

해양극지기초원천기술개발사업
(Brain Research Program)

대기이동계적 자료를 활용한 환북극 동토-대기-해상의 기후냉각물질
발생지역 추적 연구
(Tracing potential emission source areas of climate-cooling
materials in the circum-arctic region.)



고려대학교

제 출 문

과학기술정보통신부 장관 귀하

이 보고서를 “대기이동계적 자료를 활용한 환북극 동토-대기-해상의 기후냉각물질 발생지역 추적 연구“과제의 (최종: 2016.05~2021.03) 보고서로 제출합니다.

2021년 04월 05일

위탁연구기관명 : 인천대학교('16.05~ '17.12)

위탁연구기관명 : 고려대학교('18.01~ '21.03)

위탁연구책임자 : 김 태 욱

연구 원 : 고영호, 김다영, 김예원,

“ : 모아라, 석민우, 윤성태, 연효정,

“ : 김여훈, 임재운, 박승희

(이상 고려대학교; 퇴직 연구원 포함)



최종보고서				보안등급							
				일반[√], 보안[]							
중앙행정기관명		과학기술정보통신부		사업명		사업명		거대과학연구개발사업			
전문기관명(해당 시 작성)		한국연구재단		사업명		내역사업명		해양극지기초원천기술개발사업			
공고번호				총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)							
				연구개발과제번호		2016M1A5A1901788 2018M1A5A1002411					
기술분류	국가과학기술 표준분류		ND1103	100%							
	부처기술분류 (해당 시 작성)		X01	100%							
연구개발과제명 (세부과제-1)		국문		북극권 동토 관측 거점을 활용한 환경변화 감시와 예측							
		영문		Arctic permafrost environment change monitoring and prediction method developments							
위탁연구개발명		국문		대기이동계적 자료를 활용한 환북극 동토-대기-해상의 기후냉각물질 발생지역 추적 연구							
		영문		Tracing potential emission source areas of climate-cooling materials in the circum-arctic region							
위탁연구개발기관		기관명		고려대학교		사업자등록번호		209-82-08298			
		주소		서울시 성북구 안암로 145		법인등록번호		114471-0002565			
연구책임자		성명		김태욱		직위		부교수			
		연락처		직장전화		02-3290-3003		휴대전화		010-8683-6943	
				전자우편		kimtwk@korea.ac.kr		국가연구자번호		10904722	
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		연구개발 비외 지원금	
		현금		현금 현물		지방자치단체 기타()		현금 현물 합계			
총계		190,000						190,000		190,000	
1단계		1년차		30,000				30,000		30,000	
		2년차		40,000				40,000		40,000	
2단계		1년차		40,000				40,000		40,000	
		2년차		40,000				40,000		40,000	
		3년차		40,000				40,000		40,000	

연구개발담당자 실무담당자	성명		석민우	직위	박사과정연구원
	연락처	직장전화	02-3290-3618	휴대전화	010-4799-5322
		전자우편	minwoo147258@korea.ac.kr	국가연구자번호	11777395

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

2021년 04월 05일

연구책임자: 김태욱 (인)

위탁연구개발기관의 장: 고려대학교 총장 (직인)

과학기술정보통신부 장관 귀하



< 요약 문 >

※ 요약문은 5쪽 이내로 작성합니다.

사업명		해양극저기초원천기술개발사업		총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)		
내역사업명 (해당 시 작성)				연구개발과제번호		2016M1A5A1901788 2018M1A5A1002411
기술 분 류	국가과학기술 표준분류	ND1103	100%			
	부처기술분류 (해당 시 작성)	X01	100%			
연구개발과제명 (위탁과제)		대기이동계적 자료를 활용한 환북극 동토-대기-해상의 기후냉각물질 발생지역 추적 연구				
전체 연구개발기간		2016. 05. 01 - 2021. 03. 31(5년 1개월)				
총 연구개발비		총 190,000천원 (정부지원연구개발비: 190,000천원, 기관부담연구개발비 : 천원, 지방자치단체: 천원, 그 외 지원금: 천원)				
연구개발단계		기초[√] 응용[] 개발[] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]		기술성숙도 (해당 시 기재)		착수시점 기준() 종료시점 목표()
연구개발과제 유형 (해당 시 작성)						
연구개발과제 특성 (해당 시 작성)						
연구개발 목표 및 내용	최종 목표		대기이동계적 자료, 인공위성 자료, 육상 관측 자료를 통합 활용한 기후냉각물질 발생지역(동토-대기-해상) 탐색 및 제시			
	전체 내용		북극 스발바르 주변의 그린란드해와 배런츠해, 아이슬란드 주변해인 노르웨이해와 래브라도해를 비교하여 북극 에어로졸에 영향을 주는 요인을 찾고자 하였다. 자료기반 DMSP계산값, 국제공동연구팀의 관측치, 육상-해빙-해상 인공위성자료, 대기계적모형 결과치를 활용하였고, 해양기원의 DMS가 북극 대기중 미세입자에 영향을 줄 수 있는 핵심요소임을 확인할 수 있었다.			
	1단계 (해당 시 작성)	목표	- 기후냉각물질 발생지역(동토-대기-해상) 탐색을 위한 자료 통합 분석 환경 구축 (2016년도) - 기후냉각물질 발생지역(동토-대기-해상) 탐색을 위한 자료분석 기술의 개선 및 최적화 (2017년도)			
		내용	(2016년도) - 관련 자료의 수집, 생성, 분석기술환경 구축 - 위성 및 대기 자료와 육상관측자료 연동기술 구축 (2017년도) - 북극지역 특이성 고려한 자료분석 기술의 개선 및 최적화 - 기후냉각물질 특성을 고려한 자료분석기술 개선 및 최적화			
2단계 (해당 시 작성)	목표	- 스발바르 인근의 기후냉각물질 발생원 추정 (2018년도) - 아이슬란드 인근의 기후냉각물질 발생원 추정 (2019년도) - 동토-대기-해상 기후냉각물질 발생 및 영향 분석 (2020년도)				
	내용	(2018년도) - 스발바르 현장 관측자료 및 주변환경 자료 획득 및 파악 - 스발바르 인근의 기후냉각물질 예상 발생 진원지역 추정 (2019년도) - 아이슬란드 현장 관측자료 및 주변환경 자료 획득 및 파악 - 아이슬란드 인근의 기후냉각물질 예상 발생 진원지역 추정 (2020년도)				

			- 스발바르와 아이슬란드 사례 비교 및 중첩지역 분석을 통한 기후 냉각물질의 잠재 발생원 지역 추정
--	--	--	---

연구개발성과	<ul style="list-style-type: none"> - 수농도의 일변화 자료를 기반으로 클러스터 분석한 결과, 100nm 이하에서 최대 수농도를 보일 때 입자가 성장하는 양상이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 입경별 수농도 분포자료로 클러스터 분석을 수행한 결과 100nm 이하에서 최대 수농도를 보였던 시기는 그린란드해에서 대기유입이 상대적으로 높았으며, 100nm 이상에서는 유라시아와 배런츠해 지역의 대기 영향이 상대적으로 증가한 시기였다. - 최대 수농도 자료로 수용체 모형을 실행한 결과, 100nm 이하에서 최대 수농도를 보인 그룹에서는 CWT와 PSCF 모두 그린란드해 지역에서 상대적으로 높은 값이 나타났지만, 계절적으로 예외가 존재하였다. - 최대 수농도 자료와 과거 대기 이동 간 노출된 해빙, 엽록소, DMS인자의 평균농도 자료를 비교한 결과, 제플린 남동/동측의 지역에서 해빙농도가 높은 경우, 남서/서측에서는 엽록소와 DMSPt가 높은 경우에 최대 수농도가 높은 영향을 보였다. - 북극 해상의 기후냉각물질의 경우 그린란드해의 기여가 배런츠해의 기여도 보다 큰 것을 확인하였다. - 북극 기후냉각물질 기원지 추적 연구기법의 유효성 검증을 위해 동아시아 지역의 미세 에어로졸 농도에 CWT 기법을 적용한 결과, 월경성 오염물질, 국내발생 등을 효과적으로 분류할 수 있었고, 환경변화에 의한 변동성도 잘 나타났다. - 북극 아이슬란드 인근 해역에 기후냉각물질의 공간간적 변동성을 확인하고 CWT 기법을 적용하여 아이슬란드 상공에 2009-2019년 기간 동안 누적농도와 주변 해역의 영향력을 파악하였다.
--------	---

