

발 간 등 록 번 호
11-1360709-000081-01



한국형모델의 위성관측 자료동화 및 초기화 기술 개발(장기)

Development of Satellite Data Assimilation and Initialization
Techniques for the Korean Integrated Model

2022년도

기 상 청


최 종 보 고 서

세부사업명 (주관연구과제명)	한국형모델의 위성관측 자료동화 및 초기화 기술 개발(장기)		
연구용역과제명	(한글) 한국형모델의 위성관측 자료동화 및 초기화 기술 개발(장기) (영문) Development of Satellite Data Assimilation and Initialization Techniques for the Korean Integrated Model		
연구용역기관명	기 관 명	소재지	대 표
	명지대학교 산학협력단	경기도 용인시 처인구 명지로 116, 명지대학교 (남동)	김 영 옥
연구용역책임자	성 명	소속 및 부서	전 공
	송 효 종	명지대학교	환경에너지공학과
사업구분	<input type="checkbox"/> 단년 <input checked="" type="checkbox"/> 장기계속계약		
총연구기간 (해당년도)	2022년 4월 18일 ~ 2024년 11월 30일(31개월) (2022년 4월 18일 ~ 2022년 12월 15일(8개월))		
총연구비 (해당년도)	일금 팔억팔천이백만원정 (₩882,000,000원) (일금 이억구천사백만원정 (₩294,000,000원))		
참여연구원 (해당년도)	13명(책임: 4명, 연구원: 9명)		

2022년도 용역과제에 의하여 수행중인 연구과제의 최종보고서를 붙임과 같이 제출합니다.

붙임 : 최종보고서 1부.

2022년 12월 15일

연구용역책임자 송 효 종 
 연구용역기관장




기상청장 귀하

한국형모델의 위성관측 자료동화 및 초기화
기술 개발(장기) 연구에 관한 용역과제의
최종보고서를 별첨과 같이 제출합니다.

2022년 12월 15일

연구용역책임자 송 효 중 

연구용역기관장 김 영 옥 



제 출 문

기상청장 귀하

본 보고서를 “한국형모델의 위성관측 자료동화 및 초기화 기술 개발 (장기)” 최종보고서로 제출합니다.

2022년 12월 15일

○ 연구용역기관명 : 명지대학교 산학협력단

○ 연구기간 : 2022.4.18. ~ 2024.11.30.

※장기계속과제의 경우

총 연구기간 : 2022.4.18. ~ 2024.11.30.

해당연도 연구기간 : 2022.4.18. ~ 2022.12.15.

○ 연구용역책임자 : 송 효 중

○ 참여연구원

·제1세부과제책임자 : 손 병 주

·제2세부과제책임자 : 안 명 환

·제3세부과제책임자 : 송 효 중

·제4세부과제책임자 : 이 상 무

·연구원 : 강 의 중

·연구원 : 권 영 채

·연구원 : 김 명 균

·연구원 : 김 상 우

·연구원 : 김 정 민

·연구원 : 김 태 명

·연구원 : 이 수 정

·연구원 : 정 인 채

·연구원 : 최 서 은

목 차

I. 과제 구현방안	1
1. 사업의 개요	1
2. 사업 추진체계	10
3. 사업내용별 연구목표	11
II. 1단계 사업내용 및 성과	15
1. 목표 시스템 구축 내역	15
2. 시스템 시연 및 기대효과	101
III. 향후 발전방향	105
IV. 참고문헌	116

표 목 차

표 1.2.1. 연직(파란색 기둥)/경사(빨간색 기둥) 프로파일 사용 시, 관측과 모델에서의 대기조건 (청천/구름) 분류	35
표 1.2.2. KIM에 활용되는 정지기상위성 채널정보 및 자료동화에 활용 여부. 활용되는 채널은 파란색 음영으로 표시 (r: rejected, m: monitor)	36
표 1.4.1. 아시아, 동아시아, 유럽/아프리카, 북아메리카, 북극, 북반구에 대하여 분석검증, 00UTC에서의 850 hPa 온도, 250 hPa 바람, 500 hPa 지위고도, 700 hPa 상대습도에 대해 KIM3.7과 KIM3.6a의 RMSE 차이의 평균값과 KIM3.6a 평균값 대비 개선 혹은 저하 분포 분석	75
표 1.4.2. 북반구 분석검증, 00UTC에서의 850 hPa 온도, 250 hPa 바람, 500 hPa 지위고도, 700 hPa 상대습도에 대해 KIM3.6a와 KIM3.7의 24h 예보장 대비 24h, 48h, 72h, 96h, 120h 예보장들간의 예보 오차의 시간 변동성의 상관계수 및 유의성 검증 (파란색 볼드체는 유의함을 의미)	81
표 1.4.3. 00UTC에서의 IFS 분석장 대비 KIM 분석장과 예보장(24시, 48시, 72시, 96시, 120시)간의 예보 오차의 시간 변동성의 영역별 상관성 분석 및 유의성 검증 (파란색 볼드체는 유의함을 의미)	92
표 1.4.4. 00UTC에서의 IFS 분석장 대비 KIM 예보장(24시, 48시, 72시, 96시, 120시)간의 영역별 예보 오차의 시간 변동성의 상관성 분석 및 유의성 검증 (파란색 볼드체는 유의함을 의미)	94
표 1.4.5. 00UTC에서의 KIM 자체분석장 대비 KIM 예보장(24시, 48시, 72시, 96시, 120시)간의 영역별 예보 오차의 시간 변동성의 상관성 분석 및 유의성 검증 (파란색 볼드체는 유의함을 의미)	95
표 1.4.6. 00UTC에서 각각 위도 20°~90°N, 위도 60°~90°N, 위도 80°~90°N에 대하여 경도 30°간격으로 나눈 영역에 대해 850 hPa 온도, 500 hPa 지위고도에 대한 IFS 분석장 대비 KIM 분석장과 예보장(24시, 48시, 72시, 96시, 120시)간의 예보 오차의 공간 변동성의 상관성 분석 및 유의성 검증 (파란색 볼드체는 유의함을 의미)	99

그림 목 차

I. 과제 구현방안	1
그림 1.2.1. 2015년 1월 1일 영국기상청에서 제공하는 OSTIA 해수면 온도의 지리적 분포.	4
II. 1단계 사업내용 및 성과	15
그림 1.1.1. 해수면 온도의 정의 (SST-SSTfnd). (출처: Donlon et al., 2002)	16
그림 1.1.2. 2012년 7월부터 2016년 8월까지 4년간 북서 태평양에서 AMSR2의 해수면 온도와 부이 관측온도를 비교한 결과. (a) 야간, (b) 주간 (출처: 김희영 외. 2016)	17
그림 1.1.3. 해수면 상태에 대한 마이크로파의 민감도. (출처: Ulaby et al. 2014)	19
그림 1.1.4. 2003년부터 2007년까지의 [좌] 적외 복사계(MODIS)와 [우] 마이크로파 복사계(AMSR-E)에 의한 해수면 온도 산출빈도의 백분율. (출처: Hosoda, 2010)	20
그림 1.1.5. OBM의 해양 상층부 구조 모식도.	22
그림 1.1.6. 2022년 1월 1일부터 3일까지 태평양 임의지점(위도: 0, 경도: 180)에 대한 OBM 결과. (a) 한랭층 두께, (b) 한랭층과 지면의 온도 차.	24
그림 1.1.7. 2021년 1월 1일 21UTC에서 (a) OBM의 한랭층 온도와 (b-c) ERA5 재분석장의 풍속과 유의 파고.	25
그림 1.1.8. 그림 1.1.7a에 대해 풍속 보정이 이루어진 결과.	26
그림 1.1.9. (a) TAO 배열의 지리적 위치와 (b) 검증에 사용된 계류 부이의 모식도 (출처: https://www.pmel.noaa.gov/)	26
그림 1.1.10. 1 m 부이 온도 (청색), OSTIA 온도 (검은색), OBM 한랭층 온도(적색)에 대한 2021년 (a) 1월과 (b) 10월의 시계열 분포.	27
그림 1.1.11. 2001년부터 2020년까지 20년 동안 적도 태평양에 설치된 54개 부이 관측치의 (a) 일 변동 폭과 (b) QC 기준을 설명하는 모식도	28
그림 1.1.12. 2001년부터 2020년까지 20년 동안 54 TAO 부이에 대한 OBM의 한랭층 온도와 부이 관측 온도(~ 1m)의 산포도와 상관계수(r), 편향(bias), 평균 제곱근 오차(RMSE).	28
그림 1.1.13. 2021년 7월 1일 6시간 간격의 (a) ERA5의 순 단파복사량, (b) OBM의 한랭층 온도 일 변화 (OBM 한랭층 온도 - OSTIA 온도).	29
그림 1.1.14. 2021년 7월 1일 6시간 간격의 (a) ERA5의 순 단파복사량, (b) KIM의 한랭층 온도 일변화 (KIM 해양 지면 온도 - OSTIA 온도).	30
그림 1.1.15. 2021년 7월 1일 12UTC의 지면 온도의 일변화 폭. (a) OBM, (b) ERA5, (c)	

KIM.	31
그림 1.1.16. 관련 코드 적용 예시 (sfc_ocean_solver.F90)	33
그림 1.2.1. 위성 관측 구조와 연직(파란색 기둥)/경사(빨간색 기둥) 프로파일의 모식도	34
그림 1.2.2. GK2A AMI 적외채널 가중합수 (위성 직하점, 해양). US76 표준대기 51개층 프로파일을 이용해 계산	37
그림 1.2.3. 분석대상 지역 (a) GK2A 전구관측영역 (12×12 FOV; 1FOV=2km) (b) Himawari-8 전구관측영역 (16×16 FOV; 1FOV=2km), 위성천정각 65도 이상은 제거됨 (c) MSG-4 전구관측영역 (16×16 FOV; 1FOV=3km)	38
그림 1.2.4. 경사경로 관련작업이 추가되기 이전의 원래 KPOP block 다이어그램의 일부 (왼쪽)와 추가된 후의 다이어그램(오른쪽)	40
그림 1.2.5. (a)온도 (b)습도 경사 프로파일과 연직 프로파일간 차이(solid black line) 예 시. 방위각면에 10km 등 간격으로 위치한 지점들의 연직 프로파일과 관측지점의 연직 프 로파일간 차이도 함께 표출 (color lines)	42
그림 1.2.6. 모델 고도() 10km에 대응하는 수평변이() 값의 분포 (GK2A 관측영역 내 각 화소별로 계산하여 표출)	42
그림 1.2.7. 경사 프로파일 사용 후 해양과 육지에서 O-B 표준편차의 상대적인 감소 비 율(relative reduction; %) 분포. 2021년 7월 한 달, 6시간 간격 CSR 자료를 이용한 KPOP 수행 결과 이용. 위성천정각 5도 간격으로 평균하였고, 5도 간격 평균에 사용된 자료 개 수는 그림 오른쪽에 표시함	44
그림 1.2.8. GK2A CSR(왼쪽) 자료와 Level 1B(오른쪽) 자료로 분석한 경사 프로파일 사 용 후 O-B 표준편차의 relative reduction (%)	45
그림 1.2.9. 기존 연직 프로파일을 이용한 자코비안과 경사 프로파일을 이용한 자코비안 의 차이. 2021년 7월 한달 동안의 온도(왼쪽)와 습도(오른쪽) 자코비안의 평균 차이 (dash-dot)와 표준편차(solid)로 Himawari-8 CSR 자료를 이용해 계산한 결과임	47
그림 1.2.10. 경사 프로파일을 이용해 계산한 자코비안(solid)과 연직 프로파일을 이용해 계산한 자코비안(dash-dot)의 일대일 비교. 왼쪽은 온도 자코비안의 예시, 오른쪽은 습도 자코비안의 예시로 Himawari-8 KPOP 수행결과 이용	48
그림 1.2.11. Time series of the orbital inclination of Meteosat-8 (Burrows, 2018)	49
그림 1.2.12. 위성방위각 변화에 따른 위성천정각 평균 O-B(왼쪽)와 STD(오른쪽). 2021년 7월 1일 00UTC Himawari-8 CSR 자료를 이용한 분석결과로 위부터 아래로 Ch8, Ch9, Ch10에 대한 결과임	50
그림 1.3.1. 초기화 코드에서 건조지면기압 업데이트 부분	52
그림 1.3.2. 이번 프로젝트를 통해서 수정된, 건조지면기압으로부터 각 층에 할당되는 기 압차이를 구해내는 코드	53
그림 1.3.3. 초기화 코드 내에서 수증기압 계산에 바른 혼합비 증분이 사용되도록 개선한	

모습	55
그림 1.3.4. 혼합비 증분 계산을 바로잡은 코드 적용의 예시. 2021년 6월 15일 12 UTC 해면기압의 분석증분(a), 오차감소(b), 실험군과의 증분 차이(c), 추가 오차감소(d). 괄호 안 은 전구, 아시아(A), 유럽(E) 평균.	57
그림 1.3.5. 그림 1.3.4와 같은 시점의 지위고도 결과. 패널 구성은 동일하며, x축은 위도, y축은 고도로서 경도 평균된 값들이다. 괄호 안은 전구 평균과 남극 제외한 평균.	58
그림 1.3.6. 그림 1.3.4와 같은 시점과 패널 구성에 대하여, 수증기압 계산을 위해 하이브 리드 계수를 이용한 기압차를 이용한 실험의 지면기압 결과.	59
그림 1.3.7. 그림 1.3.6과 같은 실험이고 지위 고도에 대한 그림.	60
그림 1.3.8. 혼합비 증분 계산 개선과 하이브리드 계수를 이용한 고도별 기압차 계산에 의한 성능 변화 실험 결과. 2021년 7월 한달에 대해 00UTC 시작 예보(상)와 12UTC 시작 예보(하). 수치모델링센터의 결과.	61
그림 1.3.9. 그림 1.3.7과 같은 시점에 대한 분석의 검증 결과. 패널 구성은 동일함. 다만, 혼합비 계산, 각 층의 기압차 계산 개선에 온위 계산 개선을 더한 실험에 대한 검증. ..	62
그림 1.3.10. EFSO 코드에 보완되어야 했던 매트릭	63
그림 1.3.11. EFSO 코드에 보완되어야 할 이동 국지화	64
그림 1.3.12. EFSO 결과로서 각각은 운동에너지(KE), 위치에너지(PE), 습윤에너지(ME), 전체 합(TE)로 구성됨	65
그림 1.3.13. Ota et al.(2013)에서 제시된 총 예보오차 감소량	65
그림 1.3.14. 기상청 내에 구축된 EFSO를 이용한 관측 민감도 결과. 관측종별 결과(좌)와 한 관측 당 민감도 결과(우).	66
그림 1.3.15. NCEP GFS과 연동되는 EFSO 시스템에 의한 관측 민감도 결과. Hotta et al.(2017)에서 차용.	67
그림 1.3.16. 지면 관측에 대해 적용되고 전구에 대해 그려진 EFSO 결과. 괄호 내에 전 체 관측 중에 오차를 감소시키는 관측 수의 비율.	68
그림 1.3.17. 그림 1.3.16 중에 한반도 주변 확대.	69
그림 1.3.18. 태풍 보거싱이 부정적으로 작동한 시점의 EFSO 결과.	70
그림 1.4.1. 북반구 500 hPa 지위고도, 00UTC에 대한 KIM, ECMWF, UM 모델의 RMSE 시계열 분석 (검정색 점선은 0선, 빨간색 점선은 평균)	72
그림 1.4.2. 북반구 850 hPa 온도, 00UTC에 대한 KIM, ECMWF, UM 모델의 RMSE 시 계열 분석 (검정색 점선은 0선, 빨간색 점선은 평균)	73
그림 1.4.3. 북반구 250 hPa 바람, 00UTC에 대한 KIM, ECMWF, UM 모델의 RMSE 시 계열 분석 (검정색 점선은 0선, 빨간색 점선은 평균)	73
그림 1.4.4. 북반구 700 hPa 상대습도, 00UTC에 대한 KIM, ECMWF, UM 모델의 RMSE	

시계열 분석 (검정색 점선은 0선, 빨간색 점선은 평균)	74
그림 1.4.5. 북반구 500 hPa 지위고도, 00UTC에 대한 KIM, ECMWF, UM 모델의 ACC 시계열 분석 (검정색 점선은 0선, 빨간색 점선은 평균)	76
그림 1.4.6. 500 hPa 지위고도에 대한 KIM3.6a 대비 KIM3.7의 RMSE 차이의 예보 시간 별 개선 및 저하 분포 분석	78
그림 1.4.7. 북반구 분석검증, 00UTC에서의 850 hPa 온도, 250 hPa 바람, 500 hPa 지위 고도, 700 hPa 상대습도에 대해 KIM3.6a 대비 KIM3.7의 24h 예보장 대비 72h 예보장의 개선 및 저하 분포 분석 (바 위의 값은 평균값)	79
그림 1.4.8. 북반구 분석검증, 00UTC에서의 850 hPa 온도, 250 hPa 바람, 500 hPa 지위 고도, 700 hPa 상대습도에 대해 KIM3.6a 대비 KIM3.7의 24h 예보장 대비 120h 예보장의 개선 및 저하 분포 분석 (바 위의 값은 평균값)	79
그림 1.4.9. 북반구 분석검증, 00UTC에서의 850 hPa 온도, 250 hPa 바람, 500 hPa 지위 고도, 700 hPa 상대습도에 대해 KIM3.6a와 KIM3.7의 24h 예보장 대비 24h, 48h, 72h, 96h, 120h 예보장들간의 예보 오차의 시간 변동성의 상관성	80
그림 1.4.10a. 북반구 20210719, 00UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 IFS 대비 KIM3.6a의 모의 정도 분석	83
그림 1.4.10b. 북반구 20210719, 00UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 IFS 대비 KIM3.7의 모의 정도 분석	83
그림 1.4.10c. 북반구 20210719, 00UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 KIM3.7 대비 KIM3.6a의 모의 정도 분석	83
그림 1.4.10d. 북반구 20210719, 00UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 IFS 대비 KIM 모델의 예보 오차 개선 및 저하 사례 분석	83
그림 1.4.11a. 북반구 20210723, 00UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 IFS 대비 KIM3.6a의 모의 정도 분석	84
그림 1.4.11b. 북반구 20210723, 00UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 IFS 대비 KIM3.7의 모의 정도 분석	84
그림 1.4.11c. 북반구 20210723, 00UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 KIM3.7 대비 KIM3.6a의 모의 정도 분석	84
그림 1.4.11d. 북반구 20210723, 00UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 IFS 대비 KIM 모델의 예보 오차 개선 및 저하 사례 분석	84
그림 1.4.12a. 북반구 20210804, 00UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 IFS 대비 KIM3.6a의 모의 정도 분석	85
그림 1.4.12b. 북반구 20210804, 00UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 IFS 대비 KIM3.7의 모의 정도 분석	85

그림 1.4.12c. 북반구 20210804, 00UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 KIM3.7 대비 KIM3.6a의 모의 정도 분석	85
그림 1.4.12d. 북반구 20210804, 00UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 IFS 대비 KIM 모델의 예보 오차 개선 및 저하 사례 분석	85
그림 1.4.13a. 북반구 20210819, 12UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 IFS 대비 KIM3.6a의 모의 정도 분석	86
그림 1.4.13b. 북반구 20210819, 12UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 IFS 대비 KIM3.7의 모의 정도 분석	86
그림 1.4.13c. 북반구 20210819, 12UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 KIM3.7 대비 KIM3.6a의 모의 정도 분석	86
그림 1.4.13d. 북반구 20210819, 12UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 IFS 대비 KIM 모델의 예보 오차 개선 및 저하 사례 분석	86
그림 1.4.14a. 북반구, 분석검증, 00UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 KIM3.6a, KIM3.7에 대한 파워 스펙트럼 분석	89
그림 1.4.14b. 북반구, 분석검증, 00UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 ECMWF, UM 에 대한 파워 스펙트럼 분석	89
그림 1.4.15a. 00UTC에서의 IFS 분석장 대비 KIM 분석장과 예보장(24h, 48h, 72h, 96h, 120h)간의 영역별 상관성 분석	91
그림 1.4.15b. 00UTC에서의 IFS 분석장 대비 KIM 예보장(24h, 48h, 72h, 96h, 120h)간의 영역별 상관성 분석	91
그림 1.4.15c. 00UTC에서의 KIM 자체분석장 대비 KIM 예보장(24h, 48h, 72h, 96h, 120h)간의 영역별 상관성 분석	91
그림 1.4.16a. 00UTC에서의 위도 60°~90°N, 경도 30°간격으로 나눈 영역에 대해 850 hPa 온도, 500 hPa 지위고도 변수에 대한 IFS 분석장 대비 KIM 예보장(24시, 48시, 72시, 96시, 120시) 간의 예보 오차의 시간 변동성의 상관성 분석	96
그림 1.4.16b. 00UTC에서의 위도 80°~90°N, 경도 30°간격으로 나눈 영역에 대해 850 hPa 온도, 500 hPa 지위고도 변수에 대한 IFS 분석장 대비 KIM 예보장(24시, 48시, 72시, 96시, 120시) 간의 예보 오차의 시간 변동성의 상관성 분석	96
그림 1.4.17a. 00UTC에서의 위도 20°~90°N, 경도 30°간격으로 나눈 영역에 대해 850 hPa 온도, 500 hPa 지위고도 변수에 대한 IFS 분석장 대비 KIM 분석장과 예보장(24시, 48시, 72시, 96시, 120시)간의 예보 오차의 공간 변동성의 상관성 분석	98
그림 1.4.17b. 00UTC에서의 위도 60°~90°N, 경도 30°간격으로 나눈 영역에 대해 850 hPa 온도, 500 hPa 지위고도 변수에 대한 IFS 분석장 대비 KIM 분석장과 예보장(24시, 48시, 72시, 96시, 120시)간의 예보 오차의 공간 변동성의 상관성 분석	98

그림 1.4.17c. 00UTC에서의 위도 80°~90°N, 경도 30°간격으로 나눈 영역에 대해 850 hPa 온도, 500 hPa 지위고도 변수에 대한 IFS 분석장 대비 KIM 분석장과 예보장(24시, 48시, 72시, 96시, 120시)간의 예보 오차의 공간 변동성의 상관성 분석98

III. 향후 발전방향105

그림 1.3.1. 맑은 하늘(clear-sky)과 모든 하늘(all-sky)의 관측오차상관관계 행렬. Geer (2019)로부터 차용.109

그림 1.3.2. 관측오차공분산 행렬의 고유벡터를 구한 예시. Geer (2019)로부터 차용. ..110

I. 과제 구현방안

1. 사업의 개요

1.1. 연구 배경

자료동화는 다양한 관측정보를 시/공간적으로 일관성 있게 수치예보모델의 배경장(=예측값)에 반영하여 모델의 초기장(=시작값)을 재생산하는 기술로, 지난 30년간 예측성능 향상을 선도한 중요한 과학적 성과로 평가된다 (Bauer et al., 2015). 특히, 지난 20년 동안 전구 범위의 위성 관측자료를 효과적으로 자료동화에 활용함으로써 남반구의 예측성능이 북반구와 거의 같은 수준까지 도달하게 되었다. 이는 수치예보모델의 발전과 더불어 효율적인 계산이 가능한 복사전달모델의 개발로, 위성 관측복사량의 직접동화가 가능해졌기 때문이다. 이 결과 예보성능은 현저하게 개선되었고, 위성기술의 진보로 더 많은 위성의 더욱 정교한 관측이 가능하면서 과거에는 예상하지 못했던 예측성능을 갖게 된 것이다.

이러한 과학적 진보와 예측성능의 향상에도 불구하고, 북극 고위도 특히 해빙지역에서의 자료동화는 지면 경계층의 불확실성으로 매우 제한적으로 이루어져 고위도 지역은 물론 중위도 일기의 예측성능 향상에도 걸림돌이 되고 있다. 따라서 한국형수치예보모델의 고위도 온도편향을 개선하고 자료동화 능력을 향상하기 위해 지면에 민감한 위성 관측자료의 활용 기술의 확보가 요구된다. 이와 더불어 새로운 위성 관측자료의 지속적이고 효율적인 사용을 위해서는 관측오차 진단기술의 고도화 역시 현업업무에서 매우 중요한 과제로 주목받고 있다.

자료동화에서 활용하는 관측자료의 증가는 모델 초기장 개선에 기여하는 것으로 알려져 있고, 이에 따라 현재 기상청에서는 지상/고층/항공기/위성복사/위성차폐 자료 등 총 19종의 관측자료를 활용하고 있다. 이 중 위성자료가 동화에 미치는 긍정적인 영향에 대해서는 선행 연구들을 통해 여러 차례 보고된 바 있다 (Burrows, 2019; McNally, 2014; Joo & Kim, 1997). 하지만 이러한 위성자료가 동화에 미치는 영향을 최대화하기 위해서는 정확한 복사전달 모의를 통해 최대한 정확한 위성신호를 복원해 내는 작업이 중요하다. 정확한 위성신호 복원을 위해서는 위성 천정각에 따라 달라지는 복사량의 모의가 필요하고 이를 위해서는 위성 센서와 지구의 관측지점을 잇는 경사경로(slant-path 혹은 line-of-sight) 상에 놓인 대기 정보를 이용한 복사량 모의가 요구된다. 그동안 한국 기상청을 비롯한 해외의 수많은 수치예보모델 센터에서는 위성자료에 대한 동화 과정에서 이러한 위성의 관측 특성을 반영하지 못했다. 하지만, 최근 유럽중기예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts; ECMWF)를 시작

으로 경사경로 효과를 고려한 위성자료 동화가 수행되기 시작했고, 선행 연구들에서도 경사경로를 고려한 자료동화가 예측 성능에 미치는 긍정적인 영향들을 보고하고 있다(Bormann, 2017; Shahabadi et al., 2018). 구체적으로, ECMWF에서는 2016년 11월 22일 현업시스템인 IFS(Integrated Forecasting System)을 업그레이드하면서 저궤도 탐측 센서들에 대한 청천 휘도온도 동화 시 경사경로를 고려하기 시작했고, 그 결과 특히 ATMS(Advanced Technology Microwave Sounder)와 CrIS(Cross-track Infrared Sounder)와 같이 센서의 노이즈가 낮고, swath가 넓은 cross-track 스캐너의 가장자리 부분(위성 천정각이 큰 관측 영역)에서 경사경로 고려 효과가 크게 나타남을 확인하였다(Bormann, 2017).

각국의 기상예보모델시스템에서 현업뿐 아니라 연구목적으로 활용되고 있는 자료동화체계에서는 수치예보모델의 3시간 혹은 6시간 예보장을 배경장으로 정의하고 이를 예보를 위한 초기장으로 활용하고 있다. 수치예보모델의 배경장으로 활용되는 예보장은 모델의 불확실성을 내재하고 있기에 지상, 라디오존데, 항공, 기상 위성에서 관측된 기상 및 환경정보를 배경장에 동화시킴으로써 실제와 가까운 기상정보를 담고 있는 분석장을 새로운 배경장으로 활용한다. 일반적으로 분석장은 예보장에 비해 실제에 더 가깝게 기상 및 환경정보를 기술하고 있기 때문에 분석장을 초기장으로 활용하여, 예보의 정확도를 향상시킬 수 있다. 한편, 3차원 혹은 4차원 변분법을 이용한 위성자료동화체계가 확립된 이래로 초단기부터 중기까지의 예보의 전반적인 질은 지속적으로 향상되어오고 있다. 하지만, 각각의 기상 이벤트별로 세분화하여 분석했을 때 이따금 오차가 큰 예보장이 생산되곤 한다(Bauer et al., 2015). 이와 같은 사례들은 다양한 예보장을 진단 및 검증하는 시스템을 구축함으로써 모니터링이 가능하다. 현재 대한민국의 독자 기상모델의 중단기 예보장의 진단 및 검증 시스템은 유럽중기예보센터, 영국기상청, 미국환경예측센터 등에서 활용되고 있는 분석 검증, 존데 검증, 강수량 검증으로 세분화되어 있지만 (기상청, 2021), 이와 같은 검증 시스템은 단순 예보장에 대한 검증이 아닌 어느 곳에서 예보장의 오차가 유발되었는지는 확인할 수 없다.

위성자료동화는 전구의 관측범위를 고려할 때 필수불가결한 요소이며, 앞으로 더욱더 활용도가 높아질 수치예보의 영역이다. 이를 바르게 동화하여 수치예보의 성능을 향상시키는 것은 대부분의 기관들이 나아가는 방향성과 일치한다. 모델들의 해상도는 지속적으로 높아지고 있고, 이러한 변화의 상황 속에서 모델의 배경장과 관측을 융합하는 자료동화의 과정은 양쪽의 변화하는 자유도에 의해서 적절한 방식의 대처를 요구받게 된다. 현재 기상청의 앙상블 모델의 해상도는 32km이지만 내년 24km로 해상도가 향상될 예정이다. 현재 관측의 영향력을 표현하는 국지화 규모를 1800km로 사용하고 있는데 타 기관은 최소 1200km의 국지화

규모를 사용하고 있는 것으로 보인다(Lorenc et al., 2015). 이렇게 모델과 관측의 설정이 변화하는 상황일수록 관측이 예보에 미치는 영향력을 정량적으로 진단하고 바르게 대처하는 일이 필수적인데 반해, 아직 기상청에서는 앙상블 기반 관측자료 민감도 도구(Ensemble Forecast Sensitivity to Observation; EFSO)가 현업적으로 진단의 역할을 하고 있어 현업에서 활용하기 위해 EFSO관련 코드 안정화와 앙상블 기반 관측자료 민감도 도구를 바탕으로 위성자료의 활용성이 얼마만큼 자료동화시스템 내에서 적절한지 확인하고 이를 개선하는 일이 필요하다. 현재 한국형수치예보모델의 자료동화시스템의 분석변수는 정역학 체계에 근거한 변수들이고 모델 자체는 비정역학 체계에 근거한 변수들을 사용하고 있다. 자료동화가 완료되고 나면 이를 모델의 변수로 초기화하는 과정이 필수적인데 모델이 고해상도가 되고 비정역학적 중규모현상에 대한 예측이 중요할수록 이 과정들에 대한 검토 또한 필요하리라 생각된다.

1.2. 연구 필요성

해수면 온도 (Sea surface temperature)는 대기와 해양의 경계를 정의하고 상호작용을 기술하며, 대기의 열적 상태를 예측하는 데 가장 기본적인 일기 및 기후 변수로, 일기예보 모델이나 기후모델 수행에 필요한 중요한 입력자료이다 (O'Carroll et al., 2019). 따라서 해수면 온도의 관측과 시·공간적 분포와 변동에 대한 모니터링은 일기예보센터의 지속적인 업무가 되었으며, 수치예보모델의 중요한 입력자료가 되었다. 해양-대기의 열적 교환을 결정하는 주요 변수이며, 위성 관측복사량의 자료동화 시 복사전달계산을 위한 대기 하층의 경계치로 사용되기 때문이다. 한국형수치예보모델의 수행에서는 영국기상청에서 제공하는 Operational Sea surface Temperature and Ice Analysis (OSTIA) 해수면 온도 초기장 자료가 이용된다. OSTIA는 각종 적외 및 마이크로파 위성 해수면 온도 산출물과 부이 등의 현장관측자료를 융합하여 최적내삽법을 통해 일평균 전구 해수면 온도를 생산한다. OSTIA 해수면 온도의 편향은 ~ 0.1 K 평균 제공근 오차는 ~ 0.5 K로 보고되고 있어, 수치예보모델 수행에 충분한 수준의 정확도를 갖추어다고 판단된다.

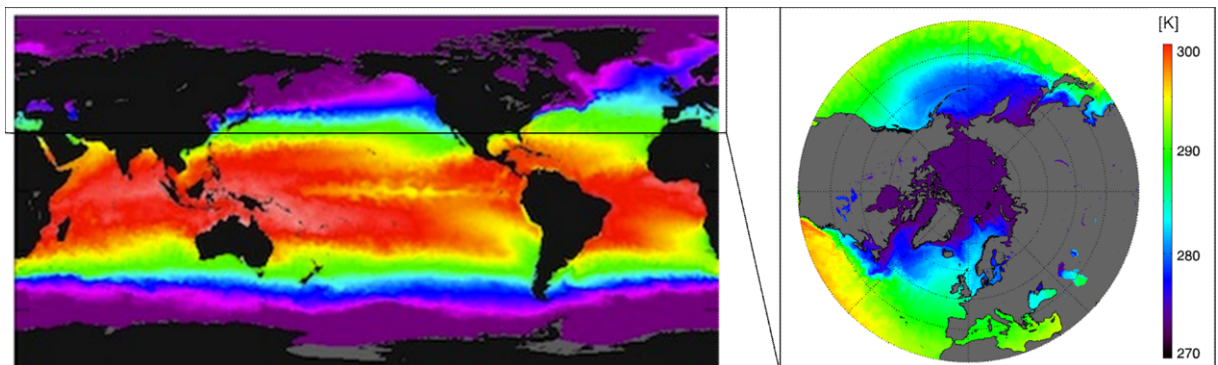


그림 1.2.1. 2015년 1월 1일 영국기상청에서 제공하는 OSTIA 해수면 온도의 지리적 분포.

그러나 이러한 정확성에도 불구하고 OSTIA 자료는 해빙 영역에서 대기-해양 경계면의 온도를 정확하게 반영하지 못하는 한계를 가진다. 해빙으로 덮여있는 해양에서 271.35 K (-1.8 °C)로 고정되어 있는데(그림 1.2.1), 해당 온도는 해빙과 대기의 경계온도가 아닌 해빙과 해수의 경계온도를 의미한다. 따라서 해빙 지역의 경우, OSTIA 해수면 온도가 자료동화에 필요한 복사경계조건으로 이용될 수 없다. 북극 해빙 지역에서는 해수면 온도가 아닌 해빙과 대기의 경계온도인 해빙표면 온도(Ice surface temperature)가 입력되어 복사전달모델의 경계조건을 제어하는 복사전달계산이 이루어져야 한다. 이러한 이유로 한국형수치예보모델에

서는 예보장의 표면온도를 다시 초기장으로 반복 사용한다. 그로 인해 모델의 표면온도는 관측과는 거리가 있어 자료동화에 직접 이용이 어렵다.

따라서 고위도 지역에서 사용되지 못하는 OSTIA 해수면 온도는 해빙표면 온도로 대체되어야 한다. 더욱 정확한 표면온도의 사용은 대기의 지표와 대기의 열적 상호작용의 요건을 더 잘 기술할 수 있다. 그뿐만 아니라 지면에 영향을 받은 위성 기반 온·습도 탐측 채널의 자료동화 활용에 필요한 대기 하층 경계치로도 사용할 수 있다. 특히, 표면온도 (또는 지면온도)의 산출과 대체는 고위도지역 예보에 매우 중요한 기여를 할 수 있으리라 생각된다.

해빙표면 온도는 적외선 및 마이크로파의 대기창 관측을 이용하여 산출할 수 있다. 이중 마이크로파에 기반한 표면온도 산출이 적절하다. 마이크로파는 해양과 해빙 지역에서 뚜렷한 복사특성의 차이를 보여 해수와 해빙 지역의 구분이 가능하고, 대기와 구름의 존재에 덜 민감하므로 지면 정보를 더욱 정확히 얻을 수 있기 때문이다. 그러나 마이크로파의 경우, 눈과 해빙 층에서 방출되는 복사에너지는 지면의 얇은 층 온도(skin temperature)가 아닌 수 센티미터 ~ 수 미터 깊이의 내부 층에서 방출되는 점에 유의해야 한다. 그뿐만 아니라 해빙은 염도나 거칠기 등의 시공간적인 변화로 인해 방출을 변화가 심하여, 정확한 방출을 산출이 자료동화에 중요한 요소가 되고 있다. 이러한 해빙 방출층 온도 및 방출을 산출의 어려움은 위성 마이크로파의 자료동화 활용을 방해하고 있다.

현재 이를 개선하기 위해 국내·외 일기예보센터는 많은 연구를 진행하고 있다. 자료동화를 위해 사용하는 해빙 방출을 생산방식은 유럽중기예보센터에서 개발한 동적 기법(dynamic method)을 들 수 있다. 이는 마이크로파 대기창 채널의 관측치(O)와 수치예보모델의 배경장(B)으로부터 복사전달모델 계산을 통해 배경값(B)에서 관측값(O)을 추산하여 "유효 방출율"을 얻는 방식이다. 그러나 이 방법은 해당 과정이 포함하는 모든 오차가 방출율에 누적되는 단점을 가지고 있어 자료동화에서의 활용이 그리 높은 편이 아니다.

최근 서울대 연구팀은 북극해 해빙 성장모델을 개발하여 적설-해빙의 물리적·광학적 성질을 모의하고 (Kang et al., 2021), 이로부터 해빙의 방출율과 방출층 온도를 산출하는 물리 모형을 구현하였다 (기상청, 2021). 이로 산출된 자료를 1차원 변분법 모델에 적용하여 ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder) 센서에 대한 대류권 하층 온도탐측 채널의 활용 여부와 그에 따른 분석장의 영향을 분석한 결과, 이제까지 불가능했던 ATMS 하층 채널의 동화가 가능함을 볼 수 있었다. 특히, 대류권 하층 (500~1000 hPa)에서 최대 80%의 분석장 오차가 감소하는 것을 확인하였다.

이러한 최근의 연구결과는 서울대 연구팀에서 생산한 물리 모형기반의 방출율

과 방출층 온도(이로부터 도출된 표면온도)는 자료동화에 필요한 대기 하층 경계의 복사정보를 높은 정확도로 제시하고 있음을 시사한다. 따라서, 이를 한국형수치예보모델에 활용할 필요성이 제기된다. 그러나 현업으로 활용하는 경우, 현재의 독립적인 물리 모형을 수행하는 것보다 효율적이고 간소화된 생산방식이 필요하다. 이를 위해 서울대 연구팀은 물리 모형이 계산하는 물리적 상태와 복사적 성질 사이에 존재하는 복잡한 비선형적인 관계를 일반화하여, 위성 관측자료 전처리시스템 내 일체된 모듈로서 한국형수치예보모델에 접목하고자 한다. 이 연구에서는 (1) 물리 모형에 기반한 각종 위성관측자료 (적외선, 마이크로파)를 이용한 해수면 온도산출 알고리즘 구축, (2) 기계학습 기반의 수치예보모델에의 접목을 위한 위성 밝기온도로부터 해빙 방출층 온도와 방출율, 해빙표면온도를 산출하는 알고리즘 구축, (3) 북극에서의 자료동화 확장을 위한 산출물의 적용 실험 및 예보정확도에 미치는 영향을 파악을 연구목표로 제안한다.

위성자료의 체계적 동화를 위해서는 관측오차의 구조를 면밀히 분석하여 반영하고 앙상블 배경오차공분산의 해상도에 따른 관측의 영향력을 정밀하게 조정하며 각 관측의 영향력을 앙상블 기반 관측자료 민감도 도구를 통해 정밀하게 분석하는 과정이 필요하다. 또한, 이렇게 만들어진 분석증분을 수치모델에 반영할 때, 분석변수와 모델 변수 사이의 차이를 이해하고 적절하게 모델이 받아들일 수 있도록 초기화 과정이 필요한데, 이 부분을 다시 점검하고 적절한 반영이 이루어질 수 있도록 개선하는 작업들은 수치예보향상에 큰 도움을 줄 수 있다.

현재 유수의 선진 자료동화 기관들은 위성자료의 채널 간 상관관계를 고려하여 위성자료를 동화하고 있다(Geer 2019). 이는 위성자료가 갖고 있는 고유한 특성을 반영한 것으로써 본질적으로 위성자료의 채널들은 대기 기둥에서 겹치는 구간의 정보를 반영하게 된다. 따라서 자료동화체계는 여기서 비롯되는 오차상관관계를 반영할 수 있어야 한다.

현재 기상청의 앙상블 모델의 해상도는 32km이지만 올해 차세대수치예보모델 개발사업단의 개발이 완료되는 24km로 해상도가 향상될 예정이다. 현재 관측의 영향범위 크게 표현하는 국지화 규모를 1800km로 사용하고 있는데 타 기관에서는 이보다 더 짧은 국지화 규모를 사용하기도 한다(Lorenc et al., 2015). 따라서 더 해상도가 높아진 앙상블 배경오차공분산의 설정에서 현재의 국지화 규모가 적합한지 점검하고 개선하는 것이 필요하다.

지난 2년간의 노력으로 기상청 내에서 보유한 앙상블 기반 관측자료 민감도 도구(EFSO)는 실제 활용할 수 있을 정도로 코드 안정화가 이루어져왔으므로 앙상블 자료동화시스템에 적용하여 효과를 검증하고 하이브리드시스템에서도 관측 민

감도를 구할 수 있도록 적용해볼 수 있을 것이다. 이를 바탕으로 위성자료의 활용성이 얼마만큼 자료동화시스템 내에서 적절한지 확인하고 이를 개선하는 일이 필요하다.

현재 한국형수치예보모델의 자료동화시스템의 분석변수는 정역학 체계에 근거한 변수들이고 모델 자체는 비정역학 체계에 근거한 변수들을 사용하고 있다. 따라서 자료동화가 완료되면 이를 모델의 변수로 초기화하는 과정이 필수적인데 이 과정은 어쩔 수 없이 적은 정보에서 많은 정보로의 벡터의 확장을 요구하는 과정이다. 이 과정은 수많은 가정을 바탕으로 하므로 여기에 쓰이는 가정이 타당한지 다시 한번 점검하는 일은 자료동화의 효과를 예보모델에 온전히 반영시키기 위해서 꼭 필요하리라 생각된다.

미국 기상예보센터의 앙상블 기반 관측자료 민감도 도구 활용에 따른 지면자료의 예보효과를 보면 지면자료를 상당히 보수적으로 사용하는 것이 오히려 예보성능에 더 좋은 효과가 나타날 수 있음을 시사하고 있다. 따라서 우리 시스템 안에서도 이를 점검하고 지면자료를 효과적으로 활용할 수 있는 방안을 마련하는 것은 필요한 일이다. 현재 기상청 현업시스템에서 지면자료를 동화하는 방식이 상이한데, 앙상블 자료동화시스템에서는 지면기압만을, 하이브리드시스템에서는 여타의 변수를 모두 동화하고 있다. 우선 이 불균형을 해소하는 일이 필요한데, 개선 방향을 결정할 때 EFSO를 활용한다면 정량적인 근거에 따른 결론을 내리는데 도움이 될 것이다. 또한, 두 시스템의 해상도가 다르다면 현재의 하이브리드시스템에서 보정된 관측을 앙상블 자료동화시스템에서 활용하는 방식 자체가 예보 시스템의 성능을 하락시킬 수도 있다. 이러한 부분들에 대한 종합적인 진단과 개선이 필요하다.

위성자료 동화 시 경사경로에 대한 고려는 정확한 위성신호 복원(혹은 관측연산자 개발)을 위해 반드시 필요한 작업으로 이미 ECMWF에서는 2016년 하반기부터 저궤도 탐측기 관측자료에 대한 청천 복사 동화에 경사경로 효과를 고려하기 시작하였고(Bormann, 2017) 캐나다 기상청에서도 경사경로 고려가 예측 성능에 미치는 영향에 대한 연구들을 진행하였다 (Shahabadi et al., 2018; Shahabadi et al., 2020). 한편, 위성 자료 동화 시 경사경로 고려 효과는 특히 구름 주변에서 크게 나타나는데, 전천 자료동화에 대한 관심과 요구가 지속적으로 증가하면서 최근 선진 현업기관을 중심으로 전천 자료동화가 시도되고 있는 상황이다(Geer et al., 2019; Shimizu et al., 2020; Shahabadi and Buehner, 2021). 따라서 위성 관측각을 고려한 정확한 위성신호 복원은 성공적인 전천 자료동화 수행을 위해서도 반드시 수행되어야 하는 작업이다. 한국 기상청의 경우

아직 청천 위성자료에 대한 동화에 경사경로에 따른 효과가 고려되어 있지 않은 상황이고, 전천 자료동화도 아직 준비 단계이므로 세계적인 흐름을 고려할 때 경사경로를 고려한 관측연산자 개발은 반드시 필요한 작업이라 할 수 있겠다. 또한, 기후변화에 대응하기 위한 탄소중립 정책이 전 지구적으로 추진되면서 최근 이산화탄소를 비롯한 미량기체 산출에 대한 연구들이 다시 활발하게 진행되고 있는데, 위성의 모의자료는 이러한 온실기체 산출 시에도 배경정보로 활용되기 때문에 정확한 온실기체 산출을 위해서도 경사경로 적용을 통한 정확한 모의자료 생산이 필요하다.

현업예보 시스템 내에서 가장 흔하게 겪는 문제는 단기 예보에서 나타나는 기압장 및 강수역의 큰 변동성이다. 이러한 변동성이 나타나는 근본적인 이유는 초기 조건이 수치예보모델의 아격자규모 물리모수화 방정식에 부적합하거나 배경장의 오차 공분산을 제대로 모의하지 못하여, 분석장 생산에 영향이 있을 때 주로 발생한다고 알려져 있다(Rabier et al., 1996). 즉, 분석장이 표면적으로는 개선이 된 것처럼 보이지만 앞선 문제들과 더불어 예보에 활용될 때 예보장의 오차를 유발할 가능성이 있는 것이다.

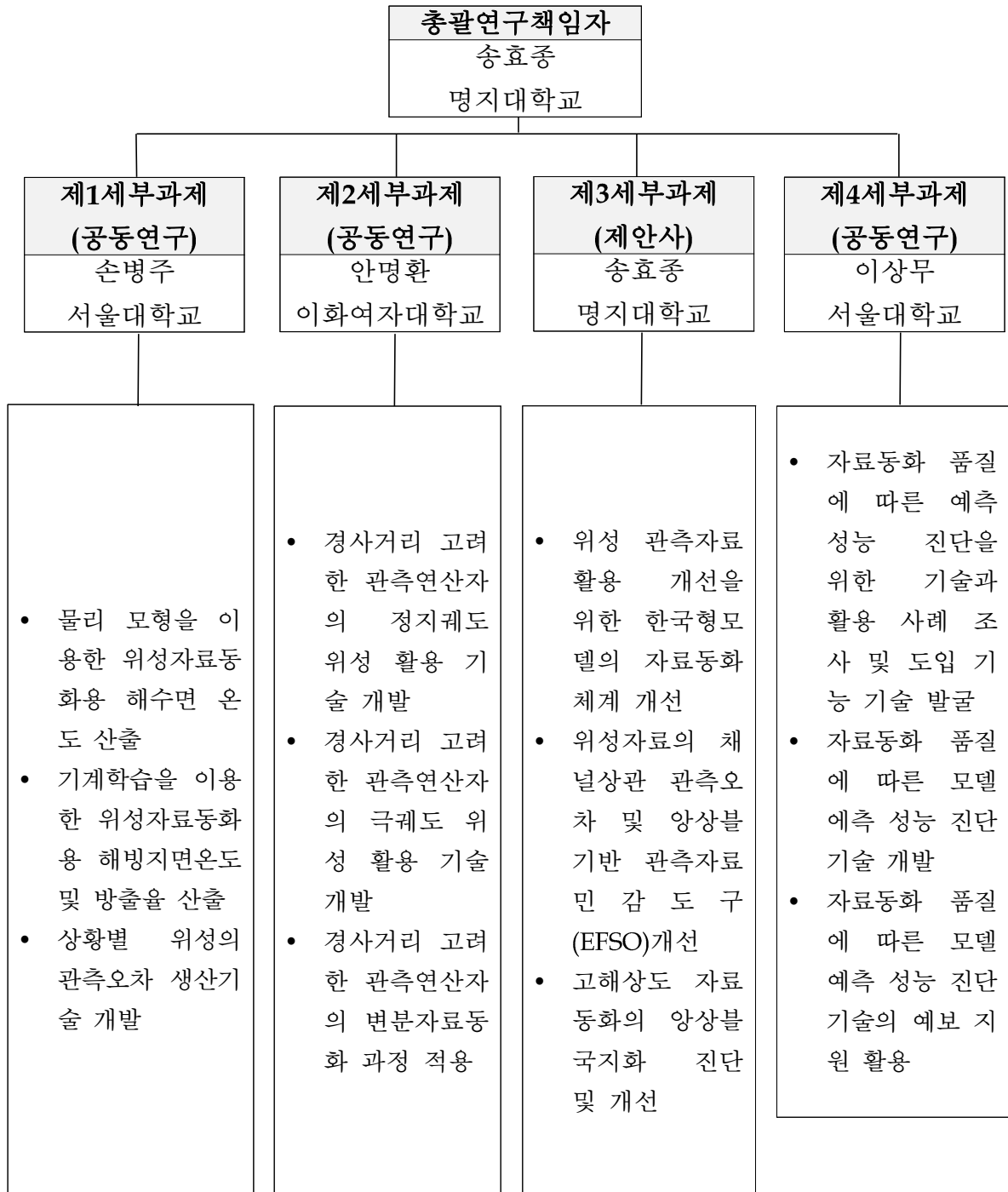
예보 오차의 기원을 찾기 위해서 다양한 오차추적기술의 활용이 가능하다. 전지구기상모델의 예보 오차는 로스비 파동의 군속도(Group velocity)를 따라 주로 전파되며 대기 파동의 위상속도(Phase velocity)에는 묶이지 않은 것으로 알려져 있다. 따라서, 종관 및 대규모 측면에서 오차를 살펴보는 것이 가장 타당한 방법이다. 가장 흔히 활용되는 방법은 예보장과 분석장의 차이를 다양한 시간대에 표면화하여 시각화한 뒤에 시간을 거슬러 일일이 오차를 추적하는 것이다. 비슷한 방법으로는 시간별(예: 30분 간격) 예보장을 시각화하여 각각의 사례별로 오차의 진행 방향을 살펴보는 것이다. 한편, 예보 오차를 줄이는 한 가지 방법으로는 앙상블 예보가 있다. 앙상블 예보는 초기장과 물리모수화 과정이 서로 다른 예보 멤버를 활용하기 때문에 대기 중에 존재하는 예보 불확정성의 발달을 예측할 수 있는 단초를 제공할 수 있다. 이 과정에서 앙상블 민감도라는 것을 정의할 수 있는데, 이는 각 모델 격자에서 앙상블 멤버간의 공분산과 반응함수를 표준화함으로써 계산할 수 있다. 앙상블 민감도에서 사용되는 함수의 정의는 모델마다 서로 다르기 때문에 모델의 분석장과 예보장의 상관성 분석이 선행되어야 한다(Zheng et al., 2013). 마지막 방법으로는 Newton Relaxation 방법을 활용하는 것이다(Jung et al., 2010). 이 방법의 물리적인 기반은 한 지역(예: 동아시아)내에 실제 상태를 지속적으로 예보장에 투사한 뒤에 예보장 내의 시간에 따른 기상 변수의 변화를 진단하는 것이다. 이러한 기술은 주로 월별, 계절 예보에 사용되며 열

대지역과 중위도 지역, 극 지역과 중위도 지역의 원격상관을 조사하는 데 활용된다.

