

해양극지기초원천기술개발사업  
(Brain Research Program)

환북극권 대기 에어로졸의 광학적 특성 연구  
(A study on the optical characteristics of atmospheric  
aerosol in the Arctic region)

2021. 3.



경인여자대학교

# 제 출 문

과학기술정보통신부 장관 귀하

이 보고서를 “환북극권 대기 에어로졸의 광학적 특성 연구“과제의 (최종: 2016.05~2021.03) 보고서로 제출합니다.

2021년 03월 31일

위탁연구기관명 : 경인여자대학교

위탁연구책임자 : 정 창 훈

연구 원 : 박 진 희

(이상 경인여자대학교)

연구 원 : 강 민 경, 김 기 애,

이 지 이

(이상 이화여자대학교)

극지연구소

(이상 성명 가나다순)

최종보고서 (위탁 과제)							보안등급				
							일반[√], 보안[ ]				
중앙행정기관명		과학기술정보통신부			사업명		사업명		거대과학연구개발사업		
전문기관명(해당 시 작성)					내역사업명		해양극지기초원천기술 개발사업				
공고번호					총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)						
					연구개발과제번호		2016M1A5A1901786				
기술분류	국가과학기술 표준분류	ND1110	30%	ND1103	30%	ND1106	40%				
	부처기술분류 (해당 시 작성)	G13401	40%	G13405	20%	G20102	40%				
위탁연구과제명		국문		한북극권 대기 에어로졸의 광학적 특성 연구							
		영문		A study on the optical characteristics of atmospheric aerosol in the Arctic region							
위탁연구개발기관		기관명		경인여자대학교		사업자등록번호		122-82-07541			
		주소		(우) 21041 인천 계양구 계산길 101		법인등록번호		124871-0003844			
위탁연구책임자		성명		정창훈		직위		부교수			
		연락처	직장전화		032-540-0166		휴대전화		010-2659-0629		
			전자우편		jch@kiwu.ac.kr		국가연구자번호		10055929		
연구개발기간		전체		2016. 05. 01 - 2021. 03. 31( 4년 11개월)							
		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		지방자치단체 기타( )		현금 현물 합계			
총계		210,000						210,000 210,000			
1단계	1년차	30,000						30,000 30,000			
	2년차	45,000						45,000 45,000			
2단계	1년차	45,000						45,000 45,000			
	2년차	45,000						45,000 45,000			
	3년차	45,000						45,000 45,000			

연구개발담당자 실무담당자		성명		박진희		직위		전임연구원	
		연락처	직장전화		032-540-0166		휴대전화		010-2329-8937
			전자우편		nahuida@naver.com		국가연구자번호		10055929

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

2021년 03월 31일

위탁연구책임자: 정창훈 (인)

위탁연구개발기관의 장: 경인여자대학교 총장 (직인)

과학기술정보통신부 장관 귀하

## < 요약 문 >

사업명		거대과학연구개발사업				총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)						
내역사업명 (해당 시 작성)		해양극저기초원천기술개발사업				연구개발과제번호		2016M1A5A1901786				
기술 분류	국가과학기술 표준분류	ND1110	30%	ND1103	30%	ND1106	40%					
	부처기술분류 (해당 시 작성)	G13401	40%	G13405	20%	G20102	40%					
연구개발과제명 (세부과제-1/위탁과제)		환북극권 대기 에어로졸의 광학적 특성 연구										
전체 연구개발기간		2016. 05. 01 - 2021. 03. 31( 4년 11개월)										
총 위탁연구개발비		총 210,000 천원 (정부지원연구개발비: 210,000천원)										
연구개발단계		기초[√ ] 응용[ ] 개발[ ]			기술성숙도 (해당 시 기재)		착수시점 기준( ) 종료시점 목표( )					
연구개발과제 유형 (해당 시 작성)												
연구개발과제 특성 (해당 시 작성)												
연구개발 목표 및 내용		최종 목표		환북극 대기 에어로졸의 광학적 특성 및 기후변화 영향 분석								
		전체 내용		물리화학적 연속 관측 및 원격측정 자료를 활용한 환북극 대기 에어로졸의 광학적 특성 및 기후변화 영향 분석 및 모사								
		1단계 (해당 시 작성)	목표	환북극 지역 대기 에어로졸 측정자료 확보 및 광학적 특성 알고리즘 개발								
			내용	환북극 지역 대기 에어로졸의 원격 및 지상 측정자료를 활용한 광학적 특성 파악 알고리즘 개발								
2단계 (해당 시 작성)	목표	환북극 지역 에어로졸의 광학적 특성 파악										
	내용	대기 에어로졸 물리, 화학, 광학적 측정자료를 활용한 환북극 지역의 복사강제력 등 기후변화 특성 모사										
연구개발성과		환북극 지역 에어로졸의 물리화학적 특성과 광학적 특성 관계 및 기후 영향 파악										
연구개발성과 활용계획 및 기대 효과		물리 및 화학적 분석을 통한 환북극 지역 에어로졸의 광학적 특성 모사 및 기후변화 영향 평가 기반확보										
연구개발성과의 비공개여부 및 사유												
연구개발성과의 등록·기탁 건수		논문	특허	보고서 원문	연구 시설· 장비	기술 요약 정보	소프트 웨어	표준	생명자원		신품종	
									생명 정보	생물 자원	화합물	정보
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황		구입 기관	연구시설· 장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호		
국문핵심어 (5개 이내)		북극 대기 에어로졸		복사강제력		구름응결핵		광학적 특성		기후변화		
영문핵심어 (5개 이내)		Arctic atmospheric aerosol		Radiative forcing		Cloud condensation nuclei		Optical property		Climate change		

## < 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요 .....	1
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용 .....	2
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도 .....	8
4. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도 .....	53
5. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획 .....	53
참고 문헌 .....	55



## 1. 연구개발과제의 개요

본 연구는 물리화학적 연속 관측 및 원격측정 자료를 활용한 환북극 대기 에어로졸의 광학적 특성 및 기후변화 영향 분석 및 모사를 목적으로 한다.

이를 위해 1단계에서는 북극 대기에어로졸 측정자료 확보 및 원격측정자료 분석을 통하여 북극 대기에어로졸 광학적 특성연구의 기초를 마련하고, 2단계에는 환북극 지역의 기후변화특성을 인공위성 원격자료 및 측정자료 기반 복사강제력 모사 등을 통해 파악하고자 하였다.

○ 구체적인 단계별 연구 목표는 다음과 같다.

1. 최종 목표: 물리화학적 연속 관측 및 원격측정 자료를 활용한 환북극 대기 에어로졸의 광학적 특성 및 기후변화 영향 분석 및 모사

2. 세부 목표:

- 북극 다산기지 지역 대기에어로졸의 지상 에어로졸 자료 확보 및 분석
- 북극지역 원격 에어로졸 AOD(광학두께) 측정자료 확보 및 환북극 지역 대기에어로졸 원격측정자료 분석
- 환북극지역 에어로졸의 물리화학 및 광학적 특성 분석
- 다분산 탄소 에어로졸의 광학적 특성 모사 알고리즘 개발
- 환북극 지역 에어로졸의 물리적 특성과 복사강제력 등 기후변화 특성 파악

## 2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

### 1) 연구개발의 필요성

북극권 환경은 과학적, 정치·경제적, 외교적 변화 등 글로벌 이슈로 대두되고 있다. 일반적으로 에어로졸은 대기 중에 존재하는 액상 및 고체상의 입상물질로 자연 및 인위적으로 발생되거나, 기체상 유기오염물질이 대기에서 광화학 반응을 거쳐 생성된다. 이렇게 발생, 생성된 에어로졸은 대기 중에서 여러 변환과정을 거치며 이동하는데 대기 중에 존재하면서 태양빛을 산란 또는 흡수하여 태양복사강제력 (radiative forcing)에 영향을 미치고, 구름 응결핵(ccn)으로 작용하여 기후변화를 야기하며 장거리이동, 대기오염물질에 의한 인체 위해성 등 수많은 대기, 지구환경 문제에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Ramanathan et al., 2001).

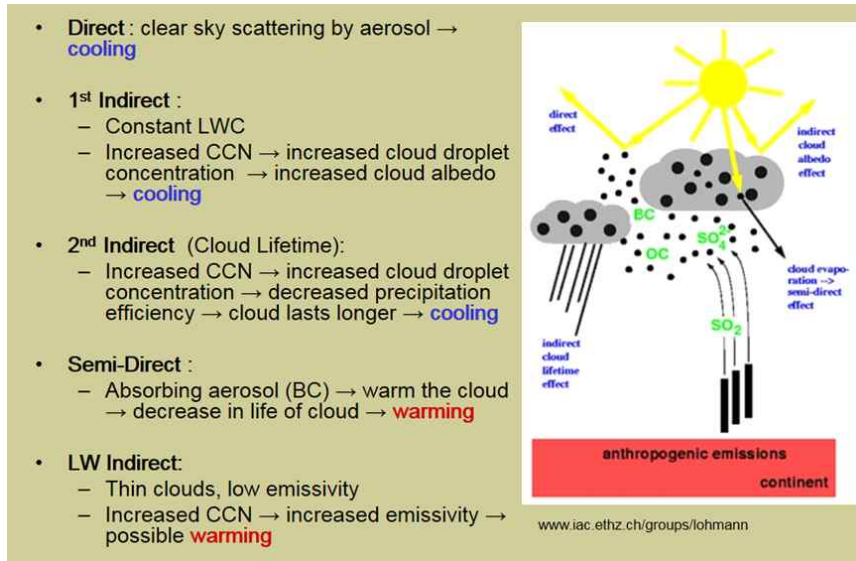


Fig. 1. Diagram for CCN on climate effects

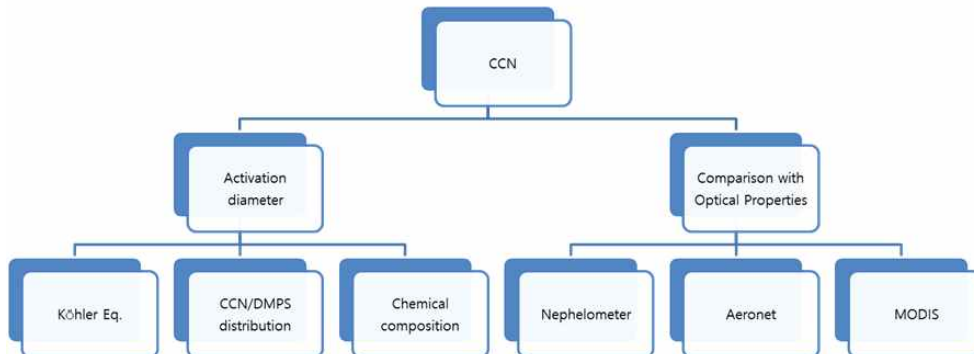


Fig. 2. CCN and related aerosol properties

북극 지역의 에어로졸은 엘니뇨 및 기후변화에 직접적인 영향을 미치는 것으로 연구되어 왔으며, 우리나라를 비롯한 전세계의 기후변화와 밀접한 관련을 가지고 있는 것으로 보고되고 있다. 이와 같은 에어로졸의 기후영향평가를 보다 정확히 예측하기 위해서는 북극권 지역의 관측자료에 기반한 에어로졸의 물리적 특성과 원격 측정자료 등의 상호 관련 연구를 통하여 북극권 에어로졸의 특성과 기후변화의 영향을 정량화하는 것이 중요하다. 2002년 4월 노르웨이령 스팔바르드군도 니알스네 북극다산과학기지 개소하면서 시작된 이래 북극다산기지에서는 자동기상관측시스템, 온실기체, 에어로졸 등 대기측정을 지속적으로 수행하고 있으며, '아라온'호등을 이용한 알래스카 인근 북극해의 장기모니터링 연구를 수행하고 있다. 이러한 모니터링은 기후변화를 비롯한 북극권 글로벌 이슈 대응 및 북극권 지역의 과학적 연구역량 확보는 향후 우리나라의 북극권 활동 강화 및 기득권 확보에 크게 기여할 것으로 기대된다.

특히, 기후변화의 직접적 영향을 미치는 북극권 대기환경에 대한 측정결과의 분석 에어로졸의 물리, 화학 및 광학적 특성과약을 통하여 북극 지역의 직간접적 기후변화 특성을 파악하고 향후 미래 예측 및 사회·경제적 활용을 위한 원천기술을 확보하는 연구가 매우 필요하다.

이러한 측면에서 본 연구에서 수행하고자 하는 북극해 지역 대기 에어로졸의 측정 및 관측자료를 활용한 광학적 특성 파악 및 모사는 북극권 지역 에어로졸의 특성과 기후변화 영향을 파악에 중요한 의의를 갖는다.

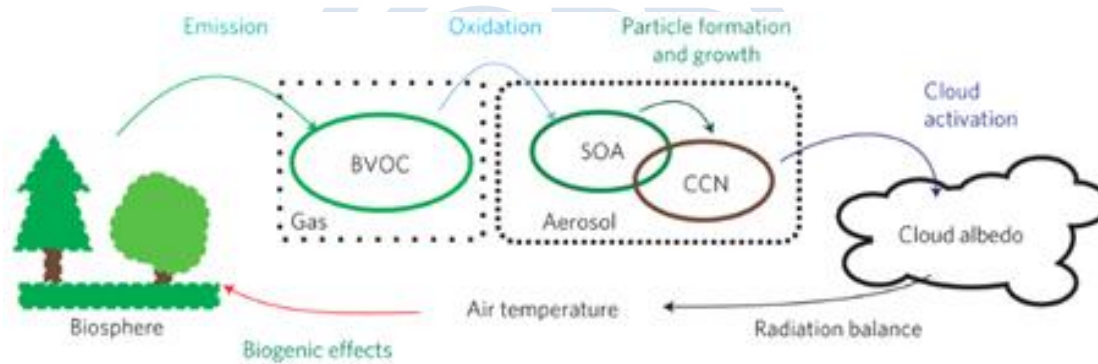


Fig. 3. Schematic diagram for aerosol, CCN and climate feedback

## 2) 연구개발의 내용

본 연구에서는 전술한 연구개발의 필요성에 준하여 북극지역 대기에어로졸의 지상 측정자료 확보 및 자료 분석하고, 환북극 지역 대기에어로졸 원격측정자료 분석함으로써 환북극 지역 대기에어로졸 및 원격 AOD(에어로졸 광학두께) 특성을 분석하고자 하였다. 특히 본 연구에서는 에어로졸의 물리적 화학적 자료를 통하여 광학적 자료를 산출하는 연구를 수행함으로써, 기존의 광학적 특성의 파악뿐 아니라, 에어로졸의 물리, 화학적 특성이 광학적 특성에 미치는 영향을 정량적으로 파악하고자 하였다. 단계별 연구 개발 내용의 추진체계는 Fig. 4와 같다.



# 한북극권 대기 에어로졸의 광학적 특성 연구

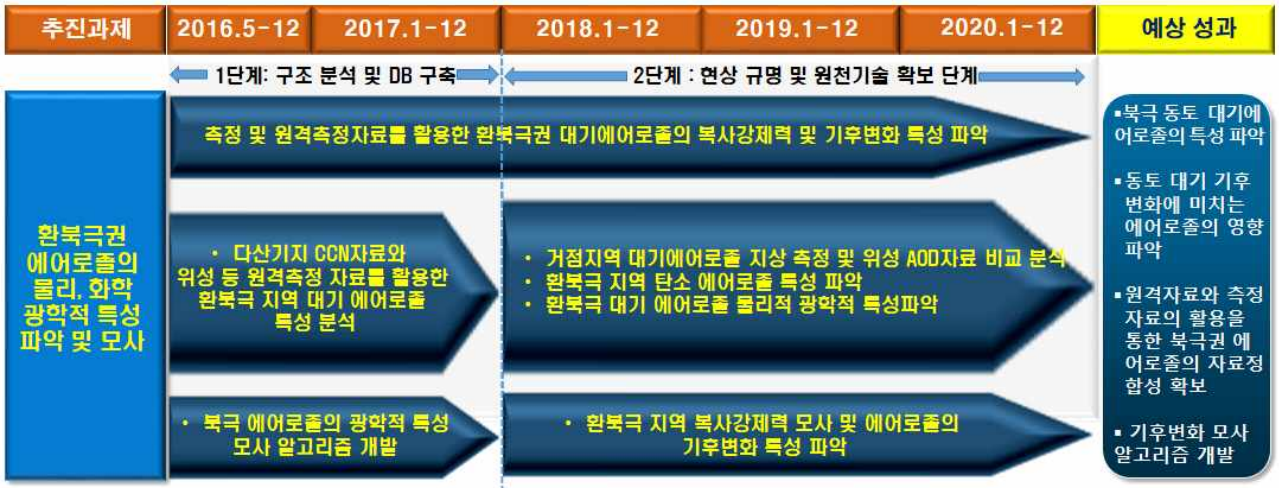


Fig. 4. Schematic diagram for this study

**(1) 추진전략 및 방법**

본 연구 방법의 개략도는 Fig. 5과 같다. 구체적인 연구 방법은 먼저 다산기지가 위치한 Zeppelin station (Fig. 6)을 포함한 북극지역 대기 에어로졸의 지상 및 원격위성 AOD(에어로졸 광학두께) 측정자료 확보 및 에어로졸의 측정 자료 분석하였다. 또한, 한북극 지역 대기 에어로졸 원격위성 측정자료 분석을 통하여 북극지역의 에어로졸 특성 파악하고 북극 에어로졸의 물리 광학특성 파악을 위해 다산기지 대기 에어로졸 및 구름 응결핵(CCN) 측정자료와 위성 등 원격 측정자료(AOD)를 활용하고 이를 통해 북극 에어로졸의 광학적 특성 파악하였다 (Fig. 5). 한북극지역 나노에어로졸 및 CCN입자의 개수 농도 및 크기분포등의 장기간 측정자료를 기반으로 하여 이를 원격자료(MODIS 위성 자료 및 AERONET자료)를 비롯한 MERRA-2등의 reanalysis 자료 등과 연계하여 에어로졸의 특성을 검증하고 특히 CCN-AOD 관계를 파악하여 CCN-AOD 관계를 도출하였다. 이러한 결과를 바탕으로, 북극 에어로졸의 광학적 특성을 조성 과 크기분포의 민감도에 따라 모사할 수 있는 모사 알고리즘 개발하고, 이를 바탕으로 하여 한북극 지역 에어로졸의 조성기반 광학특성 및 복사강제 특성을 분석하고자 하였다. 구체적인 CCN-AOD간 물리화학적 관계는 Fig. 7과 같다.

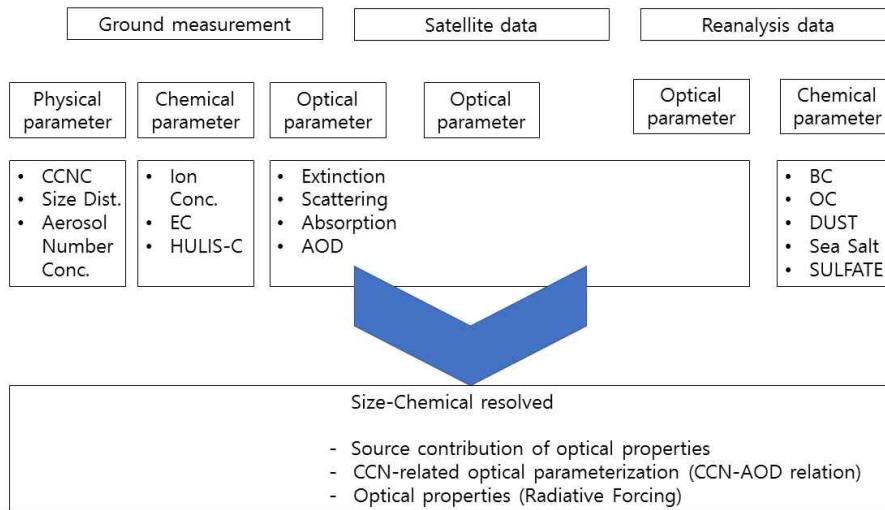


Fig. 5. Outline of this study

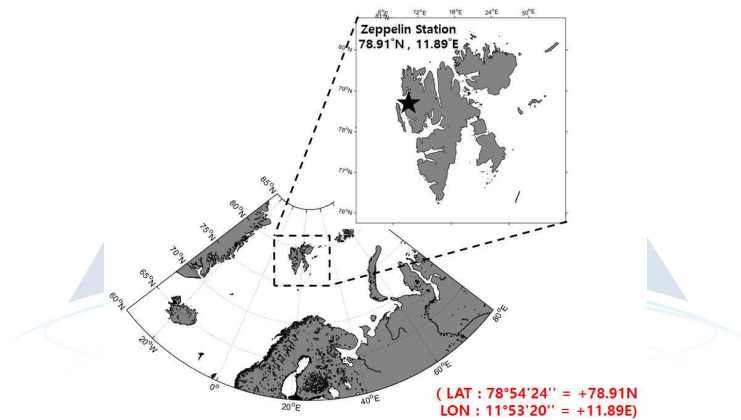
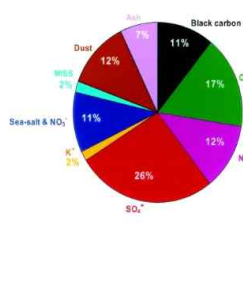
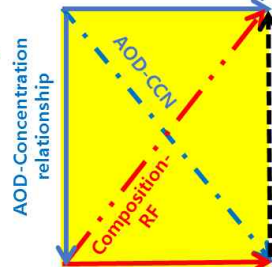


Fig. 6. Location of Zeppelin observatory

Composition based AOD Data (MERRA-2)

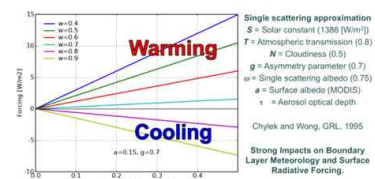


AOD-ARF relationship



$$\Delta F = -\frac{S}{4} T^2 (1-N) \tau [(1-a)^2 (1-g)\omega - 4a(1-\omega)]$$

Scattering      Absorption



Aerosol Mass Composition Measurement Data

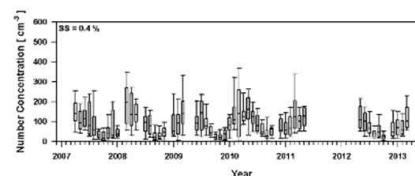
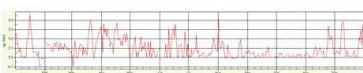


Fig. 7. Physico-chemical AOD-CCN relation

## (2) 연구 수행 내용

본 연구에서는 북극 대기 에어로졸의 측정자료 확보, 원격위성 측정자료 분석, 북극 에어로졸의 물리 광학적 특성 파악과 광학적 특성 모사 알고리즘 개발을 추진하였다. 세부적인 연구내용은 1) 북극 대기 에어로졸의 물리화학적 특성 파악 2) 환북극 지역 대기 에어로졸 원격위성 측정자료 분석, 3) 북극 에어로졸의 광학적 특성 파악, 4) 북극 에어로졸의 CCN 특성과 원격자료의 상관성 파악, 5) 북극 에어로졸의 광학적 특성 모사 알고리즘 개발 및 복사강제특성 산출의 다섯 가지 항목에 근거하여 연구를 추진하였다. 구체적인 연구 내용과 분석을 위한 주요 측정자료 목록은 아래와 같다.

