

발간등록번호
11-1360709-000079-01



최종보고서

과제명	전지구예보모델의 오차진단과 예측성 평가(III)
수행기관	(사)한국기상학회

2022. 11.

제 출 문

기 상 청 장 귀 하

본 보고서를 “전지구 예보모델의 오차진단과 예측성 평가(III)에 관한 연구”
최종보고서로 제출합니다.

2022년 11월 30일

- 주관연구기관명 : 한국기상학회
- 연 구 기 간 : 2022.4.1.~2022.11.30.
- 주관연구책임자 : 김 주 완
- 참여연구원
 - 연 구 원 : 차 동 현
 - 연 구 원 : 곽 경 환
 - 연 구 원 : 박 승 부
 - 연 구 원 : 류 호 선
 - 연 구 원 : 김 형 규
 - 연 구 원 : 박 종 호
 - 연 구 원 : 강 현 규
 - 연 구 원 : 정 다 현
 - 연 구 원 : 안 상 현
 - 연 구 원 : 문 지 수
 - 연 구 원 : 박 해 린

- 연구원 : 조 우 진
- 연구원 : 이 명 우
- 연구원 : 김 연 옥
- 연구원 : 김 태 희
- 연구원 : 손 영 진
- 연구원 : 정 하 윤

I. 연구배경

1. 제안 배경 및 필요성

기상청 수치모델링센터는 기상재해 피해 경감 및 기상자료에 대한 사회경제적 수요에 응답하기 위해 다양한 수치예보자료를 생산하고 있다. 특히 수치예보 기술의 자립화와 국제적인 경쟁력 확보를 위해 한반도 기상예보에 적합한 한국형수치예보 모델(Korea Integrated Model, 이하 KIM)을 개발하였으며, 2020년 4월부터 현업 운영에 활용하고 있다. 해당 모델은 수치기반 기상예보와 중기예측의 근간이 되는 전지구 모델로 세계적으로 우수한 전지구 모델과 유사한 수준의 성능을 보이는 것으로 알려져 있으나, 모델 해상도의 증가, 물리과정의 개선 등 수치예보모델 분야의 발전이 지속적으로 이루어지고 있어 이에 대한 반영과 평가를 위한 개발이 필요하다.

기상청은 새롭게 개발된 KIM을 이용하여 전지구 고해상도예측(12 km 해상도) 정보를 제공하고 있으며, 지속적인 모델링 시스템의 진단/수정/보완 업무와 수치모델링 기술 및 예측 시스템의 기술 개발을 추진하고 있다. 이러한 운영 및 개발 과정은 안정적인 기상예보를 제공하고 불규칙한 위험기상을 더 정확히 예측하기 위해 필수적인 과정이다. 폭염 및 집중호우와 같은 위험기상 현상은 하층 온도 및 수증기에 민감하므로 이에 대한 정확한 예측을 위해서는 모델의 지표면(또는 경계층) 물리과정과 강수물리모수화 과정의 진단 및 개선이 요구된다. 또한 한반도의 폭염 및 집중호우는 장마전선과 같은 대규모 배경장을 기반으로 발생하는 경우가 많아서, 전지구 규모의 배경장 예측성도 호우를 포함한 위험기상의 예측에 중요한 부분이다.

본 사업은 새롭게 개발되어 현업예보에 활용 중인 KIM의 전지구-지역규모 배경장 예측성, 강수 현상별 예측성, 극한기상과 관련된 지표면 예측성에 대한 진단을 통해 KIM의 예보 성능 및 극한기상 예측성을 종합적으로 평가하고자 한다. 또한 해당 진단 결과를 기반으로 물리 모수화 과정의 세부정보 및 개선방안을 제공하여 KIM 모델의 지속적인 개발에 기여하고자 한다.

○ 목적

한국형수치예보모델의 예보 활용 지원 및 모델 개선을 위한 계통적 오차 상세 특성 분석 및 강수/경계층 예측 성능 평가

2. 사업 범위

- 한국형수치예보모델 강수 예측 성능 진단 및 계통적 오차 물리적 원인 분석
 - 전지구예보모델의 강수예측 성능 진단
 - 한국형모델 현업예보 기간(2-3년)의 한반도 강수 현상별 예측성 평가
 - 극한기상 발생시 지표면 근처의 국지규모 예측성 분석

3. 연구개발 내용

- 한국형모델 현업예보 기간(2-3년)의 전지구-지역 규모 예측성 종합 평가
 - 북반구 하층 온도, 지위고도 오차의 물리적 원인 진단
 - 적도 ITCZ 편차에 의한 중위도 영향 분석(티벳 고기압, 북태평양 고기압)
- 한국형모델 현업예보 기간(2-3년)의 한반도 강수 현상별 예측성 평가
 - 정체전선, 태풍, 중규모 저기압 등에 의한 집중호우 현상에 대한 예측성 평가
 - 예측 성공/실패 사례 분석을 통해 예측성능 향상을 위한 물리모수화과정 개선 제언
- 극한기상 발생시 지표면 근처의 국지규모 예측성 분석
 - 폭염, 한파 발생시 경계층 온도, 습도 예측성 평가
 - 경계층 오차 진단 및 개선점 파악
(경계층 모수 선택의 물리적 과정 및 의미 분석 포함)

4. 연구개발 방안

본 과제의 연구개발은 공주대학교(김주완 교수), 울산과학기술원(차동현 교수), 강원대학교(곽경환 교수)의 컨소시엄과 협력을 통해서 이루어지며 한국형 수치예보모델의 전지구 및 지역규모 예측성 평가 및 물리적 원인 진단은 공주대학교, 강수 현상별 예측성 평가 및 물리모수화과정 개선 제언은 울산과학기술원, 극한 기상 발생 시기의 지표면 주변 국지예측성 및 경계층 모수 물리적 의미 분석은 강원대학교에서 주도적으로 수행한다.

○ 연구팀 및 세부과제 구성

1세부과제: 한국형모델의 전지구-지역 규모 예측성 종합 평가(공주대학교)

- 북반구 하층 온도, 지위고도 오차의 물리적 원인 진단(현업예보기간 2-3년)
- 적도 ITCZ 편차에 의한 중위도 영향 분석(티벳 고기압, 북태평양 고기압)

2세부과제: 한국형모델의 한반도 강수 현상별 예측성 평가(울산과학기술원)

- 정체전선, 태풍, 중규모 저기압 등에 의한 집중호우 현상에 대한 예측성 평가
- 예측 성공/실패 사례 분석 기반 예측성능 향상을 위한 물리모수화과정 개선 제언

3세부과제: 극한기상 발생 시 지표면 근처 국지규모 예측성 분석(강원대학교)

- 폭염, 한파 발생 시 경계층 온도, 습도 예측성 평가
- 경계층 오차 진단 및 개선점 파악(경계층 모수 선택의 물리적 과정 및 의미 분석 포함)

II. 세부과제별 연구 결과

제 1 세부과제

“한국형모델의 전지구-지역 규모 예측성
종합 평가”

연구기관

한국기상학회 / 공주대학교

<출판용 여백>

요 약 문

제 1 세부과제는 한국형수치예보모델의 전지구-지역 규모에 대한 예측성을 종합적으로 평가하는 것을 목표로 하였다. 북반구에 대한 온도 및 지위고도의 오차를 진단하고, 해당 오차를 발생시키거나 증폭시킬 수 있는 물리적 원인을 진단하였다. 또한 모델에서의 오차에 따른 중위도 예측성 영향을 진단하였다. 추가로 적도 ITCZ를 중심으로 예측성을 평가하였으며, 예측 시간에 따른 해들리 순환의 변화를 확인하였다. 마지막으로 적도에서의 오차에 따른 중위도 영향을 분석하였다. 세부적인 내용은 아래와 같다.

가. 북반구 하층 온도, 지위고도 오차의 물리적 원인 진단

- 북반구 고위도 하층 온도 및 지위고도 오차 분석(현업예보기간 2-3년)
- 북반구 고위도 오차의 물리적 원인 진단
- 북반구 고위도 오차의 중위도 예측성 영향(한반도를 중심으로 평가)

나. 적도 ITCZ 편차에 의한 중위도 영향 분석

- 적도 ITCZ 모의성능 및 계통적 오차 분석
- KIM 모델의 해들리 순환(Hadley cell) 강도 분석
- 적도 대류 오차의 중위도 영향 분석(여름철 티벳 고기압, 북태평양 고기압)

차 례

제 1 장 사업의 필요성	1
제 2 장 사업 목적	3
제 3 장 사업 개요	4
제 4 장 사업 수행 내용 및 결과	5
제 1 절. 북반구 하층 온도, 지위고도 오차의 물리적 원인 진단	5
1) 관측 및 모델, 재분석 자료의 수집	5
2) 북반구 고위도 하층 온도 및 지위고도 오차 분석	9
3) 북반구 고위도 오차의 물리적 원인 진단	17
4) 북반구 고위도 오차의 중위도 예측성 영향	24
제 2 절. 적도 ITCZ 편차에 의한 중위도 영향 분석	33
1) 관측 및 모델, 재분석 자료의 수집	33
2) 적도 ITCZ 모의성능 및 계통적 오차 분석	35
3) KIM 모델의 헤들리 순환(Hadley cell) 강도 분석	39
4) 적도 대류 오차의 중위도 영향 분석	41
제 5 장 사업수행결과의 활용 계획	53
제 6 장 참고 문헌	54

표 차례

<표 1.1.1> KIM 예측성 진단을 위해 사용된 관측 및 모델, 재분석자료	6
<표 1.2.1> KIM 예측성 진단을 위해 사용된 관측 및 모델, 재분석자료	33

그림 차례

<그림 1.1.1> 한국형모델의 현업운영개시 및 업데이트 진행 일정	2
<그림 1.1.2> 850 hPa 온도에 대한 ERA5대비 KIM의 이상상관계수 결과. 1일, 3일 5일 예측결과는 각각 빨간색, 초록색, 파란색 실선으로 표시함	9
<그림 1.1.3> 2020년 계절별 850 hPa 온도(단위 K)에 대한 ERA5대비 KIM의 5일 예측장 편차(KIM-ERA5). 좌측 상단부터 순서대로 2020년 봄철, 여름철, 가을철, 겨울철에 대한 편차를 나타냄.	11
<그림 1.1.4> 2021년 계절별 850 hPa 온도(단위 K)에 대한 ERA5대비 KIM의 5일 예측장 편차(KIM-ERA5). 좌측 상단부터 순서대로 2021년 봄철, 여름철, 가을철, 겨울철에 대한 편차를 나타냄.	12
<그림 1.1.5> 2020년 계절별 700 hPa 온도(단위 K)에 대한 ERA5대비 KIM의 5일 예측장 편차(KIM-ERA5). 좌측 상단부터 순서대로 2020년 봄철, 여름철, 가을철, 겨울철에 대한 편차를 나타냄.	13
<그림 1.1.6> 2021년 계절별 700 hPa 온도(단위 K)에 대한 ERA5대비 KIM의 5일 예측장 편차(KIM-ERA5). 좌측 상단부터 순서대로 2021년 봄철, 여름철, 가을철, 겨울철에 대한 편차를 나타냄.	14
<그림 1.1.7> 500 hPa 지위고도에 대한 ERA5대비 KIM의 ACC 결과. 1일, 3일 5일 예측결과는 각각 빨간색, 초록색, 파란색 실선으로 표시함	15
<그림 1.1.8> 500 hPa 지위고도(단위 gpm)에 대한 ERA5대비 KIM의 5일 예측장 평균제곱근 결과. 좌측 상단부터 순서대로 2020년 여름철, 겨울철, 2021년 여름철, 겨울철에 대한 결과임	16
<그림 1.1.9> 2020년 계절별 2 m 온도(단위 K)에 대한 ERA5대비 KIM의 5일 예측장 편차(KIM-ERA5). 좌측 상단부터 순서대로 2020년 봄철, 여름철, 가을철, 겨울철 에 대한 편차를 나타냄. 유라시아 및 유럽의 온도 편차를 분석하기 위해 검은색 박스로 표시함	18

<그림 1.1.10> 2021년 계절별 2 m 온도(단위 K)에 대한 ERA5대비 KIM의 5일 예측장편차(KIM-ERA5). 좌측 상단부터 순서대로 2021년 봄철, 여름철, 가을철, 겨울철에 대한 편차를 나타냄.	19
<그림 1.1.11> 유라시아 및 유럽 영역에 대한 2 m 온도(단위 K) ERA5대비 KIM의 5일 예측장 편차(KIM-ERA5). 위쪽부터 순서대로 여름철 유라시아 대륙의 온난 편차와 겨울철 유럽의 한랭편차 결과를 나타냄.	20
<그림 1.1.12> 2020년 계절별 1 m 누적 토양 수분(단위 kg/m ²)에 대한 ERA5대비 KIM의 5일 예측장 편차(KIM-ERA5). 좌측 상단부터 순서대로 2020년 봄철, 여름철, 가을철, 겨울철에 대한 편차를 나타냄.	22
<그림 1.1.13> 2021년 계절별 1 m 누적 토양 수분(단위 kg/m ²)에 대한 ERA5대비 KIM의 5일 예측장 편차(KIM-ERA5). 좌측 상단부터 순서대로 2021년 봄철, 여름철, 가을철, 겨울철에 대한 편차를 나타냄.	23
<그림 1.1.14> 2020년 8월 16일 사례에 대한 500 hPa의 ERA5대비 KIM의 5일 예측장 편차 결과. 위의 결과는 WAF(벡터, 단위 m ² s ⁻²)와 WAF의 진폭(음영, 단위 m ² s ⁻²), 지위고도(실선, gpm)을 나타내며, 아래는 WAF(벡터, 단위 m ² s ⁻²), 풍속(음영, m s ⁻¹) 및 지위고도(실선, gpm)의 편차	25
<그림 1.1.15> 2020년 8월 16일 사례에 대해 동서평균한 ERA5대비 KIM의 5일 예측장 편차 결과. 위의 그림은 동서 바람(음영, 단위 m s ⁻¹)과 온도(실선, 단위 K)의 편차를 나타내며, ERA5의 동서 바람은 검은색 실선으로 표현함. 아래 그림은 동서 바람(음영, 단위 m s ⁻¹)과 지위고도(실선, 단위 gpm)의 편차를 나타내며, ERA5의 지위고도 역시 검은색으로 표현함.	26
<그림 1.1.16> 2020년 8월 16일 사례의 예측시간 별 ERA5대비 KIM의 5일 예측장 온도(단위 K) 편차. 편차는 80N-90N 지역에 대해 계산하였으며, 빨간색 실선은 200 hPa를, 파란색 실선은 950 hPa의 편차를 의미함.	27
<그림 1.1.17> 2020년 8월 16일 사례의 예측시간별 KIM의 온도(단위 K)편차. 편차는 80N-90N 지역에 대해 계산함	29
<그림 1.1.18> 2021년 6월 9일 사례에 대한 500 hPa의ERA5대비 KIM의 5일 예측장 편차 결과. 위의 결과는 WAF(벡터, 단위 m ² s ⁻²)와 WAF의 진폭(음영, 단위 m ² s ⁻²), 지위고도(실선, gpm)을 나타내며, 아래는 WAF(벡터, 단위 m ² s ⁻²), 풍속(음영, m s ⁻¹) 및 지위고도(실선, gpm)의 편차	31
<그림 1.1.19> 2021년 6월 9일 사례에 대한 ERA5/IMERG대비 KIM의 5일 예측장 결과 및 편차. 위의 결과는 KIM과 ERA5/IMERG의 유선함수(실선, 단위 106 m s ⁻¹)와	

5일 누적 강수(음영, mm day ⁻¹)를 나타내며, 아래는 유선함수(실선, 단위 10 ⁶ m s ⁻¹)와 5일 누적 강수(음영, mm day ⁻¹)의 편차를 나타냄.	32
<그림 1.2.1> 2021년 여름철 강수에 대한 IMERG 및 KIM의 1일, 5일 예측장. 위의 결과는 일 강수(음영, mm day ⁻¹)에 대한 결과를 나타냄.	35
<그림 1.2.2> 2021년 여름철 강수에 대한 IMERG와 KIM의 1일, 5일 예측장 편차. 위의 결과는 일 강수(음영, mm day ⁻¹)에 대한 결과를 나타냄.	36
<그림 1.2.3> 2021년 여름철 강수에 대한 IMERG와 KIM의 1일, 5일 예측장의 평균제곱근오차. 위의 결과는 일 강수(음영, mm day ⁻¹)에 대한 결과를 나타냄. 37	
<그림 1.2.4> 2021년 여름철 강수에 대한 IMERG와 KIM의 1일, 5일 예측장의 패턴 상관계수 결과. 위의 결과는 일 강수(음영, mm day ⁻¹)에 대한 결과임. 38	
<그림 1.2.5> 2021년 여름철 ERA5 및 KIM의 초기장, 3일, 5일 예측장에 대한 유선함수 결과.	40
<그림 1.2.6> 2021년 겨울철 ERA5 및 KIM의 초기장, 3일, 5일 예측장에 대한 유선함수 결과.	40
<그림 1.2.7> KIM의 현업운영 기간 동안 월 평균된 북반구 해들리 순환의 강도. 검정색 실선은 ERA5로 계산된 결과를 나타내며, 나머지 실선은 KIM의 초기장, 1일, 3일, 5일 예측시간에 대한 결과임.	41
<그림 1.2.8> 2020년 여름철 KIM의 예측시간에 따른 티벳 고기압 지수, 오차(KIM-ERA5) 및 티벳 고기압 지역의 강수 오차(KIM-IMERG).	43
<그림 1.2.9> 2020년 여름철 KIM의 예측시간에 따른 티벳 고기압 지역의 강수. 44	
<그림 1.2.10> 2020년 티벳 지역의 100 hPa 지위고도 및 강수(음영). 위 2020년 7월 아래 2020년 8월, 왼쪽부터 ERA5, KIM 1일 예측장, KIM 5일 예측장.	44
<그림 1.2.11> 2021년 여름철 KIM의 예측시간에 따른 티벳 고기압 지수, 오차(KIM-ERA5) 및 티벳 고기압 지역의 강수 오차(KIM-IMERG).	45
<그림 1.2.12> 2021년 여름철 KIM의 예측시간에 따른 티벳 고기압 지역의 강수 46	
<그림 1.2.13> 2021년 티벳 지역의 100 hPa 지위고도 및 강수(음영). 그림의 구성은 <그림 1.2.10>과 동일함	46
<그림 1.2.14> 2020년 여름철 KIM의 예측시간에 따른 북서태평양 고기압 지수, 오차(KIM-ERA5) 및 해당 지역의 강수 오차(KIM-IMERG).	48
<그림 1.2.15> 2020년 여름철 KIM의 예측시간에 따른 북서태평양 고기압 지역의 강수.	49
<그림 1.2.16> 2020년 북태평양 지역의 500 hPa 지위고도 및 강수(음영). 그림의 구성은 <그림 1.2.10>과 동일함	49

<그림 1.2.17> 2021년 여름철 KIM의 예측시간에 따른 북서태평양 고기압 지수, 오차(KIM-ERA5) 및 해당 지역의 강수 오차(KIM-IMERG).	50
<그림 1.2.18> 2021년 여름철 KIM의 예측시간에 따른 북서태평양 고기압 지역의 강수.	51
<그림 1.2.19> 2021년 북태평양 지역의 500 hPa 지위고도 및 강수(음영). 그림의 구성은 <그림 1.2.10>과 동일함	51

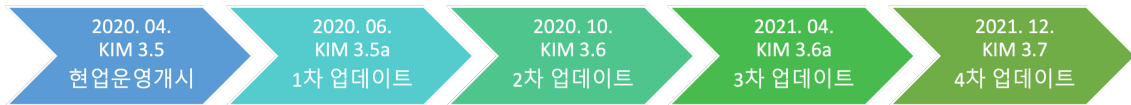
제 1 장 사업의 필요성

독자적인 기술로 지난 2011년부터 개발을 시작한 KIM은 2020년 4월을 기점으로 현재까지 현업 운영되어 왔으며, 지속적인 성능 개선을 통하여 자체적인 위험기상 예측 체계를 구축하였다(〈그림 1.1.1〉 참조). 이에 따라 한반도에 영향을 미치는 위험기상 예측에 능동적으로 대처 가능한 기반이 마련되었으나, 수치모델이 일반적으로 가지는 예측성 한계의 개선을 위해서는 지속적인 개발과 동시에 계통적 오차에 대한 분석 및 한반도 주변의 특화된 기상현상에 대한 체계적인 진단이 필요하다.

이러한 부분을 보완하고자 기상청에서는 2022년에 KIM을 3.8 버전으로 5차 업데이트를 준비하고 있으며, 용역 과제를 통하여 모델의 계통적 오차에 대한 분석을 수행하고 있다. 이를 통해 한반도 집중호우의 중심 오차는 약 150~200 km 수준이며, 만주 지역에서 모의되는 지위고도 편차와 같은 대규모 배경장의 오차가 한반도 강수 예측에 영향을 미치는 사실들이 확인되었다(기상청, 2021). 일반적으로 여름철에 한반도를 관통하는 장마전선 상에서 발달하는 집중호우는 북태평양 및 티벳 고기압과 같은 대규모 배경장에 큰 영향을 받으므로 해당 현상의 정확한 모의는 한반도 강수 예측에 중요한 요소이다. 이에 티벳 고기압 및 북태평양 고기압의 형성에 중요한 역할을 하는 적도 수렴대(Inter-Tropical Convergence Zone, ITCZ) 및 해당 지역의 강수 오차에 대한 평가가 이루어지고 있다. 현업 모델은 예측성의 향상을 위해 초기장 및 물리과정의 지속적인 업데이트가 이루어지기 때문에 강수 및 핵심 예측성 인자에 대한 모니터링이 요구된다. 추가로 한반도 일기계의 예측성을 높이기 위해 전지구-지역 규모 배경장에 대한 오차를 분석하고, 이를 발생시키는 원인에 대한 진단이 필요하다.

본 세부과제는 현업운영 중인 KIM의 전지구-지역 규모 예측성을 종합적으로 평가하기 위해 북반구에서 확인되는 오차와 이를 발생시키는 물리적 원인을 진단하고자 한다. 이를 위해 한국형모델의 현업예보가 적용된 2020년 4월

이후부터 생산된 북반구 하층 온도 및 지위고도 예측에 대한 전반적인 진단을 수행하고, 해당 오차의 중위도 전파 및 영향을 분석하고자 한다. 이 외에도 KIM에서 모의되는 적도 수렴대(ITCZ) 및 해들리 순환(Hadley cell)의 계통적 오차를 분석하여, 적도 대류의 오차에 따른 중위도 지역에 대한 영향을 평가하고자 한다.



<그림 1.1.1> 한국형모델의 현업운영개시 및 업데이트 진행 일정

제 2 장 사업 목적

제 1 세부과제는 기상청에서 현업으로 운영 중인 KIM의 전지구-지역 규모 현상에 대한 예측성을 종합적으로 평가하는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 북반구에서 발생하는 오차를 진단하고, 물리적인 원인을 파악하고자 하였다. 또한 적도 지역의 ITCZ 편차를 확인하고 해들리 순환의 오차를 분석하였으며, 북반구 및 적도 지역의 대류 오차가 중위도에 미치는 영향을 분석하였다.

추후 KIM의 업데이트를 통해 해당 오차를 줄이고 중위도 예측성 향상을 위한 분석으로 활용될 수 있도록 다음의 세부적인 내용으로 구성하였다.

■ 북반구 하층 온도, 지위고도 오차의 물리적 원인 진단

- 1) 북반구 고위도 하층 온도 및 지위고도 오차 분석(현업예보기간 2-3년)
- 2) 북반구 고위도 오차의 물리적 원인 진단
- 3) 북반구 고위도 오차의 중위도 예측성 영향(한반도를 중심으로 평가)

■ 적도 ITCZ 편차에 의한 중위도 영향 분석

- 1) 적도 ITCZ 모의성능 및 계통적 오차 분석
- 2) KIM 모델의 해들리 순환 강도 분석
- 3) 적도 대류 오차의 중위도 영향 분석(여름철 티벳 고기압, 북태평양 고기압)

제 3 장 사업 개요

제 1 세부과제는 KIM의 전지구-지역 규모 예측성 종합 평가를 위해 1) 북반구 하층 온도, 지위고도의 물리적 원인 진단, 2) 적도 ITCZ 편차에 의한 중위도 영향 분석을 수행한다. KIM의 현업운영을 시작한 2020년 4월 이후부터 2022년 3월까지의 기간에 대해 다음의 분석을 수행한다.

- 북반구 하층 온도, 지위고도의 물리적 원인 진단
 - 북반구 편차 및 이상상관계수(Anomaly Correlation Coefficient, ACC), 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 이용하여 정량적인 예측성 평가
 - 계통적 오차를 일으키는 물리적 변수 분석
 - WAF (Wave Activity Flux)를 이용한 로스비파의 전파 특성 파악 및 중위도 예측성 영향 진단

- 적도 지역 강수 및 ITCZ 모의 성능 평가
 - 적도 ITCZ의 예측성 및 오차 분석(Pattern Correlation, RMSE)
 - 계절 및 예측 시간에 따른 해들리 순환 오차 진단
 - 해들리 순환 및 티벳/북태평양 고기압의 중위도 예측성 영향 분석

- 추진 일정

내용	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월
사용자 요구사항 분석 및 수행계획 수립									
모델 및 관측자료 수집 데이터베이스 구축									
북반구 하층 온도, 지위고도 오차의 물리적 원인 진단									
적도 ITCZ 편차에 의한 중위도 영향 분석									
기술이전 및 보고서 작성									

제 4 장 사업 수행 내용 및 결과

제 1 절. 북반구 하층 온도, 지위고도 오차의 물리적 원인 진단

1) 관측 및 모델, 재분석 자료의 수집

가) 관측 및 모델, 재분석자료

KIM의 북반구 고위도 지역의 오차 진단을 위해, 기상청 수치모델링센터를 통해 KIM의 현업운영이 시작된 2020년 4월 이후의 자료를 2022년 4월 9일 00시(UTC 기준)부터 2022년 3월 31일 12시까지 확보하여 분석하였다. 해당 자료는 등압면 및 지상 자료에 대해 84시간 예측까지 3시간 간격으로 저장되어 있으며 이후 168시간 예측까지는 6시간 간격으로 구성되어 있다. 종관규모의 분석을 원활한 분석을 위해 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ 의 수평해상도와 25개의 층으로 후처리된 자료를 제공받았으며, KIM의 현업 기간 동안 가용한 최신 버전의 예측자료를 제공받아 분석에 사용하였다. 해당 기간의 예측성 진단을 위해 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)에서 제공하는 ERA5 (ECMWF Reanalysis 5) 재분석 자료를 참 값으로 분석을 진행하였으며, 추가적인 강수 분석을 위해 NASA에서 제공하는 IMERG (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM)를 사용하였다. ERA5의 경우, KIM과 동일한 수평 및 연직 해상도로 자료를 받아 분석을 수행하였으며, IMERG의 경우, 최종버전의 일강수 자료를 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 의 수평해상도를 제공하므로, KIM과 동일한 수평해상도로 분석하기 위해 CDO (Climate Data Operator)를 이용하여 이중선형보간법(Bilinear interpolation)을 적용한 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ 자료를 사용하였다.

추가적으로 KIM이 가지고 있는 고유의 오차 특성인지, 모델에서 공통적으로 나타나는 모델의 오차 특성인지를 진단하고자 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)에서 제공하는 GFS (Global Forecast System)를

이용하여, KIM에서의 오차가 모델 간에 나타나는 특성 인지를 확인하였다. 해당 자료 역시 IMERG와 동일한 방식으로 0.25° x 0.25° 의 수평해상도 자료를 선형 내삽하여 1.5° x 1.5° 해상도로 사용하였으며, 초기 시간 및 120시간 이후의 예측시간에 대한 배경장 분석에 대해 사용하였다. 분석에 사용된 자료의 정보들은 아래의 표에 표시하였다.

<표 1.1.1> KIM 예측성 진단을 위해 사용된 관측 및 모델, 재분석자료

자료	변수	수평/연직 해상도	출처
ERA5	U, V, T, Z, T2m, Soil moisture, (Rain rate for KIM)	1.5° × 1.5° (내삽), L37	ECMWF
GFS		1.5° × 1.5° (내삽), L41	NCEP
KIM		1.5° × 1.5° (내삽), L25	기상청
IMERG	Rain rate	1.5° × 1.5° (내삽)	NASA

* KIM 자료는 기상청 수치모델링센터를 통해 제공받았으며, 분석은 현업운영 이후 기간인 2020년 4월부터 2022년 3월까지의 기간에 대해 예측성 분석이 이루어졌다. 수평 해상도가 다른 자료의 경우, CDO를 통한 내삽을 이용하여 KIM과 동일한 해상도로 분석을 수행하였다.

나) 예측성 진단

KIM의 정량적인 예측성 평가를 수행하기 위해 ACC 및 RMSE를 이용하였다. 이상상관계수 및 평균제곱근 오차는 다음과 같이 정의된다.

$$ACC \equiv \frac{\sum_{i=1}^n w_i (f_i - \bar{f})(a_i - \bar{a})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n w_i (f_i - \bar{f})^2 \sum_{i=1}^n w_i (a_i - \bar{a})^2}}, \quad (-1 \leq ACC \leq 1),$$

$$f_i = F_i - C_i, \quad \bar{f} = \left(\sum_{i=1}^n w_i f_i \right) / \sum_{i=1}^n w_i,$$

$$a_i = A_i - C_i, \quad \bar{a} = \left(\sum_{i=1}^n w_i a_i \right) / \sum_{i=1}^n w_i,$$

$$RMSE \equiv \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i D_i^2} / \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i},$$

여기서 n 은 분석하고자 하는 샘플의 개수를 의미하며, w 는 가중치 계수를, F 는 예측값을, C 는 기후값을, A 는 검증값, D 는 예측장과 검증값을 뺀 오차를 의미한다. 여기서 가중치는 극지역의 오차 효과가 과하게 반영되는 것을 피하기 위해, 위도에 따른 가중치($w = 1/\cos\phi$)를 고려하였다. 기후값은 Jung and Leutbecher (2008)에서 제시된 방식을 사용하였으며, 계산을 위해 ERA5의 1991년부터 2020년까지 30년 기간에 대한 자료를 이용하였다. 이상상관계수는 -1 이상 1 이하의 값을 가지며, 1에 가까울수록 예측장이 실제 배경장에 가까운 결과를 모의함을, -1에 가까울수록 배경장과 반대의 위상을 모의함을 의미한다. 이와 반대로 0에 가까울수록 예측장의 오차가 커져, 예보로 활용하기

어려움을 의미한다. 평균제곱근 오차의 경우, 0이상의 값으로 나타나며, 0에 가까울수록 예측장과 실제 배경장이 유사함을 의미한다.

다) Wave Activity Flux 계산

대기의 순환장에 대한 이해를 돕기 위해 로스비파의 에너지 전파구조를 파악할 수 있는 WAF (Wave Activity Flux)를 사용하였다. Takaya and Nakamura (2001)에서 제시된 3차원 WAF를 이용하여, KIM에서 발생하는 다양한 현상 및 관련 오차 전파 특성을 파악하고자 하였다. 여기서 WAF는 다음과 같이 정의된다.

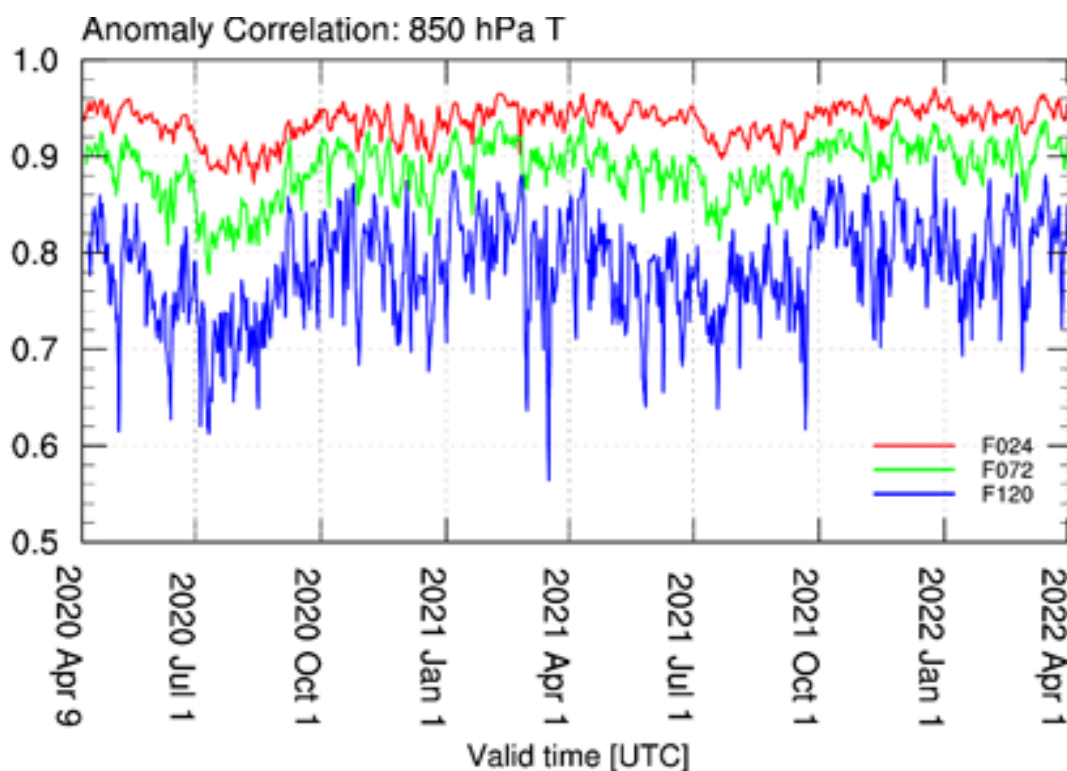
$$\mathbf{W} = \frac{p \cos \varphi}{2|\mathbf{U}|} \left(\begin{array}{l} \frac{U}{a^2 \cos^2 \varphi} \left[\left(\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \right)^2 - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda^2} \right] + \frac{V}{a^2 \cos \varphi} \left[\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \frac{\partial \psi'}{\partial \varphi} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda \partial \varphi} \right] \\ \frac{U}{a^2 \cos \varphi} \left[\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \frac{\partial \psi'}{\partial \varphi} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda \partial \varphi} \right] + \frac{V}{a^2} \left[\left(\frac{\partial \psi'}{\partial \varphi} \right)^2 - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \varphi^2} \right] \\ \frac{f_0^2}{N^2} \left\{ \frac{U}{a \cos \varphi} \left[\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \frac{\partial \psi'}{\partial z} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda \partial z} \right] + \frac{V}{a} \left[\frac{\partial \psi'}{\partial \varphi} \frac{\partial \psi'}{\partial z} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \varphi \partial z} \right] \right\} \end{array} \right) + C_U M$$

U, V는 각각 동서, 남북 배경 바람장(일반적으로 기후값을 사용)을, a는 지구 반경, f_0 는 코리올리 파라미터, N^2 는 부력진동수, p는 기압, λ , φ , z 는 각각 경도, 위도, 연직 좌표를 의미한다. ψ' 는 지위고도의 아노말리로부터 계산된 유선함수의 섭동을 의미하며, 앞서 ERA5를 이용해 계산된 지위고도의 기후값으로부터의 편차를 이용하여 계산하였다. $C_U M$ 은 위상의 전파 효과를 의미하며, \mathbf{W} 는 WAF를 의미한다. WAF는 파동 에너지가 어느 방향으로 전파되는지를 의미하며, KIM에서의 배경장 오차에 따른 전파 특성의 변화를 파악하고자 하였다.

2) 북반구 고위도 하층 온도 및 지위고도 오차 분석

가) 북반구 고위도 하층 온도 오차

KIM의 북반구 고위도 지역 오차 진단을 위해, 현업 운영 기간부터 1일, 3일, 5일 예측시간에 대한 850 hPa 온도의 이상상관계수를 계산하였다(<그림 1.1.2>). ERA5 재분석자료의 온도장을 참 값으로 가정하고 북반구의 예측성에 집중하기 위하여 북반구 지역에 대해서만 면적가중평균을 적용하여 계산을 수행하였다. 예측시간에 따른 이상상관계수의 결과는 유사한 특성을 보이거나 전반적으로 2020년 여름철 예측성 낮은 결과를 보이며, 예측시간에 따른 예측성의 감소도 큰 것으로 보아, 해당 시기에 850 hPa 온도 오차의 성장이 다른 계절에 비해 두드러지게 큰 것을 확인할 수 있다.

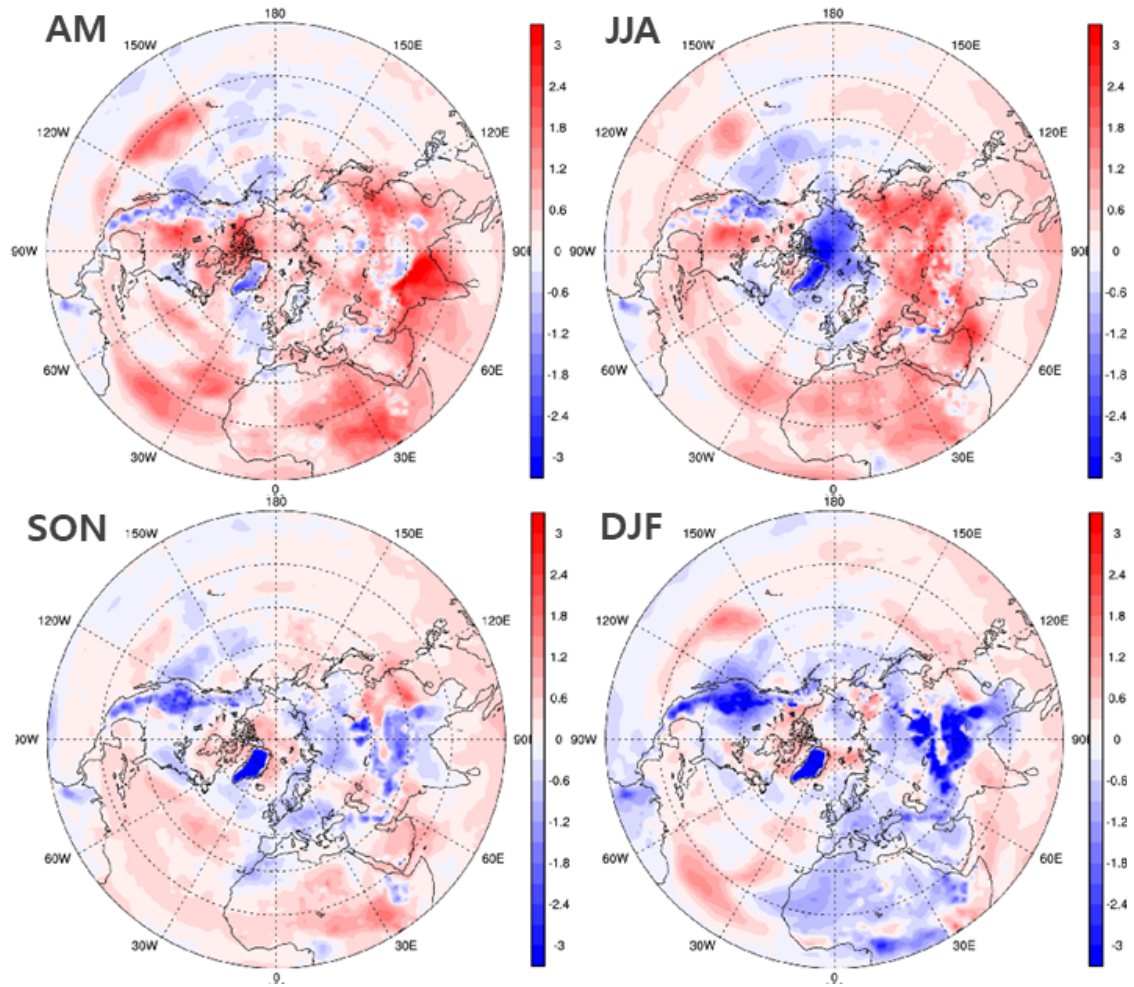


<그림 1.1.2> 850 hPa 온도에 대한 ERA5대비 KIM의 이상상관계수 결과. 1일, 3일 5일 예측결과는 각각 빨간색, 초록색, 파란색 실선으로 표시함.

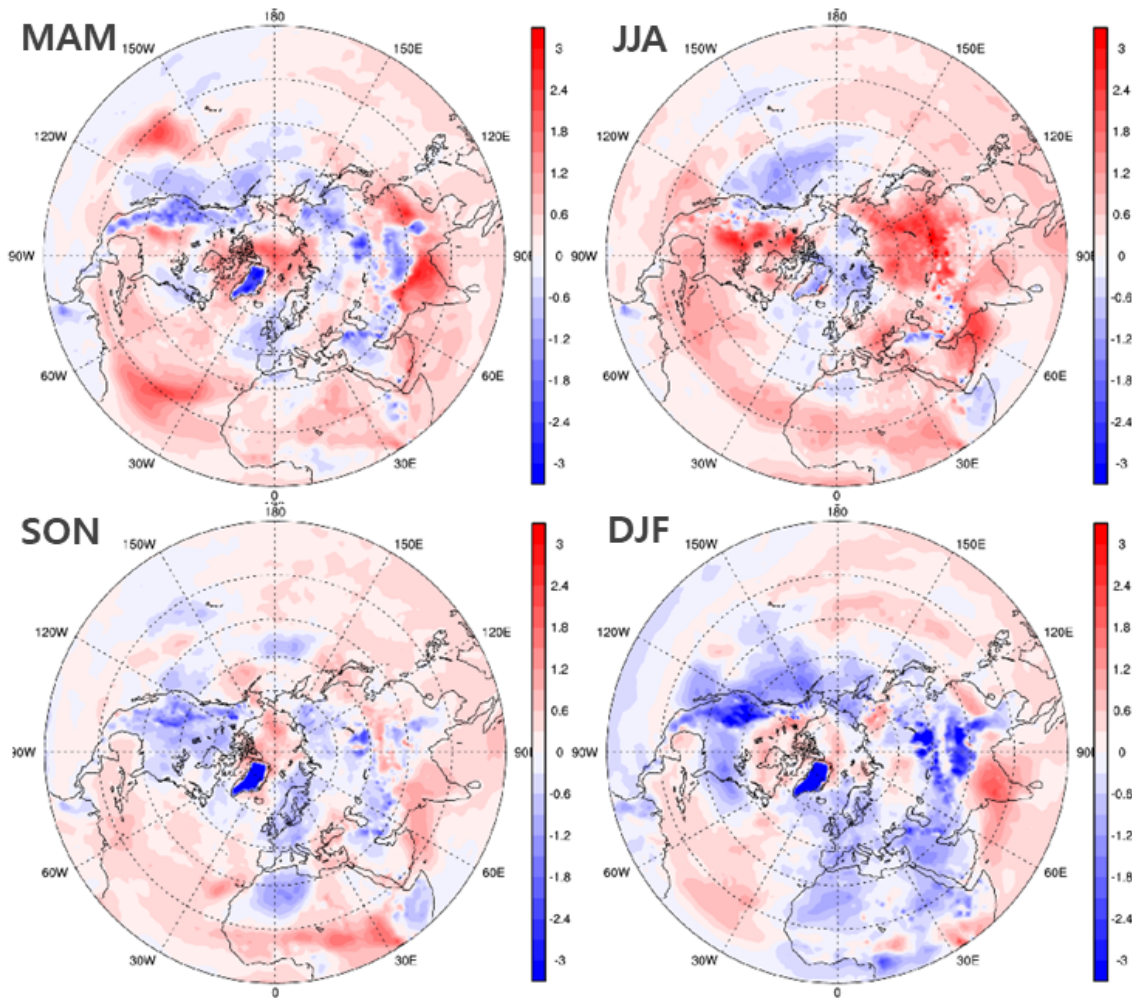
예측장의 계절적인 온도 분포를 살펴보면 2020년 여름철에 나타나는 상대적으로 낮은 예측성은 북극해에서 나타나는 한랭 편차와 더불어 북반구 대륙에 넓게 분포한 온난 편차에 기인한다(〈그림 1.1.3〉 참고). 북극해 지역에서의 한랭편차는 2021년 여름철에 대해서 개선이 되었지만(〈그림 1.1.4〉), 시베리아 및 북아메리카 내륙을 중심으로 분포한 온난 편차는 2021년 여름에도 나타나고 있어 KIM의 하층온도 예측성을 낮추는 요인으로 판단된다. 추가로 겨울철 역시 몽골, 시베리아 내륙, 및 로키 산맥을 중심으로 한랭 편차가 나타나, 내륙에 대한 KIM의 온도 오차 개선이 필요할 것으로 판단된다. 또한 모든 계절에서 그린란드를 중심으로 한랭편차가 나타나, 해당 지역에 대한 오차의 개선이 지속적으로 필요할 것으로 보인다. 특히 북반구 여름철에 내륙지역에서 나타나는 온난 편차는 대류권 하층까지 연직으로 이어진 구조를 보이는 것을 확인하였다(〈그림 1.1.5-6〉). 봄철의 경우, 다른 계절과 다르게 인도 내륙에서 온난 편차가 강하게 나타나며, 이러한 오차는 아프리카 대륙의 사하라 지역부터 동아시아에 걸쳐서 넓게 나타난다. 이러한 여름철 및 봄철의 온난 편차는 태평양 및 대서양에서도 일부 나타나, 지면 조건 이외에도 다양한 오차 발생 메커니즘이 존재하는 것으로 판단된다.

내륙지역의 오차는 지표면까지 잘 이어진 특성으로 파악할 때 지면 모델, 눈덮힘 및 토양수분과 같은 지면 상태의 처방, 그리고 지형고도와 관련이 있는 것으로 판단되며, 일부 대류권 하층에서 발생한 해양지역의 온난 편차는 지표면 근처까지 확장되지 않는 특성으로 판단할 때 지표면 조건보다는 초기 순환장 편차에도 영향을 받을 수 있을 것으로 판단된다. 이밖에 지표면 근처에서 발생하는 온도편차는 구름-복사 과정에도 영향을 받을 수 있어 대기 하층 온도 편차에 대한 추가적인 분석이 요구된다.

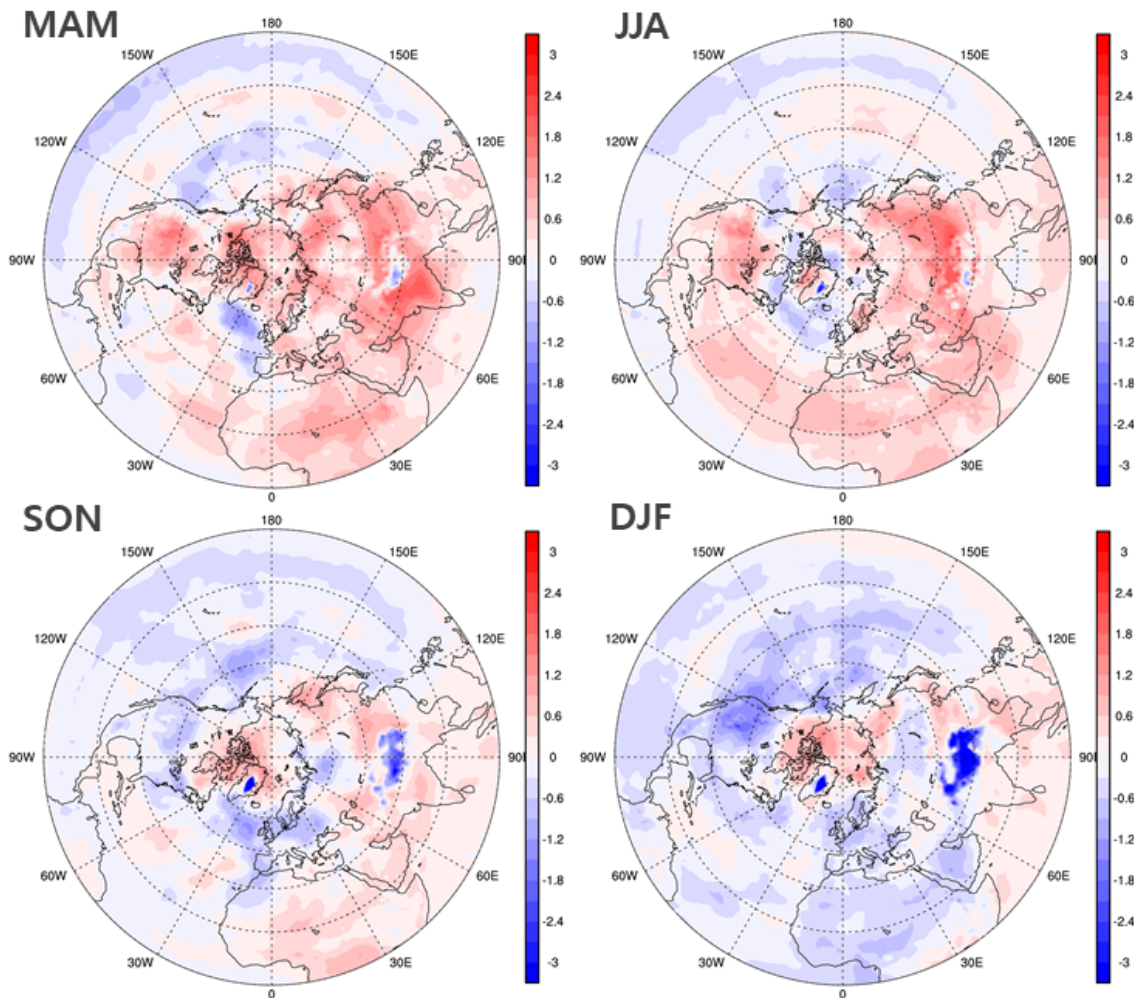
이러한 하층 온도의 편차는 정역학 평형을 통해서 대류권 지위고도의 예측에 영향을 미칠 수 있으므로 이에 대한 분석을 추가로 수행하였다.



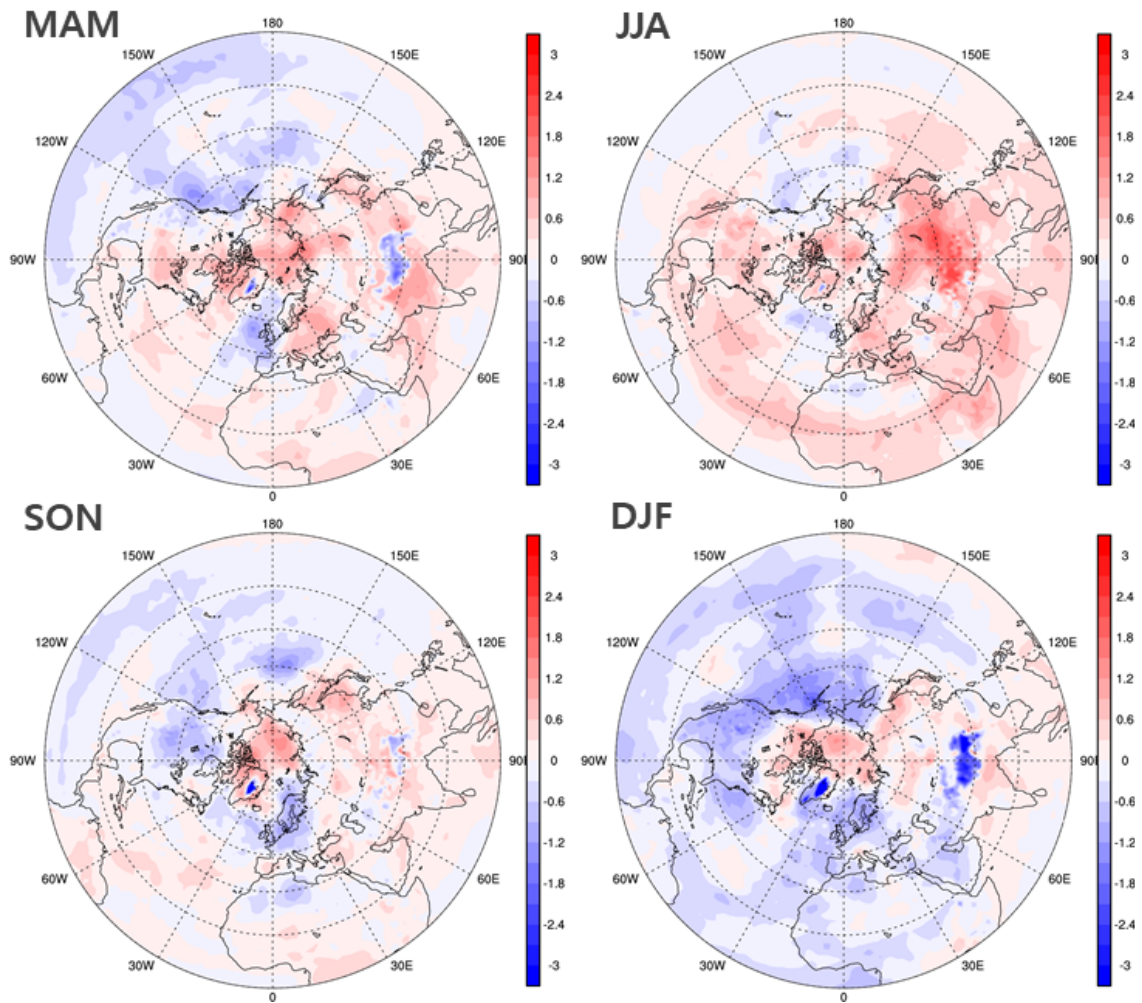
<그림 1.1.3> 2020년 계절별 850 hPa 온도(단위 K)에 대한 KIM의 5일 예측장 편차(KIM-ERA5). 좌측 상단부터 순서대로 2020년 봄철, 여름철, 가을철, 겨울철에 대한 편차를 나타냄.



<그림 1.1.4> 2021년 계절별 850 hPa 온도(단위 K)에 대한 KIM의 5일 예측장 편차(KIM-ERA5). 좌측 상단부터 순서대로 2021년 봄철, 여름철, 가을철, 겨울철에 대한 편차를 나타냄.



<그림 1.1.5> 2020년 계절별 700 hPa 온도(단위 K)에 대한 KIM의 5일 예측장 편차(KIM-ERA5). 좌측 상단부터 순서대로 2020년 봄철, 여름철, 가을철, 겨울철에 대한 편차를 나타냄.

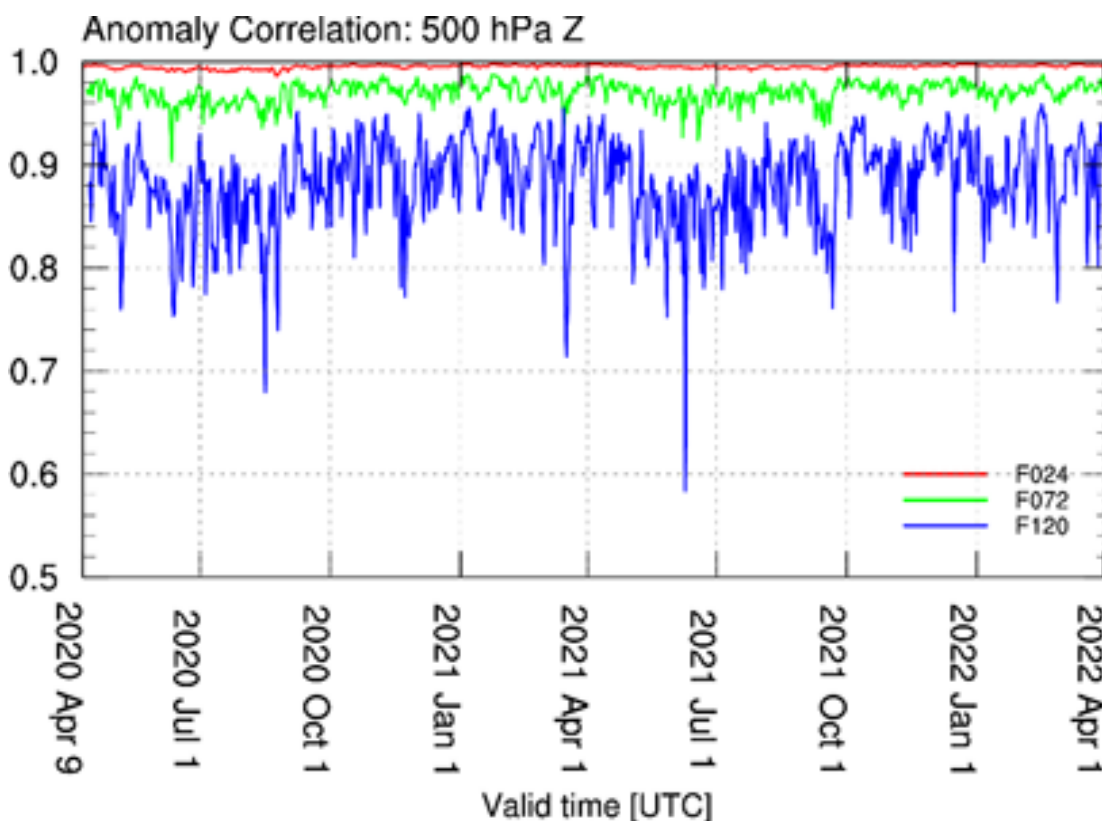


<그림 1.1.6> 2021년 계절별 700 hPa 온도(단위 K)에 대한 KIM의 5일 예측장 편차(KIM-ERA5). 좌측 상단부터 순서대로 2021년 봄철, 여름철, 가을철, 겨울철에 대한 편차를 나타냄.

나) 북반구 고위도 지위고도 오차

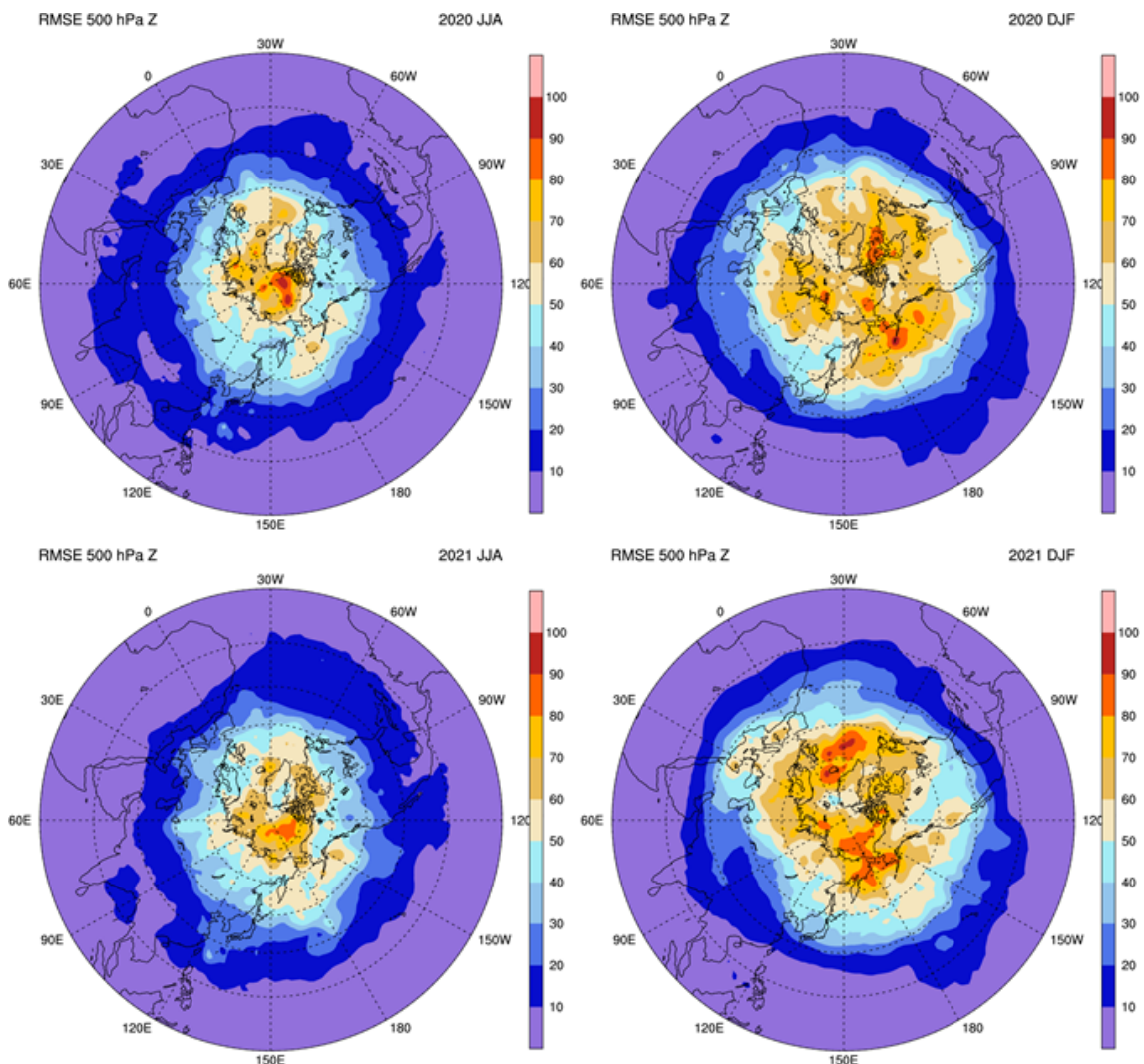
북반구 고위도에 대한 KIM의 500 hPa 지위고도 오차 진단을 위해, 앞서 분석한 850 hPa의 온도와 동일한 방법으로 500 hPa의 지위고도에 대한 이상상관계수를 계산하였다(<그림 1.1.7>). KIM의 초기장 및 1일 예측장은 오차가 거의 없으나, 예측시간이 길어질수록 오차가 빠르게 성장하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 오차 성장은 다른 계절에 비해 여름철에서 크게 나타나며, 이상상관계수가 크게 감소하는 사례들이 여름철에 자주 발생한다.

<그림 1.1.8>은 2020년과 2021년의 여름철 및 겨울철에 대한 KIM의 500 hPa 지위고도 RMSE이다. 겨울철과 비교하였을 때, 여름철 RMSE 오차의 대부분이 북극해 및 고위도에 집중되어 있음을 확인할 수 있다.



<그림 1.1.7> 500 hPa 지위고도에 대한 KIM의 ACC결과. 1일, 3일 5일 예측 결과는 각각 빨간색, 초록색, 파란색 실선으로 표시함.

이는 다른 계절에 비해 상대적으로 낮은 여름철의 이상상관계수가 북극해를 중심으로 한 북반구 고위도의 오차에서 기인한 것이며, KIM의 중위도의 일기예측성 또한 해당 오차에 영향을 받을 수 있음을 암시한다. 고위도 오차에 따른 영향을 확인하고자, 북반구에서의 오차가 가장 큰 사례인 2020년 8월 16일 사례(이상상관계수: 0.68)와 2021년 6월 9일 사례(이상상관계수: 0.58)에 대한 추가적인 분석을 수행하였으며, 해당 내용은 4) 북반구 고위도 오차의 중위도 예측성 영향에서 자세히 서술하였다.



<그림 1.1.8> 500 hPa 지위고도(단위 gpm)에 대한 KIM의 RMSE결과. 5일 예측장에 대해 계산하였으며, 좌측 상단부터 순서대로 2020년 여름철, 겨울철, 2021년 여름철, 겨울철에 대한 결과임.

3) 북반구 고위도 오차의 물리적 원인 진단

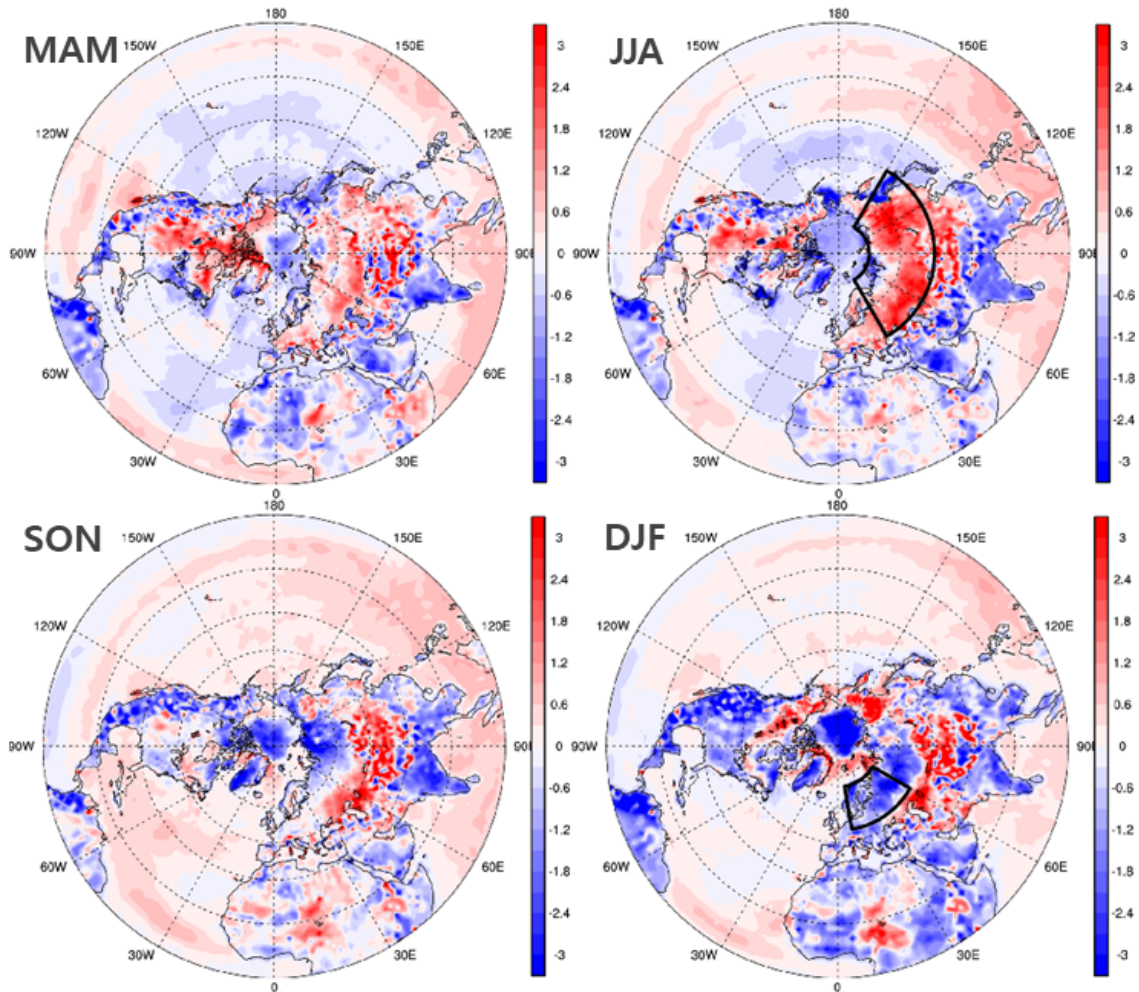
가) 2 m 온도 오차

<그림 1.1.9-10>은 KIM의 5일 예측 2 m 온도 편차(KIM-ERA5)를 나타낸 것이다. KIM 예측장에서는 북반구 여름 기간 동안 내륙에서 강한 온난 편차가 나타난다. 이러한 온난 편차는 2020년과 지면조건이 개선된 2021년에도 동일하게 나타나며, 대류권 하층에서 나타나는 온난 편차와 유사한 공간 패턴을 보인다 (<그림 1.1.3-6> 참고). 북반구 가을에도 이와 유사한 온난 편차가 유라시아 대륙에 나타나지만, 여름철에 비해 연직으로의 연관성이 다소 약하게 나타난다.

