

발 간 등 록 번 호
11-1360709-000075-01



초단기 예측시스템 여름철 강수 예측특성 분석 및 통계적 낙뢰 예측기법 개발

Analysis of prediction characteristics of summer precipitation in the very short-range forecast system and development of statistical lightning prediction

2022년 도

기상청

초단기 예측시스템 여름철 강수 예측특성 분석 및
통계적 낙뢰 예측기법 개발

Analysis of prediction characteristics of summer precipitation in the very short-range
forecast system and development of statistical lightning prediction

2022년 도

기상청

제 출 문

기 상 청 장 귀 하

본 보고서를 “초단기 예측시스템 여름철 강수 예측특성 분석 및 통계적 낙뢰 예측기법 개발 연구용역” 최종보고서로 제출합니다.

2022년 11월 30일

- 연구용역기관명 : 공주대학교
산학협력단
- 총 연구기간 (해당년도) :
2022.04.11.-2022.11.30.
(2022.04.11.-2022.11.30.)
- 연구용역책임자 : 장 은 철, 이 규 원
- 참여연구원
 - 연 구 원 : 이 재 덕, 변 의 용,
임 교 선, 송 현 제,
최 우 열, 류 근 수,
박 흥 목
 - 연구보조원 : 임 윤 정, 여 남 구,
김 민 우, 유 수 진,
이 청 룡

목 차

표 목차	II
그림 목차	III
요약문	XVI
1. 개요	1
2. 사업 수행 내용	2
2.1. 초단기 예측시스템의 여름철(2020~2021) 강수 예측 특성 분석	2
2.1.1. 기상청 초단기예측시스템(KLAPS)의 여름철 역학적 모의 특성분석	2
2.1.2. 기상청 초단기예측시스템(KLAPS)의 여름철 강한 강수 예측 특성과 개선점 분석	16
2.1.3. 요약	37
2.2. 초단기 예측모델 강수 물리과정 예측 특성 분석	39
2.2.1. 강수 사례에 대한 강수 물리과정 각 수상체 모의 특성 분석	39
2.2.2. 초기장에 대한 강수 물리과정 예측 특성 분석	60
2.2.3. 요약	93
2.3. 초단기 통계적 낙뢰 예측기법 개발	94
2.3.1. 낙뢰 예측을 위한 특성인자 분석	94
2.3.2. 통계적 낙뢰 예측기법 개발	121
2.3.3. 요약	149
3. 요약 및 제언	152
참고문헌	157

표 목차

표 2.1.1.1 2020-2021년 여름철 한반도 강수 유형 분류 및 사례 선정	5
표 2.3.1.1 낙뢰 전조에 관련된 위성 특성인자 목록과 기준치 (Mecikalski and Bedka, 2006; Siewert, 2008; Harris et al. 2010).	100
표 2.3.1.1. 낙뢰 전조에 관련된 위성 특성인자 목록과 기준치 (Mecikalski and Bedka, 2006; Siewert, 2008; Harris et al. 2010)	
표 2.3.1.2. 낙뢰 확률 예측을 위해 사용된 예측인자(predictor) 후보군 (Burrow et al., 2005)	
표 2.3.2.1. KLAPS 특성 인자 목록	127
표 2.3.2.2. 분류결과표	130
표 2.3.2.3. 70-30 hold-out 검증 결과	131
표 2.3.2.4. 2021년 8월 자료에 대한 검증 결과	132

그림 목차

그림 2.1.1.1. 종관배경장의 영향을 받는 강수유형(a-d)와 영향을 받지 않는 강수유형 (e): (a) 저기압 통과 및 전면 수렴형, (b) 저기압 전선형, (c) 하층 제트형, (d) 장마 전선형, 그리고 (e) 고기압 영향권 내 대류성 강수	3
그림 2.1.1.2. 부력이 있는 상승기류가 연직시어 및 차가운 공기의 침투에 의해 형성됨을 보여주는 모식도 (Rotunno et al. 1988): (a) 열적으로 발달하는 세포, (b) 하층의 차가운 공기의 침투로 형성된 상승기류로 차가운 공기가 있는 음의 상대와도 쪽으로 기울어져 발달함, (c) 연직시어에 의해 발달한 상승기류는 양의 상대와도 쪽으로 기울어져 발달함, 그리고 (d) 연직시어와 하층의 차가운 공기 침투 모두가 고려된 환경에서 서로의 효과가 상쇄되어 상승기류는 열적으로 발달하는 세포와 유사하게 발달함	4
그림 2.1.1.3. 2020년 6월 29일 강수 사례의 850 hPa 지위고도(파란선, gpm)와 3시간 누적 강수(음영, mm). 윗줄은 ERA5 분석장의 지위고도와 IMERG 강수이며 아래줄은 KLAPS의 예측장.	6
그림 2.1.1.4. 2020년 6월 29일 강수 사례의 850 hPa 지위 고도(파란선, gpm)와 연직 속도(음영, $m s^{-1}$). 윗줄은 ERA5 분석장이며 아랫줄은 KLAPS의 예측장.	7
그림 2.1.1.5. 2020년 6월 29일 강수 사례의 850 hPa 유선도와 1000-300 hPa 누적된 수증기 수송량. 윗줄은 ERA5 분석장이며 아랫줄은 KLAPS의 예측장.	8
그림 2.1.1.6. 2020년 6월 29일 강수 사례의 850 hPa 지위고도(파란선, gpm)와 3시간 누적 강수(음영, mm). 윗줄은 ERA5 분석장의 지위고도와 IMERG 강수이며 아래줄은 KLAPS의 예측장.	9
그림 2.1.1.7. 2020년 6월 29일 강수 사례에서 북위 37도 선을 기준으로 표현한 상당 온위(검은선, K)와 연직 속도(음영, $m s^{-1}$)의 동서-연직 단면도	10
그림 2.1.1.8. 2020년 8월 14일 강수 사례의 850 hPa 지위고도(파란선, gpm)와 3시간 누적 강수(음영, mm). 윗줄은 ERA5 분석장의 지위고도와 IMERG 강수이며 아래줄은 KLAPS의 예측장.	11
그림 2.1.1.9. 2020년 8월 14일 강수 사례의 850 hPa 유선도와 1000-300 hPa 누적된 수증기 수송량. 윗줄은 ERA5 분석장이며 아랫줄은 KLAPS의 예측장.	12
그림 2.1.1.10. 2020년 7월 6일 강수 사례의 850 hPa 지위고도(파란선, gpm)와 3시간 누적 강수(음영, mm). 윗줄은 ERA5 분석장의 지위고도와 IMERG 강수이며 아래줄은 KLAPS의 예측장.	13
그림 2.1.1.11. 2020년 7월 6일 강수 사례의 850 hPa 유선도와 풍속(음영, $m s^{-1}$). 윗줄은 ERA5 분석장이며 아랫줄은 KLAPS의 예측장.	13

그림 2.1.1.12. 2020년 7월 17일 강수 사례의 850 hPa 지위고도(파란선, gpm)와 3시간 누적 강수(음영, mm). 위쪽은 ERA5 분석장의 지위고도와 IMERG 강수이며 아래쪽은 KLAPS의 예측장.	14
그림 2.1.1.13. 2020년 7월 17일 강수 사례에 대한 한반도 중부 지역(126.5-128°E, 37-38.5°N)의 영역 평균된 상당온위(K)의 연직 분포	15
그림 2.1.2.1. 등온위면에서 위치소용돌이도 보존(An introduction to Dynamical Meteorology, 5 th edition)	16
그림 2.1.2.2. 850 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재 분석자료 2020년 6월 29일 0600 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2020년 6월 29일 0400 UTC+2h	21
그림 2.1.2.3. 500 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재 분석자료 2020년 6월 29일 0600 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2020년 6월 29일 0400 UTC+2h	21
그림 2.1.2.4. 850 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재 분석자료 2021년 6월 15일 0000 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2021년 6월 14일 1700 UTC+7h	22
그림 2.1.2.5. 500 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재 분석자료 2021년 6월 15일 0000 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2021년 6월 14일 1700 UTC+7h	22
그림 2.1.2.6. 850 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재 분석자료 2020년 7월 20일 0000 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2020년 7월 19일 1900 UTC+5h	24
그림 2.1.2.7. 500 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재 분석자료 2020년 7월 20일 0000 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2020년 7월 19일 1900 UTC+5h	25
그림 2.1.2.8. 850 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재 분석자료 2021년 9월 20일 1200 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2021년 9월 20일 1000 UTC+2h	25
그림 2.1.2.9. 500 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재 분석자료 2021년 9월 20일 1200 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2021년 9월 20일 1000 UTC+2h	26
그림 2.1.2.10. 850 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재	

분석자료 2020년 8월 15일 0000 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2020년 8월 14일 1800 UTC+6h	29
그림 2.1.2.11. 850 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2020년 8월 15일 0000 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2020년 8월 14일 1800 UTC+6h	29
그림 2.1.2.12. 850 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2021년 8월 28일 1800 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2021년 8월 28일 1200 UTC+6h	30
그림 2.1.2.13. 850 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2020년 8월 15일 0000 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2020년 8월 14일 1800 UTC+6h	30
그림 2.1.2.14. 850 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2020년 7월 06일 1200 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2020년 7월 06일 0700 UTC+5h	32
그림 2.1.2.15. 500 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2020년 7월 06일 1200 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2020년 7월 06일 0700 UTC+5h	32
그림 2.1.2.16. 850 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2021년 7월 03일 0600 UTC와 (우) KLAPS 2021년 7월 03일 0200 UTC+4h	33
그림 2.1.2.17. 500 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2021년 7월 03일 0600 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2021년 7월 03일 0200 UTC+4h	33
그림 2.1.2.18. 850 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2020년 7월 17일 1200 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2020년 7월 17일 0600 UTC+6h	35
그림 2.1.2.19. 500 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2020년 7월 17일 1200 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2020년 7월 17일 0600 UTC+6h	35
그림 2.1.2.20. 850 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2021년 7월 10일 0000 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2021년 7월 09일 1700 UTC+7h	36
그림 2.1.2.21. 500 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재	

분석자료 2021년 7월 10일 0000 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2021년 7월 09일 1700 UTC+7h	36
그림 2.2.1.1. 2020년 6월 29일 저기압 전면 수렴형 강수에 대한 (a) 1.5km 고도에서의 6시간 평균 레이더 반사도, (b) ERA5 재분석자료의 6시간 누적강수량, (c) KLAPS 예측장 자료의 6시간 누적강수량, (d) ERA5 재분석자료의 단일 시간 X지점에 대한 대기수상체 프로파일, 그리고 (e) KLAPS 예측장 자료의 6시간 평균 X지점에 대한 대기수상체 프로파일. (b)-(c)의 X는 우리나라 주변영역에서 6시간 최대누적강수량 위치를 나타낸다.	42
그림 2.2.1.2. 2020년 6월 29일 저기압 전면 수렴형 강수의 (a) KLAPS 예측장 자료의 X 지점에 대한 레이더 반사도 CFADs와 (b) 동일한 위치에서의 WISSDOM 레이더 반사도 CFADs	42
그림 2.2.1.3. 2021년 6월 14일 저기압 전면 수렴형 강수에 대한 (a) 1.5km 고도에서의 6시간 평균 레이더 반사도, (b) ERA5 재분석자료의 6시간 누적강수량, (c) KLAPS 예측장 자료의 6시간 누적강수량, (d) ERA5 재분석자료의 단일 시간 X지점에 대한 대기수상체 프로파일, 그리고 (e) KLAPS 예측장 자료의 6시간 평균 X지점에 대한 대기수상체 프로파일. (b)-(c)의 X는 우리나라 주변영역에서 6시간 최대누적강수량 위치를 나타낸다.	43
그림 2.2.1.4. 2021년 6월 14일 저기압 전면 수렴형 강수의 (a) KLAPS 예측장 자료의 X 지점에 대한 레이더 반사도 CFADs와 (b) 동일한 위치에서의 WISSDOM 레이더 반사도 CFADs	43
그림 2.2.1.5. 2020년 7월 19일 저기압 전선형 강수에 대한 (a) 1.5km 고도에서의 6시간 평균 레이더 반사도, (b) ERA5 재분석자료의 6시간 누적강수량, (c) KLAPS 예측장 자료의 6시간 누적강수량, (d) ERA5 재분석자료의 단일 시간 X지점에 대한 대기수상체 프로파일, 그리고 (e) KLAPS 예측장 자료의 6시간 평균 X지점에 대한 대기수상체 프로파일. (b)-(c)의 X는 우리나라 주변영역에서 6시간 최대누적강수량 위치를 나타낸다.	46
그림 2.2.1.6. 2020년 7월 19일 저기압 전선형 강수의 (a) KLAPS 예측장 자료의 X 지점에 대한 레이더 반사도 CFADs와 (b) 동일한 위치에서의 WISSDOM 레이더 반사도 CFADs	46
그림 2.2.1.7. 2021년 9월 20일 저기압 전선형 강수에 대한 (a) 1.5km 고도에서의 6시간 평균 레이더 반사도, (b) ERA5 재분석자료의 6시간 누적강수량, (c) KLAPS 예측장 자료의 6시간 누적강수량, (d) ERA5 재분석자료의 단일 시간 X지점에 대한 대기수상체 프로파일, 그리고 (e) KLAPS 예측장 자료의 6시간 평균 X지점에 대한 대기수상체 프로파일. (b)-(c)의 X는 우리나라 주변영역에서 6시간 최대누적강수량 위치를 나타낸다.	47
그림 2.2.1.8. 2021년 9월 20일 저기압 전선형 강수의 (a) KLAPS 예측장 자료의 X 지점에 대	

