentrations of particle mass and black carbon increased with increasing continental influence from polluted areas. Based on the measurement data of hygroscopicity and volatility of aerosols with chlorophyll-a concentration data (a possible indicator of biological activity over the ocean), we concluded that biological organic compound can play an important role in the formation of new particles and their growth to a detectable size. The fraction of submicrometer particles having an external mixing state was small. Most of them were internally mixed. On the basis of elemental composition and morphology, the submicrometer particles were classified into C-rich mixture, S-rich mixture, C/S-rich mixture, Na-rich mixture, C/P-rich mixture, and mineral-rich mixture. Number size distribution of aerosols was measured at the Gruvebadet station and new particle formation event was observed. Data suggest that Several factors such as increased emissions of particle formation precursor due to temperature rise, air stagnation, solar radiation can affect new particle formation event.

V. Application Plans of R&D Results

Data of aerosol characteristic obtained from the Arctic ocean and permafrost can be provided. Aerosol sources, formation mechanism, physical/chemical changes, transport pathway, etc can be determined. Information on the role of aerosols in climate change and basic data for construction of the monitoring network of the air pollutants in the Arctic can be provided. Real-time measurement of comprehensive characteristics of fine particles can contribute to development of real-time monitoring and early warning technology in order to minimize environmental and

economical damages caused by particles. In addition, real-time monitoring of chemical composition of nano materials can be useful to determine their behavior/transport process between the media in nature and their environmental impacts. The behavior of aerosols, which are formed in Korean peninsula or long range transported, can be identified in real time. Thus, the data obtained through this study can contribute to international countermeasure and environmental agreement.

KOPRI
극지연구소

C O N T E N T S

Chapter I. Introduction

Chapter II. International and domestic tend 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

KOPRI
극지연구소

목 차

제 1 장 서론

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 6 장 참고문헌

KOPRI
극지연구소

제 1장 연구개발과제의 개요

제 1절 연구개발 목적 및 필요성

북극은 지구기후변화에 민감하게 영향을 받으며 연구적으로 지구상에서 중요한 장소로 여겨지고 있다 (Behrenfeldt, Krejci et al. 2008). 북극에서 연간 평균 온도가 가장 큰 폭으로 상승된 것이 관측되었으며 최근 백년간의 통계에 따르면 북극에서의 warming rate은 지구상의 다른 지역들과 비교하였을 때 약 두 배 가량 높은 수치를 기록하였다. 이러한 근거 자료들은 북극에서의 기후변화 관련 연구 자료들이 global scale의 기후변화를 예측하는 데에 활용될 수 있음을 뒷받침하고 있다 (ACIA 2005;Law and Stohl 2007;Behrenfeldt, Krejci et al. 2008).

최근의 온난화 경향은 증가한 온실 가스농도 혹은 Arctic ozone budget의 변화로 설명될 수 있으며 (Law and Stohl 2007;Shindell, Faluvegi et al. 2009) 인위적인 활동으로 인하여 발생된 light-absorbing 에어로졸들 역시 북극까지 이동하여 북극의 온난화 문제를 야기 시킬 수 있다고 보고되어지고 있다 (Hansen and Nazarenko 2004;Serreze and Barry 2011). 에어로졸은 태양 빛을 흡수 및 산란시킬 뿐 아니라 구름형성응축핵 (CCN: cloud condensation nuclei)으로도 작용하여 구름형성 프로세스에도 관여할 수 있기 때문에 지구상의 radiation balance에 밀접하게 영향을 미치게 되며 그 영향력은 에어로졸의 크기, 혼합상태, 수분량, 화학적 조성에 따라 달라지게 된다. 북극지역의 대기나 눈과 얼음에서 인위적인 활동으로 인하여 발생한 에어로졸들이 발견되었으며 특히 봄철에는 증가한 에어로졸들로 인하여 Arctic Haze라고 알려진 가시거리 감소현상이 빈번하게 관측되고 있다. 이러한 Arctic Haze는 인위적인 활동으로 발생한 에어로졸들이 저위도 대륙에서 (예, northern Eurasia) 북극까지 이동하는 것이 원인이 된다고 보고된 바 있다 (Hirdman, Burkhart et al. 2010;Frossard, Shaw et al. 2011). 북극에서의 여름철은 봄철과 달리 오염물질들이 북극까지 도달하는 경향이 약해지며 줄어드는 Combustion event와 강한 Vertical mixing 등으로 인하여 상대적으로 양호한 대기상태가 관찰된다 (Browse, Carslaw et al. 2012). 최근 Arctic sea ice가 줄어들고 있는 상황으로 인하여 북극 에어로졸 특성이 해양조건에 따라 더욱 밀접하게 영향을 받을 수 있게 되었으며 따라서 이들의 관계를 이해하는 데에 있어 그 중요성이 더욱 부각되고 있다.

북극 에어로졸의 특성을 이해하기 위해서 북극 에어로졸의 Particle number size distribution 측정과 비실시간 화학적/형태학적 연구가 선행되었었지만 이러한 연구들만으로는 북극 에어로졸의 발생원과 형성경로 그리고 기후변화에 미치는 영향을 충분히 이해하기에는 무리가 따르는 상황이다. 따라서 본 과제에서는 북극 에어로졸에 대한 이해도를 높이고자 북극 에어로졸의 크기에 따른 흡습성, 휘발성, 혼합상태, 그리고 Particle size distribution 등과 같은 다양한 물리화학적 특성들을 현장에서 연속 측정하고 데이터 분석을 수행하였다.

제 2절 연구개발의 추진체계

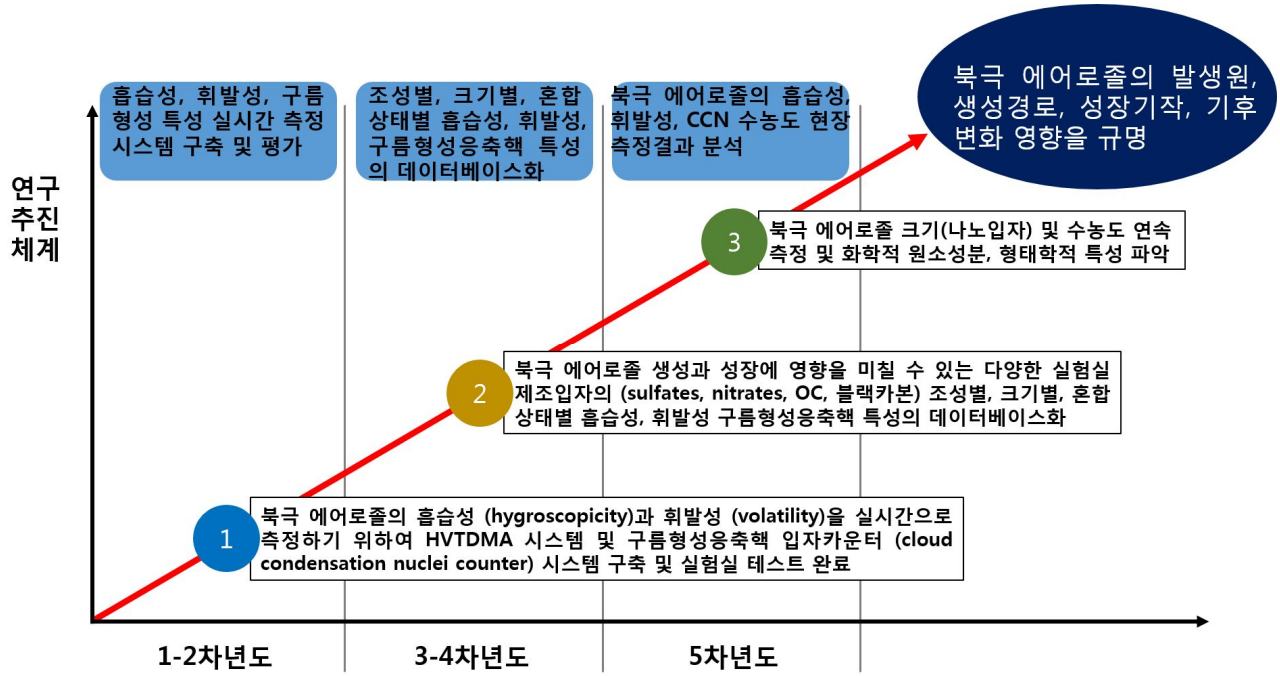


그림 1. 연도별 연구추진체계.

KOPRI
극지연구소

제 2장 국내외 기술개발 현황

제 1절 국내외 기술개발 및 연구 현황

본 연구와 관련된 국내외 기술개발현황은 개념정립 단계이며 국내에서 북극 에어로졸의 연구는 극지연구소에서 남극 세종기지에서 주로 수행되었지만 대기 중 입자들의 수농도 변화에 대한 연구에 국한되었었다. 하지만 입자들의 수농도 변화 측정을 가지고는 입자들의 생성원, 성장기작, 화학적 특성 등을 명확하게 이해하는데 어려움이 있고 북극 에어로졸의 기후변화 영향을 파악하기에 무리가 따른다. 본 연구와 관련된 에어로졸의 흡습성, 휘발성, 혼합상태 등과 같은 다양한 물리화학적 특성들을 실시간으로 동시 측정하는 연구는 국내에서 전무하다고 할 수 있다.

표 2. 국내외 연구현황 개요.

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

KOPRI
극지연구소

제 3장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1절 연구내용

2013년 9월 7일부터 2013년 10월 13일까지 총 11,937 km에 달하는 아라온의 항로 구간을 따라 북극해와 태평양 상에서 변화하는 에어로졸의 다양한 물리화학적 특성들을 DMPS (differential mobility particle sizer), CPC (condensation particle counter), HVTDMA (hygroscopicity and volatility tandem differential mobility analyzer), TEM/EDS (transmission electron microscopy/energy dispersive spectroscopy), Aethalometer 등 다수의 측정 장비를 이용하여 연속 측정하였다. 그리고 Ny-Ålesund (78.6° N, 11.6° E), Svalbard Island에 위치한 Gruvebadet 대기관측소에서 Nano-SMPS (scanning mobility particle sizer)를 이용하여 3 nm 에서 60 nm 범위의 에어로졸 크기에 따른 수농도 분포특성을 2015년 4월 1일부터 2015년 8월 31일까지 실시간 연속 모니터링 하였고 TEM/EDS를 이용한 형태학적 및 화학적 원소 구성성분 특성 연구를 수행하였다. 다양한 에어로졸의 물리화학적 특성 측정 데이터들을 HYSPLIT MODEL (air mass back trajectory)을 이용하여 획득한 장거리이동 에어로졸 특성 데이터들과 비교분석하였으며 에어로졸의 발생원, 생성기작, 이동경로, 기후변화 영향을 연구하였다.

KOPRI
극지연구소

제 2절 연구결과

극지연구소 쇄빙연구선 아라온호에 (ARAON) 아래 그림과 같이 DMA (differential mobility analyzer), RH conditioner, heated tube, CPC 3010, NI board, computer로 구성된 HVTDMA system과 Aethalometer, CPC 3772, CPC 3776, 그리고 TEM sampler등을 이용하여 다양한 물리화학적 에어로졸 특성 데이터들을 획득하였다.

