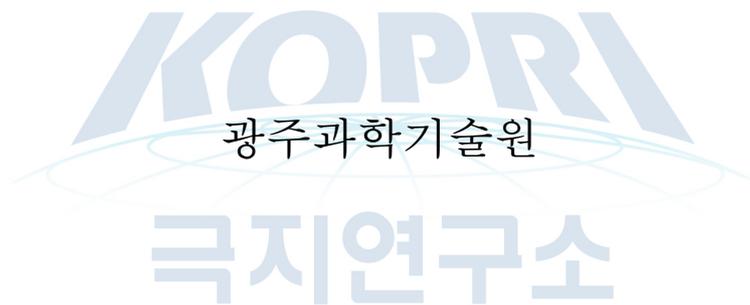


해양극지기초원천기술개발사업
(Brain Research Program)

북극권 나노입자 생성 및 에어로졸 특성 연구
(A study on nanoparticle formation and characterization of
aerosols over the Arctic area)

2021. 3.



제 출 문

과학기술정보통신부 장관 귀하

이 보고서를 “북극권 나노입자 생성 및 에어로졸 특성 연구“과제의 (최종: 2016.05~2021.03) 보고서로 제출합니다.

2021년 03월 31일

위탁연구기관명 : 광주과학기술원
위탁연구책임자 : 박 기 흥
연구 원 : 김기백, 이광열, 조희주,
“ : 박민한, 이해범, 송한결,
“ : 장지호, Lucille, Faye
(이상 광주과학기술원)



최종보고서										보안등급		
										일반[√], 보안[]		
중앙행정기관명		과학기술정보통신부			사업명		사업명			거대과학연구개발사업		
전문기관명(해당 시 작성)		한국연구재단			사업명		내역사업명			해양극지기초원천기술개발사업		
공고번호					총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)							
					연구개발과제번호		2016M1A5A1901779					
기술분류	국가과학기술 표준분류	ND1110	30%	ND1103	30%	ND1106	40%					
	부처기술분류 (해당 시 작성)	G13401	40%	G13405	20%	G20102	40%					
연구개발과제명 (세부과제-1)		국문	북극권 동토 관측 거점을 활용한 환경변화 감시와 예측									
		영문	Arctic permafrost environment change monitoring and prediction method developments									
위탁연구개발명		국문	북극권 나노입자 생성 및 에어로졸 특성 연구									
		영문	A study on nanoparticle formation and characterization of aerosols over the Arctic area									
위탁연구개발기관		기관명	광주과학기술원			사업자등록번호		410-82-07550				
		주소	광주광역시 북구 첨단과기로 123			법인등록번호						
연구책임자		성명	박기홍			직위		교수				
		연락처	직장전화	062-715-3279			휴대전화		010-4301-2156			
			전자우편	kpark@gist.ac.kr			국가연구자번호		10059740			
연구개발기간		전체	2016. 05. 01 - 2021. 03. 31(5년 1개월)									
		단계 (해당 시 작성)	1단계	2016. 05. 01 - 2017. 12. 31(1년 8개월)								
			2단계	2018. 01. 01 - 2021. 03. 31(3년 3개월)								
연구개발비 (단위: 천원)		정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계			연구개발비 외 지원금
		현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	
총계		310,000							310,000		310,000	
1단계	1년차	50,000							50,000		50,000	
	2년차	65,000							65,000		65,000	
2단계	1년차	65,000							65,000		65,000	
	2년차	65,000							65,000		65,000	
	3년차	65,000							65,000		65,000	

연구개발담당자 실무담당자	성명	이해범	직위	박사과정
	연락처	직장전화	062-715-2463	휴대전화
		전자우편	bambam91@gist.ac.kr	국가연구자번호

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2021년 03월 31일

연구책임자: 박기홍 (인)

위탁연구개발기관의 장: 광주과학기술원 총장 (직인)

과학기술정보통신부 장관 귀하



< 요약 문 >

※ 요약문은 5쪽 이내로 작성합니다.

사업명		해양극지기초원천기술개발사업		총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)			
내역사업명 (해당 시 작성)				연구개발과제번호		2016M1A5A1901779	
기술 분류	국가과학기술 표준분류	ND1110	30%	ND1103	30%	ND1106	40%
	부처기술분류 (해당 시 작성)	G13401	40%	G13405	20%	G20102	40%
연구개발과제명 (위탁과제)		북극권 나노입자 생성 및 에어로졸 특성 연구					
전체 연구개발기간		2016. 05. 01 - 2021. 03. 31(5년 1개월)					
총 연구개발비		총 310,000천원 (정부지원연구개발비: 310,000천원, 기관부담연구개발비 : 천원, 지방자치단체: 천원, 그 외 지원금: 천원)					
연구개발단계		기초[<input checked="" type="checkbox"/>] 응용[<input type="checkbox"/>] 개발[<input type="checkbox"/>] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[<input type="checkbox"/>]		기술성숙도 (해당 시 기재)		착수시점 기준() 종료시점 목표()	
연구개발과제 유형 (해당 시 작성)		KOPRI					
연구개발과제 특성 (해당 시 작성)		KOPRI					
연구개발 목표 및 내용	최종 목표	북극권 나노입자생성 특성을 파악하고 에어로졸의 물리화학적 특성을 규명하여 인위적/자연적 에어로졸의 발생원, 생성기작, 이동경로, 기후 변화 영향 파악					
	전체 내용	<p>1. 장기간 나노입자의 크기분포 및 수농도 실시간 연속 관측을 통해 북극권 나노입자생성 특성자료 확보</p> <ul style="list-style-type: none"> - 노르웨이 니알슨 (Ny-Alesund) 제플린 관측소 (Zeppelin observatory)에서 나노입자의 크기분포 및 수농도 특성 장기 측정 자료 확보 (2016.10~2020.02, 3년 5개월) - 국제 공동연구팀과 협력을 통해 기상자료, 에어로졸 측정자료, 가스자료, 인공위성 자료 등 확보 <p>2. 장기간 확보된 특성자료 분석을 통해 북극권 나노입자의 특성 및 생성 원리 규명</p> <ul style="list-style-type: none"> - 3-25 nm 크기범위의 나노입자 수농도는 태양복사 (solar radiation (SRAD))가 점차 세지는 시기인 4월부터 증가하여 여름철 최고농도에 도달한 뒤 10월에 감소하며, 응축손실 (condensation sink (CS))은 반대로 4월에 최고점에 도달 후 10월까지 감소 (즉, 응축손실이 낮고 태양복사가 높은 조건에서 나노입자생성에 유리한 것을 확인) - 북극권 나노입자생성 (new particle formation (NPF)) 발생일 빈도는 연간 약 23%로 관측되었으며, 여름철에 가장 높은 발생빈도를 보임 - 나노입자생성의 지속시간은 평균 6-7 시간으로 나타났고, 발생시간은 현지 시각 13:00 - 14:00 사이로 주로 태양복사가 강한 낮 시간에 발생함 - 나노입자의 성장률 (growth rate (GR))과 형성률 (formation rate (J))은 다른 환경(도심, 농촌 지역 등)에서 관측된 것보다 낮지만 연간 발생빈도는 비슷한 수준으로 나타남 - 나노입자생성이 발생한 날은 대기 중 암모니아 (NH₃)와 황산 (H₂SO₄) 농도가 나노입자가 발생하지 않은 날에 비해 유의하게 높은 것으로 관측되 					

		<p>며, 북극권 나노입자생성은 H₂SO₄ 뿐만 아니라 NH₃도 중요한 전구체 가스로 파악됨</p> <ul style="list-style-type: none"> - 역궤적 분석을 통해 바렌츠 해 (Barents sea)보다 그린란드 해 (Greenland sea)를 거쳐 온 기단에서 나노입자의 수농도가 높은 것을 확인 - 이는 H₂SO₄의 전구체인 DMS (dimethyl-sulfide)의 생산 능력 (production capacity)은 그린란드 해가 바렌츠 해보다 높다는 것과 연관됨 <p>3. 북극권 에어로졸 (초미세먼지) 집중관측 수행 및 발생원 추적</p> <ul style="list-style-type: none"> - 북극권 초미세먼지 (PM_{2.5}) 샘플링 수행 (2016.09.28.~2016.10.08. (11일)), 2017.09.06.~2017.09.10. (5일), 2018.05.08.~2018.05.17.(10일) - 에어로졸의 화학적 원소성분 (laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) 이용), 입자모양 및 원소성분 (transmission electron microscope - energy dispersive x-ray spectroscopy (TEM-EDS) 이용), 기상자료, 가스자료, 역궤적 (airmass backward trajectory) 분석 자료 확보 - LIBS를 통해 북극권 에어로졸의 화학적 원소성분 10종 (C, H, O, Na, K, Ca, Mg, Fe, Sr, Si) 검출 - TEM-EDS를 통해 LIBS로 검출하지 못한 Ti, Cr, Ni 등의 지각원소로 추정되는 원소 추가 검출, 주로 비균질형 (irregular) 및 입방체 (cubic) 형태를 띠고 있음 - PM_{2.5} 질량농도는 0.36~3.38 µg m⁻³ 범위로 중/저위도 지역보다 현저히 낮았으며, 5월 (1.67 µg m⁻³), 10월 (1.58 µg m⁻³), 9월 (1.21 µg m⁻³) 순으로 높음 - PM_{2.5} 질량농도 상위 15% 해당되는 날의 Ca, Fe, Mg, Na, K에 대한 LIBS 검출신호는 그렇지 않은 날보다 유의하게 높음 - 따라서 측정기간 중 북극권 에어로졸의 화학적 원소성분의 대부분은 지각 입자 또는 해양입자가 차지하는 것으로 나타남 <p>4. 북극권 나노입자생성 및 관측된 에어로졸의 기후변화 영향 예측 활용</p> <ul style="list-style-type: none"> - 에어로졸의 화학적 구성성분, 나노입자의 성장 특성 결과를 활용한 구름생성 영향 특성 추정 파악 - 나노입자의 성장률이 충분히 강하고 25 nm 크기 이상의 후속성장으로 이어질 경우 구름응축핵 (cloud condensation nuclei (CCN))으로의 역할이 가능할 것으로 파악 - 향후 한국 극지연구소에서 측정한 구름응축핵 결과와 비교분석 자료 제공이 가능 												
	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="308 1738 464 1794">1단계</td> <td data-bbox="464 1738 564 1794"> <p>목표</p> </td> <td data-bbox="564 1738 1436 1794"> <p>북극권 나노입자생성 특성자료 확보</p> </td> </tr> <tr> <td data-bbox="308 1794 464 1917">1단계</td> <td data-bbox="464 1794 564 1917"> <p>내용</p> </td> <td data-bbox="564 1794 1436 1917"> <ul style="list-style-type: none"> - 장기간 나노입자의 크기분포 및 수농도 실시간 연속 관측을 통해 북극권 나노입자 생성 특성자료를 확보하고, 국제 공동연구팀과의 협력을 통해 기상자료, 에어로졸 측정자료, 가스자료, 인공위성 자료 등 확보 </td> </tr> </table>	1단계	<p>목표</p>	<p>북극권 나노입자생성 특성자료 확보</p>	1단계	<p>내용</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 장기간 나노입자의 크기분포 및 수농도 실시간 연속 관측을 통해 북극권 나노입자 생성 특성자료를 확보하고, 국제 공동연구팀과의 협력을 통해 기상자료, 에어로졸 측정자료, 가스자료, 인공위성 자료 등 확보 	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="308 1917 464 1995">2단계</td> <td data-bbox="464 1917 564 1995"> <p>목표</p> </td> <td data-bbox="564 1917 1436 1995"> <p>북극권 나노입자 및 에어로졸의 물리화학적 특성 및 생성원리를 규명하고 인위적/자연적 에어로졸의 발생원, 생성기작, 이동경로, 기후변화 영향 파악</p> </td> </tr> <tr> <td data-bbox="308 1995 464 2040">2단계</td> <td data-bbox="464 1995 564 2040"> <p>내용</p> </td> <td data-bbox="564 1995 1436 2040"> <ul style="list-style-type: none"> - 장기간 확보된 특성자료 분석을 통해 북극권 나노입자의 특성, 생성 원리, 발생원, </td> </tr> </table>	2단계	<p>목표</p>	<p>북극권 나노입자 및 에어로졸의 물리화학적 특성 및 생성원리를 규명하고 인위적/자연적 에어로졸의 발생원, 생성기작, 이동경로, 기후변화 영향 파악</p>	2단계	<p>내용</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 장기간 확보된 특성자료 분석을 통해 북극권 나노입자의 특성, 생성 원리, 발생원,
1단계	<p>목표</p>	<p>북극권 나노입자생성 특성자료 확보</p>												
1단계	<p>내용</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 장기간 나노입자의 크기분포 및 수농도 실시간 연속 관측을 통해 북극권 나노입자 생성 특성자료를 확보하고, 국제 공동연구팀과의 협력을 통해 기상자료, 에어로졸 측정자료, 가스자료, 인공위성 자료 등 확보 												
2단계	<p>목표</p>	<p>북극권 나노입자 및 에어로졸의 물리화학적 특성 및 생성원리를 규명하고 인위적/자연적 에어로졸의 발생원, 생성기작, 이동경로, 기후변화 영향 파악</p>												
2단계	<p>내용</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 장기간 확보된 특성자료 분석을 통해 북극권 나노입자의 특성, 생성 원리, 발생원, 												

			이동궤적, 이동경로 등 파악 - 북극권 에어로졸 (초미세먼지) 샘플링 수행을 통해 북극권 에어로졸의 화학적 원소 성분, 발생원 파악 - 인위적 또는 자연발생적 에어로졸 특성 분리 및 북극권 유입경로 및 발생원 추적 - 북극권 나노입자생성 및 관측된 에어로졸의 기후변화 영향 예측 활용
--	--	--	---