연구개발성과 활용계획 및 기대 효과	<ul style="list-style-type: none"> - 기후냉각물질이 북극 환경 영향 및 피드백 역할 이해 - 기후변화 연구 인력 양성, 기후변화 예측 능력의 향상 - 국제공동협력을 통한 선진 연구그룹 진입 및 기술격차 해소 - 기후변화 예측능력의 불확실성 감소로 인한 기후변화 대응력의 향상, 관련 비용 절감 및 투자 확대
---------------------	---

연구개발성과의 비공개여부 및 사유	공개
--------------------	----

연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술 요약 정보	소프트웨어	표준	생명자원		화학물	신품종	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물
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)	한북극 동토-대기 해상		기후냉각물질		대기이동궤적		인공위성 기반 측정		북극 모니터링 거점			
영문핵심어 (5개 이내)	circum-arctic regions		climate-cooling		air-mass trajectory		satellite data		arctic monitoring			

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용	1
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	3
4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)	15
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도	15
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	15
별첨자료 (참고 문헌 등)	16



1. 연구개발과제의 개요

□ 미래 기후변화에 대한 불확실성 확대

- 환북극 지역은 급격한 기후변화에 영향을 가장 크게 받는 지역
 - IPCC 보고서에서 에어로졸에 대한 불확실성에 대해 언급하였으며, 이러한 불확실성은 잠재적인 경제, 산업적 피해로 이어질 수 있음(IPCC, 2014)
 - 지구 온도 증가로 북극 해빙 면적의 감소, 동토층의 약화는 육상과 해상의 면적을 증가시켜 대기 물질교환의 확대(IPCC, 2019)
 - 기후냉각물질의 동토-대기-해양 사이에서 생성과 이동, 기후조절기작 등의 불확실성 존재
 - 환북극 지역은 인간 활동으로부터 멀리 떨어져있기 때문에 자연적 에어로졸의 생성과 관련된 연구에 용이

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

2.1 대기 이동궤적 모형

※ NOAA의 ARL(Air Resuorse Lab)에서 제공하는 HYSPLIT 모형을 이용하여, 대기의 이동궤적 자료를 생산 (Stein et al., 2015)

- 대기 이동궤적 모형의 구동에 필요한 기상자료는 GDAS와 NCEP을 사용함. GDAS 자료는 2005년부터 자료가 이용가능하며 NCEP의 경우 1950년대부터 이용가능 하지만 전자에 비해 공간해상도가 떨어지는 단점이 있음. 대기 이동궤적 경로의 총 생성시간은 기준 시간부터 과거/미래 5일까지, 매 시간당 1개의 위치 좌표를 생성하였음. 2005년 이전의 이동궤적이 필요한 경우는 공간 해상도가 떨어지는 후자의 자료를 사용하였고, 2005년 이후의 자료만 분석하는 경우에는 GDAS 자료를 사용하였음.

2.2 육상 관측자료

※ 육상관측지점의 극지연구소와 국제공동연구팀에서 제공한 자료 활용

- 2010년부터 2015년까지 스발바르 대기 MSA 자료
- 2000년부터 2016년까지 제플린 DMPS 자료

2.3 인공위성 자료

※ 기후냉각물질과 관련이 있는 인자들을 분석할 수 있도록 자료 탐색 및 처리. NASA의 엽록소 자료, NIC(National Ice Center)의 해빙면적(sea ice extent) 자료, NSIDC 해빙농도 자료 확보 및 리셉터 모형에 적용

- 활용한 인공위성 자료의 시공간적 해상도는 각각 MODIS 엽록소의 경우 8일, 4km 해상도 자료를, NOAA NSIDC의 해빙농도와 MODIS의 PIC(Particulate Inorganic Carbon, calcite), SST(sea surface temperature) 자료는 1일, 25km 자료를 활용함. 나노입자 형성에 영향을 미치는 DMS의 영향을 간접적으로 파악하기 위해 DMSPt를 추정하였음. 북극해역의 DMSP 예측알고리즘을 인공위성 및 해양자료에 적용하여 연도별 DMSP 분포를 판별하고, 이를 연구에 활용함(Gali et al., 2015).

2.4 K-means Clustering

※ 제플린 DMPS 관측자료에 적용하여 그룹화 진행

- 하루 중 매시간별 10-700nm 총 입자수 변화 자료를 기준으로 K-means Clustering을 통해 입자 수농도의 일변화 패턴을 구분하였음. 그룹 수를 조절하여 최적의 그룹 수를 확인하였음. 10-700nm 구간의 수농도 분포를 기준으로 그룹화를 진행하였음. 마찬가지로 그룹 수를 임의로 조절하여 최적의 그룹 수를 확인함.

2.5 리셉터 모형

※ CWT(Concentration Weighted Trajectory), PSCF(Potential Source Contribution Function)을 활용한 대기 중 성분의 기원 추적

- 육상에서 관측된 대기 자료(e.g. 나노입자)가 측정된 시간과 장소에서 HYSPLIT를 통해 대기역적 자료를 생성하고, 이동 경로상의 좌표에 육상에서 관측된 대기 자료를 할당하여 각 격자에서 할당된 값의 평균을 통해 CWT 결과를 얻을 수 있음. 동일방식으로 진행하되, 각 격자에서 할당된 값의 평균이 아닌 기준 농도보다 높았던 횟수를 계산하는 PSCF 결과를 활용함(Hsu et al., 2003; Kim et al., 2014).

2.6 리셉터 모형(CWT)의 유효성 검증

※ 동아시아 지역 내 CWT(Concentration Weighted Trajectory) 적용연구

- 1, 2차연도 연구에서 CWT를 통한 기후냉각물질(에어로졸 및 그 전구체)의 기원지가 명확하게 드러나지 않아 연구기법의 문제를 검증하기 위해 진행. 동아시아 지역에서의 대기 에어로졸은 황사 및 인간기원으로 잘 알려져 있으며, 특히 한국은 중국에서 넘어오는 월경성 물질에 영향을 받는 것으로 잘 알려져 있음. 중국의 오염물질 배출의 시계열 변동과 우리나라의 오염물질 농도의 시계열 변동이 잘 알려져 있으므로, CWT 기법이 이런 동아시아에서의 현상을 잘 재현해 낸다면, 연구기법의 문제가 없음을 의미하여, 북극에서 명확한 기원지 파악이 어려운 것은 북극의 기후냉각물질 기원과 형성이 복잡하단 반증이 될 것으로 판단함.
- CWT를 적용하고 기원지의 상대적 기여도 파악을 위해, 중국지역에서 발견된 CWT 값과 일본지역의 CWT 값과 비교하였음. 일본에서 바람이 불어오는 시기를 청정한 상태로 가정하여 오염물질의 배경농도 시기로 설정함. 중국에서 바람이 불어오는 시기는 오염물질이 추가된 농도이므로, 이들 간의 차이를 통해 중국발 오염물질의 기여도를 파악할 수 있다고 판단함.
- 동아시아 지역의 연구결과 중 국내오염물질에 의한 미세먼지 발생량이 가구 에너지 사용과 어떤 관계가 있는지 살펴보고, 월경성 오염물질에 의한 미세먼지 발생량이 대기 정체 등의 기상/기후 변화에 어떠한 영향을 받는지 확인하기 위해 풍속과 기온자료를 비교함.

2.7 환경인자의 기여도 파악

※ 해양생산력, 염록소, 해빙과 입자 수 농도 간의 상관관계 분석

- 육상 및 해양 생태계, 해빙이 극지역 또는 환북극지역 나노입자 형성에 기여한다는 연구

보고가 있음(Schmale et al., 2021). 따라서 관측지점에 도달 전, 역궤적 Endpoint 위치에서 수집된 엽록소(또는 DMSPt), 해빙농도의 각각의 합과 관측지점에서의 나노입자의 농도 사이에 상관관계를 검토함. 역궤적의 지점별 해빙, 엽록소, DMSPt 농도를 평균하여, 최대 입자 수 농도 자료와 연관성을 검토함.