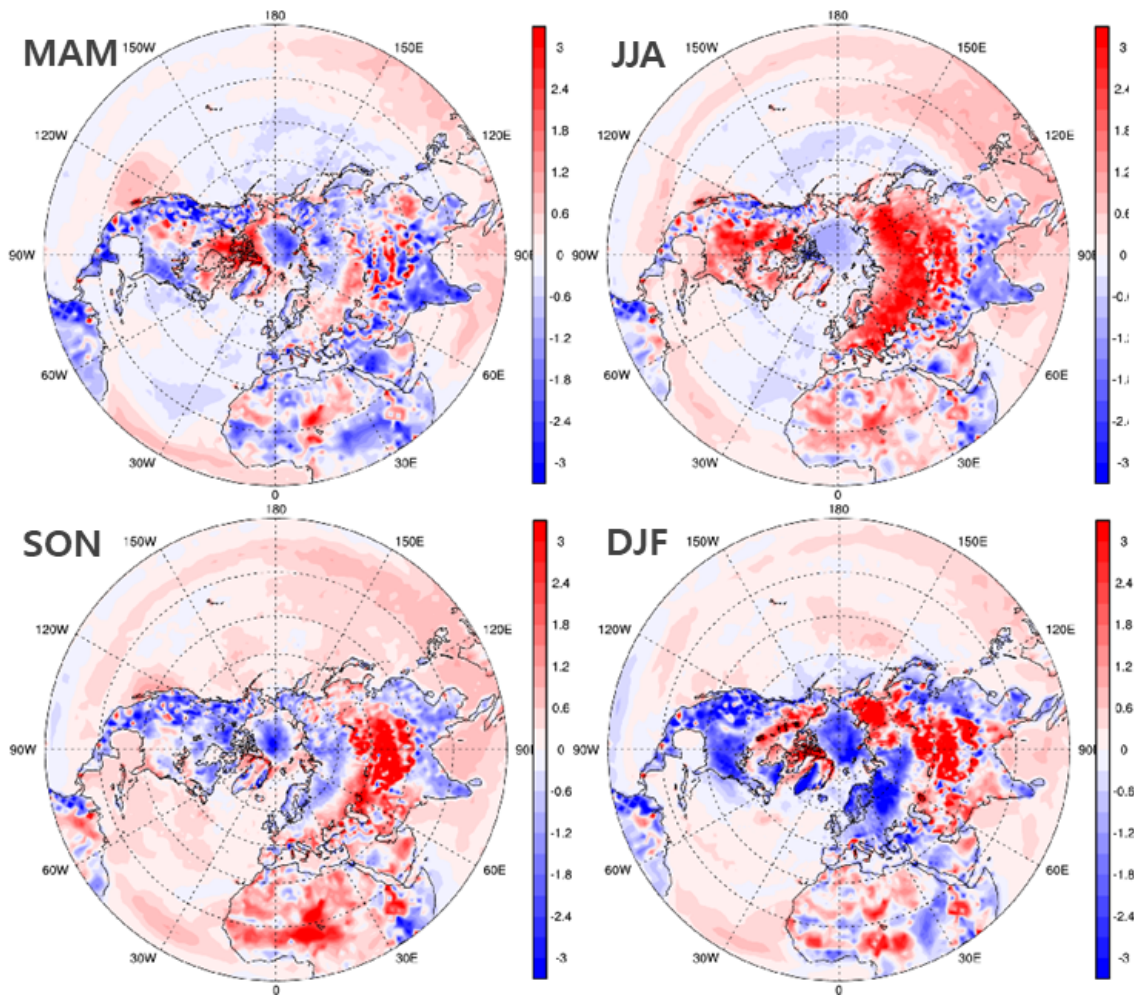
겨울철의 경우, 로키산맥과 북유럽을 중심으로 한랭편차가 나타나며, 유라시아 대륙에서는 온난 편차를 보인다. 그러나 여름철과 다르게 2 m 온도와 대류권 하층(850 hPa)과의 연관성은 약하게 나타난다. 봄철의 경우, 북아메리카와 유라시아 내륙에서 온난 편차가, 로키 산맥에서는 한랭편차가 나타나나, 850 hPa의 여름철에 비해 그 공간 분포가 뚜렷하지 않다. 태평양 및 대서양 지역의 지표면 대기 온도도 대류권 하층 850 hPa의 온난 편차와는 다른 분포를 보여 해양에서의 지표면 대기 온도로 대류권의 온도 오차를 설명하기는 어렵다. 다른 계절에 비해 여름철의 2 m 온도의 편차가 대류권 하층까지 영향을 미치며, 850 hPa 온도에 대한 이상상관계수가 여름철에 낮게 나타나는 원인으로 판단된다.

여름철에 유라시아 대륙에서 나타나는 온난 편차와 겨울철에 유럽에서 나타나는 한랭편차의 시간적 변화를 이해하기 위해, 초기 자료가 00 UTC를 기준으로 초기화된 예측장의 2 m 온도 편차를 분석하였다. 각 영역은 온도편차를 기준으로 유라시아의 경우, 45N-75N, 30E-150E 를, 유럽의 경우, 50N-70N, 10E-60E 로 선정하였으며, 해당지역은 <그림1.1.9>에 검은색 박스로 표시하였다. 각 영역에 대한 오차는 2020년 및 2021년 모두 동일한 특성을 보이나 2021년에 오차의 강도가 더 강하게 나타나는 특성을

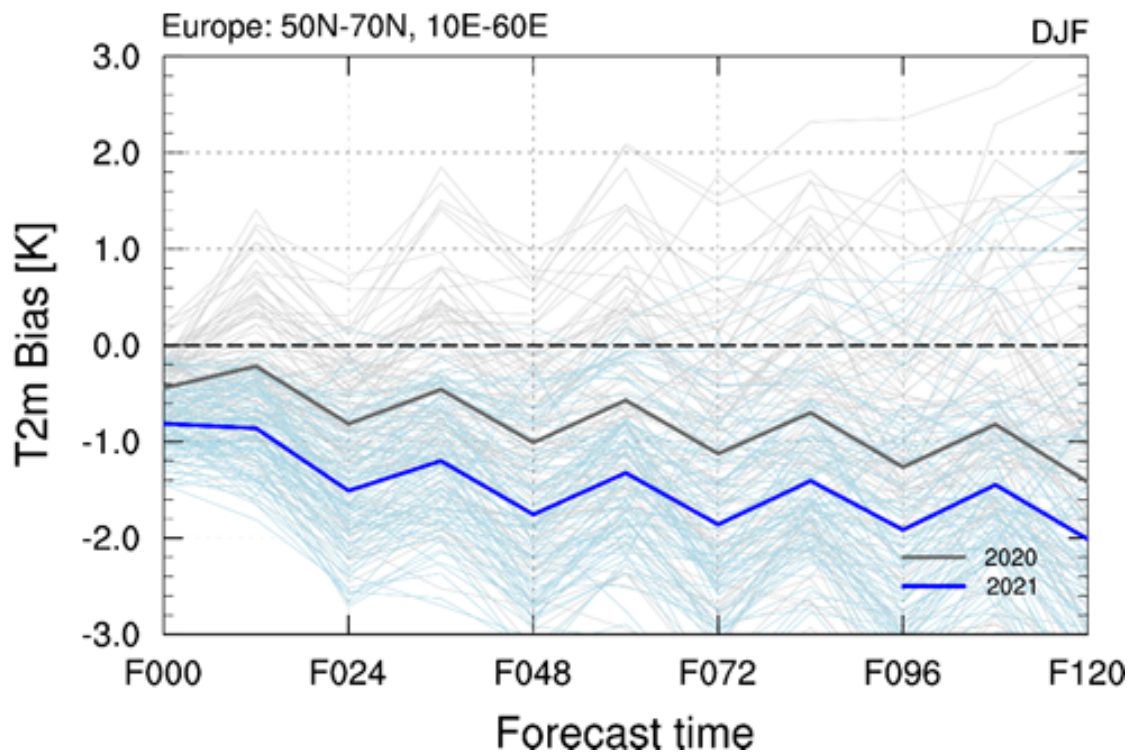
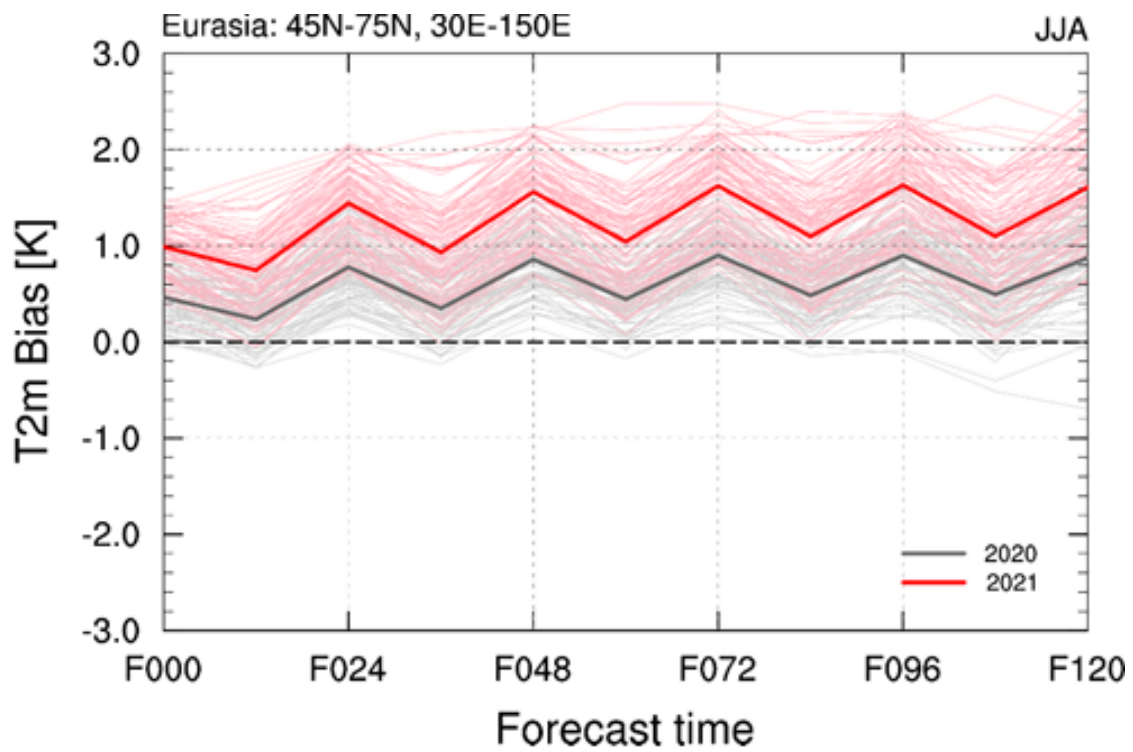
보인다. 해당 오차는 예측시간이 증가할수록 오차가 증폭되나, 초기 시간부터 발견됨을 확인할 수 있어, 모델의 물리적인 특성 개선 이외에도 초기화 과정을 통해 개선할 수 있는 부분이 있는 것으로 판단된다.



<그림 1.1.9> 2020년 계절별 2 m 온도(단위 K)에 대한 KIM의 5일 예측장 편차(KIM-ERA5). 좌측 상단부터 순서대로 2020년 봄철, 여름철, 가을철, 겨울철에 대한 편차를 나타냄. 유라시아 및 유럽의 온도 편차를 분석하기 위해 검은색 박스로 표시함.



<그림 1.1.10> 2021년 계절별 2 m 온도(단위 K)에 대한 KIM의 5일 예측장 편차(KIM-ERA5). 좌측 상단부터 순서대로 2021년 봄철, 여름철, 가을철, 겨울철에 대한 편차를 나타냄.



<그림 1.1.11> 유라시아 및 유럽 영역에 대한 2 m 온도(단위 K)에 대한 KIM의 5일 예측장 편차(KIM-ERA5). 위쪽부터 순서대로 여름철 유라시아 대륙의 온난 편차와 겨울철 유럽의 한랭편차 결과를 나타냄.

나) 토양 수분 오차

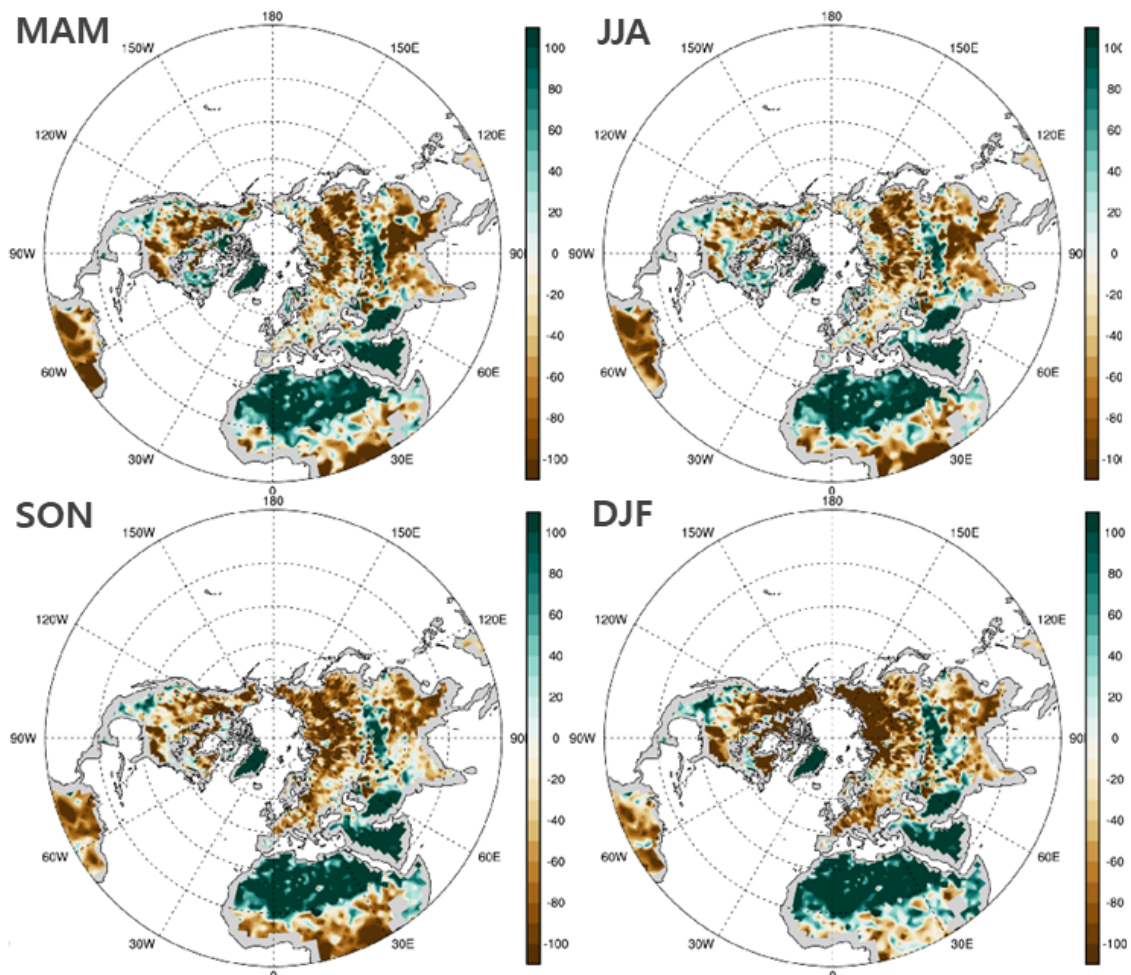
Ardilouze et al. (2017)에서는 모델에 처방된 토양 수분의 개선을 통해 2m 온도의 편차를 상당 부분 개선할 수 있음을 제시하였다. 이러한 선행연구 결과를 토대로 KIM에서의 토양 수분 및 2m 온도 편차의 연관성을 파악하였다. KIM과 ERA5는 토양 수분층의 두께가 다르므로 동등한 비교를 위해 지상부터 1m 깊이까지 누적한 토양 수분의 편차를 계절별로 분석하였다(〈그림 1.1.12-13〉).

모든 계절에서 KIM의 토양 수분이 유라시아 및 북아메리카 내륙에서 적게 나타나는 특성이 있으며, 이러한 특징은 2020년 및 2021년 둘 다 동일하게 나타난다. KIM 모델이 ERA5와 비교하였을 때 전반적으로 건조한 지표면 토양을 보이나 자세한 공간 분포는 여름철을 제외하면 연도별로 다소 차이가 있다. 봄철의 경우, 2020년에 비해 2021년에 더 광범위하게 유라시아 대륙에서 건조한 상태가 확인된다. 가을철과 겨울철에는 2020년에 고위도 유라시아 대륙에 건조한 토양 분포가 집중되어 나타난다면, 2021년에는 유럽에서부터 유라시아 대륙까지 길게 이어지는 지역에서 건조한 토양 상태가 나타난다.

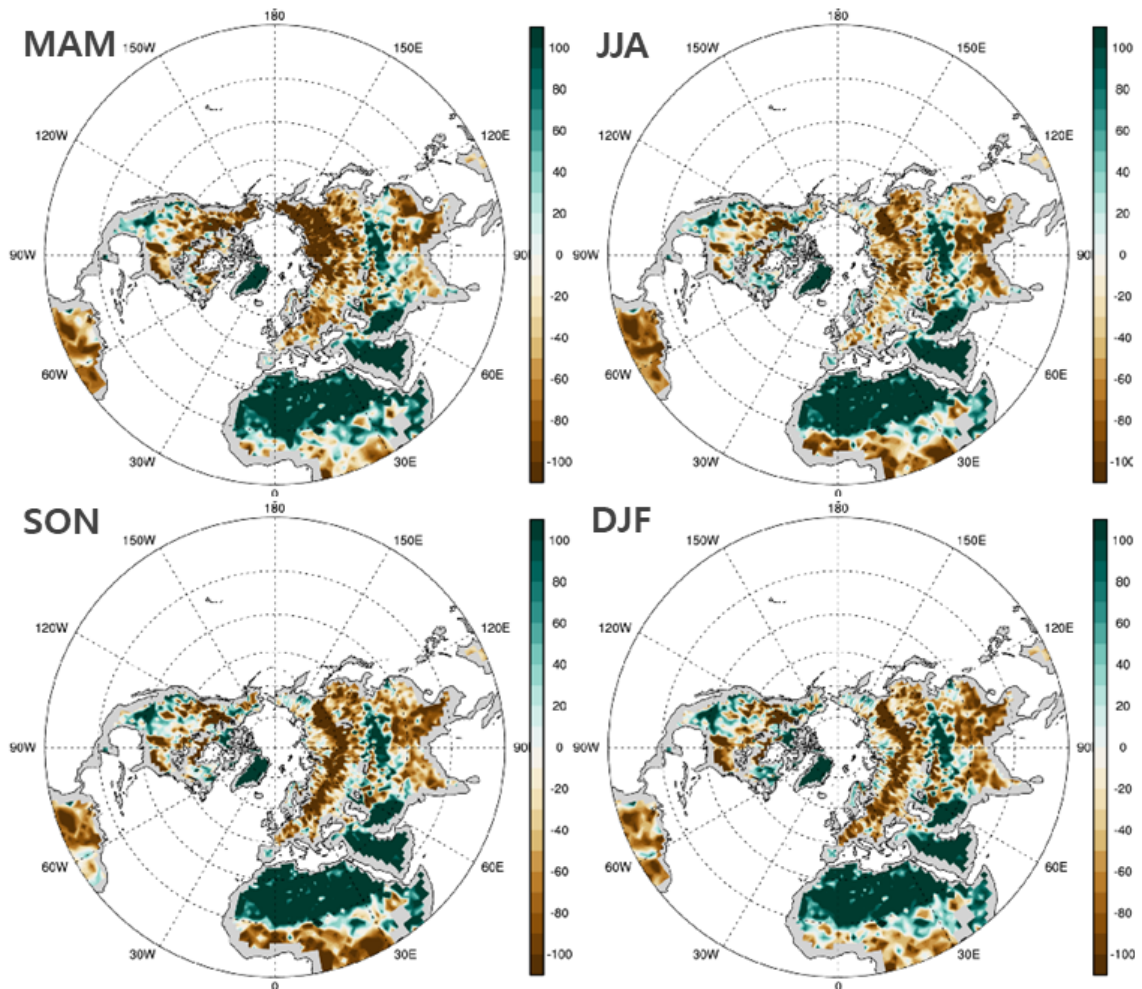
KIM에서 여름철 유라시아 내륙에서의 건조한 토양 수분은 2m 온도의 온난 편차와 유사한 공간 분포를 보인다. 그러나 여름철을 제외하고는 다른 계절에서 두 변수 간 유의한 관계를 확인하기 어렵다. 토양수분의 분포는 지표 토양의 열용량에 영향을 주어 지표 및 지표면 부근의 온도에 영향을 줄 수 있으나, 이 밖에도 운량 및 복사량과 같은 다른 물리적인 요인들과도 상호작용하여 KIM의 하층 온도 오차 발생에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 다른 물리적 요인들의 연관성에 대한 조사가 필요하다.

이와 반대로 사하라 사막과 같이 토양 수분이 매우 적은 사막지역에서는 KIM에서 ERA5 보다 높은 토양 수분이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 모든 계절에서 유사하게 나타나나, 해당지역에서 앞서 〈그림 1.1.9-10〉에서 보인 2m 온도와 유의한 연관성을 찾아보기는 어렵다.

KIM의 토양 수분 오차는 초기장에서도 동일한 결과를 보인다. 모델의 토양 수분은 강수 및 지면모델을 통해서 시간에 따라 바뀔 수 있으나, KIM 모델에서 나타나는 토양수분의 차이는 초기화의 영향이 더 큰 것으로 보이며, 초기장의 조정을 통해서 토양수분이 모델의 하층 온도편차에 미치는 영향을 쉽게 테스트해 볼 수 있을 것으로 보인다. 추가로 2020년과 2021년 여름철의 토양수분 차이가 크지 않음에도 불구하고 하층 온도의 편차가 큰 것을 감안할 때, 토양 수분 이외에도 구름 및 복사 등 여러 가지 물리적 과정이 하층온도 편차와 관련된 것으로 추정된다.



<그림 1.1.12> 2020년 계절별 1 m 누적 토양 수분(단위 kg m^{-2})에 대한 KIM의 5일 예측장 편차(KIM-ERA5). 좌측 상단부터 순서대로 2020년 봄철, 여름철, 가을철, 겨울철에 대한 편차를 나타냄.



<그림 1.1.13> 2021년 계절별 1 m 누적 토양 수분(단위 kg m⁻²)에 대한 KIM의 5일 예측장 편차(KIM-ERA5). 좌측 상단부터 순서대로 2021년 봄철, 여름철, 가을철, 겨울철에 대한 편차를 나타냄.

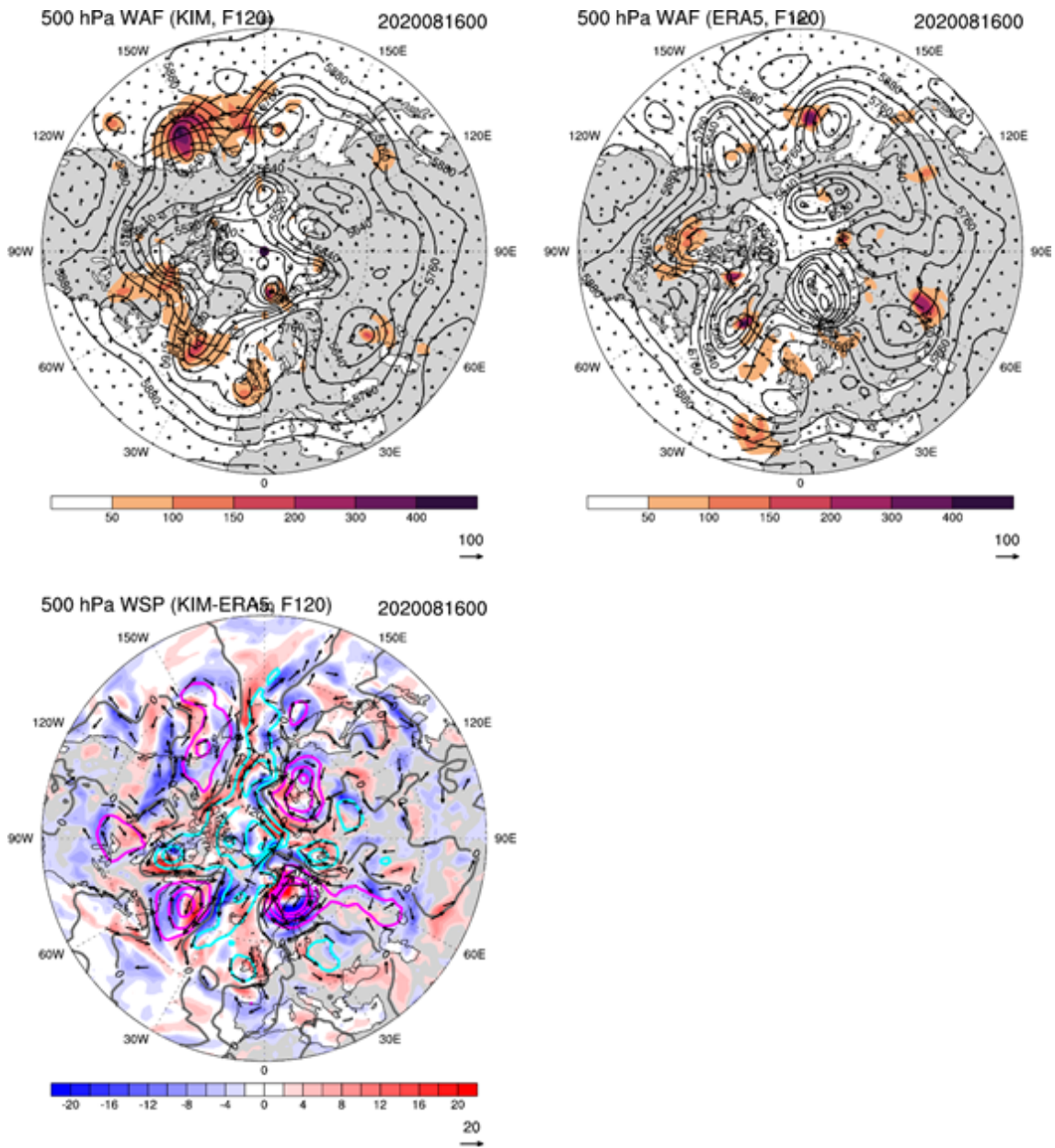
4) 북반구 고위도(및 저위도) 오차의 중위도 예측성 영향

북반구 500 hPa 지위고도 예측성에 영향을 미치는 물리적 원인을 진단하기 위해 <그림 1.1.7>에서 보인 KIM 500 hPa 지위고도에 이상상관계수가 0.7 이하로 낮게 나타난 2개의 사례를 추가로 분석하였다. 두 사례 중 2020년 사례는 북반구 고위도 편차가 중위도로 오차를 유도한 사례로 모델에서 모의되는 북반구 고위도의 상태가 중위도 일기 예측성에 중요한 역할을 할 수 있음을 나타낸다. 추가로 2021년의 사례는 그 오차의 원인이 저위도 지역으로 추정되는 사례로 오차의 저위도 오차의 중위도 전파 특성을 이해하기 위해 분석을 수행하였다.

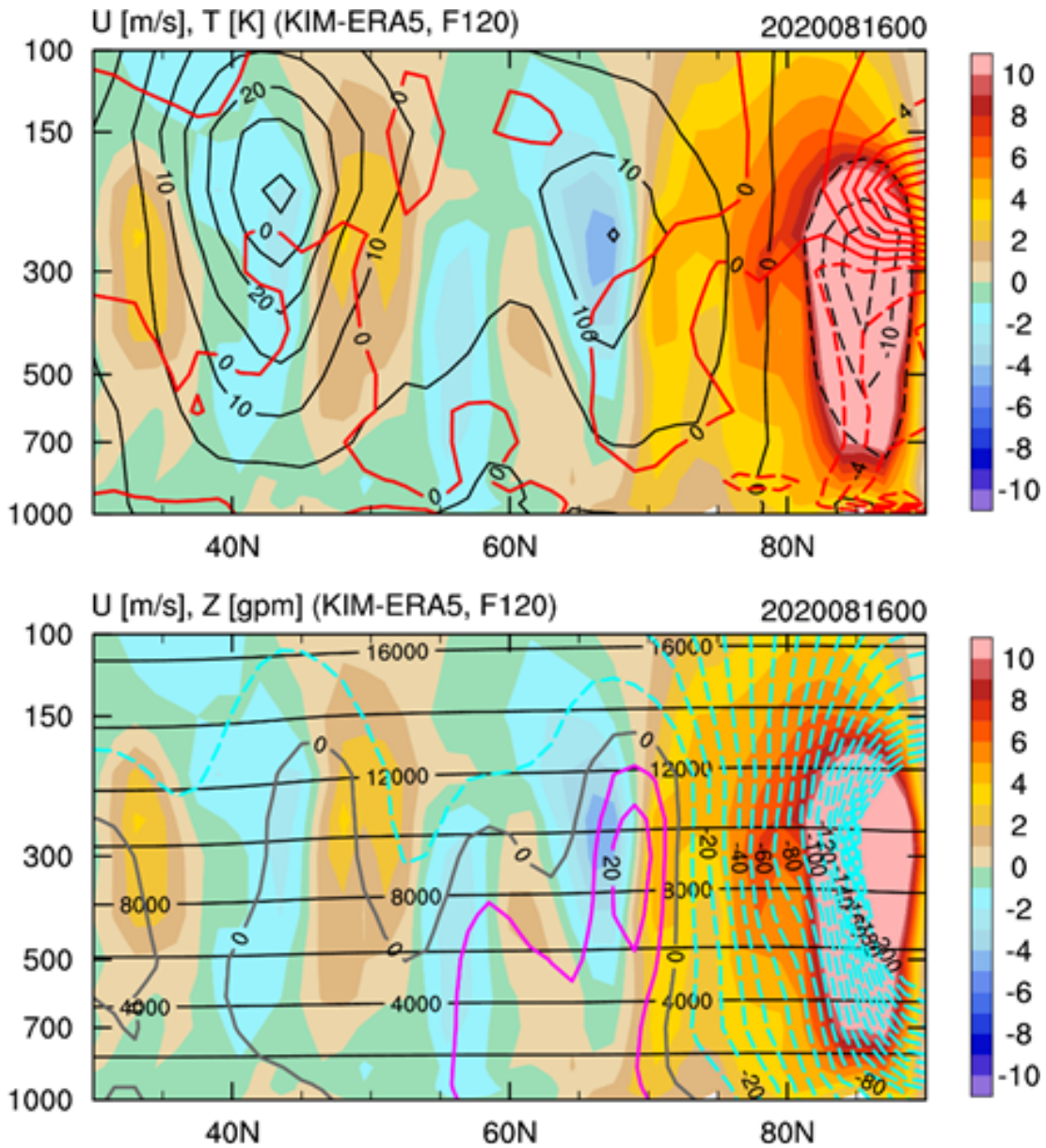
가) 2020년 8월 16일 오차 사례

KIM의 예측성 저하 원인을 분석하기 위해, 2020년 8월 11일을 초기장으로 5일 예측된 2020년 8월 16일 사례를 분석하였다. 해당 사례의 WAF를 분석하였을 때(<그림 1.1.14>), KIM에서의 파동 에너지 전파가 ERA5에 비해 전반적으로 강하게 나타나며, 특히 북태평양과 북대서양에서 강하게 나타난다. 지위고도 분포는 KIM과 ERA5 둘 다 유사하게 모의하는 듯하나, 편차장에서는 극제트의 경계를 따라 고기압, 저기압이 반복해서 나타나는 패턴을 보인다. 이는 KIM에서 극지역의 음의 지위고도 편차로 인해 ERA5에 비해 위상이 밀린 것으로 보이며, 풍속 및 지위고도의 차이를 유발한 것을 확인하였다. 풍속의 편차를 따라 WAF 전파의 차이가 나타나며, 이는 제트의 강도에 따라 파동 에너지의 전파에 영향을 미칠 수 있음을 암시한다.

이러한 지위고도의 편차는 일반적으로 질량장 또는 바람장에 의해서 유도될 수 있으나 전향력의 영향이 강한 고위도 지역에서는 일반적으로 질량장의 영향이 더 큰 것으로 알려져 있다. 따라서 해당 특성을 추가적으로 이해하기 위해 연직 온도 및 지위고도 편차의 특성을 분석하였다(<그림 1.1.15>).



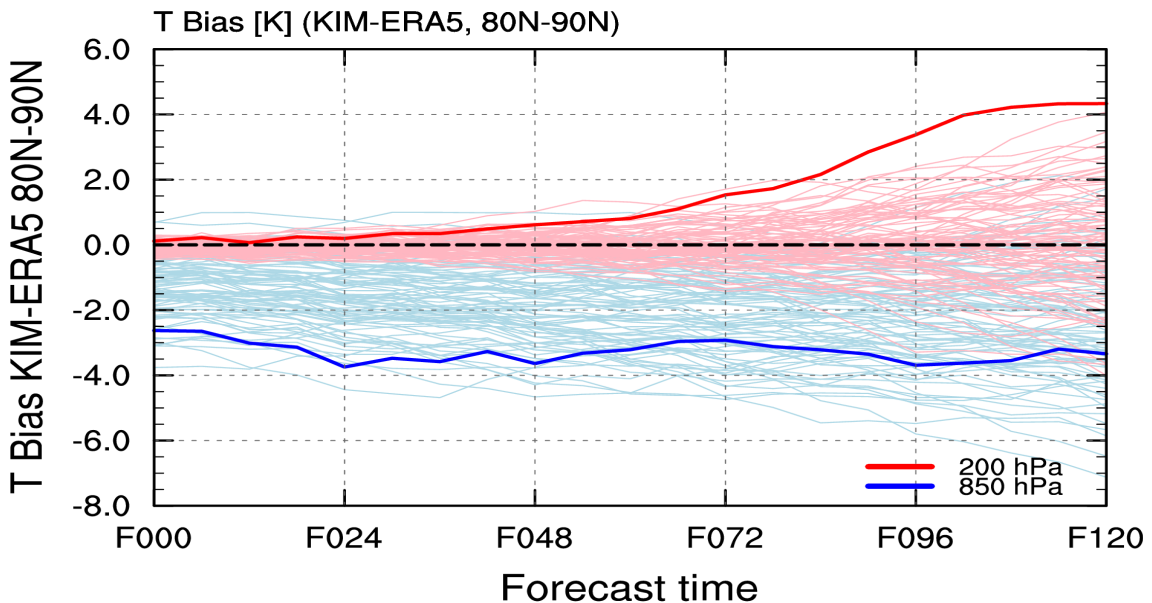
<그림 1.1.14> 2020년 8월 16일 사례에 대한 500 hPa의 KIM의 5일 예측장 편차. 위의 결과는 WAF(벡터, 단위 $m^2 s^{-2}$)와 WAF의 진폭(음영, 단위 $m^2 s^{-2}$), 지위고도(실선, gpm)을 나타내며, 아래는 WAF(벡터, 단위 $m^2 s^{-2}$), 풍속(음영, $m s^{-1}$) 및 지위고도(실선, gpm)의 편차.



<그림 1.1.15> 2020년 8월 16일 사례에 대해 동서평균한 KIM의 5일 예측장편차. 위의 그림은 동서 바람(음영, 단위 $m s^{-1}$)과 온도(실선, 단위 K)의 편차를 나타내며, ERA5의 동서 바람은 검은색 실선으로 표현함. 아래 그림은 동서 바람(음영, 단위 $m s^{-1}$)과 지위고도(실선, 단위 gpm)의 편차를 나타내며, ERA5의 지위고도 역시 검은색으로 표현함.

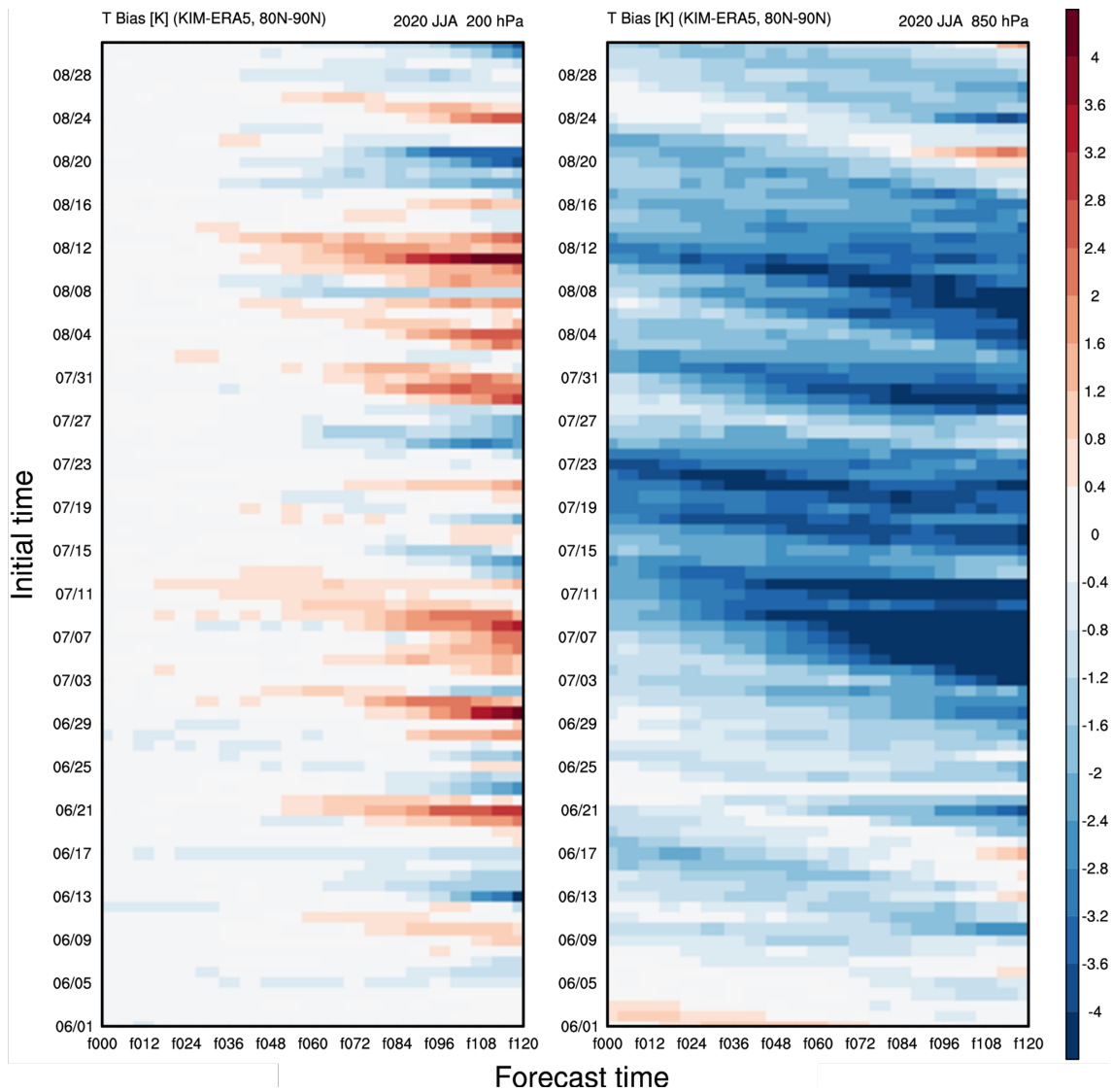
동서 평균된 KIM의 온도장은 극지역에서 뚜렷한 하층 한랭 편차와 상층 온난 편차를 나타내었으며, 이러한 결과는 북극해 주변의 바람장을 10 m/s 이상 증가시켰다. 이러한 바람장의 극향 강화는 일반적으로 북위 60-70도 지역에 나타나는 극제트의 위치와 강도를 변화시킬 수 있다. ERA5에 비해 KIM에서의 강한 WAF의 전파와 극제트 주변에서 반복적으로 나타나는 양과 음의 지위고도의 오차는 극제트의 강도 및 주변 경압성의 차이가 해당 오차에 관련되어 있음을 보이며, 고위도 지역의 하층에서 나타나는 온도의 편차가 대류권을 통해 중위도에 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

예측시간에 따른 KIM에서의 온도 편차를 확인하기 위해, 북위 80도 이상의 지역에 대해 200과 850 hPa의 온도 편차를 확인하였다(<그림 1.1.16>). 2020년 8월 16일 사례에서는 대류권 하층(850 hPa)에서 한랭편차가 대류권 상부 성층권 하부(200 hPa)에서는 온난 편차가 나타나며, 상층의 온난 편차는 시간에 따라서 성장하는 특성을 보이지만, 대류권 하층의 한랭 편차는 초기장부터 존재하는 것을 확인 할 수 있다.



<그림 1.1.16> 2020년 8월 16일 사례의 예측시간 별 KIM의 온도(단위 K) 편차. 편차는 80N-90N 지역에 대해 계산하였으며, 빨간색 실선은 200 hPa를, 파란색 실선은 850 hPa의 편차를 의미함.

해당 연도 여름철 전체(<그림 1.1.16> 열은 선)와 8월 11일 사례(굵은 선)를 비교해 보았을 때, 초기장의 하층 한랭 편차가 일반적으로 큰 값을 보였으나, 하층 온도 오차가 가장 심한 사례는 아니었으며 예측시간에 따라 오차가 성장하는 양상 또한 보이지 않았다. 반면에 상층의 온난 편차의 경우 초기에는 다른 날들과 비슷한 수준의 오차가 나타났지만 예측시간이 길어짐에 따라 다른 날들보다 눈에 띄게 증가하는 모습을 보여준다. 따라서 해당 사례는 초기장의 북극지역에 존재하던 하층 한랭 오차와 이에 따른 반응으로 예측시간에 따라 점점 성장한 상층의 온난 편차가 더 해져 예측성이 저하된 사례인 것을 확인할 수 있다. 상층의 반응은 하층 편차에 대한 정역학 조절 과정(hydrostatic adjustment)에 의한 것으로 보이며 이러한 특성은 여름철의 다른 사례들(<그림 1.1.17> 참고)에서도 살펴볼 수 있다. 그러나 해당 사례와 유사한 수준의 하층 오차가 존재함에도 불구하고 큰 예측성의 저하를 보이지 않는 사례들도 존재하여 하층의 오차가 대기의 온도 구조 및 순환장에 빠르게 반영되는 물리적/역학적 조건이 관련된 것으로 보인다. 추후 KIM의 예측성 개선을 위해서는 고위도 지역의 하층 초기장 개선과 더불어 하층 오차가 상층 및 순환장에 큰 영향을 미치는 사례에 대한 이해가 필요하다.

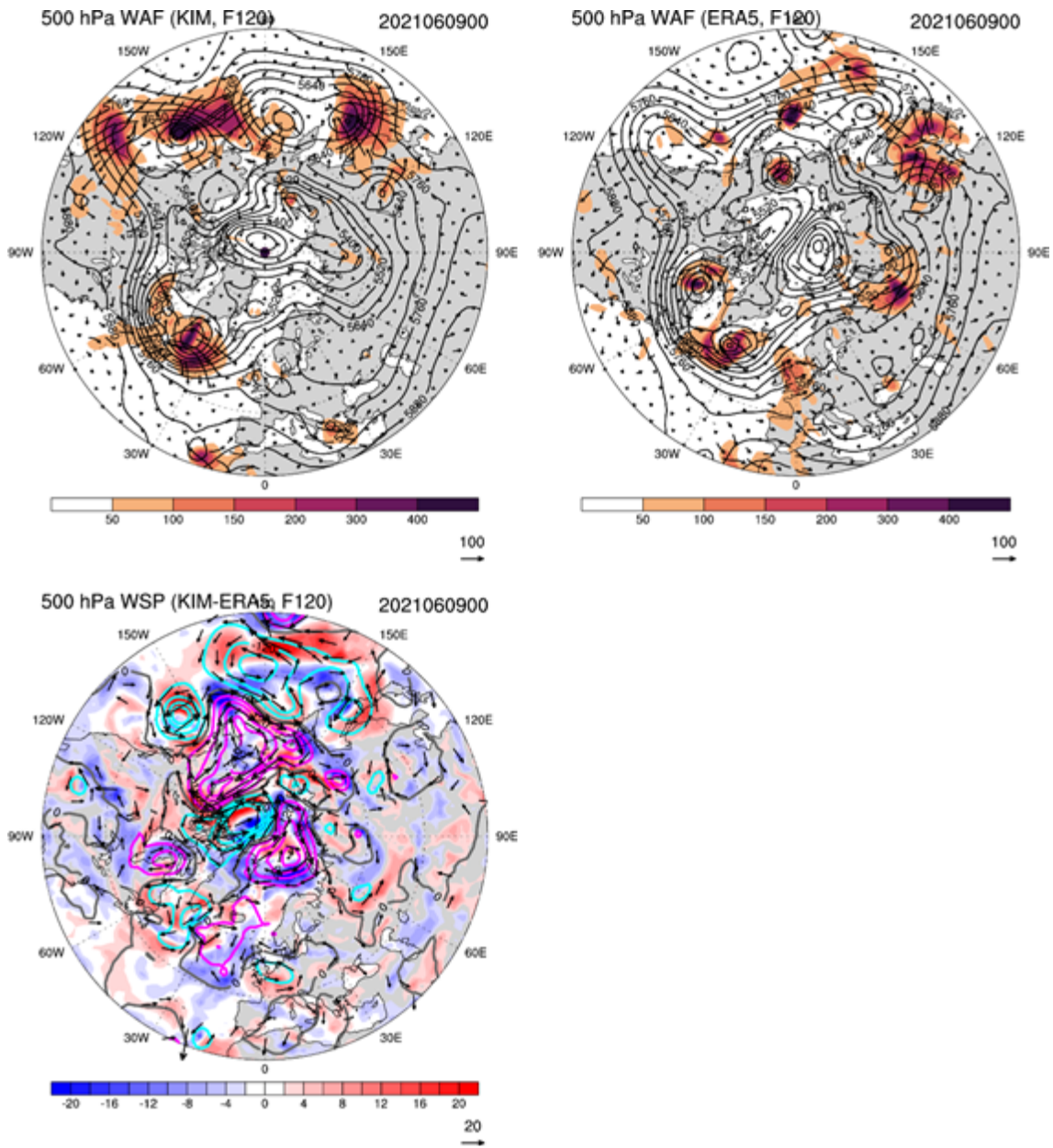


<그림 1.1.17> 2020년 8월 16일 사례의 예측시간 별 KIM의 온도(단위 K) 편차. 편차는 80N-90N 지역에 대해 계산함.

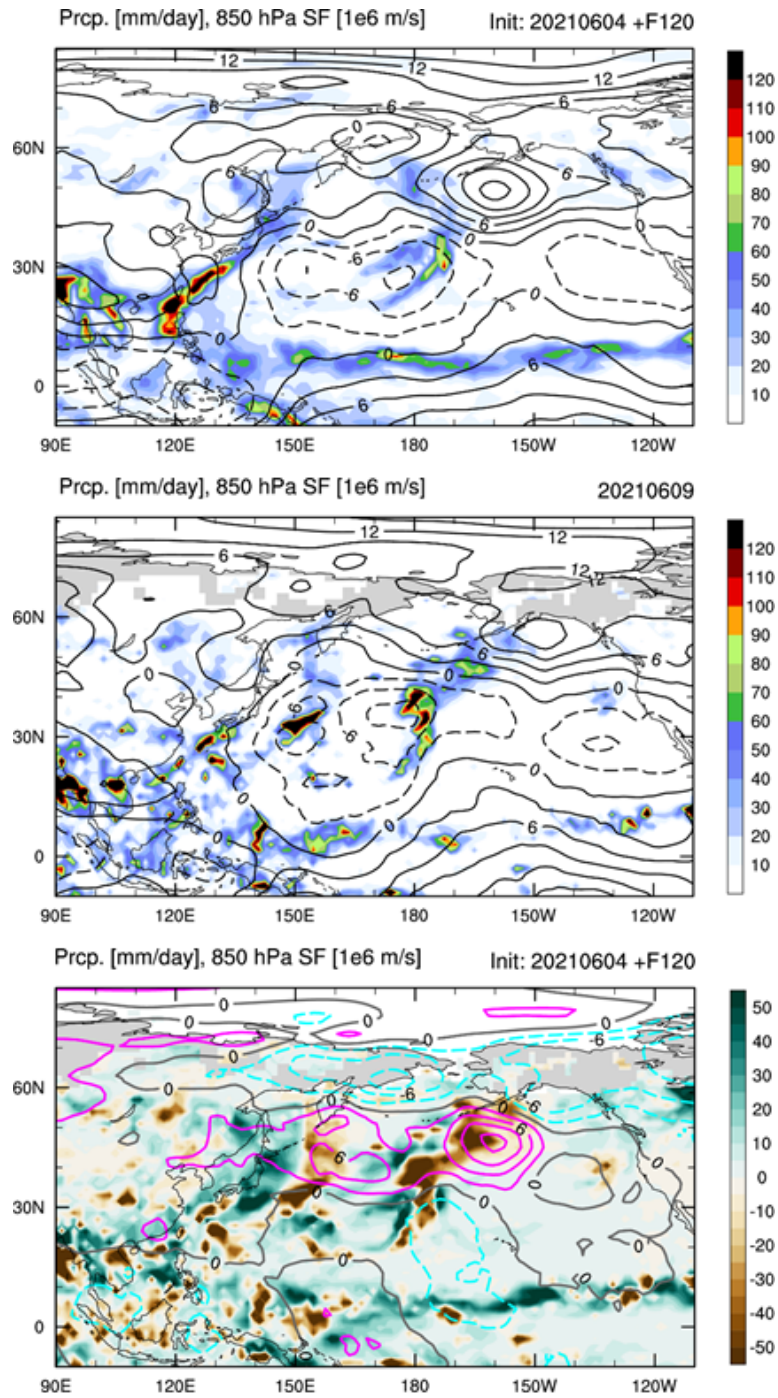
나) 2021년 6월 9일 오차 사례

해당 사례는 KIM의 현업운영 기간 동안 5일 예측 500 hPa 지위고도 이상상관계수를 기준으로 가장 낮은 예측성을 보인 사례이다. 해당 사례를 이해하기 위해서 2021년 6월 4일을 초기장부터 5일 예측장인 2021년 6월 9일 자료를 분석하였다(<그림 1.1.18>). 해당 사례 또한 KIM에서의 WAF가 ERA5에 비해 강하게 나타나는 특성을 보이며, 한반도와 알류산 저기압, 아이슬란드 저기압을 중심으로 강한 파동의 활동성이 나타난다. 편차장을 분석하였을 때, KIM에서 알류산 저기압을 강하게 모의하며, 주변의 바람장 편차를 유도하여 한반도 및 북태평양 지역의 WAF 전파를 강하게 모의하는 특성을 볼 수 있다.

해당 사례일은 아열대 서태평양 지역에서 열적 강제력에 의해서 발생한 로스비파가 북태평양 고기압의 서쪽 경계를 따라서 북상하는 Pacific-Japan (PJ) 패턴이 발생한 날로 저위도에서 전파되는 로스비파의 예측성 차이가 KIM의 예측성 저하에 영향을 미쳤을 가능성이 높은 것으로 판단된다. 또한 <그림 1.1.19>의 유선함수를 보았을 때, 이러한 오차는 저위도에서 고위도로 전파하며 예측시간이 증가함에 따라 강해지며, 다시 저위도로 전파되는 특성을 보인다. 5일 누적 강수는 한반도에서는 유의한 차이를 나타나지 않지만, 적도 수렴대 및 동아시아 지역에서는 KIM이 더 조직화된 강한 강수를 모의하고 있어 해당 강수에서 발생한 열적 강제력이 아열대 대기 순환장의 차이를 유발한 것으로 보인다. 추가로 북태평양 지역의 강수 분포 분포에도 큰 차이를 보이는데, 이러한 차이는 일기계의 강도와 관련이 있는 것으로 보이며 아열대 지역의 오차가 중위도 예측성을 저하시키는데 중요한 요인으로 고려될 수 있다. 따라서 저위도 지역의 오차가 발생하는 원인의 이해를 통해 중위도 일기 예측성의 향상을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.



<그림 1.1.18> 2021년 6월 9일 사례에 대한 500 hPa의 KIM의 5일 예측장 편차 결과. 위의 결과는 WAF(벡터, 단위 $m^2 s^{-2}$)와 WAF의 진폭(음영, 단위 $m^2 s^{-2}$), 지위고도(실선, gpm)을 나타내며, 아래는 WAF(벡터, 단위 $m^2 s^{-2}$), 풍속(음영, $m s^{-1}$) 및 지위고도(실선, gpm)의 편차.



<그림 1.1.19> 2021년 6월 9일 사례에 대한 ERA5/IMERG대비 KIM의 5일 예측 장 결과 및 편차. 위의 결과는 KIM과 ERA5/IMERG의 유선함수(실선, 단위 10^6 m s⁻¹)와 5일 누적 강수(음영, mm day⁻¹)를 나타내며, 아래는 유선함수(실선, 단위 10^6 m s⁻¹)와 5일 누적 강수(음영, mm day⁻¹)의 편차를 나타냄.

제 2 절. 적도 ITCZ 편차에 의한 중위도 영향 분석

1) 관측 및 모델, 재분석 자료의 수집

가) 관측 및 모델, 재분석자료

적도의 ITCZ 오차 진단을 위해, 1절에서 사용된 분석자료와 동일한 자료를 사용하였으며, 기상자료의 2 m 온도와 토양 수분 자료 대신 OLR(Outgoing Longwave Radiation)을 사용하여, 적도의 대류 오차를 확인하고자 하였다. 해들리 순환 및 티벳 고기압/북서태평양 고기압 분석을 위해 제공받은 자료의 여름철 및 겨울철을 중심으로 분석을 수행하였다. 사용된 자료의 정보는 <표 1.2.1>에 요약하였다.

<표 1.2.1> KIM 예측성 진단을 위해 사용된 관측 및 모델, 재분석자료

자료	변수	수평/연직 해상도	출처
ERA5	U, V, T, Z, OLR, (Rain rate for KIM)	1.5° × 1.5°, L37	ECMWF
GFS		0.25° × 0.25°, L41	NCEP
KIM		1.5° × 1.5°, L25	기상청
IMERG	Rain rate	0.1° × 0.1°	NASA

* KIM 자료는 기상청 수치모델링센터를 통해 제공받았으며, 분석은 여름철 및 겨울철을 중심으로 진행하였다. 수평 해상도가 다른 자료의 경우, CDO를 이용해 내삽하여 KIM과 동일한 해상도로 분석을 수행하였다.

나) 2차원 질량 유선함수

KIM의 해들리 순환 강도 분석을 위해, Zhou and Wang (2006)에서 사용된 동서 평균한 질량유선함수를 이용하였다. 동서 평균한 남북 및 연직 방향의 유동에 대한 2차원 질량 유선함수는 동서 평균 연속 방정식과 스토크스 유선함수(Stokes stream function)로부터 유도되며, 다음과 같이 정의된다.

$$\psi = \int \frac{2\pi R \cos\phi}{g} [v] dp$$
$$\frac{\partial [v] \cos\phi}{R \cos\phi \partial\phi} + \frac{\partial [\omega]}{\partial p} = 0$$
$$[v] = g \frac{\partial\psi}{2\pi R \cos\phi \partial p} \quad [\omega] = -g \frac{\partial\psi}{2\pi R^2 \cos\phi \partial\phi}$$

여기서 v 와 ω 는 각각 남북, 연직 방향의 바람, ϕ 는 위도, p 는 기압, $[\]$ 는 동서 평균을 의미한다. 해들리 순환은 동서 평균한 질량유선함수로 정의하며, 해들리 순환의 강도는 500 hPa 고도, 0-30N 지역의 질량유선함수 값의 최댓값으로 정의한다.

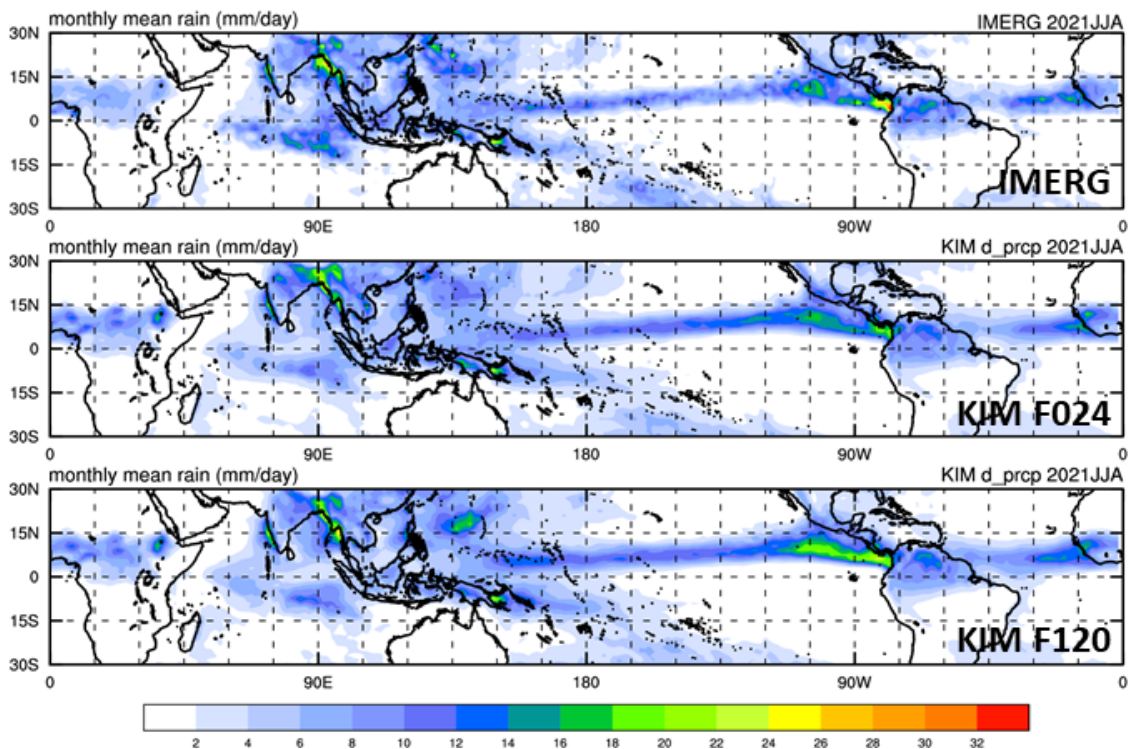
다) 여름철 티벳 고기압, 북태평양 고기압

여름철 기간에 대한 티벳 고기압 및 북태평양 고기압의 진단을 위해 He et al. (2001)에서 사용된 방법론을 참고하여 고기압 지수를 정의하였다. 500 hPa의 북서태평양 고기압이 확장하는 영역(10N-30N, 120-150E)의 지위고도를 평균한 값을 북태평양 고기압 지수로, 티벳 고기압이 나타나는 100 hPa의 10N-30N, 60E-120E 영역에 대한 지위고도 평균값을 티벳 고기압 지수로 정의하여 분석을 수행하였다.

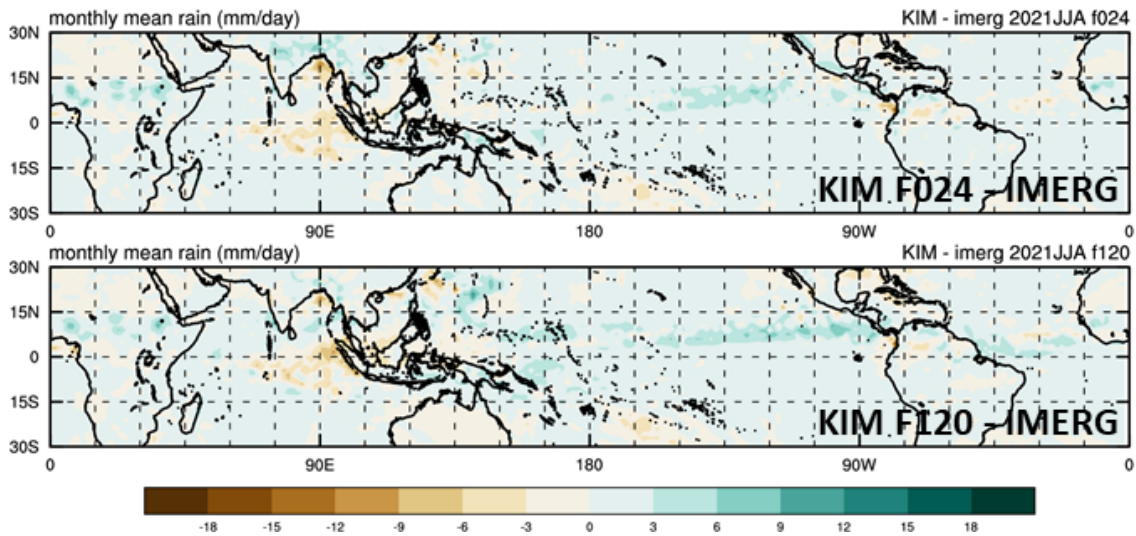
2) 적도 ITCZ 모의성능 및 계통적 오차 분석

가) 2021년 여름철 적도 강수 편차 분석

<그림 1.2.1>는 2021년 북반구 여름철 기간 동안 IMERG와 KIM의 1일, 5일 예측장의 일 강수분포이다. 위에서부터 순서대로 IMERG, KIM 1일 예측장, 5일 예측장 결과이다. 전반적으로 IMERG와 KIM의 예측장이 유사한 분포를 보이며, ITCZ 또한 동일한 위도대에 위치해 있음을 확인할 수 있다. 그러나 KIM의 5일 예측장에서 동태평양과 ITCZ를 중심으로 강한 강수가 모의되는 특징이 나타난다. 또한 서태평양에서 강한 강수가 모의되며, 이와 반대로 인도양에서 다소 약한 강수가 모의됨을 확인하였다(<그림 1.2.2>).



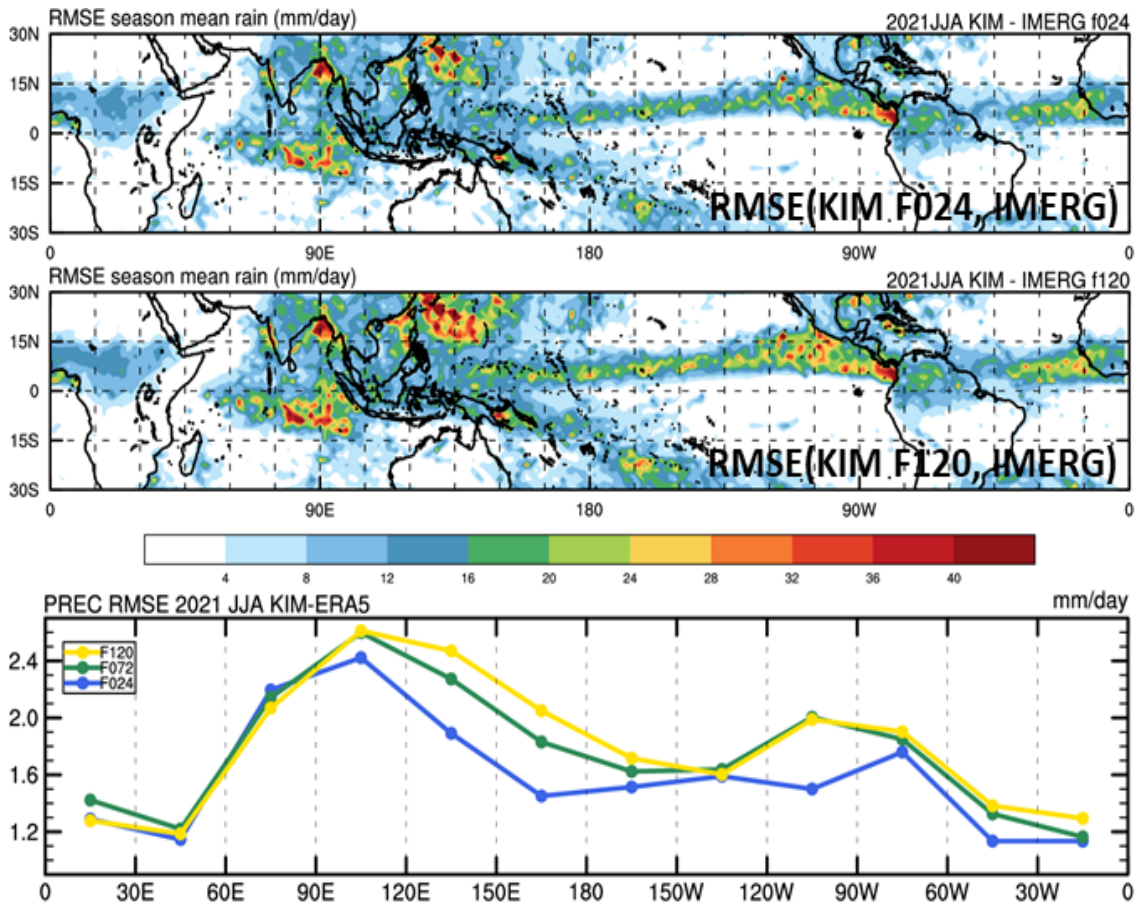
<그림 1.2.1> 2021년 여름철 강수에 대한 IMERG 및 KIM의 1일, 5일 예측장. 위의 결과는 일 강수(음영, mm day⁻¹)에 대한 결과를 나타냄.



