

해양극지기초원천기술개발사업
(Brain Research Program)

극지 대기오염 및 기후변화 연구를 위한 대기질 모델링
시스템 개발 및 활용
(Development of air quality modeling system for the Arctic)



제 출 문

과학기술정보통신부 장관 귀하

이 보고서를 “극지 대기오염 및 기후변화 연구를 위한 대기질 모델링 시스템 개발 및 활용“과제의 (최종: 2016.05~2021.03) 보고서로 제출합니다.

2021년 03월 31일

위탁연구기관명 : 광주과학기술원

위탁연구책임자 : 한 경 만

연 구 원 : 김현수, 송철한

(이상 광주과학기술원)



최종보고서										보안등급	
										일반[<input checked="" type="checkbox"/>], 보안[<input type="checkbox"/>]	
중앙행정기관명		과학기술정보통신부			사업명		거대과학연구개발사업				
전문기관명(해당 시 작성)		한국연구재단			사업명 내역사업명 (해당 시 작성)		해양극지기초원천기술 개발사업				
공고번호					총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)						
					연구개발과제번호		2016M1A5A1901782				
기술분류	국가과학기술 표준분류	ND0405	50%	ND0499	30%	ND0404	20%				
	부처기술분류 (해당 시 작성)		%		%		%				
연구개발과제명 (세부과제-1)		국문	북극권 동토 관측 거점을 활용한 환경변화 감시와 예측								
		영문	Arctic permafrost environment change monitoring and prediction method developments								
연구개발과제명		국문	극지 대기오염 및 기후변화 연구를 위한 대기질 모델링 시스템 개발 및 활용								
		영문	Development of air quality modeling system for the Arctic								
주관연구개발기관		기관명	광주과학기술원		사업자등록번호		410-82-07550				
		주소	(우)61005 광주 북구 첨단과기로 123		법인등록번호						
연구책임자		성명		한경만		직위		선임연구			
		연락처	직장전화	062-715-3408		휴대전화		010-9982-5566			
			전자우편	kmhan@gist.ac.kr		국가연구자번호		10869025			
연구개발기간		전체		2016. 05. 01 - 2021. 03. 31(5년 1개월)							
		단계 (해당 시 작성)	1단계	2016. 05. 01 - 2017. 12. 31(1년 8개월)							
			n단계	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
총계		200,000						200,000		200,000	
1단계	1년차	30,000						30,000		30,000	
	2년차	50,000						50,000		50,000	
2단계	1년차	40,000						40,000		40,000	
	2년차	40,000						40,000		40,000	
	3년차	40,000						40,000		40,000	

공동연구개발기관 등 (해당 시 작성)	기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고	
						역할	기관유형
공동연구개발기관							
위탁연구개발기관							
연구개발기관 외 기관							
연구개발담당자 실무담당자	성명		한경만		직위		선임연구원
	연락처	직장전화	062-715-3408		휴대전화		010-9982-5566
		전자우편	kmhan@gist.ac.kr		국가연구자번호		11869025

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

2021년 03월 31일

연구책임자: 한경만 (인)

주관연구개발기관의 장: 광주과학기술원 (직인)

공동연구개발기관의 장: (직인)

위탁연구개발기관의 장: (직인)

중앙행정기관의 장 귀하



< 요약 문 >

※ 요약문은 5쪽 이내로 작성합니다.

사업명								총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)				
내역사업명 (해당 시 작성)								연구개발과제번호				
기술 분 류	국가과학기술 표준분류	ND0405	50 %	ND0499	30 %	ND0404	20%					
	부처기술분류 (해당 시 작성)		%		%		%					
총괄연구개발명 (해당 시 작성)		환북극권 동토층 환경변화 분석을 통한 미래 예측 및 유용물질 응용 기술 개발										
연구개발과제명		극지 대기오염 및 기후변화 연구를 위한 대기질 모델링 시스템 개발 및 활용										
전체 연구개발기간		2016. 05. 01 - 2021. 03. 31										
총 연구개발비		총 200,000 천원 (정부지원연구개발비: 200,000천원, 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		북극권 대기환경 특성을 고려한 대기질 모델링 시스템 구축 및 활용									
	전체 내용		- 북극권 기상/대기질 모델링 시스템 구축 - 모델링 시스템을 이용한 북극권 대기오염 중점 수행									
	1단계 (해당 시 작성)	목표	대기질 모델링 시스템 구축									
		내용	- 극지 특성이 고려된 기상모델링 수행 - 극지 동토 및 대기환경 특성을 고려한 대기화학 모델링 시스템 구축 및 수행 - 대기질 모델링 시스템 검증									
2단계 (해당 시 작성)	목표	대기질 모델링 시스템 활용										
	내용	- 모델링 및 인공위성 관측으로부터 기체 및 입자상 물질 시공간적 특성 분석 조사 - 위성 및 모델링 자료 활용 자료동화된 입자상 물질 자료 생성 - 역궤적 분석을 통한 오염물질의 거동 특성 및 극지 영향성 분석										
연구개발성과		극지 대기환경 모델링 시스템 구축										
연구개발성과 활용계획 및 기대 효과		- 구축된 대기질모델링 시스템을 통한 극지 모의 선진화 및 모의된 대기환경 정보 제공 - 중위도 오염물질 장거리 이동에 따른 극지 대기질 영향성 규명 - 극지 기후강제력 산출을 통해 기후변화 영향성 파악 및 국제 협업을 위한 기초자료 활용										
연구개발성과의 비공개여부 및 사 유												
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
		3										
연구시설·장비 종합정보시스템		구입 기관	연구시설· 장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호		

등록 현황								
국문핵심어 (5개 이내)	대기질 모델	인공위성 관측	에어로솔 광학적 두께	자료동화	북극			
영문핵심어 (5개 이내)	Air Quality Model	Remotely sensed observation	Aerosol Optical Depth	Data Assimilation	Arctic			



< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용	2
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	34
4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)	36
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도	37
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	37
별첨자료 (참고 문헌 등)	37



1. 연구개발과제의 개요

- 극지 동토 및 대기환경 특성이 반영된 대기질 모델링 시스템을 구성 및 시스템을 활용한 대기오염 연구 수행 (Fig. 1)
- 대기오염 연구
 - 극지역의 (기체 및 입자상) 오염물질의 분포 특성
 - 외부로부터 유입되는 장거리 대기오염 물질의 거동 특성 및 영향성 파악
- 기상 모델링 (WRF, Weather Research and Forecasting), 배출량 자료 처리, 화학수송 모델링 (CMAQ, Community Multi-scale Air Quality)을 이용 극지 대기환경 특성이 반영된 대기질 모델링 수행
- 대기질 모델링의 성능 파악
 - 활용 가능한 위성원격 측정과 상호 비교 (위성관측은 지표반사도로 인해 제한적 자료 제공)
 - 지상/항공 관측 결과와 상호 비교 (ARCTAS field 관측 캠페인)
- 지상/위성 관측자료 활용
 - IASOA (International Arctic System for Observing the Atmosphere)의 기체 및 입자상 물질농도 자료
 - AERONET (Aerosol Robotic Network) 및 DOAS (Differential Optical Absorption Spectrometry) 등 광학 원격 관측 자료
 - OMI (Ozone Monitoring Instrument), SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric CHromatography), MOPITT (Measurements of Pollution in the Troposphere), MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer) 센서의 가스 및 입자상 물질의 시공간적 분포 특성



Fig. 1. Research summary of the project.

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

본 연구는 극지 동토 및 대기환경 특성이 반영된 대기질 모델링 시스템을 구성하고, 이 시스템을 이용하여 대기오염 연구를 수행하는 것이다. 이를 위하여 배출량 인벤토리, 기상 모델링 (WRFv3.4.1 모델, Weather Research Forecasting) 및 대기화학 모델링 (CMAQv5.1, Community Multi-scale Air Quality)을 활용하였다. 대기질 모델 구동은 2008년 1월 - 12월을 대상으로 구동되었으나, 주요 분석 대상의 시간적 범위는 2008년 5월-8월 봄 및 여름철이다.

북극지역의 기상학적 대기환경 특성을 반영하기 위하여 WRF 모델의 기본 설정된 지표자료 중 해빙 (sea ice) 정보를 개선하였고, 북극지역 대기질에 영향을 미치는 주된 요소인 경계조건 (BC, Boundary Condition)은 등지격자 모델링을 통하여 확보하였다. Fig. 2는 본 연구의 공간적 대상과 등지격자 모델링을 수행하기 위한 도메인을 나타낸 것이다. 도메인, D1의 공간적 범위는 북미, 유럽 및 아시아 등 북반구 주요 오염 배출지역을 포함하고, 도메인 D2는 북극지역으로 북극점을 포함하는 북극해, 노르웨이, 스웨덴, 핀란드, 러시아 북부, 그린란드의 일부분과 아이슬란드, 스발바르를 포함 범위이다. D1 범위 모델링 구동을 위한 경계조건은 기본 설정된 조건으로 하였고, D2 범위 모델링 구동의 경계조건은 D1에 대한 화학수송모델링 결과로부터 추출하였다. 본 연구의 주요 분석 공간적 대상은 D2 도메인이다.

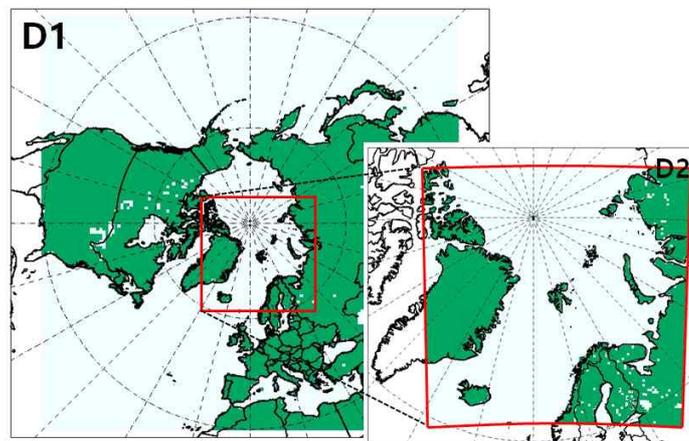


Fig. 2. Domain of D1 and D2 for 3D-CTM simulation.

해당 시간 범위를 포함하는 국제 극지의 해 (IPY 07-08년) 기간에는 미국항공우주국 (NASA)와 미국해양대기관리청 (NOAA)등에 의해 많은 항공 및 지상관측이 수행되었고, 이들 관측결과는 모델 결과 분석 및 검증에 활용하였다. 또한, 항공관측 이외에, 준 상시적으로 지상에서 관측되는 IASOA (International Arctic System for Observing the Atmosphere)와 GAW-GWDC (GAW World Data Center for Aerosol) 네트워크에서 제공되는 기체 및 입자상 물질 농도 자료도 모델 성능 평가에 활용하였다. 이들 지상 및 항공관측은 시간 및 공간적인 제약성이 있어, 보다 광범한 분석을 위해 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 및 OMI (Ozone Monitoring Instrument) 위성센서에서 관측되는 에어로솔의 광학적 두께 (Aerosol Optical Depth, AOD, τ_{MODIS})와 NO₂ 증적분 농도 ($\Omega_{\text{OMI,NO}_2}$)도 함께 분석에 활용하였다. 관측과의 비교를 통한 검증된 모델링 시스템 및 위성으로부터 관측된 기체 및 입자상 물질의 분포 특성을 분석을 통하여, 장거리 수송에 따른 대기오염물질의 거동특성과 영향을 분석하고자 하였다.

1) 북극 대기질 모델링 시스템 구축

극지 대기환경 특성을 파악하기 위하여 북극 지역을 대상으로 WRFv3.4.1/CMAQv5.1 모델링 시스템을 구축하고, 2008년 1월 - 2008년 12월 기간을 대상으로 모델링을 구동하였다. 특히, 북극지역의 기상학적 대기 특성을 반영하기 위해, WRF 모델의 기본 설정된 지표자료 중 해빙 자료를 개선/보완하여 개선효과를 파악하였고, 북극지역의 대기 특성을 고려하기 위하여 CMAQ 모델링의 배경조건을 정교하게 고려하였다 (Fig. 3 참조).

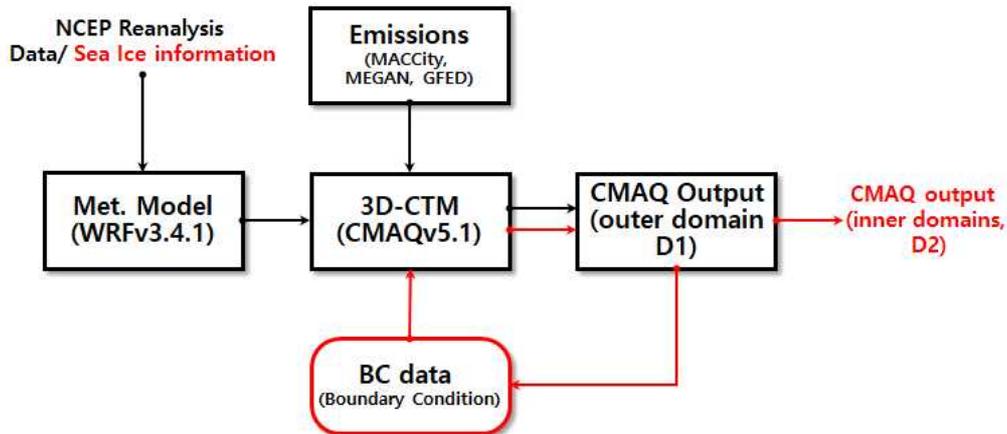


Fig. 3. Schematic procedure for 3D-chemistry transport modeling system for the Arctic.

(1) WRF 기상 모델링 시스템 구성

가. 적용 모델 및 물리적 옵션

본 연구에 활용된 기상모델은 완전 압축성 비정수계 (fully compressible non-hydrostatic) 모델인 WRF v3.4.1를 활용하였다. WRF는 Arakawa-C 격자체계와 수직으로 지형에 근거한 Eulerian 질량좌표계 (mass based terrain following coordinate)를 사용한다. WRF 모델은 전처리, 모델 및 후처리 과정으로 세 파트로 구성된다. 본 연구에 적용된 NCEP 재분석 자료는 전구규모로 수평 해상도는 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 이고, 연직으로 100mb까지 17개 층이며, 시간해상도는 6 시간이다. 이 WPS 과정을 통해 생성된 자료는 WRF 단계의 REAL 과정을 통해 연직 내삽되어 경계 및 초기자료가 생성된다. 마지막으로 WRF 실행단계의 REAL과정을 통해 생성된 자료를 바탕으로 수치 적분된다.

본 연구에 본 WRF 모델링에 적용된 주요 대기 물리적 방법은 Table 1과 같다.

Table 1. Physical options for WRF simulation

WRF 물리과정	선택 scheme	WRF 옵션 번호
미세 구름물리	WSM5 (Hong et al., 2004)	mp_physics=4
장파복사	RRTMG (Iacono et al., 2008)	ra_lw_physics=4
단파복사	RRTMG shortwave (Iacono et al., 2008)	ra_sw_physics=4
적운 대류 모수화	Kain-Fritsch scheme (new Eta) (Kain, 2004)	cu_physics=1
대기 경계층 모수화	YSU scheme (Hong et al., 2006)	bl_pbl_physics=1
지표 모수화	5-layer thermal diffusion Land Surface Model	sf_surface_physics=1

나. 북극지역 해빙 (sea ice) 입력자료 수정

WRF 모델은 24개 구분에 따른 지표 유형별 USGS (United States Geological Survey) 자료를 10m, 5m, 3m, 30s 해상도로 제공하고 있고, Fig. 4에 WRF 모델링 해당 격자로 전환하여 USGS 24개 지표유형별 비율을 나타낸 것이다. Fig. 4에 land use category 24번 ‘snow or ice’ 정보는 그린란드 지역에만 제공되고 있고, 북극지역에는 실제 지표 정보를 반영하지 못하고 있다. 실제 계절별 해빙 정보를 제공하기 위하여, 미국 해양대기청에서 다양한 위성센서 (AMSU-A, ASCAT, AVHRR, GESO I-M IMAGER, MODIS, SAR, SEVIRI, SSM/I, SSMIS) 및 실시간 관측으로부터 산출한 IMS (Interactive Multi-sensor Snow and Ice Mapping System) 데이터 중 4km 해상도 해빙 정보자료를 본 기상모델링 격자로 전환하여 수정하였다 ((<http://nsidc.org/data/G02156>, National Ice Center, 2008). IMS 데이터는 일별 자료가 제공되고 있고, 본 연구에서는 일별 자료를 월 평균하여 적용하였다.

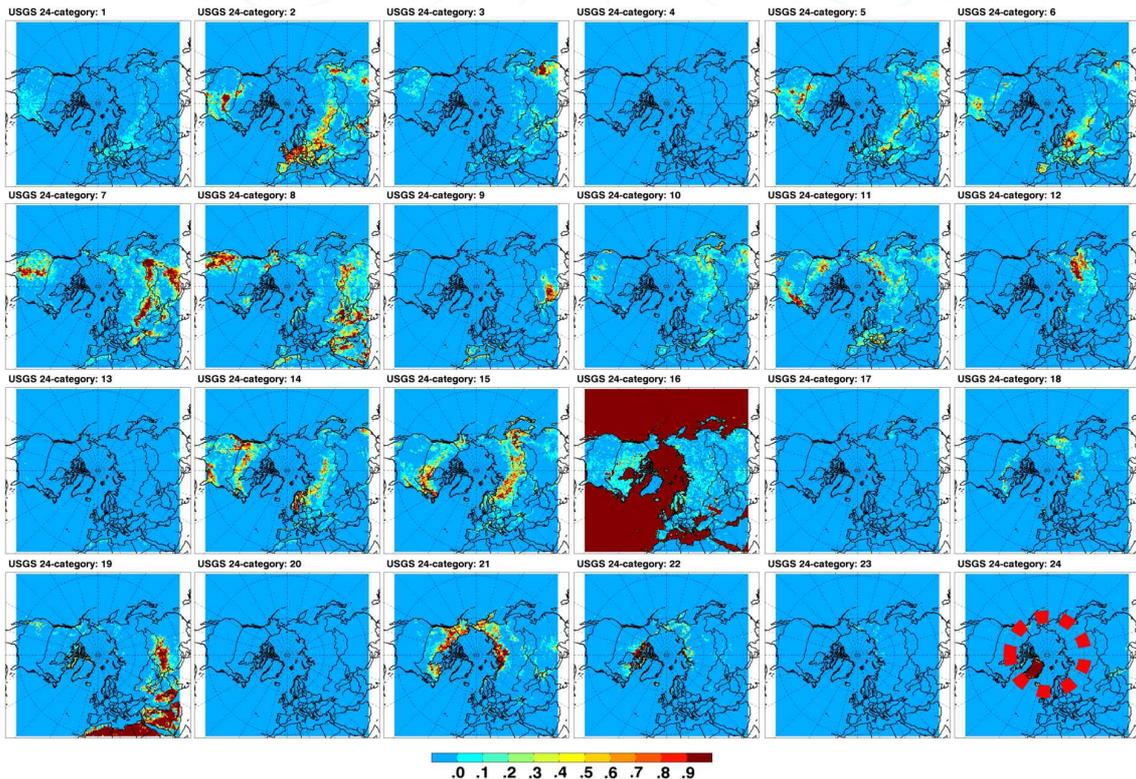


Fig. 4. default fraction of 24 categories for USGS in the WRF model.

Fig. 5는 2008년 4월 - 8월에 대하여 IMS의 해빙정보를 고려한 land use category 24번의 해당 비율 공간분포를 나타낸 것이다. 대부분 북극해는 16번 ‘Water Bodies’ 정보가 ‘snow or ice’로 변경되었다. 해빙의 공간분포는 2008년 봄에서 여름으로 갈수록 해빙의 분포범위는 점차 감소하는 경향을 나타내고 있고, 이러한, 북극지역의 해빙정보를 고려함으로써, 기온 정보를 포함한 관련 기상학적 요소가 개선될 수 있다.