2.8 환경인자와 리셉터 모형의 공간분포 비교

※ 해양생산력, 엽록소, 해빙에 의한 나노입자 형성 기여도 진단

- 역궤적 자료의 endpoint 위치에서의 엽록소(또는 DMSPt), 해빙의 농도를 격자별로 종합하여 변수별 공간분포를 생성함. 이를 리셉터 모형(CWT, PSCF)의 공간분포와 비교함. 특정 변수의 분포와 리셉터 모형의 결과가 같은 공간분포를 보인다면 해당 변수가 나노입자에 영향을 미친다고 할 수 있음.

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

(가) 대기 이동궤적 모형

- 대기 이동궤적 모형의 구동에 필요한 기상자료로는 GDAS 1도 자료를 사용함. 해당 자료는 2005년부터 자료가 이용가능함. 대기 이동궤적 경로의 총 생성시간은 기준 시간부터 과거 7일까지, 시간당 1개의 위치 좌표를 생성함. 2019년까지의 연구는 2000년부터 2016년까지 과거 7일까지, 시간당 1개의 위치 좌표를 생성하였음. 모형의 시작 시각은 나노입자 자료 시각에 일치시켰음. 매 시간마다 대기 역궤적모형을 실행함. 한 정점당 1년에 총 $1,471,680$ 개(= $356\text{day} / 1\text{year} \times 24\text{hour} / 1\text{day} \times 1\text{trajectory} / 1\text{hour} \times 168\text{point} / 1\text{trajectory}$)의 위치 좌표가 생성됨. 2020년에 수행한 모형은 2009년부터 2019년까지 1일 간격으로 미래 5일까지의 대기이동궤적 자료를 생성함. 아이슬란드를 기준으로 좌측에 위치한 래브라도해($50^{\circ}\text{N}-60^{\circ}\text{N}$, $34^{\circ}\text{W}-21^{\circ}\text{W}$)와 우측에 위치한 노르웨이해($60^{\circ}\text{N}-70^{\circ}\text{N}$, $10^{\circ}\text{W}-3^{\circ}\text{E}$)를 1도 간격으로 나누어 각각 154개의 정점에서 구동하였음. 한 정점당 1년에 총 $43,800$ 개(= $356\text{day} / 1\text{year} \times 1\text{trajectory} / 1\text{day} \times 120\text{point} / 1\text{trajectory}$)의 위치 좌표가 생성됨. 고도와 혼합층 깊이 등의 자료도 함께 생성하도록 옵션을 조절하도록 함. 자료는 5일까지 생성하였지만, 대기 중 DMS의 평균 체류 기간을 고려하여 결과는 2일(48시간)의 자료를 사용함.

(나) 육상 관측자료

- MSA 자료기반으로 북극 지역의 CWT 값을 도식하였을 때, 그린란드해가 배런츠해보다 MSA 발생에 큰 영향을 미치는 것으로 쉽게 판별할 수 있었다. 이는 기존의 극지연구소 대기팀에서 밝힌 바 있는 것처럼, 생물량은 그린란드해가 상대적으로 낮더라도 DMS 형성에 유리한 식물플랑크톤이 더 우점하고 있는 것 때문으로 추정된다. 즉, 그린란드해가 스발바르 주변 북극 대기의 기후냉각물질 형성에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 지난 연도에서 나노입자를 Clustering 한 연구에서도 그린란드 해역의 영향이 상대적으로 큰 것으로 나타났었던 것과 유사하게 비교되었다. 스발바르 지역의 2010년부터 2015년까지

대기 중 MSA 농도 경향은 아래와 같다(Fig. 1).

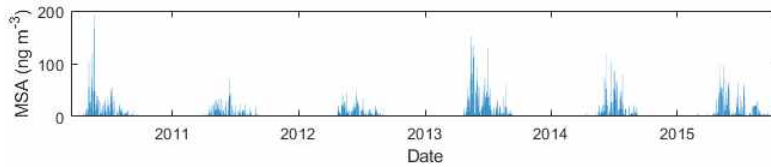


Fig. 1. Atmospheric MSA concentration in the Svalbard during 2010 - 2015 (provided from the KOPRI).

(다) 인공위성 자료

- 리셉터 모형 결과를 얻기 위해 대기 이동궤적 모형에서 얻은 각각의 Endpoint(대기가 특정 시기에 통과한 위치)가 특정 격자에서 얼마나 존재하는지, 그리고 그 Endpoint가 결과적으로 어떤 나노입자 농도와 연계되어 있는지 자료를 정리해야 하며, 각 Endpoint와 연계돼있는 나노입자의 농도에 해양/육상/해빙 환경이 미친 영향을 파악하기 위해 해양의 엽록소와 DMSPt, 해빙농도 등 환경변수의 값도 각 endpoint에서 수집하였음. 각각의 자료가 서로 다른 시/공간 해상도를 갖기 때문에, 1년에 최대 150만개(×7년)에 가까운 Endpoint에 대응되는 자료를 찾기 위해서 각각의 자료로부터 가장 가까운 시간대와 거리에 있는 자료를 탐색하여 얻은 값을 각 endpoint에 할당시켰음.
- 2009년부터 2019년까지 아이슬란드 인근 래브라도해(West)와 노르웨이해(East)에서의 월별 엽록소농도와 DMSP농도 자료를 비교함(Fig. 2). 래브라도해와 노르웨이해의 월별 엽록소농도는 유사한 농도와 계절 변화가 확인됨. 4월과 8월을 제외하고 노르웨이해에서 비교적 높은 엽록소농도가 확인되었음. DMSP농도는 대부분 노르웨이해가 래브라도해 보다 비교적 높은 것으로 확인됨. 마찬가지로, 단위 생물량 당 기후냉각물질 생성률도 노르웨이해에서 래브라도해 보다 높은 것으로 나타났기 때문에 노르웨이해의 식물성 플랑크톤 구성에 기후냉각물질의 생성 효율이 높은 종이 상대적으로 많이 분포하는 것으로 판단하였음.

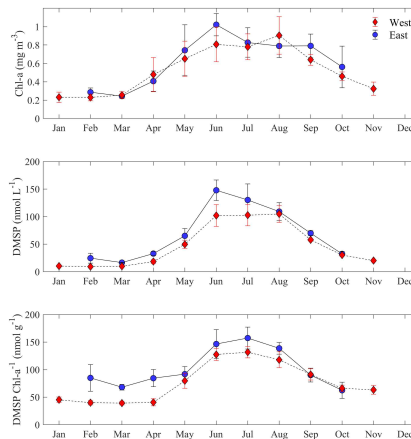


Fig. 2. Chlorophyll-a (top), DMSP concentration (middle) and DMSP:Chl-a ratio in the Labrador (red) and Norway seas (blue).

- 아이슬란드 인근 해역에 서식하는 식물성 플랑크톤의 기후냉각물질의 생성률을 시공간적

변동성을 확인하였음(Fig. 3). 기후냉각물질 생성률은 2009년에서 2019년으로 진행될수록 효율이 점차 떨어지는 것으로 나타남. 특히, 아이슬란드와 스발바르 사이의 해역은 2018년과 2019년도에 50 mmol/g 이하의 낮은 수치를 확인할 수 있었음. 래브라도해(좌측 사각형)와 노르웨이해(우측 사각형)는 유사한 변동성을 확인할 수 있었지만, 북해와 인접한 노르웨이해에서 비교적 높은 효율이 나타나는 경향성을 확인할 수 있었음.