연구개발성과	- 북극권 대기 중 나노입자의 크기분포 및 수농도 실시간 연속 관측을 통한 북극권 나노입자 생성 특성 자료 확보 (2016.10 - 2020.02, 총 3년 5개월, 자료 회수율 연 85% 이상) - 국제 공동연구팀과의 협력을 통한 기상자료, 에어로졸 측정자료, 가스자료, 인공위성 자료 등 확보 - 단기간 집중측정을 통한 북극권 에어로졸 특성자료 및 화학적 원소성분 자료 확보 - 본 연구 관련 논문 게재 (SCI 3건) 및 학회 발표 (국내 2건, 국제 7건) - 본 연구 관련 학회발표 수상실적 3건 (국내 1건, 국제 2건) - 환경인자: 나노입자의 크기분포 및 수농도 자료 - KPDC (Korea Polar Data Center) 등재
--------	--

연구개발성과 활용계획 및 기대 효과	- 나노입자생성/에어로졸의 종합적인 특성자료를 제공함으로써 나노입자/에어로졸의 발생원, 생성경로, 물리적/화학적 변화, 이동경로 등을 파악하고 에어로졸의 기후변화 역할을 규명하는데 중요한 정보를 제공해 줄 것으로 기대 - 향후 극지 대기오염물질 모니터링 네트워크 구축을 위한 기본 자료 제공 - 미세입자의 종합적 특성을 실시간으로 측정하여 입자로 인한 환경적, 경제적 피해 최소화를 목적으로 한 실시간 감시기술과 경보 기술에 활용될 것으로 기대 - 한반도에 발생하거나 또는 동아시아, 북극권 장거리 이동 에어로졸 (황사입자포함) 특성 파악기술의 선진화 및 대기 중 거동 실시간 파악 및 국제 환경협약 및 대책 수립에도 공헌
---------------------	---

연구개발성과의 비공개여부 및 사유	해당사항 없음
--------------------	---------

연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술 요약 정보	소프트웨어	표준	생명자원		화학물	신품종	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물
	3											

연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입 기관	연구시설·장비 명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호

국문핵심어 (5개 이내)	북극권 에어로졸	발생원	이동경로	물리·화학적 특성	나노입자
---------------	----------	-----	------	-----------	------

영문핵심어 (5개 이내)	The Arctic aerosol	Origin	Transport pathway	Physicochemical properties	Nanoparticles
---------------	--------------------	--------	-------------------	----------------------------	---------------

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용	1
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	17
4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)	20
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도	21
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	21
별첨자료 (참고 문헌)	21



1. 연구개발과제의 개요

위탁과제 (북극권 나노입자 생성 및 에어로졸 특성 연구)

북극권 에어로졸과 지구기후변화 (global climate change)

- 북극권은 지구기후변화에 민감하게 받으며 연구적으로 지구상에 중요한 장소로 주목받음
- 북극에서 연간 평균 온도가 가장 큰 폭으로 상승된 것이 관측되었고 인위적인 활동으로 인해 발생된 광흡수 (light-absorbing) 에어로졸들이 북극까지 이동하여 북극의 온난화 문제를 야기할 수 있음을 제시
 - 북극지역의 대기, 눈과 얼음에서 인위적인 활동으로 인해 발생한 에어로졸 발견
 - 특히 봄철에는 증가한 에어로졸들로 인한 북극 연무 (Arctic Haze) 현상의 발생으로 가시거리 감소 현상이 빈번하게 관측
 - 이러한 북극 연무는 인위적인 활동으로 발생한 에어로졸들이 저위도 대륙에서 북극까지 이동하는 것이 원인으로 보고됨
 - 최근 북극 해빙 (Arctic sea ice)이 줄어들고 있는 상황으로 인해 북극 에어로졸 특성이 해양조건에 따라 밀접하게 영향을 받을 수 있다는 것이 보고됨
- 따라서, 이들의 관계 (에어로졸과 북극권 환경)를 이해하는데 있어 그 중요성이 부각됨

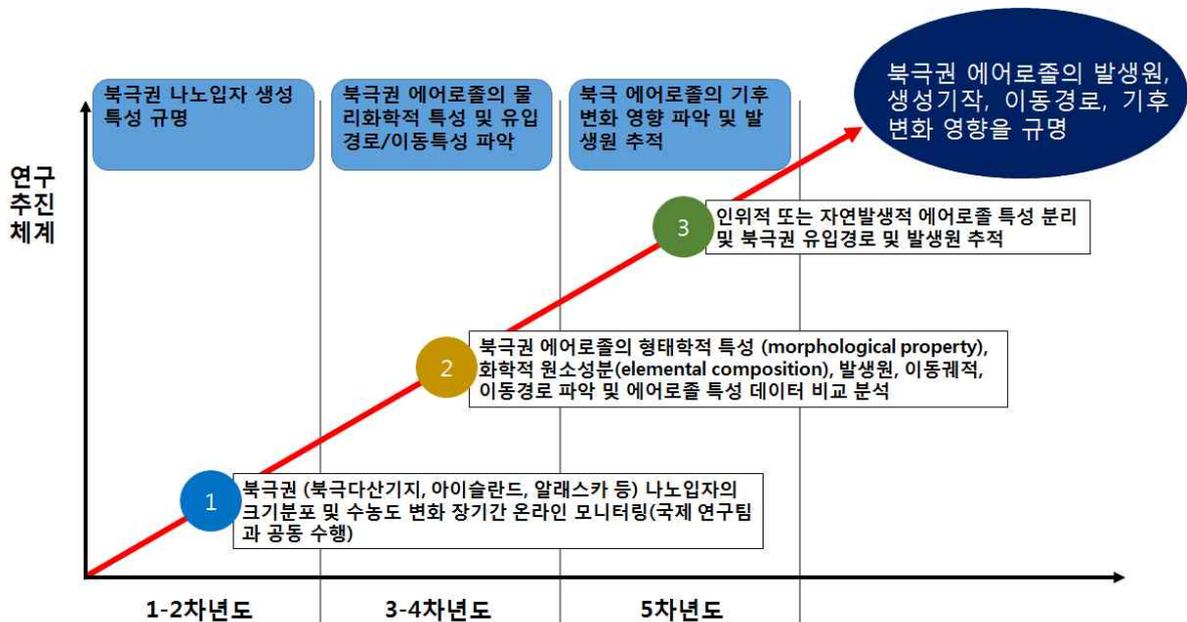
북극권 에어로졸 연구 필요성

- 에어로졸은 직/간접적으로 지구 복사열평형에 영향을 미치고 구름 형성의 핵으로 작용하여 기후 변화에 중요하게 관여 함
- 특히 나노 수준 크기의 에어로졸(나노입자)은 이러한 구름 형성 핵 (cloud condensation nuclei)으로 작용하는 것뿐만 아니라 인체에 흡입되었을 때 인체 건강에 영향을 미칠 수도 있다고 보고됨
- 본 북극권 에어로졸 연구와 관련된 국내/외 기술개발 수준은 개념정립 단계이며 기존의 대기 중 나노입자 연구는 주로 대기오염이 심한 도심지역에서 이루어졌으며 북극권과 같이 깨끗한 환경에서 발생하는 나노입자생성 연구는 기초단계임
- 북극지역에서 나노입자의 발생, 성장, 이동 및 변환 과정을 이해하기 위해서는 입자의 크기별 수농도 분포와 같은 기초적인 자료의 장기적인 측정이 요구되며, 이러한 자료를 바탕으로 북극에서의 나노입자생성 (new particle formation) 특성을 파악하고 기후변화 영향 연구에 기여하고자 함
- 따라서 이러한 에어로졸의 종합적인 특성자료를 제공함으로써 에어로졸의 발생원, 생성경로, 물리적/화학적 변화, 이동경로 등을 파악하고 에어로졸의 기후변화 역할을 규명하는데 중요한 정보 제공 가능
 - 향후 극지 대기오염물질 모니터링 네트워크 구축을 위한 기본자료 제공 기대
 - 에어로졸의 실시간 감시로 자연계 내의 매체 간 이동과 거동 및 환경영향 파악에 활용 기대

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

연구개발의 추진전략 및 방법

- 북극권 (북극 다산기지) 나노입자의 크기분포 및 수농도 변화를 국제연구팀과 공동으로 장기간 관측하여 나노입자의 생성 및 성장원리를 파악
- 확보된 자료를 활용하여 북극권 에어로졸의 발생원, 생성기작, 이동경로, 기후변화 영향을 규명



□ 주요 추진 내용 (1단계: 2016.05 - 2017.12)

- 북극권 나노입자생성 특성 자료 확보 및 규명
 - (1) 북극권 (북극 다산기지) 나노입자의 크기분포 및 수농도 변화 장기간 온라인 모니터링 (국제 연구팀과 공동 수행)
 - 노르웨이 니알슨 (Ny-Alesund) 제플린 관측소 (Zeppelin observatory)에서 나노입자의 크기분포 및 수농도 변화 장기간 측정 수행 ('16.10~'20.02, 3년 5개월)
 - 데이터 회수율 연 85% 이상 달성
 - 데이터베이스 (DB) 구축 및 KPDC (Korea Polar Data Center) 등재를 통한 연구 성과 대외 활용도 확산
 - (2) 국제 공동연구팀과 협력을 통해 기상자료, 에어로졸 측정자료, 가스자료, 인공위성 자료 등 확보
 - (3) 북극권 나노입자 생성 특성자료 비교 및 분석
 - 장기간 나노입자생성 특성자료를 분석하고 북극권 나노입자 생성 및 성장 원리 파악
 - 기 수행된 선행연구 및 연구자료를 활용하여 북극권 나노입자생성 특성 비교 분석

□ 주요 추진 내용 (2단계: 2018.01 - 2021.03)

- 북극권 에어로졸 특성 규명
 - (1) 화학적 특성을 포함한 북극권 에어로졸 특성 분석
 - (2) 북극권에서 고농도 에어로졸 발생시 에어로졸의 화학적 원소성분 분석을 위한 단기간 필터 샘플링 수행
 - (3) 레이저-유도 파괴 분광분석법 (Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS))을 이용하여 북극권 에어로졸 원소성분 분석 데이터 확보
- 북극권 나노입자/에어로졸의 물리화학적 특성 및 유입경로/이동특성 파악
 - (1) 화학적 특성을 포함한 북극권 나노입자 및 에어로졸 특성 분석
 - (2) 노르웨이 대기연구소 (Norwegian institute for air research (NILU))와 스웨덴 스톡홀름 대학 연구팀과 협력하여 북극권 에어로졸 이온 성분 자료, 기상 자료, 입자크기 10-800 nm 크기분포 및 수농도 데이터 등 확보 후 나노입자생성 특성 분석에 활용
 - (3) 나노입자생성 이벤트에 대한 물리화학적 특성 자료 확보
 - (4) 에어로졸의 역궤적 분석 (backward trajectory)을 이용한 에어로졸의 발생원 및 이동경로 특성 파악
 - (5) 확보된 북극 에어로졸 특성 측정 데이터와 기-확보된 에어로졸 특성 측정 데이터와

비교 분석 수행

○ 인위적/자연적 에어로졸의 유입 및 발생 특성 파악

- (1) 측정된 자료를 활용하여 인위적/자연발생적 에어로졸 특성을 분리하여 북극권 유입 에어로졸의 기후변화영향 파악 및 불확실성 최소화
- (2) 인위적/자연적 에어로졸을 구분하여 유입경로 및 발생원 추적

□ 연구수행내용 (2016.05 (착수) - 2021.03 (종료))

가. 연구개발의 목표와 개요

본 과제의 목표는 북극권 나노입자생성 (new particle formation (NPF)) 특성을 파악하고 에어로졸의 물리화학적 특성 (physicochemical property)을 규명하여 인위적 혹은 자연적 에어로졸의 발생원 (origin), 생성기작 (mechanism), 이동 경로 (transport pathway), 및 기후변화 영향 연구에 기여하고자 함이다.

북극권은 지구기후변화 (global climate change)에 민감하게 받으며 연구적으로 지구상에서 중요한 장소로 여겨지고 있으며 (Behrenfeldt et al., 2008) 북극에서 연간 평균 온도가 가장 큰 폭으로 상승된 것이 관측되었고 인위적인 활동으로 인하여 발생한 광흡수 (light-absorbing) 에어로졸들 역시 북극까지 이동하여 북극의 온난화 문제를 야기 시킬 수 있다고 보고되어지고 있다 (Hansen et al., 2004; Serreze et al., 2011). 북극지역의 대기나 눈과 얼음에서 인위적인 활동으로 인하여 발생한 에어로졸들이 발견되었으며 특히 봄철에는 증가한 에어로졸들로 인하여 Arctic Haze라고 알려진 가시거리감소 현상이 빈번하게 관측되고 있다. 이러한 Arctic Haze는 인위적인 활동으로 발생한 에어로졸들이 저위도 대륙에서 북극까지 이동하는 것이 원인이 된다고 보고된 바 있다 (Hirdman et al., 2010; Frossard et al., 2011).

본 연구와 관련된 국·내외 기술개발 수준은 개념정립 단계이며 국내에서 북극권 에어로졸의 연구는 극지연구소를 통해 북극 혹은 남극에서 수행된 이력이 있었으나 그 결과가 아직 많지 않다고 할 수 있다. 무엇보다 기존 과거의 관측장비는 10 nm 크기 입자의 이하의 나노입자 크기분포 및 수농도를 보지 못한 한계가 있었다. 따라서 기존 10 nm 수준 이하에서 발생하는 나노입자생성 이벤트 (NPF event), 입자들의 생성원, 성장기작 등 북극지역 에어로졸의 다양한 특성을 명확하게 이해하고 기후변화 영향을 파악하기에는 어려움이 따르고 있었다. 하지만 본 연구는 최소 3 nm 크기의 나노입자의 크기분포 및 수농도 자료를 획득할 수 있는 관측 장비를 이용하고 북극권 에어로졸의 물리화학적 특성, 나노입자생성 특성 등을 규명하여 북극권 에어로졸이 지구기후변화에 미치는 영향을 파악하는데 중요한 자료를 제공할 수 있는 의의가 있다.