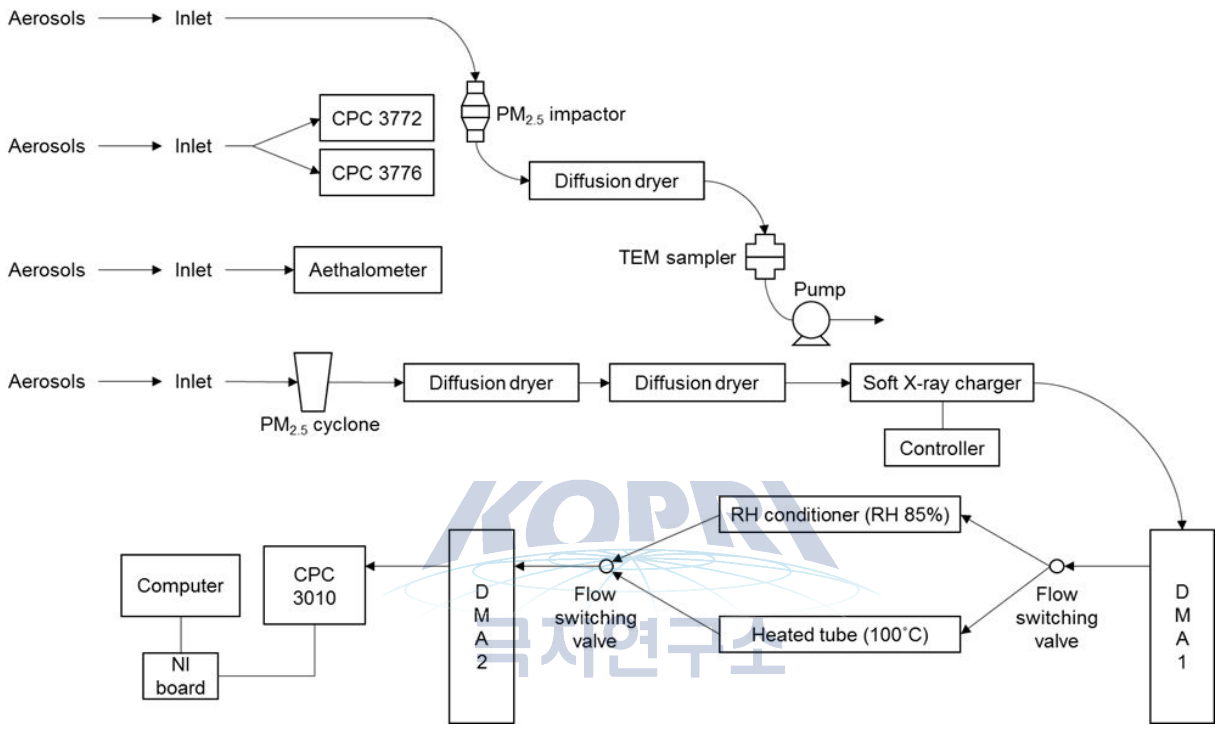
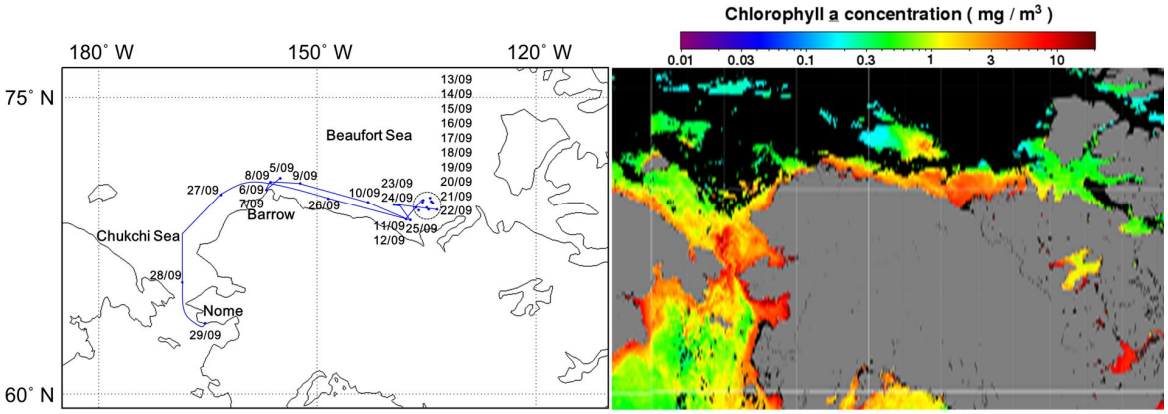


그림 2. 아라온에 설치하여 운용 된 에어로졸 특성 측정 시스템 개략도.

아라온의 항로는 각각 Cruise 1 (북극해: 2013년 9월 7일~2013년 9월 29일)과 Cruise 2 (태평양: 2013년 9월 29일~2013년 10월 13일)로 구분하였다. Cruise 1의 항해거리는 5,862 km 이며 Cruise 2의 항해거리는 6,075 km로 총 11,937 km에 달하는 아라온의 항로를 따라 북극해와 태평양 상에서의 에어로졸 특성 변화들을 측정하였다. 아라온은 Cruise 1 구간에 Barrow를 출발하여 Beaufort Sea와 Chukchi Sea를 거친 뒤 Nome에 도착하였고 Cruise 2 구간에서는 Nome을 출발하여 Bering Sea, Sea of Okhotsk, East Sea를 지나 대한민국 광양항에 도착하였다. 아라온의 항해구간과 함께 나타낸 Biological activity의 척도로 사용할 수 있는 Chlorophyll-a 농도 위성데이터를 (http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/) 바탕으로 Cruise 2와 비교하였을 때 Cruise 1 구간에서 상대적으로 강한 Biological activity 상태를 확인하였다.

(a)



(b)

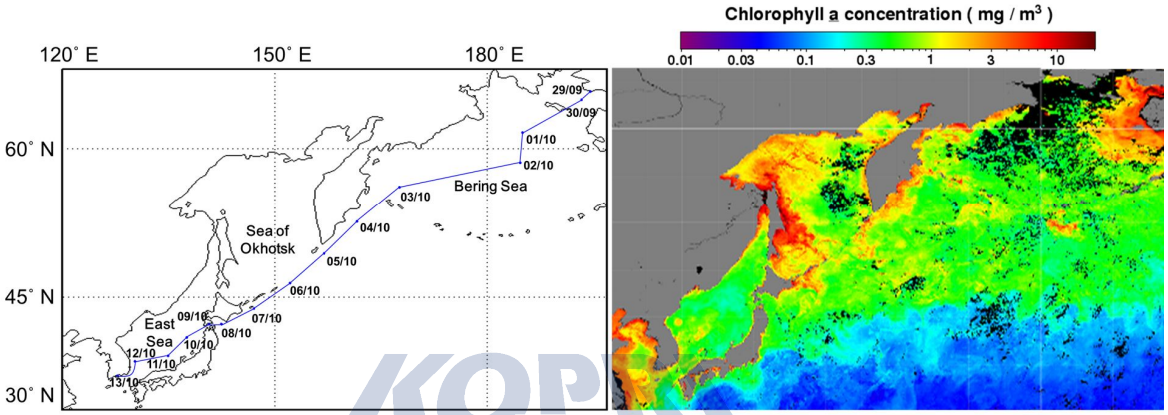


그림 3. (a) 북극해와 (cruise 1) (b) 태평양 (cruise 2)에서의 쇄빙연구선 아라온 항로 및 chlorophyll-a 농도 (mg/m^3) 위성 데이터.

입자생성 이벤트는 (nucleation event) 두 대의 CPC를 (CPC 3772, CPC 3776) 이용하여 모니터링 하였다. 측정에 사용된 CPC 3776은 크기가 2.5 nm 이상의 에어로졸 수농도를 측정할 수 있으며 반면 CPC 3772는 크기가 10 nm 이상의 에어로졸 수 농도를 측정할 수 있다. 따라서 위 두 대의 CPC 수농도 측정결과 차이는 크기가 2.5 nm에서 10 nm 범위의 에어로졸 수농도를 의미하며 nucleation event를 확인할 수 있는 데이터로 활용하였다. 대기 중 BC (black carbon) 농도를 (ng/m3) 측정하기 위해서 Aethalometer (AE22, Magee Scientific Co., USA)를 사용하였으며 풍향과 풍속 자료와 함께 Ship emission 혹은 Anthropogenic source의 영향을 판단하는 자료로써 활용이 되었다.

아래 그림은 관측기간 동안 2.5 nm 이상의 에어로졸 수농도와 2.5 nm-10 nm 범위의 수 농도 그리고 BC 농도의 변화를 나타낸 자료이다. Cruise 1 구간에서 급격한 2.5 nm와 10 nm 사이의 에어로졸 수농도 증가를 확인할 수 있으며 이는 cruise 1 구간에서의 빈번한 Nucleation event를 의미한다. Cruise 1 구간에서 상대적으로 낮은 BC 평균 농도가 (20 ng/m3) 측정되었는데 이는 Anthropogenic source로 인한 영향이 매우 적기 때문으로 사료된다. 선행연구에서는 Remote marine 지역보다 Coastal 지역에서 입자생성 이벤트가 자주 발견이 되며 (Heintzenberg, Leck et al. 2004;Yoon, O'Dowd et al. 2006;Modini, Ristovski et al. 2009;Whitehead, McFiggans et al. 2009) Remote marine 지역에서는 Iodine compounds와 Sulfuric acid에 의한 입자생성과 성장은 가능하지만 일부분만 큰 입자로 성장이 가능하다고 밝히고 있다 (Vuollekoski, Kerminen et al. 2009). 측정기간 동안 Remote marine 지역에서 관측된 Nucleation event들은 해당 구간에서의 (Cruise 1) 활발한 Biological activity와 관련된 것으로 판단된다. 활발한 Biological activity에 의한 Organic matter의 경우 입자생성과 성장에 기여할 수 있으며 특히 이러한 입자들은 구름형성 응축핵 (CCN) 발생에 있어서도 중요한 역할을 할 수 있다. Cruise 2의 경우 Cruise 1 (Marine influence)과 달리 빈번한 Continental influence가 관찰되었고 오직 1회의 Nucleation event가 관측되었으며 Continental/anthropogenic influence에 의해 에어로졸 질량과 BC 농도가 점차 증가하였다.