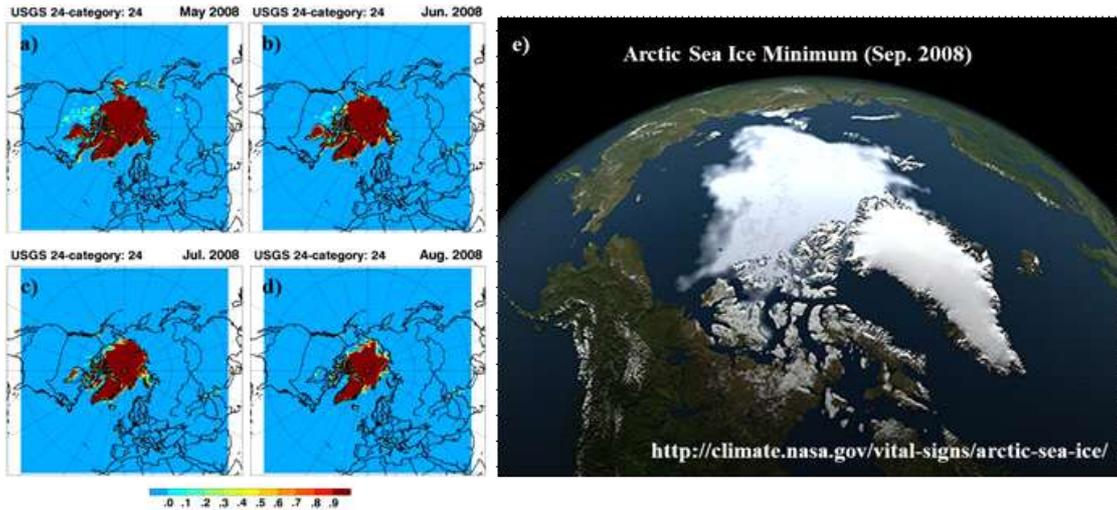


Fig. 5. fraction of the 24th land use category considering the information of sea ice from IMS data a) for May 2008, b) June 2008, c) July 2008, and d) August 2008. e) observed sea ice for September 2008.

(2) WRF 기상 모델링 결과 분석

가. 바람장 분석

Fig. 6은 WRF 모델링으로부터 모의된 북반구 바람장의 분포를 나타낸 것이다. 북반구 규모에서 월별 바람장은 북태평양 (경도 120° W - 150° W)에서 남서풍, 동아시아 (120° E - 150° E)에서 남서풍, 북대서양 (경도 30° W - 60° W)의 동풍 등 매월 유사한 패턴과 분포를 나타내고 있다.

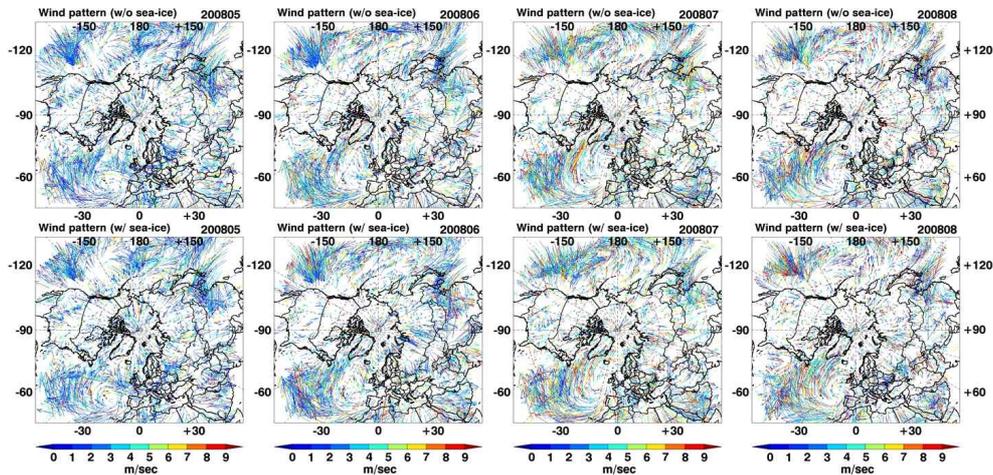


Fig. 6. Monthly wind vectors with improved 24th land use (upper panel) and default (bottom panel) for May - August 2008.

북극해로 유입되는 바람은 북대서양으로부터 그린란드로 유입되는 월별 공통된 특징을 나타내고 있고, 특히, 7월에 바람풍속이 ~10m/s 이상으로 높은 결과를 타나낸다. 위도 60° 이상 지역에서는 그 강도가 점점 약화된다. 본 연구에서는 해빙 (sea ice) 지표정보를 이용하여 개선한 모델링과 모델 내에 기본 설정된 모델링을 통해 바람장의 차이를 살펴보았다. 해빙을 고려한 모델링의 바람장 (Fig. 6, 상)과 모델 기본설정 조건으로 구동한 모델링의 바람장 (Fig. 6, 하)은 풍속에 있어 다소 약한 차이를 보이고 있으나, 북반구 바람장의 분포 특성을 유사한 결과를 나타내고 있다.

나. ice-albedo 피드백 및 지표 온도 분석

Fig. 7(상)은 WRF 기상 모델로부터 모의된 북반구 지표 2m 온도 분포를 나타낸 것으로, 모의된 월 평균 지표 2m 온도는 5월-8월에 각각 12.2, 16.1, 18.0, 17.6° C를 나타내고 있다. 7월의 최대값은, ERA-interm 자료를 활용한 분석 결과와 동일한 결과를 제시하고 있다 (Maine 대학의 Climate Change Institute, <http://cci-reanalyzer.org/>). 또한, 본 모델링으로부터 모의된 2m 온도의 공간적 분포 검증에 위해, Maine 대학의 Climate Change Institute (CCI)에서 ERM-interim 자료를 분석한 결과를 제시하였다 (Fig. 8). 본 모델링 결과와 CCI에서 제시한 결과와 공간적 분포와 값 범위가 유사함을 알 수 있다. 본 연구에서는 해빙 (sea ice) 지표 정보를 이용하여 개선한 모델링과 기본 설정된 (default) 모델링으로부터 모의된 2M 지표온도 차이를 Fig. 7(하)에 제시하였다. 2008년 5월 북극지역 해안선을 따라 약한 양의 bias를 나타내고 있으나, 6월과 7월에 양의 bias가 점차 증가하고 있고, 8월에는 북극뿐만 아니라, 북반구 전 대륙에서 1° C 이하의 양의 bias를 나타내고 있다.

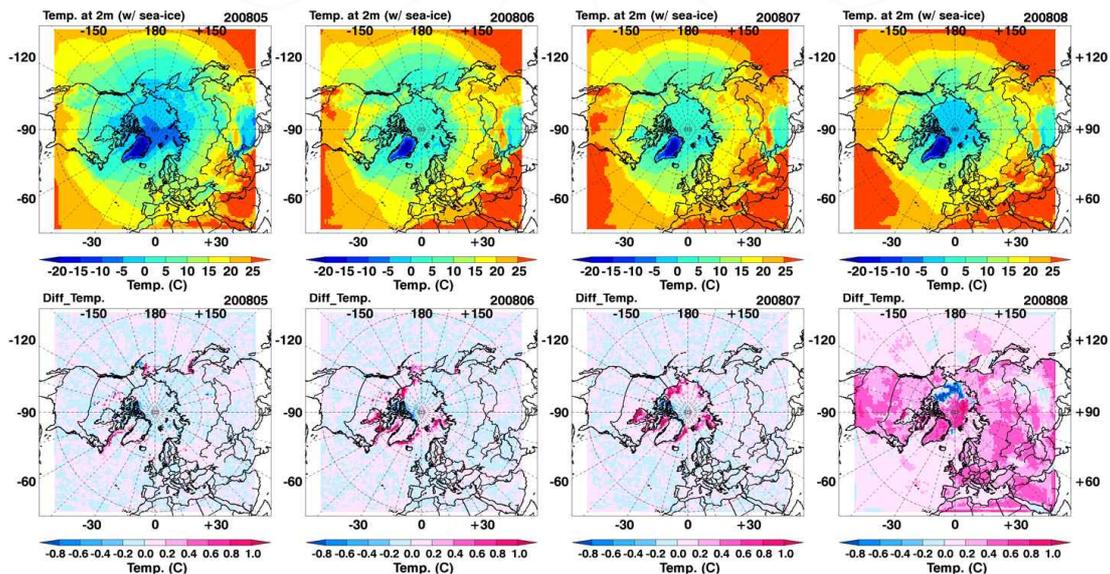


Fig. 7. Monthly 2m temperature with improved 24th land use (upper panel). The differences of the 2m temperature between improved 24th land use and default (bottom panel) for May – August 2008.

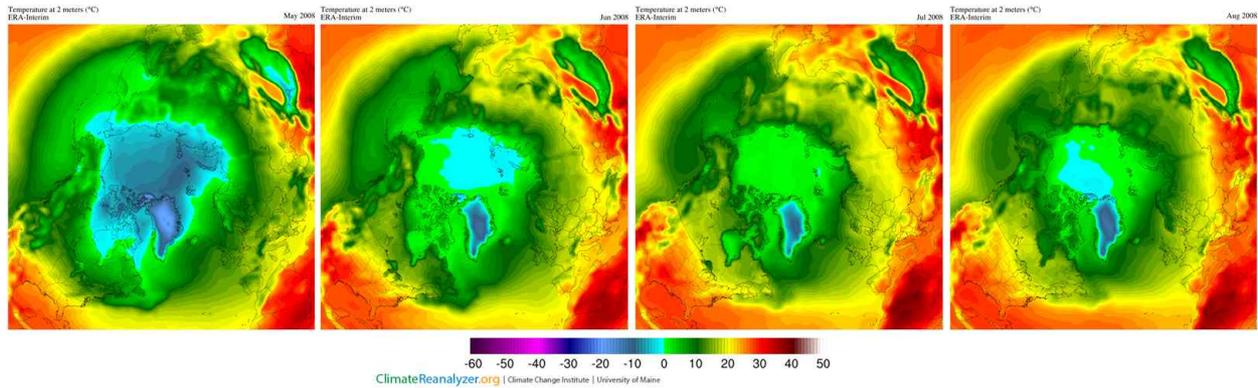


Fig. 8. As upper panel of Fig. 7 except for data of ERA-Interim obtained from Climate Change Institute.

다. 지상관측 기상자료를 이용한 비교 분석

본 연구의 기상모델링으로부터 모의된 지상관측 온도는 AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observing System), Quick Scatterometer (QuickSCAT), WMO (World Meteorological Organization) 통합 등록 자료 (AMSR-E/QuickSCAT/WMO)의 지상 일평균 온도 자료와 비교하였다 (<http://nsidc.org/data/NSIDC-0450>). 관측망에 따라 1일 4회에서부터 24회까지 관측횟수가 차이는 있으나 (관측시간 정보 없음), 기상 모델링의 결과는 매 시간 자료를 평균하여 일평균 자료를 생성하였다. 기상 모델링 기간인중 위도 65도 이상 관측 측정소를 대상으로 해당 자료를 추출하였다.

본 연구에서 모델링 결과의 신뢰도를 파악하기 위하여, 모델링 격자 내에 해당되는 관측지점의 관측값을 모델 모의된 지표 2M온도와 비교하였다. Fig. 9는 WRF 모의된 지표 2M 온도와 101개 WMO 관측지점에서 관측된 월 평균값의 공간 분포를 비교한 것으로, 대부분의 관측값이 모델 모의된 값과 유사한 범위 내에 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 보다 정교한 비교를 위하여, 지표 2M 온도의 일변화를 분석하여 Fig. 10에는 101개의 해당 관측지점 중 지역별 분포를 고려하여 대표적인 20개 측정소의 관측 결과만을 비교하여 제시하였다. 정량적인 분석을 위하여, IOA (Index of Agreement), 상관계수 (R), ME (Mean Error, °C), MNGE (Mean Normalized Gross Error, %), MB (Mean Bias, °C), MNB (Mean Normalized Bias, %) 등의 통계변수가 활용되었다. 일부 관측지점을 제외하고 대부분 지점에서 상관계수 (R)와 IOA는 0.8 이상의 좋은 관련성과 높은 일치도를 보이고 있다. Fig. 10에 관측지점 ID 042020 (No. 37)와 ID 043390 (No. 39)에서 관측된 지표 2M 온도와 WRF 모의된 값은 5월과 6월에는 유사한 패턴과 값을 나타내고 있으나, 7월과 8월에 WRF 값이 과소모의 하고 있다. 그린란드에 해안선에 인접한 이 두 관측지점의 해당하는 모델링 영역은 관측지점에 비하여 상당히 넓은 지역을 균질한 값으로 가정한 값으로, 해당 격자에서는 해당 지역의 그린란드 내륙을 포함하기 때문에 이런 차이가 발생하는 것으로 판단된다. 모든 관측지점을 대상으로 수행된 통계분석 결과, IOA를 기준으로, 관측지점의 76% (상관계수 기준 63%)는 IOA가 0.8이상을 나타내고 있다. ME는 대략 2~3° C, MB는 -1~-2° C의 값을 나타내고 있다. 전반적으로, WRF 모델링은 지표 2M의 온도를 다소 낮게 모의하는 경향이 있으나, 관측값의 변화를 잘 모의하고 있는 것으로 판단된다.

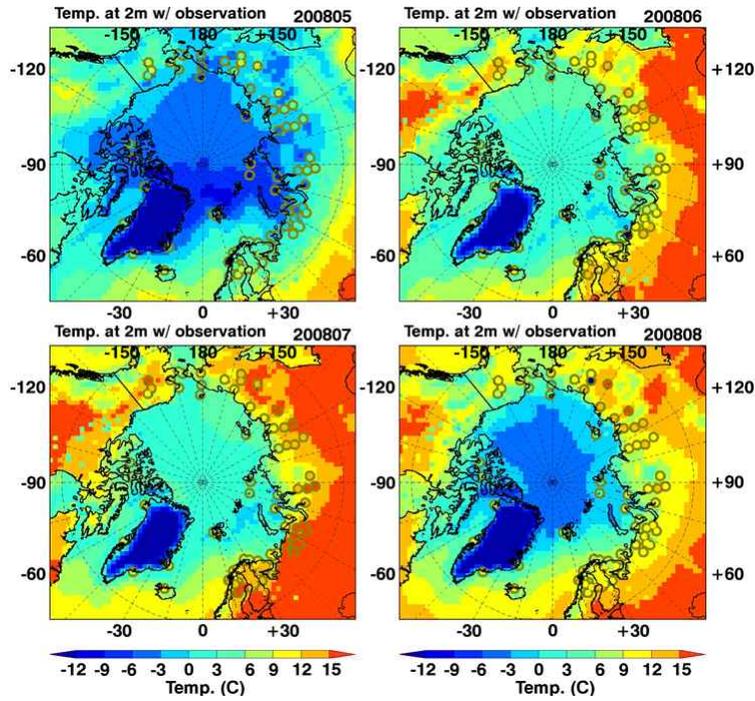


Fig. 9. WRF simulated and WMO observed (O) 2m temperatures.

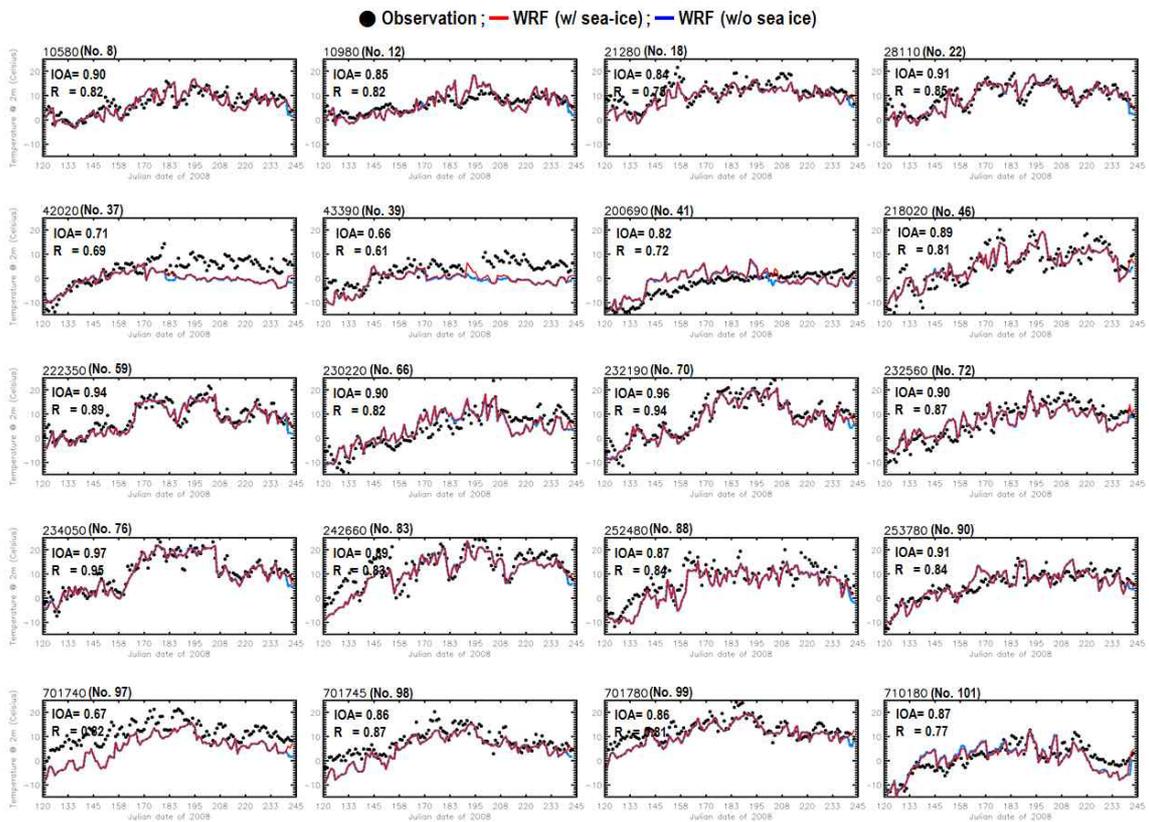


Fig. 10. time-series of modeled and observed 2m-temperatures.

(3) CMAQ 모델링 시스템 구성

가. CMAQ 모델링 수행 조건

CMAQ 모델링의 수행절차는 Fig. 3에 도식화하였다. 본 모델구동은 Fig. 2와 같이 두 개의 도메인 (D1, D2)을 대상으로 모델을 구동하였다. D1 도메인은 북반구 주요 오염원을 포함하고 수평격자 간격은 54km×54km (137개 × 137개)로, 대략 7400km × 7400km의 공간적 범위를 포함하고 있다. 상당히 넓은 범위인 D1 도메인을 대상으로 지역규모 모델인 CMAQ을 이용하여 구동한 것은, 도메인 D2를 대상으로 모델링을 수행하기 위한 경계조건 (BC)을 추출하고자 함이고, 본 연구는 북극지역 D2 도메인을 중심으로 분석이 수행되었다. D2 도메인의 수평격자 간격은 각각 18km×18km (109개×109개). 본 연구에서 수행된 모델링은 북극지역을 중심으로 수행되기 때문에 도메인에 적용된 투영법은 ‘Polar stereograph ‘이고, 이 투영법은 배경자료 추출을 위한 CMAQ v5.1의 BCON 프로세스가 지원되지 않기 때문에 본 연구에서는 화학종별, 시간별, 연직 층별로 자료를 추출하여 배경조건 자료를 독립적으로 생성하였다. 본 모델링의 연직격자는 sigma level을 기준으로 1.00, 0.995, 0.980, 0.970, 0.955, 0.930, 0.910, 0.890, 0.820, 0.740, 0.660, 0.570, 0.480, 0.390, 0.300, 0.200, 0.100, 0.0과 같이 설정하여 지표로부터 상층부까지 총 17개 층으로 구분하였다. 본 모델링에 적용된 scheme은 수평이류와 연직이류는 각각 YAMO와 WRF이고, 수평확산과 연직확산은 각각 multiscale과 acm2 scheme이 고려되었다. 기체상 화학으로는 최근 CMAQ 모델에 지원된 SAPRC-07을 적용하였고 (Carter, 2010), 에어로솔 계산을 위해서는 AERO6 최신 모듈이 적용되었다.