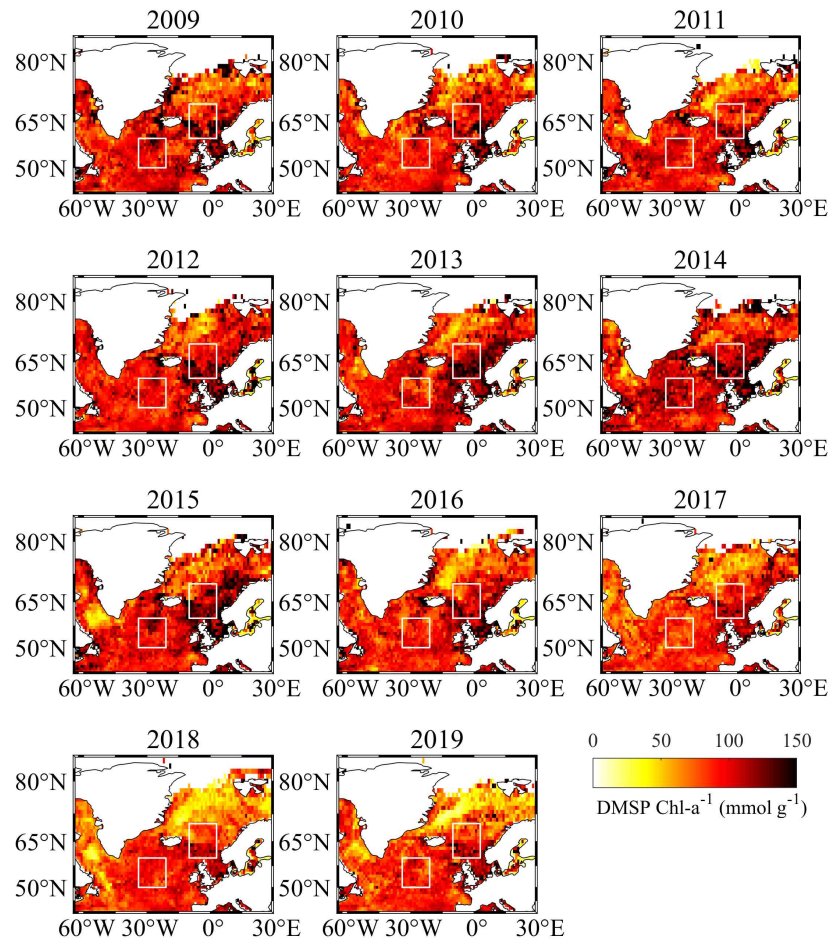


Fig. 3. Distribution of the DMSP:Chl-a ratio from 2009 to 2019 in the ocean area surrounding Island. Two boxes represent the areas where air mass trajectories were generated (left: 50° N-60° N, 34° W-21° W; right: 60° N-70° N, 10° W-3° E).

(라) K-means Clustering

- 10nm-700nm 구간의 수농도 일변화자료를 기반으로 7개의 그룹으로 분류함. 첫 번째 그룹은 종일 100nm 이상의 입자의 수농도가 높게 분포하는 것으로 나타났고, 세 번째와 여섯 번째 그룹은 연결된 듯한 양상을 보였고, 약 30nm와 100-300nm 구간에서 각각 1개의 peak가 유사한 수 농도를 보이며 나타나는 양상을 보임. 네 번째 그룹은 10시-15시에 농도가 증가하는 패턴, 일곱 번째 그룹은 12-20시에 농도가 높은 패턴을 보임. 두 번째와 다섯 번째에도 시간적으로 연속된 패턴을 보임. 결과를 바탕으로 시간에 따라 입자의 크기가 커지는 양상을 보이는 그룹은 모두 100nm 이하에서 peak를 보였기 때문에, 이 결과를 바탕으로 시간별 수 농도 분포 자료를 기반으로 K-mean Clustering을 재수행하여, 이러한 입자 성장패턴에 기인하는 지역과 환경인자를 추적하는 연구를 진행함(Fig. 4).

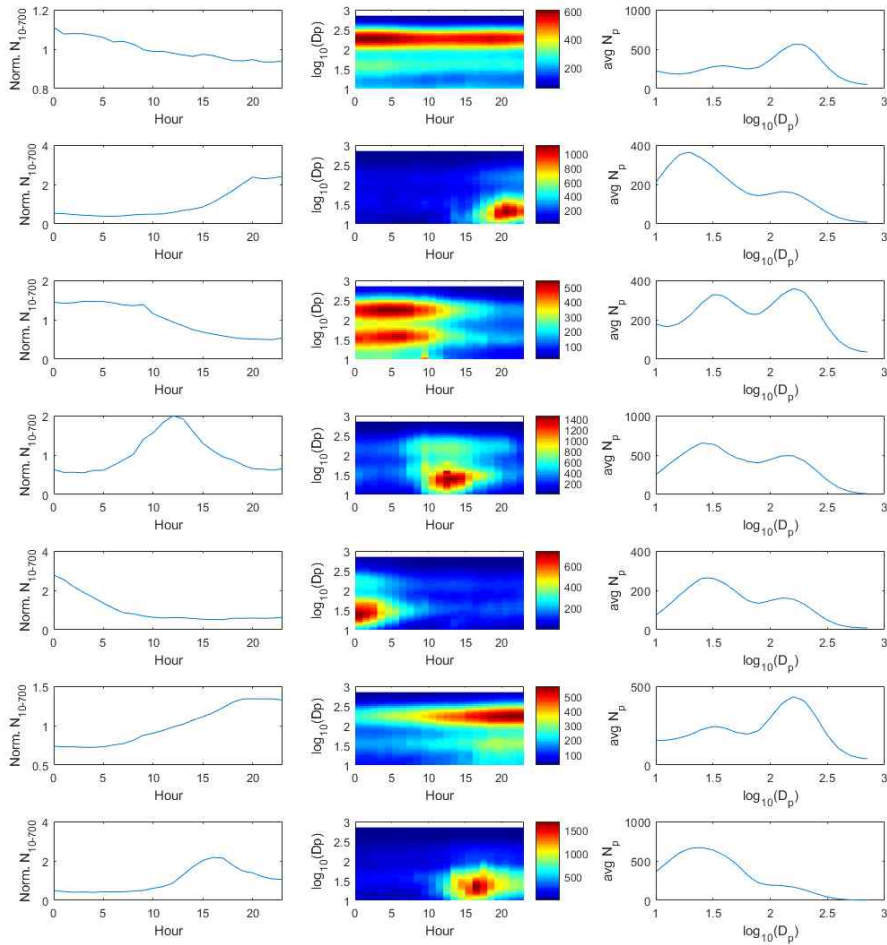


Fig. 4. K-means clustering results obtained from subdaily variations of particle number concentration (0 nm-700 nm range). Each row indicates different clusters. (left) subdaily trends. (middle) size-dependent changes in particle number concentration. (right) average particle number concentration as a function of particle diameter.

- 10nm-700nm 구간의 시간별 수농도 분포 자료를 기반으로 그룹화할 때, 6-8개 정도의 그룹으로 구분되는 것으로 파악됨. 6개로 그룹화할 경우, 20nm 이하에서 최대 수농도(Nmax)가 나타나는 그룹, 35-70nm 구간에서 Nmax가 나타나는 그룹, 20-40nm에서 Nmax가 나타나는 그룹이 있었으며, 1개는 2개의 peak을 나타냈으며 나머지 2개는 100nm 이상에 Nmax를 나타냄. 100nm 이하에서 Nmax가 나타나는 경우는 모두 하계(6월~9월)에 발견되었으며, 반대로 100nm 이상에서 Nmax가 나타나는 경우는 동계(12월~3월)에 발견됨. 각 그룹의 시간자료를 대기역궤적 결과와 연동시켜 분석하였을 때, 100nm 이하에서 Nmax를 가지는 그룹은 주로 그린란드해(Greenland Sea)에서 유입되는 대기의 영향을 상대적으로 더 받는 것으로 나타났으며, 100nm 이상의 Nmax를 가지는 그룹은 배런츠해(Barents Sea)와 유라시아 대륙에서 유입되는 대기의 영향을 상대적으로 많이 받는 것으로 사료됨(Fig. 5).