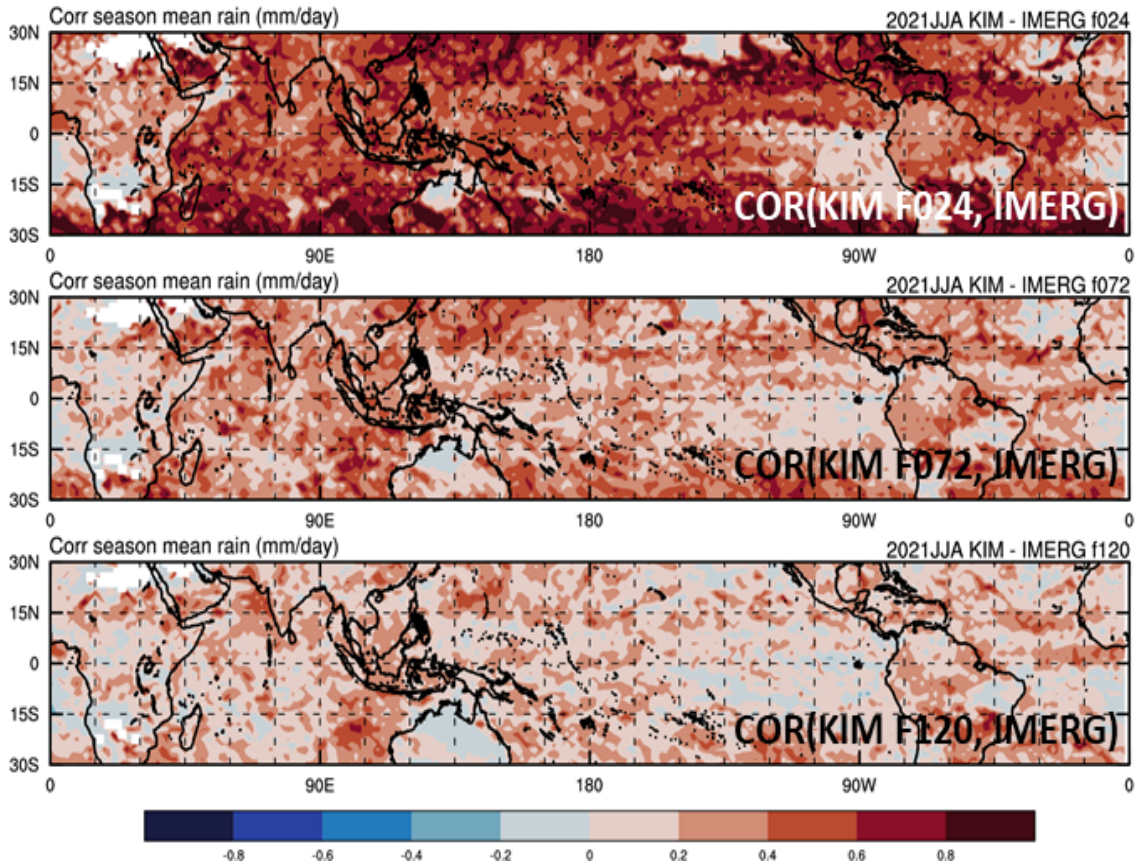
<그림 1.2.2> 2021년 여름철 강수에 대한 IMERG와 KIM의 1일, 5일 예측장
 편차. 위의 결과는 일 강수(음영, mm day⁻¹)에 대한 결과를 나타냄.

이러한 강수오차는 <그림 1.2.3>의 평균제곱근오차에서도 확인할 수 있다. 동일한 기간인 2021년 북반구 여름철 동안 IMERG와 KIM의 1일, 5일 예측장에 대한 평균제곱근오차를 계산하였으며, 경도별 적도 강수 오차를 비교하기 위해 30S-30N 지역에 대해 남북 평균한 평균제곱근오차를 계산하였다. KIM에서 강수를 강하게 모의하는 ITCZ와 동태평양을 중심으로 오차가 크게 나타나는 특성을 보이며, 서태평양에서의 강한 강수 및 인도양의 약한 강수 모의로 인해 오차가 크게 나타난다. KIM에서의 강수 오차는 예측시간이 길어질수록 커지며, 다른 지역에 비해 서태평양(90E-180E)과 동태평양(135W-75W) 지역에서 예측시간에 따른 강수 오차의 증가 경향이 크게 나타난다. 이는 인도 몬순에 이어 여름철에 시작되는 동아시아 몬순의 영향으로 다른 지역 비해 서태평양의 강수 오차가 두드러지게 강한 것으로 판단된다.

<그림 1.2.4>는 2021년 여름철 기간에 대한 IMERG와 KIM의 일 강수 패턴 상관계수이며, 위부터 1일, 3일, 5일 예측장에 대한 결과이다. 예측 시간에 따라 상관계수 값이 빠르게 감소하며, 저위도 지역에 대해서는 3일 예측 이후로는 낮은 상관계수로 인해 유의한 결과를 도출하기 어려울 것으로 판단된다.



<그림 1.2.3> 2021년 여름철 강수에 대한 IMERG와 KIM의 1일, 5일 예측장의 평균제곱근오차. 위의 결과는 일 강수(음영, mm day⁻¹)에 대한 결과를 나타냄.



<그림 1.2.4> 2021년 여름철 강수에 대한 IMERG와 KIM의 1일, 5일 예측장의 패턴 상관계수 결과. 위의 결과는 일 강수(음영, mm day⁻¹)에 대한 결과임.

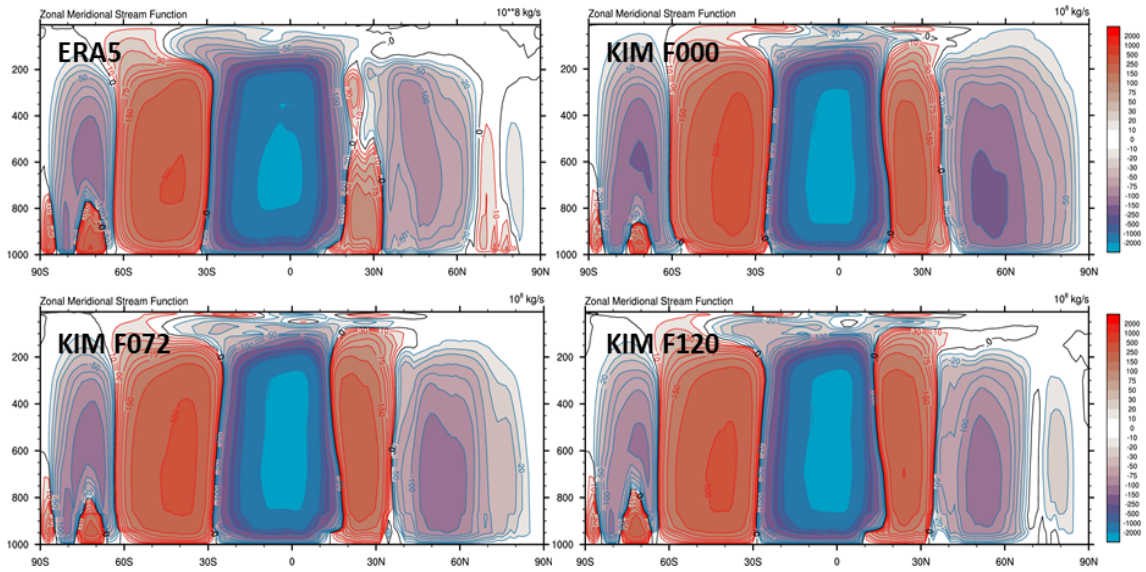
3) KIM 모델의 해들리 순환(Hadley cell) 강도 분석

가) 2021년 여름철/겨울철 해들리 순환 강도

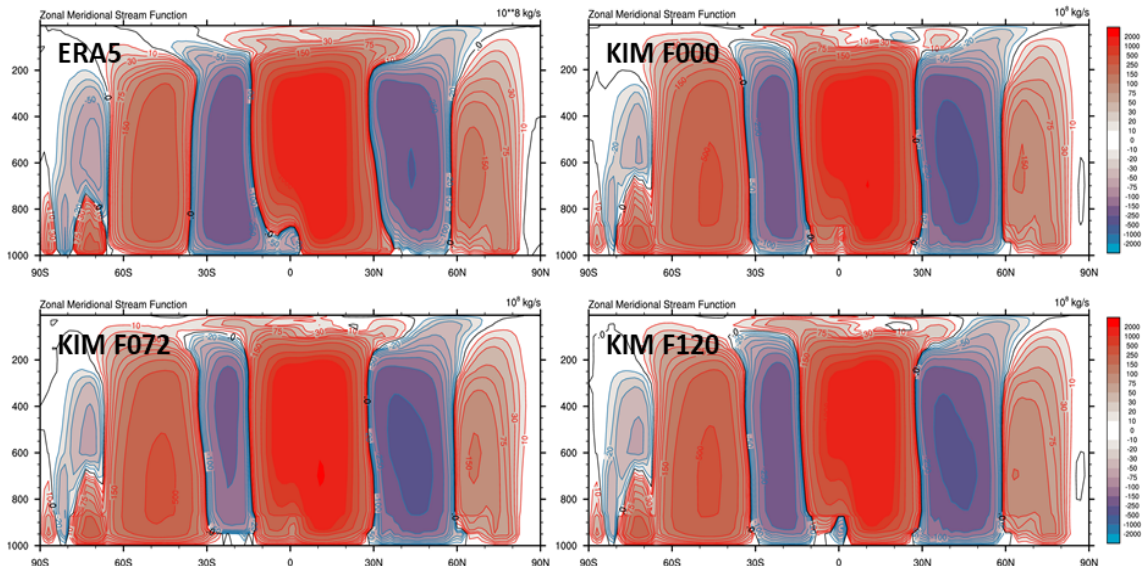
<그림 1.2.5-6>은 2021년 북반구 여름철 및 겨울철 기간에 대한 ERA5와 KIM의 유선함수를 계산한 결과이다. 좌측 상단부터 순서대로 ERA5, KIM 초기장, 3일 및 5일 예측장 결과이다. 전반적으로 ERA5에 비해 KIM은 해들리 순환을 강하게 모의하며, 예측시간이 증가할수록 ERA5와 유사하게 모의하는 특성을 보인다. 2021년 여름철의 경우, ERA5의 북반구 해들리 순환은 약하게 나타나 상하층 결합이 끊어지는 패턴을 보이지만, KIM에서는 연직으로 이어진 구조를 보여, 해들리 순환을 강하게 모의할 뿐만 아니라, 상하층 결합이 뚜렷하게 나타난다. 또한 초기장에서 북반구 페렐 순환은 강하고 넓게 나타나고 이로 인해 북반구 극 순환이 나타나지 않는다. 예측시간이 증가할수록 페렐 순환이 점차 약해지며, ERA5에 근접하는 모습을 보여준다.

2021년 겨울철도 마찬가지로 KIM의 초기장이 ERA5에 비해 남반구 해들리 순환을 강하게 모의하나 남반구 페렐 순환은 예측시간에 따른 큰 차이를 보이지 않는다. 이러한 결과로부터 KIM이 전체적으로 여름반구의 해들리 순환을 강하게 모의하며 계절과 관계없이 북반구 페렐 순환을 강하게 모의함을 알 수 있다.

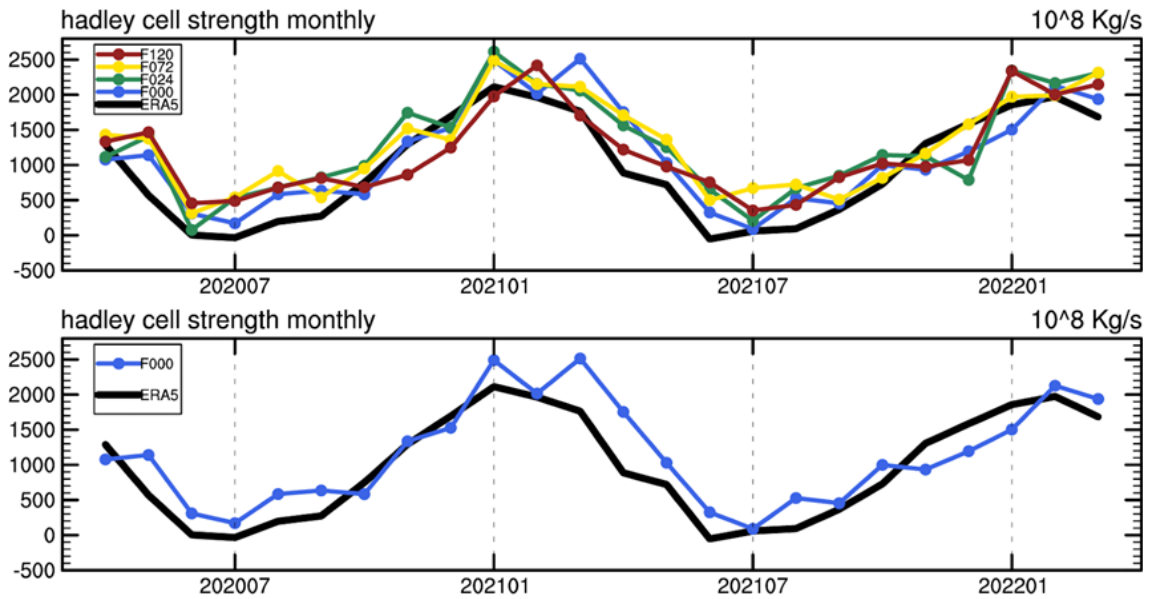
KIM에서의 강한 해들리 순환은 월 평균된 북반구 해들리 순환 강도에서도 확인할 수 있다(<그림 1.2.7>). KIM의 초기장과 ERA5의 비교에서 일부 기간을 제외하고 KIM에서의 해들리 순환이 강하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 특성은 모든 예측장에서 나타나, KIM의 예측시간이 길어질수록 ERA5와 비슷하게 나타나는 특성이 보인다. 따라서 초기장에서 시작된 해들리 순환의 강도 오차는 예측시간이 길어지면서 점점 줄어드는 방향으로 모의하는 것으로 판단된다.



<그림 1.2.5> 2021년 여름철 ERA5 및 KIM의 초기장, 3일, 5일 예측장에 대한 유선함수 결과.



<그림 1.2.6> 2021년 겨울철 ERA5 및 KIM의 초기장, 3일, 5일 예측장에 대한 유선함수 결과.



<그림 1.2.7> KIM의 현업운영 기간 동안 월 평균된 북반구 해들리 순환의 강도. 검정색 실선은 ERA5로 계산된 결과를 나타내며, 나머지 실선은 KIM의 초기장, 1일, 3일, 5일 예측시간에 대한 결과임.

4) 적도 대류 오차의 중위도 영향 분석

가) 여름철 티벳 고기압

<그림 1.2.8-11>은 2020년 및 2021년 여름철 기간 동안 KIM에서 계산된 티벳 고기압 지수와 오차를 나타낸 결과이다. 티벳 고기압 지수의 오차는 KIM과 ERA5의 지위고도를, 강수 오차는 KIM과 IMERG를 이용하여 계산하였다.

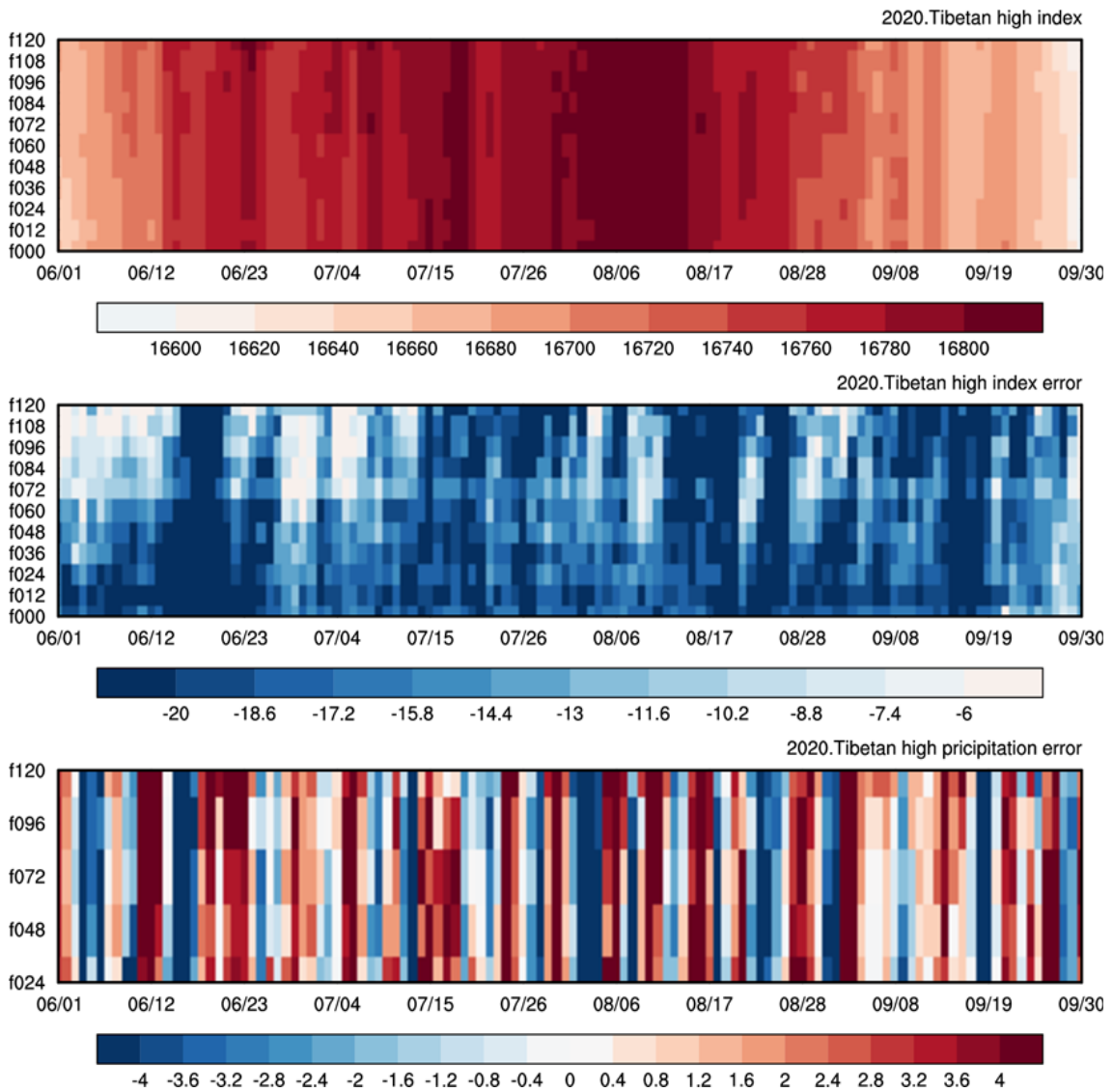
2020년의 경우 KIM은 6월초에 발달하기 시작하여 8월 말에 쇠퇴하는 티벳 고기압의 일반적인 특성을 잘 모의하고 있으나 ERA5 자료와 비교해서 티벳 고기압 지수를 전체적으로 약하게 모의 하는 계통적 오차를 보인다. 또한 오차는 6월 중순, 8월 말, 9월 중에 강하게 나타났다. 따라서 해당

기간에 대해서는 티벳 고기압 지수의 강도와 오차의 강도 간 유의한 관련성이 없는 것으로 보인다.

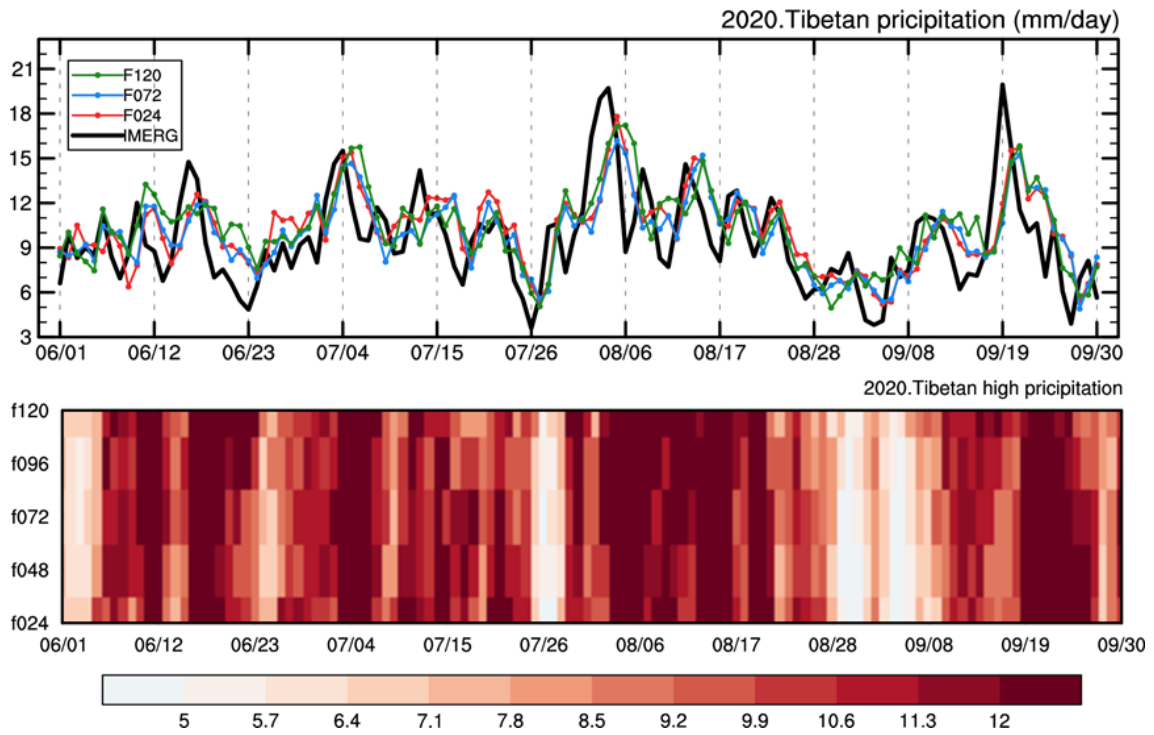
KIM의 2020년 여름철 예측 강수 시계열은 IMERG와 유사하여, 티벳 고기압의 강도에 영향을 미치는 인도 몬순 지역의 평균 강수량의 시간적 변동성을 비교적 잘 모의하는 것으로 판단된다(<그림 1.2.8>). 그러나 8월 4일이나 9월 19일 같이 강수가 강한 사례의 경우 KIM은 강수 강도를 다소 약하게 모의하며, 전반적인 강수 예측이 1-2일 뒤에 나타나는 특성이 나타난다. 이는 앞절에서 언급한 KIM에서의 위상 차이로 인해 강수가 늦게 모의되는 것일 수도 있으나, 자세한 요인을 파악하기 위해서는 저위도 지역의 배경장 분석이 수행되어야 할 것으로 보인다.

<그림 1.2.10, 그림 1.2.13>은 2020년, 2021년의 7, 8월 100 hPa 고도 지위고도장과 강수(음영)를 나타낸 것이다. 티벳 고기압의 영역을 간단히 표시하기 위해서 16,700 과 16,800 gpm을 각각 파선과 실선으로 나타내었다. 전체적으로 ERA5대비 KIM에서 티벳 고기압이 작게 나타나지만 티벳 고기압을 형성하는 인도 몬순 지역과 벵골만 지역의 강수의 분포 및 강도는 KIM에서 비교적 잘 모의하는 것을 알 수 있다. 특히 2021년의 강수의 분포 및 강도가 2020년보다 일부지역에서 개선된 모습을 보여준다.

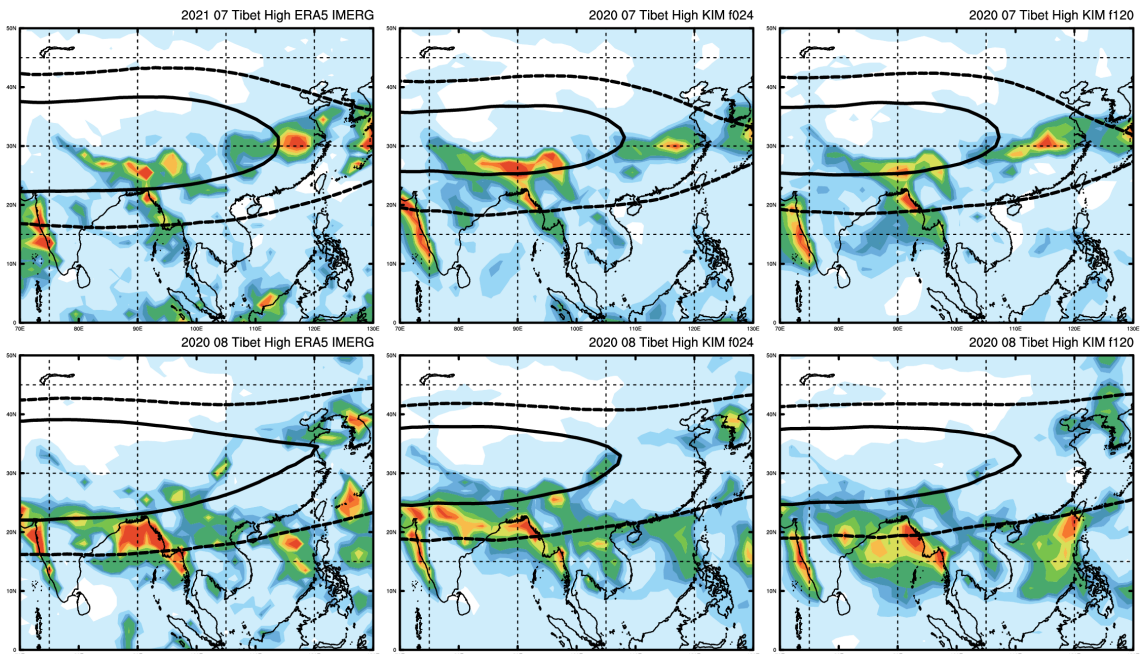
티벳 고기압 형성에는 벵골만 지역의 대류와 티벳 고원지역의 비단열 가열이 핵심적인 역할을 하는데 2021년 여름철에 티벳 고기압 지수 오차와 강수 예측성능 모두 2020년에 비해 개선된 모습을 보여주지만 티벳 고기압 지수의 오차와 강수의 오차가 특별한 상관관계를 보여주지 않으며 강수 모의 성능에 대해서 2020년과 2021년 모두 특징적인 계통적 오차를 보여주지 않는다. 따라서 벵골만 지역의 강수오차를 개선하는 것이 티벳 고기압 예측성에 필요조건은 아닌 것으로 보이며 티벳 고기압 지수 오차를 만드는 원인으로 티벳 고원 지역의 태양 복사의 문제를 의심해 볼 수 있다.



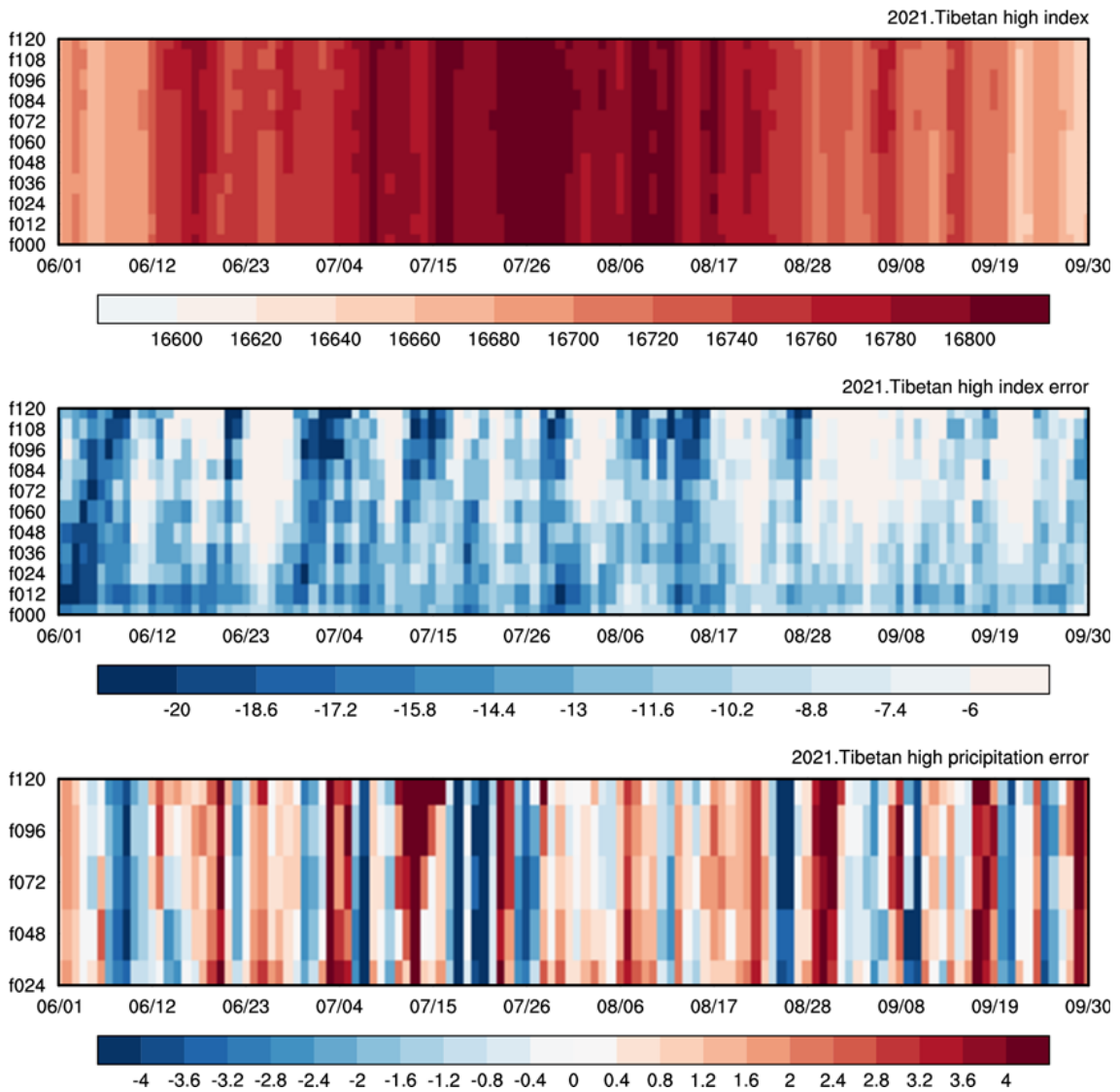
<그림 1.2.8> 2020년 여름철 KIM의 예측시간에 따른 티벳 고기압 지수, 오차(KIM-ERA5) 및 티벳 고기압 지역의 강수 오차(KIM-IMERG).



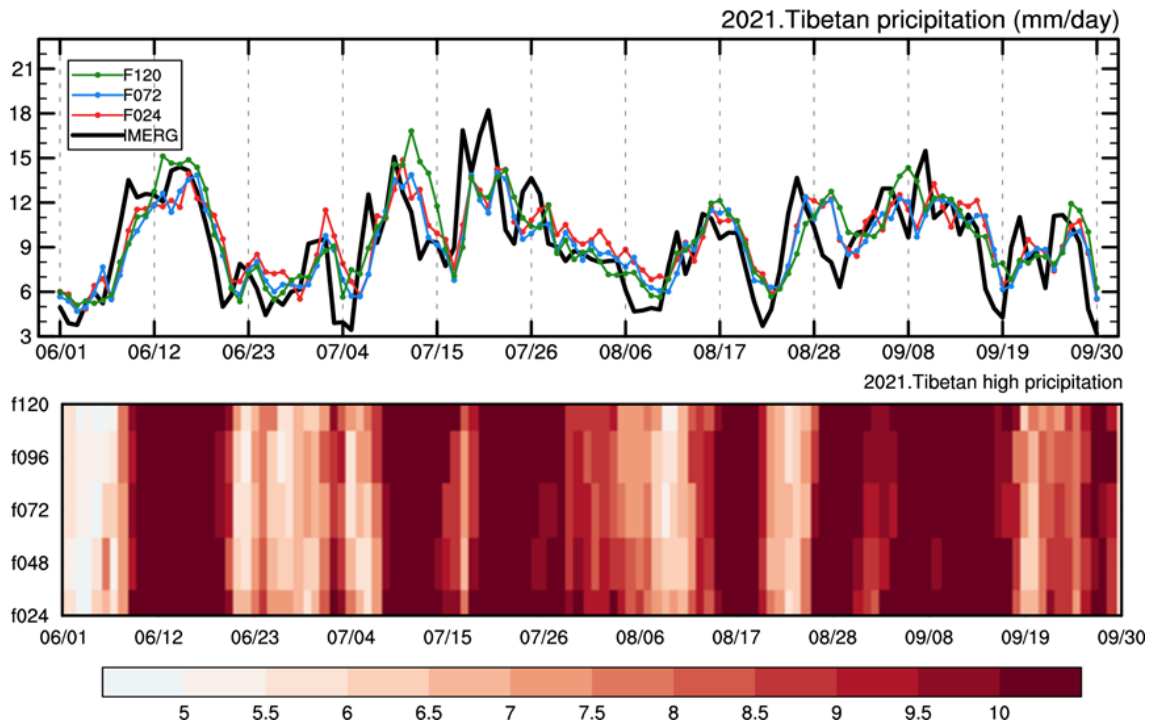
<그림 1.2.9> 2020년 여름철 KIM의 예측시간에 따른 티벳 고기압 지역의 강수.



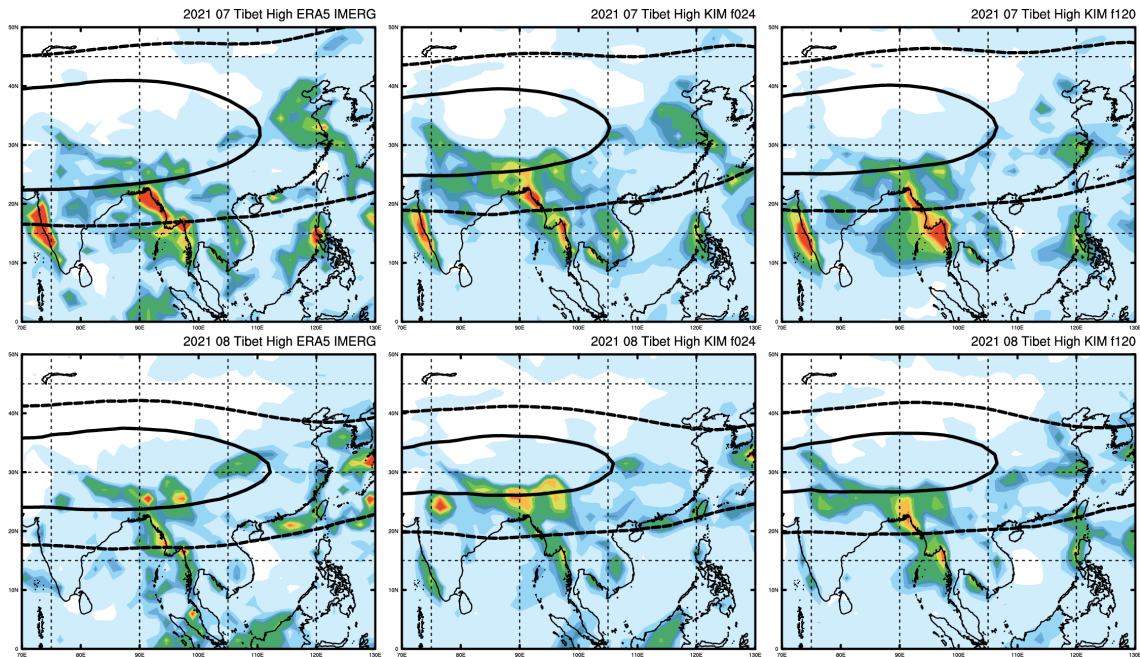
<그림 1.2.10> 2020년 티벳 지역의 100 hPa 지위고도 및 강수(음영). 위 2020년 7월 아래 2020년 8월, 왼쪽부터 ERA5, KIM 1일 예측장, KIM 5일 예측장.



<그림 1.2.11> 2021년 여름철 KIM의 예측시간에 따른 티벳 고기압 지수, 오차(KIM-ERA5) 및 티벳 고기압 지역의 강수 오차(KIM-IMERG).



<그림 1.2.12> 2021년 여름철 KIM의 예측시간에 따른 티벳 지역의 강수.



<그림 1.2.13> 2021년 티벳 지역의 100 hPa 지위고도 및 강수(음영).

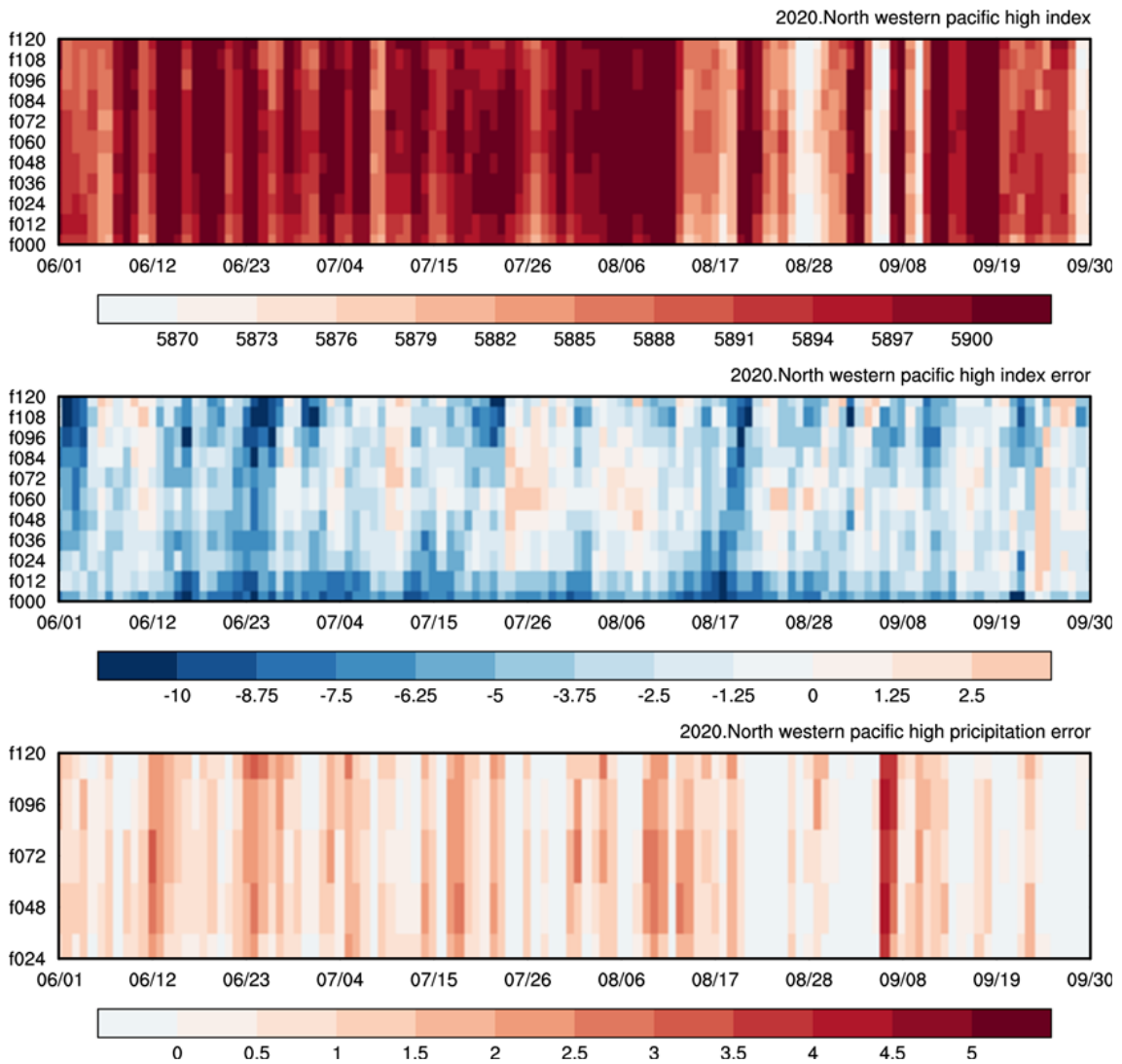
그림의 구성은 <그림 1.2.10> 과 동일함

나) 여름철 북태평양 고기압

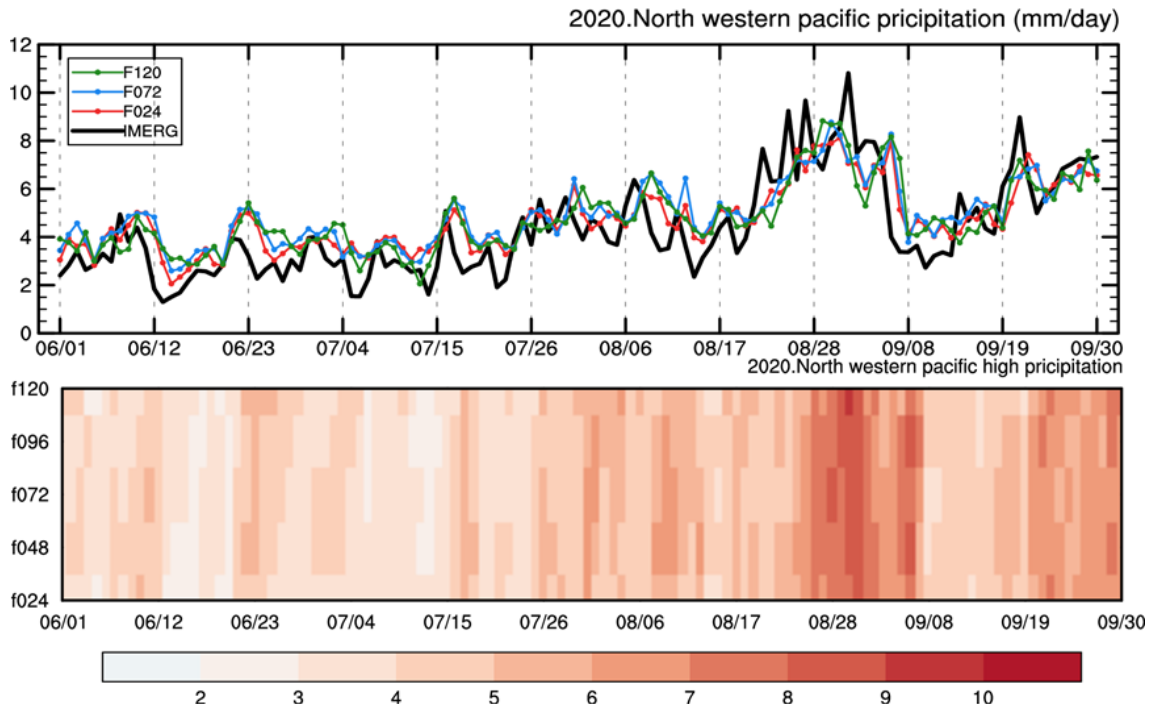
<그림 1.2.14-17>은 2020년 및 2021년 여름철 동안 KIM에서 계산된 북서태평양 고기압 지수와 오차를 나타낸 결과이다. 북서태평양 고기압 지수의 오차도 앞서 티벳 고기압에 대한 분석과 유사하게 KIM과 ERA5의 지위고도를, 강수 오차는 KIM과 IMERG를 이용하여 계산하였다.

2020년 북서태평양 고기압 지수는 티벳 고기압과 마찬가지로 8월 초중에 강하게 나타났으나, KIM에서 북서태평양 고기압 지수는 ERA5에 비해 전반적으로 약하게 모의된다. 특히 초기장에 가까운 예측 시간일수록 오차가 다소 크게 나타나는 특징을 보여, KIM에서 북서태평양 고기압이 약한 특징이 초기장부터 나타나는 것으로 판단된다. 2020년 여름철 북서태평양 지역의 KIM과 IMERG의 강수 차이(<그림 1.2.15>)를 보면 초기시간과 예측시간에 상관없이 전체적으로 KIM에서 강수를 과다모의 함을 알 수 있다. 따라서 해당지역의 대류를 강하게 모의하는 것이 원인이 되어 북태평양 고기압을 약하게 모의하는 것으로 판단된다.

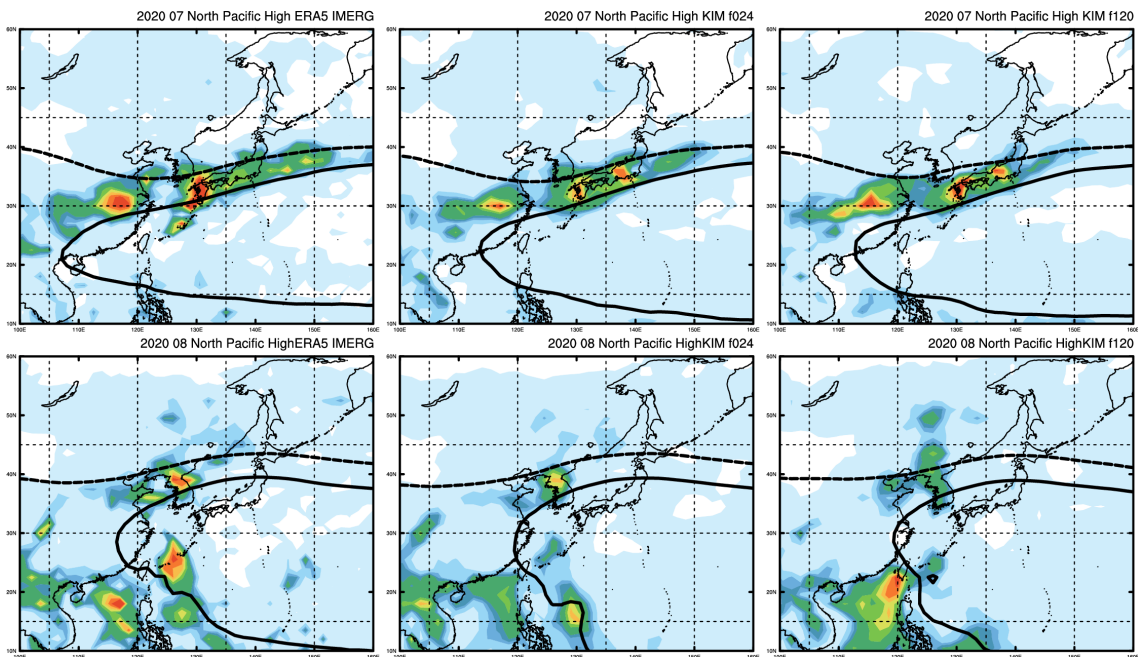
2020년의 경우 북태평양 고기압의 공간적인 분포는 전반적으로 잘 모의하고 있으며(<그림 1.2.16>) 따라서 한반도 장마 강수 분포의 오차 또한 크지 않다. 그러나 2021년의 경우 북태평양 고기압의 공간적인 분포가 상대적으로 크게 왜곡되었으며 해당오차는 아열대지역의 대류성 강수오차의 기인하는 것으로 판단된다. 특히 이러한 강수 오차는 8월에 크게 나타났다. 또한 티벳 지역의 강수와 유사하게 1-2일 정도 강수가 늦게 모의되는 특성이 나타나므로, 저위도 지역의 대류성 강수를 유발하는 배경장 분석이 필요하다.



<그림 1.2.14> 2020년 여름철 KIM의 예측시간에 따른 북서태평양 지수, 오차(KIM-ERA5) 및 해당 지역의 강수 오차(KIM-IMERG).

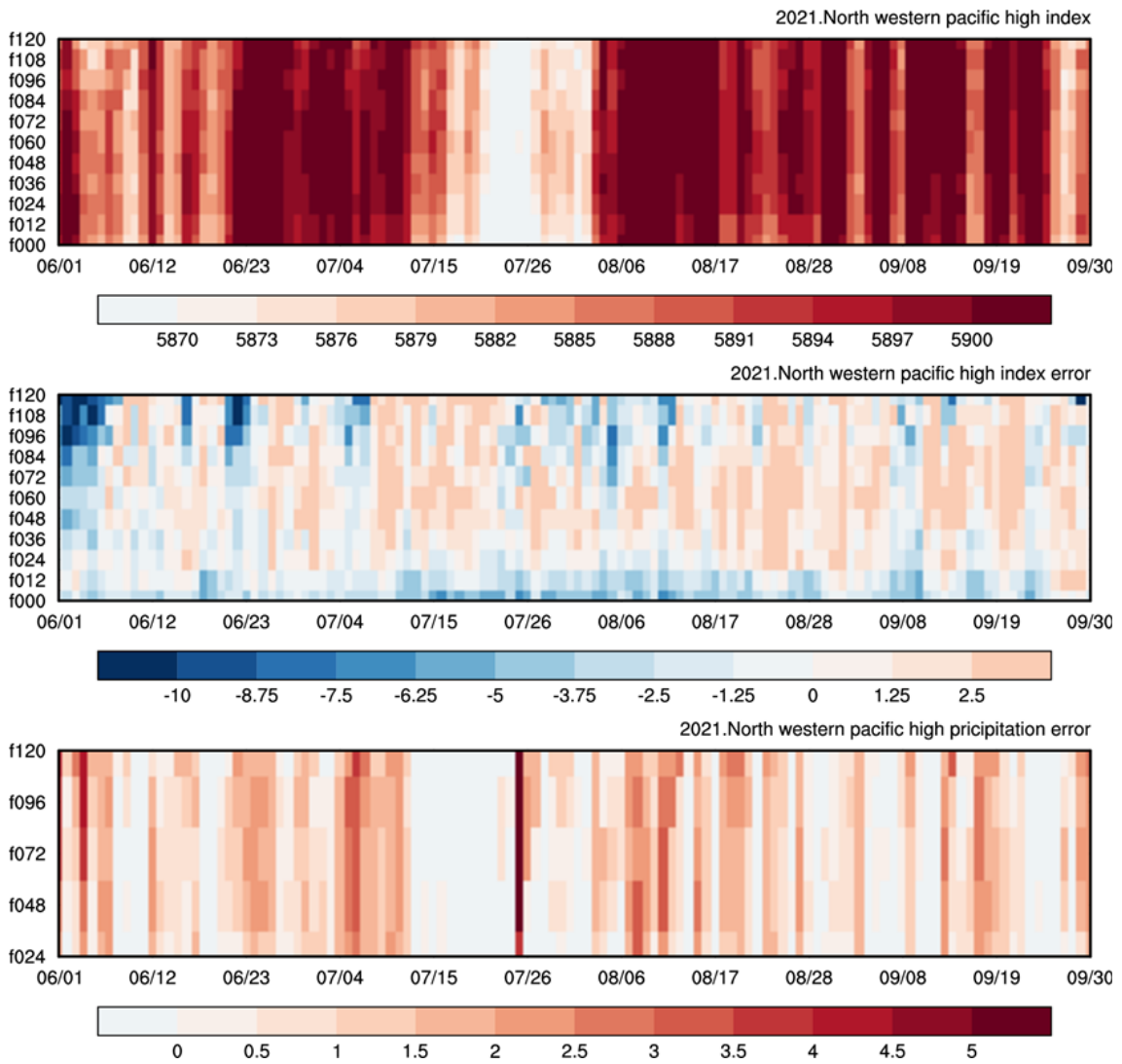


<그림 1.2.15> 2020년 여름철 KIM의 예측시간에 따른 북서태평양 지역의 강수.

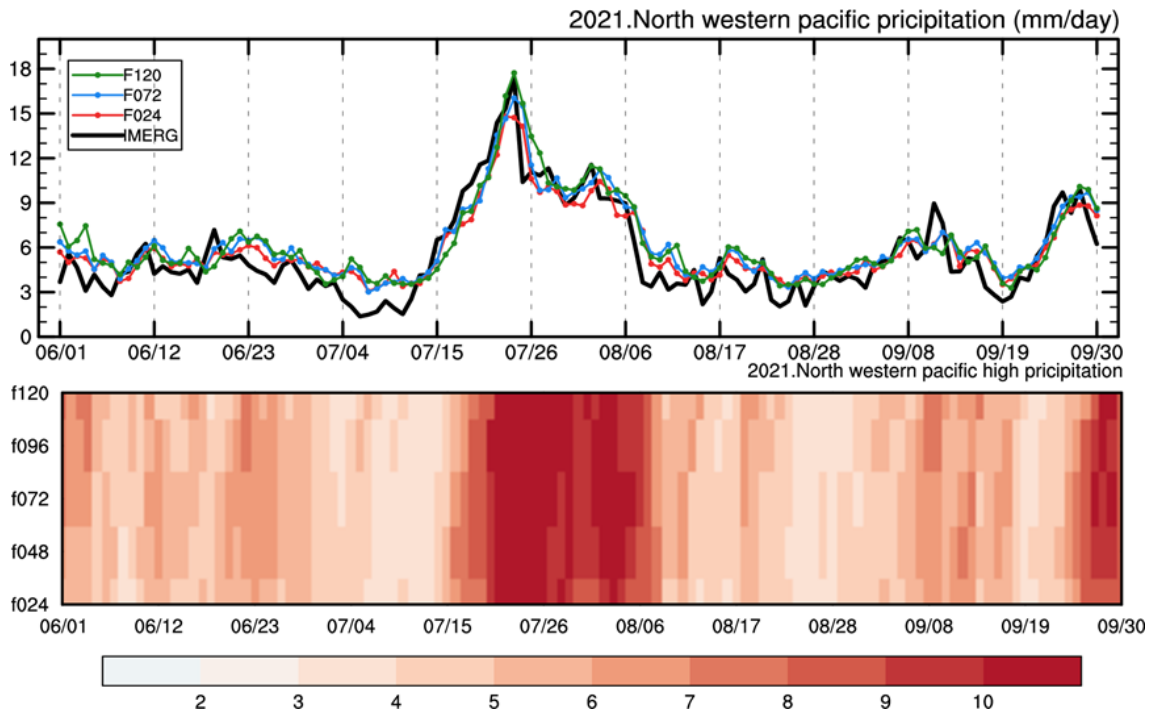


<그림 1.2.16> 2020년 북태평양 지역의 500 hPa 지위고도 및 강수(음영).

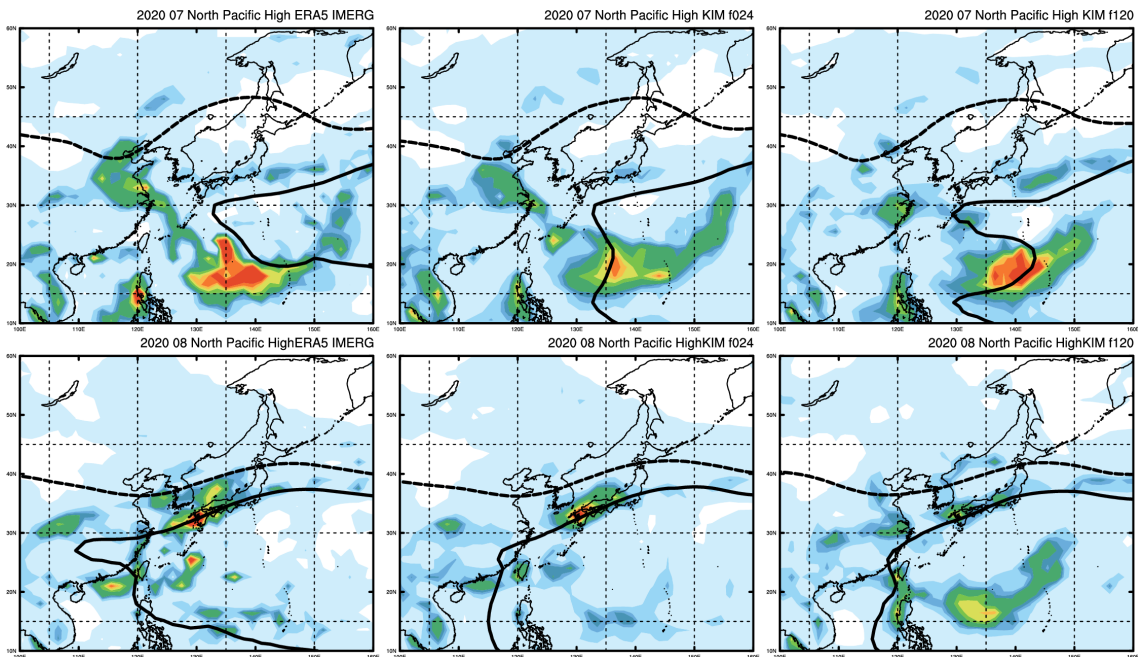
그림의 구성은 <그림 1.2.10> 과 동일함



<그림 1.2.17> 2021년 여름철 KIM의 예측시간에 따른 북서태평양 고기압 지수, 오차(KIM-ERA5) 및 해당 지역의 강수 오차(KIM-IMERG).



〈그림 1.2.18〉 2021년 여름철 KIM의 예측시간에 따른 북서태평양 고기압 지역의 강수.



〈그림 1.2.19〉 2021년 북태평양 지역의 500 hPa 지위고도 및 강수(음영).

그림의 구성은 〈그림 1.2.10〉 과 동일함

요 약 문

* 북반구 하층 온도, 지위고도 오차의 물리적 원인 진단 *

- KIM 예측성 진단 결과, 다른 계절에 비해 여름철에 대해 낮은 예측성을 보이며, 내륙의 온난 편차와 극지역의 한랭 편차에 의한 것으로 보임.
- 이러한 오차는 내륙 중심으로 나타나는 지상 온도에 기인하며, KIM에서 유라시아 및 북아메리카 내륙 지역의 건조한 토양 수분에 의해 온난 편차가 생긴 것으로 판단됨.
- KIM의 예측성이 낮은 사례들에서 강한 파동 에너지 전파가 나타나며, 이는 배경장 변화에 따른 제트의 강도 변화로 인한 것임. 또한 예측성이 낮은 사례들은 고위도에서 형성된 오차가 중위도로 영향을 미쳐 예측성을 저하시킨 것으로 판단됨.

* 적도 ITCZ 편차에 의한 중위도 영향 분석 *

- KIM이 업데이트 되면서 북서태평양 지역에 대한 강수 재현 성능이 향상됨. 그러나 여전히 강수에 대한 평균제곱근 오차가 다른 지역에 비해 북서태평양에서 크게 나타남.
- KIM에서 강한 해들리 순환이 나타나며, 예측 시간이 길어질수록 ERA5와 유사한 분포를 보임. 초기장에서 강한 해들리 순환을 반영하는 요인이 있을 것으로 판단됨.
- 티벳 고기압 및 북서태평양 고기압은 KIM에서 약하게 나타나는 계통적 오차를 보이고 있음. 해당 고기압과 관련된 강수가 전반적으로 잘 모의되고 있으나, 약한 고기압으로 인한 강수 오차 발생 가능성을 간과할 수 없음.

제 5 장 사업수행결과의 활용 계획

- 한국형모델의 북반구 고위도 계통 오차 특성을 파악하고 물리적 원인을 진단함으로써 현업 예보에 참고자료로 제공
- 한국형모델의 적도 ITCZ 계통 오차 특성 파악하고 티벳 고기압 및 북서태평양 고기압 지수를 활용함으로써, 추후 북반구 여름철 오차 특성 요인으로 활용 가능성 제시
- 한국형모델의 전지구-지역 규모 오차 특성 진단을 통한 모델 개선에 기여

제 6 장 참고 문헌

- Ardilouze, C., Batté, L., Bunzel, F. *et al.* Multi-model assessment of the impact of soil moisture initialization on mid-latitude summer predictability. *Clim Dyn* **49**, 3959-3974 (2017). <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3555-7>
- Esau, I., Tolstykh, M., Fadeev, R., Shashkin, V., Makhnorylova, S., Miles, V., & Melnikov, V. (2018). Systematic errors in northern Eurasian short-term weather forecasts induced by atmospheric boundary layer thickness. *Environmental Research Letters*, *13*(12), 125009.
- He, C., Lin, A., Gu, D. *et al.* Using eddy geopotential height to measure the western North Pacific subtropical high in a warming climate. *Theor Appl Climatol* *131*, 681-691 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00704-016-2001-9>
- Jolliffe, I.T. and Stephenson, D.B. (2003) Forecast Verification. A Practitioner's Guide in Atmospheric Science. *John Wiley & Sons Ltd.*, Hoboken, 240 p.
- Jun, S., Park, J.-H., Choi, H.-J., Lee, Y.-H., Lim, Y.-J., Boo, K.-O., Kang, H.-S. (2021) Impact of Soil Moisture Data Assimilation on Analysis and Medium-Range Forecasts in an Operational Global Data Assimilation and Prediction System. *Atmosphere*, *12*(9), 1089. <https://doi.org/10.3390/atmos12091089>
- Jung, T. and Leutbecher, M. (2008). Scale-dependent verification of ensemble forecasts. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography*, *134*(633), 973-984.
- Takaya, K., Nakamura, H. (2001). A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow. *Journal of Atmospheric Sciences*, *58*(6), 608-627.
- Zhou, B., and H. Wang (2006), Relationship between the boreal spring Hadley circulation and the summer precipitation in the Yangtze River valley, *J. Geophys. Res.*, *111*, D16109, doi:10.1029/2005JD007006.
- 기상청 수치모델링센터, 2021; 전지구예보모델의 오차진단과 예측성 평가(II), 11-1360709-000064-01

제 2세부과제

“전지구 예보모델의 오차진단과 예측성 평가 (Ⅲ)”

연구기관

한국기상학회 / 울산과학기술원

<출판용 여백>

요 약 문

제 2 세부과제는 기상청 한국형수치예보모델의 한반도 호우 예측성 개선을 목표로 2020년 및 2021년 한반도 집중호우(정체전선, 태풍, 중규모 저기압)의 특성 및 중기예측성을 분석, 평가하는 것을 목표로 한다. 먼저 한국형수치예보모델의 우리나라 집중호우 현상별 강수 예측성능을 진단하고, 추가적인 사례분석을 통하여 한국형수치예보모델의 예측실패 사례의 원인을 분석하였다. 이후, KIM 테스트베드를 이용한 물리모수화과정 민감도 실험을 통한 한국형수치예보모델의 물리모수화과정 개선방안을 제시하였다.