본 모델링에 적용된 배출량 자료는 MACCity 혹은 MACC/CityZen EU Project (Lamarque et al., 2010), ECLIPSE V4a (Klimont et al., 2013; Höglund-Isaksson, 2012), MEGAN-MACC (Sindelarova et al., 2014), GFED3 (Van der Werf et al., 2010) 등의 인벤토리로부터 확보하였고, 이들이 제공하는 시간 및 공간해상도와 화학종은 Table 2에 나타내었다. Fig. 11에는 2008년 1월과 7월에 대한 NO_x, SO₂, PM₁₀ 및 CO 배출량의 공간적 분포를 시각화하였다. 이 자료에는 선박으로부터 배출되는 NO_x와 SO₂가 포함이 되어 있고, 계절에 따른 선박의 이동 경로가 명확하게 구분되고 있다. 이들 인벤토리가 선박배출량에 대한 불확실성은 높으나, 노르웨이 해 주변을 이동하는 선박으로부터 배출되는 오염물질에 대한 배출량도 소량으로 확인되고 있다.

본 연구에 적용된 CMAQ v5.1은 대기광화학, 이류 프로세스, 대기-지표 간 상호작용 (air-surface exchange) 등이 개선되었다. 대기광화학 관점에서, ClNO₂의 비균질 반응을 통한 생성 및 ClNO₂ 대기화학 추가되었다. ClNO₂의 비균질 생성은 겨울과 여름철에 모두 발생되지만, 겨울철에 더욱 명확하게 발생하며, 이 반응을 추가함으로써, 질산염 농도는 감소하나 오존의 농도가 증가된 것으로 보고되었다 (Sarwar et al., 2012; 2014). 또한, 해양의 요오드화물 (iodide)과의 반응에 기인한 오존의 화학적 소멸 고려하기 위해 오존의 건식침적 속도를 조절하였고 고려하였고, 이 영향으로 인한 오존의 농도는 대략 5ppbv 정도 감소된 것으로 보고되고 있다. 이 소멸상수는 식 1과 같다 (Sarwar et al., 2015). 그 이외에도 isoprene, alkanes, PAHs로부터 SOA 생성경로가 추가 되었다.

$$k_{O_3}(P) = 1.0000 \times 10^{-40} e^{7.7400 \times 10^{-4} \times P} + 4.0582 \times 10^{-9} e^{5.7451 \times 10^{-5} \times P} \quad (1)$$

Table 2. Emission inventories employed in the CMAQ model simulation

구분	배출인벤토리 (대상년도)	시간 해상도	공간 해상도	화학종
인위적인 배출물질	MACCity (2008)	month	0.5°	acetone, BC, butanes (& higher alkanes), butenes (& higher alkenes), CO, ethane, ethene, HCHO, methanol, NH ₃ , NO _x , OC, other alcohols, other aldehyde, other ketones, propanes, propenes, SO ₂ , aromatics
	ECLIPSE_GAINS (2010)	year	0.5°	CH ₄ , OM, PM _{2.5} , PM ₁₀
식생 배출물질	MEGAN-MACC (2008)	month	0.5°	acetaldehyde, acetic acid, acetone, butanes (& higher alkanes), butenes (& higher alkenes), CH ₄ , CO, ethane, ethanol, ethaene, HCHO, formic acid, isoprene, methanol, mono-terpene, other aldehyde, other ketones, propane, propene, sesquiterpenes, toluene
산불발생 배출물질	MACCity (2008)	month	0.5°	acetylene, BC, benzene, butanes, CH ₄ , chlorinated hydrocarbon, CO, DMS, ethane, ethene, ethers, HCHO, hexanes (& higher alkanes), isoprene, mono-terpene, NH ₃ , NO _x , OC, other aldehydes, other alkenes & alkynes, other aromatics, other VOCs, pentanes, propane, propene, SO ₂ , toluene, total acids, total alcohols, total ketones, xylene
	GFED3 (2008)	month	0.5°	PM _{2.5} , TPM

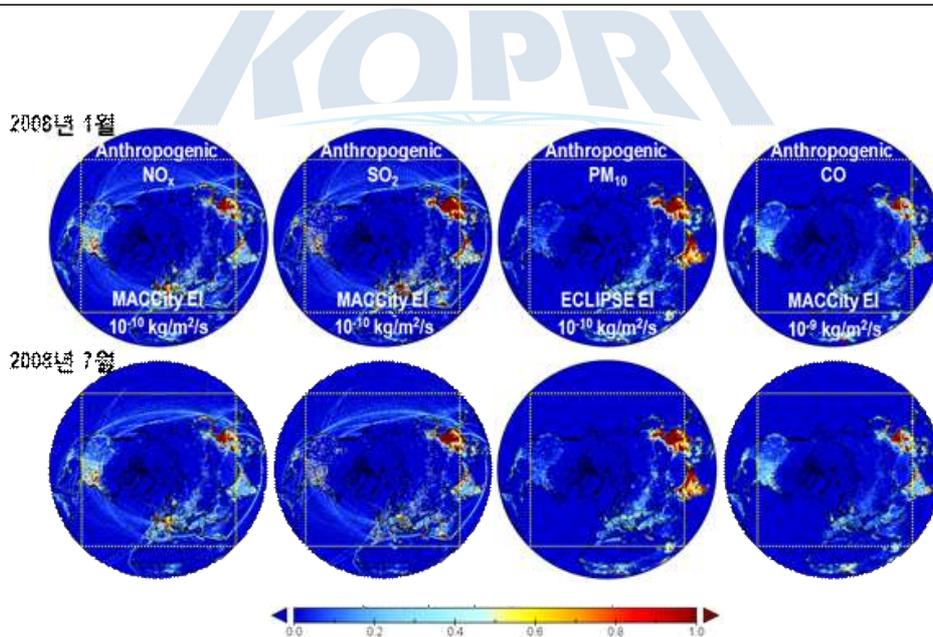


Fig. 11. Spatial distributions of NO_x, SO₂, PM₁₀ and CO for January and July 2008.

2) 북극 대기질 모델링 시스템 활용

(1) 북극권 기체상 물질의 시공간적 분포

가. 위성관측 대류권 NO₂ 총적분 농도 자료 산출

NASA의 EOS-Aura 플랫폼에 탑재된 OMI는 대기를 통과하여 대기에서 산란되거나 지표에서 반사되는 자외선과 가시광선을 관측하는 초분광 센서로서, 남극 및 북극의 양극을 따라 하루 14-15회 회전하며 전구 대기를 관측한다. OMI에서 관측된 radiance 자료는 산출알고리즘을 거쳐 대기중 에어로솔 광학적 두께 (AOD)와 O₃, NO₂, SO₂, HCHO 등 기체상 총적분 농도 자료를 제공한다.

OMI 센서의 NO₂ 총적분 농도 자료의 경우 NASA/OMNO2 알고리즘을 이용한 standard product (Bucsela et al., 2006)와 KNMI (네덜란드 기상청)의 DOMINO 알고리즘을 이용한 DOMINO product (Boersma et al., 2011), 그리고 동일 기관에서 최근에 개발한 QA4ECV v1 product로 구분된다. 이들 알고리즘은 기본적으로 차등흡수분광법 (DOAS, Differential Optical Absorption Spectroscopy)에 기초한 것으로 이는 태양광이 어떤 매질 (즉, 대기)를 통과할 때 파장에 의존하여 흡수가 일어나는 원리를 이용한 것이다. 앞서 소개한 이 알고리즘은 서로 상호 유사한 결과를 제공하지만, 대류권-성층권 간 분리하는 방법, 알고리즘에 적용되는 대기화학모델, AMF 계산 등에서 다소 차이를 나타낸다. 본 연구에서 네덜란드 기상청에서 개발한 DOMINO v2.0 알고리즘으로부터 제공되고 일간 대류권 NO₂ 총적분 농도, 에러 및 AK (Averaging Kernel) 수직분포 정보를 TEMIS 포털에서 확보하였고 (www.temis.nl), 이들 자료를 이용하여 모델로부터 산출된 NO₂ 총적분 농도 자료와 비교하였다.

DOMINO v2.0 알고리즘을 이용한 대류권 NO₂ 총적분 농도 산출은 다음과 같은 3단계 과정을 거친다.

- 1단계: 경사총적분 농도 (slant NO₂ columns)는 DOAS 기법을 이용한 스펙트럼 피팅 (fitting)을 통해 결정됨.
- 2단계: TM4 전구 대기화학모델을 통해 성층권 기여도를 제거하여 대류권 경사 총적분 농도를 산출 (tropospheric slant NO₂ column)
- 3단계: 대기질량인자 (AMF, Air Mass Factor)를 이용하여 경사 총적분 농도 (SCD)를 수직 총적분 농도 (VCD)로 전환.

대기질량인자, AMF는 식 2와 같이 정의되고, 지표반사도, 위성의 관측지점, 구름, 에어로솔, 기체상 물질의 수직농도 분포 등에 의해 결정된다.

$$AMF = \frac{SCD}{VCD} \quad (2)$$

자료의 불확실성을 최소화하기 위하여, 지표반사도가 0.3보다 큰 자료와 CRF (Cloud Radiance Fraction)가 50% 이상인 자료는 모두 제거하였다 (Boersma et al., 2011). Fig. 12는 지표반사도 및 CRF를 기준에 따라 filtering한 전후의 NO₂ 총적분 농도의 공간적 분포를 나타낸 것인데, 자료를 filtering 함에 따라 눈과 빙하로 덮여 있는 지역 (예, 그린란드 및 북극해)의 자료가 모두 제거된 것을 확인할 수 있다.

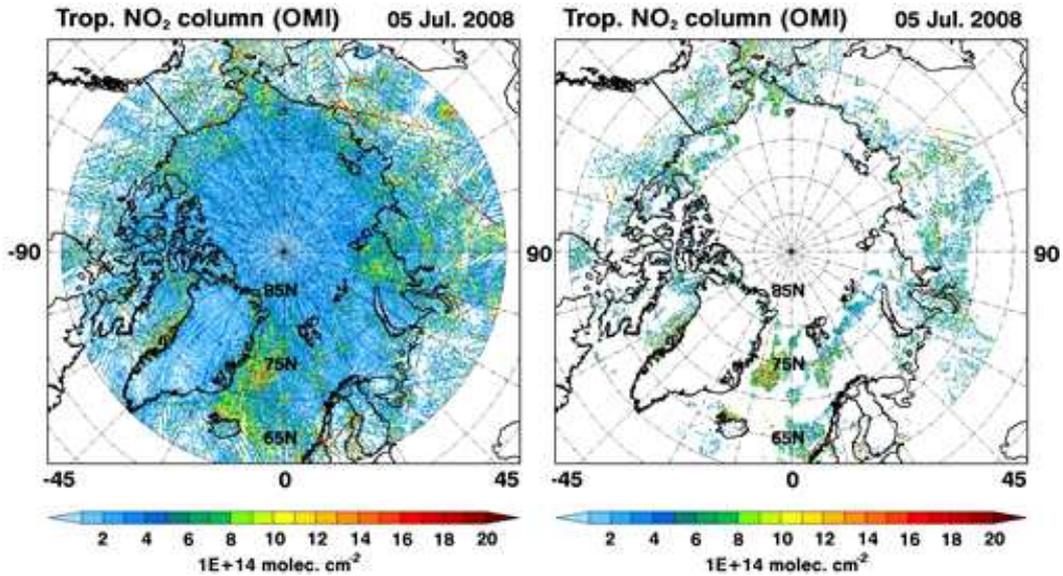


Fig. 12. Spatial distributions of tropospheric NO₂ columns depending on whether data a) is not and b) is filtered according to surface albedo and CRF (on 5 July 2008).

나. 대기화학모델링으로부터 NO₂ 증적분 농도 산출

모델링으로부터 대류권 NO₂ 증적분 농도는 모델로부터 모의된 각 층별 NO₂ 농도 (단위: molecules cm⁻³)에 각 층별 높이를 곱하여, 대류권에 대한 molecules 수를 연직 적분하여 산출한다 (Fig. 13, 식 3-5).

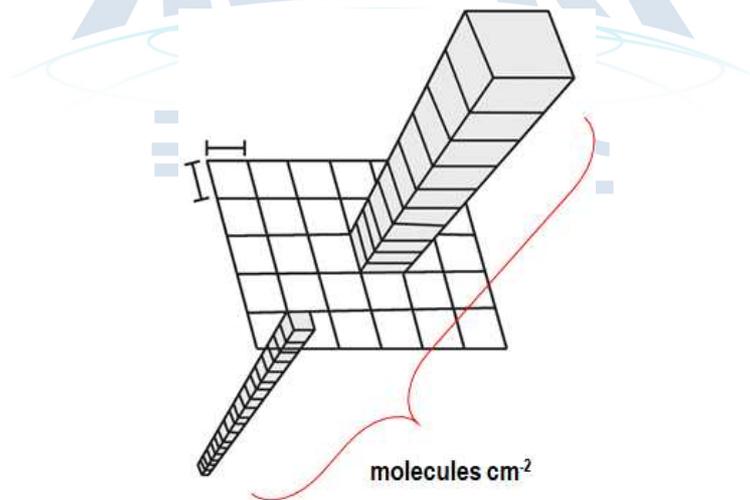


Fig. 13. Concept for the calculation of columnar NO₂.

$$VCD = \frac{m_R(ppm)}{10^6} \times n_0 \quad (\text{단위: molecules cm}^{-3}) \quad (3)$$

$$n_0 = \frac{P}{R \cdot T} \quad (4)$$

$$VCD = \sum_{i=0}^{10km} \frac{m_R}{10^6} \times \frac{L_T \cdot P \cdot N_A}{R \cdot T} n_0 \quad (5)$$

여기에서 m_R , n_0 , P , R , T , L_T 는 NO₂ 농도, NO₂ molecules 수, 압력, 이상기체상수, 온도, 층별

고도를 나타낸다. 위성관측 NO₂ 증적분 농도와 모델모의 NO₂ 증적분 농도의 직접 비교를 위해 averaging kernel (AK)를 적용하는 것이 필요하고 (Han et al., 2015), AK는 미량기체 수직분포에 대한 위성관측의 민감도를 나타내는 것으로 식 6과 같이 정의된다. 여기에서 x 는 대기 중 실제값이고, \tilde{x} 는 위성으로부터 측정된 산출값이다.

$$AK = \frac{\partial \tilde{x}}{\partial x} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \tilde{x} &= AK \cdot x + error \\ &= \frac{S}{M(x_a, b)} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} AK &= M(x_a, b)^{-1} \frac{\partial S}{\partial x} \\ &= M(x_a, b)^{-1} m \end{aligned} \quad (8)$$

AK는 식 6 - 식 8을 통하여 계산되고, M은 대기질량인자 (AMF), S는 경사 증적분농도, x_a 는 가정된 NO₂ 분포, b는 모델변수, m은 산란가중치 (scattering weight) 이다. AK는 지표부근에서 1보다 낮은 값을 나타내는데, 지표에 대한 OMI 센서의 관측감소가 낮음을 의미하고, 고층 대기에서는 1보다 높은 값을 나타내어 OMI 센서의 관측감도가 높음을 의미한다.

다. 북극지역 NO₂ 증적분 농도의 시공간 분포

북극권 지역에 대하여 OMI 센서에서 관측된 그리고, CMAQ 모델 모의된 대류권 NO₂ 증적분 농도의 시공간적 월 평균 농도를 분석하였고, Fig. 14는 이들 두 NO₂ 증적분 농도간 차이를 나타낸 것이다. CMAQ 모의된 NO₂ 증적분 농도는 위성이 관측한 시공간적 정보와 동일하게 할당하였고, 동시에 AK 정보를 반영하여 산출하였다. Fig.과 같이 겨울철의 경우, NO₂ 관측영역이 감소되었다. 예를 들어 1월과 12월은 관측영역이 해당 도메인에서 1% 이내이고, 여름철의 경우, 최대 70%의 관측영역을 나타내고 있다 (Fig. 15). 이것은 지표반사도의 의한 영향으로 (Fig. 12 참조), 여름철 기온의 증가로 해빙의 범위 감소에 기인한 것이다.

위성 관측된 NO₂ 증적분 농도는 북극권 (70° N 이상 범위)에서 최대 $\sim 5 \times 10^{14}$ molecules cm⁻²이고, 6 - 8월 스발바르-그린란드 혹은 스발바르-아이슬란드 간, 그리고 노르웨이 해안, 러시아 북부 해산에서 비교적 높은 농도를 나타내고 있다. 이들 지역에서 상대적 높은 농도는 6-8월 비교적 따뜻한 기온으로 인해 해빙이 감소되면서 선박이 이동량이 증가된 것에 기인하는 것으로 추정된다.

세부적인 분석을 위하여 4개 지역 (a: Svalbard, b: Iceland, c: Norwegian sea, d: Gulf of Bothnia)으로 구분하였다. 월간 NO₂ 증적분 농도는 Svalbard, Iceland, Norwegian sea에서 1.3×10^{13} - 1.8×10^{14} molecules cm⁻², 스웨덴과 핀란드 사이 Gulf of Bothnia에서는 5월에 1.66×10^{15} molecules cm⁻²의 최고값을 보이고, 월평균은 1.2×10^{14} - 1.0×10^{15} molecules cm⁻² 범위를 나타내었다.

CMAQ 모델된 NO₂ 증적분 농도는 북유럽 및 러시아 대륙에서 북극점으로 갈수록 대체적으로 감소하는 경향을 나타내고, 모델 모의된 NO₂ 증적분의 농도가 북유럽 지역에서 (특히, 가을 및 겨울철에) 과대 모의되었고, 여름철 북극해의 해안선을 따라 대체적으로 과소 모의된 경향을 나타낸다 (Fig. 14).

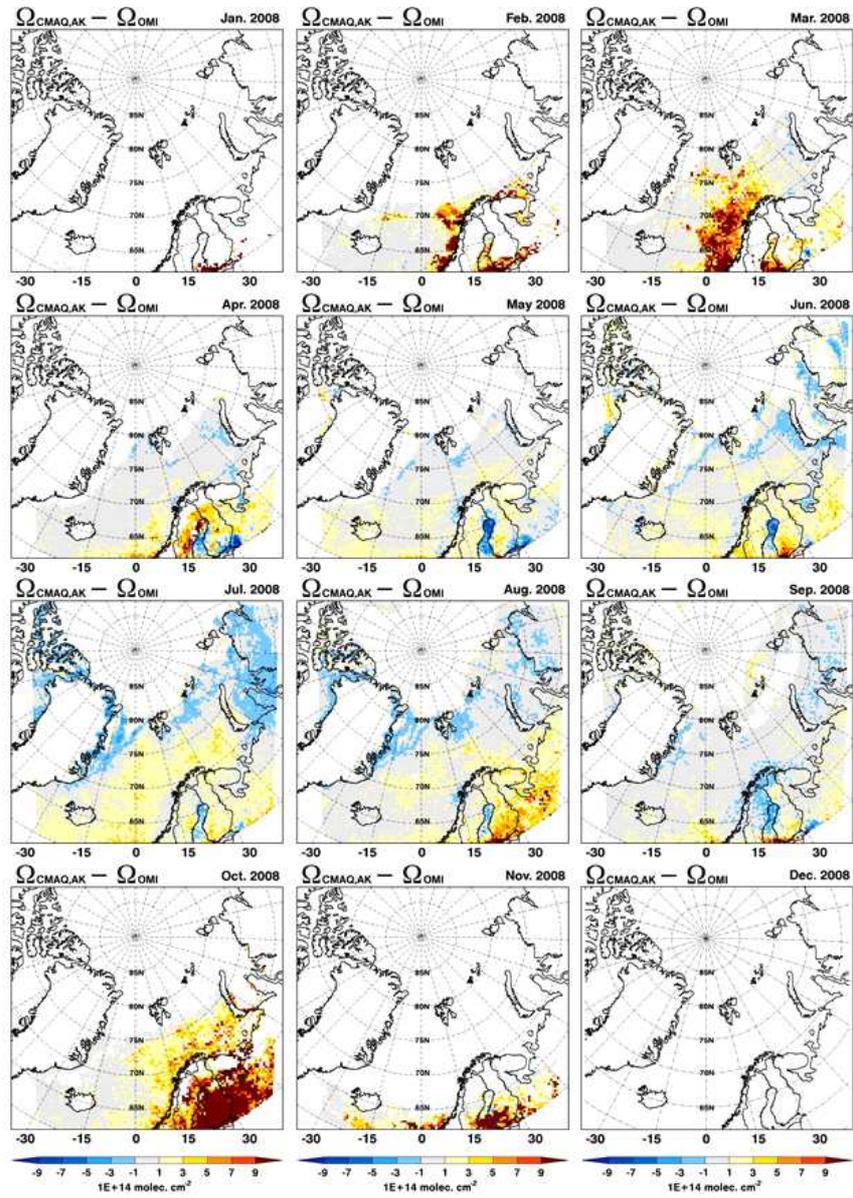


Fig. 14. Monthly differences between the CMAQ-simulated and OMI-observed NO₂ columns.