나. 연구개발 추진전략 및 방법

본 과제의 연구개발 목표를 성공적으로 달성하기 위해서는 연구수행 연속성이 중요하기 때문에 연구개발 추진 전략 및 방법은 1차년도인 2016년 10월부터 시작하여 2020년 2월까지 북극권 (북극 다산기지) 나노입자의 크기분포 및 수농도 (aerosol number size concentration) 변화를 국제 연구팀과 공동으로 장기간 모니터링을 함으로써 나노입자의 생성 및 성장원리를 파악하고자 하였다. 장기간 측정을 위한 측정거점은 노르웨이 니알슨 (Ny-Alesund)에 있는 제플린 관측소 (Zeppelin observatory)에서 수행되었다 (Fig.1). 3 nm에서 60 nm 크기 에어로졸(나노입자)의 수농도 분포 특성을 매 3분 간격으로 실시간 모니터링을 위한 nano-SMPS (nano-scanning mobility particle sizer) (TSI, USA) 장비를 사용하였고, 데이터 손실을 최소화하기 위해 원격으로 주기적으로 장비 운용상태 및 데이터 백업을 진행하였다. 추가적인 연구 활동으로서 북극 다산기지 체류기간 동안에 그루바데트 연구실 (Gruvadet laboratory)을 이용하여 PM_{2.5} 에어로졸 샘플링을 단기간 (수 일 ~ 수 주간) 진행하였고, 이 필터에 포집된 에어로졸은 나중에 레이저-유도 파괴 분광분석법 (laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS))을 이용하여 원소 성분 분석 데이터를 추가 확보 하였다.

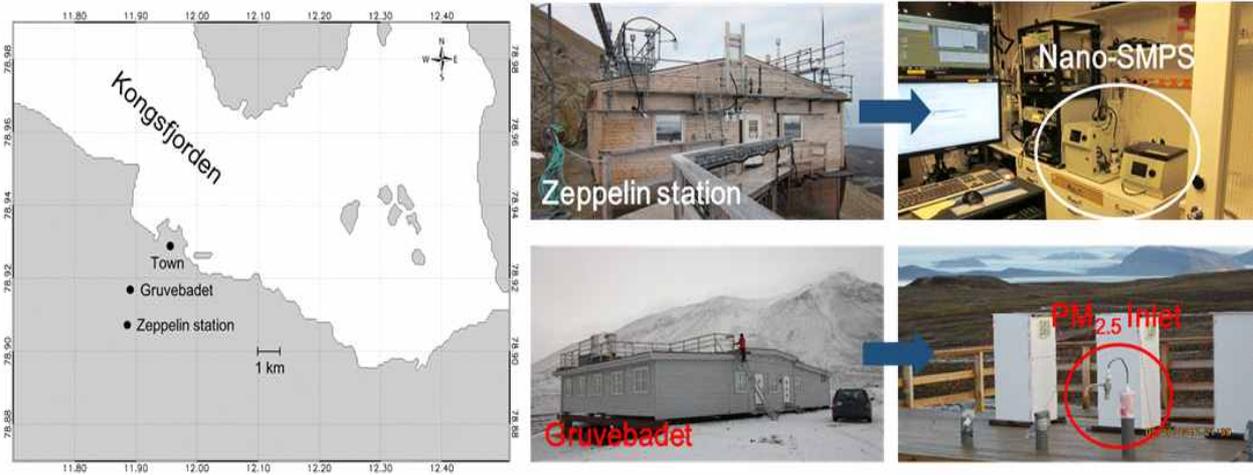


Fig. 1. The map of sampling sites.

Fig. 2와 같이 nano-SMPS는 입자를 인가전압에 따른 전기이동도 (electrical mobility)에 차이를 이용하여 특정 입자 크기를 걸러주는 DMA (differential mobility analyzer)와 입자의 수농도를 측정해주는 CPC (condensation particle counter)로 이루어져 있다. DMA는 입자의 크기에 따라서 전기이동도가 다른 원리를 이용하여 입자들의 크기를 순차적으로 분류하게 되며 DMA에 의해서 걸러진 일정한 크기의 단분산 (monodisperse) 입자들은 CPC로 넘어가서 응축성장 (condensation growth)을 한 뒤 레이저에 의해 산란되는 신호를 검출함으로써 입자의 수농도 (number concentration)를 실시간으로 카운팅하며 단위는 cm^{-3} 이다. 이러한 원리에 의해 최종적으로 에어로졸 수농도 크기분포 (aerosol number size distribution) 데이터를 실시간으로 획득할 수 있다.

추가적인 연구 활동으로 북극 체류기간 동안 구르바데트 실험실 (Gruvebadet laboratory)에서는 $\text{PM}_{2.5}$ 입자의 원소성분을 측정하기 위해 $\text{PM}_{2.5}$ cyclone (URG, USA)를 이용하여 $2.5 \mu\text{m}$ 이하의 입자들을 silver membrane filter에 하루 24시간 포집하였으며 2016년 9월 28일부터 2016년 10월 8일 동안의 총 11개의 필터 시료를 확보하였고, 2017년 9월 6일부터 2017년 9월 10일 동안 5개의 필터 시료를 확보하였다. 이러한 포집된 필터는 Fig. 3에 보이는 바와 같이 LIBS (laser-induced breakdown spectroscopy)를 이용하여 필터에 포집된 에어로졸의 원소성분들을 분석하였다. LIBS는 필터 샘플에 펄스 레이저(pulse laser)를 집속시켜 플라즈마를 생성시킨 후 방출되는 빛 (emission light)을 분광 분석하여 다양한 원소성분들을 검출하는 방법이다.

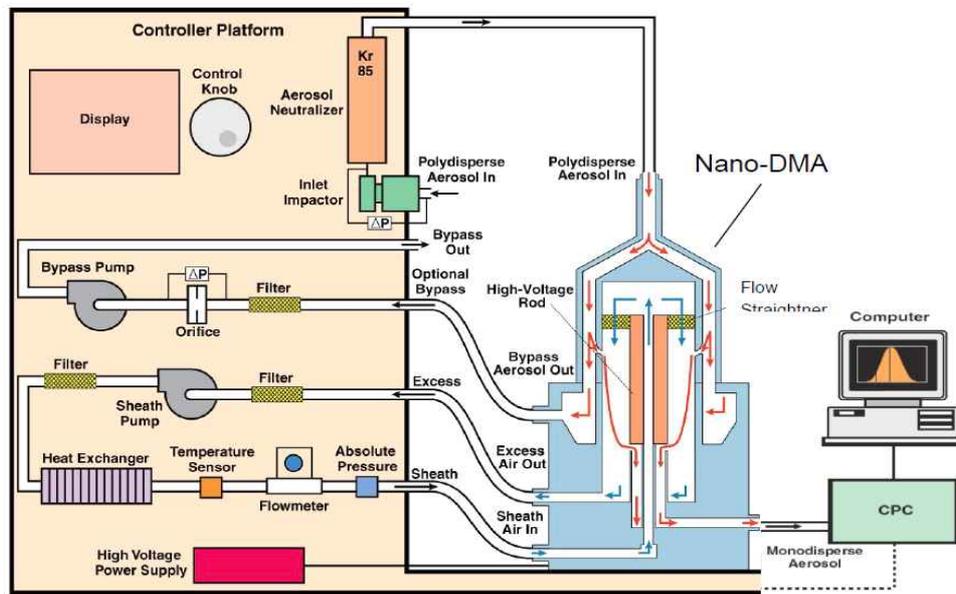


Fig. 2. The schematic of Nano-SMPS 개략도 (reference: TSI, manual).

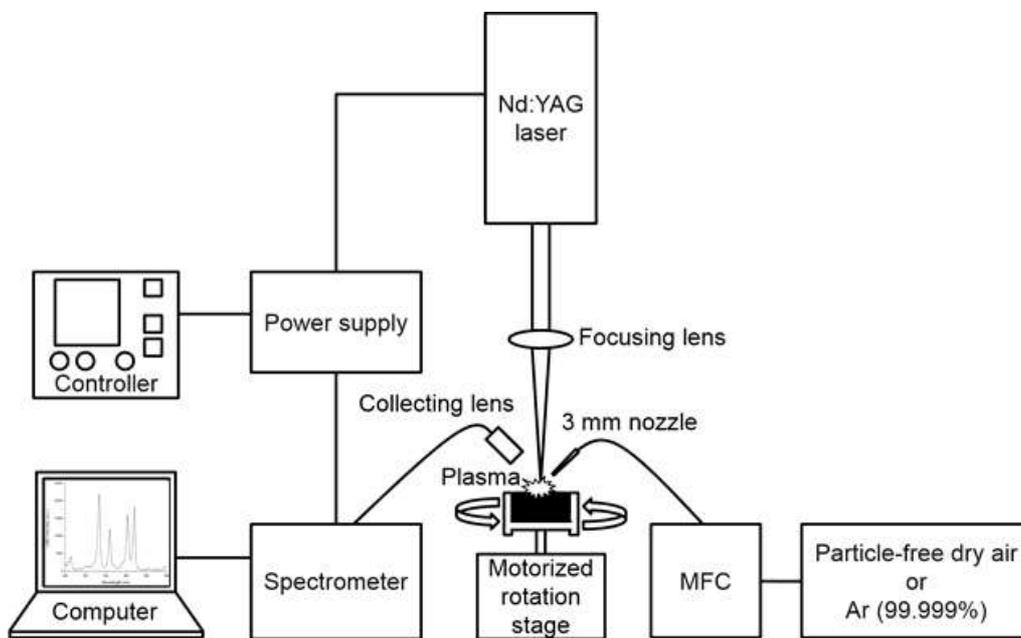


Fig. 3. The schematic of Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS)

다. 연구결과

○ 북극권 나노입자의 크기분포 및 수농도

Fig. 4는 본 연구에서 확보한 2016년 10월부터 2020년 02월까지 총 3년 5개월의 3-60

nm 입자 크기분포 및 수농도의 결과를 보여준다. x축은 시간을, y축은 입자크기 (nm), 그리고 z축 (색)은 입자크기에 따른 수농도이다. 4월 말인 늦은 봄부터 수농도가 급격히 증가하기 시작하여 9월 중순 쯤 부터 입자수가 감소하는 것으로 관측되었다. 우리나라 절기상으로는 9월 중순부터 추분이 시작되는 시기이다. 북극의 봄부터 여름철의 나노입자생성 이벤트 (NPF event)가 많이 관찰되었으며, 이는 태양복사 (solar radiation)가 강해지는 시기에 따른 광화학 반응 (photochemical reaction)이 활발히 일어나기 때문에 NPF event가 많이 발생할 가능성이 높다. 상대적으로 낮보다 밤이 긴 늦가을부터 봄까지는 그러한 광화학 반응의 영향을 상대적으로 덜하기 때문에 나노입자 수농도가 눈에 띄게 줄어드는 것을 알 수 있다. 따라서 북극의 초여름부터 늦가을까지 진행되는 백야기간 동안 활발한 광화학 반응이 나노입자 형성에 영향을 주었을 가능성이 높다.

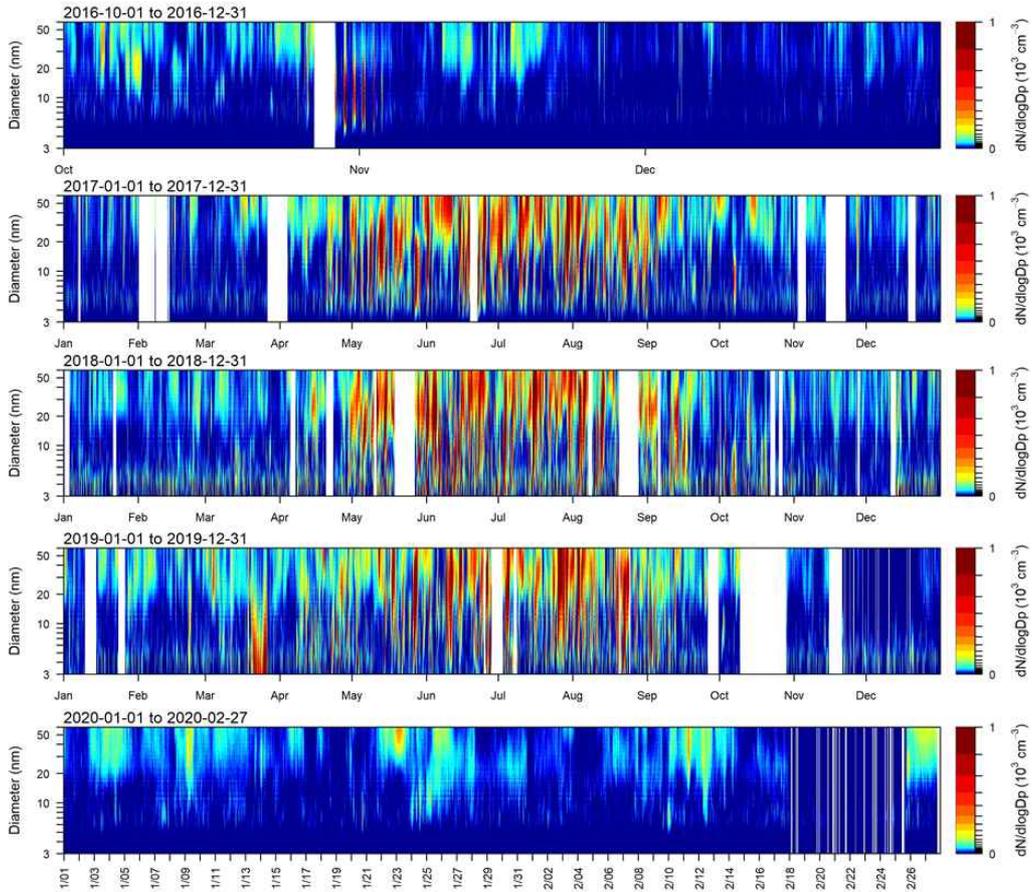


Fig. 4. The aerosol size distribution in the size range of 3-60 nm during the measurement period (Oct 2016 - Feb 2020)