가. 정체전선, 태풍, 중규모 저기압 등에 의한 집중호우 현상에 대한 예측성 평가

- 우리나라 호우 사례 선정
- 우리나라 호우 사례 예측성 진단

나. 예측 성공/실패 사례분석을 통해 예측성능 향상을 위한 물리모수화과정 개선 제언

- 우리나라 호우 예측 성공/실패 사례 분류 및 예측 실패 사례 원인 분석

차 례

제 1 장 사업의 필요성	1
제 2 장 사업 목적	2
제 3 장 사업 개요	2
제 4 장 사업 수행 내용 및 결과	4
제 1 절. 정체전선, 태풍, 중규모 저기압 등에 의한 집중호우 현상에 대한 예측성 평가	4
1) 관측 및 모델 자료의 수집 및 예측성 평가	4
2) 우리나라 호우 사례 예측성 진단	5
제 2 절. 예측 성공/실패 사례분석을 통해 예측성능 향상을 위한 물리모수화과정 개선 제언	27
1) 우리나라 호우 예측 성공·실패 사례 분류 및 예측 실패 사례 원인 분석	27
제 5 장 사업수행결과의 활용 계획	54
제 6 장 참고 문헌	55

표 차 례

〈표 2.1.1〉 일 누적 강수에 대한 분할표	5
〈표 2.2.1〉 기상청에서 제공한 KIM-meso (KMA)와 본 세부에서 사용한 KIM-meso 역학·물리과정 구성표	30

그 립 차 례

〈그림 2.1.1〉 연도별 한반도 주변 강수 예측성 검증에 사용한 강수 영역	6
〈그림 2.1.2〉 2020년 월별 IMERG와 KIM의 예측시간별 모의된 강수 결과	7
〈그림 2.1.3〉 2020년 월별 IMERG와 KIM의 예측시간별 모의된 강수 차이	8
〈그림 2.1.4〉 2021년 월별 IMERG와 KIM의 예측시간별 모의된 강수 결과	9
〈그림 2.1.5〉 2021년 월별 IMERG와 KIM의 예측시간별 모의된 강수 차이	10
〈그림 2.1.6〉 2020년 월별에 대한 KIM의 예측시간별 모의된 강수, 좌측은 대류성강수, 우측은 비대류성강수	11
〈그림 2.1.7〉 2020년 월별에 대한 KIM의 예측시간별 모의된 강수, 좌측은 대류성강수, 우측은 비대류성강수	11
〈그림 2.1.8〉 2020년 월별에 대한 IMERG와 KIM의 예측시간별 모의된 강수의 공간분포패턴지수	12
〈그림 2.1.9〉 2021년 월별(에 대한 IMERG와 KIM의 예측시간별 모의된 강수의 공간분포패턴지수	13
〈그림 2.1.10〉 연도별(2020년, 2021년)에 대한 IMERG와 KIM의 강수검증지수	14
〈그림 2.1.11〉 강수 유형별 KIM의 단기 (F24) 강수검증지수	16
〈그림 2.1.12〉 KIM의 2020년 강수 유형별 강수검증지수 (ETS)	17
〈그림 2.1.13〉 KIM의 2020년 강수 유형별 강수검증지수 (TS)	17
〈그림 2.1.14〉 KIM의 2021년 강수 유형별 강수검증지수 (ETS)	17
〈그림 2.1.15〉 KIM의 2021년 강수 유형별 강수검증지수 (TS)	18
〈그림 2.1.16〉 IMERG 위성자료와 KIM의 예측시간별 일누적강수 분포 (2020년 7월 23일 저기압형 사례)	19
〈그림 2.1.17〉 KIM의 예측시간별 강수 검증지수, 좌측부터 Equitable Threat Score 및 Threat Score과 Bias Score	19

<그림 2.1.18> 저기압형 사례 (2020년 7월 23일)의 850 hPa 및 500 hPa 종관장	20
<그림 2.1.19> 초기시간에 따른 KIM의 예측시간별 850 hPa 종관장 모의결과	20
<그림 2.1.20> IMERG 위성자료와 KIM의 예측시간별 일누적강수 분포도 (2020년 8월 11일 태풍 사례)	21
<그림 2.1.21> KIM의 예측시간별 강수 검증지수	21
<그림 2.1.22> <그림 2.1.18>과 동일하나 태풍 사례 (2020년 8월 11일)	22
<그림 2.1.23> 초기시간에 따른 KIM의 예측시간별 850 hPa 종관장 모의결과	24
<그림 2.1.24> IMERG 위성자료와 KIM의 예측시간별 일누적강수 분포도 (2020년 7월 29일 고립형뇌우 사례)	25
<그림 2.1.25> KIM의 예측시간별 강수 검증지수 (2020년 7월 29일 고립형뇌우 사례)	25
<그림 2.1.26> <그림 2.1.18>과 동일하나 고립형 뇌우사례 (2020년 7월 29일)	26
<그림 2.1.27> 초기시간에 따른 KIM의 예측시간별 500 hPa 지위고도 모의 결과	27
<그림 2.2.1> 기상청에서 제공받은 KIM-meso (KMA)와 본 세부에서 사용한 KIM-meso 도메인	31
<그림 2.2.2> 초기시간별 F24 일누적강수 분포도	32
<그림 2.2.3> KIM의 예측시간별 일누적강수 모의 결과 (초기시간 2020년 07월 21일 00 UTC)	33
<그림 2.2.4> 실험 1의 예측시간별 KIM 테스트베드 강수 모의 결과, 초기장 KIM	34
<그림 2.2.5> 실험 1의 예측시간별 KIM 테스트베드 강수 모의 결과, 초기장 ERA5	34
<그림 2.2.6> 2020년 07월 21일 00 UTC과 2020년 07월 22일 00 UTC 850 hPa 종관장	35
<그림 2.2.7> KIM 테스트베드의 850 hPa 종관장 모의 결과, 좌측부터 2020년 7월 21일 00 UTC F24, F48	36
<그림 2.2.8> KIM 테스트베드의 850 hPa 종관장 모의 결과, 좌측부터 2020년 7월 22일 00 UTC F00, F24	36
<그림 2.2.9> KIM의 예측시간별 일누적강수 모의결과 (초기시간 2020년 07월 21일 00 UTC)	37
<그림 2.2.10> KIM의 예측시간별 일누적강수 모의결과, 도메인 축소 실험 (초기시간 2020년 07월 21일 00 UTC)	37
<그림 2.2.11> KIM 테스트베드의 예측시간 별 850 hPa 종관장 모의 결과, 초기시간은 2020년 07월 21일 00 UTC, 위에서부터 기본 실험, 도메인 축소실험	38
<그림 2.2.12> KIM 테스트베드의 초기장에 따른 예측시간별 700 hPa 지위고도 RMSE (계산 영역:위도 30-60° N, 경도 110-135° E)	39
<그림 2.2.13> KIM의 초기시간에 따른 예측시간별 700 hPa 지위고도 RMSE (계산 영역	

:위도 30-60° N, 경도 110-135)	40
<그림 2.2.14> IMERG와 KIM의 초기시간 및 예측시간별 일누적강수 모의 결과	41
<그림 2.2.15> 초기장에 따른 KIM 테스트베드 일누적강수 모의 결과, 좌측에서부터 초기장 ERA5 재분석장과 KIM	42
<그림 2.2.16> 2020년 08월 02일-2020년 08월 03일의 일누적강수 분포도이며, 초기시간에 따른 KIM과 KIM 테스트베드의 예측시간별 강수모의 결과	43
<그림 2.2.17> 2020년 7월 31일 00 UTC를 초기시간으로 한 KIM 테스트베드의 850 hPa 종관장 모의 결과	44
<그림 2.2.18> 그림 2.2.16과 동일하나, 초기시간이 2020년 08월 01일 00 UTC	45
<그림 2.2.19> 2020년 08월 02일-2020년 08월 03일의 지면물리과정 및 적운모수화과정에 따른 일누적강수 분포도	46
<그림 2.2.19> 지면물리과정 실험별 850 hPa 지위고도 차이	47
<그림 2.2.20> 적운대류물리과정 실험별 850 hPa 지위고도 차이	48
<그림 2.2.21> 지면물리과정 및 적운대류물리과정 실험별 850 hPa 지위고도 차이	48
<그림 2.2.22> 적운대류물리과정 실험별 500 hPa 지위고도)	49
<그림 2.2.23> 2020년 7월 31일 00 UTC를 초기장으로 하는 적운대류물리과정 실험별 KIM 테스트베드의 700 hPa 지위고도 및 수증기 모의 결과 차이	50
<그림 2.2.24> 2020년 7월 31일 00 UTC의 토양수분 값	51
<그림 2.2.25> 2020년 7월 31일 00 UTC를 초기장으로 한 토양수분 초기화 실험	52

제 1 장 사업의 필요성

우리나라의 집중호우는 정체전선, 태풍, 중규모 저기압 등 다양한 종관환경에 의하여 영향을 받는다. 기상예보는 수치예보모델에 의존하기 때문에 수치예보모델의 예측 정확도 진단 및 그에 대한 검증은 매우 중요하다. KIM은 2020년부터 현업 운영 중으로, 관측자료 확대 및 물리과정 개선 등 지속적인 버전 업데이트를 통하여 개선되고 있다. 따라서, KIM의 예측 성능에 대한 심층 분석을 통해 중기 예측 성능을 평가하여 모델의 물리과정 및 계통오차를 분석할 필요가 있다.

기상청(2020)에 따르면, 2020년 여름철 강수 유형별 모의 성능 결과에서는 다른 강수 유형과 비교하여 장마기간에 발생한 고립형 뇌우 사례에서 상대적으로 낮은 예측성을 보이는 것으로 보고되었다. 또한, 태풍에 의하여 발생하는 강수의 경우 위성자료에 비하여 과소모의하며 비교적 강수를 넓은 지역에 알게 발생하는 계통적 오차와 아열대 및 중위도 지역의 태풍에 의해 발생하는 강수 및 수증기 수송 예측 오차로 한반도 장마전선 모의가 실패되는 사례가 보고되었다. 이러한 집중호우에 대한 예측성을 향상시키기 위해서는 KIM의 개선 및 검증을 위하여 한국형모델의 강수 현상별 예측성능을 진단하고 추가적인 사례분석을 통하여 수치모델의 현상별 예측 성공·실패의 충분한 분석과 이해가 필요하다.

제 2세부과제는 한반도 주변에서 발생하는 정체전선, 태풍, 중규모 저기압 등에 의한 집중호우 현상에 대하여 강수 유형별 KIM모델의 모의성능 평가를 수행하고 추가로 수치모델의 물리과정 이해를 통하여 모델의 예측성 향상을 위한 전지구 예보모델의 성능점검 및 개선의 기반을 다지고자 한다.

제 2 장 사업 목적

제 2 세부과제는 현재 기상청에서 운영 중인 KIM의 한반도 강수 현상별 예측성을 평가하고, KIM 테스트베드를 이용한 물리모수화과정 민감도 실험을 통하여 KIM의 물리모수화과정 개선 방향 제시를 목표로 한다. 다음과 같은 세부 목표를 갖는다.

- 정체전선, 태풍, 중규모 저기압 등에 의한 집중호우 현상에 대한 예측성 평가
 - 1) 우리나라 호우 사례 선정
 - 2) 우리나라 호우 사례 예측성 진단
- 예측 성공·실패 사례분석을 통한 예측성향 향상을 위한 물리모수화과정 개선 제언
 - 1) 우리나라 호우 예측 성공/실패 사례 분류 및 예측 실패 사례 원인 분석

제 3 장 사업 개요

제 2 세부과제는 기상청 KIM의 강수 예측성 평가 및 개선을 목표로 한반도 주변에서 나타나는 집중호우를 동반한 정체전선, 태풍, 중규모 저기압 사례에 대한 강수예측성능을 분석하고자 한다. 또한, KIM의 예측 성공·실패 사례를 분석하여 물리모수화과정 개선 방향을 제언하고자 한다. 세부적인 연구 방법은 다음과 같다.

- 정체전선, 태풍, 중규모 저기압 등에 의한 집중호우 현상에 대한 예측성 평가
 - 관측 및 모델 자료의 수집
 - 연도별 강수 예측성 진단
 - 우리나라 호우 사례 선정 및 예측성 평가
 - 호우 사례별 한반도 강수 예측성 진단

■ 예측 성공·실패 사례분석을 통한 예측성능 향상을 위한 물리모수화과정 개선 방향 제언

- KIM 테스트베드 구축
- 예측 실패 사례 분석 선정 및 분석
- KIM 테스트베드를 통한 예측시간 및 적운모수화과정별 호우 사례 민감도 실험 수행
- KIM의 물리과정 개선을 위한 개선 방향 제시

■ 추진 일정

내용	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월
사용자 요구사항 분석 및 수행계획 수립									
모델 및 관측자료 수집 데이터베이스 구축									
관측자료와 KIM의 호우 사례분석									
KIM의 호우사례 민감도 실험									
기술이전 및 보고서 작성									

제 4 장 사업 수행 내용 및 결과

제 1 절. 정체전선, 태풍, 중규모 저기압 등에 의한 집중호우 현상에 대한 예측성 평가

1) 관측 및 모델 자료의 수집 및 예측성 평가

가) 관측 및 모델 자료의 수집 및 강수 예측성 평가

현업 운영 중인 KIM의 3.5 버전의 강수 예측성능을 확인하기 위하여 2020년과 2021년의 여름철(6월, 7월, 8월, 9월) 자료를 확보하였으며, 여름철 집중호우 및 태풍의 강수 예측성능 분석을 진행하였다. 해당 기간에 대한 KIM의 예측시간별 강수모의 특성과 종관특성을 살펴보기 위하여, NASA에서 제공하는 IMERG (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM)와 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)에서 제공하는 ERA5 재분석장을 사용하였다. 호우사례 선정을 위하여 기상청에서 제공하는 종관기상관측자료 (Automated Synoptic Observing System, ASOS)를 사용하였다.

재분석자료를 사용해 모델의 예측성을 분석하기 위하여 성공임계지수(TS, Threat score) 및 공정임계지수(ETS, Equitable Threat Score) 및 치우침 지수(BS, Bias Score)를 사용하였다. 지수를 계산하는데 사용되는 분할표는 <표 1.1.1>와 같으며, 각 지수는 다음과 같이 정의된다.

$$TS = H / (H+M+F) \quad (1)$$

$$ETS = (H-a) / (H+M+F-a) \quad (\text{where } a = ((H+M) \times (H+F)) / (H+M+F+C)) \quad (2)$$

$$BS = (H+F) / (H+M) \quad (3)$$

〈표 2.1.1〉 일 누적 강수에 대한 분할표

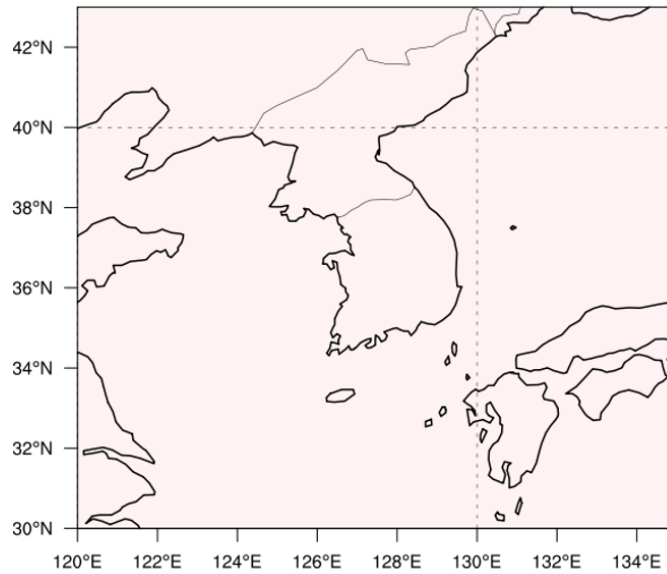
Total events = H+F+M+C		Observation	
		Yes	No
Forecast	Yes	H (Hit)	F (False alarms)
	No	M (Miss)	C (Correct negative)

치우침 지수의 경우, 1에 가까울수록 모델 예측이 관측에 가까움을 의미하며, 1보다 작을 때는 모델이 관측에 비해 과소 모의를, 1보다 큰 경우에는 모델이 관측에 비해 과다 모의하고 있음을 의미한다. 공정임계지수의 경우, 1에 가까울수록 모델 예측분포가 관측에 가까운 결과를 나타냄을 의미한다. 이와 반대로 값이 작아질수록 모델 예측의 위치오차가 커짐을 의미한다. 성공임계지수는 모델이 무작위하게 강수를 맞힐 가능성이 포함되어 있으며, 공정임계지수는 이러한 가능성을 제거한 값으로 강수특성이 다를 경우에도 더 정확하게 예측성을 비교, 평가할 수 있다.

2) 우리나라 호우 사례 예측성 진단

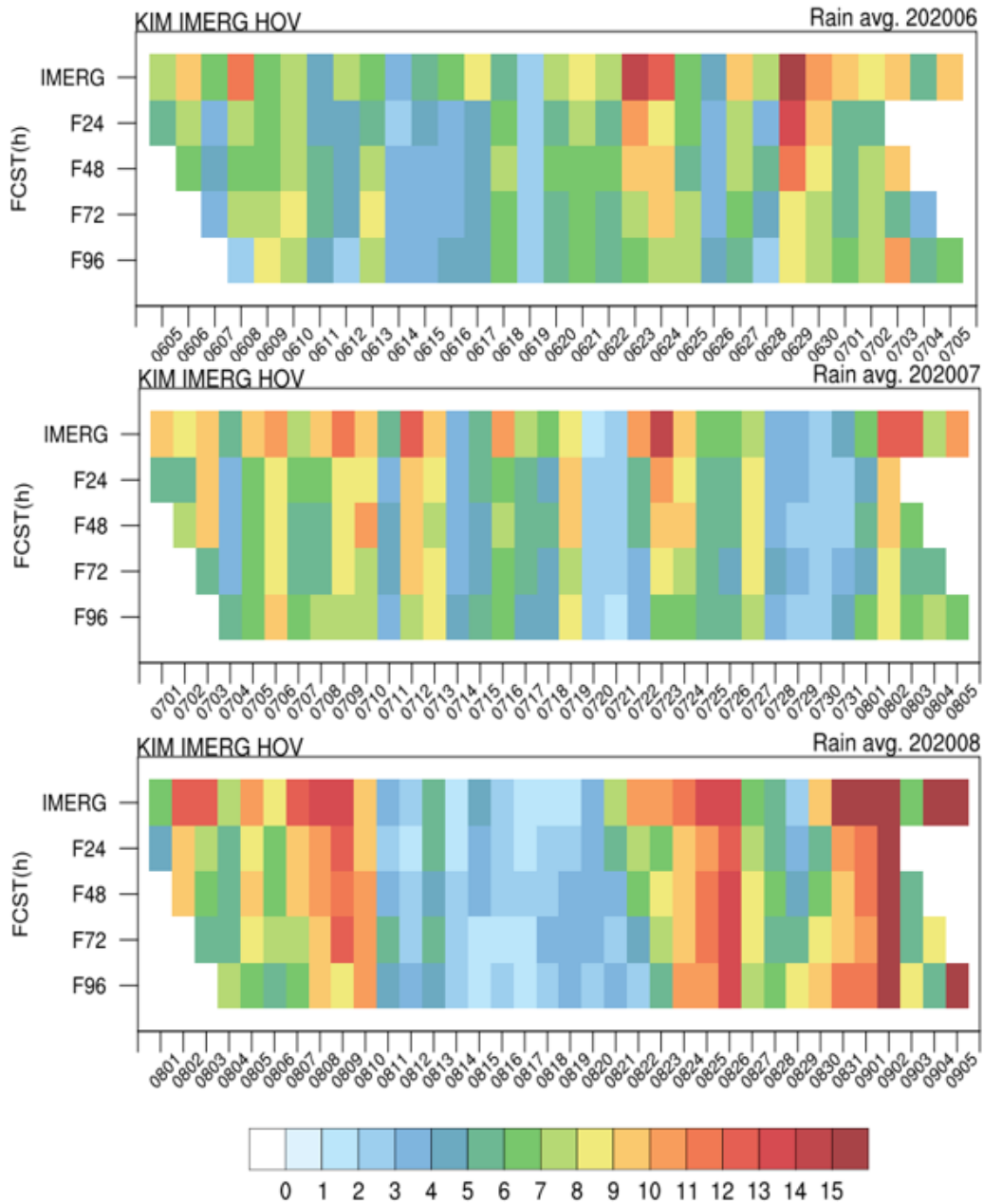
가) 연도별 강수 예측성 진단

KIM의 연도별 한반도 주변 강수예측성을 진단하기 위하여 일평균 강수량 평균 영역을 〈그림 2.1.1〉에 표시하였다. 육지뿐만 아니라 해양에서의 강수를 포함하기 위하여 아래 그림과 같이 분석범위를 잡았다.

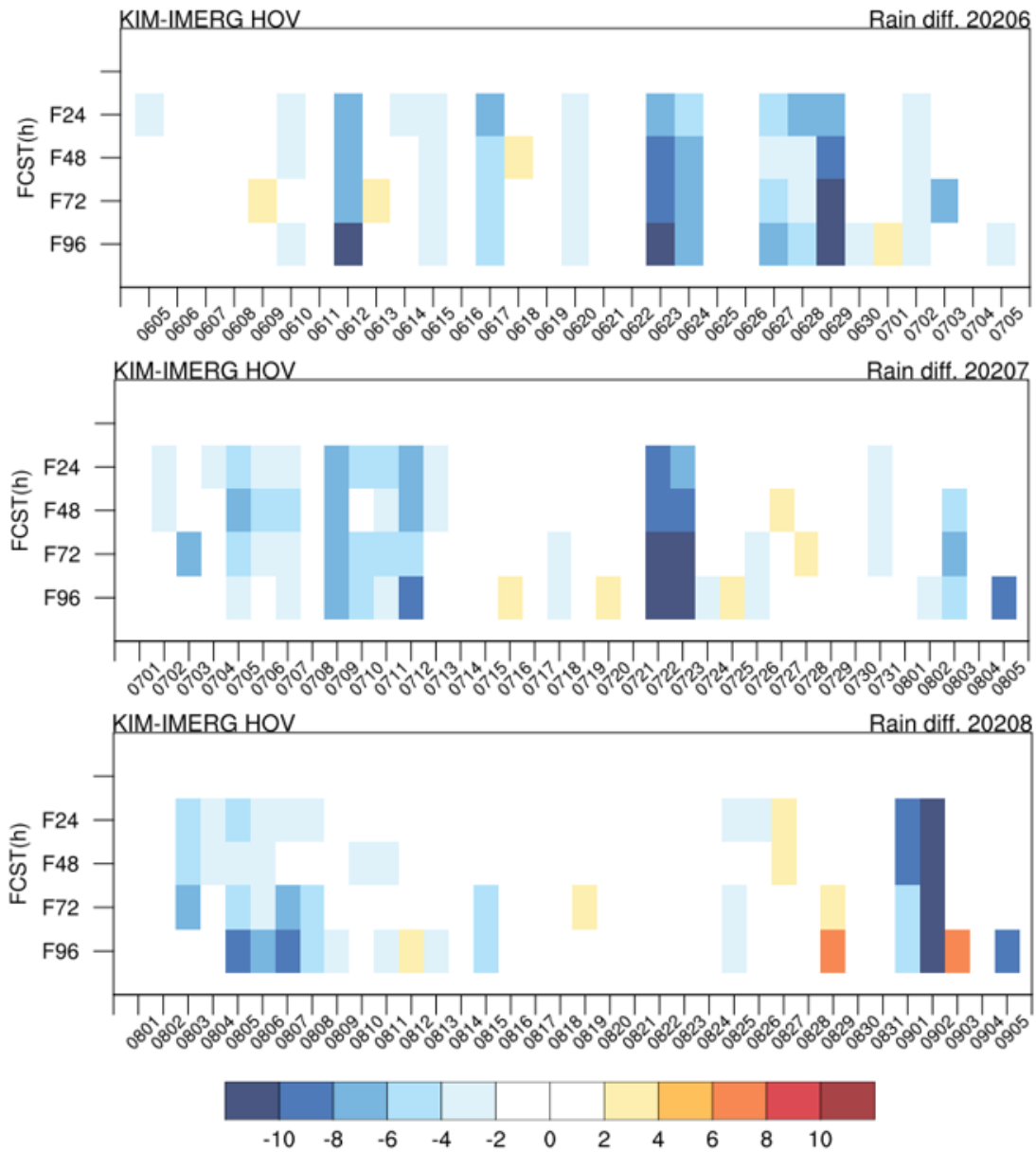


〈그림 2.1.1〉 연도별 한반도 주변 강수
예측성 검증에 사용한 강수 영역

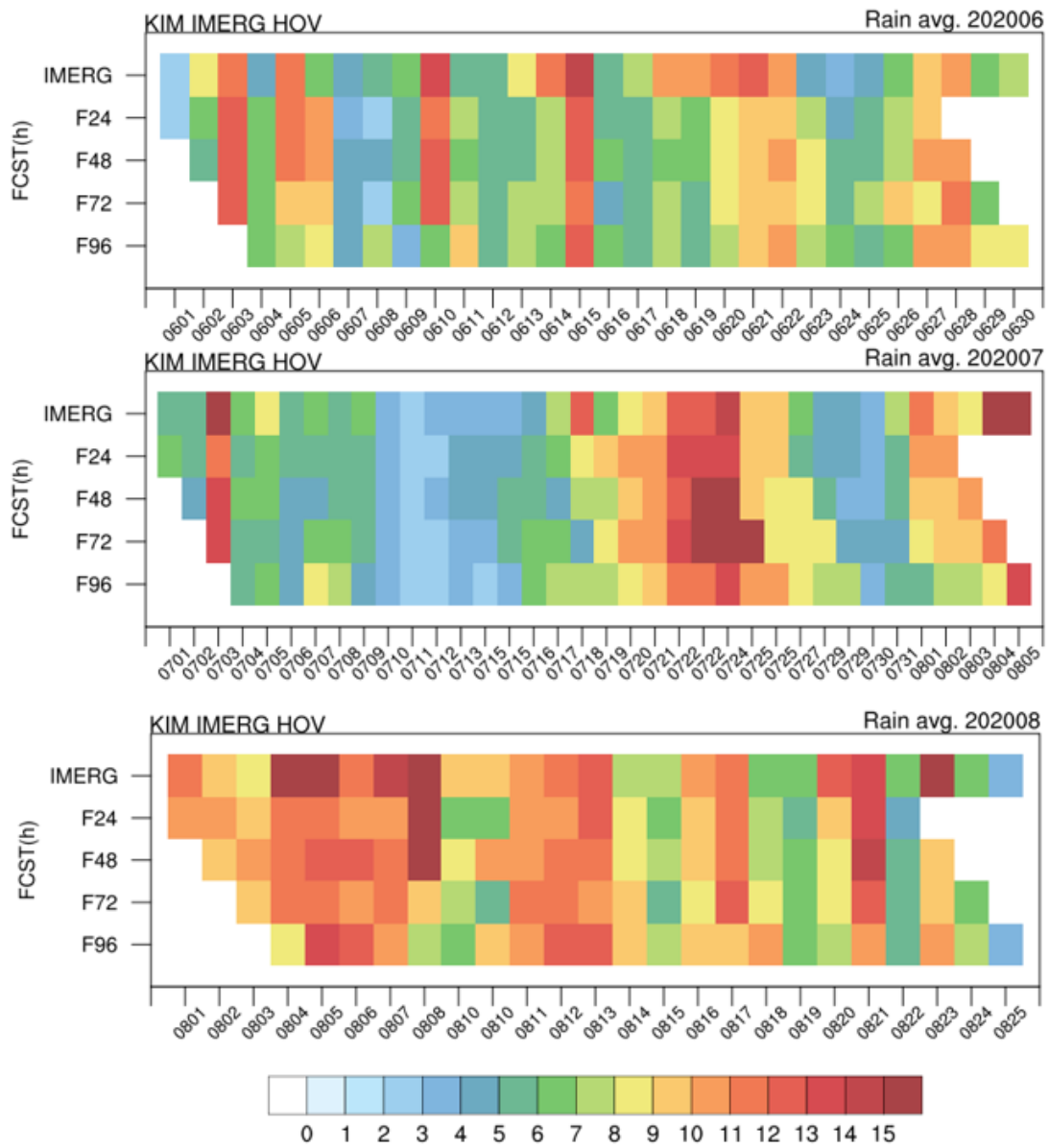
〈그림 2.1.2-7〉은 한반도 주변지역(그림 2.1.1 영역)의 강수 예측성을 분석하기 위하여 일평균강수에 대하여 IMERG와 KIM의 예측시간별 강수 일평균 강수량 및 공간분포패턴 지수를 Hovmöller diagram으로 나타난 그림이다. 가로축은 날짜를 의미하며, 세로축은 예측시간별 KIM의 평균강수량 및 강수 예측성능을 의미한다. 〈그림 2.1.2〉는 KIM의 월별(6월, 7월, 8월) 일 평균 강수를 IMERG와 함께 Hovmöller diagram으로 나타낸 그림이다. KIM의 2020년 강수모의 결과는 IMERG 위성자료와 비교하여 전반적으로 F24 (단시간)에 대한 강수예측은 관측과 유사한 결과를 보이며, 예측시간이 길어질수록 강수를 과소모의하는 경향이 커지는 것으로 분석된다. 특히, 강한 강수가 나타나는 날에 대해서는 예측시간이 길어질수록 강수를 과소모의하는 경향(2020년 6월 23일, 2020년 6월 28일, 2020년 7월 23일, 2020년 8월 8일, 2020년 8월 31일)이 커지며 상대적으로 약한 강수가 나타나는 강수사례에 대해서는 강수의 예측오차가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는, 〈그림 2.1.3〉의 KIM과 IMERG의 차이에서 뚜렷하게 확인할 수 있다.



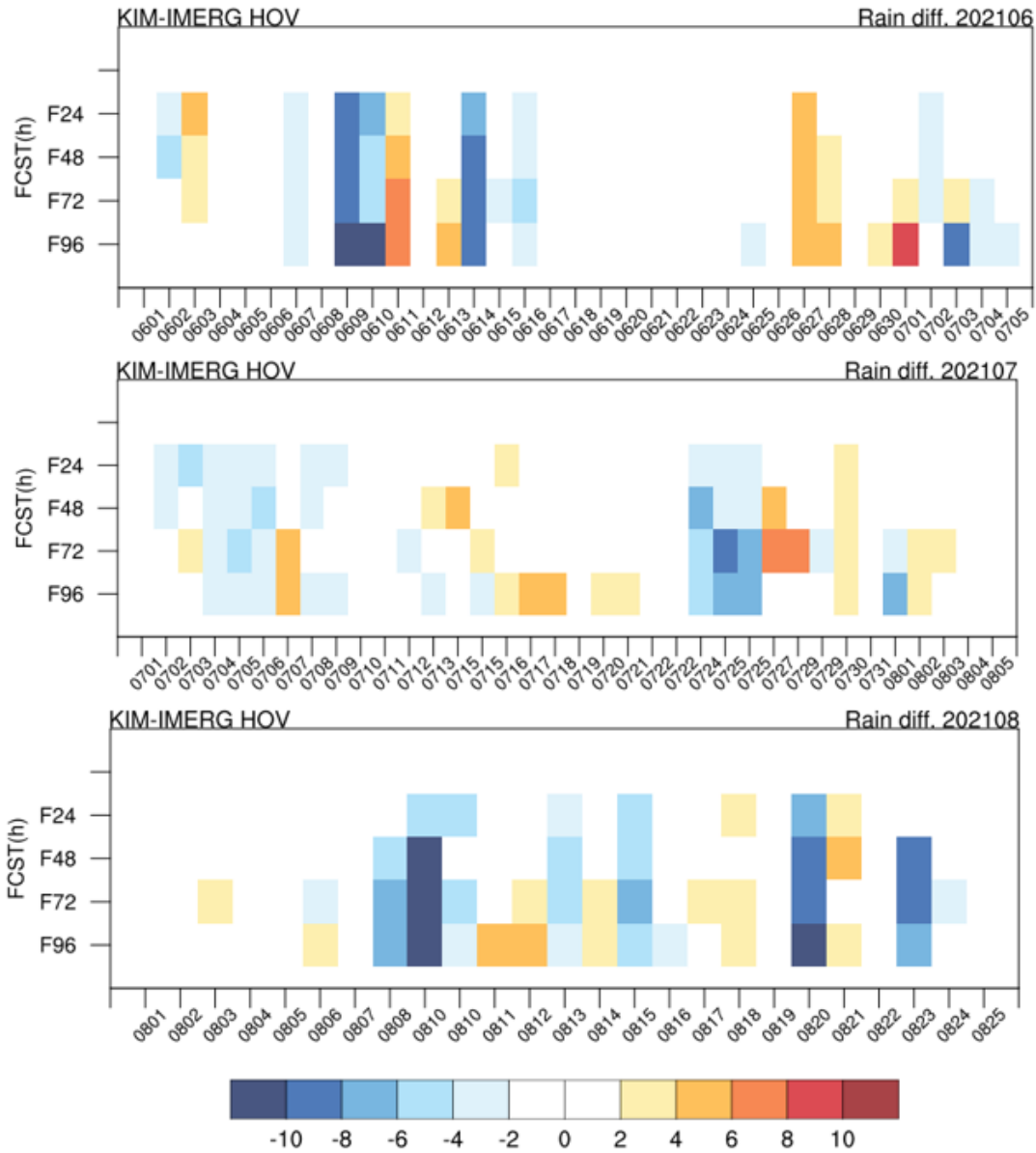
<그림 2.1.2> 2020년 월별(6, 7, 8월)에 대한 IMERG와 KIM의 예측시간
별 모의된 강수 결과



<그림 2.1.3> 2020년 월별(6, 7, 8월)에 대한 IMERG와 KIM의 예측시간별 모의된 강수 차이

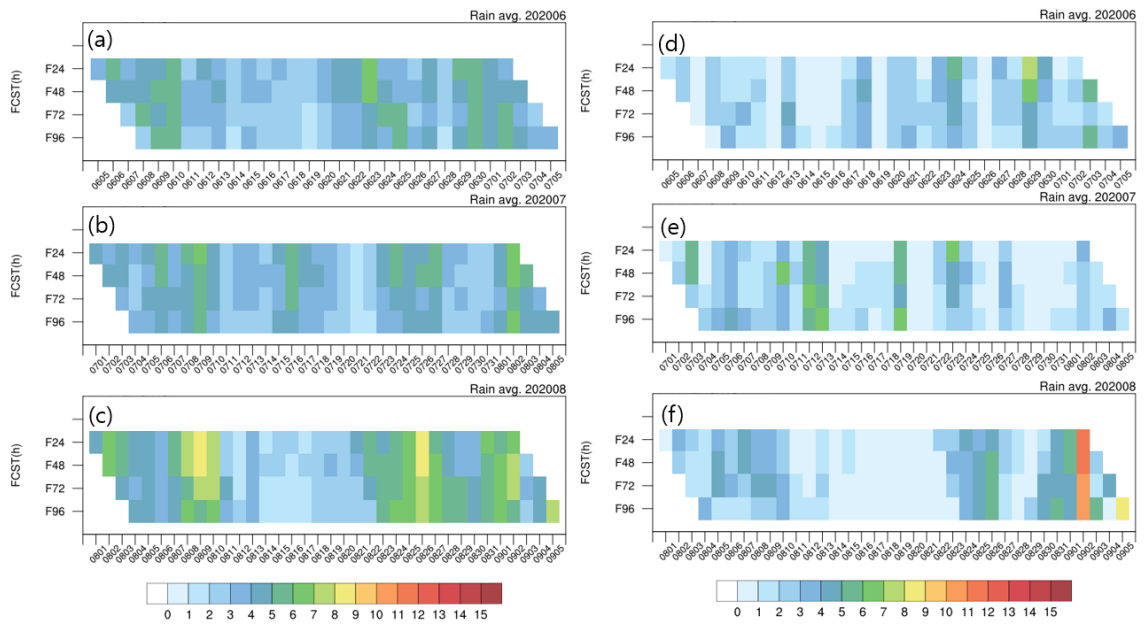


<그림 2.1.4> 2021년 월별(6, 7, 8월)에 대한 IMERG와 KIM의 예측시간별 모의된 강수 결과

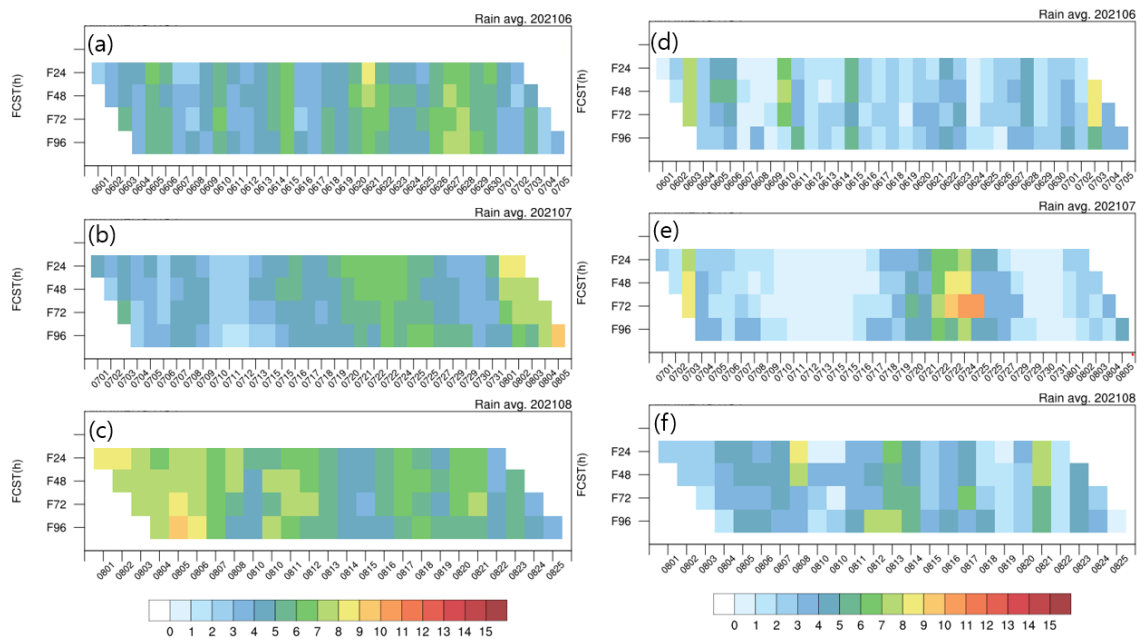


<그림 2.1.5> 2021년 월별(6, 7, 8월)에 대한 IMERG와 KIM의 예측시간별 모의된 강수 차이

<그림 2.1.4>와 <그림 2.1.5>는 한반도 주변 지역에 대한 KIM의 2021년 월별(6월, 7월, 8월) 일 평균 강수와 차이를 나타낸 그림이다. KIM의 2020년 강수모의 결과와 다르게 2021년 강수모의는 IMERG와 비교하여 강수를 과다모의하는 날이 증가하는 것으로 분석된다.

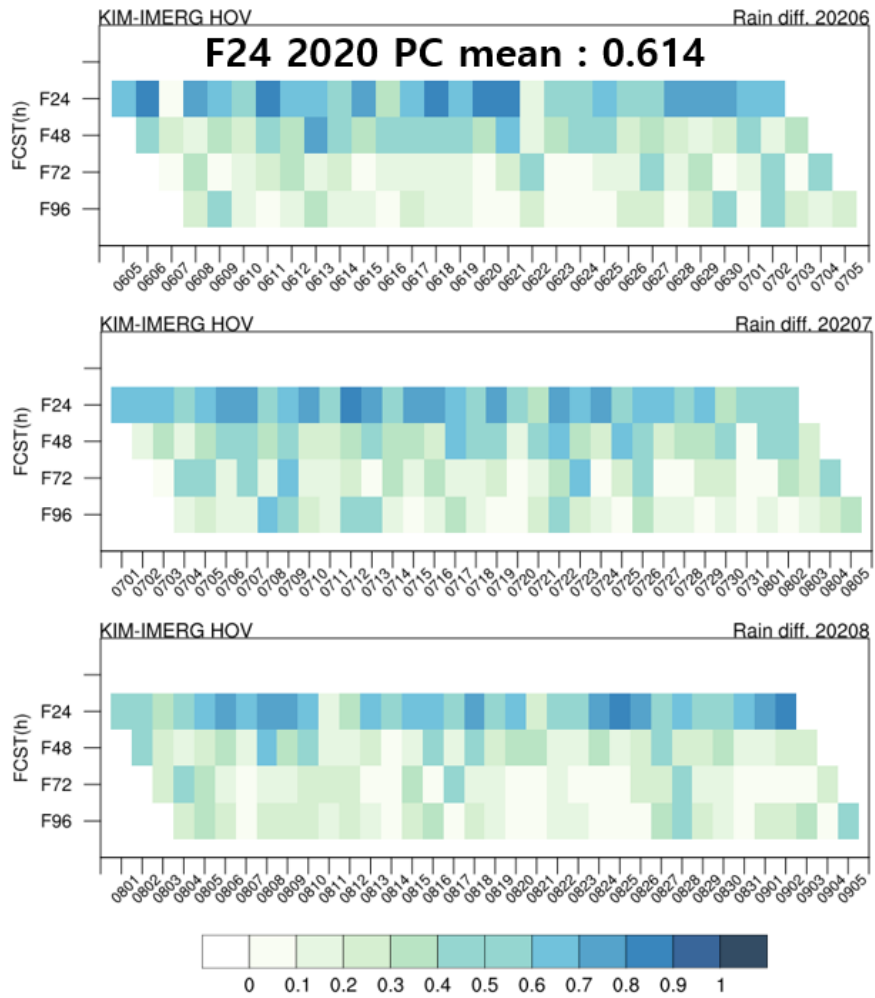


<그림 2.1.6> 2020년 월별(6, 7, 8월)에 대한 KIM의 예측시간별 모의된 강수, 좌측은 대류성강수, 우측은 비대류성강수

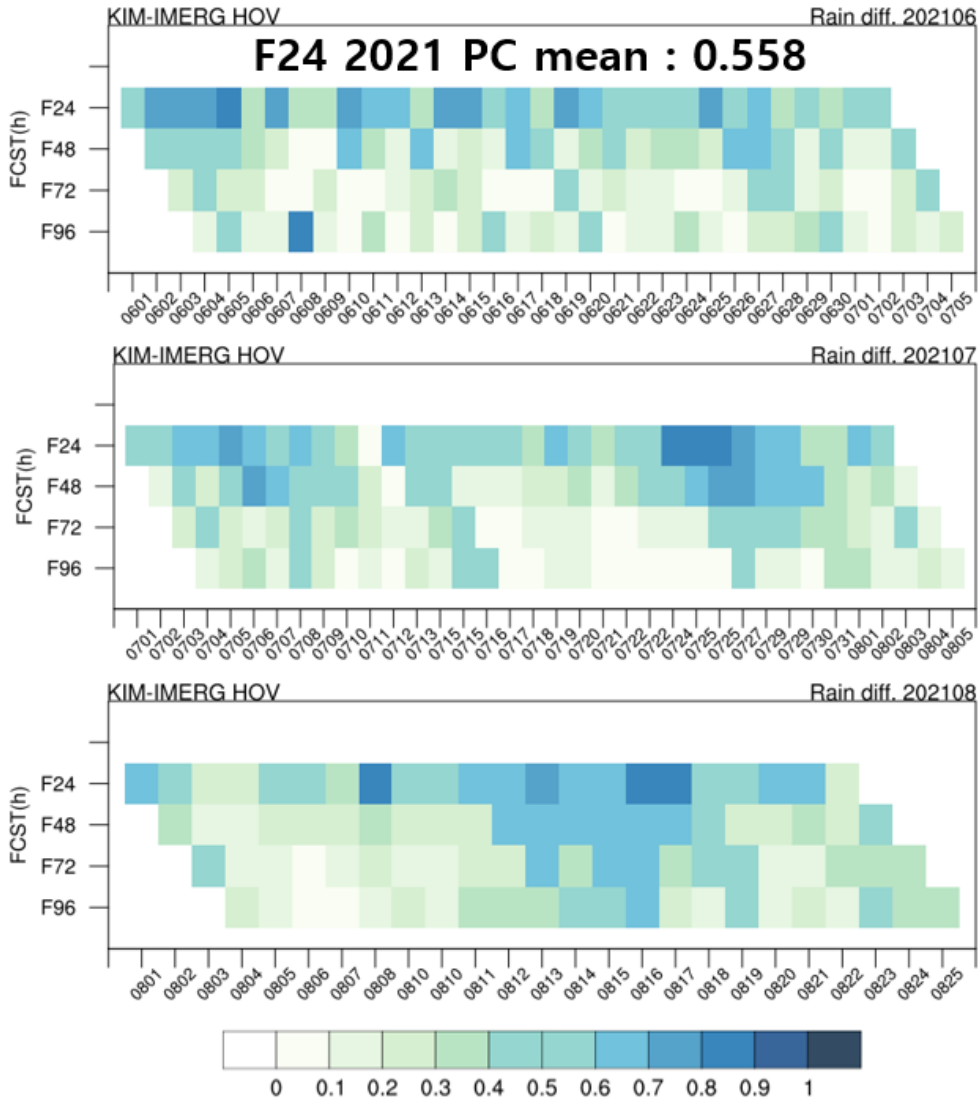


<그림 2.1.7> 2021년 월별(6, 7, 8월)에 대한 KIM의 예측시간별 모의된 강수, 좌측은 대류성강수, 우측은 비대류성강수

<그림 2.1.6>와 <그림 2.1.7>은 한반도 주변지역에 대한 KIM의 예측시간별 2020년 2021년 월별(6월, 7월, 8월) 일 평균 대류성강수(좌)와 비대류성강수(우)를 나타낸 그림이다. KIM의 2020년과 2021년 모두 대류성강수량이 비대류성강수량에 비하여 전반적으로 높은 값을 가지는 경향을 확인할 수 있다. 그러나, 2020년 9월 2일(그림 2.1.6의 c,f), 2021년 7월 23과 24일(그림 2.1.7의 b,e)에서 비대류성강수가 대류성강수에 비하여 많은 강수량 값을 가지는데, 이는 2020년/2021년 각각 태풍 마이삭/인파가 한반도에 접근하면서 호우가 발생한 날로 비대류성강수가 더 많은 비율을 가지는 것으로 분석된다.



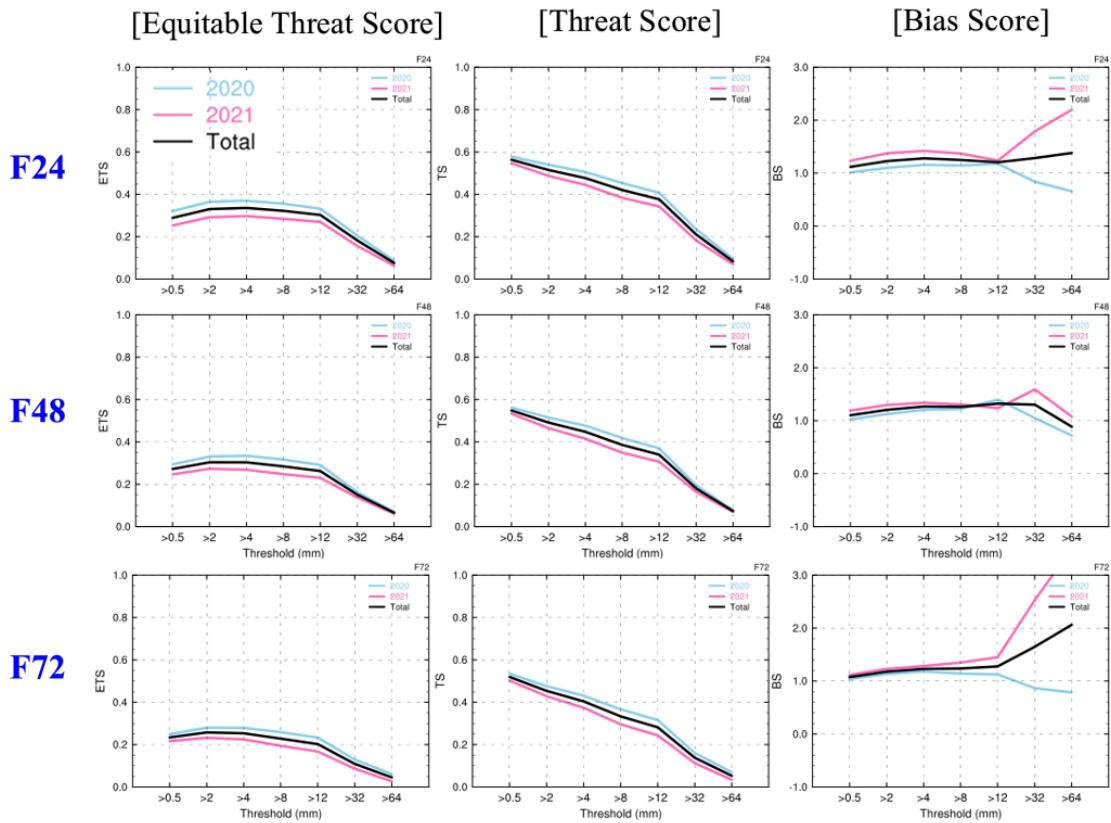
<그림 2.1.8> 2020년 월별(6, 7, 8월)에 대한 IMERG와 KIM의 예측시간별 모의된 강수의 공간분포패턴지수



<그림 2.1.9> 2021년 월별(6, 7, 8월)에 대한 IMERG와 KIM의 예측 시간별 모의된 강수의 공간분포패턴지수

<그림 2.1.8>와 <그림 2.1.9>은 한반도 주변지역에 대한 KIM의 예측시간에 따른 월별(6월, 7월, 8월) 일평균강수의 공간분포패턴지수를 Hovmöller diagram으로 나타내었다. 검증자료는 IMERG를 사용하였으며, 1에 가까울수록 IMERG와 KIM의 공간분포 예측성이 유사함을 의미한다. 전반적으로, KIM의 공간분포패턴은 단시간 예측(F24)에서 가장 높은 값을 가지며, 예측시간이 길어질수록 예측성이 떨어지는 경향을 보인다. 또한, 2020년(0.614)의 단시간

예측 (F24) 공간분포패턴 값은 0.614로 2021년의 단시간 예측 공간분포패턴 값보다 높은 값을 가지는 것으로 나타났다. 이는, 2021년에 강수강도가 강하고, 과다모의되는 경향이 증가함에 따라 나타나는 결과와 일치한다.



<그림 2.1.10> 연도별(2020년, 2021년)에 대한 IMERG와 KIM의 강수검증지수, 좌측부터 순서대로 ETS, TS, BIAS 지수, 위에서부터 순서대로 F24, F48, F72 강수예측에 대한 결과

<그림 2.1.10>은 연도별 여름철(6월, 7월, 8월)의 KIM의 예측시간별 강수지수를 나타낸 그림이다. KIM은 예측시간이 길어질수록, 강수강도가 강할수록 KIM의 강수 모의성능이 낮아짐을 확인할 수 있다. 이는, KIM이 강한 강도의 강수를 모의하는데 한계가 있음을 시사한다. 연도별 강수예측 성능을 살펴보면, 여름철 강수에 대하여 2020년이 2021년에 비하여 예측성능이 우수하게 나타난다. 이는 <그림 2.1.8>과 <그림 2.1.9>에서 2021년이 2020년에 비하여

공간패턴상관지수 값이 낮게 나타난 것과 일치하는 결과이다. 특히, BIAS의 경우 2021년이 2020년에 비하여 강한 강도의 영역에서 강수를 과다모의하는 경향이 나타나며, 이는 F72에서 과다모의하는 경향이 크게 나타났다.

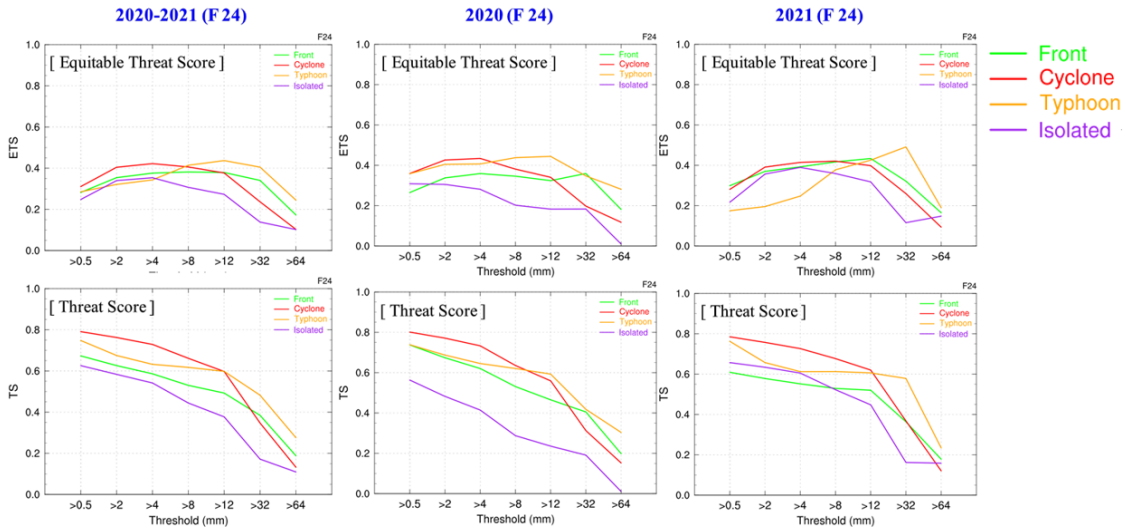
나) 우리나라 호우 사례 선정 및 예측성 평가

한반도에서의 집중호우는 종관규모 강제력을 동반한 중위도 저기압계 혹은 정체전선, 태풍과 같은 열대성 저기압의 직·간접적인 영향에 동반되어 발생한다. 한반도 강수 현상별 (정체전선, 태풍, 중규모 저기압 등) 강수 예측성 평가를 하기 위하여 기상청 관측 강수량을 기반으로 사례들을 선정하고, 예측 선행시간·강수현상별 예측성을 비교한다. KIM 예측 자료가 존재하는 여름철 기간에 대해 호우주의보 기준(3시간 누적강수 60mm 이상)을 만족하는 ASOS 지점이 존재하는 사례들을 세부 강수 현상으로 구분하였다. 이에, 선정된 사례는 총 22개 사례로 전선형(6개), 저기압형(8개), 태풍(5개), 고립형 뇌우계(4개)로 구분하였다.

다) 호우 사례별 한반도 강수 예측성 진단

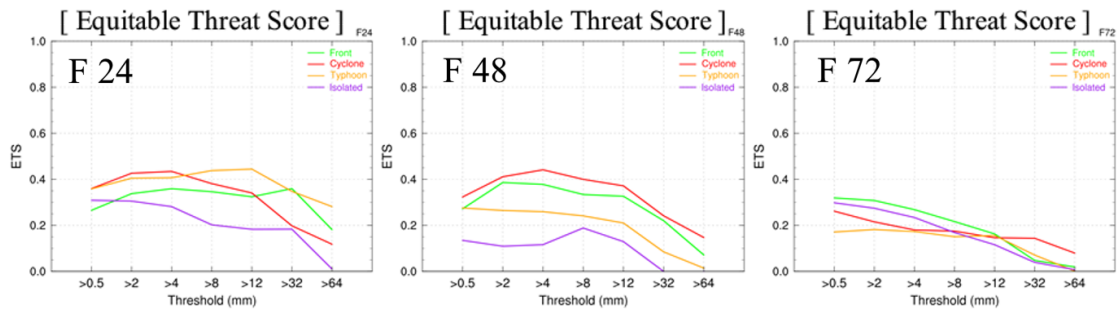
한반도에서의 집중호우는 종관규모 강제력을 동반한 중위도 저기압계 혹은 정체전선, 태풍과 같은 열대성 저기압의 직·간접적인 영향에 동반되어 발생한다. 한반도 강수 현상별 (정체전선, 태풍, 중규모 저기압 등) 강수 예측성 평가를 하기 위하여 기상청 관측 강수량을 기반으로 사례들을 선정하고, 예측 선행시간·강수 현상별 예측성을 비교한다. KIM 예측 자료가 존재하는 여름철 기간에 대해 호우주의보 기준(3시간 누적강수 60mm 이상)을 만족하는 ASOS 지점이 존재하는 사례들을 세부 강수 현상으로 구분하였다. 이에, 선정된 사례는 총 22개(2020년/ 2021년) 사례로 전선형 6 개(3/3), 저기압형 8개(4/4), 태풍 5(4/1*), 고립형 뇌우계 2개 (1/1)로 구분하였다. 사례별 유형

분류는 일기도 및 레이더 영상을 기반으로 주관적으로 분류하였다(*2021년은 한반도 영향 태풍이 없어 간접 태풍으로 분류).

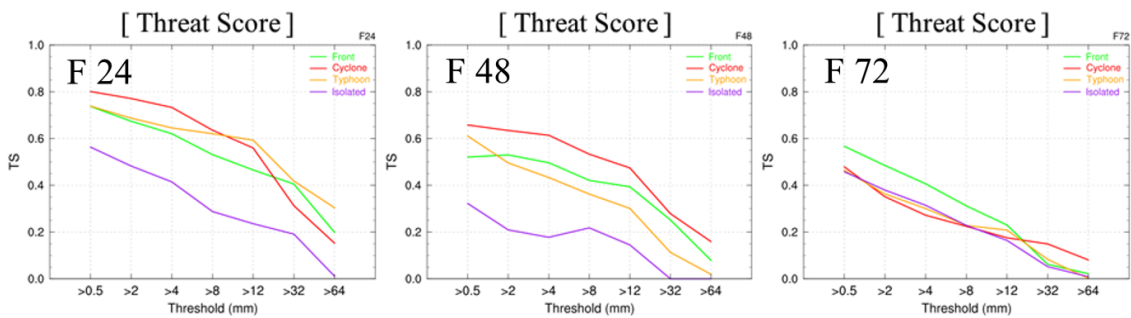


<그림 2.1.11> 강수 유형별 KIM의 단기 (F24) 강수검증지수, 좌측부터 순서대로 2020년과 2021년, 2020년, 2021년; 위에서부터 순서대로 ETS, TS 지수

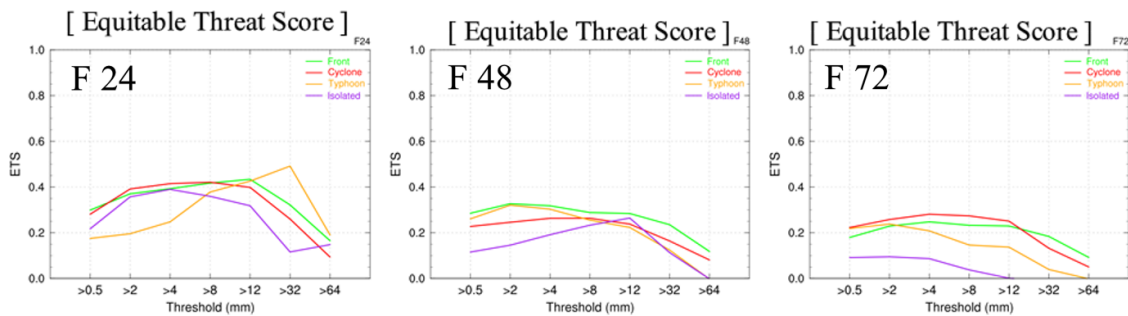
<그림 2.1.11>은 강수 유형별 KIM의 단기 강수 검증지수를 나타낸 그림이다. 각 유형별 강수검증 결과는 전반적으로 낮은 강수 임계값에 대하여 높은 예측 성능이 우수한 결과를 보이며, 높은 임계값을 가질수록 예측성능이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 2020년과 2021년 모두에서 고립형 뇌우계의 예측성능이 떨어짐을 확인할 수 있다.



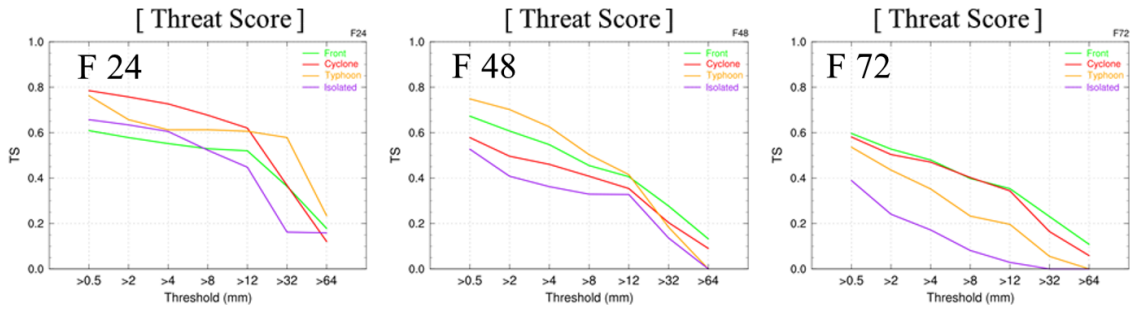
<그림 2.1.12> KIM의 2020년 강수 유형별 강수검증지수 (ETS), 좌측부터 순서대로 F24, F48, F72



<그림 2.1.13> KIM의 2020년 강수 유형별 강수검증지수 (TS), 좌측부터 순서대로 F24, F48, F72



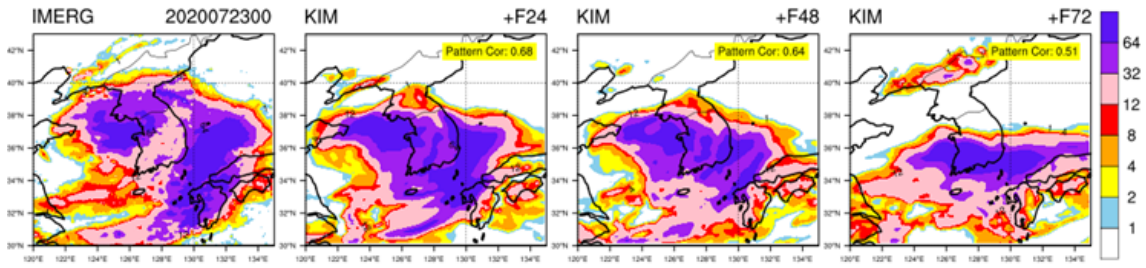
<그림 2.1.14> KIM의 2021년 강수 유형별 강수검증지수(ETS), 좌측부터 순서대로 F24, F48, F72



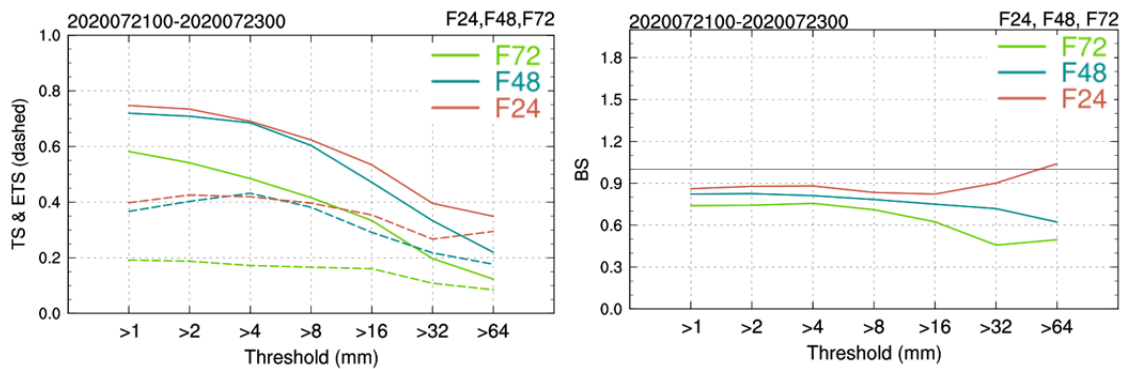
<그림 2.1.15> KIM의 2021년 강수 유형별 강수검증지수 (TS), 좌측부터 순서대로 F24, F48, F72

<그림 2.1.12>와 <그림 2.1.13>은 강수 유형별 2020년 KIM의 단기 강수 검증지수를 나타낸 그림이며, <그림 2.1.14>과 <그림 2.1.15>는 강수 유형별 2021년 KIM의 단기 강수 검증지수를 나타낸 그림이다. 예측시간이 길어질수록 각 강수 유형별 예측성능이 유사해짐을 확인할 수 있으나, 특히 저기압형 (빨간색) 유형의 경우 F72에서 예측성능 변화가 가장 큰 것을 확인할 수 있다.

본 파트에서는 각 유형별 KIM의 호우 예측실패 사례를 ERA5 재분석장으로 비교·분석하였다. 첫 번째 분석사례는 F72에서 예측성능의 변화가 큰 저기압형 사례 중 하나(2020년 7월 23일)이다. <그림 2.1.16>은 2020년 7월 22일 00 UTC에서 23일 00 UTC의 IMERG와 KIM의 초기시간에 따른 예측시간별 일누적강수 분포도이다. 본 사례의 경우, 앞서 언급했듯이 F72 예측성능 (그림 2.1.17의 초록색)이 다른 예측시간(F24, F48)에 비하여 현저하게 떨어짐을 확인할 수 있고, 전반적으로 IMERG 위성자료과 비교하여 강수량을 과소모의함을 확인하였다.



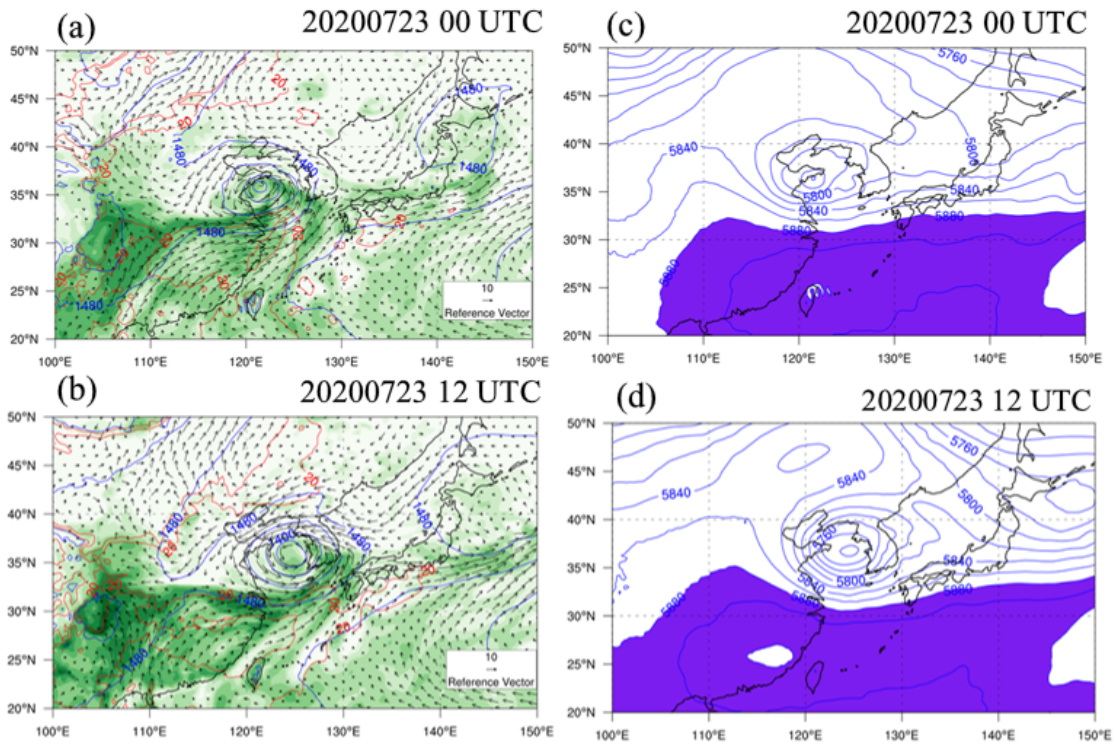
<그림 2.1.16> IMERG 위성자료와 KIM의 예측시간별 일누적강수 분포도 (2020년 7월 23일 저기압형 사례)



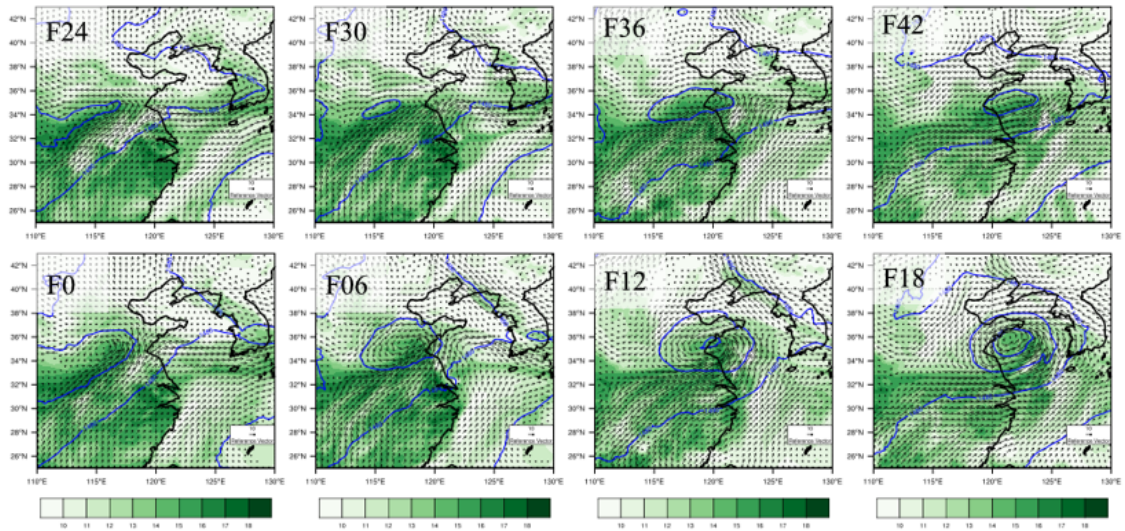
<그림 2.1.17> KIM의 예측시간별 강수 검증지수, 좌측부터 Equitable Threat Score(점선) 및 Threat Score(실선)과 Bias Score, (2020년 7월 23일 저기압형 사례)

<그림 2.1.18>은 ERA5 재분석장의 2020년 07월 23일 00 UTC와 07월 23일 12 UTC의 850 hPa의 종관장(수증기, 지위고도, 온도, 바람)과 500 hPa의 종관장(지위고도)를 나타낸 그림이다. <그림 2.1.18>의 (a)와 (b)에서 산동반도에 걸쳐진 저기압이 수증기(채색)를 동반하여 한반도로 접근하면서, 발달된 저기압이 한반도가 강한강도의 강수를 발생시켰다. 그러나, <그림 2.1.19> 초기시간에 따른 KIM의 예측시간별 모의성능을 살펴보면, 초기시간이 2020년 7월 21일 00 UTC의 F24이 2020년 7월 22일 00 UTC의 F00에 비하여 산동반도 서쪽 내륙에서부터의 저기압강도를 과소모의함을 확인할 수 있다. 이에, 본사례의 F72(초기시간:2020년 7월 21일 00 UTC)의 저기압형 강수 모의실패 원인은 중국내륙에서 시작되는 대류가 적절하게 트리거되지 못함(대류 발달의

과소모의)에 따라 한반도에서 발생하는 폭발적인 저기압형 강수가 과소모의 된 것으로 분석된다.