한국형수치예보사업단의 보고서에 따르면, 한국형수치예보모델 내에는 분석장의 정확도에 따른 예보 오차를 진단하고 이의 기원을 찾는 오차추적기술이 개발되어 있지 않다. 단순 오차예보의 진단도 모델을 개선하고 개발하는 데 중요한 역할을 하지만, 분석장의 정확도에 따른 예보 오차를 진단하지 않는다면 모델의 어떤 부분을 개선해야 하는가에 대한 방향성을 결정하기 어렵고, 더불어 잘못된 방향으로 모델의 개선 방향을 결정하는 실수를 범할 수 있다. 따라서 한국형수치예보모델 시스템 내에서 분석장과 예보장의 상관관계를 분석하고, 오차를 진단하며 추적할 수 있는 시스템이 필수적으로 개발되어야 한다.

2. 사업 추진체계

본 사업의 수행 조직은 주관연구기관과 협력연구기관 2팀으로 총 3팀으로 구성된다. 프로젝트의 성공적인 수행을 위하여, 사업지원팀의 적극적인 지원이 필요하며, 프로젝트 관리자의 책임하에 충실히 사업을 수행한다. 계획된 일정 내에 “한국형모델의 위성관측 자료동화 및 초기화 기술 개발” 사업이 완료될 수 있도록 사업관리팀과의 강력한 협력체계를 유지한다.



3. 사업내용별 연구목표

3.1. 물리 모형을 이용한 위성자료동화용 해수면 온도산출 (서울대학교)

전통적 해수면 온도 관측은 선박 및 부이 등의 현장 관측이 통상적이며, 대부분 엘니뇨-남방 진동 등의 지구 온난화에 대한 장기간 기후 변동을 감시하는 목적으로 사용된다. 특히, 현장 관측은 높은 정확도를 가지며 기상 조건에 크게 영향을 받지 않는 장점이 있어, 해양 산출물 검증에서의 "기준값"으로도 사용된다. 하지만, 북대서양과 북태평양의 일부 지역을 제외하고는 특히 남반구 해양지역에서는 현장 관측자료가 희박하다. 따라서, 현장 관측으로부터 연속적인 전구 해수면 온도자료를 생산하기 위해서는 높은 수준의 내·외삽이 요구된다. 하지만, 이는 특정 영역에서의 시·공간적 특징을 모호하게 할 수 있으며, 기기 간의 측정 기법과 측정 깊이의 차이로 인한 가짜 변동을 유발할 수 있는 단점이 있다.

그에 반해 위성 관측은 전구 범위의 해수면 온도를 제공할 수 있다는 점에서 현장 관측보다 큰 이점을 가진다. 위성 관측은 해수면에서 일어나는 방출이 대기를 통과하여 위성 고도까지 도달한 양을 측정하기 때문에, 해수면 산출에는 주로 대기의 영향을 거의 받지 않는 적외 및 마이크로파의 대기창 영역이 사용된다. 적외 파장은 해면 상태에는 크게 영향을 받지 않지만 구름에는 큰 영향을 받는다. 반면에, 마이크로파 파장은 구름의 영향은 적지만 해면 상태에는 큰 영향을 받는다. 적외 관측은 고해상도(< 1 km) 자료를, 마이크로파 관측은 저해상도(> 50 km) 자료를 제공한다. 위성 관측은 시/공간적으로 비균질적으로 이루어지기 때문에, 신뢰할 수 있는 전구 자료를 안정적으로 생산하기 위해서는 하루 정도의 자료 수집 기간이 필요하다. 이러한 연유로, 대부분의 위성 관측기반 해수면 온도자료는 하루 전날의 일평균 자료를 제공하며(예: OSTIA) 낮은 시간 해상도를 가지는 단점이 있다.

해수면 온도는 대기와 해양의 경계를 정의하고 상호작용을 기술하며, 위성 관측 복사량을 해석하기 위해 자료동화에서 요구하는 필수 입력자료이다. 본 연구는 해수면 생산기술의 고도화를 목표로, 위성 관측기반의 일 평균 해수면 온도로부터 높은 시간 해상도의 온도를 복원하는 해양 경계 모델(Ocean Boundary Model, OBM)을 개발하고 이를 검증한다.

3.2. 경사거리 고려한 관측연산자의 정지궤도 위성 활용 기술 개발 (이화여자대학교)

관측연산자를 이용한 모의 정확도를 높이기 위해서는 위성의 관측각을 고려한 모의가 매우 중요한데, 전통적으로 위성자료를 수치예보모델에 동화 시 관측각에 따라 위성에 도달하는 신호가 달라지는 특성이 완벽하게 고려되지 못했다. 이는 위성이 직하점을 관측할 때를 제외하고는 위성과 지구상의 관측지점을 잇는 선이 연직(vertical)이 아닌 기울어진(slanted) 구조를 하고 있음에도, 지금까지는 이러한 위성의 관측 구조 특성을 고려하지 않고 slant-path상의 프로파일(즉, 경사 프로파일)이 아닌 연직 프로파일을 이용해왔기 때문이다. 하지만, 정확한 위성신호 복원을 위해서는 경사거리 변화에 따라 달라지는 optical depth 효과에 대한 고려와 함께(이 부분은 이미 복사전달모델에 반영되어 있음) 관측연산자의 모의 입력자료로 사용되는 대기 프로파일을 연직 프로파일이 아닌 경사 프로파일로 변경하는 작업이 수반되어야 한다.

이에 본 연구에서는 KIM 시스템에 적용할 수 있는 경사 관측연산자를 3차년에 걸쳐 개발하는 것을 목표로, 1차년도에는 우선 정지궤도 위성 자료에 대한 KIM의 전처리 시스템인 KPOP에 적용할 수 있는 경사계산 모듈을 개발하였다. 정지궤도 위성에 대한 자료동화에 경사 관측연산자를 적용하는 연구는 아직까지 활발하게 진행되고 있지 않는 것으로 파악되어 있고, 반면 자료동화에 미치는 영향이 큰 저궤도 위성에 대한 자료동화에는 마이크로파 탐측기를 시작으로 경사계산 방식이 적용되기 시작하였다 (예시, ECMWF, 캐나다 기상청). 현재 KIM 전처리 시스템에서 활용하고 있는 정지궤도 위성 자료는 GK2A, Himawari-8, MSG 위성에서 생산되는 청천복사휘도 자료이다. 따라서, 본 연구에서는 이 3종의 정지궤도 위성자료 처리에 적용할 경사 관측연산자를 개발하되, 향후 새로운 정지궤도 위성자료가 추가될 경우를 고려하여 확장 적용이 가능하도록 공용 모듈로 개발하는 것을 목표로 연구를 진행하였다.

3.3. 위성 관측자료 활용 개선을 위한 한국형모델의 자료동화체계 개선 (명지대학교)

현재 한국형수치예보모델의 자료동화시스템의 분석변수는 정역학 체계에 근거한 변수들이고 모델 자체는 비정역학 체계에 근거한 변수들을 사용하고 있다. 따라서 자료동화가 완료되고 나면 이를 모델의 변수로 초기화하는 과정이 필수적인데 이 과정은 어쩔 수 없이 적은 정보에서 많은 정보로의 벡터의 확장을 요구하는 과정이다. 따라서 이 과정에서 쓰이는 수많은 가정이 타당한지 점검하여 자료동화의 효과를 예보모델에 온전히 반영 하고자 하였다.

미국 기상예보센터의 앙상블 기반 관측자료 민감도 도구 활용에 따른 지면자료의 예보효과를 보면 지면자료를 상당히 보수적으로 사용하는 것이 오히려 예보성능에 더 좋은 효과가 나타날 수 있음을 시사하고 있다. 따라서 우리 시스템 안에서도 이를 점검하고 지면자료를 효과적으로 활용할 수 있는 방안을 마련하는 것은 필요한 일이다.

현재 기상청 현업시스템에서 지면자료를 동화하는 방식이 상이한데, 앙상블 자료동화시스템에서는 지면기압만을, 하이브리드시스템에서는 여타의 변수를 모두 동화하고 있다. 이 불균형을 해소하기 위한 방향성을 결정하는데 EFSO를 연계하여 활용한다면 정량적인 근거에 따른 결론을 내리는데 도움이 될 것이다. 또한, 두 시스템의 해상도가 다르다면 현재의 하이브리드시스템에서 보정된 관측을 앙상블 자료동화시스템에서 활용하는 방식 자체가 예보 시스템의 성능을 하락시킬 수도 있다. 이러한 부분들에 대한 종합적인 진단과 개선을 위해 노력하였다.

3.4. 자료동화 품질에 따른 예측 성능 진단을 위한 기술과 활용 사례 조사 및 도입 기능 기술 발굴 (서울대학교)

수치예보모델의 자료동화 시스템에서 개선된 분석장은 예보장에 비해 실제에 더 가깝게 대기 상태를 묘사하고 있기 때문에 분석장을 다음 예보장의 초기장으로 활용됨으로써 예보 오차를 개선해준다. 그러나 개선된 분석장임에도 예보 오차가 커지는 사례들이 발생하곤 하여 예보 오차를 개선하고 모델체계의 개선 방향성을 정확하게 잡기 위해선 예보장을 지속적으로 평가 및 분석하여야 한다. 이러한 예보 오차를 분석하고자 다양한 예보장을 진단 및 검증하여 시스템을 구축하는 것은 필수적이다. 한국형수치예보모델의 진단 및 검증 시스템은 단순 예보장에 대한 검증만을 하고, 어느 곳에서의 예보 오차가 유발되었는지는 확인할 수 없다. 예보 오차를 진단하는 시스템을 구축하는 것은 중요한 역할을 하지만, 분석장에 따른 예보 오차를 진단하지 않으면 수치예보모델에서 어느 부분을 개선해야 되는지 방향성을 찾기 어려우며, 오히려 잘못된 방향으로 정하게 될 수 있다. 그러므로 한국형수치예보모델 시스템 내에서 예보장의 예보 오차의 분포 및 예보장과 분석장간의 상관관계를 분석하고 오차를 진단하며 추적할 수 있는 시스템의 개발이 필수적이다.

본 연구에서는 자료동화의 품질에 따라 개선된 분석장이 모델의 예측 성능과 어떤 관계가 있는지를 예보장과 분석장간의 상관성을 분석하고 예보 오차를 진단하고자 하며, 이를 추적하는 시스템을 개발하여 실예보에도 적용이 될 수 있도록 지원하고자 한다.

II. 1단계 사업내용 및 성과

1. 목표 시스템 구축 내역

1.1. 물리 모형을 이용한 위성자료동화용 해수면 온도산출 (서울대학교)

1.1.1. 통계 기반에서 물리 모형기반의 알고리즘 개발로 연구 계획을 변경한 사유

본 연구는 공고에 따라 기계학습 기반의 해수면 산출 알고리즘 개발을 위해 ERA5 재분석자료로부터 대기/지면 상태를 확보하고 이를 복사전달모델에 입력하여 밝기온도를 계산한 후, 밝기온도와 해수면 온도 사이의 관계를 학습하는 통계 기반 알고리즘을 개발하는 계획을 수립하였다. 즉, 개발된 알고리즘은 ERA5에 기반하기 때문에, ERA5에 준하는 성능을 가진다고 볼 수 있다.

하지만, 복사전달방정식에서 지면 기여도의 구성은 온도뿐만 아니라 방출률과도 밀접한 관련이 있다. 밝기온도 계산에 사용되는 방출률은 복사전달모델에 내장된 해양 방출률 모델에 의존한다. ERA5는 물리 모형을 기반으로 표면 온도를 산출하기 때문에 복사전달모델의 해양 방출률 모델과는 무관하다. 따라서, 학습 과정에서 표면 온도와 방출률 사이의 다중 해(multiple solution)가 충분히 존재할 수 있다. 이는 산출 알고리즘의 정확도에 영향을 미치는 중요한 요인이다.

결론적으로 ERA5에 준하는 해수면 온도를 산출하기 위해서는 과학적 사실과 원리에 근거한 물리 모형기반의 해수면 온도산출 알고리즘의 개발로 귀결된다. 이에 따라, 본 연구팀은 발주처와 협의하여 통계 기반에서 물리 모형기반의 알고리즘 개발로 연구 계획을 변경하였다.

1.1.2. 해수면 온도의 이론적 정의

해수면 온도는 다양한 분야에서 관련 목적에 따라 세분화하여 정의하며, 일부는 같은 명칭이라도 정의가 다를 수가 있다. 아래는 해양 관측과 원격탐사 분야에서 사용하는 세분된 해수면 온도를 정리한다.

가. 해양학 관점

해수면 온도는 관측 기기의 특성과 해양의 고유한 특징에 따라 해빙 상층부 내 다양하게 세분된다 (Donlon et al., 2002).

1) Interface sea surface temperature (SST_{int})

대기와 해양의 경계면 온도로 현재 기술로는 관측할 수 없으며, 이론상 존재하는 온도이다.

2) Skin sea surface temperature (SST_{skin})

해양의 깊이 $\sim 10 \mu m$ 부근에서 방출하는 3.7, 10~12 μm 밴드의 적외 복사계에서 산출한 온도이다. 대기-해양 경계면 아래 $\sim 10 \mu m$ 깊이에서의 온도를 대표한다.

3) Sub-skin sea surface temperature ($SST_{subskin}$)

해양의 깊이 $\sim 1 mm$ 부근에서 방출하는 6~10 GHz 주파수의 마이크로파 복사계에서 산출한 온도이다. 대기-해양 경계면 아래 $\sim 1 mm$ 깊이에서의 온도를 대변한다.

4) Sea surface temperature at specific depth (SST_{depth})

해양 상층부 내 물리적으로 설치한 부이, 선박 등의 관측기기로부터 측정된 특정 깊이(specific depth)에서의 온도이다.

5) Foundation sea surface temperature (SST_{fnd})

해양 상층부 내 대략 3~10 m 부근의 일 주기가 나타나지 않는(=일 변동이 없는) 층에서의 온도이다. 이는 적외 및 마이크로파 복사계로는 측정이 불가하며, 부이와 같은 지상 관측 자료로부터 깊이와 온도를 추정할 수 있다.

그림 1.1.1은 앞서 언급한 해양 상층부 내 세분된 5가지 해수면 온도의 모식도이다. 온도의 일 주기가 없는 “ SST_{fnd} ” 를 기준으로 주·야간의 해양 상층부의 이상적 수직 온도 변화를 보여준다. 주목할만한 부분은 “interface” 와 “sub-skin” 사이는 항상 “sub-skin” 온도보다 낮다는 점과 야간에는 “sub-skin” 부터 “foundation” 까지 등온 상태를 유지한다는 점이다.

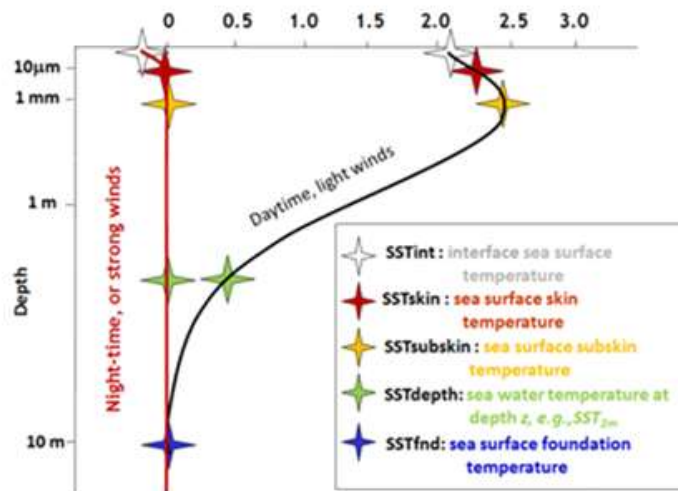


그림 1.1.1. 해수면 온도의 정의 ($SST-SST_{fnd}$). (출처: Donlon et al., 2002)

나. 원격탐사 관점

위성 기반 해수면 온도 알고리즘은 대기의 영향이 적고 지면의 영향이 지배적인 대기창 채널들을 이용하며, 주로 관측된 복사량과 해수면 온도 사이의 관계를 다중 회귀 방식으로 구현한다. 따라서, 알고리즘 개발의 핵심 요소는 대기창 채널로부터 적절한 예측 인자(predictor)를 구성하고 양질의 훈련자료로부터 최적의 회귀계수를 결정하는 것이다.

대부분의 알고리즘 개발에서는 위성 복사량과 부이 해수면 온도를 훈련자료로 사용한다. 여기서 주목할 부분은 적외 및 마이크로파 복사계가 대표하는 깊이(0.01~1 mm)와 부이가 대표하는 깊이(0.5~1 m)가 다르다는 점이다. 즉, 위성 관측은 “SST_{skin}”와 “SST_{subskin}”을 대변하지만, 부이는 “SST_{depth}”를 대변하기 때문에, 두 온도는 이론적으로 일치하지 않는다. 하지만, 원격탐사에서는 부이 관측자료와 위성복사량으로 측정된 온도가 동일하다고 가정한다. 훈련자료로 사용할 0.01~1 mm 부근의 실 관측자료가 없기 때문이다. 따라서, 위성 기반 알고리즘은 부이 관측온도를 추정하도록 설계되어 있다고 볼 수 있다. 그림 1.1.2는 김희영 외 (2016)에서 수행한 2012년 7월부터 2016년 8월까지 4년간 북서 태평양에서의 AMSR2(Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) 해수면 온도 산출물과 부이 관측 온도를 비교·검증한 결과이다. 두 산출물은 편향(bias)이 없이, ~1에 가까운 상관관계를 가진다. 이는 앞서 언급한 원격탐사 분야에서 채택한 “위성 알고리즘→부이 관측온도” 개념을 뒷받침한다.

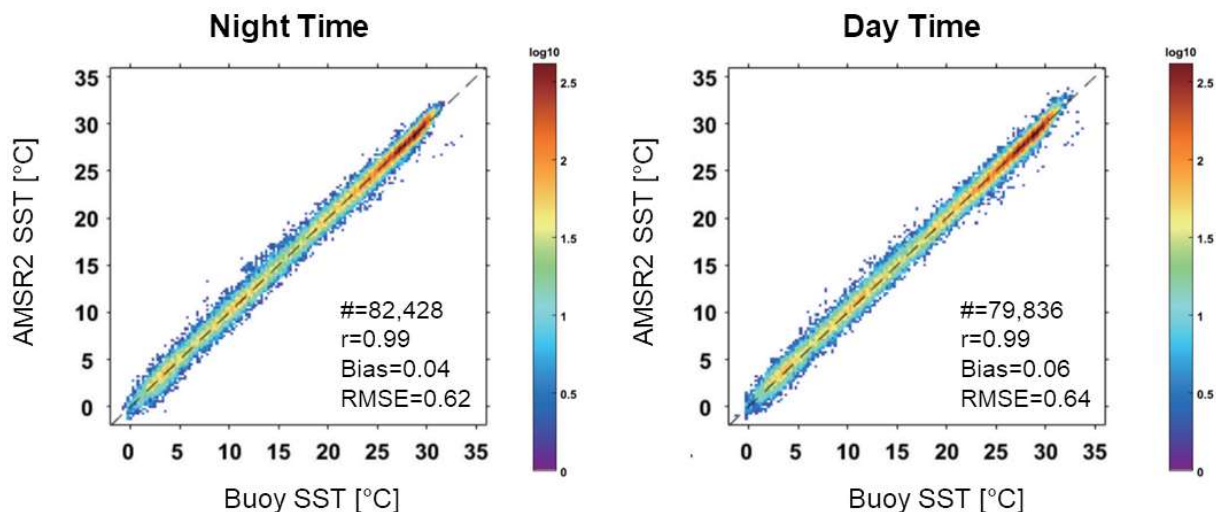


그림 1.1.2. 2012년 7월부터 2016년 8월까지 4년간 북서 태평양에서 AMSR2의 해수면 온도와 부이 관측온도를 비교한 결과. (a) 야간, (b) 주간 (출처: 김희영 외, 2016)

다. 수치예보모델 관점

수치예보모델에서는 해수면 온도가 동화 단계에서 매번 초기화되고, 예보 동안에는 변하지 않는다. 한국형수치예보모델(KIM)에서는 영국기상청에서 제공하는 해수면 온도자료인 OSTIA Level 4 Foundation SST를 SST_{fnd} 으로 매번 초기화한다. OSTIA 자료는 위성, 선박, 부이 관측자료들로 구성된 전구 범위의 일 평균(=합성)자료이며, 그중 상당수가 적외 및 마이크로파 관측자료이다. 앞서, 위성 기반 해수면 온도는 부이 관측을 기준으로 하고 OSTIA는 이들의 평균임을 고려할 때, OSTIA가 명칭 하는 “Foundation” 과 앞서 언급한 “ SST_{fnd} ” 사이에는 개념적 차이가 있다. 추가로, KIM은 초기 주어진 “ SST_{fnd} ” 을 예보하는 동안 고정하며, 주어진 대기 강제력과 균형을 이루는 “ SST_{int} ” 를 매번 진단한다.

1.1.3. 위성 해수면 온도 알고리즘의 이론적 배경

적외 영역에 대한 산출 기법을 간략히 살펴보면, 적외 복사계는 채널 구성에서 대부분 근적외와 열적외 영역의 대기창 채널들을 포함한다. 대부분 알고리즘은 2~3개의 다중 대기창 채널들을 이용하는 다중 회기 기반의 “분할 창”(split window) 기법에 기초한다. 적외 복사계는 공간 해상도가 높다는 이점을 통해 고해상도(~1 km) 전구 해수면 온도자료를 생산할 수 있지만, 구름에 의해 가용영역이 심각하게 제한된다. 적외 파장은 구름의 상단에서 흡수와 방출이 지배적으로 일어나면서, 구름 아래의 해수면을 관측할 수 없기 때문이다. 이로 인해, 적도 수렴대(ITCZ)와 남태평양 수렴대(SPCZ)에서는 산출빈도가 현저히 낮으며, 관측 공백을 채우기 위해 내·외삽법을 사용한다. 요약하자면, 적외 관측기반 알고리즘은 관측복사량과 해수면 온도 간의 높은 선형성을 기반으로 직관적으로 온도를 산출하지만, 내·외삽과 공간 해상도보다 작은 구름에서 유발되는 오차를 고려해야 한다.

마이크로파 파장은 구름의 영향이 미미하므로 적외 관측이 가지는 가용영역 문제를 회피할 수 있지만, 공간 해상도(50 km 이상)가 낮다는 단점이 있다. 마이크로파 복사계는 6~10 GHz 주파수 대역의 대기창 채널로부터 해수면 온도를 추정한다. 해당 주파수는 3 cm 이상의 장파로 전천(all-sky) 영역에서 활용할 수 있는 장점이 있다. 하지만, 6~10 GHz 범위의 마이크로파는 해수면 상태(예, 해수면 염분, 풍속, 온도 등)에 영향을 받는다. 우선, 4~10 GHz 주파수의 방출(=밝기온도)은 전반적으로 해수면 온도에 민감하다. 여기서, 4 GHz 주파수 이하는 해수면 염분에 민감하며, 6~10 GHz에서는 해상풍에 민감하다. 그림 1.1.3은 상태변수에 대한 마이크로파의 민감도를 보여주는 그림이다. 따라서, 6~10 GHz 기반의 산출 알고리즘(AMSR 계열 알고리즘)은 해상풍에 대한 보정 과정이 필수이

다. 대부분은 1차 모수화를 통해 여러 주파수로부터 해상풍을 추정하고 2차 모수화를 통해 그 영향을 반영하지만, 이는 마이크로파 알고리즘에서 지속해서 개선해야 할 과제로 남아 있다.

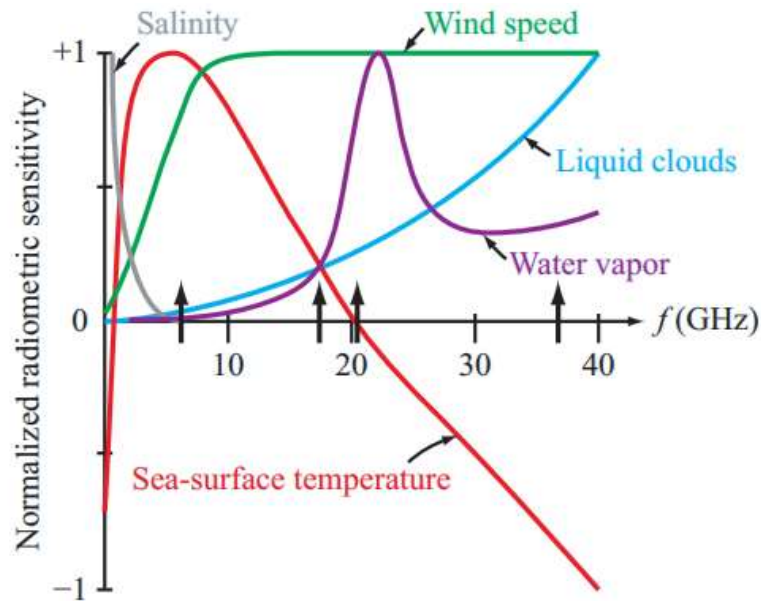


그림 1.1.3. 해수면 상태에 대한 마이크로파의 민감도. (출처: Ulaby et al. 2014)

그림 1.1.4는 2003년부터 2007년까지 4년 동안 MODIS 적외 복사계 및 AMSR-E 마이크로파 복사계의 계절별 해수면 온도의 산출빈도를 보여준다. 적외 복사계의 산출빈도는 운량의 계절 변화와 유사하며(Hosoda, 2010), 전체 자료 중 평균 30%만을 사용한다. 그에 반해, 마이크로파 복사계는 평균 ~90% 이상을 활용하는 이점을 보여준다.

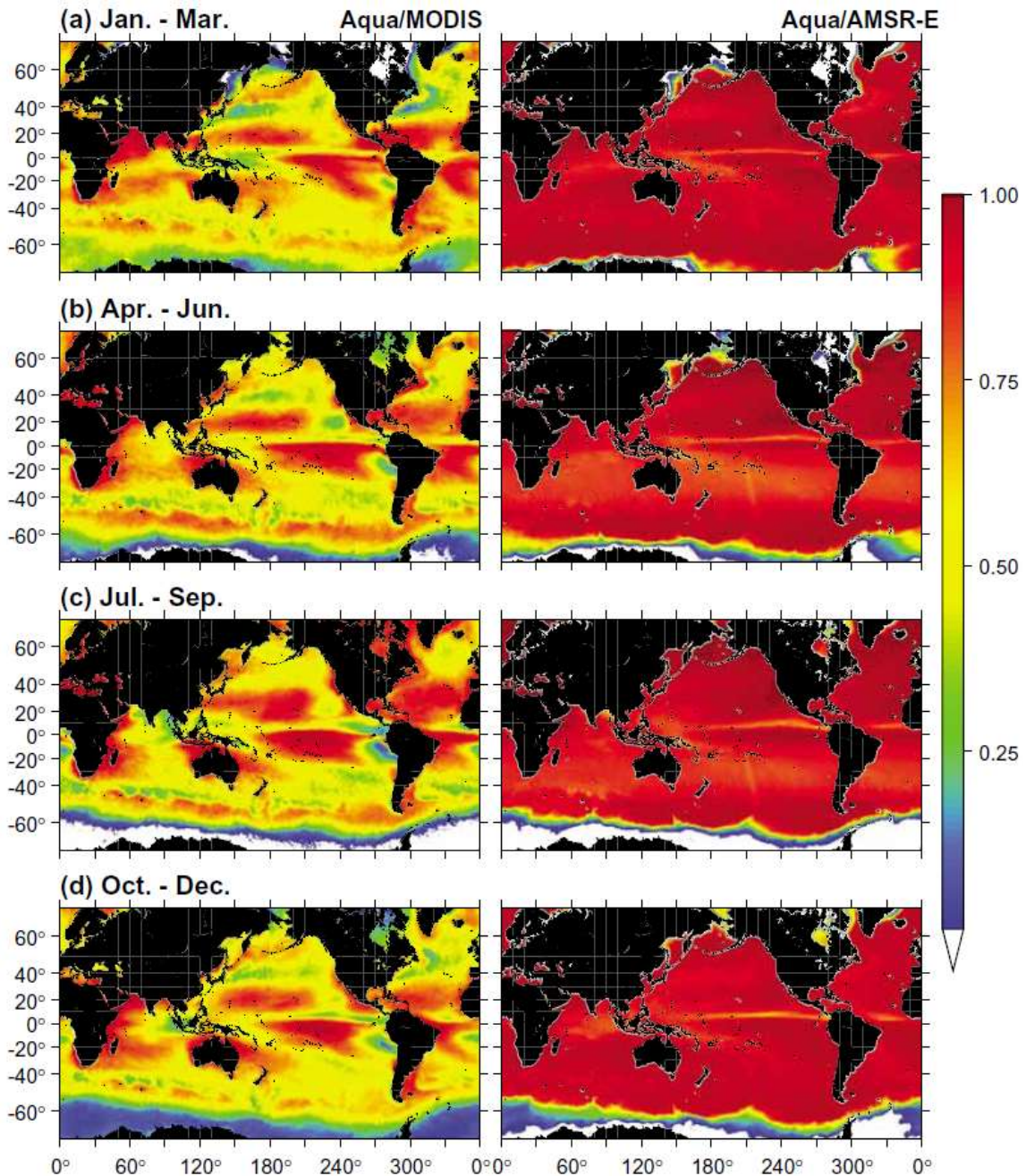


그림 1.1.4. 2003년부터 2007년까지의 [좌] 적외 복사계(MODIS)와 [우] 마이크로파 복사계(AMSR-E)에 의한 해수면 온도 산출빈도의 백분율. (출처: Hosoda, 2010)

1.1.4. Ocean Boundary Model 구현

Ocean Boundary Model (OBM) 구현과 관련하여, 수치예보모델의 용어를 우선 정리하고자 한다. 수치예보모델에서 변수 “skin temperature”는 앞서 정의한 “ SST_{int} ”이다. 변수 “sea surface temperature”는 매번 동화되는 OSTIA 온도자료로 예보 동안 고정되어, 마치 “Foundation” 온도처럼 사용한

다. 하지만, OSTIA 자료는 위성 관측기반 해수면 온도의 일 평균치이다. 위성 알고리즘은 부이의 “SST_{depth}” 를 기준으로 개발되었기 때문에, “OSTIA L4 foundation SST” 는 앞서 정의한 “SST_{ind}” 과는 차이가 있다. 즉, 해양, 원격탐사, 수치모델링 분야마다 같은 의미를 다르게 명하거나, 혹은 같게 명하지만, 의미가 다른 경우가 빈번하다.

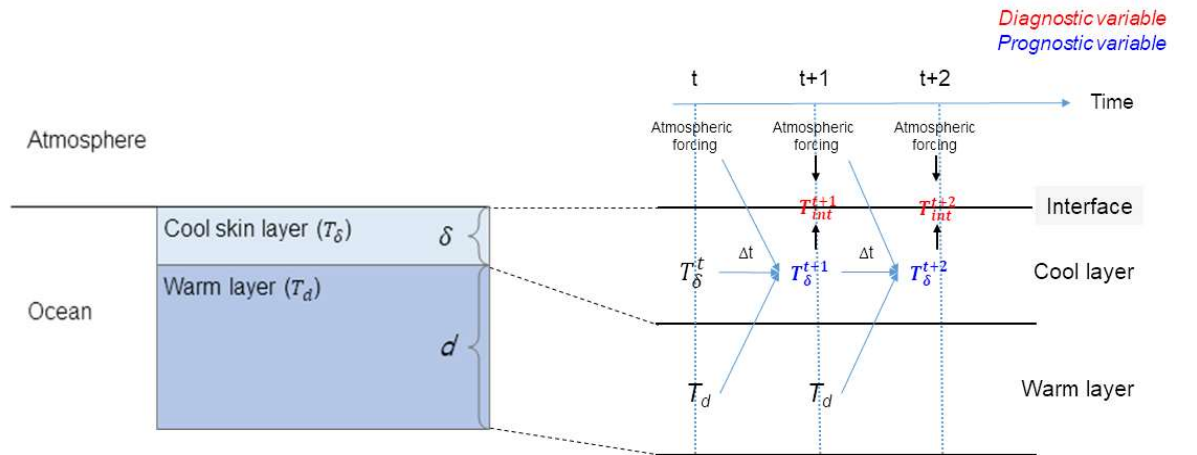
이를 바탕으로 살펴보면, OBM은 해양 분야에서 정의한 개념으로 개발되었으며, 위성 해수면 온도 알고리즘은 원격탐사 분야에서 정의한 개념으로 개발되었다. 그리고 수치모델링은 OBM을 도입하고 위성 해수면 온도를 OBM의 입력자료로 사용한다. 즉, OBM과 위성 알고리즘 사이에 개념이 일부 충돌하지만, 현재 IFS, UM, KIM 등에서는 이를 일괄적으로 사용한다. 따라서, 운용 기관마다 OBM의 개념설계와 조정 과정이 다르므로, 모델 간의 결과에는 차이가 존재한다. 본 연구는 원격탐사 개념을 기준으로 OBM을 개념 설계하였다. 본 연구에서 설계한 OBM은 OSTIA의 일 평균 해수면 온도(free-diurnal SST)를 일 변동을 가지는 부이 해수면 온도(buoy-measured diurnal SST)로 복원하는 것을 목표로한다.

OBM은 해양 상부층(~10 m) 내 대기-해양 에너지 교환과 난류 혼합으로 인해 발생하는 복잡한 수직 온도 구조를 다루도록 설계된다. OBM은 『warm layer (이하, 온난층)』, 『cool skin layer (이하, 한랭층)』, 『atmospheric-ocean interface (이하, 지면)』으로 2개 층과 1개의 경계로 구성된다. 그림 1.1.5는 OBM이 구성하는 해양 상층부 구조의 모식도이다. Saunder (1967)와 Fairall et al. (1996)에서는 OBM의 이론적 배경을 정립하였으며, Fairall et al. (1996), Belljaars (1997), Zeng & Beljaars (2005)에서는 관련된 수치연구를 수행하였다. 자세한 내용은 해당 문헌에서 확인할 수 있다.

지면(대기-해양 경계층)은 순 장파복사, 순 단파복사, 대기-해양 간의 잠열과 현열, 그리고 분자 확산에 따른 열전도가 균형을 이루는 에너지 방정식(heat energy equation)에 지배받는다 (식 1). 표면 온도는 주어진 대기 조건과 한랭층 온도로부터 진단(diagnostic)된다.

$$T_{sk} - T_{\delta} = \frac{\delta}{\rho c k} (H + E + LW + SW f_s) \quad (1)$$

여기서, δ 은 한랭층 두께, ρ 은 해양 밀도, c 는 해양 열함량, k 는 해양 열전도율, H 는 잠열, E 는 현열, LW 는 순 장파복사, SW 는 순 단파복사, f_s 는 표피층의 단파복사 흡수율을 의미한다. T_{sk} 와 T_{δ} 는 각각 표면과 한랭층 온도이다.



Required input data

Atmospheric forcing: SW, LW, LH, SH, u, v from NWP model
Warm layer temp. (T_d): OSTIA daily SST_{ind}

Deterministic variables

Skin temp. (T_{int}): diagnostic SST (= theoretical interface temp.)
Cool layer temp. ($T_δ$): prognostic SST (= IR & MW-estimated temp.)

그림 1.1.5. OBM의 해양 상층부 구조 모식도.

주간에는 단파복사가 표면에 도달하고 흡수되면서 지면 부근부터 점차 온난화된다. 이후, 해양 상층부는 안정화(성층화)되고 수직 혼합은 약화한다. 반면, 야간에는 단파복사가 사라지면서, 표면은 냉각되고 밀도가 올라가면서 해양 상층부 내 대류가 발생한다. 따라서, “convective-turbulence” 로 인해 반복되는 상승과 하강은 해양 상층부를 혼합시켜 등온 상태를 촉진한다 (그림 1.1.1).

여기서 주목할 점은 순 단파복사를 제외한 나머지 에너지는 표면을 냉각시키는 역할을 한다. 해양은 대기와 달리 압축성이 작고 점성이 크기 때문에, 표면 아래 mm 두께 층에서 냉각이 제한적으로 발생한다(Saunders, 1967; Paulson & Simpson, 1981; Fairall et al., 1996; Donlon et al., 2007; Tu & Tsuang, 2005). 이로 인해, 항상 표면 아래에는 온도가 상대적으로 0.1~0.5 K 낮은 층이 발생하며, 이를 『cool skin layer』라 부른다.

단파복사는 해수면 아래 수 미터(~10m)까지 흡수되기 때문에, 일교차를 가지는 층을 생성한다. 이를 『warm layer』 혹은 『diurnal warm layer』라 부른다. 여기서, 해양 상층부의 정의는 표면부터 온난층의 하단부까지를 의미하며, 대략 수심이 3 m에서 최대 10 m까지 나타난다. 한랭층 온도(T_d)는 식 2와 같이 주어진 대기 상태와 온난층 온도로부터 예측(prognostic)된다.

$$\frac{\partial(T_\delta - T_d)}{\partial t} = \frac{a}{d} [H + E + LW + SW(1 - R_d)] - \frac{b}{d} \frac{U}{\phi} (T_\delta - T_d) \quad (2)$$

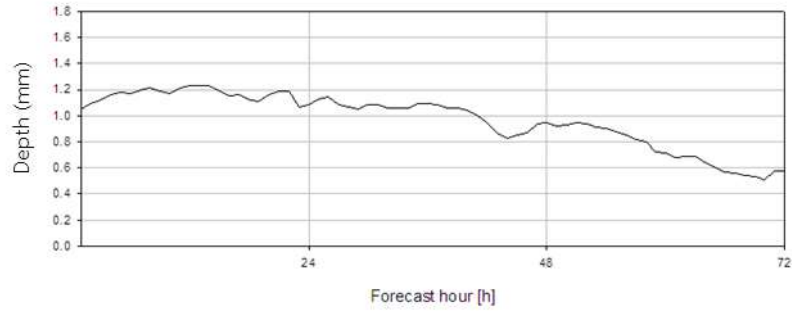
여기서, a 와 b 는 벌크 계수, d 는 온난층 두께, R_d 는 두께 d 까지 단파복사의 소산율, φ 는 층의 안정도이다. 특히, d 와 R_d 는 상숫값으로 고정되고, φ 는 부력의 함수이다. 여기서, 온난층의 두께(d)는 3~10m 범위에서 OBM 설계개념에 맞춰 지정한다. 본 연구는 $d=10$ 으로 지정하였다. 온난층 온도는 OSTIA 해수면 온도 (free-diurnal foundation SST)를 사용한다. 이는 동화 단계에서 매번 초기화되고, 예보 동안은 고정된다. 요약하자면, OBM에서 T_d 는 견고한 기초 역할을 하고, 주어진 대기 상태에 따른 시간(Δt)에 대한 명시적인 변화량을 결정하여 T_δ 를 예측하고, 이로부터 대기 강제력과 균형을 이루는 T_{sk} 을 진단한다.

- * T_d : OSTIA 해수면 온도.
- * T_δ : t 시간의 T_d , T_δ , 대기 강제력으로부터 일차원 열역학 방정식에 기반하여 Δt 에 따른 ΔT_δ 를 고려하여, $t+1$ 시간의 T_δ 예측 (prognostic variable).
- * T_{sk} : $t+1$ 시간의 T_δ 와 대기 강제력 사이의 에너지 균형을 만족하는 T_{sk} 진단 (diagnostic variable).

그림 1.1.6은 한랭층의 두께와 한랭층과 표면 간의 온도 차이를 보여준다. 냉각 효과가 강하게 발생하는 한랭층은 대략 평균 1 mm 두께를 가지며, 이는 마이크로파의 투과 깊이와 유사하다. 또한, $T_\delta - T_{sk}$ 는 평균 0.1 K의 온도 차이를 가지며, 최대 ~0.4 K까지 보인다.

위성 알고리즘은 부이 관측 온도(~50 cm)를 기준으로 개발되며, 온난층의 온도로 사용하는 OSTIA는 이들의 평균치이다. 본 연구는 OBM의 한랭층 온도가 부이 관측 온도를 대변하도록 개념을 설계하였다. 다시 말해, OBM의 온난층 온도는 위성 관측의 평균치(= OSTIA)이고, 한랭층 온도는 이들의 일 변동(= 부이 관측 온도 = 위성 관측 온도)을 가지는 것이다. 이는 변수 간의 개념과는 충돌하지만, 각각 다른 분야에서 정의한 개념을 융합하기 때문에 이에 관한 유연한 사고가 필요하다.

(a) Cool layer depth (δ)



(b) $T_{\delta} - T_{sk}$

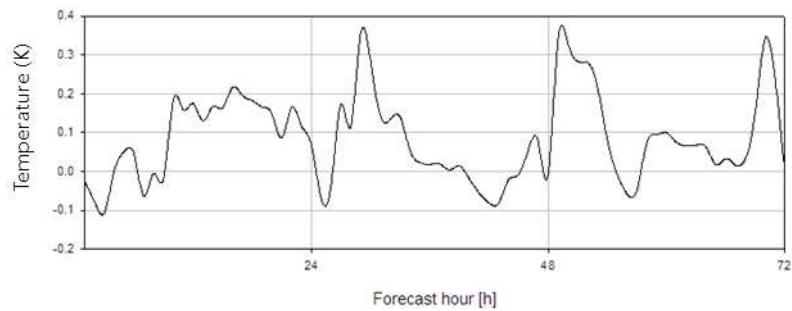


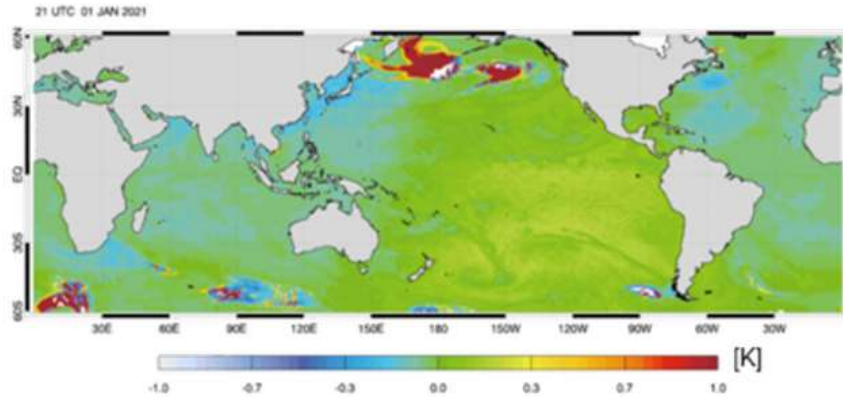
그림 1.1.6. 2022년 1월 1일부터 3일까지 태평양 임의지점(위도: 0, 경도: 180)에 대한 OBM 결과. (a) 한랭층 두께, (b) 한랭층과 표면의 온도 차.

1.1.5. 풍속 보정

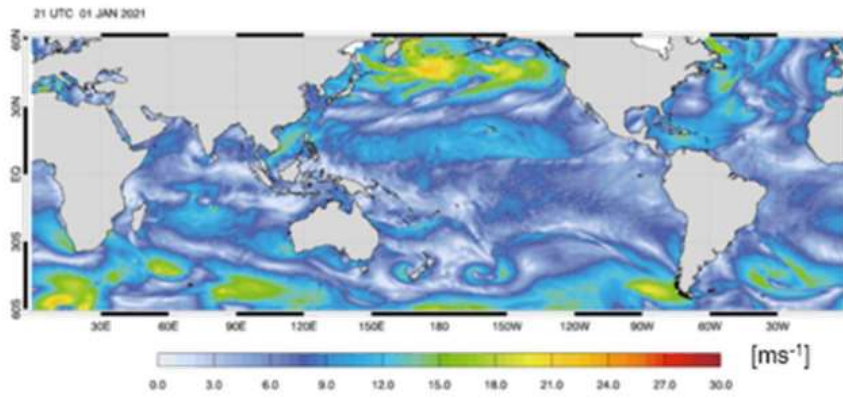
OBM으로부터 2021년 1월 1일부터 3일까지 1시간 간격의 전구 해수면 온도를 모의하였다. 그림 1.1.7은 2021년 1월 1일 21UTC에 대한 OBM의 한랭층 온도 결과이다. 일부 지역에서 비-물리적 온도를 확인할 수 있다. 그림 1.1.7b~c는 동일 기간에 대한 ERA5의 풍속과 유의 파고(최대 파고 1/3의 평균치)이다. 명확히 강한 풍속과 높은 파고가 발생한 지역에서 OBM이 특이점을 만든다. 관련 현상을 해석하면 다음과 같다. 강한 풍속은 높은 파고를 일으킨다. 높은 파고는 해양 상층부를 강하게 혼합시켜 등온 상태를 초래한다. 하지만, OBM은 물리적 혼합 과정을 고려하지 않는다. 따라서, 파고가 해양 상층부 두께($d + \delta \approx 10$ m)보다 높으면 이론상 모의가 불가능하며 특이점이 나타난다. 이는 해양 상층부의 온도 변동을 설명하는 그림 1.1.1에서도 등온 상태의 조건 중 하나로 지목한다.

풍속이 12 ms^{-1} 이상 지역에서는 주로 10 m 이상의 파고가 발생한다(ERA5 재분석장의 장기간 분석). 풍속 12 ms^{-1} 이상이면 해양 상층부 내 강한 혼합이 발생하여 온난층과 한랭층의 온도가 같아진다는 가정을 세우고, 보정항($T_b = T_d$)을 OBM에 추가하였다. 그림 1.1.8은 그림 1.1.7a에 대하여 풍속 보정이 이루어진 결과이며, 명확히 비-물리적 특이점들이 개선된 것을 볼 수 있다.

(a) OBM cool layer temp.



(b) ERA wind speed



(c) ERA ocean wave height

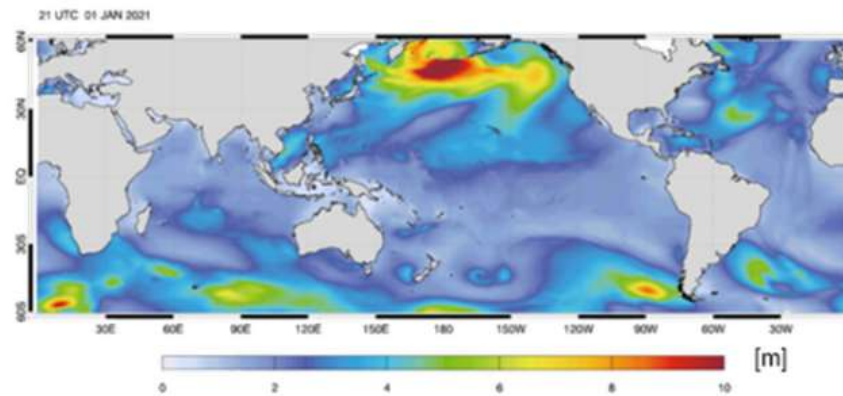


그림 1.1.7. 2021년 1월 1일 21UTC에서 (a) OBM의 한랭층 온도와 (b-c) ERA5 재분석장의 풍속과 유의 파고.

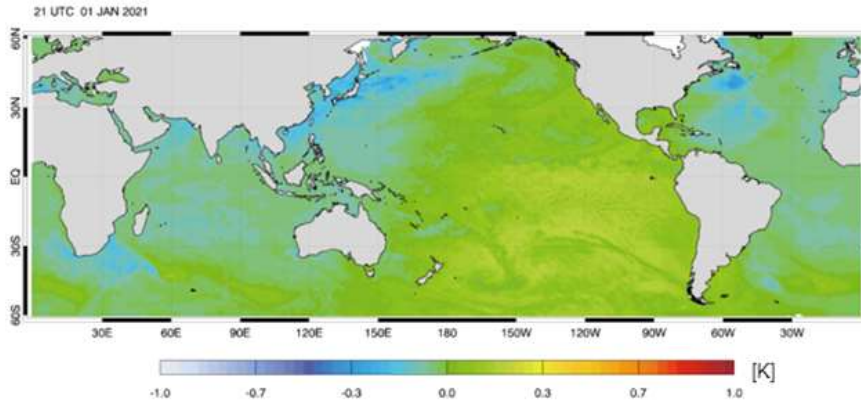


그림 1.1.8. 그림 1.1.7a에 대해 풍속 보정이 이루어진 결과.