### 1. 북극 대기 에어로졸의 물리화학적 특성 파악

- 2008-2013년에 Zeppelin 측정소에서 측정한 CCN, DMPS 에어로졸 크기 분포자료 확보 및 경향분석
- 북극 대기 에어로졸의 조성별 에어로졸 측정자료 확보(탄소 에어로졸, 아라온 향차)

### 2. 환북극 지역 대기 에어로졸 원격위성 측정자료 분석

- 2008-2013년 Zeppelin 측정소 인근 AERONET 원격 측정자료 및 위성자료 확보 및 중장기 경향분석

### 3. 북극 에어로졸의 광학적 특성 파악

- MODIS, AERONET 등의 원격자료 및 MERRA-2 reanalysis 자료 등을 통한 북극 에어로졸의 광학적 특성 파악
- 북극 향차 측정을 통한 탄소 에어로졸의 광학적 특성 파악

### 4. 북극 에어로졸의 CCN 특성과 원격자료의 상관성 파악

- Zeppelin 지역의 장기간에 걸친 북극권 측정자료의 확보 및 CCN 에어로졸의 특성과 원격자료와의 상관성 및 계절별 특이성 파악

### 5. 북극 에어로졸의 광학적 특성 모사 알고리즘 개발 및 복사강제특성 산출

- 다분산 탄소 에어로졸의 광학적 특성 모수화 알고리즘 개발
- 환북극권 지역 에어로졸의 크기분포를 포함한 다양한 물리화학(조성별)적 정보를 이용한 광학 특성 분석

Table 1. List of data from ground and remote measurement

Characteristics	CCN	AOD from ground-based measurements	MODIS	MERRA-2	Aerosol absorption coefficient	Aerosol scattering coefficient	Aerosol chemical composition
Dataset	CCN particle counter	Measured AOD by sun photometer, Type SP1a	• MOD08_M3 (collection 6) • MOD08_D3 (collection 6)	• MERRA-2 instM_2d_gas_Nx • MERRA-2 inst3_3d_gas_Nv	Modified Particle Soot Absorption Photometer (PSAP)	Integrating Nephelometer (TSI Inc., Model 3563)	Aerosol sampling using a three-stage filter pack sampler
Temporal resolution	• Monthly average data • Daily average data	• One minute average data	• Monthly average data • Three-hour average data	• Monthly average data • Daily average data	• Hourly average data	• Hourly average data	• Daily average data
Spatial resolution and used geometry	Zeppelin station (11.89° E, 78.91° N)	Ny-Ålesund (Zeppelin station) (11.928° E, 78.923° N)	1° × 1° (11.5° E, 78.5° N)	0.5° × 0.652° (11.875° E, 79° N)	Zeppelin station (11.89° E, 78.91° N)	Zeppelin station (11.89° E, 78.91° N)	Zeppelin station (11.89° E, 78.91° N)
Grid	One point	One point	Lon.: -179.5° to 179.5° Lat.: 89.5° to -89.5°	Lon.: -180.0° to 179.375° Lat.: -90° to 90°	One point	One point	One point
Number of data (monthly and daily average)	• 55/72 • 1,535/2,192	• 42/72 • 518/2,192	• 42/72 • 641/2,192	• 72/72 • 2,192/2,192	• 1,688/2,192 (daily avg.)	• 919/2,192 (daily avg.)	• SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> : 1,713/2,192 • NaCl: 1,474/2,192 (daily avg.)
Wavelength		501 nm	550 nm	550 nm	525 nm	550 nm	
Supersaturation	0.4 %						



### 3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

#### 1) 연구수행 결과

##### (1) 정성적 연구개발성과

#### 1. 북극 대기 에어로졸의 물리화학적 특성

##### 1-1. 북극지역 에어로졸의 물리적 특성

Fig. 8에서 볼 수 있듯이 본 연구에서는 2007-2013년에 걸친 북극권 에어로졸의 CCN 및 광학두께 (Aerosol Optical Depth, AOD) 측정 자료를 분석해 본 결과 장기간에 걸친 계절적 변동경향을 뚜렷이 확인할 수 있었다. 계절적으로는 봄철 증가 경향이 뚜렷하며 가을과 겨울 CCN의 낮은 농도 경향을 확인할 수 있었다 (Table 2.). 특히, 봄철 Arctic haze기간의 AOD의 증가는 장거리 수송 영향에 의한 것으로 알려져 있다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 측정 연도별자료와 월별자료를 과포화도(SS, Supersaturation ratio)에 따라 비교해 본 결과에서도 동일한 경향이 나타나며, 과포화도가 0.2%에서 1%로 증가할수록 이러한 경향은 더 증가하는 것으로 확인할 수 있다. 월별 에어로졸의 크기분포로 볼 때, 봄철의 적산모드 (accumulation mode)에어로졸의 증가와 여름철의 아이트켄 모드(Aitken mode)의 증가가 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수 있다(Fig. 10). 이러한 에어로졸의 농도와 CCN의 농도 사이에는 선형적인 상관관계를 보이는 것을 확인할 수 있다. Fig. 11은 에어로졸 개수 농도와 CCN이 100nm이상의 입자에서 밀접한 상관성을 보이는 것을 보여주고 있다.

Table 2. Seasonal CCN-AOD data in Zeppelin, Svalvard from 2007-2013

Season	CCN [ $\text{cm}^{-3}$ ] (SS = 0.4%)	AOD from ground-based measurements (500 nm)	MODIS AOD (550 nm)	MERRA-2 AOD (550 nm)
Spring	130 ± 89	0.091±0.050	0.125 ± 0.090	0.106 ± 0.043
Summer	85 ± 65	0.058±0.023	0.087 ± 0.156	0.067 ± 0.031
Autumn	33 ± 32	0.053±0.029	0.052 ± 0.077	0.064 ± 0.027
Winter	58 ± 66	-	-	0.074 ± 0.035

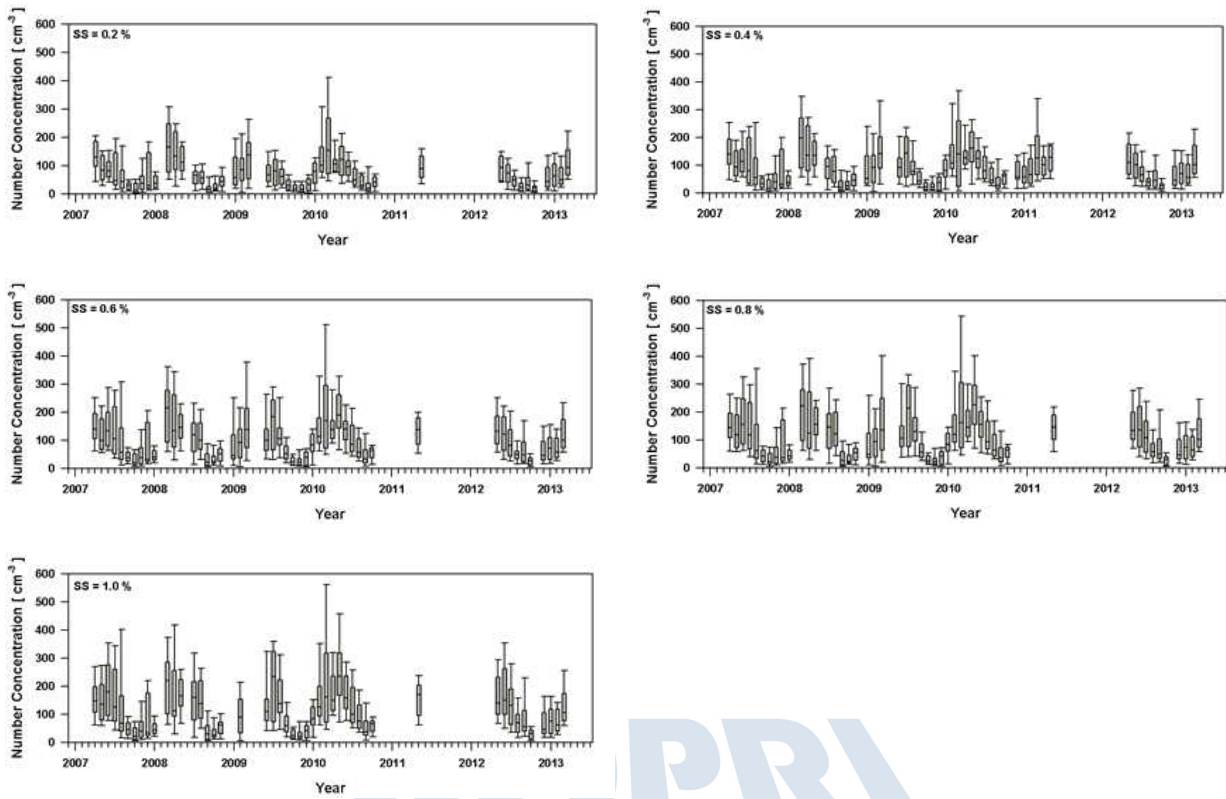


Fig. 8. Trends of CCN concentration from 2007-2013 in Zeppelin, Svalvard (SS of 0.2%-1.0%)

극지연구소

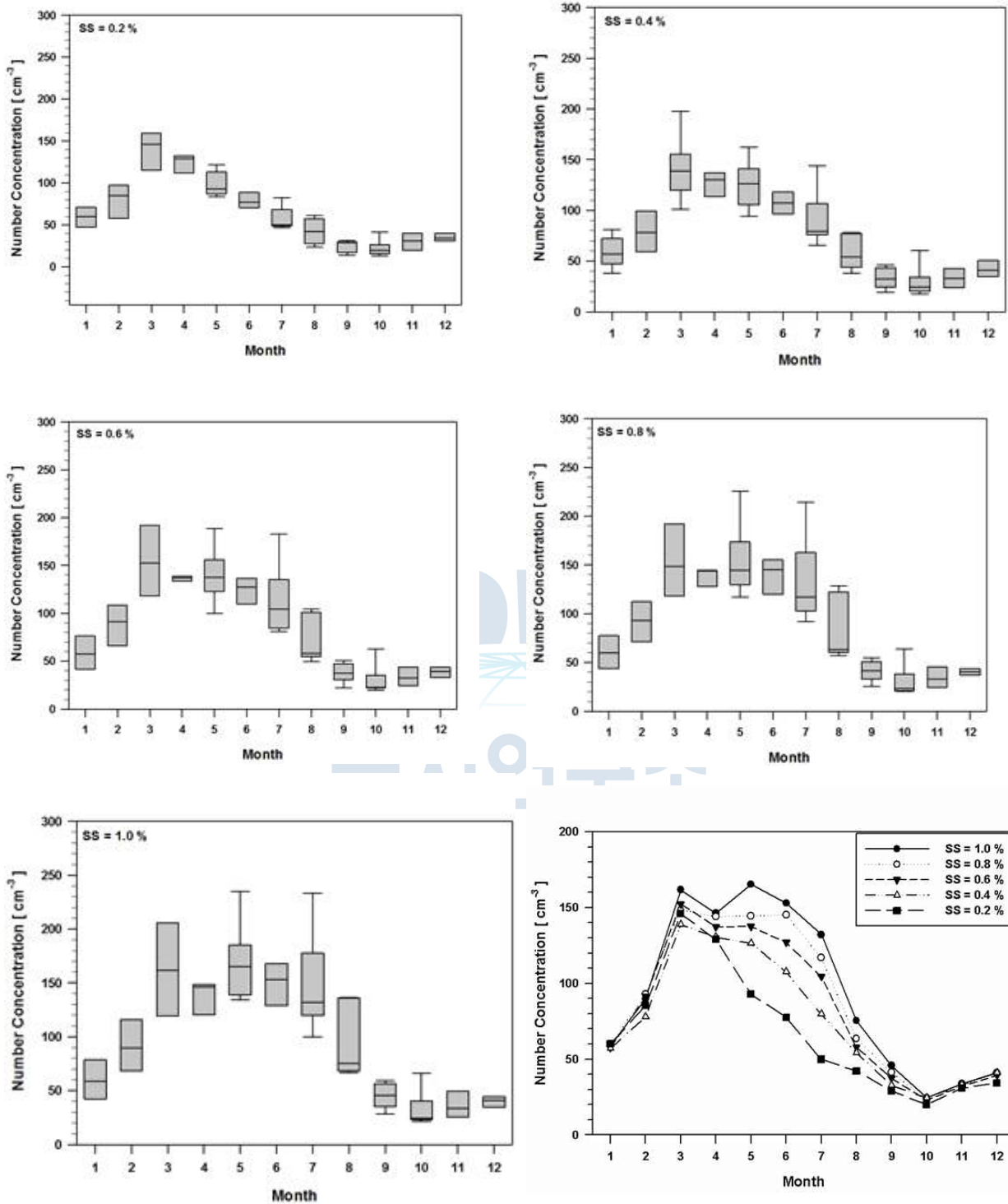


Fig. 9. Monthly variation of CCN median concentration from 2007-2013 in Zeppelin, Svalbard (SS of 0.2%~1.0%)

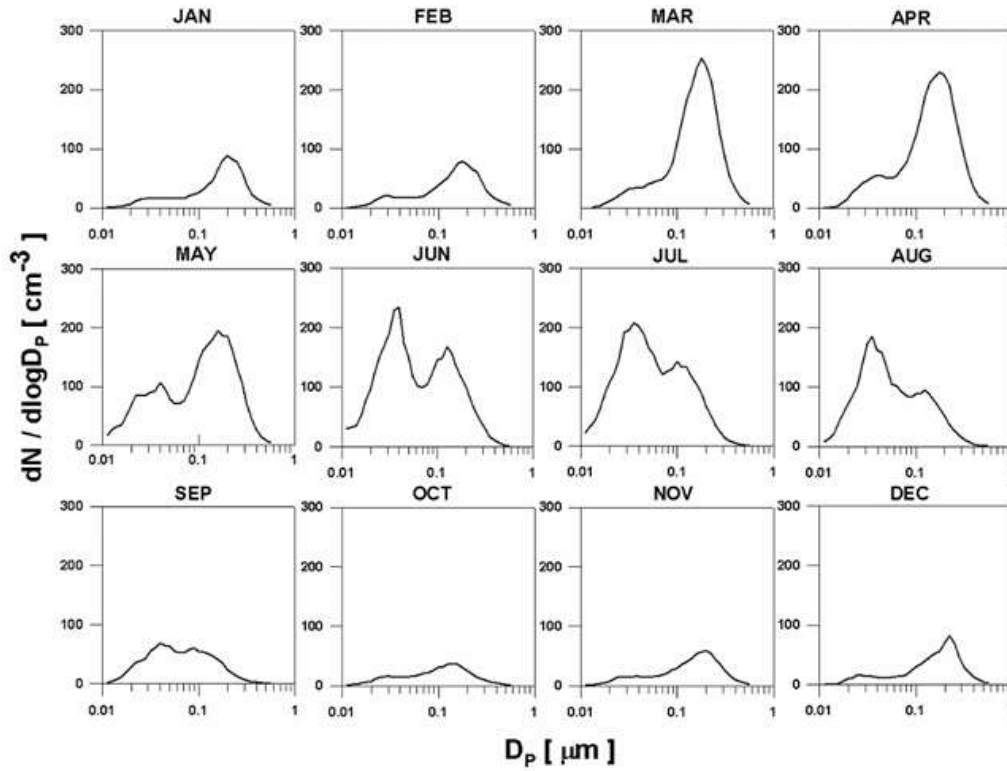


Fig. 10. Monthly variation of aerosol size distribution from 2007–2013 in Zeppelin, Svalbard

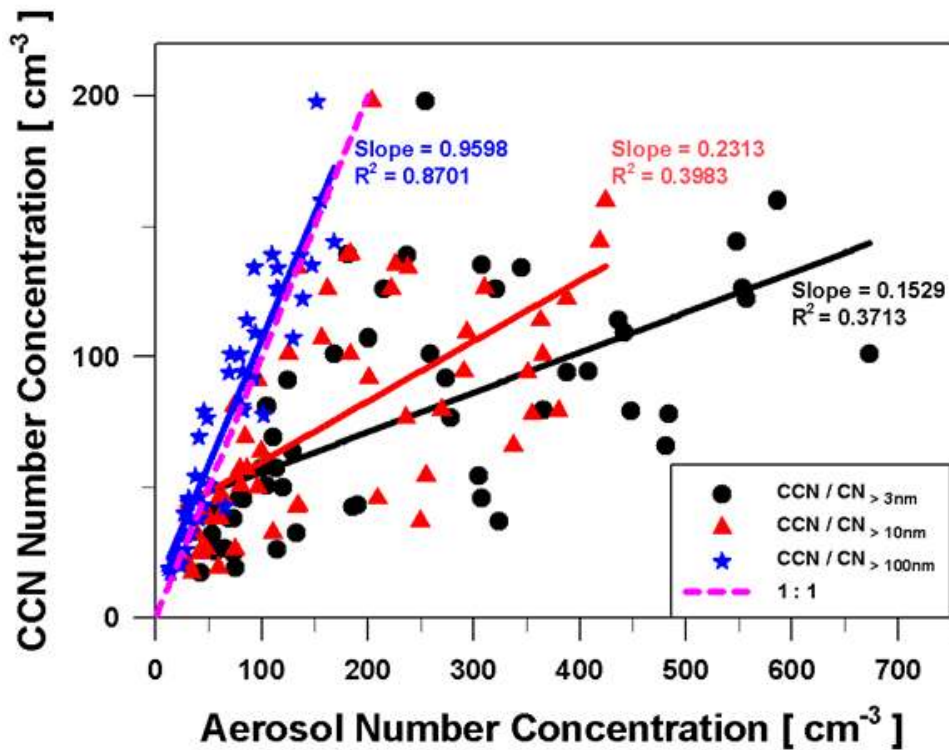


Fig. 11. Correlation of aerosol number concentration vs. CCN number concentration



본 연구에서는 이러한 에어로졸의 물리적 특성 파악을 위하여, Ny-Alesund 그루바데트 측정소에서 TEM-grid analysis를 통한 에어로졸의 크기 및 shape 형태 자료를 측정하였다(Fig. 12). Fig. 12에서 볼 수 있듯이, 비구형 형태의 입자들뿐 아니라, 구형의 입자, chain형태의 입자들을 확인할 수 있었다. 관련한 정확한 기원과 성분에 관련한 비교 연구가 필요함을 보여주고 있다. 확보된 자료는 장기적 측정을 통한 비구형 극지 에어로졸의 모수화 및 광학적 특징 산출에 기초자료로 활용될 수 있다.

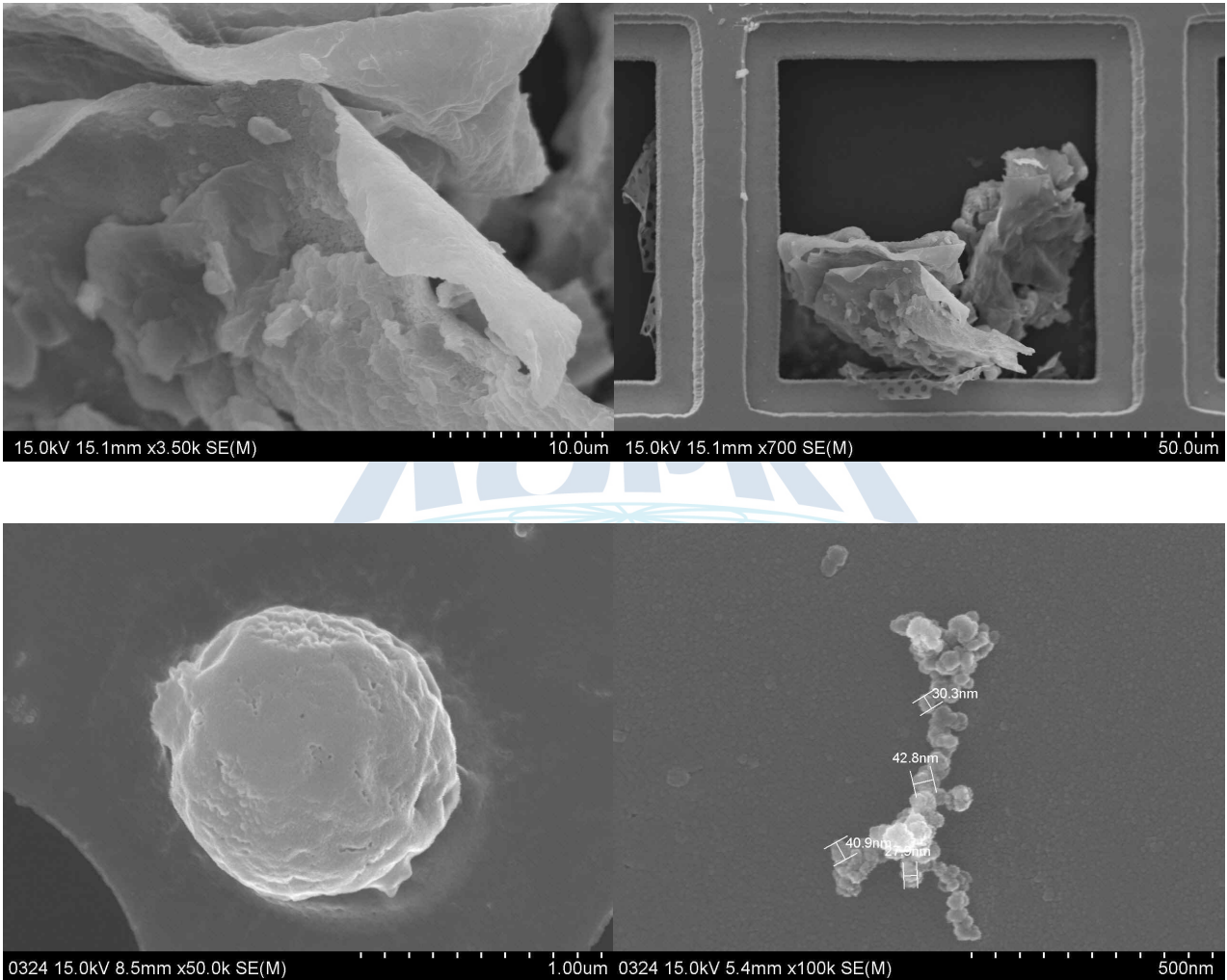


Fig. 12. Morphology of single aerosol particle at Grubadet station, Svalbard

## 1-2. 북극지역 에어로졸의 화학적 특성

물리적 특성과 더불어 에어로졸의 특성 파악에 필요한 주요 특성은 북극지역 에어로졸의 화학적 특성 자료이다. CCN농도, 에어로졸의 크기분포를 비롯한 북극지역 에어로졸의 물리적 특성자료는 화학조성과의 특성과 결합하여 분석할 때, 기원 및 연관성에 대한 파악이 가능하다. 또한 에어로졸 생성은 직접적인 배출이외에 가스상 반응에 의한 2차 생성이 중요한 역할을 하므로, 북극지역 에어로졸 분석에서도 2차생성의 영향을 파악하기 위해서는 가스상 입자상 물질의 측정자료 확보가 필요하다. 본 연구에서는 이러한 점에 착안하여, 그루바데트 측정소에서 측정한 에어로졸 및 가스상 물질의 화학적 조성의 경향을 분석하였다. Fig. 13은 2007-2013년 동안 이들 조성 물질의 경향을 보여주고 있다. 분석대상인 측정자료는 주로 TSP(total suspended particle)상의 NH<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>등의 가스상 농도와 ammonium, nitrate등의 무기이온, 그리고 K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>등의 양이온 농도들이다. 전반적으로 봄철 농도가 증가하고 가을 겨울철에 농도가 낮아지는 전형적인 경향을 보여 주고 있으나, 연도별, 물질별 증가감소의 폭과 추이는 상이함을 확인할 수 있다. 본 연구에서 확보된 에어로졸의 화학적 자료는 물리적 특성자료와 결합하여, 광학적 특성자료를 산출하고 물리-화학자료와 광학자료와의 인과관계 파악에 적용하였다.

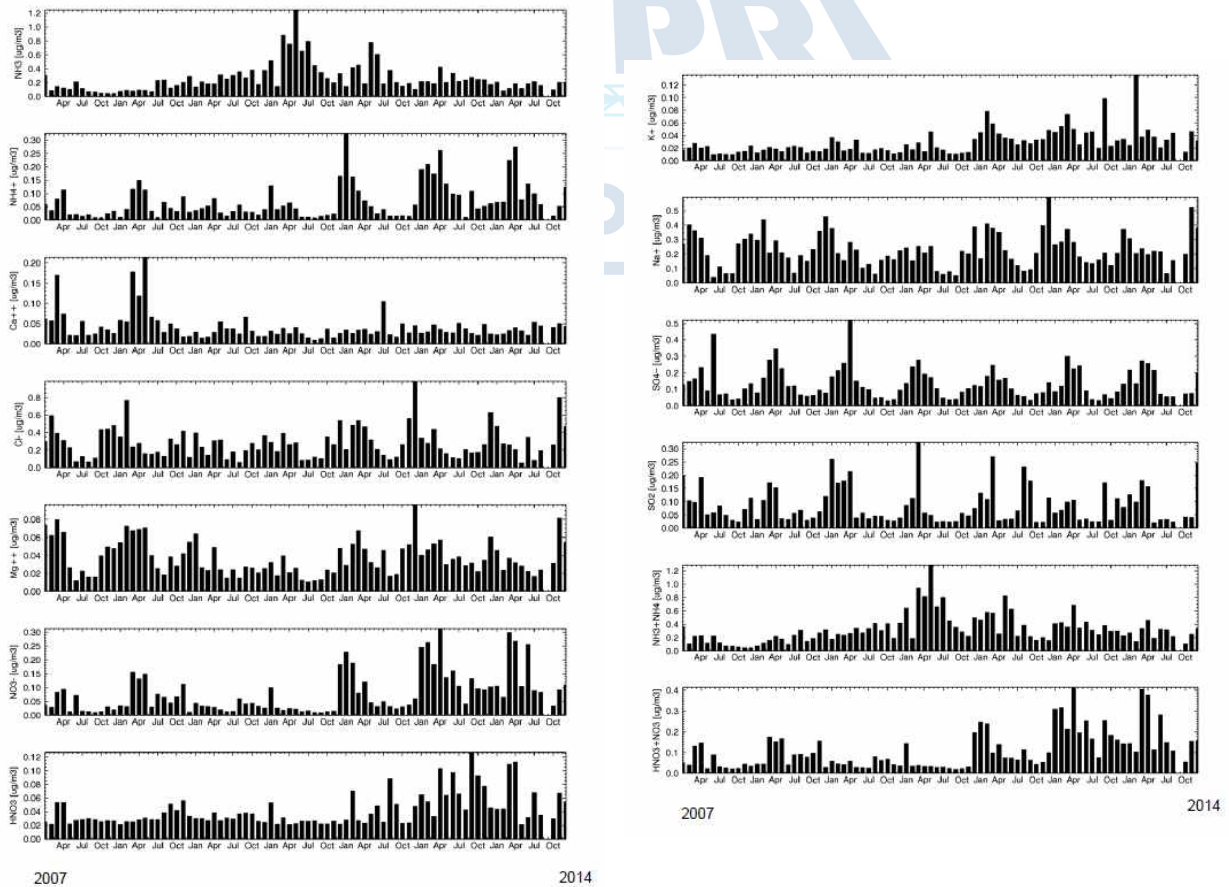


Fig. 13. Trends of aerosol and gas concentration at Grubadet station, Svalbard (2007-2014)

### 1-3. 북극지역 에어로졸의 광학적 특성

에어로졸의 물리적 특성과 화학적 조성 특성은 중국적으로 입자의 광학적 특성에 영향을 미친다. 이는 에어로졸의 크기분포등의 물리적 특성과 화학적 조성에 따라 입자의 산란과 흡수의 정도가 달라지기 때문으로 중국적으로 이러한 광학적 특성의 변화는 에어로졸의 복사 강제력에 영향을 미치게 된다.