북유럽 지역에 대한 CMAQ 모델의 과대모의는 북유럽 지역의 NO_x 배출량과 해당 도메인의 외부 경계조건으로부터 유입되는 NO_2 의 과대 산정된 것으로 추정된다.

Fig. 16과 Table 3에 4개 분석 대상 지역에 대한 월평균 NO_2 증적분 농도 월변화를 분포를 나타낸 것이다. OMI 관측과 모델모의 간 NO_2 증적분 농도의 월변화가 Gulf of Bothnia 지역에서 (특히, 겨울철에) 다소 차이를 보이고 있으나, 그 외 Svalbard, Iceland, Norwegian Sea에서 매우 유사한 경향을 나타내고 있다. OMI 관측된 NO_2 증적분 농도의 월간 변화는 1월부터 점차 증가하여, 여름철에 최대값을 나타낸 후 점차 감소하는 경향이 있다. 이러한 원인은 여름철 빙하감소에 따른 선박 운항 증가로 선박에 의한 NO_x 배출량 증가와 중위도로부터 장거리 유입된 PAN이 여름철 온도 증가로 열분해 되어 (식 9), 대기 중으로 NO_2 가 공급되기 때문으로 추정된다.

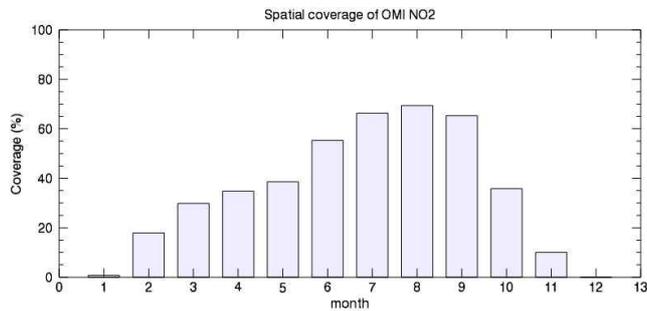


Fig. 15. Monthly spatial availability of OMI-observed NO_2 column for the entire domain (%).

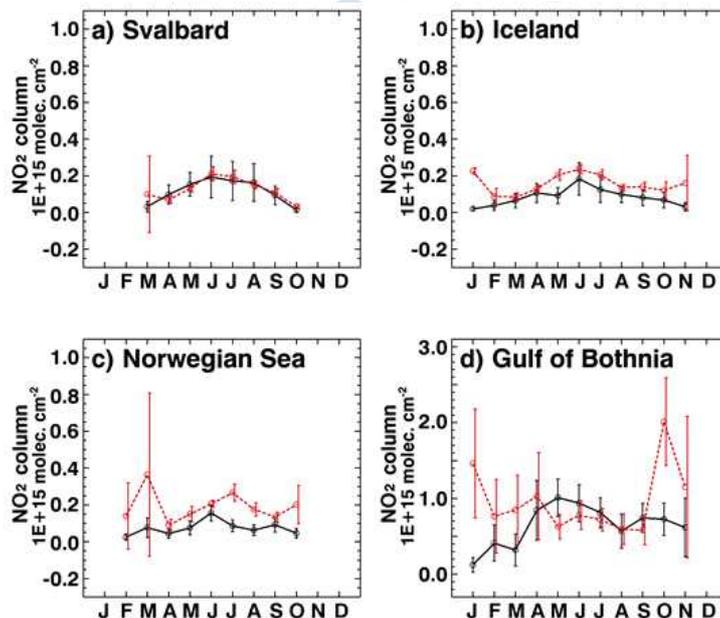


Fig. 16. Monthly variations of NO_2 columns from CMAQ simulation (red lines) and OMI observation (black lines) over a) Svalbard, b) Ice land, c) Norwegian Sea, and d) Gulf of Bothnia.

Table 3. Tropospheric NO₂ columns by regions and their statistical analysis from CMAQ simulation and OMI observation

Region	Month	N. of data	$\Omega_{\text{CMAQ,AK}}^*$	Ω_{OMI}^*	ME ^{*,1)}	MB ^{*,2)}	R ³⁾
Svalbard	200801	Nan	Nan	Nan	Nan	Nan	Nan
	200802	Nan	Nan	NaN	NaN	NaN	NaN
	200803	123	9.91E+13	3.16E+13	7.47E+13	-6.75E+13	0.21
	200804	136	6.90E+13	9.73E+13	4.66E+13	2.84E+13	0.14
	200805	117	1.29E+14	1.53E+14	5.37E+13	2.36E+13	0.33
	200806	145	2.11E+14	1.94E+14	9.15E+13	-1.75E+13	0.13
	200807	197	1.95E+14	1.72E+14	9.49E+13	-2.26E+13	-0.03
	200808	219	1.50E+14	1.63E+14	8.66E+13	1.36E+13	0.12
	200809	225	1.08E+14	9.39E+13	4.09E+13	-1.42E+13	0.26
	200910	9	3.24E+13	1.32E+13	2.25E+13	-1.92E+13	-0.62
	200811	Nan	Nan	Nan	Nan	Nan	Nan
	200812	Nan	Nan	Nan	Nan	Nan	Nan
Iceland	200801	2	2.25E+14	1.89E+13	2.06E+14	-2.06E+14	Nan
	200802	163	8.70E+13	3.83E+13	5.24E+13	-4.87E+13	-0.05
	200803	173	8.46E+13	6.50E+13	3.64E+13	-1.96E+13	0.23
	200804	191	1.28E+14	1.07E+14	4.42E+13	-2.07E+13	0.15
	200805	231	2.05E+14	9.25E+13	1.12E+14	-1.12E+14	-0.11
	200806	250	2.36E+14	1.83E+14	8.17E+13	-5.29E+13	0.36
	200807	250	2.06E+14	1.25E+14	9.13E+13	-8.09E+13	0.31
	200808	250	1.36E+14	9.81E+13	4.71E+13	-3.80E+13	0.24
	200809	248	1.39E+14	8.07E+13	6.41E+13	-5.86E+13	0.00
	200910	191	1.20E+14	6.79E+13	6.02E+13	-5.25E+13	-0.10
	200811	103	1.60E+14	3.13E+13	1.29E+14	-1.29E+14	0.13
	200812	Nan	Nan	Nan	Nan	Nan	Nan
Norwegian Sea	200801	Nan	Nan	Nan	Nan	Nan	Nan
	200802	136	1.40E+14	2.55E+13	1.14E+14	-1.14E+14	0.33
	200803	255	3.64E+14	7.67E+13	2.91E+14	-2.88E+14	0.37
	200804	255	9.07E+13	4.43E+13	4.77E+13	-4.63E+13	0.35
	200805	256	1.50E+14	7.58E+13	7.55E+13	-7.46E+13	0.43
	200806	256	2.06E+14	1.56E+14	5.79E+13	-4.98E+13	-0.06
	200807	256	2.67E+14	8.59E+13	1.81E+14	-1.81E+14	-0.16
	200808	248	1.76E+14	6.33E+13	1.13E+14	-1.12E+14	0.11
	200809	255	1.33E+14	9.30E+13	4.74E+13	-4.00E+13	0.20
	200910	251	2.02E+14	4.64E+13	1.56E+14	-1.56E+14	0.13
	200811	Nan	Nan	Nan	Nan	Nan	Nan
	200812	Nan	Nan	Nan	Nan	Nan	Nan
Gulf of Bothnia	200801	8	1.46E+15	1.23E+14	1.34E+15	-1.34E+15	-0.52
	200802	75	7.65E+14	4.12E+14	3.74E+14	-3.53E+14	0.65
	200803	60	8.47E+14	3.21E+14	5.28E+14	-5.26E+14	0.54
	200804	90	1.03E+15	8.45E+14	5.10E+14	-1.81E+14	-0.41
	200805	96	6.27E+14	1.01E+15	4.13E+14	3.83E+14	0.17
	200806	96	7.80E+14	9.37E+14	2.25E+14	1.58E+14	0.37
	200807	96	7.20E+14	8.12E+14	1.53E+14	9.21E+13	0.61
	200808	96	5.94E+14	5.69E+14	1.68E+14	-2.46E+13	0.50
	200809	96	5.82E+14	7.43E+14	2.58E+14	1.61E+14	0.09
	200910	93	2.01E+15	7.27E+14	1.28E+15	-1.28E+15	0.18
	200811	80	1.15E+15	6.18E+14	5.86E+14	-5.31E+14	0.74
	200812	Nan	Nan	Nan	Nan	Nan	Nan

* unit: molecules cm⁻²; ¹⁾ Mean Error; ²⁾ Mean Bias ; ³⁾ Correlation coefficient

(2) 북극권 입자상 물질의 시공간적 분포

2008년 기간을 대상으로 수행된 CMAQ 모델과 MODIS 위성센서로부터 산출된 입자상 물질 분포 특성을 분석하고자 하였다. 북극지역의 경우, 구름 및 눈으로 덮여 있는 해빙으로 인한 지표 반사도 증가되고, 이로 인해 위성 관측 자료 산출에 많은 불확실성이 증대되고, 자료 손실이 많아진다. 반면, 모델 모의된 자료는 3차원 공간에 대한 연속적 자료를 제공할 수 있는 장점이 있으나, 대기질 모델 자체의 성능 및 입력자료의 불확실성으로 인해 관측결과와 비교하여 자료의 정확도가 낮은 것으로 알려져 있다. 본 연구는 위성관측 및 모델링의 단점을 극복하고 장점을 그대화하기 위하여 자료동화 기법을 이용하여 북극지역의 입자상 물질의 분포 특성을 살펴보고자 하였다. 본 연구를 위한 공간적 분석범위는 Fig. 17과 같다.

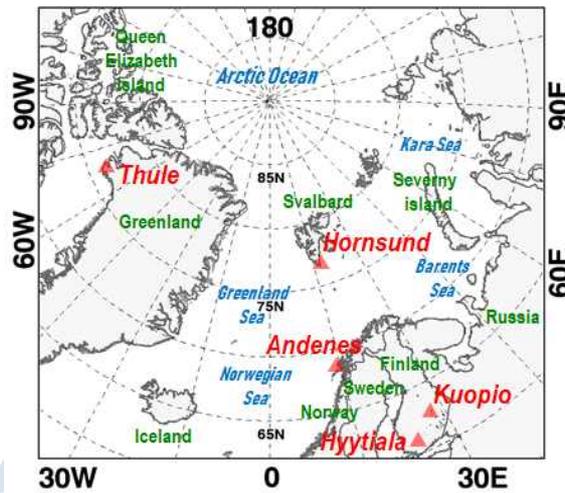


Fig. 17. Analysis scope of the study and AERONET monitoring stations.

가. 위성관측 에어로솔 광학적 두께 (AOD) 자료

Terra 및 Aqua 위성의 EOS 플랫폼에 탑재된 MODIS 센서의 임무는 구름과 눈이 없는 내륙과 해양에 대한 에어로솔의 광학적 특성 (AOD), Angström 지수, 구름과 눈위의 단일 산란 알베도와 같은 층적분 농도와 에어로솔의 특성들을 포착하는 것이다. MODIS/Terra는 지역 시간 10시 30분에 적도를 지나면서 하강궤도로 대기를 관찰하고, MODIS/Aqua는 지역시간 13시 30분에 적도를 가로 질러 북쪽으로 향한다. 특히, MODIS 센서에 의해 관측된 연직 에어로솔 소멸 (AOD, τ_{MODIS})는 3차원 대기화학 모델의 성능을 평가하고 모델 계산된 AOD의 자료동화를 수행하는데 활용된다 (Generoso et al., 2007; Song et al., 2008; McHenry et al., 2015). 이러한 연구 목적으로 NASA LAADS (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search>)로부터 Terra 위성 (MOD04_L2)의 일간 자료 (Level2 AOD)를 확보하였다. AOD 산출물은 NASA Collection 6 알고리즘 (C006)으로부터 550 nm 파장에서 산출되었다. MODIS로부터 관측된 자료는 구름에 의한 방해되는 픽셀을 제거하고, 지표 반사도를 고려하는 등 전처리를 한 후, 육지와 해양 등에 대한 각각의 산출 알고리즘이 적용된다. i) 가시광 영역에서 산출된 식생 및 어두운 토양을 대상으로 가시광 영역에서 산출되는 Dark Target (DT) 알고리즘 (Kaufman et al., 1997; Levy et al., 2013), ii) 가시광 영역에서 밝은 표면 (예: 사막)에 대한 Deep Blue (DB) 알고리즘 (Hsu et al., 2013), iii) 가시광 및 장파장 영역에서 수면에 대한 DT 알고리즘 (Levy et al., 2013; Tanré et al., 1997) 등이 포함된다.

AOD의 불확실성은 육지에서 $\pm(0.05 \pm 15\%)$, 해양에 대해 $-0.02 \pm 10\%$ 에서 $0.04 \pm 10\%$ 범위

로 보고되고 있다 (Levy et al., 2013). Levy et al. (2013)은 또한 AERONET에서 산출한 AOD (τ_{AERONET})와 비교할 때, τ_{MODIS} 의 69.4%가 에러에 해당한다고 보고하였다. 본 연구에서는 공간적으로 부족한 부분이 더욱 많이 채워진 자료 세트를 사용하기 위해 DT와 해양 및 육지의 DB를 결합 병합된 AOD 자료를 사용하였고 (“AOD_550_Dark_Target_Deep_Blue_Combined”), 이 자료는 공간적으로 최하지점에서 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ (swath의 가장자리에서 $48 \text{ km} \times 20 \text{ km}$)와 시간적으로 5분의 해상도를 가진다 (Levy et al., 2013; Sayer et al., 2014). MODIS에서 산출된 AOD의 해당 도메인의 모델격자 $15 \text{ km} \times 15 \text{ km}$ 로 전환하여 북극권 입자상 물질 분포 특성을 살펴보았다.

Fig. 18은 병합된 AOD 산출물의 월별 자료 가용성에 대한 시공간적 분포를 나타내는 것이다.

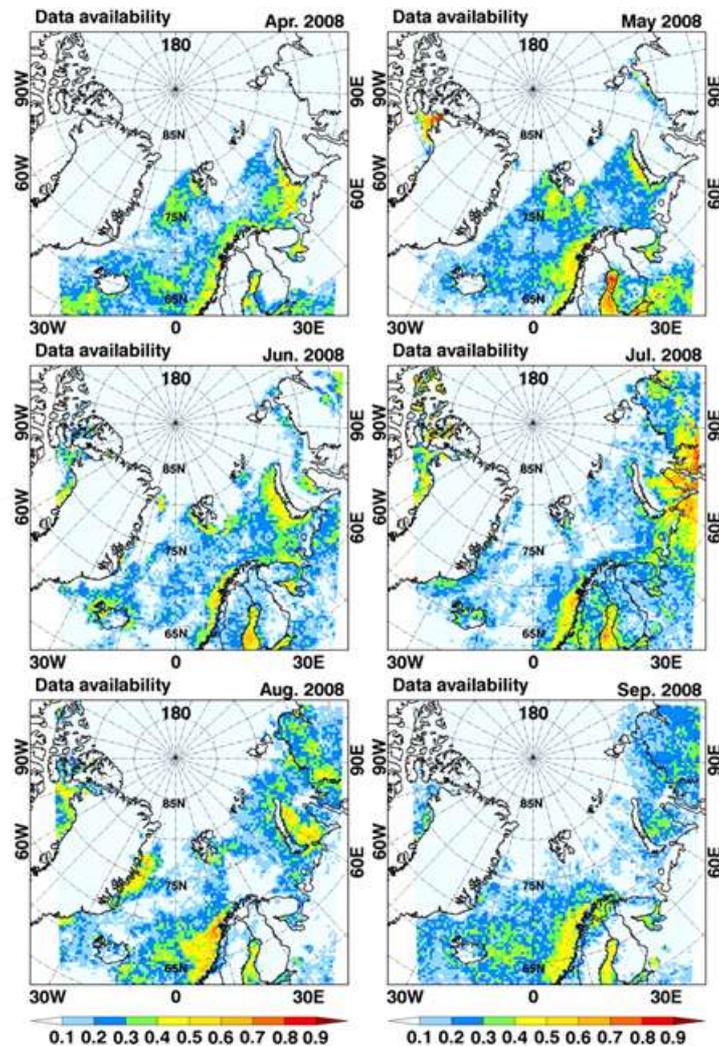


Fig. 18. Spatial map of the availability of the MODIS data.

예상할 수 있는 바와 같이, 북극해와 그린란드 지역은 눈 및 해빙에 기인한 높은 지표반사로 많은 수의 pixel이 누락되어 있다. 북극해 지역의 낮은 데이터 가용성은 계절에 따라 크게 차이를 나타내고 있다. 반면, 그린란드 해, 바렌츠 해, 노르웨이 해의 일부 지역에서는 30% 이상의 데이터 가용성이 확인된다 (Fig. 17 지명 참조).

이러한 결과는 북극해와 같이 지표반사도가 높은 지역에 대해 모델 및 위성 관측 AOD간

데이터 통합 혹은 자료동화의 필요성을 제시하는 것이고, 이를 통해 모델 예측과 위성관점의 결합을 보완하고 장점을 극대화할 수 있다.

Fig. 19는 2008년 3월 - 11월 기간에 걸쳐 MODIS 센서에서 관측된 북극권 지역 AOD의 시공간 분포를 나타낸 것이다. 1월-2월, 12월의 경우, 구름 및 눈으로 덮여 있는 해빙으로 인한 지표 반사도 증가로 모든 대상 지역의 대부분 pixel이 손실되어 본 대상에서 제외하였다. 위성 관측된 AOD의 계절변화는 북극권 haze 기간인 4월-5월에 명확하게 높은 결과를 나타내고 있다.