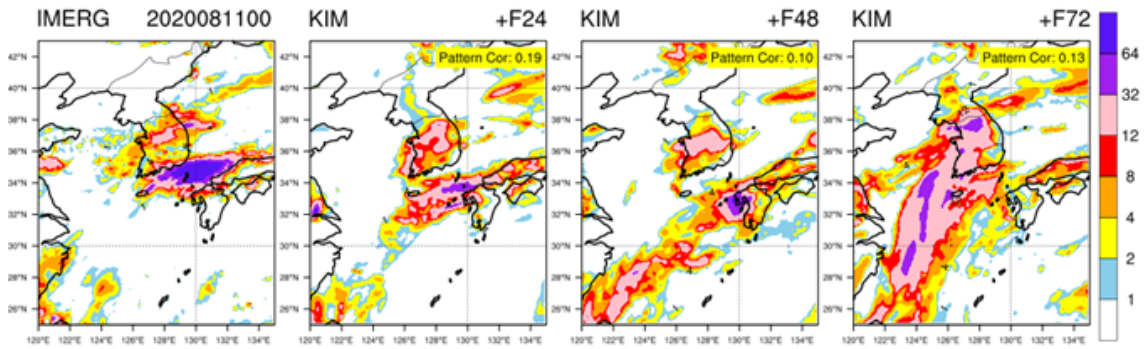


<그림 2.1.18> 저기압형 사례 (2020년 7월 23일)의 850 hPa(좌측) 및 500 hPa (우측) 종관장, 위에서부터 2020년 7월 23일 00 UTC와 2020년 7월 23일 12 UTC (ERA5 재분석장 사용)

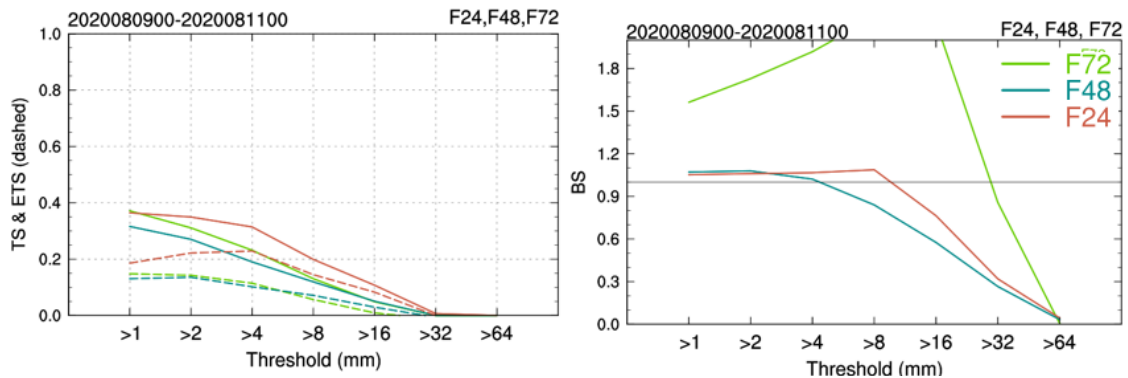


<그림 2.1.19> 초기시간에 따른 KIM의 예측시간별 850 hPa 종관장 모의결과, 위에서부터 초기시간 2020년 7월 21일 00 UTC, 2020년 7월 22일 00 UTC

두 번째 분석사례는 태풍 장미가 한반도를 지나가면서 발생한 호우 사례 (2020년 8월 11일)이다. 2020년 8월 11일 00 UTC에서 2020년 8월 12일 00 UTC의 IMERG 일누적강수는 한반도 남동쪽에서 일본 사이의 대한해협에서 강한강도의 강수를 가짐을 확인할 수 있으나, 예측시간이 길어질수록 KIM의 강수분포 및 강도 측면에서 예측성능이 현저하게 떨어짐을 확인할 수 있다 (그림 2.1.20). 특히, F72에서 IMERG와 완전히 다른 강수분포를 보이며, 강수량 또한 과다 모의됨을 알 수 있다. 이는 <그림 2.1.21>의 BIAS score에서도 나타난다.

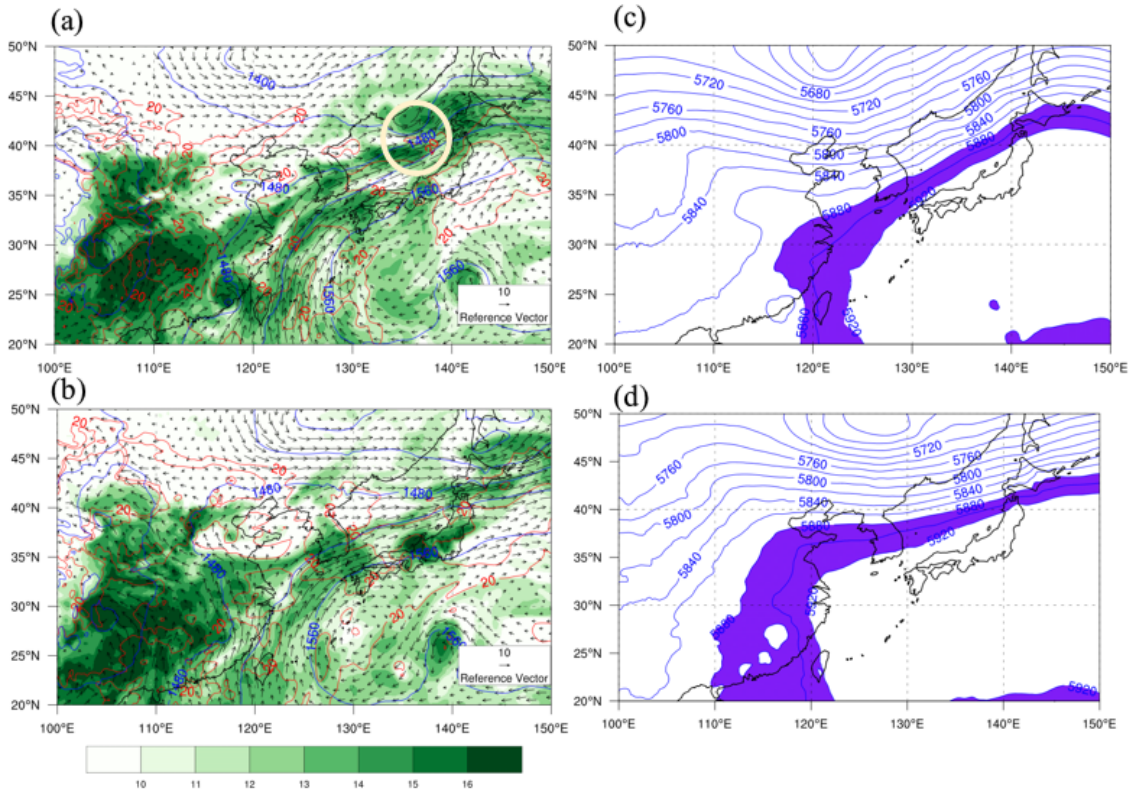


<그림 2.1.20> IMERG 위성자료와 KIM의 예측시간별 일누적강수 분포도 (2020년 8월 11일 태풍 사례)



<그림 2.1.21> KIM의 예측시간별 강수 검증지수, 좌측부터 Equitable Threat Score(점선) 및 Threat Score(실선)과 Bias Score, (2020년 8월 11일 태풍 사례)

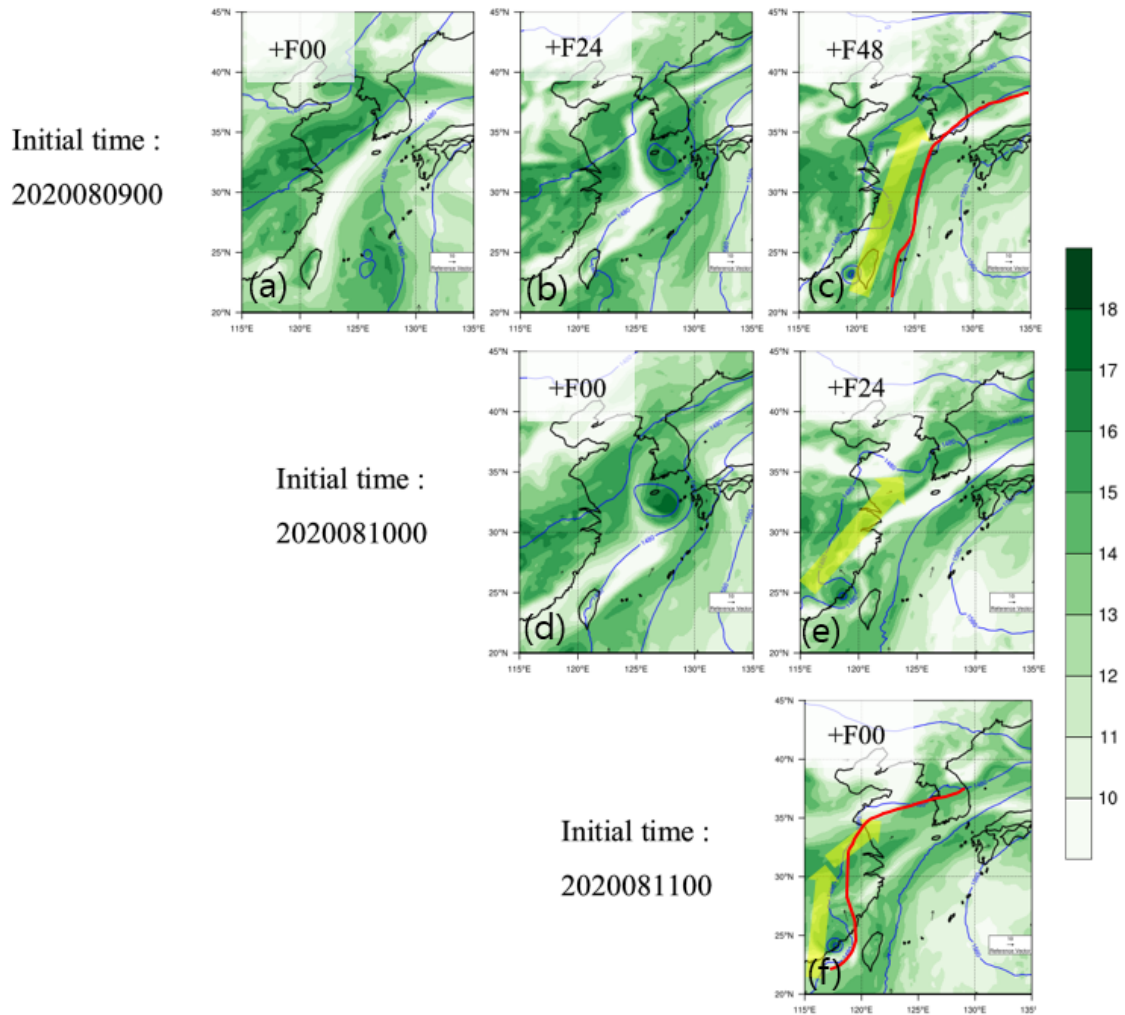
<그림 2.1.22>는 2020년 8월 11일 00 UTC와 12 UTC의 850 hPa(수증기, 지위고도, 온도, 바람)과 500 hPa(지위고도) 종관장을 나타낸다. 태풍 장미는 2020년 8월 10일 00 UTC 당시 994 hPa의 매우 약한 세력의 태풍이었으며, 2020년 8월 11일 00 UTC에서는 한반도를 통과한 상태(그림 2.1.22, a의 동그라미)로 장미를 따라 다량의 하층 수증기(초록색 채색)가 유입되는 것을 확인할 수 있다. 본 태풍에 의한 호우 사례는 태풍 장미가 한반도를 지나가면서 태풍에 의하여 동반된 수증기 및 종관모의 오차에 의하여 한반도 호우예측성이 떨어진 사례일 것으로 분석하였다.



<그림 2.1.22> <그림 2.1.18>과 동일하나 태풍 사례 (2020년 8월 11일), 위에서부터 2020년 8월 11일 00 UTC와 2020년 8월 11일 12 UTC (ERA5 재분석장 사용)

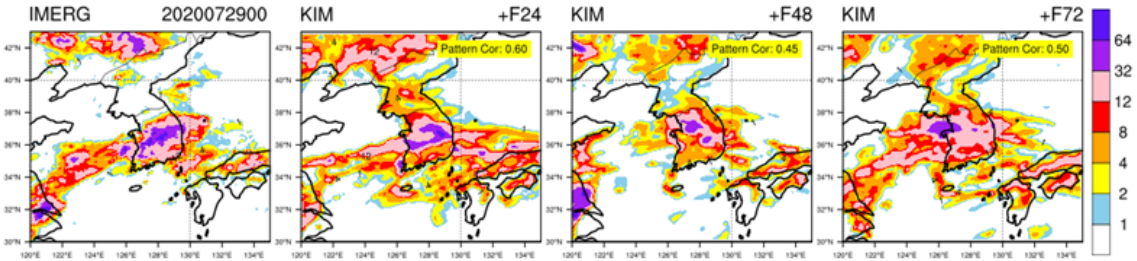
본 태풍 사례에서 KIM의 강수 예측성 감소 원인을 분석하기 위하여, 초기시간에 따른 KIM의 예측시간별 850 hPa 종관장(수증기, 지위고도, 온도, 바람) 모의결과를 살펴보았다 (그림 2.1.23). 강수 예측성의 차이가 큰 2020년 8월 9일 00 UTC과 11일 00 UTC의 F00의 하층 지위고도와 비습을 비교하여 볼 때(그림 2.1.23의 c와 f), 예측시간이 긴 9일 00 UTC의 F48의 지위고도 선이 11일 00 UTC의 F00 지위고도 선과 비교하여 동쪽으로 많이 수축(빨간색 선)되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이는, 초기시간 2020년 8월 9일 00 UTC의 F00에서 F48의 결과를 볼 때, 태풍 장미에 의한 영향(대만 오른쪽에서 제주도로 북상하면서 고기압을 동쪽으로 수축)인 것으로 보인다 (예측시간이 짧아질수록 개선). 또한, 장미 다음에 발생하는 태풍 MEKHALA (대만부근에 위치)가 2020년 8월 11일 F00보다 남동쪽 위치하며, 수축된 고기압을 따라 다량의

수증기가 한반도상으로 바로 유입됨에 따라 중위도에서 한반도까지 강수가 과다모의되는 결과를 보이는 것으로 분석된다. 즉, KIM의 태풍에 의하여 발생하는 강수 및 종관장의 모의 오차 증가가 아열대 및 중위도에서 유입되는 강수 및 수증기의 수송 예측 오차를 증가시켰고, 한반도 강수 모의 실패의 요인으로 작용될 수 있을 것으로 분석된다.

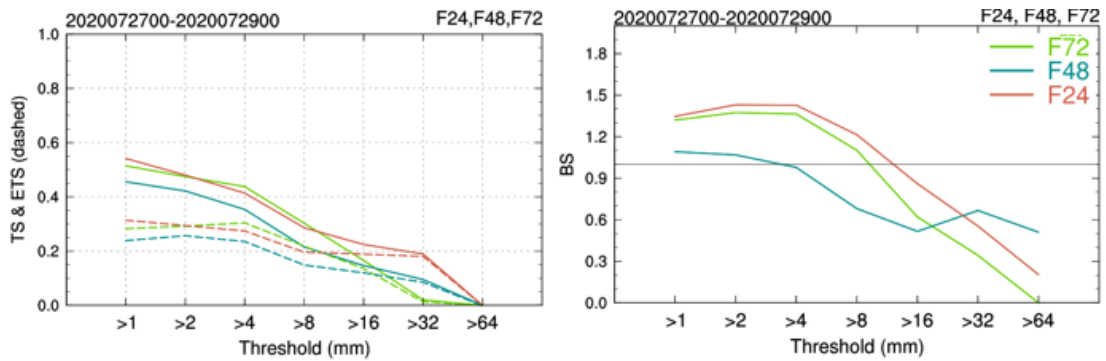


<그림 2.1.23> 초기시간에 따른 KIM의 예측시간별 850 hPa 종관장 모의결과, 위에서부터 초기시간 2020년 8월 9일 00 UTC, 2020년 8월 10일 00 UTC, 2020년 8월 11일 00 UTC

세 번째 분석사례는 고립형 뇌우 사례로, 저기압형 및 태풍 사례에 비하여 예측시간이 짧아질수록 모의가 개선되지 않는 것이 특징이다.

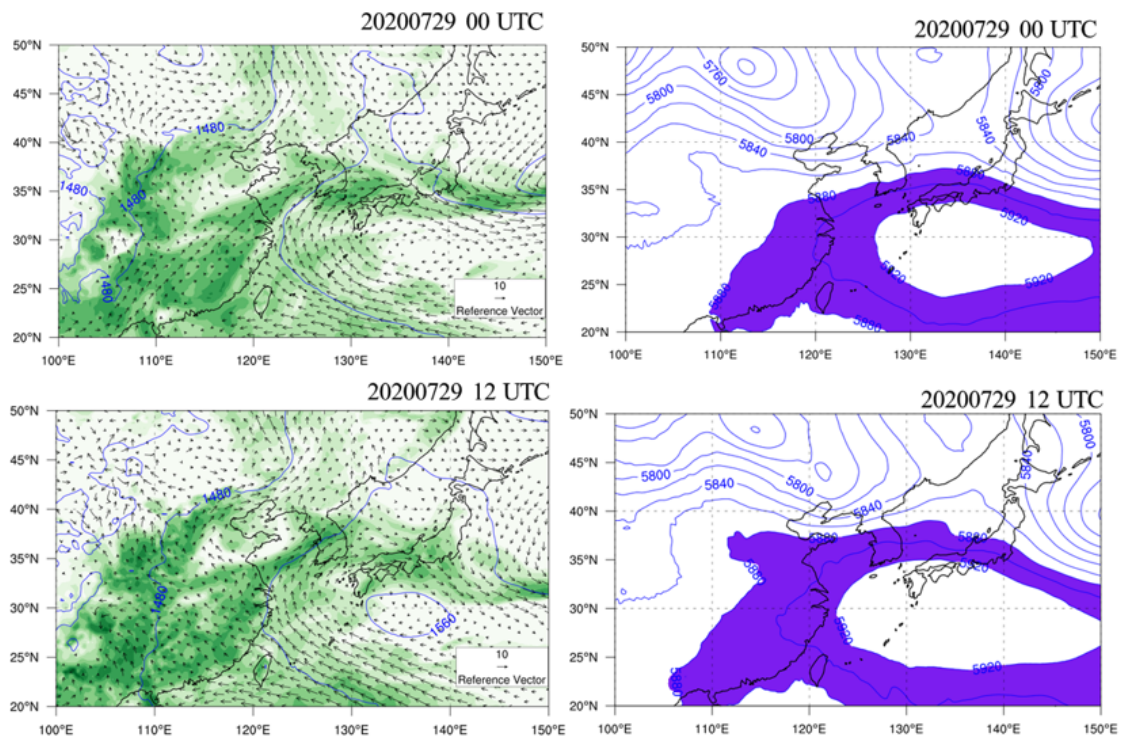


<그림 2.1.24> IMERG 위성자료와 KIM의 예측시간별 일누적강수 분포도 (2020년 7월 29일 고립형뇌우 사례)



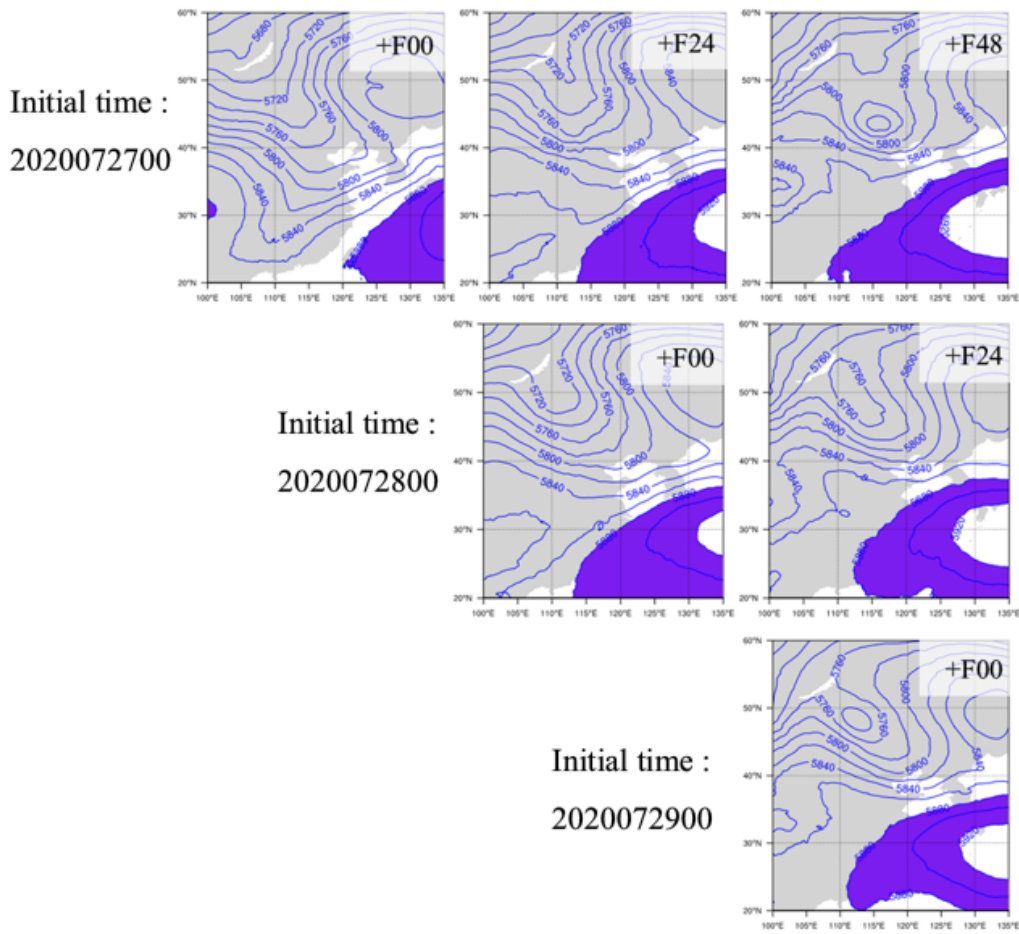
<그림 2.1.25> KIM의 예측시간별 강수 검증지수, 좌측부터 Equitable Threat Score(점선) 및 Threat Score(실선)과 Bias Score, (2020년 7월 29일 고립형뇌우 사례)

<그림 2.1.26>는 2020년 7월 29일 00 UTC와 12 UTC의 850 hPa과 500 hPa 종관장을 나타낸다. 북서태평양고기압이 한반도 중부지역까지 걸쳐져있으며, 고기압 가장자리를 따라 서쪽에서 한반도상으로 수증기가 약하게 유입되고 있다. 2020년 7월 29일 12 UTC에 한반도 중부지역에서 수증기의 양이 비교적 높은 것을 확인할 수 있으며, 한반도상에서의 수증기의 유입으로 불안정도가 강해져 강수가 발생한 사례로 분석된다.



<그림 2.1.26> <그림 2.1.18>과 동일하나 고립형 뇌우사례 (2020년 7월 29일), 위에서부터 2020년 7월 29일 00 UTC와 2020년 7월 29일 12 UTC (ERA5 재분석장 사용)

본 사례에서는 초기시간에 따른 예측성능에 있어 850 hPa의 수증기 오차는 크지 않음을 확인 하였으나(보이지 않음), 중국 북부지역에서부터 발달하는 기압골의 모의 오차가 증가하는 것을 확인하였다 (그림 2.1.27). 본 사례는 기압골의 강도 모의 차이가 한반도 강수대 위치 및 강수 강도 모의 오차에 영향을 미친 것으로 분석된다. 본 사례의 연장선으로 기압골 강도 모의 오차의 증가 원인을 제 2절에서 KIM 테스트베드를 이용하여 분석하고자 한다.



<그림 2.1.27> 초기시간에 따른 KIM의 예측시간별 500 hPa 지위고도 모의 결과, 위에서부터 초기시간 2020년 7월 27일 00 UTC, 2020년 7월 28일 00 UTC, 2020년 7월 29일 00 UTC

제 2 절. 예측 성공·실패 사례분석을 통한 예측성능 향상을 위한 물리모수 화과정 제언

1) 우리나라 호우 예측 성공·실패 사례 분류 및 예측 실패 사례 원인 분석

가) KIM 테스트베드 구축

한국형 수치예보모델은 현재 기상청 슈퍼컴퓨터 4호기 중앙처리장치 (Central Processing Unit, CPU)인 Intel Xeon(R) E5-2690 v3을 사용하여 운영되고 있다. 이는 한국형 수치예보모델 운영에 기상청 슈퍼컴퓨터 계산자원의 약 40%를 이용할 정도로 대량의 계산자원이 필요한 것으로, 한국형 수치예보모델의 12일 예측 시 약 1TB의 데이터가 산출되기 때문에 매우 무겁고 방대한 계산자원 및 저장 용량이 필요하다. 기상청(2020,2021)는 기상청에서 제공받는 KIM 규준모델(KIM-meso) 데이터를 참고하여 KIM 테스트베드를 구축하였고, KIM의 2020년 및 2021년 태풍 사례에 대한 수치 실험을 통하여 KIM 테스트베드가 KIM이 가지는 모델의 계통적 특성(태풍 초기강도 및 최대강도시기의 태풍 강도 과소모의와 강수 과소모의 등)을 유사하게 모의하는 것을 보였다. 또한, 격자 적응(scale-aware) 방안의 작용을 줄임에 따라 격자 내의 구름의 기저 질량속과 유출 변경이 태풍 중심 강수, 북서태평양고기압, 태풍진로의 모의를 향상시킬 수 있음을 확인하였고, 적운대류모수화방안 및 수평해상도 민감도 실험을 통하여 태풍 진로 및 강도 개선방안을 제시하였다.

수치모델에서는 많은 물리과정들이 격자크기보다 더 작은 규모로 발생하며, 격자규모로 분해되지 않는 아격자규모의 대류 및 강수 현상은 적운대류물리 과정을 통하여 모수화된다. 현재 KIM은 적운대류물리과정으로 Deep convection 방안인 KIAPS Simplified Arakawa and Schubert (KSAS, Han et al., 2016; 2020; Kwon and Hong, 2017) 방안을 사용하고 있다. WRF에서는

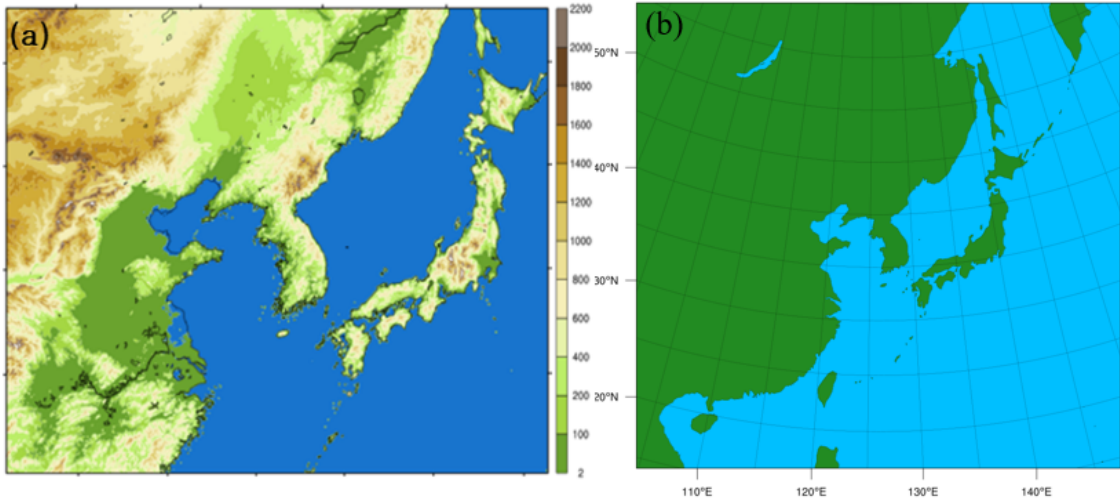
다양한 적운대류모수화 방안을 제공하고 있으며, KIM에서 사용하는 Deep convection 방안과 유사한 적운대류모수화방안인 KSAS 방안 또한 제공하고 있다. 또한, 기후 및 날씨 규모에서의 지면-대기 상호작용을 고려하기 위하여 수치예모모델은 지면모델을 결합하여 사용하고 있다(Best et al., 2011; Niu et al., 2011; Smirnova et al., 2016). 수치모델의 예측성능을 결정하는 매우 중요한 요소인 지면조건은 지면-대기 상호작용을 통해 기온, 구름, 강수 모의까지 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 이처럼 수치모델에서는 많은 물리과정들이 격자크기보다 더 작은 규모로 발생하며, 모수화에서 생략되거나 단순화되는 과정에서 많은 모수 값들은 경험적으로 설정됨에 따라 불확실성을 가지게 된다.

따라서, 본 파트에서는 본과제의 1·2차년도에서 구축한 ‘KIM 테스트베드’를 바탕으로 KIM의 한반도 강수 예측 실패 사례를 선정하고 물리과정 민감도 실험을 통하여 KIM의 물리 메커니즘 기반으로 오차 원인을 분석하였다.

기상청에서 제공한 KIM-meso (KMA)의 역학·물리과정 및 도메인 구성은 <표 2.2.1>와 <그림 2.2.1>의 (a)와 같다. 하지만, 본 세부과제에서는 약 12 km로 구성되어있는 KIM을 따라 KIM-meso (KMA)의 해상도를 10 km로 변경하고, 기압골 및 대류 발달 모의 실패 원인을 분석하고자 함에 따라 한반도 위주로 맞춰져 있는 KIM-meso (KMA)의 도메인 영역을 <그림 2.2.1>의 (b)와 같이 확장하여 세팅하였다. 시간적분간격은 해상도가 3 km에서 10 km로 증가함에 따라 15초에서 45초로 증가시켰다(수정된 KIM-meso (KMA)를 KIM 테스트베드로 명명함). KIM-meso 민감도 실험을 재분석장으로 분석하였던 본 과제의 1·2차년도와는 달리, KIM 예측장을 사용하여 민감도실험을 진행하였다.

<표 2.2.1> 기상청에서 제공한 KIM-meso (KMA)와 본 세부에서 사용한 KIM-meso 역학·물리과정 구성표(*기상청에서 제공받은 KIM-meso 표준 물리과정 파일을 따름)

	(a) KIM-meso (KMA)	(b) KIM-meso
역학 체계	압축성 오일러 비정역학 유한차분방법	
수평 해상도/격자수	3 km vs 3 km/ 1050(동서) × 840(남북)	10 km vs 10 km/ 500(동서) × 480(남북)
연직층	40층(모델 상단~50 hPa)	
격자체계-수평	Arakawa C-grid coordinate	
격자체계-연직	Hybrid vertical coordinate	
시간적분간격	18초	45초
미세(강수)물리과정	WDM5	
복사물리과정(장파)	RRTMG_K	
얇은 적운모수화과정	없음	
경계층 물리과정	Shin-Hong PBL scheme	
적운모수화과정	KIAPS SAS(KIM과 동일)	
지면물리과정	Thermal Diffusion Scheme*	



<그림 2.2.1> 기상청에서 제공받은 KIM-meso (KMA)와 본 세부에서 사용한 KIM-meso 도메인

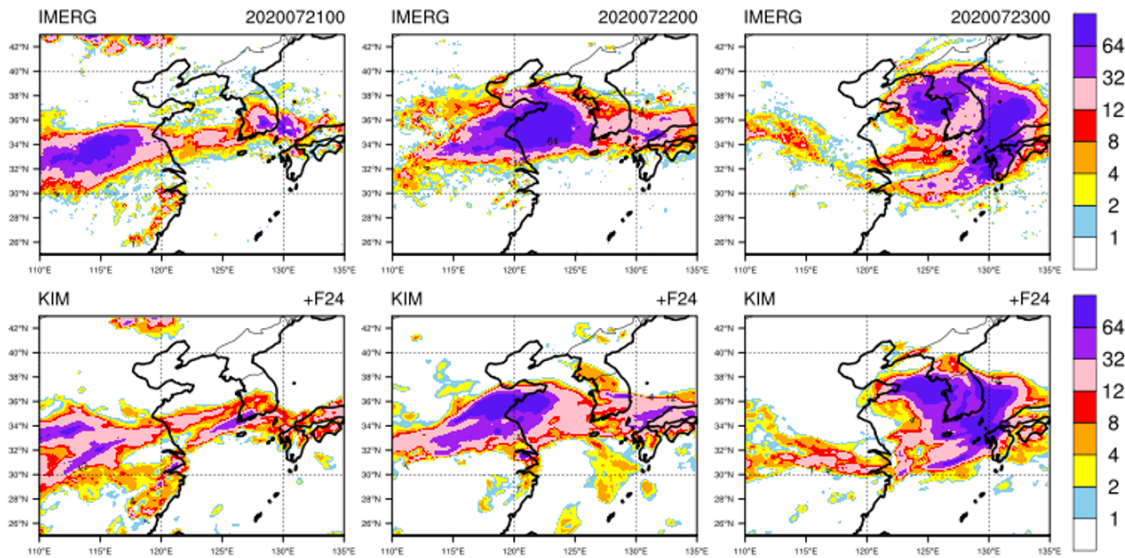
KIM의 경우 IMERG 위성자료와 비교하여 저기압형 사례가 다른 유형의 강수보다 모의성능이 현저하게 떨어짐을 확인하였다. 이에, 저기압형 사례들 중 F24, F48과 F72 예측 성능을 확인하였을 때, F72에서 예측성능 감소가 큰 사례 2개를 선정하여 WRF 테스트베드 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 1절의 호우 사례별 한반도 강수 예측성 진단 파트에서 KIM의 강수예측 실패 원인을 대류발달 및 기압골 모의 실패로 분석한바, 이에 다음 2가지 요인을 중심으로 민감도실험을 수행하였다(i.적운대류모수화방안 ii.지면물리과정). 이어지는 파트에서는 KIM 테스트베드를 이용하여 KIM의 집중호우 민감도실험 결과를 보인다.

나) KIM 테스트베드를 통한 예측시간 및 물리모수화과정별 호우사례 민감도 실험 수행

KIM의 호우 실패 사례 특성 분석을 위한 KIM 테스트 베드 분석 사례는 다음과 같다. i) 사례1: 2020년 7월 21일-2020년 7월 23일 산동반도 저기압 사례, ii) 사례2: 2020년 7월 31일- 2020년 8월 2일 몽골 저기압 사례

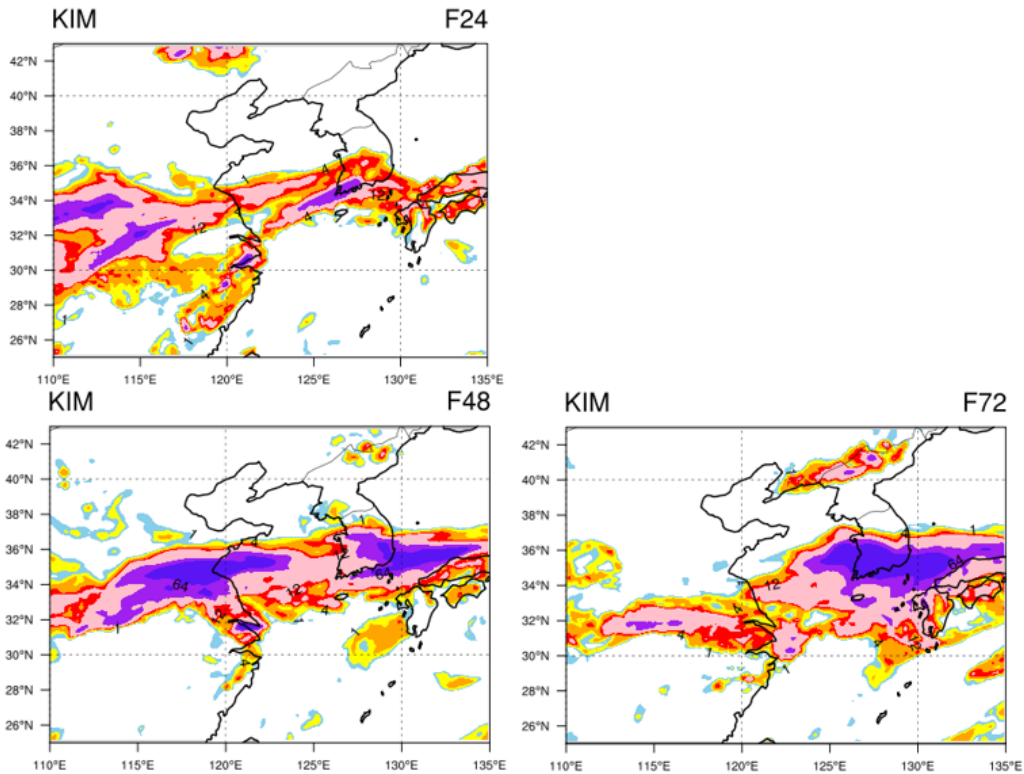
i) 사례1 :2020년 7월 21일 -2020년 7월 23일 산동반도 저기압 사례

본 사례는 산동반도 서쪽 중국내륙에서 시작된 저기압이 황해를 지나 발달하면서 한반도에 폭발적인 강수를 내린 사례이다. <그림 2.2.2>는 IMERG 위성자료와 KIM의 초기시간별 F24 일누적강수 분포도를 나타낸 그림이다. KIM의 경우 F24 결과는 전반적으로 IMERG 위성자료와 유사하게 모의함을 확인할 수 있다. 그러나, 강수의 강도는 과소모의, 영역은 좁게 모의하는 특징을 보인다.



<그림 2.2.2> 초기시간별 F24 일누적강수 분포도, 좌측부터 순서대로 초기시간 2020년 07월 21일 00 UTC, 2020년 07월 22일 00 UTC, 2020년 07월 23일 00 UTC, 위에서부터 순서대로 IMERG 위성자료와 KIM 모의 결과

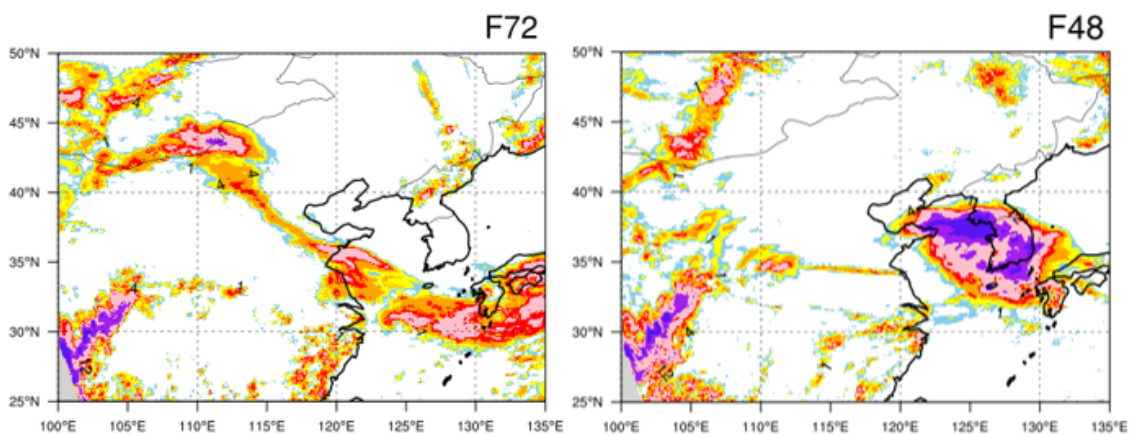
그러나, <그림 2.2.3>의 초기시간이 2020년 07월 23일 00 UTC의 강수 모의 결과에서 IMERG와 유사하게 모의하는 F24와 F48과 달리, F72의 결과에서 강수 모의 성능이 현저하게 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 이에, 본 사례를 첫 번째 실패 사례로 선정하였다.



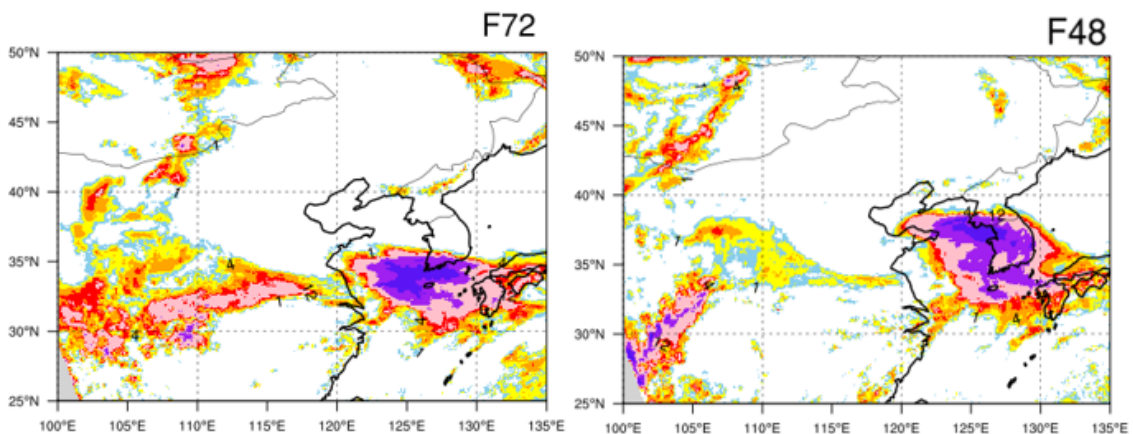
〈그림 2.2.3〉 KIM의 예측시간별 일누적강수 모의 결과 (초기시간 2020년 07월 21일 00 UTC)

먼저 KIM 테스트베드는 KIM이 가지는 강수 모의 특성을 유사하게 모의하는지 분석하기 위하여, 초기시간별 실험을 진행하였다. 〈그림 2.2.4〉는 KIM 초기장을 사용하여 수행한 초기시간별 실험이며, 초기시간은 2020년 07월 21일 00 UTC와 2020년 07월 22일 00 UTC로 설정하였다. 초기시간을 2020년 07월 21일 00 UTC로 하였을때, 강수모의결과는 IMERG 위성자료 및 KIM과는 현저하게 다른 강수 형태를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 초기시간을 하루 뒤인 2020년 07월 22일 00 UTC인 실험결과는 IMERG 위성자료와 매우 유사한 결과를 나타내고 있다. 이에, F72에서 모의성능이 현저하게 떨어지는 원인을 찾기 위하여, 초기장을 ERA5 재분석장으로 하여 〈그림 2.2.4〉와 동일하게 실험을 진행하였다. 〈그림 2.2.5〉는 〈그림 2.2.4〉와 동일하지만 초기장을 ERA5 재분석장으로 바꾼 실험결과로, KIM을 초기장으로 사용한 실험의 F72의 강수 모의 결과와 현저하게 다른 강수분포를

보이고 있으나, KIM의 초기시간 2020년 07월 21일 00 UTC의 F72의 강수분포 (남쪽으로 치우친 강수대)와 유사한 결과를 보인다(그림 2.2.3의 F72). 이에, 본 연구에서 저기압의 발달 실패 원인을 분석하기 위하여 초기장을 ERA5 재분석장으로 하여 민감도 실험을 진행한 후, KIM의 강수모의 실패 원인을 분석하고, 이와 관련하여 후반에 <그림 2.2.4>의 F72 예측의 실패 원인을 기술하고자 한다.



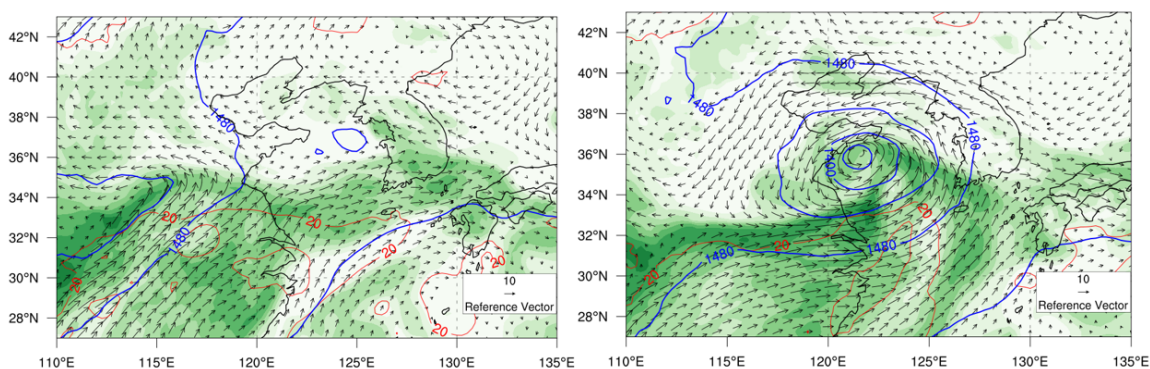
<그림 2.2.4> 실험 1의 예측시간별 KIM 테스트베드 강수 모의 결과, 초기장 KIM (좌측에서부터 초기시간 및 예측시간 2020년 07월 21일 00 UTC F72, 2020년 07월 22일 00 UTC F48)



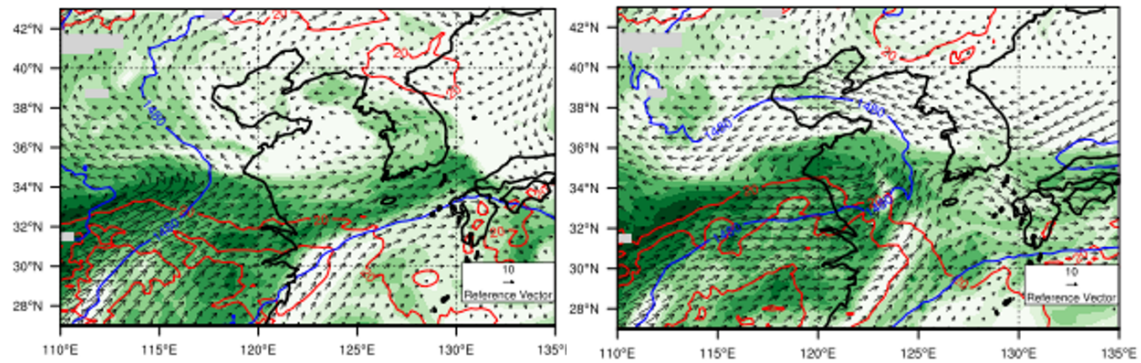
<그림 2.2.5> 실험 1의 예측시간별 KIM 테스트베드 강수 모의 결과, 초기장 ERA5 (좌측에서부터 초기시간 및 예측시간 2020년 07월 21일 00 UTC F72, 2020년 07월 22일 00 UTC F48)

<그림 2.2.5>는 초기장 시간을 2020년 7월 21일 00 UTC에서 22일 00 UTC로 바꾸었을 때, 강수모의가 개선되는 것을 확인하였다. 이에 2020년 7월 21일 00 UTC와 22일 00 UTC 기간 사이의 종관장을 집중해서 살펴보았다.

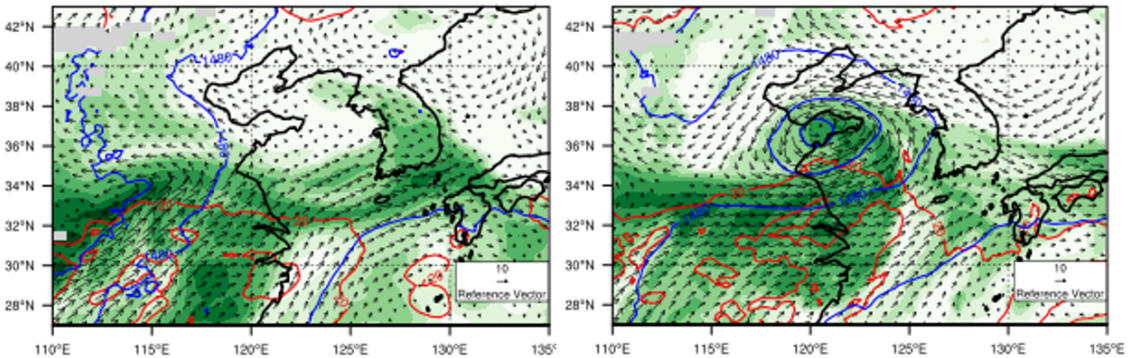
<그림 2.2.6>은 ERA5의 2020년 07월 21일 00 UTC와 07월 22일 00 UTC의 850 hPa의 종관장(수증기, 지위고도, 온도, 바람)을 나타낸 그림이다. 2020년 07월 21일 00 UTC에서 산동반도 서쪽의 중국 내륙(약 북위 30도, 동경 113도)에서부터 저기압성 회전으로 인한 저기압 발달이 21일 00 UTC에 산동반도에 위치하게 된다. 그러나 <그림 2.2.7>의 2020년 7월 21일 00 UTC F24 종관 장 그림에서 저기압성 바람이 ERA5보다 약하게 모의되고 있으며, 이에 F48의 모의결과에서도 KIM 테스트베드가 ERA5보다 저기압의 강도(지위고도)를 현저하게 과소모의하고 있음을 확인할 수 있다. 그러나, 초기시간을 하루 미룬 <그림 2.2.8>의 경우 2020년 07월 22일 F00과 F24에서는 저기압의 강도 모의가 개선된 것으로 분석된다. 이는, KIM의 초기시간별 저기압모의 특성(경향)과 동일하게 나타났다. 이에, 저기압이 제대로 강화되지 못하는 산동반도 서쪽의 영역을 제외시킨 도메인으로, 도메인 영역 변경 실험을 수행하였다.



<그림 2.2.6> 2020년 07월 21일 00 UTC (왼쪽)과 2020년 07월 22일 00 UTC 850 hPa 종관장 (오른쪽), ERA5 재분석장 사용

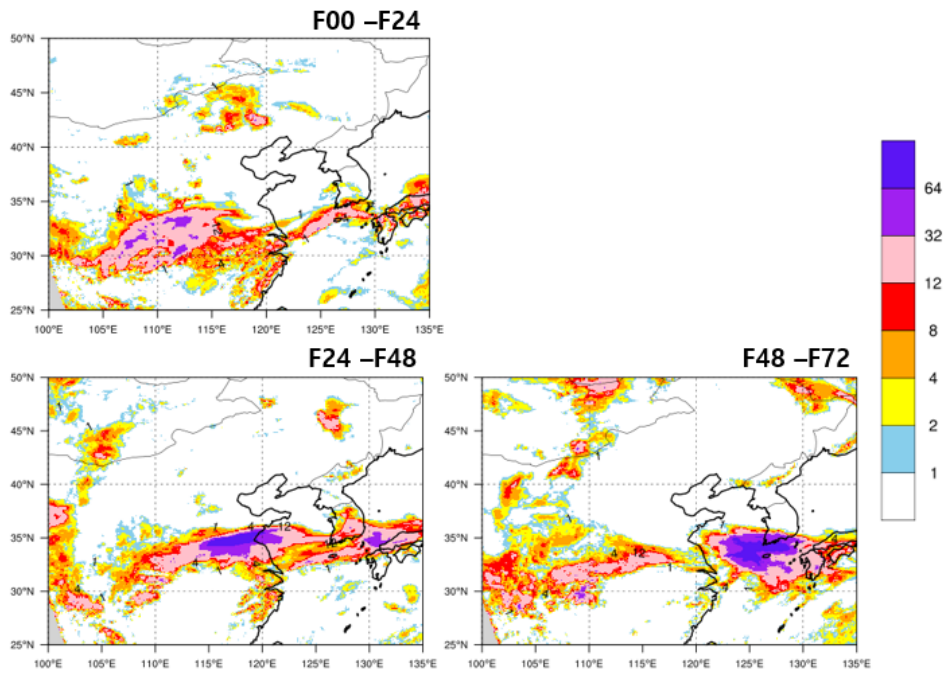


<그림 2.2.7> KIM 테스트베드의 850 hPa 종관장 모의 결과, 좌측부터 2020년 7월 21일 00 UTC F24, F48

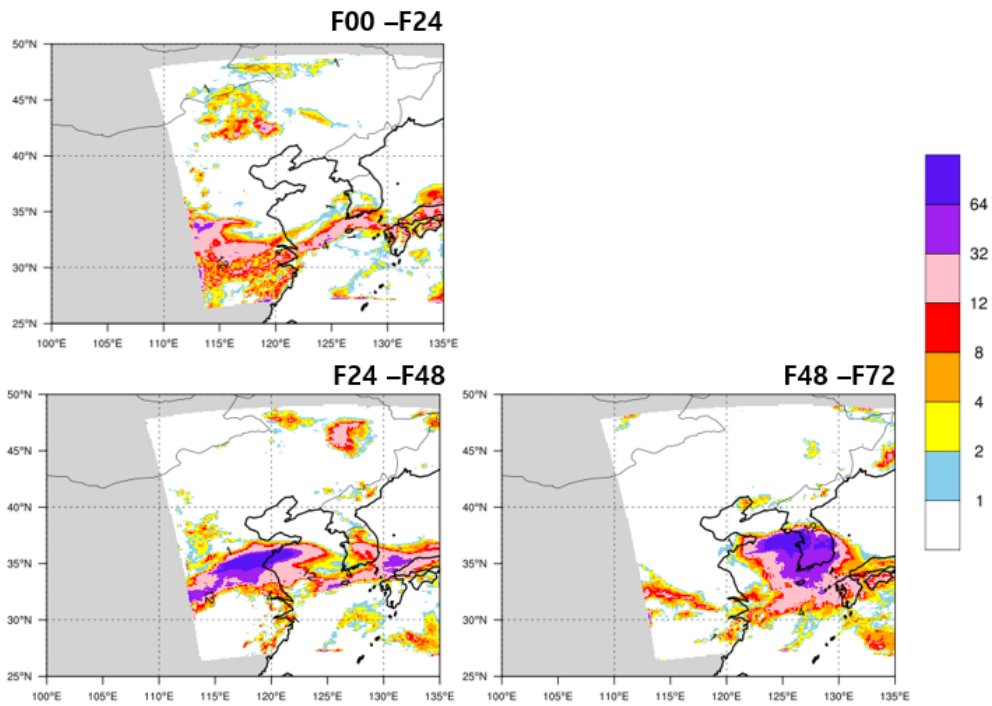


<그림 2.2.8> KIM 테스트베드의 850 hPa 종관장 모의 결과, 좌측부터 2020년 7월 22일 00 UTC F00, F24

<그림 2.2.8>과 <그림 2.2.9>과 동일하나 중국 내륙지역을 포함유무에 따른 KIM 테스트베드 강수모의 결과이다. 초기시간을 2020년 07월 21일 00 UTC로 동일하게 진행했음에도 불구하고 도메인영역을 축소하여 실험을 진행하였을 때, 강수모의 성능이 초기시간 2020년 07월 22일 F48과 유사하게 개선됨을 확인할 수 있었다. 이에, ERA5 재분석장의 중국내륙에서의 경계조건의 차이가 강수모의 개선에 영향을 줌을 확인할 수 있었다. 이는 KIM과 ERA5 재분석장을 초기장으로 사용한 KIM 테스트베드 강수 모의결과 모두 중국내륙에서의 대류발달에 문제가 있음을 확인함에 따라, 수치모의시 중국내륙의 대류발생 메커니즘에 문제가 있을 것으로 사료된다.

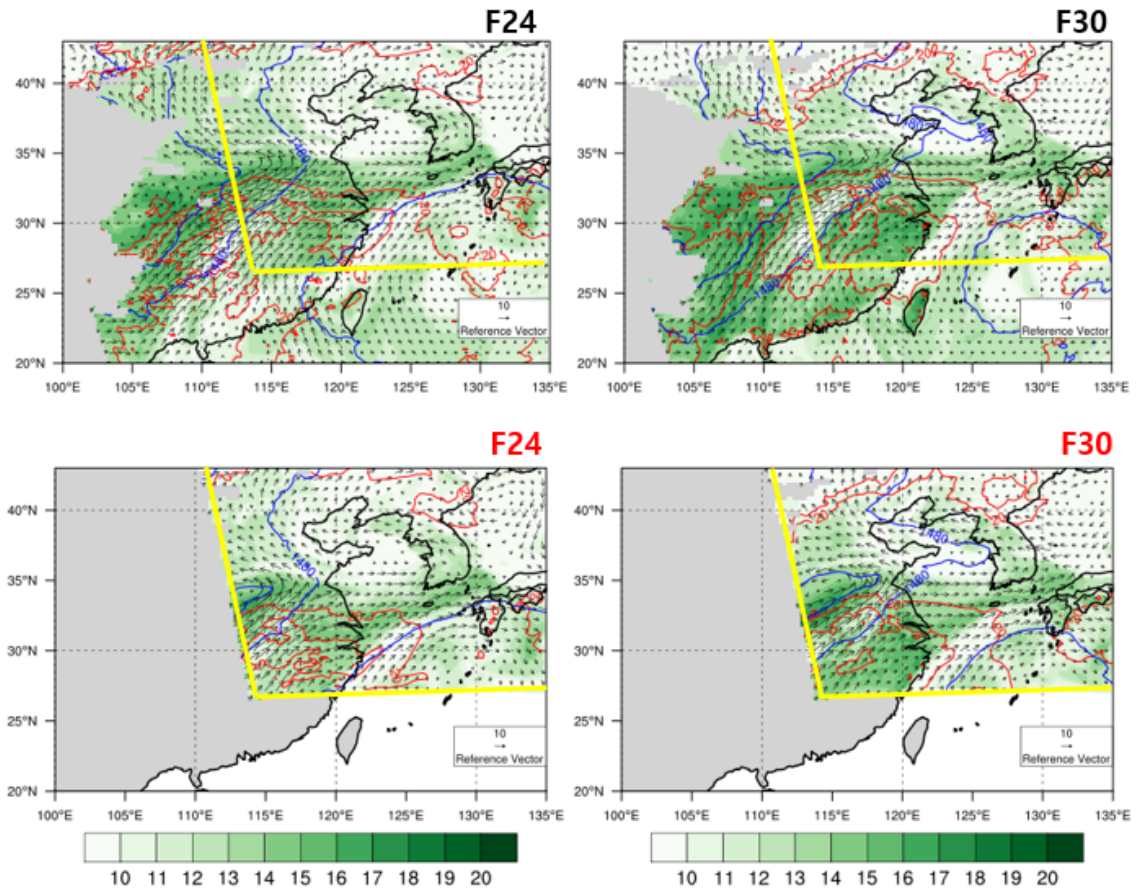


<그림 2.2.9> KIM의 예측시간별 일누적강수 모의결과(초기시간 2020년 07월 21일 00 UTC)



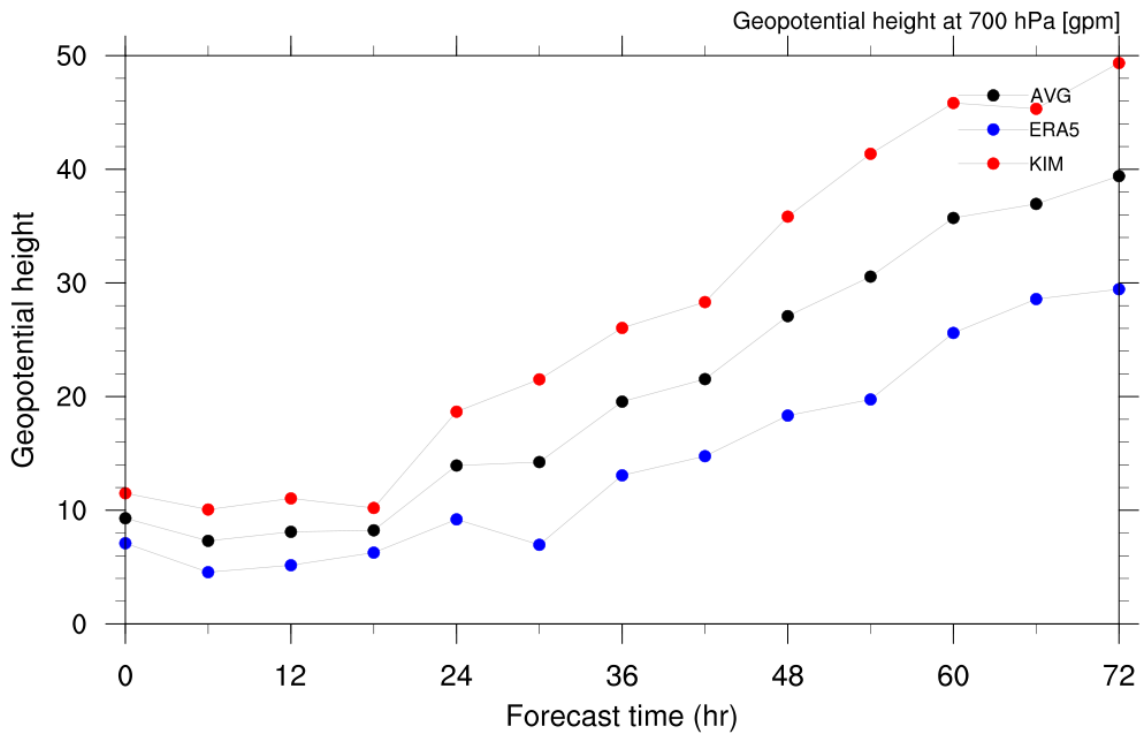
<그림 2.2.10> KIM의 예측시간별 일누적강수 모의결과, 도메인 축소 실험 (초기시간 2020년 07월 21일 00 UTC)

<그림 2.2.11>은 초기시간이 2020년 7월 21일 00 UTC일 때의 예측시간별 850 hPa 종관 모의 결과이다. F24에서부터 도메인 경계 오른쪽 부근에서 두 실험간의 지위고도(파란선)의 예측 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있다.



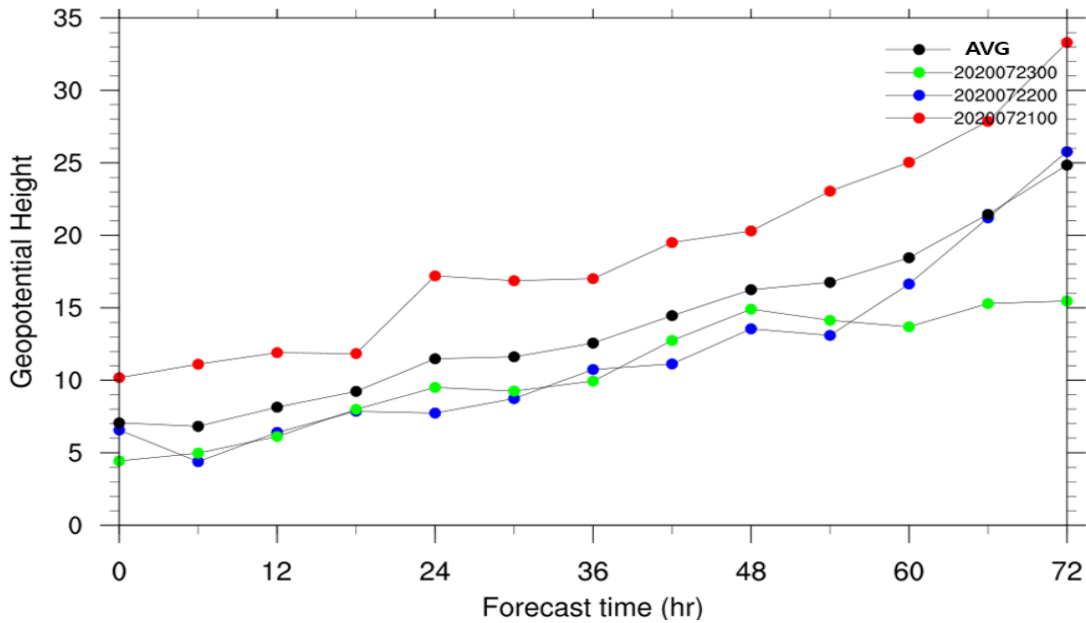
<그림 2.2.11> KIM 테스트베드의 예측시간 별 850 hPa 종관장 모의 결과, 초기시간은 2020년 07월 21일 00 UTC, 위에서부터 기본 실험, 도메인 축소실험

<그림 2.2.12>는 KIM 테스트베드의 산동반도 서쪽영역(위도 30-60° N, 경도 110-135° E)의 700 hPa 지위고도 RMSE이다. RMSE는 KIM 테스트베드와 ERA5 재분석장을 이용하여 계산하였다. 계산영역에서 KIM을 초기장으로 사용한 수치실험 결과(빨간점)가 ERA5 재분석장을 초기장으로 사용한 수치실험(파란점) 결과보다 RMSE가 높게 나타난 것을 확인할 수 있다. 따라서, KIM을 초기장으로 사용한 수치실험에서 <그림 2.1.4>의 F72 모의결과와 같이 강수대 모의가 실패한 것으로 분석된다.



<그림 2.2.12> KIM 테스트베드의 초기장에 따른 예측시간별 700 hPa 지위고도 RMSE (계산 영역:위도 30-60° N, 경도 110-135° E)

이와 동일하게, KIM의 2020년 07년 21일 00 UTC 초기장에서 강수대 모의가 22일 00 UTC에 비하여 강수분포 모의를 실패한 원인 또한 <그림 2.2.13>에서 확인할 수 있듯이 대류가 발생하는 영역에서의 초기 지위고도 오차가 비교적 크게 나타났고, 초기장에서부터의 문제가 모의 후반부에 큰 영향을 미친 것으로 분석된다.