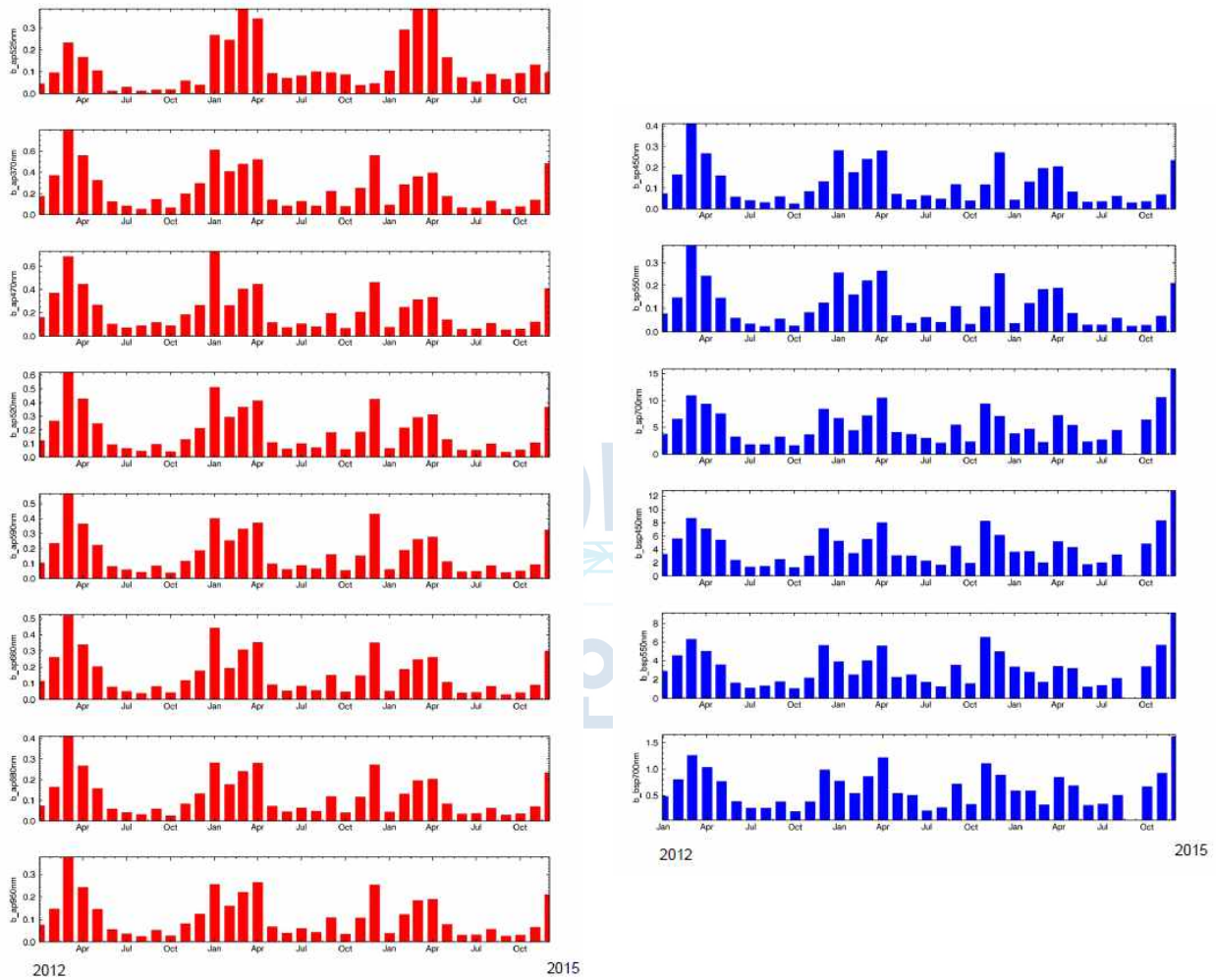


Fig. 14. Trends of aerosol scattering and absorption coefficient (2012-2015)

Fig. 14는 Ny-Ålesund Zeppelin 측정소에서 측정한 nephelometer와 aethalometer를 통하여 측정한 북극 에어로졸의 광흡수 및 광산란 계수의 변화를 보여주고 있다.

nephelometer는 광산란계수를 통하여 에어로졸에 의한 빛의 산란을 보여주고, aethalometer는 광흡수 계수를 산정하여, 에어로졸에 의한 빛의 흡수 영향을 보여주고 있다. 통상, BC (Black Carbon)과 같은 광흡수성 물질의 흡수 계수를 측정한다. 그림에서 볼 수 있듯이 봄철 에어로졸의 농도가 높은 계절에 광학적 특성이 증가하고 가을 겨울의 경우 농도가 낮아지는 전형적인 경향을 보여주고 있다. 광흡수 계수와 광산란 계수의 경향 역시 전반적으로 비슷한 계절적 추이를 보이는 것을 알 수 있다. 확보된 광학적 측정 자료는 물리-화학적 자료와 함께, 북극지역의 물리-화학-광학적 자료의 인과성 분석에 적용되었다.

### 1-3. 북극항차 탄소 에어로졸의 조성 특성

본 연구에서는 북극항차동안의 유기탄소 에어로졸의 조성을 측정하고 이러한 유기탄소 에어로졸의 영향이 광학적으로 어떠한 영향을 미치는 지를 파악하고자 하였다. 이를 위해 2017년 아라온 북극 항차에서 에어로졸의 탄소 성분을 측정하였다. 특히 광흡수에 영향을 미치는 흡수성 유기탄소 에어로졸인 HULIS의 농도를 측정하여 그 수준을 비교하여 보았다. 항차 경로 및 확보된 시료관련 정보는 Fig. 15과 같다. Fig. 16은 항차에서 측정한 탄소 HULIS의 에어로졸의 분석 절차를 보여주고 있다.



Fig. 15. Courses and equipped instruments for aerosol (to and from NOME)

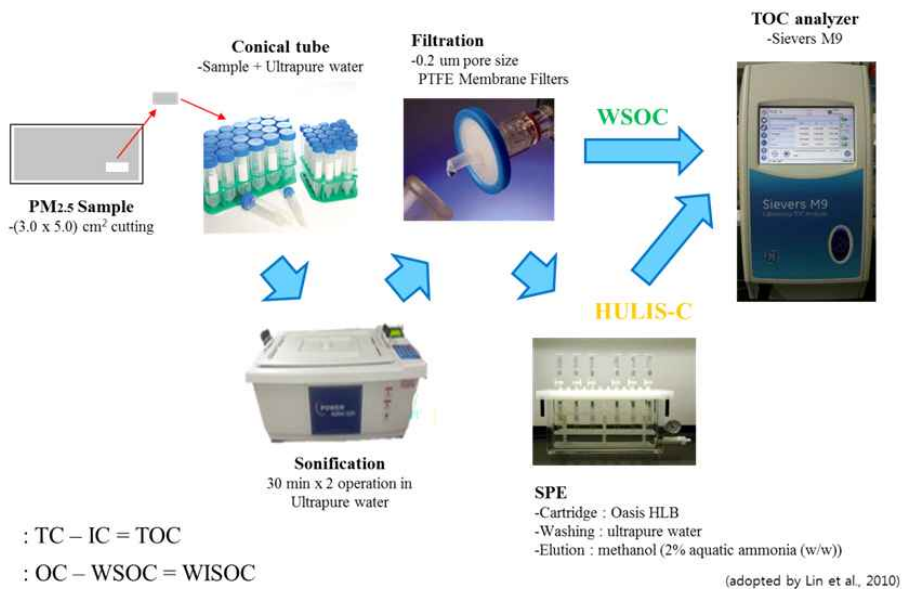
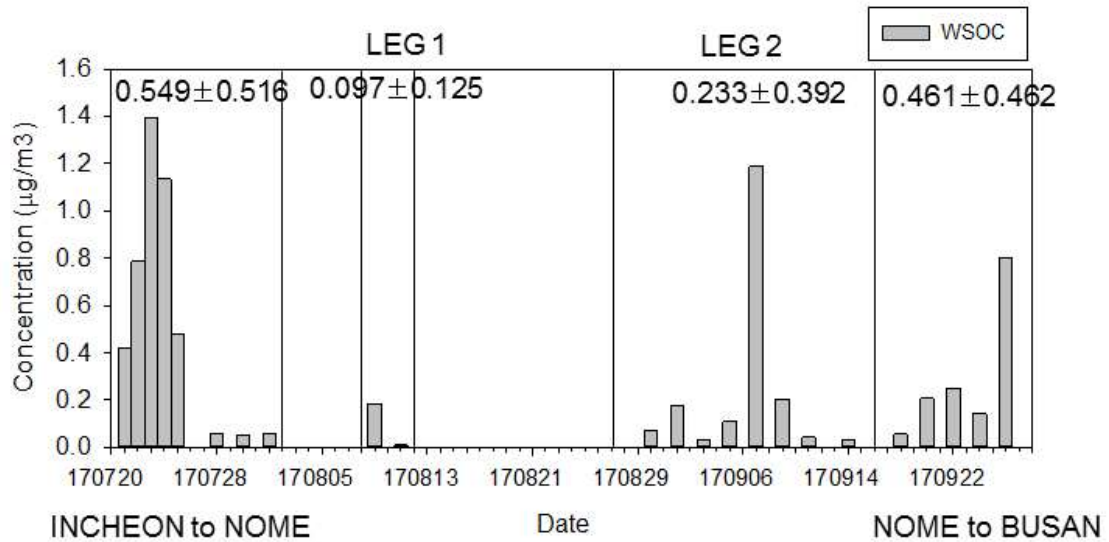
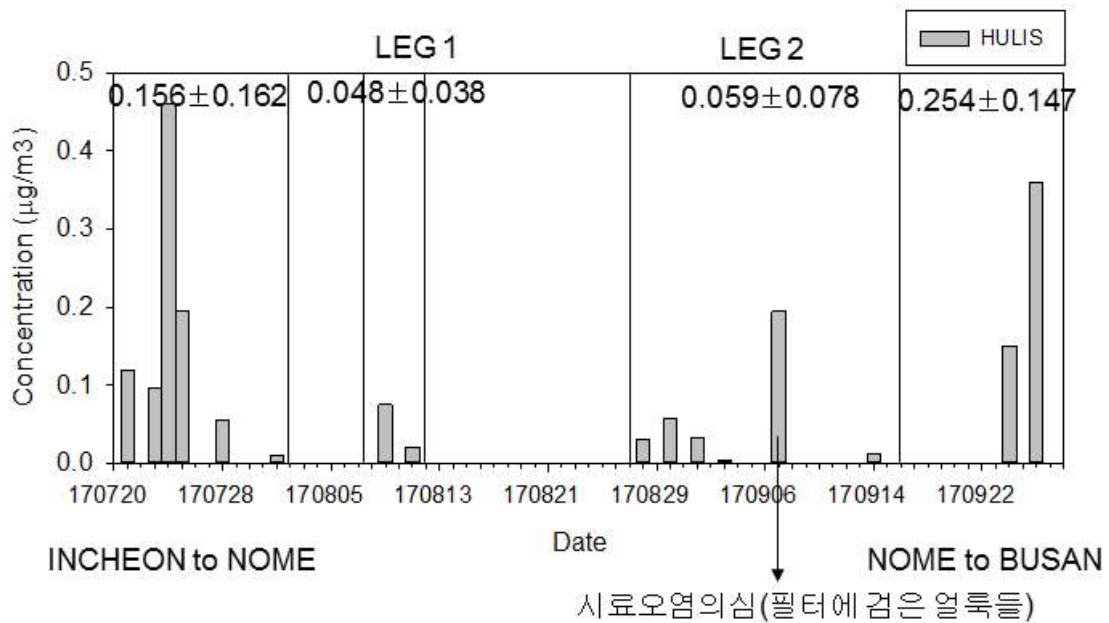


Fig. 16. Analytic procedures for carbon HULIS aerosol

Fig. 16과 Fig. 17은 2017년 하계 북극항차기간동안의 WSOC 및 HULIS-C의 농도 결과를 보여 주고 있다. Fig. 16과 Fig. 17에서 볼 수 있듯이, 평균적으로 보았을 때 항차기간동안의 WSOC (water soluble organic carbon)의 농도는  $0.381 \pm 0.448 \text{ C } \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 보이고 있으며, 인천에서 NOME으로 가는 항차에서 가장 높은 농도가 관측되었다.



(a) WSOC



(b) HULIS-C

Fig. 17. Concentration of (a) WSOC, (b) HULIS-C to and from NOME course

Fig. 17에서 볼 수 있듯이 HULIS-C의 농도는  $0.117 \pm 0.131 \text{ C } \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 관측되었으며, NOME에서 BUSAN으로 가는 항로에서 높은 경향을 보였다. 이 기간 평균적인 HULIS-C/WSOC 비율은  $56 \pm 10\%$  이었다. Fig. 18은 항차기간동안의 HULIS-C/WSOC 비율을 보여주고 있다. Fig. 18에서 볼 수 있듯이, 전체 항차의 평균 HULIS-C/WSOC 비율은  $38 \pm 26\%$ 을 보였다. Leg

1 과 Leg 2 의 평균 HULIS의 농도는  $0.053 \pm 0.071 \text{ ugC/m}^3$  로 최대  $0.195 \text{ ugC/m}^3$ 에서 최소  $0.003 \text{ ugC/m}^3$  의 농도 경향을 보였다. 아라온 북극항차 측정결과 2017년 아라온호 북극항차 기간동안 채취한 PM2.5 시료에서 WSOC와 HULIS-C 를 분석을 하였고, 두 성분 모두 INCHEON TO NOME과 NOME TO BUSAN 구간에서 높은 농도를 보이는 반면 HULIS-C/WSOC 평균비율은 전구간에서 유사한 경향을 보였다 (Fig. 18). 또한, LEG 1과 LEG 2에서는 전반적으로 낮은 농도 또는 검출한계 아래의 농도를 보였다. 전반적으로 도출된 결과는 Table 3에서 볼 수 있듯이 기존의 선행연구와 비슷한 수준의 경향을 보이고 있다. 다만, 1회 항차에 한정된 측정결과로 반복실험 결과 재현성을 확인하지 못한 한계가 있어, 향후, 최종결과 확신을 위한 추가 재분석 필요하다. 도출된 자료는 크기분포 및 굴절률 등의 물리적 조건에서의 광학적 특성을 계산하는데 활용되었다.

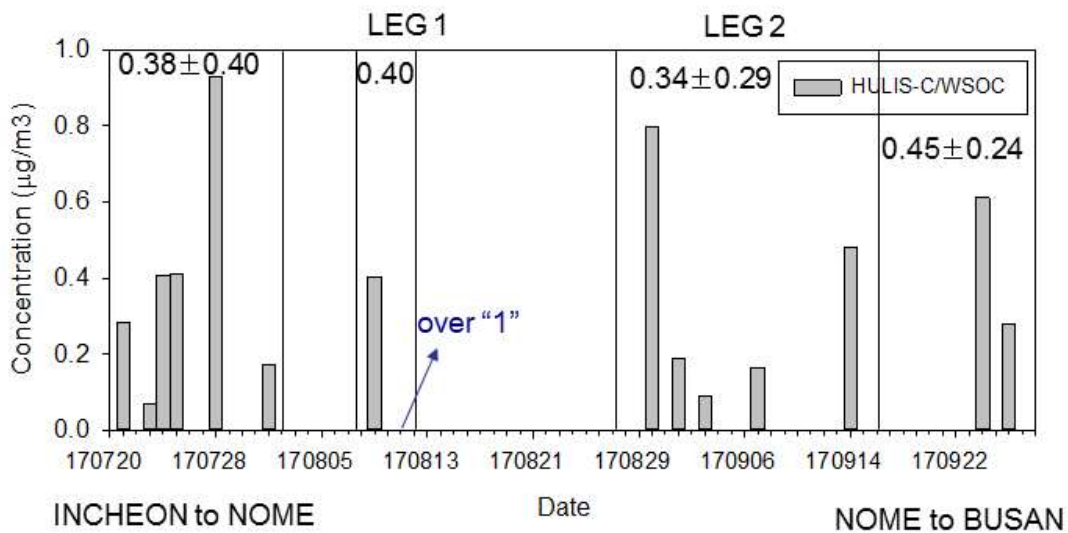


Fig. 18. HULIS-C/WSOC ratio to and from NOME course

Table 3. Comparison of HULIS-C concentration in Arctic regions

Site	Sample type	Isolat. Meth.	Quantif. Meth.	HULIS concentration ( $\mu\text{gC L}^{-1}$ )			Reference
				Min	Max	Average	
Station Nord, Arctic	Aerosol (PM <sub>10</sub> )	HLB	TOC			0.02 <sup>a</sup>	Nguyen et al., 2014
Barrow, Alaska, Arctic	Snowpack	DEAE	TOC	1	16		Voisin et al., 2012
Alaska, Arctic	Snowpack		UV-Vis	1200 <sup>b</sup>	1500 <sup>b</sup>		France et al., 2012
Col du Dôme, Alpine	Ice core		UV-Vis	50	400		Legrand et al., 2007
Col du Dôme, Alpine	Ice core	DEAE	TOC	4	250		Guilhermet et al., 2013
Antarctic	Snow, coast	XAD-8	Gravimetry	16 <sup>c</sup>	397 <sup>c</sup>		Calace et al., 2005
Antarctic	Snow, inland	XAD-8	Gravimetry	25 <sup>c</sup>	146 <sup>c</sup>		Calace et al., 2005

<sup>a</sup> in the unit of  $\mu\text{gC m}^{-3}$ .

<sup>b</sup> the concentration of non-BC light-absorbers in snowpack.

<sup>c</sup> in the unit of  $\mu\text{g L}^{-1}$ .

## 2. 환북극 지역 대기 에어로졸 원격위성 측정자료 분석

### 2.1. 원격자료로 산출된 AOD 분석

북극지역의 경우, 접근성과 기상조건등 여러 한계로 직접적인 지상측정자료를 장기간 확보하는데 한계를 가지고 있다. 따라서, 위성자료를 통한, 자료의 활용이 매우 중요하다. 그러나, 위성자료는 기본적으로 원격특성을 이용한 관측원리상 직접측정과의 비교등을 통한 자료의 검증이 그 이용과 활용에 있어 필수적이다. 본 연구에서는 MODIS위성자료를 통한 북극 지역의 AOD분석을 통하여 AERONET자료와 같은 계절적 변동을 확인할 수 있었다. 또한 CCN 측정자료의 장기적 추이와 비교함으로써 상관성을 파악하고 이를 통해, AOD로부터 CCN의 농도를 유추할 수 있다.

Table 4는 측정 기간 동안 MODIS, AERONET 등을 원격측정을 통한 대기 에어로졸의 AOD를 보여주고 있으며, Table 5는 각 측정 및 재분석 자료의 특징을 보여주고 있다. Fig. 19와 Fig. 20에서 볼 수 있듯이, 측정기간 동안 CCN, AOD자료로부터 봄철CCN, AOD의 증가와 가을 겨울 감소 등 계절별 변동을 확인할 수 있다.

AOD의 월별 변화 패턴은 MODIS, AERONET, MERRA-2 reanalysis자료를 통하여서도 확인할 수 있으며, Fig. 20의 비교에서 알 수 있듯이, AERONET과 MERRA-2의 경우 월별 평균값의 변동이 매우 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. Fig. 21에서 보듯이, MODIS AOD의 경우, 다소 높은 경향을 보이고 있으며 이러한 경향의 상관성을 파악하기 위하여 각 자료간의 월별 평균 AOD간의 상관성을 파악하여 보면, MERRA-2와 MODIS의 상관성이 가장 높은 것을 알 수 있다. 이는 MODIS의 AOD값이 다소 높은 경향을 보이고 있으나, 상관성의 측면에서 볼 때 유사한 경향을 보이고 있음을 의미한다.

CCN의 평균 농도는 봄철 Arctic Haze의 영향으로 증가하고 3월에 최고치를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이러한 고농도는 4-8월까지 완만한 감소세를 보이다 9월에 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다. CCN과 DMPS등의 측정을 통한 북극지역 에어로졸 추이 분석결과 봄철 장거리 수송에 의하여 증가된 에어로졸의 농도가 CCN의 생성에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. 여름철 CCN의 moderate한 증가의 경우 여름철 nano size의 입자개수의 폭발적 증가와 관련이 있으며 이는 AOD등의 질량을 고려한 지표에 직접적 연관성을 파악되기는 쉽지 않으나 개연성을 파악할 필요가 있다. 이러한 측면에서 AAE등의 크기 parameter를 활용한 입경과 CCN생성의 상관성을 파악 등이 필요하며, 또한 Global model을 통하여 산출된 에어로졸의 조성자료를 통한 에어로졸의 조성과 CCN, 크기분포 등의 지상 측정자료의 비교 분석을 통하여 주요 성분과의 상관관계 비교가 필요하다.

Table 4. Daily average AOD distribution (2013–2017)

Season	MODIS AOD	AERONET AOD	CCN	MERRA-2
Spring	0.125 ± 0.090 (48%)	0.104 ± 0.045 (36%)	129.711 ± 88.843 (68%)	0.106 ± 0.043 (100%)
Summer	0.087 ± 0.156 (57%)	0.072 ± 0.034 (26%)	84.521 ± 65.338 (76%)	0.067 ± 0.031 (100%)
Autumn	0.052 ± 0.077 (11%)	0.070 ± 0.023 (4%)	33.103 ± 31.826 (72%)	0.064 ± 0.027 (99%)
Winter	-	-	57.675 ± 66.404 (63%)	0.074 ± 0.035 (99%)

Table 5. Characteristics of MODIS, AERONET, CCN, MERRA-2 AOD dataset

Characteristics	MODIS	AERONET	CCN	MERRA-2
Dataset	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MOD08_M3 (collection6)</li> <li>• MOD08_D3 (collection6)</li> </ul>	Version 2 Direct Sun Algorithm, Level 2.0	Cloud Condensation Nuclei Particle Counter (ARM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MERRA-2 instM_2d_gas_Nx</li> <li>• MERRA-2 inst3_3d_gas_Nv</li> </ul>
Temporal Resolution	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monthly average data</li> <li>• 3 hours average data</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monthly average data</li> <li>• Daily average data</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monthly average data</li> <li>• Daily average data</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monthly average data</li> <li>• Daily average data</li> </ul>
Spatial Resolution & Used geometry	1 ° (11.5 ° E, 78.5 ° N)	Hornsund station (15.560 ° E, 77.001 ° N)	Zeppelin station (11.89 ° E, 78.91 ° N)	0.5 ° 0.652 ° (11.875 ° E, 79 ° N)
Grid	Lon.: -179.5 ° to 179.5 ° Lat.: 89.5 ° to -89.5 °	One point	One point	Lon.: -180.0 ° to 179.375 ° Lat.: -90 ° to 90 °
Number of data (formonthlyanddailyaveragedata)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 42/72</li> <li>• 641/2192</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 38/72</li> <li>• 364/2192</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 55/72</li> <li>• 1535/2192</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 72/72</li> <li>• 2192/2192</li> </ul>
Wavelength	550 nm	500 nm		550 nm