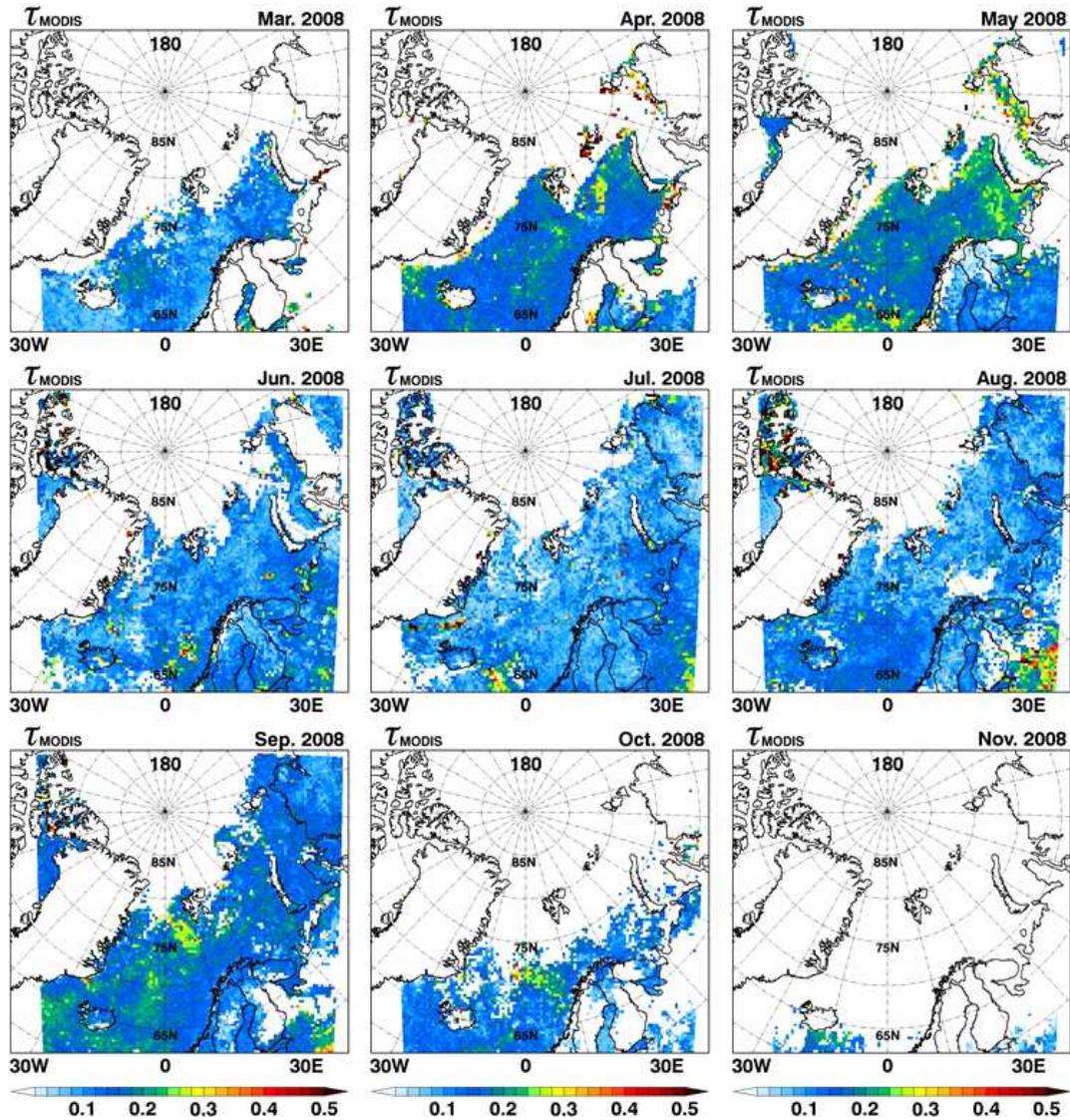


Fig. 19. Spatial distribution of the MODIS observed AOD over the Arctic for Mar.-Nov. 2008.

나. 지상관측 AERONET AOD 자료

C006 알고리즘으로 산출된 MODIS AOD 자료는 지상기반 태양광도계 (sun/sky-photometer) 전구 네트워크인 AERONET AOD (τ_{AERONET})로 검증되었다 (Holben et al., 1998). sun-photometer는 340, 380, 440, 500, 675, 870, 1020, 1640 nm의 8 채널에서 태양의 광도를 측정하고, 지표에서 측정된 이 태양광도는 지표반사의 영향을 받지 않기 때문에 참값으로 간주된다. 따라서 본 연구에서는 북극권 5개 AERONET 모니터링 사이트 (Hornsund, Thule, Andenes,

Kuopio, 및 Hyttiala, Fig. 17 참조)에서 활용 가능한 AOD 자료를 활용하여 모델 모의된, MODIS 관측된 및 자료동화된 AOD를 평가하였다. Fig. 17에서처럼, Thule, Hornsund, Andenes 는 해안에 인접해 있어 해당 지역의 AOD는 해염입자의 영향을 쉽게 받을 수 있다. 이에 반해, Kuopio 및 Hyttiala 관측소는 핀란드 내부에 위치하고 있어 해당 지역의 대기질은 인위적인 오염원에 쉽게 영향 받을 수 있다.

AERONET (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov>)에서 확보한 level 2.0 AOD 자료는 v3.0 산출 알고리즘을 따라 구름 제거, 자료 품질 처리된 자료이다 (Giles et al., 2019). 550 nm 파장의 AOD 는 MODIS와 동일하고, 식 10과 11로 계산된다.

$$\tau_{\lambda} = \tau_{\lambda_0} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-\alpha} \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{\text{Log} \frac{\tau_{\lambda_1}}{\tau_{\lambda_2}}}{\text{Log} \frac{\lambda_1}{\lambda_2}} \quad (11)$$

여기에서, λ 와 λ_0 는 550nm와 500nm의 파장을 각각 나타낸다. Angström 지수 (α)는 870nm (λ_1) 및 440nm (λ_2) 채널에서 계산된다 (Ruiz-Arias et al., 2013).

본 분석에서는 5개 AERONET 관측지점에 대한 τ_{AERONET} 과 τ_{MODIS} 간 월별 scatter plot과 통계분석을 수행하였고, 이를 위해 AERONET과 MODIS의 관측의 동기화를 위한 MODIS 자료는 10km 및 30분의 시공간 차이 이내에서 수집되었다. 전체자료에 대한 상관계수 (R) 및 IOA는 각각 0.73과 0.81이고, 특히, 4월과 8월에 더욱 좋은 관계를 나타내었다. 본 분석에서는 또한 AERONET과 MODIS AOD간 기울기는 따뜻한 계절에 특히 작은 값을 보였으며, 이것은 MODIS AOD가 과소 평가되었을 가능성이 있음을 의미하는 것이다. 따라서 과소 평가된 MODIS AOD는 자료동화된 AOD로부터 지표 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 산출에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서 AERONET AOD는 또한, 자료동화를 위한 free parameter 결정을 위해 사용되었다.

다. 모델모의를 통한 AOD 자료

복사 에너지는 에어로솔 산란 및 흡수에 의해 대기 중에서 감쇠된다. 감쇠는 소멸계수 ($\sigma_{\text{ext}} = \sigma_{\text{sct}} + \sigma_{\text{abs}}$, 단위: Mm⁻¹)로 표현되며, 이는 입자 크기에 대한 입자 조성에 따라 달라진다 (Ouimette and Flagan, 1982). 본 연구에서는 CMAQ 모델링으로부터 모의된 결과로부터 에어로솔의 광학적 두께 (AOD)를 550nm 파장범위에서 계산하였다. AOD는 에어로솔 소멸계수를 고도에 따라 적분하여 산출할 수 있다 (식 12).

$$\begin{aligned} \tau_{\text{CMAQ}} &= \sum_{i=1}^N (\sigma_{\text{sct}} + \sigma_{\text{abs}}) \Delta z_i \\ &= \sum_{i=1}^N (\sigma_{\text{ext}}) \Delta z_i \end{aligned} \quad (12)$$

여기에서, Δz_i 와 N 은 각층의 두께와 17개 층을 나타낸다. 에어로솔 소멸계수에 대한 계산은 Mie 이론에 기초한 방법과 경험적인 방법으로 구분할 수 있다. Mie 이론에 기초한 소멸계수의 계산은 입자상 물질의 질량, 소멸율, 입자유효반경의 함수로 표현되고, 이러한 계산방법은 입자상 물질의 입경분포가 3차원 모델에서 고정된 것으로 가정하는 단점이 있다. 본 연구에서는 해양에 대해 해양이 에어로솔 소멸계수에 영향을 미칠 가능성이 크기 때문에 기존 IMPROVE (Interagency Monitoring of PROtected Visual Environment) 소멸식 대신에 식 13-14를 사용하는 Pitchford 방법을 사용하였다 (Pitchford et al., 2007; Lowenthal et al., 2006). 해양 에어로솔에 대한 광산란은 기존 IMPROVE 공식에는 고려되어 있지 않고, 북극권을 대상으로 수행된 모델링의 도메인은 Fig. 17과 같이 광범위한 해양을 포함하고 있기 때문이다.

$$\begin{aligned} \sigma_{ext} (Mm^{-1}) &\approx \sum_{s=1}^N \alpha_{s,dry} f_s(RH) [C_s] \\ &\approx 2.2 \times f_F(RH) \times [(NH_4)_2SO_4]_F + 4.8 \times f_L(RH) \times [(NH_4)_2SO_4]_L \\ &\quad + 2.2 \times f_F(RH) \times [NH_4NO_3]_F + 4.8 \times f_L(RH) \times [NH_4NO_3]_L \\ &\quad + 2.8 \times [OM]_F + 6.1 \times [OM]_L \\ &\quad + 10 \times [EC]_F \\ &\quad + 1.7 \times f_F(RH) \times [SS] \\ &\quad + 0.6 \times [CORS] + 0.6 \times [SOIL] \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} f_F(RH) = f_L(RH) = f_{SS}(RH) &= a_1 \times \frac{RH}{1-RH} + a_2 \quad \text{for } RH \geq b_1 \\ f_F(RH) = f_L(RH) = f_{SS}(RH) &= 1 \quad \text{for } RH < b_1 \end{aligned} \quad (14)$$

여기에서 $f_s(RH)$ 는 상대습도 (RH, %)의 함수로서 황산암모늄, 질산아모늄 및 해양에 대한 흡습성 성장인자를 나타낸다. 구체적으로, $f_s(RH)$ 는 미세입자, 조대입자 및 해양입자에 대해 각각 $f_F(RH)$, $f_L(RH)$ 및 $f_{SS}(RH)$ 로 분류된다. $f_s(RH)$ 는 식 14에서 a_1 과 a_2 계수의 함수이고, 이들 계수는 각각 미세입자(F)에 대해 0.4175와 1.2312이고, 조대입자에 대해 0.2381과 1.3272이며, 해양에 대해 0.2931과 2.3308이다. 기준 상대습도 (b_1)은 미세입자 및 조대입자의 경우 37%이고, 해양은 46%가 적용된다. C_s 는 각각 유기에어로솔 (OM), EC와 해양 (SS), 조대입자 (CORS), 토양 유래 입자 (SOIL)의 농도를 나타낸다. $\alpha_{s,dry}$ 는 건조질량 소멸계수 ($m^2 g^{-1}$)이다. 건조질량 소멸계수는 건조 조건 550 nm에서 Mie 이론에 의해 계산된 값이 사용되었고, 예를 들어, 황산암모늄 및 질산암모늄은 크기에 따라 2.2와 4.8, 유기입자는 크기에 따라 2.8과 6.1, EC는 10, 해양의 경우 1.7이 적용되었다 (Pitchford et al., 2007).

Fig. 20은 CMAQ 모델에서 모의한 AOD의 시공간 분포를 나타낸 것이고, Terra 위성 MODIS 센서에서 관측된 시간 및 공간과 동일한 pixel을 추출하여 평균한 것이고, 지표반사도 영향으로 인해 자료가 산출되지 못한 흰색의 pixel 지역에 대하여 모델링으로부터 모의된 월평균 자료로 대체하여 표출하였다.

전반적으로 CMAQ에서 모의한 AOD는 MODIS에서 관측한 AOD의 시간 및 공간적 변화를 적절하게 모의하고 있지 못한 것으로 판단된다. CMAQ에서 모의한 AOD가 MODIS에서 관측한 AOD보다 대략 10배 정도 낮게 모의하고 있다 (Fig. 19와 20은 동일한 color bar가 사용되었음). 모델링에 적용된 북극지역 배출량의 불확실성과 해당 도메인에 대한 경계정보의 불확실성에

기인된 것으로 추정된다. 과소평가된 모델모의 AOD는 위성자료와 조합한 자료동화를 통하여 북극지역의 AOD를 최적으로 대변하고자 한다.

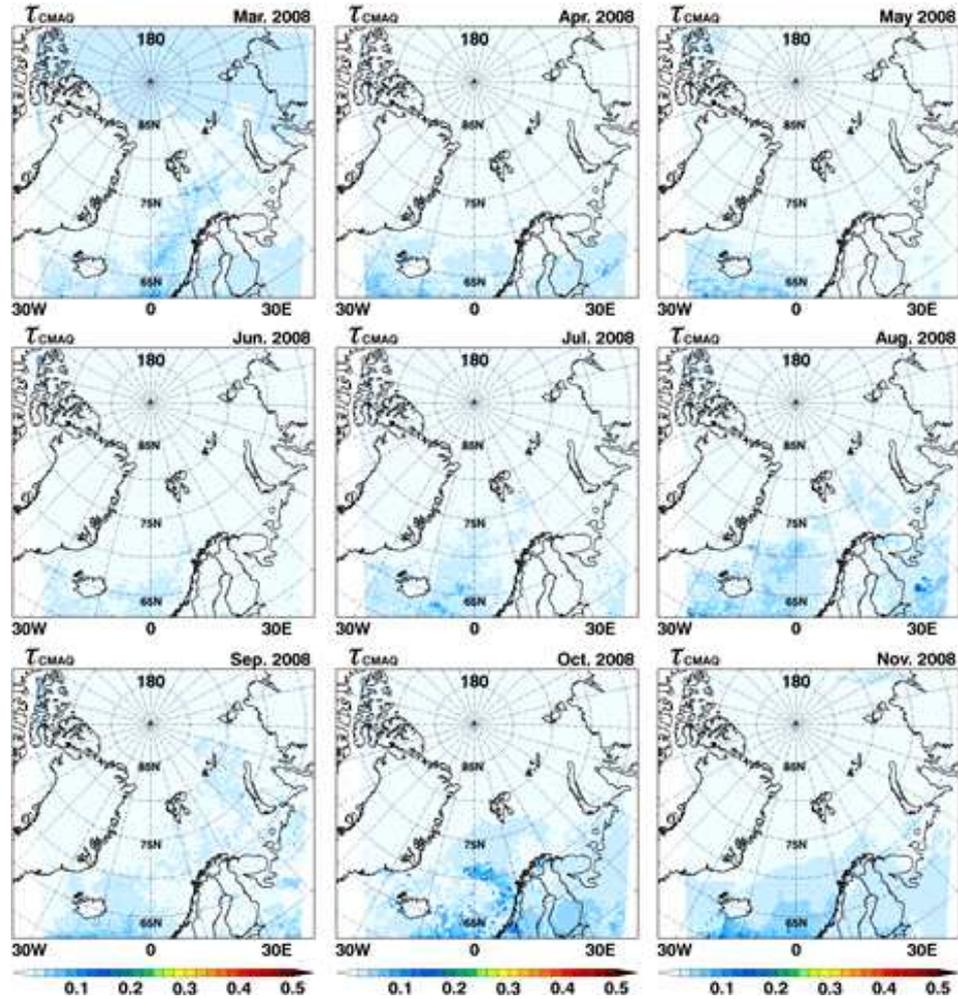


Fig. 20. Spatial distribution of the CMAQ simulated AOD over the Arctic for Mar.–Nov., 2008.

라. 자료동화 (Data Assimilation)

시스템의 진화 상태에 대한 최적의 추정 AOD를 생성하기 위하여 모델링과 인공위성 관측 자료를 결합하는 자료동화 기술이 활용되고 있다 (Adhikary et al., 2008; Park et al., 2011; Lee et al., 2016). 자료동화에 적용된 기법은 칼만 매트릭스 (Kalman Matrix)를 활용한 최적 내삽기법 (Optimal Interpolation, OI)으로 관측값과 모델값의 초차 공분산이 최소 자승법을 통해 최소가 될 때 추정값을 계산하는 방법으로 Collins et al. (2001), Adhikary et al. (2008) 및 Park et al. (2011)의 연구에 활용된 바 있다. OI 기법과 Kalman matrix는 식 15-16으로 표현된다.

$$\tau'_m = \tau_m + K(\tau_o - H \times \tau_m) \quad (15)$$

$$K = BH^T(HBH^T + O)^{-1} \quad (16)$$

τ'_m 은 자료동화가 적용된 AOD이고, τ_o 과 τ_m 은 MODIS 관측 및 CMAQ 모의된 AOD를 의미한다. H는 관측 오퍼레이터 (forward observational operator)로 모델링 격자에서 관측격자로

내삽하는 선형 연산자이다. 예를 들어, 관측자료의 격자와 모델링의 공간격자가 일치하는 H는 단위행렬을 갖게 된다. K (Kalman matrix)는 가중치를 의미한다. K의 변수인 B와 O는 모델링과 관측오차 공분산을 각각 나타내고 (식 17-18), OI 기법의 효율을 개선하기 위하여 AERONET 자료를 활용하여 자료동화 기법에 사용되는 매개변수 (free parameter)의 민감도 테스트를 통하여 계절변화에 따른 최적의 변수를 적용하였다 (Park et al., 2011).

$$O = (f_o \tau_o + \epsilon_o)^2 I \quad (17)$$

$$B = (f_m \tau_m + \epsilon_m)^2 \exp\left(-\frac{dx^2 + dy^2}{2l_{xy}^2}\right) \quad (18)$$

여기에서 f_m : AOD 관측값의 fractional error

f_o : AOD 관측값의 root mean square error

ϵ_m : 모델 AOD의 fractional error

ϵ_o : 모델 AOD의 root mean square error

l_{xy} : correlation length-scale

$d_x=d_y$: 수평해상도 (본 연구에서 18km)

$f_m, f_o, \epsilon_o, \epsilon_m$ 의 최적의 free-parameter는 민감도 테스트를 통하여 식 19로 정의된 χ^2 통계 변수를 최소화하여 결정하였다 (Park et al., 2011).

$$\chi^2 = \frac{1}{N} \sum_i \left[\frac{(\tau_{i,AERONET} - \tau'_{i,m})^2}{\tau'_{i,m}} \right] \quad (19)$$

N은 AERONET 관측지점에서 사용가능한 자료의 세트 수이다. $\tau_{AERONET}$ 는 Fig. 17의 5개 AERONET 사이트 (Hornsund, Thule, Andenes, Kuopio, 및 Hyytiala)를 활용하였다.

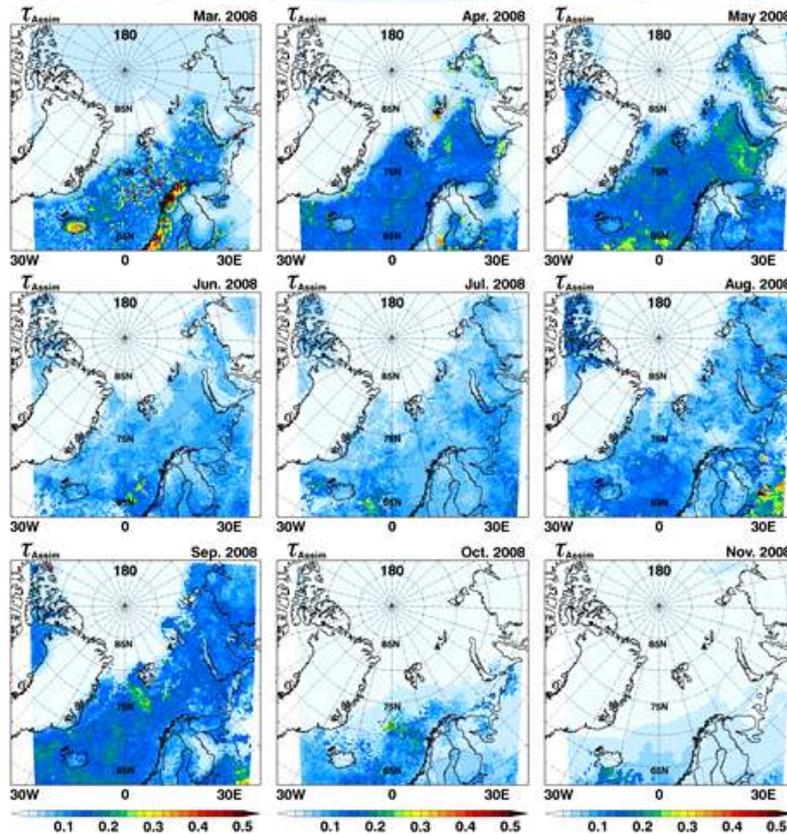


Fig. 21. Spatial distribution of the assimilated AOD over the Arctic for Mar.-Nov., 2008.

Fig. 21은 자료동화 AOD의 시공간적 분포를 나타낸 것이기도, 자료동화를 통하여 위성관측의 소실된 자료가 보완되었음을 확인할 수 있다. 자료동화된 AOD는 MODIS AOD와 비교하여 시공간적으로 비교적 일치하는 경향을 나타낸다.