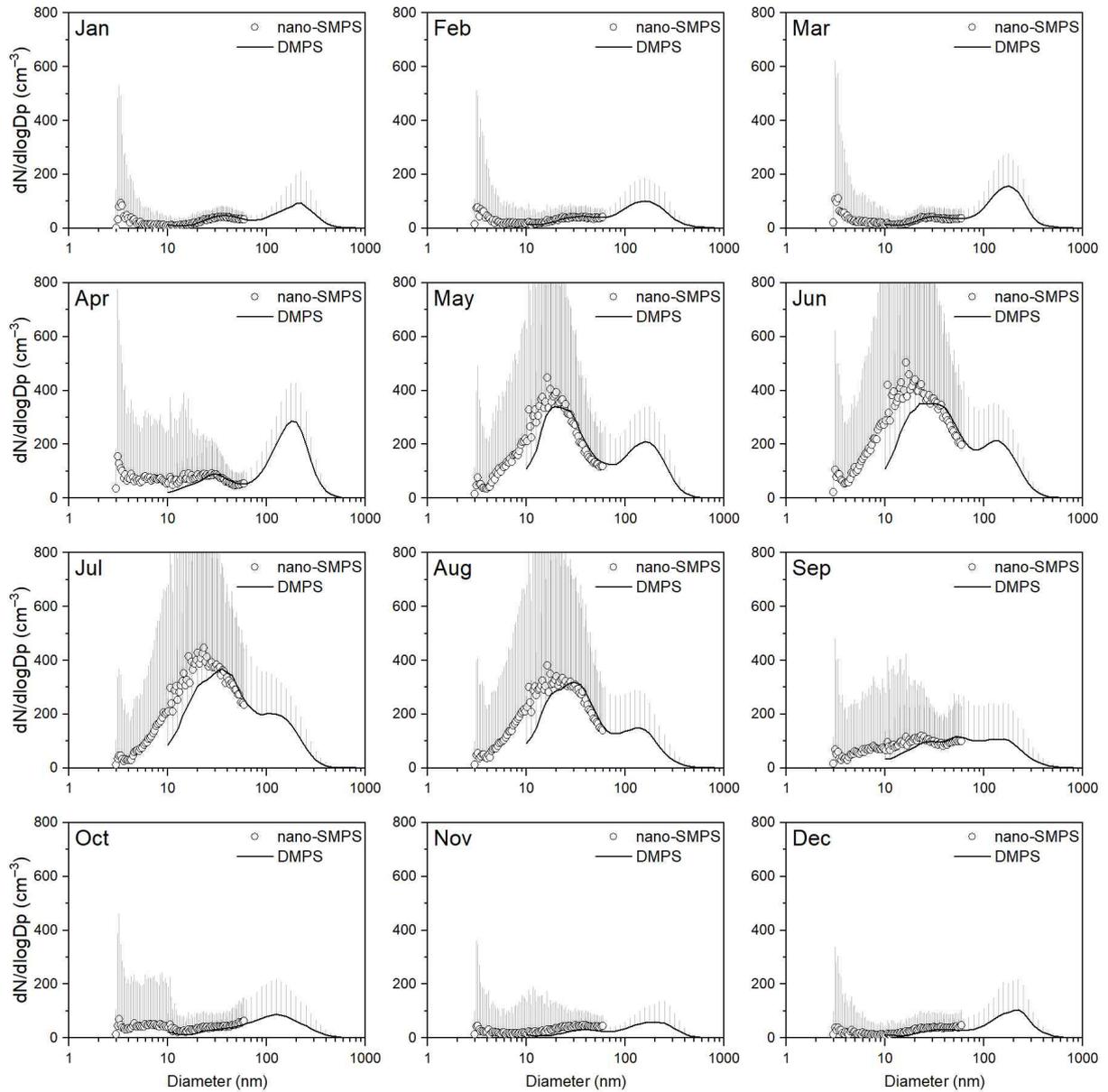


Fig. 5. Comparison of monthly average size distributions obtained from the nano-SMPS (3-60 nm) and DMPS (10-810 nm) during the measurement period. The error bar indicates standard deviation (Supplement Figure S1 in Lee et al., 2020).

Fig. 5는 노르웨이 대기연구소 (NILU)와 스톡홀름 대학 연구팀의 10-800 nm 크기 범위의 입자 수농도 자료와 본 연구에서 측정된 nano-SMPS 데이터와 결합하여 총 3-800 nm 입자 크기 범위에 대한 월별 수농도 평균 분포를 보여준다 (2016년 10월 - 2018년 12월에 대한 자료 활용). 다른 두 장비로 측정하였음에도 불구하고 서로 잘 맞는 것을 확인할 수 있었다. 앞서 Fig. 4에서 언급한 바와 같이 초여름부터 늦가을까지 3-60 nm 입자크기 범위의 수농도가 유의하게 증가하는 것을 알 수 있으며, 겨울철 입자 수농도가 확연히 줄어든 것을 알 수 있었다.

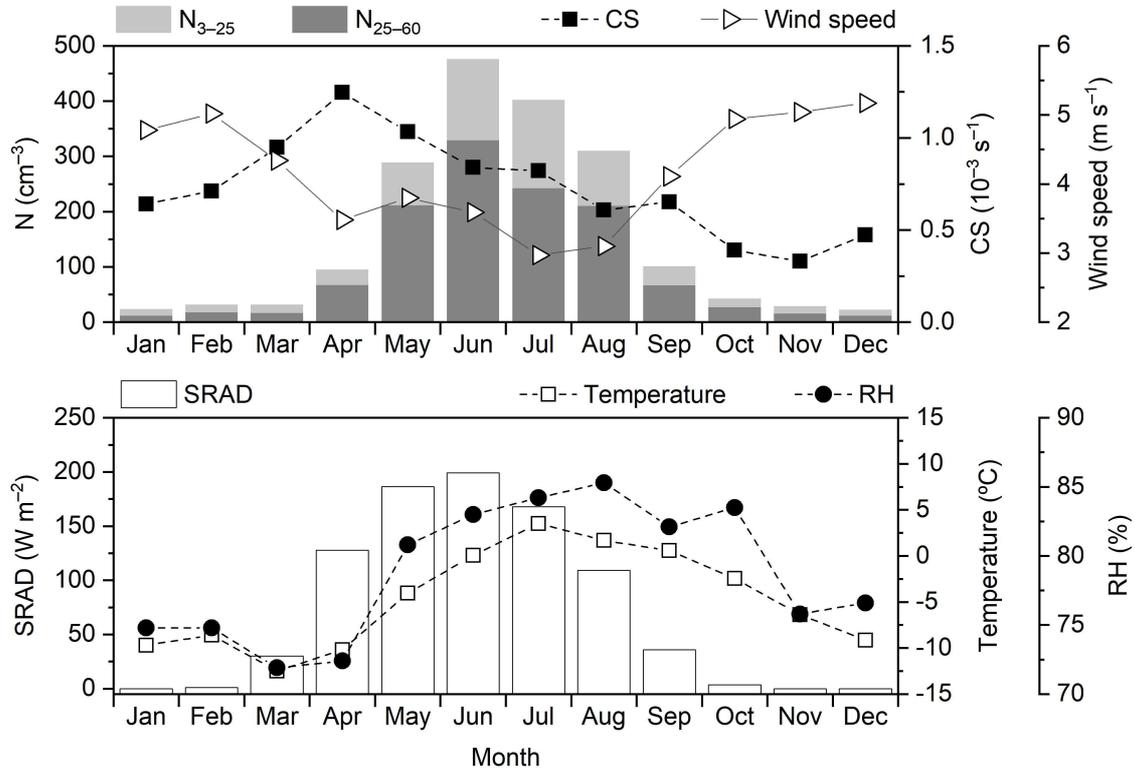


Fig. 6. Monthly variations of N_{3-25} , N_{25-60} , CS, and wind speed (upper panel), temperature, RH, and SRAD (lower panel) during the measurement period (Figure 2 in Lee et al., 2020).

Fig. 6은 2016년 10월 - 2018년 12월에 데이터 대한 월별 수농도 및 기상자료의 결과를 보여준다. 여기서 N_{3-25} 는 3-25 nm 입자 크기범위의 수농도 (cm^{-3})를, N_{25-60} 은 25-60 nm 입자 크기범위의 수농도 (cm^{-3})를, CS는 condensation sink (s^{-1})를, SRAD는 solar radiation (W m^{-2})를 의미한다. 일반적으로 25 nm 입자크기 아래의 수농도가 폭발적으로 증가하는 것은 NPF event 결정 인자중 하나이다. Fig. 4과 Fig. 5에서 보인바와 동일하게 4월 말인 늦은 봄부터 수농도가 증가하기 시작하여 9월 중순 쯤 부터 입자의 수농도가 감소하는 것으로 관측됨과 동시에 CS는 4월부터 점차 감소하고 SRAD는 증가하는 경향을 보인다. CS란 응축 가능한 증기 분자가 대기 중 기-존재하는 에어로졸에서 얼마나 빠르게 응축되어 사라지는지를 결정하는 인자이다 (Kulmala et al., 2012). 즉, 대기 중 큰 입자들이 많으면 CS의 값은 커지는데, 이는 핵화 (nucleation)에 참여해야할 대기 중 응축 가능한 증기 분자 (주로 H_2SO_4) 또는 수 나노입자 크기의 작은 입자들이 사라지는 것이 많다는 의미이다. 따라서 CS가 높다는 것은 NPF의 발생이 억제될 여지가 높다는 의미로 해석될 수 있다. 결과적으로 CS가 낮고 SRAD가 높은 기간에 나노입자들의 수농도가 증가하고 NPF event의 빈도가 높아진다.

○ 북극권 나노입자생성 이벤트 특성

Fig. 7에 보인바와 같이 본 연구에서는 두 가지 대표적인 유형의 NPF를 식별하였다. Type 1 NPF event는 전 세계 여러 지역에서 전형적으로 관찰되는 “바나나 (banana)” 모양의 NPF event를 보여주며 후속입자성장 (형성된 나노입자가 점진적 성장을 하는 형태)과 함께 수농도가 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. Type 2 NPF event는 폭발적인 수농도 증가가 보이지만 후속입자생장이 보이지 않는 형태를 띠는 NPF event다. 마지막으로 그림에 보이지 않았지만 “undefined” NPF event의 경우 Type 1 또는 Type 2에 해당하지 않는 event이며 수농도의 증가가 보이지만 2시간 이내 짧게 발생하거나 형태가 애매한 경우이다.

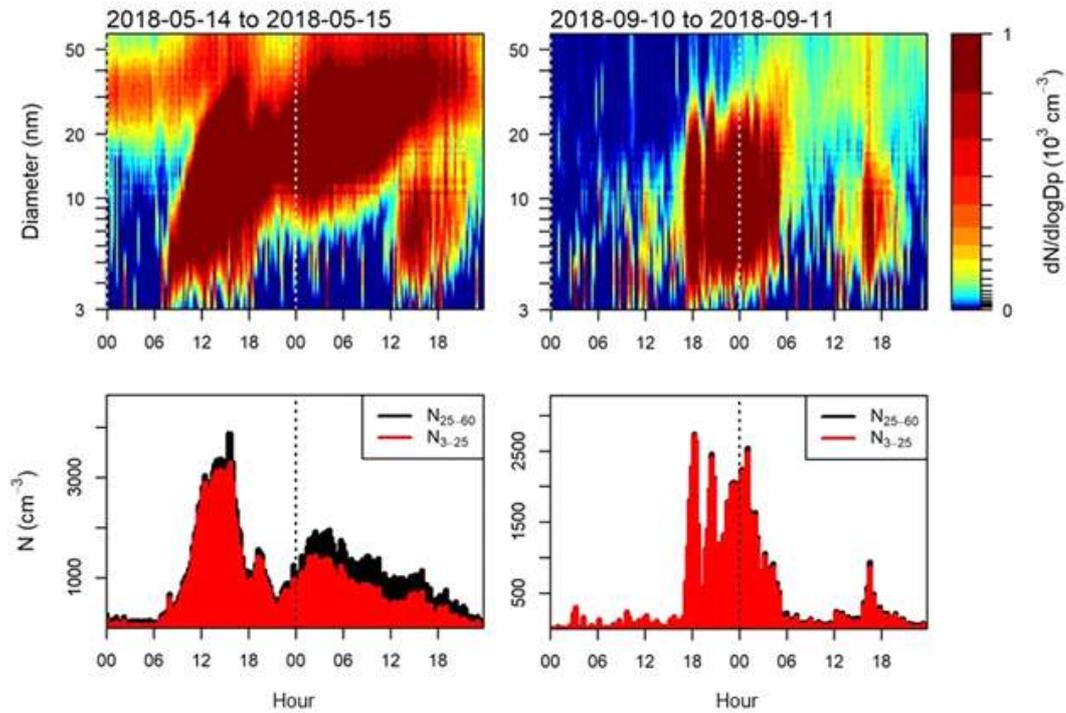
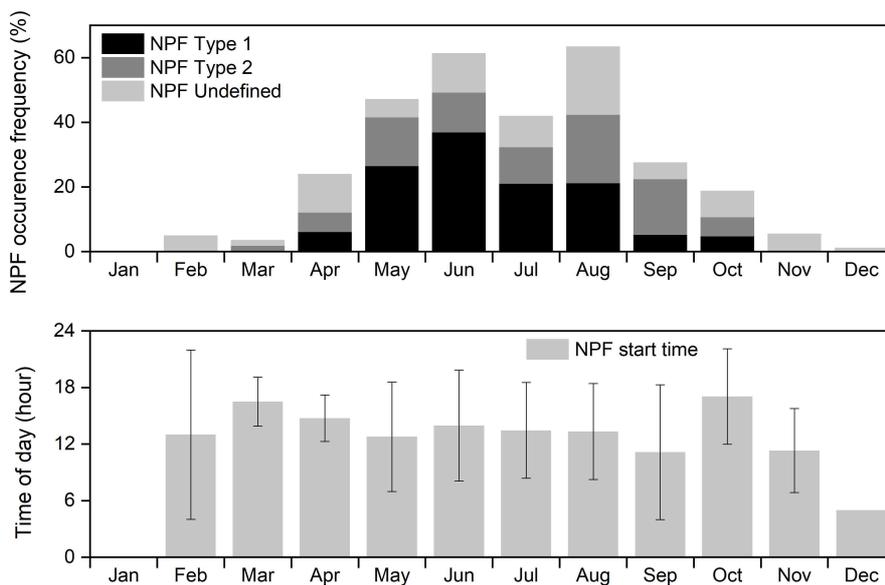