1.1.6. Ocean Boundary Model 검증(vs. 부이)

미국해양대기청(NOAA: National Oceanic & Atmospheric Administration)은 열대 태평양의 온도 변동성 조사를 목적으로 TAO (Tropical Atmosphere Ocean) 프로젝트를 통해 2000년부터 실시간 관측 부이를 운영하고 있다. 본 연구에서는 TAO 배열에 설치된 계류 부이 관측자료를 OBM 검증에 사용하였다. 2001년부터 2020년까지 20년 동안 적도 태평양에 설치된 54개 부이의 해수면 온도 관측치를 수집하고, 이를 OBM의 모의치와 비교·평가하였다. 그림 1.1.9는 TAO 배열의 지리적 분포와 설치된 계류 부이의 모식도이다. TAO 자료는 NOAA 부이 자료 저장소에서 확보할 수 있다(<https://www.ndbc.noaa.gov>).

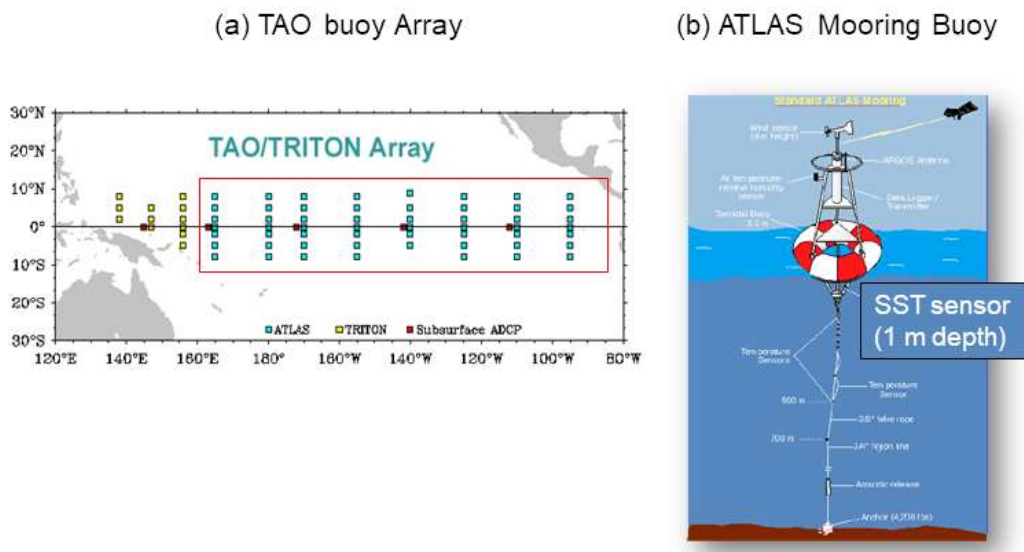


그림 1.1.9. (a) TAO 배열의 지리적 위치와 (b) 검증에 사용된 계류 부이의 모식도 (출처: <https://www.pmel.noaa.gov/>)

우선, 부이 관측자료의 품질 확인을 위해, 남위 2도(2S) 서경 180도(180W)에 설치된 계류 부이(TAO2S180W; 52312)의 2021년 한해 자료를 분석하였다. 추가로, 동일 기간에 대하여 OBM의 한랭층 온도, OSTIA의 해수면 온도를 함께 비교하였다. 그림 1.1.10은 2021년 1월과 10월의 시계열 분포이다.

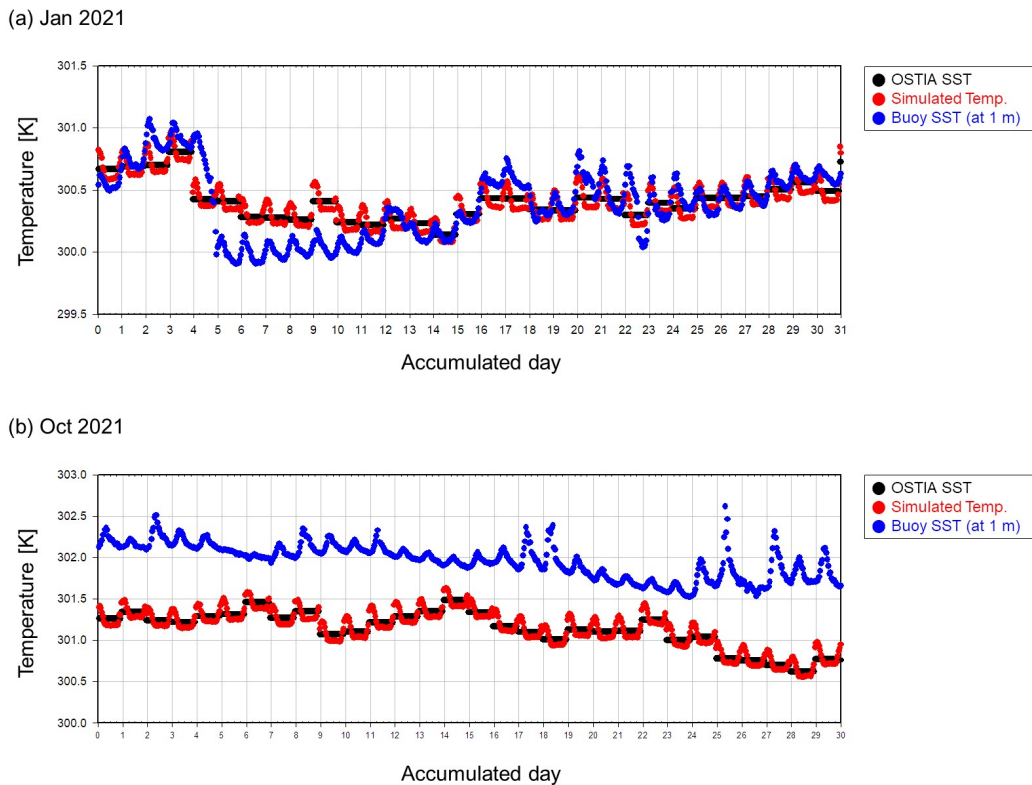


그림 1.1.10. 1 m 부이 온도 (청색), OSTIA 온도 (검은색), OBM 한랭층 온도(적색)에 대한 2021년 (a) 1월과 (b) 10월의 시계열 분포.

2021년 1월 분석에서 OBM은 온난층 온도(=OSTIA 일평균 온도)로부터 부이 관측과 높은 상관성을 가지는 한랭층 온도를 성공적으로 복원하였다. 하지만, 일부 기간에서는 부이 관측치와 모의치 사이에 편향이 있다. 추가로, 2021년 10월 자료를 보면 OSTIA 온도와 부이 관측 온도 사이에 상당한 편향이 존재한다. 주목할 부분은 OSTIA 생산 과정에는 부이 자료가 포함된다는 점이다. 그리고, NOAA는 TAO 부이 자료에 대해 자동화된 품질관리(QC)를 수행하고 있다. 따라서, 그림 1.1.10b에서 나타나는 지속적인 편향은 이해하기 어렵다. 본 연구에서는 검증에 사용되는 부이 관측자료에 QC 과정을 추가 도입하였다.

20년 동안 54개 TAO 부이 관측자료로부터 일 변동을 분석하였다. 일 평균 변동의 1σ 는 ± 0.1 K이며, 3σ 는 ± 0.42 K이었다. 본 연구에서는 1시간 간격의

부이 관측자료를 하루 단위로 구분하고 OSTIA의 일 평균 온도자료를 기준으로 변동 폭이 ± 0.5 를 초과하면 해당 날짜의 자료를 검증에서 제외하였다 (그림 1.1.11).

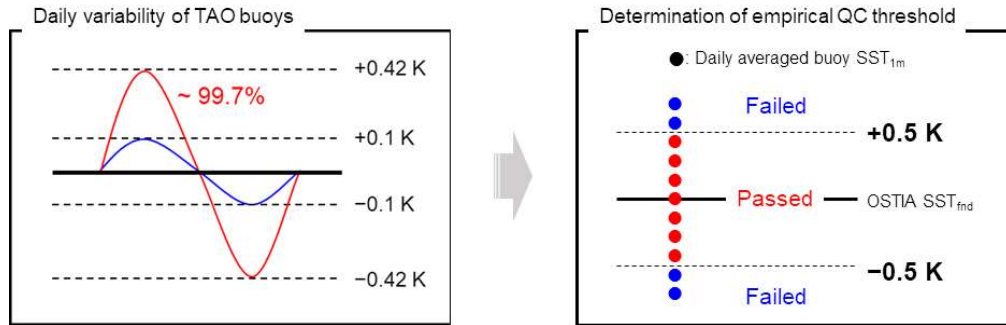


그림 1.1.11. 2001년부터 2020년까지 20년 동안 적도 태평양에 설치된 54개 부이 관측치의 (a) 일 변동 폭과 (b) QC 기준을 설명하는 모식도.

추가 QC를 적용하여 20년 동안의 54개 TAO 부이 자료에서 총 626만 개의 관측자료를 확보하였다(시간 해상도: 1h). 이를 OBM의 한랭층 온도와 비교 분석하였다. 그림 1.1.12는 두 자료에 대한 산포도와 그에 상응하는 상관계수(r), 편향(bias), 평균 제곱근 오차(RMSE)를 보여준다. 결과는 상관계수 0.99, 평균 편차 0.05 K, 평균 제곱근 오차 0.22 K을 보이며, 이를 통해 OBM이 성공적으로 부이 관측온도(=위성 해수면 온도)를 재생산함을 확인하였다.

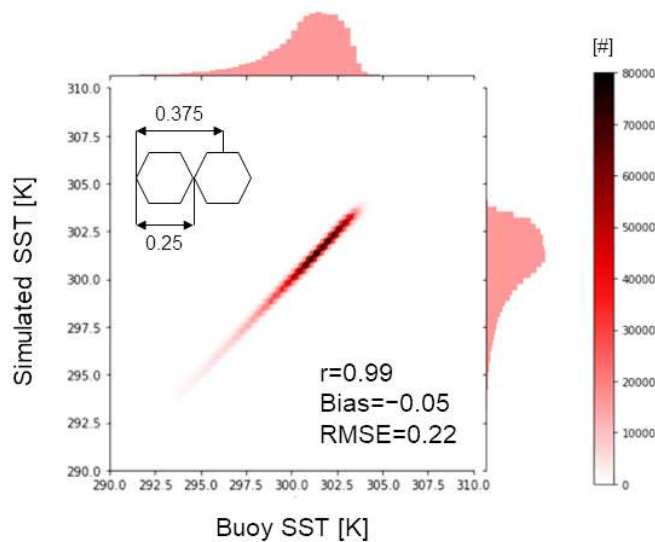
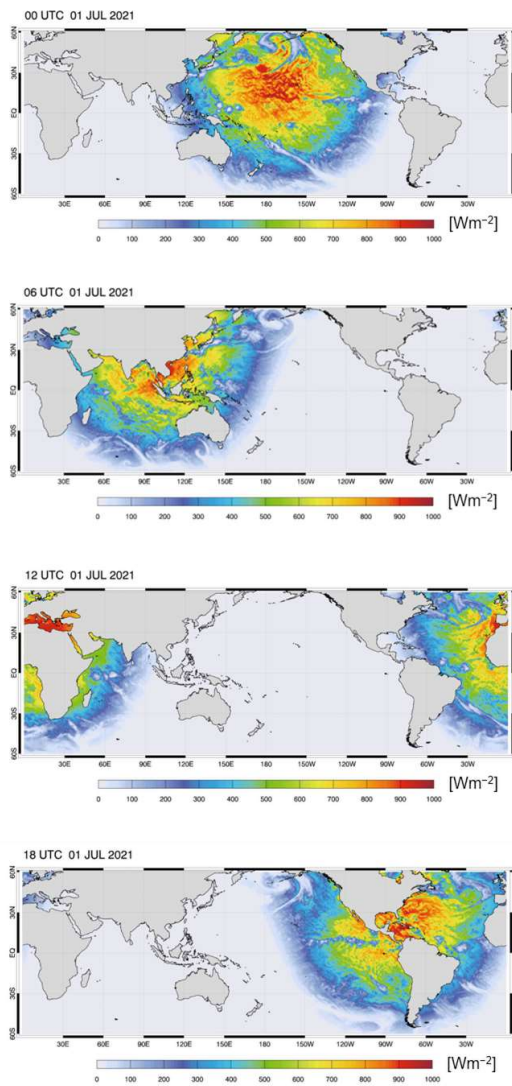


그림 1.1.12. 2001년부터 2020년까지 20년 동안 54 TAO 부이에 대한 OBM의 한랭층 온도와 부이 관측 온도(~ 1m)의 산포도와 상관계수(r), 편향(bias), 평균 제곱근 오차(RMSE).

1.1.7. Ocean Boundary Model 전구 비교 분석 (vs. KIM & ERA5)

KIM의 2021년 7월 1일 00UTC로부터 6시간 간격 해양 표면 온도(skin temperature = SST_{int})의 5일 예보장 자료를 확보하였다. 이를 OBM과 ERA5 결과와 비교하여, 모델 간의 유사성을 분석하였다. 여기서 OBM, KIM, ERA5 모두는 OSTIA의 해수면 온도(SST_{ind} = sea surface temperature)에 기반한다. 따라서, 온도의 변동 폭을 직관적으로 살펴보기 위해, OSTIA 자료를 기준으로 모델의 해양 표면 온도와 차로부터 일변화를 계산하여 비교하였다. 그림 1.1.13은 2021년 7월 1일의 6시간 간격 ERA5의 표면 순 단파복사량과 OBM의 한랭층 온도 일변화를 비교한 그림이다.

(a) Net SW flux at surface



(b) OBM (diurnal variability of cool layer temp.)

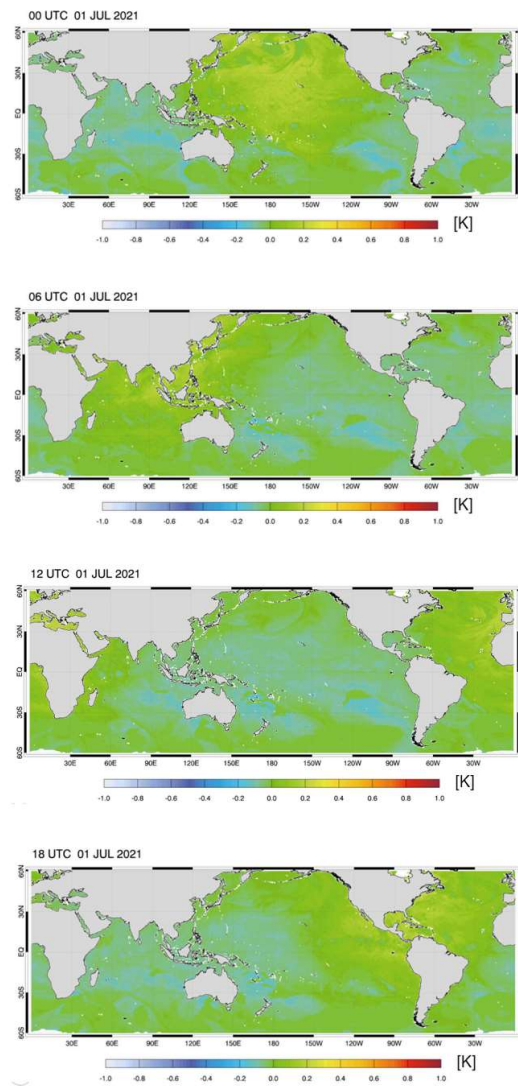
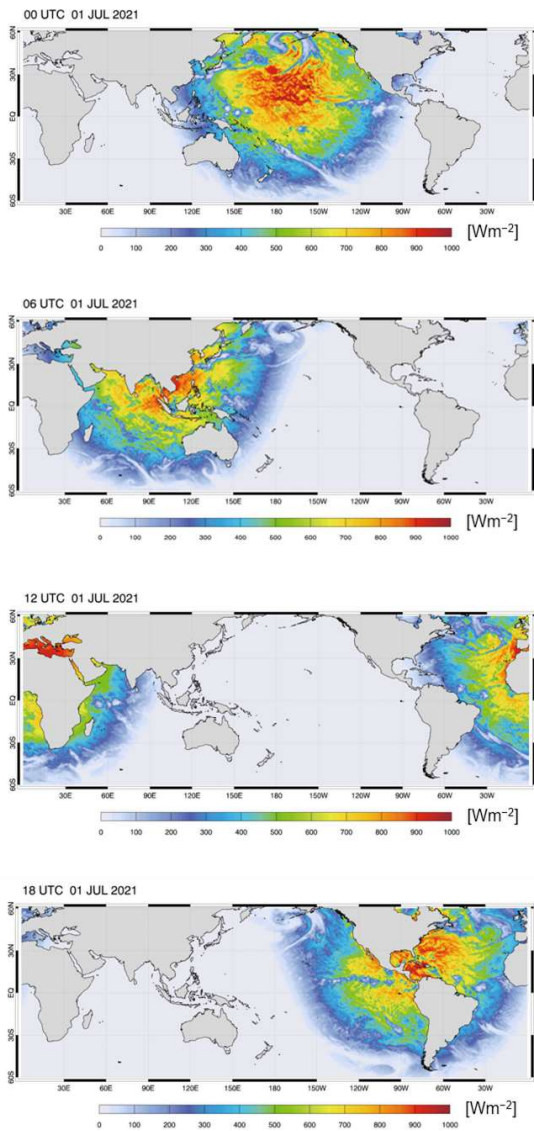


그림 1.1.13. 2021년 7월 1일 6시간 간격의 (a) ERA5의 순 단파복사량, (b) OBM의 한랭층 온도 일 변화 (OBM 한랭층 온도 - OSTIA 온도).

열-에너지 방정식에서 해양을 가열하는 에너지원은 순 단파복사가 지배적이기 때문에, 해양 일변화와 순 단파복사량은 높은 일관성을 가져야 한다. OBM의 온도 변화는 순 단파복사량의 지리적 분포와 높은 일관성을 보이며, 주·야간의 표면 가열과 냉각의 뚜렷한 대조를 함께 보인다. 또한, 앞서 부이 온도의 일 평균 변동 폭이 ± 0.5 K 이내임을 고려하면, OBM은 이와 유사한 온도 변동 폭을 가진다. 따라서, OBM은 전구 범위의 해양 상층부 온도를 합리적으로 생산한다고 판단된다. 그림 1.1.14는 2021년 7월 1일의 6시간 간격 ERA5의 표면 순 단파복사량과 KIM의 표면 온도 일변화를 비교한 그림이다.

(a) Net SW flux at surface



(b) KIM (diurnal variability of skin temp.)

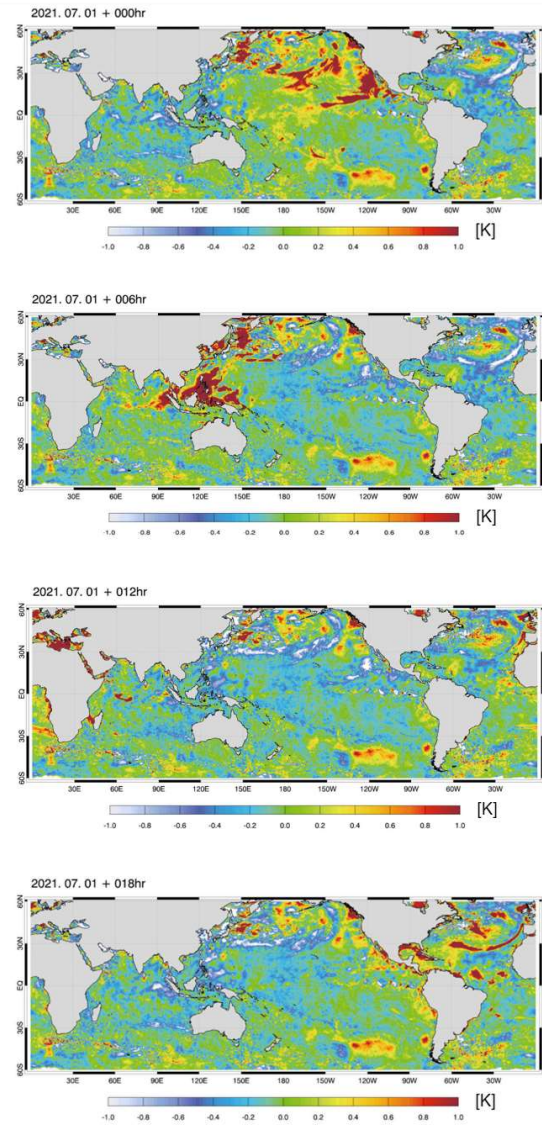
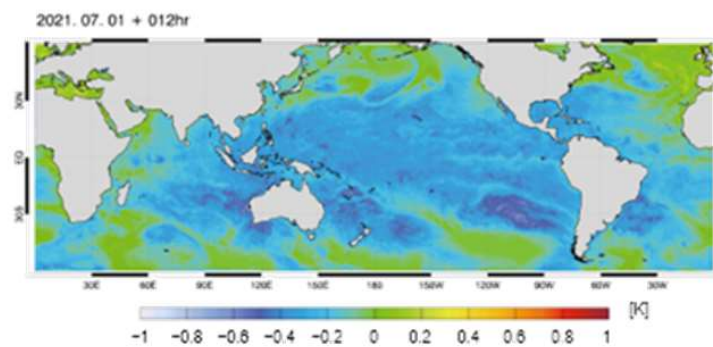


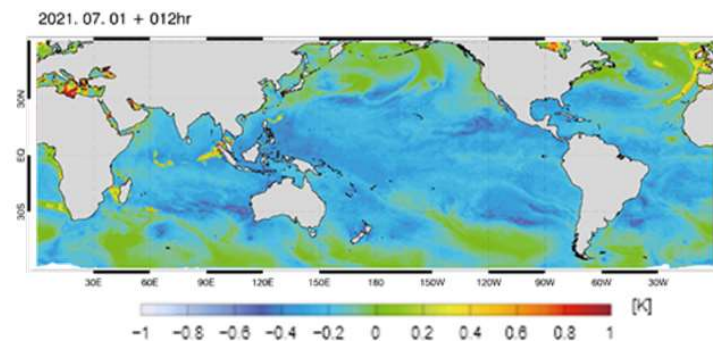
그림 1.1.14. 2021년 7월 1일 6시간 간격의 (a) ERA5의 순 단파복사량, (b) KIM의 한랭층 온도 일변화 (KIM 해양 표면 온도 - OSTIA 온도).

KIM 역시 순 단파복사량의 변화에 따른 온도의 일변화를 보인다. 하지만, 온도 변동 폭이 3 K 이상인 지역이 일부 존재한다. 해양 열용량을 고려하면, 이는 다소 높은 온도 변화이다. 따라서, KIM 결과 대비, OBM의 결과가 순 단파복사량과 더 높은 일관성을 가지며, 알려진 해양 온도의 특성에 조금 더 부합하는 것으로 생각된다. 추가로, 2021년 7월 1일 12UTC의 OBM, ERA5, KIM의 해양 표면 온도의 일변화를 함께 비교해보았다(그림 1.1.15).

(a) OBM



(b) ERA5



(c) KIM

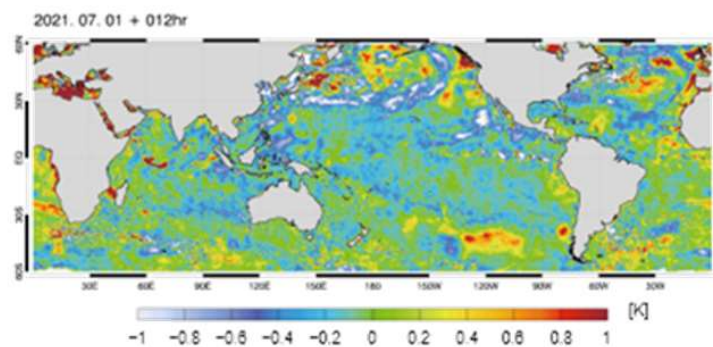


그림 1.1.15. 2021년 7월 1일 12UTC의 표면 온도의 일변화 폭. (a) OBM, (b) ERA5, (c) KIM.

OBM과 KIM은 2021년 7월 1일 00UTC 초기장으로부터 12시간 예보한 결과이며, ERA5는 12UTC의 재분석장이다. 온도 변동에 대한 전반적인 패턴과 크기는 OBM과 ERA5가 상당히 유사하다. 이는 두 모델의 설계개념이 유사하다는 것을 의미한다. 반면, KIM은 두 모델과는 뚜렷한 차이를 가진다. 이를 바탕으로, 본 연구에서 개발한 OBM을 KIM에 적용하고 수치실험을 수행하는 연구는 과학적 가치가 충분히 있다고 생각한다.

1.1.8. KIM 서브루틴 구성

본 연구에서 개발한 모듈을 KIM의 서브 루틴으로 구성하였다. 현재 KIM의 OBM 서브 루틴은 KIM/3.7/src/atm에서 다음과 같은 구조를 가진다.

```
-----
└─ KIM/3.7/src/atm
  └─ sfc_main_solver.F90
    └─ sfc_common_subprogram.F90
      (subroutine sfc_lake_solver)
      (subroutine sfc_ocean_solver)
      (subroutine sfc_sea_ice_solver)
      & ...
    └─ sfc_ocean_slab.F90
      (subroutine sfc_ocean_sst_skin)
      (subroutine sfc_ocean_sst_skin_v2)
      & ...
-----
```

sfc_main_solver는 다양한 표면 경계층을 다루며, 표면 유형에 따른 각각의 solver들이 sfc_common_subprogram에 정의되어 있다. 본 연구에서는 그 중 sfc_ocean_solver를 다룬다. 현 KIM의 OBM은 sfc_ocean_sst_skin으로 처리되며. 관련 서브루틴은 sfc_ocean_slab에 정의되어 있다. 따라서, 본 연구에서 개발한 OBM을 “subroutine sfc_ocean_sst_skin_v2”로 구성하여 sfc_ocean_slab에 추가하였다 (관련 코드는 1차연도 산출물로 제공). 그림 1.1.16은 sfc_ocean_solver에서 기존 OBM인 sfc_ocean_sst_skin과 함께 새로운 OBM인 sfc_ocean_sst_skin_v2를 함께 나타낸 그림이다.

기존 sfc_ocean_sst_skin의 입력자료 중 emiss, temp, stbolt 변수는 입력은

받지만 사용하지 않는 변수들이다. 또한, dtw1 변수는 온난층과 한랭층의 온도차를 의미하며, 상위 모듈에서의 용도 확인이 필요하다. 만약, 사용하지 않는 변수라면 생략하고, 그렇지 않다면 “_v2” 에서 추가로 변수 출력이 필요하다. 본 연구의 sfc_ocean_sst_skin_v2에서는 v10, u10, sst (=OSTIA SST) 변수들이 추가로 필요하다.

```

!-----
  subroutine sfc_ocean_solver(delt,ul,vl,ql,tskin,thetal,
                             qsurf,qflx,hflx,evap,rch,roq,
                             prsil,sfcnew,dlwflx,ulwflx,coriol,
                             emiss,stbolt,
                             tml,tOml,tmoml,
                             hml,hOml,huml,hvml,
                             ustar,dtwl,
                             u10, v10, sst) !!!added by kangej
!-----
      ■
      ■
      call sfc_ocean_sst_skin(dlwflx,ulwflx,sfcnew,hflx,qflx,tskin,ustar,
                             emiss,dtwl,temp,delt,stbolt)
      !kangej check ==> not used variables: emiss, temp, stbolt

      call sfc_ocean_sst_skin_v2(dlwflx-ulwflx, sfcnew, hflx, qflx, tskin, sst,
                                u10, v10, delt)
      !kangej check ==> required new variables: u10, v10, sst
      ! ==> need to check where 'dtwl' is used
!
  end subroutine sfc_ocean_solver

```

그림 1.1.16. 관련 코드 적용 예시 (sfc_ocean_solver.F90)

1차연도 연구 개발에서 물리 모형기반의 해수면 온도산출 알고리즘(OBM)을 성공적으로 개발하였다. 이를 KIM 내 “subroutine sfc_ocean_sst_skin_v2” 로 구성하여 KIM/3.7/src/atmsfc_ocean_slab에 추가하였다. 2차연도 연구내용에 개발된 OBM을 KIM에 적용하여, 최적화 과정을 수행하고, 구동 시현을 하는 부분을 추가하여 기상청 수치모델링센터의 연구 개발을 지원할 계획이다.

1.2. 경사거리 고려한 관측연산자의 정지궤도 위성 활용 기술 개발 (이화여자대학교)

1.2.1. 경사거리 고려한 모의 개념

전통적으로 위성신호 복원을 위한 복사전달 모의에 사용되어 온 대기 프로파일은 아래 그림에서 파란색 기둥으로 표현된 연직 프로파일이다. 하지만 위성 탑재센서에서 직하점 관측시를 제외하고는 다른 각도로 지구를 관측하기 때문에, 정확한 위성신호 복원을 위해서는 대기의 연직 프로파일(vertical profile) 아닌 위성과 관측지점을 잇는 line-of-sight의 대기 프로파일, 즉 경사 프로파일(slanted profile)(그림 1.2.1. 빨간색 기둥)을 이용해야 한다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 위성천정각(θ_{zen}) 값이 커질수록 지구복사에너지가 투과하는 경로가 길어지기 때문에 연직 프로파일과 경사 프로파일 간 차이가 증가하고, 공간적 차이는 고도가 증가할수록 증가한다. 따라서 공간적으로 변동성이 큰 변수(예를 들어 온도에 비해 수증기) 및 상황(예를 들어 강한 남북 경도가 발생하는 전선상 등)에서 그 영향은 증가할 것이다. 또한, 위성관측 채널의 측면에서는 하층에 민감한 채널보다는 상층 대기에 대한 정보를 많이 가지고 있는 채널에서 그 영향이 더 크게 나타날 것임을 예상할 수 있다.

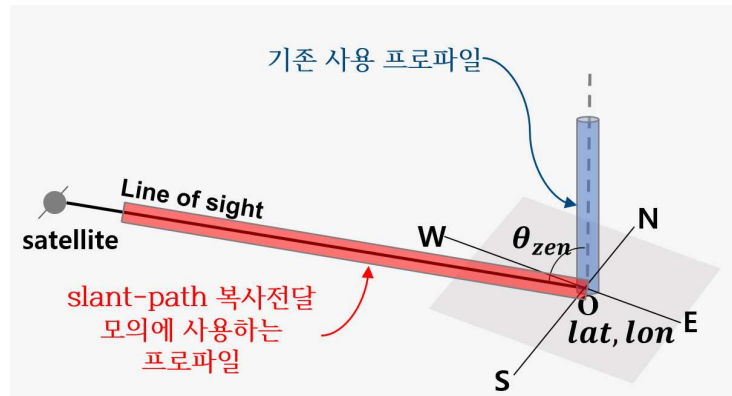
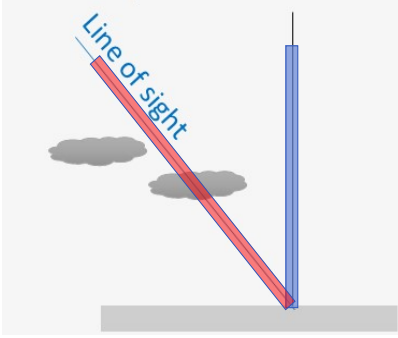
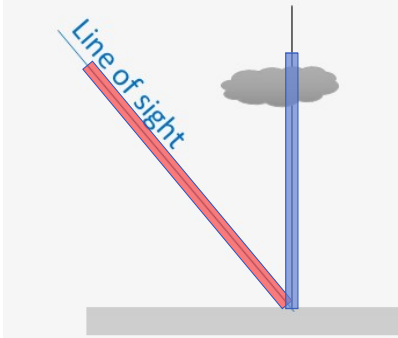


그림 1.2.1. 위성 관측 구조와 연직(파란색 기둥)/경사(빨간색 기둥) 프로파일의 모식도

이들 효과와 더불어, 경사 효과가 특히 강하게 발생할 수 있는 경우는 관측화소(observation field of view)에 구름이 존재하는 경우이다. 아래 표에 보인 경우와 같이, 구름이 위성의 시야각(viewing angle)에 포함되는 경우(사례 (a))와 시야각에는 포함되지 않지만, 관측지점 연직 상공에 존재하는 경우(사례 (b))를 고려할 수 있다. 첫 번째의 경우에는 관측된 복사휘도에는 구름의 영향이 반영되지만, 연직 프로파일을 이용하면 구름이 존재하지 않는 대기조건이 이용된다. 반면에 두 번째의 경우에는 정반대로 관측된 복사휘도에는 구름의

영향이 없지만, 연직 프로파일을 사용한 모의에서는 구름의 영향을 받은 복사휘도가 생산된다. 따라서 두 경우 모두 모의된 배경 휘도온도와 관측 휘도온도 간의 차이가 크게 나타날 수 있으며, 결과적으로 O-B(Observation-minus-Background) 체크 과정에서 탈락하게 되거나 O-B 값이 크지 않을 경우는 구름에 오염된 자료가 청천동화에 사용되는 상황이 발생할 수 있다. 이러한 상황에서 경사 프로파일을 적용할 경우, 관측과 모델이 동일한 대기 조건에 놓이게 되기 때문에, 연직 프로파일 사용으로 발생했던 복잡한 문제들이 상당 부분 완화될 수 있을 것으로 기대된다.

표 1.2.1. 연직(파란색 기둥)/경사(빨간색 기둥) 프로파일 사용 시, 관측과 모델에서의 대기조건 (청천/구름) 분류

	(a)	(b)
구름조건 사례		
연직 프로파일 사용 시	관측: cloudy 모델: clear	관측: clear 모델: cloudy
경사 프로파일 사용 시	관측: cloudy 모델: cloudy	관측: clear 모델: clear

따라서, 본 과제에서는 향후 3년간 정지 및 극궤도 위성자료의 경사거리를 고려한 관측연산자의 변분자료동화 과정에 적용할 수 있는 기술을 개발하는 목표를 가진다. 우선, 1차년도 작업에서는 청천자료에 대한 KIM의 전처리시스템인 KPOP에 경사 프로파일 적용을 목표로 하고 있고, 위성 원시자료가 아닌 KPOP에서 활용하는 정지기상위성 청천복사휘도(Clear-Sky Radiance; CSR) 자료를 이용하여 작업을 진행한다. 경사 프로파일을 이용한 청천 모의를 수행하면 포함될 청천 사례는 관측지점 상공과 경사면이 모두 청천인 경우와 표 1b에서 보인 사례와 같은(관측지점 상공에 구름이 존재하는) 경우가 될 것이다. 다만, CSR 자료는 Level 2 자료로, 생산 과정에서 GK2A 구름탐지 알고리즘의 결과가 적용된 자료이므로, 구름탐지 알고리즘에서 발생할 수 있는 오차 가능성이 포함된 자료일 가능성이 있다. 일반적으로, 구름 탐지 시

경계값 체크를 위해 수치예보모델 배경장으로 모의한 휘도온도를 활용하는데 (김희애&이병일, 2019), 이때 경사 프로파일이 아닌 연직 프로파일을 사용하여 모의했을 확률이 높으므로 CSR 자료는 연직 프로파일의 구름 정보가 반영된 결과물이라고도 할 수 있겠다.

구름으로 인한 이러한 복잡한 부분들은 전천 모의/동화 시 오히려 해소될 수 있는 부분으로, 전천 모의 시에는 CSR 자료 대신 위성관측 Level 1B 자료를 직접 활용 가능하고, 구름탐지를 사용하는 대신 관측과 모델이 가지고 있는 구름물량 정보를 이용해 전천 휘도온도를 모의하기 때문이다. 현재 선진 현업기관에서 전천 동화를 시작하는 단계이고 한국 기상청에서도 전천 동화를 준비 중이므로, 경사관측연산자 개발은 전천 모의/동화를 위해서도 반드시 선행되어야 할 작업이라 할 수 있겠다.

1.2.2. 경사관측연산자 적용 대상 위성

1차년도에는 정지기상위성 자료 전처리를 위한 KPOP 시스템에 경사 거리를 고려한 관측연산자를 적용하는 것을 목표로 연구가 진행되었다. 현재 KPOP에서 활용되고 있는 정지기상위성 자료는 GK2A, Himawari-8, MSG-1/MSG-4에서 생산된 CSR 자료이다. 이 중, Himawari-8 CSR 자료는 오랜 기간 현업에서 활용되어 왔고, GK2A CSR 자료는 2020년 4월 KIM의 현업화와 함께 현업에 적용되기 시작했다. MSG 4기 위성 중 현재 KIM에서 활용되고 있는 위성은 경도 0도에 위치한 MSG-4(Meteosat-11)와 경도 45도에 위치한 MSG-1(Meteosat-8)이나, MSG-1의 경우 위성 궤도 경사각 오차가 매년 증가하는 추세를 보여(Burrows, 2018), 본 연구에서는 제외하는 것으로 협의되었다(중간보고회의). 따라서 본 연구에서는 GK2A, Himawari-8, MSG-4 CSR 총 3종의 위성자료에 경사관측연산자 적용을 목표로 연구를 진행하였다. 각 위성의 채널과 중심파장 정보, 자료동화에 활용되고 있는 채널 정보는 아래 표 1.2.2와 같다.

표 1.2.2. KIM에 활용되는 정지기상위성 채널정보 및 자료동화에 활용 여부. 활용되는 채널은 파란색 음영으로 표시 (r: rejected, m: monitor)

위성	채널번호 및 중심파장 (μm)										중심경도
	7(r)	8	9	10	11	12(m)	13	14	15	16(r)	
GK2A	3.9	6.2	6.9	7.3	8.6	9.6	10.4	11.2	12.3	13.3	128.2°
	7(r)	8	9	10	11	12(m)	13	14	15	16	
Himawari-8	7(r)	8	9	10	11	12(m)	13	14	15	16	140.7°

	3.9	6.2	6.9	7.3	8.6	9.6	10.4	11.2	12.4	13.3	
MSG-4	4(m)	5	6	7	8(m)	9	10	11(m)			
	3.9	6.2	7.3	8.7	9.7	10.8	12.0	13.4	0°		

표에서 볼 수 있는 바와 같이 3개 위성 모두 중~상층 수증기 흡수 채널이 활용되고 있고 10~11 μm 에 중심을 둔 적외창 채널과 dirty window 채널들이 활용되고 있는데, 이들 채널 모두 가중함수 최대고도가 10 km 이하에 있다. 아래 그림은 GK2A AMI 적외채널의 가중함수를 나타내며, 12번 채널(오존흡수 채널)을 제외하고는 가중함수의 최대고도가 모두 200 hPa 아래에 있음을 알 수 있다. 6.2, 6.9, 7.3 μm 에 중심을 둔 3개 수증기 흡수채널(Ch08, Ch09, Ch10)의 경우 가중함수 최대고도가 300~600 hPa 사이에 있어, 경사거리 고려시 그 효과가 확인될 수 있을 것으로 기대된다. 단, MSG-4 위성의 경우 6.9 μm 채널이 포함되어 있지 않기 때문에, 경사거리 효과는 6.2 μm 와 7.3 μm 에 중심을 둔 2개 흡수 채널 위주로 분석하고자 한다.

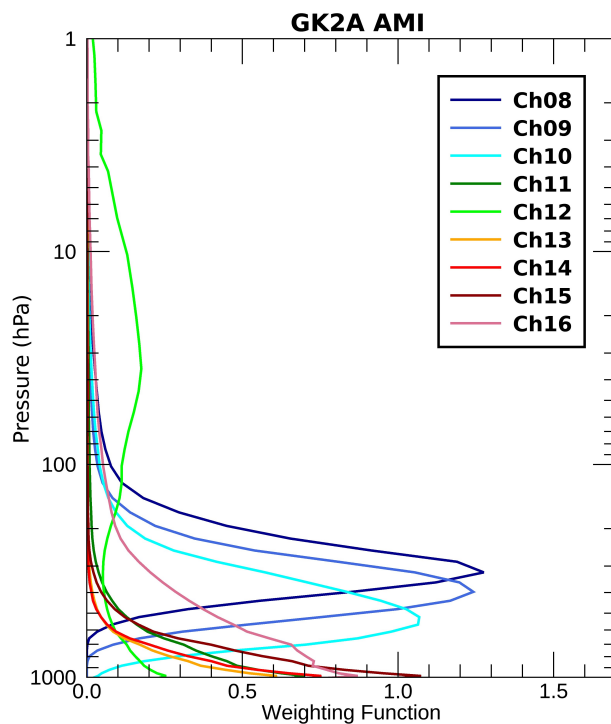


그림 1.2.2. GK2A AMI 적외채널 가중함수 (위성 직하점, 해양). US76 표준대기 51개층 프로파일을 이용해 계산

그림 1.2.3은 본 연구의 분석대상에 포함되는 영역으로 각각 GK2A (1.2.3a),

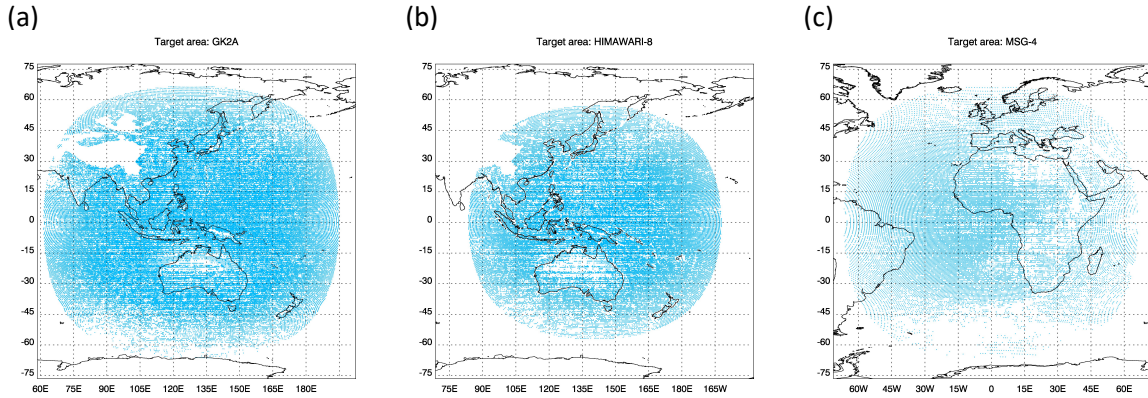
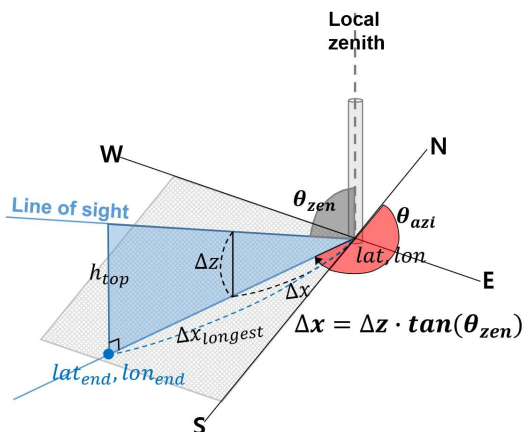


그림 1.2.3. 분석대상 지역 (a) GK2A 전구관측영역 (12×12 FOV; $1\text{FOV}=2\text{km}$) (b) Himawari-8 전구관측영역 (16×16 FOV; $1\text{FOV}=2\text{km}$), 위성천정각 65도 이상은 제거됨 (c) MSG-4 전구관측영역 (16×16 FOV; $1\text{FOV}=3\text{km}$)

Himawari-8 (그림 1.2.3b), MSG-4 (그림 1.2.3c) 전구 관측 영역으로 각 위성의 CSR 자료를 이용해 표출하였다. Himawari-8 CSR 자료의 경우 위성천정각(satellite zenith angle, θ_{zen} ; 정지궤도 위성의 경우 특정 위경도에서의 위성천정각은 항상 일정한 값을 가지는 것으로(위성자료의 위치보정 정확도가 확보된 경우) 가정함)이 큰 화소들이 사전에 제거된 후 제공되기 때문에 상대적으로 관측영역이 좁게 표출되었다. 또한 MSG-4 CSR의 경우 16×16 FOV 단위로 생산되고 1FOV 크기가 3 km로 GK2A와 Himawari-8 ($1\text{FOV}=2\text{km}$)보다 공간해상도가 약간 낮은 특징을 가지고 있다.

1.2.3. 경사 프로파일 생성 방법

위성이 θ_{zen} 의 천정각을 가지고 지구상의 특정 지점을 관측한다 할 때, 경사 프로파일은 다음과 같은 3단계를 거쳐 생성된다.



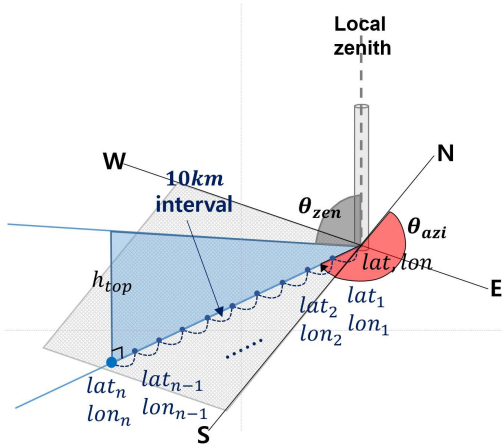
[1단계]

위성 관측지점(lat, lon)과 위성을 잇는 slant-path (그림에서는 line of sight로 표시)에 연직한 방향으로 지면과 교차하는 방위각면(그림에서 하늘색 음영으로 나타낸 직각삼각형)의 최대변이 $\Delta x_{longest}$ 값과 최대변이 지점의 위도/경도 위치(lat_{end}, lon_{end})를 계산한다.

* $\Delta x_{longest} = h_{top} \tan(\theta_{zen})$ (KIM의 경우)

$$h_{top} \sim 80km)$$

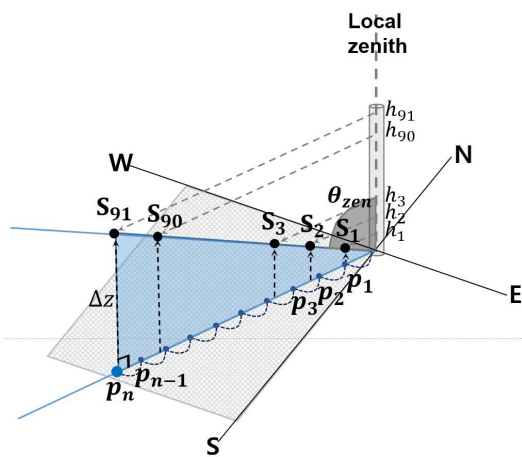
* lat_{end} , lon_{end} 은 관측지점(lat, lon)과 직하점을 잇는 great circle의 중간 지점이므로, 관측지점에서 직하점까지의 거리와 $\Delta x_{longest}$ 의 거리 비율을 이용하여 계산



[2단계]

관측지점과 최대변이 지점까지의 거리를 10 km 등 간격으로 분할하면서 방위각면에 놓여있는 지점들의 위도/경도 ($lat_1, lat_2, \dots, lat_n / lon_1, lon_2, \dots, lon_n$)를 1단계에서와 유사한 방식으로(즉, 관측지점에서 해당 지점까지의 거리와 $\Delta x_{longest}$ 의 비율을 이용) 계산한다.

→ 10 km 등 간격 각 지점에 해당하는 연직 프로파일을 bg_ingest로 불러와서 저장



[3단계]

지상(h_1)부터 모델 top(h_{91})까지의 각 고도에 대응되는 slant-path 상의 지점들 (S_1, S_2, \dots, S_n)에서의 대기 정보 (즉, 경사 프로파일을) 얻기 위해 2단계에서 저장해 둔 배경 프로파일을 수직 내삽한다. 예를 들어, S_2 에서의 대기정보를 얻기 위해 방위각면의 가장 가까운 2개 지점인 p_2 와 p_3 의 프로파일을 내삽한다.

그림 1.2.4는 KIM KPOP 시스템의 Block 다이어그램(Kang et al., 2018)의 일부로, 경사계산을 위한 작업이 추가되기 전후의 흐름을(왼쪽은 추가되기 전, 오른쪽은 추가된 경우) 보여준다. 제시된 흐름도의 경우에는 위성별 BUFR 형식 CSR 자료를 읽어오는 작업에 이어 CSR 자료에 대한 Gross QC가 수행된 후 위성의 위도/경도/위성천정각/시간 등의 정보를 이용해 배경 프로파일을 가져오는

(BG ingest) 작업이 수행된다. 경사 계산방식 적용을 위해서는, 위에서 설명한 3단계에 걸친 작업 중 1, 2단계 작업을 BG ingest 호출 전에 수행해야 한다. 즉, 관측지점별로 방위각면상의 10km 등 간격 지점들의 위치 정보를 미리 추출하여 원래 관측지점의 정보와 함께 BG ingest를 호출하여, 관측지점에 대한 연직 프로파일뿐만 아니라 10km 등 간격 모든 지점에 대한 연직 프로파일 값도 함께 받아오도록 하기 위함이다. 이 두 단계에 걸친 작업은 공통모듈로 작성하여 메인 프로그램에서 호출하도록 (CALL get_slantlatlon) 설계하였다. BG ingest 호출 시 관측지점의 정보와 함께 해당 방위각면상의 10km 등 간격 지점들의 정보를 모두 포함하여 호출하기 위해서는, 원래 관측자료를 담은 배열(robs)의 크기를 늘려서 임시배열(robs_temp)을 생성하고, BG ingest의 호출 인자로 robs 대신 robs_temp를 이용하도록 하였다. 이어서 각 관측지점과 방위각면상 지점들에 대한 연직 프로파일 정보를 모두 넘겨받게 되면 3단계 과정을 수행하여 최종적으로 경사 프로파일을 생성한다.