마. 모델모의, 위성관측, 자료동화된 AOD 비교

북극 지역에 대한 모델 성능을 파악하기 위하여 CMAQ 모의 및 MODIS 관측된 AOD를 상호 비교하였다. Fig. 22의 초록색 은 전체 도메인에 대하여 CMAQ 모의 (τ_{CMAQ}) 및 MODIS 관측된 AOD (τ_{MODIS})를 월별 scatter plot을 나타낸 것으로, 상관계수 및 두 자료간 기울기 관점에서 모델의 성능이 충분하지 않은 것으로 판단된다. τ_{CMAQ} 와 τ_{MODIS} 사이에는 거의 상관관계가 없으며 모든 월에 -0.15 - -0.26의 낮은 값을 나타내고, 또한, 그 기울기는 X축 방향으로 치우쳐 있습니다.

이러한 과소평가는 대기화학 모델링과 모델의 입력자료, 그리고 AOD 계산에서 여러 불확실한 요소들이 포함될 수 있다. 그중에서 북극지역 상향식 배출량은 가장 큰 불확실한 요소 중의 하나가 된다. Fig. 23은 Greenland Sea, Barents Sea, Norwegian Sea를 포함하는 지역 (70° N - 90° N; 60° W - 60° E)에 대해 여러 배출인벤토리의 SO₂, NO_x, BC, OC, PM₁₀, PM_{2.5}의 배출량을 비교한 것으로 대부분의 배출량은 선박 운송활동에 기인하는 것으로 추정된다. MODIS의 관측은 그린란드와 북극해에서는 지표반사도로 자료가 소실되고, 대부분 해양지역에 분포하기 때문에 분석 대상 지역으로 선정하였다.

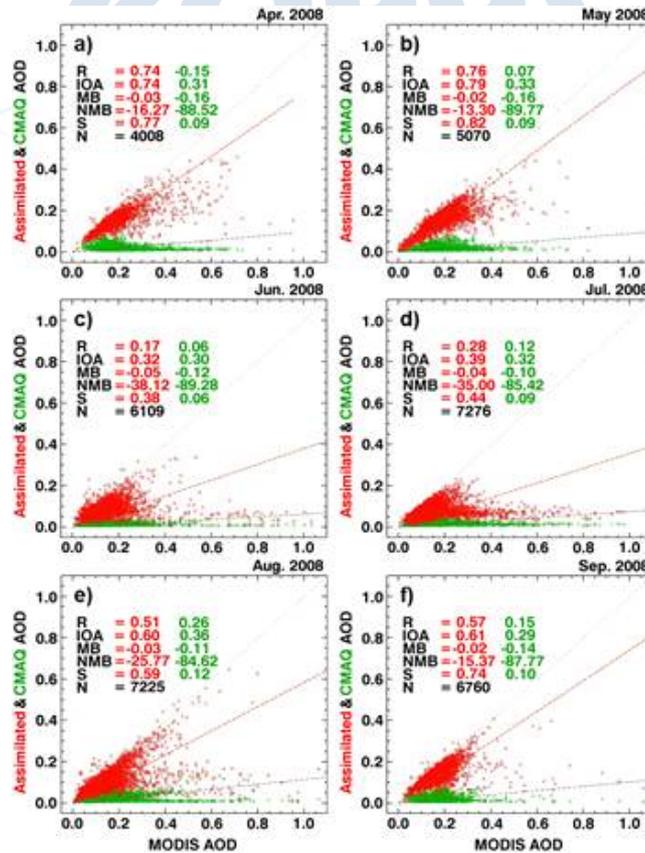


Fig. 22. Scatter plots and statistical between τ_{MODIS} and τ_{MODIS} and $\tau_{assimilated}$ over the entire domain for (a) April, b) May, c) June, d) July, e) August, and f) September 2008. The statistical analysis of R (correlation coefficient), IOA (index of agreement), MB (Mean Bias), NMB (normalized mean bias), S (slope), and N (number of data) were presented.

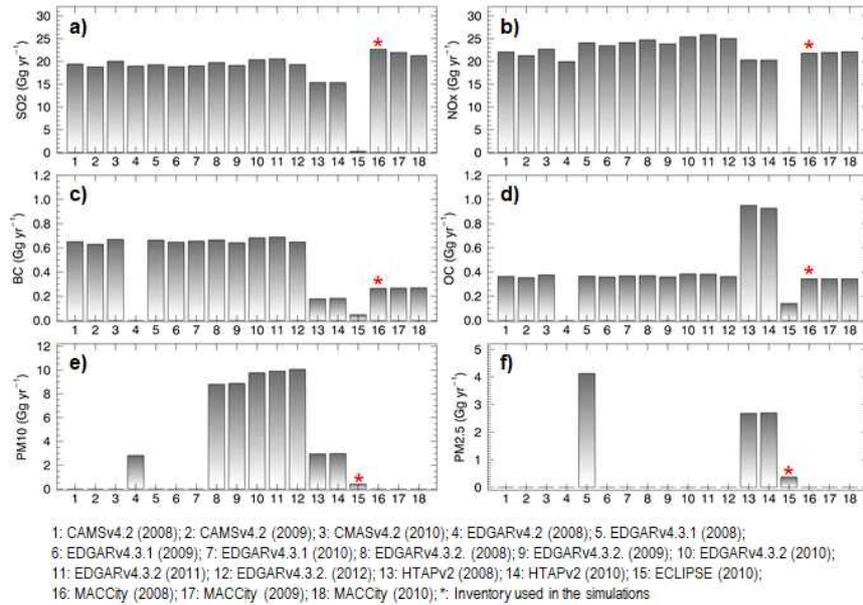


Fig. 23. Annual emission fluxes of a) SO₂, b) NO_x, c) BC, d) OC, e) PM₁₀, f) PM_{2.5} for the regions (70°N–90°N; 60°W–60°E) from the eighteen inventories (*: inventory used in the simulation).

Fig. 23에 나타난 바와 같이, 이들 배출량은 배출물질별 인벤토리에 따라 상당한 차이를 나타내고 있다. 또한, 본 대기화학모델링에 적용된 배출인벤토리인 ECLIPSE의 입자상 물질 (PM₁₀ 및 PM_{2.5}) 배출량은 가장 적게 예측하고 있다. 예를 들어, PM₁₀의 경우, ECLIPSE는 가장 적은 배출량을 제시하고 있으나, EDGARv4.3 (Fig.에서 4번) 및 HATAP v2 (Fig.에서 13, 14번)의 경우 ~3 Gg yr⁻¹이지만, EDGARv4.3.2는 ~10 Gg yr⁻¹로 추정하고 있다. 이러한 비교는 PM_{2.5}와 BC, 그리고 OC에서도 유사한 경향을 나타내었다.

인위적 오염물질에 대한 배출량뿐만 아니라, 특히, 해안지역에서는 해면에서 생성된 자연 발생 해염입자는 해양 입자상 물질 농도에 높은 기여도를 나타낸다 (Putaud et al., 2004). 하지만, 해염 배출량의 추정은 파도 발생지역 (surf zone), 풍속, 해수면 마찰속도, 염도, 해수면 온도 및 건조 해염 입자 크기 등 시간에 따라 변화는 불확실성 정보에 영향을 받는다 (Gong et al., 2003; Neumann et al., 2016).

Fig. 22의 붉은색 결과는 자료동화 (τ' 혹은 τ_{Assim}) 및 MODIS 관측된 (τ_{MODIS}) AOD 간 scatter plot과 통계분석 결과를 보여준다. 제시된 바와 같이, τ_{CMAQ} 과 τ_{MODIS} 간 통계결과에 비해 τ_{Assim} 과 τ_{MODIS} 간 통계결과가 더욱 향상되었다. 예를 들어, 상관계수는 -0.15 - 0.26 범위에서 0.17 - 0.76 범위로 향상되었다. 그러나, 특히 6월과 7월에는 여전히 낮은 상관성도 나타낸다. τ_{Assim} 과 τ_{MODIS} 간 기울기 (S)는 1:1라인에 근접하게 분포하고 있는데, 자료동화를 통해 AOD 값이 전반적으로 상승했기 때문이다. 이러한 개선은 Fig. 19, 20, 21의 τ_{MODIS} , τ_{CMAQ} 및 τ_{Assim} 의 공간분포에서도 시각적으로 확인된다.

MODIS 관측자료는 CMAQ 모델모의 AOD에 동화될 때 완전한 2차원 AOD 데이터 세트를 생성한다. 따라서 자료 동화된 AOD (τ_{Assim})는 모델모의된 AOD (τ_{CMAQ})에 비해 그린란드 해, 노르웨이 해 등 해상에서 훨씬 개선된 결과를 생산하게 된 것이다 (Fig. 21). 그럼에도 불구하고, τ_{Assim} 은 τ_{MODIS} 에 비하여 여전히 과소평가 되고 있다.

Fig. 24는 2008년 Thule, Hornsund, Andenes, Hyytiala, Kuopio의 AERONET 관측지점에서 τ_{CMAQ} , τ_{MODIS} , τ_{Assim} 의 일일 변동과 평균값을 나타낸 것이다. 또한, τ_{CMAQ} , τ_{MODIS} , τ_{Assim} 등

이들 자료간 상관계수는 Table 4에 정리하였다. 일변화, 평균값 및 통계분석 관점에서 τ_{Assim} 은 τ_{CMAQ} 에 비해 상당히 개선되었다. τ_{MODIS} 와 $\tau_{AERONET}$ 간 상관성은 0.52 - 0.91 범위로, MODIS 센서가 AERONET에서 관측한 AOD를 유사한 범위에서 관측하고 있다. 이 두자료간 월별 유사성은 자료동화 성능에도 긍정적 영향을 미쳤고, 이러한 것은 MODIS 관측자료의 정확성이 자료동화에 있어 중요한 요소가 됨을 나타내는 것을 의미한다. 따라서, OI 기술에 의해 자료동화된 AOD는 모델모의된 AOD와 비교하여, MODIS 및 AERONET 관측된 AOD와 유사한 수준의 일일 변동을 나타내었다. 또한 MODIS AOD 관측자료가 없음에도 불구하고, 이들 선택된 기간에서 자료동화로부터 분석증분이 생성되었다 (예, Hornsund 지역 3월, 4월, 5월). 이러한 결과는 인접하고 있는 지역에서 관측된 MODIS AOD가 이동 유입되어 자료동화에 긍정적인 영향을 미치기 때문이다. 하지만, Fig. 24에서처럼, 2월, 3월, 10월, 11월에는 유용한 MODIS 관측자료가 거의 없기 때문에 자료동화 효과는 미미하였다. 전반적인 분석 결과, OI 기법을 기반으로 CMAQ 모델과 자료동화 간 조합을 통한 AOD가 모델 모의만으로 계산된 것보다 대기 중 AOD의 정확한 수준과 공간분포를 제공함을 파악하였다 (Hanea et al., 2004).

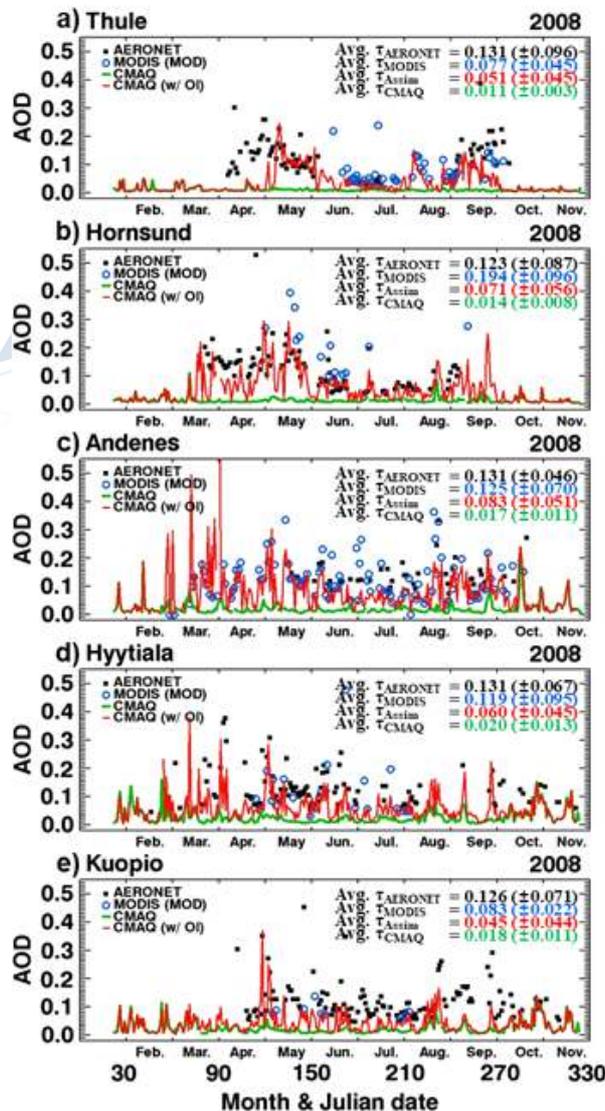


Fig. 24. Daily mean variations of $\tau_{AERONET}$ (black squares), τ_{MODIS} (blue circles), τ_{CMAQ} (green lines), and τ_{Assim} (red lines) at several stations of a) Thule, b) Hornsund, c) Andenes, d) Hyttiala, and e) Kuopio. Their mean values with standard deviations for April–September.

Table 4. Correlation coefficients among AODs from AERONET, MODIS, model, and data assimilation at several AERONET stations.

Correlation coefficient (R)	Thule	Hornsund	Andenes	Hyytiala	Kuopio
$\tau_{\text{AERONET}} \text{ VS. } \tau_{\text{MODIS}}$	0.52	0.82	0.75	0.91	0.69
$\tau_{\text{AERONET}} \text{ VS. } \tau_{\text{CMAQ}}$	0.21	0.10	0.48	0.13	0.08
$\tau_{\text{AERONET}} \text{ VS. } \tau_{\text{Assim.}}$	0.03	0.57	0.53	0.65	0.49
$\tau_{\text{MODIS}} \text{ VS. } \tau_{\text{CMAQ}}$	0.19	0.38	0.31	0.41	0.30
$\tau_{\text{MODIS}} \text{ VS. } \tau_{\text{Assim.}}$	0.46	0.82	0.76	0.65	0.29

(3) 장거리 이동 오염물질의 거동 특성 및 영향성 분석

가. 자료동화 AOD로부터 지표 PMs 농도 산출

본 연구에서 모델 모의된 AOD는 배출량 자료 및 경계조건 불확실성으로 인하여 상당히 과소 평가되었기 때문에 (Fig. 22 및 Fig. 19, 20, 21), PMs의 농도가 낮을 것으로 예상할 수 있다. 그러므로, 모델 도메인 전체에 대해 보다 현실적인 수준의 PM 농도를 추정하기 위하여 PM과 AOD간의 선형관계에 기반으로, 자료동화된 AOD를 이용하여 북극지역 지표 PMs 농도를 산출하였다. AOD는 PMs의 proxy로 간주되기 때문에, $PM_{10, \text{CMAQ}(w/OI)}$ 와 $PM_{2.5, \text{CMAQ}(w/OI)}$ 를 산출하기 위하여 식 20과 식 21이 사용되었다 (Park et al., 2014; Li et al., 2020).

$$PM_{10, \text{CMAQ}(w/OI)} = \frac{PM_{10, \text{CMAQ}}}{\tau_{\text{CMAQ}}} \times \tau_{\text{CMAQ}(w/OI)} \quad (20)$$

$$PM_{2.5, \text{CMAQ}(w/OI)} = \frac{PM_{2.5, \text{CMAQ}}}{\tau_{\text{CMAQ}}} \times \tau_{\text{CMAQ}(w/OI)} \quad (21)$$

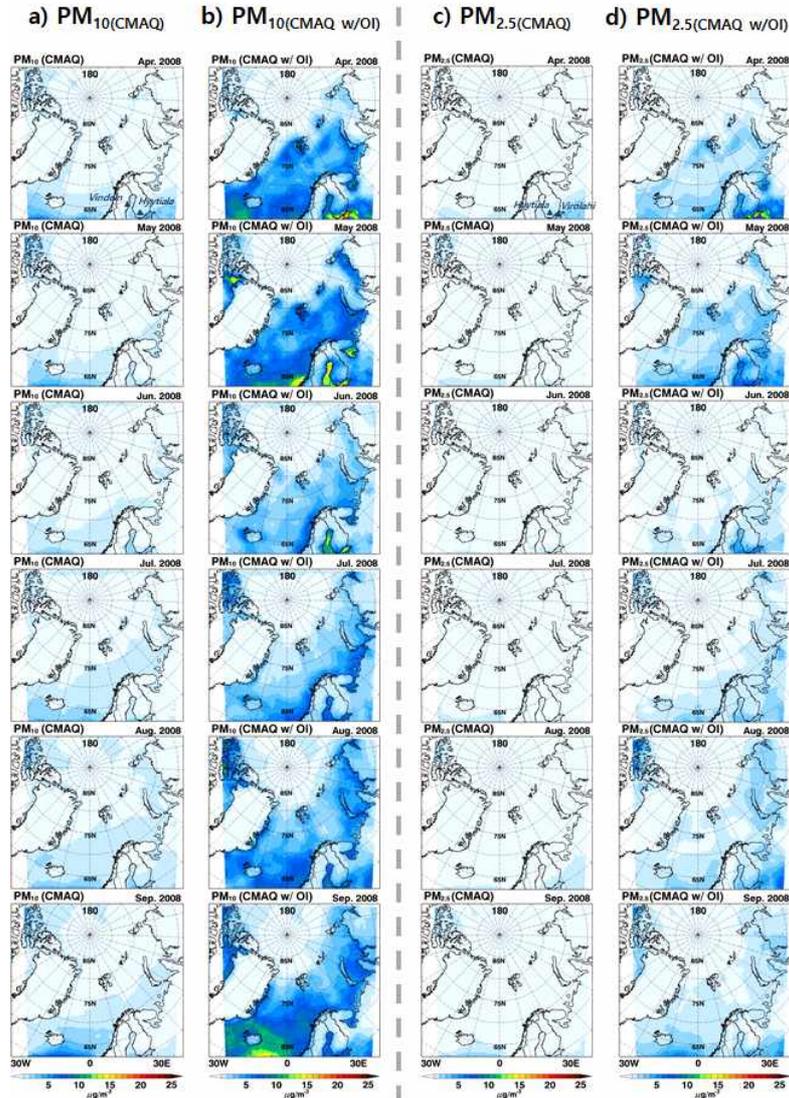


Fig. 25. Spatial distributions of monthly averaged PM_{10} and $PM_{2.5}$ calculated from the CMAQ simulations and inferred from the linear relationship between PMs and assimilated AODs.

Fig. 25는 CMAQ 모델에서 모의된, 그리고 식 20-21의 선형관계에서 추론된 월평균 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 농도의 공간분포를 나타낸 것이다. Fig. 25의 (a)와 (c)에서 CMAQ 모의된 $PM_{10(CMAQ)}$ 과 $PM_{2.5(CMAQ)}$ 의 농도는 $\sim 1-2 \mu g m^{-3}$ 보다 작고 전체 도메인에서 공간적으로 균일하게 나타났다.

또한, 도메인의 경계로부터 유입되는 에어로솔의 영향으로 도메인의 남쪽 부분 (북해)에서 농도가 상대적으로 높음을 알 수 있다. 반면, 자료동화를 통해 증가된 AOD로부터 추론된 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도는 4월-9월에 140-280% 증가되었다. 자료동화된 AOD로부터 추론된 도메인평균 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 월평균 농도는 $2.18 - 3.70$ 및 $0.85 - 1.68 \mu g m^{-3}$ 범위이다 (Table 5 요약 참조). 추정된 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 최대값은 노르웨이 해안선과 선박 배출원의 영향을 많이 받는 Gulf of Bothnia 지역에서 나타났다 (Karl et al., 2019). Fig. 25 b) 및 d)와 Fig. 21에서 볼 수 있듯이 자료동화된 AOD와 추론된 PMs간 불일치가 (특히, Gulf of Bothnia 지역에서) 있을 수 있는데, 이러한 불일치는 에어로솔의 연직 분포와 관련이 있다. AOD는 대기표면에서 대기 상단까지 통합된 에어로솔의 정량적인 값이지만, PMs은 지표면의 농도인 차이가 있기 때문이다. Fig. 25

의 산출된 PMs 농도는 지표관측된 자료와 비교를 통해 검증하였다. Fig. 26은 Hyytiala, Vindeln 및 Virolahi 지점에서 관측, 모의 추정된 PMs의 일평균 변화를 나타낸다.