한 레이더 반사도 CFADs와 (b) 동일한 위치에서의 WISSDOM 레이더 반사도 CFADs	47
그림 2.2.1.9. 2020년 8월 14일 하층 제트형 강수에 대한 (a) 1.5km 고도에서의 6시간 평균 레이더 반사도, (b) ERA5 재분석자료의 6시간 누적강수량, (c) KLAPS 예측장 자료의 6시간 누적강수량, (d) ERA5 재분석자료의 단일 시간 X지점에 대한 대기수상체 프로파일, 그리고 (e) KLAPS 예측장 자료의 6시간 평균 X지점에 대한 대기수상체 프로파일. (b)-(c)의 X는 우리나라 주변영역에서 6시간 최대누적강수량 위치를 나타낸다.	49
그림 2.2.1.10. 2020년 8월 14일 하층 제트형 강수의 (a) KLAPS 예측장 자료의 X 지점에 대한 레이더 반사도 CFADs와 (b) 동일한 위치에서의 WISSDOM 레이더 반사도 CFADs	50
그림 2.2.1.11. 2021년 8월 28일 하층 제트형 강수에 대한 (a) 1.5km 고도에서의 6시간 평균 레이더 반사도, (b) ERA5 재분석자료의 6시간 누적강수량, (c) KLAPS 예측장 자료의 6시간 누적강수량, (d) ERA5 재분석자료의 단일 시간 X지점에 대한 대기수상체 프로파일, 그리고 (e) KLAPS 예측장 자료의 6시간 평균 X지점에 대한 대기수상체 프로파일. (b)-(c)의 X는 우리나라 주변영역에서 6시간 최대누적강수량 위치를 나타낸다.	50
그림 2.2.1.12. 2021년 8월 28일 하층 제트형 강수의 (a) KLAPS 예측장 자료의 X 지점에 대한 레이더 반사도 CFADs와 (b) 동일한 위치에서의 WISSDOM 레이더 반사도 CFADs	51
그림 2.2.1.13. 2020년 7월 6일 장마전선형 강수에 대한 (a) 1.5km 고도에서의 6시간 평균 레이더 반사도, (b) ERA5 재분석자료의 6시간 누적강수량, (c) KLAPS 예측장 자료의 6시간 누적강수량, (d) ERA5 재분석자료의 단일 시간 X지점에 대한 대기수상체 프로파일, 그리고 (e) KLAPS 예측장 자료의 6시간 평균 X지점에 대한 대기수상체 프로파일. (b)-(c)의 X는 우리나라 주변영역에서 6시간 최대누적강수량 위치를 나타낸다.	53
그림 2.2.1.14. 2020년 7월 6일 장마 전선형 강수의 (a) KLAPS 예측장 자료의 X 지점에 대한 레이더 반사도 CFADs와 (b) 동일한 위치에서의 WISSDOM 레이더 반사도 CFADs	54
그림 2.2.1.15. 2021년 7월 3일 장마전선형 강수에 대한 (a) 1.5km 고도에서의 6시간 평균 레이더 반사도, (b) ERA5 재분석자료의 6시간 누적강수량, (c) KLAPS 예측장 자료의 6시간 누적강수량, (d) ERA5 재분석자료의 단일 시간 X지점에 대한 대기수상체 프로파일, 그리고 (e) KLAPS 예측장 자료의 6시간 평균 X지점에 대한 대기수상체 프로파일. (b)-(c)의 X는 우리나라 주변영역에서 6시간 최대누적강수량 위치를 나타낸다.	54
그림 2.2.1.16. 2021년 7월 3일 장마 전선형 강수의 (a) KLAPS 예측장 자료의 X 지점에 대한 레이더 반사도 CFADs와 (b) 동일한 위치에서의 WISSDOM 레이더 반사도 CFADs	55

그림 2.2.1.17. 2020년 7월 17일 고기압 영향권 내 대류성 강수에 대한 (a) 1.5km 고도에서의 6시간 평균 레이더 반사도, (b) ERA5 재분석자료의 6시간 누적강수량, (c) KLAPS 예측장 자료의 6시간 누적강수량, (d) ERA5 재분석자료의 단일 시간 X지점에 대한 대기수상체 프로파일, 그리고 (e) KLAPS 예측장 자료의 6시간 평균 X지점에 대한 대기수상체 프로파일. (b)-(c)의 X는 우리나라 주변영역에서 6시간 최대누적강수량 위치를 나타낸다.	57
그림 2.2.1.18. 2020년 7월 17일 고기압 영향권 내 대류성 강수의 (a) KLAPS 예측장 자료의 X 지점에 대한 레이더 반사도 CFADs와 (b) 동일한 위치에서의 WISSDOM 레이더 반사도 CFADs	58
그림 2.2.1.19. 2021년 7월 9일 고기압 영향권 내 대류성 강수에 대한 (a) 1.5km 고도에서의 6시간 평균 레이더 반사도, (b) ERA5 재분석자료의 6시간 누적강수량, (c) KLAPS 예측장 자료의 6시간 누적강수량, (d) ERA5 재분석자료의 단일 시간 X지점에 대한 대기수상체 프로파일, 그리고 (e) KLAPS 예측장 자료의 6시간 평균 X지점에 대한 대기수상체 프로파일. (b)-(c)의 X는 두자료사이의 누적강수량 또는 최대강수량이 나타난 지점을 임의로 표시한 지점이다.	58
그림 2.2.1.20. 2021년 7월 9일 고기압 영향권 내 대류성 강수의 (a) KLAPS 예측장 자료의 X 지점에 대한 레이더 반사도 CFADs와 (b) 동일한 위치에서의 WISSDOM 레이더 반사도 CFADs	59
그림 2.2.2.1. KLAPS 모델 자료의 초기시간에 따른 누적강수량 정량평가 방법 모식도 ...	61
그림 2.2.2.2. 2020년 6월 29일 저기압 전면 수렴형 강수의 6시간 누적강수량 비교: (a) IMERG, (b) ERA5 재분석자료, (c) AWS 관측자료, (d) KLAPS 0200 UTC, (e) KLAPS 0300 UTC, 그리고 (f) KLAPS 0400 UTC	63
그림 2.2.2.3. 2020년 6월 29일 저기압 전면 수렴형 강수에 대한 ERA5 재분석자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄	63
그림 2.2.2.4. 2020년 6월 29일 저기압 전면 수렴형 강수의 850 hPa에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄	64
그림 2.2.2.5. 2020년 6월 29일 저기압 전면 수렴형 강수의 500 hPa에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄	64
그림 2.2.2.6. 2021년 6월 14일 저기압 전면 수렴형 강수의 6시간 누적강수량 비교: (a) IMERG, (b) ERA5 재분석자료, (c) AWS 관측자료, (d) KLAPS 1500 UTC, (e) KLAPS 1600	

UTC, 그리고 (f) KLAPS 1700 UTC	66
그림 2.2.2.7. 2021년 6월 14일 저기압 전면 수렴형 강수에 대한 ERA5 재분석자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄	66
그림 2.2.2.8. 2021년 6월 14일 저기압 전면 수렴형 강수의 850 hPa에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄	67
그림 2.2.2.9. 2021년 6월 14일 저기압 전면 수렴형 강수의 500 hPa에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄	67
그림 2.2.2.10. 2020년 7월 19일 저기압 전선형 강수의 6시간 누적강수량 비교: (a) IMERG, (b) ERA5 재분석자료, (c) AWS 관측자료, (d) KLAPS 1700 UTC, (e) KLAPS 1800 UTC, 그리고 (f) KLAPS 1900 UTC	69
그림 2.2.2.11. 2020년 7월 19일 저기압 전선형 강수에 대한 ERA5 재분석자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄	69
그림 2.2.2.12. 2020년 7월 19일 저기압 전선형 강수의 850 hPa에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄.	70
그림 2.2.2.13. 2020년 7월 19일 저기압 전선형 강수에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄	70
그림 2.2.2.14. 2021년 9월 20일 저기압 전선형 강수의 6시간 누적강수량 비교: (a) IMERG, (b) ERA5 재분석자료, (c) AWS 관측자료, (d) KLAPS 1700 UTC, (e) KLAPS 1800 UTC, 그리고 (f) KLAPS 1900 UTC	72
그림 2.2.2.15. 2021년 9월 20일 저기압 전선형 강수에 대한 ERA5 재분석자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄	72
그림 2.2.2.16. 2021년 9월 20일 저기압 전선형 강수의 850 hPa에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄	73
그림 2.2.2.17. 2021년 9월 20일 저기압 전선형 강수에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄	73

을 나타냄	73
그림 2.2.2.18. 2020년 8월 14일 하층 제트형 강수의 6시간 누적강수량 비교: (a) IMERG, (b) ERA5 재분석자료, (c) AWS 관측자료, (d) KLAPS 1700 UTC, (e) KLAPS 1800 UTC, 그리고 (f) KLAPS 1900 UTC	75
그림 2.2.2.19. 2020년 8월 14일 하층 제트형 강수에 대한 ERA5 재분석자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄	76
그림 2.2.2.20. 2020년 8월 14일 하층 제트형 강수의 850 hPa에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄	76
그림 2.2.2.21. 2020년 8월 14일 하층 제트형 강수에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄	77
그림 2.2.2.22. 2021년 8월 28일 하층 제트형 강수의 6시간 누적강수량 비교: (a) IMERG, (b) ERA5 재분석자료, (c) AWS 관측자료, (d) KLAPS 1700 UTC, (e) KLAPS 1800 UTC, 그리고 (f) KLAPS 1900 UTC	79
그림 2.2.2.23. 2021년 8월 28일 하층 제트형 강수에 대한 ERA5 재분석자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄	79
그림 2.2.2.24. 2021년 8월 28일 하층 제트형 강수의 850 hPa에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄	80
그림 2.2.2.25. 2021년 8월 28일 하층 제트형 강수에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄	80
그림 2.2.2.26. 2020년 7월 06일 장마전선형 강수의 6시간 누적강수량 비교: (a) IMERG, (b) ERA5 재분석자료, (c) AWS 관측자료, (d) KLAPS 1700 UTC, (e) KLAPS 1800 UTC, 그리고 (f) KLAPS 1900 UTC	82
그림 2.2.2.27. 2020년 7월 06일 장마전선형 강수에 대한 ERA5 재분석자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄	82
그림 2.2.2.28. 2020년 7월 06일 장마전선형 강수의 850 hPa에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경	

도장(∇H)을 나타냄	83
그림 2.2.2.29. 2020년 7월 06일 장마전선형 강수에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄	83
그림 2.2.2.30. 2021년 7월 03일 장마전선형 강수의 6시간 누적강수량 비교: (a) IMERG, (b) ERA5 재분석자료, (c) AWS 관측자료, (d) KLAPS 1700 UTC, (e) KLAPS 1800 UTC, 그리고 (f) KLAPS 1900 UTC	85
그림 2.2.2.31. 2021년 7월 03일 장마전선형 강수에 대한 ERA5 재분석자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄	85
그림 2.2.2.32. 2021년 7월 03일 장마전선형 강수의 850 hPa에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄	86
그림 2.2.2.33. 2021년 7월 03일 장마전선형 강수에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄	86
그림 2.2.2.34. 2020년 7월 17일 고기압 영향권 내 대류성 강수의 6시간 누적강수량 비교: (a) IMERG, (b) ERA5 재분석자료, (c) AWS 관측자료, (d) KLAPS 1700 UTC, (e) KLAPS 1800 UTC, 그리고 (f) KLAPS 1900 UTC	88
그림 2.2.2.35. 2020년 7월 17일 고기압 영향권 내 대류성 강수에 대한 ERA5 재분석자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄	88
그림 2.2.2.36. 2020년 7월 17일 고기압 영향권 내 대류성 강수의 850 hPa에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄	89
그림 2.2.2.37. 2020년 7월 17일 고기압 영향권 내 대류성 강수에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄	89
그림 2.2.2.38. 2021년 7월 09일 고기압 영향권 내 대류성 강수의 6시간 누적강수량 비교: (a) IMERG, (b) ERA5 재분석자료, (c) AWS 관측자료, (d) KLAPS 1700 UTC, (e) KLAPS 1800 UTC, 그리고 (f) KLAPS 1900 UTC	91
그림 2.2.2.39. 2021년 7월 09일 고기압 영향권 내 대류성 강수에 대한 ERA5 재분석자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경	

도장(∇H)을 나타냄	91
그림 2.2.2.40. 2021년 7월 09일 고기압 영향권 내 대류성 강수의 850 hPa에 대한 KLAPS 예측 장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄	92
그림 2.2.2.41. 2021년 7월 09일 고기압 영향권 내 대류성 강수에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄	92
그림 2.3.1.1. 미세물리과정을 통한 구름 수적의 발달과정 모식도 (Morrison et al., 2020)	95
그림 2.3.1.2. 적란운 영역의 낙뢰 형성 모식도 (Dwyer and Uman, 2014)	96
그림 2.3.1.3. 낙뢰와 비낙뢰 영역에서의 레이더 반사도 기반 특성인자들의 (a) 반사도, (b) Echo top, (c) UVIL 확률밀도함수 (Park, 2012).	97
그림 2.3.1.4. 대류운 정규화 지속시간에 대한 (a) 대류운 영역, (b) CG 낙뢰횟수밀도, (c) 대류성 강수비율, (d) 1 km 고도에서의 CAPPI 최대 반사도의 시계열 분포 (Rigo et al., 2010)	98
그림 2.3.1.5. 대류운 정규화 지속시간 동안의 레이더망의 특성인자와 낙뢰발생밀도의 시간 변동에 대한 모식도 (Rigo et al., 2010)	99
그림 2.3.1.6. 1분 평균 낙뢰 발생에 대하여 (a) Dry snow와 Precipitable ice의 fraction과 (b) Dry snow와 Precipitable ice의 product 경향성에 대한 시계열 (Deierling et al., 2005)	100
그림 2.3.1.7. (a) 최대 상승기류와 1분 평균 낙뢰 총 발생수에 대한 산포도, (b) 1분 평균 낙뢰 발생수에 대하여 5 ms ⁻¹ 이상의 상승기류 volume과 Dry snow와 Precipitable ice의 fraction에 대한 시계열 (Deierling et al., 2008)	100
그림 2.3.1.8. 낙뢰 발생 1시간 전부터 낙뢰 발생 15분 후 시간 구간에서의 GOES-12의 VIS(좌)와 IR(10.7 μm , 우)의 영상 (Harris et al. 2010)	102
그림 2.3.1.9. 3.9 μm reflectance의 시계열 상자그림 (Harris et al., 2010)	103
그림 2.3.1.10. 낙뢰 전조 관련 위성 특성인자의 시계열 모식도 (Harris et al., 2010)	103
그림 2.3.1.11. 2003년 6월 27일 2100 UTC ~ 6월 28일 0000 UTC 사례에 대하여 북아메리 카 영역에서 21~24 시간 낙뢰 예측 모의 결과 (Burrow et al., 2005)	105
그림 2.3.1.12. 그림 2.3.1.11에서 캐나다와 미국 동부 영역에 대하여 낙뢰 확률 예측 결과 (빨강색과 파랑색 등치선)과 실제 관측된 낙뢰 영역(연두색~녹색 영역)의 공간분포 (Burrow et al., 2005)	106