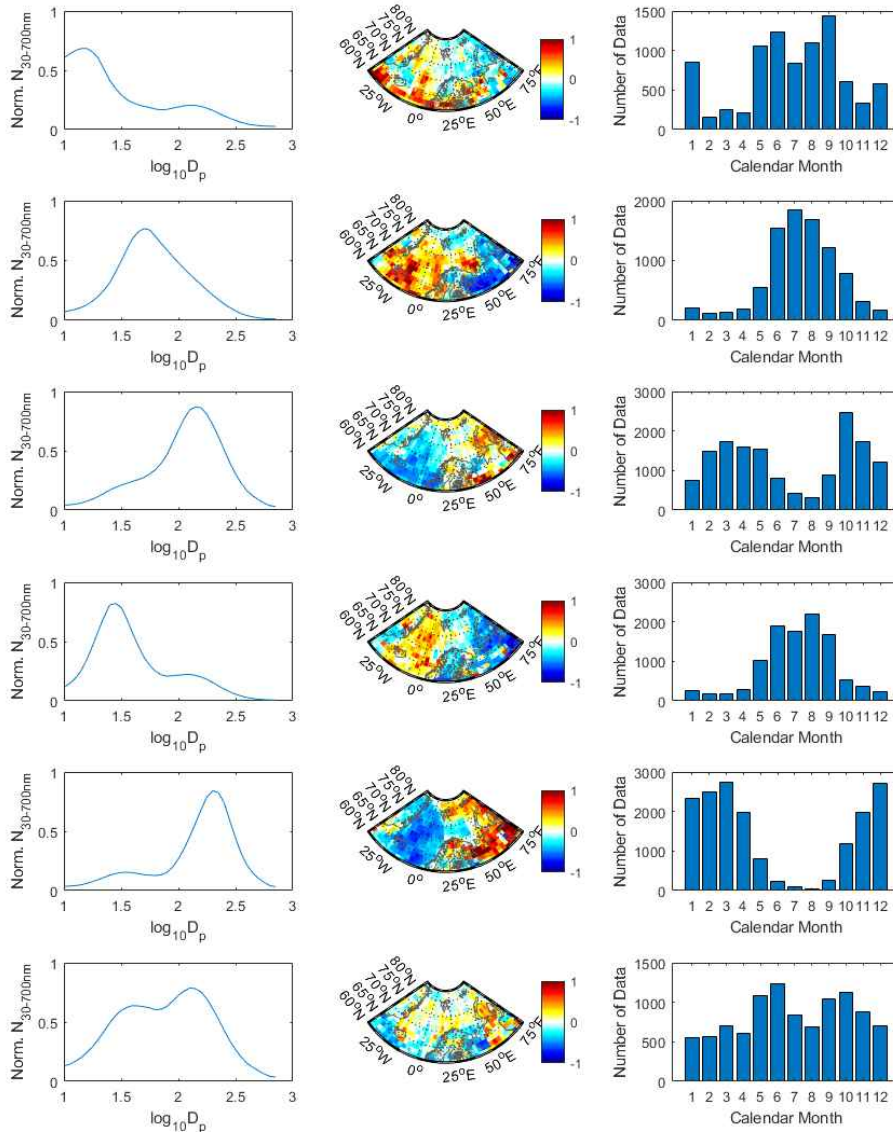


Fig. 5. K-means clustering results obtained from subdaily variations of particle number concentration (30-700 nm range). (left) relative particle number concentration as a function of particle diameter. (middle) areas associated with each cluster. (right) monthly distribution of the data classified into each group.

(마) 리셉터 모형

- 수농도 자료를 기반으로 분류한 그룹(6개)의 자료에서 Nmax값을 활용하여 CWT와 PSCF 분석을 수행함(Fig. 6). 가장 작은 입경에서 Nmax를 보였던 1그룹은 주로 그린란드해의 영향을 많이 받는 시기에 나타나는 것으로 나타났지만, 겨울철에 발생하는 아주 높은 농도는 오히려 핀란드와 인접한 러시아지역 및 백해(white sea), 카라해(Kara Sea) 해역에서 유입되는 바람에 의해 영향을 받는 것으로 보임. 2그룹은 여름철 전체적으로 그린란드해에서 유입되었을 때 Nmax가 높은 것으로 나타났지만, 겨울철에 카라해 해역이 고농도의 Nmax와 연관성이 사료됨. 4그룹은 제플린과 아이슬란드 인근 해역의 영향을 받을 때, Nmax가 나타나는 것이 확인됨. 100nm 이상에서 Nmax를 보인 3, 5그룹은 유라시아 부근에서 높은 수치가 확인됨.

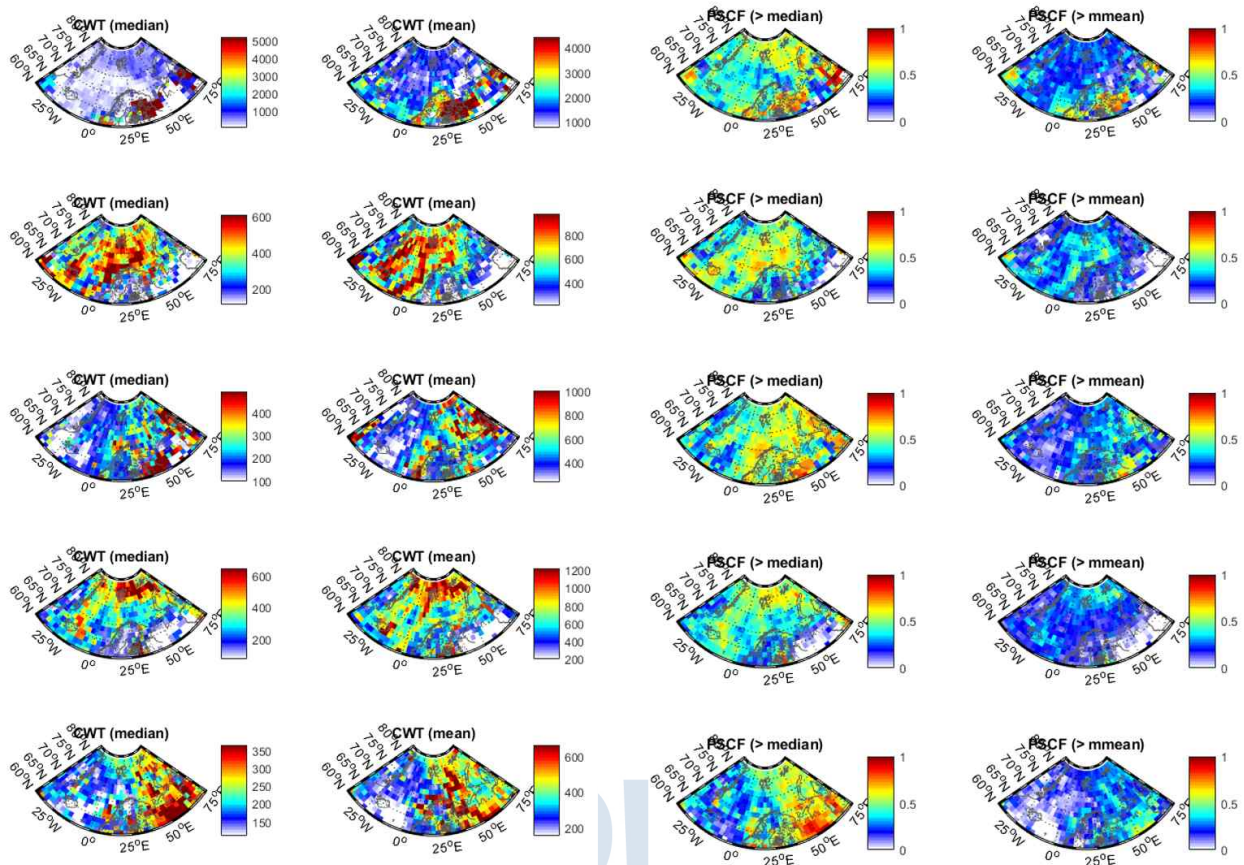


Fig. 6. (first two columns) Concentration Weighted Trajectory and (last two columns) Point Source Contribution Function obtained using Nmax. The first and third columns represent the results taken using median values. The second and fourth columns represent the results taken using mean values. Each row indicates clusters.