Fig. 7. Examples of distinct NPF types identified in this study. In type 1 (left), N_{3-25} increases significantly with continuous particle growth, while in type 2 (right) it increases significantly without significant particle growth. The x-axis is the local time (hour) (Figure 4 in Lee et al., 2020).

이렇게 선정된 NPF event의 연간 NPF 발생 빈도는 약 23%로 나타났으며 월별 NPF 발생 빈도에 대해서는 Fig. 8에 나타내었다. 본 연구와 동일한 지역에서 수행된 Dall' Osto et al. (2017)에서 보인 선행연구에서는 2000년부터 2010년까지 연간 NPF 발생의 평균이 18%로 우리의 값보다는 낮은 것으로 나타났다. Heintzenberg et al. (2017) 선행연구에서는 2006년부터 2015년 자료를 사용하였고 연 평균 20% NPF 발생 빈도가 나타났다. 따라서 해가 지나갈수록 NPF 발생빈도가 점차 증가하는 것으로 추측될 수 있었다.



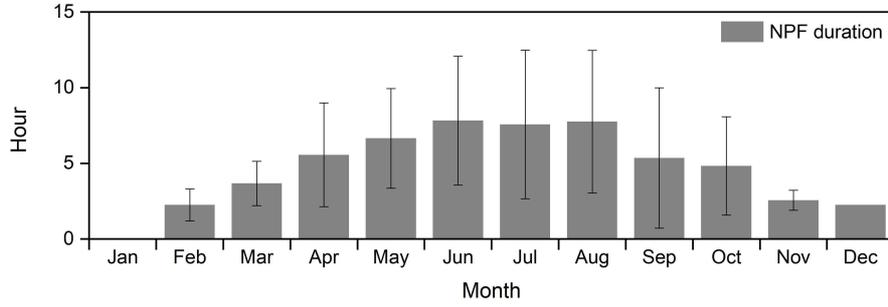


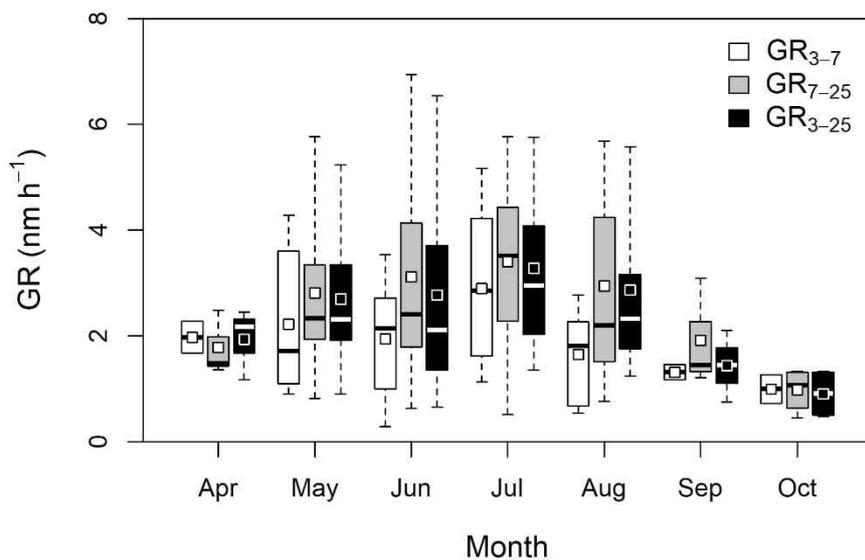
Fig. 8. Monthly variations of NPF occurrence, start time (local time), and duration; the error bar represents standard deviation (Figure 5 in Lee et al., 2020).

Fig. 8에 보이듯 본 측정 거점에서의 NPF 발생시간은 현지시간으로 13:00-14:00 사이에 주로 발생하였으며, 이는 강한 태양 복사에 의한 광화학 활동이 NPF 시작에 중요한 역할을 하는 것을 시사한다. NPF의 지속시간은 약 6-7시간 정도로 지속되었으며 여름에 가장 길게 나타났다. 그리고 종종 NPF가 낮에만 발생하는 것이 아닌 밤에 NPF가 발생하는 경우가 종종 보였다. 이를 소위 night-time NPF라 칭하며 daytime NPF와는 조금 다른 메커니즘으로 발생하는 것으로 알려져 있다 (Vehkamaki et al., 2004; Park et al., 2020).

$$GR = \frac{D_{p2} - D_{p1}}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

$$J = \frac{dN_{i-j}}{dt} + \frac{N_{i-j}}{d_j - d_i} GR + N_{i-j} CoagS_{i-j} \quad (2)$$

Fig. 9은 NPF event에 대한 성장률 (growth rate (GR))과 형성률 (formation rate (J))에 관한 결과를 보여준다. GR이란 입자가 단위 시간동안 몇 nm로 성장하는지에 대한 정보이며 단위는 nm h^{-1} 이다 (식 (1)). J는 단위 시간당 변하는 수농도로 정의되며 단위는 $\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$ 이다. 이 두 정보를 이용하여 NPF의 세기(intensity)를 판단할 수 있다 (식 (2)). 본 연구결과에서는 평균적으로 NPF event에 대한 GR_{3-7} 이 2.07 nm h^{-1} 그리고 J_{3-7} 가 $0.04 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ 로 계산되었다. 다른 도심지역과 같은 선행연구들과 비교해보았을 때, 이러한 수치는 수에서 수십 배 낮은 것을 확인할 수 있었다 (Dal Maso et al., 2005; Wu et al., 2007; Manninen et al., 2010; Shen et al., 2016; Kalivitis et al., 2019).



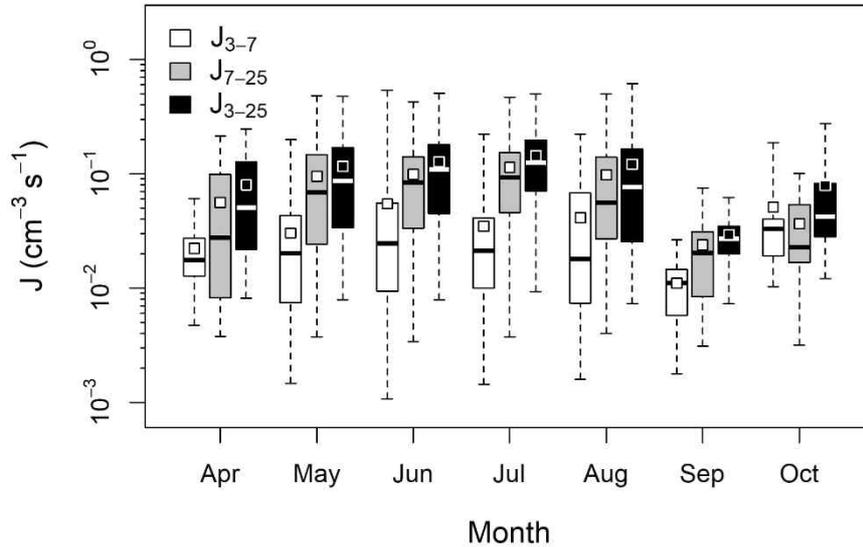


Fig. 9. Monthly variations of GR_{3-7} , GR_{7-25} , GR_{3-25} , J_{3-7} , J_{7-25} , and J_{3-25} for NPF in the Arctic. Boxes and whiskers represent the 25th-75th percentiles and minimum-maximum, respectively; squares indicate means and horizontal lines within boxes indicate medians (Figure 7 in Lee et al., 2020).

○ 북극권 나노입자생성 이벤트와 발생원, 이동경로, 유입경로

본 연구에서는 NPF event와 스발바르 주변 지역의 엽록소 농도 (chlorophyll-a)와 연관성을 찾기 위해 MODIS 자료를 활용하였다. 엽록소 농도는 식물성 플랑크톤의 biomass의 양을 나타내는 정보를 주며, 이러한 생물학적 활동에 의해 배출되는 DMS (dimethylsulfide)는 대기 중 황산 (H_2SO_4) 농도에 영향을 준다. Fig. 10은 Svalbard 주변 (70-85° N, 25° W-50° E 범위) 지역의 MODIS 월간 엽록소 농도의 평균적인 분포를 보여준다. 엽록소의 농도는 4월부터 증가하고 8월 이후에는 감소한 것으로 나타났다.

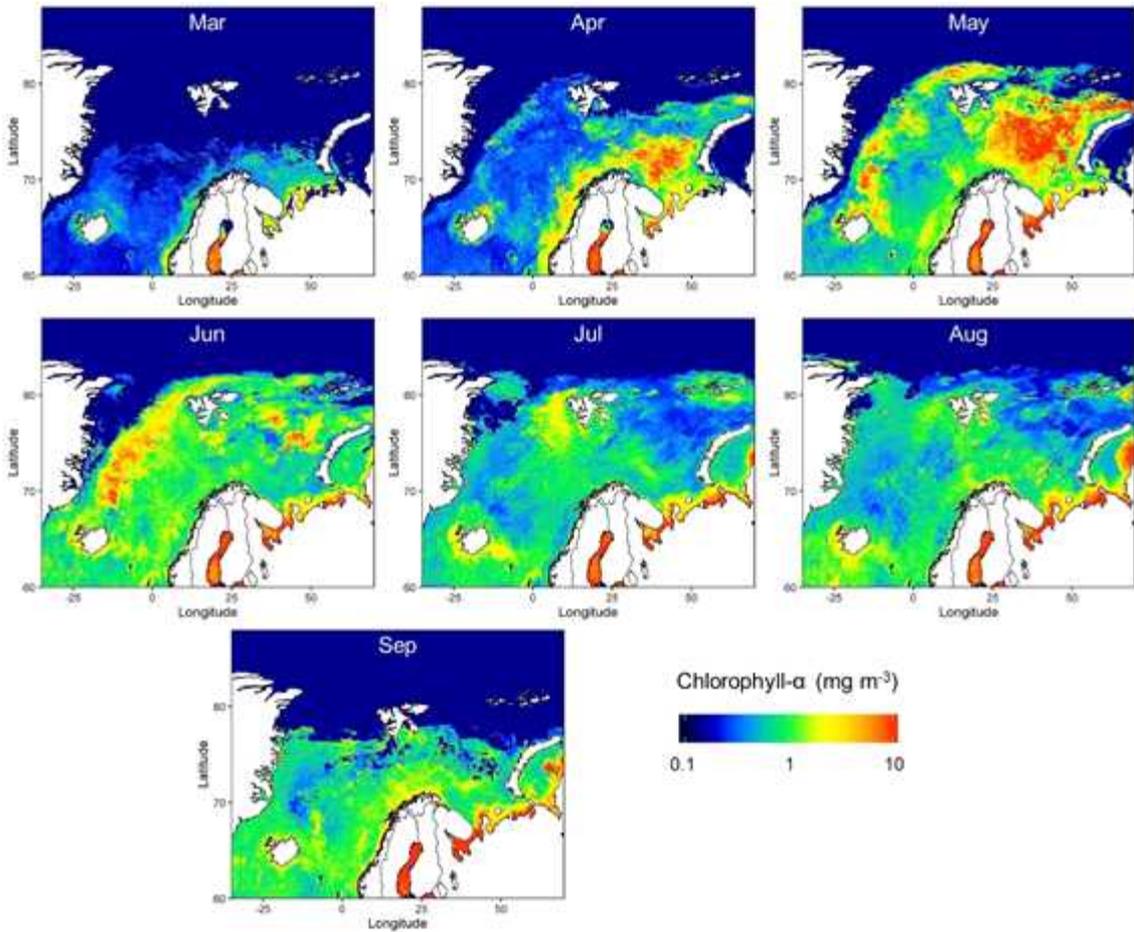


Fig. 10. MODIS-derived monthly chlorophyll- α concentration during the measurement period at 4 km resolution (Figure 6 in Lee et al., 2020).