그림 2.3.1.13. (a) 최대 낙뢰(섬광) 강도밀도와 상방향 싸락우박 플럭스량에 대한 보정된 산포도, (b) 최대 낙뢰 강도밀도와 얼음함량 연직 적분성분 간의 보정된 산포도 (McCaul et al., 2009)	107
그림 2.3.1.14. 2002년 3월 30일 0400 UTC 강수사례에 대하여 (a) LMA에서 관측된 낙뢰밀도(색 등치선)과 KHTX 레이더에서 관측된 하층 반사도(회색음영)의 공간분포, (b) WRF에서 모의된 낙뢰밀도(색 등치선)과 고도 -15 °C에서의 반사도(회색음영)의 공간분포 (McCaul et al., 2009)	108
그림 2.3.1.15. 2008년 9월 9일 강수사례(이탈리아)에 대하여 (a) 24시간 누적 낙뢰횟수와 (c) WRF 기반으로 산출된 4 km 격자점 해상도에서의 LPI 와 (e) 1.33 km 격자점 해상도에서의 LPI 그리고 2009년 2월 28일 강수사례(이스라엘)에 대하여 (b) 24시간 누적 낙뢰횟수와 (d) WRF 기반으로 산출된 4 km 격자점 해상도에서의 LPI 와 (f) 1.33 km 격자점 해상도에서의 LPI	109
그림 2.3.1.16. 2002 ~ 2008년간 한반도에서 발생한 (a) 낙뢰밀도 공간분포와 (b) 한반도 중부지역에서의 Hövmoller 도식도 (Park, 2012)	110
그림 2.3.1.17. FAST 뇌우 영역 판별 및 낙뢰반경 모식도	112
그림 2.3.1.18. 2020년 8월 2일 15:00(KST)의 낙뢰, 뇌우 판별영역, VIL 산출 결과	112
그림 2.3.1.19. 2020년 8월 2일 15:00(KST)의 낙뢰사례에 대한 레이더 관측변수	113
그림 2.3.1.20. 위성기반 낙뢰 특성인자인 (a) Ref_38, (b) T_B 10.5 μm , (c) ΔRef_38 , (d) ΔT_B 10.5 μm 의 공간분포 예시. 검은점은 낙뢰가 발생한 지점을 나타냄.	115
그림 2.3.1.21. 위성기반 낙뢰 특성인자인 (a) BTD(3.8 μm , 10.5 μm), (b) BTD(6.7 μm , 10.5 μm), (c) BTD(13.3 μm , 10.5 μm), (d) Δ BTD(3.8 μm , 10.5 μm), (e) Δ BTD(6.7 μm , 10.5 μm), (f) Δ BTD(13.3 μm , 10.5 μm)의 공간분포 예시. 검은점은 낙뢰가 발생한 지점을 나타냄.	116
그림 2.3.1.22. KLAPS 기반 특성변수 산출 흐름도	118
그림 2.3.1.23. 2020년 8월 2일 15:00(KST)의 낙뢰사례에 대한 PRI 산출결과	119
그림 2.3.1.24. 2020년 8월 2일 15:00(KST)의 낙뢰사례에 대한 SI 산출결과	120
그림 2.3.2.1. 반경에 따른 낙뢰(실선) 및 비낙뢰(점선) 영역의 레이더 관측변수 빈도분포	121
그림 2.3.2.2. 낙뢰(With) 및 비낙뢰(Without) 영역에 대한 레이더 기반 특성변수의 빈도분포	123

그림 2.3.2.3. 낙뢰(With) 및 비낙뢰(Without) 영역에 대한 레이더 기반 특성변수의 빈도분포(계속)	124
그림 2.3.2.4. 낙뢰와 비낙뢰 영역에서의 (a) Ref_38, (b) T_B 10.5 μm , (c) ΔRef_38 , (d) ΔT_B 10.5 μm 의 확률밀도함수. 검은 실선과 파랑 실선은 각각 낙뢰영역과 비낙뢰 영역을 나타냄.	125
그림 2.3.2.5. 낙뢰와 비낙뢰 영역에서의 (a) BTD(3.8 μm , 10.5 μm), (b)BTD(6.7 μm , 10.5 μm), (c) BTD(13.3 μm , 10.5 μm), (d) Δ BTD(3.8 μm , 10.5 μm), (e) Δ BTD(6.7 μm , 10.5 μm), (f) Δ BTD(13.3 μm , 10.5 μm)의 확률밀도함수. 검은 실선과 파랑 실선은 각각 낙뢰영역과 비낙뢰 영역을 나타냄.	126
그림 2.3.2.6. 낙뢰(With) 및 비낙뢰(Without) 영역에 대한 KLAPS 기반 특성변수의 빈도분포	128
그림 2.3.2.7. 낙뢰(With) 및 비낙뢰(Without) 영역에 대한 KLAPS 기반 특성변수의 빈도분포(계속)	129
그림 2.3.2.8. 낙뢰(With) 및 비낙뢰(Without) 영역에 대한 KLAPS 기반 특성변수의 빈도분포(계속)	130
그림 2.3.2.9. 낙뢰(With) 및 비낙뢰(Without) 영역에 대한 KLAPS 기반 특성변수의 빈도분포(계속)	131
그림 2.3.2.10. 낙뢰(With) 및 비낙뢰(Without) 영역에 대한 KLAPS 기반 특성변수의 빈도분포(계속)	132
그림 2.3.2.11. (a)과소추출 전과 (b) 과소추출 후의 낙뢰발생 유무에 따른 히스토그램 ...	133
그림 2.3.2.12. 랜덤 포레스트의 변수 중요도	135
그림 2.3.2.13. 70-30 hold-out 검증 분류 결과	138
그림 2.3.2.14. 2021년 8월 자료에 대한 랜덤포레스트 분류 결과	139
그림 2.3.2.15. 레이더 HSR 강우 영상(2021.08.03. 21 UTC)	140
그림 2.3.2.16. (a) 랜덤 포레스트 예측결과 와 (b) 랜덤 포레스트 낙뢰 발생 예측확률 (2021.08.03. 21 UTC)	141
그림 2.3.2.17. 레이더 HSR 강우 영상 (2021.08.19. 07 UTC)	141
그림 2.3.2.18. (a) 랜덤 포레스트 예측결과와 (b) 랜덤 포레스트 낙뢰 발생 예측확률 (2021.08.19. 07 UTC)	142

그림 2.3.2.19. 랜덤 포레스트 낙뢰 발생 예측확률(2022.06.11. 07 UTC 예측장)	143
그림 2.3.2.20. 레이더 반사도 CMAX 영상(2022.06.11. 07~10 UTC)	144
그림 2.3.2.21. 랜덤 포레스트 낙뢰 발생 예측확률(2022.07.03. 07 UTC 예측장)	145
그림 2.3.2.22. 레이더 반사도 CMAX 영상(2022.07.03. 07~10 UTC)	145
그림 2.3.2.23. 랜덤 포레스트 낙뢰 발생 예측확률(2022.08.13. 05 UTC 예측장)	146
그림 2.3.2.24. 레이더 반사도 CMAX 영상(2022.08.13. 05~08 UTC)	147
그림 2.3.2.25. 예측 선행 시간에 따른 랜덤 포레스트 낙뢰 발생 예측확률	148

요 약 문

본 연구에서는 기상청 초단기예측시스템인 KLAPS 시스템의 여름철 강수 모의 능력을 평가하기 위하여 강수 발생 메커니즘에 따라 2020-2021년 사례들을 수집하고 강수 발생 핵심 구조의 모의 성능을 평가하였다. 대표 사례는 종관배경장의 영향을 받는 4가지 강수 유형인 저기압 전면 수렴형, 저기압 전선형, 하층 제트형, 그리고 장마전선형으로 구분하고 종관배경장의 영향을 받지 않는 형태로 고기압 영향권 내 대류성 강수로 사례분류를 하였다. 다음은 본 연구를 종합적으로 요약한 것이다.

- 시간에 따른 기압장, 바람, 수분장의 구조 발달에서 전반적으로 KLAPS는 강수 구조를 잘 모의하였으나 종관 저기압에 있어 기압구조와 상승을 잘 모의하였음에도 수분 수송이 약한 구역에서 강수를 과소모의 하거나 강수의 중심위치를 모의하지 못하는 한계점도 나타남.
- 전선 강수의 경우는 재분석에 비해 강한 경계면 구조를 모의하면서 IMERG에 비해 강수 과대모의를 보였으나 중규모 구조에서 나타나는 전선 구조는 KLAPS에서 모의된 결과가 타당성이 있는 것으로 판단되며, 하층 제트형 강수는 구조를 잘 모의하였으나 경기만에서 강수를 강하게 모의하고 육상으로 유입되는 강수를 과소모의하는 해양-육지 경계 특징을 보임.
- 장마 구조에서 나타나는 작은 규모의 강수 구조는 고해상도의 KLAPS가 우수한 모의 성능을 보였으며, 종관 강제력이 약한 고기압 권역내의 대류성 강수의 경우는 IMERG나 ERA5에 비해 강한 강수 모의를 보였으나, 이 역시 중규모 강수 모의 능력은 KLAPS에서 우수한 것으로 판단됨.
- 선정된 강수 사례에 대해 위치소용돌이도 경향진단방정식과 비단열항 계산을 통해 ERA5 재분석자료와 비교하여 저기압 전면 수렴형 사례에서는 위치소용돌이도 경향 진단항들은 전반적으로 유사한 형태를 보여주었으며, 강수 코어를 모의하지 못한 부분은 역학적 필드가 잘 모사하지 못한 것으로 판단됨.
- 저기압 전선형 사례에서 위치소용돌이도 경향은 ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장 모두 잘 모의된 것으로 생각되지만, 고해상도 KLAPS의 예측장이 실제 저기압 전선형 강

수형태를 잘 모의하였고, 결과적으로 좁고 차가운 전선형 강수에서의 위치소용돌이도 비단열항에 의해 촉발되는 위치소용돌이도 불균형이 위치소용돌이도 수평이류항에 의해 상쇄되는 특징을 잘 설명함.

- 하층 제트형 강수 사례에서 ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장은 비슷한 위치에서 위치소용돌이도 경향 진단항들의 변화를 설명하였으나, 저기압 전선형 사례와 유사하게 고해상도 KLAPS 자료는 비교적 좁고 강한 강수 사례에 대한 위치소용돌이도의 자세한 변화를 모의하기에 좀 더 유리한 측면이 있는 것으로 판단됨.
- KLAPS 850 hPa 예측장에서는 수도권 서쪽 해안가에 강한 음의 비단열흐름을 보여주고 있으며, 이는 하강류 또는 수평적인 열차이가 큰 육지-해양 대조를 나타내는 것으로 판단되며, 이러한 특징은 500 hPa 층에서는 다소 완화된 특징을 보임.
- 장마 전선형 강수에서 ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장 자료는 위치소용돌이도 경향 진단항들이 비슷한 공간분포를 보여주고 있으나, KLAPS 예측장은 우리나라 중부내륙에서 강한 비단열 및 위치소용돌이도 비단열항을 모사하였고, 그 결과 수평 및 연직 흐름의 변화가 발생한 것을 알 수 있음.
- 고기압 영향권 내 대류성 강수 사례는 고해상도 KLAPS 예측장 자료가 더욱 자세한 위치소용돌이도 경향 진단항 변화를 나타내고 있었으며, ERA5 재분석자료는 850 hPa에서는 유의미한 변화는 관찰되지 않음.
- 강수 사례에 대한 대기수상체 특성 분석과 KLAPS 자료의 초기장에 대한 강수 물리과정 예측 특성을 분석 부분에서 ERA5 재분석자료와 달리 KLAPS는 강수지역에서 항상 일정한 대기수상체 분포와 변화를 보여줌.
- KLAPS 강수지역에서 계산된 CFADs와 WISSDOM 반사도 CFADs를 비교해볼 때, KLAPS 예측장의 대기수상체 분포는 대기 하층에서는 수증기가 많이 모사되며, 중층(5 km) 부근에서 뚜렷한 대기수상체 상변이가 나타나고, 대기 상층에서는 빙정 형태의 성장을 잘 설명하지 못하는 경향을 보임.
- KLAPS의 대기수상체 분포와 함께 강수는 전반적으로 강수 구조나 형태에 따라 적절히 모의되고 있지 않은 것으로 판단되며, 이는 강수 형태에 따라 적절한 미세물리규모모수화 방안에 대한 고찰이 필요하다고 판단됨.