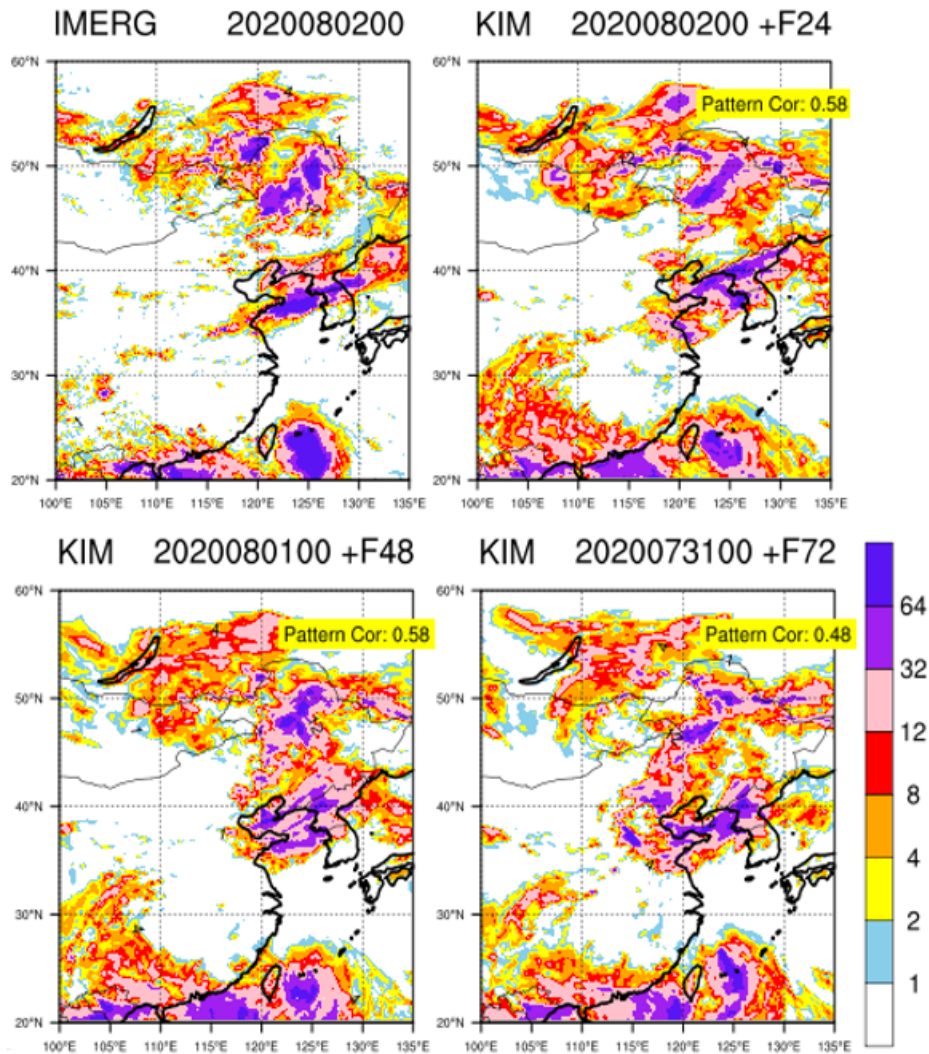


<그림 2.2.13> KIM의 초기시간에 따른 예측시간별 700 hPa 지위고도 RMSE (계산 영역:위도 30-60° N, 경도 110-135)

ii) 2020년 7월 31일-2020년 8월 2일 몽골 저기압 사례

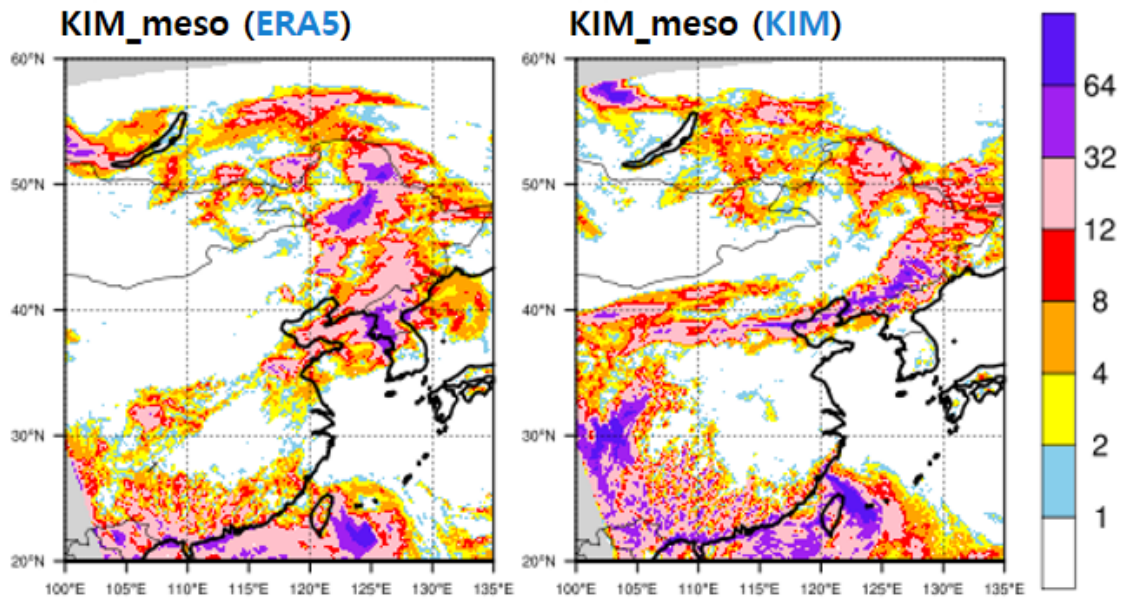
본 사례는 북서태평양 고기압의 경계를 따라 한반도로 수증기가 유입되는 종관구조를 가지고 있으며, 500 hPa 기압골의 영향으로 만주지역에 강하게 발달한 저기압이 북서태평양 고기압과 함께 한반도의 기압경도를 강화시켜 좁고 강한 긴 강수대를 형성한 사례이다.

<그림 2.2.14>는 IMERG와 KIM의 초기시간에 따른 예측시간별 일누적강수 분포도를 나타낸다. 초기시간이 예측시간이 짧아질수록 2020년 08월 02일의 일누적강수분포도와 KIM의 모의 결과가 유사해지는 결과를 보인다. 그러나 IMERG와 달리 한반도에 걸쳐져있는 강수대의 강도 및 영역을 제대로 모의하지 못함을 확인할 수 있다. 또한, 예측시간이 짧아질수록 만주지역에서 강하게 발달되어있는 저기압과 한반도에 걸쳐져있는 강수대가 분리(개선)되는 것이 본 사례의 특징이다.



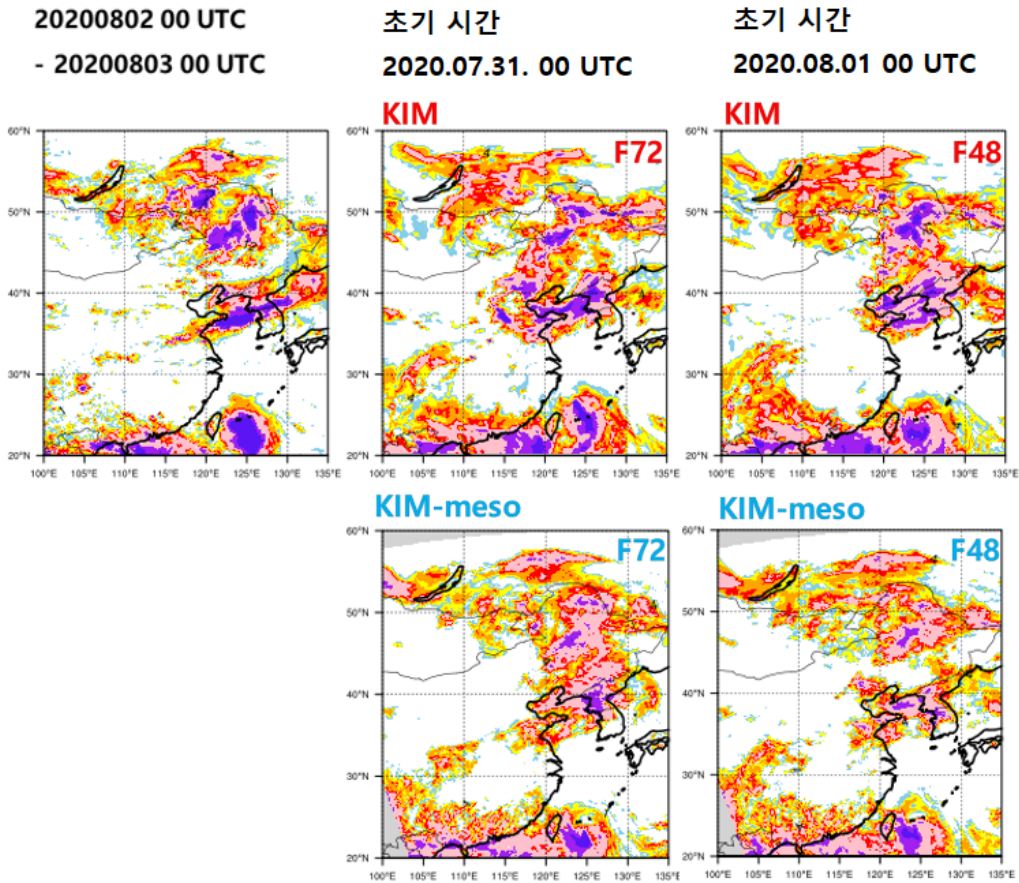
<그림 2.2.14> IMERG와 KIM의 초기시간 및 예측시간별 일누적 강수 모의 결과

<그림 2.2.14>는 초기장에 따른 KIM 테스트베드 일누적강수 모의 결과이다. 앞에서 분석한 사례1(산동반도 저기압)의 결과와 유사하게 KIM을 초기장으로 사용한 KIM 테스트베드 강수모의결과는 KIM 및 IMERG와 강수발생 메커니즘이 완전히 다른 경향을 보인다. 그러나, ERA5 재분석장을 초기장으로 사용한 경우 실제 KIM의 <그림 2.2.15> F48과 유사하게 모의됨을 확인할 수 있다. 이에 본 사례 2(몽골저기압 사례)도 ERA5 재분석장을 초기장으로 한 실험 중심으로 민감도 실험을 진행하였다.



<그림 2.2.15> 초기장에 따른 KIM 테스트베드 일누적강수 모의 결과, 좌측에서부터 초기장 ERA5 재분석장과 KIM

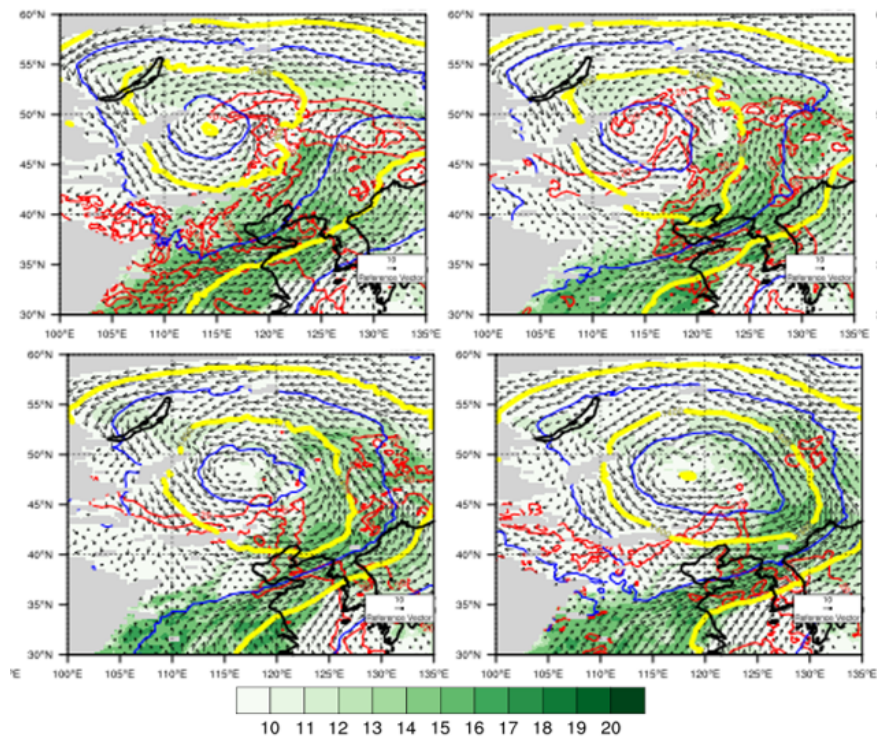
<그림 2.2.16>은 2020년 08월 02일-2020년 08월 03일의 일누적강수 분포도이며, 초기시간에 따른 KIM과 KIM 테스트베드의 예측시간별 강수모의 결과를 나타낸 그림이다. 초기장은 ERA5 재분석장으로 하였으며 예측시간이 짧아질수록 KIM 테스트베드의 강수 모의성능(몽골지역과 한반도의 강수대 분리)는 향상되나, 한반도 상에 길게 형성되어있는 띠 형태의 강수대의 형태 및 강수강도 모의 오차는 여전히 존재하는 것으로 나타났다. 이는 KIM과 유사한 특성을 가진다. 초기시간별 예측성능이 차이나는 원인을 살펴보기 위하여 850 hPa 종관장을 살펴보았다.



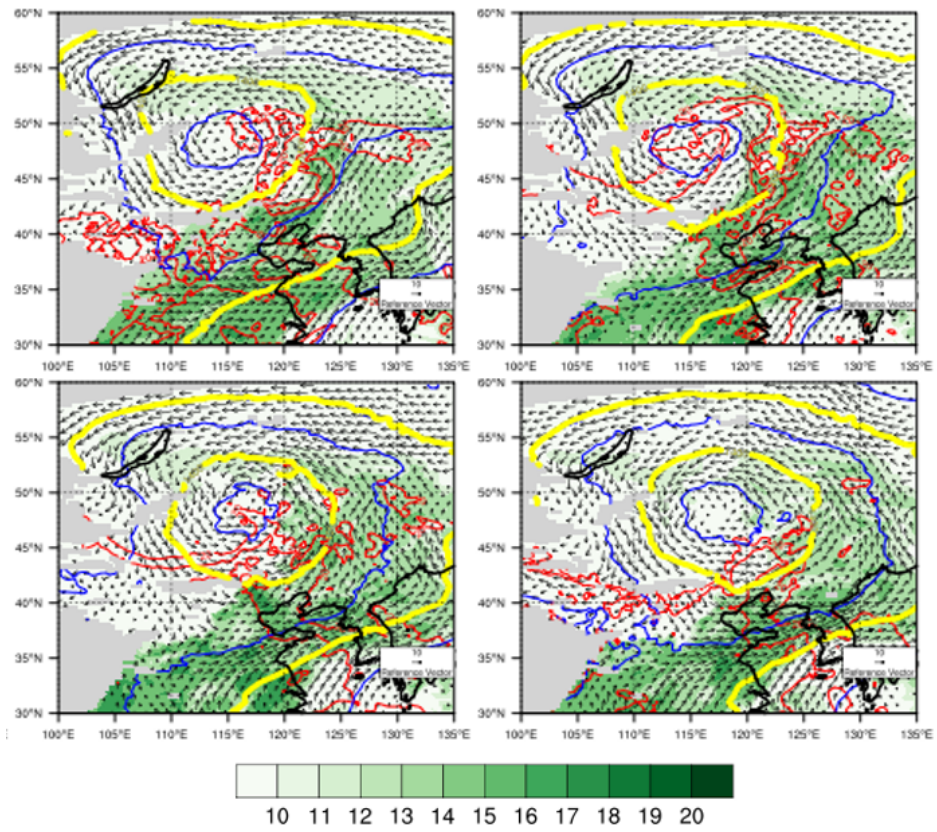
<그림 2.2.16> 2020년 08월 02일-2020년 08월 03일의 일누적강수 분포도이며, 초기시간에 따른 KIM과 KIM 테스트베드의 예측시간별 강수모의 결과

<그림 2.2.17>과 <그림 2.2.18>은 사례 2의 2020년 07월 31일 00 UTC과 2020년 08월 01일 00 UTC를 초기시간으로 한 850 hPa 종관장이다. 초기시간 2020년 07월 31일 00 UTC의 경우(그림 2.2.17), 초기시간 2020년 08월 01일 00 UTC (그림 2.2.18)보다 2020년 08월 02일 00 UTC ~18 UTC에서 저기압계의 확장(지위고도의 강도)의 차이가 두드러지게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 초기시간이 2020년 7월 31일 00 UTC의 수치실험의 경우 몽골지역에서 발달하는 기압계가 남동쪽으로 강하게 확장됨에 따라 만주지역에서부터 한반도 북부지역까지의 기압경도가 강해져 위도 42° N,경도 135° E 부근에서의 강수가 과다 모의된 것으로 분석된다. 이에 본 사례의 만주지역 강수오차는

몽골지역에서 시작되는 기압계의 강도가 남동쪽으로 과도하게 발달한 것이 원인인 것으로 분석된다. 이에, 몽골지역의 기압계 모의오차를 분석하기 위하여, 기압계 발달에 영향을 줄 수 있는 2가지 물리과정 (지면물리과정, 적운모수화과정) 실험을 진행하였다. 지면물리과정은 기상청에서 제공받은 <표 2.2.1>의 지면물리과정 Thermal Diffusion scheme과 한국형수치예보모델에서 사용하고 있는 Loah LSM으로 비교하여 진행하였고, 적운대류물리과정으로는 KSAS방안과 KF방안을 비교·분석하였다.

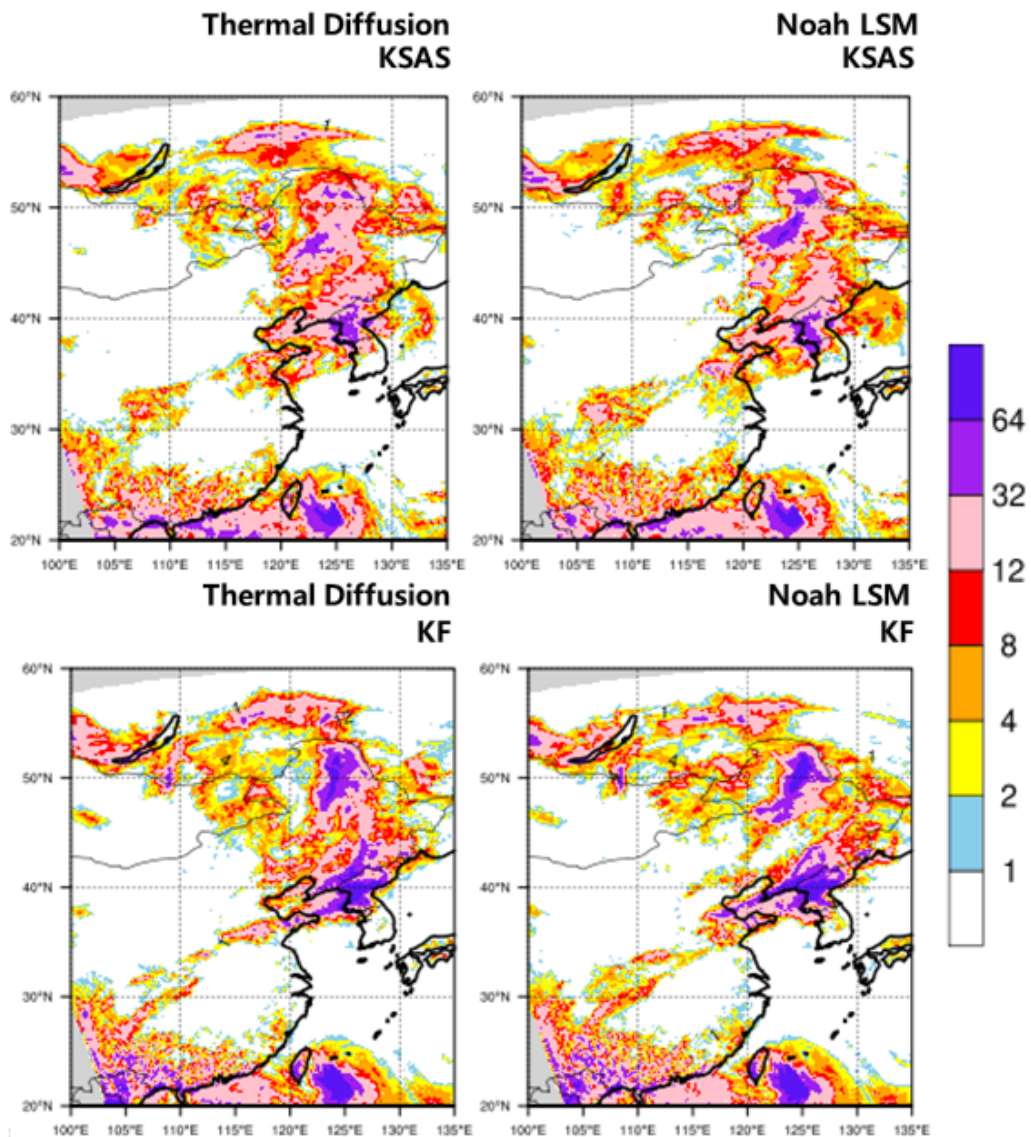


<그림 2.2.17> 2020년 7월 31일 00 UTC를 초기시간으로 한 KIM 테스트베드의 850 hPa 종관장 모의 결과, 순서대로 2020년 08월 02일 00 UTC, 2020년 08월 02일 06 UTC, 2020년 08월 02일 12 UTC, 2020년 08월 02일 18 UTC



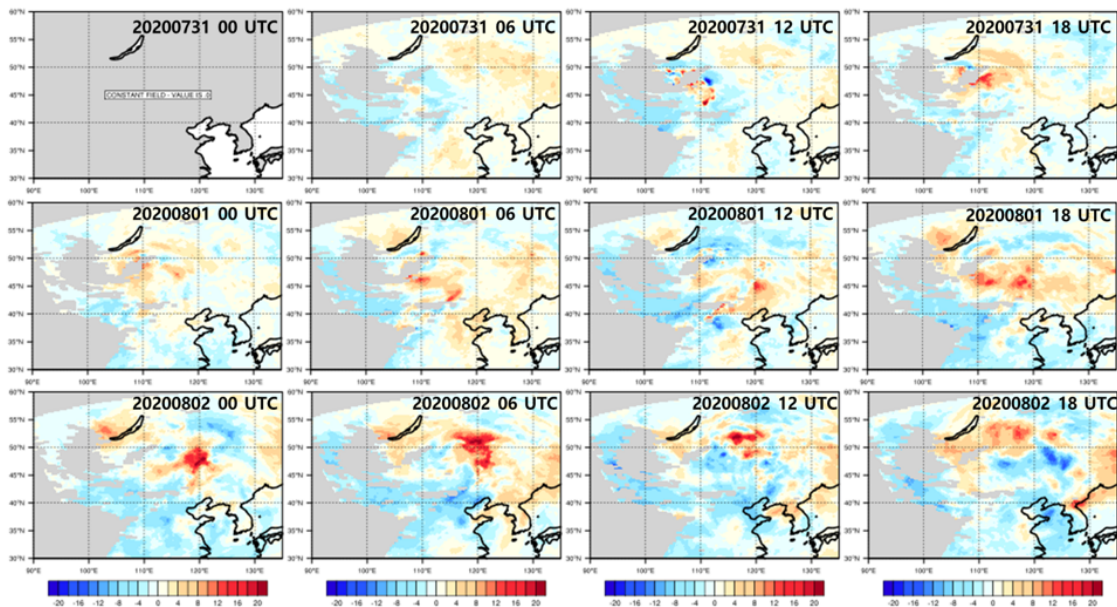
<그림 2.2.18> 그림 2.2.16과 동일하나, 초기시간이 2020년 08월 01일 00 UTC

<그림 2.2.19>는 초기시간을 2020년 07월 31일로한 F48에서 F72의 일누적 강수 분포도이며, 지면물리과정과 적운대류물리과정의 조합을 달리한 실험이다. 지면물리과정은 몽골지역의 강수강도 및 분포 개선에 큰 영향을 주었고, 한반도 강수모의에는 큰 변화가 없는 것이 특징이며, 적운대류물리과정은 몽골지역의 강수강도 뿐만 아니라 한반도 강수강도 및 분포가 개선에 영향을 줌을 확인할 수 있다.

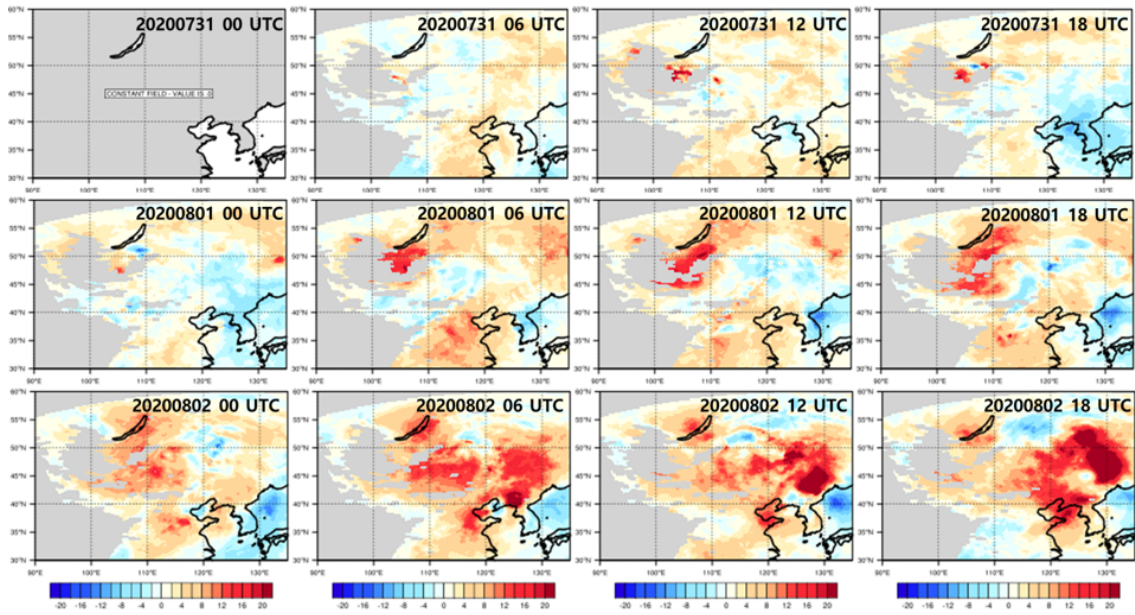


<그림 2.2.19> 2020년 08월 02일-2020년 08월 03일의 지면물리과정 및 적운모수화과정에 따른 일누적강수 분포도

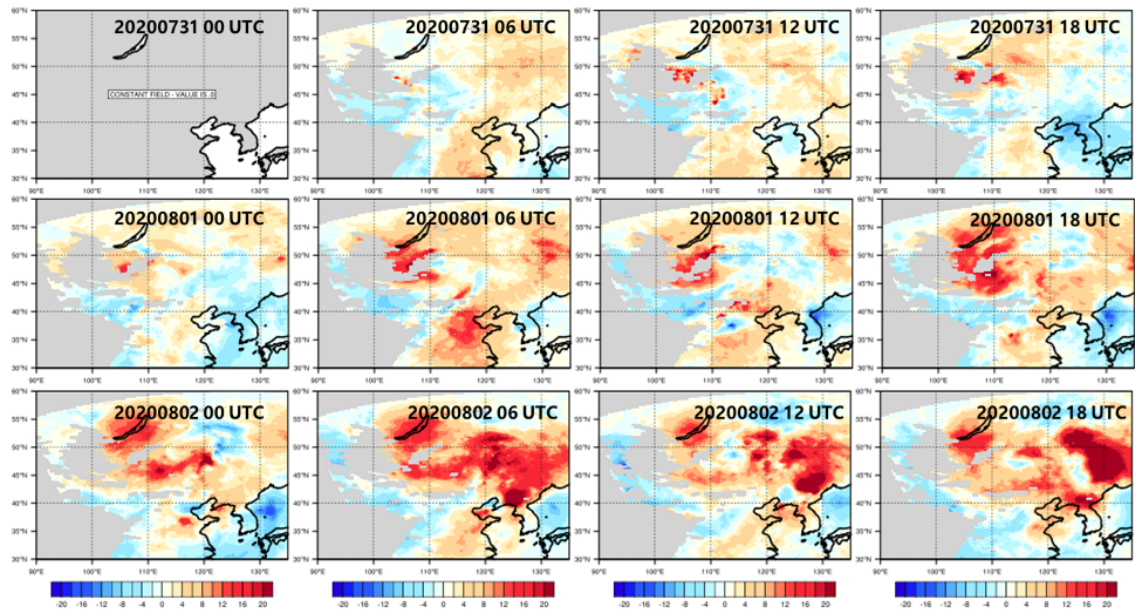
〈그림 2.2.19〉에서 〈그림 2.2.21〉은 물리과정 조합별 850 hPa 지위고도 차이를 나타낸 그림이다. Noah LSM은 Thermal diffusion 방안에 비하여 몽골에서 시작되는 저기압을 더 강화시키는 결과를 보이며, KF 방안이 KSAS 방안보다 몽골에서부터 저기압을 빠르게 강화시키며, 산동반도 중국내륙에서의 저기압계를 강하게 모의함을 확인할 수 있다. 본 과제 1·2차년도 KIM 테스트베드 강도를 과소모의하는 경향이 있을 뿐만 아니라 강수 또한 KF 방안 및 관측에 비하여 강수를 넓고 얇게 모의하는 특징을 나타냈다. 이에, KSAS 방안의 10 km 해상도를 유지하면서 규모인식매개변수를 이용한 고해상도화 실험 및 10 km에서 3 km로 해상도를 높이는 고해상도 민감도 실험을 수행하였고, 열대성저기압 강수 모의 및 강도 모의개선을 보인 바 있다. 본 사례에서도 열대성저기압 발달과 유사하게 몽골지역의 저기압계의 강도 또한 과소모의하는 유사한 경향을 나타내었다. 이에, KIM의 12.5 km에서 8km로 해상도가 변경(추후 업데이트)될 시 강수 모의성능이 향상될 수 있을 것으로 사료된다.



〈그림 2.2.19〉 지면물리과정 실험별 850 hPa 지위고도 차이 (Thermal Diffusion - Noah LSM)



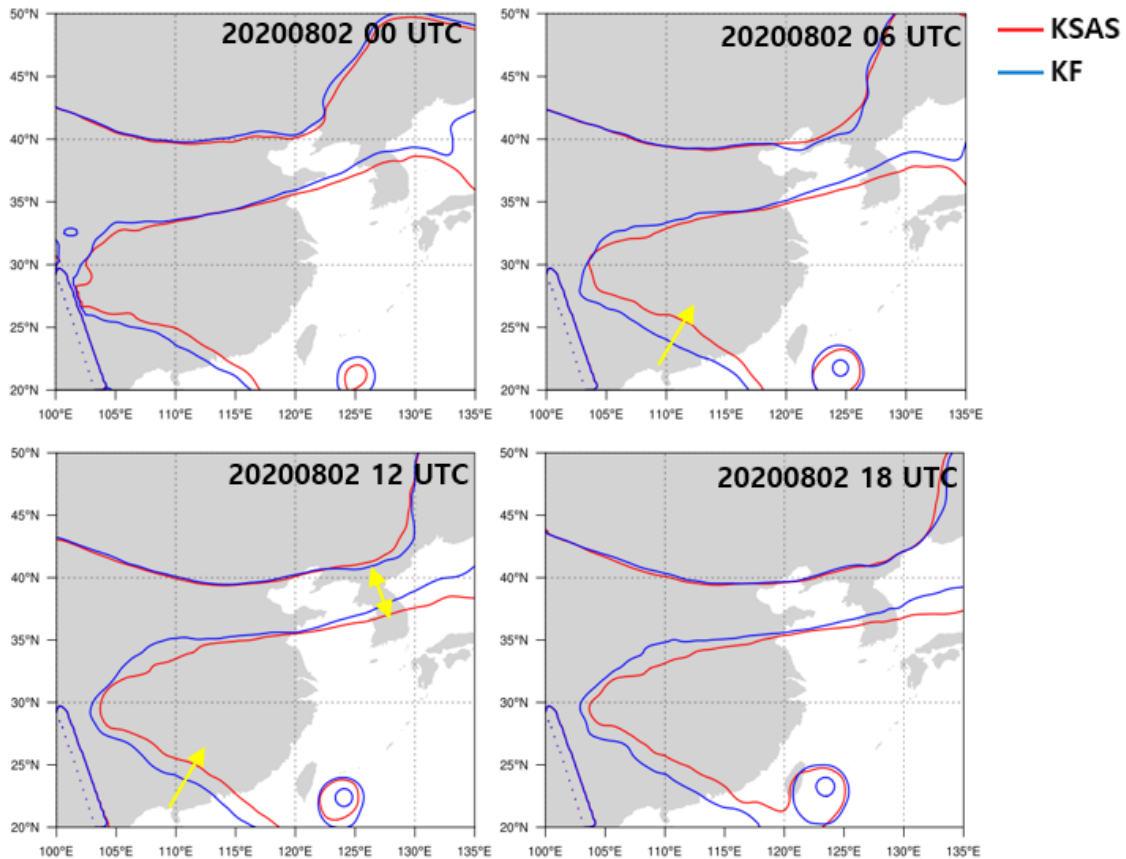
<그림 2.2.20> 적운대류물리과정 실험별 850 hPa 지위고도 차이 (KSAS-KF)



<그림 2.2.21> 지면물리과정 및 적운대류물리과정 실험별 850 hPa 지위고도 차이 (Thermal Diffusion,KSAS - Noah LSM,KF)

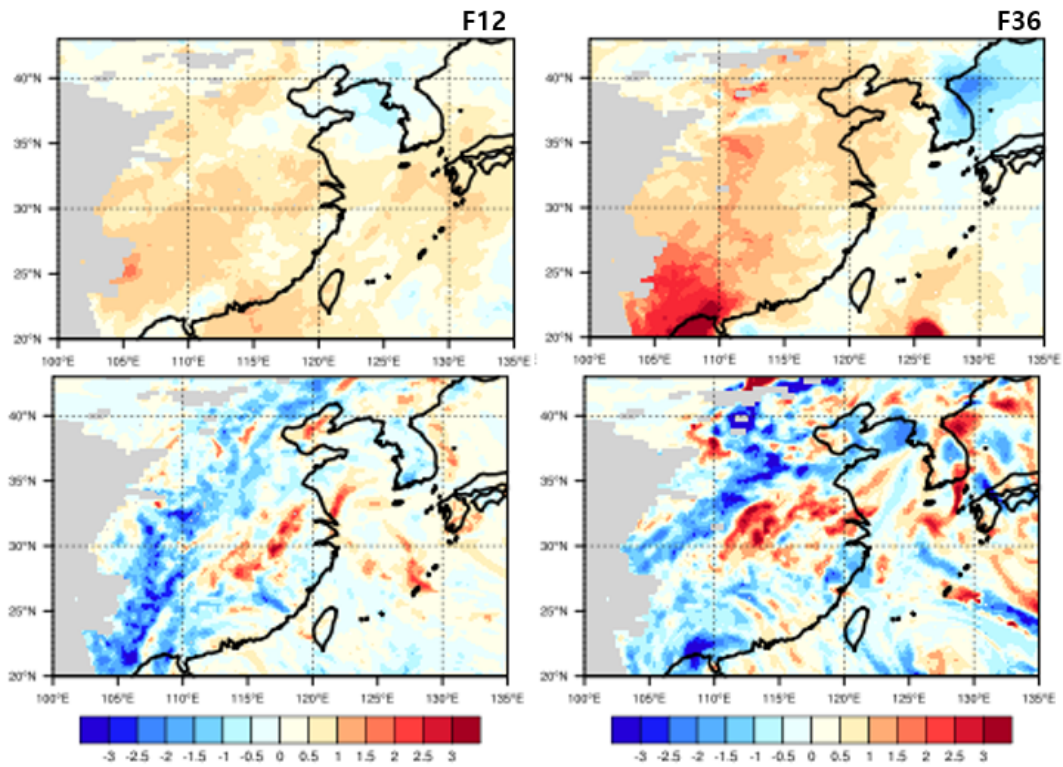
<그림 2.2.22>는 적운대류물리과정실험별 500 hPa 지위고도를 나타낸 그림이다. 남중국 영역에서 KSAS 방안이 KF 방안보다 북서태평양고기압을 수축

에서 모의하는 경향이 있으며, 한반도상에 걸쳐있는 기압선도 KF 방안보다 남쪽으로 치우쳐져 있는 결과를 보인다.



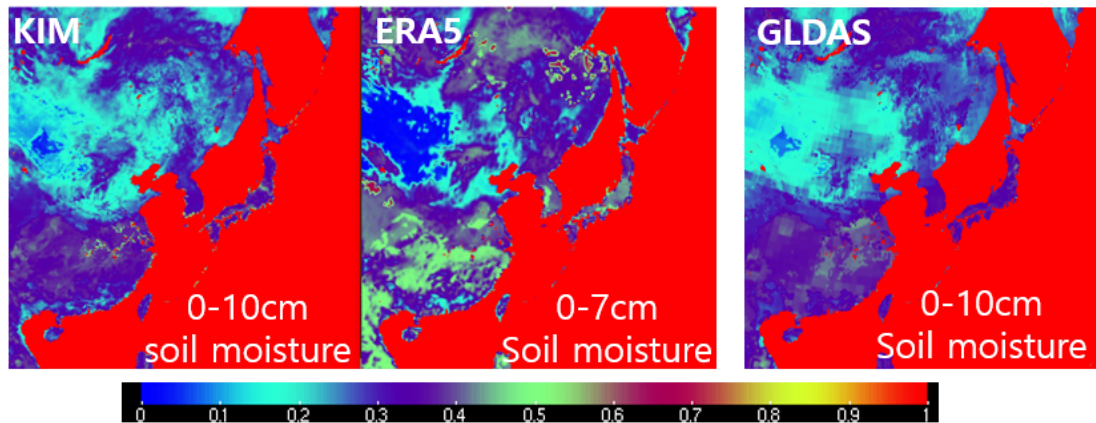
<그림 2.2.22> 적운대류물리과정 실험별 500 hPa 지위고도 (빨간선 :KSAS 방안, 파란선: KF 방안)

<그림 2.2.23> 2020년 7월 31일 00 UTC를 초기장으로 하는 적운대류물리과정 실험별 KIM 테스트베드의 700 hPa 지위고도 및 수증기 모의 결과 차이를 나타낸 그림이다. F36 예측시간의 중국남부(위도 20° N, 경도 110° N)에서 KF 방안이 KSAS 방안에 비하여 20 gpm 이상 강도를 강하게 모의할 뿐만 아니라 수증기도 더 많이 모의하고 있음을 확인할 수 있다. KSAS 방안은 중국남부지역에서의 수증기를 한반도로 공급하지 못함에 따라 한반도의 강수강도 또한 약하게 모의되었을 가능성 또한 있을 수 있음을 제시한다.



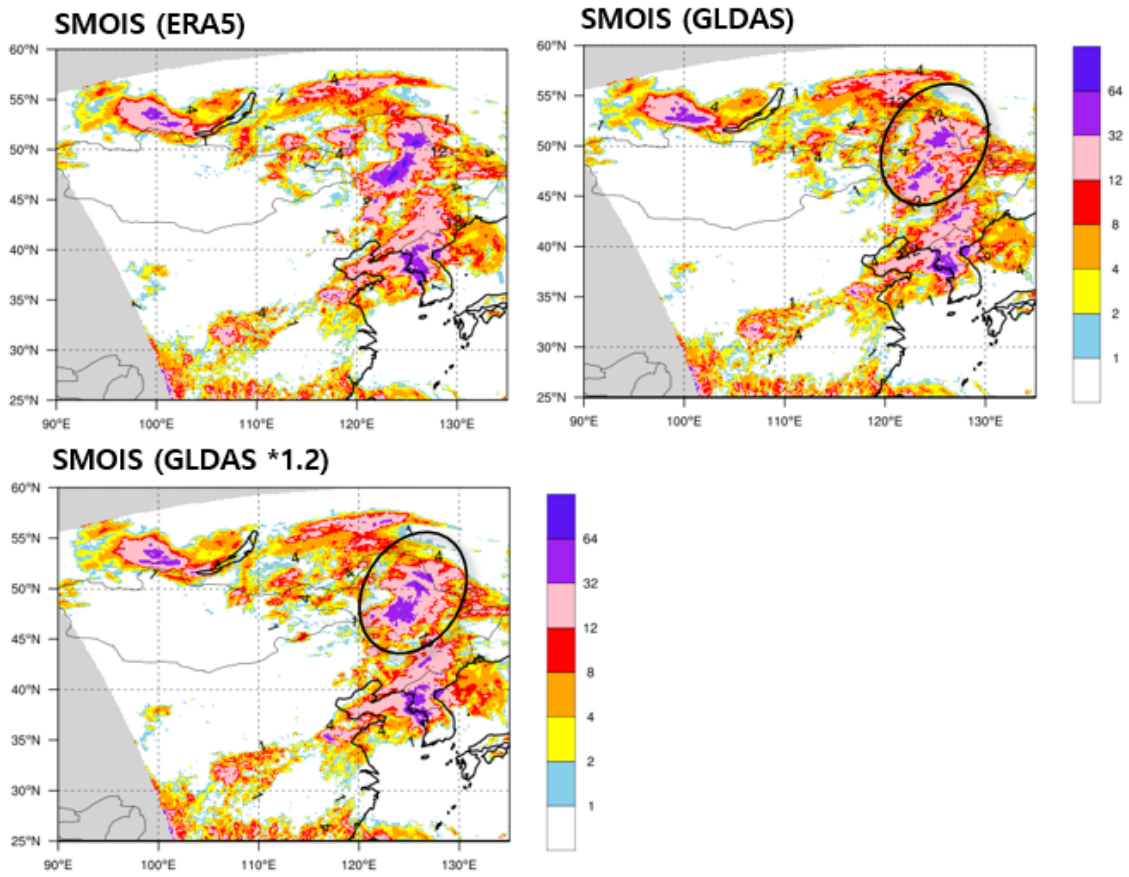
<그림 2.2.23> 2020년 7월 31일 00 UTC를 초기장으로 하는 적운대류물리과정 실험별 KIM 테스트베드의 700 hPa 지위고도 및 수증기 모의 결과 차이, 위에서부터 700 hPa 지위고도와 수증기, 좌측에서부터 예측시간 F12와 F36

<그림 2.2.24>는 2020년 7월 31일 00 UTC의 토양수분 값이며, 최상층의 레벨을 나타낸 그림이다. KIM과 GLADS의 토양수분 값은 유사하게 나타나며, ERA5의 재분석장의 토양수분 값은 두 모델과 다른 경향을 가짐을 확인할 수 있다, ERA5와 GLDAS는 최상층의 토양깊이는 0-10 cm이고, ERA5 재분석장의 경우 0-7cm로 층 깊이가 달라 객관적인 분석은 불가하나, KIM과 GLDAS의 토양수분이 유사하다는 가정으로 토양수분 초기화 민감도 실험을 진행하였다.



<그림 2.2.24> 2020년 7월 31일 00 UTC의 토양수분 값, 좌측에서부터 KIM, ERA5 재분석장, GLDAS

<그림 2.2.25>은 2020년 7월 31일 00 UTC를 초기장으로 하는 토양수분초기화에 따른 강수모의결과이다. 초기장은 기존의 실험과 동일하게 ERA5 재분석장을 사용하였으며, 토양수분 초기화 실험을 위하여 토양수분 초기장은 GLDAS를 사용하였다. 즉, ERA5 초기장의 토양수분을 GLDAS 토양수분 값으로 수정한 모델 실험의 경우 F48에서 F72의 만주지역의 강수강도 약하게 모의되는 경향을 보인다. 그러나 GLDAS의 토양수분을 20% 증가시킨 실험을 진행할 결과, 강수 강도가 감소한 만주지역의 강수량이 증가한 것으로 분석된다. 이에, 몽골지역의 저기압은 토양수분과 대기의 상호작용으로 강도 모의차이가 발생하고 이에 강수모의에 영향을 미친 것으로 분석된다.



<그림 2.2.25> 2020년 7월 31일 00 UTC를 초기장으로 한 토양수분 초기화 실험

요 약 문

* 태풍, 중규모 저기압 등에 의한 집중호우 현상에 대한 예측성 평가*

- 한국형수치예보모델의 경우, 2020년의 호우예측성능이 2021년에 비하여 우수함
- 호우사례를 Cyclone, Front, TC, Isolated, 유형으로 분류
- Isolated 사례가 예측성이 가장 낮음
- 3일 예측에서 Cyclone 유형의 예측성 감소가 큼

* 성공·실패 사례분석을 통해 예측성능 향상을 위한 물리모수화과정 개선 제언 *

- Cyclone 유형의 예측성 감소 원인 파악
- 3일 예측에서 저기압계의 발달 모의 실패로 인하여 강수 모의 실패됨
- 몽골 지역의 저기압은 Soil moisture, 중국내륙에서 한반도의 강수는 적운모수화과정의 영향으로 예측성이 떨어지는 것으로 사료됨
- 중국 내륙에서의 강수 모의가 과도하게 발생되며, 초기장으로 사용될 시 문제가 발생 (중국내륙의 강수모의 개선이 필요함)

제 5 장 사업수행결과의 활용 계획

- 한국형수치예보모델의 한반도 호우 중기예측성능 진단함으로써, 한국형수치예보모델의 호우 예측 성능 평가와 물리과정 개선 기술 확보
- KIM 테스트베드를 활용한 민감도 실험 수행 통해 한국형수치예보모델의 이해도 증진

제 6 장 참고 문헌

- 기상청 수치모델링센터, 2020; 전지구예보모델의 오차진단과 예측성 평가, 11-1360709-000046-01
- 기상청 수치모델링센터, 2021; 전지구예보모델의 오차진단과 예측성 평가 (II), 11-1360709-000064-01
- Arakawa, A., & Schubert, W. H. (1974). Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part I. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31 (3), 674-701.
- Copernicus Climate Change Service (C3S) (2017): ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate . Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), date of access.
- Han, J.-Y., S. Y. Hong, K.-S. Sunny Lim, and J. Han, 2016: Sensitivity of a cumulus parameterization scheme to precipitation production representation and its impact on a heavy rain event over Korea. *Mon. Wea. Rev.*, 144, 2125-2135. [<https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0255.1>]
- Han, J.-Y., and S. Y. Hong, 2018: Precipitation forecast experiments using the weather research and forecasting (WRF) model at gray-zone resolutions. *Wea. Forecasting*, 33, 1605-1616. [<https://doi.org/10.1175/WAF-D-18-0026.1>]
- Han, J.-Y., S. Y. Hong, and Y. C. Kwon, 2020: The performance of a revised simplified Arakawa-Schubert (SAS) convection scheme in the medium-range forecasts of the Korean Integrated Model (KIM). *Wea. Forecasting*, 35, 1113-1128. [<https://doi.org/10.1175/WAF-D-19-0219>]
- Kwon, Y. C., and S.-Y. Hong, 2017: A mass-flux cumulus parameterization scheme across gray-zone resolutions. *Mon. Wea. Rev.*, 145, 583-598. [<https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0034.1>]
- Niu, G.-Y., Yang, Z.-L., Mitchell, K.E., Chen, F., Ek, M.B., Barlage, M., Kumar, A., Manning, K., Niyogi, D., Rosero, E., Tewari, M., and Xia, Y. (2011). "The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116, No. D12, p. D12109.

제 3 세부과제

“극한기상 발생시 지표면 근처의 국지규모
예측성 분석”

연구기관

한국기상학회 / 강원대학교 / 서울시립대학교

<출판용 여백>

요 약 문

제 3 세부과제는 한국형수치예보모델의 경계층 및 국지 규모에 예측성을 평가하는 것을 목표로 하였다. 특히 여름철 폭염 및 겨울철 한파 발생시 대기 하층의 온도와 습도 오차를 진단하고, 해당 오차를 발생시키는 물리적 원인을 진단하였다. 또한 라디오존데 관측 자료와 비교를 통해 경계층 내 온도 및 습도의 연직 구조를 평가하였다. 세부적인 내용은 아래와 같다.

가. 폭염, 한파 발생시 경계층 온도, 습도 예측성 평가

- 2020년과 2021년 여름철 폭염 사례의 경계층 온도, 습도 예측성 비교
- 2021년과 2022년 겨울철 한파 사례의 경계층 온도, 습도 예측성 비교
- 지표면 근처 국지 규모 예측성이 낮은 기상조건 유형화

나. 경계층 오차 진단 및 개선점 파악

- 09, 21시 존데자료를 활용한 여름과 겨울 경계층온도, 습도, 바람 예측성 비교
- 경계층 모수화 방안의 모수조사 및 선택방향 제안

차 례

제 1 장 사업의 필요성	1
제 2 장 사업 목적	2
제 3 장 사업 개요	2
제 4 장 사업 수행 내용 및 결과	3
제 1 절. 폭염, 한파 발생시 경계층 온도, 습도 예측성 평가	3
1) 관측 및 모델 자료의 수집	3
2) 평년 대비 기압변화에 따른 모델 오차 진단	7
3) KIM의 기압 변화에 따른 폭염과 한파 모의 특성 파악	8
4) 폭염 발생 시 기온 및 습도 오차 유형 진단	10
5) 한파 발생 시 기온 및 습도 오차 유형 진단	20
제 2 절. 경계층 오차 진단 및 개선점 파악	32
1) 경계층 오차 분석 방법	32
2) 경계층 오차 분석	35
제 5 장 사업수행결과의 활용 계획	46
제 6 장 참고 문헌	47

표 차례

<표. 3.1.1> KIM 모의 자료 개요 5

그림 차례

<그림. 3.1.1> 지상 ASOS, 고층 기상 관측 지점 6

<그림. 3.1.2> 여름철 평년기압 대비 2020년, 2021년의 일 평균 해면기압(hPa) 7

<그림. 3.1.3> 폭염 발생 시 전날 대비 일평균기압 변화량과 평년 대비 기압 차의 분포에 따른 기온 MBE 강도 [(좌)전국적 폭염 사례, (우)지역적 폭염 사례] 8

<그림. 3.1.4> 한파 발생 시 전날 대비 일평균기압 변화량과 평년 대비 기압 차의 분포에 따른 일최저기온 MBE(°C) [(좌)전국적 한파 사례, (우)지역적 한파 사례] 9

<그림. 3.1.5> 폭염기간 동안의 최고기온의 MBE(°C)와 평년기압 편차 유형별 모델의 기온 MBE(°C) 공간분포 10

<그림. 3.1.6> 폭염 사례의 기온 MAE(°C)별 Heat flux(W/m²) 비교 11

<그림. 3.1.7> 여름철 기간 기온(°C), 습도, 전운량(%), 지표온도(°C), 기압(hPa)의 MBE 시계열과 강수량 시계열 13

<그림. 3.1.8> 여름철 사례 분석 기간의 일기도 [(좌)2021년 7월 23일 09KST, (중) 2021년 7월 27일 09KST, (우)2021년 7월 30일 09KST] 13

<그림. 3.1.9> 여름철 사례 분석 기간의 (맨 위부터) 기온(°C), 습도(%), 지표온도(°C), 전운량(1/10)의 MBE 시계열 15

<그림. 3.1.10> 여름철 사례 분석 기간의 (맨 위부터) 기온(°C), 습도(%), 지표온도(°C), 전운량(1/10), PBL 높이(m), PBL 타입(합계), 비습(kg/kg), 현열(W/m²), 잠열(W/m²) 시계열 16

<그림. 3.1.11> 여름철 사례 분석 기간의 일 최고기온(°C), 기온(°C), 지표온도(°C), 전운량(1/10)의 MBE 공간 분포 16

<그림. 3.1.12> 여름철(2020년 7월 14일~16일, 18일, 19일) 이천 존데 집중 관측 (국립기상과학원)과 KIM 모의 비교(09KST, 15KST) [(상)기온 연직 분포, (하)비습 연직 분포] 18

<그림. 3.1.13> 여름철(2020년 7월 25일, 27일, 31일, 8월 2일) 이천 존데 집중 관측

(국립기상과학원)과 KIM 모의 비교(09KST, 15KST) [(상)기온 연직 분포, (하)비습 연직 분포]	19
<그림. 3.1.14> 한파기간의 최저기온의 MBE(°C)와 평년기압 편차 유형별 모델의 기온 MBE(°C) 공간분포	20
<그림. 3.1.15> 한파 사례의 기온 MAE(°C)별 Heat flux(W/m ²) 비교	21
<그림. 3.1.16> 겨울철 기간 기온(°C), 습도(%), 전운량(1/10), 지표온도(°C), 기압의 MBE 시계열과 강수량 시계열	23
<그림. 3.1.17> 겨울철 한파 분석 사례 기간의 일기도 [(좌)2021년 1월 13일 15KST, (중) 2021년 1월 16일 15KST, (우)2021년 1월 21일 15KST]	23
<그림. 3.1.18> 겨울철 사례 분석 기간의 (맨 위부터) 기온(°C), 습도(%), 지표온도(°C), 전운량(1/10)의 MBE 시계열	24
<그림. 3.1.19> 겨울철 사례 분석 기간의 (맨 위부터) 기온(°C), 습도(%), 지표온도(°C), 전운량(1/10), PBL 높이(m), PBL 타입(합계), 비습(kg/kg), 현열(W/m ²), 잠열(W/m ²)의 시계열	25
<그림. 3.1.20> 겨울철 사례 분석 기간의 일 최저기온(°C), 기온(°C), 지표온도(°C), 전운량(1/10)의 MBE 공간 분포	26
<그림. 3.1.21> 겨울철 사례 분석 기간의 N ² 시계열 [(상) 일평균, (하) 3시간 간격]	27
<그림. 3.1.22> 겨울철(2021년 12월 24일, 2022년 2월 13일~14일) 존데 집중 관측 (국립기상과학원)과 KIM 모의 비교(09KST, 15KST) [(상)기온 연직 분포, (하)비습 연직 분포].	29
<그림. 3.1.23> 겨울철 존데 집중 관측 기간의 N ² 연직 그래프	31
<그림. 3.2.1> 2021년 4월 오산 지점에서의 6시간 간격과 12시간 간격의 존데 기온 자료를 사용하여 계산한 기온의 일별 연직평균오차	33
<그림. 3.2.2> 2021년 4월 오산 지점에서의 6시간 간격 자료로 계산한 오차와 12시간 간격 자료 중 9시 오차에 가중치 0.6을 적용하여 계산한 기온의 일별 연직평균오차	34
<그림. 3.2.3> 다양한 가중치(0-1)를 적용하여 계산한 오산(47122, 위)과 광주(47158, 아래) 지점에서의 기온(좌)과 비습(우)의 연직평균오차	34
<그림. 3.2.4> 2021년 7월 오산(위)과 백령도(아래) 고층기상관측 지점에서의 기온의 시간-연직 분포	35
<그림. 3.2.5> 2021년 7월 오산 고층기상관측 지점에서의 기온(위)과 기온편차(아래, KIM-존데) 시간-연직 분포. 점은 대기경계층 높이 표시	36

<그림. 3.2.6> 2021년 7월 백령도 고층기상관측 지점에서의 기온(위)과 기온편차 (아래, KIM-존데) 시간-연직 분포. 점은 대기경계층 높이 표시	36
<그림. 3.2.7> 2021년 7월 850 hPa(위), 950 hPa(중간), 1000 hPa(아래)에서의 기온 편차 분포	37
<그림. 3.2.8> 2021년 7월 기온(위), 비습(중간), 풍속(아래)의 연직평균편차(좌)와 950 hPa에서의 편차(우)	38
<그림. 3.2.9> 2021년 7월 기온(좌), 비습(중간), 풍속(우) 평균편차의 연직 분포	38
<그림. 3.2.10> 2021년 7월 950 hPa에서의 기온(위), 비습(중간), 풍속(아래)의 편차 분포	39
<그림. 3.2.11> 2022년 1월 오산(위)과 백령도(아래) 고층기상관측 지점에서의 기온의 시간-연직 분포	40
<그림. 3.2.12> 2022년 1월 오산 고층기상관측 지점에서의 기온(위)과 기온편차(아래, KIM-존데) 시간-연직 분포. 점은 대기경계층 높이 표시	41
<그림. 3.2.13> 2022년 1월 백령도 고층기상관측 지점에서의 기온(위)과 기온편차 (아래, KIM-존데) 시간-연직 분포. 점은 대기경계층 높이 표시	41
<그림. 3.2.14> 2022년 1월 850 hPa(위), 950 hPa(중간), 1000 hPa(아래)에서의 기온 편차 분포	42
<그림. 3.2.15> 2022년 1월 기온(위), 비습(중간), 풍속(아래)의 연직평균편차(좌)와 950 hPa에서의 편차(우)	43
<그림. 3.2.16> 2022년 1월 기온(좌), 비습(중간), 풍속(우) 평균편차의 연직 분포	43
<그림. 3.2.17> 2022년 1월 950 hPa에서의 기온(위), 비습(중간), 풍속(아래)의 편차 분포	44

제 1 장 사업의 필요성

폭염, 한파 등 극한기상 현상은 종관규모의 기단 및 기압의 배치 등이 주요한 원인인 한편, 그 강도는 각 지역별 지형의 특성과 지면작용에 의해 큰 차이를 보인다. 이러한 극한기상을 KIM이 정확히 예측하기 위해서는 종관규모의 기상장과 함께 지표면 근처의 국지규모 기상장을 모의하는 것이 중요하다. 앞선 연구에서 전지구예보모델의 종관기상장 예측 성능과 함께 지면 과정과 국지 순환 예측 성능을 함께 진단함으로써 종관기상적인 특성에 의한 오차와 국지기상적인 특성에 의한 오차 사례를 구분한 바 있다. 이를 극한기상 사례에 적용하기 위해서는 폭염, 한파 등 해당 사례의 예측 성능을 진단하기에 적합한 지상 및 상층 대기 인자를 도출하여야 한다. 또한, 최근 수년간의 극한기상 사례 예측성을 정량적으로 비교함으로써 2020년 이후 현업 운영 중인 한국형수치예보모델의 성능 개선 정도를 평가할 필요가 있다.

한국형수치예보모델의 국지규모의 예측성은 주로 경계층 모수화 방안에 크게 의존하는 것으로 알려져 있다. 경계층에서는 국지규모의 난류에 의해 대기 중 열, 수분, 운동량 등이 연직 방향으로 수송확산되며, 극한기상 사례에서는 지면과의 열, 수분, 운동량 교환과정도 중요한 역할을 한다. 한국형수치예보모델(KIM)에 적용된 대기경계층 모수화 방안에서는 우선 지표면 조건과 온습도 연직 프로파일 자료를 이용하여 대기경계층의 타입을 분류하고 분류된 타입에 따라 연직 혼합과정을 다르게 처리한다. 앞선 연구에서는 봄철에 모의된 대기경계층의 타입을 분석한 바 있는데 여름철과 겨울철에도 한국형 수치예보모델이 경계층 내 열, 수분, 운동량의 연직 혼합과정을 적절히 모의하는지 정량적으로 살펴볼 필요가 있다. 나아가 폭염과 한파 사례에서 국지규모 예측성을 파악할 수 있는 자료를 선별하고 경계층 혼합과정의 강도를 추측하는 등의 분석을 통해 극한기상 사례의 예측성을 향상시키기 위한 방안을 도출할 수 있을 것이다.

제 2 장 사업 목적

본 세부과제의 목적은 기상청이 운영 중인 한국형수치예보모델의 극한기상 사례 예측성을 분석하고, 경계층 오차 진단을 바탕으로 한 개선점을 제시하는 것이다.

- 폭염, 한파 발생시 경계층 온도, 습도 예측성 평가
 - 2020, 2021년 여름철(6-8월) 폭염 사례의 경계층 온도, 습도 예측성 비교
 - 2021, 2022년 겨울철(1-2월) 한파 사례의 경계층 온도, 습도 예측성 비교
 - 지표면 근처 국지규모 예측성이 낮은 기상조건 유형화
- 경계층 오차 진단 및 개선점 파악
 - 9, 21시 준데자료를 활용한 여름과 겨울 경계층 온도, 습도, 바람 예측성 비교
 - 경계층 모수화 방안의 모수 조사 및 선택 방향 제안

제 3 장 사업 개요

제 3 세부과제는 폭염과 한파 등 극한기상 사례의 지표면 근처 국지기상 예측성을 진단하기 위하여, 한국형수치예보모델이 현업 운영했던 기간 중 여름철 폭염과 겨울철 한파 사례를 선정하고, 예측 자료를 여러 관측 자료와 비교함으로써 예측성이 낮은 지역 및 조건을 도출하고 개선점을 제안하고자 한다. 세부적인 연구 내용 및 결과는 다음과 같다.

추진 일정

내용	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	비고
■ 사용자 요구사항 분석 및 수행계획 수립										강원대 시립대
■ 모델 및 관측자료 수집 데이터베이스 구축										강원대
■ 현상별 분석 사례 선정										강원대
■ 현상별 경계층 예측성 평가										강원대
■ 경계층 오차 진단 및 개선 점 파악										시립대
■ 기술이전 및 보고서 작성										강원대 시립대

제 4 장 사업 수행 내용 및 결과

제 1 절. 폭염, 한파 발생시 경계층 온도, 습도 예측성 평가

1) 관측 및 모델 자료의 수집

가) 모델 자료 수집

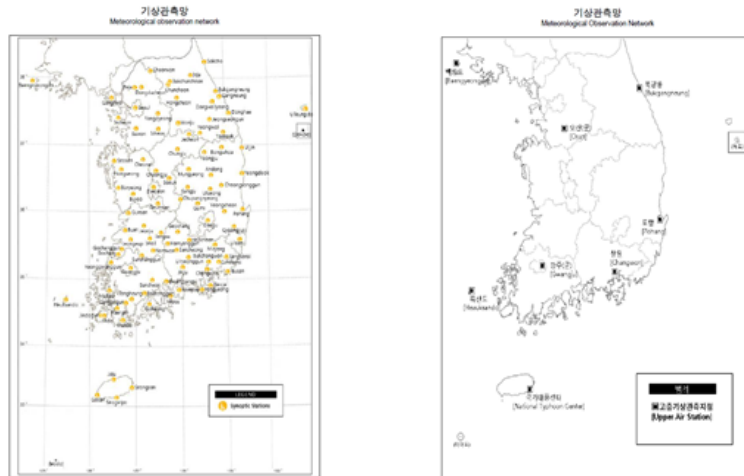
전지구예보모델인 KIM의 기온과 경계층 모의 특성을 진단하기 위해 기상청 수치모델링센터에서 제공한 여름철(2020년 6월 10일 ~ 9월 8일, 2021년 6월 1일 ~ 8월 31일), 겨울철(2022년 12월 25일 ~ 1월 31일, 2021년 12월 1일 ~ 2월 28일)의 모의 자료를 이용하였다. 이 중에서 2020년도 여름철 모의 자료와 2020년 12월 일부와 2021년 1월의 모의 자료는 지난 2차년도 과업에서 사용한 자료와 동일한 KIM 3.5 버전이며, 2021년 여름철과 2022년 겨울철은 올해 과업에서 추가로 제공받은 KIM 3.6 버전이다. 모든 기간에 대해 00UTC를 기준으로 한 초기장으로부터 일 1회 모의한 자료를 제공받았다. 제공받은 KIM 모의 자료 구조 및 상세 정보를 <표 3.1.1>에 나타내었다. 지상 기온 모의 정확도 평가에는 지상 예보일 자료의 3시간 간격 t2m, q2m, cld, sensible heat flux 등을 사용하였으며, 경계층 모의 정확도 평가에는 등압면 0~6예보일 자료의 6시간 간격 u, v, T, q 등을 사용하였다. 이때, 등압면 고도는 700, 750, 800, 850, 875, 900, 925, 950, 975, 1000 hPa이다. 공간 해상도는 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ 로 동일하다.

<표 3.1.1> KIM 모의 자료 개요

	KIM	
	등압면	지상
수평 공간 해상도	0.125°×0.125°	
등압면 (hPa)	1, 3, 5, 7, 10, 20, 30, 50, 70, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850, 875, 900, 925, 950, 975, 1000	-
예보 기간(h)	0~168	
시간 간격(h)	3 또는 6	
주요 변수	u, v, T, q	t2m, u10m, v10m, pbltype, tmax, tmin, q2m

나) 지상 ASOS 자료 및 라디오존데 자료 수집

KIM의 모의 성능을 비교 및 평가하기 위해 중관기상관측소(ASOS) 자료, 고층 기상 관측 자료를 이용하였다. <그림 3.1.1>에서 ASOS 관측 자료로는 전국 95개 지점의 2 m의 기온, 10 m 풍속 자료를, 고층 기상 관측 자료로는 오산, 광주 지점의 일 2회 또는 4회 관측 자료를 이용하였다. 라디오존데는 국립기상과학원의 제공으로 이천(2020년 6-8월 일부), 속초(2021년 8월과 12월 일부), 대관령(2022년 2월) 지점에서 1일 2회 관측된 자료를 수집하였다.



<그림 3.1.1> 지상 ASOS와 고층 기상 관측 지점

다) 통계지표를 위한 오차 진단 과정

전지구수치예보모델의 예측 정확도를 비교하기 위하여 통계지표 중 <식 3.1.1>의 절대 평균 오차(Mean Absolute Error, MAE)와 <식 3.1.2>의 평균 오차(Mean Bias Error, MBE)를 사용하였다. 평균 절대 오차를 이용하여 오차가 큰 사례를 분석일로 정하고, 평균 오차를 통해 MBE값이 양수이면 과대모의를, 음수이면 과소모의를 의미한다.

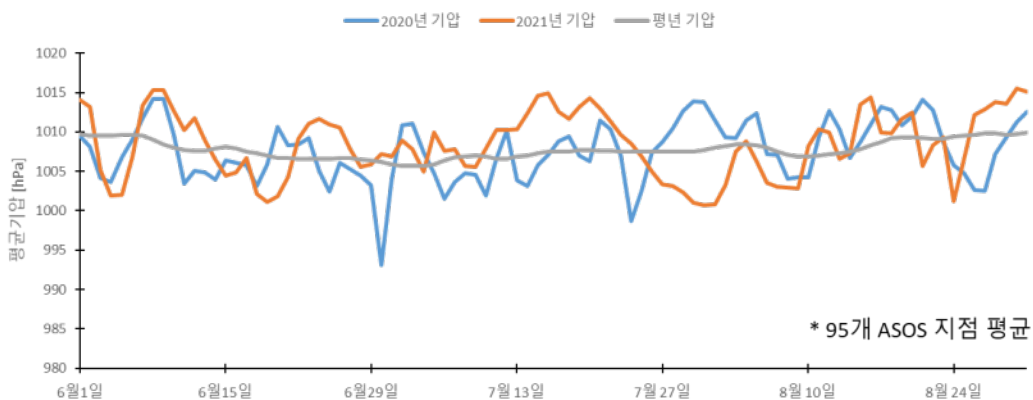
$$MAE(\text{Mean Absolute Error}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^n |M_i - O_i| \quad \text{<식 3.1.1>}$$

$$MBE(\text{Mean Bias Error}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^n (M_i - O_i) \quad \text{<식 3.1.2>}$$

위 통계지표를 이용하여 폭염과 한파 때, MAE가 컸던 각 상위 20개 사례를 선정하였다. 이때 오차 비교는 KIM의 1예보일 값과 관측값을 이용하였다. 그 이후 MBE를 통해 KIM이 과소 및 과대모의를 진단하였다. 비교 요소는 일 최고기온과 일 최저기온, 상대습도, 비습, 전운량, PBL Type 등이다.