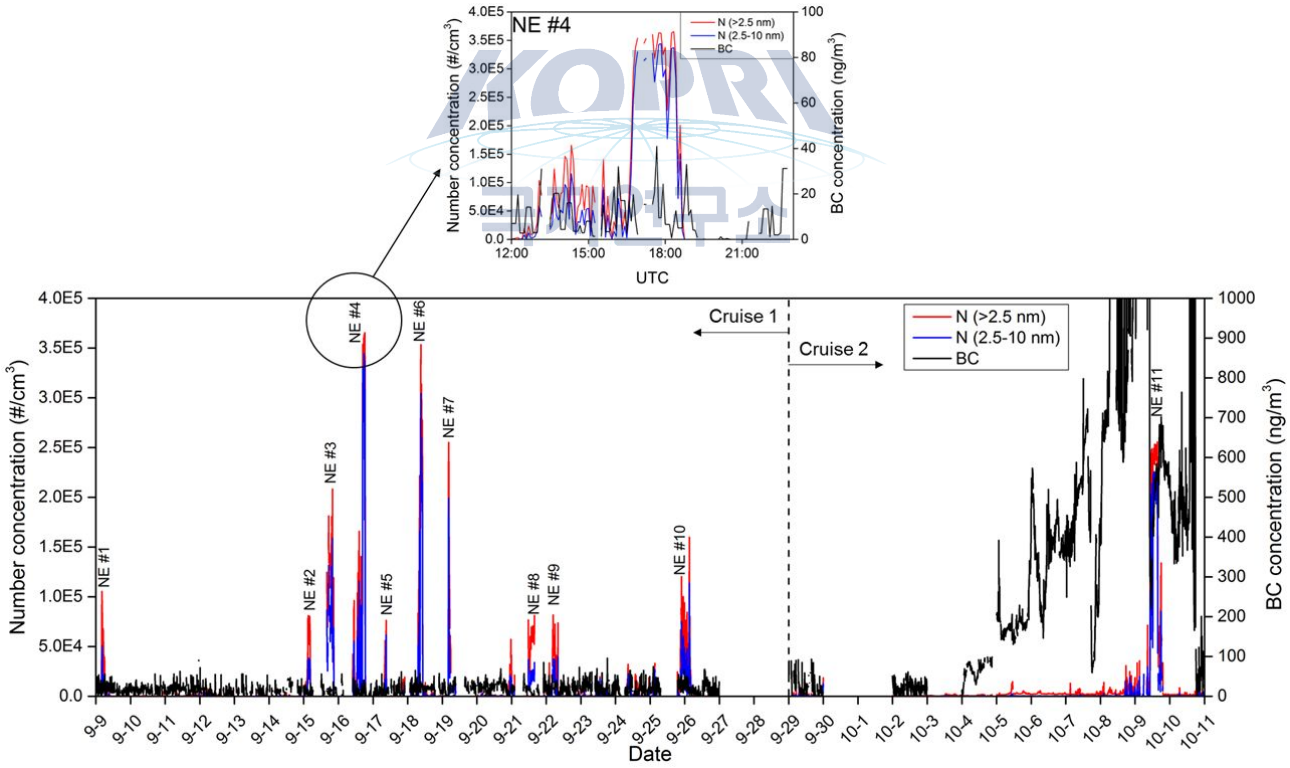


그림 4. 관측기간 동안의 2.5 nm-10 nm와 2.5 nm-10 μm 범위의 에어로졸 수 농도(#/cm^3) 및 BC 농도 (ng/m^3).

표 3. Cruise 1과 2에서의 기상, 해수, 그리고 에어로졸 특성 요약.

	Cruise 1	Cruise 2
Date	9/7/2013-9/29/2013	9/29/2013-10/13/2013
Major locations	Arctic Ocean (Barrow, Beaufort Sea, Nome, and Chukchi Sea)	Pacific Ocean (Nome, Bering Sea, Sea of Okhotsk, East Sea, and Gwangyang)
Average ambinet temperature	-0.1 ± 1.1°C	13.1 ± 3.1°C
Average RH	91 ± 5%	73 ± 9%
Average wind speed	8.8 ± 2.0 m/s	12.9 ± 3.1 m/s
Average wind direction	5.9 ± 23.4°	4.0 ± 23.6°
Average seawater temperature	2.6 ± 1.0°C	15.4 ± 3.5°C
Average chlorophyll-a concentration	3.4 ± 1.1 mg/m^3	1.0 ± 0.4 mg/m^3
Average number concentration of particles larger than 10 nm	4,971 ± 5,987 $\#/cm^3$(CPC3772)	3,648 ± 3,812 $\#/cm^3$(CPC3772)
Average number concentration of particles larger than 2.5 nm	11,910 ± 19,360 $\#/cm^3$(CPC3776)	9,159 ± 17,780 $\#/cm^3$(CPC3776)
Average mean particle size	193 ± 72 nm	197 ± 24 nm
Average black carbon concentration	20 ± 9 ng/m^3	502 ± 531 ng/m^3

KOPRI
극지연구소

표 4. Nucleation event 발생시 에어로졸 수농도, BC 농도, 그리고 해수 온도 측정 자료.

Date	Time	Air mass type	N(>2.5 nm) (#/cm^3)	N(2.5-10 nm) (#/cm^3)	N(2.5-10 nm)/N(>2.5 nm) (%)	BC (ng/m^3)	Seawater T (°C)
9/9/2013	04:00-06:30	Marine (Beaufort sea)	45,359 ± 12,881	16,390 ± 6,563	32 ± 5	22 ± 7	2.4 ± 0.1
9/15/2013	01:25-04:40	Marine (remote Arctic Ocean)	39,842 ± 13,696	16,172 ±6,446	39 ± 4	8 ± 3	3.2 ± 0.1
9/15/2013	16:05-21:00	Marine (remote Arctic Ocean)	114,357 ± 25,694	68,993 ± 19,168	56 ±7	11 ± 5	3.3 ± 0.2
9/16/2013	09:55-18:40	Marine (remote Arctic Ocean)	101,457 ± 58,995	77,481 ± 54,829	52 ±12	12 ± 5	2.5 ± 0.2
9/17/2013	07:40-09:25	Marine (remote Arctic Ocean)	31,188 ± 10,431	13,567 ± 7,479	40 ± 10	8 ± 4	2.4 ± 0.1
9/18/2013	07:35-10:50	Marine (Beaufort sea)	161,795 ± 58,771	124,705 ± 50,275	66 ± 9	22 ± 5	0.4 ± 0.2
9/19/2013	04:05-06:30	Marine (Beaufort sea)	108,572 ± 36,289	61,922 ± 31,699	46 ±11	16 ± 5	2.0 ± 0.1
9/21/2013	11:35-15:55	Marine (Beaufort sea)	53,383 ± 7,654	16,885 ± 3,802	30 ± 3	10 ± 4	0.9 ± 0.1
9/22/2013	04:10-08:05	Marine (Beaufort sea)	25,650 ± 12,063	10,876 ± 5,928	41 ± 9	26 ± 5	0.8 ± 0.1
9/25/2013 - 9/26/2013	20:55-04:45	Marine (remote Arctic Ocean)	48,462 ± 15,588	23,896 ± 10,178	45 ± 8%	26 ± 7	0.3 ± 0.1
10/9/2013	08:05-19:10	Continental (China and Japan)	161,296 ± 45,567	129,738 ± 45,708	66 ± 13	538 ± 52	21.3 ± 0.6

KOPRI 극지연구소

(a)

(b)

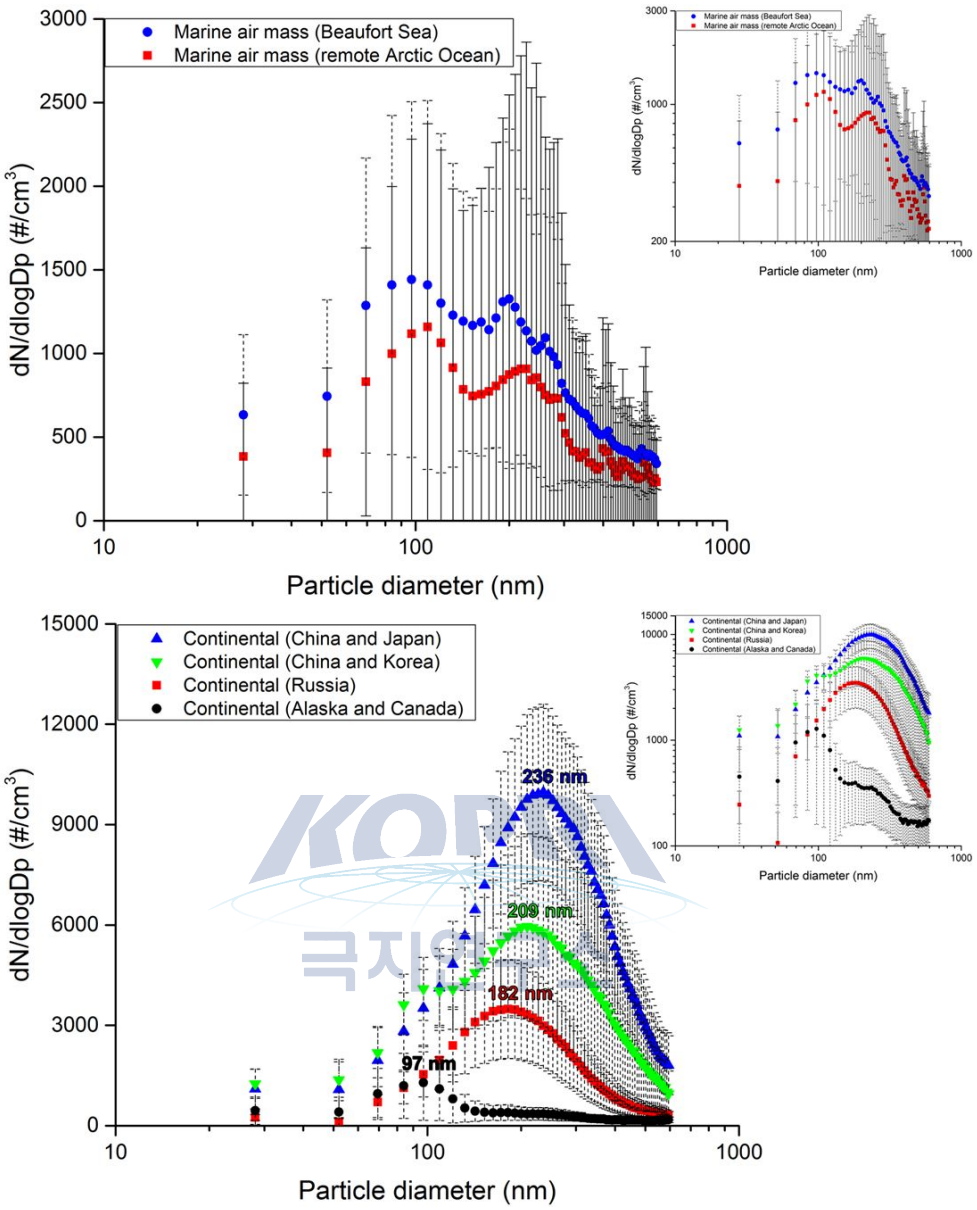


그림 5. (a) remote Arctic Ocean과 Beaufort Sea에서 기인하는 marine air mass와 (b) Alaska, Canada, Russia, China와 Japan으로부터 기인하는 continental air mass의 number size distribution (30-600 nm).

그리고 DMPS를 이용하여 에어로졸 크기에 (30 nm-600 nm) 따른 수농도 (#/cm3) 분포 특성을 파악하였다. 에어로졸의 평균 Number size distribution은 그림 5와 같으며 Air mass에 따라서 확연한 차이를 보이는 것을 알 수 있다. Marine influence에 의해 100-110 nm, 200-230 nm, 270-300 nm, 400-420 nm에서와 같이 Multiple mode가 관찰되었다. 이는 다양한 Marine aerosol 형성과정으로 (primary, secondary) 기인하는 것으로 사료된다. 반면 Continental air mass의 경우 수농도가 증가하고 Number size distribution 상에서는 단일피크가 발견되었으며 Air mass가 어디에서 기인하는지에 따라서 입자 크기의 Single dominant mode가 달라졌다 (100 nm: Alaska and Canada, 180 nm: Russia, 210 nm: China and Korea, 240 nm: China and Japan).