Table 5. Monthly mean of PM₁₀ and PM_{2.5} from the CMAQ simulation and linear estimation over the entire domain

월	평균 PM _{10,CMAQ}	평균 PM _{10,CMAQ(w/OI)}	평균 PM _{2.5,CMAQ}	평균 PM _{2.5,CMAQ(w/OI)}
4월	1.00(±0.64)*	2.95(±2.77)	0.54(±0.39)	1.45(±1.59)
5월	0.92(±0.58)	3.50(±2.96)	0.47(±0.27)	1.68(±1.38)
6월	0.84(±0.44)	2.18(±1.71)	0.34(±0.18)	0.85(±0.70)
7월	0.99(±0.52)	2.37(±1.63)	0.44(±0.19)	1.06(±0.68)
8월	1.10(±0.55)	3.15(±2.15)	0.51(±0.27)	1.39(±0.98)
9월	1.08(±0.84)	3.70(±3.00)	0.46(±0.36)	1.30(±0.88)

* 평균농도(±편차) 단위: $\mu\text{g m}^{-3}$

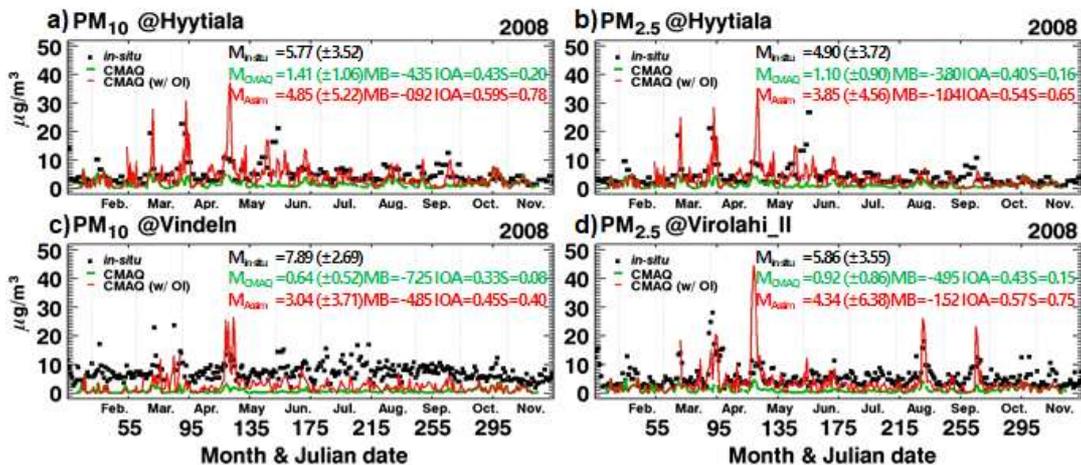


Fig. 26. Daily mean variations of observed (black square), modeled (green lines), and estimated (red lines) PM₁₀ at a) Hyytiala and c) Vindeln stations and PM_{2.5} at b) Hyytiala and d) Virolahi stations.

이들 지역의 위치는 Fig. 25 a)와 c)에 나타내었다. CMAQ으로 모의된 PM₁₀과 PM_{2.5} (Fig.에서 녹색)의 일변화는 거의 평평하지만, 추론된 PM_{10,CMAQ(w/OI)} 및 PM_{2.5,CMAQ(w/OI)} (Fig.에서 적색)는 관측된 고농도를 잘 포착하였다. 그러므로, In-situ 관측된 PMs과 비교하여 자료동화로부터 추정된 PMs,CMAQ(w/OI)는 모델모의된 PMs과 비교하여 통계적 관점 (평균, MB, IOA, 기울기)에서 (특히, Hyytiala에서) 더 좋은 성능을 나타내었다. Hyytiala와 Vindeln 지역에서 추정된 PM_{10,CMAQ(w/OI)}은 각각 4.85와 3.04 $\mu\text{g m}^{-3}$ 이고, Hyytiala와 Virolahi 지역에서 추정된 PM_{2.5,CMAQ(w/OI)}은 각각 3.85와 4.35 $\mu\text{g m}^{-3}$ 이다. Vindeln 지역을 제외하고, -1.52 - -0.82 $\mu\text{g m}^{-3}$ 의 낮은 편향 범위로, 추정값은 관측값에 매우 유사하게 나타났다.

본 연구에서는 AERONET의 5개 지점인 Thule, Hyytiala, Hornsund, Kuopio, Andenes, 및 북극점에서 PM_{10,CMAQ(w/OI)} 및 PM_{2.5,CMAQ(w/OI)} 농도를 산출하여 일별 농도변화를 Fig. 27에 나타내었다. 4월부터 9월까지 추정한 평균 PM_{10,CMAQ(w/OI)} (PM_{2.5,CMAQ(w/OI)}) 농도는 해당지역에서 각각 5.88, 3.78, 6.37, 2.19, 7.99, 0.61 $\mu\text{g m}^{-3}$ (2.21, 3.09, 2.54, 1.79, 2.25, 0.41 $\mu\text{g m}^{-3}$)이다. 이들 값은 북극점을 제외하고, CMAQ 모델링으로부터 모의된 농도와 비교하여 170-670% 증가된 것이다. 모델에서 모의된 PM₁₀ (밝은 초록)과 PM_{2.5} (짙은 초록)의 일변화는 평평하다. 이에 반해, 추정된 PM_{10,CMAQ(w/OI)}(붉은색)과 PM_{2.5,CMAQ(w/OI)} (자주색)는 상당한 변동성을 나타내었다.

2월, 3월, 10월, 11월 Thule 및 Hornsund 지역에서 CMAQ 모델 모의된 PMs과 추정된 $PM_{s,CMAQ(w/O)}$ 농도가 유사성은 관측된 MODIS 자료가 높은 지표반사도 등으로 해당 도메인에서 매우 미미하게 존재하여 자료동화의 효과가 미미한 것으로 판단된다.

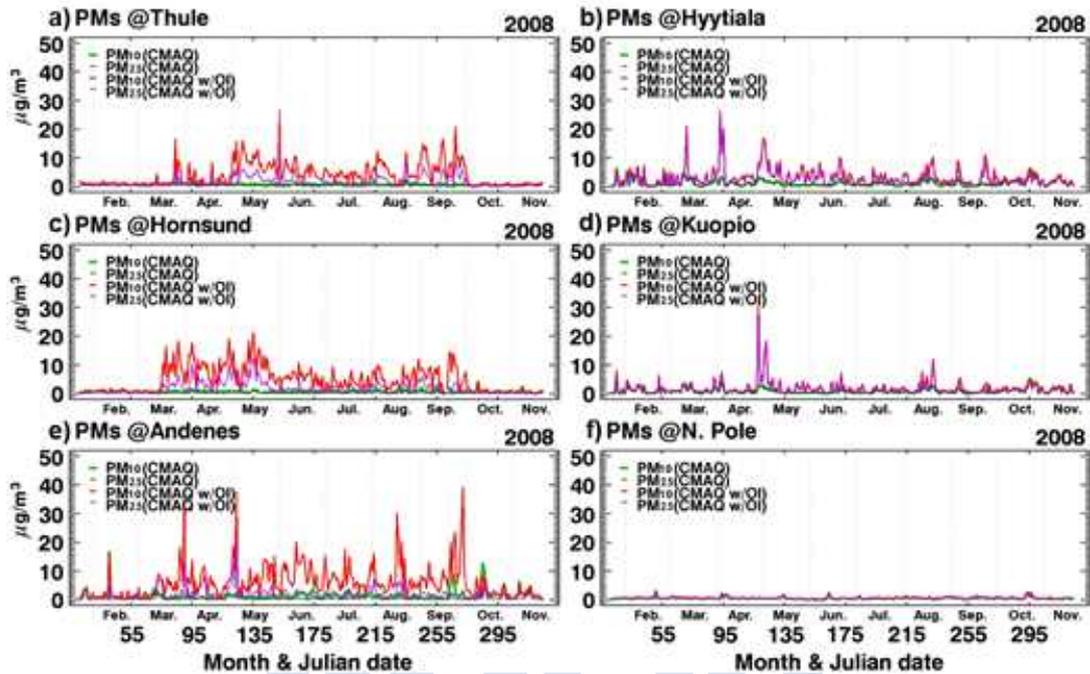


Fig. 27. Temporal variations of the modeled (bright and dark green lines) and estimated (red and purple lines) PM_{10} and $PM_{2.5}$ a) Thule, b) Hyttiala, c) Hornsund, d) Kuopio, e) Andenes, f) N. Pole.

Fig. 27에서 볼 수 있듯이, PM_{10} 에 대한 $PM_{2.5}$ 의 비율을 통하여 두 개의 개별 그룹으로 구분할 수 있다. 상대적으로 낮은 비율을 가진 첫 번째 그룹은 Thule, Hornsund, Andenes 등으로 이들 비율은 각각 0.35, 0.35, 0.30을 나타내었다. 해안선 인근에 위치한 이들 지역은 조대 해염 입자를 생성에 유리한 위치에 인접하고 있다. 반면, PM_{10} 에 대한 $PM_{2.5}$ 의 비율이 높은 지역 (Hyttiala와 Kuopio)로 각각 0.80, 0.70이고, 이들은 핀란드 내륙에 위치하고 있어, 상대적으로 인위적 요인에 영향을 받기 쉽다.

나. 기원 및 기여도 분석

본 연구에서는 이 지역으로(Thule, Hyttiala, Hornsund, Kuopio, Andenes, 및 북극점) 도착하는 공기 기단의 기원을 평가 및 분석하였다. 공기 기단의 기원 분석은 입자상 물질의 대기 중 수준이나 기여도를 이해하는데 있어 중요하다. 본 연구에서는 이를 위하여 HYSPLIT v5.0 모델을 이용하여 4월-9월까지 5일간의 역궤적 분석을 수행하였다. HYSPLIT의 입력 기상자료는 NOAA ARL의 GDAS (Global Data Assimilation System) 자료를 활용하였다. 이 자료는 NOAA 자료 저장용 FTP 서버(<ftp://arlftp.arl.noaa.gov/pub/archives/gdas1>)에서 확보하였고, 3시간 시간 해상도이고 1° 격자 간격 자료이다. HYSPLIT 역궤적은 해당기간동안 매일 4회 (6시간 간격: 00, 06, 12, 18 UTC) 분석이 수행되었고, 6개 지역으로 유입되는 공기기단의 기원은 다음과 같이 6개 지역으로 구분하였다. i) ‘Arctic Region’은 청정대기로서 공기기단이 경로에 상관없

이 위도 65° N 이상의 궤적 포인트가 대상이 되고, ii) ‘European Sector’ 는 궤적 포인트가 65° N 이내에서 경도가 15° W - 30° E인 범위, iii) ‘Russian & Asian Sector’ 는 궤적 포인트가 65° N 이내에서 경도가 30° W - 180° E인 범위, iv) ‘North American Sector’ 는 65° N 이내에서 경도가 70° W - 180° W인 범위, v) ‘Atlantic Sector’ 는 65° N 이내에서 경도가 15° W - 70° W인 범위이다 (Fig. 28). Atlantic Sector는 역시 청정지역으로 선박 배출원등 대기오염의 최소한 영향이 있는 것으로 간주된다. Fig. 29는 6개 지역에 대한 월별 5-day 역궤적 분석 결과 (00UT 기준)와 궤적에 따른 고도 정보를 함께 표출한 것이다.



Fig. 28. The sectors (Arctic Region; Russian & Asian Sector; North American Sector; Atlantic Sector; European Sector) used to classify the air mass arriving at 6 points.

극지연구소



Fig. 29. Five days backward trajectories by stations and month based on 00 UTC.

Fig. 29의 5-day 역레적 지점들이 Fig. 28에 제시된 구역별로 구분하여 해당 궤적의 기여도를 파악하여 Fig. 30에 제시하였다.

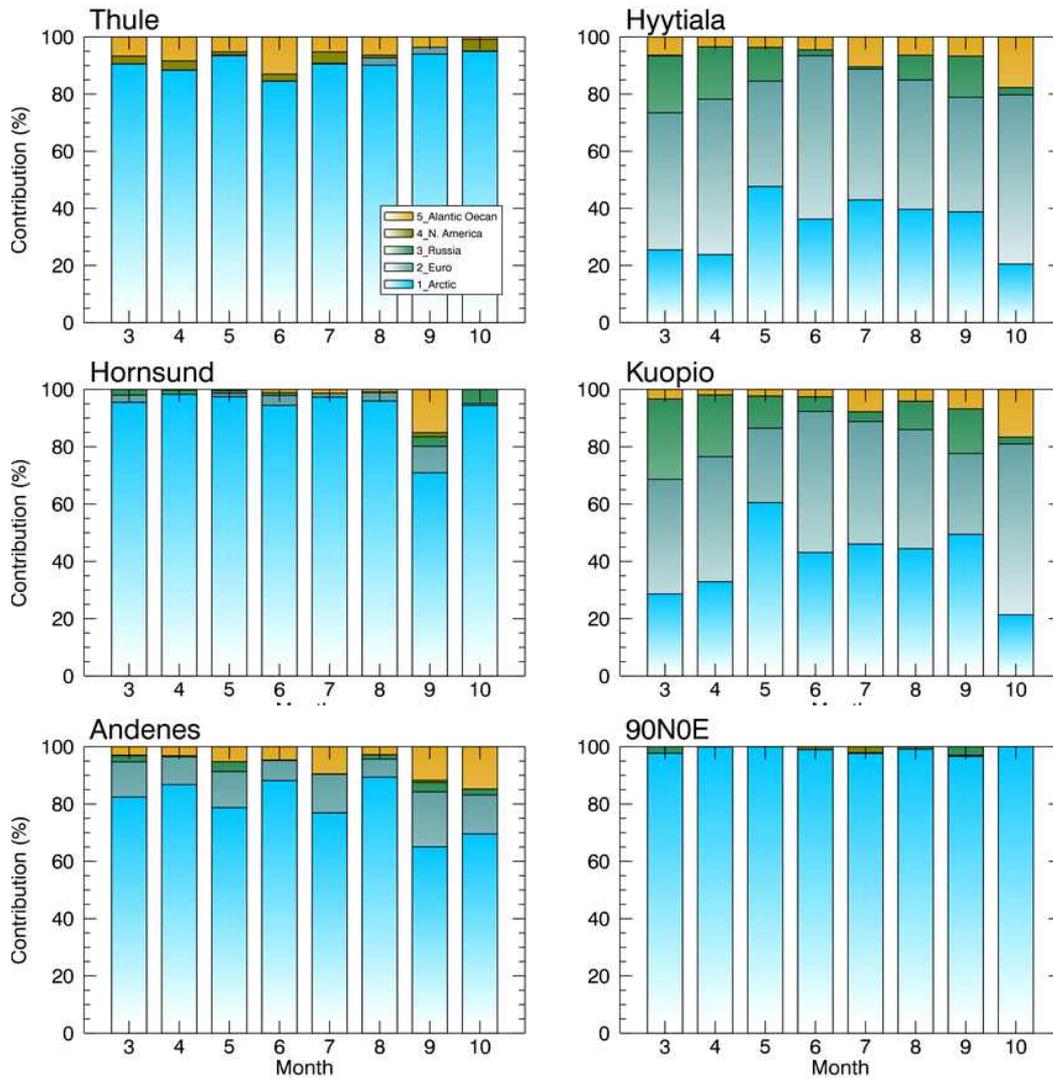


Fig. 30. Monthly relative contribution of air arriving at 6 points from the various sector.

Fig. 30은 공기기단이 해당 6개 지점으로 유입되는 각각의 구역별 기여도를 나타낸 것으로 북극권에 위치한 Andenes, Hornsund, Thule, 북극점, 4개 지점은 ‘Arctic Region’의 기여도가 모든 달에 걸쳐 가장 높은 기여도를 나타내었다 (65.07-99.95%). 그리고 이들 4개 지점이 위치한 지점에 따라 ‘Atlantic Sector’ 혹은 ‘European Sector’가 두 번째 높은 기여도를 나타낸다. 하지만 이들 두 번째 높은 기여도는 대부분 20% 이내이다.

이에 반해, Andenes, Hornsund, Thule, 북극점 지점과 비교하여 Hyytiala와 Kuopio에서는 ‘Arctic Region’의 기여도가 상대적으로 감소하고 ‘European Sector’가 증가하였다. Hyytiala와 Kuopio는 북극권에서 다소 거리가 먼 북유럽에 위치한 지점으로서, 인위적인 오염원에 의한 영향을 상대적으로 많이 받을 수 있다. Hyytiala에서는 ‘European Sector’가 가장 큰 기여도 (37-57%)를 나타내고 Kuopio에서는 ‘Arctic Region’이 여전히 높은 기여도 (33-61%)를 나타내었다.

Fig. 31은 각 구역별 기여도에 따른 PM₁₀ 월별 농도를 나타낸 것이다. 이를 위하여, 6개 지점별 일변화 농도에 연평균 농도 (배경농도)를 제외하였고, 월평균한 각각의 농도에 각 지점별 구역에 따른 기여도적 적용한 것이다.

Andenes 지점에서 Arctic Region에 의한 기여도가 가장 크고, 미치는 농도 영향은 $2.36 - 8.58 \mu\text{g m}^{-3}$ 범위이다. Hornsund 및 Thule 지점에서 Arctic Region에 의한 기여도가 가장 크며, 기여도 영향은 각각 $1.10 - 4.77, 1.29 - 4.34 \mu\text{g m}^{-3}$ 범위이다. Hyttiala 지점에서는 European Sector에 의한 영향이 크게 나타나고 그 영향은 $0.50 - 3.42 \mu\text{g m}^{-3}$ 범위이다. 또한, Kuopio의 경우, 여전히 Arctic Region에 의한 영향이 가장 크고 $0.72 - 2.11 \mu\text{g m}^{-3}$ 의 영향이 있고, European Sector에 의한 영향은 $0.32 - 2.19 \mu\text{g m}^{-3}$ 범위이다.