- 실제 WISSDOM 반사도 CFADs와 비교하여 대체로 KLAPS 모델자료의 CFADs 분포에서 -30 dBZ 값은 모델 격자점에서 QRAIN, QSNOW, QGRAUPEL에 의해 계산되는 Z_e 값이 0이 되는 지점을 포함하기 때문인데, 이는 비강수구역과 강수구역 내에서도 위의 대기수상체가 모두 0이 되는 격자 지점이 존재하기 때문으로 분석됨.
- 초기장에 대한 강수 물리과정 예측 특성에서는 KLAPS의 초기장 자료가 강수시점에 가까울수록 누적강수량이 IMERG와 AWS 관측자료의 누적강수량을 잘 모의하는 것을 알 수 있었고, 몇몇 사례에서 KLAPS 예측장의 누적강수량은 관측자료와 비교하여 과대 모의하는 경향을 보였음.
- 이와 같은 강수 과대모의 경향은 대부분의 강수 유형에서 나타나기 때문에 2.2.1절의 대기수상체와 관련하여 미세물리 규모방안 또는 적운모수화등과 같은 모델의 물리과정 특성을 살펴볼 필요가 있음.
- KLAPS의 자료동화 시스템은 단시간에 발달하는 강수의 특징에 효과적으로 대응할 수 있는 장점을 보였으며, 대류성 강수 형태에 대해 강수 시점에 가까울수록 잘 모의하는 경향이 나타남.
- 본 연구에서는 KLAPS 예측장 자료와 공간해상도가 같은 재분석자료가 존재하지 않기 때문에, 보편적으로 품질 측면에서 신뢰성 높은 ERA5 재분석자료와 비교하였으며, 비록 KLAPS 예측장 자료와 ERA5 재분석 자료간의 공간해상도 차이로 인해 정량적 비교(위치소용돌이도 경향진단 및 비단열항, 온도장, 지위고도장, 온도경도 및 이류 등)에 어려움이 있으나, 두 모델 자료로 분석된 자료 사이의 정성적 비교 및 설명은 어느정도 유의하다고 판단됨.
- 낙뢰는 다양한 얼음입자 수농도와 미세물리과정 그리고 상승기류가 발달한 적란운에서 빈번하게 발생하며 낙뢰 특성을 분석하기 위하여 위성이나 지상레이더와 같은 원격탐측장비를 이용한 여러 사전연구가 수행되었음.
- 지상레이더에서 생산되는 이중편파 변수와 반사도 기반으로 산출된 특성인자를 이용하여 낙뢰 특성분석이 가능하며 위성 기반 특성인자를 이용하여 낙뢰 전조탐지 및 특성 분석의 가능성을 보여주었음.
- 수치모델 기반으로 산출된 열역학 불안정도 지수와 얼음입자들의 플럭스량, LPI 등 다양

한 특성인자를 이용하여 낙뢰 예측이 가능하였음.

- 3차원 레이더 관측자료와 퍼지로지 기반의 뇌우판별 및 추적알고리즘(FAST)을 이용하여 낙뢰 및 비낙뢰 영역에 대한 기상레이더의 관측변수와 특성변수의 특성을 조사하였음.
- FAST 알고리즘을 이용하여 뇌우 영역을 판별한 후에 뇌우 영역에서 발생한 낙뢰 위치를 중심으로 일정한 반경을 선정하여 낙뢰 영역을 분류한 다음 낙뢰 영역과 비낙뢰 영역에 대하여 관측변수와 특성인자의 공간분포와 통계적 특성을 분석하였음.
- 낙뢰의 공간분포 특성 측면에서 반사도와 K_{DP} , ρ_{HV} , 그리고 특성인자 VIL가 상대적으로 높은 영역에서 낙뢰가 집중적으로 분포하였고 확률밀도함수를 이용한 관측 및 특성변수의 통계적 특성분석에서도 레이더 반사도, 차등반사도, VIL, CMAXZ, ETH는 높은 값 구간에서 빈도수가 밀집된 패턴을 보여주었음.
- GK2A 위성의 고분해능 관측산출물을 기반으로 특성인자를 계산하였고 낙뢰 영역에서 특성인자의 공간분포 특성과 통계적 특성을 조사함으로써 낙뢰 예측인자 활용 가능성을 진단하였음.
- 공간분포 특성 분석 결과로 위성기반 특성인자인 Ref_38과 $10.5 \mu\text{m}$ 채널의 휘도온도(T_B $10.5 \mu\text{m}$)에서 낙뢰는 주변보다 낮은 영역에서 집중분포하였으며 특성인자 BTD($3.8 \mu\text{m}$, $10.5 \mu\text{m}$), BTD($6.3 \mu\text{m}$, $10.5 \mu\text{m}$), BTD($13.3 \mu\text{m}$, $10.5 \mu\text{m}$)에서는 낙뢰는 주변보다 높은 영역에서 주로 관측되었음.
- 위성기반 특성인자의 통계적 특성분석 결과에서 낙뢰 영역의 T_B $10.5 \mu\text{m}$ 와 Ref_38는 비낙뢰 영역에 비해 낮은 값 구간에서 빈도가 집중적으로 분포하였고 낙뢰 영역의 BTD 특성인자는 비낙뢰 영역의 BTD 특성인자들에 비해 높은 온도차 구간에서 밀집된 빈도 분포 패턴을 보여줌.
- 결론적으로 시간경향성을 나타내는 특성인자에서는 한반도 지역에서 발생한 낙뢰에 대한 특성을 분석하기 어려운 한계점이 있었지만 Ref_38과 T_B $10.5 \mu\text{m}$, BTD 인자는 낙뢰 특성 분석에 유용하게 활용할 수 있음을 나타냄.
- KLAPS 수치모델을 활용한 낙뢰 예측기법에서 생산되는 특성인자를 이용하여 낙뢰지역의 특성을 조사하였음.
- 특성인자들은 대지와 구름 방전을 구분하는데 활용되는 낙뢰자료와 KLAPS 예측장에서

생산되는 기초변수들을 이용하여 산출하였으며 역학적 변수와 구름 운정고도 정보, 0 ℃ 이하인 구름층 두께 등으로 구성되었음.

- 낙뢰영역에 대한 특성인자의 공간분포 분석 결과로 PRI와 SHR 인자는 비낙뢰 영역에 비해 상대적으로 높게 나타났으며 CAPE와 SI는 비낙뢰 영역에 비해 낮게 산출되었음.
- 장기간 여름철 낙뢰사례를 이용한 특성변수들의 통계적 특성 결과로 다양한 특성인자들 (예: SHO, LI, SWEAT, SI, TTI, PRI, GZ500, PW, PWU, TD850, TD700, CTT, CTH, CTP)이 낙뢰 예측에 활용할 수 있는 가능성을 보여주었음.
- 머신러닝 방법인 랜덤 포레스트 방법을 이용하여 KLAPS 낙뢰 예측을 수행하였음.
- KLAPS 분석장에 적용한 결과 실제 낙뢰 발생 지역과 랜덤 포레스트로 예측한 낙뢰 발생 영역이 비교적 일치하였으며, 낙뢰 발생확률을 0.9 이상으로 높게 예측하였음.
- 2022년 6~8월까지의 KLAPS 예측장 자료에 적용하였을 때 1시간 선행 예측까지 랜덤 포레스트의 낙뢰 발생 예측 영역과 실제 낙뢰 발생 영역이 높은 일치성을 보였음.
- 6시간 선행 예측까지 랜덤 포레스트로 비교적 정확한 낙뢰 발생 예측함을 확인했으며, 이를 통해 머신러닝을 활용한 낙뢰 예측기법 개발의 가능성을 확인하였음.

1. 개요

기상청은 대국민 예보서비스의 품질 향상을 위해서 10분 간격의 빠른 갱신주기의 초단기 예측시스템을 2019년 7월에 현업화 하였고, 2020년 2월에는 예보업무와 근무체계 개선 계획을 수립하여 빠르게 실황에 대응하는 상세예보를 제공할 계획을 수립하여 추진 중에 있다. 10분 간격으로 빠르게 갱신되는 초단기 예측시스템은 2019년 7월 현업화 이후 레이더 실황예보와 함께 대국민 초단기 예보 서비스의 근간이 되는 모델로서, 기상청의 현업관측자료 활용 확대 및 한국형 물리과정을 이식하여 모델을 개선하였다.

기상청에서는 최근 여름철(2020~2021)의 초단기 예측 시스템의 예보서비스 결과를 토대로, 위험기상에 대한 초단기 모델의 역학적, 물리적 예측 특성을 심층 분석하여 향후 모델 개선의 기반을 마련하고자 한다. 이를 위하여 2020년과 2021년 여름철에 발생한 강수 사례들 중 발생 기작에 따라 대표 사례를 선정하고, 현상별로 초단기 예측시스템이 강수 발생의 핵심 구조를 모의하는 성능을 평가하여 개선 방향을 제안한다. 또한, 재난방재를 위해 낙뢰에 대한 예측기술을 개발하여 향후 초단기 예보서비스 확대의 기반 기술을 개발하고자 한다.

본 연구는 1) 초단기 예측시스템의 여름철 강수예측 특성을 분석하고, 2) 초단기 예측모델의 강수 물리과정 예측 특성을 분석하며, 3) 초단기 통계적 낙뢰 예측기법을 개발하는 것을 목표로 한다.

2. 사업 수행 내용

2.1. 초단기 예측시스템의 여름철(2020~2021) 강수 예측 특성 분석

2.1.1. 기상청 초단기예측시스템(KLAPS)의 여름철 역학적 모의 특성분석

가. 배경 및 여름철 강수 유형 분류

우리나라 여름철 강수는 보통 중규모 크기(수백 km 이내) 및 중관규모 크기(수천 km 이내)의 저기압과 열대저기압에 의해 발생하며, 한여름 북태평양 고기압 영향권 내에서는 강한 대류성 강수가 지역적으로 발생한다. 우리나라 강수량 대부분은 여름철에 집중되는 특징을 보이며, 강수에 의한 피해도 여름철에 더욱 집중되는 경향을 보인다. 따라서 이러한 여름철에 집중되는 강수에 의한 피해 경감과 수치모델의 여름철 강수 예측 향상을 위해서 우리나라 여름철 강수의 역학적 모의 특성을 이해하고 분석하는 것이 필요하다. 이에 본 연구에서는 기상청 초단기 예측시스템의 여름철 역학적 모의 특성 분석을 수행하기 위해 2020년과 2021년에 대해 우리나라 여름철 강수를 중관배경장의 영향을 받는 경우와 그렇지 않은 경우로 구분하고, 그림 2.1.1.1의 모식도와 같이 다섯 가지의 유형(저기압 통과 및 전면 수렴형, 저기압 전선형, 하층 제트형, 장마 전선형, 고기압 영향권 내 대류성 강수)으로 구분하였다.

우선 중관배경장의 영향을 받는 유형으로, 저기압 통과 및 전면 수렴형은 저기압 전면의 온난이류와 저기압 중심으로의 수렴으로 인한 상승에 의해 강수가 시작되는 형태로 대체로 저기압 중심에서 진행 전면까지 강수 폭 넓게 발달하는 특징을 보인다(그림 2.1.1.1a). 저기압 전선형은 주로 저기압 중심에서 남서쪽으로 긴꼬리 형태로 확장되는 전선 기압계가 구름영역과 함께 나타나며, 저기압 중심 전면과 전선대의 전면에서 강수가 발달한다(그림 2.1.1.1b). 긴꼬리 형태를 보이는 지역에서는 대체로 좁고 강한 강수가 발달하며, 이 지역에서는 뚜렷한 온도 경계 및 풍향급변으로 인한 수렴을 통해 상승기류가 발달하는 특징이 있다. 하층 제트형 강수는 고기압과 저기압의 서로 다른 흐름이 만나 합류영역(confluent zone)을 만들고, 저기압 영역까지 강수구름을 형성하는 특징을 가지고 있다. 이러한 합류영역의 하층에서는 약 10 m/s 이상의 강한 풍속이 발견되는데, 이를 하층제트라고 부른다(그림 2.1.1.1c). 이러한 하층제트형

강수는 강수영역이 대체로 좁고 강한 강수가 발달하는 특징을 가지고 있다. 본 연구에서 분류한 종관배경장의 영향을 받는 마지막 유형으로는 장마 전선형이다. 이 강수 유형은 북태평양 고기압과 상대적으로 작은 규모의 고기압 사이 경계면에서 동서로 확장한 강수대가 형성되고 오래 정체하는 것이 많이 알려진 전형적인 특징이다(그림 2.1.1.1d). 그러나 이러한 전형적인 특징 외에도 확장한 북태평양 고기압의 경계를 따라 저기압 및 아열대 흐름이 북태평양의 경계를 따라 한반도로 유입되는 경우, 동서로 확장된 정체전선에 의한 강수대를 형성하는 경우가 있다.