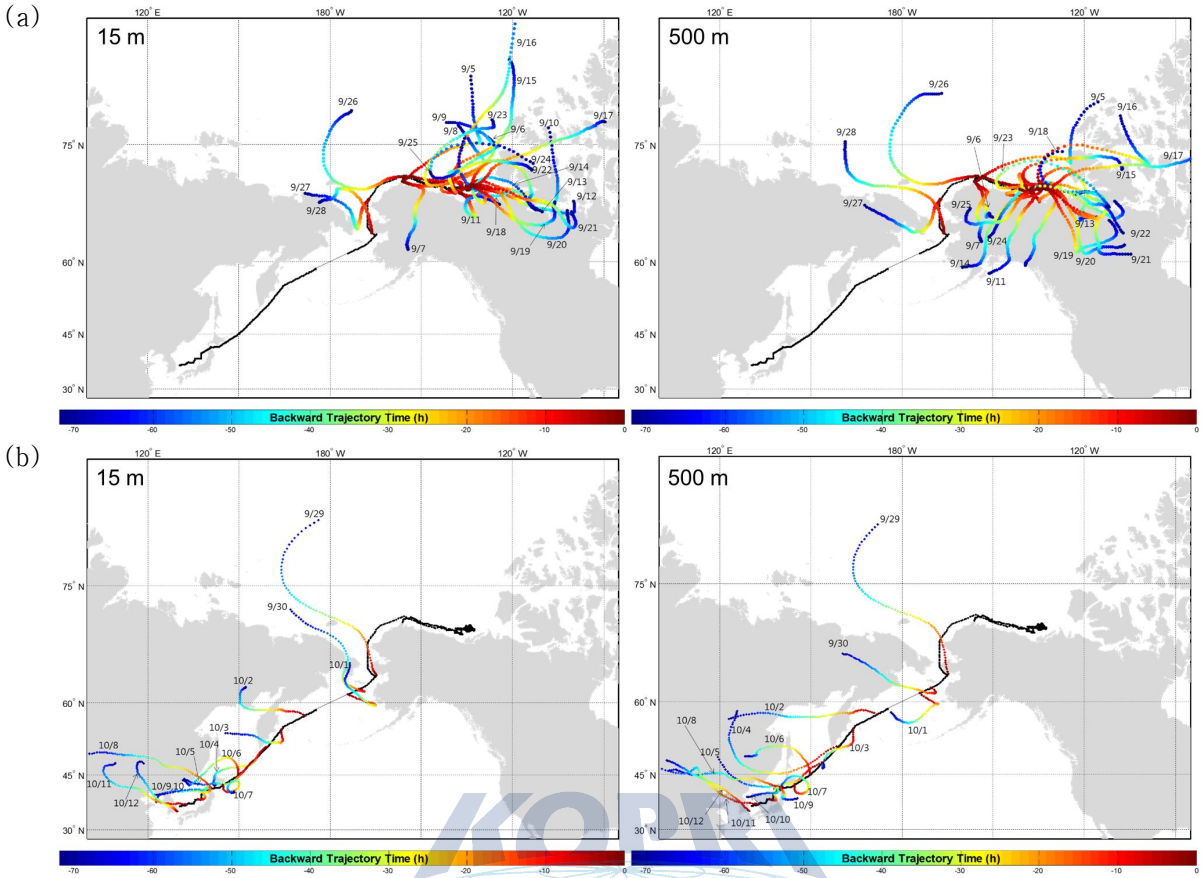


그림 6. cruise 1과 (a) cruise 2의 (b) 항로구간에서의 역궤적 분석 (15 and 500 m)

KOPRI 극지연구소

관측기간 동안 Air mass가 에어로졸 특성에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 Air mass trajectory 데이터 분석을 하였다. 15 m와 500 m 상에서의 Air mass trajectory 데이터는 그림 6과 같으며 주요 Air mass type은 표 4에 요약하였다. Air mass는 Marine air mass와 Continental air mass로 나누어지며 Air mass가 Ocean에서 기인하고 최소 72시간 동안 Land를 거치지 않았을 때 Marine air mass로 구분을 하였다.

Cruise 1 구간에서는 주로 Air mass가 Remote Arctic Ocean과 Beaufort Sea에서 기인하였으며 Cruise 2 구간에서는 Russia, Japan, Korea, China에 기인하는 것이 대부분이었다. Air mass에 따른 에어로졸 특성 측정 데이터들은 표 4에 요약하였다. 아라온이 Land에 접근하거나 Continental air mass의 영향에 놓였을 때 BC 농도가 증가하는 것을 알 수 있으며 중국과 일본으로부터 기인된 Air mass의 영향이 있었을 때 가장 높은 BC 농도가 관측되었다. 이는 BC 농도가 Continental/anthropogenic source 영향의 지표로써 사용될 수 있음을 의미한다.

표 5. Air mass type에 따른 에어로졸 특성 측정 자료.

Air mass type	Date	HGF	Volume fraction of volatile species (%)	N (>2.5 nm) (#/cm^3)	N (2.5-10 nm) (#/cm^3)	BC (ng/m^3)
Marine air mass (remote Arctic Ocean)	9/15, 9/16, 9/17, 9/25, 9/26, 9/28, 9/29	1.40 ± 0.14	24 ± 7	22,670 ± 28,920	14,820 ±23,660	17 ± 9
Marine air mass (Beaufort Sea)	9/8, 9/9, 9/10, 9/13, 9/18, 9/19, 9/20, 9/21, 9/27	1.32 ± 0.18	27 ± 6	10,390 ± 19,400	6,870 ± 15,600	18 ± 6
Continental air mass (Alaska and Canada)	9/11, 9/12, 9/14	1.31 ± 0.08	30 ± 9	777 ± 538	241 ± 282	16 ± 7
Continental air mass (Russia)	10/2-10/6	1.41 ± 0.07	7 ± 1	1,545 ± 705	190 ± 103	167 ± 73
Continental air mass (China and Japan)	10/8-10/10	1.46 ± 0.07	9 ± 2	24,970 ± 31,150	16,530 ± 25,980	947 ± 849
Continental air mass (China and Korea)	10/11-10/12	1.52 ± 0.06	15 ± 4	4,310 ± 2,744	595 ± 840	593 ± 360
Average during the whole sampling period	9/7/2013-10/13/2013	1.39 ± 0.09	19 ± 6	9,772 ±18,300	5,976 ± 14,860	188 ± 335

KOPRI
극지연구소

본 연구 과제를 통해서 개발된 HVTDMA system을 직접 이용하여 에어로졸의 흡습성, 휘발성, 혼합상태 특성들이 측정되었다. Ocean biological activity는 Remote ocean에서 Submicrometer 입자의 Organic, non-sea salt (nss)-sulfate, sea salt의 비율에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (O'Dowd, Facchini et al. 2004; Gantt and Meskhidze 2013). 선행 연구에서는 상대습도 90% 조건에서 Ammonium sulfate, ammonium bisulfate, sea salts, water soluble organic matter (WSOM), water insoluble organic matter (WIOM)들은 각각 1.7, 1.8, 2.0, 1.2, 1.0의 Hygroscopic growth factor (HGF) 값을 가진다고 보고된 바 있으며 본 과제에서 사용이 된 HVTDMA system을 가지고 실험실에서 측정한 결과 마찬가지로 유사한 결과를 보였다. 실험실에서 Volatile, semi-volatile organic의 경우 100℃ 조건에서 증발되지만 Sulfate의 경우는 증발되지 않는 것을 확인하였으며 nss-sulfate과 Sea salt species는 Hygroscopic, non-volatile 하고 Organic species는 Less hygroscopic, volatile 한 특징을 가지고 있다. 50 nm-220 nm 사이의 특정 크기를 선택하여 측정된 에어로졸의 HGF (hygroscopic growth factor)와 SF (shrinkage factor) 값의 빈도분포는 아래 그림과 같다.

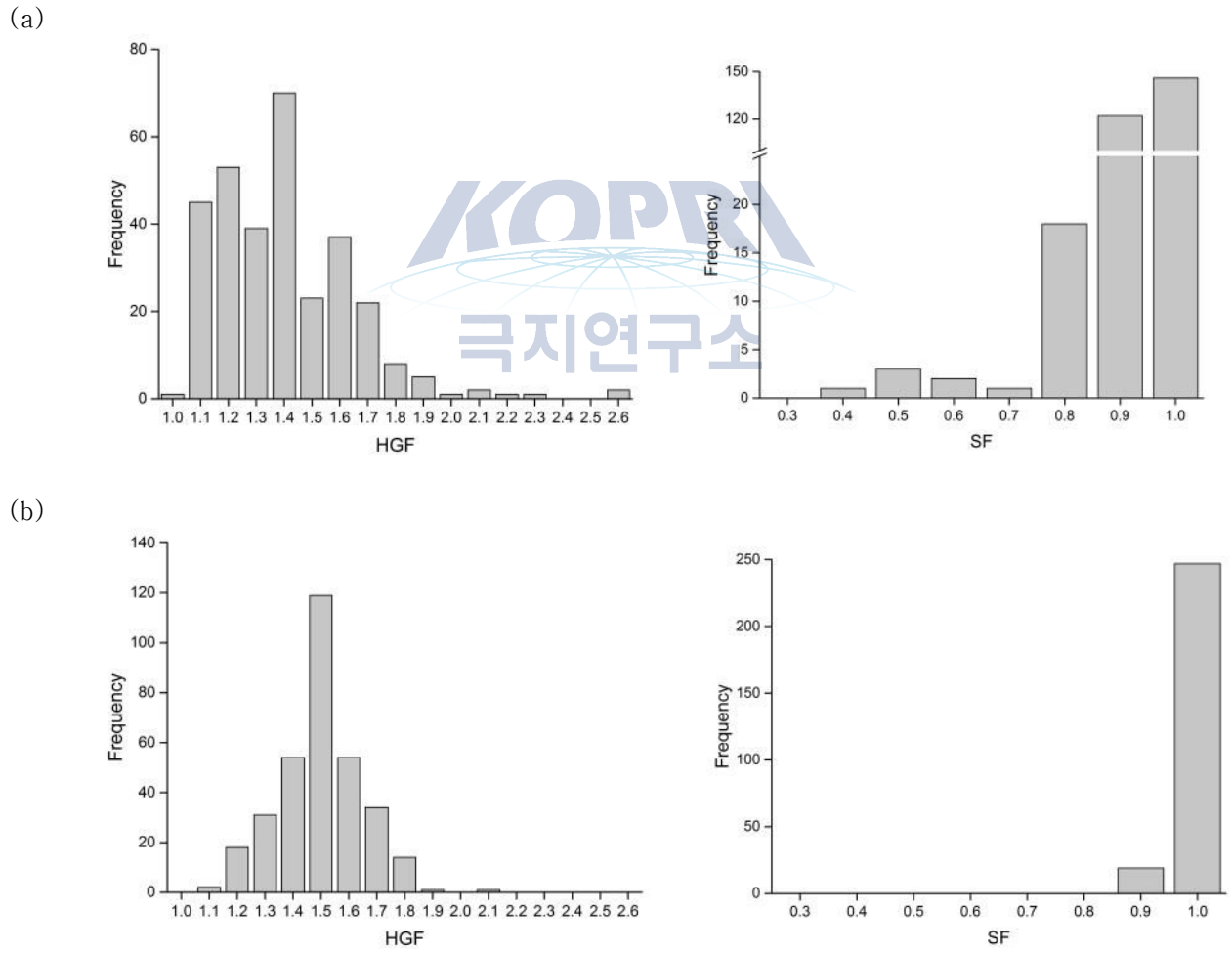


그림 7. (a) cruise 1과 (b) cruise 2에서의 에어로졸 HGF, SF 빈도분포

Cruise 1에서는 HGF 측정값들이 다양한 빈도분포를 보였고 (1.1-1.2, 1.4, 1.6) 상대적으로 많은 양의 Volatile species가 존재하는 것을 알 수 있었다. 1.4와 1.6의 HGF 값은 Sulfate과 다양한 Organic components량과 관계가 있으며 상대적으로 작은 HGF 값들은 Biological organic components (less hygroscopic)에 기인한다. 참고로 선행연구에서는 Sea water에 존재하는 Bacteria 농도가 증가함에 따라 SSA (sea salt aerosol)의 HGF 값이 감소한다는 것을 증명하여 발표하였다 (Prather, Bertram et al. 2013).