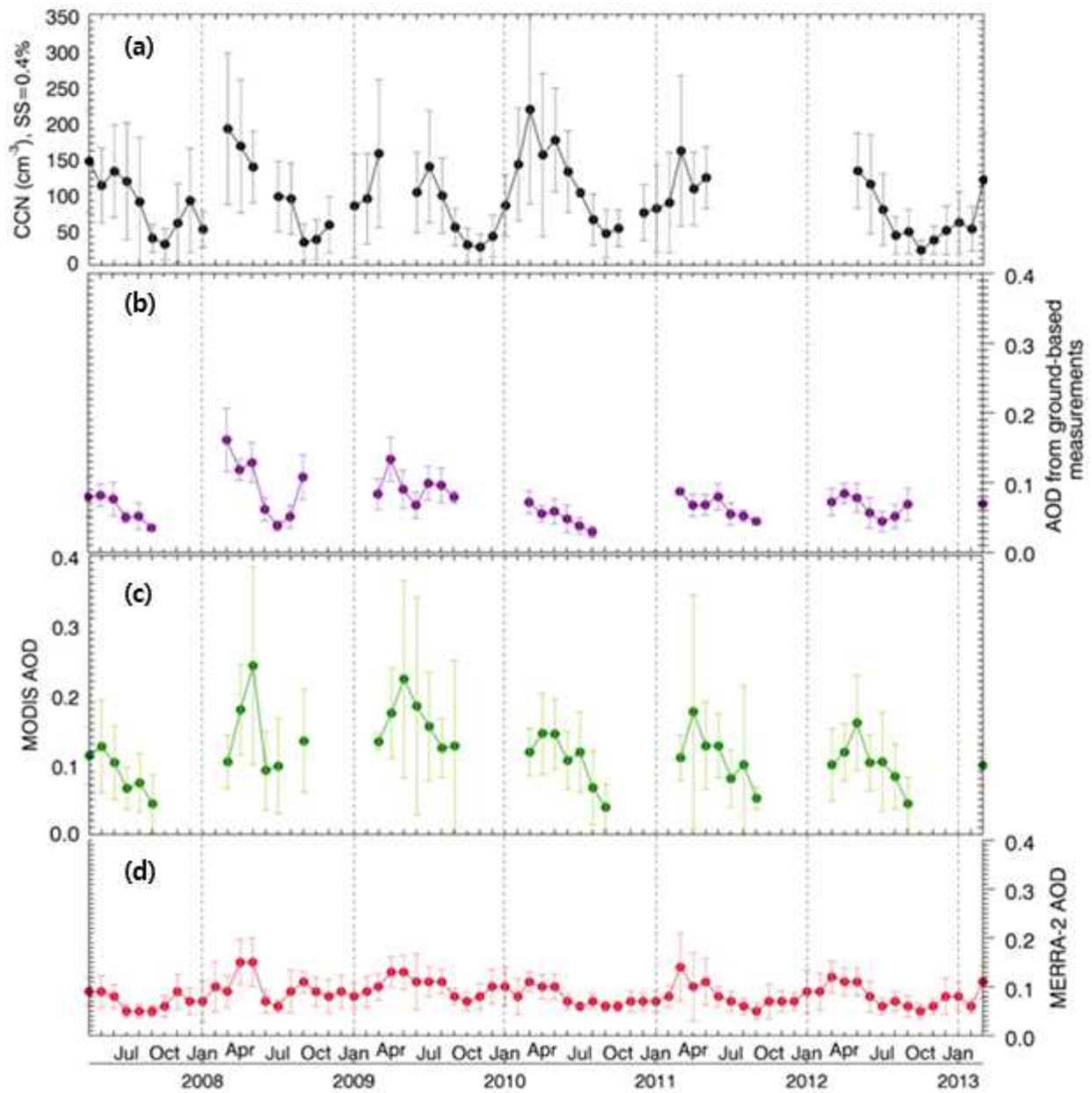


Fig. 19. (a) CCN (SS = 0.4%), (b) AOD (500 nm), (c) MODIS AOD (550 nm) (d) MERRA-2 AOD (550 nm) (2007~2013, Zeppelin, Ny Ålesund)

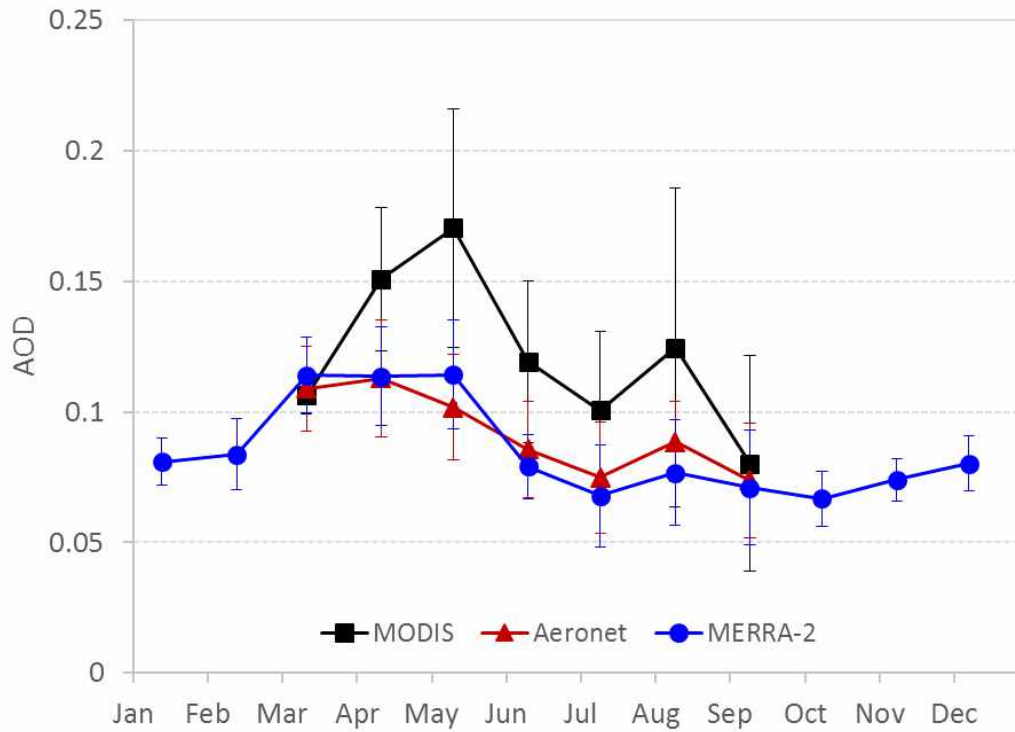


Fig. 20. Comparison of the monthly averaged AOD for MERRA-2, AERONET, MODIS (2007-2013)

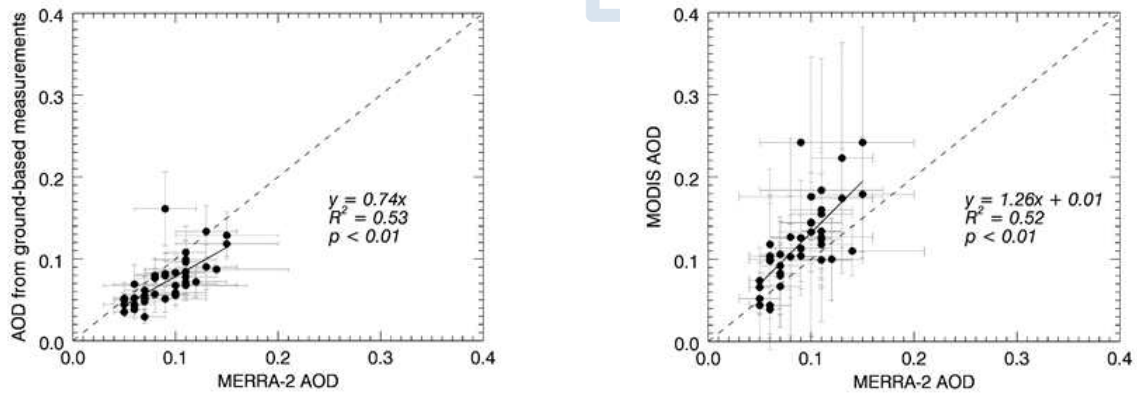


Fig. 21. Correlation of monthly averaged MERRA-2 AOD and (a) ground measured AOD (b) MODIS AOD

## 2.2. 원격자료로 산출된 탄소에어로졸 특성 분석

지상 측정자료의 시공간적 한계를 보완, 비교하기 위해 본 연구에서는 MERRA-2 자료에 기반한 Zeppelin지역의 BC, OC등의 탄소성분 농도 경향 분석하였다. 연구결과, 연관된  $SO_4^{2-}$  등의 에어로졸 조성의 장기간 추이 분석을 통해, 뚜렷한 계절별 경향성 (seasonal trends)을 보여주고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 22에서 보는바와 같이 MERRA-2 자료에 기반한 탄소 에어로졸의 농도는 상관성을 보이고 있음을 알 수 있다. 특히, BC와  $SO_4^{2-}$ 의 농도 변화 경향은 매우 높은 상관관계를 보이고 있다.

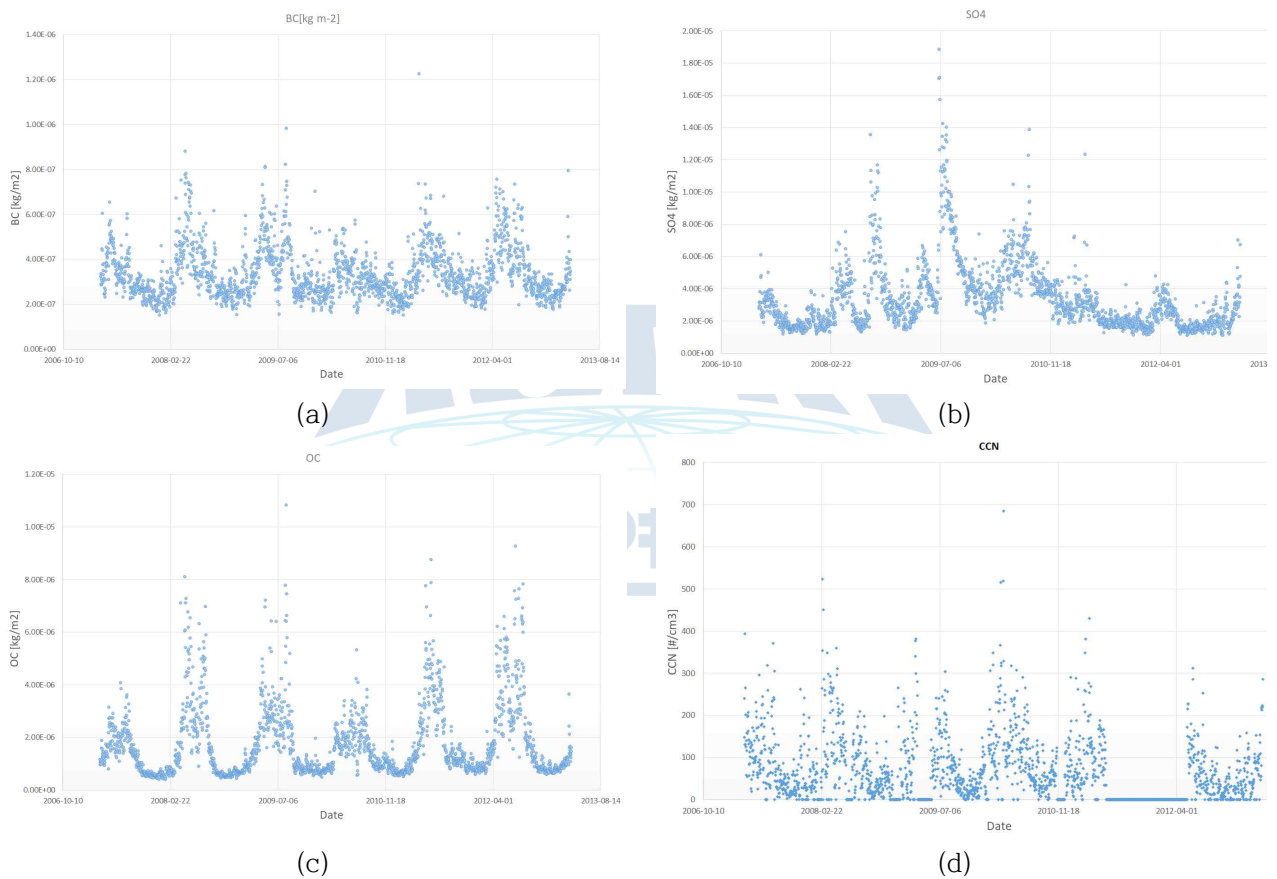


Fig. 22. Daily averaged concentration of BC, OC,  $SO_4^{2-}$  from MERRA-2 and CCN (2007-2013)

Fig. 23은 BC와 OC,  $SO_4^{2-}$  농도간 상관분석을 보여준다. Fig. 23에서 볼 수 있듯이, OC와 BC,  $SO_4^{2-}$ 간의 약한 상관성 존재함을 확인할 수 있었다. 이들 결과는 다음 장에 기술된 수용모델을 통한 기여도 분석을 수행하는데 활용될 수 있다.

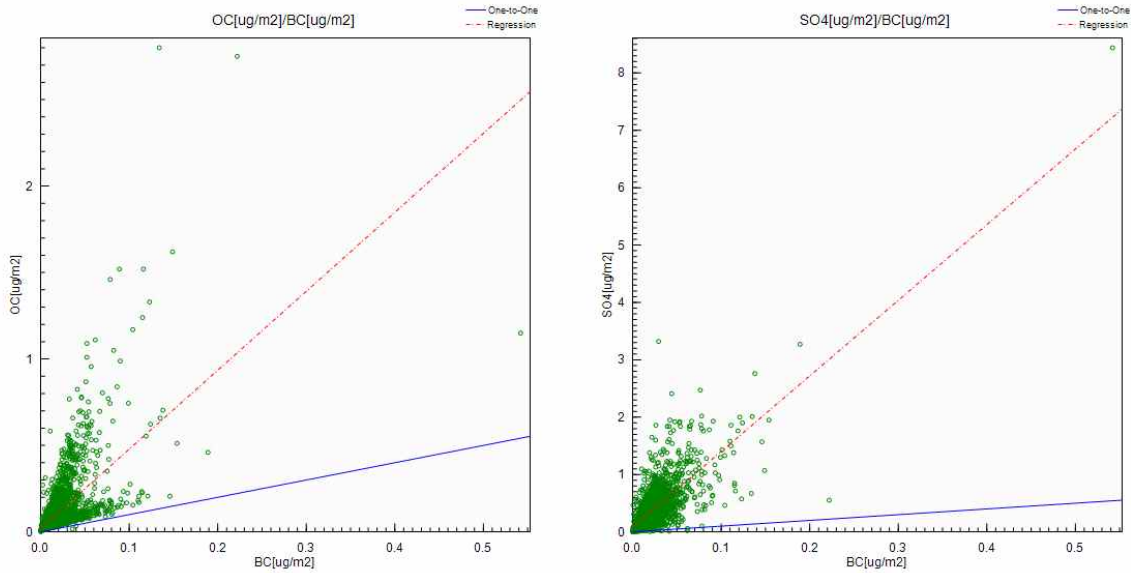


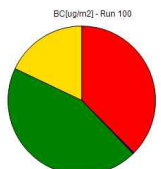
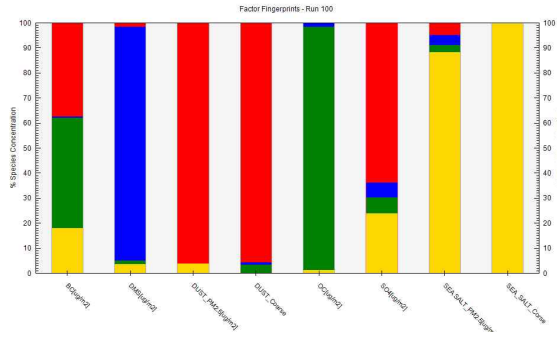
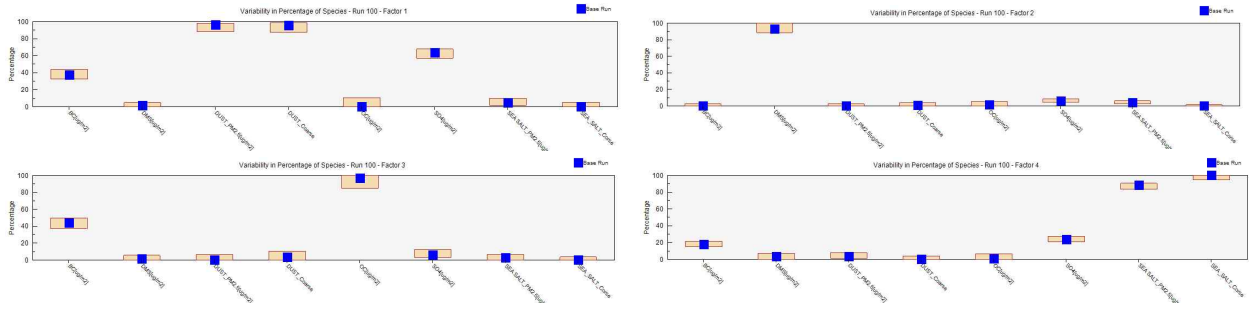
Fig. 23. Correlation between BC vs. OC (left) and BC vs.  $SO_4^{2-}$

### 2-3. 원격자료에 기반한 에어로졸의 광학적 특성 분석

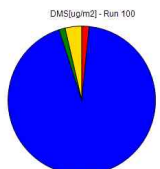
원격자료에서 도출된 AOD와 대기 column의 질량밀도(mass density,  $Mass_{column}$ )로부터, MEE(Mass Extinction Efficiency)를 구할 수 있다. AOD와 컬럼의 질량농도 그리고 이에 상응하는 MEE(Mass extinction coefficient)는 다음과 같은 관계를 통하여 도출이 가능하다.

$$AOD_{tot} = \sum_i AOD_i = \sum_i MEE_i \cdot Mass_{Column} \quad (1)$$

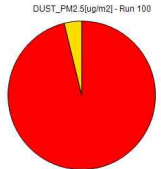
본 연구에서는 또한, MERRA-2의 조성별 자료를 이용하여 광학적 특성 도출과 더불어 PMF를 이용하여, 요소별 기여율에 근거한 광학특성을 도출 하고자 하였다. MERRA-2로부터 얻어진 원격자료에 기반하여 각 요인별 AOD와 질량 농도, 전체 에어로졸의 총 AOD자료로부터, 조성 및 수용모델(PMF)결과를 통한 기여율별 MEE(Mass Extinction Efficiency)를 도출할 수 있다 (Fig. 24). 본 연구에서는 에어로졸의 광학적 특성을 총 4개의 원인별 기여(source contribution)로 설명해 보고자 하였다. 도출된 요소(factor)는 각각 장거리 이동 (f1), DMS (f2), 탄소 조성물질 (f3), 해염(f4)에 의한 영향으로 구분이 가능하다. (f1: Long range transport, f2: DMS, f3: OC, BC(탄소 조성물질). f4: sea-salt). 구체적인 요소별 광학 특성 결과는 5절에 제시 되어 있다.



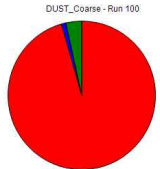
Factor Contribution > 0.05 %  
 Factor 1 = 0.00802 (37.5 %)  
 Factor 2 = 0.00006 (0.3 %)  
 Factor 3 = 0.00947 (44.3 %)  
 Factor 4 = 0.00384 (18.0 %)



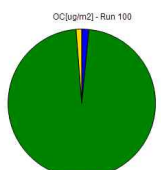
Factor Contribution > 0.05 %  
 Factor 1 = 0.00118 (1.6 %)  
 Factor 2 = 0.06884 (93.4 %)  
 Factor 3 = 0.00099 (1.3 %)  
 Factor 4 = 0.00268 (3.6 %)



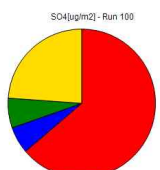
Factor Contribution > 0.05 %  
 Factor 1 = 0.53684 (96.2 %)  
 Factor 4 = 0.02142 (3.8 %)



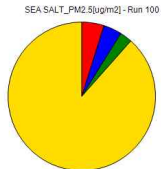
Factor Contribution > 0.05 %  
 Factor 1 = 0.99189 (95.6 %)  
 Factor 2 = 0.01034 (1.0 %)  
 Factor 3 = 0.03585 (3.5 %)



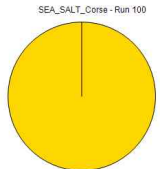
Factor Contribution > 0.05 %  
 Factor 2 = 0.00196 (1.6 %)  
 Factor 3 = 0.12250 (97.2 %)  
 Factor 4 = 0.00155 (1.2 %)



Factor Contribution > 0.05 %  
 Factor 1 = 0.22640 (63.8 %)  
 Factor 2 = 0.02081 (5.9 %)  
 Factor 3 = 0.02298 (6.5 %)  
 Factor 4 = 0.08409 (23.9 %)



Factor Contribution > 0.05 %  
 Factor 1 = 0.08773 (4.9 %)  
 Factor 2 = 0.07256 (4.0 %)  
 Factor 3 = 0.04807 (2.7 %)  
 Factor 4 = 1.58980 (88.4 %)



Factor Contribution > 0.05 %  
 Factor 4 = 7.33400 (100.0 %)

Fig. 24. Source based contribution from PMF receptor model

### 3. CCN-AOD relation을 통해본 에어로졸의 물리-광학적 관계 파악

Fig. 25는 일평균 AOD와 CCN의 월별 경향을 보여주고 있다. 본 연구에서는 이들 CCN과 AOD의 관계를 통하여, 환북극 지역의 에어로졸의 특성과 상관관계를 파악하고자 하였다. 에어로졸의 광학적 대체지표인 AOD는 원격 측정과 위성측정 등을 통하여 상대적으로 직접적 측정이 어려운 지점의 자료 산출이 가능하나, CCN과 같은 에어로졸의 구름생성핵입자는 에어로졸에 의한 간접적 기후변화(indirect effect)를 파악할 수 있는 중요성이 있음에도 불구하고, 직접적 측정외에는 원격적인 방법을 통한 자료의 확보에 한계가 있다. 따라서, AOD자료를 이용하여 CCN의 농도 수준을 예측할 수 있다면, 에어로졸에 의한 기후적 영향 파악에 보다 유용한 도구로 사용될 수 있다. Andrea(2009)에 의하면, 지역에 따른 AOD와 CCN의 관계를 도출하여, 에어로졸의 특성을 파악하였다. 본 연구는 Andrea(2009)의 방법을 활용하여, AOD와 CCN의 관계를 도출하고 이를 특성에 따라 분류하였다. Fig. 26은 AOD와 CCN에 따른 에어로졸의 분류사례를 보여주고 있다. Fig. 26에서 볼 수 있듯이, 연구 결과 Zeppelin측정소 지역의 경우 CCN은 수십~100/cm<sup>3</sup> 내외의 CCN농도와 0.1 정도의 AOD 수준을 유지하고 있으며, 구체적인 값의 범위는 계절에 따라 다소 다른 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 통상적인 remote marine에 해당하는 에어로졸의 특성을 보여주고 있다. Fig. 27은 CCN-AOD relation 식을 산출하고 이를 여러 자료와 비교한 것이다. Fig. 27에서 볼 수 있듯이, 전 대륙을 대상으로 한 Andrea(2009)의 결과와 비교해 볼 때, CCN농도가 증가함에 따른 AOD의 증가 경향은 환북극 지역이 낮음을 알 수 있다. 이는 환북극 지역의 CCN 활성화에 기여하는 조성 특성과 크기분포 등의 지역적 특성에 따른 차이인 것으로 해석할 수 있으며, 또한 계절별 경향성의 차이인 것으로도 해석된다. 즉, 봄철 CCN증가에 따른 AOD증가의 경향이 Andrea(2009)의 결과와 다소 차이가 있음(다소 낮음)을 보여주고 있다.