엽록소 농도는 특히 스발바르 남서부와 남동부의 해양, 즉 그린란드 해와 바렌츠 해안 지역에서 상대적으로 높게 나타난 것을 알 수 있었다. Park et al. (2018) 연구에 따르면 그린란드 해 (남서쪽)의 DMS 생산 능력은 바렌츠 해 (남동쪽)보다 3 배 정도 더 높은 것으로 나타났다. 즉, 엽록소 농도당 배출되는 DMS의 양은 그린란드 해가 더 높다는 말이다. 실제 Park et al. (2018)에서 제시한 “Air mass exposure to chlorophyll-a (E_{chl})” 개념을 이용하여 해당 영역을 지난 해양 기단의 잠재적 DMS 생산 능력 비교를 수행하였고, E_{chl} 값과 NPF 발생 빈도의 상관관계는 $r = 0.69$ (p -value < 0.05) 으로 관련이 높은 것으로 나타났다. 따라서 그린란드 해의 생물학적 활동에 의한 DMS의 양은 바렌츠 해보다 상대적으로 높으며, 북극 권에서의 DMS의 양은 NPF 발생 빈도와 연관이 있는 것을 시사한다.

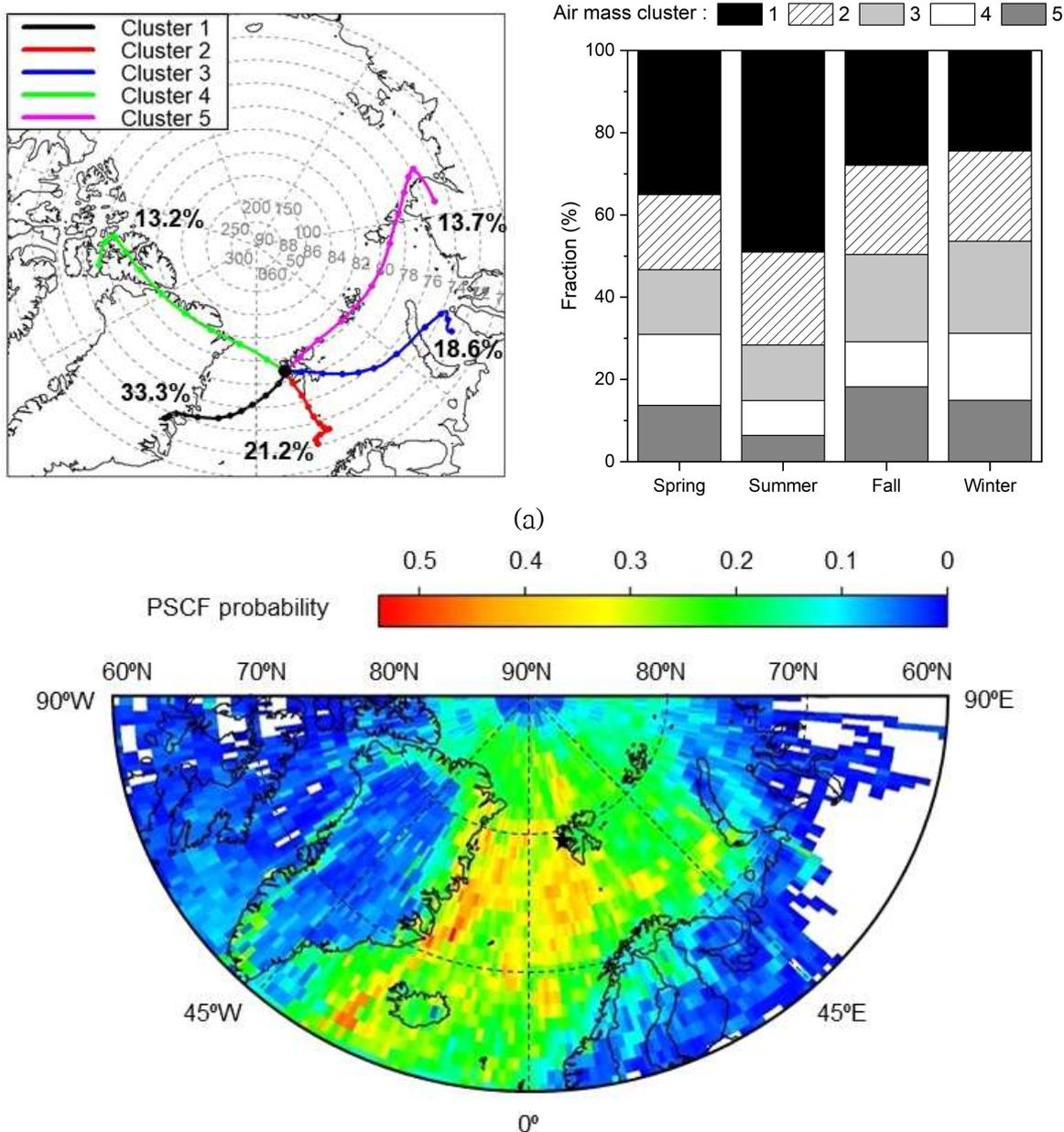


Fig. 11. (a) Five major clusters for air mass back trajectories during the measurement period and the fraction of each cluster by seasons. (b) PSCF back-trajectory analysis for air mass origins affecting NPF at the 75th percentile of N_{3-25} (Figure 8 in Lee et al., 2020).

이러한 결과에 대한 다른 증거로써, NOAA (national oceanic and atmospheric administration) HYSPLIT (hybrid single particle lagrangian intergated trajectory)의 역궤적 (airmass backwater trajectory) 데이터를 이용하여 PSCF (potential source contribution function) 분석을 진행하였다. Fig. 11-(b)는 역궤적 데이터와 N_{3-25} 의 75 번째 백분위 수를 사용하여 NPF와 관련하여 공기 질량의 잠재원 영역을 추가로 조사하였다. 나노 입자의 양 (즉, NPF 이벤트)의 증가는 공기 질량이 해양 지역을 지나 스발바르의 남서쪽과 남쪽으로 통과 할 때 더 자주 발생한 것으로 나타났으며, Fig. 11-(a)에 나타나있듯 전체 기간 동안 공기 질량의 49%가 남서쪽에서 유래되었다. 앞서 Fig. 10에 나타난 대로 열록소 농도는 남서쪽 해양과 남동쪽 해양 지역에서 강했으며 남서쪽 해양의 DMS 생산 능력은 남동 해양보다 3 배 더 많았다고 하였다. 따라서 본 결과도 마찬가지로 그린란드 해 지역의 해양 생물원이 북극의 NPF에서 중요한 역할을 한다고 할 수 있다.

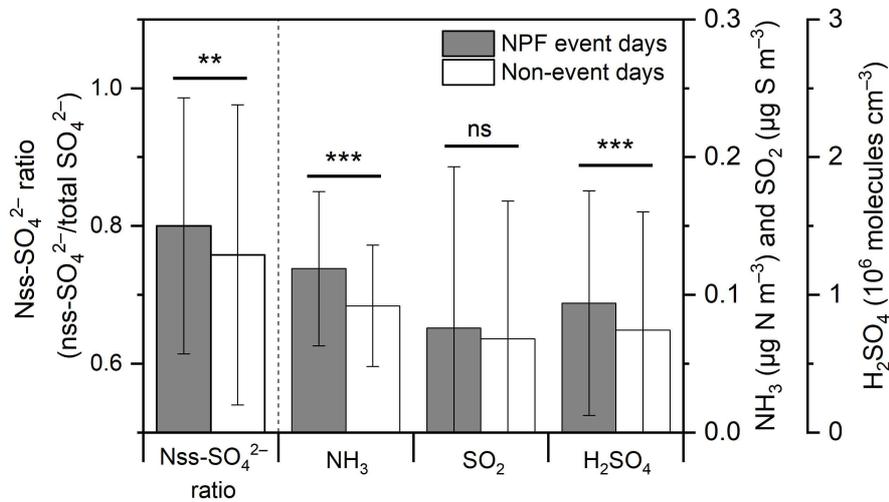


Fig. 12. Comparison of average nss-SO₄²⁻ ratio (nss-SO₄²⁻/total SO₄²⁻), NH₃, SO₂, and H₂SO₄ concentrations between NPF events and non-event days: error bar and stars represent the standard deviation and *p*-values of a t-test (ns: > 0.05, *: ≤ 0.05, **: ≤ 0.01, ***: ≤ 0.001), respectively (Figure 9 in Lee et al., 2020).

노르웨이 대기연구소 (NILU)에서 제공 받은 입자상 물질 (PM)의 화학적 특성과 일일 NH₃ 농도를 활용 및 조사하였다. 측정 기간 동안 PM에서 이온 종 (Na⁺, Mg²⁺, K⁺, NH₄⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻ 및 Cl⁻) 중에서 1차 해염 입자 (Na⁺, Mg²⁺ 및 Cl⁻)는 풍속이 높은 겨울에 증가한 반면 NH₄⁺, NO₃⁻ 및 SO₄²⁻ (2차 종)의 기여는 봄과 여름에 증가한 것으로 나타났다. Fig. 12 결과에 나타낸바와 같이 NH₃ 농도는 비-사건일 보다 NPF 사건 일에 유의하게 높은 것으로 나타났다. 이는 북극의 NH₃는 생물학적 및 동물 공급원 (예 : 바닷새 서식지)에서 유래 할 수 있다는 연구결과가 있다 (Tovar-Sánchez et al., 2010; Croft et al., 2016; Dall'Osto et al., 2017). 그러나 SO₂ 기체 농도는 비-사건일 보다 NPF 사건 일에 유의하게 높지는 않은 것으로 나타났다. 하지만 H₂SO₄는 NPF 사건 일이 비-사건일 보다 유의하게 높은 것으로 나타났으며 이는 북극권 대기에서 H₂SO₄가 핵 생성 및 성장에 중요한 역할을 하는 것을 시사한다.

○ 북극권 에어로졸 원소성분 분석 결과

Fig. 13은 2016년부터 2018년까지 매년 북극 체류기간 동안에 초미세먼지 (PM_{2.5})를 포집한 뒤 질량농도를 나타낸 것이다. 측정기간 동안 PM_{2.5} 질량농도는 0.36-3.38 μg m⁻³ 범위의 값을 가졌으며, 이는 중/저위도 지역보다 현저히 낮은 수치에 해당한다. 한 예로, 광주지역의 경우 연 평균 PM_{2.5} 질량농도는 20 μg m⁻³ 수준이다. 측정된 기간 중 봄철인 5월 (1.67 μg m⁻³)에 농도가 평균적으로 가장 높았으며, 그다음은 가을인 10월 (1.58 μg m⁻³), 여름인 9월 (1.21 μg m⁻³) 순으로 나타났다.

Fig. 14은 2016년 및 2017년 북극 체류기간 동안에 에어로졸을 포집한 필터를 가지고 레이저 유도 파괴 분광분석법을 이용하여 검출된 10개 원소에 대한 스펙트럼에 대한 결과다. 탄소 (C), 산소 (O), 수소 (H)를 포함한 7개의 금속 원소 (Na, K, Ca, Mg, Fe, Sr, Si)들이 검출되었음을 확인할 수 있었다. 대부분 지각 원소 (crustal elements)들이 많이 포함됨을 알 수 있었으며, 2016년 필터 11개에 대한 PM_{2.5}와의 비교를 통해 Fig. 15에서 볼 수 있듯이 PM_{2.5} 질량농도가 금속 원소들과의 상관성을 보임을 확인하였다. 즉, 대체적으로 높은 PM_{2.5} 질량농도가 높아질수록 원소성분들도 높은 검출 값이 나타남을 보였다. 2017년 필터 5개에 대한 원소분석 결과를 통해 (Fig. 16), 필터 샘플링 기간 동안의 특정 PM_{2.5} 이벤트가 보이지 않았으며, 특이점을 찾을 수 없었다. 2018년 자료는 그림에 표현하지 않았지만, 2016-2018년

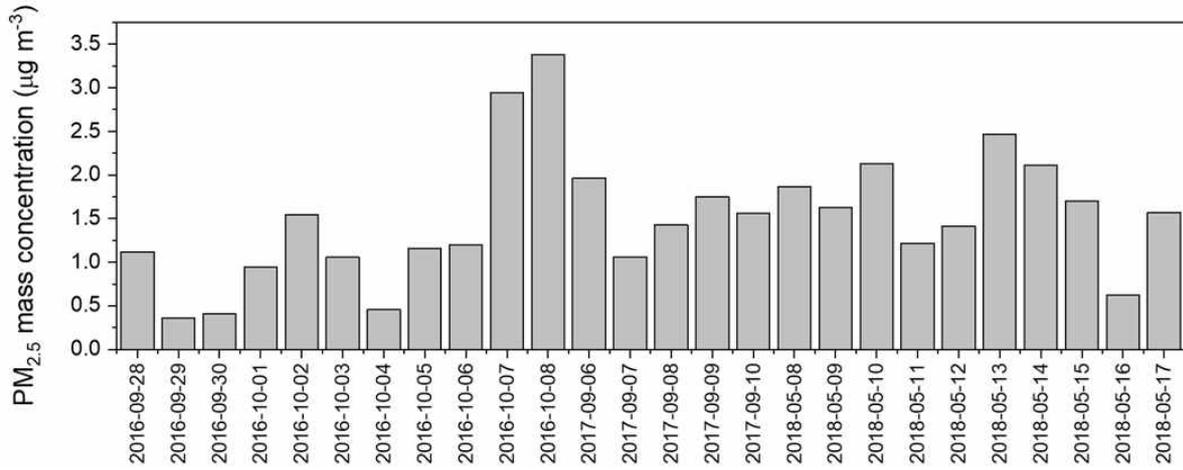


Fig. 13. PM_{2.5} mass concentration ($\mu\text{g m}^{-3}$) during the sampling periods. 모든 자료를 바탕으로 PM_{2.5} 질량농도 상위 15% 해당되는 날은 주로 C, O, H 원소를 제외한 지각원소성분 (Ca, Fe, Na, Mg 등)의 LIBS signal이 그렇지 않은 날보다 높은 것으로 나타났다. 따라서 (상대적) 고농도 이벤트의 경우 지각성분 유래 초미세먼지가 유입된 것으로 판단되었다.