반면 Cruise 2의 HGF 빈도분포도에서는 측정값 1.5에서 단일 피크를 보였으며 Volatile species의 양도 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 본 과제를 수행하며 얻은 HGF와 SF 측정값은 Marine influence 조건에서 Volatile organic species가 Submicrometer 에어로졸의 생성과 성장에 중요한 역할을 할 수 있다는 것을 보여준다. 관측기간 동안 입자들은 Internal mixing 상태가 대부분이었으며 전체 관측 데이터 중에서 오직 2%만이 External mixing 상태였다. 이는 Hygroscopic (sea-salt) 입자들은 단독으로 존재하기 보다는 다양한 비율의 nss-sulfate, volatile/semi-volatile organics, sea salt 입자들이 Internal mixing 상태로 존재하는 경향성을 보여준다.

KOPRI
극지연구소

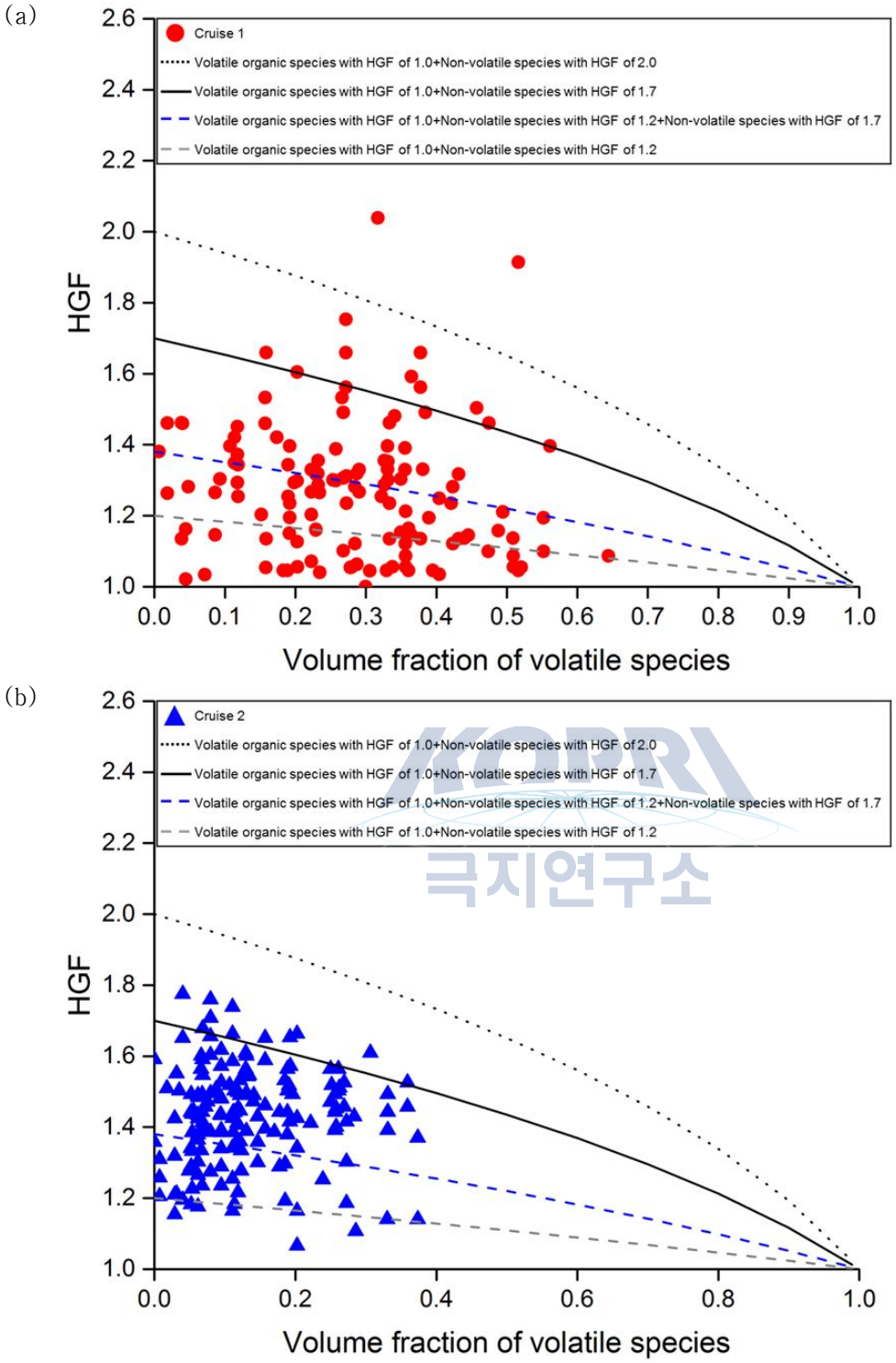


그림 8. (a) cruise 1과 (b) cruise 2 구간에서의 volatile species의 volume fraction에 따른 HGF 측정값과 Zdanovskii-Stokes-Robinson (ZSR) relationship을 이용한 multicomponent mixtures의 HGF 곡선.

측정된 HGF와 Volatile species의 Volume fraction 데이터들과 Zdanovskii-Stokes-Robinson (ZSR) relationship을 이용하여 흡습성과 휘발성이 알려진 혼합된 물질들의 데이터들과 서로 비교하였다. 위 그림에서 알 수 있듯이 Cruise 1과 Cruise 2를 비교

하였을 때 Cruise 1 구간에서 측정된 에어로졸들은 상대적으로 많은 휘발성 물질로 구성되어 있을 뿐 아니라 다양한 Internal mixtures임을 알 수 있다. 반면 Cruise 2는 Cruise 1과 달리 상대적으로 에어로졸들의 HGF 측정 분포도가 집중되어 있고 Volatile species의 Volume fraction도 적은 것을 알 수 있다.

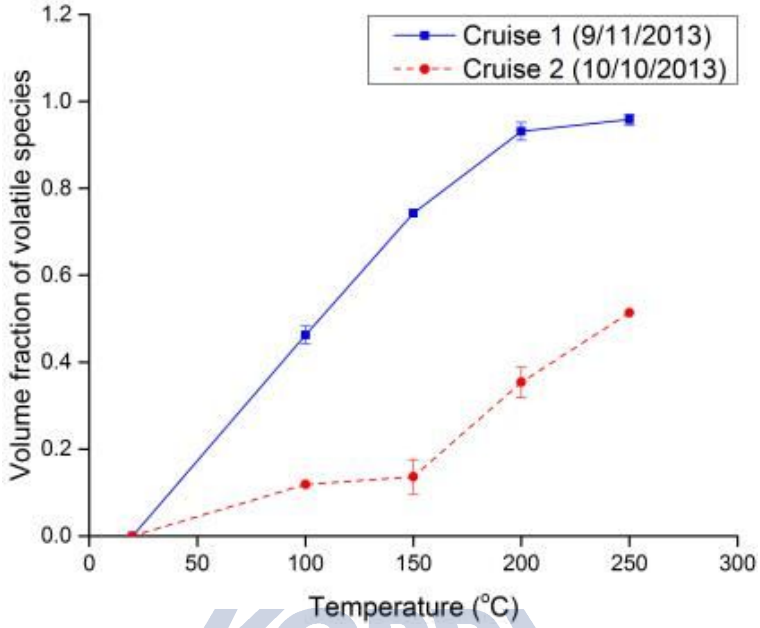


그림 9. 온도에 따른 에어로졸 휘발특성 변화.

관측기간 동안에 간헐적으로 Heated tube의 온도를 20℃에서 250℃까지 단계적으로 올리면서 에어로졸의 휘발특성을 살펴보았다. Volatile organic species는 100℃ 이전에 증발되기 시작하며 nss-sulfate과 Less volatile organic species들은 100℃를 넘어서 증발되고 250℃ 온도에서 대부분 증발이 된다. Cruise 1 (2013년 9월 11일)의 측정 자료를 살펴보면 앞에서 설명된 것처럼 상대적으로 많은 Volatile species가 존재하는 것을 알 수 있고 Cruise 2 (2013년 10월 10일)의 경우 100℃ 이전에 증발하는 Little volatile organic species 존재를 확인할 수 있었으며 150℃에서 증발하기 시작하는 nss-sulfate의 데이터는 Cruise 2 구간에서 상당한 양의 nss-sulfate이 존재한다는 것을 뒷받침 해주고 있다. nss-sulfate은 Anthropogenic source (anthropogenic SO2 conversion)와 Biogenic marine source (dimethyl-sulfide oxidation conversion)에서 모두 기인 될 수 있다. 그리고 Cruise 2 구간에 250℃ 조건에서 증발하지 않고 남아있는 에어로졸이 있었으며 이는 에어로졸이 Mineral과 Biological material과 같은 non-volatile species를 포함하고 있는 것을 의미한다.

에어로졸의 형태학적 특성 및 화학적 원소성분 분석을 위해서는 TEM/EDS가 이용되었다. 총 257개의 에어로졸이 분석 되었으며 주로 C-rich (type 1), S-rich mixture (type 2), C/S-rich mixture (type 3), Na-rich mixture (type 4), C/P-rich mixture (type 5), mineral-rich mixture (type 6)으로 구분이 되었다. C/P-rich mixture (type 5)의 경우 대부분 cruise 1 기간에 관찰되었는데 이는 해당기간/구간에 상대적으로 강한 Biological activity에 의한 영향이라고 사료된다.

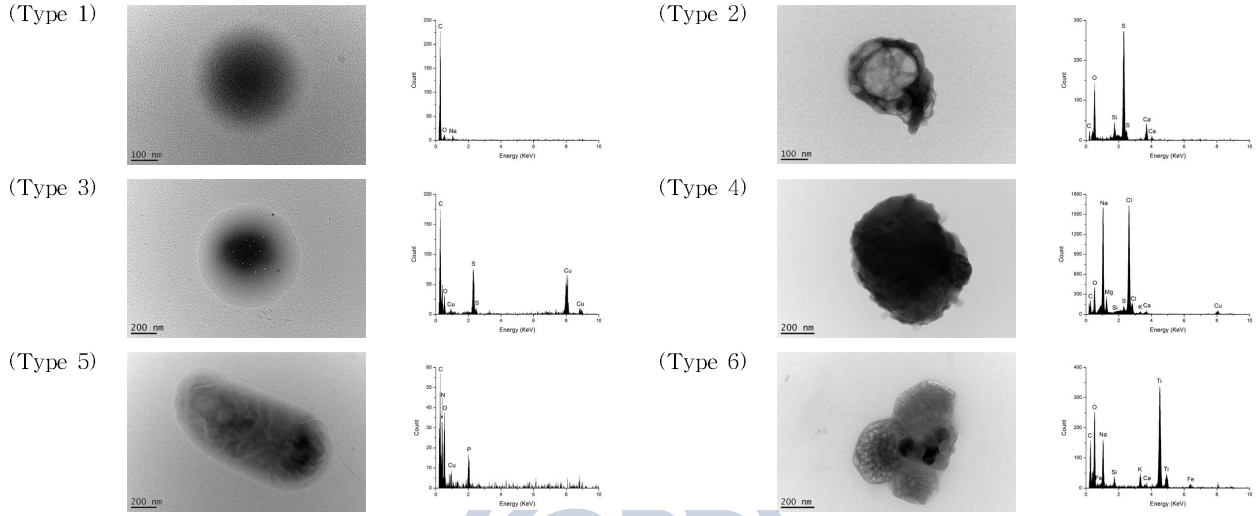


그림 10. C-rich mixture (type 1), S-rich mixture (type 2), C/S-rich mixture (type 3), Na-rich mixture (type 4), C/P-rich mixture (type 5), mineral-rich mixture (type 6)의 TEM/EDS 데이터.