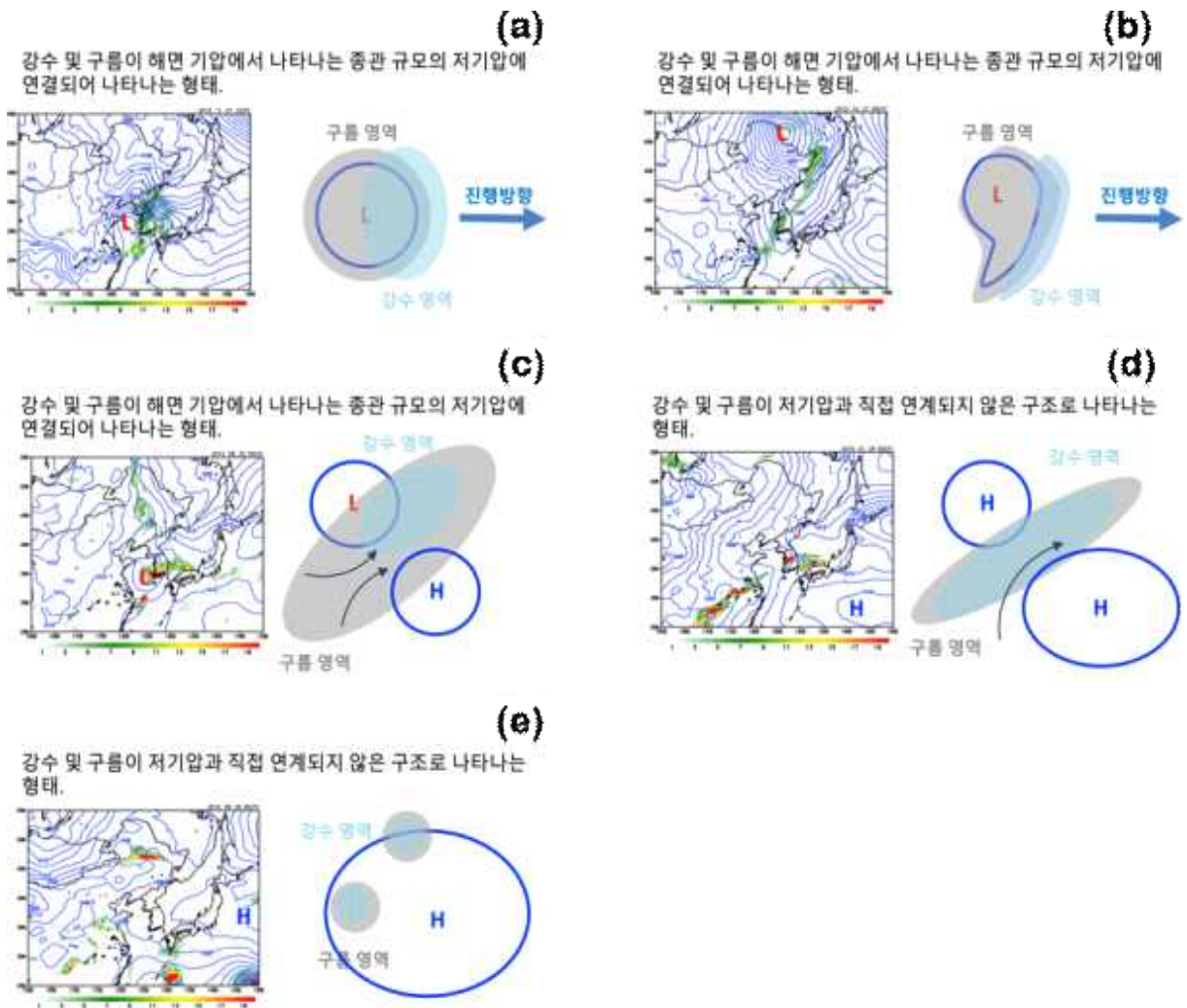


그림 2.1.1.1. 종관배경장의 영향을 받는 강수유형(a-d)와 영향을 받지 않는 강수유형 (e): (a) 저기압 통과 및 전면 수렴형, (b) 저기압 전선형, (c) 하층 제트형, (d) 장마 전선형, 그리고 (e) 고기압 영향권 내 대류성 강수

한편, 위의 네 가지 유형과 달리 종관배경장의 영향을 받지 않는 강수유형으로는 여름철 북태평양 고기압의 영향 내에서 발달하는 중규모 이하 수평규모를 가진 대류성 강수가 대표적인 예이다. 일반적으로 이러한 강수 형태는 고기압권 내의 기압 및 온도 경계면이 형성되지 않은 환경에서 지표면 부근의 부등가열로 인해 열적 불안정도가 증가함에 따라 강한 상승운동에 의해 발달하는 강수를 의미한다(그림 2.1.1.1e).

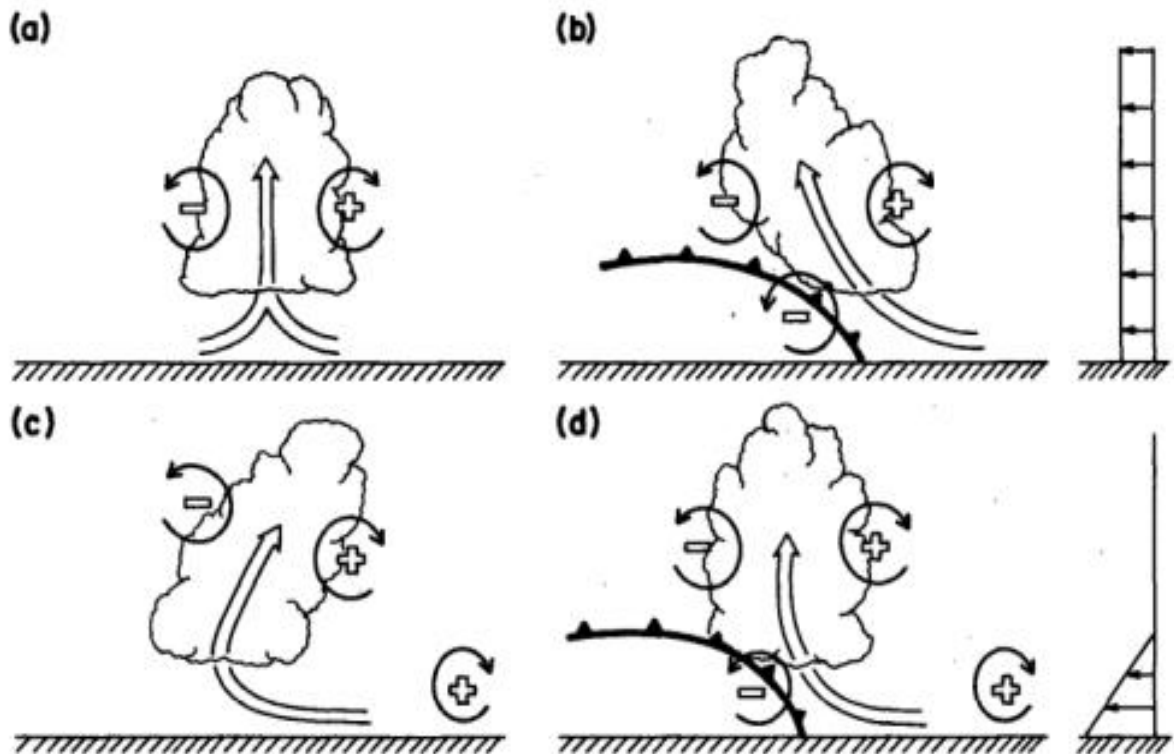


그림 2.1.1.2. 부력이 있는 상승기류가 연직시어 및 차가운 공기의 침투에 의해 형성됨을 보여주는 모식도 (Rotunno et al. 1988): (a) 열적으로 발달하는 세포, (b) 하층의 차가운 공기의 침투로 형성된 상승기류로 차가운 공기가 있는 음의 상대와도 쪽으로 기울어져 발달함, (c) 연직시어에 의해 발달한 상승기류는 양의 상대와도 쪽으로 기울어져 발달함, 그리고 (d) 연직시어와 하층의 차가운 공기 침투 모두가 고려된 환경에서 서로의 효과가 상쇄되어 상승기류는 열적으로 발달하는 세포와 유사하게 발달함

이러한 대류성 강수는 그림 2.1.1.2의 모식도에서와 같이 여러 환경에 따라 발달 구조가 달라질 수 있다. 우선 연직시어와 하층에서의 차가운 공기(cold pool)의 침투가 없는 환경에서 상승기류는 연직방향의 축대칭 형태를 보인다(그림 2.1.1.2a). 이러한 환경은 열적으로 매우 이상적인 환경에서의 대류구름의 형성과 발달을 설명할 수 있다. 그러나 실제 대기환경에서는 연직시어 및 차가운 공기의 침투로 인해

대류구름이 수동적으로 또는 기계적 상승으로 발달하는 경우가 존재한다. 보통 강수에 의해 발생한 지표면의 차가운 공기는 따뜻한 공기보다 상대적으로 밀도가 크고 이동속도가 빠르기 때문에 따뜻한 공기를 기계적으로 상승시킬 수 있으며, 이 경우 대류구름은 음의 상대와도 쪽으로 기울어져 발달하는 경향을 보인다(그림 2.1.1.2b). 이와 달리 연직시어에 의해 발달하는 대류구름은 연직시어의 하측으로 기울어져 강한 상승기류와 함께 양의 상대와도가 발달하는 특징을 보인다(그림 2.1.1.2c). 연직시어와 차가운 공기의 침투가 모두 고려된 경우, 대류구름은 열적으로 발달하는 대류구름과 유사하게 연직방향으로 좌우대칭 형태로 발달하는 특징을 보여준다(그림 2.1.1.2d).

나. 강수 유형에 따른 기상청 초단기 예측시스템의 초기장

본 연구에서는 각 여름철 한반도 강수 유형에 대해 우리나라에 영향을 주기 시작하는 최소 3시간 전의 수치모델의 초기장과 12시간 예측장을 이용하여 기상청 초단기 예측시스템의 여름철 강수 예측 특성과 물리과정 예측특성을 분석하고자 한다. 표 2.1은 2020-2021년의 여름철 강수 유형, 초기장 시간, 그리고 특징을 요약하였다. 이러한 강수 사례 선정은 기상청 초단기 예측시스템의 초기장에 대한 예측성을 정량적으로 검증할 수 있으며, 또한 초단기 예측시스템의 자료동화에 대한 효과도 검증할 수 있을 것으로 생각된다.

구분	강수 유형	초기장 시간 (UTC)	특징
중관배경장의 영향을 받는 경우	저기압 전면 수렴	2020.06.29. 0200~0400	저기압 전면의 온난 이류 및 중심의 수렴에 의한 상승
		2021.06.14. 1500~1700	
	저기압 전선	2020.07.19. 0200~0400	전선 상의 온도 경계면 및 풍향 급변으로 인한 수렴에 의한 상승
		2021.09.20. 0800~1000	
	하층 제트	2020.08.14. 1600~1800	흐름의 합류로 인한 경계면 형성 및 상승 유도
		2021.08.28. 1000~1200	
장마전선	2020.07.06. 0500~0700 2021.07.03. 0000~0200	고기압 사이의 반대흐름의 합류로 경계면 형성 및 상승 유도	
중관배경장 영향을 받지 않는 경우	고기압 영향권 내 대류성 강수	2020.07.17. 0400~0600	중관규모의 경계면이 형성되지 않은 환경에서 열적 불안정도에 의해 형성
		2021.07.09. 1500~1700	

표 2.1.1.1 2020-2021년 여름철 한반도 강수 유형 분류 및 사례 선정

다. 저기압 전면 수렴형

종관배경장의 영향을 받는 대표 사례로 저기압 전면 수렴형의 강수 발달 과정을 분석하였다. 그림 2.1.1.3은 2020년 6월 29일 발생한 저기압 강수 사례의 기압과 강수의 3시간 간격 발달 및 이동을 분석한 것이다. ERA5 재분석에서 산둥반도 남쪽에서 서해를 거쳐 한반도 호남 지역으로 저기압 중심이 이동하는 구조를 확인할 수 있다. 2020년 6월 29일 06 UTC에는 저기압 전면에서 형성된 강수가 한반도에 영향을 주기 시작했으며 제주 및 남해에서 강한 강수가 나타나기 시작하는 것을 볼 수 있다. KLAPS는 저기압 중심 위치와 강수 분포가 관측과 유사하게 나타내는 것을 확인할 수 있다. 09 UTC에는 저기압의 이동 전면인 서해상에서 강수의 핵이 발달하며 남해안으로 접근하는 강수 중심이 발달하는 것을 볼 수 있다. KLAPS는 호남 지역 남서쪽 해안에서 강수 중심이 크게 발달하는 것을 볼 수 있는데 관측에서 보인 저기압 중심 전면의 서해안 강수는 약하게 모의하는 것을 확인할 수 있다. 12 UTC에는 저기압이 한반도로 접근하면서 저기압 중심의 북동쪽에 해당하는 호남 서해안에서 강수 중심이 발달하는 것으로 나타났으나, KLAPS는 저기압 중심의 남동쪽에 위치하는 남해안에서 강수가 크게 발달하는 것으로 모의하였으며 저기압 북동쪽의 서해안 강수는 약하게 모의하는 특징을 보였다.

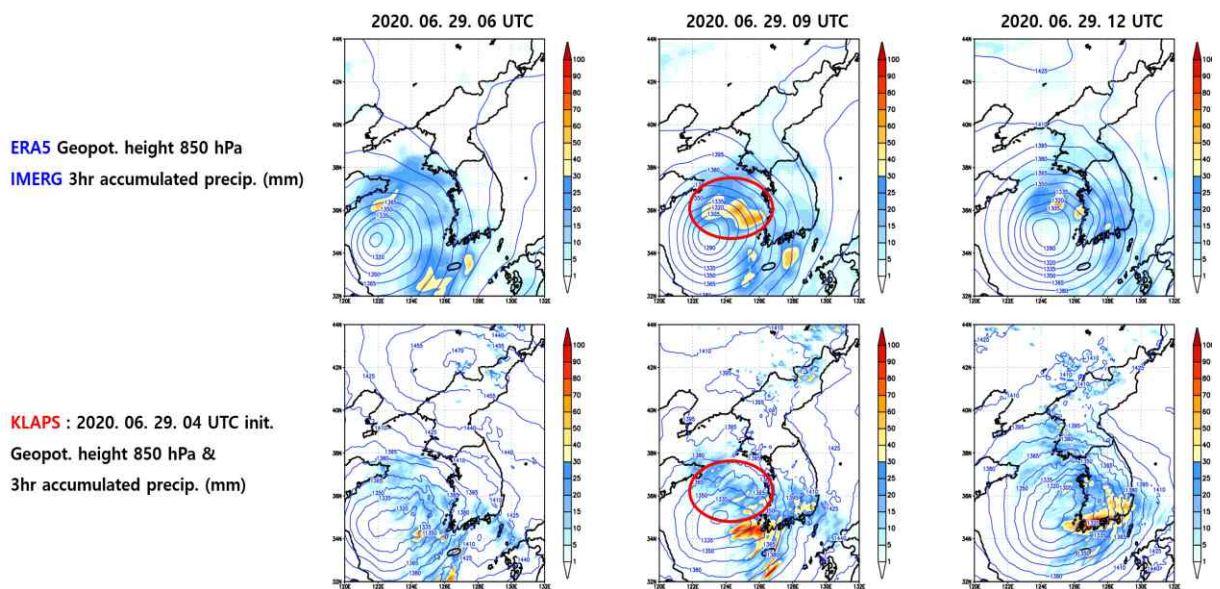


그림 2.1.1.3. 2020년 6월 29일 강수 사례의 850 hPa 지위고도(파란선, gpm)와 3시간 누적 강수(음영, mm). 윗줄은 ERA5 분석장의 지위고도와 IMERG 강수이며 아래줄은 KLAPS의 예측장.