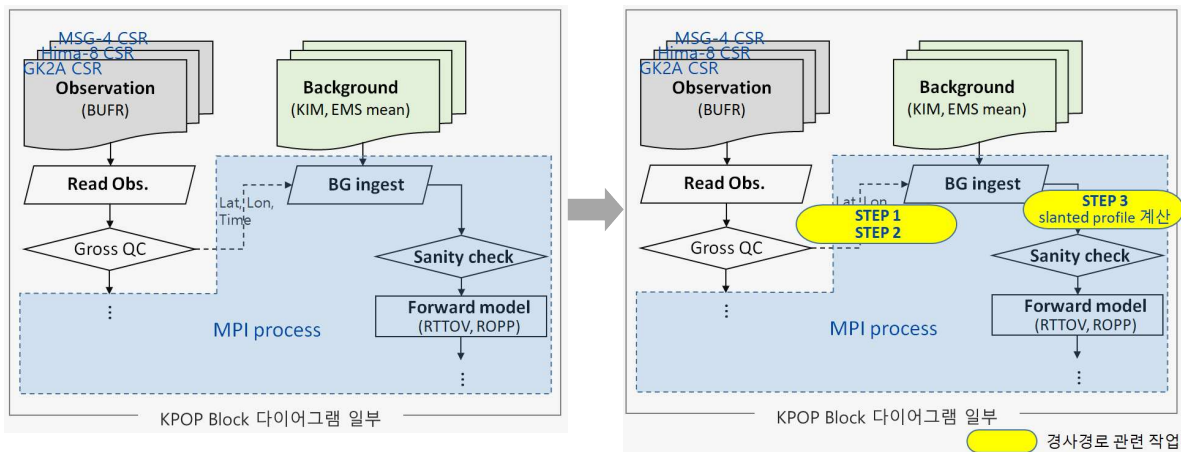


그림 1.2.4. 경사경로 관련작업이 추가되기 이전의 원래 KPOP block 다이어그램의 일부(왼쪽)와 추가된 후의 다이어그램(오른쪽)

1.2.4. 경사 프로파일과 연직 프로파일 비교

1.2.3절에서 설명한 방식으로 구축된 경사 프로파일을 이용한 복사전달 모의를 시작하기에 앞서, 경사 프로파일과 기존의 연직 프로파일에 대한 비교를 수행하였다. 가시적인 비교를 위해 위성천정각이 큰($\theta_{zen} = 68^\circ$) 관측지점에 대한 예시를 그림 1.2.5에 제시하였다. 그림에서 굵은 흑색 실선은 최종적으로 구해진 경사 프로파일과 기존의 프로파일(관측지점에서의 연직 프로파일)간의 차이를 나타내며, 색으로 표시된 선들은 방위각면 10 km 등 간격 지점(위의 3단계의 p_1, p_2, \dots, p_n)에서의 연직 프로파일들과 관측지점의 연직 프로파일의 차이를 나타낸다. 보라

색 계열에서 빨간색 계열로 갈수록 관측지점에서 멀리 떨어진 방위각면에 놓인 연직 프로파일과의 차이를 의미한다. 따라서, 굵은 실선은 하층에서는 파란색 선과 비슷한 값을 가지다가 상층으로 갈수록 점점 빨간색 선에 근접하는 형태를 보이게 된다. 온도 프로파일의 경우 대기 상층 성층권까지 경사 프로파일과 원래의 연직 프로파일간 차이가 크게 나타나는 것으로 확인되고 있지만, 앞에서 언급한 바와 같이 KIM에서 활용되고 있는 3개 정지기상위성 적외채널에는 상층에 민감한 온도탐측 채널이 없으므로, 경사계산을 적용하더라도 온도 프로파일 변화로 인한 효과는 확인이 어려울 것으로 보인다. 반면, 습도 프로파일의 경우는 지상에서 약 500 hPa 구간에서 가시적인 차이가 나타나고 건조한 상층에서는 차이가 거의 0에 가까운 것을 확인할 수 있다. 다만 지상~500 hPa 구간에서 굵은색 실선이 보라색 계열의 선과 유사한 값을 가지는 것으로 보아, 이 사례는 관측지점에서 아주 가까운 하층에서 습도 차이가 크게 발생한 특이한 사례인 것으로 판단된다. $6.2\mu m$, $6.9\mu m$, $7.3\mu m$ 채널의 가중함수 최대고도가 10km 이하에 존재하는 점을 고려할 때, 관측지점으로부터의 거리는 위성천정각이 큰 지역이라 하더라도 $\Delta x = \Delta z \tan(\theta_{zen})$ 식으로부터 $\Delta x = 30km$ 이내임을 알 수 있다 (그림 1.2.6 참조). 즉, 정지기상위성 수증기 채널의 경우, 연직으로 10km 이내, 수평적으로 30km 이내에 경사면을 따라 습도 차이가 큰 경우에만 경사계산 적용 효과를 확인할 수 있다는 의미가 된다.

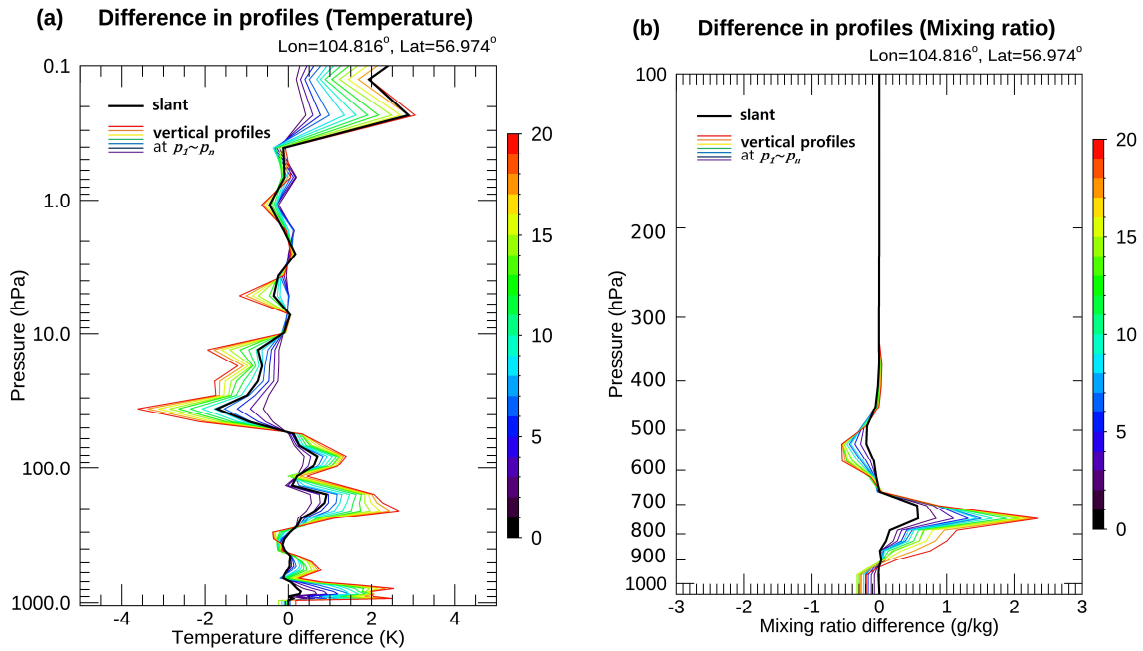


그림 1.2.5. (a) 온도 (b) 습도 경사 프로파일과 연직 프로파일간 차이 (solid black line) 예시. 방위각면에 10km 등 간격으로 위치한 지점들의 연직 프로파일과 관측지점의 연직 프로파일간 차이도 함께 표출 (color lines)

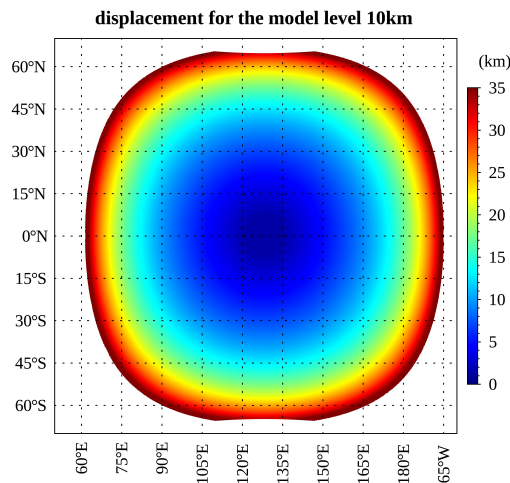


그림 1.2.6. 모델 고도(Δz) 10km에 대응하는 수평변이(Δx) 값의 분포 (GK2A 관측영역 내 각 화소별로 계산하여 표출)

1.2.5. 경사계산 적용 전후 복사량 비교

경사 프로파일을 이용해 모의한 복사량이 기존의 연직 프로파일 사용했을 때 대비 개선 정도를 평가하기 위해 각각의 경우에 대해 O-B의 표준편차(standard

deviation; STD) 값을 계산하고 경사 프로파일 사용 시 O-B STD의 상대적인 감소 비율을 아래 그림 1.2.7과 같이 위성별로 해양(왼쪽)과 해양+육지(오른쪽)로 나누어 표출하였다. 연직 프로파일 사용 시의 O-B STD를 $\sigma_{noslant}$, 경사 프로파일 사용시의 O-B STD를 σ_{slant} 라 하고 상대적인 감소비율을 $(\sigma_{noslant} - \sigma_{slant})/\sigma_{noslant}$ 로 정의하여 계산하였다. 따라서 감소비율이 양의 값으로 클수록 개선효과가 높은 경우를 나타낸다. 먼저 해양에서의 결과를 살펴보면, 개선 정도가 크지는 않지만 GK2A와 Himawari-8의 경우는 위성천정각이 증가할수록 수증기 채널에서 STD도 조금씩 감소하는 것을 확인할 수 있다. MSG-4 수증기 채널의 경우 일관된 패턴을 보이지 않고 0을 기준으로 좌우로 변동하거나 ($7.3\mu m$) 오히려 STD가 증가하는 ($6.2\mu m$) 패턴을 보여 원인에 대한 상세 분석이 필요할 것으로 보인다. MSG 위성들의 경우 궤도경사각이 0도보다 더 큰 값을 가지면서 변동하는 것으로 (EUMETSAT, 2022) 알려져 있는데, 방위각 계산을 위해 필요한 궤도경사각 정보가 CSR 자료에 함께 제공되고 있지 않아, 본 연구에서는 MSG-4에 대한 방위각 계산 시 궤도경사각을 0으로 가정하였다. 하지만, 궤도경사각 오차로 인해 방위각 계산 오차 발생 시 정확한 경사 프로파일 생산에 영향을 미치기 때문에(1.2.6절 참조) 이러한 요소가 그림의 결과에 영향을 미쳤을 가능성도 존재한다. 따라서 결과에 대한 정확한 원인 분석을 위해서는 정확한 방위각 값 계산이 요구되고, 이 점이 향후 작업에서 보완되어야 할 것으로 보인다.

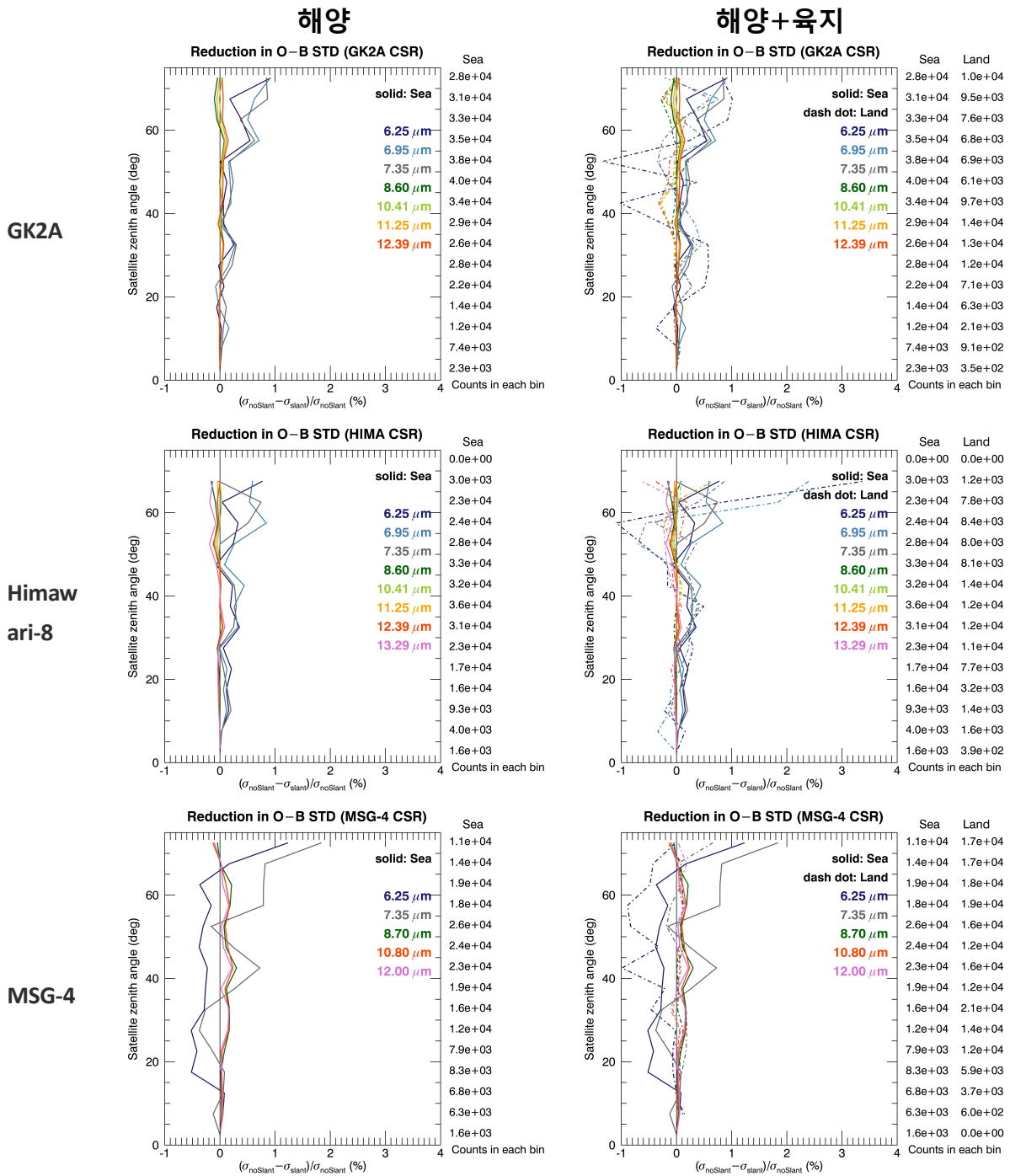
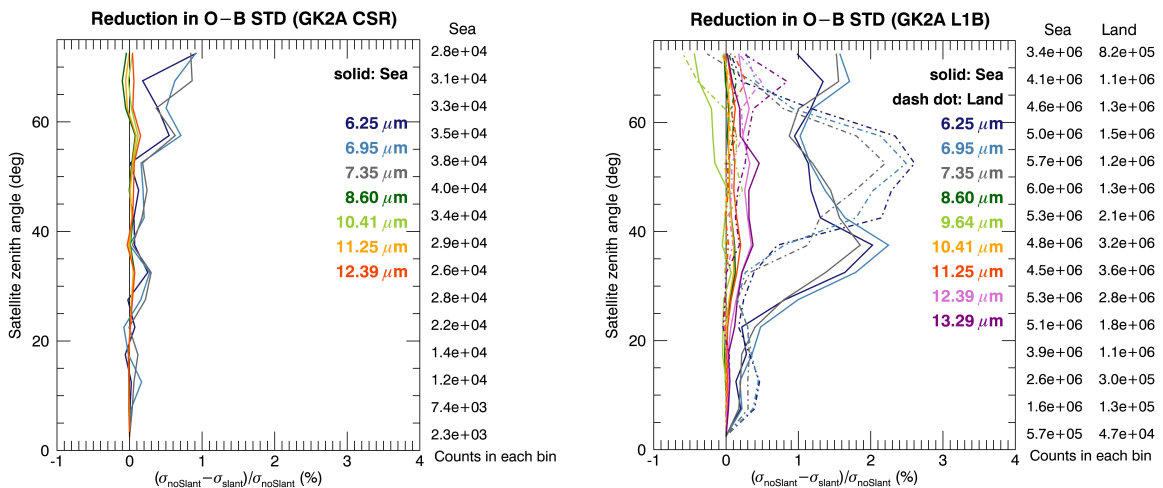


그림 1.2.7. 경사 프로파일 사용 후 해양과 육지에서 O-B 표준편차의 상대적인 감소 비율(relative reduction; %) 분포. 2021년 7월 한 달, 6시간 간격 CSR 자료를 이용한 KPOP 수행 결과 이용. 위성천정각 5도 간격으로 평균하였고, 5도 간격 평균에 사용된 자료 개수는 그림 오른쪽에 표시함

육지에서의 경사 효과 확인을 위해, KPOP 수행 시 육지에 대해서 사용하지

않도록 설정되어 있었던 채널들을 사용할 수 있도록 설정 변경한 후 KPOP을 수행하였으나, 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 육지(dash-dot)에서는 해상(solid)과 달리 GK2A와 Himawari-8에서도 일관된 개선이 나타나지 않음을 확인할 수 있다. 하지만, CSR이 아닌 Level 1B 자료를 이용한 추가적인 실험에서는 약간 다른 결과를 확인할 수 있었는데, 그림 1.2.8은 3×3 FOV 간격의 GK2A Level 1B 자료를 이용해 동일한 작업을 수행했을 때 얻은 결과를 표출한 것이다. 비교를 위해 CSR 자료를 이용한 결과와 모의수행 조건(자료 해상도, 기간)을 함께 나타내었다. 그림으로부터, CSR 자료의 경우 12×12 FOV 단위로 생산되기 때문에, 평균되는 과정에서 관측값이 smoothing되었기 때문에, 3×3 FOV 단위로 처리한 Level 1B 자료에 비해 경사 효과도 많이 smoothing된 것으로 보이며, CSR 자료와 달리 Level 1B 이용 시에는 육지에서도(dash-dot) 경사효과가 3개 수증기 채널에서 뚜렷하게 나타나는 것을(특히 위성천정각 40° ~ 60° 사이) 확인할 수 있다. 이러한 차이가 단순히 자료 해상도 차이에 기인한 것인지(6km×6km vs. 24km×24km), 구름탐지의 영향인지(CSR vs. Level 1B에 직접 cloud-mask 적용), 혹은 KIM 모델 버전의 차이(2020년 5월 vs. 2021년 7월)의 영향인지에 대해서는 추가 분석이 필요할 것으로 보인다.



2021년 7월 한달 6시간 간격
12×12 FOV (24km × 24km)
CSR자료, thinning 이후 자료

2020년 5월 한달 6시간 간격
3×3 FOV (6km × 6km)
GK2A cldmask이용한 구름제거

그림 1.2.8. GK2A CSR(왼쪽) 자료와 Level 1B(오른쪽) 자료로 분석한 경사 프로파일 사용 후 O-B 표준편차의 relative reduction (%)

1.2.6. 경사계산 적용 전후 자코비안 비교

경사거리 고려 전과 후의 자코비안 변화를 살펴보기 위해 먼저 온도와 습도 자코비안의 차이를 채널별로 살펴보았다. 그림 1.2.9는 온도(왼쪽)와 습도(오른쪽) 자코비안간 차이를 한달 평균한 값(dash-dot)과 STD(solid) 값을 함께 나타낸 것이다. 온도, 습도 모두 차이값의 평균은 0에 가까우며 STD는 3개 수증기 흡수 채널에서 상대적으로 높게 나타남을 확인할 수 있다. 온도 자코비안의 경우는 STD 자체도 최대 0.001 [K/K] 수준으로 값이 매우 작은 편이지만, 습도 자코비안의 경우는 상층 수증기 채널의 경우 최대 150 K/(kg/kg) 혹은 0.15K/(g/kg) 정도의 차이를 보인다. 좀 더 상세한 자코비안 변화를 살펴보기 위해 위성천정각이 큰 지점에서의 경사거리 고려 전/후의 자코비안을 1:1로 비교해보았다. 그림 1.2.10은 Himawari-8 CSR 자료에 대해 계산된 3개 수증기 채널의 자코비안을 비교한 것으로 2021.07.01. 06 UTC $\theta_{zen} = 57.29^\circ$ 에서의 온도 자코비안(왼쪽)과 2021.07.02. 00 UTC $\theta_{zen} = 57.25^\circ$ 에서의 습도 자코비안(오른쪽) 예시를 제시하였다. 그림에서 경사거리를 고려한 후(solid) 자코비안 프로파일의 모양뿐만 아니라 값의 크기, 최대고도의 위치도 바뀌는 것을 확인할 수 있다. 이는 경사 프로파일 이용으로 경사면을 따른 수증기장의 변동성이 잘 반영된 결과라 할 수 있다

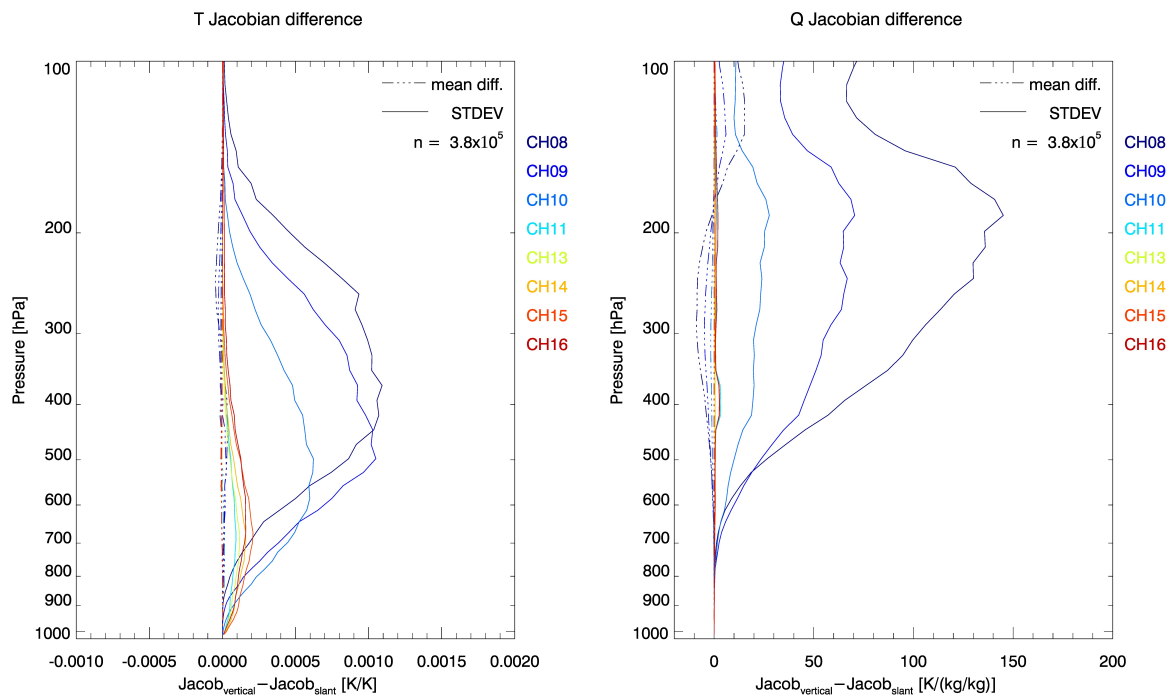


그림 1.2.9. 기존 연직 프로파일을 이용한 자코비안과 경사 프로파일을 이용한 자코비안의 차이. 2021년 7월 한달 동안의 온도(왼쪽)와 습도(오른쪽) 자코비안의 평균 차이 (dash-dot)와 표준편차(solid)로 Himawari-8 CSR 자료를 이용해 계산한 결과임

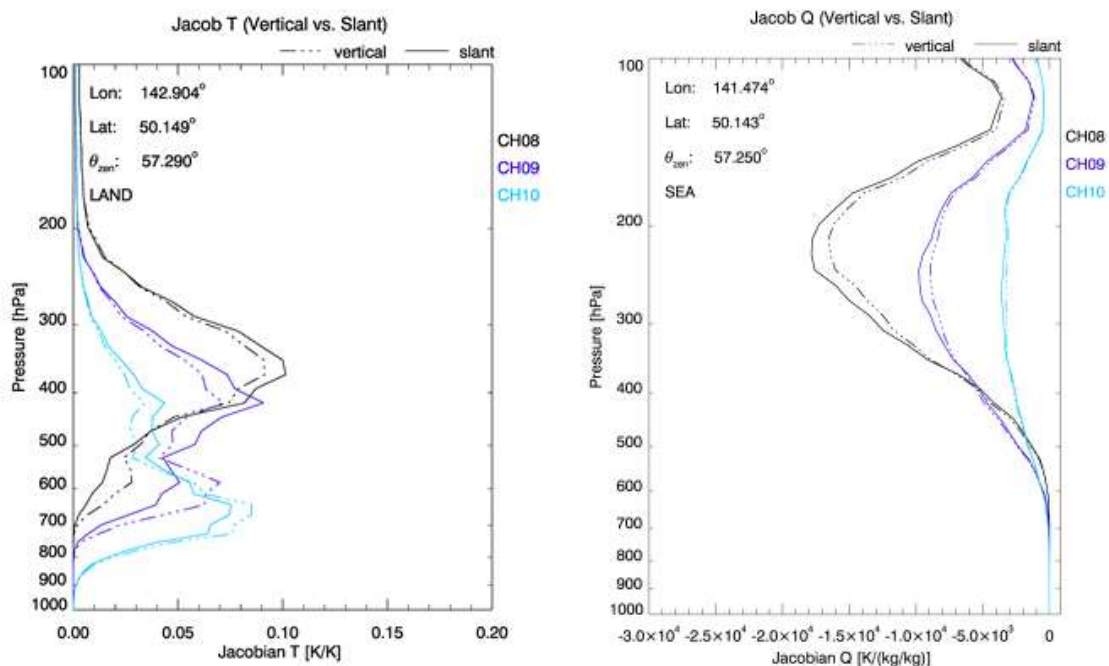


그림 1.2.10. 경사 프로파일을 이용해 계산한 자코비안(solid)과 연직 프로파일을 이용해 계산한 자코비안(dash-dot)의 일대일 비교. 왼쪽은 온도 자코비안의 예시, 오른쪽은 습도 자코비안의 예시로 Himawari-8 KPOP 수행결과 이용

1.2.7. 위성방위각 오차에 대한 민감도 테스트 결과

1.2.4절에 명시된 바와 같이 MSG 위성의 궤도경사각은 0도가 아니고, 특히 MSG-1 (Meteosat-8) 위성은 2010년에 남북방향 자세유지장치(station-keeping manoeuvres)가 작동을 멈춘 이후 궤도경사각이 급격하게 증가하고 있는 것으로 알려져 있다 (Burrows, 2018). 2018년 기준 MSG-1의 경사각은 5도까지 증가하였으며, 그림 1.2.11과 같이 계속 증가 추세인 것으로 보고되고 있다. 위성의 궤도경사각이 정확하게 주어지지 않을 경우에는 관측된 화소의 정확한 관측 방위각 계산이 불가능해진다. 현재 MSG CSR 자료에는 위성방위각 계산에 필요한 정보가 포함되지 않은 채 배포되고 있으므로, 불가피하게 본 연구에서는 MSG-1 위성을 제외하기로 중간보고 회의에서 협의하였다. 하지만, MSG-4 위성의 경우에도 궤도경사각이 0보다 크기 때문에 궤도경사각을 0으로 가정하고 방위각 계산 시 오차가 발생하게 된다. 이에, 궤도경사각 오차로 인해 방위각 값에 오차 발생 시, 그 오차가 경사계산 정확도에 어느 정도 영향을 미치는지 평가해보고자 민감도 테스트를 수행하였다.

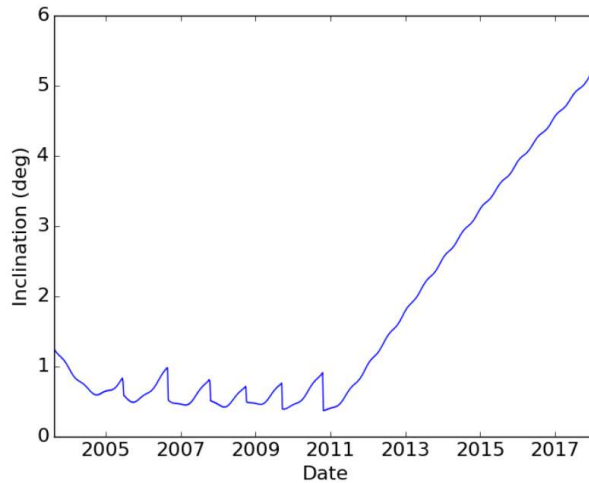


그림 1.2.11. Time series of the orbital inclination of Meteosat-8 (Burrows, 2018)

민감도 테스트를 위해 위성방위각(θ_{azi}) 값을 조금씩($\theta_{azi}-1^\circ$, -3° , -5°) 바꾸어가며 경사계산에 미치는 영향을 분석하였다. 가장 간단한 방법으로, 변경된 위성방위각에 해당하는 경사 프로파일을 입력자료로 하는 복사량을 모의하고, 그 값을 변경되기 전 원래의 위성방위각 값을 이용한 결과와 비교하였다. 그림 1.2.12는 Himawari-8 CSR 자료를 이용하여 방위각 변화에 따른 O-B 변화(왼쪽)와 O-B STD 변화(오른쪽)를 분석한 것으로 위부터 아래로 수증기 채널 8, 9, 10 번에 관한 결과이다. 그림으로부터 방위각 오차 1° 발생 시(청록색) O-B와 O-B STD 모두 위성천정각 $25^\circ \sim 30^\circ$ 부터 가시적인 차이가 발생하며, 방위각 오차가 5° (빨간색)까지 증가하면 중간이상의 위성천정각에서 O-B 차이는 최대 1K, STD 차이는 최대 2K까지 발생할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 위성 궤도경사각의 변동으로 정확한 위성방위각 계산이 어려운 위성에 대해서는(즉, MSG) 경사계산 적용을 보류하는 것이 바람직할 것으로 판단되고, 반드시 적용해야 하는 경우에는 별도 계산을 통한 정확한 위성방위각 확보가 선행되어야 한다. MSG CSR 자료에는 관측 궤도경사각 정보가 포함되어 있지 않으므로, 이를 위해서는 제공되는 변수들(위도, 경도, 위성천정각)을 이용하여, 역으로 궤도경사각을 계산하고, 이 정보들을 이용해 최종적으로 방위각을 계산하는 방법을 고려해볼 수 있다. 이 방안의 적용 여부에 대해서는 향후 기상청과 협의가 필요할 것으로 보인다.

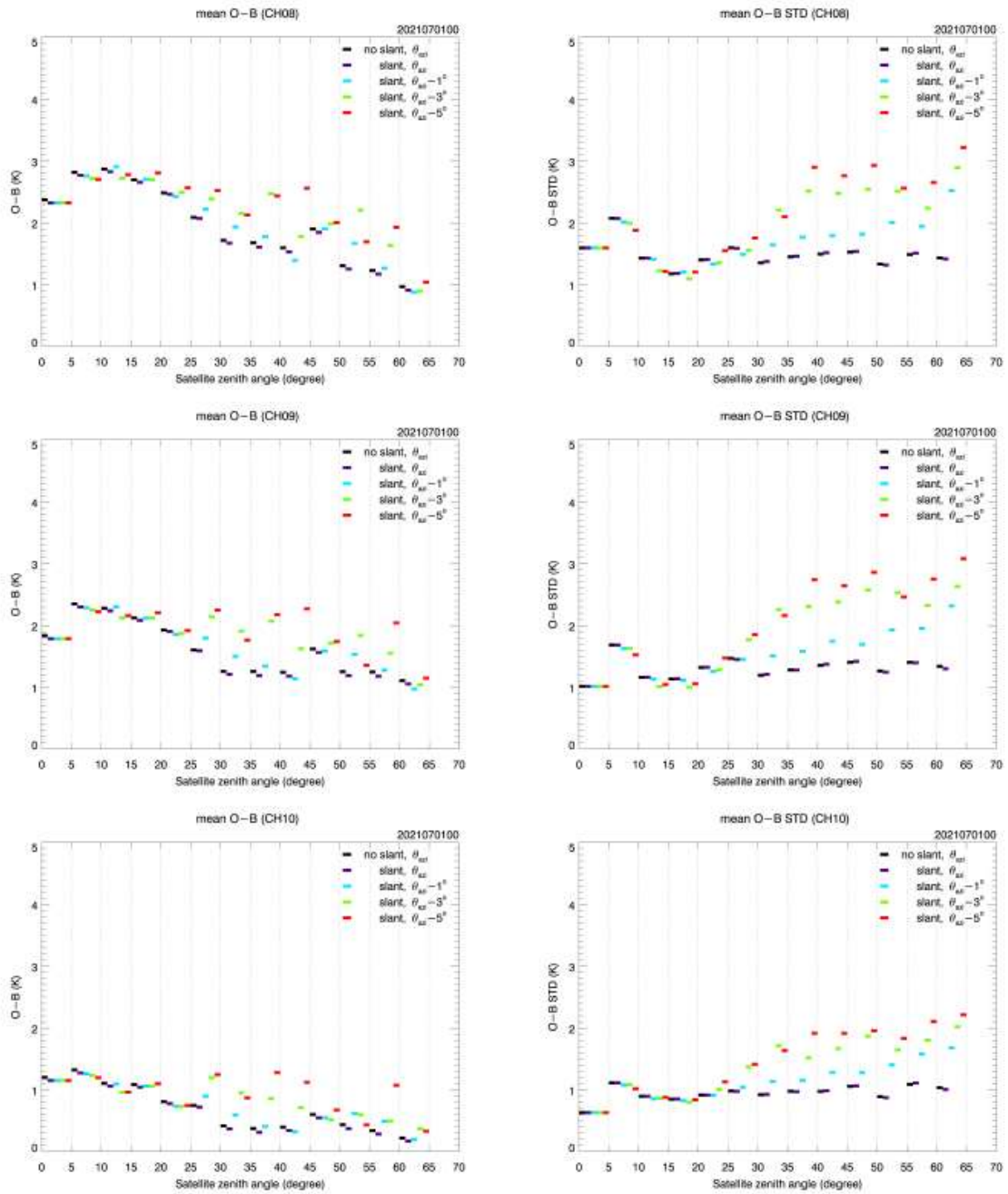


그림 1.2.12. 위성방위각 변화에 따른 위성천정각 5° 평균 O-B(왼쪽)와 STD(오른쪽). 2021년 7월 1일 00UTC Himawari-8 CSR 자료를 이용한 분석결과로 위부터 아래로 Ch8, Ch9, Ch10에 대한 결과임

1.2.8. 1차년도 연구 요약

1차년도에는 정지기상위성 CSR 자료 전처리과정에 적용할 수 있는 경사 관측연산자를 개발하고 이를 이용한 복사량 모의 및 이전 결과와의 비교 작업을

진행하였다. 연구에 활용된 위성자료는 GK2A, Himawari-8, MSG-4 3개 CSR 자료이고, MSG-1 위성은 위성 궤도경사각 증가 이슈로 인해 분석 대상에서 제외되었다. 경사계산을 위한 모듈은 공통모듈로 개발되어 KPOP 수행시 메인 코드에서 호출되도록 하였고, 최종 경사 프로파일 생성을 위한 수직 내삽은 메인 프로그램 안에서 처리하도록 설계하였다. 경사 프로파일을 이용해 복사량을 모의한 결과, 정지기상위성 특성상 그 효과가 두드러지게 나타나지는 않았으나 300~600 hPa 사이에 가중함수 최대고도가 위치한 3개 수증기 흡수 채널에서는 그 효과가 어느정도 나타나는 것을 O-B STD 분석 및 자코비안 분석을 통해 확인하였다.

마지막으로, 3차년도에 KIM의 변분자료동화 시스템에 경사 관측연산자를 적용하기 위한 상세업무분석도 올해 과업 내용에 포함되어 있었으나, 현재 현업에서 코드 업데이트 작업이 진행 중으로, 자료 동화시 배경 프로파일을 별도 호출하지 않고 KPOP에서 만들어진 경사 프로파일이 호출되어 사용될 수 있도록 변경하는 작업이 KIAPS 중심으로 진행 중이기 때문에, 상세 업무분석은 업데이트된 코드를 이용하여 앞으로 진행하는 것으로 협의하였다.

1차년도에 개발된 모듈을 바탕으로 2차년도에는 극궤도 위성에 경사 관측연산자를 적용하고, 모의된 복사량을 분석함으로써 경사 효과를 평가할 계획이다.

1.3. 위성 관측자료 활용 개선을 위한 한국형모델의 자료동화체계 개선 (명지대학교)

1.3.1. 초기화 코드 개선 구축 내역

Kwon et al. (2018)에서 묘사된 KIM의 초기화 과정은 다음과 같이 정리할 수 있다: KIM은 건조지면기압(dry surface pressure)을 초기조건으로 사용한다. 각 모델층의 건조정역학기압은 η 를 이용하여서 건조지면기압으로부터 계산되는 것이다. 건조지면기압은 지면에서 상층까지의 습도를 모두 적분하여 분석된 지면기압으로부터 빼서 계산하게 된다.

이 계산을 위해서 interface-level에서의 기압은 정역학 균형을 이용하여서 구하게 된다. 이를 위해 interface-level에서의 지위고도를 이용하게 된다. 지위고도는 배경장의 지위고도를 사용하는데, 실상 이 지위고도는 비정역학적 기압으로부터 정역학 균형을 강제하여 얻은 지위고도를 사용하고 있다(그림 1.3.1).

```

call io_add_var(kimout,'zint',hvi_dim,
               'no_standard',
               'Pa','pressure at interface',
               iotype_phy,record_mode_snapshot,physicsgrid)

! Geopotential height at interface
print*, "Calculating geopotential height"
zint(:,1) = topo(:)
DO k=1,nlev
  zint(:,k+1) = zint(:,k) + Rd * tv(:,k) / Grav &
               *DLOG( pint(:,k) / pint(:,k+1) )
ENDDO
print *, "min,max =", minval(zint), maxval(zint)

! Moisture accumulation
print*, "Calculating intq"
intq(:) = 0._r8
DO k = 1, nlev
DO i = 1, ncol
  rho = p_bg(i,k) / ( Rd * t(i,k) )
  rho = p_bg(i,k) / ( Rd * tv(i,k) )
  dz = zint(i,k+1) - zint(i,k)
  intq(i) = intq(i) + rho * Grav * q(i,k) / (1._r8 - q(i,k)) * dz
  intq(i) = intq(i) + rho * Grav * q(i,k) * dz
ENDDO
ENDDO
print *, "min,max =", minval(intq), maxval(intq)

! Dry surface pressure
print*, "Calculating pdst"
pdst = ps - intq
print *, "min,max =", minval(pdst), maxval(pdst)

```

그림 1.3.1. 초기화 코드에서 건조지면기압 업데이트 부분

그러나 이것은 불필요한 과정으로서, 사실상 건조정역학기압은 배경장의 건조지면기압으로부터 하이브리드 계수를 이용하여 구할 수 있고, 여기에 분석된 혼합비를 적용하여서 각 층의 정역학적 건조 기압을 얻을 수 있다(그림 1.3.2).

```

! Calculate background dry hydrostatic pressure
print*, "Calculating dry hydrostatic pressure"
ALLOCATE(p_dhi(ncol, ilev))
p_dhi(:, :) = 0._r8
DO k = 1, ilev
DO i = 1, ncol
    p_dhi(i, k) = hyai(k)*(P0 - p_top) &
                +hybi(k)*(pdst_bg(i) - p_top) &
                +p_top
END DO
END DO
print *, "min,max =", minval(p_dhi), maxval(p_dhi)

! Calculate difference of dry hydrosatic pressures
print*, "Calculating difference of dry hydrostatic pressure"
ALLOCATE(delta_p_dh(ncol, nlev))
DO k = 1, nlev
DO i = 1, ncol
    delta_p_dh(i, k) = p_dhi(i, k) - p_dhi(i, k+1)
END DO
END DO
print *, "min,max =", minval(delta_p_dh), &
        maxval(delta_p_dh)

```

```

! Moisture accumulation
print*, "Calculating intq"
intq(:) = 0._r8
DO k = 1, nlev
DO i = 1, ncol
!   rho = p_bg(i, k) / ( Rd * t(i, k) )
!   rho = p_bg(i, k) / ( Rd * tv(i, k) )
!   dz = zint(i, k+1) - zint(i, k)
!   intq(i) = intq(i) + rho * Grav * q(i, k) / (1._r8 - q(i, k)) * dz
!   intq(i) = intq(i) + rho * Grav * q(i, k) * dz
    intq(i) = intq(i) + delta_p_dh(i, k) * &
                (q(i, k) / (1.-q(i, k))) ! specific hum -> mixing ratio
ENDDO
ENDDO
print *, "min,max =", minval(intq), maxval(intq)

```

그림 1.3.2. 이번 프로젝트를 통해서 수정된, 건조지면기압으로부터 각 층에 할당되는 기압차이를 구해내는 코드

이렇게 하는 것이 비정역학 기압에 정역학 균형을 강제해서 각 층의 기압차이를 구하는 것보다 직관적이고 근사에 의한 오류가 유발될 가능성이 줄어들 것이라고 생각할 수 있다. 또한 향후에 분석 과정에서의 지면기압 변화로부터 각 층의 기압을 계속해서 계산해내고 적용하려면, 분석과정이나 초기화과정에서 구해낸 지면기압을 각 층의 기압과 연동할 수 있어야하기에, 하이브리드 계수를 이용하여 각 층의 기압과 지면 기압을 연관짓는 시스템으로 나아가야하리라 생각한다.

2022년도 연구를 진행하면서 의도치 않게 초기화 코드 내의 오류를 발견하였는데, 바로 비습의 증분을 혼합비의 증분으로 변화시킬 때, 비습을 혼합비로 바꾸는 식,

$$mr_a = \frac{sp_a}{1-sp_a},$$

을 그대로 이용하였다는 것이다:

$$\delta mr_a = \frac{\delta sp_a}{1-\delta sp_a} \quad (1)$$

실상 테일러 급수 전개를 통해서 좌변의 첫 번째 항을 남겨서 혼합비의 증분을 얻어내야하지만 오류가 있었다. 이를 바로잡기 위하여 아래와 같이, 배경장의 혼합비와 분석장의 혼합비를 계산한 후에,

$$mr_b = \frac{sp_b}{1-sp_b}, mr_a = \frac{sp_a + \delta sp_a}{1-sp_b - \delta sp_a}$$

차이를 구하는 것인데, 차이 자체는 단순히 구할 수 있지만 그 의미는 아래와 같이 전개를 통해서 좀 더 드러날 수 있다:

$$\begin{aligned} \delta mr_a &= mr_a - mr_b & (2) \\ &= \frac{sp_b + \delta sp_a}{1-sp_b - \delta sp_a} - \frac{sp_b}{1-sp_b} \\ &= \frac{(1-sp_b)(sp_b + \delta sp_a) - sp_b(1-sp_b - \delta sp_a)}{(1-sp_b - \delta sp_a)(1-sp_b)} \\ &= \frac{sp_b + \delta sp_a - sp_b^2 - sp_b\delta sp_a - sp_b + sp_b^2 + sp_b\delta sp_a}{(1-sp_b - \delta sp_a)(1-sp_b)} \\ &= \frac{\delta sp_a}{1-sp_b - \delta sp_a - sp_b + sp_b^2 + sp_b\delta sp_a} \\ &= \frac{\delta sp_a}{1-\delta sp_a - 2sp_b + sp_b^2 + sp_b\delta sp_a} \end{aligned}$$

잘못된 혼합비 증분에 대한 공식 (1)과 바로잡힌 식의 전개식 (2)를 비교해보면, 분모에 추가된 항 중에서 sp_b^2 의 값이 $-2sp$ 에 비해서 크기가 작고 $sp_b\delta sp$ 의 경우 비습 증분의 부호에 따라 변화하는 양이기 때문에 전반적으로 개선된 식 (2)에서 분모가 작아질 확률이 높고 따라서 혼합비 증분의 크기는 기존 식(1)에 의해 계산된 값에 비해서 커질 확률이 높다. 그러나 이것이 혼합비 증분이 커짐을 의미하지는 않는다. 분자에 해당하는 비습의 증분의 부호에 따라서 달라지고, 우리가 얘기할 수 있는 것은 단지 혼합비 증분의 부호와 상관없는 크기가 증가할

확률이 높아진다는 것이다. 따라서 식(2)에 의해 각 층의 수증기압을 계산하게 되면, 수증기압의 변동성이 커지고 건조기압의 변동성이 커질 확률이 높아지며, 결론적으로 건조지면기압의 변동성이 커질 확률이 높아진다. 다시 말해 건조지면 기압 산출에 있어서 각 층의 수증기가 미칠 수 있는 영향력이 커지게 된다. 위 식을 코드 상에서 구현하여 기존 코드를 바로 잡으면 아래와 같다.

```
WRITE(*,'(a)') 'processing q [kg/kg]'
CALL ReadDoubleVariable(fcstInput, 'qv', var2d, start=(/1,1/), count=(/ncol,nlev/))
q_bg = RESHAPE( var2d, SHAPE=(/ncol,nlev/) )
IF (is moist mr) THEN
  ALLOCATE( q_bg_mix(ncol,nlev) )
  q_bg_mix(:, :) = q_bg(:, :) ! mixing ratio
  q_bg(:, :) = q_bg_mix(:, :) / (1. + q_bg_mix(:, :)) ! mixing ratio --> specific humidity
ENDIF
print *, "min,max =", minval(q_bg), maxval(q_bg)
```

```
WRITE(*,'(a)') 'processing q_inc [kg/kg]'
CALL ReadDoubleVariable(incInput, 'qv', var2d, start=(/1,1/), count=(/ncol,nlev/))
q_inc = RESHAPE( var2d, SHAPE=(/ncol,nlev/) )
IF (is moist mr) THEN
  !q_inc(:, :) = q_inc(:, :) / (1. + q_inc(:, :)) ! mixing ratio --> specific humidity
  ALLOCATE( q_inc_mix(ncol,nlev) )
  ALLOCATE( q_an_mix(ncol,nlev) )
  ALLOCATE( q_an(ncol,nlev) )
  q_inc_mix(:, :) = q_inc(:, :) ! mixing ratio increment
  q_an_mix(:, :) = q_bg_mix(:, :) + q_inc_mix(:, :) ! mixing ratio analysis
  q_an(:, :) = q_an_mix(:, :) / (1. + q_an_mix(:, :)) ! mixing ratio --> specific humidity
  q_inc(:, :) = q_an(:, :) - q_bg(:, :) ! sp analysis increment
ENDIF
print *, "min,max =", minval(q_inc), maxval(q_inc)
```

그림 1.3.3. 초기화 코드 내에서 수증기압 계산에 바른 혼합비 증분이 사용되도록 개선한 모습

마지막으로, 모델의 예단 변수가 기온이 아니라 온위이기 때문에, 초기화 코드 내에서 온위를 계산하는 부분이 존재하는데, 이 부분에서 각 mid-level의 기압이 사용되게 된다. 기존 코드에서는 배경장의 비정역학 mid-level 기압을 그대로 사용하였었다. 그러나 이 경우에 분석된 건조지면기압으로부터 업데이트되는 각 층의 기압 정보를 사용할 수 없기 때문에 이를 개선할 수 있는 가능성에 대해서도 테스트해보았다.

그러나 이 과정은 아직 완벽하지 않다. 모델 연직층의 interface-level의 경우는 하이브리드 계수를 이용하여 건조지면기압으로부터 기압 차이를 구하고 mid-level의 혼합비를 이용하여 수증기압 계산이 가능했지만(이를 이용하여 개선된 코드에서는 분석 건조지면기압을 계산해내었다), 이렇게 계산해낸 수증기압은 각층에서의 interface-level에서의 값이다. mid-level에서의 수증기압을 계산해내려면 interface-level에서의 혼합비를 얻어야 하는데 어떤 내삽방법이 적절한지에 대해서는 아직 적합한 방법을 찾지 못했다. 단순히 log 기압 값을 이용하

여 연직 내삽을 수행했을 때 근사가 적절히 이루어질 수 있다면 그 방법을 사용할 수 있을 것이다. 하지만 당해연도 사업에서는 시도해보지 않았다.

또 하나의 문제점은 분석 기온을 분석 온위로 변환하는데 있어서 정역학 기압을 사용해도 될지의 여부이다. 앞서 언급한 혼합비의 연직 내삽 문제가 해결된다고 하더라도 초기화 코드 내에서 건조지면기압으로부터 하이브리드 계수를 통해서 얻을 수 있는 각 mid-level의 기압은 정역학 균형을 이루고 있는 양이다. 비정역학 성분에 대해서는 어떤 얘기도 할 수 없으며, 이 부분의 공기의 압력이 필요하다면 배경장의 비정역학기압에서 정역학 성분을 빼낸 후에 저장하고 있다가, 분석된 정역학 기압에 더해줘야한다. 이러한 부분은 당해연도 사업에서는 고려되지 않았으며 따라서 초기화 코드에서 온위에 대한 개선은 향후에 좀 더 보완되어야 한다.

자료동화 초기화 코드 개선에서 가장 중요한 과업은 각 층의 건조 기압을 하이브리드 계수를 이용하여 계산하고 이 값으로부터 분석 혼합비를 통해 수증기압을 계산하여 최종적으로 분석된 건조지면기압을 얻는 것이었다. 그러나 과업을 진행하던 중 건조지면기압 계산에 들어가는 혼합비 계산에 쓰이는 혼합비 증분의 계산이 잘못되어서 이를 바로 잡는 과정이 진행되었다.