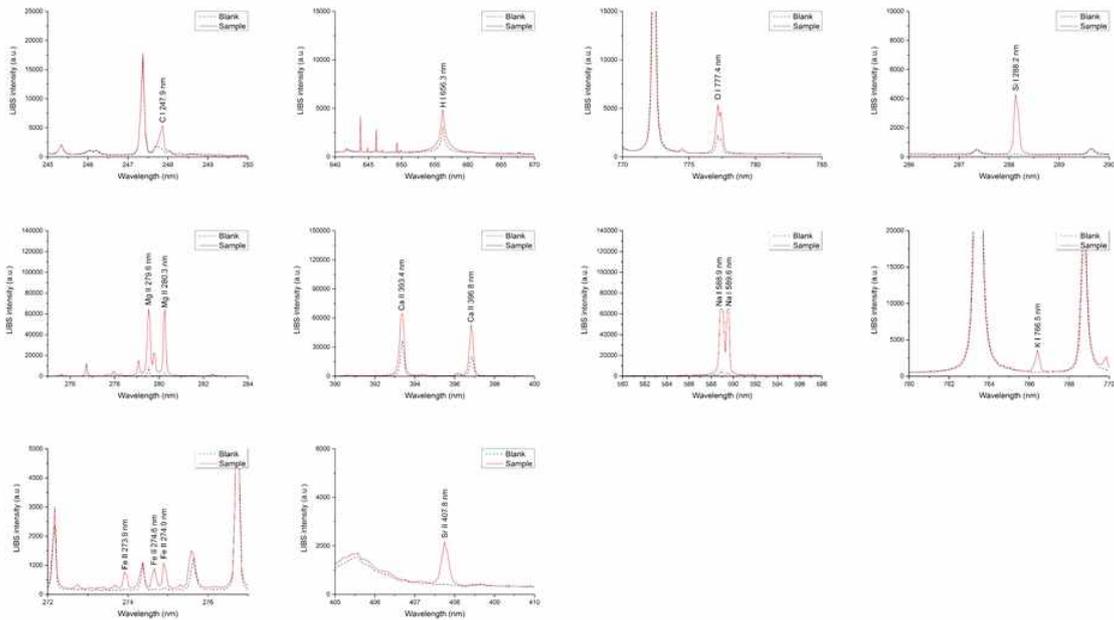


Fig. 14. The results of LIBS analysis for 10 elemental components (C, H, O, Na, K, Ca, Mg, Fe, Sr, Si).

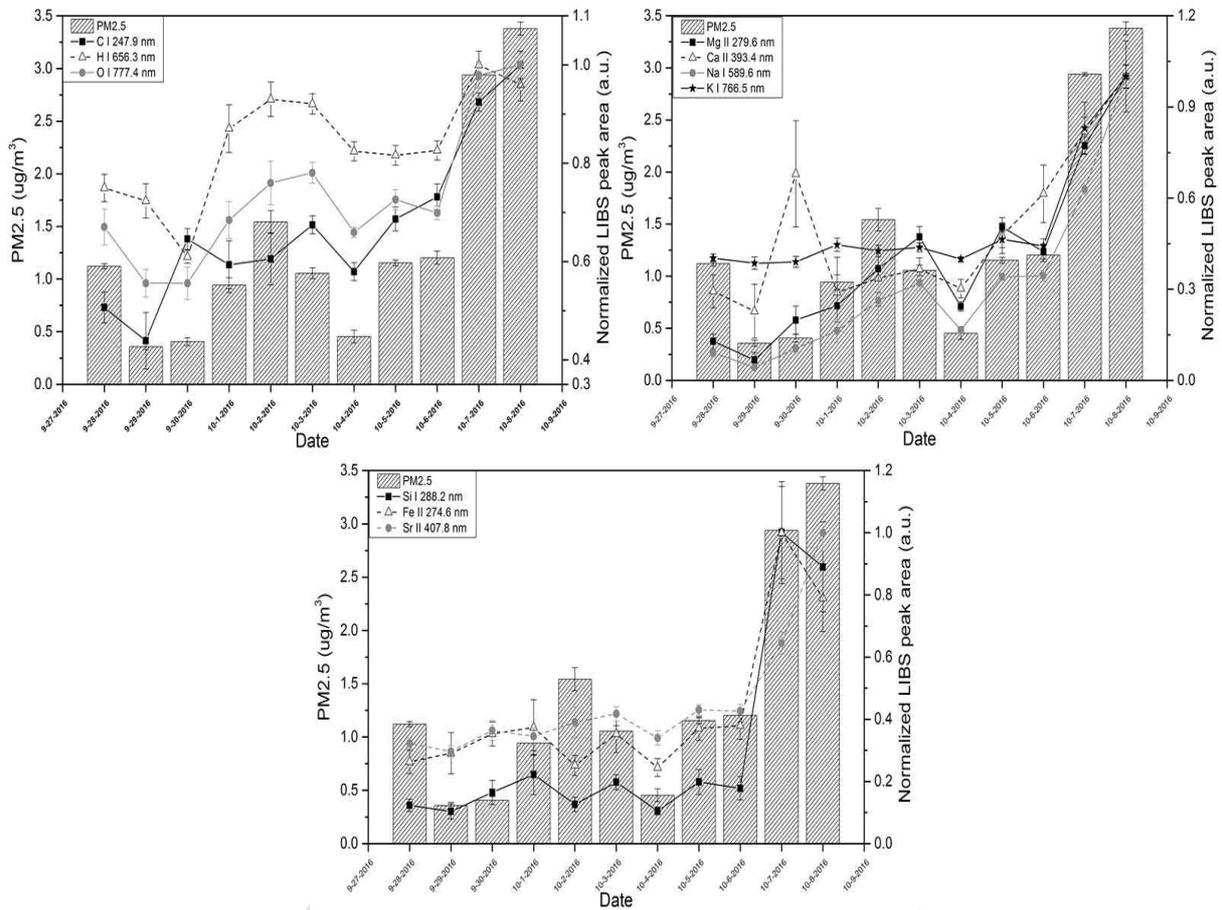
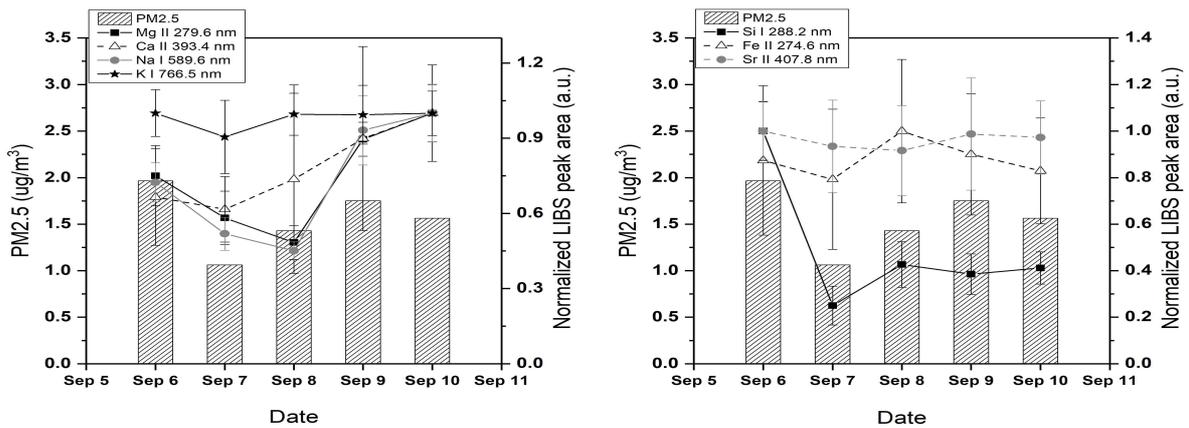


Fig. 15. Comparison of 10 elemental components measured by PM_{2.5} and LIBS for 11 filters obtained in September 2016.



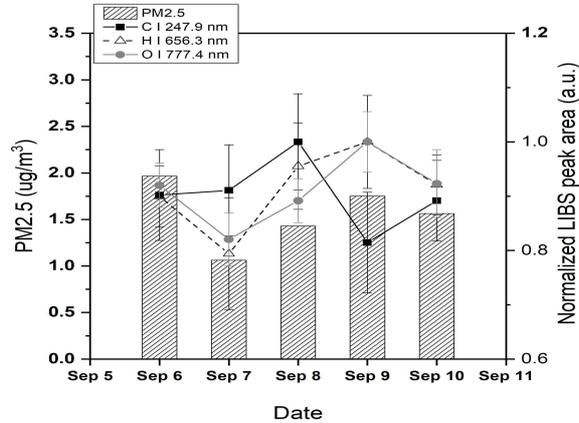


Fig. 16. Comparison of 10 elemental components measured by PM_{2.5} and LIBS for 5 filters obtained in September 2017.

포집된 필터에서 LIBS로 검출할 수 없는 원소성분은 TEM-EDS (transmission electron microscope - energy dispersive x-ray spectroscopy)를 통해 형태학적 (morphology) 특성과 원소성분을 동시에 분석하였다. Fig. 17에 보인바와 같이 북극권 에어로졸의 화학적 원소성분은 앞서 LIBS를 통해 Si (실리콘), Fe (철) 원소성분 말고도 Ti (타이타늄), Ni (니켈), Cr (크롬)과 같은 지각원소들도 포함하고 있는 것으로 나타났다. 관찰된 형태는 주로 cubic 및 irregular 형태가 많았으며, cubic 형태는 주로 Na와 Cl로 이루어진 해염유래 입자일 가능성이 높다. irregular 형태는 금속성분을 포함한 입자에서 주로 나타난다. Ti, Ni, Cr의 경우 이동오염원에 의해서도 나올 수 있지만, 니알슨 기지촌은 전기차를 이용하거나 그러한 이동오염원이 될 만한 것들이 최소화 되어있기 때문에, 이는 스발바르 제도 부근이나 주변 바다를 통해 넘어온 장거리 이동된 지각성분을 포함하는 에어로졸이 되어 검출되었을 가능성이 높은 것으로 판단된다. 따라서 북극권 에어로졸의 원소성분은 대체로 인위적인 활동에 의해 만들어진 원소성분은 많지 않은 것을 시사한다.

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

- 노르웨이 니알슨 (Ny-Alesund) 제플린 관측소 (Zeppelin observatory)에서 나노입자의 크기분포 및 수농도 특성 장기 측정 자료 확보 (2016.10~2020.02, 3년 5개월)
- KPDC (Korea Polar Data Center) 등재를 통한 연구성과 대외활용도 확산 및 네트워크 구축
- 국제 공동연구팀과 협력을 통해 기상자료, 에어로졸 측정자료, 가스자료, 인공위성 자료 등 확보
- 북극권 환경변화에 따른 나노입자생성 관련성 규명 및 나노입자의 생성/성장 특성 자료 확보
- 단기간 집중측정을 통한 북극권 에어로졸 (초미세먼지) 특성자료 및 화학적 원소성분 자료 확보
- 극지 대기 오염물질 모니터링 네트워크 구축을 위한 에어로졸 입자의 종합적인 특성자료 및 기초 자료 확보
- 나노입자 및 에어로졸의 발생원, 생성경로, 물리적/화학적 변화, 이동경로 등을 파악하고 에어로졸의 기후변화 영향 예측 활용 자료 확보
- 본 연구와 관련한 국내/국제 학술대회에 다수 발표 및 논문 게재

(2) 정량적 연구개발성과(해당 시 작성하며, 연구개발과제의 특성에 따라 수정이 가능합니다)

세부 정량적 연구개발성과에 기재함

(3) 세부 정량적 연구개발성과 (해당되는 항목만 선택하여 작성하되, 증빙자료를 별도 첨부해야 함)