KOPRI 극지연구소

북극지역에서의 입자 발생원 및 생성 기작을 파악하기 위하여 스발바드 군도(Svalbard Island) 내 뉘알레순(Ny-Ålesund (78.6° N, 11.6° E)) 지역에 위치한 그루바뎃(Gruvebadet) 대기관측소 (그림11)에서 Nano-SMPS (scanning mobility particle sizer, DMA (Model 3085, TSI) – UCPC (Model 3776, TSI))를 이용하여 3 – 60 nm 입자의 크기별 수농도 변화를 관측하였다. 측정은 2015년 4월 1일부터 2015년 8월 31일까지 수행하였으며, 5월부터는 그루바뎃 관측소를 관할하는 이탈리아 연구팀의 도움을 받아 진행하였다.

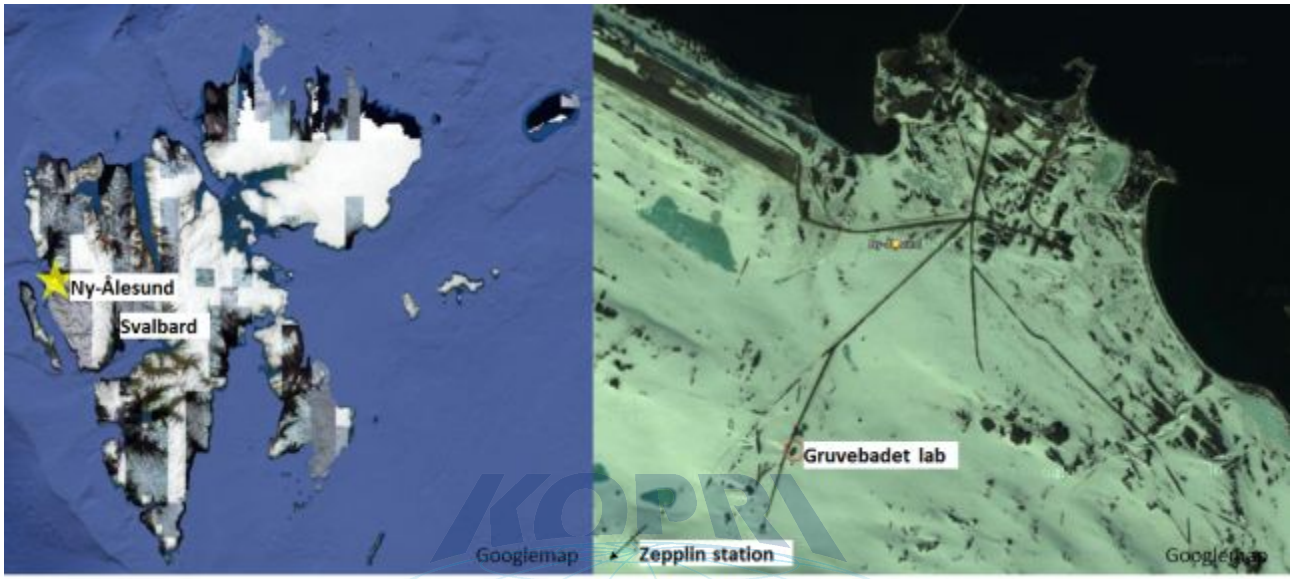


그림 11. 북극지방에서의 입자 발생 및 생성 기작 파악 연구를 수행한 뉘알레순 지역 내 그루바뎃 관측소 위성사진.

그림 12. 그루바뎃 관측소와 옥상에 설치된 샘플 인렛 및 관측 중인 Nano-SMPS 장치 사진(왼쪽부터).

나노 에어로졸의 시간에 따른 입경별 수 농도 측정 결과를 아래 그림과 같이 나타내었다. 5월과 7월 전기 시설 점검으로 발생한 데이터 공백을 제외하고는 정상적인 측정이 이루어졌다. 측정 기간 중 5월(DOY: 121-152)에 새로운 입자 생성 이벤트가 가장 빈번히 발생하였다.

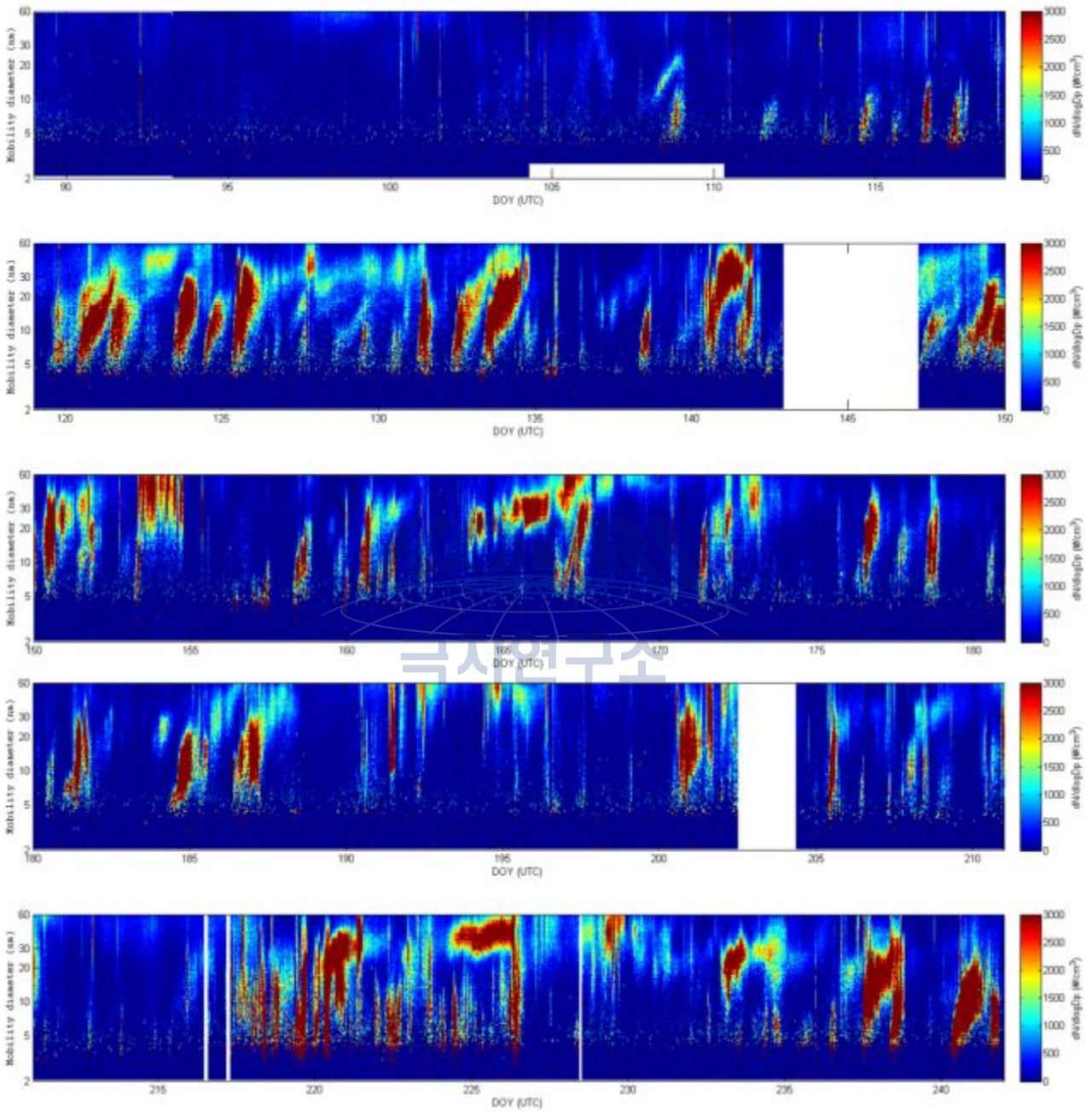


그림 13. 측정 기간 동안의 입경별 수농도 분포.

분석에 앞서, 새로운 입자 생성 (NPF, new particle formation) 이벤트를 정의하였다. 아래 그림 14에 나타낸바와 같이 Nucleation mode (Dp < 10 nm)의 수농도가 급격히 증가하고, 뒤이어 모드 직경의 꾸준한 성장이 나타나는 경우를 NPF 이벤트로 정의하였다. 첫 번째 패널과 같이 시간에 따른 입경별 수농도 분포를 나타낸 도표에서는 바나나와 같은 모양으로 표현된다. Nucleation mode의 수농도 증가 시작과 종료지점 사이의 값을 이용하여 입자의 생성속도 (formation rate, #/cm3·s)을 계산하였고, 이벤트 기간 동안 시간에 따른 모드 직경의 변화를 이용하여 성장속도 (growth rate, nm/h)를 계산하였다. 계산식은 Kulmala et al.(2004)에 제시된 식을 이용하였다.