- 스발바르 지역에서 2010년부터 2015년까지 관측한 대기 중 MSA 농도를 기반으로 CWT-MSA를 계산함(Fig. 7). 기존 나노입자 수농도를 기반으로 진행했던 연구는 동아시아 지역에서 CWT 기법의 재확인해본 결과, 북극의 기후냉각물질 생성과 이동이 단순하지 않고, 복잡한 요인의 영향을 받는 것으로 추정되기 때문에 해양기원의 MSA로 변경하였음. 따라서 북극 해상/해양이 대기 중 기후냉각물질에 미치는 영향으로 구분하여 파악해보기로 계획하고, 해양기원 DMS로부터 생성되는 MSA를 연구대상으로 결정함. CWT-MSA는 평균값과 중간값 모두 그린랜드해의 영향이 배런츠해 보다 더 큰 것을 확인할 수 있었음.

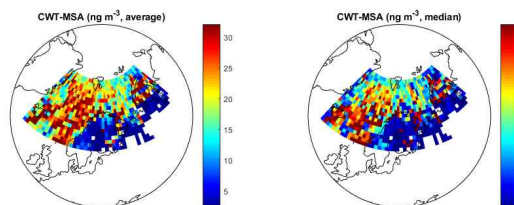


Fig. 7. Concentration weighted trajectory around Svalbard calculated using MSA concentration measured from 2010 to 2015.

- 북극에서 대기 미세입자 수농도를 기반으로 연구를 진행한 결과 기후냉각물질의 생성과 이동이 단순하지 않은 것으로 판단, 아이슬란드 지역의 2009년부터 2019년까지 인근 해역의 월평균 DMSP 농도 경향을 기반으로 생성된 래브라도해와 노르웨이해의 CWT-DMSP 결과를 확인함(Fig. 8과 9). 대기 중 DMS의 평균 체류시간(2일)을 고려할 때 래브라도해와 노르웨이해에서 형성된 기후냉각물질은 스발바르 지역까지 영향력을 행사하는 것으로 나타남. 연평균 CWT-DMSP 값은 대부분 노르웨이해가 래브라도해보다 더 높은 것이 확인되고, 마찬가지로 육상 관측이 진행된 아이슬란드 상공에 미치는 영향력도 노르웨이해가 래브라도해보다 높은 것을 확인함(Fig. 10). 예외적으로, 2013년은 노르웨이해와 래브라도해의 영향력이 유사하게 나타났으며, 점차 래브라도해에서의 영향력이 증가하는 것으로 확인됨. 누적 CWT-DMSP 값은 2016년도와 2018년도에 상대적으로 낮은 값을 확인하였음(Fig. 10).

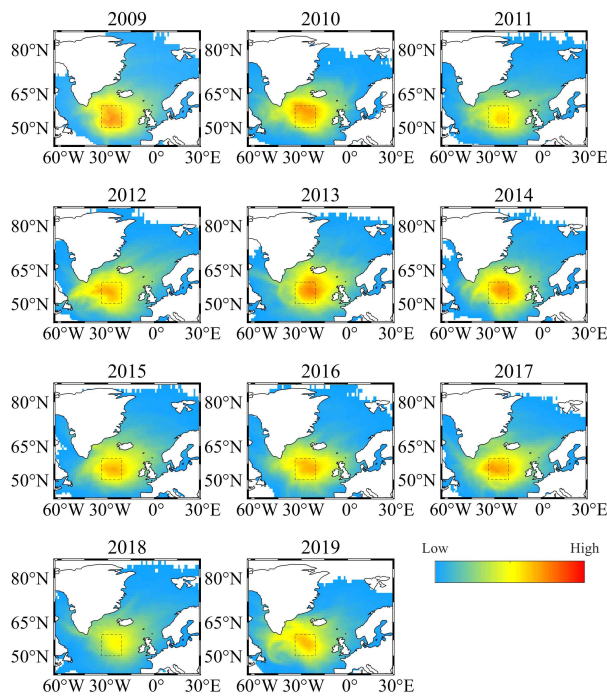


Fig. 8. Potential relative contribution of Labrador sea area (box) to atmospheric DMS predicted based on forward air mass trajectory and seawater DMSP concentration.

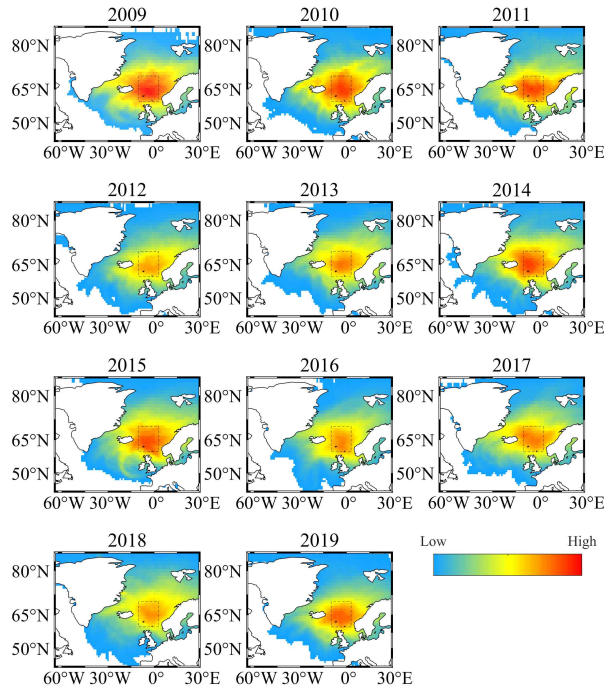


Fig. 9. Potential relative contribution of Norwegian Sea area (box) to atmospheric DMS predicted based on forward air mass trajectory and seawater DMSP concentration.

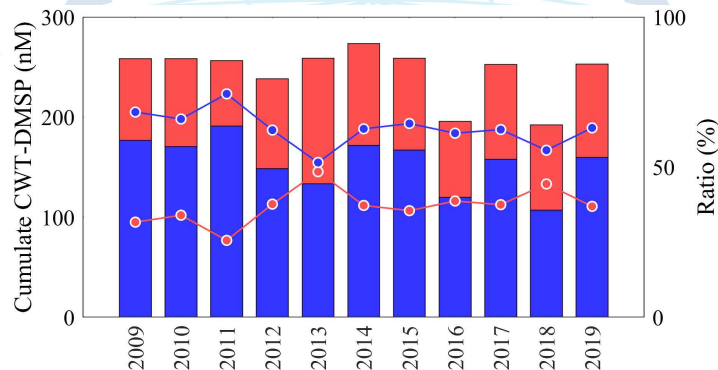


Fig. 10. Relative contribution of air masses originating from the Norwegian Sea (blue) and Labrador Sea (red) to the Island DMS monitoring station 63° N, 20° W.

(바) 리셉터 모형(CWT)의 유효성 검증

- 북극의 에어로졸 및 그 전구체를 동아시아 지역의 미세먼지 농도와 등치시켜서, 연구를 진행함. 동아시아의 경우, 미세먼지의 기원이 상대적으로 명확하며 기원별 기여도가 잘 알려져 있으며, 이용가능한 장기관측자료와 위성자료로 인해 선정함. CWT 기법의 값과 일반적인 패턴(중국 연안지역의 값이 높고, 동해를 포함한 우리나라 동쪽지역의 값이 낮음)이 유사하게 나타남(Fig. 11). 시계열 분포는 중국으로부터의 월경성 오염물질(TAP; Transboundary Air Pollution)의 기여율을 위도별로 연도별로 나타낸 값으로 위도별 차이는 크지 않은 것으로 나타남. 국내에서 관측정점이 증가함에 따라, PM10의 농도와 NO₂, SO₂의 농도는 시간에 따라 감소하는 경향도 나타났음.