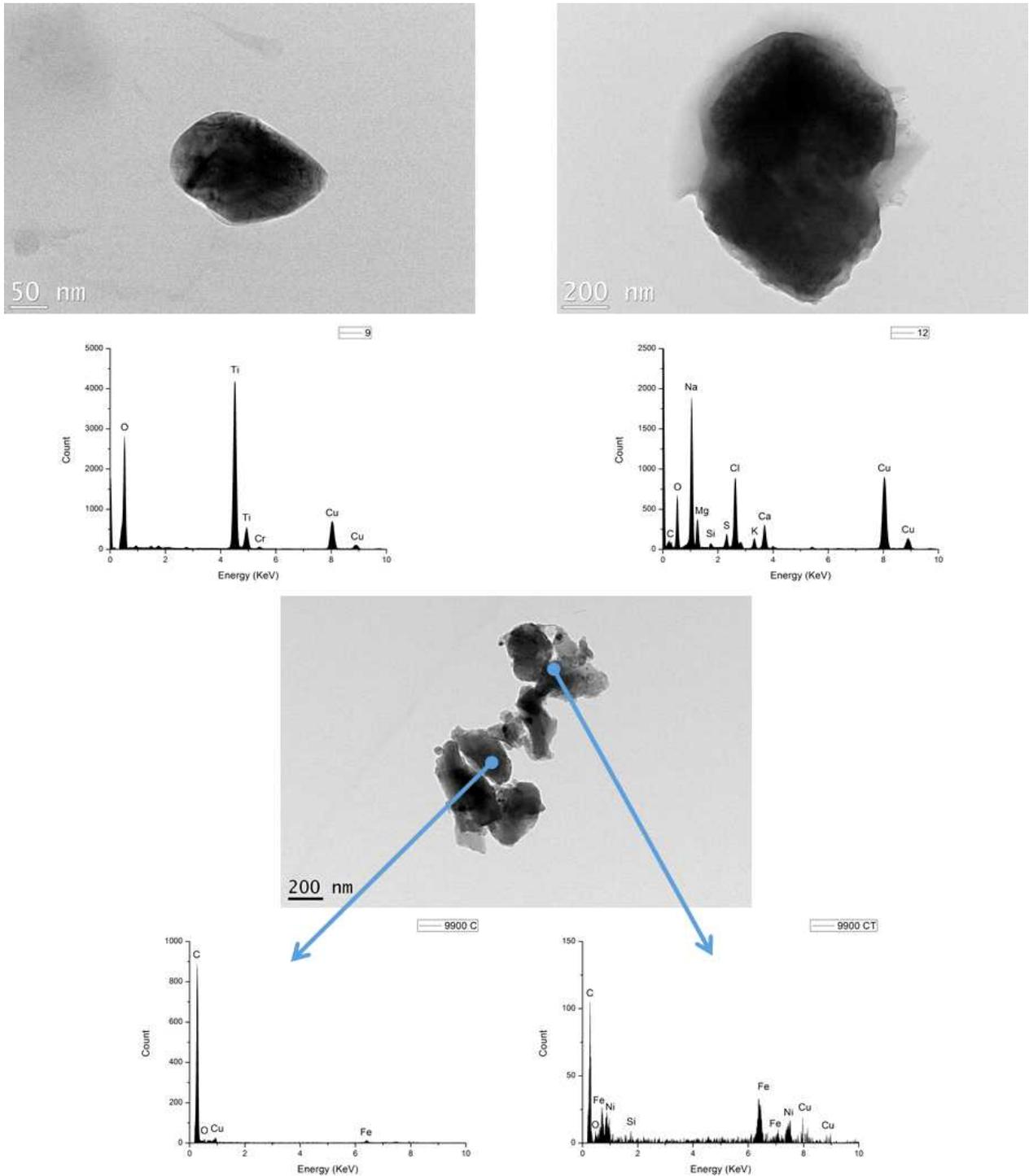


Fig. 17. The results of TEM-EDS for aerosol samples during the intensive sampling periods (다)

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비 SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	Elemental composition of Arctic soils and aerosols in Ny-Alesund measured using laser -induced breakdown spectroscopy	SPECTROCHIMICA ACTA PART B-ATOMIC SPECTROSCOPY	김기백	134	England	Elsevier	SCIE	2017.08 .01	0584-85 47	70%
2	A Study on Elevated Concentrations of Submicrometer Particles in an Urban Atmosphere	ATMOSPHERE	조희주	9(10)	Switzerland	MDPI	SCIE	2018.10 .10	2073-44 33	34%
3	Atmospheric new particle formation characteristics in the Arctic as measured at Mount Zeppelin, Svalbard, from 2016 to 2018	ATMOSPHERIC CHEMISTRY AND PHYSICS	이해범	20(21)	Germany	European Geosciences Union	SCIE	2020.11 .12	1680-73 16	90%

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	Asian Aerosol Conference (AAC)	김기백	2017.07.05	제주	대한민국
2	Asian Aerosol Conference (AAC)	이광열	2017.07.05	제주	대한민국
3	Asian Aerosol Conference (AAC)	이해범	2019.05.28	홍콩	홍콩
4	한국입자에어로졸학회 (KAPAR)	이해범	2019.07.03	용평	대한민국
5	American Association for Aerosol Conference (AAAR)	이해범	2019.10.17	포틀랜드	미국
6	European Geosciences Union (EGU)	이해범	2020.05.05	온라인	오스트리아
7	American Association for Aerosol Conference (AAAR)	이해범	2020.10.05	온라인	미국
8	한국입자에어로졸학회 (KAPAR)	이해범	2020.10.29	온라인	대한민국
9	Arctic Summit Science Week (ASSW)	이해범	2021.03.26	온라인	포르투갈

[그 밖의 성과](해당 시 작성합니다)

수상실적

수상명	시상기관	시상국가	수상사유	수상년월 (YYYY,MM)	소속기관	수상자명
우수포스터상	한국대기환경학회 (KOSAE)	대한민국	한국대기환경학회 정기학술대회 우수포스터 선정	2016.08	광주과학기술 연구원	김기백
Excellent Poster Presentation Award	Asian Aerosol Conference (AAC)	대한민국	2017 AAC Excellent Poster Presentation Award	2017.07	광주과학기술 연구원	이광열
Student Poster Award Winners	American Association for Aerosol Research (AAAR)	미국	2020 AAAR (American Association for Aerosol Research) student poster award winners	2020.09	광주과학기술 연구원	이해범
우수논문발표상	한국입자에어로졸학회 (KAPAR)	대한민국	2020년도 한국입자에어로졸학회 학술대회의 구두 논문발표 부문에서 우수한 논문을 발표하였으므로 이 상을 수여함	2020.10	광주과학기술 연구원	이해범

(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항(해당 시 작성합니다)

2) 목표 달성 수준

추진 목표	달성 내용	달성도(%)
북극권 나노입자 생성 특성 규명	○ 나노입자의 크기분포 및 수농도 변화 장기간 온라인 모니터링 - 북극권 (북극 다산기지) 나노입자 크기분포 및 수농도 변화 장기간 온라인 모니터링 (2016.10 - 2020.02) - 총 3년 5개월 연속데이터 확보 - 연간 데이터 회수율 85% 이상 달성	100
북극권 에어로졸 특성 규명	○ 북극권 에어로졸의 물리화학적 특성 종합 분석 - 노르웨이 대기연구소 (NILU)의 협력을 통한 일 별 이온성분 질량 농도 자료, 가스 성분 농도 자료 등 확보 및 활용 - 스톡홀름 대학과의 협력을 통한 10-800 nm 크기 범위 수농도 모니터링 자료 확보 및 활용 - 북극권 나노입자생성 이벤트와 연관 분석 진행	100
북극권 에어로졸 특성 비교 분석	○ 북극권 에어로졸의 특성 과거자료와 비교분석 - 기존선행연구와 측정된 나노입자생성 특성 자료와 비교 분석 - 타지역 나노입자생성 특성 자료와 비교 분석	100
북극권 에어로졸 유입/이동 특성 파악	○ 에어로졸의 북극권 유입경로 파악 - 자료 획득 기간 및 나노입자생성 이벤트에 대한 역궤적 (airmass back trajectory) 분석을 통한 에어로졸 유입/이동 특성 파악	100
인위적/자연적 에어로졸의 유입 및 발생 특성 파악	○ 인위적/자연적 에어로졸의 특성 구분 ○ 인위적/자연적 에어로졸의 유입경로 및 발생원 추적 - 에어로졸 화학적 구성성분 자료 및 역궤적 (backward trajectory) 분석을 활용한 발생원 파악	100

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성합니다)

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

해당사항 없음

2) 자체 보완활동

해당사항 없음

3) 연구개발 과정의 성실성

해당사항 없음

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

(1) 기술적 측면

- 기존 대기환경에서 사용하던 입자측정 및 분석 장치와 더불어 북극환경에서 에어로졸입자의 종합적 분석 및 향상된 에어로졸 모니터링 시스템 구축
- 북극환경에서 다양하게 존재하는 에어로졸 입자로 인한 환경적 피해를 최소화를 위한 실시간 영향 진단 기술에 기여
- 다양한 크기 (나노크기에서 마이크로미터크기)와 종류의 입자의 특성을 실시간으로 직접적으로 측정하는 기술은 대기환경측정사업에 활용 가능

(2) 경제적·산업적 측면

- 한반도에 발생하거나 또는 동아시아 장거리 이동 에어로졸입자 (황사입자)의 대기 중 거동 및 나노입자의 영향 파악, 국제 환경협약 및 대책 수립 기관과 공유
 - 나노입자생성에 의한 기후변화 영향 및 매체 간에 입자의 이동, 변화, 거동 특성 파악에 활용 가능
 - 나노물질의 자연계 내 거동 및 환경영향 파악에 활용
 - 향후 극지 대기오염물질 모니터링 네트워크 구축을 위한 기본 자료 제공 및 협력
-

6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

- 에어로졸 입자의 종합적인 특성자료를 제공함으로써 에어로졸의 발생원, 생성경로, 물리적/화학적 변화, 이동경로 등을 파악하고 에어로졸의 기후변화 역할을 규명하는데 중요한 정보를 제공해 줄 것으로 기대
 - 향후 북극권 대기오염물질 모니터링 네트워크 구축을 위한 기본 자료 제공
 - 미세입자의 종합적 특성을 실시간으로 측정하여 입자로 인한 환경적, 경제적 피해 최소화를 목적으로 한 실시간 감시기술과 경보기술에 활용될 것으로 기대
 - 에어로졸의 화학적 성분 실시간 감시로 자연계 내의 매체 간 이동과 거동 및 환경영향 파악에 활용
 - 한반도에 발생하거나 또는 동아시아, 북극권 장거리 이동 에어로졸 (황사입자포함) 특성 파악기술의 선진화 및 대기 중 거동 실시간 파악 및 국제 환경협약 및 대책 수립에도 공헌
-

별첨자료

※ 참고문헌

- Croft, B., Martin, R. V., Leaitch, W. R., Tunved, P., Breider, T. J., D'Andrea, S. D., and Pierce, J. R.: Processes controlling the annual cycle of Arctic aerosol number and size distributions, *Atmos. Chem. Phys.*, 16 (6), 3665-3682, 2016.
- Behrenfeldt, U., Krejci, R., Strom, J., and Stocl, A., "Chemical properties of Arctic aerosol particles collected at the Zeppelin station during the aerosol transition period in May and June of 2004", *Tellus B*, 60(3), 405-415, 2004.
- Dall'Osto, M., Beddows, D. C. S., Tunved, P., Krejci, R., Strom, J., Hansson, H.-C., Yoon, Y. J., Park, K.-T., Becagli, S., Udisti, R., Onasch, T., O'Dowd, C. D., Simo, R., and Harrison, R. M., "Arctic sea ice melt leads to atmospheric new particle formation", *Scientific Reports*, 7, 3318, 2017.
- Dal Maso, M., Kulmala, M., Riipinen, I., Wagner, R., Hussein, T., Aalto, P. P., and Lehtinen, K. E.: Formation and growth of fresh atmospheric aerosols: eight years of aerosol size distribution data from SMEAR II, Hyytiälä, Finland, *Boreal Environ. Res.*, 10 (5), 323-336, 2005.
- Heintzenberg, J., Tunved, P., Gali, M., and Leck, C., "New particle formation in the Svalbard region 2006-2015", *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 6153-6178, 2017.
- Hirdman, D., Burkhardt, J. F., Sodemann, H., Eckhardt, S., Jefferson, A., Quinn, P. K., Sharma, S., Strom, J., and Stohl, A., "Long-term trends of black carbon and sulphate aerosol in the Arctic: changes in atmospheric transport and source region emissions", *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 9351-9368, 2010.
- Kalivitis, N., Kerminen, V.-M., Kouvarakis, G., Stavroulas, I., Tzitzikalaki, E., Kalkavouras, P., Daskalakis, N., Myriokefalitakis, S., Bougiatioti, A., Manninen, H. E., Roldin, P., Petäjä, T., Boy, M., Kulmala, M., Kanakidou, M., and Mihalopoulos, N.: Formation and growth of atmospheric nanoparticles in the eastern Mediterranean: Results from long-term measurements and process simulations, *Atmos. Chem. Phys.*, 19 (4), 2671-2686, 2019.
- Kulmala, M., Petaja, T., Nieminen, T., Sipila, M., Manninen, H. E., Lehtipalo, K., Dal Maso, M., Aalto, P. P.,

- Junninen, H., Paasonen, P., Riipinen, I., Lehtinen, K. E., Laaksonen, A., and Kerminen, V. M.: Measurement of the nucleation of atmospheric aerosol particles, *Nature Protocols*, 7 (9), 1651-1667, 2012.
- Lee, H., Lee, K., Lunder, C. R., Krejci, R., Aas, W., Park, J., Park, K.-T., Lee, B. Y., Yoon, Y. J., and Park, K., "Atmospheric new particle formation characteristics in the Arctic as measured at Mount Zeppelin, Svalbard, from 2016 to 2018", *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 13425-13441, 2020.
- Park, K. T., Lee, K., Kim, T. W., Yoon, Y. J., Jang, E. H., Jang, S., and Lee, B. Y., Hermansen, O.: Atmospheric DMS in the Arctic Ocean and its relation to phytoplankton biomass, *Glob. Biogeochem. Cycles*, 32 (3), 351-359, 2018.
- Serreze, M. C. and Barry, R. G., "Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis", *Global and Planetary Change*, 77(1), 85-96, 2011.
- Tovar-Sánchez, A., Duarte, C. M., Alonso, J. C., Lacorte, S., Tauler, R., and Galbán-Malagón, C.: Impacts of metals and nutrients released from melting multiyear Arctic sea ice, *J. Geophys. Res.*, 115 (C7), 2010.
- Wu, Z., Hu, M., Liu, S., Wehner, B., Bauer, S., Maßling, A., Wiedensohler, A., Petäjä, T., Dal Maso, M., and Kulmala, M.: New particle formation in Beijing, China: Statistical analysis of a 1-year data set, *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 112 (D9), 2007.



주 의

1. 이 보고서는 과학기술정보통신부에서 시행한 거대과학연구개발사업의 해양극지기초원천기술개발사업 연구개발과제(위탁과제)의 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 과학기술정보통신부에서 시행한 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.