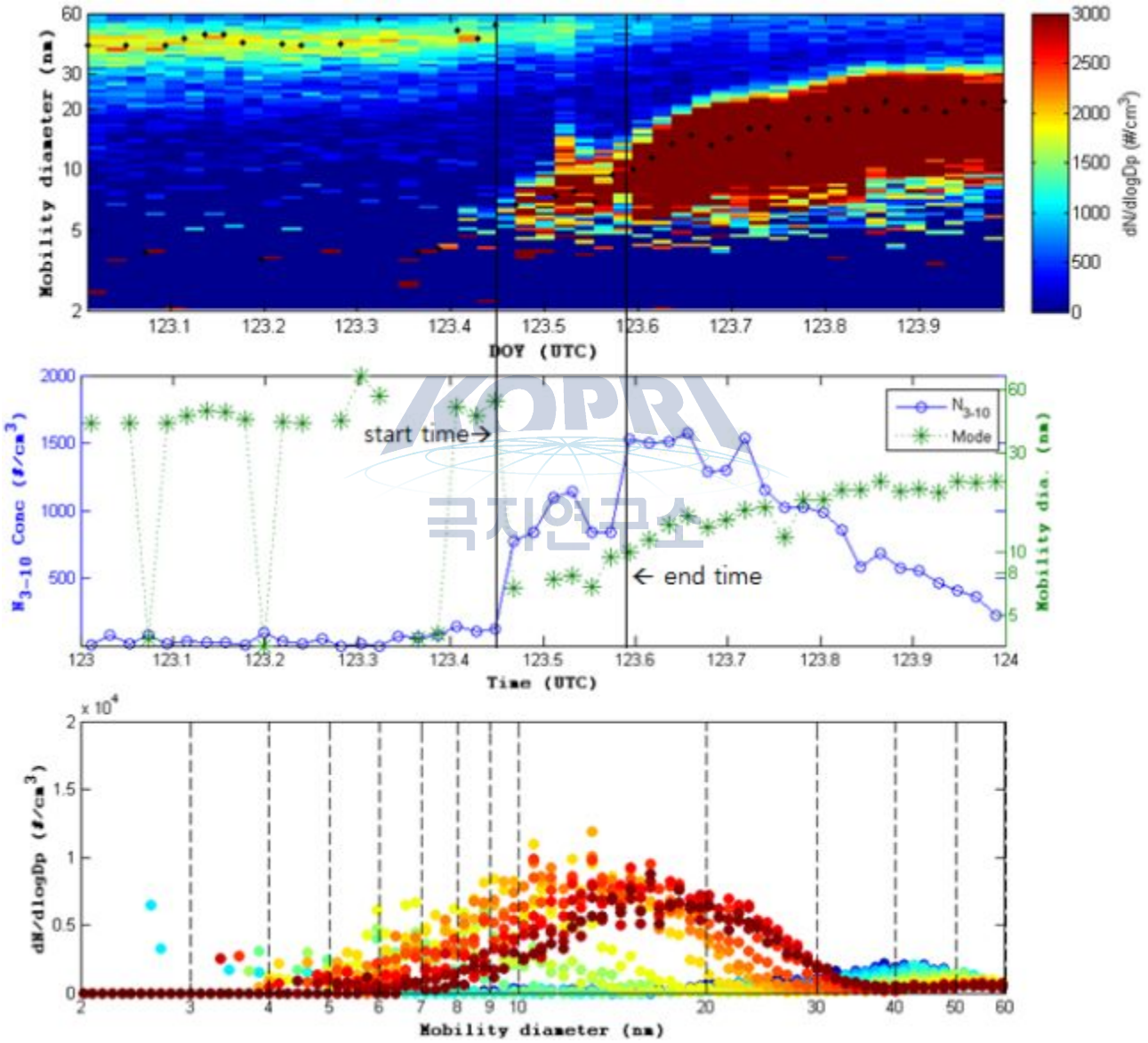


그림 14. 2015년 5월 2일 측정된 입경별 크기 분포를 이용한 NPF 이벤트 분석 예. Nucleation mode 입자의 수농도가 급격히 증가하고 모드 입경의 성장이 따라오는 경우를 NPF로 분류.

총 측정 기간 중 5월에 NPF 이벤트의 발생 빈도가 가장 높게 나타났다. 봄철 기온상승으로 인하여 해양, 토양 및 해설로부터 NPF의 전구물질이 되는 SO2, VOC의 배출량 증가와 강한 태양복사에 의한 것으로 판단된다. 또한 여름철보다 더 빈번히 발생하는 이유는 5월의 대기가 정체되어 있기 때문으로 사료된다. 이는 NOAA Hysplit 모델을 이용한 120시간 Airmass 역궤적 분석 결과를 통해 확인하였다. 그림 16에 나타낸 바와 같이 월별 Airmass의 Residential time 분석결과, 5월 중 Air mass가 가장 좁은 영역에 분포하고 대륙의 영향 또한 가장 적게 받는 것으로 나타났다.

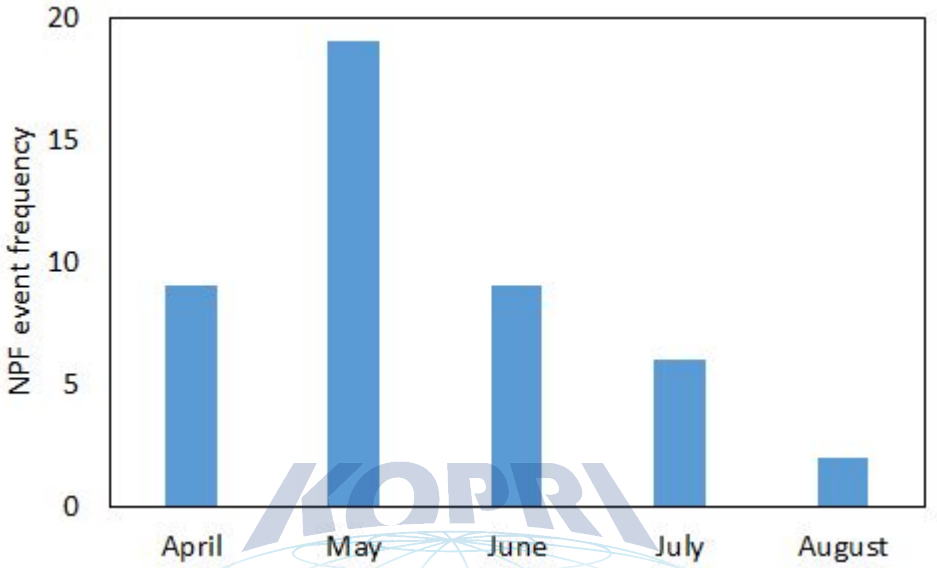


그림 15. 월별 NPF 이벤트 발생 빈도.

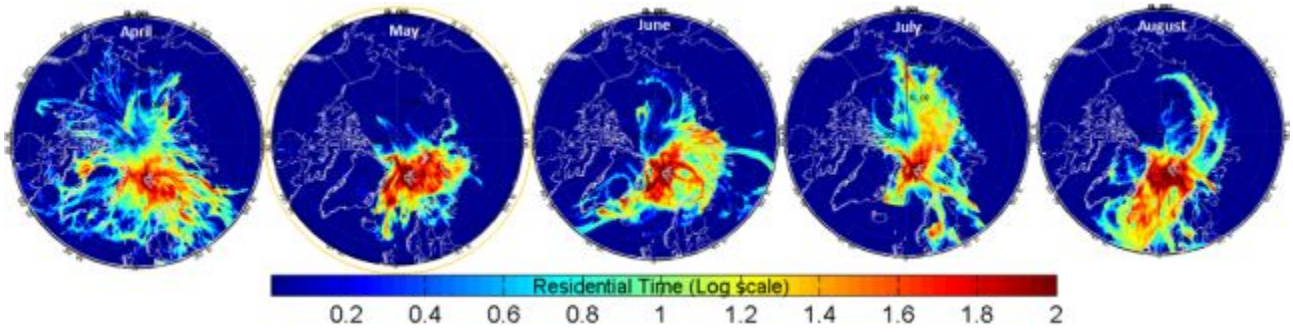


그림 16. 월별 air mass의 체류시간 분석.

제 3절 연구개발성과

1. 국외 전문학술지 (10건)

① 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. Environmental Science and Technology 49:12024-12035 (Impact Factor: 5.393).

② Park, K., Kim, G., Kim, J. S., Yoon, Y. J., Cho, H. J. and Ström, J. (2014). Mixing state of size-selected submicrometer particles in the arctic in May and September 2012. Environmental Science and Technology 48:909-919 (Impact Factor: 5.393).

③ Batmunkh, T., Kim, Y. J., Jung, J. S., Park, K. and Tumendemberel, B. (2013). Chemical characteristics of fine particulate matters measured during severe winter haze events in Ulaanbaatar, Mongolia. J. Air Waste Manag. Assoc. 63:659-670 (Impact Factor: 1.613).

④ Kim, J., Maskey, S., Yoon, Y. J. and Park, K. (2013). Mixing state of size-selected submicrometer particles during photochemical and combustion events measured with the tandem system. Aerosol Science and Technology 47:746-754 (Impact Factor: 1.953).

⑤ Park, J. Y., Lim, S. and Park, K. (2013). A new approach for determination of fouling potential by colloidal nanoparticles during reverse osmosis (RO) membrane filtration of seawater Nanotechnology for Sustainable Development. Journal of Nanoparticle Research 15 (Impact Factor: 2.101).

⑥ Kim, J. S. and Park, K. (2012). Atmospheric aging of Asian dust particles during long range transport. Aerosol Science and Technology 46:913-924 (Impact Factor: 1.953).

⑦ Tumolva, L., Park, J. Y. and Park, K. (2012). Combination of transmission electron and atomic force microscopy techniques to determine volume equivalent diameter of submicrometer particles. Microsc. Res. Tech. 75:505-512 (Impact Factor: 1.130).

⑧ Hossain, A. M. M. M. and Park, K. (2012). Exploiting potentials from interdisciplinary perspectives with reference to global atmosphere and biomass burning management. Aerosol and Air Quality Research 12:123-132 (Impact Factor: 2.393).

⑨ Park, K., Park, J., Lee, S., Cho, H. J. and Kang, M. (2012). Real time measurement of chemical composition of submicrometer aerosols at urban Gwangju in Korea by aerosol mass spectrometer. Atmos. Environ. 62:281-290 (Impact Factor: 3.459).

⑩ Kim, J. S., Bais, A. L., Kang, S. H., Lee, J. and Park, K. (2011). A semi-continuous measurement of gaseous ammonia and particulate ammonium concentrations in PM 2.5 in the ambient atmosphere. Journal of Atmospheric Chemistry 68:251-263 (Impact Factor: 1.550).

KOPRI 극지연구소

2. 국제 학술회의 발표 (8건)

① Kihong Park*, Gibaek Kim, Young Jun Yoon,"Shipborne measurement of hygroscopicity and volatility of fine particles during the Artic cruise", The 12th Annual UNU & GIST Joint Programme Symposium, Oct 27-29, DaNang, Vietnam, 2014.

② Gibaek Kim, Young Jun Yoon, Hee-joo Cho, and Kihong Park*, "Characterization of Arctic Aerosol Particles during the Arctic Ocean Expedition in 2013", American Association for Aerosol Research, Oct 20-Oct 24, Orlando, Florida, USA, 2014.

③ Gibaek Kim, Young-Jun Yoon, Hee-joo Cho, and Kihong Park*, "Hygroscopicity, Volatility, Morphology, and Elemental Composition of Ultrafine Particles during the Arctic Ocean Expedition in 2013", International Aerosol Conference, Aug 28-Sep 2, Busan, Korea, 2014.

④ Kihong Park, Gibaek Kim, Jaesuk Kim, Young Jun Yoon, Heeju Cho, and Johan Ström," Hygroscopicity, volatility, and mixing state of submicrometer particles in the Arctic (Ny-Alesund, Svalbard)", Asian Aerosol Conference (AAC), 2-5 December, Sydney, Australia, 2013.

⑤ Kihong Park, Gibaek Kim, Jaesuk Kim, Young Joon Yoon, and Heeju Cho, "Mixing state ofsize-selected submicrometer particles in the Arctic (Ny-Ålesund, Svalbard) in the spring and fall of 2012", Americal Association for Aerosol Research, Sep 29-Oct 4, Portland, USA, 2013.

⑥ Kihong Park, Jaeseok Kim, "A Study on Mixing Structure of Atmospheric Ultrafine Particles by Using the Thermo-Denuder HTDMA System.", The 31st American Association for Aerosol Research, October 8-12, Hyatt Regency Minneapolis, Minneapolis, Minnesota, USA, 2012.

⑦ Jae-Seok Kim and Kihong Park, "Measurements of hygroscopicity and volatility of dust particles during Asian dust events", The 30th American Association for Aerosol Research, October 3-7, Rosen Shingle Creek Resort & Golf Club, Orlando, Florida, USA, 2011.

⑧ Jinkwan Oh and Kihong Park, CCN activity of ultrafine particles in the atmosphere, The 9th UNU&GIST joint programme symposium, pp.46, October 11-13, GIST, Korea, 2011.

KOPRI 극지연구소

3. 국내 학술회의 발표 (11건)

① 김기백, 윤영준, 박기홍, “선박관측을 통한 북극해와 태평양에서의 에어로졸 흡습성, 휘발성, 혼합특성 측정” Proceedings of the 58th Korean Society for Atmospheric Environment, pp. 153, November 5-7, Yeosu Expo Convention, Korea, 2015.