SLP_EXP1 (Pa)

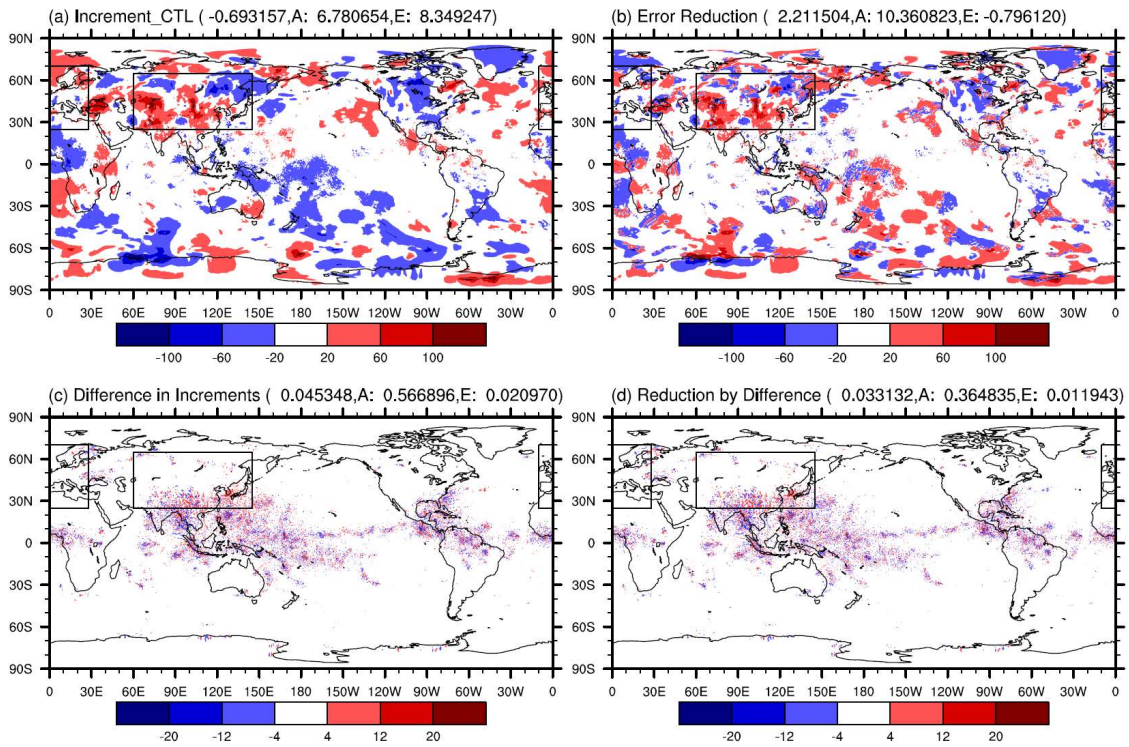


그림 1.3.4. 혼합비 증분 계산을 바로잡은 코드 적용의 예시. 2021년 6월 15일 12 UTC 해면기압의 분석증분(a), 오차감소(b), 실험군과의 증분 차이(c), 추가 오차감소(d). 괄호 안은 전구, 아시아(A), 유럽(E) 평균.

2021년 6월 15일 12UTC에 대해서 적용한 결과, 전반적인 변화 영역이 수증기가 많은 지역이라는 점은 지면기압의 변화가 연직층에 함유된 수증기의 양에 영향을 받아 발생했다는 사실과 연관된다. 지면기압 증분은 증가하는 것으로 나타났는데(그림 1.3.4c), 이는 각 층의 수증기압 감소를 의미하며, 1.3.1절의 수식(2)에 의하면 수증기 증분이 전반적으로 배경장의 수증기를 줄이는 방향으로 산출되었음을 짐작케한다. 이 결과는 IFS 분석장과 비교하였을 때 해당 기준값에 더 가까워지는 결과로 이어졌다(그림 1.3.4d). 이러한 현상은 아시아에서 도드라진다.

Geopotential height_EXP1 (gpm)

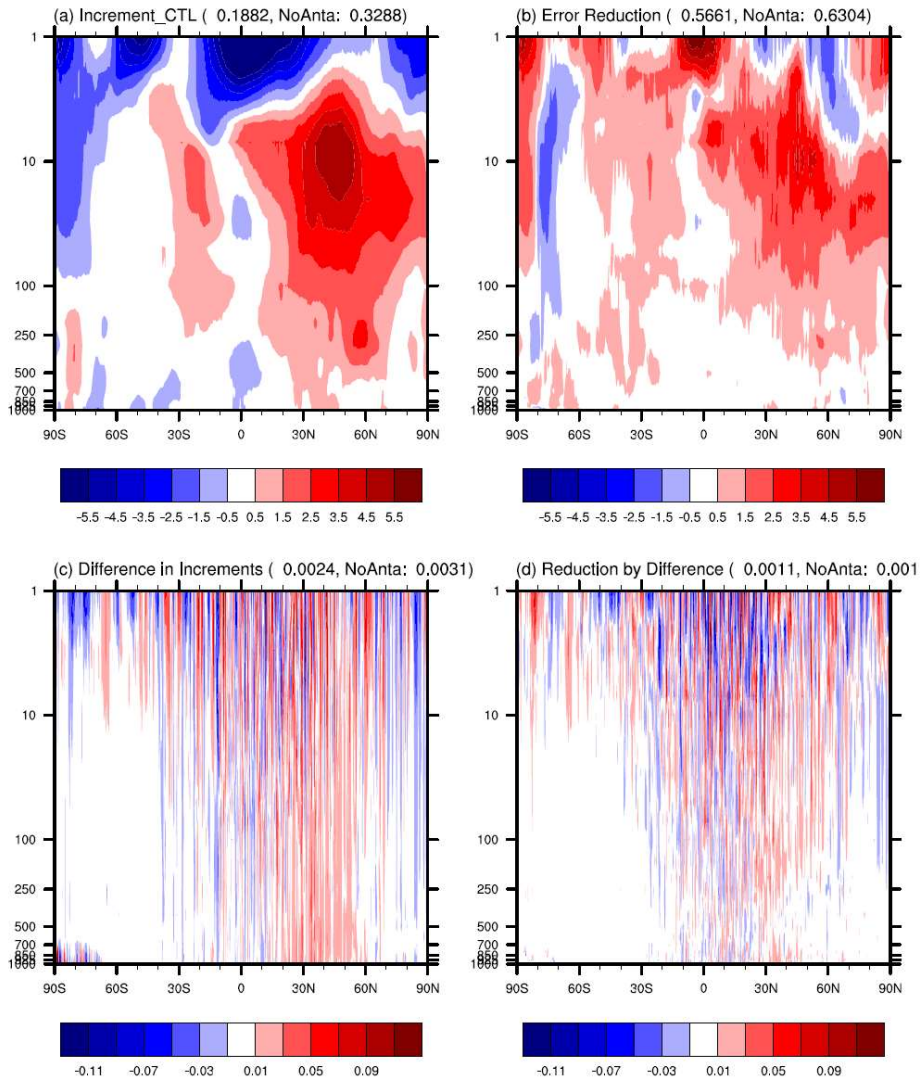


그림 1.3.5. 그림 1.3.4와 같은 시점의 지위고도 결과. 패널 구성은 동일하며, x축은 위도, y축은 고도로서 경도 평균된 값들이다. 괄호 안은 전구 평균과 남극 제외한 평균.

지면기압의 변화는 특히나 KIM에서 큰 영향을 미친다. 이 분석장을 모델이 받아들여서 예측을 해나갈 때 전체 연직층의 기압을 결정짓게 되기 때문이다. 이것은 다른 한편으로 전체 지위고도를 결정짓는 결과를 낳는 것이다. 지위고도 결과를 살펴보면(그림 1.3.5), 전반적으로 향상되는 모습을 볼 수 있다(그림 1.3.5d). 혼합비 증분 계산을 수정함으로써 지위고도는 전반적으로 증가했다(그림 1.3.5c). 그림 1.3.5a를 보면, 규준 실험에서 전반적으로 양의 증분인 것으로 보았을 때 IFS 분석장에 비하여 KIM의 6시간 예보 지위고도가 낮은 것을 알 수 있다. 혼합비 오류 개선 결과는 이러한 낮은 지위고도 편향을 감소시키는 방향으

로 작동하고 있다.

SLP_EXP3 (Pa)

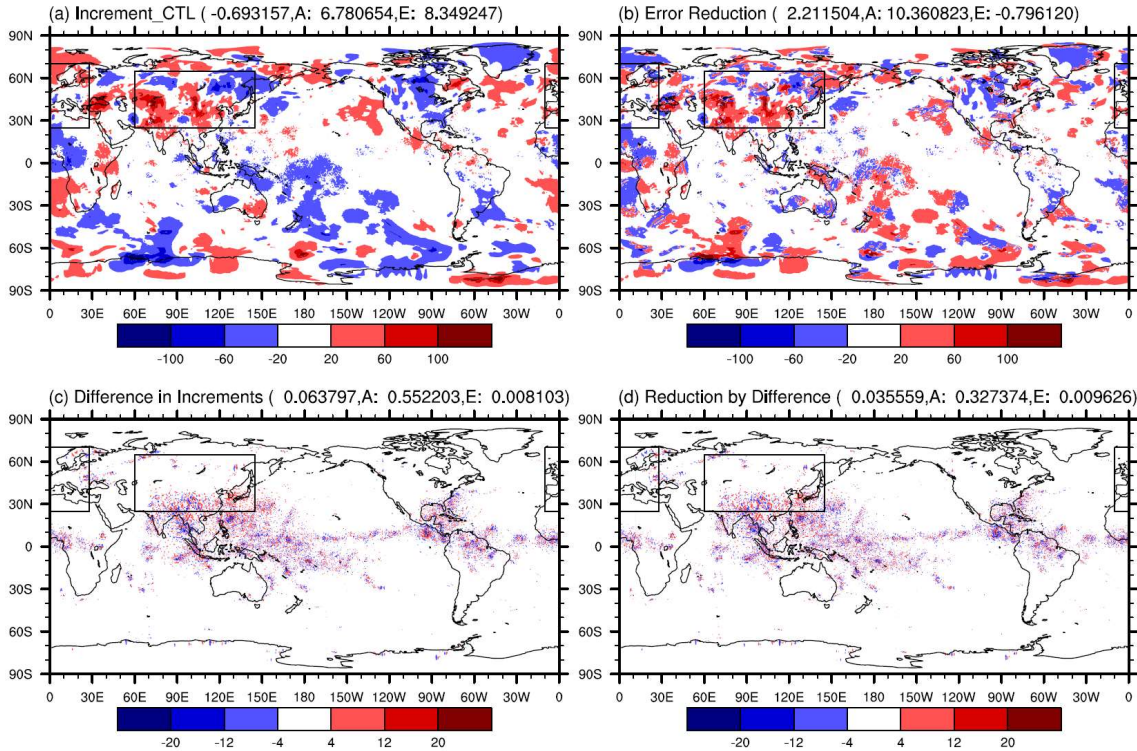


그림 1.3.6. 그림 1.3.4와 같은 시점과 패널 구성에 대하여, 수증기압 계산을 위해 하이브리드 계수를 이용한 기압차를 이용한 실험의 지면기압 결과.

본래의 중요한 과업인 각 층의 수증기압 계산을 위한 기압 차이를, 건조지면기압으로부터 하이브리드 계수를 이용하여 구한 결과를 확인하였다(그림 1.3.6). 직접적인 변수로서 지면기압을 보면, 증분 자체는 기준 실험에 비하여 증가하였고(그림 1.3.6c), 이것은 IFS 분석장과 더 가까워지는 결과로 귀결됐다(그림 1.3.6d). 지면 기압의 성능 향상은 지위고도의 성능 향상을 기대하게 한다. 이 실험은 앞선 혼합비 계산 교정에 하이브리드 계수를 이용한 기압차 계산을 더한 실험이기 때문에 앞선 실험 결과와 향상 정도의 차이를 볼 필요가 있는데, 마지막 패널의 지위고도 향상 정도를 비교하면, 하이브리드 계수를 이용하여 기압차 계산을 할 때 약 9%의 추가적인 오차 감소를 얻을 수 있었다(지면 기압은 약 6%의 추가 성능 향상이 있었다).

Geopotential height_EXP3 (gpm)

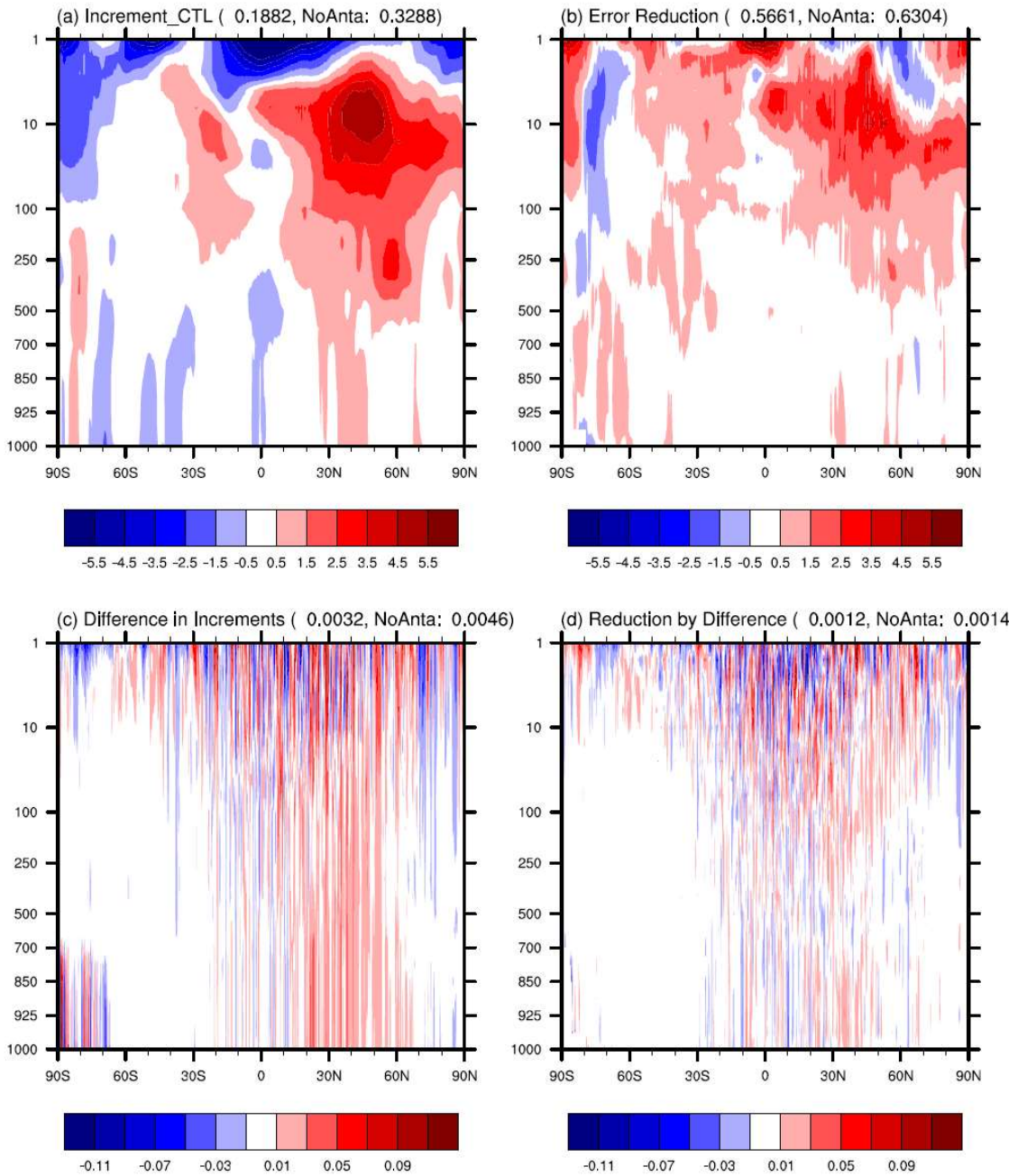


그림 1.3.7. 그림 1.3.6과 같은 실험이고 지위 고도에 대한 그림.

이 버전의 초기화 코드가 기상청 수치모델링센터와의 협업을 통해서 현업 시스템에 시험적으로 도입되어 한 달여 간의 사이클 실험이 수행된 결과는 다음과 같다(그림 1.3.8):

mod1= 38ctl, mod2= initpdst, sdate= 2021070100, 31days

fcst time (hr)	NH						SH						TR						ASIA						EUR					
	00	24	48	72	96	120	00	24	48	72	96	120	00	24	48	72	96	120	00	24	48	72	96	120	00	24	48	72	96	120
s700hPa	0.1	-0.01	0.07	0.41	0.15	0.57	0.26	0.07	-0.27	-0.6	0.01	0.16	-0.02	-0.02	-0.29	0.12	-0.17	-0.47	0.47	-0.01	0.2	0.85	0.62	1.77	0.14	0.13	-0.13	0.04	0.87	0.25
w250hPa	-0.1	-0.55	0.37	0.2	0.93	0.32	-0.12	0.11	0.38	0.08	-0.3	-0.49	0.17	-0.2	-0.54	0.17	-0.15	-0.09	-0.14	0.22	1.3	0.55	2.22	1.61	-1.13	-0.09	0.5	0.24	1.73	3.61
w500hPa	0.12	-0.01	0.16	0.15	0.64	0.34	-0.19	-0.14	-0.11	0.15	-0.04	-0.81	-0.02	-0.04	-0.15	0.31	0.29	0.69	0.05	0.37	1.55	1.08	2.17	1.22	0.19	0.42	-1.46	-2.04	-1.0	2.37
w850hPa	0.22	0.23	0.56	0.02	0.31	-0.23	0.27	0.13	-0.04	0.2	-0.03	-0.15	-0.1	0.09	0.01	0.63	0.31	-0.22	1.12	0.33	1.39	1.9	1.57	-0.01	0.09	0.44	0.66	-0.44	-0.73	-0.46
z250hPa	0.94	-0.47	0.86	1.1	1.9	-0.41	-0.15	0.3	-0.28	-0.13	0.75	-1.14	0.67	1.23	0.89	-0.25	-0.09	0.65	-1.21	-1.62	3.23	2.92	4.04	1.95	0.6	1.96	0.98	0.24	-2.83	2.07
z500hPa	-0.07	0.02	0.47	0.38	1.15	-0.83	-0.88	-0.58	-0.17	0.31	0.75	-1.45	-1.65	-0.19	-1.08	-0.56	0.71	0.64	-0.38	0.08	3.74	3.49	5.03	3.29	-1.65	1.01	0.34	-2.13	-5.24	0.27
z850hPa	0.46	0.64	0.82	1.07	0.6	-1.2	0.17	-0.43	-0.31	0.83	-0.06	-1.37	-1.41	0.23	-1.34	0.56	0.68	-0.7	2.56	1.7	3.27	3.96	4.33	1.09	-2.42	0.94	0.01	-0.77	-2.21	-2.24
t250hPa	-0.08	-0.5	0.25	-0.31	0.0	-0.54	-0.27	-0.13	-0.23	0.2	0.42	0.67	0.17	0.62	0.74	0.52	-0.19	0.23	1.26	0.56	1.08	0.19	1.05	0.0	-1.34	0.71	0.93	-2.07	-2.8	0.76
t500hPa	0.35	0.01	0.02	0.06	0.91	0.01	-0.01	0.02	-0.21	-0.07	0.5	-0.24	-0.13	0.24	-0.23	-0.17	-0.46	-0.08	-0.32	-0.54	1.23	1.62	2.26	-0.45	0.41	-0.32	-2.25	-1.84	-3.62	2.64
t850hPa	-0.09	0.13	0.11	0.15	0.39	0.26	0.51	0.3	0.07	0.38	-0.11	-0.78	-0.02	0.09	0.01	0.41	0.26	-0.11	0.6	1.56	0.87	0.86	1.04	2.66	0.47	0.16	1.64	0.39	-0.74	-0.54

mod1= 38ctl, mod2= initpdst, sdate= 2021070112, 31days

fcst time (hr)	NH						SH						TR						ASIA						EUR					
	00	24	48	72	96	120	00	24	48	72	96	120	00	24	48	72	96	120	00	24	48	72	96	120	00	24	48	72	96	120
s700hPa	0.03	0.28	-0.02	0.07	0.31	0.03	0.03	0.1	-0.07	-0.27	0.16	0.47	-0.1	-0.3	-0.36	-0.31	-0.24	-0.51	0.1	0.51	-0.56	0.58	-0.09	-0.89	0.35	0.07	0.76	0.59	0.06	-0.81
w250hPa	-0.62	-0.19	0.7	0.25	0.52	0.28	-0.37	-0.67	0.06	0.05	-0.03	0.49	-0.01	-0.07	-0.69	-0.08	-0.45	-0.58	-1.57	-0.32	1.47	1.27	0.54	0.17	0.06	0.62	1.78	2.24	-0.63	-1.23
w500hPa	-0.03	-0.1	0.09	-0.23	0.09	0.19	0.06	-0.01	0.19	0.06	0.57	-0.23	-0.13	-0.27	-0.18	-0.27	-0.37	-0.16	-0.21	-0.58	-0.01	0.16	0.36	0.95	-0.81	-1.36	-0.55	-0.12	0.71	-1.41
w850hPa	0.09	0.43	0.45	-0.67	-0.05	1.02	0.05	0.26	-0.01	0.48	0.37	1.23	-0.03	-0.21	0.04	-0.28	0.2	-0.31	0.24	0.59	0.2	-1.61	-1.04	1.56	-0.08	0.57	0.47	0.76	0.3	0.17
z250hPa	1.18	1.08	0.34	0.97	1.18	0.92	-0.54	-0.24	0.21	0.45	0.57	1.27	0.62	0.87	1.03	-0.38	-0.86	-0.47	0.79	0.16	0.34	1.23	0.52	-0.71	2.26	3.99	3.62	0.8	2.74	-0.09
z500hPa	0.24	0.62	-0.26	1.04	0.56	0.86	-1.2	-0.27	0.42	0.98	0.91	0.49	-0.43	-0.6	0.06	-1.1	-0.67	-0.83	-0.88	1.22	-0.6	1.6	-0.39	-1.86	-1.5	0.37	-1.61	1.18	3.18	-1.47
z850hPa	0.35	0.21	0.11	0.0	1.31	1.78	-0.73	0.03	-0.12	0.88	0.61	1.21	-0.79	-0.2	0.3	-0.46	0.44	-0.23	1.82	1.02	-1.38	-1.93	-1.83	-3.99	-1.41	0.7	-2.17	0.92	2.6	0.52
t250hPa	-0.21	0.31	0.36	-0.76	-0.56	-0.52	-0.22	-0.09	0.08	0.53	0.78	0.03	0.48	0.37	0.8	0.28	0.21	-0.06	0.05	-0.41	0.63	-1.01	-2.6	-1.82	-1.19	-0.8	0.23	0.88	1.54	-2.12
t500hPa	0.45	0.25	0.15	-0.18	-0.35	-0.31	-0.09	-0.31	-0.09	0.31	0.66	0.27	0.08	-0.26	-0.59	-0.14	-0.17	-0.46	0.44	-0.02	0.03	-0.13	-0.58	-1.09	0.72	0.63	0.19	-1.85	-0.83	-0.13
t850hPa	0.04	0.31	-0.13	-0.03	0.29	0.33	0.43	0.28	-0.06	0.23	0.09	0.55	-0.32	-0.23	-0.37	0.56	-0.17	-0.02	0.76	1.12	0.21	1.59	0.0	-2.18	0.26	0.2	0.65	0.44	1.06	0.8

그림 1.3.8. 혼합비 증분 계산 개선과 하이브리드 계수를 이용한 고도별 기압차 계산에 의한 성능 변화 실험 결과. 2021년 7월 한달에 대해 00UTC 시작 예보(상)와 12UTC 시작 예보(하). 수치모델링센터의 결과.

북반구 500hPa의 지위고도 초기장 결과가 전반적으로 향상되고, 12UTC에 시작된 예보의 경우에는 5일 예보 결과 0.86%의 향상이 보인다. 00UTC에 시작된 예보의 경우 0.83%의 성능 하락이 보이지만, 12UTC 시작 예보와 함께 고려해 보았을 때 작지만 성능 향상이 보인다고 말할 수 있다. 그리고 00UTC 시작 예보의 경우는 아시아 지역 예보 4일차에 4%가 넘는 큰 향상이 나타난다.

이 사이클 결과는 스핀업 이후 한달이 넘는 기간으로 연장될 필요가 있다고 여겨진다. 그림 1.3.8의 00UTC 시작 북반구 지위고도 4일 예보와 5일 예보 성능 변화를 살펴보면, 4일까지는 1.15% 향상을 보이던 결과가 5일 예보에서 83% 성능 하락의 모습을 보였다. 혼합비 증분 계산 교정과 건조정역학 기압 계산의 개선은 이론적 근거를 갖고 있는 코드 변화이므로 사이클 런 성능 향상이 기대되어 지고 일단은 그에 부합되는 결과를 얻은 셈이다. 이를 조금 더 연장하여 살펴보고 통계적 유의성 검사를 추가하여 조금 더 객관적인 성능 평가가 이어질 필요가 있다.

아직 살펴보아야할 점들이 더 있지만, 당해연도에서 시범적으로 가온도를 온위로

변환하는데 사용되는 기압을 분석된 건조지면기압으로부터 하이브리드 계수를 통해 계산된 각 mid-level의 건조 정역학 기압을 사용하여 기온에 대한 성능 평가를 시행해보았다.

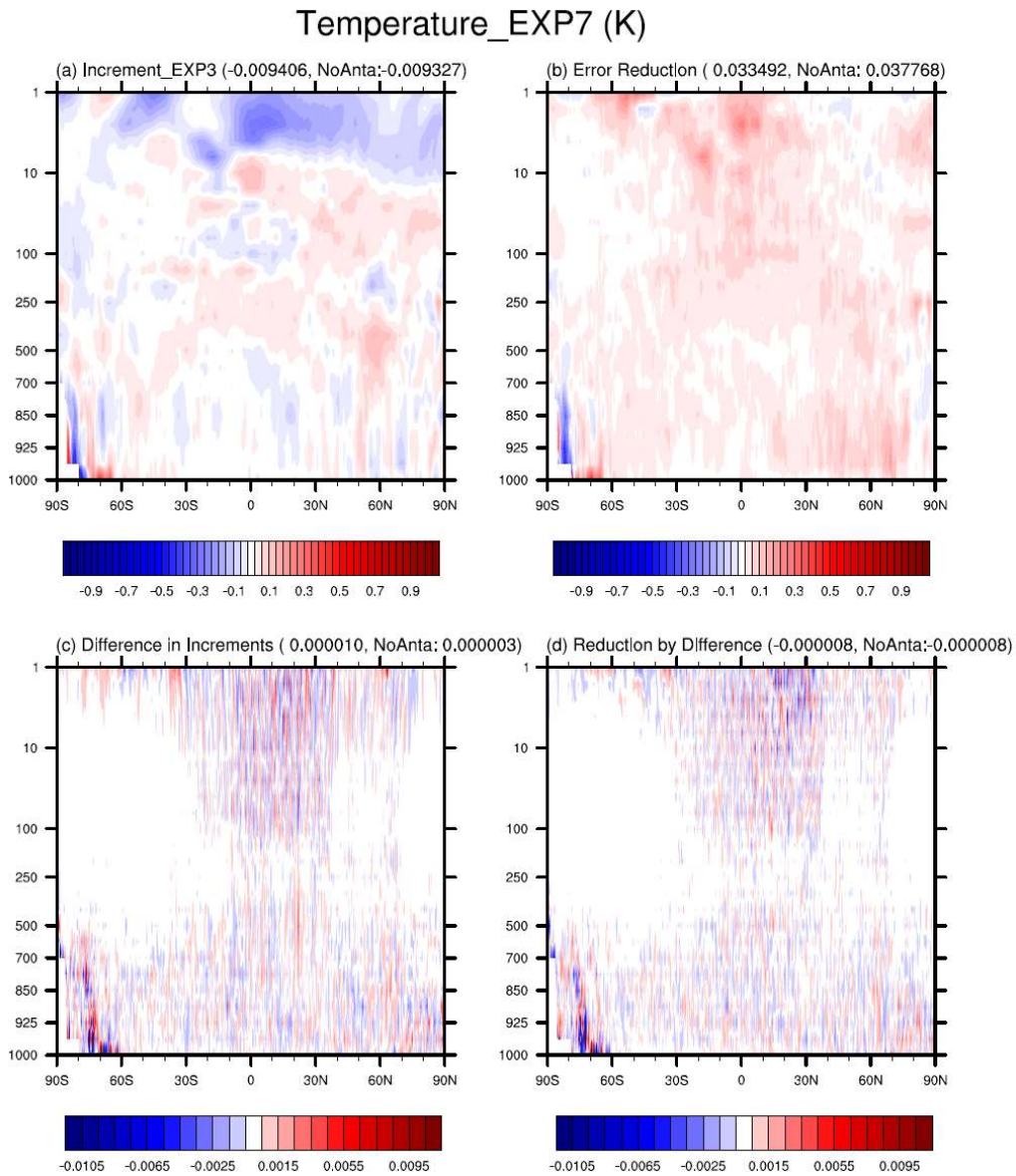


그림 1.3.9. 그림 1.3.7과 같은 시점에 대한 분석의 검증 결과. 패널 구성은 동일함. 다만, 혼합비 계산, 각 층의 기압차 계산 개선에 온도 계산 개선을 더한 실험에 대한 검증.

결과적으로 그림 1.3.9d를 통해 알 수 있는 것처럼 기온 분석에 대한 성능은 기존 실험에 비해서 떨어지거나 중립적이었다. 앞으로 interface-level에서의 혼합비를 내삽하여 구해내는 방법을 정하여 건조 성분과 수분 성분의 전체 정역학 기압을 계산해내는 방법을 구현할 필요가 있고, 필요하다면 비정역학 성분을 배경장

에서 남겨두었다가 더하여 전체 비정역학 기압의 분석장을 얻어내는 방법도 생각할 수 있을 것이다.

1.3.2. 앙상블 기반 관측자료 민감도 도구 코드 개선 구축 내역

앙상블 자료동화의 결과에 대한 각 관측의 기여도는 앙상블 기반 관측자료 민감도 도구(Ensemble Forecast Sensitivity to Observation, EFSO)을 통해서 구할 수 있다. 한국형 수치예보 모델개발 사업단에서 접합되었던 코드를 확보한 후에 코드 분석을 수행하였으며, 몇 가지 보완되어야 할 점들이 발견되었었다.

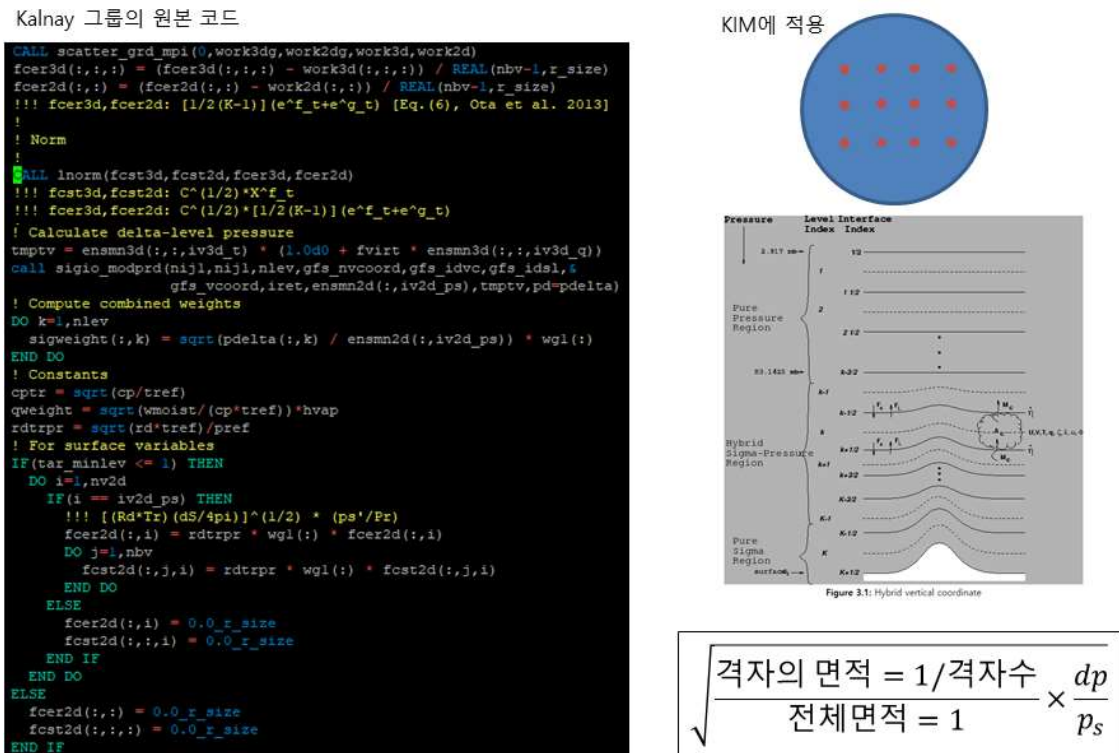


그림 1.3.10. EFSO 코드에 보완되어야 했던 매트릭

가장 중요하게 개선되어야 할 부분은 예보값을 레퍼런스와 비교하여 그 차이를 정의할 때 극 격자점이 대표하는 부피를 고려하여서 평균을 내는 부분에 대한 고려가 없었다는 점이다. 이 부분은 그림 1.3.10에서 보는 것처럼 원래 채택되어 도입한 코드에 존재하던 부분이였다.

현재의 np3 격자에서는 수평 간격은 전 지역에서 일정하기 때문에 단순 평균으로 대체할 수 있었고, 연직의 경우에는 지면 기압에 대한 각 층의 기압 두께를 반영되게 함으로써 매트릭이 적절히 구성되게 할 수 있었다. 코드의 구현은 수치모델링센터에서 이루어졌다.

두 번째로 국지화의 이동에 대한 고려가 되지 않고 있었던 부분에 대한 개선이

다. 원래 앙상블 자료동화에서 국지화의 이동을 고려하진 않지만, EFSO 계산을 할 때는 공기의 이류에 의한 관측 정보 전달의 차이를 고려하면 관측자료 민감도 결과가 더욱 향상될 수 있음이 알려져있다(Ota et al. 2013). 보유하고 있던 코드의 분석 결과 채택 대상이 되었던 원본 코드에는 이동 국지화가 구현되어 있었으나, 사업단에서 개발하는 과정에서 빠진 것을 확인할 수 있었다(그림 1.3.11).

```

!
! MAIN ASSIMILATION LOOP
!
$OMP PARALLEL PRIVATE (ij, ilev, k, hdxfl, rdiag, rloc, dep, nobsl, oindex, &
$ workl, m, nob)
  ALLOCATE ( hdxfl(1:nobstotal, 1:nbv), rdiag(1:nobstotal), rloc(1:nobstotal), &
  & dep(1:nobstotal) )
  ALLOCATE (oindex(1:nobstotal))
  --- For ILEV = 1 - NLEV
$OMP DO SCHEDULE (DYNAMIC)
  DO ilev=1,nlev
    WRITE (6, '(A, I3)') 'ilev = ', ilev
    DO ij=1,ni1j1
      IF (ABS (locadv_rate) > TINY (locadv_rate)) THEN
        CALL obs_local (lon2(ij, ilev), lat2(ij, ilev), pfull(ij, ilev), 0, hdxfl, rdiag, rloc, dep, nobsl, oindex)
      ELSE
        CALL obs_local (lon1(ij), lat1(ij), pfull(ij, ilev), 0, hdxfl, rdiag, rloc, dep, nobsl, oindex)
      END IF
    END DO
  END DO

```

```

! calculate a mean wind & moving localization center
!
allocate (sa3d1(intgrd,nlev,nv3d_inloc), sa3d1(intgrd,nv2d_inloc))
allocate (sa3d2(intgrd,nlev,nv3d), sa3d2(intgrd,nv2d))
allocate (sa3d3(ni1j1,nlev,nv3d), sa3d3(ni1j1,nv2d))
allocate (sa3d4(ni1j1,nlev,nv3d), sa3d4(ni1j1,nv2d))
do n = 1,2
  if (n == 1) fname='assmnt.nc'
  if (n == 2) fname='assmnt.nc'
  write(ih,*) 'start reading ', trim(fname)
  sa3d2 = 0.095 ; sa3d3 = 0.095
  if (myrank == 0) then
    call read_grd_anal(fname,sa3d1,sa3d1)
    sa3d2(1,1,1v3d_u) = sa3d1(1,1,1v3d_anal_u)
    sa3d2(1,1,1v3d_v) = sa3d1(1,1,1v3d_anal_v)
    sa3d2(1,1,1v3d_w) = sa3d1(1,1,1v3d_anal_w)
    sa3d2(1,1,1v3d_p_pert) = sa3d1(1,1,1v3d_anal_pp)
    sa3d2(1,1,1v3d_pb) = sa3d1(1,1,1v3d_anal_pb)
    sa3d2(1,1,1v3d_q) = sa3d1(1,1,1v3d_anal_q)
  !
  ! potential temperature (theta) to temperature (t)
  sa3d2(1,1,1v3d_t) = sa3d1(1,1,1v3d_anal_theta)
  sa3d2(1,1,1v3d_anal_pp) = sa3d1(1,1,1v3d_anal_pb) / (p0)**(rd/cp)
  sa3d2(1,1v3d_pa) = sa3d1(1,1v3d_anal_pa/cv)
  endif
enddo

```

```

do i=1,ni1j1
  lon2(i,k) = lon1(i) - 0.5_r_size * (ua(i,k) + uf(i,k)) &
  & * coslat(i) * rad2deg
  lat2(i,k) = lat1(i) - 0.5_r_size * (va(i,k) + vf(i,k)) &
  & * rad2deg
  IF (lat2(i,k) > 90.0_r_size) THEN
    lat2(i,k) = 180.0_r_size - lat2(i,k)
    lon2(i,k) = lon2(i,k) + 180.0_r_size
  ELSE IF (lat2(i,k) < -90.0_r_size) THEN
    lat2(i,k) = -180.0_r_size - lat2(i,k)
    lon2(i,k) = lon2(i,k) + 180.0_r_size
  END IF
  IF (lon2(i,k) > 360.0_r_size) THEN
    lon2(i,k) = MOD(lon2(i,k),360.0_r_size)
  ELSE IF (lon2(i,k) < 0.0_r_size) THEN
    lon2(i,k) = MOD(lon2(i,k),360.0_r_size) + 360.0_r_size
  END IF
END DO
END DO
RETURN
END SUBROUTINE loc_advection

```

KIM EFSO 코드에는 moving localization 존재하지 않음

그림 1.3.11. EFSO 코드에 보완되어야 할 이동 국지화

이동 국지화는 예보 전후의 바람의 평균을 이용하여 업데이트된 국지화 위치가 반영되도록 코드를 수정함으로써 이루어졌고 마찬가지로 수치모델링센터에서 코드화되었다. 결과적으로 부족한 부분이 보완된 버전이 구현되어 그림 1.3.12의 EFSO 결과들을 얻었다. 그림에서 가로로 늘어선 값들은 여러 시점의 EFSO 결과들이고 각 열이 운동에너지, 위치에너지, 습윤에너지, 마지막으로 전체 합이 표현되고 있다. 전체 합의 크기가 전반적으로 -20 J/Kg 정도의 크기인데, 그림 1.3.13에서 나타나는 Ota et al.(2013)의 예보오차감소량과 비교하였을 때 10배 정도의 크기 차이가 나타난다.

(a) KE	(b) PE	(c) ME	(d) TE
(0) -12.1729504245264	(0) -6.307177013379071	(0) -2.709812173715732	(0) -21.1899396116212
(1) -8.171468764953667	(1) -5.536395906313129	(1) -1.63816405310841	(1) -15.34602872437521
(2) -10.86298676051889	(2) -5.35925183766064	(2) -2.432900986228112	(2) -18.6551395840765
(3) -7.46859346887585	(3) -4.676793906927965	(3) -1.49165494025298	(3) -13.63704231605679
(4) -11.82918945726265	(4) -5.577424082134144	(4) -2.581815591833931	(4) -19.98842813123072
(5) -8.2420982353222	(5) -5.52602800767421	(5) -1.61174621229513	(5) -15.37986404350156
(6) -10.19958825431541	(6) -6.300569189412277	(6) -2.29490121543961	(6) -18.79505865916729
(7) -7.615709383800006	(7) -5.488751257039852	(7) -1.618476531272475	(7) -14.72293717211234
(8) -11.47711728816681	(8) -5.311395307591932	(8) -2.571017496834954	(8) -19.3593300925937
(9) -8.532839049265407	(9) -5.575551042721639	(9) -1.82469371021108	(9) -15.93308379300816
(10) -8.847987505974677	(10) -4.79293537567131	(10) -2.370078531700629	(10) -17.01100141334662
(11) -8.160764414226458	(11) -6.823284868046569	(11) -1.67757991545388	(11) -16.6616291972691
(12) -10.45166295476842	(12) -5.990127309903288	(12) -2.463687032630391	(12) -18.90547729730211
(13) -8.425610528378677	(13) -5.568951832068716	(13) -1.84908397770086	(13) -15.84364633821748
(14) -9.885764054769833	(14) -7.601459485881326	(14) -2.479087988640765	(14) -19.96631152929193
(15) -9.28535740585966	(15) -4.825170339182637	(15) -1.824157567736569	(15) -15.93468531277887
(16) -12.11220541813486	(16) -8.880287745644361	(16) -2.826093981338425	(16) -23.81858714511764
(17) -8.078279752189908	(17) -5.921890829209025	(17) -1.784056263368213	(17) -15.78522684476714
(18) -11.39317421300758	(18) -8.020033154119082	(18) -2.827117690282916	(18) -22.24032505740957
(19) -7.994950560005409	(19) -5.790508487538813	(19) -1.837518988163519	(19) -15.62297798170774
(20) -10.98516215410432	(20) -5.514720585442388	(20) -2.639830058116554	(20) -19.14971279766326
(21) -7.988228159171215	(21) -5.91961833685278	(21) -1.695438009233572	(21) -15.60328500525757
(22) -10.5904742599465	(22) -4.832891644934078	(22) -2.542661879770256	(22) -18.06602778465084
(23) -6.607904637316595	(23) -3.217640404124896	(23) -1.518618259903895	(23) -11.34416030142538
(24) -9.231002012227605	(24) -3.819401211525009	(24) -2.297835605469249	(24) -15.34825772962586
(25) -7.085576036248592	(25) -6.17377139913422	(25) -1.628238293185146	(25) -14.88758273056896
(26) -11.0306865405316	(26) -6.308911421072629	(26) -2.646329678553573	(26) -19.98592675367937
(27) -7.844130710877782	(27) -6.911495518656173	(27) -1.94925908537583	(27) -16.80488532490978
(28) -11.45727120509176	(28) -6.572381750261883	(28) -2.858872011401914	(28) -20.38852500675556
(29) -8.695984739125349	(29) -5.795111196041948	(29) -1.85265898741485	(29) -16.34878133390878
(30) -8.566112030441717	(30) -6.064181276028497	(30) -1.82172544123187	(30) -16.4520187476934
(31) -12.75029024977044	(31) -7.251815363026883	(31) -3.058181385394031	(31) -23.06028698919135
(32) -7.897806964467019	(32) -4.774509600727747	(32) -1.637767328210605	(32) -14.31008389340537
(33) -10.22758265619701	(33) -6.210368166966061	(33) -2.54223795918574	(33) -18.98019238234891
(34) -7.820344591424432	(34) -7.638920881209023	(34) -1.87132455085111	(34) -17.33059002348456
(35) -9.518388470622469	(35) -5.778620765977616	(35) -2.359432802982038	(35) -17.65644203958213

그림 1.3.12. EFSO 결과로서 각각은 운동에너지(KE), 위치에너지(PE), 습윤에너지(ME), 전체 합(TE)로 구성됨

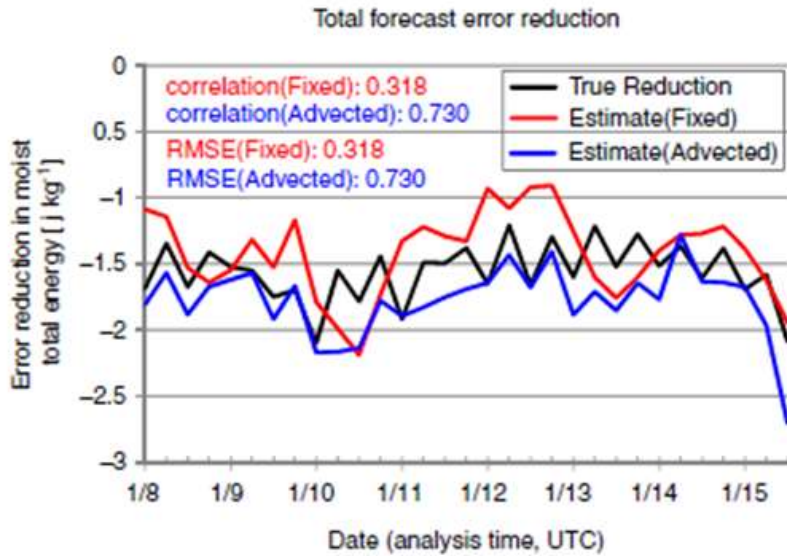


그림 1.3.13. Ota et al.(2013)에서 제시된 총 예보오차 감소량

이러한 차이에 대한 원인으로 첫째는, EFSO 코드에 들어간 앙상블 예보의 결과는 하이브리드자료동화 결과로 리센터링된 분석 앙상블로부터 계산되는데 반해, 오차를 계산하기 위한 레퍼런스 데이터는 앙상블 자료동화의 분석장이 쓰여서 기본적으로 레퍼런스 대비 예보 결과의 차이의 메트릭이 크게 나타나고 있었다. 확

인 결과 이 차이는 상층에서 10 m/s에 해당하는 정도의 양이었고, 운동에너지의 오차로 상당히 기여가 있었을 것으로 추정된다. 바람에서의 차이는 기온에서의 차이와도 연결되므로 전체적인 에너지노름(energy norm)에 의한 차이가 크게 나타났을 것으로 보인다. 여기에 더해, 수치모델링센터와의 협업 결과, **중관자료에 대한 관측 오차 분산이 지나치게 작아서** 분석 증분이 크게 생성되고 예보 오차 감소량이 큰 것으로 파악되었다.

EFSO 코드의 분석과 보완은 이루어졌지만, 향후에 바르게 활용되기 위해서는 하이브리드 분석장을 활용하여 계산하거나, 앙상블 자료동화만을 위해 사용될 필요가 있다. 하이브리드 분석장을 레퍼런스 데이터로 사용하는 경우에 관측 민감도를 계산하는데 있어서 적용되는 배경오차공분산의 구조가 앙상블 자료동화의 배경오차공분산 구조여서 서로 맞지 않는 상황이 발생하게 된다. 아마도 이렇게 얻은 결과와 앙상블 자료동화 시스템 내에서만 얻은 결과의 상호 비교가 필요할 것으로 여겨진다. 이를 보완하고 LETKF 시스템과 하이브리드 시스템에서 관측의 예보 기여도를 얻는 작업이 내년도에 이어져야 할 것이다.

당해연도 사업의 성과 중의 하나로 앙상블 기반 관측자료 민감도 도구 (Ensemble Forecast Sensitivity to Observations, EFSO)에 대한 1차적 검증 완료를 들 수 있다. 기존에 수치모델링센터에 구축된 EFSO의 값이 -20J/kg 정도로 다른 기관의 EFSO 결과에 비해 10배 정도가 커서 구현된 코드에 대한 의심을 떨치기가 어려웠었다. 일단, 리센터링 분석장 대신 하이브리드 자료동화 시스템 내의 LETKF 분석장과 예보장을 이용하여서 EFSO를 계산하여 아래와 같은 결과를 얻었다(그림 1.3.14).

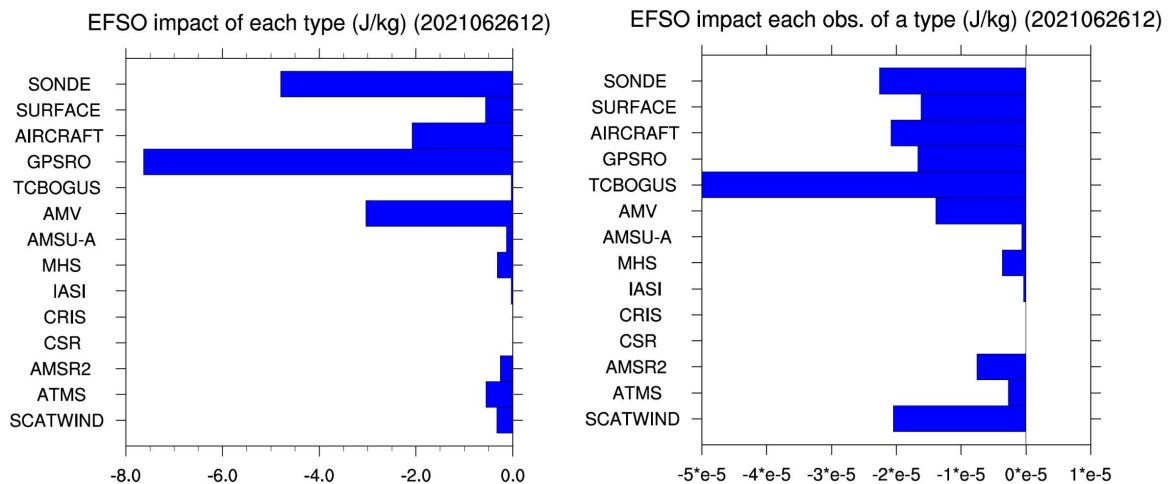


그림 1.3.14. 기상청 내에 구축된 EFSO를 이용한 관측 민감도 결과. 관측종별 결과(좌)와 한 관측 당 민감도 결과(우).