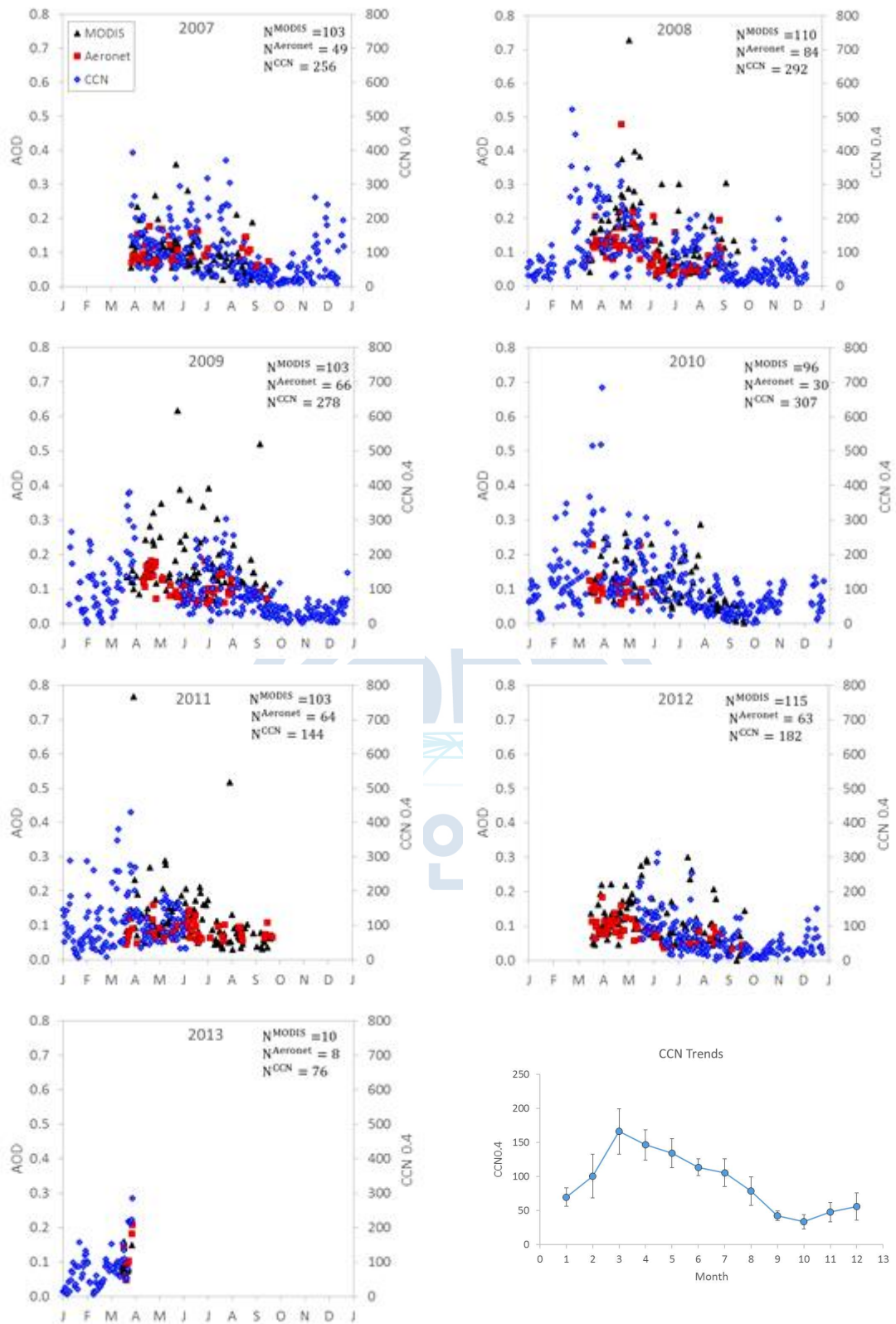


Fig. 25. Daily averaged AOD(MODIS,AERONET) and CCN number concentration (2007-2013, SS=0.4%)

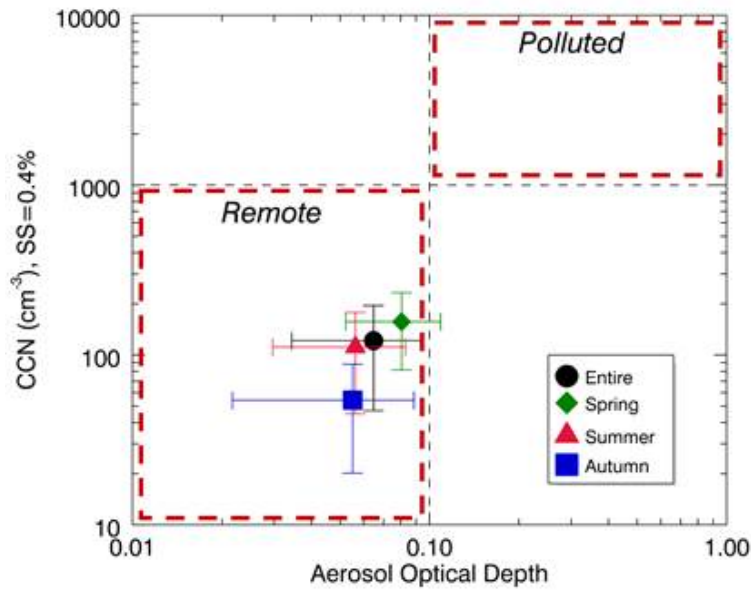


Fig. 26. Seasonal variability of CCN vs. AOD in Zeppelin (error bar: standard deviation)

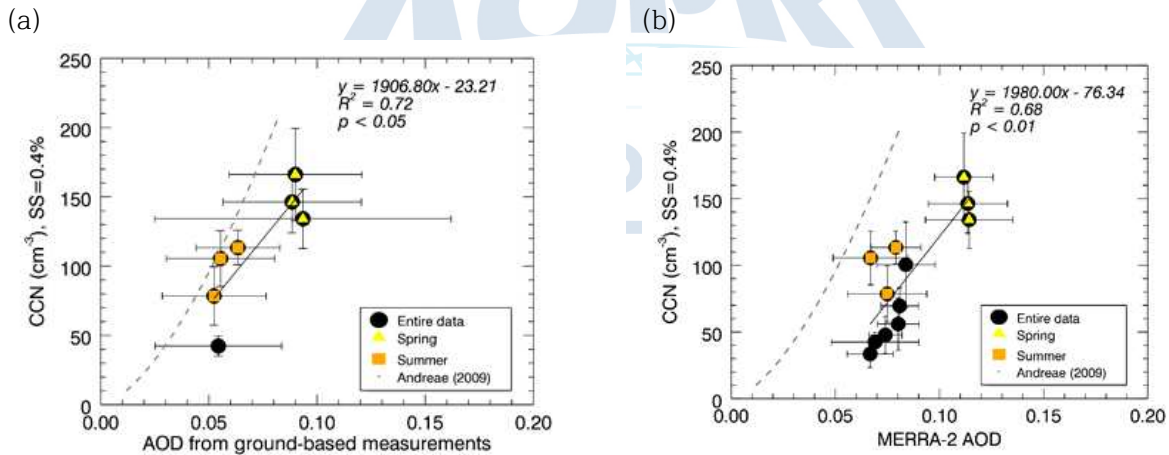


Fig. 27. Comparison of the CCN and (a) ground measured AOD (b) MERRA-2 AOD (gray dashed line: Andreae (2009)' s previous results)

에어로졸의 물리적 광학적 특성 분석에 있어, 질량 농도와 더불어 물리적 특성으로 가장 중요한 요소중의 하나는 입자의 크기 분포 (size distribution)이다. 기본적으로 에어로졸은 크기에 따라 산란과 흡수의 강도가 달라지게 되므로, 동일한 질량농도를 갖는 에어로졸이라 하더라도, 조성과 더불어 크기분포에 따라 다른 광학적 특성을 갖게 된다. 크기분포에 대한 정보는 에어로졸 크기분포를 직접적으로 측정하는 방법과, 간접 측정을 통해 얻어진 광학적 데이터로부터 크기분포를 유추하는 방법이 있다. 광학적 데이터로부터 크기분포를 유추하는 방법의 하



나로 retrieval을 들 수 있다. Fig. 28은 AERONET 자료로 측정기간(2007-2013)동안 retrieval한 Ny-Alesund지역의 크기분포로 연도별로 fine mode쪽 입자의 크기분포에 차이가 있음을 보여주고 있다. 이는 계절적 변화뿐 아니라 연도별 기원(source)의 변동이 입자 크기분포에 영향을 보여주고 있음을 시사하고 있다. Fig. 29는 Zeppelin측정소에서 측정한 에어로졸 크기분포의 계절별 특성을 보여준다. Fig. 29에서 볼 수 있듯이, 에어로졸의 계절별 변동은 봄철과 여름철을 비교하여 보았을 때, 봄철 coarse mode입자의 크기분포 증가가 두드러지는 것을 볼수 있으며, 이는 장거리 이동에 의한 Arctic haze의 영향인 것으로 해석된다.

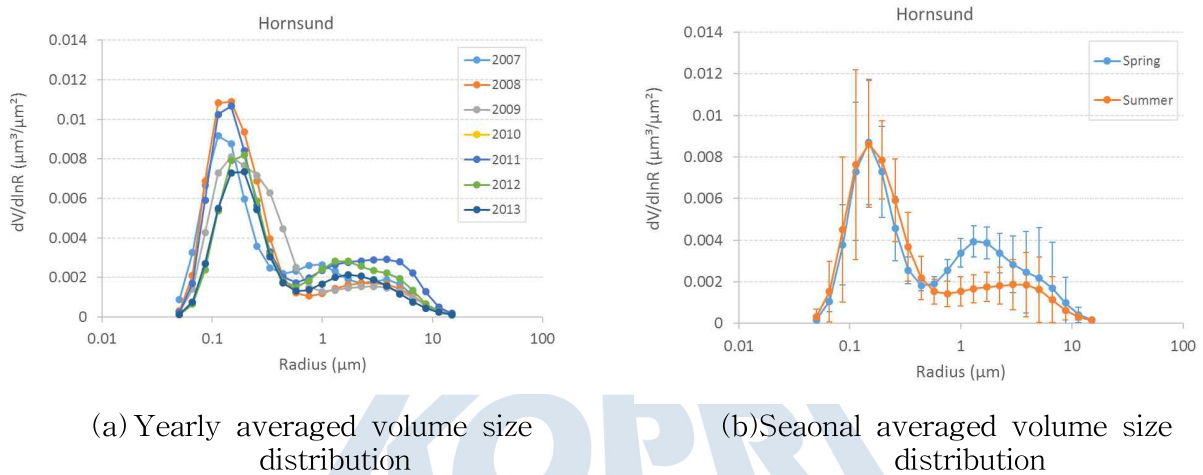


Fig. 28. Aerosol volume size distribution retrieved from AERONET (Hornsund, Svalbard)

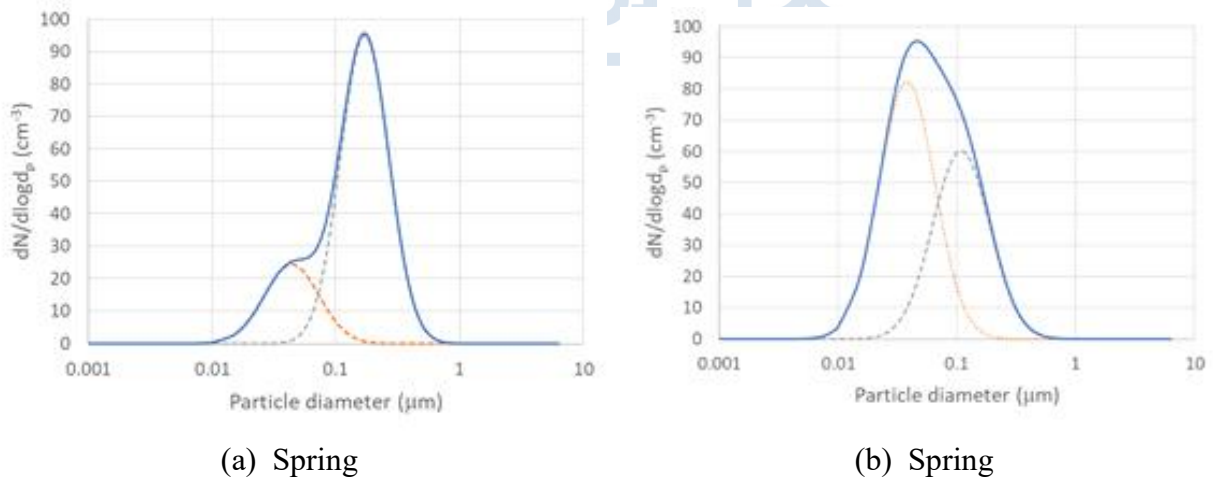


Fig. 29. Aerosol number size distribution from Zeppelin station

에어로졸의 크기에 대한 정보를 원격자료에서 파악할 수 있는 지표로 Angstrom exponent(AE)을 들 수 있다. 본 연구에서는 Zeppelin측정소 지점의 계절에 따른 입자크기의 경향을 보기 위하여 Angstrom exponent(AE)의 월별 변화를 AERONET, MODIS, MERRA-2의 retrieval 자료를 통해 결과를 분석하여 보았다. Fig. 30에서 볼 수 있듯이, MODIS, AERONET, MERRA-2자료의 월별 경향이 AOD의 경향에 비하여 다소 상이한 변화경향을 보이는 것을 확

인할 수 있다. 계절별 변화 경향을 보면 이러한 차이는 다소 완화되는데 여름철 AE값이 증가하고 봄, 가을로 갈수록 작아지는 것을 확인 할 수 있다.

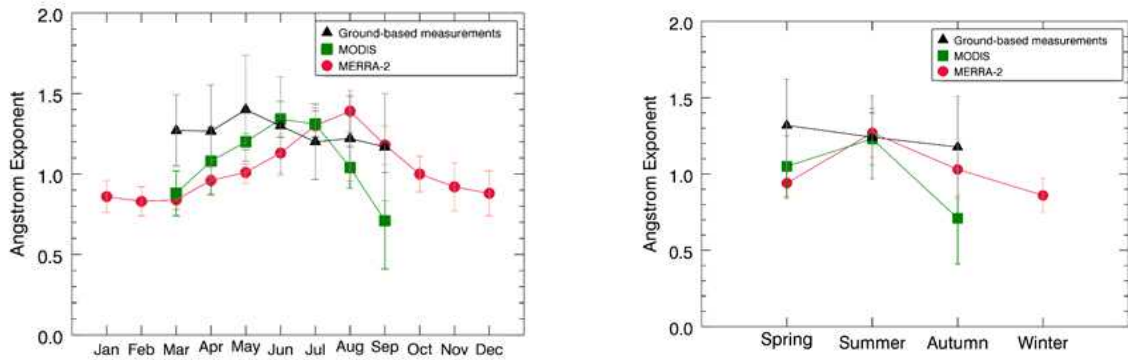


Fig. 30. Comparison of the Monthly averaged Ångström exponents (AE) retrieved from AERONET, MERRA-2 and MODIS

Fig. 31은 AOD와 Ångström exponents (AE)을 측정된 자료와 MERRA-2재분석자료에 대하여 비교한 것이다. AOD값을 Ångström exponents (AE)값과 비교하여, 크기와 에어로졸의 농도의 관계를 간접적으로 파악하고 유추하였을 때, Fig. 31과 같이 AE값을 기준으로 볼 때, Hornsund지역의 에어로졸은 continental과 maritime이 혼재된 특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 계절별로 살펴볼 때, 봄철의 경우 AOD가 높은 전형적 경향을 보이며, 여름철의 경우, AOD가 감소하면서 AE는 증가하는 경향을 보인다. 이는 여름철 fine mode입자가 주도적인 특성을 보여주고 있다.

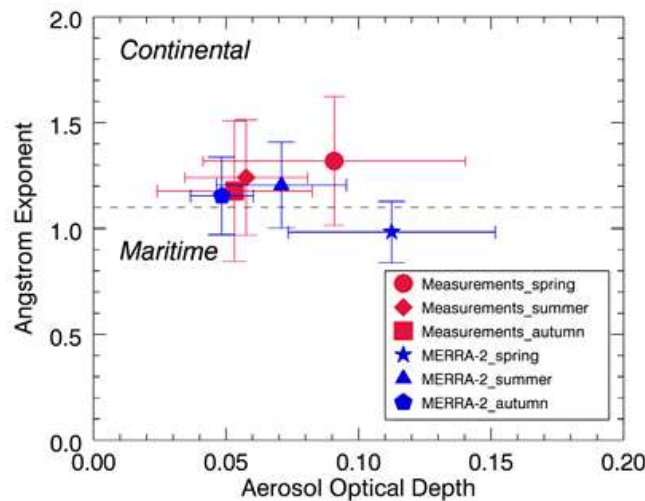


Fig. 31. Seasonal change of Ångström exponents and AOD from AERONET Sun photometers and MERRA-2 reanalysis data (Hornsund)

입자의 광흡수성과 AOD의 관계를 파악하기 위하여, 본 연구에서는 AAE(Absorption Angstrom exponent)와 AOD의 관계를 계절별로 살펴보았다. AERONET의 retrieval 자료를 활용하여 살펴보았을 때, 봄철이 AOD와 AAE가 높은 전형적인 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. CCN과 AAE를 비교한 Fig. 32와 같이 살펴보았을 때, AOD vs. AAE와 비슷한 계절별 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 다만 가을철의 경우, CCN의 농도 추이가 AOD보다 더 급격히 감소하고 있음을 알 수 있다.

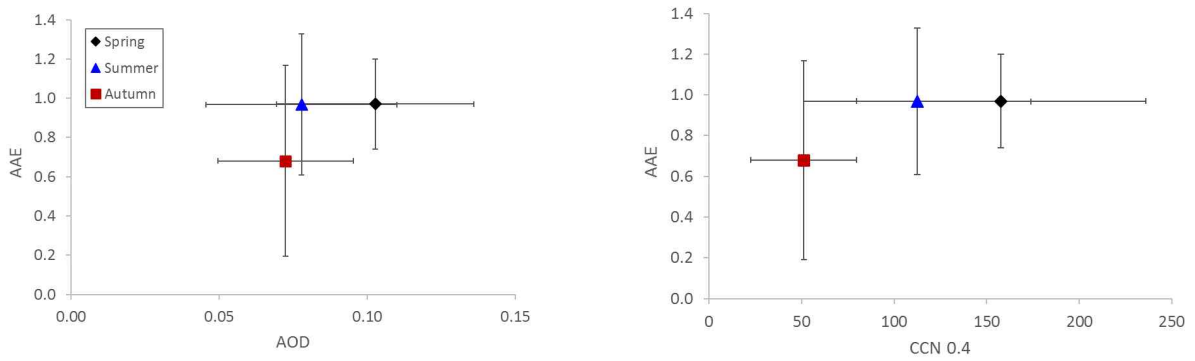


Fig. 32. Seasonal variation of AOD and AAE (Absorption Ångström exponents) at Hornsund



#### 4. 북극 에어로졸의 CCN 특성과 조성 측정자료 및 원격자료의 상관성 파악

에어로졸 광학 특성 관련 자료 기반 에어로졸 특성 파악을 위해, 북극 Zeppelin 및 그루바멧 지역의 aerosol 화학조성자료와 더불어, 광학적 특성자료(흡수와 산란계수) 측정자료를 분석하고 이의 상관성을 분석하였다. 광학적 특성자료는 복사강제력 산정등에 기본자료로 이들 복사강제력과 조성의 관계식을 파악할 수 있다. 본 연구에서는 Zeppelin 지역의 장기간에 걸친 북극권 측정자료와 CCN에어로졸의 특성으로부터, 원격자료와의 상관성 및 계절별 특이성 등을 파악하고자 하였다. 회귀관계를 통하여 화학조성과 광학적 특성간의 상관성을 파악하고자 하였다. Fig. 33은 물리화학, 광학적 특성으로부터 CCN을 유추하는 개략도를 보여주고 있다.

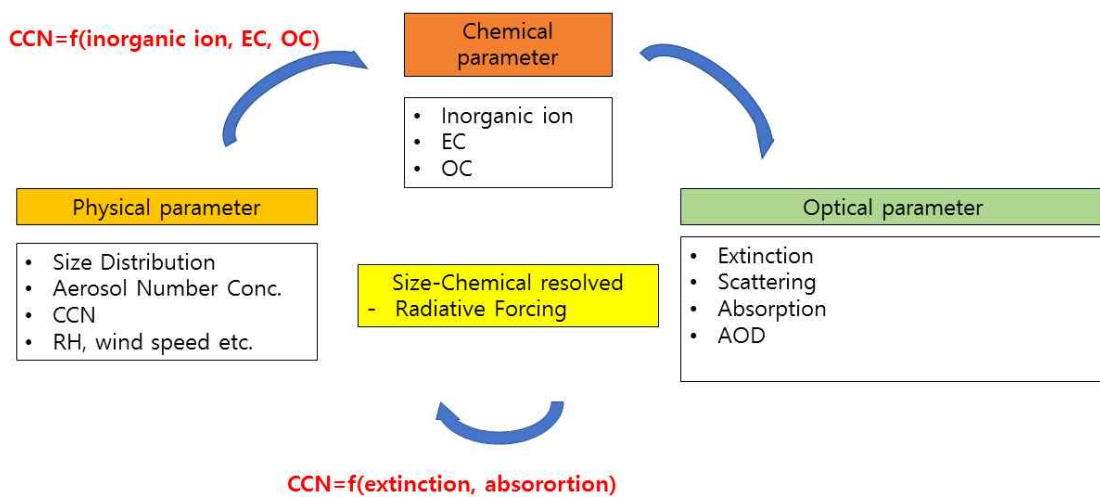


Fig. 33. CCN estimation from aerosol physico-chemical and optical characteristics

먼저, sulfate 와 NaCl과 산란계수의 회귀 분석 관계식은 다음과 같다. 여기서,  $a_1$ 과  $a_2$ 는 회귀분석을 통하여 통계적으로 유의미하게 파악된 계수를 의미한다. 물리적으로 산란계수가 종속변수이고 농도가 독립변수인 경우  $a_1$ ,  $a_2$ 는 mass extinction efficiency를 의미한다.

$$\log_{10}[b_{sca}] = a_1 \cdot \log_{10}[SO_4^{2-}] + a_2 \cdot \log_{10}[NaCl] + c \quad (2)$$

도출된 산란계수(Scattering coefficients)와 화학조성간 회귀분석 결과는 Table 6와 같다. Table 6에서 보듯이 전반적으로 이 두 물질의 경우 통계적으로 유의미한 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

Table 6. Seasonal variation of regression coefficients from aerosol chemical composition and scattering coefficients

Coefficients	Spring	Summer	Autumn	Winter	All
Constant	1.389*	0.636*	-0.352	-0.138	-0.076
a1 (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	16.473*	19.458*	23.941*	17.621*	18.465*
a2 (NaCl)	2.355*	1.240*	3.374*	4.585*	3.882*
r	0.737	0.803	0.873	0.806	0.802
N	146	75	136	176	533

\* p < 0.05.

Menon(2002)의 선행 연구에 따르면, CCN은 통상 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도와 직접적인 연관을 가지고 있다. CCN농도를 종속변수로, sulfate농도를 독립변수로 하여 회귀분석을 시행하여 보았을 때, 에어로졸 조성 및 광학 특성 관련 자료 기반 북극지역 CCN 농도 관계식이 도출될 수 있다. CCN-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도 간 회귀분석 결과는 아래 Table 7과 같다.

$$\log_{10}[CCN] = a_1 \cdot \log_{10}[SO_4^{2-}] + c \quad (3)$$

Table 7. Seasonal variation of regression coefficients from SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and CCN concentration

$$(\log_{10}[CCN] = a_1 \cdot \log_{10}[SO_4^{2-}] + c)$$

Coefficients	Spring	Summer	Autumn	Winter	All
Constant	2.456	2.343	2.278	2.510	2.468
a <sub>1</sub> (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	0.483	0.390	0.612	0.778	0.649
r	0.618	0.425	0.523	0.745	0.647
N	347	307	264	282	1,200

본 연구에서는 이상의 방법을 확장시켜, CCN와 광학 특성과의 상관성 분석을 위하여, CCN 제플린 측정자료와 결합하여 CCN과 조성별 AOD간의 관계식을 아래와 같이 도출하고자 하였다. BC, DUST, OC, SS, SO<sub>4</sub>를 모두 포함시켰을 경우, Table 8에서 보는바와 같이, 겨울철 BC만이 CCN과 유의미한 결과를 보였다.

$$\log_{10}[CCN] = a_1 \cdot \log_{10}[AOD_{BC}] + a_2 \cdot \log_{10}[AOD_{DUST}] + a_3 \cdot \log_{10}[AOD_{OC}] + a_4 \cdot \log_{10}[AOD_{SS}] + a_5 \cdot \log_{10}[AOD_{SO_4^{2-}}] + c \quad (4)$$

Table 8. Seasonal variation of regression coefficients from composition resolved AOD from MERRA-2 and CCN concentration

Coefficients	Spring	Summer	Autumn	Winter	All
Constant	1.153	3.293	1.949	1.636	2.955
a1 (BC)	-0.726	0.810	-	-0.428*	-0.247
a2 (DUST)	0.191	0.275	0.360	0.530	0.678
a3 (OC)	-	-0.466	-	-0.671	-
a4 (SS)	-0.220	-0.259	-0.179	-0.257	-0.164
a5 (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	0.657	0.257	-	1.134	0.309
r	0.409	0.548	0.233	0.679	0.594

CCN과 sulfate(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)와 BC의 AOD간의 상관성을 다중 선형회귀(multilinear regression)식을 이용하여 구할 수 있다. 아래 표는 CCN과 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>와 BC기반 AOD의 상관관계를 분석한 결과이다. Table 9에서 볼 수 있듯이, 전체적으로 보았을 때, 상관계수는 sulfate의 경우 0.363, BC의 경우, 0.866의 계수가 통계적으로 유의미하게 도출되었다. 계절별로 보았을 때, sulfate의 경우 봄, 여름, 겨울에 BC의 경우 여름, 가을에 유의미한 상관성을 보이는 것을 알 수 있다.

$$\log_{10}[CCN] = a_1 \cdot \log_{10}[AOD_{SO_4^{2-}}] + a_2 \cdot \log_{10}[AOD_{BC}] + c \quad (5)$$

Table 9. Seasonal variation of regression coefficients from AOD<sub>SO4</sub> and AOD<sub>BC</sub> from MERRA-2 and CCN concentration

Coefficients	Spring	Summer	Autumn	Winter	All
Constant	2.668**	2.995**	2.827**	2.293**	4.572**
a1 (AOD <sub>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></sub> )	0.346**	0.276**	0.075	0.785**	0.363**
a2 (AOD <sub>BC</sub> )	0.039	0.273**	0.468*	-0.220	0.866**
r	0.226	0.227	0.113	0.331	0.373
N	378	419	396	342	1,535

CCN과 광학측정으로부터 구하여진 산란 및 흡수 계수간의 상관관계를 다음의 관계식과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, b<sub>sca</sub>와 b<sub>abs</sub>는 지상의 nephelometer와 aethalometer를 통해 측정한 Zeppelin측정소에서의 산란 및 흡수 계수를 의미한다. CCN과 이들 산란 및 흡수 계수와의 관계는 다음과 같다.

$$\log_{10}[CCN] = a_1 \cdot \log_{10}[b_{sca}] + a_2 \cdot \log_{10}[b_{abs}] + c \quad (6)$$

Table 10은 CCN과 산란 및 흡수계수간의 관계를 보여주고 있다. 종속변수는 CCN의 농도, 산란 및 흡수 계수를 독립변수로 설정하였다. Fig. 34는 이와 같이 유추한 관계식에 의하여 도출한 CCN예측식을 측정결과와 비교하였다. Fig. 34에서 보는 바와 같이 기준 Menon(2002)의 관계식에 비하여 본 연구 결과에서 도출된 예측식이 CCN을 더 잘 예측하는 것을 알 수 있다.