그림 2.1.1.4는 강수 발생의 주요 기작인 상승 운동의 구조를 표현한 것이다. 강수 분포에서 보인 것과 같이 ERA5 재분석자료에서는 저기압 중심의 북동쪽에서 상승 중심이 나타나며 12 UTC에서는 저기압이 한반도 남서쪽에 접근하면서 남해안에서도 상승이 발달하는 특징이 나타난다. KLAPS는 전반적인 상승 구조는 ERA5와 유사하게 표현되는 것을 확인할 수 있다. 12 UTC의 KLAPS 강수가 저기압 중심의 북동쪽 서해안 강수핵을 적절히 모의하지 못한 것과는 대조적으로 상승 구조는 적절히 표현하고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 강수를 촉발시키는 상승 운동의 모의 실패가 아닌 다른 요인의 모의 능력 저하가 강수의 과소모의하는 원인이라는 것을 의미한다고 판단 할 수 있다.

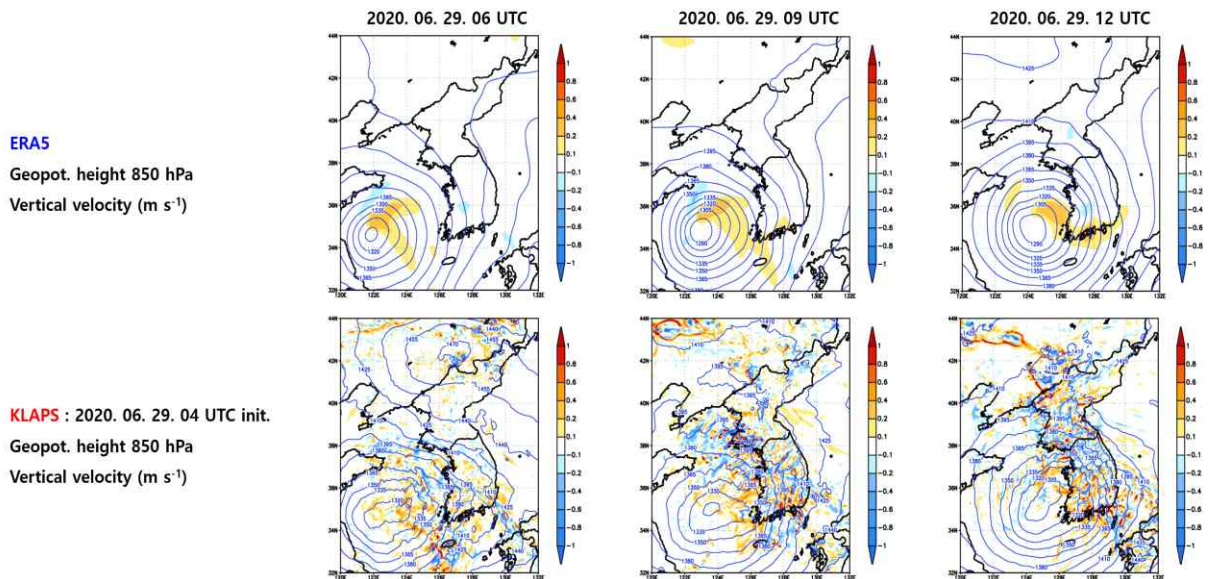


그림 2.1.1.4. 2020년 6월 29일 강수 사례의 850 hPa 지위 고도(파란선, gpm)와 연직 속도(음영, $m s^{-1}$). 윗줄은 ERA5 분석장이며 아랫줄은 KLAPS의 예측장.

그림 2.1.1.5는 강수를 형성하는데 직접적인 영향을 미치는 수분 수송과 바람 구조를 나타낸 것이다. 한반도를 포함한 중위도 종관 강수 시스템은 수분의 절대량도 중요하지만 수평적인 수분 수송량이 강수 형성에 중요한 영향을 미치기 때문에 연직 방향으로 적분된 수증기 수송량을 분석하였다. ERA5에서는 저기압 중심의 전면에서 주로 강한 수증기 수송이 나타나며 전면의 남쪽에서 최대 수송이 보이고 전면의 북쪽에서도 강한 수송이 동반되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 KLAPS에서는 저기압 전면의 남쪽에서 유입되는 수증기는 잘 표현하고 있지만 상대적으로 전면의 북쪽에 유입되는 수증기의 양을 과소모의하고 있음을 알 수 있다. 이는

09 UTC에서 저기압 북동쪽에서 상승 운동을 모의하였지만 강수를 과소모의한 직접적인 원인으로 보이며, 12 UTC에서도 동일한 문제를 보인다. 또한 12 UTC의 남해안에서 나타난 강수 과대모의는 KLAPS가 수증기 수송을 과대 모의하면서 발생하는 것으로 판단하였다.

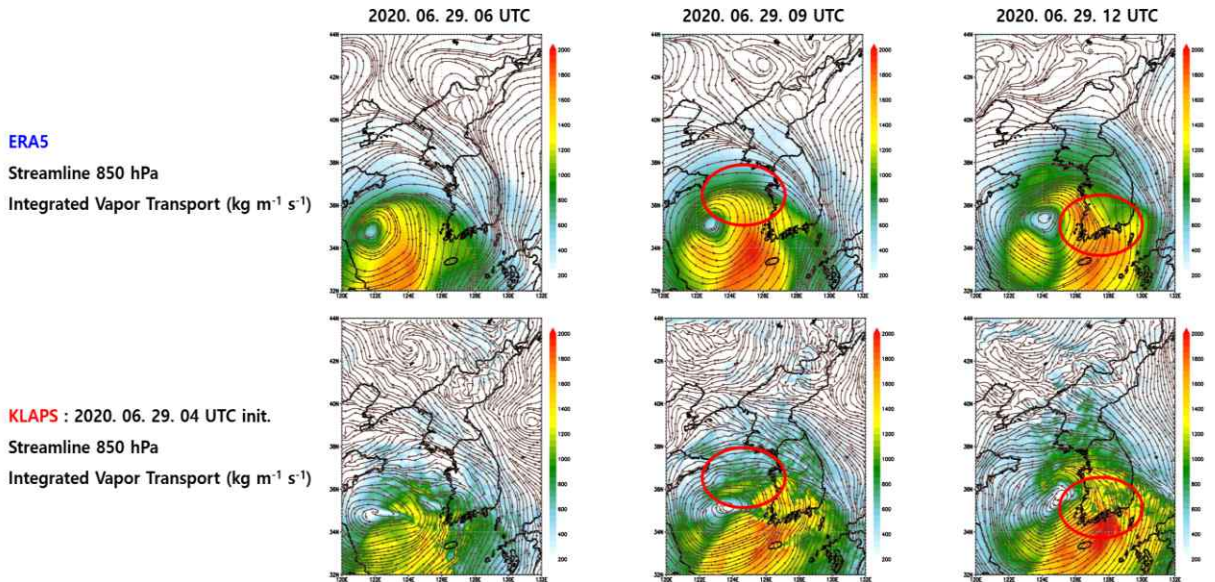


그림 2.1.1.5. 2020년 6월 29일 강수 사례의 850 hPa 유선도와 1000-300 hPa 누적된 수증기 수송량. 윗줄은 ERA5 분석장이며 아랫줄은 KLAPS의 예측장.

라. 저기압 전선형 (한랭전선)

한반도 북쪽으로 저기압 중심이 지나고 남쪽으로 확장된 전선에 동반된 강수가 한반도 중부와 남부에 영향을 미친 사례인 2020년 7월 19일 사례를 분석하였다. 그림 2.1.1.6에 보인 기압 구조와 강수는 한반도 북쪽으로 저기압 중심이 지나면서 남서쪽으로 확장한 전선이 한반도 중부와 남부에 강수를 발생시키는 것을 보인다. 이 사례는 기압구조만으로 전선이 명확하게 파악되지 않는 것을 볼 수 있으며 나타난 강수의 폭이 좁아 종관 전선 구조보다는 중규모 전선 구조(일부 연구에서는 스콜라인으로 분류하기도 함)로 분석된다. KLAPS는 관측에서 보인 강수의 구조와 위치를 잘 표현하고 있지만 관측에 비해 강수량을 강하게 모의하는 편차를 보인다. 하지만 관측에서 표현된 것과 같이 중규모의 강수 밴드 폭은 적절히 표현하는 모의 능력을 보이고 있다.

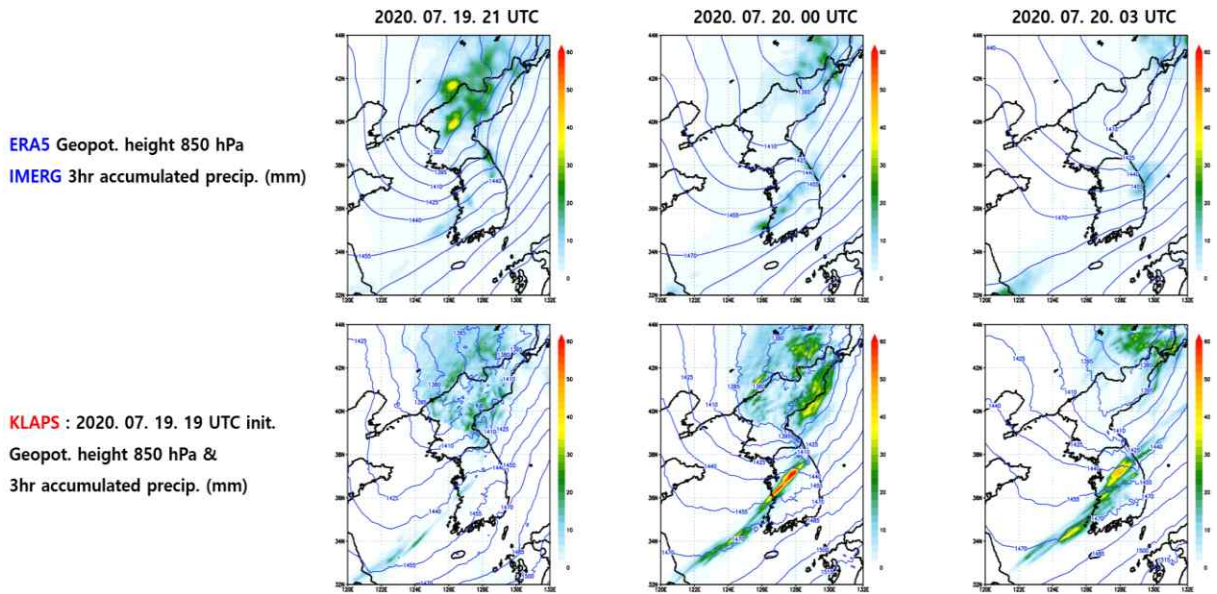


그림 2.1.1.6. 2020년 6월 29일 강수 사례의 850 hPa 지위고도(파란선, gpm)와 3시간 누적 강수(음영, mm). 윗줄은 ERA5 분석장의 지위고도와 IMERG 강수이며 아래줄은 KLAPS의 예측장.

전선의 연직 단면 구조를 그림 2.1.1.7에 나타내었다. 서쪽에서 접근하는 한랭한 공기가 동쪽의 상대적으로 따뜻한 공기 아래로 관입하는 구조가 분석장에서 나타나고 있는데 KLAPS의 분석장 역시 이를 잘 표현하고 있다. 하지만 재분석에서 명확한 상승 운동의 구조가 잘 표현되고 있지 않음에 비해 KLAPS는 재분석보다 강한 상승의 구조를 명확하게 모의하는 것을 볼 수 있다. 이는 전선면에서 상당운위의 경도를 KLAPS가 크고 연직으로 발달한 형태로 나타내는 것 때문으로 분석된다. 이는 모델의 모의 성능이 떨어진다고 단편적으로 판단하기는 다소 어렵다고 생각되는데, 이 사례의 규모가 작아서 약 25km의 수평 해상도를 가지는 재분석자료에서 연직 구조를 충분히 표현하기 어렵지만 5km 해상도를 가지는 KLAPS에서는 고해상도의 장점에 의해 상세한 구조가 표현된 것으로 생각된다. 이를 명확하게 파악하기 위해서는 KLAPS 수준의 고해상도 관측기반 분석장이 필요한 것으로 보인다. 뒤에서 언급되겠지만 지상 관측 자료와 비교해 보면 IMERG 역시 해당 강수를 과소 탐지하는 것으로 파악되며, 이는 KLAPS가 중규모 현상의 모의에 장점을 가지는 점을 시사한다고 할 수 있다.