결과적으로, 리센터링된 분석장을 사용하지 않는다고 하더라도 아래의 NCEP GFS 예보 시스템의 EFSO 결과와 비교했을 때(그림 1.3.15), 여전히 그 값이 컸다. 수치모델링센터와 함께 논의하며 살펴본 결과, 현재 현업 LETKF 자료동화시스템의 중관자료에 대한 관측 오차 분산의 크기가 너무 작게 설정된 것으로 추정했고, 이를 보완하여 수정한 값을 적용한 결과 타 기관과 유사한 수준의 EFSO 값을 얻는 것으로 수치모델링센터 내에서 확인이 되었다. 이를 통해서, 구축된 EFSO가 정상적으로 구현되었음을 확인할 수 있었다.

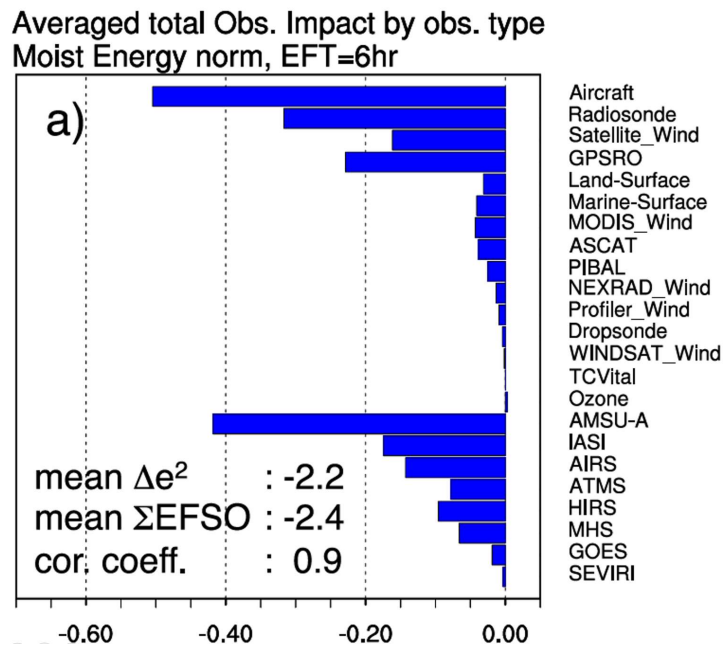


그림 1.3.15. NCEP GFS과 연동되는 EFSO 시스템에 의한 관측 민감도 결과. Hotta et al.(2017)에서 차용.

EFSO Impact (J/kg) for SFC obs. (2021062612, benef. obs.=63.35%)

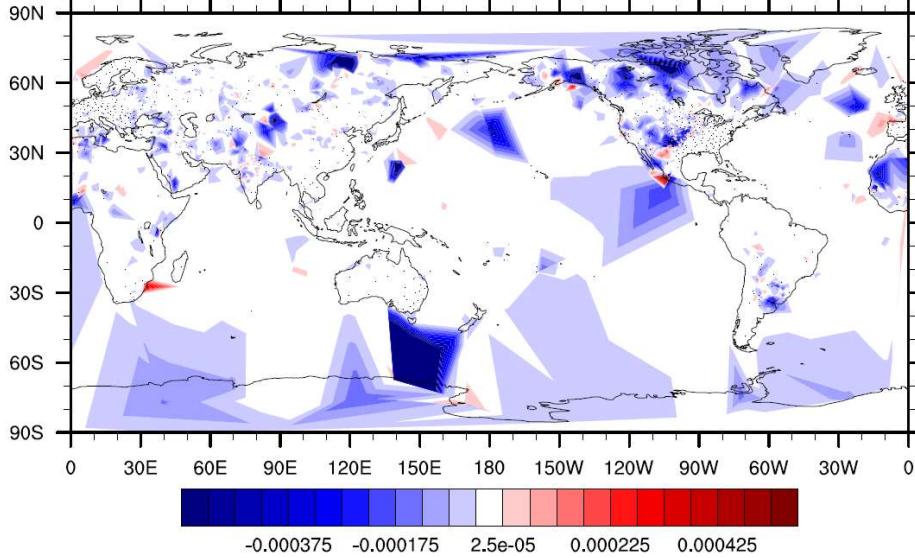


그림 1.3.16. 지면 관측에 대해 적용되고 전구에 대해 그려진 EFSO 결과. 괄호 내에 전체 관측 중에 오차를 감소시키는 관측 수의 비율.

정상 작동이 확인된 EFSO를 통하여 얻어낸 결과 중 하나는, 기존에 작동이 의심되었던 지면 관측의 효과가 생각만큼 부정적이지는 않다는 사실이었다(그림 1.3.16). 일부 지역을 제외하고는 전반적으로 예보오차를 줄이는 방식으로 작동하는 것을 볼 수 있다. 한 가지 한반도 위에서의 지면 관측이 지나치게 촘촘하여서 향후에 속아내기가 필요하지 않을까 생각이 된다. 우리나라의 경우 2021년 6월 21일 12시에 동해안 지역의 지면 관측은 긍정적으로 작동하지만, 전라남도 지역에서는 부정적으로 작동되는 것으로 나타났다(그림 1.3.17).

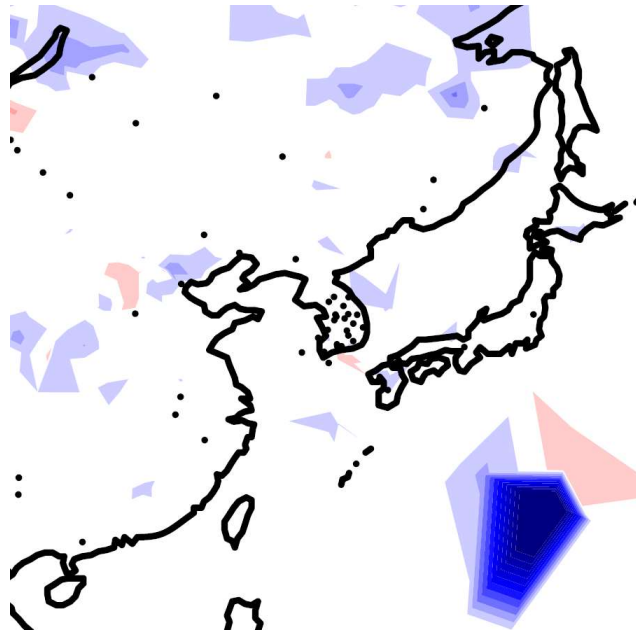


그림 1.3.17. 그림 1.3.16 중에 한반도 주변 확대.

이처럼 EFSO를 이용하여서, 특정 분석시점의 특정 지점의 특정 종의 관측이 긍정적인 영향을 미치는지, 부정적인 영향을 미치는지 판단할 수 있다. 이는 아래의 태풍 보거싱 관측이 부정적으로 작동했을 때의 분석 시점을 탐지하는 경우에도 작동되었다(그림 1.3.18).

따라서, 내년도 양상블 자료동화시스템 연구의 목표로서 설정했던 지면 자료 동화에 초점이 맞춰진 주제의 방향을 바꿔서, 정상작동이 확인된 EFSO를 이용하여 장기적인 관측 민감도의 모니터링에 시범 적용해보고자 한다. 이때 하이브리드 자료동화시스템 내의 LETKF 분석장과 예보장에 적용되어 계산된 관측 민감도는, 하이브리드 시스템의 분석장과 예보장으로부터 얻어낸 EFSO 결과와도 비교될 필요가 있다. 그리고 그림 1.3.15에서 보이는 것처럼 예보 오차 전체 크기와 EFSO 전체 합 사이의 비교 또한 추가 검증을 위해 덧붙여질 필요가 있다.

EFSO impact each obs. of a type (J/kg) (2022070212)

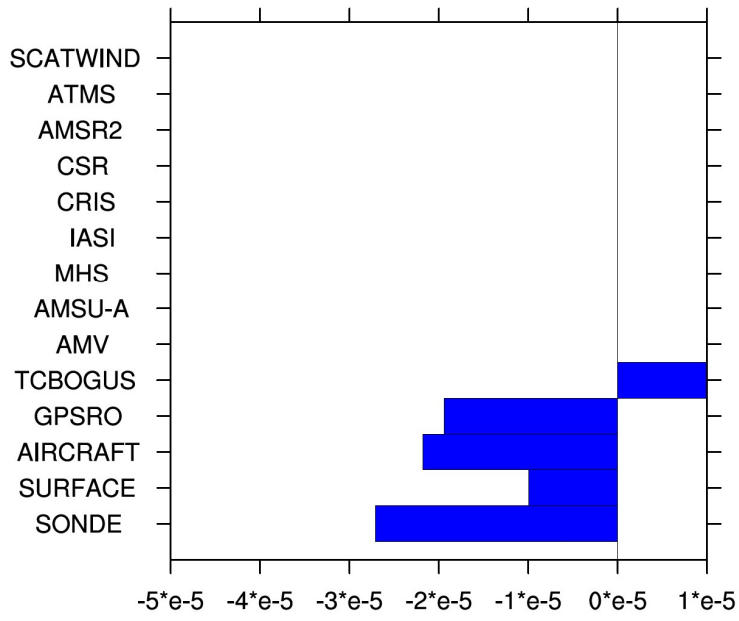


그림 1.3.18. 태풍 보거싱이 부정적으로 작동한 시점의 EFSO 결과.

1.4. 자료동화 품질에 따른 예측 성능 진단을 위한 기술과 활용 사례 조사 및 도입 기능 기술 발굴 (서울대학교)

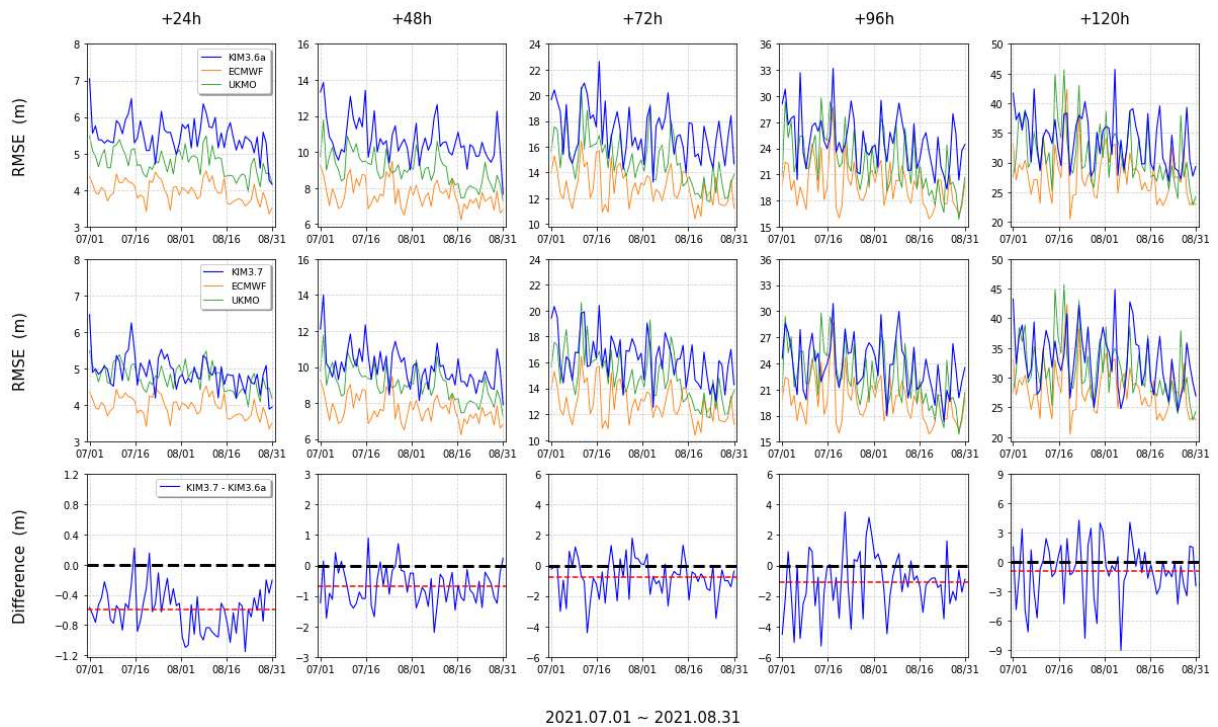
1.4.1. 시계열 자료를 통한 KIM3.6a, KIM3.7의 버전 업데이트에 따른 예보 오차 분석

본 연구에서는 한국형수치예보모델(Korean Integrated Model, KIM)의 자료동화 개선에 따른 예보 오차를 정성적/정량적으로 분석하고자 기상청에서 제공하는 데이터를 적극 활용하였다. 또한, 전구에 초점을 맞추기 보다는 한반도가 위치한 북반구를 중심으로 오차 분석을 수행하였다. 뿐만 아니라 북반구를 다섯 지역으로 나누어(예: 아시아, 동아시아, 유럽/아프리카, 북미, 북극), 기상변수를 분석함으로써 지역별 오차의 시간, 공간에 따른 변화를 분석하였다. 본 연구에서는 다음과 같은 850 hPa 온도, 250 hPa 바람, 500 hPa 지위고도, 700 hPa 상대습도 기상변수에 대해 분석을 수행하였으며, 이 중에서도 예보오차를 판단하는데 중요 지표로 활용되는 500 hPa 지위고도에 대해 집중적으로 분석을 수행하였다. 분석 기간은 target time 기준으로 2021년 7월 1일부터 2021년 8월 31일까지 총 62일이다.

본 연구에서는 KIM 버전 3.6a와 3.7, 유럽중장기예보센터의 IFS (Integrated Forecasting System), 영국기상청의 UM (Unified Model)의 기상변수 자료들로 통계변수인 평균제곱근오차 (Root Mean Square Error, RMSE)와 이상상관계수 (Anomaly Correlation Coefficient, ACC)를 활용하여 통계량의 변동성 및 자료동화를 통해 개선된 분석장이 예보장에 미치는 영향을 분석하였다. 사용된 RMSE 통계량은 다음에 주어진 식으로 계산하였다. RMSE는 대상 변수의 오차의 정도를 나타내는 방법으로서 수치예보모델의 정확성을 평가하는 방법 중 가장 널리 쓰이는 방법이다. RMSE 값이 클수록 예보 오차가 커지는 것을 뜻하고 기준 값 이상일 경우에는 모델의 성능이 좋지 않다는 것을 의미한다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (F - O)^2} \quad (1)$$

여기서 n 은 표본 수, F 는 예보장, O 는 관측 혹은 분석장을 의미한다.



2021.07.01 ~ 2021.08.31

그림 1.4.1. 북반구 500 hPa 지위고도, 00UTC에 대한 KIM, ECMWF, UM 모델의 RMSE 시계열 분석 (검정색 점선은 0선, 빨간색 점선은 평균)

그림 1.4.1은 KIM3.6a, KIM3.7, IFS, UM 모델의 500 hPa 지위고도에 대한 자체분석장 대비 RMSE의 시계열을 나타낸다 (00UTC 기준). 그림 1.4.1에서 파란색, 주황색, 초록색 선은 각각 KIM, IFS, UM 모델들의 자체분석장 대비 RMSE 시계열이며, 첫 번째 줄의 KIM은 KIM3.6a, 두 번째 줄의 KIM은 KIM3.7이고, 세 번째 줄은 KIM3.7과 KIM3.6a와의 차이를 비교 분석한 것이다. 여기서 검정색 점선은 0선이고 빨간색 점선은 해당 그래프에서의 평균값을 나타낸다.

분석 결과, 첫 번째와 두 번째 줄에서 예보 시간이 하루(24시간) 간격으로 늘어남에 따라 KIM3.6a에서 KIM3.7로 버전이 업데이트 되면서 전반적으로 예보 오차가 감소하는 즉, 모델이 개선된 모습을 보인다. 이는 그림 1.4.1의 세 번째 줄에서 두 버전의 KIM 모델들의 차이를 통해서도 확인할 수 있듯, KIM3.7의 RMSE와 KIM3.6a의 RMSE의 차이가 대부분 음의 값인 것을 확인할 수 있다. 세분화하여, 1~3일 예보의 경우 대부분의 사례들이 음의 값인 것을 확인할 수 있는데, 이는 KIM3.7보다 KIM3.6a에서의 RMSE가 높은 경우로, KIM3.7로 모델의 버전이 업데이트 됨에 따라 모델의 예보 성능이 향상되었음을 보이고 있다. 두 번째 줄에서는 특히 KIM3.7에서는 UM과 비슷한 분포를 보이는 것을 확인할 수 있다. 평균적인 예보성능 향상은 4일과 5일 예보장에서도 나타나지만, 몇몇 사례

에서는 오히려 RMSE가 크게 커지는 모습을 보이고 있으며 이는 성능이 악화되는 사례가 다수 존재한다는 것을 알 수 있다.

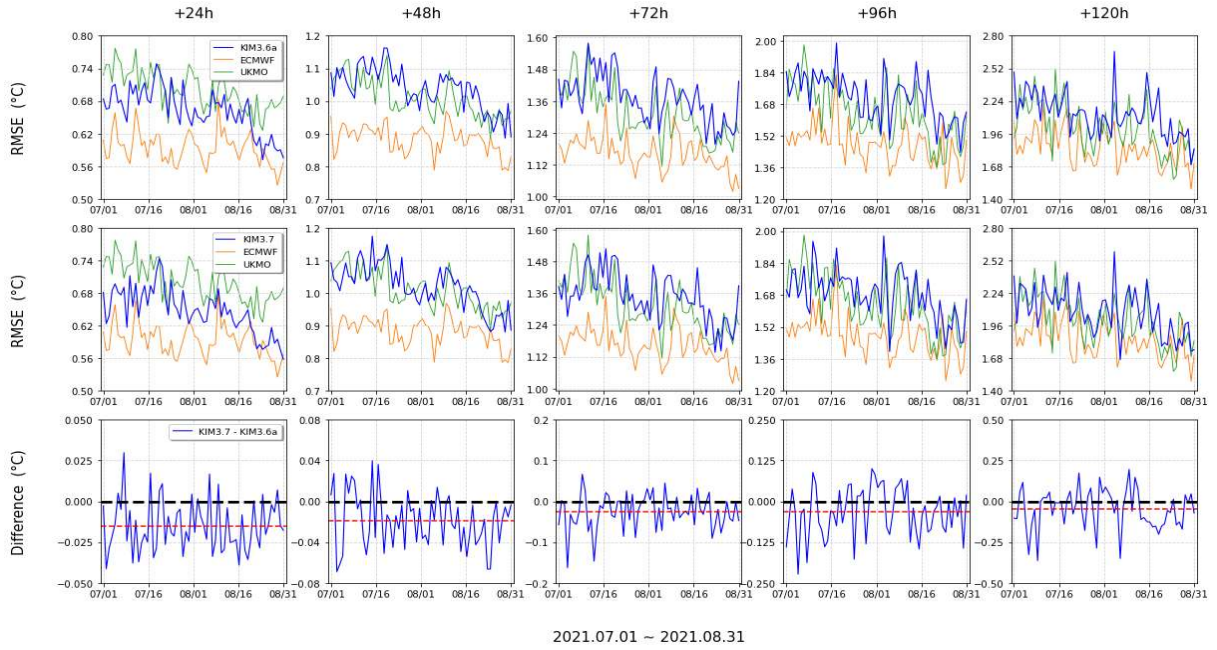


그림 1.4.2. 북반구 850 hPa 온도, 00UTC에 대한 KIM, ECMWF, UM 모델의 RMSE 시계열 분석 (검정색 점선은 0선, 빨간색 점선은 평균)

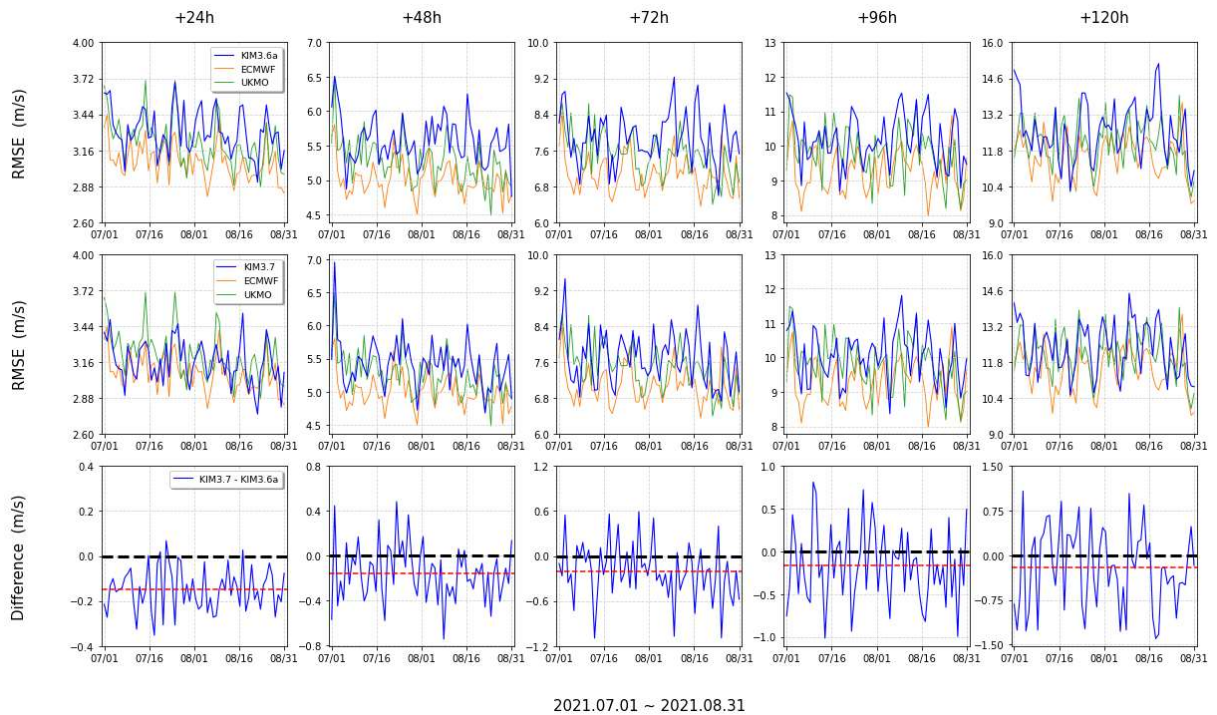


그림 1.4.3. 북반구 250 hPa 바람, 00UTC에 대한 KIM, ECMWF, UM 모델의 RMSE 시계열 분석 (검정색 점선은 0선, 빨간색 점선은 평균)

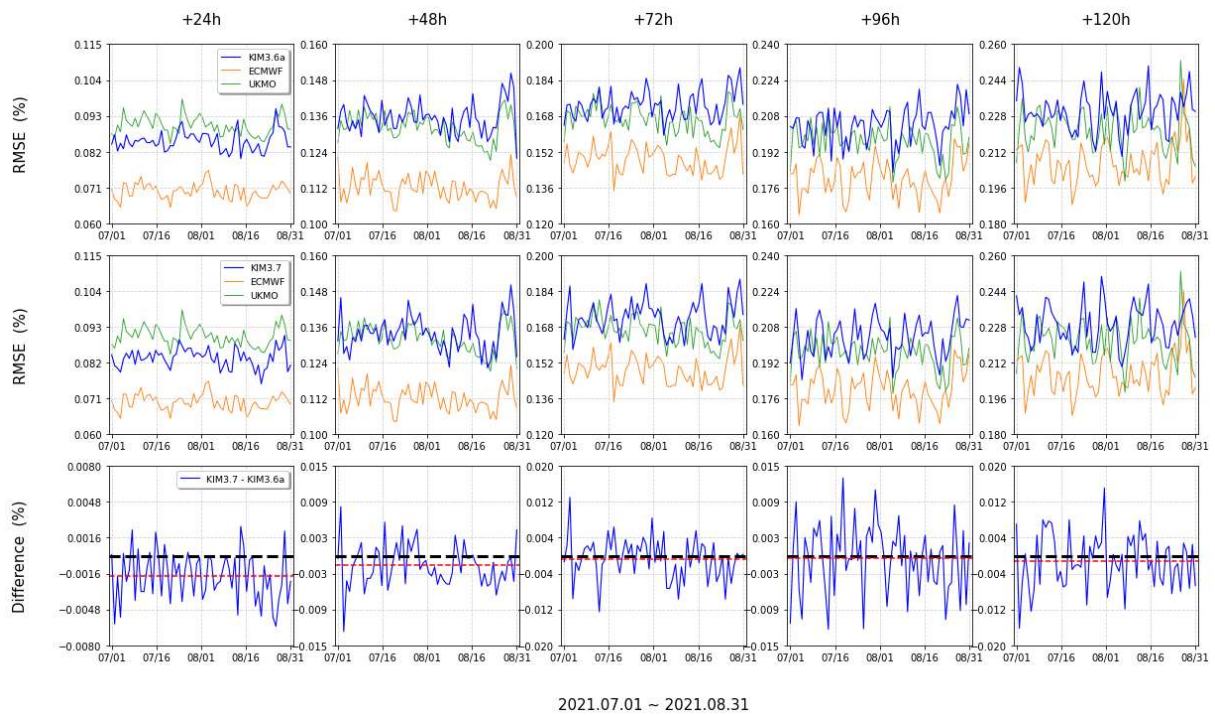


그림 1.4.4. 북반구 700 hPa 상대습도, 00UTC에 대한 KIM, ECMWF, UM 모델의 RMSE 시계열 분석 (검정색 점선은 0선, 빨간색 점선은 평균)

그림 1.4.2, 그림 1.4.3, 그림 1.4.4는 각각 850 hPa 온도, 250 hPa 바람, 700 hPa 상대습도에 대한 RMSE의 시계열 그래프이며, 특징들은 그림 1.4.1과 동일하다. 그림 1.4.2, 그림 1.4.3, 그림 1.4.4를 통해 KIM3.6a에서 KIM3.7로 버전이 업데이트 되면서 예보 성능이 향상되는 모습을 보이고 있으며 특히 그림 1.4.2와 그림 1.4.4의 24시 예보장에서는 KIM3.6a와 KIM3.7 모두 UM보다 예보 성능이 비슷하거나 좋은 모습을 보이고 있다. 그러나 그림 1.4.1과 마찬가지로 4일과 5일 예보장에서 몇몇 사례에서는 RMSE가 크게 커지는 모습을 보이고 있다.

표 1.4.1. 아시아, 동아시아, 유럽/아프리카, 북아메리카, 북극, 북반구에 대하여 분석검
 증, 00UTC에서의 850 hPa 온도, 250 hPa 바람, 500 hPa 지위고도, 700
 hPa 상대습도에 대해 KIM3.7과 KIM3.6a의 RMSE 차이의 평균값과
 KIM3.6a 평균값 대비 개선 혹은 저하 분포 분석

KIM3.7 - KIM3.6a	Variables	+24h	+72h	+120h
Asia	850 hPa T [° C]	0.0093 [1.2%]	0.0216 [1.5%]	-0.0088 [0.4%]
	250 hPa W [m/s]	-0.1041 [2.7%]	0.0621 [0.76%]	0.0394 [0.33%]
	500 hPa GPH [m]	-0.7660 [12.75%]	-0.1210 [0.76%]	-0.2110 [0.78%]
	700 hPa RH [%]	-0.0006 [0.71%]	0.0017 [1.04%]	-0.0004 [0.17%]
East Asia	850 hPa T [° C]	0.0110 [1.68%]	0.0447 [3.56%]	0.0421 [2.44%]
	250 hPa W [m/s]	-0.0634 [1.63%]	0.0003 [0.004%]	0.1527 [1.30%]
	500 hPa GPH [m]	-0.9183 [14.66%]	-0.1852 [1.17%]	0.0537 [0.22%]
	700 hPa RH [%]	-0.0015 [1.88%]	0.0014 [0.86%]	-0.0023 [1.04%]
Europe and Africa	850 hPa T [° C]	-0.0117 [2.08%]	-0.0620 [5.46%]	-0.0836 [4.62%]
	250 hPa W [m/s]	-0.2017 [6.84%]	-0.2089 [2.87%]	-0.2293 [1.96%]
	500 hPa GPH [m]	-0.7463 [15.00%]	-1.4361 [9.45%]	-1.0878 [3.70%]
	700 hPa RH [%]	-0.0004 [0.52%]	-0.0014 [0.98%]	-0.0010 [0.49%]
North America	850 hPa T [° C]	-0.0199 [2.70%]	-0.0186 [1.30%]	-0.0422 [1.94%]
	250 hPa W [m/s]	-0.1360 [3.89%]	-0.2011 [0.35%]	-0.3481 [2.76%]
	500 hPa GPH [m]	-0.5073 [11.24%]	-0.8301 [6.18%]	-1.1521 [4.13%]
	700 hPa RH [%]	-0.0025 [0.35%]	-0.0011 [0.65%]	-0.0008 [2.98%]
North Polar	850 hPa T [° C]	-0.0107 [1.41%]	-0.0550 [3.12%]	-0.1006 [3.43%]
	250 hPa W [m/s]	-0.1862 [5.50%]	-0.3063 [3.33%]	-0.3850 [2.50%]
	500 hPa GPH [m]	-0.2867 [4.10%]	-0.9098 [3.63%]	-1.5239 [2.88%]
	700 hPa RH [%]	0.0028 [2.84%]	-0.0003 [0.12%]	-0.0002 [0.08%]
Northern Hemisphere	850 hPa T [° C]	-0.0151 [2.28%]	-0.0260 [1.90%]	-0.0490 [2.30%]
	250 hPa W [m/s]	-0.1481 [4.48%]	-0.2047 [2.59%]	-0.2081 [1.66%]
	500 hPa GPH [m]	-0.5969 [10.86%]	-0.7779 [4.54%]	-0.9026 [2.67%]
	700 hPa RH [%]	-0.0019 [2.17%]	-0.0007 [0.39%]	-0.0011 [0.49%]

북반구를 포함하여 각 세부 분석 지역인 아시아와 동아시아, 유럽/아프리카, 북미, 북극 지역에서 앞서 언급한 4종의 변수들에 대해 KIM3.7과 KIM3.6a의 RMSE 차이에 대한 분석 결과는 표 1.4.1에서 확인할 수 있다. 예를 들어, 표 1.4.1에서 아시아 850 hPa 온도의 24시 예보장에서 0.0093 [1.2%]는 KIM3.7의 62일간의 일별 RMSE의 평균값이 KIM3.6a의 평균값 대비 개선 혹은 저하 정도를 나타내고 있으며, 빨간색은 KIM3.7로 모델이 업데이트 되면서 RMSE 지표가 저하된 것을, 파란색은 RMSE 지표가 개선된 것을 나타낸다. 표 1.4.1을 통해서 아시아와 동아시아 지역에서는 72시, 120시 예보장에서 대부분 모델이 저하가 된 것을 확인할 수가 있으며, 그 외의 나머지 지역에서는 전반적으로 모델이 개선이 된 것을 확인할 수 있다. 전반적으로 북반구 내에서 어느 지역이 예보 성능을 향상시키는 데 영향을 미치는지는 추후 연구가 더 필요할 것 같으며, 아시아와 동아시아에서 특히 850 hPa 온도와 250 hPa 바람에서 다른 지역들과는 달리 개선율이 안 좋은 방향으로 가는 것에 대한 것도 더 필요할 것 같다.

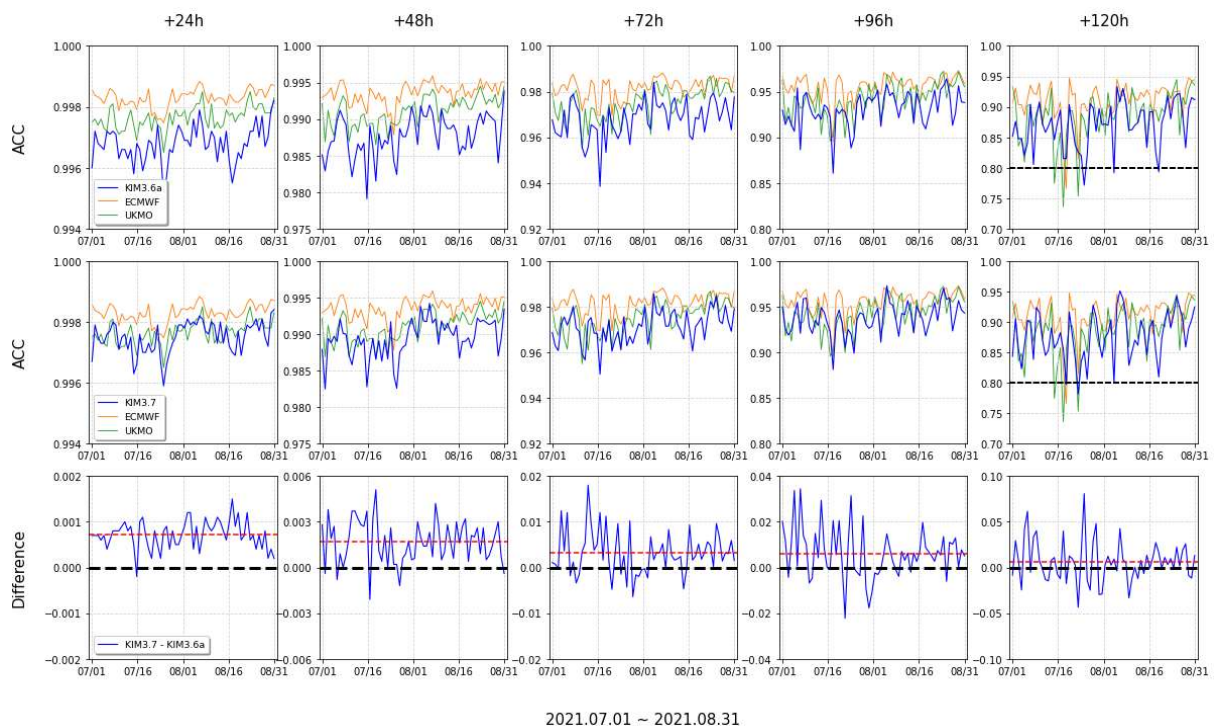


그림 1.4.5. 북반구 500 hPa 지위고도, 00UTC에 대한 KIM, ECMWF, UM 모델의 ACC 시계열 분석 (검정색 점선은 0선, 빨간색 점선은 평균)

그림 1.4.5는 그림 1.4.1과 같은 방법으로 ACC에 대해 분석한 결과이다. ACC는 RMSE와 같이 수치예보모델의 정확성을 평가하는 방법이며 식은 다음 아래와 같다.

$$ACC = \frac{\frac{1}{n} \sum (F - C)(O - C)}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum (F - C)^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum (O - C)^2}} \quad (2)$$

여기서 C는 모델변수의 기후 평균값이며, 표준 평균값 대신 C를 사용하여 예보와 관측 차이의 일치와 위상 차이를 측정한다. ACC의 값은 -1에서 1 사이이며 1에 가까울수록 예보장의 성능이 좋다는 것을 의미한다. ACC는 상관 계수와 같이 예보 평균오차에 덜 민감하며 일치성의 척도로서 좋은 방법의 하나이다.

그림 1.4.1에서 볼 수 있었듯, 그림 1.4.5의 500 hPa 지위고도에 대해 ACC 값의 시계열을 통해서도 전반적으로 KIM3.6a에서 KIM3.7으로 모델의 버전이 업데이트 되면서 모델이 전반적으로 개선된 모습을 볼 수 있으며, 두 버전의 KIM 모델들의 ACC 차이가 전반적으로 양의 값을 갖은 것을 확인해 볼 때, 모델의 성능이 향상되었음을 확인할 수 있다. 유럽중장기예보센터 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts; ECMWF)의 웹페이지 ([https://confluence.ecmwf.int/display/FUG/12.A+Statistical+Concepts+-+Deterministic+Data#id-12.AStatisticalConceptsDeterministicData-MeasureofSkill-theAnomalyCorrelationCoefficient\(ACC\)](https://confluence.ecmwf.int/display/FUG/12.A+Statistical+Concepts+-+Deterministic+Data#id-12.AStatisticalConceptsDeterministicData-MeasureofSkill-theAnomalyCorrelationCoefficient(ACC))) 따르면 ACC가 0.8 이상일 경우 수치예보모델이 우수(Good)하다고 하며, 0.6에서 0.8일 경우 적당(Moderate)하다고 판단할 수 있다. 이 정의를 토대로 KIM 모델의 우수성을 평가하고자 본 연구에서 ACC의 기준이 0.8 이상일 때를 모델의 예보성능이 우수하다고 판단하였으며, 0.8 미만일 경우에는 모델의 예보성능이 좋지 않다고 판단하였다. 그림 1.4.5에서 4일 예보장까지는 0.8 이상이지만 5일 예보장에서는 0.8보다 밑에 있거나 0.8 근처에 있는 모습을 볼 수 있다. 이는 연구를 진행하면서 사례를 선정할 때 참고하였다.

1.4.2. 기상변수들에 대한 KIM3.6a 대비 KIM3.7의 시간별 개선 및 저하 정도 분석

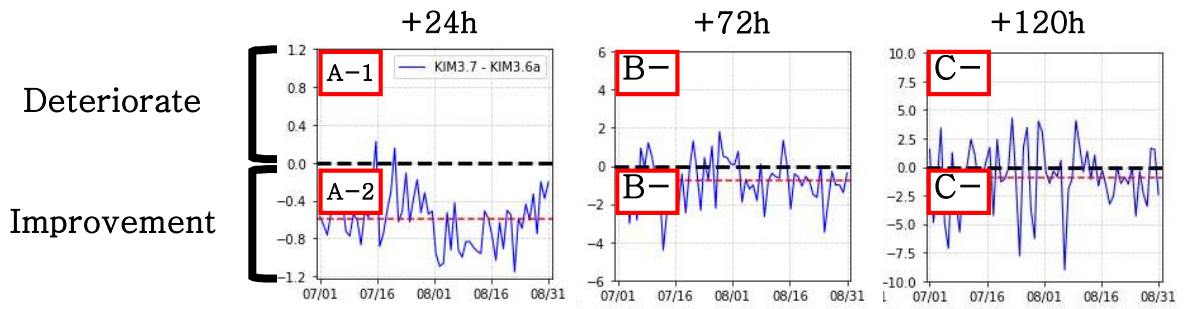


그림 1.4.6. 500 hPa 지위고도에 대한 KIM3.6a 대비 KIM3.7의 RMSE 차이의 예보 시간별 개선 및 저하 분포 분석

그림 1.4.1에서 KIM3.7과 KIM3.6a의 RMSE 차이를 분석한 결과를 토대로 24시 예보장 대비 72시, 120시 예보장과의 개선 정도를 분석하였다. 이는 그림 1.4.6을 통해서 알 수 있으며, RMSE 차이가 음의 값일수록 KIM3.7으로 모델 개선이 된 것을, 양의 값일수록 모델 저하가 된 것을 나타내는데, 이를 각각 Improvement, Deteriorate이라 정의한다. 각각의 예보장들에 대해 24시 예보장이 좋아졌을 때 72시, 120시 예보장은 얼마만큼 좋아졌는지 혹은 얼마만큼 안 좋아졌는지를 분석하고자 다음과 같은 방법으로 수행하였다.

예를 들어, 24시 예보장이 좋아졌을 때(A-2) 72시 예보장이 좋아진 경우(B-2)를 분석하기 위해 A-2와 B-2가 공통으로 해당되는 사례들을 세어보았으며, 마찬가지로 72시 예보장이 안 좋아진 경우(B-1)를 분석하기 위해 A-2와 B-1가 공통으로 해당되는 사례들을 세어보았다.

이와 같은 방법으로 수행한 결과는 그림 1.4.7과 그림 1.4.8에서 확인할 수 있다.

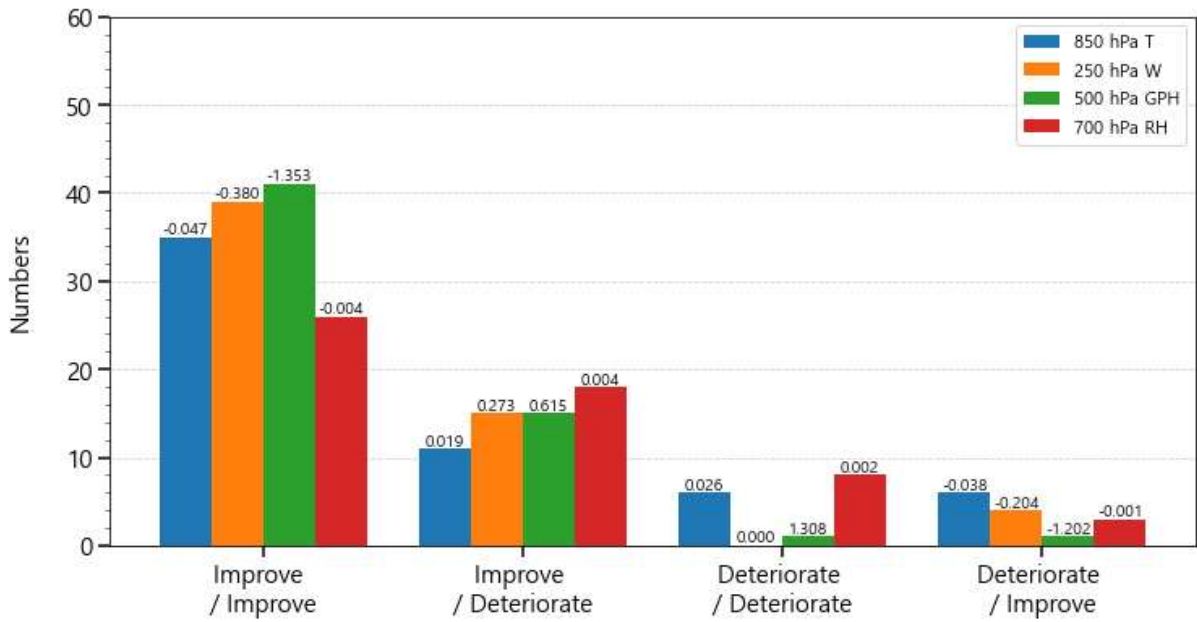


그림 1.4.7. 북반구 분석검증, 00UTC에서의 850 hPa 온도, 250 hPa 바람, 500 hPa 지위고도, 700 hPa 상대습도에 대해 KIM3.6a 대비 KIM3.7의 24h 예보장 대비 72h 예보장의 개선 및 저하 분포 분석 (바 위의 값은 평균값)

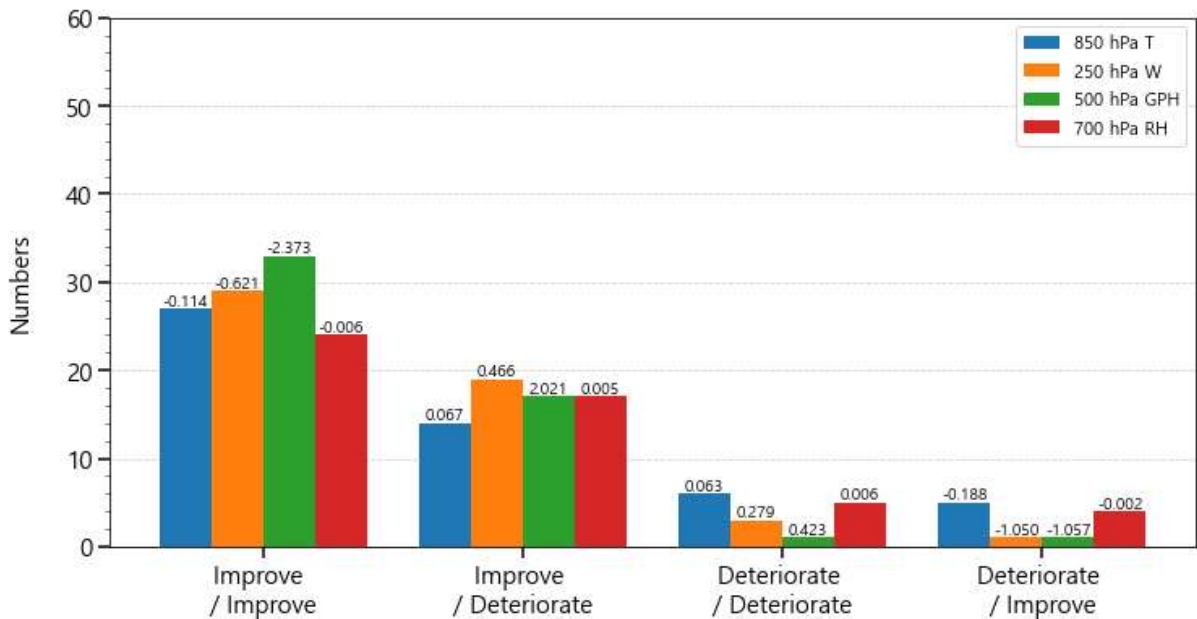


그림 1.4.8. 북반구 분석검증, 00UTC에서의 850 hPa 온도, 250 hPa 바람, 500 hPa 지위고도, 700 hPa 상대습도에 대해 KIM3.6a 대비 KIM3.7의 24h 예보장 대비 120h 예보장의 개선 및 저하 분포 분석 (바 위의 값은 평균값)

그림 1.4.7과 그림 1.4.8는 각각 24시 예보장 대비 72시 예보장, 24시 예보장

대비 120시 예보장을 나타낸다. 분석 결과, KIM3.6a에서 KIM3.7로 버전이 업데이트 됨에 따라 24시 예보장이 좋아졌을 때 72시 예보장도 좋아진 경우가 가장 많았으며, 수치로만 보았을 때는 500 hPa 지위고도가 가장 많았고, 700 hPa 상대습도가 가장 적었다. 그러나 24시 예보장이 좋아졌음에도 불구하고 72시 예보장은 안 좋아진 경우가 그 다음으로 많은 것을 확인할 수 있다. 그림 1.4.8에서도 마찬가지로 24시 예보장이 좋아졌을 때 120시 예보장도 좋아진 경우가 가장 많았으나, 120시 예보장이 안 좋아진 경우가 그 다음으로 많은 것을 볼 수 있고, 72시 예보장일 때보다 차이가 적어진 것을 볼 수 있다. 이는 예보 시간이 길어짐에 따라서 모델의 버전 업데이트에 따른 예보장의 성능의 개선 정도가 줄어들음을 의미한다.

1.4.3. KIM3.6a, KIM3.7의 24시 예보장 대비 이후의 예보장들간의 예보 오차의 변동성의 상관성 분석

위의 분석 결과들을 통해 KIM3.6a에서 KIM3.7로 버전이 업데이트 되면서 5일 예보장의 정확도가 크게 저하되는 사례가 있는 것을 확인하였다. 따라서, 본 연구에서는 예보장의 오차의 변동성이 분석장(혹은 이전시간 예보장)의 오차 변동성과의 상관성이 어떠한지 분석하였다. 여기서는 분석장과 가장 가까운 시간대인 24시 예보장의 오차를 기준으로 하여 24시, 48시, 72시, 96시, 120시 예보장의 오차들과의 상관성을 분석하였다. 여기서 62일 동안의 일별 RMSE 값을 분석하였기 때문에 이를 예보 오차의 변동성의 상관성이라고 정의할 수 있다.

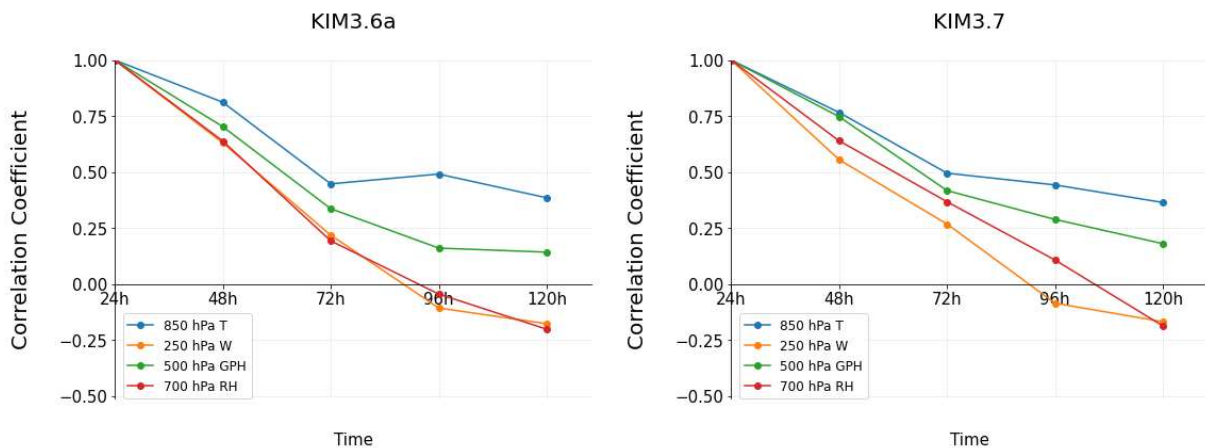


그림 1.4.9. 북반구 분석검증, 00UTC에서의 850 hPa 온도, 250 hPa 바람, 500 hPa 지위고도, 700 hPa 상대습도에 대해 KIM3.6a와 KIM3.7의 24h 예보장 대비 24h, 48h, 72h, 96h, 120h 예보장들간의 예보 오차의 시간 변동성의 상관성

그림 1.4.9는 4종의 기상변수에 대한 오차의 변동성의 상관성을 나타낸다. 오차의 변동성의 상관성은 850 hPa 온도와 500 hPa 지위고도에서 높게 나타났으며, 높은 상관성이 120시간까지 유지되는 것을 확인하였다. 하지만, 250 hPa의 바람과 700 hPa의 습도는 상관성이 예보시간이 지남에 따라 빠르게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 초기장의 개선이 4~5일 예보장의 850 hPa의 온도와 500 hPa 지위고도의 정확도에 긍정적인 영향을 준다고 결론을 내릴 수 있다. 하지만, 700 hPa 습도와 250 hPa 바람장에 대해서는 초기장이 개선되었을지라도 4~5일 예보장의 개선여부와는 상관성이 적다는 것을 확인할 수 있었다. KIM3.6a와 KIM3.7을 비교하면, 버전이 업데이트 됨에 따라 850 hPa 온도와 250 hPa 바람에서 오차의 변동성에 대한 상관성은 거의 변화가 없었으며, 500 hPa 지위고도와 700 hPa 상대습도에서는 약간의 개선점을 보였다.