Table 10. Seasonal variation of regression coefficients from ground measured  $b_{sca}$  and  $b_{abs}$  and CCN concentration in Zeppelin

Coefficients	Spring	Summer	Autumn	Winter	All
Constant	2.109	2.164	1.709	1.706	1.899
a1 ( $b_{sca}$ 550 nm)	0.242	0.414	0.301	0.559	0.357
a2 ( $b_{abs}$ 525 nm)	0.330	0.246	0.203	0.414	0.236
r	0.640	0.702	0.623	0.954	0.692
N	119	101	133	141	494

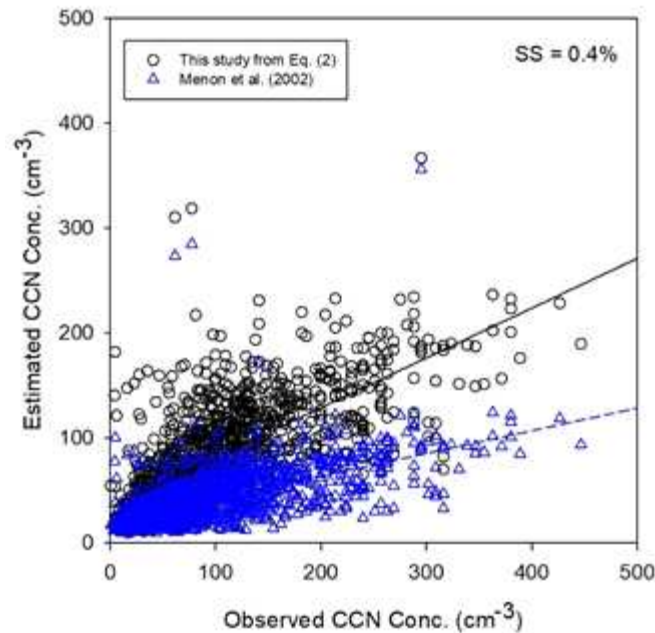


Fig. 34. Comparison of the estimated and observed CCN

## 5. 북극 에어로졸의 광학적 특성 모사 알고리즘 개발

### 5.1. 북극 에어로졸의 조성기반 광학적 특성 및 복사강제효과 민감도 분석 알고리즘 개발

에어로졸의 물리화학적 특성과 광학적 특성의 인과관계를 파악하는 것은 많은 불확실성과 가정을 포함하고 있다. 따라서 원격자료를 통한 에어로졸 특성의 유추는 매우 중요하면서도 어려운 문제이다. 본 연구에서는 지금까지 도출한 연구 방법론을 기반으로, 원격자료를 통한 에어로졸 특성의 파악과 더불어, 측정 자료에 기반한 에어로졸 광학적 특성에 대한 연구를 위한 에어로졸 광학적 특성 모사 알고리즘을 개발하고자 하였다. 광학적 모수화 연구 절차와 개략도는 Fig. 35와 같다.

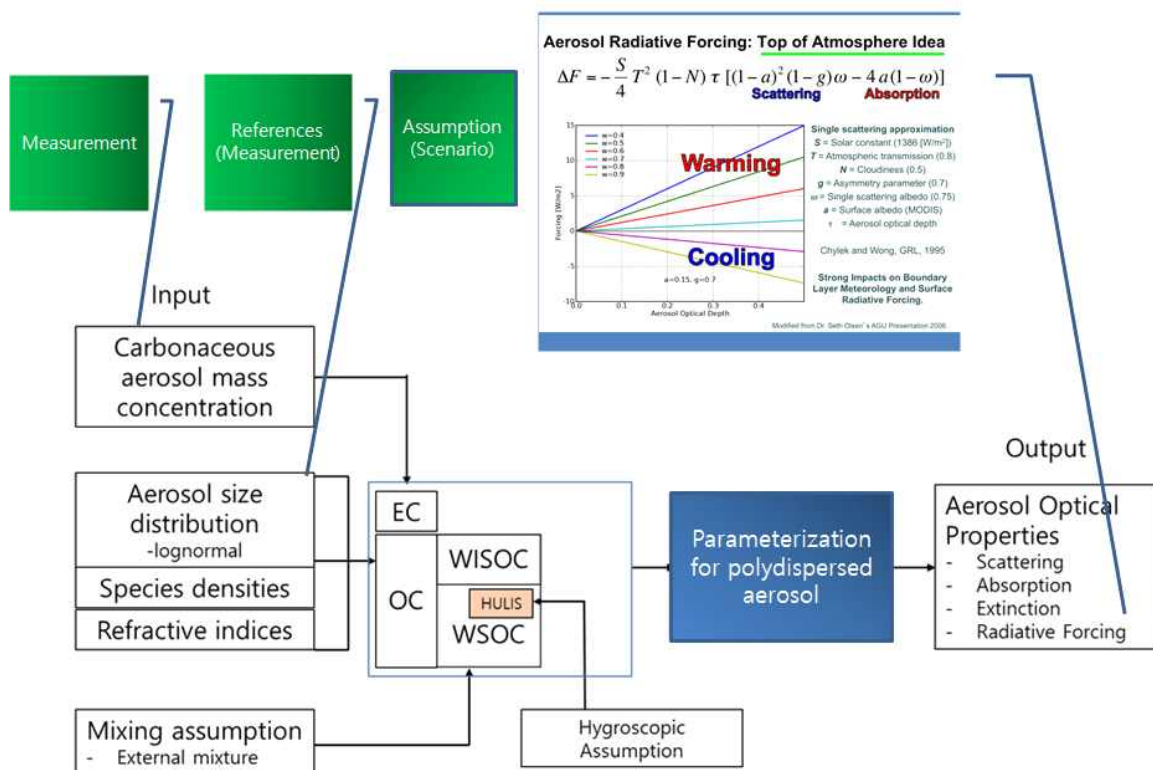


Fig. 35. Schematic diagram for parameterization of aerosol optical properties from aerosol physico-chemical parameters



본 연구에서 적용한 산출 알고리즘은 조성별 에어로졸의 extinction coefficient를 Mie theory에 의하여 계산된 값에 근거하여 에어로졸입자의 지수형태로 모수화하고, 이를 선형회귀 regression을 통하여 간단한 형태의 해석적 해를 유도하는 과정으로 도출하는 것이다 (Fig. 36). 개선된 알고리즘은 지상 측정자료와 원격 측정자료의 비교 및 다분산 에어로졸의 크기분포에 따른 mass scattering efficiency, mass absorption efficiency(MAE), mass extinction efficiency(MEE) 등의 값을 산출하는데 활용될 수 있다.

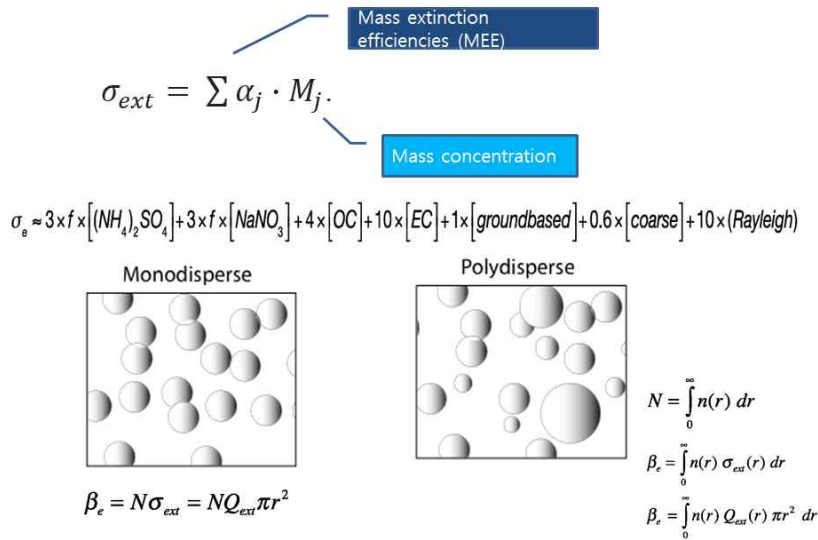


Fig. 36. MEE(mass efficiencies) for polydispersed aerosol

에어로졸 전구간 영역에서 다분산 에어로졸의 MEE는 조화평균을 이용하여 다음의 모수화된 식으로 표현이 가능하다.

$$MEE = \left( (a \times d_{gv}^b)^{-2} + (c \times d_{gv}^d)^{-2} \right)^{-1/2} = \left\{ \left( (\vartheta_1 \sigma_g + \varepsilon_1) \times d_{gv}^{(\vartheta_2 \sigma_g + \varepsilon_2)} \right)^{-2} + \left( (\vartheta_3 \sigma_g + \varepsilon_3) \times d_{gv}^{(\vartheta_4 \sigma_g + \varepsilon_4)} \right)^{-2} \right\}^{-1/2} \quad (7)$$

모수화 방법은 입자의 크기구간별로 선형적인 MEE, MAE 등의 값을 크기분포의 함수에 대하여 구하고 이를 조화평균(harmonic mean approximation)을 이용하여 해석적인 표현식으로 바꾸는 것이다. Fig. 37은 모수화를 위한 구체적인 절차를 보여주고 있으며, Fig. 38은 세부적인 과정 및 도출된 모수화 사례를 보여주고 있다. 최종적으로 도출된 해석적인 결과는 Fig. 39와 같다. Fig. 39에서 볼 수 있듯이, 간략화된 조화평균을 이용한 모수화된 식이 Mie이론에 의하여 수치적으로 도출한 MEE 값을 입자의 크기분포에 대하여 잘 예측하는 것을 알 수 있다. 본 연구로부터 두 가지 결론을 유추할 수 있다. 1) MEE는 크기분포에 민감한 변화를 보인다. 따라서, 다분산 에어로졸의 입자 크기분포를 광학적 특성을 구할 때는 고려하여야 한다. 2) 기존의 수치적 방법에 비교하여 본 연구의 간략화된 방법을 통하여 해석적인 방법으로 다분산을 고려한 광학적 특성값을 도출할 수 있다.

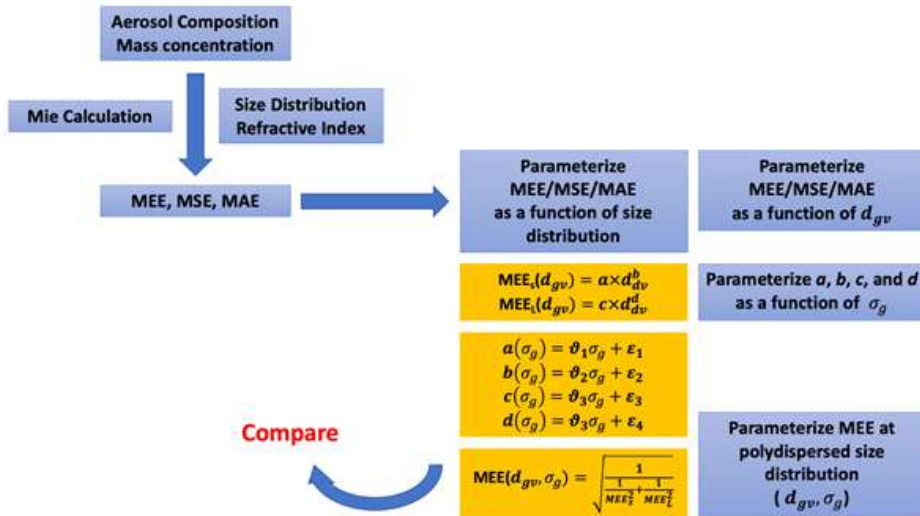


Fig. 37. Parametrization of MEE(mass efficiencies) for polydispersed aerosol

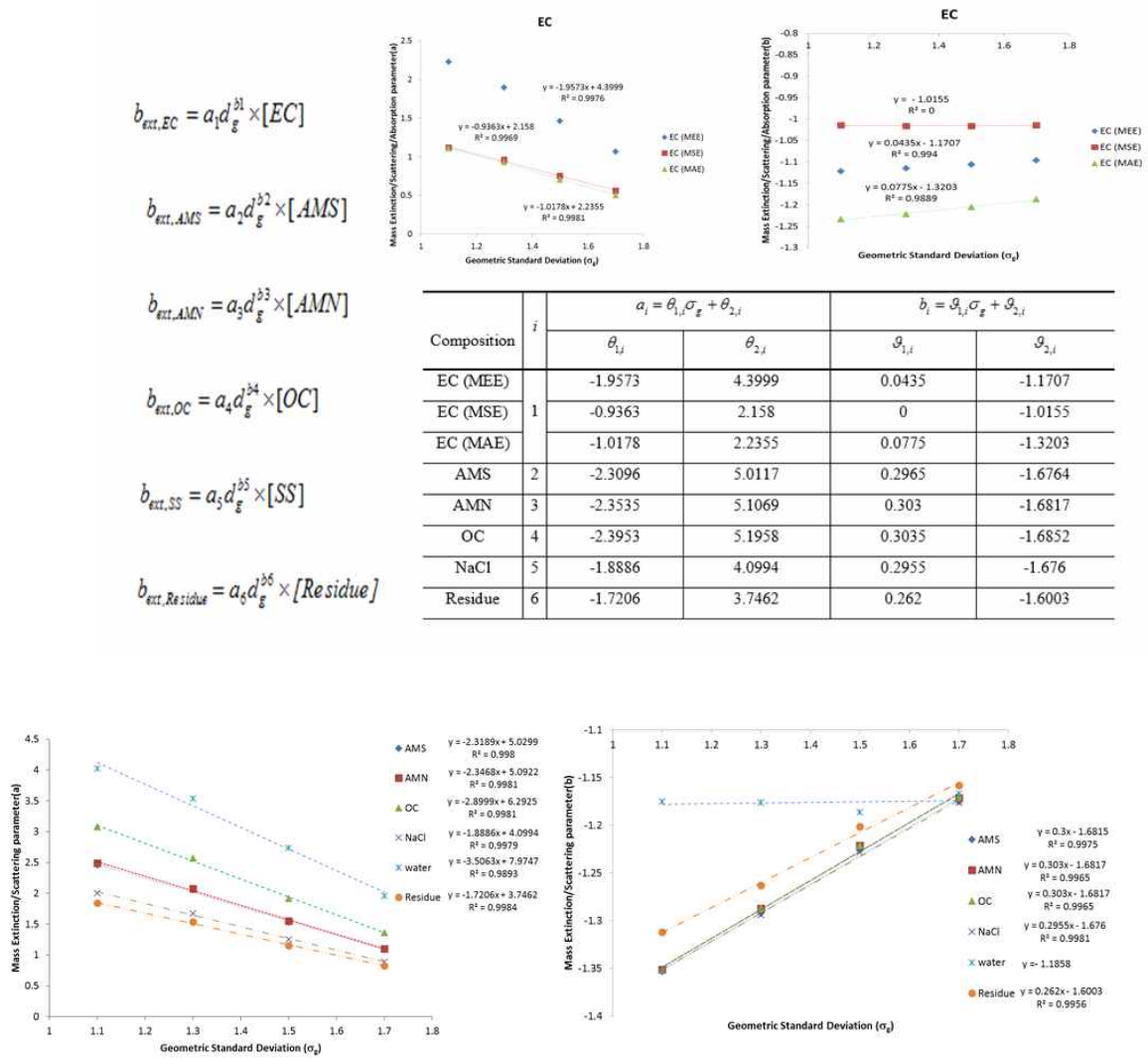


Fig. 38. Resultant formulae for MEE(mass scattering efficiencies) parameterization

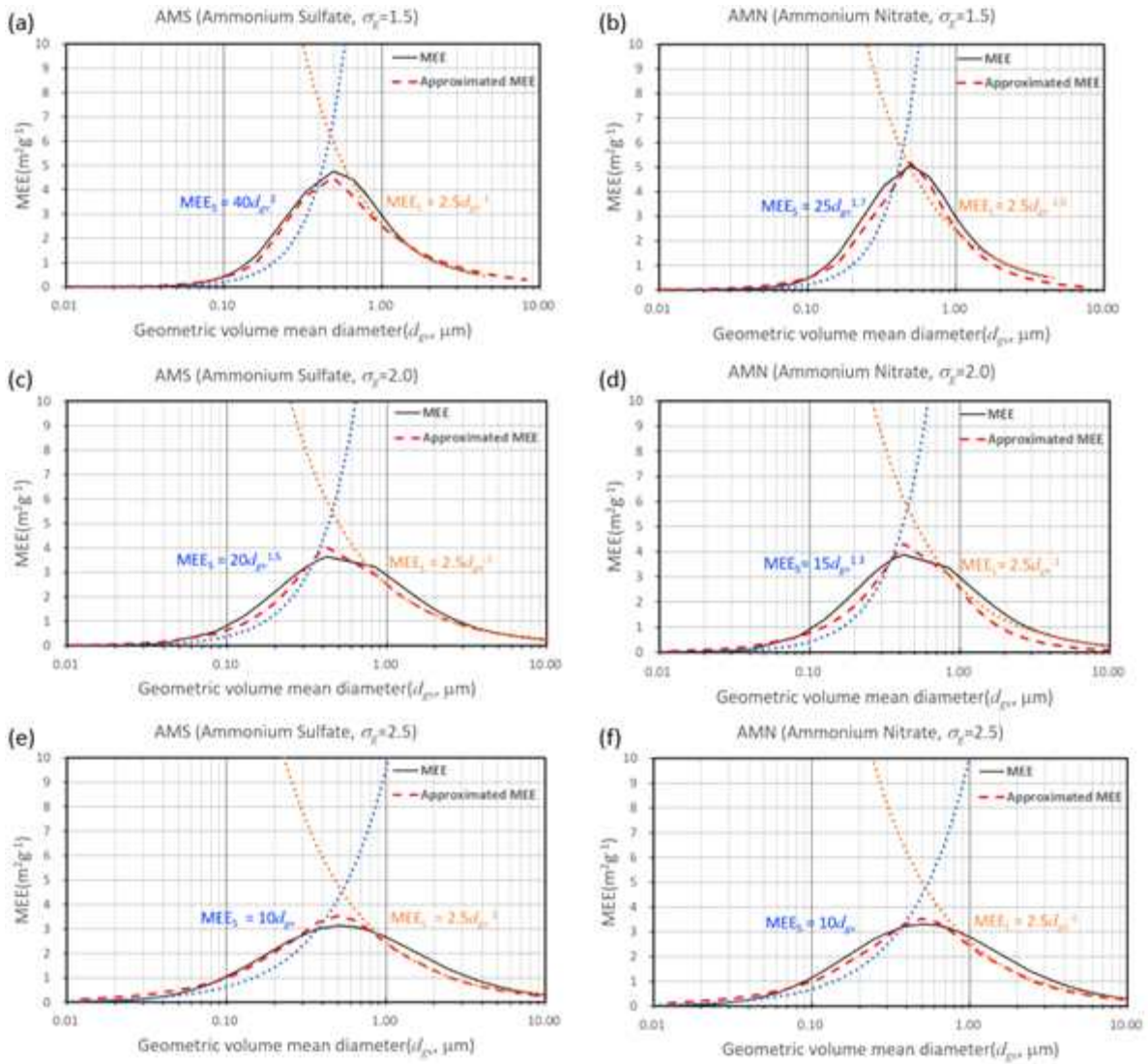


Fig. 39. Comparison of the analytic and numerical calculated size resolved MEE (Ammonium Sulfate, Ammonium Nitrate)

5.2. 오염물질의 기여율 결과를 통하여 요소별 발생원별 광학적 기여율 도출 알고리즘 개발

본 연구에서는 오염물질의 기여율 결과를 통하여 요소별 발생원별 광학적 기여율 도출 알고리즘 개발하고자 하였다. 도출된 알고리즘에 기반하여 탄소에어로졸의 발생원별 광학적 MEE(Mass Extinction Efficiency) 도출완료 및 발생원별 MEE값과 물질별 MEE값 비교 발생원별 광학적 특성 분석하였다. 또한, CCN과 발생원별 농도간 상관관계 분석 및, CCN과 발생원별 기여율별 광학적 AOD간 CCN-AOD 관계식 설정 및 도출하였다. 도출알고리즘의 기본적 개요도는 Fig. 40과 같다.

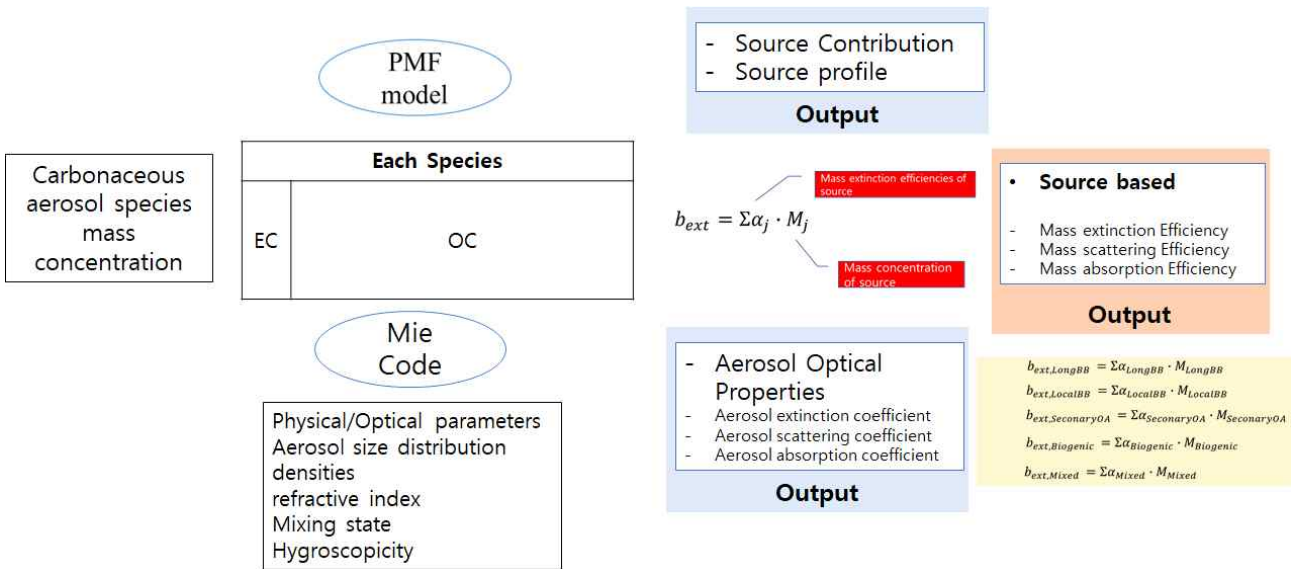


Fig. 40. Schematic diagram for obtaining polydispersed aerosol optical properties from source based receptor model results

CCN과 aerosol 질량, mass extinction efficiency는 에어로졸의 조성에 따라 다음의 관계식에 의거하여 특성에 따른 값을 갖게 된다. 여기서,  $i$ 는 화학성분,  $j$ 는 에어로졸의 Source를 의미한다.

$$CCN = \sum_i \alpha_i \cdot AOD_i = \sum_i \alpha_i \cdot MEE_i \cdot Mass_{Column_i}$$

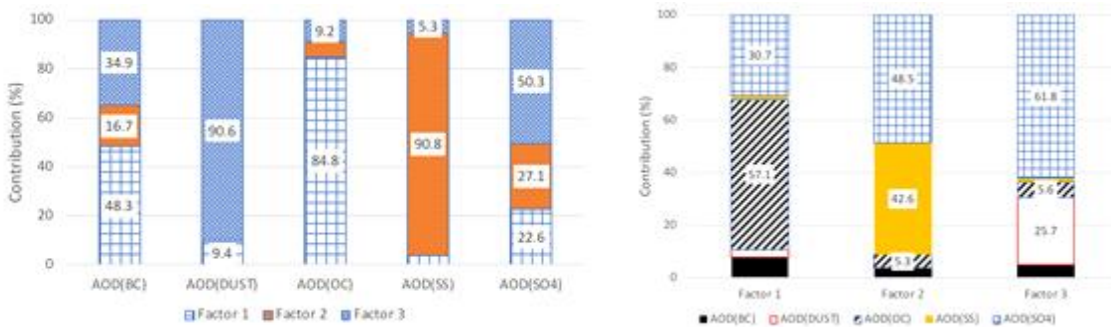
$$CCN = \sum_j \alpha_j \cdot AOD_j = \sum_j \alpha_j \cdot MEE_j \cdot Mass_{Column_j}$$

$$AOD_{tot} = \sum_i AOD_i = \sum_i MEE_i \cdot Mass_{Column_i}$$

$$AOD_{tot} = \sum_j AOD_j = \sum_j MEE_j \cdot Mass_{Column_j} \quad (8)$$

에어로졸의 일별, 월별농도에 기반한 source별 광학 특성기여율은 다음과 같다. Fig. 41에서 볼 수 있듯이, 일별 기여율과 월별 기여율은 절대값에 의한 차이는 있지만 큰 변동은 없다. Factor 1의 경우 OC> SO4> BC, Factor 2의 경우 SO4>SS, Factor 3의 경우 SO4>DUST가 주요 성분으로 구성되어 있는 것으로 분석되었다.