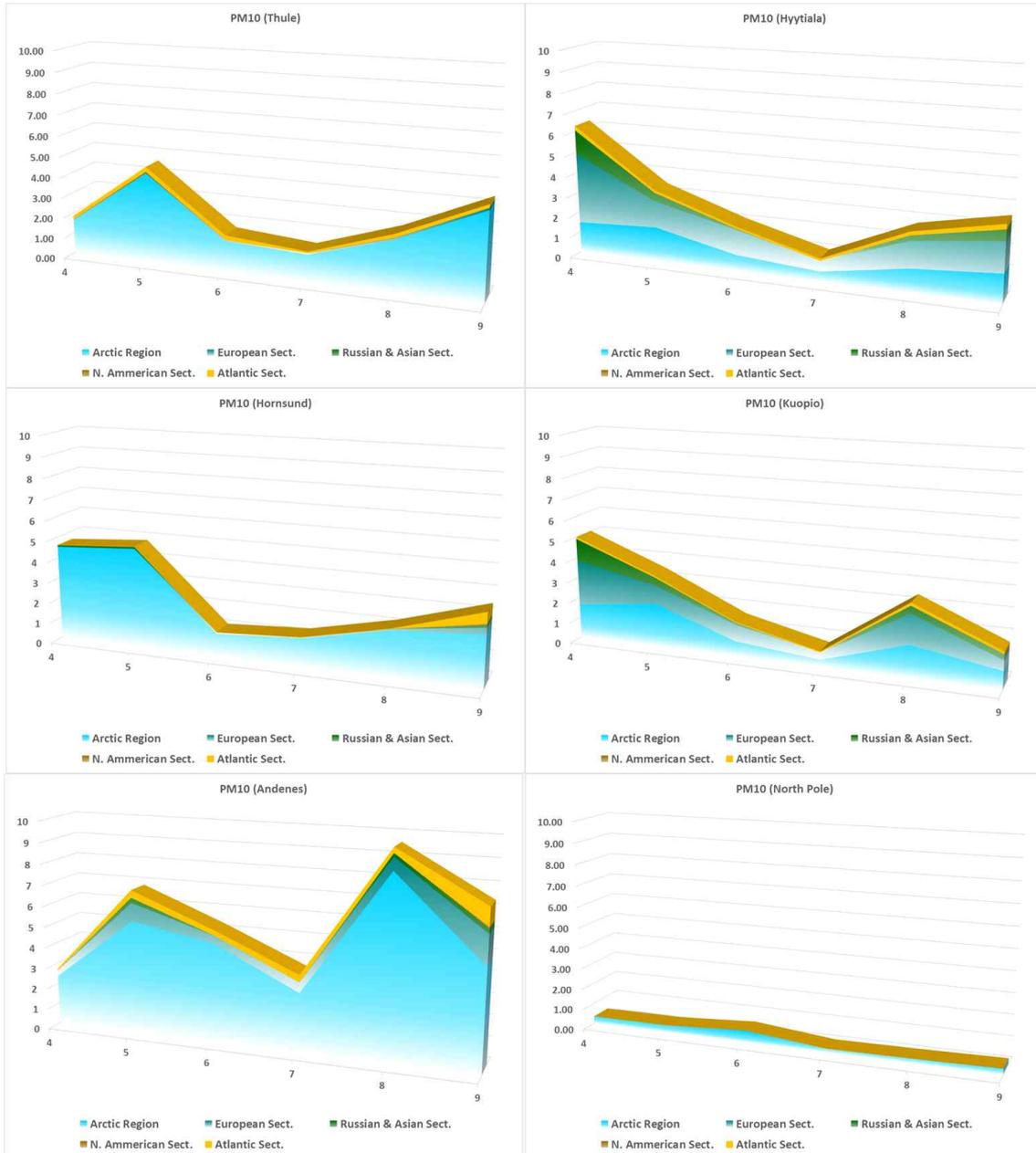


Fig. 31. Monthly PM_{10} concentration ($\mu\text{g m}^{-3}$) according to the contributions by the sector.

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

- 북극 대기오염을 연구할 위한 북극 대기질 모델링 시스템 구성 및 구축
 - 극지 대기환경 특성이 고려된 기상모델링 수행 (해빙 정보 업데이트)
 - 기상장, 배출장, 경계자료 생성을 위한 연구프레임 구축
 - 북극 대기질 모델링 시스템 최적화 및 구동 수행
 - 지상, 항공 및 위성 관측 자료를 이용한 모델링 시스템 성능 검증
- 자료동화 시스템 구축
 - Optimal Interpolation 기법 기반 AOD 자료동화 시스템 구성, 매개변수 최적화를 통한 월별 최적화된 자료동화 AOD 자료 생산
 - 자료동화된 AOD 및 모델모의 자료를 이용한 지표 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도 공간적 산출

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

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

[과학적 성과]

논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	A model investigation into the atmospheric NO _y chemistry in remote continental Asia	Atmospheric Environment	Han, K.M.	214	네덜란드	Elsevier Ltd	SCIE	2019.10.	13522310	33%
2	Temporal analysis of OMI-observed tropospheric NO ₂ columns over East Asia during 2006 - 2015	Atmosphere	Han, K.M.	10(11)	스위스	MDPI AG	SCIE	2019.11.	20734433	50%
3	Data assimilation of AOD and estimation of surface particulate matters over the Arctic	Applied Sciences	Han, K.M.	11(4)	스위스	MDPI AG	SCIE	2021.02	20763417	100%

2) 목표 달성 수준

추진 목표	달성 내용	달성도(%)
<ul style="list-style-type: none"> ○ 북극 대기질 모델링 시스템 구축 및 활용 <ul style="list-style-type: none"> - 구축된 대기질 모델링 시스템을 통한 북극 대기오염 물질 거동 특성 파악 - 북극 대기오염물질 농도 분포 및 외부 유입 영향성 분석 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 북극 대기질 모델링 시스템 구축 완료 <ul style="list-style-type: none"> - 극지 대기환경 특성이 고려된 기상모델링 수행 (해빙 정보 업데이트) - 기상장, 배출장, 경계자료 생성을 위한 연구 프레임 구축 - 지상, 항공, 위성 관측자료를 이용한 모델 성능 검증 및 평가 ○ 오염물질 거동 특성, 분포 및 외부 유입 영향성 분석 <ul style="list-style-type: none"> - 역패적 분석을 통한 PM의 거동 경로 파악 - PM의 분석구역별 외부 유입 영향성 분석 (6개 지역 구분) - 위성 및 모델링 자료를 이용한 기체 및 입자상 물질의 시공간적 분포 특성 분석 - 입자상 물질의 보다 개선된 분포 특성 파악을 위해, MODIS 위성 자료를 모델 자료에 동화하여 자료동화된 AOD 재분석 자료 생성 후 분석에 적용 	100

4. 목표 미달 시 원인분석 (해당 시 작성합니다)

1) 목표 미달 원인 (사유) 자체분석 내용

2) 자체 보완활동

3) 연구개발 과정의 성실성

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

1. NTIS의 “극지 대기질 모델링” 검색 결과, 관련 R&D 연구과제는 총 4건으로, 이 중 북극 지역에 관한 대기 오염에 관한 연구는 전무함. 본 연구는 국내 기관에서 수행된 희소성 있는 연구임.
2. 북극지역의 관측활동 제약으로 인하여 모델링의 성능을 검증하고 이들 자료를 활용하는 연구에 제한이 있으나 본 연구를 통해 구축된 북극지역 대기질 모델링 시스템과 자료동화에 관한 논문 성과는 북극지역 대기질 및 대기오염 연구를 위한 기본 토대가 될 수 있음.

6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

- 대기질 모델링 수행에 있어 북극지역은 상대적으로 매우 청정한 지역으로 내부 배출원이 제한적인 극지의 대기 환경적 특성이 고려되어야 하므로 북극으로 유입되는 오염물질에 대한 배경조건과 배출량 자료의 정교한 분석도 동시에 이루어져야 될 필요가 있음.
- 본 연구로부터 구축한 북극 대기질 모델링 시스템과 자료동화 시스템을 개선하고 고도화하기 위한 후속 연구가 필요할 것으로 판단됨
- 자료동화시스템으로부터 산출된 자료동화된 AOD는 북극지역에서 에어로솔에 의한 기후강제력 산출의 정확도 개선에 활용가능할 것으로 판단됨.

< 연구개발성과 활용계획표 >

구분(정량 및 정성적 성과 항목)		연구개발 종료 후 5년 이내
국외논문	SCIE	0.5편/년 (후속과제 연계)
	비SCIE	
	계	0.5편/년 (후속과제 연계)
국내논문	SCIE	
	비SCIE	
	계	-

< 별첨 자료 >

참고문헌

- Adhikary, B.; Kulkarni, S.; D'allura, A.; Tang, Y.; Chai, T.; Leung, L.R.; Qian, Y.; Chung, C.E.; Ramanathan, V.; Carmichael, G.R. A regional scale chemical transport modeling of Asian aerosols with data assimilation of AOD observations using optimal interpolation technique. *Atmos. Environ.* 2008, 42, 8600–8615, doi:10.1016/j.atmosenv.2008.08.031.
- Boersma, K. F., Eskes, H. J., Dirksen, R. J., van der A, R. J., Veefkind, J. P., Stammes, P., Huijnen, V., Kleipool, Q. L., Sneep, M., Claas, J., Leitão, J., Richter, A., Zhou, Y., and Brunner, D.: An improved tropospheric NO₂ column

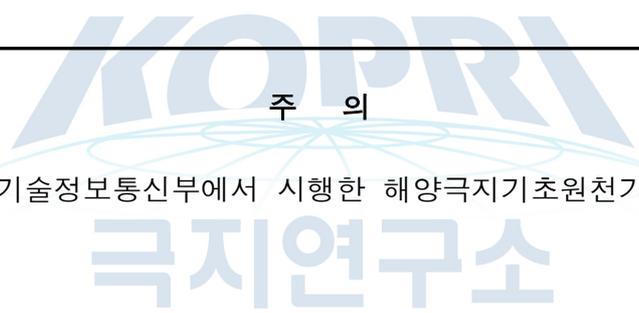
- retrieval algorithm for the Ozone Monitoring Instrument, *Atmos. Meas. Tech.*, 4, 1905–1928, 2011.
- Bucsela, E. J., Celarier, E. A., Wenig, M. O., Gleason, J. F., Veefkind, J. P., Boersma, K. F., Brinksma, E. J., Algorithm for NO₂ vertical column retrieval from the Ozone Monitoring Instrument, *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 44(5), 1245–1258, 2006.
- Carter, W. P. L.: Development of the SAPRC-07 Chemical Mechanism, *Atmospheric Environment*, 44, 5324–5335, 2010.
- Collins, W.D.; Rasch, P.J.; Eaton, B.E.; Khattatov, B.V.; Lamarque, J.F.; Zender, C.S. Simulating aerosols using a chemical transport model with assimilation of satellite aerosol retrievals: Methodology for INDOEX. *J. Geophys. Res.* 2001, 106, 7313–7336, doi:10.1029/2000jd900507.
- Generoso, S., F.-M. Bréon, F. Chevallier, Y. Balkanski, M. Schulz, and I. Bey (2007), Assimilation of POLDER aerosol optical thickness into the LMDz-INCA model: Implications for the Arctic aerosol burden, *J. Geophys. Res.*, 112, D02311, doi:10.1029/2005JD006954.
- Giles, D.M.; Sinyuk, A.; Sorokin, M.G.; Schafer, J.S.; Smirnov, A.; Slutsker, I.; Eck, T.F.; Holben, B.N.; Lewis, J.R.; Campbell, J.R.; et al. Advancements in the Aerosol Robotic Network (AERONET) Version 3 database—automated near-real-time quality control algorithm with improved cloud screening for Sun photometer aerosol optical depth (AOD) measurements. *Atmos. Meas. Tech.* 2019, 12, 169–209, doi:10.5194/amt-12-169-2019.
- Gong, S.L. A parameterization of sea-salt aerosol source function for sub- and super-micron particles. *Global Biogeochem. Cycles* 2003, 17, 1097, doi:10.1029/2003GB002079.
- Han, K. M., Lee, S., Chang, L. S., and Song, C. H.: A comparison study between CMAQ-simulated and OMI-retrieved NO₂ columns over East Asia for evaluation of NO_x emission fluxes of INTEX-B, CAPSS, and REAS inventories, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 1913–1938, <https://doi.org/10.5194/acp-15-1913-2015>, 2015.
- Hanea, R.G.; Velders, G.J.M.; Heemink, A. Data assimilation of ground-level ozone in Europe with a Kalman filter and chemistry transport model. *J. Geophys. Res.* 2004, 109, D10302, doi:10.1029/2003JD004283.
- Hong, S.-Y., Dudhia, J., and Chen, S.-H.: A revised approach to ice microphysical processes or the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 103–120, 2004.
- Hong, S. Y., Noh, Y., and Dudhia, J.: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes, *Mon. Weather Rev.*, 134(9), 2318–2341, doi:10.1175/Mwr3199.1, 2006.
- Höglund-Isaksson, L.: Global anthropogenic methane emissions 2005–2030: technical mitigation potentials and costs, DOI:10.1088/1748-9326/8/1/014003, *Atmospheric Chemistry and Physics* 12 : 9079–9096, 2012.
- Holben, B. N., Eck, T. F., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J. P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J. A., Kaufman, Y. J., Nakajima, T., Lavenue, F., Jankowiak, I., and Smirnov, A.: AERONET: A federated instrument network and data archive for aerosol characterization, *Remote Sens. Environ.*, 66, 1–16,

- doi:10.1016/S0034-4257(98)00031-5, 1998.
- Hsu, N.C.; Jeong, M.J.; Bettenhausen, C.; Sayer, A.M.; Hansell, R.; Seftor, C.S.; Huang, J.; Tsay, S.-C. Enhanced Deep Blue aerosol retrieval algorithm: The second generation. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2013, *118*, 9296–9315, doi:10.1002/jgrd.50712.
- Iacono, M. J., Delamere, J. S., Mlawer, E. J., Shephard, M. W., Clough, S. A., and Collins, W. D.: Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models, *J. Geophys. Res.*, 113, D13103, doi:10.1029/2008JD009944, 2008.
- Kain, J.S. The Kain–Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.* 2004, *43*, 170–181, doi:10.1175/1520-0450(2004)043%3C0170:TKCPAU%3E2.0.CO;2.
- Karl, M.; Bieser, J.; Geyer, B.; Matthias, V.; Jalkanen, J.P.; Johansson, L.; Fridell, E. Impact of a nitrogen emission control area (NECA) on the future air quality and nitrogen deposition to seawater in the Baltic Sea region. *Atmos. Chem. Phys.* 2019, *19*, 1721–1752, doi:10.5194/acp-19-1721-2019.
- Kaufman, Y.J.; Wald, A.E.; Remer, L.A.; Gao, B.C.; Li, R.R.; Flynn, L. The MODIS 2.1 channel–Correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1997, *35*, 1286–1298, doi:10.1109/36.628795.
- Klimont, Z., S. J. Smith, and J. Cofala (2013), The last decade of global anthropogenic sulfur dioxide: 2000–2011 emissions, *Environ. Res. Lett.*, 8(1), 014003, doi:10.1088/1748-9326/8/1/014003
- Lamarque, J.-F.; Bond, T.C.; Eyring, V.; Granier, C.; Heil, A.; Klimont, Z.; Lee, D.; Liousse, C.; Mieville, A.; Owen, B.; et al. Historical (1850–2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: Methodology and application. *Atmos. Chem. Phys.* 2010, *10*, 7017–7039, doi:10.5194/acp-10-7017-2010.
- Lee, S.; Song, C.H.; Park, R.S.; Park, M.E.; Han, K.M.; Kim, J.; Choi, M.; Ghim, Y.S.; Woo, J.-H. GIST-PM-Asia v1: Development of a numerical system to improve particulate matter forecasts in South Korea using geostationary satellite-retrieved aerosol optical data over Northeast Asia. *Geosci. Model. Dev.* 2016, *9*, 17–39, doi:10.5194/gmd-9-17-2016
- Levy, R.C.; Mattoo, S.; Munchak, L.A.; Remer, L.A.; Sayer, A.M.; Patadia, F.; Hsu, N.C. The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean. *Atmos. Meas. Tech.* 2013, *6*, 2989–3034, doi:10.5194/amt-6-2989-2013.
- Li, L. Optimal Inversion of Conversion Parameters from Satellite AOD to Ground Aerosol Extinction Coefficient Using Automatic Differentiation. *Remote Sens.* 2020, *12*, 492, doi:10.3390/rs12030492.
- Lowenthal, D.; Kumar, N. Light scattering from sea-salt aerosols at interagency monitoring of protected visual environments (IMPROVE) sites. *J. Air Waste Manage.* 2006, *56*, 636–642, doi:10.1080/10473289.2006.10464478.
- McHenry, J.N.; Vukovich, J.M.; Hsu, N.C. Development and implementation of a remote-sensing and in situ data-assimilating version of cmaq for operational PM_{2.5} forecasting. Part 1: Modis aerosol optical depth (AOD) data-assimilation design and testing. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 2015, *65*, 1395–1412.

- Neumann, D.; Matthias, V.; Bieser, J.; Aulinger, A.; Quante, M. A comparison of sea salt emission parameterizations in northwestern Europe using a chemistry transport model setup. *Atmos. Chem. Phys.* 2016, *16*, 9905–9933, doi:10.5194/acp-16-9905-2016.
- Ouimette, J.R.; Flagan, R.C. The extinction coefficient of multicomponent aerosols. *Atmos. Environ.* 1982, *16*, 2405–2419, doi:10.1016/0004-6981(82)90131-7.
- Park, M.E.; Song, C.H.; Park, R.S.; Lee, J.; Kim, J.; Lee, S.; Woo, J.H.; Carmichael, G.R.; Eck, T.F.; Holben, B.N.; et al. New approach to monitor transboundary particulate pollution over Northeast Asia. *Atmos. Chem. Phys.* 2014, *14*, 659–674, doi:10.5194/acp-14-659-2014, 2014.
- Park, R.S.; Song, C.H.; Han, K.M.; Park, M.E.; Lee, S.S.; Kim, S.B.; Shimizu, A. A study on the aerosol optical properties over East Asia using a combination of CMAQ-simulated aerosol optical properties and remote-sensing data via a data assimilation technique. *Atmos. Chem. Phys.* 2011, *11*, 12275–12296, doi:10.5194/acp-11-12275-2011.
- Pitchford, M.; Malm, W.; Schichtel, B.; Kumar, N.; Lowenthal, D.; Hand, J. Revised algorithm for estimating light extinction from IMPROVE particle speciation data. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 2007, *57*, 1326–1336, doi:10.3155/1047-3289.57.11.1326.
- Putaud, J.-P., et al., 2004. A European aerosol phenomenology-2: chemical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe, *Atmos. Environ.* *38*, 2579e2595.
- Ruiz-Arias, J.A.; Dudhia, J.; Gueymard, C.A.; Pozo-Vázquez, D. Assessment of the Level-3 MODIS daily aerosol optical depth in the context of surface solar radiation and numerical weather modeling. *Atmos. Chem. Phys.* 2013, *13*, 675–692, doi:10.5194/acp-13-675-2013.
- Sarwar, G., Simon, H., Bhawe, P., and Yarwood, G.: Examining the impact of heterogeneous nitril chloride production on air quality across the United States, *Atmospheric Chemistry & Physics*, *12*, 1–19, 2012.
- Sarwar, G., Simon, H., Xing, J., Mathur, R.: Importance of tropospheric CINO₂ chemistry across the Northern Hemisphere, *Geophysical Research Letters*, *41*, 4050–4058, 2014.
- Sarwar, G., Gantt, B., Schwede, D., Foley, K., Mathur, R., and Saiz-Lopez, A.: Impact of enhanced ozone deposition and halogen chemistry on tropospheric ozone over the Northern Hemisphere, *Environ. Sci. Technol.*, *49*, 9203–9211, <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01657>, 2015.
- Sayer, A.M.; Munchak, L.A.; Hsu, N.C.; Levy, R.C.; Bettenhausen, C.; Jeong, M.-J. MODIS Collection 6 aerosol products: Comparison between Aqua's e-Deep Blue, Dark Target, and "merged" data sets, and usage recommendations. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2014, *119*, 13965–13989, doi:10.1002/2014JD022453.
- Sindelarova, K., Granier, C., Bouarar, I., Guenther, A., Tilmes, S., Stavrou, T., Müller, J.-F., Kuhn, U., Stefani, P., and Knorr, W.: Global dataset of biogenic VOC emissions calculated by the MEGAN model over the last 30 years, doi:10.5194/acpd-14-10725-2014, *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions* *14* : 10725–10788, 2014.

- Song, C. H., Park, M. E., Lee, K. H., Ahn, H. J., Lee, Y., Kim, J. Y., Han, K. M., Kim, J., Ghim, Y. S., and Kim, Y. J.: An investigation into seasonal and regional aerosol characteristics in East Asia using model-predicted and remotely-sensed aerosol properties, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 6627–6654, <https://doi.org/10.5194/acp-8-6627-2008>, 2008.
- Tanré, D.; Kaufman, Y.J.; Herman, M.; Mattoo, S. Remote sensing of aerosol properties over oceans using the MODIS/EOS spectral radiances. *J. Geophys. Res.* 1997, 102, 16971–16988, doi:10.1029/96JD03437.
- Van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Collatz, G. J., Mu, M., Kasibhatla, P. S., Morton, D. C., DeFries, R. S., Jin, Y. and van Leeuwen, T. T.: Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires, doi:10.5194/acp-10-11707-2010, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 11707–11735, 2010.





주 의

1. 이 보고서는 과학기술정보통신부에서 시행한 해양극지기초원천기술개발과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 과학기술정보통신부 (한국연구재단)에서 시행한 해양극지기초원천기술개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.