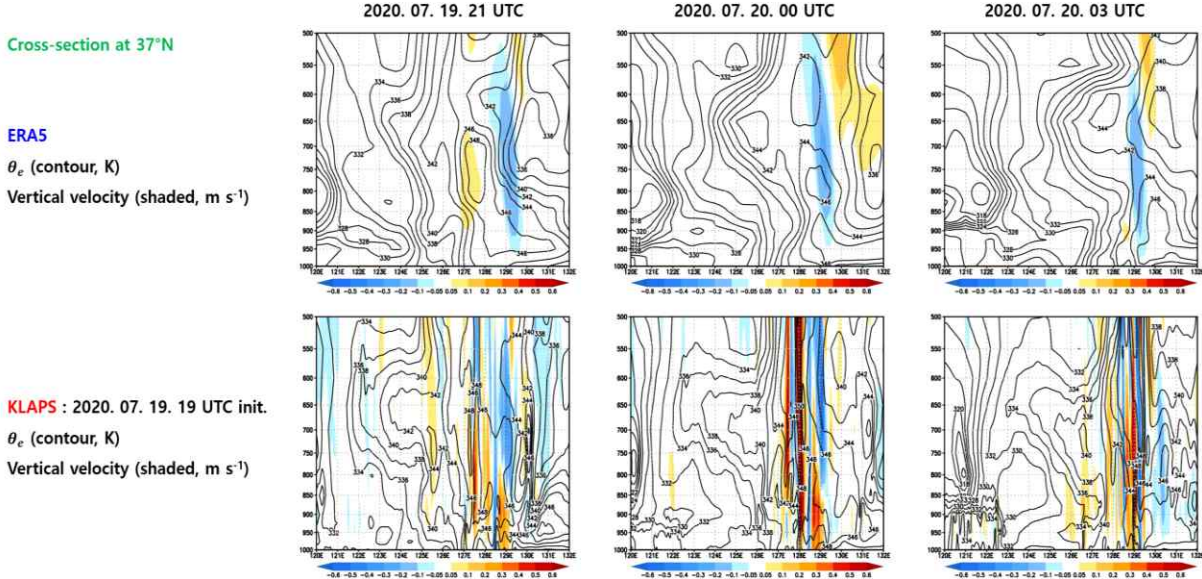


그림 2.1.1.7. 2020년 6월 29일 강수 사례에서 북위 37도 선을 기준으로 표현한 상당 온도(검은선, K)와 연직 속도(음영, $m s^{-1}$)의 동서-연직 단면도

마. 하층제트

여름철 한반도에서 가장 빈번하게 집중호우를 발생시키는 하층제트의 사례로 2020년 8월 14일 강수 사례를 분석하였다. 그림 2.1.1.8에 표현된 것과 같이 남쪽의 북태평양 고기압이 위치하는 환경에서 북쪽으로 종관 저기압이 지나면서 고기압과 저기압이 만나는 경계에서 합류로 인하여 발생한 경계면에서 강수가 형성되었다. IMERG 강수는 14일 21 UTC에 동서로 늘어난 강수 밴드가 한반도 중부 지역으로 유입되기 시작하여 15일 00 UTC에 서울, 경기 지역에서 강수 중심이 발달하며 이후 03 UTC에 밴드 형태만 유지하고 강수는 소멸하는 과정을 보인다. KLAPS는 강수 밴드의 남북 위치는 잘 표현하고 있으며 14일 21 UTC에 경기만 지역에서 다소 과대 모의하였지만 강수 중심이 발달하는 것을 잘 모의하고 있다. 15일 00 UTC에는 한반도 중부지역에서 동서로 확장된 강수 밴드를 KLAPS가 잘 모의하지만 강수의 핵을 경기만 해상에서 강하게 모의하고 서울, 경기 지역의 내륙 강수는 상대적으로 약하게 모의하는 것을 볼 수 있다. 이후 15일 03 UTC에서는 내륙 강수는 점차 약화되는 구조를 보이고 있지만 여전히 경기만 서쪽으로의 해상에서 강한 강수가 유지되는 것을 보인다. 이는 모든 하층제트 구조에서 보이는 특징은 아닌 것으로 분석되는데, 강수 밴드가 경기만을 지나는 사례에 대하여 KLAPS가 경기만 해상에서 강한 강수를 모의하고 육상으로의 유입은 상대적으로 약하게

표현하는 특징을 보인다.

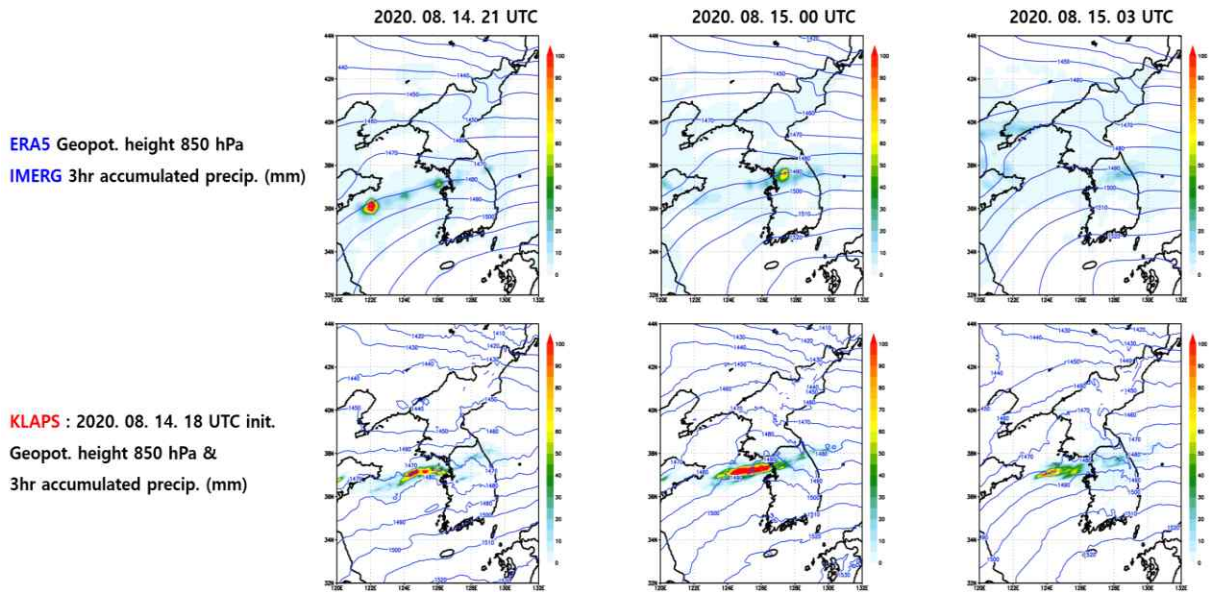


그림 2.1.1.8. 2020년 8월 14일 강수 사례의 850 hPa 지위고도(파란선, gpm)와 3시간 누적 강수(음영, mm). 윗줄은 ERA5 분석장의 지위고도와 IMERG 강수이며 아래줄은 KLAPS의 예측장.

그림 2.1.1.9는 유선과 수분 수송을 표현하였다. 기압계에서 분석한 것과 같이 북쪽의 저기압성 흐름과 남쪽의 고기압성 흐름의 경계를 통해 수증기 수송이 주로 나타나며, 이 구역에서 강수가 발생하는 것을 확인할 수 있다. KLAPS의 구조에서 특징적으로 나타나는 것은 경기만 지역에서 850 hPa의 흐름이 동진하며 남북으로 진동하는 난류성의 구조를 보이는 것이다. 이 구조에서 수분이 내륙으로 전달되지 못하고 해상에서 끊어지는 형태를 보인다. KLAPS가 경기만 지역에서 하층 온도를 재분석에 비해 낮게 모의하는 특징을 보이는데 이러한 흐름이 온도의 cold pool 구조와 연계되는 것으로 추정되며, 이 지역에서 강한 상승으로 강수를 크게 발달시키는 것으로 판단된다. 또한 경기만의 cold pool은 육지와 큰 온도 대비를 보이는데, 이 구조는 해안 경계에서 강한 경계면을 발생시키고 하층 대기의 흐름이 해안 경계에서 육상으로 진행하지 못하게하는 주된 원인으로 판단된다.

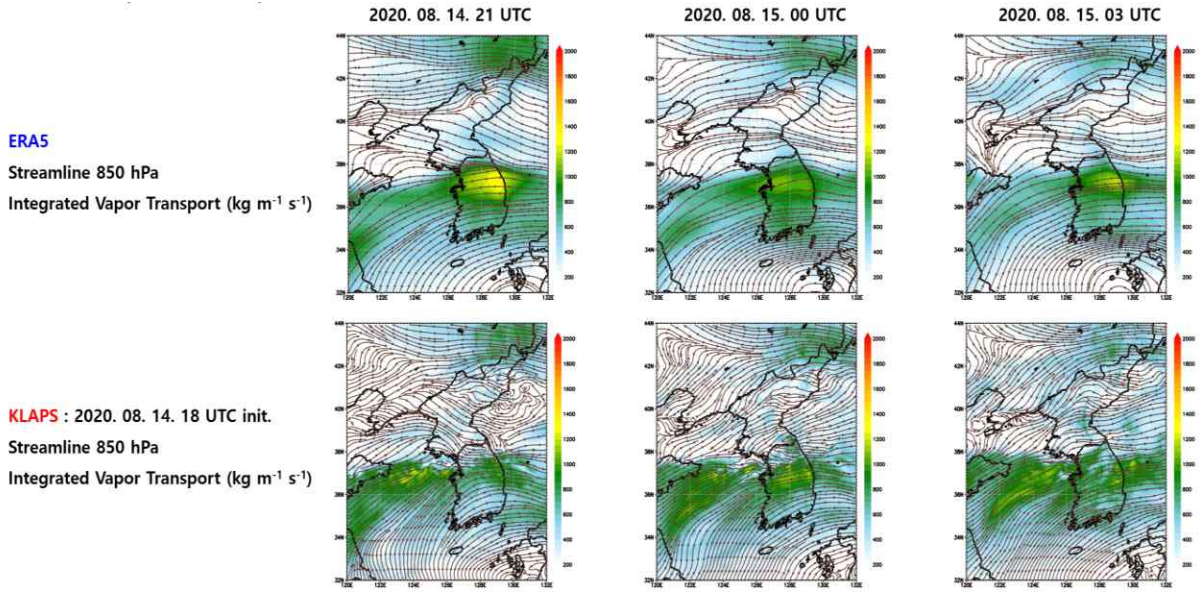


그림 2.1.1.9. 2020년 8월 14일 강수 사례의 850 hPa 유선도와 1000-300 hPa 누적된 수증기 수송량. 윗줄은 ERA5 분석장이며 아랫줄은 KLAPS의 예측장.

바. 장마전선

그림 2.1.1.10은 2020년 7월 6일의 사례를 나타낸 것이다. 주된 종관 정체전선은 제주 남쪽으로 위치하여 일본 지역에 강수를 발생시키고 있는데 6일 12 UTC에서 15 UTC에 영남 지역에서 중규모의 강수 밴드가 발생하였다. KLAPS는 IMERG에 비해 강한 강수를 모의하고 있는데 앞선 사례와 같이 작은 규모의 현상에 대한 강한 강수 모의 특징이 나타난 것으로 판단된다. 강수량의 과대모의를 제외하고 강수의 위치나 발생 시기는 KLAPS가 잘 모의하고 있음을 확인할 수 있다.

그림 2.1.1.11은 850 hPa 흐름과 풍속을 표현한 것으로, 한반도 남쪽에 위치한 종관 강수 밴드에서 강한 풍속이 하층제트와 같은 구조를 가지는 것을 볼 수 있으며 영남 지역에서도 이보다 작은 규모로 풍속이 강한 구역이 나타나고, 이 경계의 북쪽에서 강수가 발생한 것을 볼 수 있다. KLAPS는 이러한 풍속 구조를 잘 나타내고 있으며 이는 강수 발생 시기와 위치를 성공적으로 모의한 배경으로 분석된다.

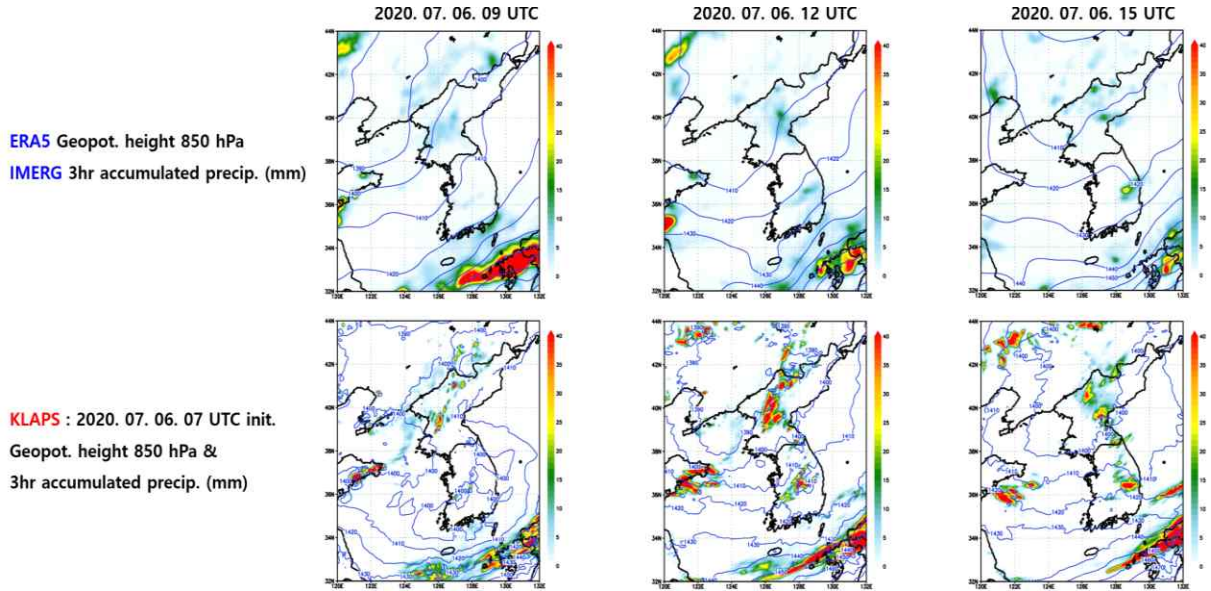


그림 2.1.1.10. 2020년 7월 6일 강수 사례의 850 hPa 지위고도(파란선, gpm)와 3시간 누적 강수(음영, mm). 윗줄은 ERA5 분석장의 지위고도와 IMERG 강수이며 아래줄은 KLAPS의 예측장.