2) 평년 대비 기압변화에 따른 모델 오차 진단

폭염과 한파 발생시 일평균 기압 편차를 이용하여 오차원인을 진단하기 위해 1991년부터 2020년까지 전국 95개 ASOS 지점의 지점별 일평균 해면기압을 폭염, 한파 기간으로 선정된 날짜와 비교하였다. <그림 3.1.2>에서는 사례일의 95개 지점 일 평균 해면기압(hPa)과 평년 95개 지점 일 평균 해면기압(hPa)을 비교하였다. 평년 대비 사례일의 기압의 편차가 양수로 나타나면 평년 대비 기압이 높으며 고기압의 영향이 강함을 의미하고, 평년 대비 사례일의 기압의 편차가 음수로 나타나면 평년 대비 기압이 낮아 고기압의 영향이 약함을 의미한다.

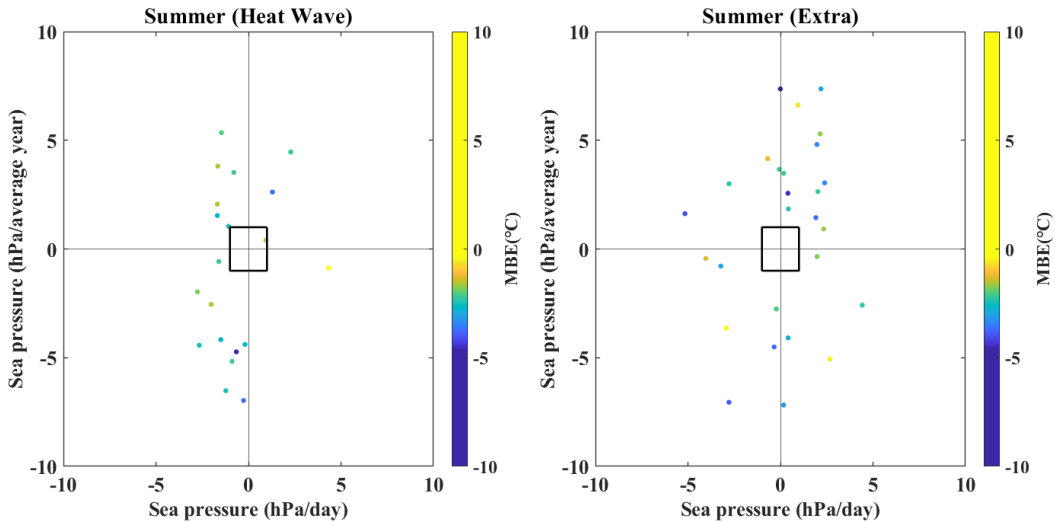


<그림 3.1.2> 여름철 평년기압 대비 2020년, 2021년의 일 평균 해면기압(hPa)

이와 함께 사례일의 기압의 변화 경향을 진단 요소로 활용하기 위해 전날 대비 일평균 해면기압의 변화를 확인하였다. ASOS 관측 자료를 기준으로 사례일의 일평균 해면기압에서 사례일 전날의 일평균 해면기압을 뺀 편차를 구하였다. 기압의 변화량이 양수였으면 전날 대비 고기압의 세력이 강해짐을 의미하고, 기압의 변화량이 음수였으면 전날 대비 고기압의 세력이 약해짐을 의미한다.

3) KIM의 기압 변화에 따른 폭염과 한파 모의 특성 파악

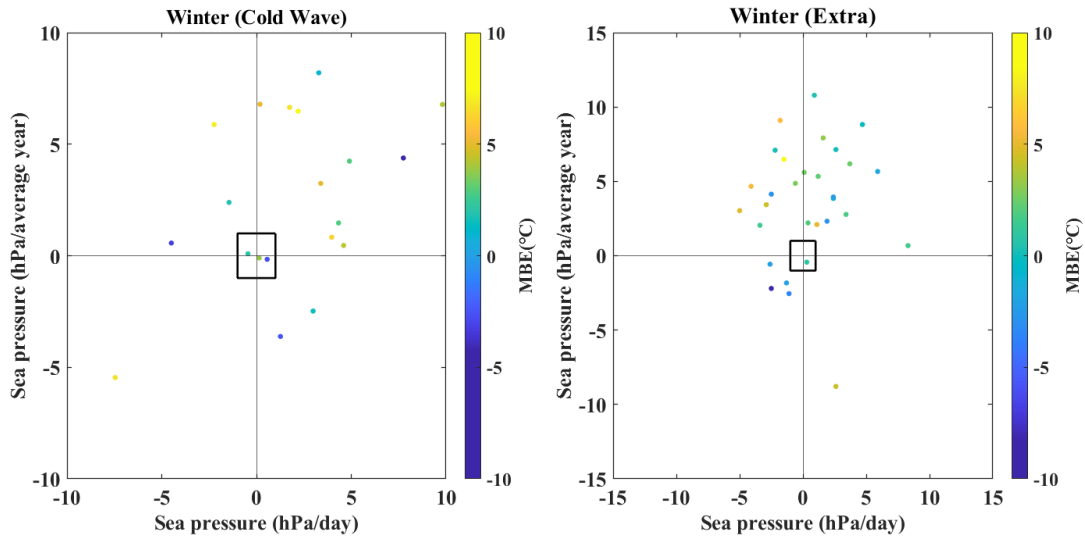
가) 평년 대비 일평균 기압 편차를 이용한 폭염의 오차 진단



〈그림 3.1.3〉 폭염 발생 시 전날 대비 일평균기압 변화량과 평년 대비 기압 차의 분포에 따른 일최고기온 MBE(°C) [(좌)전국적 폭염 사례, (우)지역적 폭염 사례]

기압의 변화에 따른 폭염 사례일의 일최고기온 MAE(°C)의 특성을 보고자 하였다. 〈그림 3.1.3〉의 왼쪽은 전국적인 폭염 사례(95개 ASOS 지점의 일최고기온 평균이 33°C 이상인 사례) 중 지점 간 표준편차가 컸던 상위 20개 사례의 해면기압 변화에 따른 일최고기온 MBE(°C)를 나타냈으며, 오른쪽은 전국 평균 일최고기온이 33°C 미만이나, 일부 지역(5개 지점 이상)에서 일최고기온이 33도 이상인 사례의 해면기압 변화에 따른 일최고기온 MBE(°C)를 나타내었다. 여기에는 주로 영남 지역에 일부 발생했던 폭염 사례들이 포함되었다. 〈그림 3.1.3〉은 폭염 사례에서 일반적으로 KIM이 일최고기온을 과소모의함을 보여준다. 전국적으로 폭염이 발생한 사례일에서는 기압이 점차 강해지는 시기에 KIM의 최고기온 모의 오차가 커지는 경향을 보였다. 한편, 지역적으로 폭염이 발생한 사례에서는 기압이 점차 약해질 때, KIM의 일최고기온 모의 오차가 증가하였다.

나) 평년 대비 일평균 기압 편차를 이용한 한파의 오차 진단



<그림 3.1.4> 한파 발생 시 전날 대비 일평균기압 변화량과 평년 대비 기압 차의 분포에 따른 일최저기온 MBE(°C) [(좌)전국적 한파 사례, (우)지역적 한파 사례]

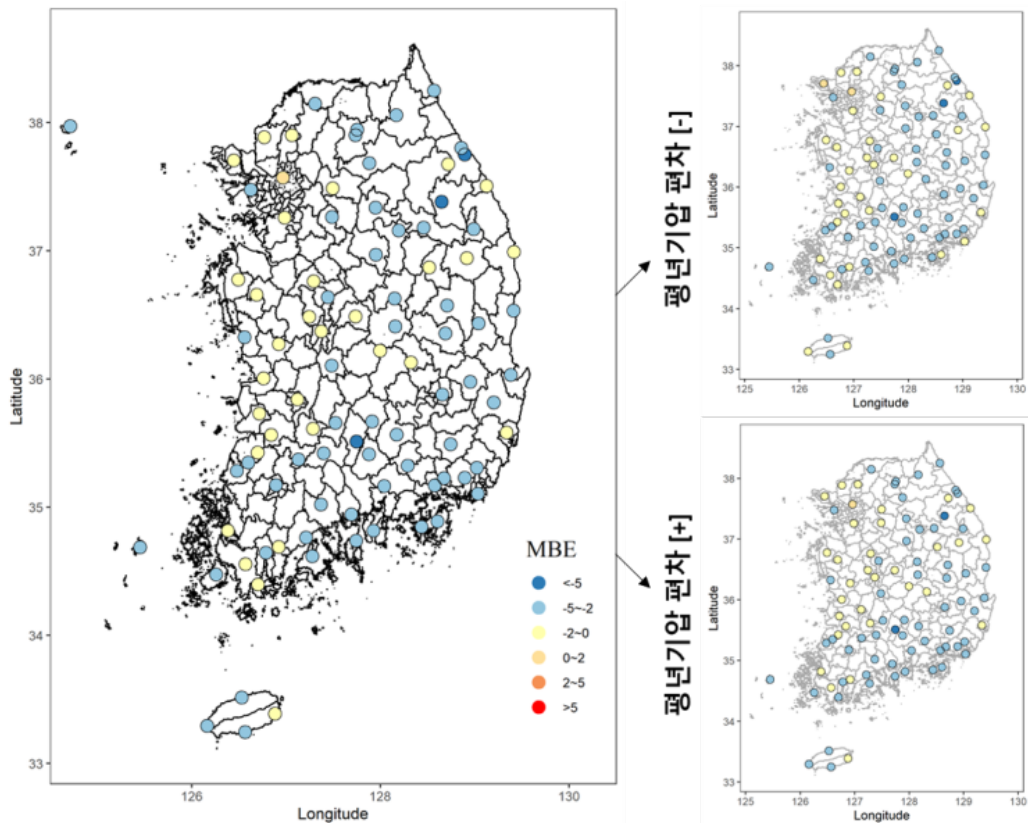
<그림 3.1.4>의 왼쪽은 95개 ASOS 지점의 일최저기온이 평균 영하 12°C 이하로 낮으면서 표준편차가 컸던 상위 20개 사례를 해면기압 변화에 따른 일최저기온 MBE(°C)로 나타냈다. 오른쪽은 일최저기온이 영하 12도 이하인 곳이 5지점 이상이었던 사례를 해면기압 변화에 따른 일최저기온 MBE(°C)로 나타내었다. 전국적으로 한파가 발생한 사례에서 기압이 점차 강해질 때 KIM의 일최저기온의 오차가 증가하였다. 한편, 지역적으로 한파가 발생사례에서 기압이 점차 낮아질 때, KIM의 일최저기온을 크게 과대모의하였다. 겨울철의 전국적 한파 사례의 모의 오차로부터 시베리아 고기압의 확장처럼 기압이 점차 증가할 때 한파의 강도를 과소모의한다고 확인하였다.

4) 폭염 발생 시 기온 및 습도 오차 유형 진단

가) 폭염 발생시 기온 MBE(°C) 분포

여름철 평년기압 편차 유형에 따른 KIM의 MBE(°C) 분포를 확인하였다. <그림 3.1.5>는 2020년부터 2021년 여름철 일최고기온에 대해 KIM 예측자료와 관측자료를 비교하였고 대체로 관측 대비 약 2.3°C 과소모의하는 경향이 나타났다.

일 평균 기압이 평년 대비 낮았던 기간의 편차는 약 -0.7°C, 높았던 기간은 약 -0.8°C으로, 다소 과소모의하였다. 특히 남해안과 강원지역에서 과소모의하는 경향이 크게 나타났다.

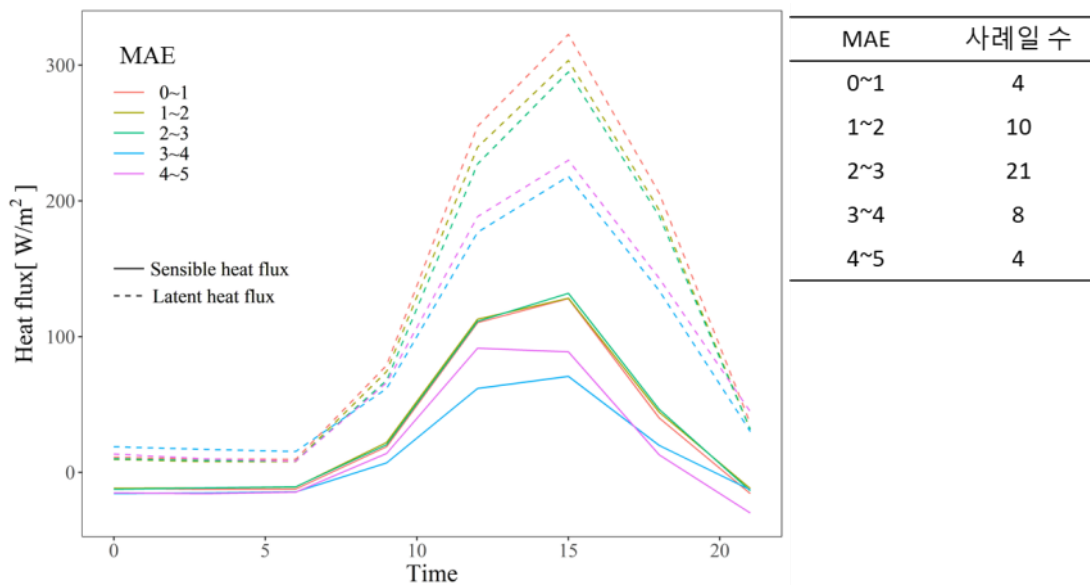


<그림 3.1.5> 폭염기간 동안의 최고기온의 MBE(°C)와 평년기압 편차 유형별 모델의 기온 MBE(°C) 공간분포

나) 폭염 사례의 기온 MAE(°C)별 Heat flux(W/m²) 비교

폭염선정 사례의 모델의 오차원인을 확인하기 위하여 모델 오차의 수준에 따라 Heat flux가 어떤 변화를 보이는지 확인하였다. KIM과 ASOS 관측자료를 활용하여 일최고기온에 대한 MAE(°C)를 계산하여 5개 등급으로 분류하여 heat flux의 일변화를 확인하였다. 일최고기온의 MAE(°C)를 0~1, 1~2, 2~3, 3~4, 4~5의 5등급으로 분류하였고 각 등급별 해당되는 사례일수는 각각 4일, 10일, 21일, 8일, 4일로 나타났다.

<그림 3.1.6>은 폭염일의 Heat flux(W/m²) 일변화 패턴을 나타내었다. Latent heat flux가 Sensible heat flux보다 높게 나타났으며 해당 기간은 MAE(°C)가 높게 나타날수록 heat flux가 감소하는 경향이 나타났다.

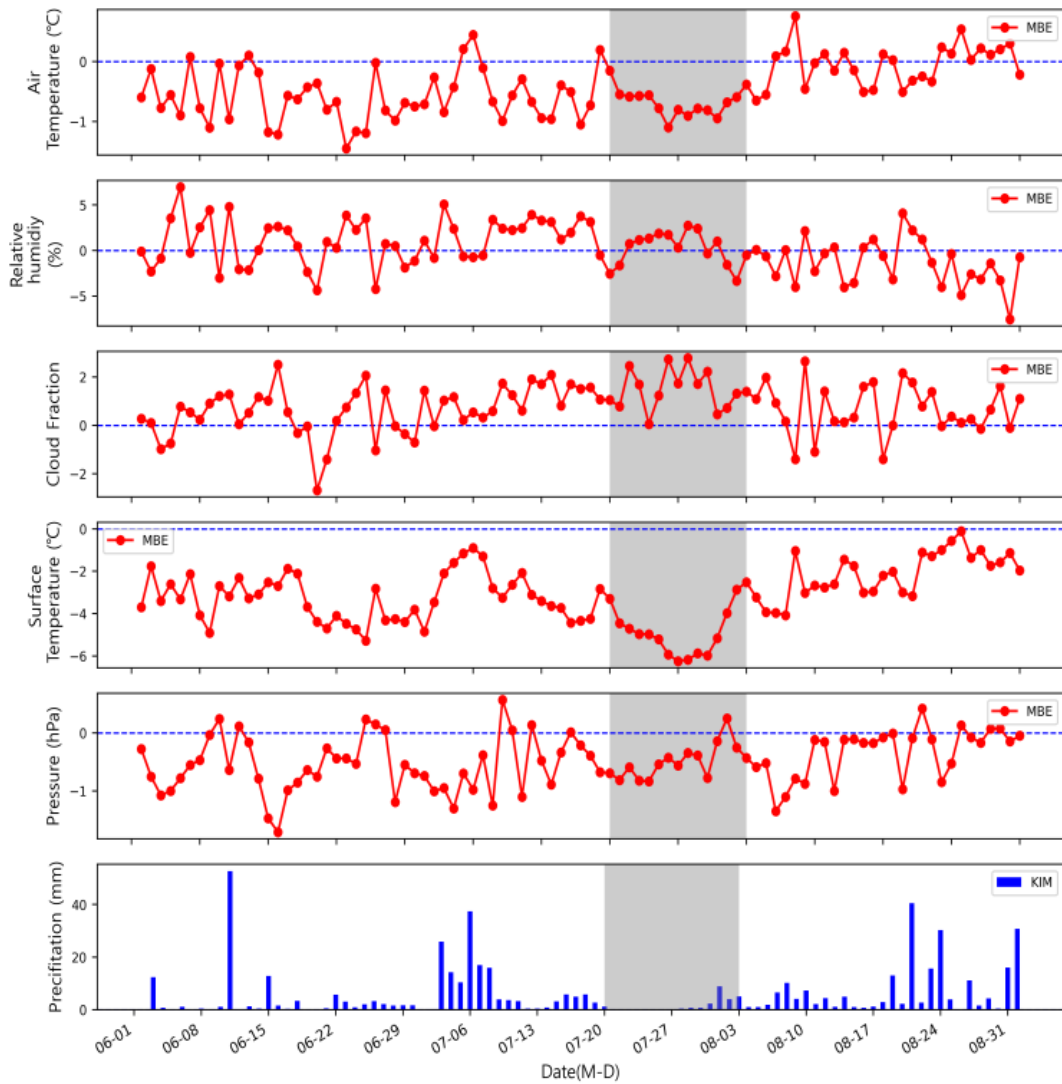


<그림 3.1.6> 폭염 사례의 기온 MAE(°C)별 Heat flux(W/m²) 비교

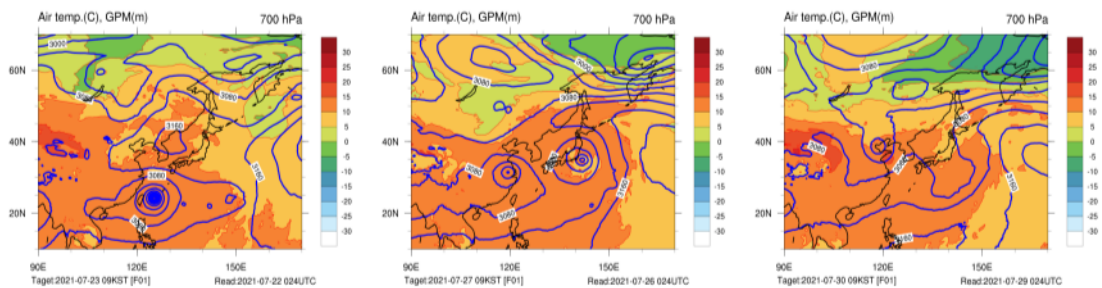
다) 여름철 폭염 대표 사례

본 연구에서는 2021년 6~8월에 대하여 폭염 대표 사례를 선정하기 위해 기온(°C), 지표온도(°C), 전운량(1/10) 등을 분석하였다. <그림 3.1.7>은 해당 기간의 관측에 대한 KIM 예측자료의 MBE의 시계열을 나타내었다. 전체적으로 KIM은 기온을 대체적으로 과소모의하는 경향을 보여주었으며 상대적으로 KIM이 대표 사례 기간의 기온을 다른 일자보다 과소모의하는 기간이 길었다. 상대 습도는 KIM이 최대 8%까지 과대모의했다. 전운량은 대체적으로 다소 과대 모의하는 경향을 보인 반면, 해면기압은 1 hPa 이내로 유사하게 모의했다.

대표사례는 강수가 없는 기간에 대하여 기온을 최대 6.1°C 과소모의한 7월 27일을 선정하였고 분석기간으로 대표사례일 기준 전후 1주일(2021년 7월 20일부터 8월 2일)을 선정하였다. 선정된 사례 기간의 KIM 일기도인 <그림 3.1.8>을 보면 2021년 7월 23일부터 제6호 태풍 인파의 영향을 받고 있었고 7월 27일에는 한반도 근처까지 태풍이 북상했고 7월 30일 이후에 태풍이 소멸한 것을 볼 수 있다. <그림 3.1.9>는 선정된 여름철 폭염 분석 사례 기간에 대한 ASOS와 KIM 간 기온, 습도, 기압, 지표온도, 전운량의 MBE를 시계열로 나타낸 것이다. 그리고 <그림 3.1.10>은 사례 기간의 ASOS와 KIM 간 기온, 습도, 지표온도, 전운량, PBL 고도, PBL 타입, 비습, 잠열 flux, 현열 flux의 시계열을 나타낸 것이다. <그림 3.1.9>과 <그림 3.1.10>의 회색 영역은 7월 27일이며, 전국 ASOS 지점에 대해 평균한 값이다.

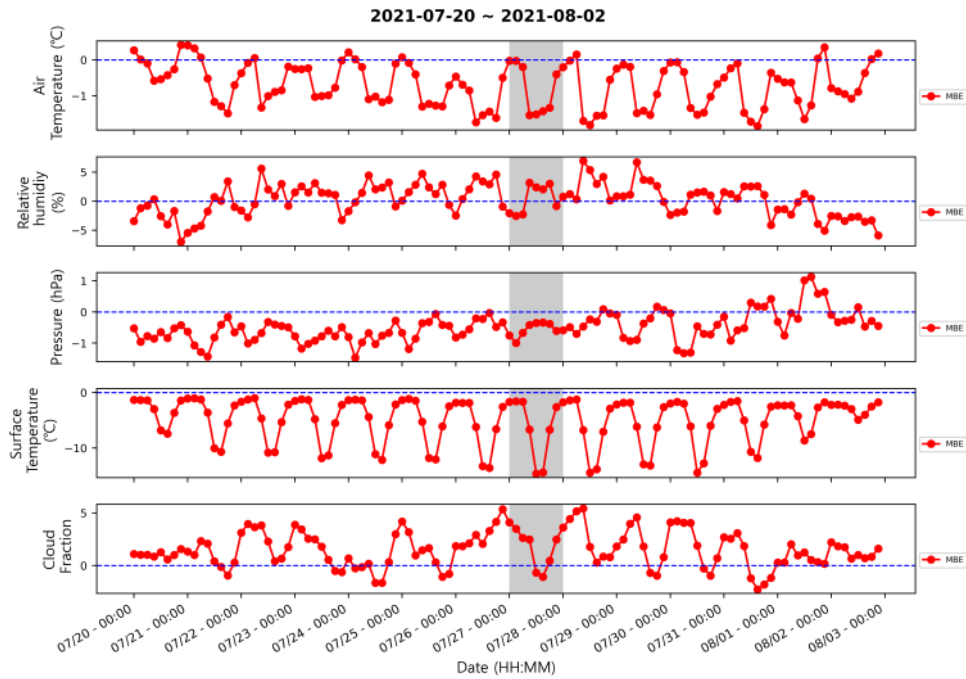


<그림 3.1.7> 여름철 기간 기온(°C), 상대습도(%), 전운량, 지표온도(°C), 기압(hPa)의 MBE 시계열과 강수량 시계열



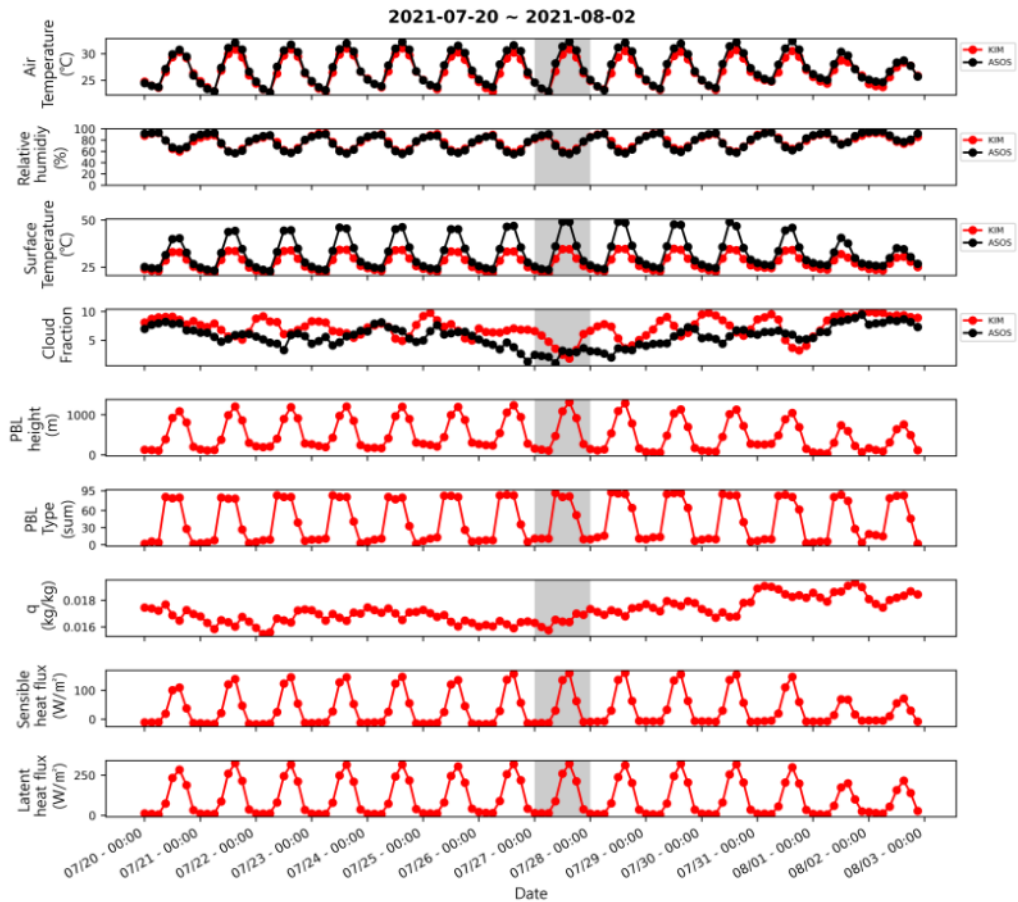
<그림 3.1.8> 여름철 사례 분석 기간의 일기도 [(좌)2021년 7월 23일 09KST, (중) 2021년 7월 27일 09KST, (우)2021년 7월 30일 09KST]

여름철 폭염 대표 사례 기간인 7월 27일을 대상으로 <그림 3.1.9>과 <그림 3.1.10>을 이용하여 다른 일자와 비교하였다. 해당 사례일(7월 27일) 새벽 시간에 기온 MBE(°C)가 0에 가깝게 나타나 유사하게 잘 모사했다. 반면, 낮 시간에는 1°C 이상 과소모의했다. 상대습도는 새벽~오전 시간에 약 1~2% 정도 과소모의하였고 오후 시간대에 약 2~3% 과대모의하였다. 지표 온도는 모든 시간대에서 과소모의하였으나 새벽 시간대와 오후 시간대 간 과소모의하는 강도가 달랐다. 새벽 시간대에서는 1~2°C 정도 과소모의하였으나 오후 시간대에서는 최대 10°C까지 과소모의했다. 전운량은 새벽부터 오전까지 주기적으로 과대모의하는 특징을 보였다. 최대 PBL 고도는 7월 27일에 가장 높았고 PBL 타입, 현열, 잠열은 다른 일자와 비교했을 때 큰 특징을 보이지 않았다. 비습은 7월 27일을 기점으로 감소세를 보인 후 점차 증가하는 것으로 모의하였다. KIM이 모의한 전운량은 오후 시간대에 비교적 오차가 작은 반면, 밤부터 오전시간에 과대모의하는 경향이 뚜렷하며, 현열 속과 잠열 속이 작은 일별 패턴과 유사한 것으로 보아 지면온도 및 기온의 오차 원인으로 판단된다. 또한, 7월 27일은 <그림 3.1.9>에서 맑은 날임에도 불구하고 지표 온도를 낮 시간에 과소모의하는 경향이 다른 일자보다 강했다. 지표 온도로 인해 기온과 습도에 영향을 주는 것으로 판단된다.

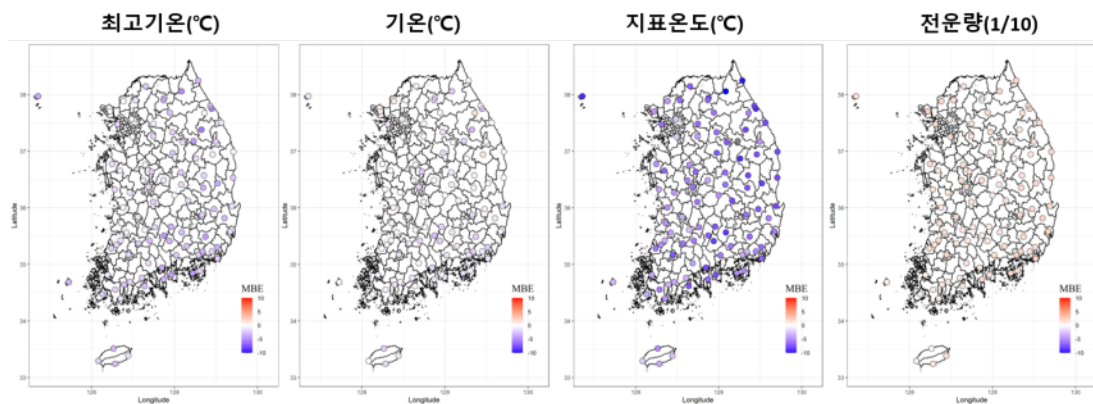


<그림 3.1.9> 여름철 사례 분석 기간의 (맨 위부터) 기온(°C), 습도(%), 지표 온도(°C), 전운량(1/10)의 MBE 시계열

<그림 3.1.11>은 앞서 선정된 여름철 폭염 사례 분석 기간의 일최고기온(°C), 일평균기온(°C), 지표 온도(°C), 전운량(1/10)의 ASOS 관측값에 대한 KIM의 MBE 공간분포다. 해당 기간 일최고기온의 MBE(°C)는 -2.05, 일평균기온의 MBE(°C)은 -0.69로 둘 다 과소모의하는 경향이 나타났다. 지표 온도의 MBE(°C)는 -5.86로 강원 영동지역과 경남지역에서 오차가 크게 나타났다. 전운량의 MBE는 1.47로 모델에서 구름을 과대모의하는 것으로 나타났다. 여름철 사례 분석 기간의 지표 온도에 대한 오차가 크게 발생하였고 해당 기간은 구름의 과대모의로 인해 지표 온도에 대한 오차가 발생한 것으로 사료된다.



<그림 3.1.10> 여름철 사례 분석 기간의 (맨 위부터) 기온(°C), 습도(%), 지표 온도(°C), 전운량(1/10), PBL 높이(m), PBL 타입, 비습(kg/kg), 현열(W/m²), 잠열(W/m²) 시계열

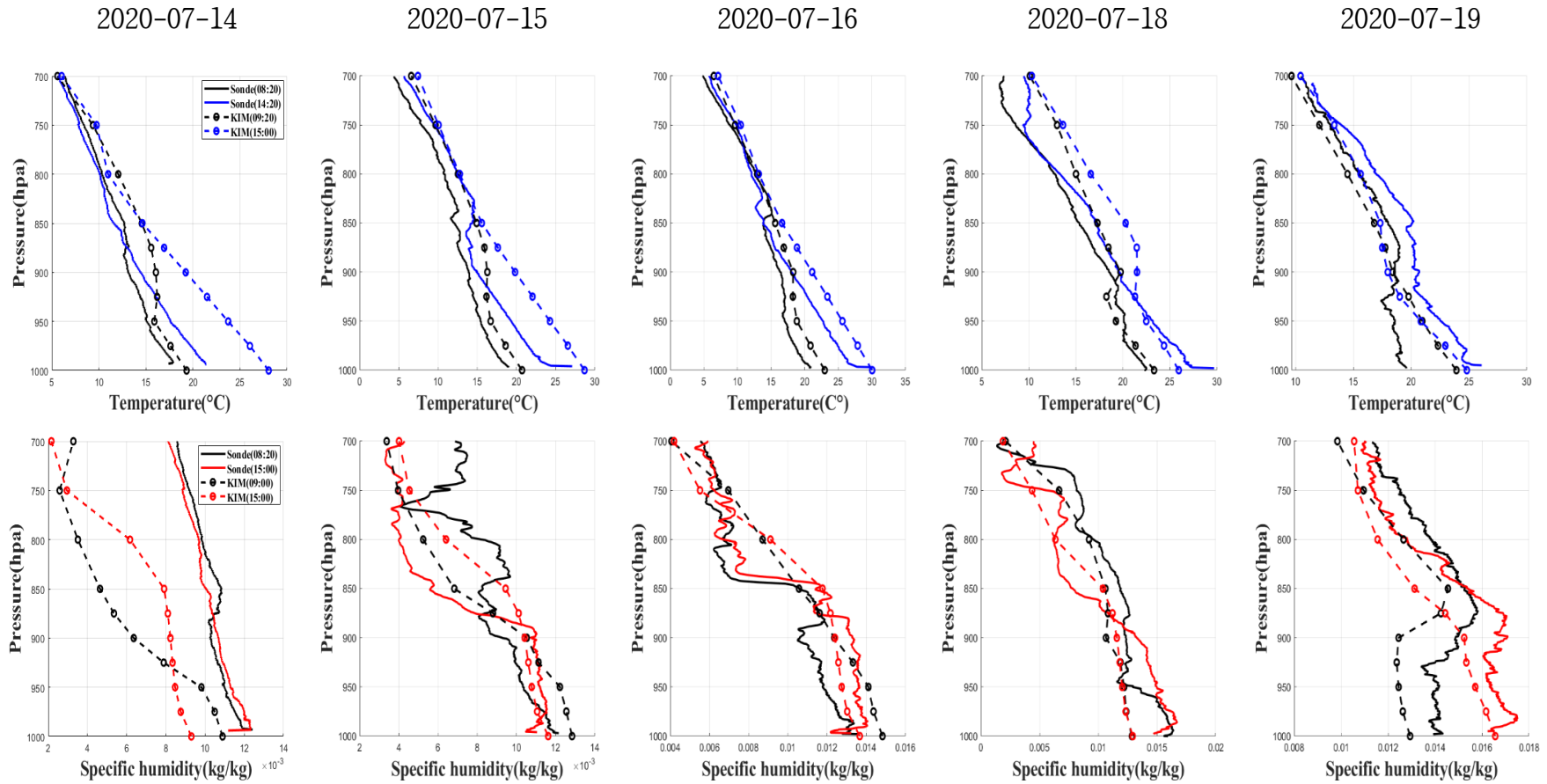


<그림 3.1.11> 여름철 사례 분석 기간의 일최고기온(°C), 기온(°C), 지표온도(°C), 전운량(1/10)의 MBE 공간 분포

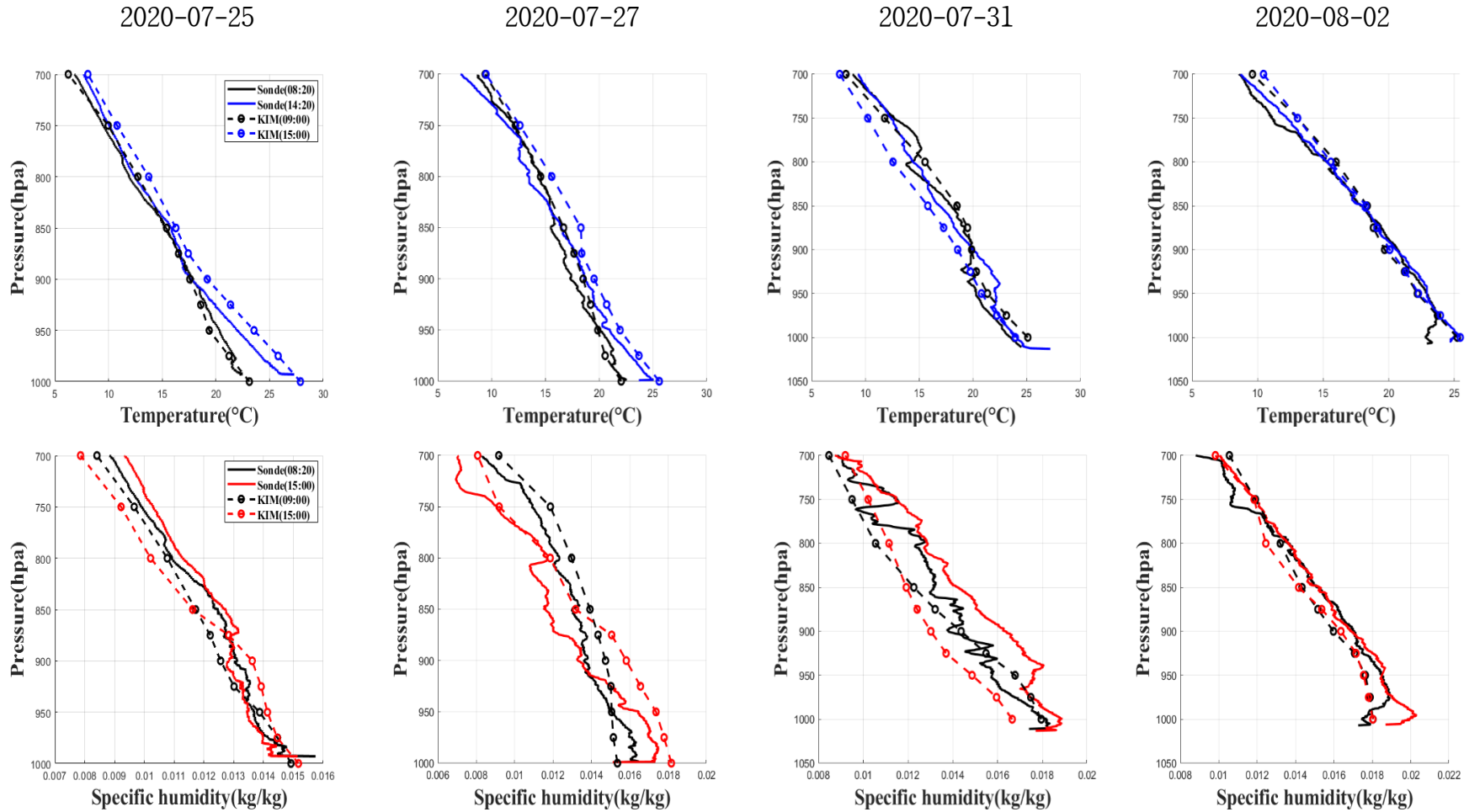
라) 여름철 존데 집중 관측 비교

KIM의 모의 오차를 연직적으로 진단하기 위해 국립기상과학원에서 제공한 라디오존데 자료와 비교하였다. <그림 3.1.12>는 2020년 7월 14일 ~ 16일, 18일, 19일의 9시와 15시의 기온 연직 분포와 비습의 연직 분포를 비교한 것이다. KIM은 기온을 9시에 대체로 잘 모의하였으나, 15시에는 지표 근처부터 약 850 hPa까지 연직 기온의 경향을 잘 따라가지 못했고, 9시보다 관측과 KIM 모의 간 오차가 커진 것을 확인하였다. 비습의 연직 분포는 9시와 15시에서 모두 대체로 과소모의하는 경향을 보였고, 7월 15일과 7월 16일에 약 850 hPa 근처에서 비습의 급격한 변화를 잘 따라가지 못하는 것을 확인하였다.

<그림 3.1.13>에서 KIM은 2020년 7월 25일, 27일, 31일과 8월 2일 사례의 기온 연직 분포를 잘 모의하는 것을 확인하였다. 이때 비습의 연직 분포에서도 라디오존데 관측 값과 KIM의 모의 값의 오차가 상대적으로 작은 것을 확인하였다. <그림 3.1.12>과 <그림 3.1.13> 사례 비교를 통해 KIM은 7월 14~16일, 18~19일의 사례보다 7월 25, 27, 31일과 8월 2일 사례의 기온 및 비습 연직 분포를 잘 모의하였음을 확인할 수 있었다.



<그림 3.1.12> 여름철(2020년 7월 14일~16일, 18일, 19일) 이천 존데 집중 관측(국립기상과학원)과 KIM 모의 비교(09KST, 15KST) [(상)기온 연직 분포, (하)비습 연직 분포]



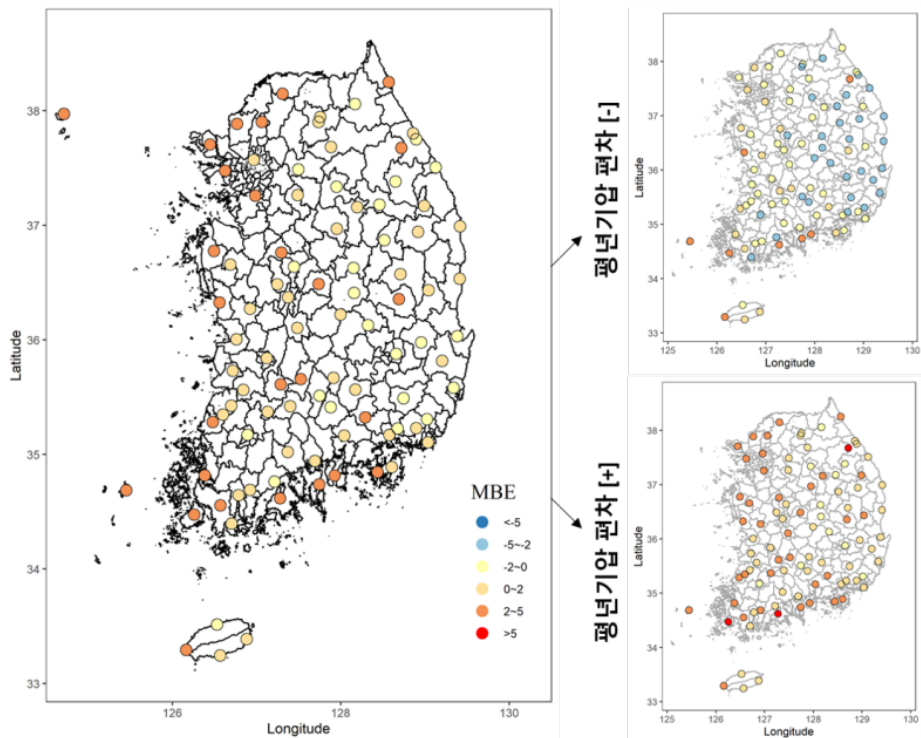
〈그림 3.1.13〉 여름철(2020년 7월 25일, 27일, 31일, 8월 2일) 이천 존데 집중 관측(국립기상과학원)과 KIM 모의 비교(09KST, 15KST) [(상)기온 연직 분포, (하)비습 연직 분포]

5) 한파 발생 시 기온 및 습도 오차 유형 진단

가) 한파 발생시 기온 편차 분포

<그림 3.1.14>는 2020년부터 2022년 겨울철 일최저기온에 대해 KIM의 예측자료와 ASOS의 관측자료 간 MBE의 전국 분포를 비교하였다. 대체로 KIM은 겨울철 일최저기온을 관측 대비 약 1.2°C 과대모의하는 경향이 나타났다.

한파 사례기간 중 일 평균 기압이 평년 대비 낮았던 기간 동안 기온의 일 평균 MBE(°C) 값을 확인하면 서해안과 남해안에서는 모델이 과대모의하는 경향을 나타냈으며 강원지역과 경남지역은 모델이 과소모의하는 경향을 나타내었다. 반면, 일 평균 기압이 평년 대비 높았던 기간은 전국적으로 기온을 대부분 과대모의하는 경향을 보여 평년기압 편차가 겨울철 기온 모의 오차에 중요한 인자임을 확인하였다.

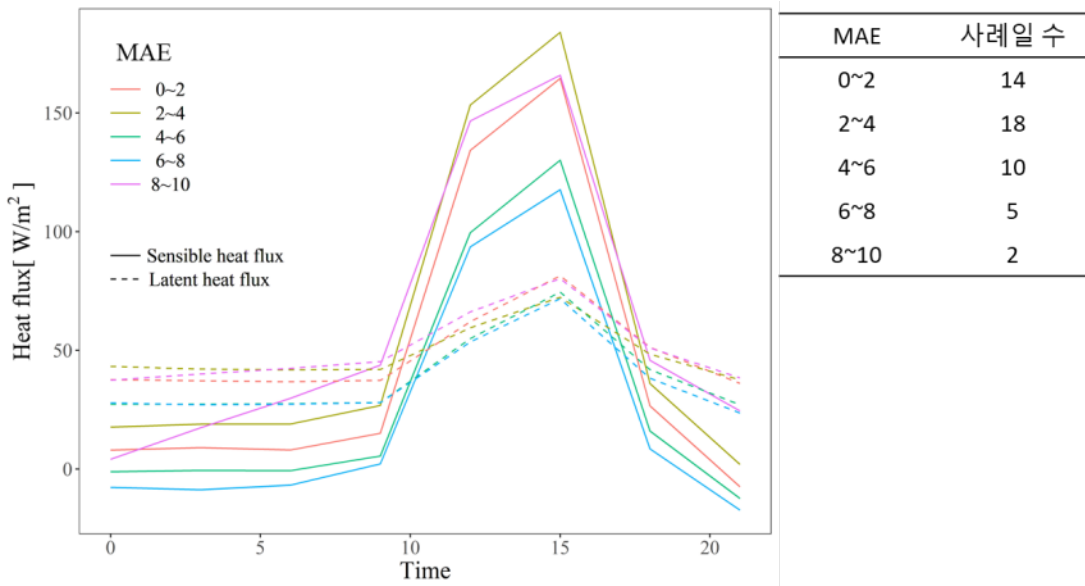


<그림 3.1.14> 한파기간의 일최저기온의 MBE(°C)와 평년기압 편차 유형별 모델의 기온 MBE(°C) 공간분포

나) 한파 사례의 기온 MAE(°C)별 Heat flux(W/m²) 비교

한파 사례의 모델 오차 수준에 따라 Heat flux(W/m²)의 일변화 패턴을 확인하였다. KIM의 예측자료와 ASOS 관측자료를 활용하여 일최저기온 MAE(°C)를 계산하고 이를 5개 등급으로 분류하여 heat flux의 일변화를 확인하였다.

일최저기온의 MAE(°C)는 0~2, 2~4, 4~6, 6~8, 8~10의 5등급으로 분류하였고 각 등급별 해당되는 사례일수는 각각, 14일, 18일, 10일, 5일, 2일로 나타났다. <그림 3.1.15>은 한파 사례 기간의 Heat flux(W/m²) 일변화 패턴을 나타내었다. 대체적으로 Sensible heat flux(W/m²)가 Latent heat flux(W/m²)보다 높게 나타났으며, MAE가 큰 편인 6~8°C 구간에서 낮 시간의 Heat flux가 작은 경향을 확인하였다.

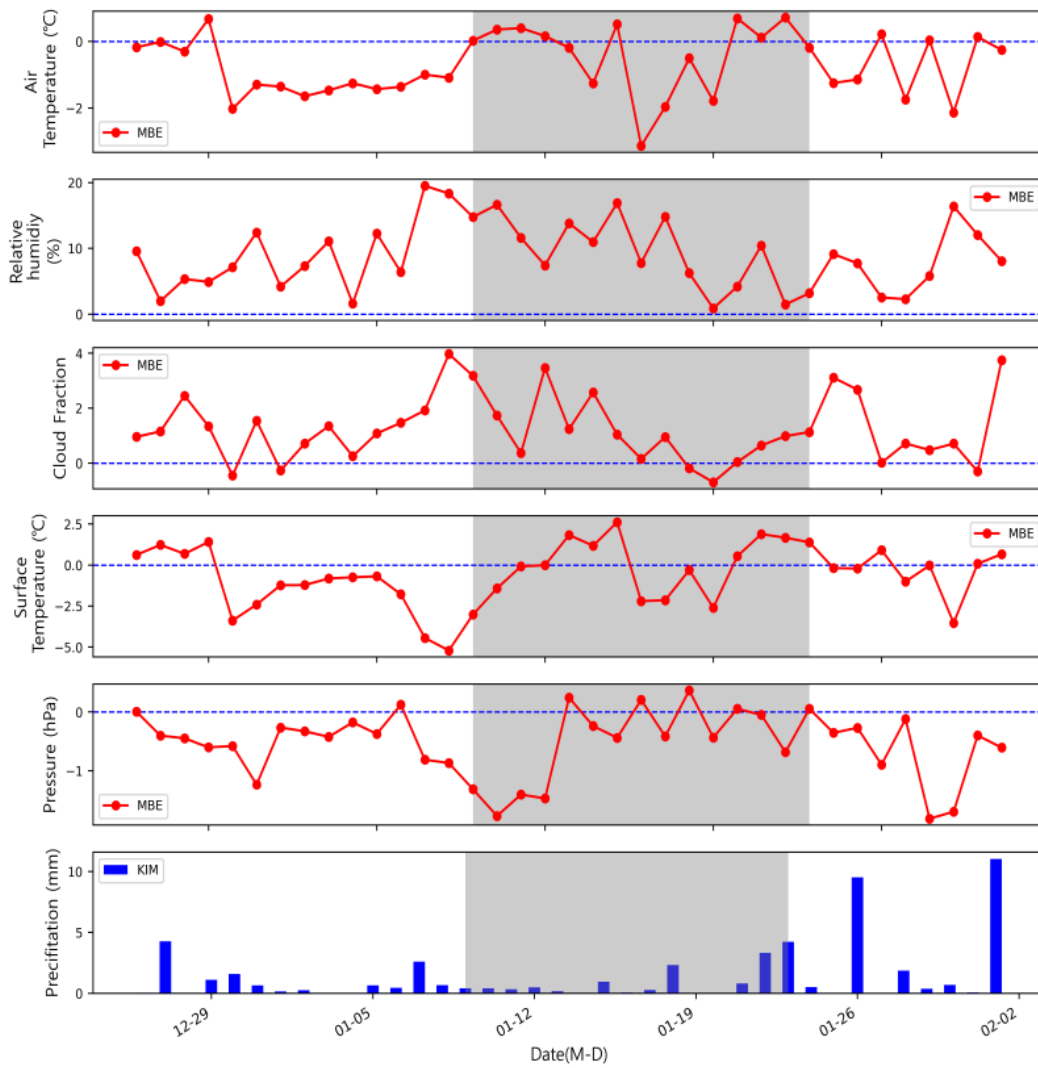


<그림 3.1.15> 한파 사례의 기온 MAE(°C)별 Heat flux(W/m²) 비교

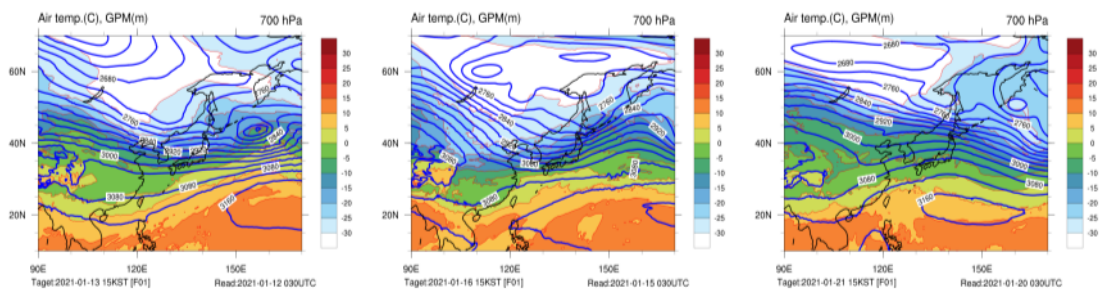
다) 겨울철 한파 대표 사례

겨울철 한파 대표 사례일을 선정하기 위해 겨울철 기간인 2020년 12월 25일 ~ 2021년 2월 28일을 대상으로 시계열로 분석하였다. <그림 3.1.16>은 겨울철 한파 사례의 기온(°C), 습도(%), 전운량(1/10), 지표온도(°C), 기압(hPa)의 MBE와 강수량의 시계열을 나타낸 것이다. KIM은 기온을 대체로 과소모의하는 경향을 보여주었다. 2021년 1월 16일의 MBE(°C)가 -2.6로 다른 일자보다 상대적으로 과소모의가 컸다. KIM은 상대습도를 대체로 과대모의하였고 최대 20%까지 과대모의하였다. 전운량은 대체로 2 ~ 4 정도 과대모의하였다. 지표 기온은 1월 8일에 최대 5°C 까지 과소모의하였고 다른 일자에서는 -2.5 ~ 2.5°C 내의 오차를 보였다. 반면 기압은 -1.5 hPa 이내로 유사하게 모의했다.

겨울철 한파 분석 사례 기간의 KIM의 일기도(<그림 3.1.17>)를 보면 시베리아 고기압이 확장하면서 0°C 이하의 찬 공기가 유입되고 사례일(2021년 1월 16일) 이후 따뜻한 공기가 유입된 기간이 이어진다. 이러한 고기압의 확장 및 쇠퇴 과정에서 KIM의 기온과 상대습도 오차가 커지는 패턴을 확인하였다.

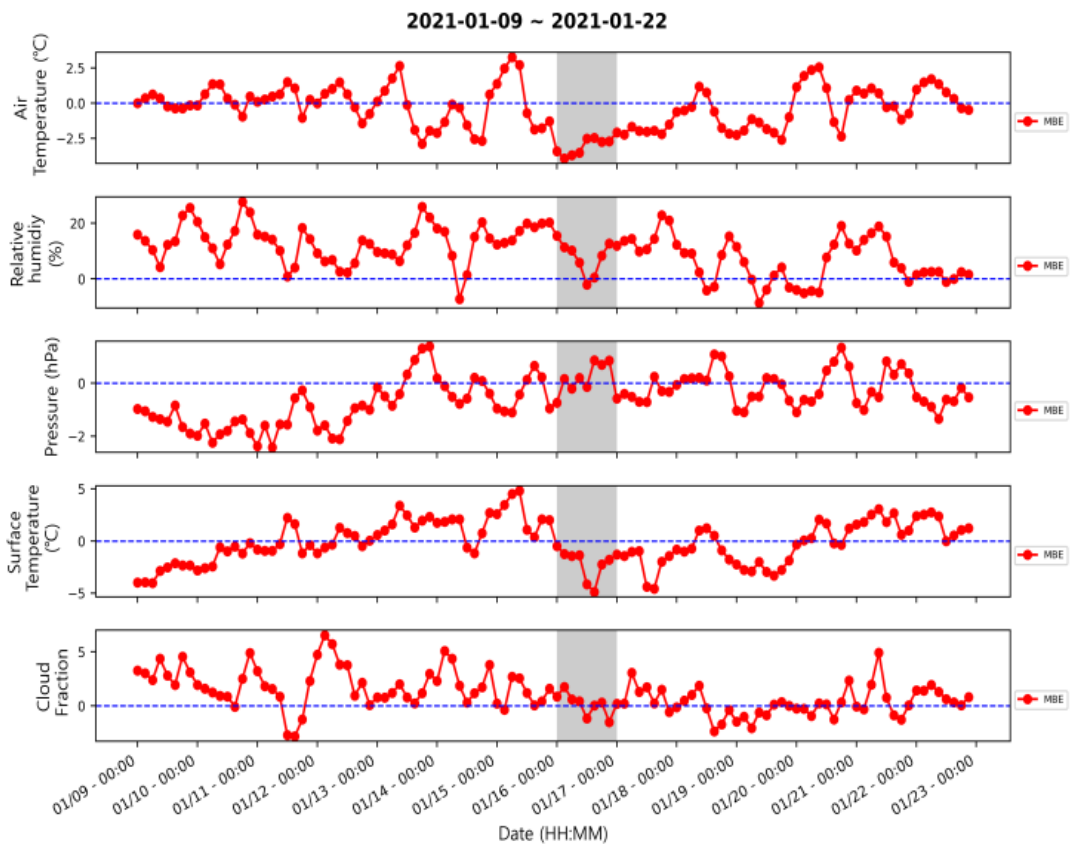


<그림 3.1.16> 겨울철 기간 기온(°C), 습도(%), 전운량(1/10), 지표온도(°C), 기압의 MBE 시계열과 강수량 시계열

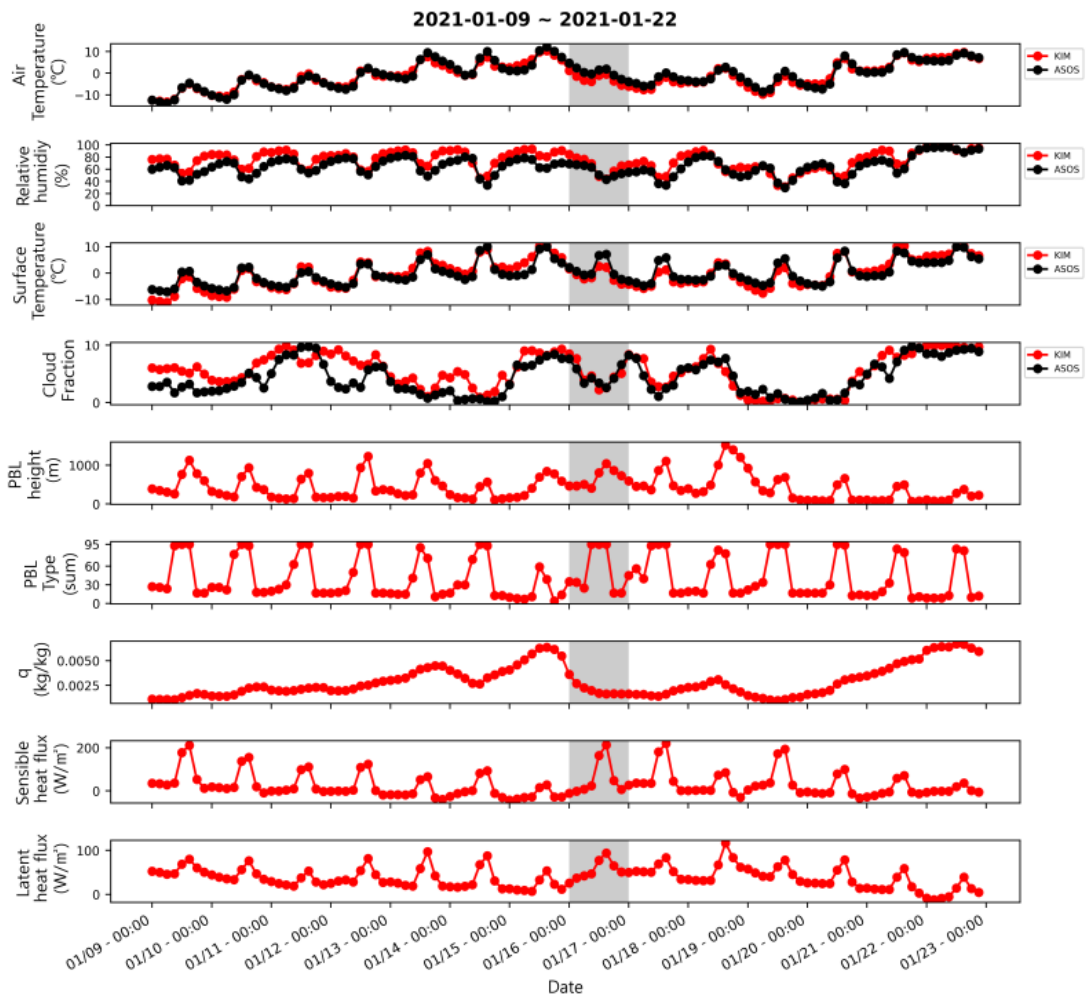


<그림 3.1.17> 겨울철 한파 분석 사례 기간의 일기도 [(좌)2021년 1월 13일 15KST, (중) 2021년 1월 16일 15KST, (우)2021년 1월 21일 15KST]

선정된 겨울철 한파 분석 사례 기간의 KIM의 기온(°C), 상대습도(%), 기압(hPa), 지표온도(°C), 전운량(1/10)의 MBE값의 시계열을 <그림 3.1.18>에 나타내었다. 그리고 사례 기간의 ASOS와 KIM의 기온(°C), 습도(%), 지표온도(°C), 전운량(1/10), PBL 고도(m), PBL 타입(합계), 비습(kg/kg), 잠열 flux(W/m²), 현열 flux(W/m²)의 시계열을 <그림 3.1.19>에 나타내었다. <그림 3.1.18>과 <그림 3.1.19>의 자료는 전국 ASOS 지점에 대해 평균한 값이며, 3시간 간격인 KIM 예보 시간과 동일한 시간의 관측 자료를 이용한 것이다.



<그림 3.1.18> 겨울철 사례 분석 기간의 (맨 위부터) 기온(°C), 습도(%), 지표온도(°C), 전운량(1/10)의 MBE 시계열

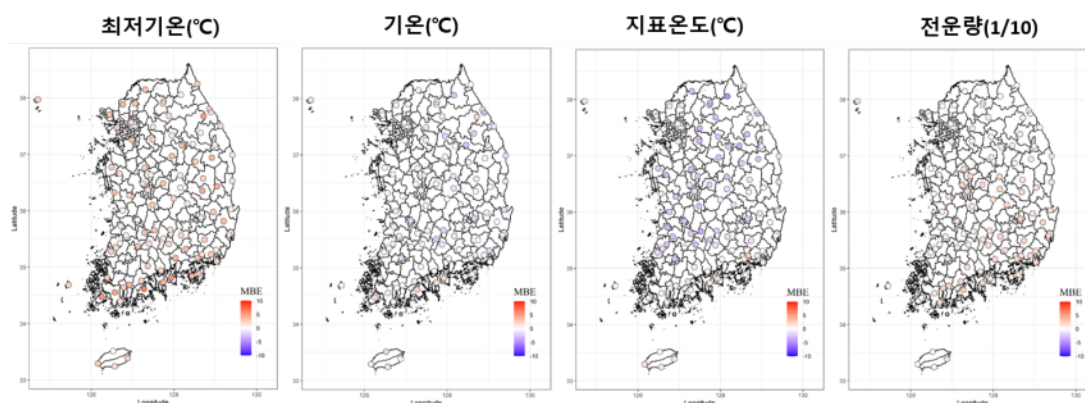


<그림 3.1.19> 겨울철 사례 분석 기간의 (맨 위부터) 기온(°C), 습도(%), 지표온도(°C), 전운량(1/10), PBL 높이(m), PBL 타입(합계), 비습(kg/kg), 현열(W/m²), 잠열(W/m²)의 시계열

<그림 3.1.18>과 <그림 3.1.19>에서 겨울철 한파 대표 사례 기간인 2021년 1월 16일과 다른 일자를 비교하였다. 먼저, <그림 3.1.18>을 보면 대표 사례일인 (1월 16일)에서 기온 MBE(°C)가 -3.9로 가장 큰 오차를 보였다. 사례일의 상대습도는 다른 일자보다 비교적 작은 MBE(%)를 보여주었고 오후 시간에는 0에 가깝게 나타나 비교적 양호한 성능을 보여주었다. 기압은 1월 13일 이전에는 과소모의하다가 이후 과대모의하는 경향을 보여주었다. 대표 사례일의 지표 온도는 MBE(°C) -4.8을 보여 가장 크게 과소모의했다. 전운량은 대표 사례일 이전에 과대모의하였으나 대표 사례일 이후에서는 비교적 양호하게

모의하였다. <그림 3.1.19>를 보면 기온, 상대습도, 지표온도, 전운량은 ASOS 관측값과 패턴은 유사하게 모의하는 것으로 나타났다. 비습은 대표 사례일 이전 날짜인 1월 15일에 증가하다가 대표 사례일에서 급격하게 낮아지게 모의했다. 또한, 해당하는 날의 전운량도 급격하게 낮아졌으나 ASOS 관측값과 유사하게 2~4 정도의 전운량을 모의하였다. 대표 사례일의 현열(W/m²)은 다른 일자보다 급격하게 높게 모의했고 잠열은 1월 15일에 최저를 보인 후 증가했다. 이는 1월 15일에 강우가 내렸기에 최저치를 보인 것으로 판단된다. 선정된 겨울철 한파 대표 사례일의 전운량은 비교적 관측값과 유사하게 모의하였으나 지표 온도를 크게 과소모의하였다.

<그림 3.1.20>는 겨울철 한파 대표 사례기간의 일최저기온(°C), 평균 기온(°C), 지표온도(°C), 전운량(1/10)의 KIM 모델 예측자료와 관측자료 간 MBE 공간분포를 나타낸 것이다. 해당 기간의 일최저기온 MBE(°C)는 2.3로 과대모의하고 있는 반면, 평균기온 MBE(°C)는 -0.42, 지표온도의 MBE(°C)는 -1.19로 약간 과소모의하는 경향이 나타났다. 전운량의 MBE 경우 1.09로 모델에서 구름을 과대모의 하는 것으로 나타났다. 따라서 전운량의 과대모의로 인해 낮과 밤의 일교차가 작아짐에 따라 일최저기온을 과대모의하는 것으로 판단된다.