② Kihong Park*, Gibaek Kim, and Young Jun Yoon, “Shipborne measurements of hygroscopicity and volatility of fine particles during the Arctic cruise", 2014 UMS-GIST symposium, Sep 23-Sep 24, Gwangju, Republic of Korea, 2014.

③ 김기백, 윤영준, 박기홍 “레이저유도 플라즈마 분광분석 장치와 TEM/EDS를 이용한 북극 에어로졸의 원소성분 및 형태학적 분석”, Proceedings of the 14th Korean conference on Aerosol and Particle Technology, pp197, July 3-5, Yongpyung, Korea, 2013.

④ KaYan Chong, Kihong Park “CCN activity of mixed black carbon particles with core-shell structure”, Proceedings of the 14th Korean conference on Aerosol and Particle Technology, pp36, July 3-5, Yongpyung, Korea, 2013.

⑤ 김기백. 이희성. 윤영준. 박기홍 "북극 에어로졸의 흡습성, 휘발성 특성 측정 연구" Proceedings of the 56th Korean Society for Atmospheric Environment. p115, September 5-6, BEXCO, Korea, 2013.

⑥ Shila Maskey, 박기홍 "Characterization of mixing state of laboratory-generated mixed inorganic and organic ultrafine aerosol particles", Proceedings of the 55th Korean Society for Atmospheric Environment, pp100, October 25-26, Yeungnam University, Korea, 2012.

⑦ Ka Yan Chong, 박기홍 "Sulfuric acid로 코팅된 블랙카본의 구름형성응축핵 활성도 측정", Proceedings of the 55th Korean Society for Atmospheric Environment, pp70, October 25-26, Yeungnam University, Korea, 2012.

⑧ Ka Yan Chong, 오진관. 박기홍, Measurments of Cloud Condensation Nuclei (CCN) activity of laboratory-generated particles and atmospheric particles", Proceedings of the 13th Korean conference on Aerosol and Particle Technology, pp189, July 5-6, Yongpyung, Korea, 2012

⑨ 김재석, Shila Maskey, 박기홍 "대기 중 극초미세입자의 흡습성과 혼합상태에 관한 연구", Proceedings of the 54th Korean Society for Atmospheric Environment, pp22, May 10-12, Graduate School of Public Health, Seoul National University, Seoul, Korea, 2012.

⑩ 김재석, 박기홍 "2010년 광주지역 황사기간 입자들의 흡습성과 휘발성 비교", Proceedings of the 12th Korean Conference on Aerosol and Particle Technology, pp. 32, June 30-July 2, Yongpyung, Korea, 2011.

⑪ 오진관, 박기홍 "구름형성응축핵 카운터를 이용한 유기물의 CCN activity 측정", Proceedings of the 12th Korean Conference on Aerosol and Particle Technology, pp. 109, June 30-July 2, Yongpyung, Korea, 2011.

KOPRI 극지연구소

제 4장 목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1절 연구개발목표 달성도

(1) 연구개발의 최종목표

북극 에어로졸의 물리화학적 특성 측정과 이동특성을 연구하여 장거리이동 에어로졸의 영향을 파악하고 에어로졸의 발생원, 생성기작, 이동경로, 기후변화 영향 연구를 수행하고자 한다.

(2) 연차별 연구개발 목표 및 달성도

표 6. 2단계 연차별 연구개발 목표 및 달성도.

구 분	연구개발 목표	연구개발 내용 및 범위	달성도
3차년도 (2013)	북극해 에어로졸의 특성파악	아라온의 북극해 연구항해 구간을 따라서 다양한 에어로졸의 물리화학적인 특성에 대해 실시간 연속측정 수행 (2013년 9월 7일~2013년 10월 13일).	100%
	북극해 에어로졸 특성과 동토층 에어로졸 특성 비교	북극해 에어로졸과 동토층 에어로졸 관측자료 비교.	
4차년도 (2014)	북극 에어로졸의 발생원, 성장기작 및 기후변화 영향 파악	에어로졸의 흡습성, 휘발성 등 다양한 물리화학적 특성 데이터 분석. 북극 에어로졸의 size distribution 분석, 형태학적 특성 및 화학적 성분 분석, 장거리이동 에어로졸의 이동특성 규명.	100%
5차년도 (2015)	북극 에어로졸의 발생원, 성장기작 및 기후변화 영향 파악	Gruvebadet station에서 3 nm에서 60 nm 크기의 북극 에어로졸 size distribution 측정 (2015년 4월 1일~2015년 8월 31일) 및 분석. 북극 에어로졸의 형태학적 특성 및 화학적 성분 분석과 장거리이동 에어로졸의 이동특성 규명.	100%

제 2절 대외 기여도

기존 대기환경에서 사용하던 입자측정 및 분석 장치와 더불어 북극 환경에서 에어로졸입자의 종합적 분석이 가능하고 한 단계 upgrade된 에어로졸 모니터링 시스템 구축할 수 있을 것이다.

북극환경에서 다양하게 존재하는 에어로졸 입자로 인한 환경적 피해를 최소화를 위한 실시간 감시기술 개발에 기여할 것이다.

다양한 크기 (나노크기에서 마이크로미터크기)와 종류의 입자 특성을 실시간으로 직접적으로 측정하는 기술은 대기환경측정사업, 반도체/부품 제조공정사업 (반도체 제조공정에서 발생하는 오염입자 모니터링), 나노입자 활용사업 (나노물질 제조공정 및 생산품의 품질관리), 클린디젤 자동차 (자동차 배기입자 화학적 성분 실시간 모니터링) 등과 연관된 다양한 기업에 공통적으로 활용될 수 있을 것이다.

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.

KOPRI 극지연구소

제 5장 연구개발성과의 활용계획

본 연구개발을 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 구름형성 응축핵 모니터링을 통해 에어로졸의 구름형성 및 기후변화 역할에 대한 과학적 이해증진에 도움이 될 것이다.

대기 중 황사, 미세입자, 극초미세입자와 나노입자의 발생원, 생성경로, 성장기작 등을 규명하여 환경오염입자 자료를 제공할 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.

KOPRI 극지연구소

미세입자의 종합적 특성을 실시간으로 측정하여 입자로 인한 환경적, 경제적 피해 최소화를 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 환경영향

파악에 활용할 수 있다.

유해성 판단을 위한 입자의 화학적 성분 자료 실시간 제공하는데 이용할 수 있다 (보건의료업계에서 활용).

나노입자을 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.

KOPRI
극지연구소

제 6장 참고문헌

- ACIA (2005). Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge, UK
- Behrenfeldt, U., R. Krejci, J. Ström and A. Stohl (2008). "Chemical properties of Arctic aerosol particles collected at the Zeppelin station during the aerosol transition period in May and June of 2004." Tellus,SeriesB:ChemicalandPhysicalMeteorology60 B(3): 405-415.
- Browse, J., K. S. Carslaw, S. R. Arnold, K. Pringle and O. Boucher (2012). "The scavenging processes controlling the seasonal cycle in Arctic sulphate and black carbon aerosol." AtmosphericChemistryandPhysics12(15): 6775-6798.
- Frossard, A. A., P. M. Shaw, L. M. Russell, J. H. Kroll, M. R. Canagaratna, D. R. Worsnop, P. K. Quinn and T. S. Bates (2011). "Springtime Arctic haze contributions of submicron organic particles from European and Asian combustion sources." JournalofGeophysicalResearchD:Atmospheres116(5).
- Gantt, B. and N. Meskhidze (2013). "The physical and chemical characteristics of marine primary organic aerosol: A review." AtmosphericChemistryandPhysics13(8): 3979-3996.
- Hansen, J. and L. Nazarenko (2004). "Soot climate forcing via snow and ice albedos."Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America101(2): 423-428.
- Heintzenberg, J., C. Leck, W. Birmili and E. K. Bigg (2004). "The modal structure of the summer Arctic aerosol and its connection to aerosol processes." JournalofAerosolScience35(SUPPL. 2): S723-S724.
- Hirdman, D., J. F. Burkhart, H. Sodemann, S. Eckhardt, A. Jefferson, P. K. Quinn, S. Sharma, J. Ström and A. Stohl (2010). "Long-term trends of black carbon and sulphate aerosol in the Arctic: Changes in atmospheric transport and source region emissions." AtmosphericChemistryandPhysics10(19): 9351-9368.
- Kulmala, M., H. Vehkamaki, T. Petaja, M. Dal Maso, A. Lauri, V.-M. Kerminen, W. Birmili, P.H. McMurry (2004). "Formation and growth rates of ultrafine atmospheric particles: a review of observations." Journal of Aerosol Science35(2):143-176.
- Law, K. S. and A. Stohl (2007). "Arctic air pollution: Origins and impacts." Science315(5818): 1537-1540.
- Modini, R. L., Z. D. Ristovski, G. R. Johnson, C. He, N. Surawski, L. Morawska, T. Suni and M. Kulmala (2009). "New particle formation and growth at a remote, sub-tropical coastal location." AtmosphericChemistryandPhysics9(19): 7607-7621.
- O'Dowd, C. D., M. C. Facchini, F. Cavalli, D. Ceburnis, M. Mircea, S. Decesari, S. Fuzzi, J. Y. Young and J. P. Putaud (2004). "Biogenically driven organic contribution to marine aerosol." Nature431(7009): 676-680.
- Prather, K. A., T. H. Bertram, V. H. Grassian, G. B. Deane, M. D. Stokes, P. J. DeMott, L. I. Aluwihare, B. P. Palenik, F. Azam, J. H. Seinfeld, R. C. Moffet, M. J. Molina, C. D. Cappa, F. M. Geiger, G. C. Roberts, L. M. Russell, A. P. Ault, J. Baltrusaitis, D. B.

KOPRI 극지연구소

Collins, C. E. Corrigan, L. A. Cuadra-Rodriguez, C. J. Ebben, S. D. Forestieri, T. L. Guasco, S. P. Hersey, M. J. Kim, W. F. Lambert, R. L. Modini, W. Mui, B. E. Pedler, M. J. Ruppel, O. S. Ryder, N. G. Schoepp, R. C. Sullivan and D. Zhao (2013). "Bringing the ocean into the laboratory to probe the chemical complexity of sea spray aerosol." Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 110(19): 7550-7555.

- Serreze, M. C. and R. G. Barry (2011). "Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis." GlobalandPlanetaryChange77(1-2): 85-96.
- Shindell, D. T., G. Faluvegi, D. M. Koch, G. A. Schmidt, N. Linger and S. E. Bauer (2009). "Improved attribution of climate forcing to emissions." Science326(5953): 716-718.
- Vuollekoski, H., V. M. Kerminen, T. Anttila, S. L. Sihto, M. Vana, M. Ehn, H. Korhonen, G. McFiggans, C. D. O'Dowd and M. Kulmala (2009). "Iodine dioxide nucleation simulations in coastal and remote marine environments." JournalofGeophysicalResearch:Atmospheres114(2).
- Whitehead, J. D., G. B. McFiggans, M. W. Gallagher and M. J. Flynn (2009). "Direct linkage between tidally driven coastal ozone deposition fluxes, particle emission fluxes, and subsequent CCN formation." GeophysicalResearchLetters36(4).
- Yoon, Y. J., C. D. O'Dowd, S. G. Jennings and S. H. Lee (2006). "Statistical characteristics and predictability of particle formation events at Mace Head." JournalofGeophysicalResearch:Atmospheres111(13).

KOPRI
극지연구소

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소 위탁과제 연구결과보고서 입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 위탁연구과제로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.

KOPRI 극지연구소