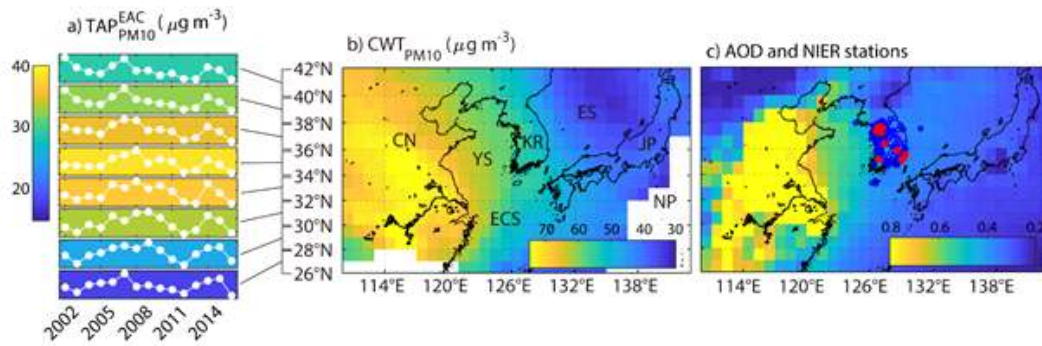


Fig. 11. Concentration weighted trajectory map estimated from PM₁₀ data in South Korea from 2001 to 2017(top middle), the relative contribution of China to PM₁₀ in South Korea (estimated from concentration weighted trajectory), and Aerosol optical depth (top right).

- 연도별로 월경성 오염의 영향과 국내오염의 영향의 높/낮음은 존재하지만, 전반적으로 유사한 영향을 보여주는 것으로 나타남(Fig. 12). 월별결과에서 황사의 영향이 있는 3월에 월경성 기여도가 높은 것으로 나타났고, 11월-2월의 값이 전반적으로 높은 것으로 미루어 봤을 때, 난방으로 인한 미세먼지 발생의 기여로 사료됨(Fig. 12). 추가 발생하는 미세먼지 농도를 봤을 때, 대도시가 비대도시에 비해 시간에 따라 감소하는 경향이 나타났고 이는 대기오염물질 농도를 감소시키려는 지속적인 노력이 반영된 결과로 유추됨(Fig. 12).

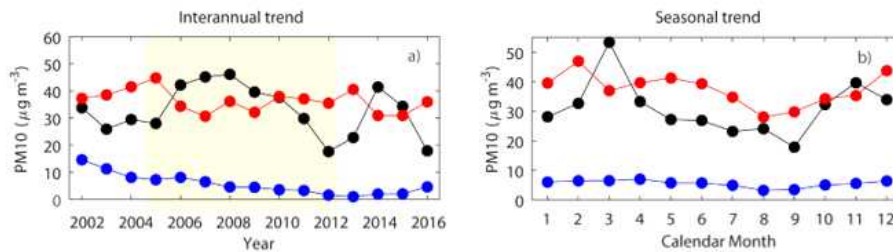


Fig. 12. Interannual (left) and monthly (right) contributions of transboundary air pollutants (black), domestic sources (red) to PM₁₀ in South Korea. Additional contribution from metropolitan cities was also presented (blue).

- PM₁₀에 대한 월경성 오염물질의 기여도는 온도, 풍속과 유사한 패턴을 확인할 수 있음. 월경성 오염물질의 기여도와 국내오염의 기여도가 음의 상관관계로 나타났으며, 이는 기상 현상의 영향으로 판단됨. 기온이 높을 때 풍속이 상대적으로 낮은 경향이 확인됨. 풍속이 낮으면 대기 정체가 발생하여 오염물질의 체류가 증가하여 풍속이 낮은 시기에 월경성 오염물질의 영향이 증가를 유발할 수 있음. 반면 같은 원리로 국내오염물질의 영향도 증가해야 하는데, 낮은 풍속은 높은 온도와 연관이 있었고 높은 온도는 에너지 사용량을 줄이는데 영향을 미친것으로 추정됨.
- 월경성 오염물질의 월별 기여도와 AOD의 연도별 분포가 양의 상관관계를 나타내는 것을 통해 월경성 오염물질의 상대적 기여도 추정의 신뢰성을 확인함(Fig. 13). 최근 국내 풍속이 감소하는 현상을 보정 했을 때, 월경성 오염물질이 미치는 영향을 재산정한 결과는 월경성 오염물질의 영향력이 지속적으로 감소하고 있는 것으로 나타남. 이는 중국의 대기오

염 저감 정책으로 인해 대기질 개선이 반영된 것으로 판단됨. 에너지 사용량과 국내오염의 기여도 사이에 양의 상관관계를 통해 국내오염은 주로 에너지 사용과 연관성이 큰 것으로 사료됨.

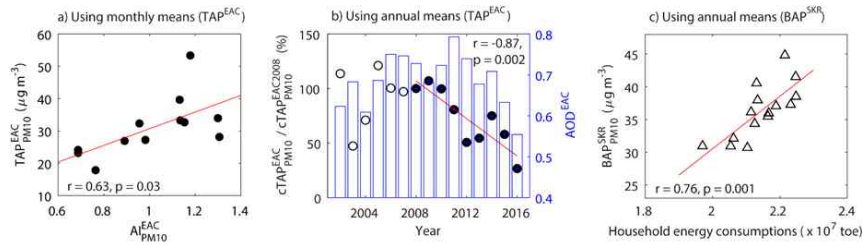


Fig. 13. Comparison between aerosol index and CWT-based transboundary air pollution from China (left). Wind speed dependence of the contribution of transboundary air pollutants (middle). Comparison between energy consumption and domestic air pollution (right).

(사) 환경인자의 기여도 파악

- 모든 계절, 모든 광량, 3일 역궤적을 기본 조건으로, 조건에 변동을 주면서 변화를 파악함. CWT-average(각 격자에서 평균값을 계산)와 CWT-median(각 격자에서 중간값을 계산)의 결과가 서로 다른 형태를 나타냄. 전자는 제플린 정점을 기준으로 북쪽의 공기가 유입되었을 때 높은 변화를 나타내는 것으로 나왔지만, 후자는 제플린의 남동쪽(유럽방향)에서 공기가 유입될 때 나노입자의 수가 증가하는 경향을 확인함. 극값에 의해 평균값의 변동성이 클 수 있으므로, 나노입자의 수가 급격한 증가 경향은 북쪽과 더 관계가 있고, 전반적인 증가는 유럽 방향의 대기와 관계가 높을 것으로 추정됨. 이러한 결과는 PSCF에서도 확인되었음. 상위 10% 나노입자 농도를 보였을 때의 대기역궤적은 제플린 북쪽해역 방향이었음. 역궤적 시간을 5일로 증가시켰을 때에도 범위가 확장되었지만, 전반적으로 유사한 경향을 나타냄. Downward solar flux 기준을 100, 200 W/m^2 로 증가시켰을 때, 남동쪽 유럽 방향의 대기궤적이 나노입자 농도에 미치는 영향이 제거됨. 이는 일부 계절적인 요인으로 예상됨. 겨울 자료에 한정하여 리셉터 모형을 구동하였을 때 북유럽 방향에서 높은 CWT 값을 보였으며, 봄과 여름에 제플린 북쪽에서 높은 CWT 값이 나타났음.

(아) 환경인자와 리셉터 모형의 공간분포 비교

- 그룹별 Nmax 농도를 대기 역추적궤도 상의 해빙농도, 엽록소농도, DMSPt 농도와 비교하였음. 리셉터 모형 결과를 기반으로 81°N 이상, 81°N 이하, 경도 16°E 우측과 좌측으로 나누어 지역별 차이를 분석함. 대부분 분명한 상관관계를 확인할 수 없었음. 1지역 (81°N 이상), 클러스터 그룹2에서 DMSPt 농도와 Nmax가 상관관계가 나타남. 2지역 (81°N 이하, 16°E 우측)에서는 DMSPt농도가 낮고, 해빙농도가 높을 때 Nmax가 높은 경향을 나타냈지만, 100nm 이상에서 Nmax를 갖는 그룹 3과 5에서는 엽록소농도와 Nmax가 양의 상관관계를 나타냄. 3지역(81°N 이하, 16°E 좌측)에서는 해빙농도와는 관계가 나타나지 않았지만, 엽록소와 DMSPt가 높은 경우에 Nmax가 높게 나타남.

(2) 정량적 연구개발성과

○ 총괄과제에서 성과로 포함한 SCIE 논문 1편 출판에 기여하였음.

Atmospheric DMS in the Arctic Ocean and its relation to phytoplankton biomass,
Global Biogeochemical Cycles, 32, 351-359.