(a) Daily



(b) Monthly

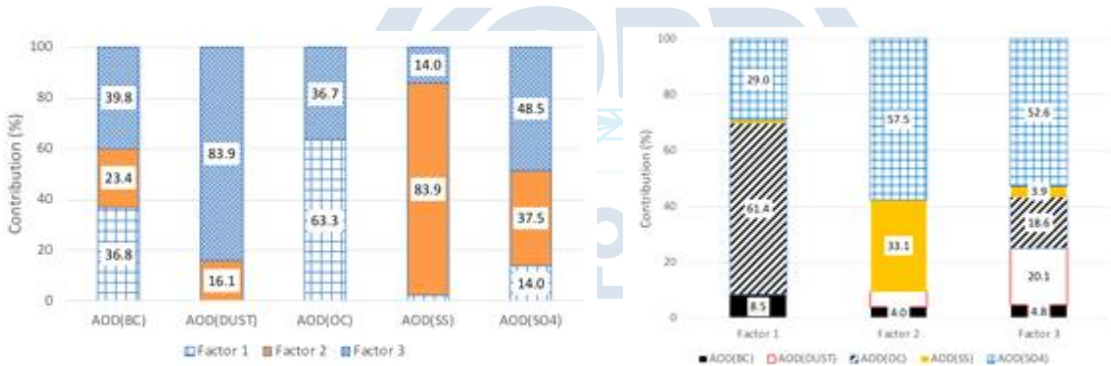


Fig. 41. Source contribution of aerosol optical properties ((a) Daily averaged, (b) Monthly averaged, based on MERRA-2 reanalysis data)

Fig. 42와 Fig. 43은 앞서 설명한 방식과 마찬가지로 source에 근거한 일별(Fig. 42) 및 월별 농도(Fig. 43)와 요소 기반(Composition- and factor-based) CCN과 AOD 농도의 변화를 시계열적으로 보여 주고 있다. Fig. 42와 Fig. 43에서 볼 수 있듯이, 고농도 CCN 및 AOD가 관찰된 사례에서도 각 요소별 기여율은 측정 시기에 따라 차이가 있는 것을 알 수 있다. 따라서, 광학적 특성의 조성 및 기여율이 CCN등의 농도에 미치는 영향을 분석할 경우 이러한 조성 및 기원의 특성을 충분히 고려하여야 한다.

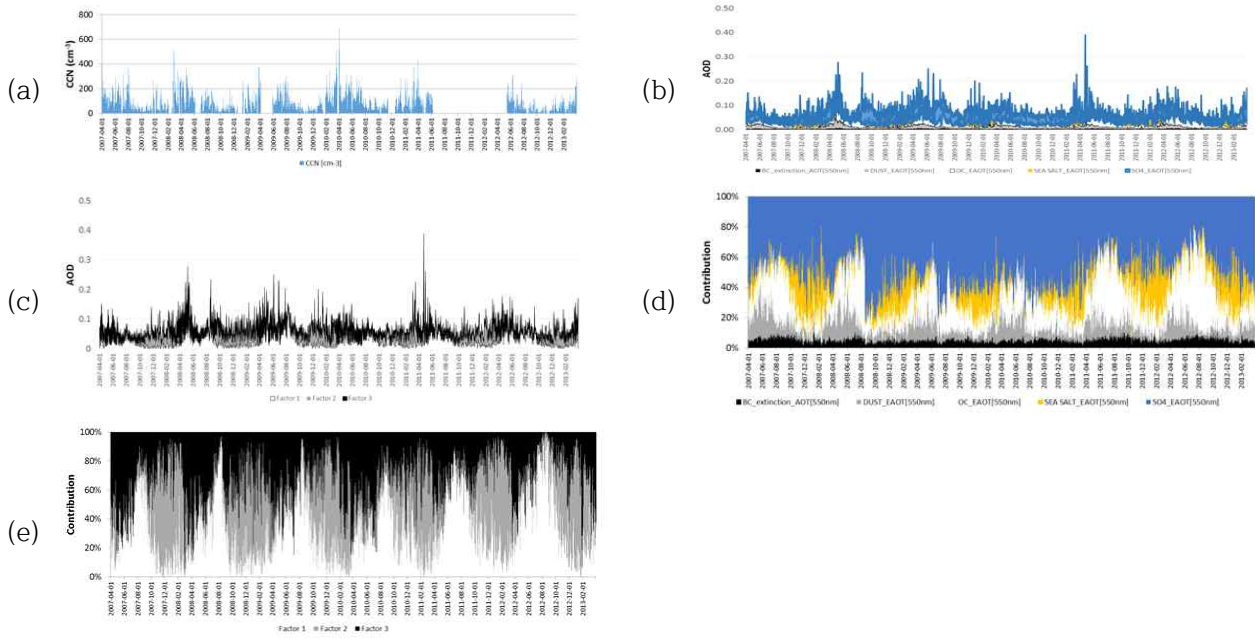


Fig. 42. Factor based CCN and AOD concentration from daily MERRA-2 composition reanalysis data

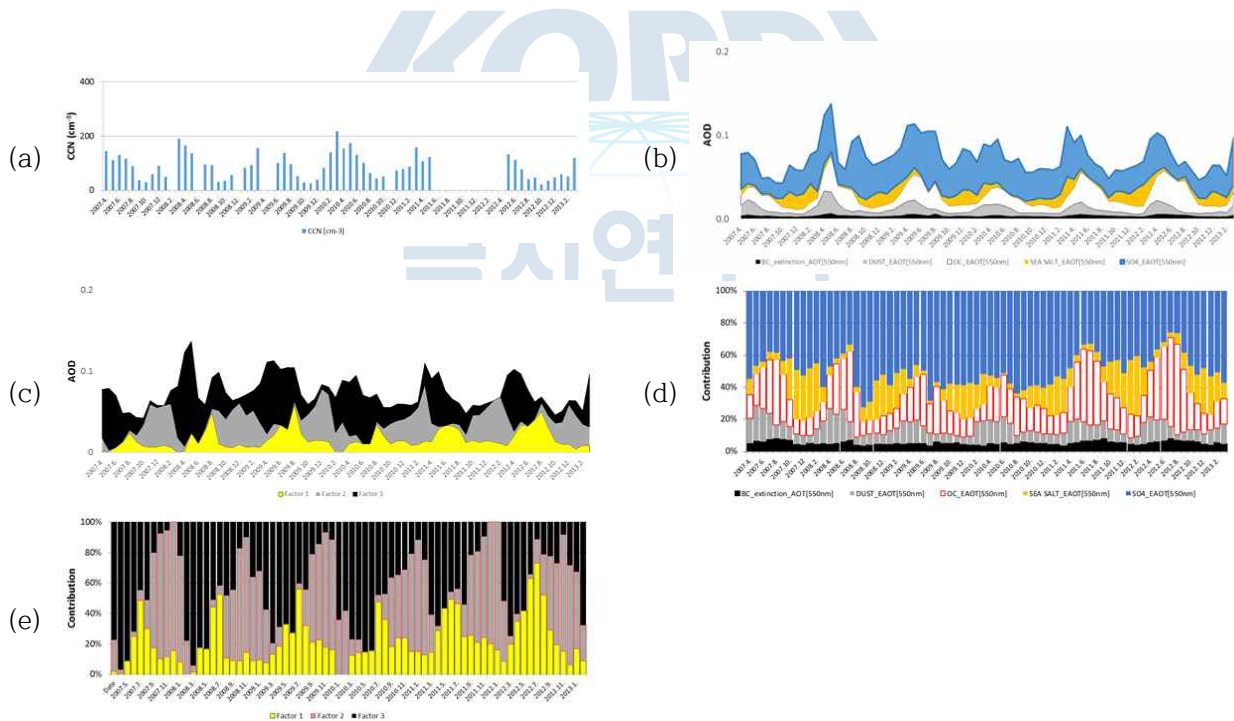


Fig. 43. Factor based CCN and AOD concentration from monthly MERRA-2 composition reanalysis data

본 연구에서 확보된 물리, 화학, 광학적 특성은 상호적으로 밀접한 관련을 가지고 있다. 일반적으로 광학적 측정을 통하여 구하여진 산란계수등을 통하여, 복사 강제력등 기후변화 요인을 도출할 수 있으나, 본 연구에서는 조성 기반으로부터, 광학적 특성을 유추하고 이를 통해 복사 강제력등을 산출하여 보고자 하였다. 2012년부터 2014년 월별 및 일별 조성자료에 기반한 광학적 특성자료로부터 도출된 북극 Ny-Alesund지역의 복사 강제력 산출결과는 Fig. 44와 같다.

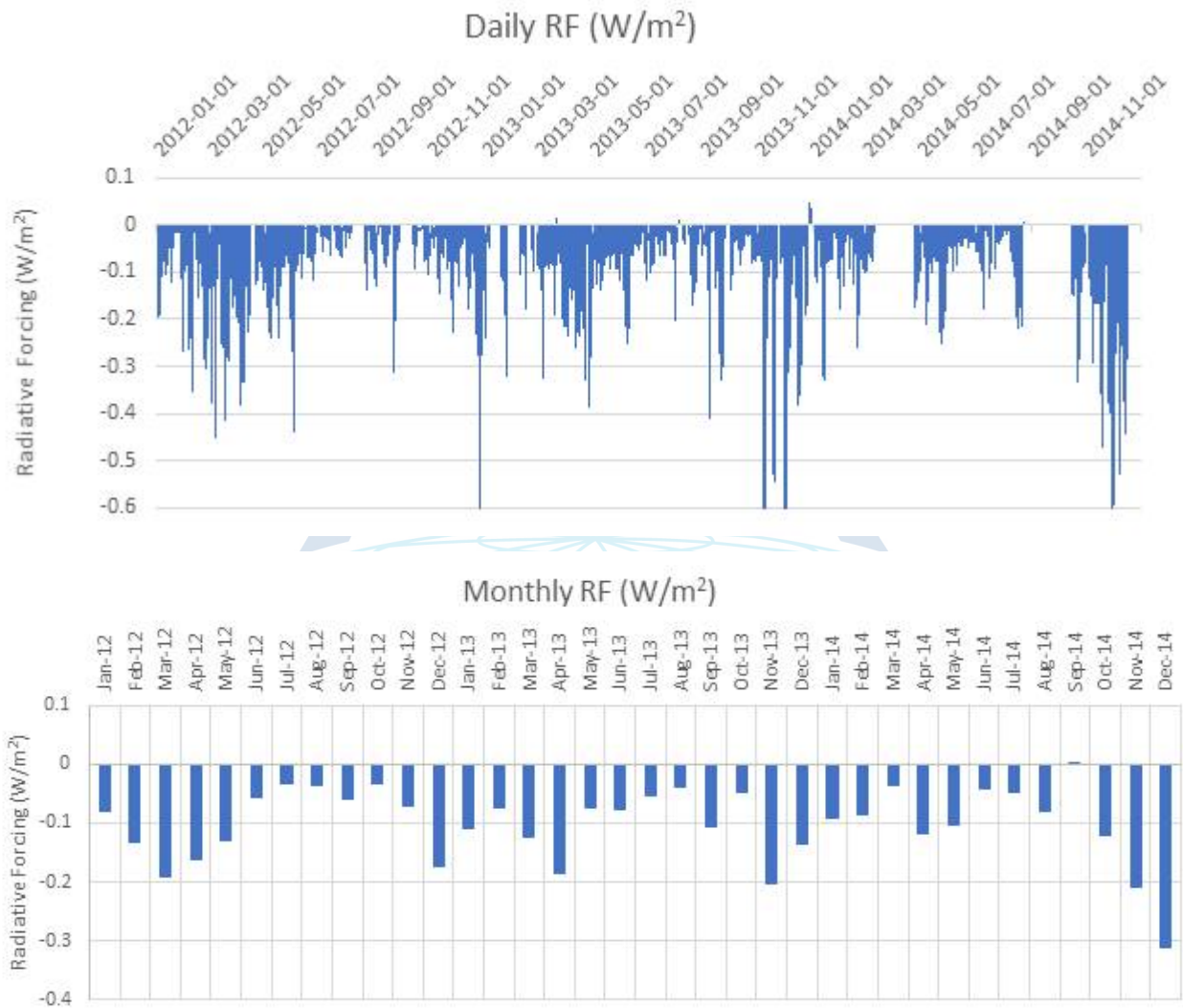


Fig. 44. Change of aerosol daily and monthly radiative forcing (2012-2014)

### 5.3. 북극항차 샘플링 분석을 통한 탄소에어로졸의 광학적 특성 및 복사 강제영향 평가

Fig. 45는 조성별 MEE의 크기분포 및 imaginary refractive index에 따른 민감도를 보여 주고 있다. Fig. 46은 아라온 북극 항차 샘플을 이용한 탄소 에어로졸의 extinction coefficient ( $b_{ext}$ )의 조성별 기여도 및 기하학적 평균 직경( $d_g$ )에 따른 변화를 보여주고 있다. Fig. 47은 마찬가지로 아라온 북극 항차 샘플을 이용하여, 탄소 에어로졸의 extinction coefficient과 absorption coefficient( $b_{abs}$ )이 크기 및 HULIS imaginary refractive index에 따른 변화를 보여 준다. 이들 결과에서 볼 수 있듯이, 탄소에어로졸의 광학적 특성이 같은 질량농도라고 하더라도, 입자의 크기 및 HULIS의 imaginary refractive index에 따라 큰 변화를 보이는 것을 확인 할 수 있다.

일반적으로 복사 강제력을 포함한 입자의 광학적 특성은 조성별 농도를 고려할 경우, 입자의 크기분포 등 물리적 특성을 관과하는 경향이 있었다. 그러나, 본 연구에서 제시한 바와 같이 입자의 광학적 특성은 크기 분포와 밀접한 관련을 가지고 있다. 따라서, 조성별 광학적 특성 및 복사강제력 산출시에도 입자의 크기분포에 대한 고려가 필요하다. 조성별 MEE는 입자의 크기분포와 refractive index에 따라 변화를 보인다. 특히, Imaginary refractive index에 대한 민감도 역시 크기분포에 따라 차이를 보이게 된다. 따라서, MEE(Mass Extinction Efficiency)의 크기분포 민감도를 파악해 볼 필요가 있다.





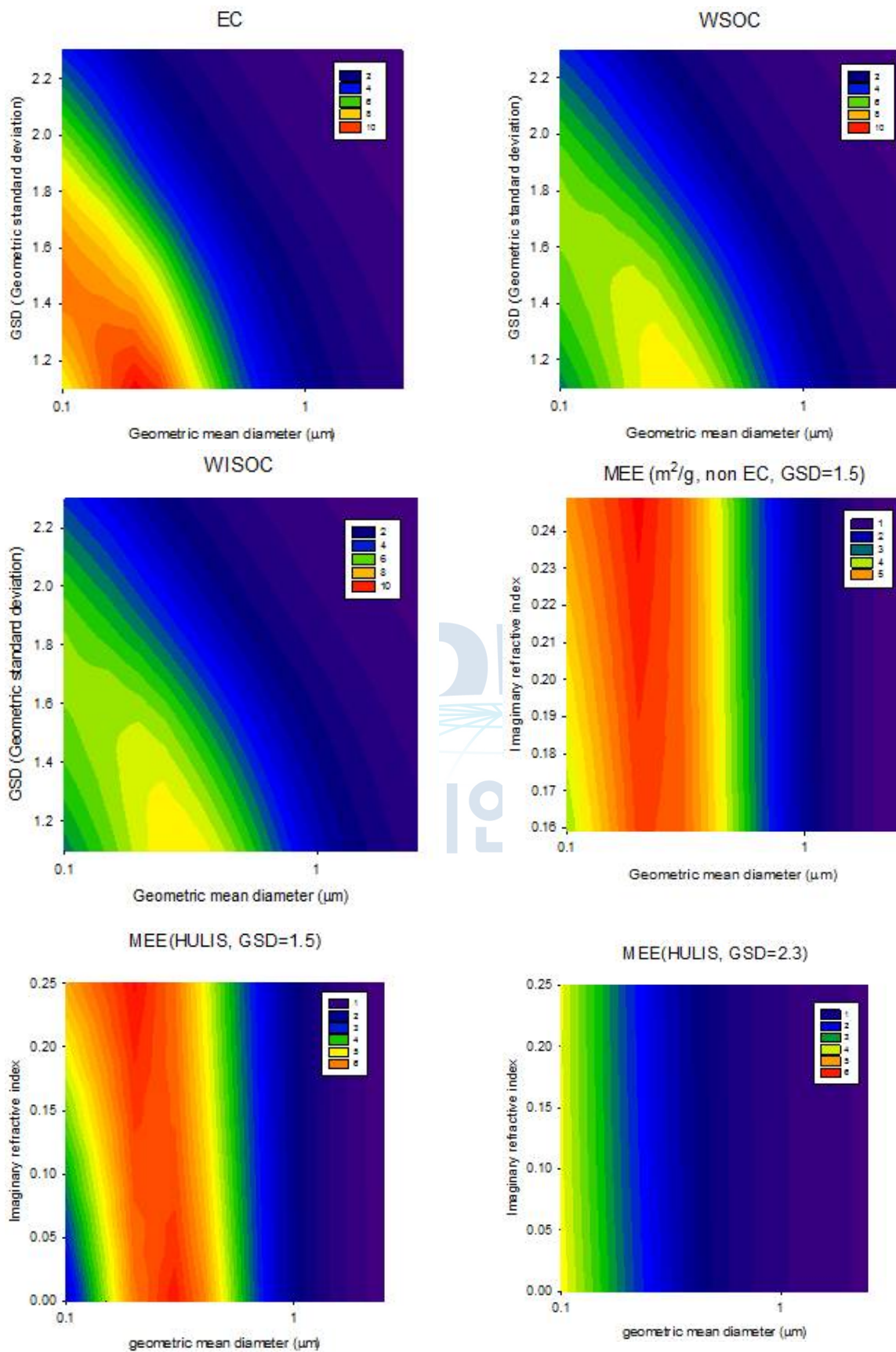


Fig. 45. Sensitivity of composition based MEE with different geometric mean diameter and geometric standard deviation

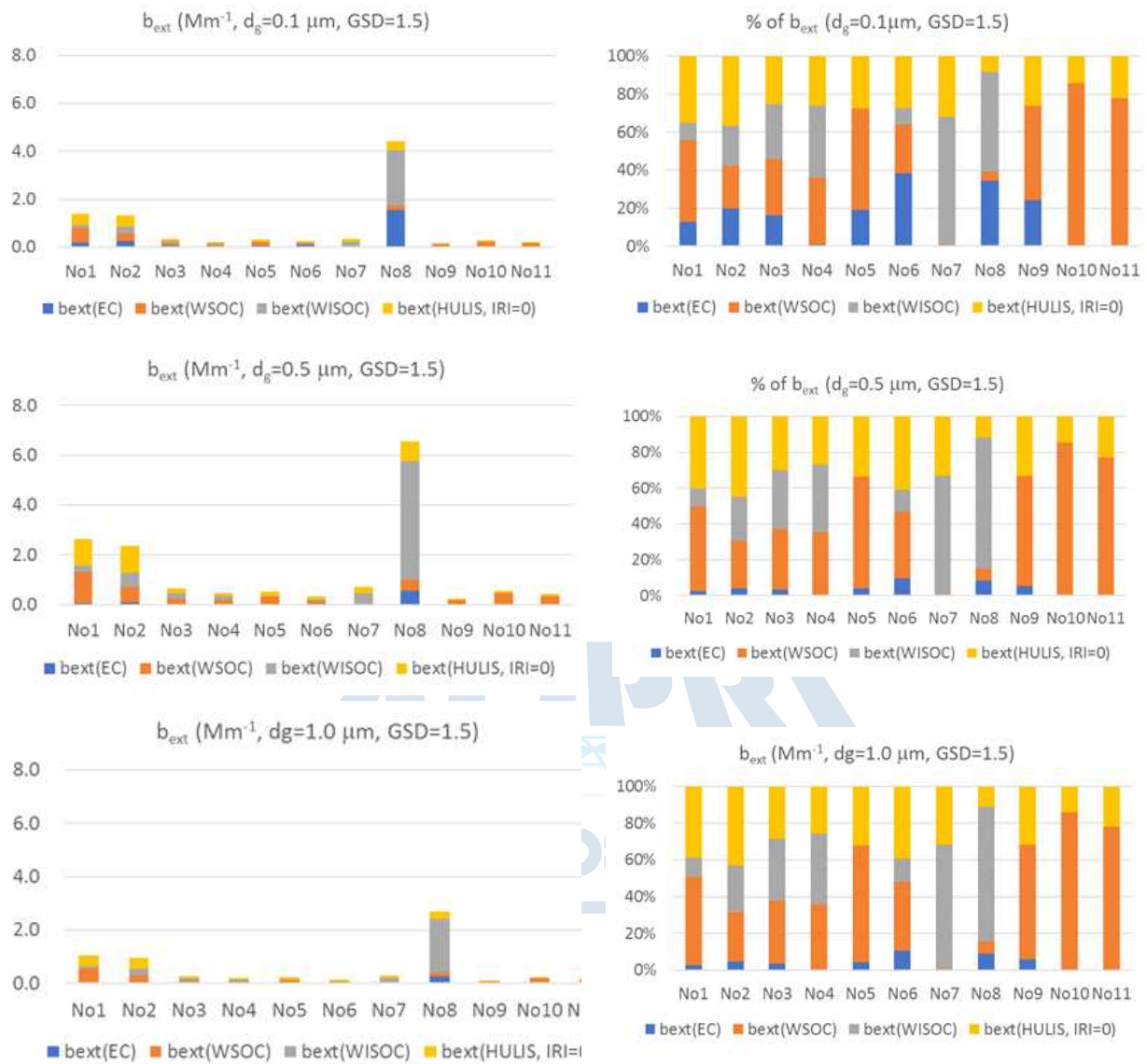


Fig. 46. Change of extinction coefficient ( $b_{\text{ext}}$ ) of carbonaceous aerosol according to different geometric mean diameter

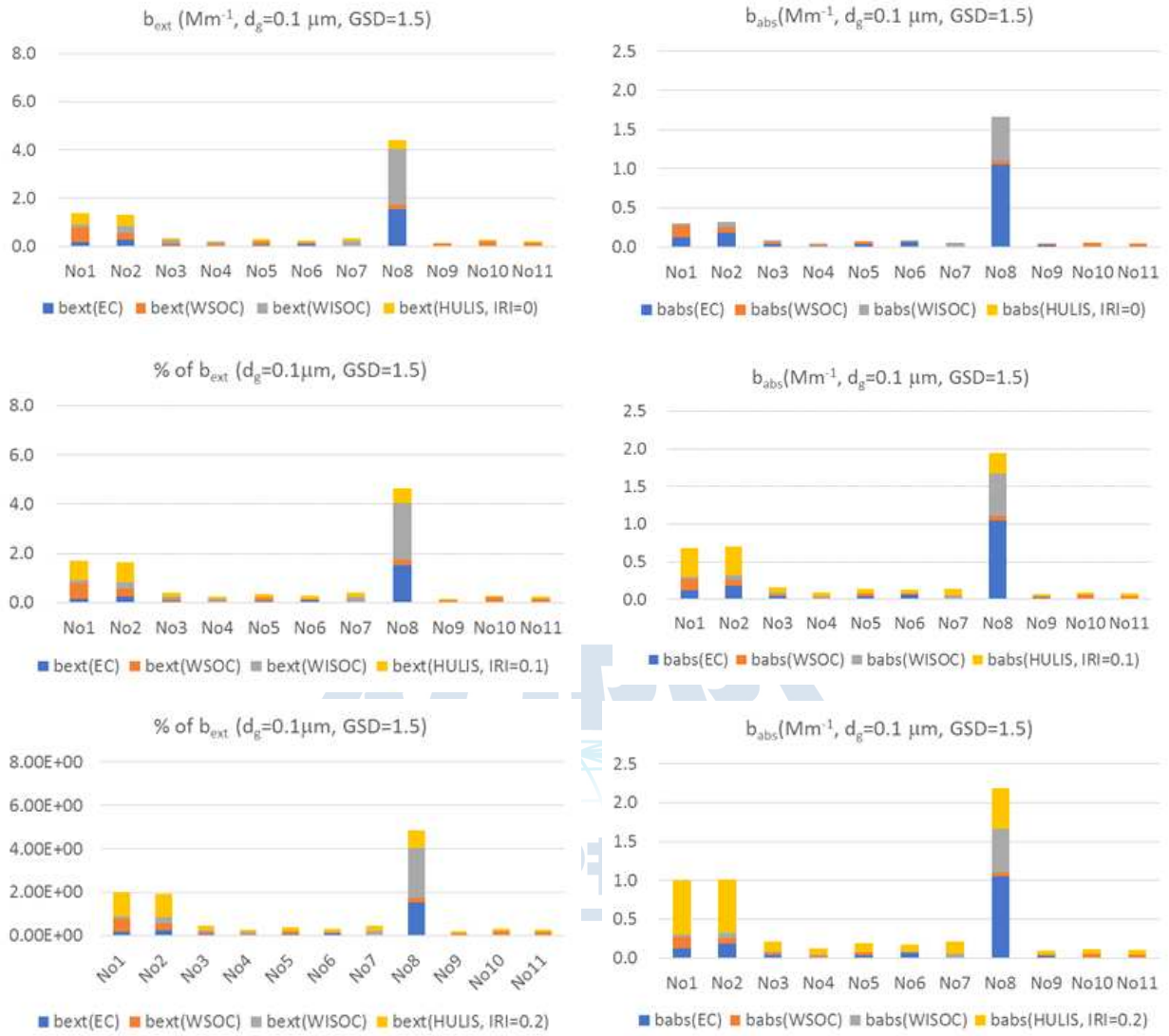


Fig. 47. Change of extinction coefficient ( $b_{ext}$ ) and absorption coefficient ( $b_{abs}$ ) of carbonaceous aerosol according to different imaginary refractive index of HULIS

Fig. 48는 조성별 크기분포에 따른 복사 강제력의 변화를 나타낸 것이다. 광학적 특성은 Imaginary refractive index에 따라 변화한다. Fig. 48에서 볼 수 있듯이, HULIS에어로졸의 imaginary refractive index가 증가할수록 extinction coefficient (bext)는 증가하는 경향을 보인다. 이러한 조성별 크기분포에 따른 복사강제력의 변화는 입자의 크기에 따른 에어로졸의 extinction coefficient(bext) 변화로부터 기인한다. 예를 들어, EC는 크기가 작을수록 증가하며, HULIS는 0.5um에서 가장 큰 값을 보임을 알 수 있다.