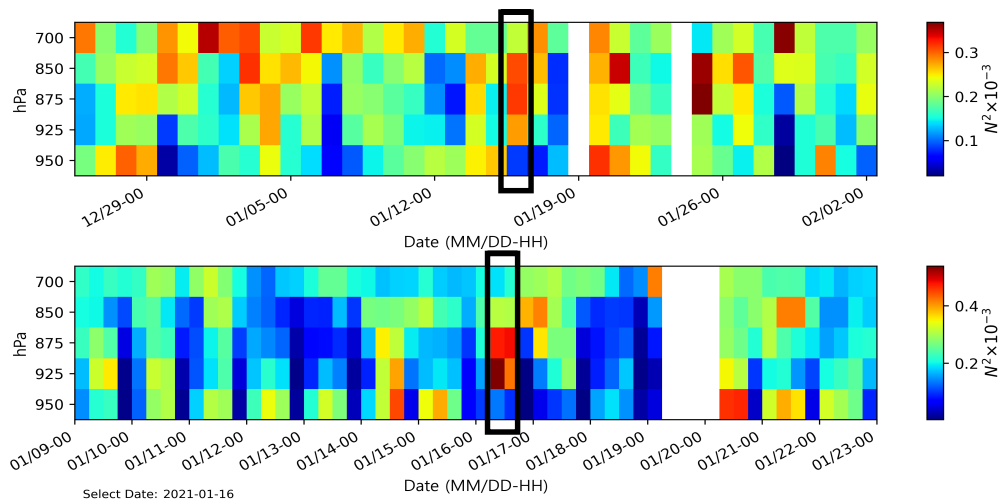


<그림 3.1.20> 겨울철 사례 분석 기간의 일 최저기온(°C), 기온(°C), 지표온도(°C), 전운량(1/10)의 MBE 공간 분포

겨울철 사례 분석 기간의 대기안정도를 확인하기 위하여 Brunt-Vaisala 진동수를 산출하였다. Brunt-Vaisala 진동수는 대기안정도의 함수로 아래와 같이 나타낸다(Holton, 2004).

$$N^2 = \frac{g}{\theta} \times \frac{d\theta}{dz} \quad \text{〈식 3.1.3〉}$$

여기서, N 은 Brunt-Vaisala 진동수이며, g 는 중력가속도, $d\theta$ 와 dz 는 각각 고도별 온도 차, 고도 차를 뜻한다. N^2 이 클수록 대기는 안정하다는 것을 뜻한다. 본 연구에서는 〈식 3.1.3〉을 이용하여 겨울철 한파 사례 분석 기간의 N^2 를 〈그림 3.1.21〉로 나타내었다.



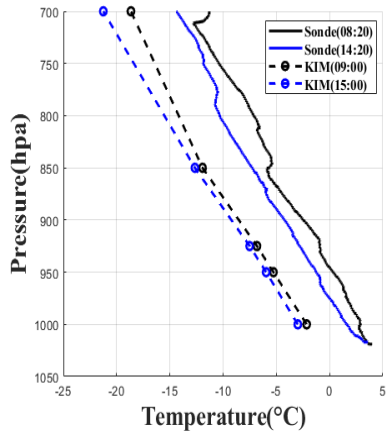
〈그림 3.1.21〉 겨울철 사례 분석 기간의 N^2 시계열 [(상) 일평균, (하) 3시간 간격]

앞서 선정된 겨울철 한파 대표 사례일(2021년 1월 16일)의 대기안정도는 925와 875 hPa의 기압층에서 N^2 의 값이 다른 기압층보다 높았다. 이 날짜의 3시간 간격 N^2 값을 보면 낮에 925와 875 hPa의 대기안정도가 높은 것을 볼 수 있다. 겨울철 한파 사례일은 KIM이 오전 6시, 오후 12시의 예보에서 다른 시간대보다 925와 875 hPa 기압층을 다른 기압층보다 강하게 대기를 안정하게 모의했다. 이러한 대기 하층의 안정도 모의가 한파 사례 기간의 특징으로 기온 모의 오차와 연관이 있음을 시사한다.

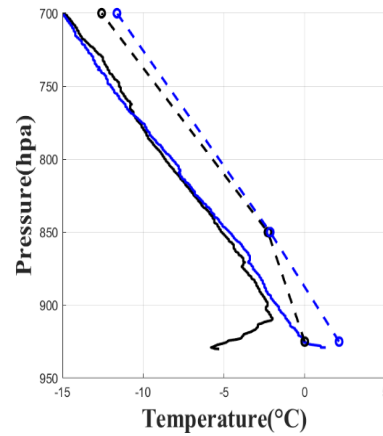
라) 겨울철 존데 집중 관측 비교

<그림 3.1.22>은 2021년 12월 24일과 2022년 2월 13 ~ 14일 겨울철 사례의 KIM과 존데 간 연직 기온과 비습 분포 비교 그래프다. 12월과 2월 관측 지점이 속초와 대관령으로 각각 다르지만, KIM은 전반적으로 겨울철 기온 연직 분포에 대한 모의 오차가 큰 것을 확인하였다. 대기 하층 전 고도에 대해 기온과 비습의 절대 오차 및 경향 불일치가 뚜렷한 점으로 보아, 겨울철 대기 안정도 모의 불확실성에 따른 지면 부근 기온 및 습도 오차가 원인일 가능성을 제시하고 있다. 또한, 해당 지역이 속초와 대관령으로 지형적인 영향을 크게 받는 점을 고려할 때, 지형 묘사의 정확도가 중요한 요인일 것으로 추정된다.

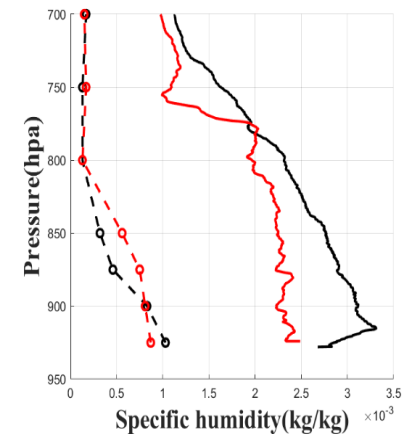
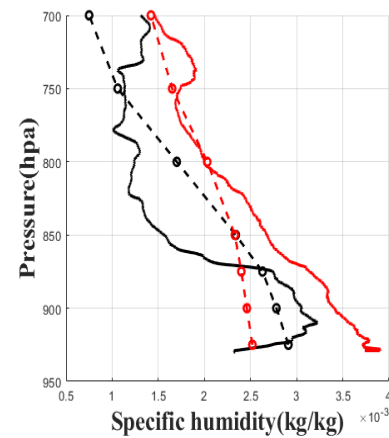
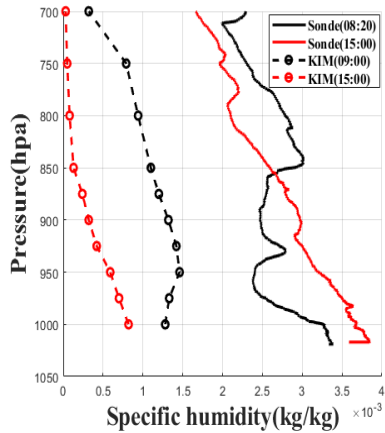
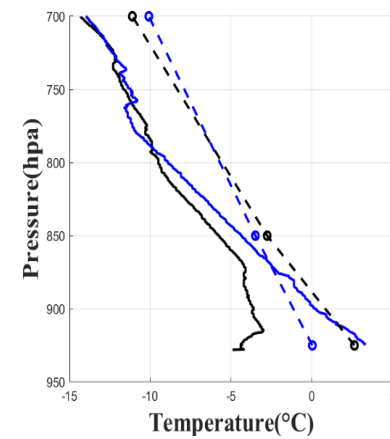
2021-12-24(속초)



2022-02-13(대관령)



2022-02-14(대관령)

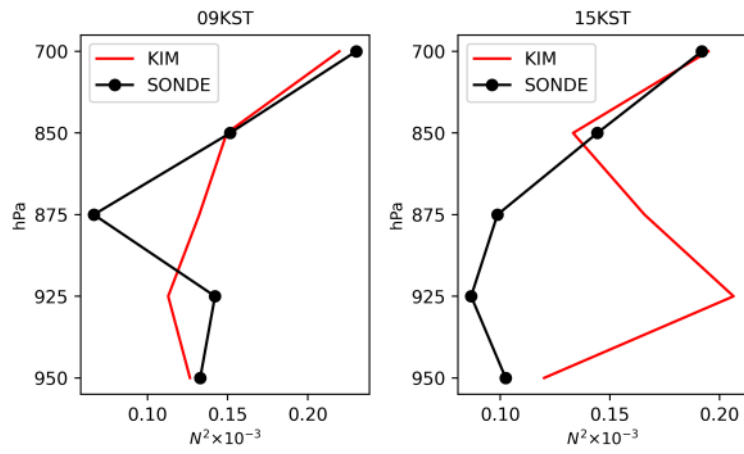


<그림 3.1.22> 겨울철(2021년 12월 24일, 2022년 2월 13일~14일) 존데 집중 관측(국립기상과학원)과 KIM 모의 비교(09KST, 15KST) [(상)기온 연직 분포, (하)비습 연직 분포].

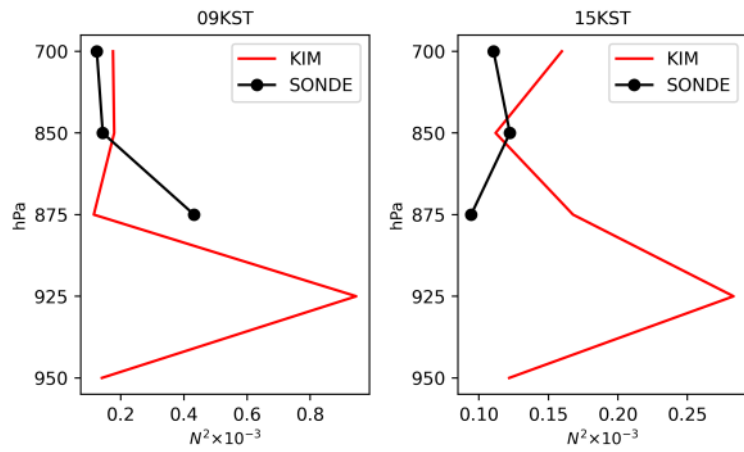
겨울철 존데 집중 관측 자료를 이용하여 KIM 모델의 N^2 과 존데의 N^2 값을 비교하였다. 존데의 N^2 값을 계산하기 위해서는 모델의 기압층과 비슷한 자료를 추출해야 한다. 존데의 각 기압층(1000, 950, 925, 875, 850, 700 hPa) 값들은 KIM의 각 기압층의 기압을 기준으로 존데에서 측정된 기압의 ± 2 hPa 범위의 값들을 평균하여 이용하였다. 존데의 N^2 와 KIM N^2 의 연직 그래프인 <그림 3.1.23>는 최대한 같은 지점과 동일한 시간대의 자료를 이용하여 산출한 것이다.

15시 속초 및 대관령 지점에서 KIM의 N^2 은 925 hPa 이상에서 실제보다 대기를 안정하게 모의하는 경향을 확인하였다. 2022년 2월 13일과 14일 09시 대관령의 N^2 값은 KIM 모델이 실제보다 낮았고 대기를 불안정하게 모의했다. 같은 일자의 15시 대관령의 KIM 모델 N^2 값은 실제보다 컸고 대기를 안정하게 모의하는 경향을 보였다. 09시와 15시 모두 850 hPa부터 비교적 N^2 의 경향을 잘 모의한 것으로 보아, 대기 하층의 안정도 모의 정확도가 지상 기온 및 비습 오차의 원인일 것으로 추정된다. 특히, 09시와 15시에서 대기 안정도의 차이를 보이면서 하부 대기경계층과 지면과의 잠열과 현열에 대한 오차가 있을 수 있음을 확인하였다. 앞서 겨울철 한파 분석 사례와 연계해 볼 때, 지면 온도를 실제보다 과소모의하면서 KIM 모델이 하부 대기경계층을 안정하게 모의하는 경향이 두드러지는 것으로 보인다. 또한, 겨울철 지면과정에서의 현열과 잠열에 대한 추가적인 분석이 필요할 것으로 판단된다.

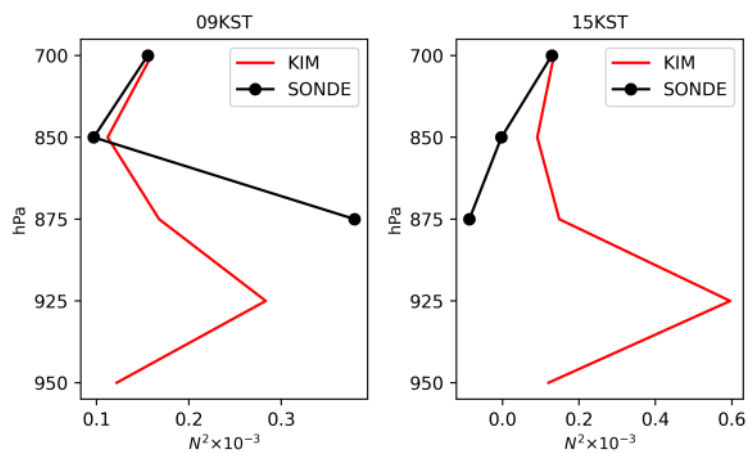
2021-12-24, Sockcho



2022-02-13, Daegwanryeongmyeon



2022-02-14, Daegwanryeongmyeon



<그림 3.1.23> 겨울철 존데 집중 관측 기간의 N^2 연직 그래프

제 2 절. 경계층 오차 진단 및 개선점 파악

앞서 1절에서 폭염과 한파 등의 사례를 주로 분석하였다. 이번 2절에서는 장기간 여러 고층기상관측 지점에서 경계층 구조가 어떻게 예측되었는지 관측 자료와의 비교를 통하여 파악하고자 한다.

2-1) 경계층 오차 분석 방법

2차년도 사업에서는 2021년 4월 6시간 간격의 고층기상관측 자료를 이용하여 경계층 오차를 분석하였는데 6시간 간격의 존데 자료가 있는 오산과 광주 고층기상관측 지점만을 대상으로 분석을 진행하였다. 오산과 광주 지점을 제외한 나머지 지점에는 주로 9시와 21시에 측정되는 12시간 간격의 존데 자료가 존재하여 2차년도 사업에서 적용한 분석 방법을 그대로 활용할 수 없다. 다양한 기간과 지점을 대상으로 경계층 오차를 분석하기 위하여 12시간 간격의 존데 자료를 활용하여 연직평균오차를 계산하는 방안을 마련하였다. 기온, 비습, 풍속의 연직평균오차는 식 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3을 사용하여 계산하였다.

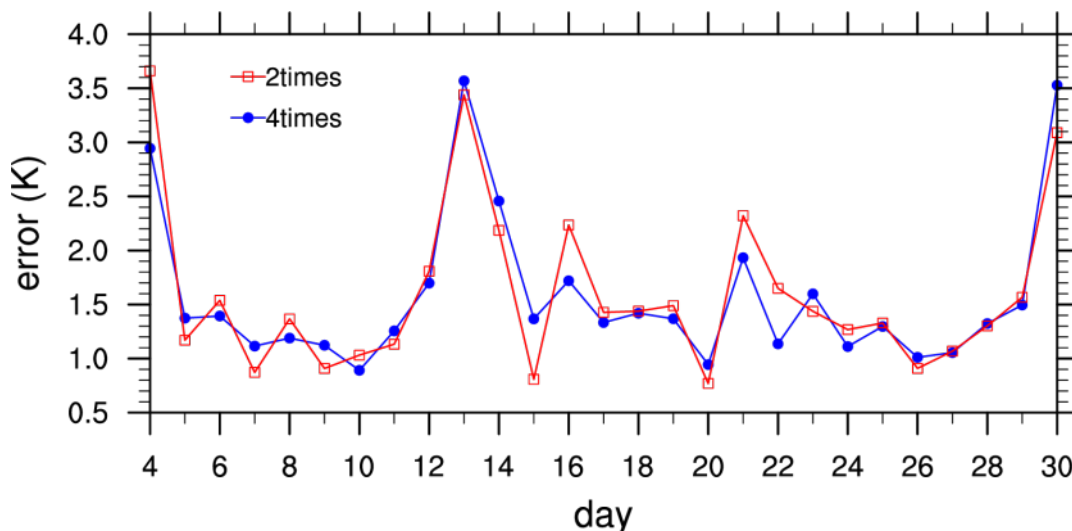
$$E_T = \frac{\int_{p_1}^{p_2} |T_{sim} - T_{obs}| dz}{|p_2 - p_1|} \quad \langle \text{식 3.2.1} \rangle$$

$$E_q = \frac{\int_{p_1}^{p_2} |q_{sim} - q_{obs}| dz}{|p_2 - p_1|} \quad \langle \text{식 3.2.2} \rangle$$

$$E_{WS} = \frac{\int_{p_1}^{p_2} |WS_{sim} - WS_{obs}| dz}{|p_2 - p_1|} \quad \langle \text{식 3.2.3} \rangle$$

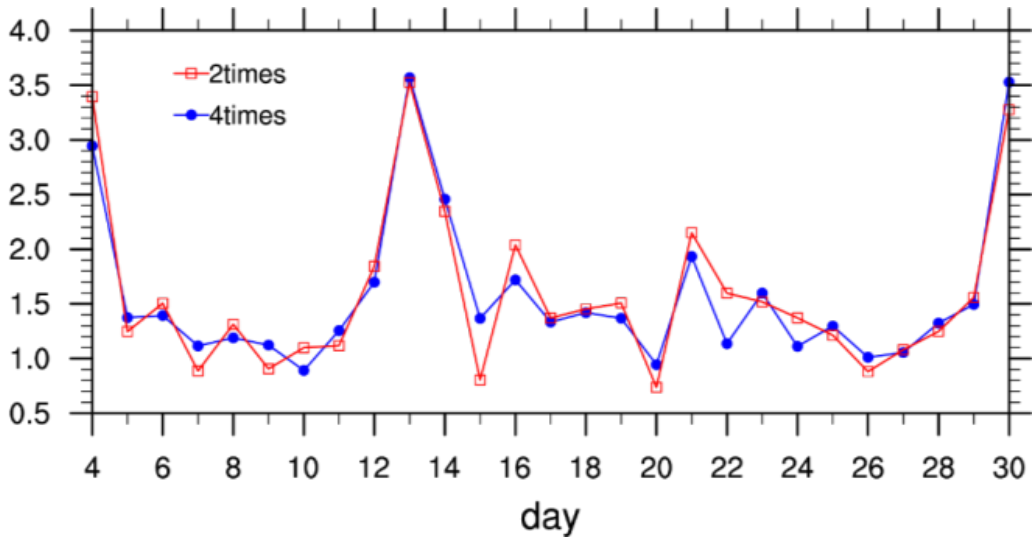
아래첨자 *sim*과 *obs*는 각각 예측 자료와 측정 자료를 나타내고, 연직 고도 p_1 은 1000 hPa로 p_2 는 700 hPa 또는 850 hPa로 정하여 계산하였다. 오차의 계산 과정에서 존데 자료를 KIM 자료의 연직 고도로 보간한 뒤 적분하였다. 우선 오산(47122) 지점의 2021년 4월 6시간 자료로 기온의 일별 연직평균오차를

계산한 값과 6시간 자료 중 9시와 21시 자료만 선택하여 기온의 일별 연직 평균오차를 계산한 값을 비교하였다 (그림 3.2.1). 9시과 21시 자료만 사용하여 계산한 연직평균오차가 6시간 간격의 자료를 사용하여 계산한 오차보다 일별 변동 폭이 크게 나타나지만 전체적인 오차의 변화 패턴을 유사하게 보여준다.

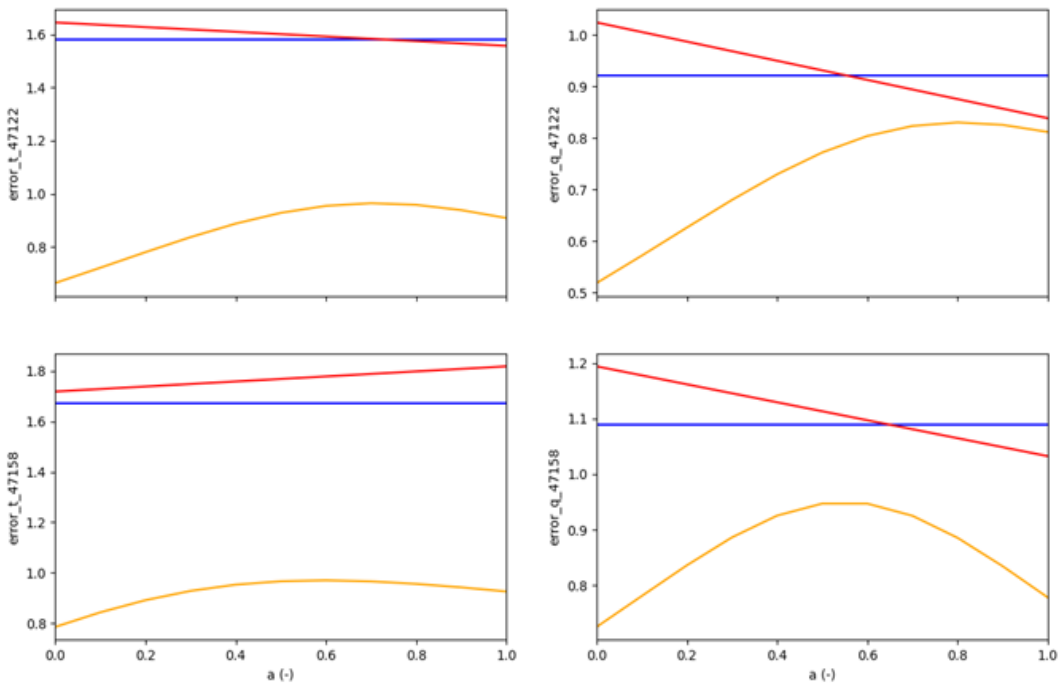


<그림 3.2.1> 2021년 4월 오산 지점에서의 6시간 간격과 12시간 간격의 존데 기온 자료를 사용하여 계산한 기온의 일별 연직평균오차

일별 연직평균오차를 계산할 때 9시 오차와 21시 오차를 평균하여 계산하였는데, 두 오차의 가중치를 다르게 하여 계산할 수 있으며 9시 자료의 가중치를 0.6으로 하여 테스트를 하였는데 가중치를 주지 않은 경우와 비교하여 일별 변동 폭이 다소 줄어들었다(그림 3.2.2). 9시 자료 오차의 가중치를 0에서 1까지 0.1 간격으로 변화시켜 분석한 결과 0.4에서 0.7 사이의 값이 6시간 자료 오차와 차이도 작고 상관성이 높게 나타났다. 더 상세한 테스트를 통하여 최적의 가중치를 찾을 수도 있지만 0.5 즉 가중치를 주지 않고 9시 자료와 21시 자료를 균등한 비율로 고려하여 일별 오차를 계산하는 것도 괜찮은 결과를 얻을 수 있어 오차 분석에서 단순하게 합산하여 평균을 계산하였다.



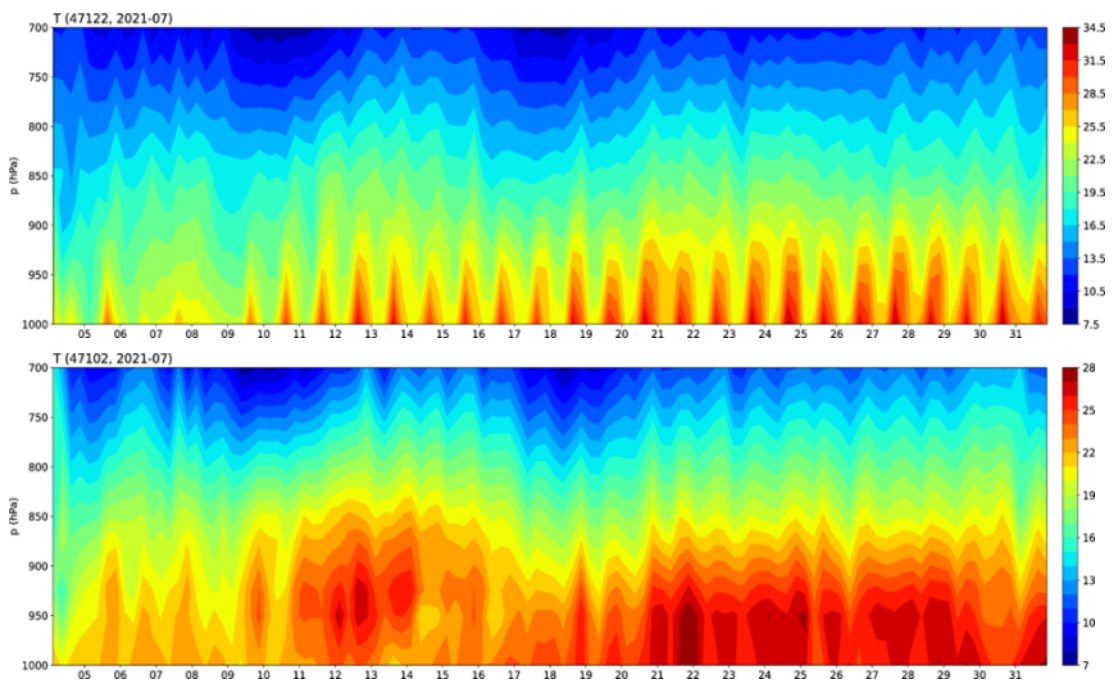
<그림 3.2.2> 2021년 4월 오산 지점에서의 6시간 간격 자료로 계산한 오차와 12시간 간격 자료 중 9시 오차에 가중치 0.6을 적용하여 계산한 기온의 일별 연직평균오차



<그림 3.2.3> 다양한 가중치(0-1)를 적용하여 계산한 오산(47122, 위)과 광주(47158, 아래) 지점에서의 기온(좌)과 비습(우)의 연직평균오차

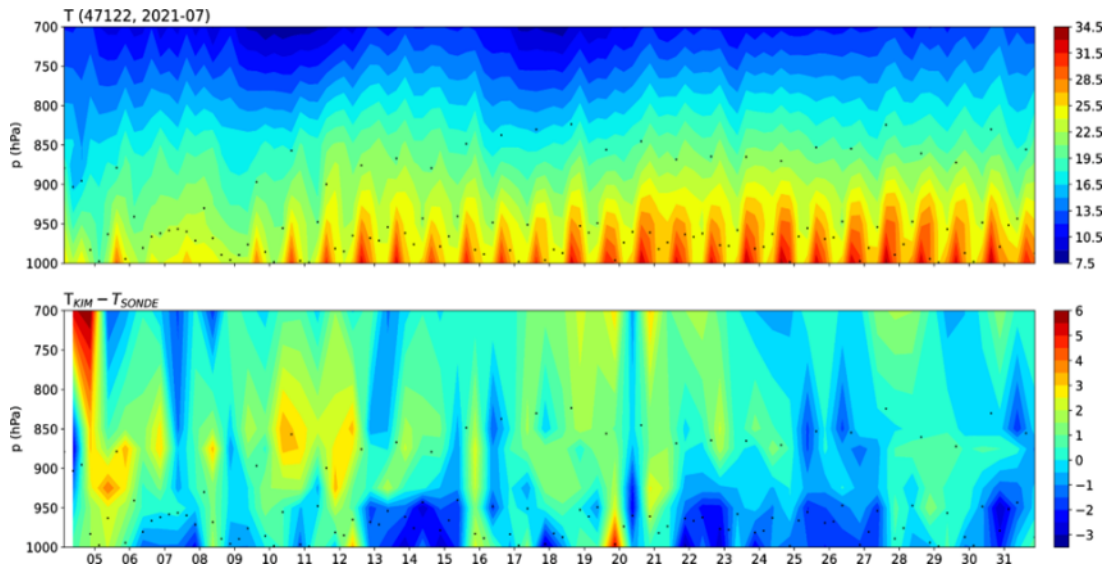
2-2) 여름철 경계층 오차 분석

<그림 3.2.4>은 2021년 7월 오산과 백령도 고층기상관측 지점에서의 기온의 연직 분포를 보여준다. 오산 지점에서 낮시간 지면가열에 의해 성장하고 일몰 후 쇠퇴하는 대기경계층의 열적구조를 확인할 수 있다. 백령도 지점에서는 해양에서 주로 나타나는 대기경계층의 열적구조가 나타난다.

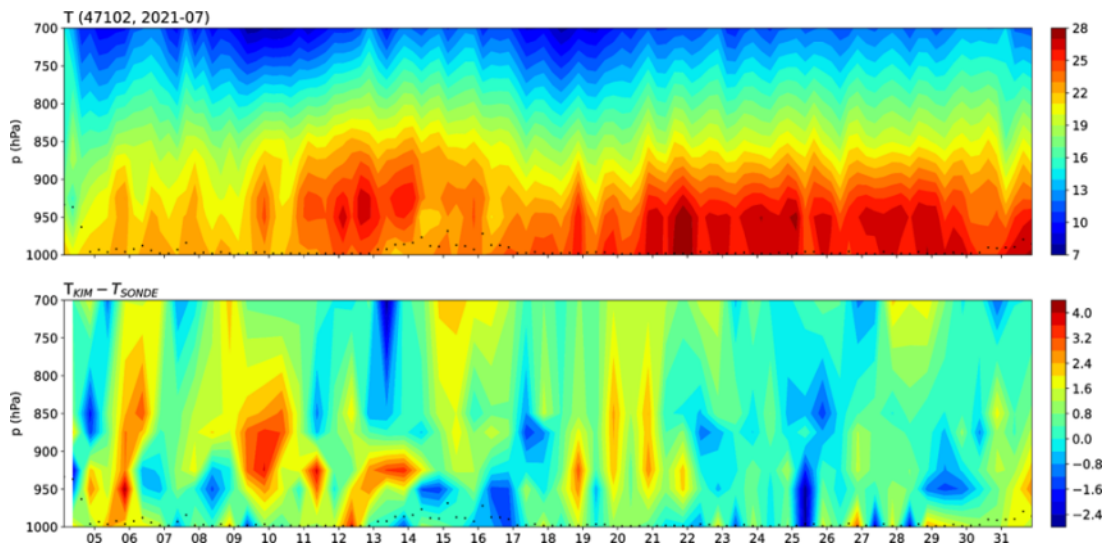


<그림 3.2.4> 2021년 7월 오산(위)과 백령도(아래) 고층기상관측 지점에서의 기온의 시간-연직 분포

모든 고층기상관측 지점에서의 기온의 편차(모델과 관측 자료의 차이)를 계산하고 오산 고층기상관측 지점에서의 오차의 연직 분포를 확인하였다 (그림 3.2.5). 모의된 기온 패턴과 오차를 보면 전반적으로 21시에 기온의 오차가 크게 나타나며 간간히 온난오차가 나타나지만 주로 지면에서 발생하는 한랭오차가 950 hPa 이상의 고도까지 확장되어 대기경계층 내 기온의 예측성을 낮추는 것으로 판단된다.



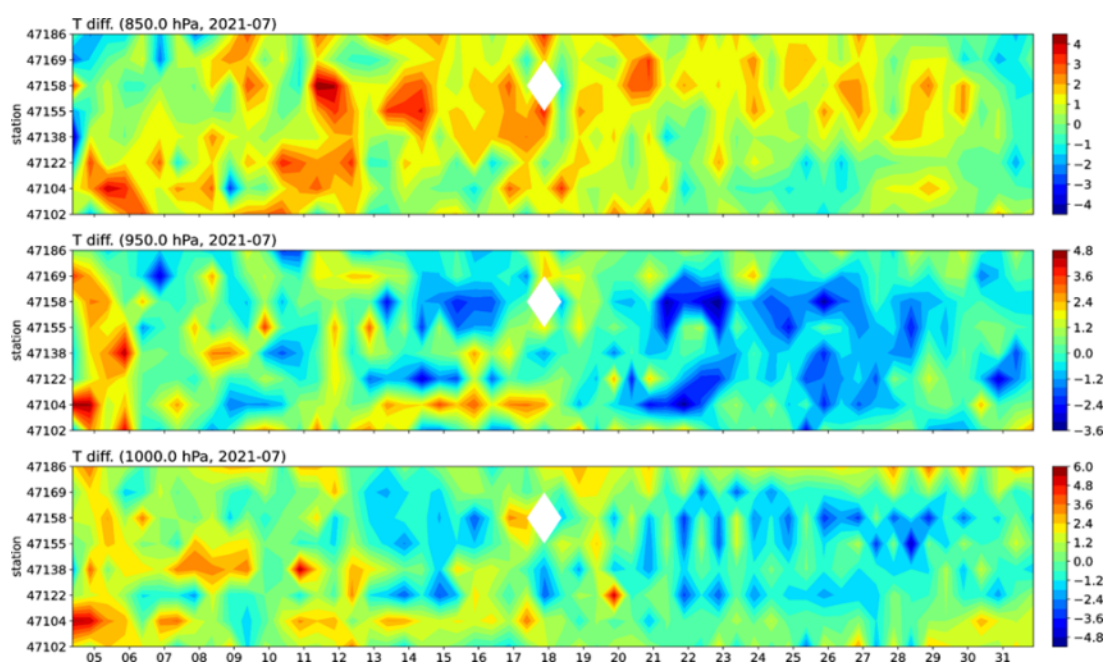
<그림 3.2.5> 2021년 7월 오산 고층기상관측 지점에서의 기온(위)과 기온편차 (아래, KIM-존데) 시간-연직 분포. 점은 대기경계층 높이 표시



<그림 3.2.6> 2021년 7월 백령도 고층기상관측 지점에서의 기온(위)과 기온편차 (아래, KIM-존데) 시간-연직 분포. 점은 대기경계층 높이 표시

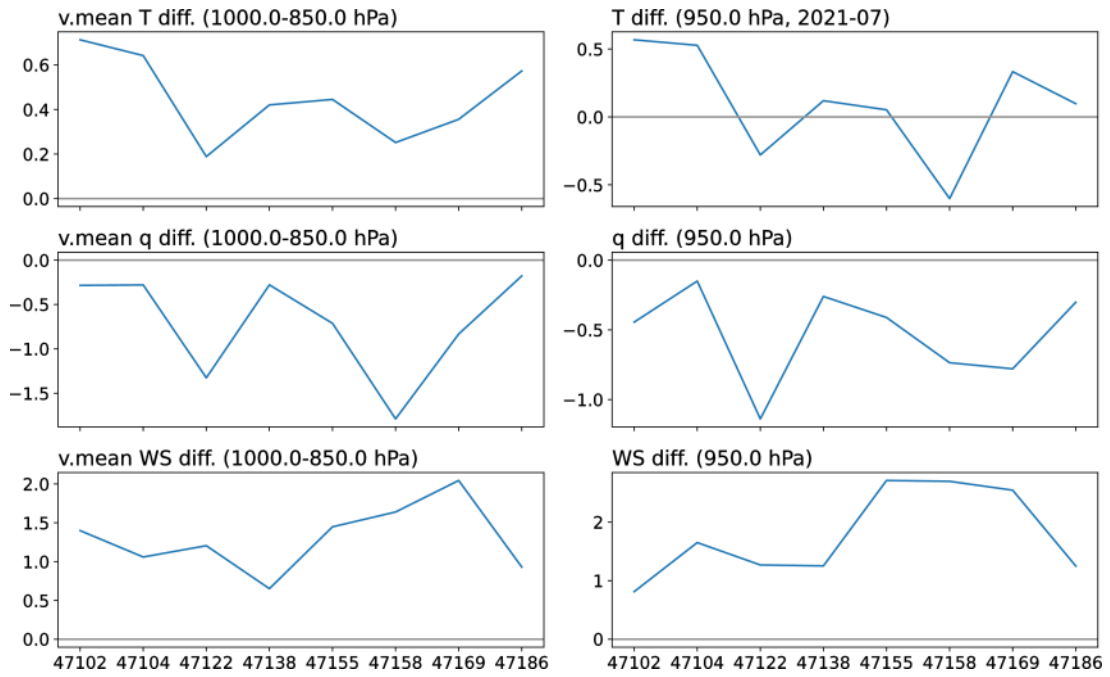
백령도 고층기상관측 지점 부근에서는 오산 지점에서보다 한랭오차가 약하게 발생하고 종종 온난오차가 발생한다(그림 3.2.6). 대기경계층의 높이는 매우 낮은 것으로 나타났다.

모든 고층기상관측 지점에 대하여 850, 950, 1000 hPa에서의 기온 편차의 시간적인 분포를 확인하였다(그림 3.2.7). 오산 등 내륙에 위치한 고층기상관측 지점에서 1000 hPa에서 한랭오차가 발생하여 950 그리고 850 hPa까지 확장되어 나타난다. 도서 지역 또는 해안가에 위치한 지점에서는 한랭오차의 빈도가 낮으며 950과 850 hPa에서는 약한 온난오차가 종종 발생하지만 뚜렷한 패턴을 확인하기 힘들다.

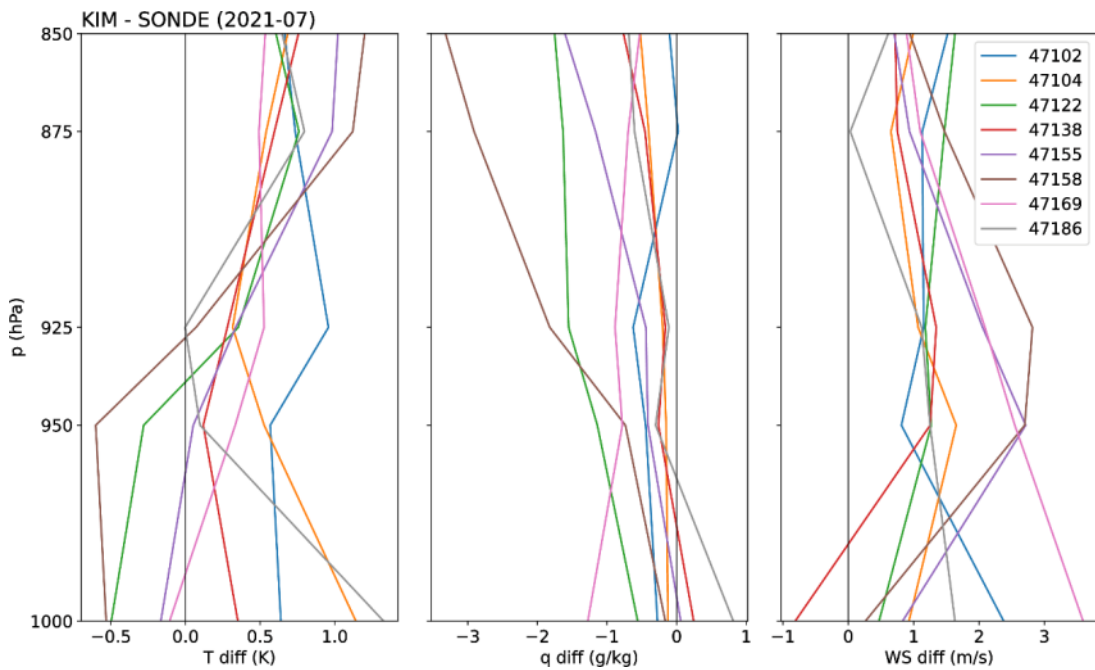


<그림 3.2.7> 2021년 7월 850 hPa(위), 950 hPa(중간), 1000 hPa(아래)에서의 기온편차 분포

장기간 편차를 확인하기 위하여 모든 고층기상관측 지점에 대하여 2021년 7월 월평균 기온, 비습, 풍속의 연직평균편차(1000-850 hPa)와 950 hPa 단일 고도에서의 편차를 분석하였다(그림 3.2.8).



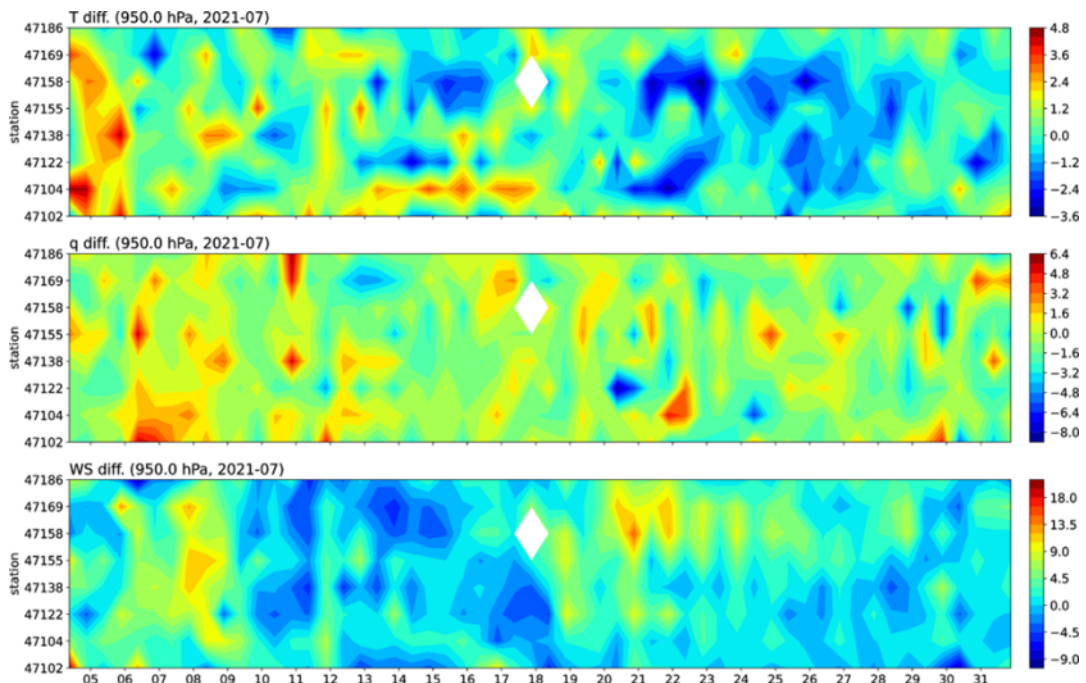
<그림 3.2.8> 2021년 7월 기온(위), 비습(중간), 풍속(아래)의 연직평균편차 (좌)와 950 hPa에서의 편차(우)



<그림 3.2.9> 2021년 7월 기온(좌), 비습(중간), 풍속(우) 평균편차의 연직 분포

950 hPa에서는 오산(47122)과 광주(47158) 지점에서 한랭오차가 발생하였으나 연직평균 편차는 양의 값을 가지는 것으로 나타났다. 비습의 편차 결과에서도 내륙의 고층기상관측 지점에서 건조오차가 나타났으며 한랭오차의 발생과 연관이 있는 것으로 보인다. 풍속은 연직평균과 950 hPa에서의 편차 모두 그리고 모든 지점에서 양의 편차가 발생하였다. 즉 존재 자료에 비해 풍속이 과대모의되는 것으로 나타났다.

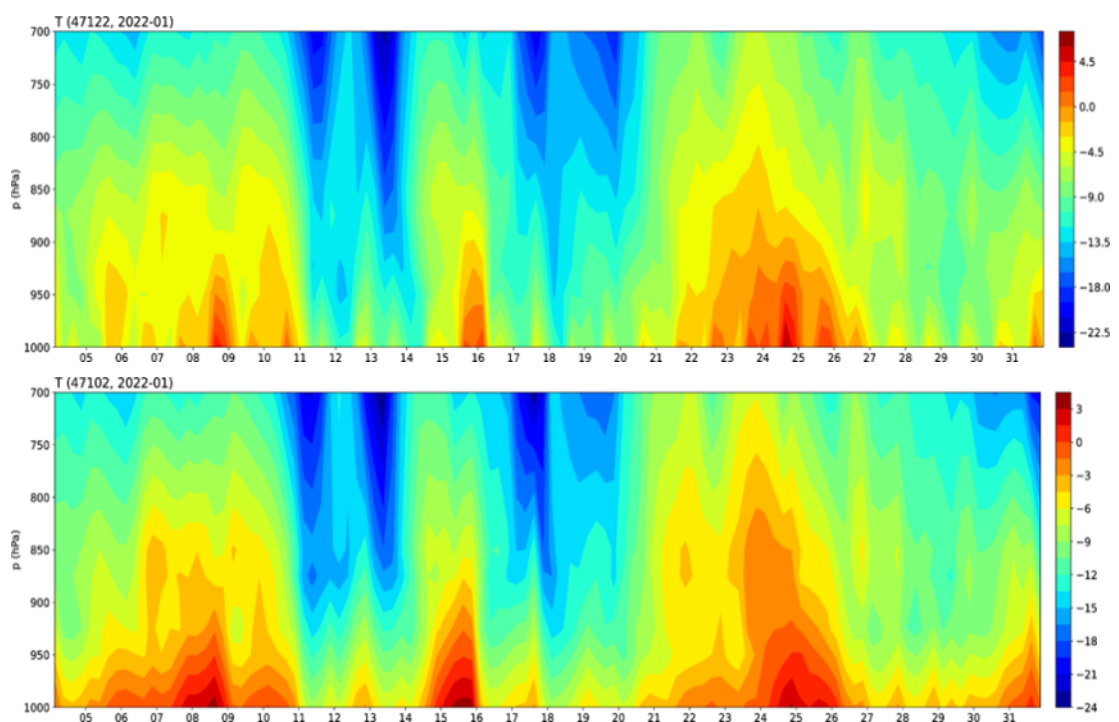
<그림 3.2.9>에 나타낸 2021년 7월 기온, 비습, 풍속의 편차의 연직 분포를 보면 내륙에 위치한 고층기상관측 지점에서는 950 hPa까지 한랭오차가 발생하고 대부분의 지점에서 풍속의 과대모의 오차가 나타나는 등 앞에서 확인한 내용과 유사한 경향성을 파악할 수 있다. 이를 바탕으로 950 hPa에서의 기온, 비습, 풍속의 오차를 분석하였다(그림 3.2.10). 내륙의 지점에서 한랭오차와 건조오차가 발생하며, 풍속은 과대모의되나 국지적으로 과소모의되는 지점도 있다. 전체적으로 편차의 뚜렷한 패턴을 확인하기 힘들다.



<그림 3.2.10> 2021년 7월 950 hPa에서의 기온(위), 비습(중간), 풍속(아래)의 편차 분포

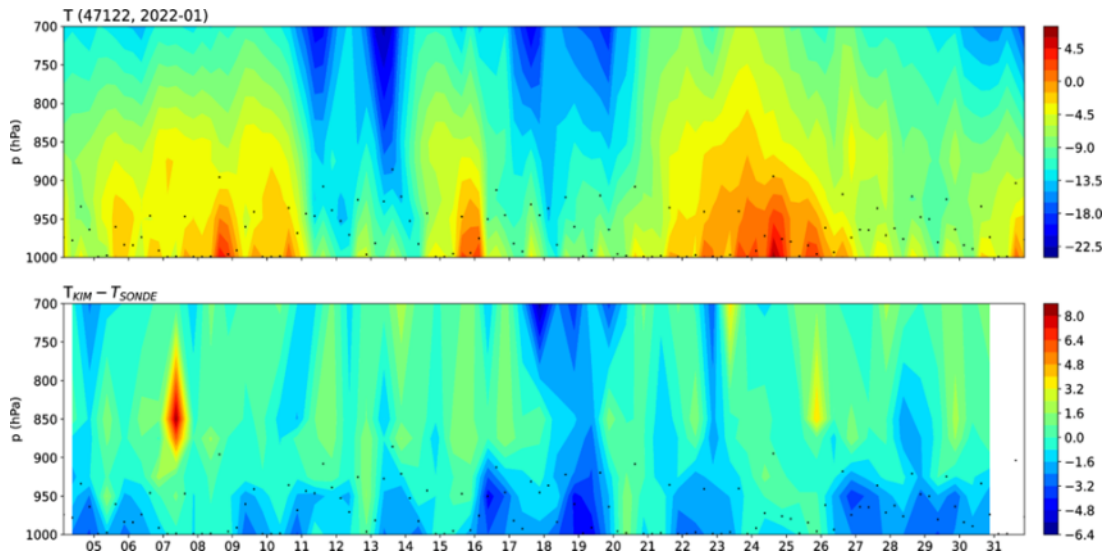
2-3) 겨울철 경계층 오차 분석

<그림 3.2.11>은 2022년 1월 오산과 백령도 고층기상관측 지점에서의 기온의 연직 분포를 나타낸다. 두세 차례 강한 한파가 오산과 백령도 지점 모두에서 나타나며 내륙에 위치한 오산 지점에서는 여름철과 마찬가지로 지면가열에 의해 성장한 대기경계층의 열적구조를 볼 수 있다.

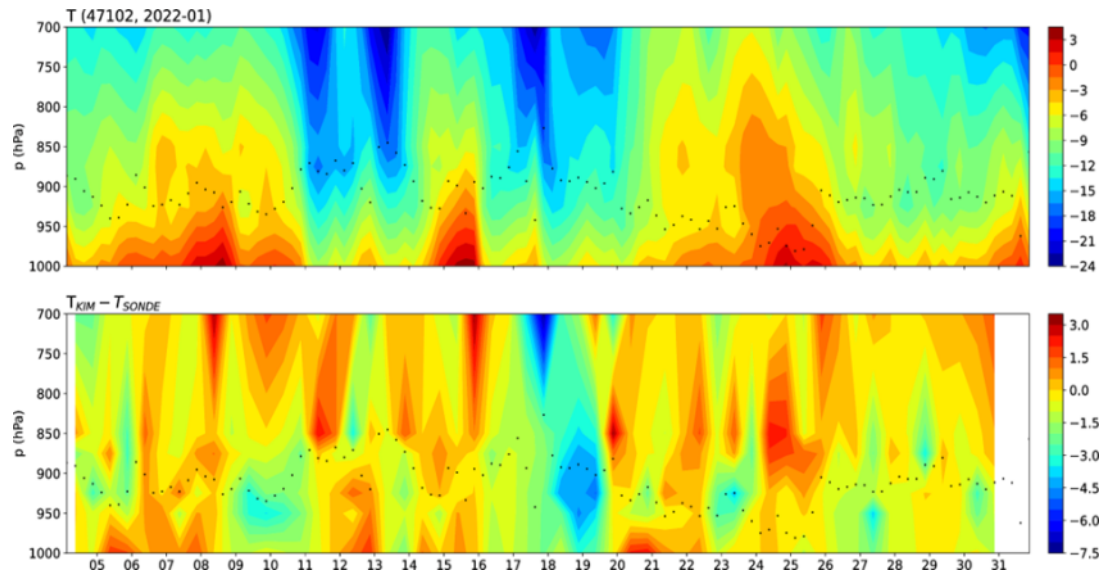


<그림 3.2.11> 2022년 1월 오산(위)과 백령도(아래) 고층기상관측 지점에서의 기온의 시간-연직 분포

<그림 3.2.12>에서는 오산 고층기상관측 지점에서의 기온과 기온 편차(모델과 관측 자료의 차이)의 연직 분포를 나타내었다. 겨울철에는 여름철에 비해 대기경계층의 높이가 다소 낮게 나오며 기온 편차는 여름철과 마찬가지로 지면 부근에서부터 한랭오차가 950 hPa 이상의 고도까지 발달하여 나타난다(그림 3.2.5).



<그림 3.2.12> 2022년 1월 오산 고층기상관측 지점에서의 기온(위)과 기온편차(아래, KIM-존데) 시간-연직 분포. 점은 대기경계층 높이 표시

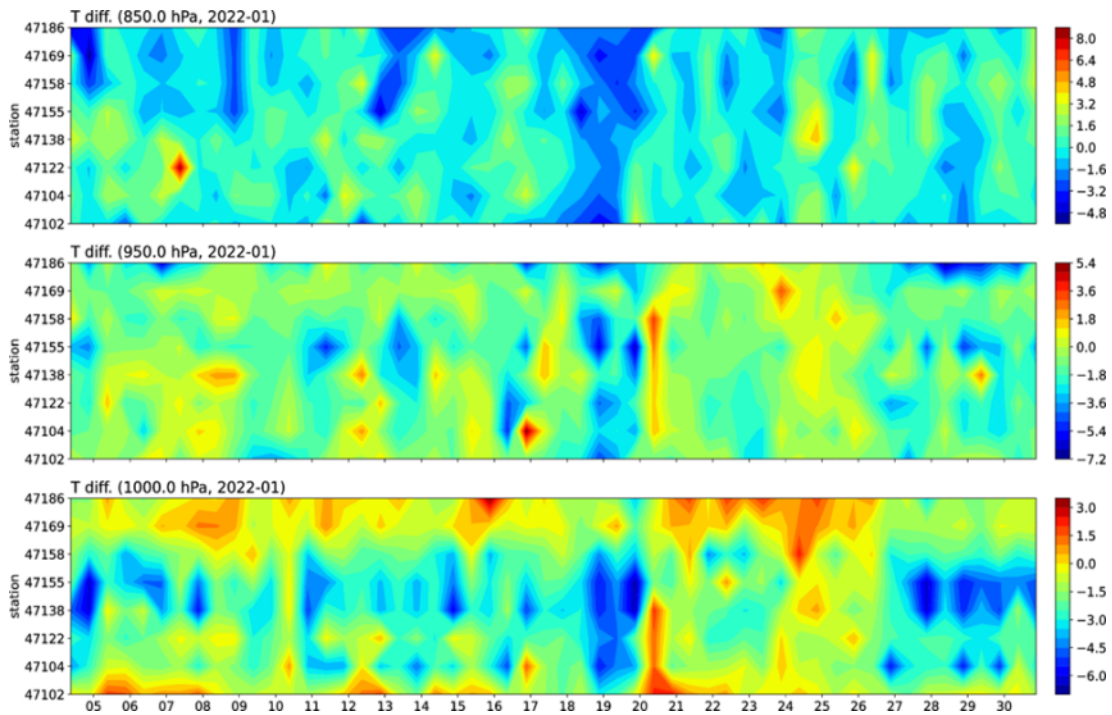


<그림 3.2.13> 2022년 1월 백령도 고층기상관측 지점에서의 기온(위)과 기온 편차(아래, KIM-존데) 시간-연직 분포. 점은 대기경계층 높이 표시

백령도 고층기상관측 지점에서는 오산 지점에서보다 대기경계층이 더 높게 발달하는 것을 확인할 수 있다(그림 3.2.13). 전체적으로 잠열플럭스가

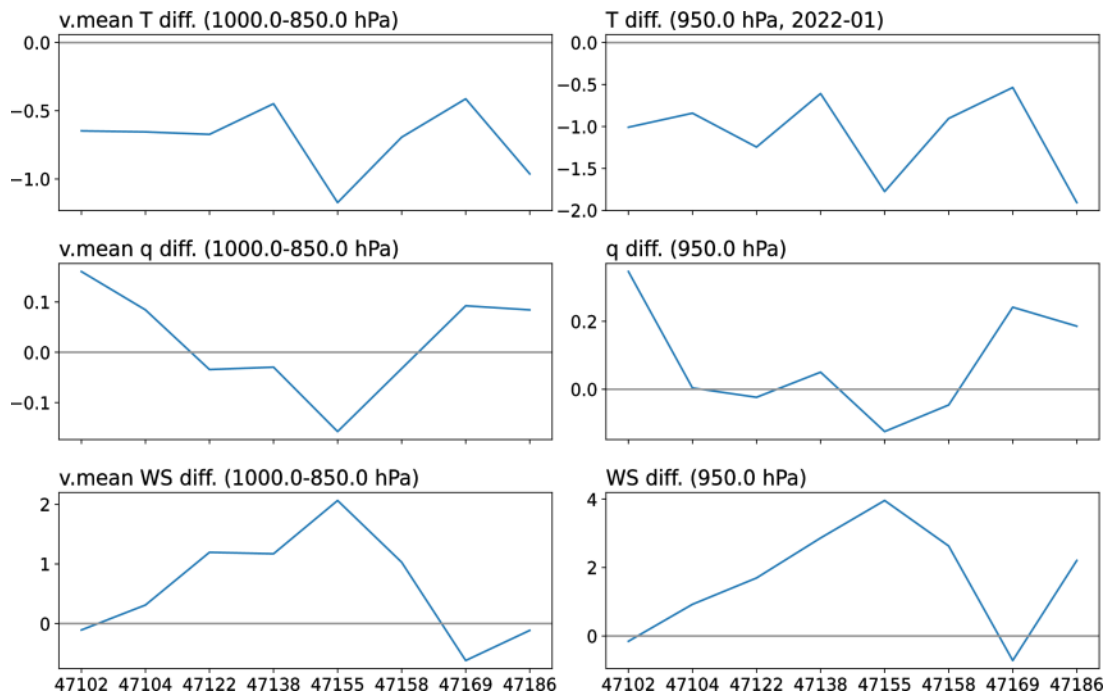
과대모의되어 도서 지역과 해안가 지역에서 대기경계층이 과도하게 발달된 것으로 추정된다. 지면 부근에서 온난오차와 한랭오차가 번갈아 나타나는 등 내륙 지역과는 다소 다른 편차의 분포 패턴을 확인할 수 있다.

<그림 3.2.7>과 마찬가지로 850, 950, 1000 hPa 세 고도에서의 기온편차를 <그림 3.2.14>에 나타내었다. 내륙에 위치한 고층기상관측 지점에서는 지면 부근에서 한랭오차가 발생하지만 여름철 만큼 연직으로 발달하지는 않는 것으로 보인다. 그리고 도서 지역과 해안가 지역에서는 1000 hPa에서 온난오차가 뚜렷하게 나타난다.

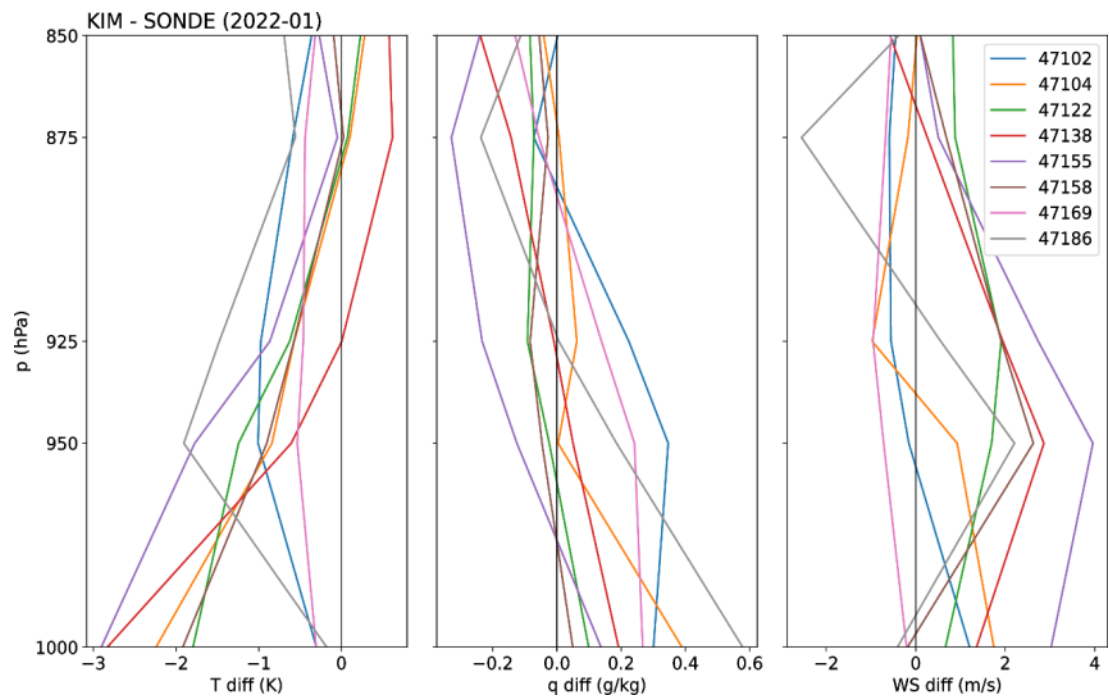


<그림 3.2.14> 2022년 1월 850 hPa(위), 950 hPa(중간), 1000 hPa(아래)에서의 기온편차 분포

여름철과 마찬가지로 <그림 3.2.15>에 나타난 연직평균편차와 950 hPa 단일고도에서의 편차는 대체적으로 유사한 경향성을 보인다. 기온은 전반적으로 과소모의 그리고 풍속은 과대모의하는 것으로 나타났으며, 백령도(47102)와 흑산도(47169) 지점에서는 풍속이 아주 약하게 과소모의되었다.



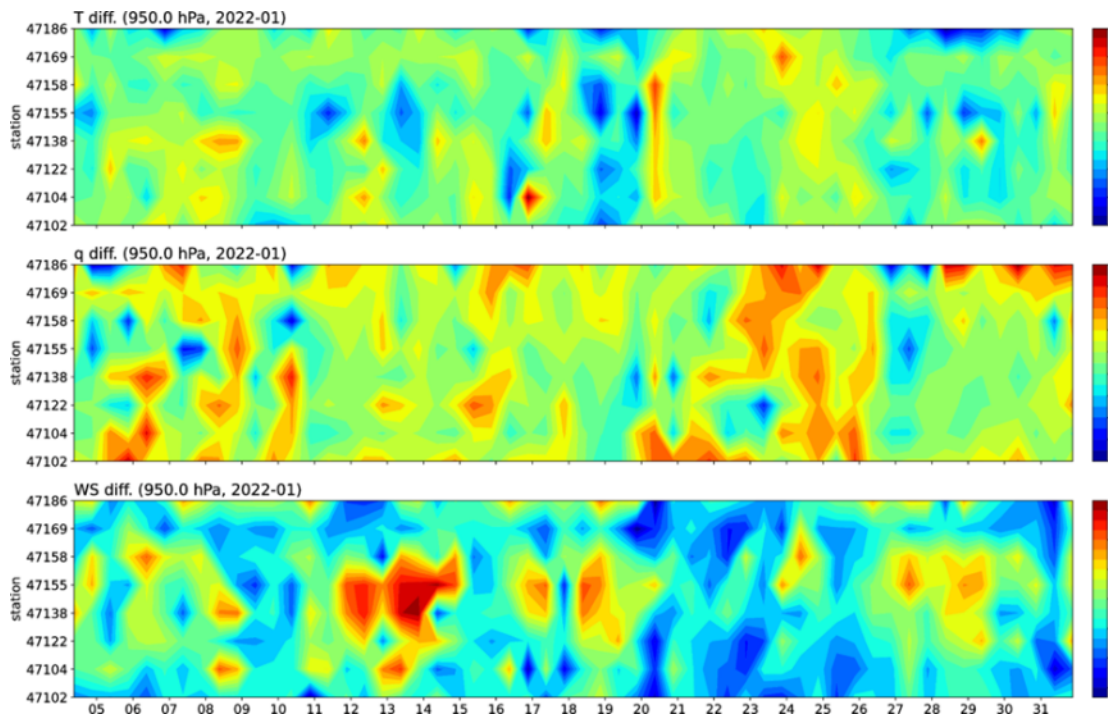
<그림 3.2.15> 2022년 1월 기온(위), 비습(중간), 풍속(아래)의 연직평균편차 (좌)와 950 hPa에서의 편차(우)



<그림 3.2.16> 2022년 1월 기온(좌), 비습(중간), 풍속(우) 평균편차의 연직 분포

<그림 3.2.16>에서도 기온의 한랭오차와 풍속의 과대모의 패턴을 확인할 수 있다. 2022년 1월에는 950 hPa에서 간간이 한랭오차가 발생하였다(그림 3.2.17). 비습은 과대모의되는 패턴이 자주 나타나며 풍속은 강하게 과대모의되거나 약한 과소모의 패턴이 간간이 나타났다. 전반적으로 겨울철에는 여름철보다 편차의 특징을 규정하기 힘들다.

전 고층기상관측지점에서의 12시간 간격 존데 자료를 활용하여 KIM의 예측성을 평가하였고 내륙과 도서/해안가 지역의 차이를 파악하였는데, 경계층 내 기상변수의 예측성은 지면 부근에서 발생하는 편차의 영향을 많이 받으므로 지면모수화 과정의 예측성에 대한 평가가 우선적으로 필요하다. 난류확산의 강도를 독립적으로 판단할 수 있는 방안에 대한 추가 연구가 필요하며, 난류확산의 강도를 판단한 후 모수화 방안에서 countergradient 항과 에디 확산계수의 차수(pfac, pfac_q) 등의 파라미터를 조절하여 기온과 비습의 확산 강도를 조절할 필요가 있다. 경계층 꼭대기에서의 유입(entrainment) 파라미터는 보다 상세한 시간 해상도의 자료를 분석하여 조절할 필요가 있다.



<그림 3.2.17> 2022년 1월 950 hPa에서의 기온(위), 비습(중간), 풍속(아래)의 편차 분포

요 약 문

* 폭염, 한파 발생시 경계층 온도, 습도 예측성 평가

- 2020-2021년 여름철 폭염 사례 분석을 통해, KIM은 고기압이 약화되는 시기에 비교적 큰 일최고기온 오차가 발생하는 것으로 나타남.
- KIM이 새벽~오전 시간대 전운량을 과대모의함에 따라, 현열 및 잠열 속을 과소모의하고 결과적으로 지표온도와 일최고기온을 과소모의함.
- 2020-2022년 겨울철 한파 사례 분석을 통해, KIM은 고기압이 확장되는 시기에 비교적 큰 일최저기온 오차가 발생하며, 상대습도를 과대모의하는 경향이 뚜렷함.
- KIM이 전반적으로 전운량을 과대모의하면서 일교차가 실제보다 작아짐에 따라 일최저기온을 과대모의하고 있음. 또한, 대기 하층의 대기안정도를 실제보다 더 안정하게 모의하는 경향도 일부 사례에서 확인함.

* 경계층 오차 진단 및 개선점 파악

- 전 고층기상관측 지점에서의 자료를 활용하여 KIM의 경계층 오차를 진단하는 방법을 마련하였음
- 내륙 고층기상관측 지점에서 여름철 지면 부근 한랭오차가 종종 연직으로 전파되어 나타남
- 지면 과정의 편차가 경계층 예측성에 영향을 미치는 것으로 판단되며 이를 고려하여 경계층 과정을 개선해야 함

제 6 장 참고 문헌

Holton, J., 2004, An introduction of dynamic meteorology. *Academic press*, N
Y, USA, 62 p.

주 의

1. 이 보고서는 기상청 수치모델링센터 수치모델활용팀에서 시행한 연구개발사업으로 전지구예보모델의 오차진단과 예측성 평가(Ⅲ) 연구의 연구용역과제 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 기상청 수치모델링센터 수치모델활용팀에서 시행한 연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.
4. 이 보고서와 관련된 문의사항은 기상청 수치모델링센터 수치예보활용팀 연구관 최현주(042-481-7572)로 하시면 됩니다.

비매품/무료

95450



9 791192 755823

ISBN 979-11-92755-82-3 (PDF)