표 1.4.2. 북반구 분석검증, 00UTC에서의 850 hPa 온도, 250 hPa 바람, 500 hPa 지위고도, 700 hPa 상대습도에 대해 KIM3.6a와 KIM3.7의 24h 예보장 대비 24h, 48h, 72h, 96h, 120h 예보장들간의 예보 오차의 시간 변동성의 상관계수 및 유의성 검증 (파란색 볼드체는 유의함을 의미)

Models	Variables	Correlation Coefficient	+24h	+48h	+72h	+96h	+120h
KIM3.6a	850 hPa T [°C]	+24h	1.0	0.81	0.45	0.49	0.39
	250 hPa W [m/s]	+24h	1.0	0.63	0.22	-0.11	-0.18
	500 hPa GPH [m]	+24h	1.0	0.70	0.34	0.16	0.14
	700 hPa RH [%]	+24h	1.0	0.64	0.19	-0.04	-0.20
KIM3.7	850 hPa T [°C]	+24h	1.0	0.77	0.50	0.44	0.36
	250 hPa W [m/s]	+24h	1.0	0.56	0.27	-0.08	-0.17
	500 hPa GPH [m]	+24h	1.0	0.75	0.42	0.29	0.18
	700 hPa RH [%]	+24h	1.0	0.64	0.37	0.11	-0.19

그림 1.4.9에 대한 상관계수와 유의성 검증은 표 1.4.2와 같고, 95%의 신뢰성으로 유의한 값은 파란색 볼드체로 나타냈으며, KIM3.6a에서 KIM3.7로 버전이 업데이트 되면서 72시 예보장까지는 유의한 결과가 나왔다. 특히 버전 업데이트에 따라 24시간 예보장의 오차의 변동성과 96시간과 120시간의 오차의 변동성의 상관성이 전반적으로 높아진 것을 확인할 수 있다.

1.4.4. 분석 사례 선정 및 선정된 사례에 대한 KIM3.6a와 KIM3.7의 500 hPa 지위고도 모의 정도 분석

본 연구에서는 1.4.1절에서 수치예보모델을 평가하는데 사용된 통계량인 RMSE와 ACC를 이용하여 사례를 선정하였다. KIM3.7로 버전이 업데이트가 되었음에도 ACC 값이 0.8 미만이거나 그 근처 값이 있는 때를 선별한 후 같은 기간에 대해서도 RMSE의 변화를 분석하여 해당 RMSE가 커지거나 개선된 모습이 미미한 경우를 사례로 선정하였다. 사례로 선정된 기간은 2021년 7월 19일 00UTC, 2021년 7월 23일 00UTC, 2021년 8월 4일 00UTC, 2021년 8월 19일 12UTC로 4일이 선정되었다. 이때 사례 선정에 기준이 된 변수는 500 hPa 지위고도이며, 다른 변수들에서도 같은 방법으로 ACC와 RMSE를 통해 분석하였지만, 선정되는 사례들이 천차만별무작위로 분포하기 때문에 분석에 어려움이 있어 500 hPa 지위고도에 대해서 사례를 선정해보았다.

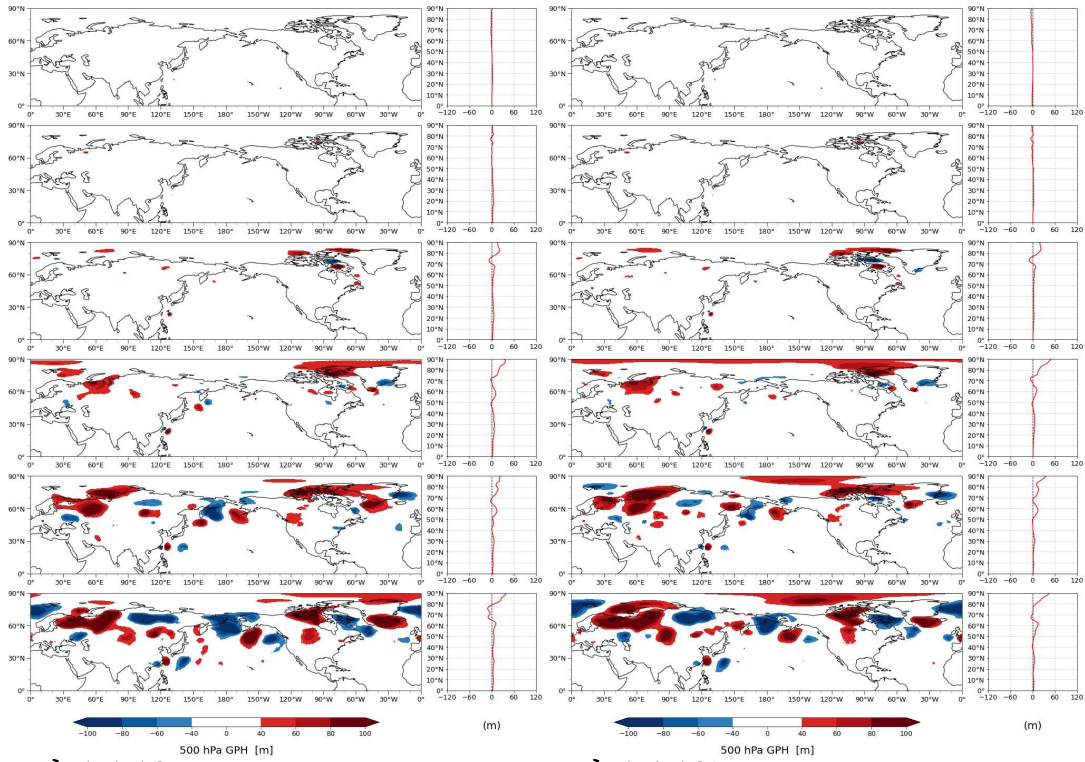


그림 1.4.10a.

그림 1.4.10b.

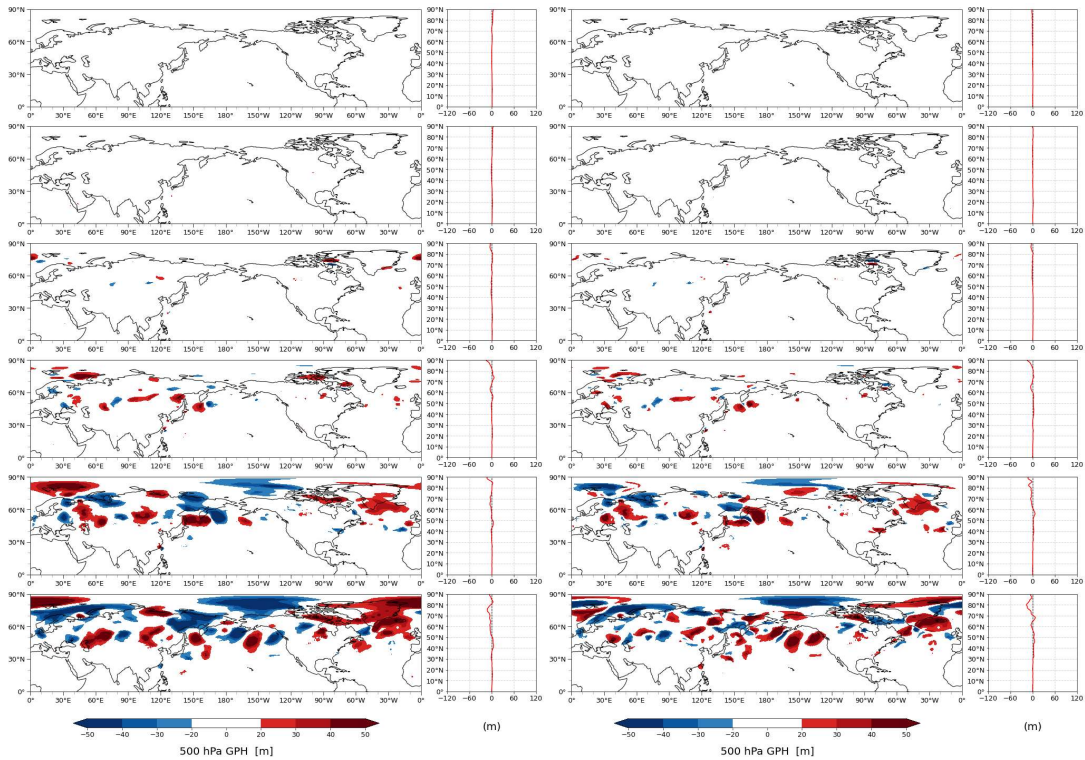


그림 1.4.10c.

그림 1.4.10d.

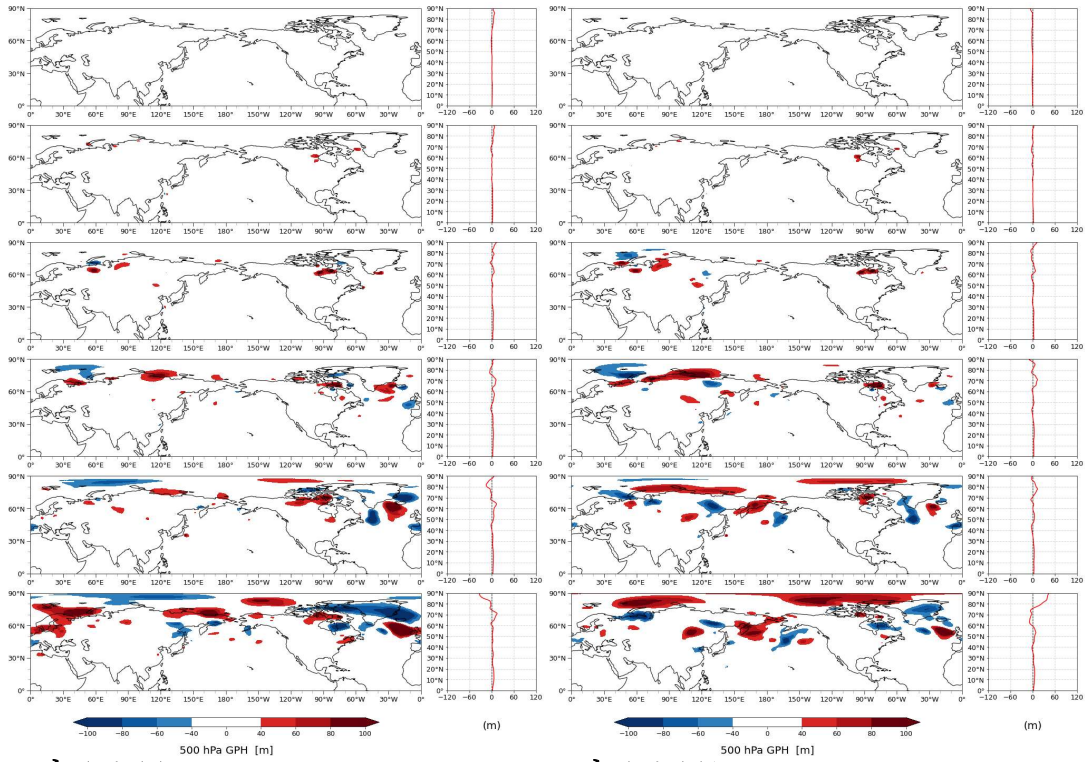


그림 1.4.11a.

그림 1.4.11b.

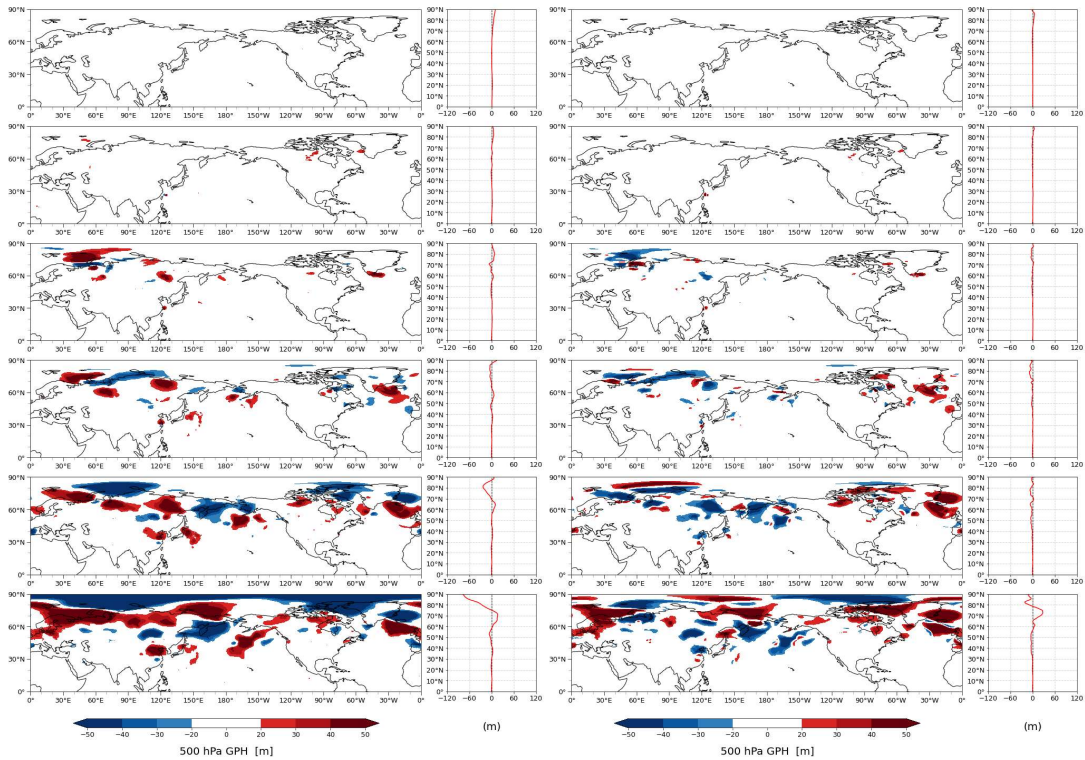


그림 1.4.11c.

그림 1.4.11d.

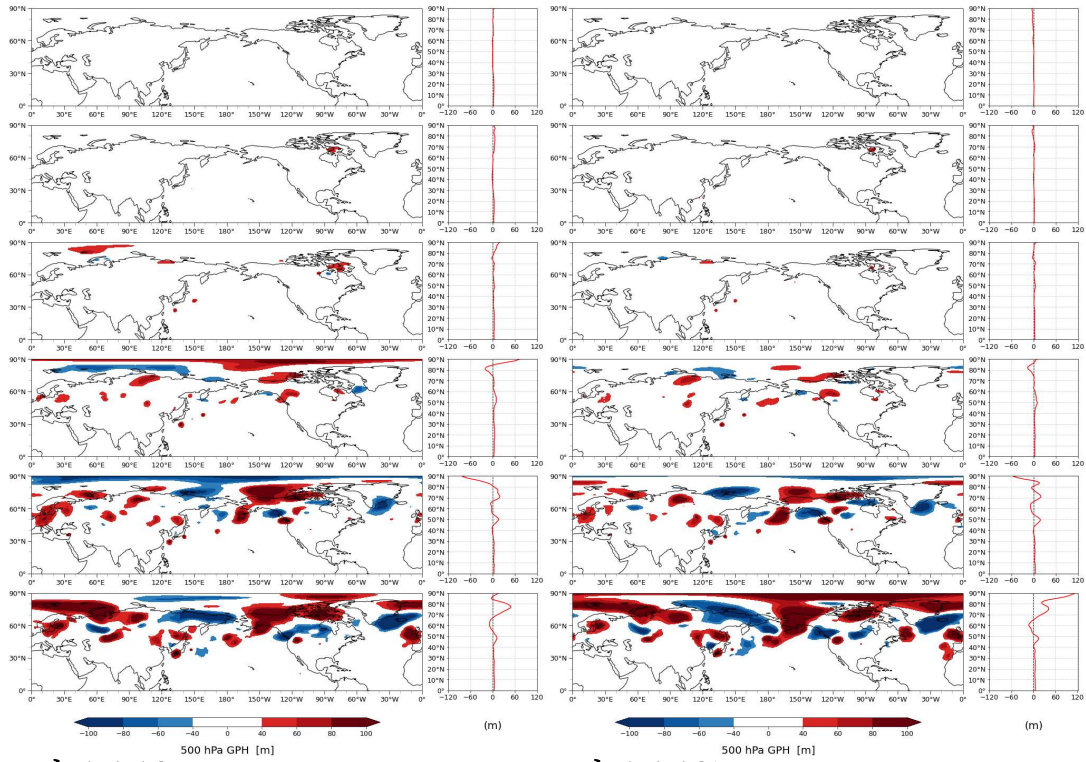


그림 1.4.12a.

그림 1.4.12b.

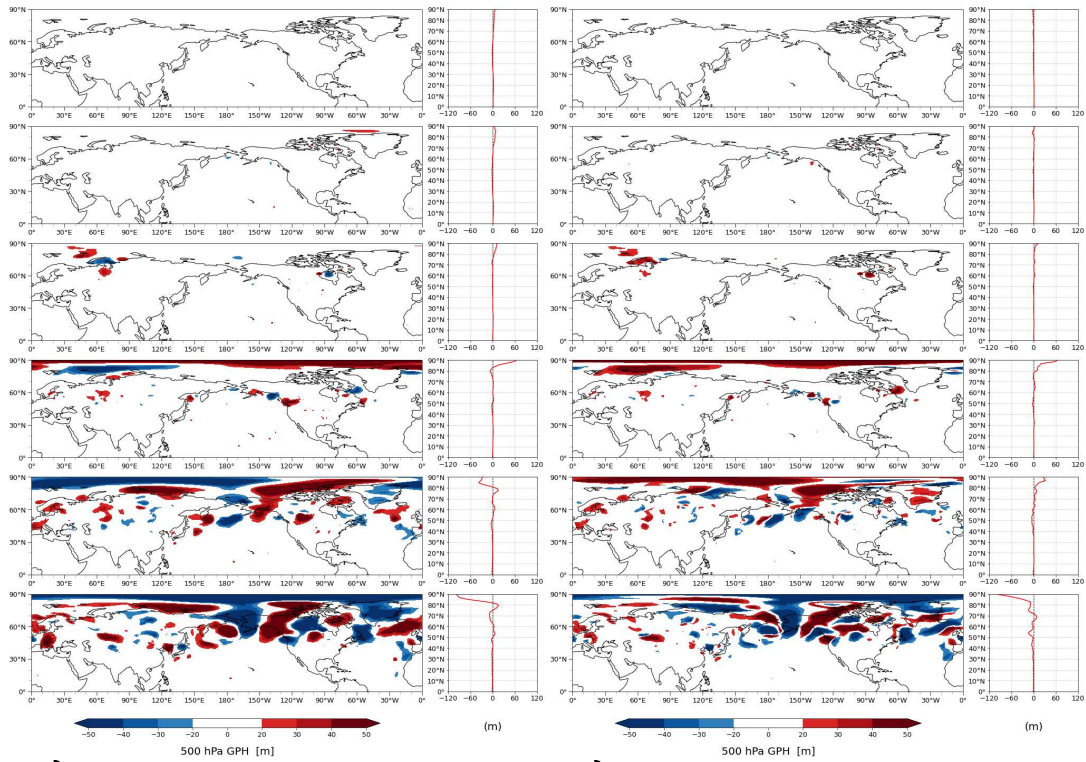


그림 1.4.12c.

그림 1.4.12d.

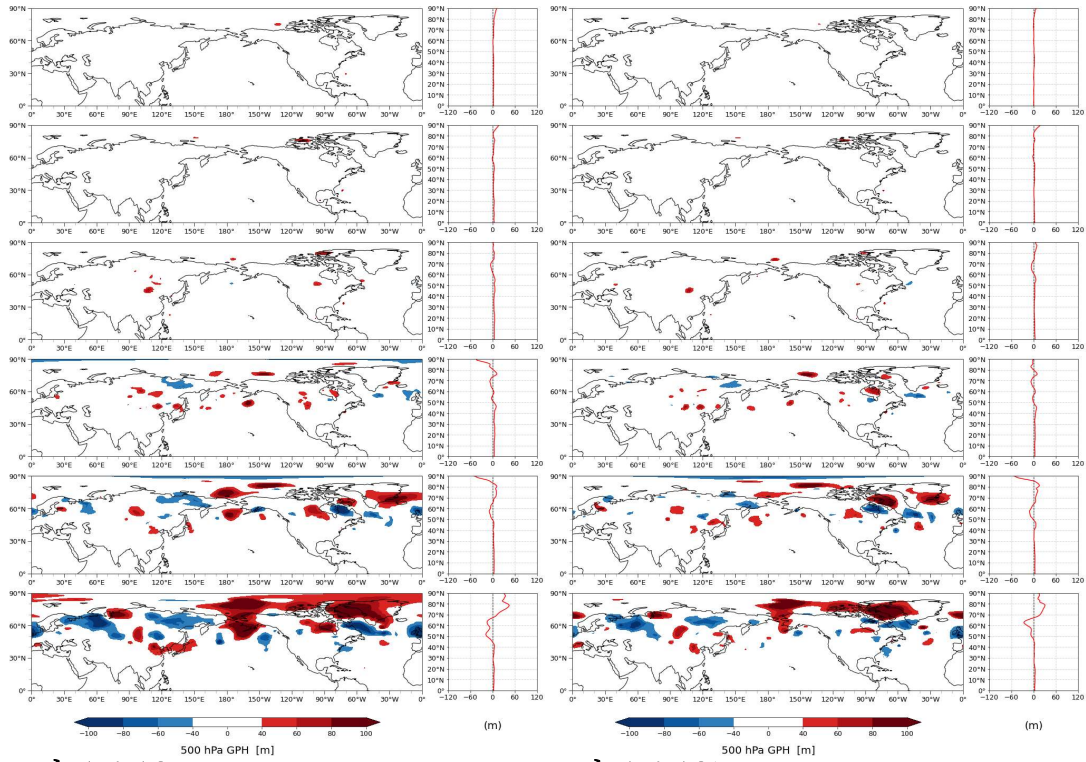


그림 1.4.13a.

그림 1.4.13b.

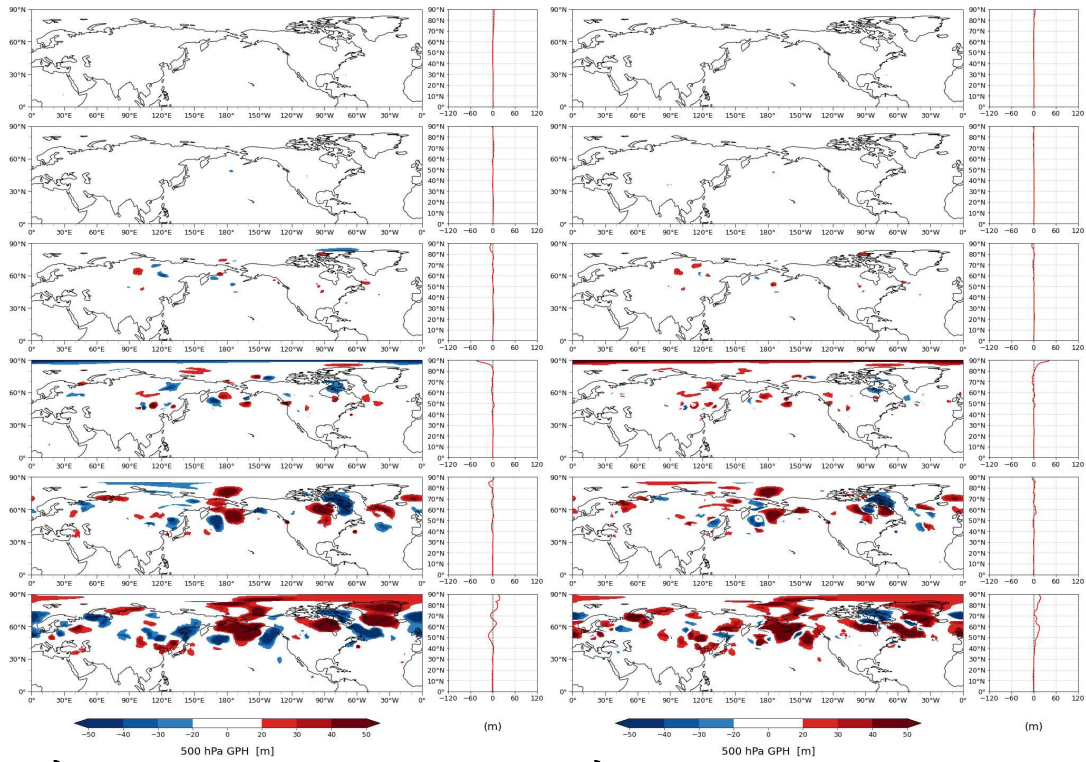


그림 1.4.13c.

그림 1.4.13d.

그림 1.4.10a. 북반구 20210719, 00UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 IFS 대비 KIM3.6a의 모의 정도 분석

그림 1.4.10b. 북반구 20210719, 00UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 IFS 대비 KIM3.7의 모의 정도 분석

그림 1.4.10c. 북반구 20210719, 00UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 KIM3.7 대비 KIM3.6a의 모의 정도 분석

그림 1.4.10d. 북반구 20210719, 00UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 IFS 대비 KIM 모델의 예보 오차 개선 및 저하 사례 분석

그림 1.4.11a. 북반구 20210723, 00UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 IFS 대비 KIM3.6a의 모의 정도 분석

그림 1.4.11b. 북반구 20210723, 00UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 IFS 대비 KIM3.7의 모의 정도 분석

그림 1.4.11c. 북반구 20210723, 00UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 KIM3.7 대비 KIM3.6a의 모의 정도 분석

그림 1.4.11d. 북반구 20210723, 00UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 IFS 대비 KIM 모델의 예보 오차 개선 및 저하 사례 분석

그림 1.4.12a. 북반구 20210804, 00UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 IFS 대비 KIM3.6a의 모의 정도 분석

그림 1.4.12b. 북반구 20210804, 00UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 IFS 대비 KIM3.7의 모의 정도 분석

그림 1.4.12c. 북반구 20210804, 00UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 KIM3.7 대비 KIM3.6a의 모의 정도 분석

그림 1.4.12d. 북반구 20210804, 00UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 IFS 대비 KIM 모델의 예보 오차 개선 및 저하 사례 분석

그림 1.4.13a. 북반구 20210819, 12UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 IFS 대비 KIM3.6a의 모의 정도 분석

그림 1.4.13b. 북반구 20210819, 12UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 IFS 대비 KIM3.7의 모의 정도 분석

그림 1.4.13c. 북반구 20210819, 12UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 KIM3.7 대비 KIM3.6a의 모의 정도 분석

그림 1.4.13d. 북반구 20210819, 12UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 IFS 대비 KIM 모델의 예보 오차 개선 및 저하 사례 분석

그림 1.4.10은 사례로 선정된 기간 중 2021년 7월 19일 00UTC에 대하여 각

각 북반구 분석검증으로, 그림 1.4.10a, 그림 1.4.10b는 IFS 분석장 대비 KIM3.6a와 KIM3.7이 500 hPa 지위고도를 과대 혹은 과소 모의하는 지를 나타내며, 그림 1.4.10c는 KIM3.6a 분석장 대비 KIM3.7에서 500 hPa 지위고도를 과대 혹은 과소 모의하는 것에 대한 성능을 나타내고, 그림 1.4.10d는 IFS 대비 KIM 모델의 예보 오차 개선 및 저하 사례를 나타내는 그림으로, KIM3.6a에서 KIM3.7로 버전이 업데이트 됨에 따라 어느 지역에서 예보 오차가 개선이 되었는지를 알 수 있으며 빨간색은 개선, 파란색은 저하를 나타낸다. 해당 위도에서의 값들을 평균(Zonal mean)하였을 때의 그래프는 각각의 지도 오른쪽에 있는 그래프와 같다. 그림 1.4.10, 그림 1.4.11, 그림 1.4.12, 그림 1.4.13은 IFS 혹은 KIM3.7 분석장 대비에 대한 결과로서 예보시각을 상단에서 하단까지 순서대로 00시, 24시, 48시, 72시, 96시, 120시로 나타내었고, 각각의 그림들에 대해 a, b, c, d를 계산하기 위한 식은 다음 아래와 같다.

그림 1.4.10a. $KIM3.6a - IFS$

그림 1.4.10b. $KIM3.7 - IFS$

그림 1.4.10c. $KIM3.6a - KIM3.7$

그림 1.4.10d. $|KIM3.6a - IFS| - |KIM3.7 - IFS|$

그림 1.4.10d를 통해 4일 예보장에서부터 대략 위도 80° N 이상, 경도 180~210° E에서 예보 오차가 발생 및 커지는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 방법으로 그림 1.4.11, 그림 1.4.12, 그림 1.4.13은 각각 사례로 선정된 2021년 7월 23일 00UTC, 2021년 8월 4일 00UTC, 2021년 8월 19일 12UTC에 대한 500 hPa 지위고도의 예보 오차 분포를 분석한 결과이다. 그림 1.4.10d, 그림 1.4.11d, 그림 1.4.12d, 그림 1.4.13d 모두 극지역 쪽에서 예보 오차가 발생 혹은 증가하는 것을 볼 수 있으며, 특히 그림 1.4.12d(2021년 8월 4일 00UTC)에서는 4일 예보장에서 5일 예보장으로 넘어가면서 갑자기 극지역에서의 예보 오차 개선도가 바뀌는 것을 확인할 수 있다. 이는 지도 오른쪽의 그래프를 통해서도 확인할 수 있다.

종합적으로 살펴보면, KIM의 예보오차는 대부분 극지역에서 유발됨을 확인할 수 있었다. 따라서, 극 지역의 물리과정 혹은 자료동화과정을 중점적으로 개선해 나가는 것이 KIM의 예보오차를 종합적으로 줄이는 방법이라고 결론을 내릴 수 있다.

1.4.5. 파워 스펙트럼 분석을 통한 예보 오차의 주기성 파악 및 분석

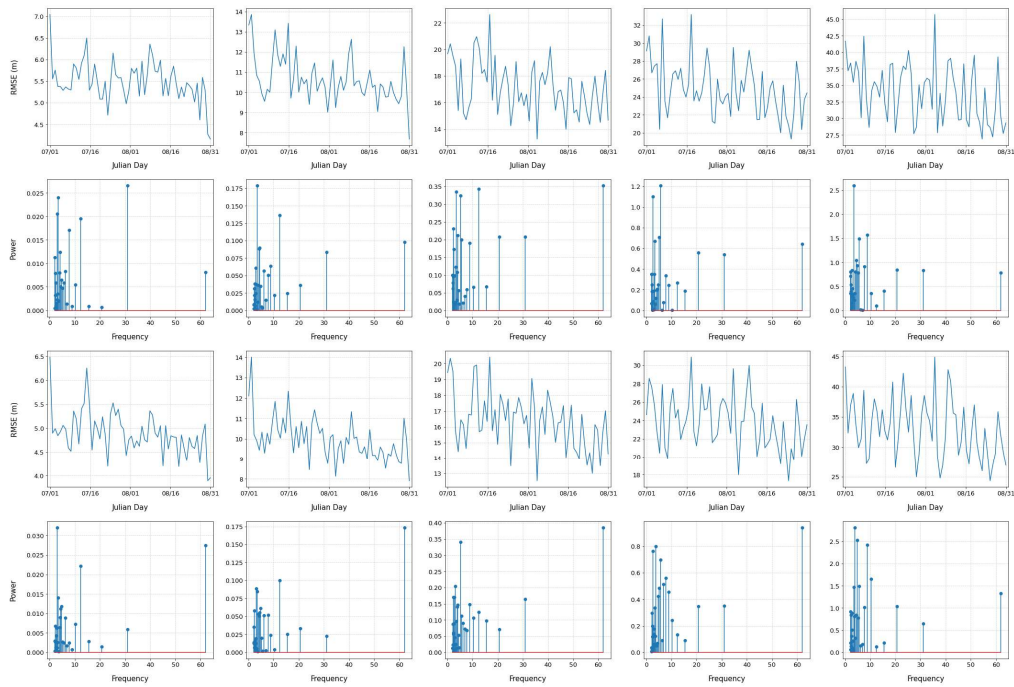


그림 1.4.14a. 북반구, 분석검증, 00UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 KIM3.6a, KIM3.7에 대한 파워 스펙트럼 분석

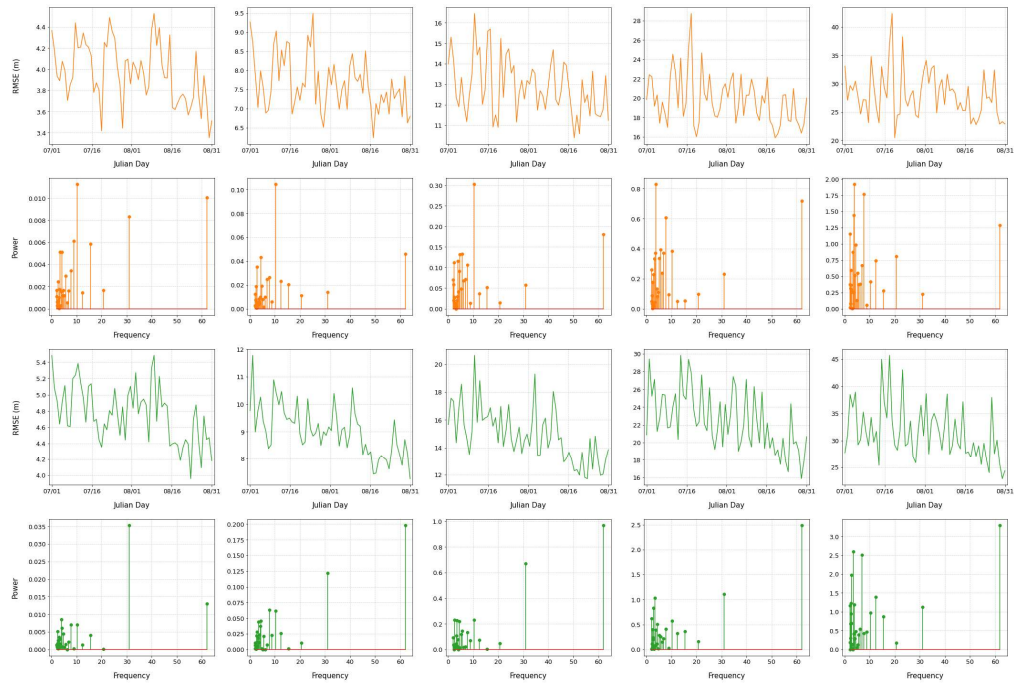


그림 1.4.14b. 북반구, 분석검증, 00UTC에서의 500 hPa 지위고도에 대해 ECMWF, UM에 대한 파워 스펙트럼 분석

그림 1.4.14는 KIM3.6a, KIM3.7, IFS, UM 모델들의 푸리에 변환을 통한 파워 스펙트럼 분석을 수행한 그래프이다. 전반적으로 RMSE의 변동성의 주기가 2~3일인 것으로 볼 때 중관 기상 관점에서 대기의 운동 주기와 비슷한 것을 볼 수 있고, 이를 통해 예보 오차가 대기의 운동에 영향을 받고 있는 것을 직접적으로 알 수 있다. 따라서, 오차의 Local Minimum과 Local Maximum을 찾아내어 오차의 이동을 추적한다면 오차가 진행되는 방향과 오차가 커지는 속도 등을 간접적으로 계산할 수 있을 것이다.

1.4.6. IFS 분석장 대비 KIM 분석장과 예보장간의 영역별 시간 변동성의 상관성 분석

1.4.3절에서 수행하였던 분석은 KIM 자체분석장 대비 상관성을 분석한 결과이다. 이 절에서는 IFS 분석장 대비 KIM 분석장과 예보장간의 영역별 상관성 분석을 수행하였으며, KIM 자체분석장 대비 영역별 예보 오차의 시간 변동성의 상관성 분석 결과와 이를 정성적으로 비교·분석하고자 한다.

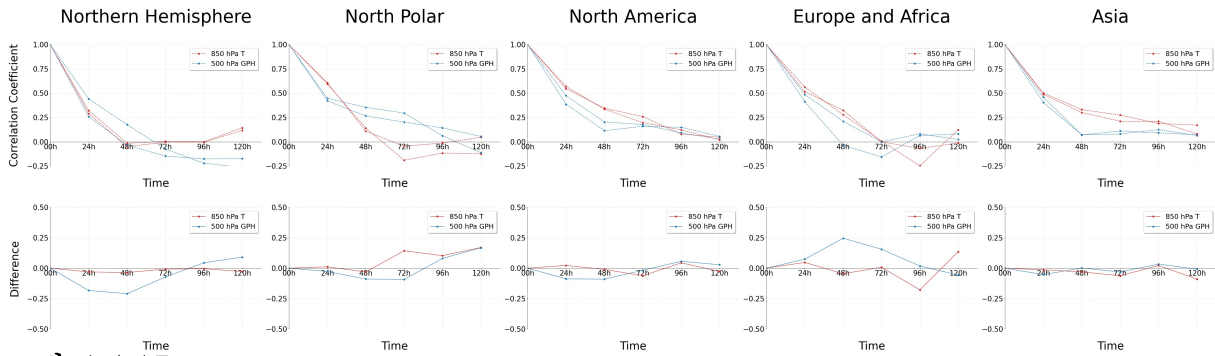


그림 1.4.15a.

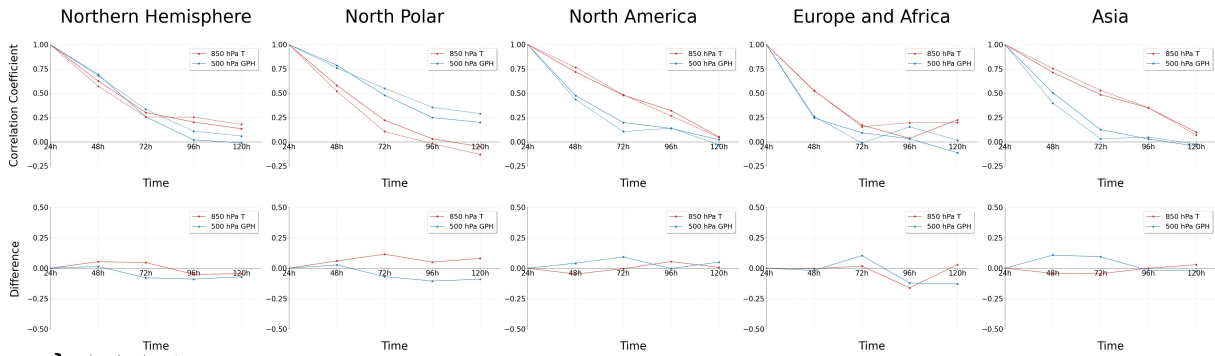


그림 1.4.15b.

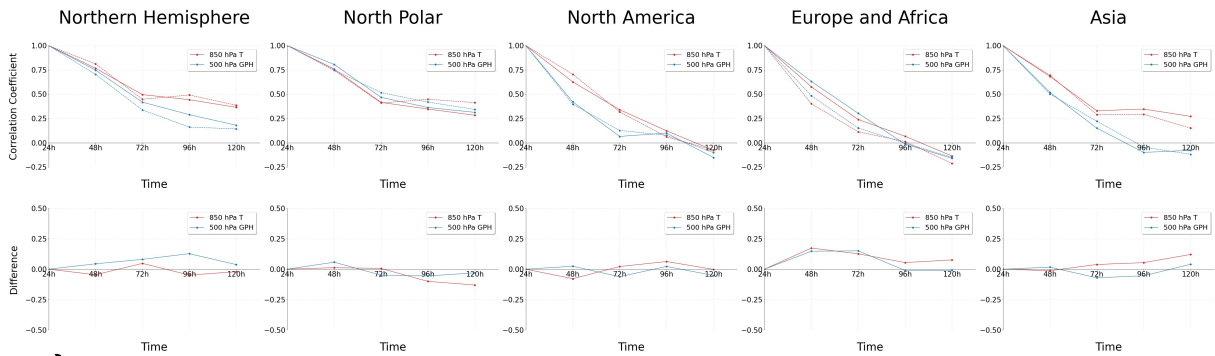


그림 1.4.15c.

그림 1.4.15a. 00UTC에서의 IFS 분석장 대비 KIM 분석장과 예보장(24h, 48h, 72h, 96h, 120h)간의 영역별 상관성 분석

그림 1.4.15b. 00UTC에서의 IFS 분석장 대비 KIM 예보장(24h, 48h, 72h, 96h, 120h)간의 영역별 상관성 분석

그림 1.4.15c. 00UTC에서의 KIM 자체분석장 대비 KIM 예보장(24h, 48h, 72h, 96h, 120h)간의 영역별 상관성 분석

그림 1.4.15a는 00UTC에서의 IFS 분석장 대비 KIM 분석장과 예보장(24시, 48시, 72시, 96시, 120시)간의 영역별 상관성을 분석한 그림이다. 여기서 영역은 북반구, 북극, 북미, 유럽/아프리카, 아시아 지역으로 나누었으며, 분석 변수로는 850 hPa 온도와 500 hPa 지위고도로, 점선은 KIM3.6a, 실선은 KIM3.7을

나타내고, 두 번째 줄에서는 KIM3.7과 KIM3.6a와의 상관성 차이를 나타내고 있다. 그림 1.4.15b는 그림 1.4.15a와 같은 방법으로 00UTC에서의 IFS 분석장 대비 KIM 예보장(24시, 48시, 72시, 96시, 120시)간에 대해서, 그림 1.4.15c는 00UTC에서의 KIM 자체분석장 대비 KIM 예보장(24시, 48시, 72시, 96시, 120시)간에 대한 영역별 상관성을 분석한 그림이다. 그림 1.4.15a를 통해 알 수 있는 것은 북극 지역에서의 두 버전의 KIM 모델의 500 hPa 지위고도의 상관관계가 다른 지역들에서보다 높은 모습을 보이거나, 850 hPa 온도에서는 반대의 모습을 보이고 있다. 특히 아시아에서 4일 예보장까지는 가장 높은 상관관계를 보이고 있지만, 5일 예보장에서는 다른 지역들과 비슷한 상관관계를 보이고 있다.

그림 1.4.15a, 그림 1.4.15b, 그림 1.4.15c에 대한 상관계수와 유의한 값은 각각 표 1.4.3, 표 1.4.4, 표 1.4.5와 같다.

표 1.4.3. 00UTC에서의 IFS 분석장 대비 KIM 분석장과 예보장(24시, 48시, 72시, 96시, 120시)간의 예보 오차의 시간 변동성의 영역별 상관성 분석 및 유의성 검증 (파란색 볼드체는 유의함을 의미)

Models	Variables	Regions	Correlation Coefficient	00h	+24h	+48h	+72h	+96h	+120h
KIM3.6a	850 hPa T [°C]	Northern Hemisphere	00h	1.0	0.32	-0.02	0.004	-0.0003	0.14
		North Polar	00h	1.0	0.60	0.14	-0.19	-0.12	-0.12
		North America	00h	1.0	0.55	0.35	0.26	0.08	0.05
		Europe and Africa	00h	1.0	0.52	0.32	0.0003	-0.07	-0.01
		Asia	00h	1.0	0.50	0.33	0.27	0.19	0.17
	500 hPa GPH [m]	Northern Hemisphere	00h	1.0	0.44	0.18	-0.08	-0.22	-0.26
		North Polar	00h	1.0	0.45	0.35	0.29	0.06	-0.11
		North America	00h	1.0	0.47	0.20	0.18	0.09	0.03
		Europe and Africa	00h	1.0	0.41	-0.04	-0.16	0.06	0.08
		Asia	00h	1.0	0.46	0.07	0.11	0.09	0.07
KIM3.7	850 hPa T [°C]	Northern Hemisphere	00h	1.0	0.29	-0.05	-0.003	-0.005	0.12
		North Polar	00h	1.0	0.61	0.11	-0.05	-0.01	0.05
		North America	00h	1.0	0.57	0.33	0.20	0.12	0.02
		Europe and Africa	00h	1.0	0.56	0.28	0.01	-0.25	0.12
		Asia	00h	1.0	0.49	0.30	0.21	0.21	0.08
	500 hPa GPH [m]	Northern Hemisphere	00h	1.0	0.26	-0.03	-0.15	-0.18	-0.17
		North Polar	00h	1.0	0.42	0.27	0.20	0.14	0.06

		North America	00h	1.0	0.39	0.11	0.16	0.15	0.05
		Europe and Africa	00h	1.0	0.49	0.21	-0.001	0.08	0.02
		Asia	00h	1.0	0.40	0.07	0.08	0.12	0.06

표 1.4.4. 00UTC에서의 IFS 분석장 대비 KIM 예보장(24시, 48시, 72시, 96시, 120시)간의 영역별 예보 오차의 시간 변동성의 상관성 분석 및 유의성 검증 (파란색 볼드체는 유의함을 의미)

Models	Variables	Regions	Correlation Coefficient	+24h	+48h	+72h	+96h	+120h
KIM3.6a	850 hPa T [° C]	Northern Hemisphere	+24h	1.0	0.57	0.25	0.25	0.18
		North Polar	+24h	1.0	0.52	0.11	-0.02	-0.13
		North America	+24h	1.0	0.77	0.48	0.27	0.04
		Europe and Africa	+24h	1.0	0.53	0.15	0.20	0.20
		Asia	+24h	1.0	0.76	0.53	0.35	0.07
	500 hPa GPH [m]	Northern Hemisphere	+24h	1.0	0.68	0.33	0.11	0.06
		North Polar	+24h	1.0	0.76	0.55	0.35	0.29
		North America	+24h	1.0	0.44	0.11	0.14	-0.03
		Europe and Africa	+24h	1.0	0.26	-0.01	0.15	0.02
		Asia	+24h	1.0	0.40	0.03	0.05	-0.02
KIM3.7	850 hPa T [° C]	Northern Hemisphere	+24h	1.0	0.63	0.30	0.20	0.13
		North Polar	+24h	1.0	0.58	0.22	0.03	-0.05
		North America	+24h	1.0	0.72	0.48	0.32	0.05
		Europe and Africa	+24h	1.0	0.52	0.17	0.03	0.23
		Asia	+24h	1.0	0.71	0.48	0.35	0.10
	500 hPa GPH [m]	Northern Hemisphere	+24h	1.0	0.69	0.26	0.02	-0.01
		North Polar	+24h	1.0	0.79	0.48	0.25	0.20
		North America	+24h	1.0	0.48	0.20	0.14	0.02
		Europe and Africa	+24h	1.0	0.24	0.09	0.03	-0.11
		Asia	+24h	1.0	0.50	0.13	0.03	-0.04

표 1.4.5. 00UTC에서의 KIM 자체분석장 대비 KIM 예보장(24시, 48시, 72시, 96시, 120시)간의 영역별 예보 오차의 시간 변동성의 상관성 분석 및 유의성 검증 (파란색 볼드체는 유의함을 의미)

Models	Variables	Regions	Correlation Coefficient	+24h	+48h	+72h	+96h	+120h
KIM3.6a	850 hPa T [° C]	Northern Hemisphere	+24h	1.0	0.81	0.45	0.49	0.39
		North Polar	+24h	1.0	0.75	0.41	0.45	0.41
		North America	+24h	1.0	0.70	0.32	0.06	-0.08
		Europe and Africa	+24h	1.0	0.40	0.11	0.01	-0.21
		Asia	+24h	1.0	0.69	0.29	0.29	0.15
	500 hPa GPH [m]	Northern Hemisphere	+24h	1.0	0.70	0.34	0.16	0.14
		North Polar	+24h	1.0	0.75	0.52	0.42	0.34
		North America	+24h	1.0	0.40	0.13	0.08	-0.10
		Europe and Africa	+24h	1.0	0.48	0.15	-0.004	-0.15
		Asia	+24h	1.0	0.50	0.22	-0.04	-0.12
KIM3.7	850 hPa T [° C]	Northern Hemisphere	+24h	1.0	0.77	0.50	0.44	0.36
		North Polar	+24h	1.0	0.76	0.42	0.35	0.28
		North America	+24h	1.0	0.63	0.34	0.12	-0.08
		Europe and Africa	+24h	1.0	0.58	0.24	0.07	-0.14
		Asia	+24h	1.0	0.68	0.33	0.35	0.27
	500 hPa GPH [m]	Northern Hemisphere	+24h	1.0	0.75	0.42	0.29	0.18
		North Polar	+24h	1.0	0.81	0.47	0.36	0.31
		North America	+24h	1.0	0.42	0.07	0.10	-0.15
		Europe and Africa	+24h	1.0	0.63	0.30	-0.01	-0.16
		Asia	+24h	1.0	0.52	0.15	-0.10	-0.08

1.4.7. IFS 분석장 대비 KIM 분석장과 예보장간의 영역별 예보 오차의 시간 변동성의 상관성 분석

영역별 예보 오차의 시간 변동성의 상관성 분석이란, 일별 RMSE 값을 통해 원하는 영역별로 나누어 분석을 한 것을 의미한다. 분석을 위해 영역에 대해 각각 위도 60° ~90° N, 위도 80° ~90° N에 대해 경도를 30° 간격으로 나누어 850 hPa 온도, 500 hPa 지위고도 변수에 대한 IFS 분석장 대비 KIM 분석장과 예보장(24시, 48시, 72시, 96시, 120시)간의 상관성을 분석하였다. 이는 다음의 그림 1.4.16a, 그림 1.4.16b와 같으며, 왼쪽의 두 버전의 KIM 모델의 그래프들은 850 hPa 온도를, 오른쪽의 두 버전의 KIM 모델의 그래프들은 500 hPa 지위고도를 의미하고, 경도 0° ~30° E부터 330° ~360° E까지는 순서대로 lon0부터 lon330까지를 의미한다.