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율

국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명



2) 목표 달성 수준

추진 목표	달성 내용	달성도(%)
○ 자료의 통합 분석을 위한 기술 환경 구축 및 분석 기술 최적화	○ HYSPLIT 대기역궤적 모형을 매트랩 기반으로 구동하여 환북극 전역의 장기 역궤적자료를 생성, 분석할 수 있는 체계를 갖추었고, 육상/환경/대기 자료와 비교 분석하였음.	100%
○ 스발바르 인근의 기후냉각물질 발생원 추정 ○ 스발바르 인근 해역이 기후냉각물질 형성에 미치는 영향 분석	○ 스발바르 관측자료와 대기 역궤적 자료 기반의 해양기원 영향력을 분석한 결과, 그린란드해의 영향이 배런츠해의 영향보다 큰 것을 확인하였음 ○ 스발바르 MSA 자료 역시 일관된 결과를 제시하였음. ○ 수농도 분석결과 광이 상대적으로 풍부한 하계에 그린란드해 지역에서 대기가 유입되었을 때, 수농도가 증가하는 현상이 두드러지게 나타난 거승로 확인되어, 위의 연구결과와 동일한 결론을 냈음.	100%
○ 아이슬란드 인근(또는 타거점 1 곳)의 기후냉각물질 발생원 추정	○ 극지연구소에서 신규로 구축한 관측지점에서 생성된 자료를 활용하여 연구를 수행했지만, 현지 사정 및 코로나로 인한 장비 유지보수로 인해 예상보다 자료가 부족하였음. ○ 해양 DMSP 자료를 기반으로 대기 궤적자료를 분석한 결과 노르웨이해가 래브라도해보다 영향력이 상대적으로 큰 것으로 나타났음. 아이슬란드 자료가 좀 더 충분히 확보되면 스발바르의 연구방법론을 활용하여 좀더 세밀한 분석이 가능할 것으로 보임.	90%
○ 기후냉각물질 발생 지역 제시	○ 구름 형성에 기여하는 DMS는 주로 해양기원으로 알려져 있었고, 본 위탁연구와 총괄연구팀의 일련의 연구결과들은 모두 해양기원 DMS의 중요성을 제시하고 있고, 특히 그린란드해가 가장 중요한 지역으로 나타났음.	90%

4. 목표 미달 시 원인분석

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

- 스발바르 지역은 2010년부터 자료가 축적되었던 반면, 아이슬란드 2017년 이후 제한적으로 관측이 수행되어 왔고, 현지 관측소의 내부공사, 코로나로 인한 유지보수 부재에 따른 관측자료 생성이 제한되었음. 추후 충분한 자료가 확보되면 스발바르처럼 DMS 발생에 대한 향상된 연구 결과를 제시할 수 있을 것으로 예상됨.
- 대기이동체적과 관측자료를 연합한 리셉터 모형의 결과가 상대적으로 분명하게 나타나지 않은 경우가 많았는데, 이는 북극지역의 DMS 거동에 미치는 요소가 다양한 것 때문인 것으로 보임.

2) 자체 보완활동

- 리셉터 모형을 활용한 기후냉각물질인 에어로졸 발생지역을 추적하는 것이 핵심 목표였는데, 에어로졸 발생이 그린랜드해에서 배런츠해보다 상대적으로 비교 우위에 있다는 연구결과는 얻었지만, 지역적 분포 등이 일부 연구결과에서 분명하게 나타나지 않았던 점이 있어 리셉터 모형의 활용성을 재점검하기 위해, 이미 대기입자 공급원이 알려져 있는 지역인 동아시아를 통해서 검증을 진행하였고, 리셉터 모형의 효용성을 재입증하였음. 리셉터 모형에 의해 발생지역이 다소 불분명했던 것은 반응성이 높은 DMS의 복잡한 거동과 높은 변동성 때문이라고 추정할 수 있었음.

3) 연구개발 과정의 성실성

- 총괄연구팀과 연구수행과정 및 현황에 대한 지속적인 보고와 교류를 통해 소통을 하였고, CWT 분석의 경우 연구 방법의 효용성을 자체적으로 검증하기 위해서 새로운 지역의 자료를 신규로 획득하고 분석하는 등 상당한 노력을 경주하였고, 연구 방법 자체에는 문제가 없는 것을 재검증/확인하는 등의 노력을 진행함.

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

- 북극 지역은 기후 변화의 영향으로 해빙이 감소하면서, 기후변화 영향이 증폭되어 빠른 변화가 예상되는 지역이므로(IPCC, 2019), 해양 지역의 확대와 생산력의 변동으로 인해 DMS 발생량에도 변화가 있을 수 있고, 대기 중 에어로졸 농도에도 영향을 줄 수 있을 것이다. 따라서 이 지역에 대한 연구가 지속적으로 필요한 시점에서 연구 기반을 마련하였다고 판단된다. 북극 스발바르 고정점에서 DMS를 장기연속관측한 연구가 극지연구소에서 최초로 진행되었고, 본 연구에서는 그 자료뿐만 아니라 타 외국연구팀의 자료까지 종합적으로 분석하여 기존에 알려져 있던 에어로졸 연구결과들과 비교할 수 있었다. 리셉터 모형이 대기미세먼지/에어로졸 발생원 등을 추적할 수 연구 방법임을 재확인할 수 있었기 때문에, 일부 개선을 통해서 북극 에어로졸 전구체에도 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

- 본 연구는 북극 DMS에 초점을 주로 초점을 맞추고 진행되었지만, 본 연구에서 활용하였던 연구방법은 타 지역에서 다양한 물질의 발생원 추적에 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 남극 역시 DMS 발생이 높은 것으로 나타났고 실제로 극지연구소와 함께 남극 DMS에 의한 입자형성에 대한 연구를 수행한 바 있다(Jang et al., 2019). DMS외에 요오드 등과 같이 에어로졸 형성에 영향을 미친다고 알려진 물질 등에 대한 관측자료가 축적되면 연구를 수행할 수 있을 것으로 판단된다. 북대서양 역시 DMS 발생량이 높은 것으로 알려져 있어 관련 연구 수행이 필요한 지역으로 판단된다. DMS와 요오드 같은 에어로졸 전구체 외에도 에어로졸 자체의 거동을 추적하는데 효과적으로 활용될 수 있다는 점이 동아시아 자료를 활용한 검증 연구에서 재확인하였다. 시베리아 지역의 산불 등이 주요 환경 이슈로 제시되고 있는데, 북극 지역으로의 각종 기체 및 부산물의 이동 등에 대한 연구에 활용될 수 있을 것으로 보인다.

별첨자료

참고문헌

1. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
2. IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]
3. Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D., Ngan, F., 2015, NOAA's hysplit atmospheric transport and dispersion modeling system, 96 (12), p2059-2077.
4. Martí Galí, Emmanuel Devred, Maurice Levasseur, Sarah-Jeanne Royer, Marcel Babin, 2015, A remote sensing algorithm for planktonic dimethylsulfoniopropionate (DMSP) and an analysis of global patterns, Remote Sensing of Environment, 171, p171-184.
5. Hsu, Y.-K., T. M. Holsen, and P. K. Hopke, 2003, Comparison of hybrid receptor models to locate PCB sources in Chicago, Atmos. Environ., 37(4), 545-562
6. T.-W. Kim, K. Lee, R. Duce, P. Liss, 2014, Impact of atmospheric nitrogen deposition on phytoplankton productivity in the South China Sea, 2014, Geophysical Research Letters, 41, 3156-3162.
7. Schmale, J., Zieger, P. & Ekman, A.M.L., 2021, Aerosols in current and future Arctic climate. Nat. Clim. Chang. 11, 95-105.
8. E. Jang, K.-T. Park, Y.J. Yoon, T.-W. Kim, S.-B. Hong, S. Becagli, R. Traversi, J. Kim, and Y. Gim, 2019, New particle formation events observed at the King Sejong Station, Antarctic Peninsula - Part 2: Link with the oceanic biological activities, Atmospheric Chemistry and Physics, 19, 7595-7608

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.