Fig. 48에서 볼 수 있듯이, HULIS의 imaginary refractive index 및 크기에 따른 복사강제력 (RF, radiative forcing)를 살펴보면, HULIS의 imaginary refractive index에 따라 RF은 음에서 양의 값의 범위를 보일수 있다. 이를 선행 결과와 비교하여 보면 평균 북극 anthropogenic OC의 복사 강제력이  $-0.03 \pm 0.003 \text{ W/m}^2$  정도를 보였다 (Myhre et al., 2013; Breider et al., 2017). 이는 본 연구에서 도출된 복사 강제력이 선행연구와 비슷한 수준을 보이는 것을 알 수 있다. HULIS 탄소 에어로졸의 복사강제력에 미치는 영향은 여러 요인의 영향을 받는다. 본 연구의 민감도 분석 결과에 의하면, Hygroscopicity 가 증가할수록 복사강제력은 감소하고, Imaginary refractive index가 증가할수록 복사강제력은 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 크기분포는 accumulation mode에서 최대값을 보이거나 크기분포에 따른 변화를 보임을 확인할 수 있었다. 반면, EC 탄소 에어로졸이 RF에 미치는 영향은 크기가 증가할수록 복사강제력이 감소하는 것을 뚜렷이 알 수 있었다. 그 외 탄소 에어로졸의 경우, Mixture type에 따른 흡습성 (hygroscopicity)의 영향을 고려할 필요가 있는데 이와 관련한 연구는 본 연구에서 진행되지 못하였다. 향후 이러한 흡습성에 관련한 기후변화 영향에 대한 북극지역의 특성에 대한 연구가 진행될 필요가 있다.

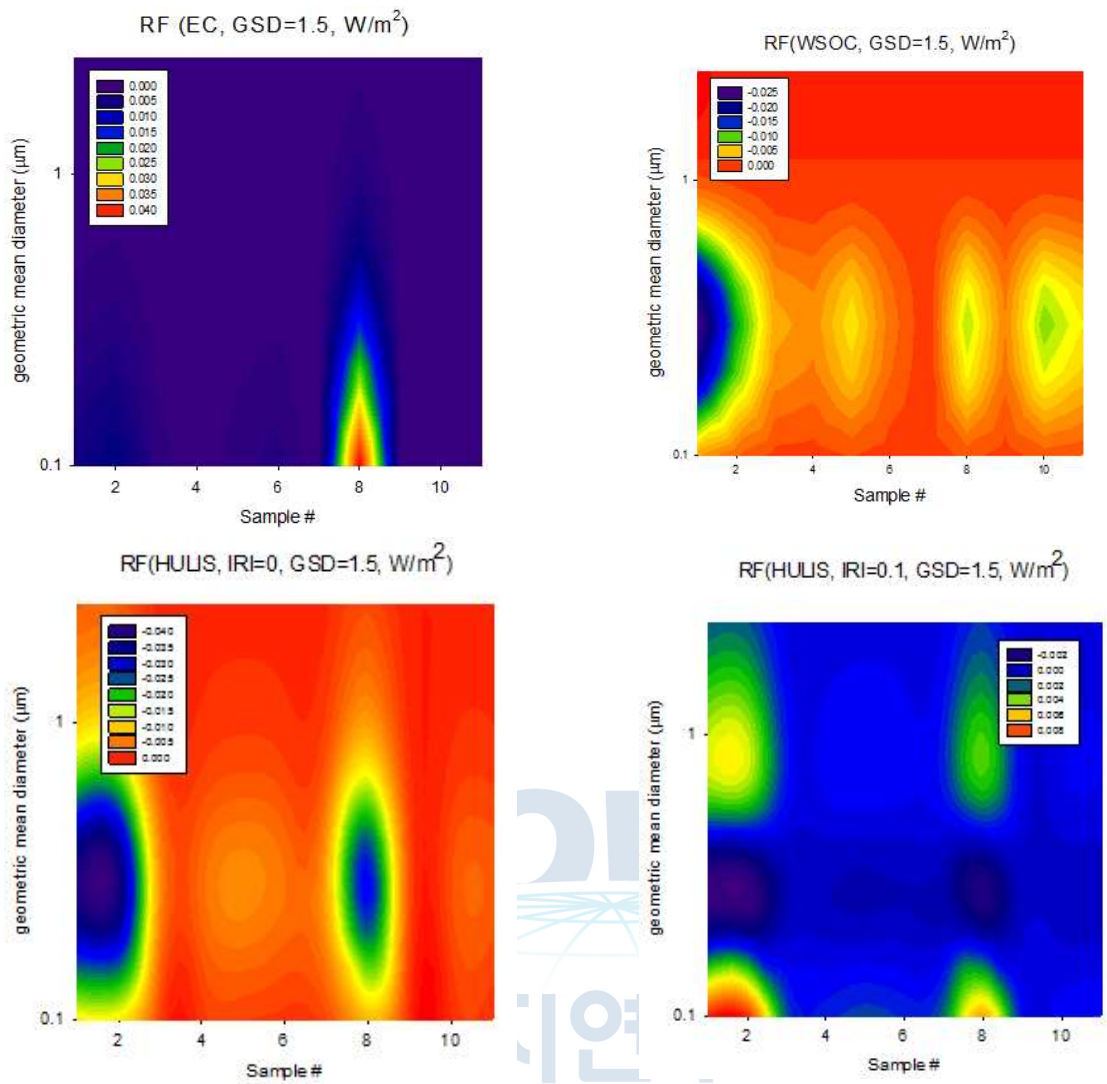


Fig. 48. Sensitivity of aerosol radiative forcing with different size and imaginary refractive index of HULIS

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

(단위 : 건, 천원)

성과지표명	연도		1단계	n단계	계	가중치 (%)
			(YYYY~YYYY)	(YYYY~YYYY)		
전담기관 등록·기탁 지표 <sup>1)</sup>		목표(단계별)				
		실적(누적)				
		목표(단계별)				
		실적(누적)				
연구개발과제 특성 반영 지표 <sup>2)</sup>		목표(단계별)				
		실적(누적)				
		목표(단계별)				
		실적(누적)				
계						

평가 항목 (주요성능 <sup>1)</sup> )	단위	전체 항목에서 차지하는 비중 <sup>2)</sup> (%)	세계 최고		연구개발 전 국내 성능수준	연구개발 목표치		목표설정 근거
			보유국/보유기관	성능수준	성능수준	1단계 (YYYY~YYYY)	n단계 (YYYY~YYYY)	
1								
2								



(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE /비SCIE)	게재 일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	Analytic expression for the aerosol mass efficiencies for polydispersed accumulation mode	<i>Aerosol and Air Quality Research</i>	Jung, C. H. (제1, 교신)	18 (6)	Taiwan	Taiwan Association for Aerosol Research	SCIE	2018	1680-8584	33%
2	The seasonal characteristics of cloud condensation nuclei (CCN) in the Arctic lower troposphere	Tellus B	Jung, C. H. (제1), Yoon, Y.J. (교신)	70 (1)	Sweden	Taylor & Francis	SCIE	2018	1600-0889	100%
3	Estimation of source-based aerosol optical properties for polydisperse aerosols from receptor models	Applied Sciences	Jung, C. H. (제1, 교신)	9(7)	Swiss	MPDI	SCIE	2019	2076-3417	50%
4	Mass Extinction Efficiency Approximation for Polydispersed Aerosol using Harmonic Mean-Type Approximation	Applied Sciences	Um, J. (제1), Jung, C. H. (교신)	10 (23)	Swiss	MPDI	SCIE	2020	2076-3417	15%
5	Approximation of Most-Penetrating-Particle Size for Fibrous Filters Considering Cunningham Slip Correction Factor	Environmental Engineering Research	Jung, C. H. (제1, 교신)	25 (3)	Korea	KSEE	SCIE	2020	1226-1025	50%
6	Approximated expression of the hygroscopic growth factor for polydispersed aerosols	Journal of Aerosol Science	Jung, C. H. (제1, 교신)	151	Netherlands	Elsevier	SCIE	2021	0021-8502 	25%

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	AGU fall meeting	Jung, C. H.	2017.12.12	New Orleans	미국
2	AGU fall meeting	Jung, C. H.	2018.12.10	Washington, D.C.	미국
3	POLAR2018	Jung, C. H.	2018.06.19	Davos	스위스
4	AGU fall meeting	Jung, C. H.	2019.12.10	San Francisco	미국





## 2) 목표 달성 수준

추진 목표	달성 내용	달성도(%)
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 물리화학적 연속 관측 및 원격측정 자료를 활용한 환북극 대기 에어로졸의 광학적 특성 및 기후변화 영향 분석</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 북극 다산기지 지역 대기에어로졸의 지상 에어로졸 자료 확보 및 분석</li> <li>○ 북극지역 원격 에어로졸 AOD(광학두께) 측정 자료 확보 및 환북극 지역 대기에어로졸 원격 측정자료 분석</li> <li>○ 환북극지역 에어로졸의 물리화학 및 광학적 특성 분석</li> <li>○ 다분산 탄소 에어로졸의 광학적 특성 모사 알고리즘 개발</li> <li>○ 환북극 지역 에어로졸의 물리적 특성과 복사강제, 광학적 특성 등 기후변화 특성 파악</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 100</li> </ul>



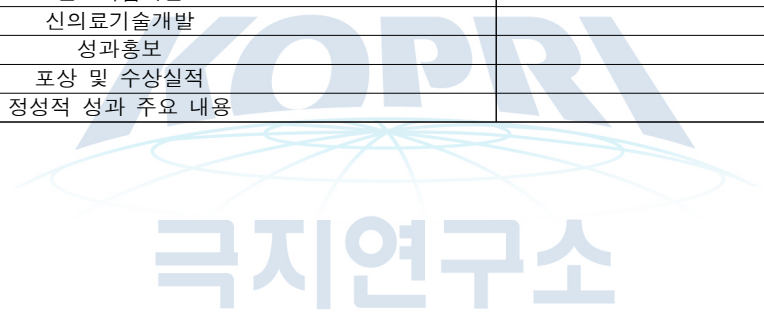
#### 4. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

- 물리 및 광학적 분석을 통한 환북극 지역 에어로졸의 광학적 특성을 모사
- 환북극권 동토지역 대기 에어로졸의 물리화학적 측정자료 및 모델 등을 통하여 물리, 화학적 인자에 따른 북극 에어로졸의 광학적 특성 및 기여도 파악

#### 5. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

- 에어로졸의 복사 강제 및 광학적 특성 파악을 위한 주요 방법론은 주로 측정이나 원격탐사를 통하여 진행되어 왔으나 본 연구는 물리적 측정 자료 뿐 아니라 화학적 조성자료에 기반한 물리적 과정을 포함한 직접적(direct) 형태의 광학적 특성 모사를 통하여 복사강제 특성을 보다 근본적으로 파악하는데 기여할 수 있을 것으로 기대됨
- 또한 복사 및 기후변화 모델의 정확도 향상 등 기존 에어로졸을 포함한 기후변화 예측모델의 광학적 특성 모사 알고리즘의 개선에 활용될 수 있을 것으로 예상됨.
- 본 연구와 같은 기초 이론적 연구를 통하여 향후 보다 실용화된 연구의 기초적 이론적 토대를 제공할 수 있으리라 기대됨.
- 또한 향후 인공위성 등 원격측정자료로부터 에어로졸의 영향을 해석하는데 보다 정량적인 이론적 기초를 제공할 수 있을 것으로 기대됨.
- 기타 북극 대기환경 측정 자료 활용 및 연구를 통하여 북극권 내 관측거점의 효율적 운영과 활용성을 제고할 수 있고, 지속적 환경변화 감시를 통하여 북극권 글로벌 이슈 해결 역량 강화 및 북극권 환경변화에 따른 우리나라 기후변화의 미래 예측정확도 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대됨.

구분(정량 및 정성적 성과 항목)		연구개발 종료 후 5년 이내
국외논문	SCIE	6편
	비SCIE	
	계	6편
국내논문	SCIE	
	비SCIE	
	계	
특허출원	국내	
	국외	
	계	
특허등록	국내	
	국외	
	계	
인력양성	학사	
	석사	
	박사	
	계	
사업화	상품출시	
	기술이전	
	공정개발	
제품개발	시제품개발	
비임상시험 실시		
임상시험 실시 (IND 승인)	의약품	1상
		2상
		3상
	의료기기	
진료지침개발		
신의료기술개발		
성과홍보		
포상 및 수상실적		
정성적 성과 주요 내용		



## [별첨자료]

### 참고 문헌

- Andreae, M. O. 2009. Correlation between cloud condensation nuclei concentration and aerosol optical thickness in remote and polluted regions. *Atmos. Chem. Phys.* 9(2), 543-556; DOI 10.5194/acp-9-543-2009.
- Barrie, L. A. 1967. Arctic air pollution: an overview of current knowledge. *Atmospheric Environment.*, 20(4), 643-663; DOI 10.1016/0004-6981(86)90180-0.
- Bond, T. C., Anderson, T. L., & Campbell, D. 1999. Calibration and intercomparison of filter-based measurements of visible light absorption by aerosols. *Aerosol Science & Technology*, 30(6), 582-600.
- Browse, J., Carslaw, K. S., Arnold, S. R., Pringle, K. and Boucher, O. 2012. The scavenging processes controlling the seasonal cycle in Arctic sulphate and black carbon aerosol. *Atmos. Chem. Phys.* 12(15), 6775-6798; DOI 10.5194/acp-12-6775-2012.
- Chin, M., Ginoux, P., Kinne, S., Holben, B. N., Duncan, B. N., Martin, R. V., Logan, J. A., Higurashi, A., & Nakajima, T. 2002. Tropospheric aerosol optical thickness from the GOCART model and comparisons with satellite and sunphotometer measurements, *Journal of Atmospheric Science* 59, 461-483.
- Deng, Z. Z., Zhao, C. S., Ma, N., Ran, L., Zhou, G. Q. and co-authors. 2013. An examination of parameterizations for the CCN number concentration based on in situ measurements of aerosol activation properties in the North China Plain. *Atmos. Chem. Phys.* 13(13), 6227-6237; DOI 10.5194/acp-13-6227-2013.
- Dubovik, O., & King, M. D. 2000. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from sun and sky radiance measurements. *Journal of Geophysical Research*, 105, 20 673-20 696.
- Glantz P., & Tesche, M. 2012. Assessment of two aerosol optical thickness retrieval algorithms applied to MODIS Aqua and Terra data in Europe. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5, 1727-1740.
- Glantz, P., Bourassa, A., Herber, A., Iversen, T., Karlsson, J., Kirkevåg, A., Maturilli, M., Seland, Ø., Stebel, K., Struthers, H., Tesche, M., Thomason, L. (2014). Remote sensing of aerosols in the Arctic for an evaluation of global climate model simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(13), 8169-8188.
- Hegg, D. A., Radke, L. F. and Hobbs, P. V. 1991. Measurements of Aitken nuclei and cloud condensation nuclei in the marine atmosphere and their relation to the DMS-Cloud-Climate Hypothesis. *J. Geophys. Res.* 96(D10), 18727-18733; DOI 10.1029/92jd00448.
- Hegg, D. A., Ferek, R. J., and Hobbs, P. V. 1995. Cloud condensation nuclei over the Arctic Ocean in Early Spring. *J. Appl. Meteor.* 34(9), 2076-2082.
- Heintzenberg, J. and Leck, C. 2012. The summer aerosol in the central Arctic 1991-2008: did it change or not?, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 3969-3983; DOI 10.5194/acp-12-3969-2012.
- Herenz, P., Wex, H., Henning, S., Kristensen, T. B., Rubach, F., Roth, A., Borrmann, S., Bozem, H., Schulz, H., and Stratmann, F. 2017. Measurements of aerosol and CCN properties in the Mackenzie River delta (Canadian Arctic) during Spring-Summer transition in May 2014, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/acp-2017-745>.

- Holben, B., Nakajima, T., Lavenue, I., Jankowiak, I., Smirnov, A., Eck, T., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J., & Kaufman, Y. 1998. AERONET-A Federated Instrument Network and Data Archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of Environment*, 66, 10.1016/S0034-4257(98)00031-5.
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jacob, D. J., Crawford, J. H., Maring, H., Clarke, A. D., Dibb, J. E., Emmons, L. K., Ferrare, R. A., Hostetler, C. A., Russell, P. B., Singh, H. B., Thompson, A. M., Shaw, G. E., McCauley, E., Pederson, J. R., & Fisher, J. A. 2010. The Arctic Research of the Composition of the Troposphere from Aircraft and Satellites (ARCTAS) mission: design, execution, and first results.
- Jefferson, A. 2010. Empirical estimates of CCN from aerosol optical properties at four remote sites, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 6855-6861, <https://doi.org/10.5194/acp-10-6855-2010>.
- Jung, C. H., Yoon, Y. J., Kang, H. J., Gim, Y., Lee, B. Y., Ström, J., Krejci, R., & Tunved, P. (2018) The seasonal characteristics of cloud condensation nuclei (CCN) in the arctic lower troposphere, *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 70, 1, doi:10.1080/16000889.2018.1513291.
- Martin, M., Chang, R. Y.-W., Sierau, B., Sjogren, S., Swietlicki, E. and co-authors. 2011. Cloud condensation nuclei closure study on summer Arctic aerosol. *Atmos. Chem. Phys.* 11(22), 11335-11350; DOI 10.5194/acp-11-11335-2011
- Maskey, S., Chong, K. Y., Seo, A., Park, M., Lee, K., & Park, K. 2017. Cloud condensation nuclei activation of internally mixed black carbon particles. *Aerosol and Air Quality Research*, 17(4), 867-877.
- McCoy, D. T., Bender, F. A.-M., Mohrmann, J. K. C., Hartmann, D. L., Wood, R., & Grosvenor, D. P. 2017. The global aerosol-cloud first indirect effect estimated using MODIS, MERRA, and AeroCom, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122, doi:10.1002/2016JD026141.
- Mei, L., Xue, Y., Xu, H., Guang, J., Li, Y., Wang, Y., Ai, J., Jiang, S., He, X. 2012. Validation and analysis of aerosol optical thickness retrieval over land. *International Journal of Remote Sensing*, 33, 781-803, 10.1080/01431161.2011.577831.
- Menon, S., Saxena, V.K., Durkee, P., Wenny, B.N., & Nielsen, K. 2002. Role of sulfate aerosols in modifying the cloud albedo: A closure experiment. *Atmospheric Research*, 61, 169-187, doi:10.1016/S0169-8095(01)00140-5.
- Moore, R. H., Bahreini, R., Brock, C. A., Froyd, K. D., Cozic, J., Holloway, J. S., Middlebrook, A. M., Murphy, D. M., and Nenes, A. 2011. Hygroscopicity and composition of Alaskan Arctic CCN during April 2008, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 11807-11825, doi:10.5194/acp-11-11807-2011.
- Mitchell, J. M. J. 1957. Visual range in the polar regions with particular reference to the Alaskan Arctic. *Journal of Atmospheric Terrestrial Physics. Spec. Suppl.* 185-211.
- Nakajima, T., Higurashi, A., Kawamoto, K., & Penner, J. E. (2001). A possible correlation between satellite-derived cloud and aerosol microphysical parameters, *Geophysical Research Letters*, 28, 1171-1174.

- O'Dowd, C. D., Lowe, J. A., Clegg, N., Smith, M. H. and Clegg, S. L. 2000. Modelling heterogeneous sulphate production in maritime stratiform clouds. *J. Geophys. Res.* 105(D6), 7143-7160; DOI 10.1029/1999jd900915.
- Quinn, P. K., Miller, T. L., Bates, T. S., Ogren, J. A., Andrews, E. and co-authors. 2002. A three-year record of simultaneously measured aerosol chemical and optical properties at Barrow, Alaska. *J. Geophys. Res.* 107(D11), AAC 8-1-AAC 8-15; DOI 10.1029/2001jd001248.
- Quinn, P. K., Shaw, G., Andrews, E., Dutton, E. G., Ruoho-Airola, T. and co-authors. 2007. Arctic haze: current trends and knowledge gaps. *Tellus. B.* 59(1), 99-114; DOI 10.1111/j.1600-0889.2006.00238.x.
- Ramanathan, V., Crutzen, P. J., Kiehl, J. T., Rosenfeld, D. 2001. Aerosols, climate, and the hydrological cycle. *Science.* 294(5549), 2119-2124; DOI 10.1126/science.1064034.
- Romakkaniemi, S., Arola, H., Kokkola, W., Birmili, T., Tuch, V.-M., Kerminen, P., Räisänen, J. N., Smith, H., Korhonen, and A. Laaksonen 2012. Effect of aerosol size distribution changes on AOD, CCN and cloud droplet concentration: Case studies from Erfurt and Melpitz, Germany, *J. Geophys. Res.*, 117, D07202, doi:10.1029/2011JD017091.
- Russell, P. B., Bergstrom, R. W., Shinzuka, Y., Clarke, A. D., DeCarlo, P. F., Jimenez, J. L., Livingston, J. M., Redemann, J., Dubovik, O., and Strawa, A.: Absorption Angstrom Exponent in AERONET and related data as an indicator of aerosol composition, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 1155-1169, <https://doi.org/10.5194/acp-10-1155-2010>, 2010.
- Shindell, D. and Faluvegi, G. 2009. Climate response to regional radiative forcing during the twentieth century. *Nature Geosci.* 2009, 2(4), 294-300; DOI 10.1038/ngeo473.
- Shinzuka, Y., Clarke, A. D., DeCarlo, P. F., Jimenez, J. L., Dunlea, E. J., Roberts, G. C., Tomlinson, J. M., Collins, D. R., Howell, S. G., Kapustin, V. N., McNaughton, C. S., and Zhou, J. 2009. Aerosol optical properties relevant to regional remote sensing of CCN activity and links to their organic mass fraction: airborne observations over Central Mexico and the US West Coast during MILAGRO/INTEX-B, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 6727-6742, doi:10.5194/acp-9-6727-2009.
- Stohl A. 2006. Characteristics of atmospheric transport into the Arctic troposphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111: D11306.
- Stone, R. S., Dutton, E. G., Harris, J. M., & Longenecker, D. 2002. Earlier spring snowmelt in northern Alaska as an indicator of climate change. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D10), ACL-10.
- Ström, J., Engvall, A. C., Delbart, F., Krejci, R. and Treffeisen, R. 2009. On small particles in the Arctic summer boundary layer: observations at two different heights near Ny-Alesund, Svalbard. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology.* 61(2), 473-482; DOI 10.1111/j.1600-0889.2008.00412.x.
- Ström, J., Umegard, J., Torseth, K., Tunved, P., Hansson, H. C. and co-authors. 2003. One year of particle size distribution and aerosol chemical composition measurements at the Zeppelin Station, Svalbard, March 2000-March 2001. *Physics and Chemistry of the Earth.* 28(28-32), 1181-1190; DOI 10.1016/j.pce.2003.08.058.
- Tomasi, C., Lupi, A., Mazzola, M., Stone, R. S., Dutton, E. G., Herber, A., Radionov, V. F., Holben, B. N., Sorokin, M. G., Sakerin, S. M., Terpugova, S. A., Sobolewski, P. S., Lanconelli, C., Petkov, B. H., Busetto, M., & Vitale, V. 2012. An update on polar aerosol optical properties using POLAR-AOD and other measurements performed during the

International Polar Year, Atmospheric Environment, 52, 29-47.

- Tunved, P., Ström, J. and Krejci, R. 2013. Arctic aerosol life cycle: linking aerosol size distributions observed between 2000 and 2010 with air mass transport and precipitation at Zeppelin station, Ny-Ålesund, Svalbard. Atmos. Chem. Phys. 13(7), 3643-3660; DOI 10.5194/acp-13-3643-2013.
- Wang, Q., Jacob, D. J., Fisher, J. A., Mao, J., Leibensperger, E. M., Carouge, C. C., Le Sager, P., Kondo, Y., Jimenez, J. L., Cubison, M. J., and Doherty, S. J. 2011. Sources of carbonaceous aerosols and deposited black carbon in the Arctic in winter-spring: implications for radiative forcing, Atmospheric Chemistry and Physics, 11, 12453-12473, doi:10.5194/acp-11-12453-2011.
- Zábory, J., Rastak, N., Yoon, Y. J., Riipinen, I. and Ström, J. 2015. Size-resolved cloud condensation nuclei concentration measurements in the Arctic: two case studies from the summer of 2008. Atmos. Chem. Phys. Discuss. 15(4), 5079-5128; DOI 10.5194/acpd-15-5079-2015.



## 주 의

1. 이 보고서는 과학기술정보통신부에서 시행한 [해양극지 기초원천기술개발개발사업] 북극권 동토관측거점을 활용한 환경변화 감시와 예측과제의 위탁연구(환북극권 대기 에어로졸의 광학적 연구) 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 과학기술정보통신부에서 시행한 해양극지 기초원천기술개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.