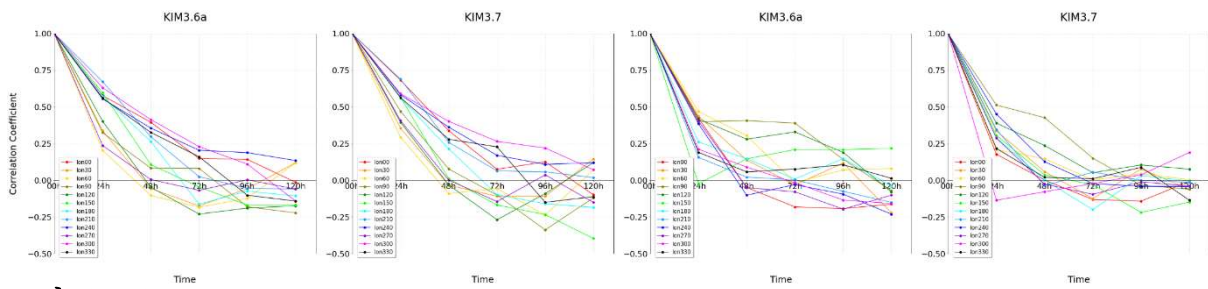


그림 1.4.16a.

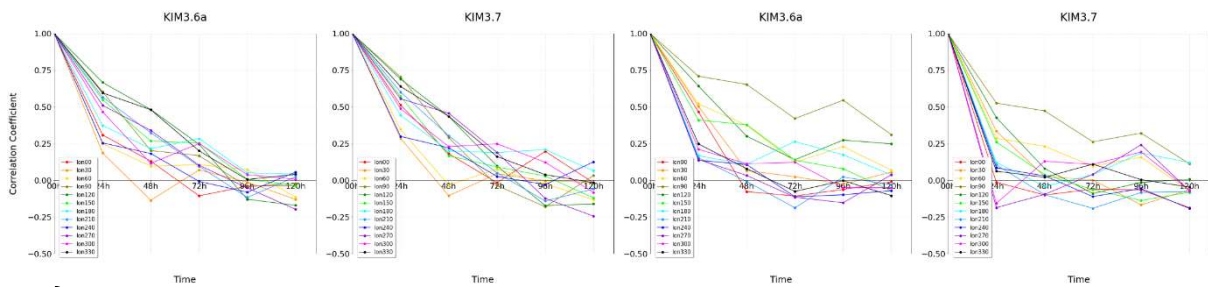


그림 1.4.16b.

그림 1.4.16a. 00UTC에서의 위도 60° ~90° N, 경도 30° 간격으로 나눈 영역에 대해 850 hPa 온도, 500 hPa 지위고도 변수에 대한 IFS 분석장 대비 KIM 예보장(24시, 48시, 72시, 96시, 120시) 간의 예보 오차의 시간 변동성의 상관성 분석

그림 1.4.16b. 00UTC에서의 위도 80° ~90° N, 경도 30° 간격으로 나눈 영역에 대해 850 hPa 온도, 500 hPa 지위고도 변수에 대한 IFS 분석장 대비 KIM 예보장(24시, 48시, 72시, 96시, 120시) 간의 예보 오차의 시간 변동성의 상관성 분석

그림 1.4.16a에서 왼쪽의 두 버전의 KIM 모델 중 KIM3.6a의 850 hPa 온도

그래프를 통해 알 수 있는 것은 위도 $20^{\circ} \sim 90^{\circ} \text{ N}$, 경도 $240^{\circ} \sim 270^{\circ} \text{ E}$ 에서가 양의 상관관계가 가장 높고, 위도 $20^{\circ} \sim 90^{\circ} \text{ N}$, 경도 $90^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{ E}$ 에서가 음의 상관관계가 가장 높은 것을 알 수 있다. 또한 KIM3.7의 850 hPa 온도 그래프를 통해 알 수 있는 것은 위도 $20^{\circ} \sim 90^{\circ} \text{ N}$, 경도 $30^{\circ} \sim 150^{\circ} \text{ E}$ 에서가 양의 상관관계가 가장 높고, 위도 $20^{\circ} \sim 90^{\circ} \text{ N}$, 경도 $150^{\circ} \sim 180^{\circ} \text{ E}$ 에서가 음의 상관관계가 가장 높은 것을 알 수 있다.

그러나 KIM3.6a, KIM3.7를 포함한 모든 지역에서 상관관계가 0.5 미만인 것을 볼 때 상관성이 낮음을 알 수 있다. 마찬가지로 그림 1.4.16a에서 오른쪽의 500 hPa 지위고도에 대한 영역별 상관관계를 통해 상관성이 낮음을 알 수 있다.

그림 1.4.16b에서 왼쪽의 두 버전의 KIM 모델의 850 hPa 온도에 대한 그래프를 통해서도 그림 1.4.16a와 마찬가지로 낮은 상관성을 볼 수 있으나, 오른쪽의 500 hPa 지위고도에 대한 그래프를 통해 알 수 있는 것은, KIM3.6a, KIM3.7 모두 위도 $60^{\circ} \sim 90^{\circ} \text{ N}$, 경도 $90^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{ E}$ 에서 4일 예보장까지 높은 상관성을 보이며, KIM3.6a에서는 5일 예보장에서도 가장 높은 상관성을 보이고 KIM3.7에서는 가장 높지는 않으나 두 번째로 높은 상관성을 보이고 있다.

1.4.8. IFS 분석장 대비 KIM 분석장과 예보장간의 영역별 예보 오차의 공간 변동성의 상관성 분석

1.4.7절에서 수행했던 분석은 62일 동안의 일별 RMSE 값을 분석한 예보 오차의 시간 변동성의 상관성 분석이다. 이 절에서는 일별 RMSE 값이 아닌, 공간별 RMSE에 대한 공간 변동성의 상관성 분석 결과와 이를 정성적으로 비교·분석하고자 한다. 영역별로는 위도 $20^{\circ} \sim 90^{\circ} \text{ N}$, 위도 $60^{\circ} \sim 90^{\circ} \text{ N}$, 위도 $80^{\circ} \sim 90^{\circ} \text{ N}$ 에 대해 경도를 30° 간격으로 나누었으며, 각각 850 hPa 온도, 500 hPa 지위고도 변수에 대하여 IFS 분석장 대비 KIM 분석장과 예보장(24시, 48시, 72시, 96시, 120시)간의 상관성을 분석하였다. 이는 다음 아래의 그림 1.4.17a, 그림 1.4.17b, 그림 1.4.17c와 같으며, 점선은 KIM3.6a, 실선은 KIM3.7를 나타내고, 빨간색은 850 hPa 온도, 파란색은 500 hPa 지위고도를 의미한다.

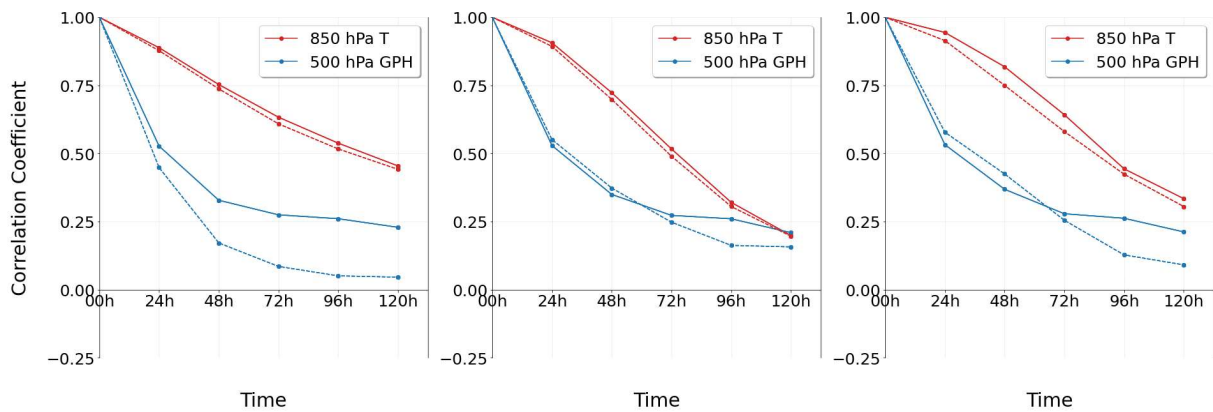


그림 1.4.17a.

그림 1.4.17b.

그림 1.4.17c.

그림 1.4.17a. 00UTC에서의 위도 20° ~90° N, 경도 30° 간격으로 나눈 영역에 대해 850 hPa 온도, 500 hPa 지위고도 변수에 대한 IFS 분석장 대비 KIM 분석장과 예보장(24시, 48시, 72시, 96시, 120시)간의 예보 오차의 공간 변동성의 상관성 분석

그림 1.4.17b. 00UTC에서의 위도 60° ~90° N, 경도 30° 간격으로 나눈 영역에 대해 850 hPa 온도, 500 hPa 지위고도 변수에 대한 IFS 분석장 대비 KIM 분석장과 예보장(24시, 48시, 72시, 96시, 120시)간의 예보 오차의 공간 변동성의 상관성 분석

그림 1.4.17c. 00UTC에서의 위도 80° ~90° N, 경도 30° 간격으로 나눈 영역에 대해 850 hPa 온도, 500 hPa 지위고도 변수에 대한 IFS 분석장 대비 KIM 분석장과 예보장(24시, 48시, 72시, 96시, 120시)간의 예보 오차의 공간 변동성의 상관성 분석

그림 1.4.17을 통해 알 수 있는 것은 세 영역 모두 850 hPa 온도의 상관성이 500 hPa 지위고도의 상관성보다 높다는 것이다. 이는 850 hPa 온도의 초기장의 개선이 4~5일 예보장까지 정확도에 긍정적인 영향을 준다고 할 수 있다. 또한 500 hPa 지위고도에 대해서도 세 영역에서 모두 상관성이 증가한 것을 볼 때 마찬가지로 초기장 개선에 따른 예보장의 정확도에 긍정적인 영향을 준다고 할 수 있다.

각각의 상관계수들과 그에 따른 95% 유의성 검증은 표 1.4.6과 같다.

표 1.4.6. 00UTC에서 각각 위도 20° ~90° N, 위도 60° ~90° N, 위도 80° ~90° N에 대하여 경도 30° 간격으로 나눈 영역에 대해 850 hPa 온도, 500 hPa 지위고도에 대한 IFS 분석장 대비 KIM 분석장과 예보장(24시, 48시, 72시, 96시, 120시)간의 예보 오차의 공간 변동성의 상관성 분석 및 유의성 검증 (파란색 볼드체는 유의함을 의미)

Domains	Models	Variables	Correlation Coefficient	00h	+24h	+48h	+72h	+96h	+120h
Latitude 20° ~90° N	KIM3.6a	850 hPa T [° C]	00h	1.0	0.88	0.74	0.61	0.52	0.44
		500 hPa GPH [m]	00h	1.0	0.45	0.17	0.09	0.05	0.05
	KIM3.7	850 hPa T [° C]	00h	1.0	0.89	0.75	0.63	0.54	0.45
		500 hPa GPH [m]	00h	1.0	0.53	0.33	0.27	0.26	0.23
Latitude 60° ~90° N	KIM3.6a	850 hPa T [° C]	00h	1.0	0.89	0.70	0.49	0.31	0.20
		500 hPa GPH [m]	00h	1.0	0.55	0.37	0.25	0.16	0.16
	KIM3.7	850 hPa T [° C]	00h	1.0	0.91	0.72	0.52	0.32	0.20
		500 hPa GPH [m]	00h	1.0	0.53	0.35	0.27	0.26	0.21
Latitude 80° ~90° N	KIM3.6a	850 hPa T [° C]	00h	1.0	0.91	0.75	0.58	0.42	0.31
		500 hPa GPH [m]	00h	1.0	0.58	0.42	0.25	0.13	0.09
	KIM3.7	850 hPa T [° C]	00h	1.0	0.94	0.82	0.64	0.44	0.33
		500 hPa GPH [m]	00h	1.0	0.53	0.37	0.28	0.26	0.21

1.5. 산출물내역

구 분	산출물 내역
제안사 : 명지대학교	<ul style="list-style-type: none"> ○ 위성 관측자료 활용 개선을 위한 한국형모델의 자료동화체계 개선 <ul style="list-style-type: none"> ● 개선된 한국형 모델 초기장 산출 알고리즘 ● 안정화된 앙상블 기반 관측자료 민감도 도구 코드
공동수급사 : 서울대학교	<ul style="list-style-type: none"> ○ 위성자료동화용 해수면 온도 산출 <ul style="list-style-type: none"> ● 물리 모형기반의 해수면 산출 모델(OBM) 개발. ● 개발된 OBM의 소스 코드 제공. ○ 관측 및 자료동화 개선에 따른 분석, 예측 오차 진단 및 상관성 분석 <ul style="list-style-type: none"> ● 한국형수치예보모델의 자료동화 개선에 따른 분석장의 개선여부 분석 ● 분석장의 개선에 따른 예보장의 개선 여부 및 오차 진단 ● 기상 예측 성능 진단을 위한 관측자료 활용 선행 기술현황 조사 및 한국형수치예보모델 적용의 적정성 평가 판단.
공동수급사 : 이화여자대학교	<ul style="list-style-type: none"> ○ 경사거리 고려한 관측연산자의 정지궤도 위성 활용 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> ● 정지궤도 위성자료에 적용할 경사거리 고려한 관측연산자 (공통 모듈로 개발) ● 경사거리 고려하지 않은 관측연산자 대비 복사량 비교 결과
공통	<ul style="list-style-type: none"> ○ 소스코드 <ul style="list-style-type: none"> ● 소스코드 및 코드 리스트 ○ 보고서 및 매뉴얼 <ul style="list-style-type: none"> ● 사업수행 계획서 ● 최종 보고서 ● 사용자 매뉴얼 <ul style="list-style-type: none"> - 산출물 관련 상세 설명 및 방법론

2. 시스템 시연 및 기대효과

2.1. 물리 모형을 이용한 위성자료동화용 해수면 온도산출 (서울대학교)

○ 연구개발결과

- 물리 모형기반의 Ocean Boundary Model(OBM)을 구현.
- 2001년부터 2020년까지 적도 태평양의 54개 부이 관측치와 비교 평가 수행. 부이 관측 대비 $r=0.99$, $Bias=-0.05$ K과 $RMSE=0.22$ K의 성능을 가짐.
- 모의 결과는 ERA5와 전반적인 패턴과 크기가 유사함. 하지만, KIM과는 모델 간의 개념설계 및 최적화 과정이 달라 차이가 있음.

○ 연구개발결과의 활용방안

- 본 연구에서 구현된 OBM을 KIM에 적용하여 장기간 수치실험을 통한 예보성능 평가는 충분한 과학적 가치가 있음.
- 대기-해수면 경계층 모수화 개선 및 개발을 위한 기초연구로 활용 가능.
- 지구 온난화에 대한 기후 변동 감시, 강수량과 태풍 세기 등에 대한 해수면 온도와 관련된 메커니즘 분석의 기초연구로 활용 가능.
- 기후 시스템의 이해에 있어 해양 열 수지의 이해 증진. 특히, 해양의 열 함량 변화는 체적 변화, 평균 수온의 변화, 염분의 변화(질량의 변화), 해양순환의 변화와 밀접한 관련이 있음.

○ 기대효과

(1) 기술적 측면

- 지면에 민감한 대류권 하층 채널들의 자료동화 내 적극적 활용 및 개선이 기대됨.
- 대기-해양 에너지 순환 개선이 가능. 특히, 지면 온도는 대기 하층 경계의 열 에너지 수송을 결정하는 중요한 인자로 하층운 생성과도 밀접한 관련이 있음.

(2) 경제적/산업적 측면

- 기상기술은 공공재 성격이 강하여 국외 위탁이 불가. 따라서, 전 주기적 관점에서 운용 능력 향상.
- 국외기술 의존성 해소.

2.2. 경사거리 고려한 관측연산자의 정지궤도 위성 활용 기술 개발 (이화여자대학교)

○ 연구개발결과

- 3개 정지궤도 위성 CSR 자료에 대한 KPOP 수행 단계에서, 각 관측지점별 경사방향 최대변위를 구하고, 방위각면에 위치하는 10km 등간격 지점들의 위치를 계산하는 부분을 공통모듈로 개발.
- 2021년 7월 한달 해양 자료를 이용한 경사효과 분석 시 (O-B STD 개선률), GK2A와 Himawari-8의 3개 수증기 채널의 경우 고위도에서 이전 대비 최대 1%의 STD 개선률을 보임 (GK2A Level 1B 자료를 이용한 분석에서는 육지/해양 모두 개선정도가 뚜렷하고, 고위도에서 최대 3% 개선율을 보임).
- MSG 위성은 궤도경사각 이슈로 인해 정확한 효과 분석이 힘든 상황으로, 방위각 계산 정확도 확보가 우선임.

○ 연구개발결과의 활용방안

- 경사거리를 고려한 정지궤도 위성자료에 대한 모의를 통해 정확한 위성신호를 복원함으로써 정지기상 위성자료의 동화 활용률 증대
- 개선된 관측연산자를 이용해 모의된 모델자료를 전처리 과정에 활용함으로써 관측자료에 대한 품질 검사 정확도 향상
- 공통모듈로 개발된 경사 관측연산자를 향후 추가되는 정지궤도 위성에 활용 가능

○ 기대성과

- 정지궤도 위성자료 모의 시 경사거리를 고려한 관측연산자를 적용함으로써 상대적으로 모의 불확실성이 큰 지역(위성천정각이 큰 지역)에 대한 모의 정확도 개선

2.3. 위성 관측자료 활용 개선을 위한 한국형모델의 자료동화체계 개선 (명지대학교)

○ 연구개발결과의 활용방안

- 한국형수치예보모델의 초기화 방안 분석 및 이해
- 자료동화시스템의 초기화방안 분석으로 인해 안정된 예보 초기 성능 도출
- EFSO의 실제적 활용이 가능하도록 체계 구축 및 결과 도출
- 한국형수치예보모델의 분석장에 따른 예보장의 정확도 진단을 통한 수치예보 모델의 불확실성 파악

○ 기대성과

(1) 기술적 측면

- 초기 예보과정에서 발생할 수 있는 강수량 오차 감소
- 앙상블 자료동화시스템에 들어가는 관측들의 효과의 정량적 진단
- 기상 예측 성능 진단을 위한 관측자료 활용 선행 기술의 수리물리적 근거 확보

(2) 경제적/산업적 측면

- 다양한 위성자료를 활용한 자료동화를 통해 전지구예보모델의 예보 수준을 높여 양질의 예보 제공함으로써 우리나라 국민의 삶의 질 향상에 기여
- 단기 예보 혹은 nowcasting을 활용하는 시민들과 기업들의 만족도 고양
- 관측 효과의 정밀 분석을 통한 예보 성능의 가성비 고양

2.4. 자료동화 품질에 따른 예측 성능 진단을 위한 기술과 활용 사례 조사 및 도입 가능 기술 발굴 (서울대학교)

○ 연구결과

- 수치예보모델을 평가하는 척도인 RMSE, ACC를 통해 KIM 모델 및 다른 모델들간의 성능 비교 및 사례 선정
- 단기(1~3일) 및 중기(4~5일) 예보장의 개선 혹은 저하 사례를 정량적 분석
- 선정된 사례를 통하여 예보 오차의 이동 및 분포를 파악
- 원하는 영역별로 상관성 분석을 하여 KIM 모델의 버전간 어느 영역에서의 상관성이 높고 낮은지를 파악
- 파워 스펙트럼 분석을 통해 2~3일 주기로 진동하는 결과를 분석하였으며, 이를 통해 예보 오차의 유발이 중관 기상 관점에서 대기의 운동을 잘 모의하지 못하는 것으로 파악

○ 활용방안

- 사례를 선정할 근거 기반을 마련하여 정확한 사례를 선정 가능
- 사례로 선정된 기간을 포함한 총 62일의 기간에 대해 원하는 영역별로 세분화하여 큰 영역보다는 작은 영역들에 대해 예보 오차를 보다 더 민감하게 분석 및 파악 가능

○ 기대효과

(1) 기술적 측면

- 1단계 연차동안 분석을 위해 수행하였던 방법들과 예보 오차의 Local Maximum/Minimum Value를 파악하는 방법을 토대로 KIM3.8, KIM3.9 등의 새로운 버전의 예보 오차를 획기적으로 분석 및 파악 가능
- 파워 스펙트럼 분석 등 주기 분석을 통해 KIM 모델 내의 어느 부분에서 오차를 유발하는지 파악 가능

(2) 경제적/산업적 측면

- 국내 독자적인 기술 활용 가능
- 정확한 예보 오차 파악을 통한 예보 성능 향상으로 인해 기상의 질 향상 기대

III. 향후 발전방향

1. 2단계 연차 연구내용

1.1. 기계학습을 이용한 위성자료동화용 해빙지면온도 및 방출율 산출 (서울대학교)

현재 한국형수치예보모델의 고위도 지역에서는 지면에 영향을 받지 않는 위성 관측자료만을 매우 제한적으로 동화에 사용한다. 그 이유는 지면 경계의 높은 불확실성으로 복사전달계산과정에서 관측자료의 해석이 어렵기 때문이다. 이는 위성 관측자료가 제공하는 대류권 중·하층의 온·습도 정보가 초기장에 반영되지 못함을 의미한다. 위성 관측에 절대적으로 의존하는 고위도에서 이러한 요인은 초기장의 불확실성이 높고 예보성능이 중·저위도 보다 낮은 주요 원인으로 지목된다. 현재 자료동화기술이 가장 선진화된 유럽중장기예보센터에서도 해빙지면 경계치의 불확실성으로 지면에 민감한 대류권 중·하층 채널들을 자료동화에 사용하지 못한다. 그렇다면, 유독 해빙 지역에서 마이크로파 관측이 사용되지 못하는 이유는 마이크로파가 눈과 해빙을 일부 투과(반투명)하는 성질 때문이다. 이를 다르게 해석하면, 마이크로파 관측을 활용하기 위해서는 실제 방출이 일어나는 해빙 내부의 온도(= 방출층 온도)와 방출율이 필요하다. 이를 생산하기 위해서는 고해상도 눈-해빙 예보모델과 눈-해빙 복사전달모델이 요구되지만, 현재로서는 현업 모델 내 이들이 부재하다.

서울대 연구팀은 최근 해빙의 물리 상태를 모의하는 눈-해빙 성장모델과 광학 성질을 진단하는 눈-해빙 방출모델을 결합한 물리 모형을 개발하였다. 그리고 이를 통해 수치예보모델과는 독립적으로 겨울철 북극해 전역에 대한 마이크로파 온도탐측밴드(54~57 GHz)의 해빙 방출층 온도와 방출율, 밝기온도, 해빙표면 온도 등을 성공적으로 생산하였다. 이를 보다 효율적으로 자료동화에 반영하기 위해 범용성을 갖춘 간소화된 모듈로의 대체가 필요하며, 본 연구팀은 물리 모형으로부터 계산된 물리 상태와 광학 성질 간의 관계를 일반화하는 기계학습기법을 제안한다.

1.1.1. 1차연도에 개발한 물리 모형기반의 해수면 온도산출 알고리즘을 KIM 내 적용 및 구동 시현 (1차연도 연구과제의 수치모델링센터 지원 연구)

1차연도 연구 개발에서 물리 모형기반의 알고리즘을 개발하였다. 이를 “**subroutine** sfc_ocean_sst_skin_v2” 로 구성하여 KIM/3.7/src/atmsfc_ocean_slab에 추가하였다(관련 코드는 1차연도 산출물로 제공). 기상청 수치모델링센터의 연구 지원을 위해 개발된 OBM을 KIM에 적용하고, 최적화 과정을 수행하여 구동 시현을 하는 부분을 2차연도에 연구내용에 추가한다.

1.1.2. 기계학습의 훈련자료로 활용할 가상의 모의자료 생산

가. 대상 센서 선정

- 위성 마이크로파 센서 중, AMSU-A와 AMSU-B 센서가 결합한 차세대 마이크로파 온·습도 탐측기인 "ATMS" 센서를 대상으로 지정.
- ATMS 계열 센서는 2039년까지 운용 계획이 수립되어 있음. 따라서, 해당 센서를 대상으로 개발한 알고리즘은 높은 범용성을 가짐.

나. 모의자료 생산

1) 대기복사전달모델

- 유럽기상위성센터에서 제공하는 RTTOV(Radiative Transfer for TOVS) 모델을 사용.

2) 눈-해빙 모델 (물리 모형)

- 물리 모형은 눈과 해빙의 물리 상태를 모의하는 눈-해빙 성장모델과 이로부터 광학 성질을 진단하는 눈-해빙 방출모델로 구성.
- 눈-해빙 성장모델은 눈과 해빙의 상태 변수(온도, 염도, 밀도, 입자크기, 두께 등)를 모의.
- 눈-해빙 방출모델은 상태 변수로부터 1~100 GHz 주파수 범위 내 해빙 방출층 온도, 방출율, 그리고 그에 상응하는 밝기온도를 모의.

3) 생산 기간

- 모의기간: 12월부터 3월까지의 북극해 겨울철
- 모의영역: 북위 70도 이상에서 해빙점유율이 95% 이상인 지역.
- 관측조건: 청천 영역, 입사각 0°~65° 이내
- 모의변수: ATMS 센서의 청천 밝기온도와 그에 상응하는 방출율, 방출층 온도, 표면온도.

1.1.3. 기계학습 방식을 적용한 해빙지면정보 산출 알고리즘 구현

- 비 복원 무작위 추출을 통해 이 중 75%를 훈련자료로, 나머지 25%는 검증자료로 사용.
- 다양한 네트워크를 구성하고 훈련자료를 학습. 여기서, 네트워크는 최소한 사용된 모델들의 수치적 복잡성에 대응하는 수준으로 구성.
- 필요에 따라 지구 물리변수를 추가.

1.1.4. 산출된 해빙지면정보의 정확도 진단 (알고리즘 검증)

- 구현된 알고리즘들을 이용하여 검증 자료(전체 25%)로부터 검증.

1.2. 경사거리 고려한 관측연산자의 극궤도 위성 활용 기술 개발 (이화여자대학교)

극궤도 위성자료에 대한 동화 시 경사거리를 고려한 관측연산자의 현업 적용은 2016년 11월 ECMWF 현업 시스템에서 가장 먼저 시도되었고 이어 캐나다 기상청의 Environment and Climate Change Canada (ECCC) 예보 시스템에도 ATMS와 AMSU-A에 대한 모의 시 경사거리를 고려한 관측연산자가 적용되었다. 그 결과, 특히 고위도 성층권에서 예측 성능이 향상되고, 가중함수 최대고도가 높은 온도 탐측 채널들에서 효과가 크게 나타난 것으로 보고되었다(Bormann, 2017; Shahabadi et al., 2018).

따라서, 본 연구에서는 ECMWF와 ECCC의 적용 방식 및 결과를 보다 상세하게 분석하여 KIM 시스템에 적합한 방식을 찾아 극궤도 위성자료에 적용할 관측연산자를 개발하고 이를 먼저 KIM 전처리시스템인 KPOP에 적용하고자 한다. 이때 경사거리 고려 효과가 가장 크게 나타나는 것으로 평가되어 있는 ATMS 자료를 대상으로 먼저 경사 관측연산자를 적용하고 그 효과를 분석 후, 이를 기반으로 다른 마이크로파 탐측기 자료에 대해 적용 범위를 확대하면서 그 효과를 분석하고자 한다. 저궤도 초분광 관측자료들(IASI, CrIS)에 대해서는 적용 가능성에 대해 추가 분석을 진행하고 작업을 진행하면서 경사 관측연산자 적용 시 소요되는 시간에 대한 모니터링을 함께 진행하고자 한다.

1.2.1. 경사거리 고려한 관측연산자를 공용 모듈로 개발하여 극궤도 위성에 활용

가. KIM에 활용중인 극궤도 위성 전처리 및 동화과정 분석

- ATMS 자료에 대한 전처리과정 분석.
- 기타 극궤도 위성 자료들에 대한 전처리과정 분석.
- 전처리 과정에서 모델 배경장에 관측연산자 적용 필요한 부분들에 대한 파악.

나. 극궤도 위성 자료에 공통으로 적용할 수 있는 모듈 개발

- 극궤도 위성자료들간 수평 해상도 차이를 고려한 방위각면 검색 범위 설정을 위한 분석 및 테스트.
- ATMS에 적용 가능한 경사 관측연산자 개발 및 적용.
- ATMS 중심으로 개발된 관측연산자를 다른 저궤도 위성에 적용하기 위한 모듈 변경 및 테스트 수행.

1.2.2. 개발된 관측연산자로 산출된 위성복사량의 정확도 평가 및 수행시간 비교

가. 극궤도 위성 자료에 대한 KPOP에 경사거리 적용 전/후의 효과 비교 분석

- 경사거리 고려하지 않은 기존방식으로 KPOP 수행 (최소 15일 기간 자료 이용).
- ATMS에 대한 KPOP 경사 관측연산자 적용 전/후의 효과 분석.
- ATMS를 포함한 모든 저궤도 위성들(초분광 적외센서 제외)에 경사 관측연산자 적용 전/후의 효과 분석 및 수행시간 비교.
- 모든 저궤도 위성들(초분광 적외센서 포함)에 경사 관측연산자 적용 전/후의 효과 분석 및 수행시간 비교.

1.2.3. 개발된 관측연산자를 변분자료동화에 적용하기 위한 선행 기술 개발

가. 변분 자료동화 시스템에 대한 분석

- KIM의 변분 자료동화 시스템에 대한 분석을 통해 극궤도 위성 관련 경사 관측연산자 적용이 필요한 부분들에 대한 파악 및 적용을 위한 상세업무 분석.
- 극궤도 위성에 대한 자료동화에 경사 관측연산자 적용한 선진 기관들의 수행 사례에 대한 상세분석 및 KIM에 적용을 위한 기반 구축.

1.3. 위성자료의 채널상관 관측오차 고려 및 앙상블 기반 관측자료 민감도 도구 시험 적용 (명지대학교)

위성관측은 하나의 채널이 커버하는 연직적인 대기질량의 범위가 넓기 때문에 채널 오차 간의 상관관계가 발생하게 된다. 현재의 하이브리드 시스템은 관측오차의 상관관계를 시스템 내에서 구현할 수 없기 때문에 ECMWF나 UK Metoffice에서 수행하는 관측오차상관관계를 고려한 위성자료동화가 이루어질 수 없다. 이를 해결하기 위해서는 현재의 구조를 최대한 유지하면서 오차상관관계가 존재하는 행렬을 고유값과 고유벡터로 나누어 고유벡터를 관측연산자의 일부로 포함하여 구현하는 방식을 취할 필요가 있다(Geer 2019).

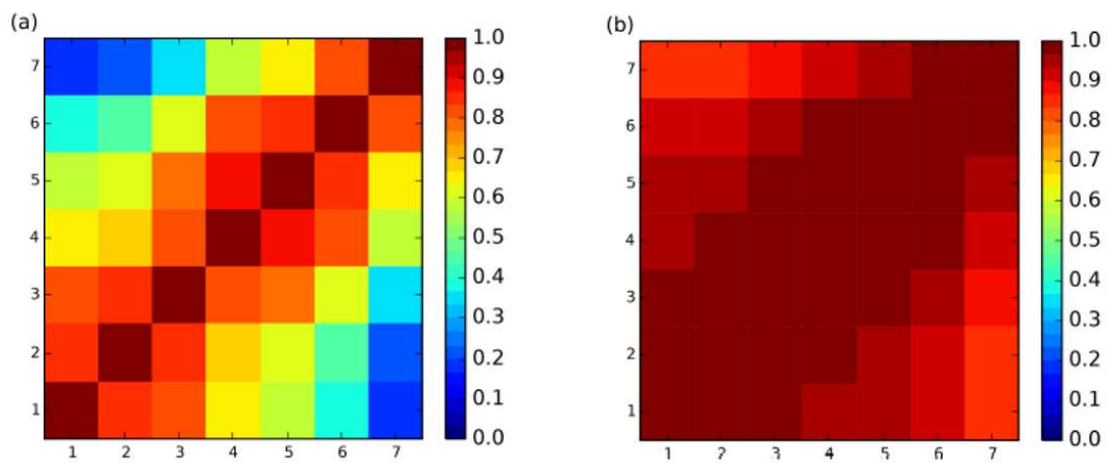


그림 1.3.1. 맑은 하늘(clear-sky)과 모든 하늘(all-sky)의 관측오차상관관계 행렬. Geer (2019)로부터 차용.

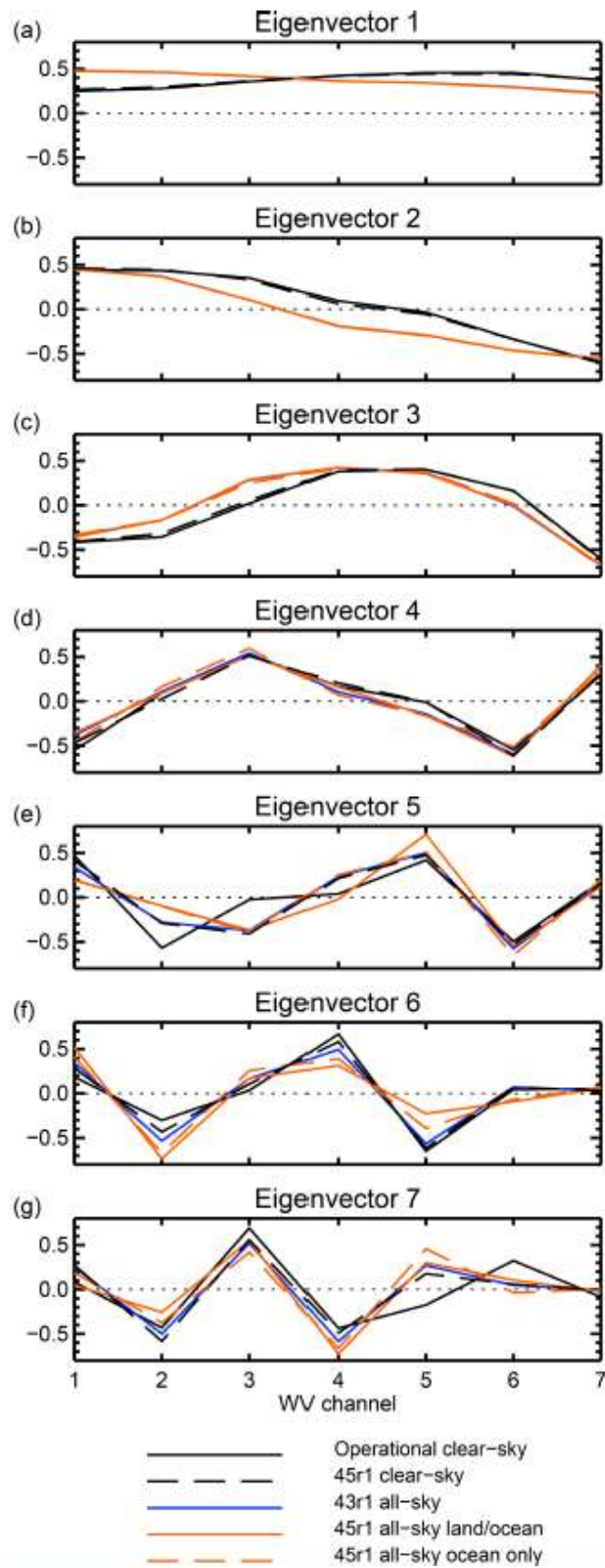


그림 1.3.2. 관측오차공분산 행렬의 고유벡터를 구한 예시. Geer (2019)로부터 차용.

정상 작동이 확인된 EFSO를 통하여 얻어낸 결과 중 하나는, 기존에 작동이 의심되었던 지면 관측의 효과가 생각만큼 부정적이지는 않다는 사실이었다. 따라서, 내년도 앙상블 자료동화시스템 연구의 목표로서 설정했던 지면 자료 동화에 초점이 맞춰진 주제의 방향을 바꿔서, 정상작동이 확인된 EFSO를 이용하여 장기적인 관측 민감도의 모니터링에 시범 적용해보고자 한다. 이때 하이브리드 자료동화시스템 내의 LETKF 분석장과 예보장에 적용되어 계산된 관측 민감도는, 하이브리드 시스템의 분석장과 예보장으로부터 얻어낸 EFSO 결과와도 비교될 필요가 있다. 그리고 예보 오차 전체 크기와 EFSO 전체 합 사이의 비교 또한 추가적인 검증에 대해 덧붙여질 필요가 있다.

1. 위성 관측 자료의 채널상관을 고려한 관측오차 산출 기술 개발

- 가. 관측오차공분산의 비대각성분이 들어갈 수 있도록 설계
 - 기존의 하이브리드 시스템 체계를 최대한 유지하도록 설계
 - eigendecomposition을 통한 고유값과 고유벡터 생성
 - 관측 벡터가 고유벡터를 통해 변환되고 변형된 관측이 자료동화시스템에 들어가도록 설계
- 나. 설계 결과의 코드화
 - 현재의 하이브리드 시스템 변분자료동화 과정에 맞게끔 코딩
 - KPOP 관측오차공분산의 dump 파일 구조 변경
 - KPOP 출력 파일 형태로 고유값과 고유벡터 저장 및 로드 가능하게 변경

2. 산출된 채널상관 관측오차 활용에 따른 영향 분석

- 가. 코드화된 채널상관 고려 관측오차 테스트
 - 적용된 KPOP과 하이브리드 시스템의 사이클 구성
 - 구성된 사이클의 기존 실험 대비 비교 검증
- 나. 기존 기관들의 결과 대비 성능 검증
 - UK Metoffice나 ECMWF의 채널상관 고려 효과 등과 비교
 - 기존 검증과 다른 결과에 나올 시 원인 분석
 - 기존 코드 보완 및 추가 검증

3. 앙상블 기반 관측자료 민감도구(EFSO) 시험 적용 및 현업 적용을 위한 체계 설계

- 가. 앙상블 기반 관측자료 민감도구(EFSO) 시험 적용
 - EFSO의 총합과 예보오차 감소의 총합 비교

- 하이브리드 자료동화 시스템의 분석장 및 예보장으로부터 EFSO 계산
 - LETKF EFSO와 하이브리드 자료동화 EFSO 비교
- 나. EFSO 현업 적용을 위한 체계 설계
- EFSO를 이용한 관측 민감도 모니터링 체계 설계
 - EFSO 모니터링을 통한 통계값 시범 산출

1.4. KIM3.8의 예보 오차 분석 및 추적(서울대학교)

한국형수치예보모델에서 기상 현상의 예측성을 향상시키기 위해 KIM 모델은 주기적으로 자료동화 등의 업데이트를 통해 버전이 향상되고 있다. 특히 수치예보 모델에서 실제 대기상태를 정확히 모의하기 위해서는 정확한 초기장 자료가 필요하며, 초기장 자료의 변화가 적어도 모의되는 대기상태는 실제와 크게 다른 결과를 나타낸다. 수치예보모델 체계를 개선하여도 초기장 자료가 정확하지 않으면 예측 성능의 개선이 상대적으로 작거나 악화가 되는 결과를 나타내기 때문에 정확한 초기장 자료가 중요하다.

수치예보모델의 예측 성능 향상을 위해선 예보장에서 발생하는 예보 오차를 파악하여 초기장을 개선하여야 하는데, 발생하는 예보 오차가 어디서, 어느 예보 시간대에서 유발이 되는지는 알기가 어렵다. 본 연구의 2단계 연차에서는 예보 오차를 이해하고 파악 및 추적하고자 한다. 1단계 연차 연구에서 수행하였던 통계적 분석기법(RMSE, ACC)을 통해 KIM3.8에 대하여 KIM3.6a와 KIM3.7과의 비교 분석을 위해 예보 오차를 분석 및 개선/저하 정도를 파악하며, 사례를 선정한 후 해당 사례에 대해 앙상블 민감도 (Ensemble Sensitivity)를 적용하여 예보 오차를 추적 및 분석하고자 한다. 특정 기상 현상의 변화율을 기상 변수에 대한 종속변수로 표현할 수 있는 앙상블 민감도는 수치예보모델의 예보 오차를 평가하는 데에 사용되는데, 특히 예보장과 초기장이 특정 기상 현상과 연관이 있다. 또한 1단계 연차 연구에서 수행하였던 영역별 예보 오차의 Local Maximum Value, Local Minimum Value를 통해 예보 오차의 발생 및 이동 경향성을 파악 및 분석하고자 한다.

본 연구를 통해 수치예보모델의 예보 오차를 파악 및 추적하는 기술을 개발하여 실예보에서도 적용을 할 수 있게끔 하고자 한다.

1.4.1. KIM3.8 새로운 버전 업데이트에 따른 분석장 대비 예보장과의 데이터 분석 및 오차 상관성 분석

- 1차년도에서 수행하였던 RMSE, ACC를 통해 KIM3.8 새로운 버전으로 업데이트된 모델을 비교 분석.
- 사례를 선정하여 예보 오차의 발생 및 이동 분포를 파악.
- 위도·경도·고도별 세분화한 영역에 대해 초기장 대비 상관성 분석.
- 파워 스펙트럼 분석을 통해 주기성 파악.

1.4.2. Local Maximum Value, Local Minimum Value Tracking

- 영역별 예보 오차의 최대값, 최소값을 통해 예보 오차의 발생 및 이동 경향성

파악 및 분석.

1.4.3. 앙상블 민감도를 통한 예보 오차의 민감도 파악

- 앙상블 민감도 (Ensemble Sensitivity) 방법을 활용하여 예보 오차를 추적 및 분석.

1.5. 2단계 연차 연구내용

구 분	내용
제안사 : 명지대학교	<ul style="list-style-type: none"> ○ 위성자료의 채널상관 관측오차 고려 및 앙상블 기반 관측자료 민감도 도구 시험 적용 <ul style="list-style-type: none"> ● 위성 관측 자료의 채널상관을 고려한 관측오차 산출 기술 개발 ● 산출된 채널상관 관측오차 활용에 따른 영향 분석 ● 앙상블 기반 관측자료 민감도구(EFSO) 시험 적용 및 현업 적용을 위한 체계 설계
공동수급사 : 서울대학교	<p><제1세부과제></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 1차연도에 개발한 물리 모형기반의 해양지면온도 산출 알고리즘을 KIM 내 적용 및 구동 시험 (1차연도 연구과제의 수치모델링센터 지원 연구) ○ 기계학습을 이용한 위성자료동화용 해빙지면온도 및 방출율 산출 <ul style="list-style-type: none"> ● 기계학습의 훈련자료로 활용할 가상의 모의자료 생산 ● 기계학습 방식을 적용한 지면정보 산출 알고리즘 구현 ● 산출된 지면정보의 정확도 진단 (알고리즘 검증) <p><제4세부과제></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ KIM3.8, KIM3.9 등의 버전 업데이트에 따른 분석장 대비 예보장과의 데이터 분석 및 오차 상관을 분석 ○ Local Max/Min Tracking, Ensemble Sensitivity 방법을 활용하여 예보 오차를 추적 및 분석하고, 실예보에 사용할 수 있도록 지원
공동수급사 : 이화여자대학교	<ul style="list-style-type: none"> ○ 경사거리 고려한 관측연산자의 극궤도 위성 활용 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> ● 극궤도 위성자료에 적용할 경사거리 고려한 관측연산자 (공통 모듈로 개발) ● 개발된 관측연산자로 산출된 위성복사량 정확도 평가 결과 및 수행 시간 비교 ● 개발된 관측연산자를 변분자료동화에 적용하기 위한 선행 기술 개발

IV. 참고문헌

<제1세부과제>

- 기상청, 2021: 한국형모델 관측자료 전처리시스템 의 (KPOP) 북극지역 위성관측 활용 증대 연구.
- 김희영, 박경애, 우혜진. 2016: 북서태평양 GCOM-W1/AMSR2 해수면온도 검증 및 오차 특성. *Korean Journal of Remote Sensing*, 32(6), 721-732.
- Bauer, P., Thorpe, A., and Brunet, G., 2015: The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*, 525(7567), 47-55.
- Beljaars, A. C., 1997: Air-sea interaction in the ECMWF model. In *Proc. Seminar on Atmosphere-Surface Interaction*, 33-52.
- Donlon, C., Robinson, I., Casey, K. S., Vazquez-Cuervo, J., Armstrong, E., Arino, O., ... & Rayner, N., 2007: The global ocean data assimilation experiment high-resolution sea surface temperature pilot project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(8), 1197-1214.
- Fairall, C. W., Bradley, E. F., Godfrey, J. S., Wick, G. A., Edson, J. B., & Young, G. S., 1996: Cool-skin and warm-layer effects on sea surface temperature. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C1), 1295-1308.
- Hosoda, K., 2010: A review of satellite-based microwave observations of sea surface temperatures. *Journal of oceanography*, 66(4), 439-473.
- Kang, E. J., Sohn, B. J., Tonboe, R. T., Dybkjær, G., Holmlund, K., Kim, J. M., and Liu, C., 2021: Implementation of a 1-D Thermodynamic Model for Simulating the Winter-Time Evolvment of Physical Properties of Snow and Ice Over the Arctic Ocean. *J. Adv. Model. Earth SY.*, 13(3), e2020MS002448.
- O' Carroll, A. G., Armstrong, E. M., Beggs, H. M., Bouali, M., Casey, K. S., Corlett, G. K., et al., 2019: Observational needs of sea surface temperature. *Front. Mar. Sci.*, 6(420).
- Paulson, C. A., & Simpson, J. J., 1981: The temperature difference across the cool skin of the ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 86(C11), 11044-11054.
- Saunders, P. M., 1967: The temperature at the ocean-air interface. *Journal of Atmospheric Sciences*, 24(3), 269-273.
- Tu, C. Y., & Tsuang, B. J., 2005: Cool-skin simulation by a one-column ocean model. *Geophysical research letters*, 32(22)
- Ulaby, F. T., Long, D. G., Blackwell, W. J., Elachi, C., Fung, A. K., Ruf, C., et

- al., 2014: Microwave radar and radiometric remote sensing. Ann Arbor, Michigan, USA: University of Michigan Press.
- Zeng, X., & Beljaars, A., 2005: A prognostic scheme of sea surface skin temperature for modeling and data assimilation. *Geophysical Research Letters*, 32(14).

<제2세부과제>

- 김희애 & 이병일, 2019: GK-2A AMI Algorithm Theoretical Basis Document: 구름 탐지 (Cloudmask). 국가기상위성센터. Version 1.0, 2019.04.15.
- Bormann, N., 2017: Slant path radiative transfer for the assimilation of sounder radiances. *Tellus*, 69A, 1272779 .
- Burrows, C., 2018: Assimilation of radiance observations from geostationary satellites: first year report. EUMETSAT/ECMWF Fellowship Programme, Research Report No. 47.
- EUMETSAT, 2022: PDF of Meteosat orbits archive, EUMETSAT.
- Kang, J.-H., H.-Y. Chun, S. Lee, J.-H. Ha, H.-J. Song, I.-H. Kwon, H.-J. Han, H. Jeong, H.-N. Kwon, and T.-H. Kim, 2018: Development of an Observation Processing Package for Data Assimilation in KIAPS, Asia-Pac. *J. Atmos. Sci.*, 54(s), 303-318.
- Shahabadi, M.B., J. Aparicio, and L. Garand, 2018: Impact of Slant-Path Radiative Transfer in the Simulation and Assimilation of Satellite Radiances in Environment Canada's Weather Forecast System. *Mon. Wea. Rev.*, 146, 4357-4372.
- Shahabadi, M.B., M. Buehner, J. Aparicio, and L. Garand, 2020: Implementation of Slant-Path Radiative Transfer in Environment Canada's Global Deterministic Weather Prediction System. *Mon. Wea. Rev.*, 148(10), 4231-4245. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-20-0060.1>.

<제3세부과제>

- Geer, A. J., 2019: Correlated observation error models for assimilating all-sky infrared radiances. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(7), 3629-3657.
- Hotta, D., Chen, T. C., Kalnay, E., Ota, Y., & Miyoshi, T., 2017: Proactive QC: A fully flow-dependent quality control scheme based on EFSO. *Monthly Weather Review*, 145(8), 3331-3354.
- Lorenc, A. C., Bowler, N. E., Clayton, A. M., Pring, S. R., & Fairbairn, D., 2015: Comparison of hybrid-4DVar and hybrid-4DVar data assimilation methods for global NWP. *Monthly Weather Review*, 143(1), 212-229.

<제4세부과제>

ECMWF, 2013: User Guide to ECMWF forecast products. 83-84.

주 의

1. 이 보고서는 기상청 수치모델링센터에서 시행한 연구개발사업으로 「수치예보 지원 및 활용 기술 개발」 사업의 연구용역과제 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 기상청 수치모델링센터에서 시행한 연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.
4. 이 보고서와 관련된 문의사항은 기상청 수치모델링센터 수치자료응용과, 전화 042-481-7539로 하시면 됩니다.