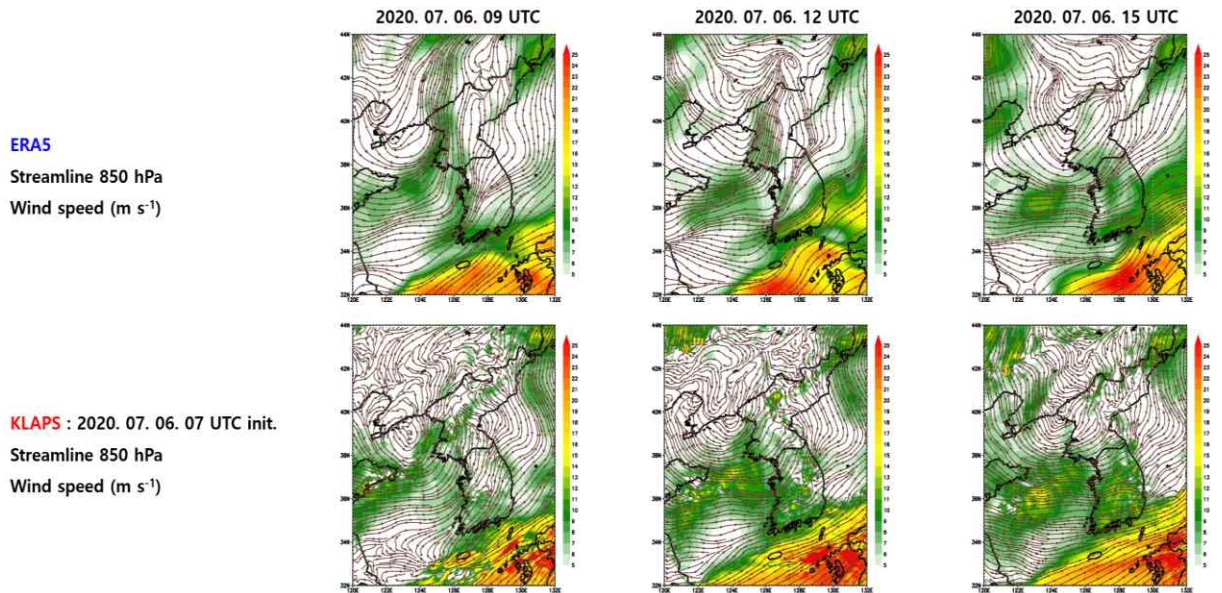


그림 2.1.1.11. 2020년 7월 6일 강수 사례의 850 hPa 유선도와 풍속(음영, $m s^{-1}$). 윗줄은 ERA5 분석장이며 아랫줄은 KLAPS의 예측장.

사. 대류성 강수

한반도 지역이 고기압 권역에 놓이게 되는 환경에서는 기압 경도가 작아져 종관 강제력의 영향이 작은 구조를 가지게 된다. 이러한 경우에 열적 불안정도가 증가하면 중규모의 대류 세포들이 발달하여 강수가 발생할 수 있다. 그림 2.1.1.12에서 보인 기압 배치는 한반도 지역이 확장한 고기압의 영향권에 들어 기압선의 간격이 넓은, 기압 경도가 작아 종관 강제력이 작은 상황을 설명하고 있다. IMERG는 한반도 내륙에서의 약한 강수를 표현하고 있는데 KLAPS는 이에 비해 강하게 발달한 대류성 강수를 모의하고 있다. 이렇게 나타나는 강수는 중규모 현상 중에서도 규모가 작은 것으로 IMERG와 ERA5가 표현하기에 한계가 있는 것을 보이며, KLAPS는 강수량은 다소 과다 모의하는 경향이 있지만, 이러한 작은 규모의 현상을 적절히 표현할 수 있는 능력이 있음을 보인다고 분석된다.

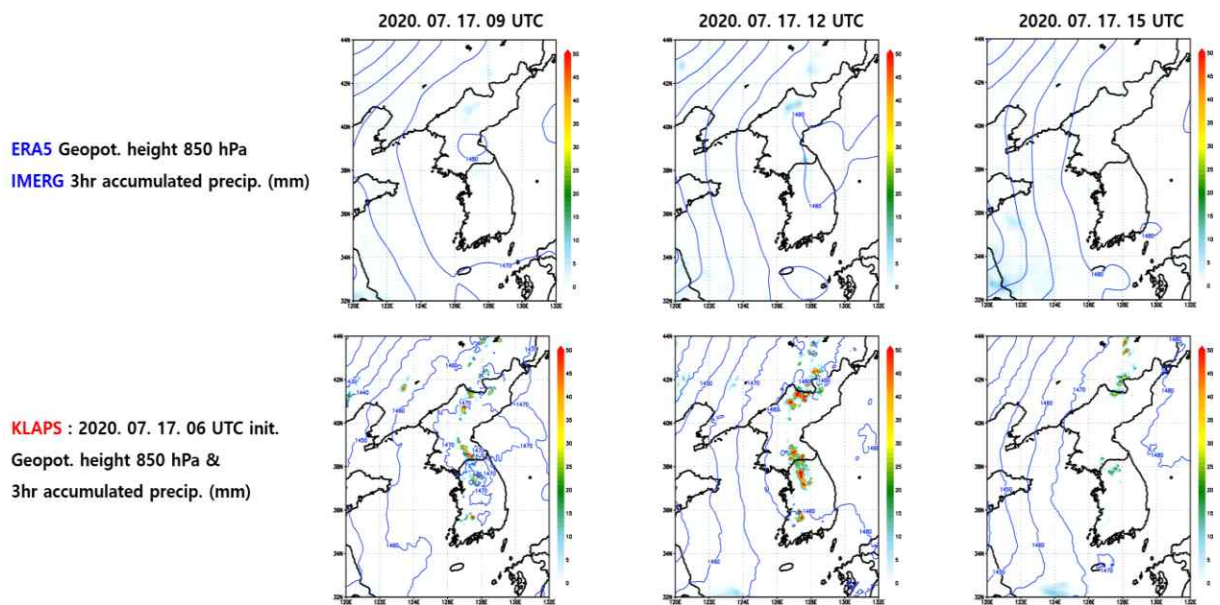


그림 2.1.1.12. 2020년 7월 17일 강수 사례의 850 hPa 지위고도(파란선, gpm)와 3시간 누적 강수(음영, mm). 윗줄은 ERA5 분석장의 지위고도와 IMERG 강수이며 아래줄은 KLAPS의 예측장.

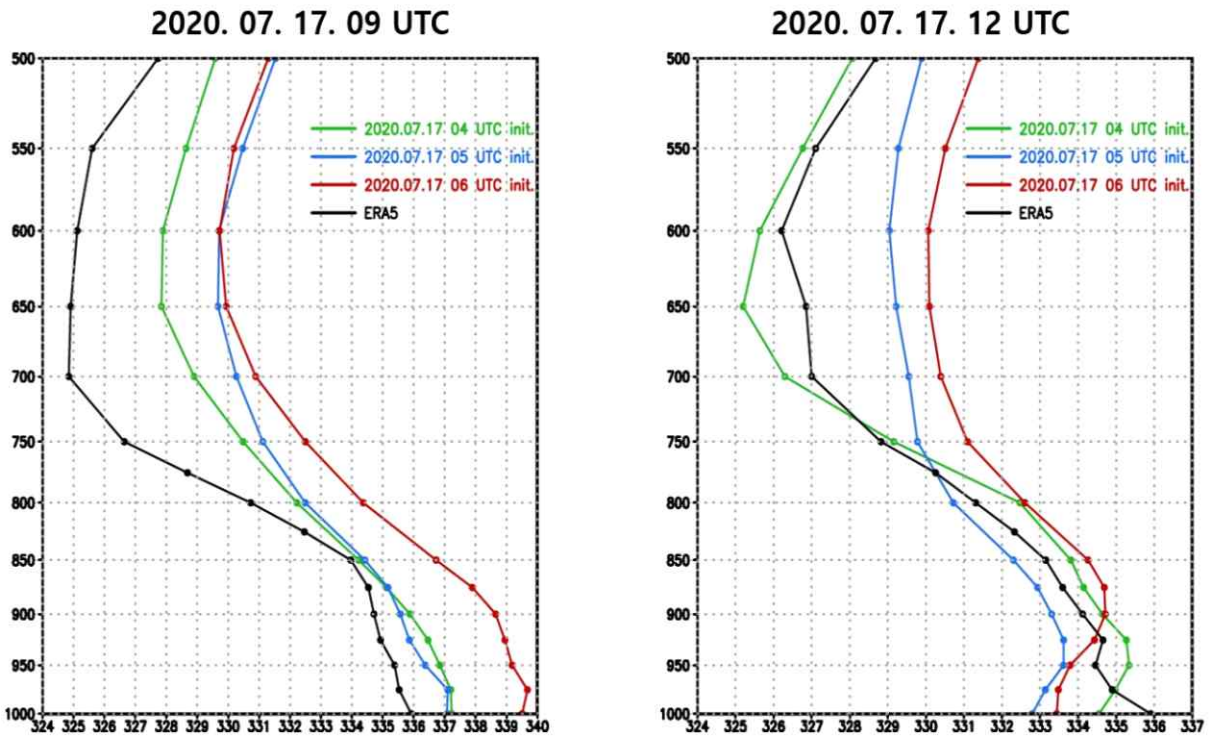


그림 2.1.1.13. 2020년 7월 17일 강수 사례에 대한 한반도 중부 지역(126.5-128°E, 37-38.5°N)의 영역 평균된 상당온위(K)의 연직 분포

대류성 강수의 주요 강제력이 열적 불안정도이기 때문에 한반도 중부 지역에 대하여 상당온위의 연직 분포를 분석하였다(그림 2.1.1.13). 강수가 발생하기 전인 09 UTC에 KLAPS가 ERA5에 비해 전반적으로 큰 상당온위를 보이는 것을 볼 수 있다. 상당온위는 온도와 수분의 정보를 포함하기 때문에 강수 형성의 배경을 설명한다는 점에서 KLAPS가 강수 형성에 유리한 구조를 보이는 것으로 판단된다. 강수가 발생하기 시작하는 고도인 대류권 하부(950-850 hPa)에서는 KLAPS가 연직 상당온위의 감률을 더 크게 고려함으로써 더 불안정한 하층 대기를 모의하는 것을 알 수 있다. 이후 강수가 발생한 12 UTC에서는 강수가 강하게 나타난 KLAPS에서 빠르게 지면 부근이 안정화되는 과정을 보여주고 있다.

2.1.2. 기상청 초단기예측시스템(KLAPS)의 여름철 강한 강수 예측 특성과 개선점 분석

가. 위치소용돌이도 경향진단법 (Potential vorticity tendency diagnostics)

본 연구에서는 그림 2.1.1.1과 표2.1.1.1에 나타난 다섯 가지의 강수사례에 대해 기상청 초단기 예측시스템의 여름철 강한 강수 예측 특성과 개선점을 분석하고자 한다. 이를 위해, 본 연구에서는 위치소용돌이도 경향진단법 (Potential vorticity tendency diagnostics)을 도입하였다. 일반적으로 위치소용돌이도(potential vorticity, PV)는 다음 그림 2.1.2.1과 같이 단열 및 마찰이 없는 환경에서 등온위면에서 보존되는 특징을 가지고 있다. 이러한 위치소용돌이도 경향진단법을 이용하여 이전연구들에서는 저기압 및 열대저기압의 이동과 대류시스템을 분석하는데 사용하였다 (Haynes and McIntyre 1987; Wu and Wang 2000; Wu et al. 2003; Yamada et al. 2016; Tory et al. 2012).

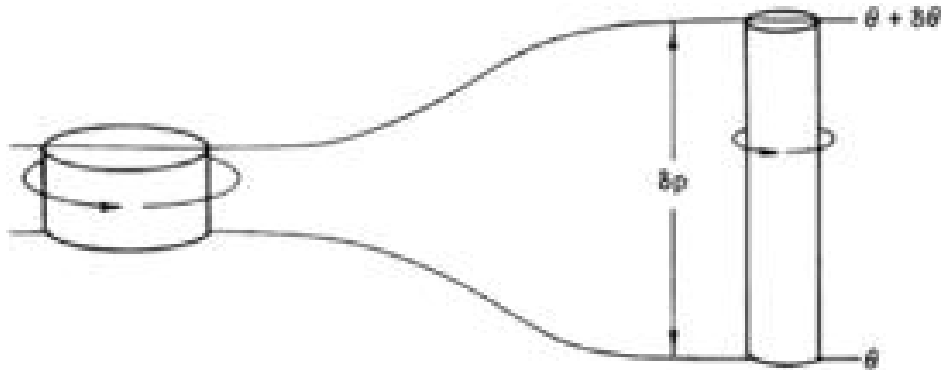


그림 2.1.2.1. 등온위면에서 위치소용돌이도 보존(An introduction to Dynamical Meteorology, 5th edition)

위치소용돌이도(q , PVU= 10^{-6} K m² kg⁻¹ s⁻¹)는 다음의 수학적식 2.1.2.1에 의해 정의된다.

$$q = \frac{\eta \cdot \nabla \theta}{\rho} \quad \text{수학적식 2.1.2.1}$$

변수 η , θ , 그리고 ρ 는 3차원 절대소용돌이도, 온도, 그리고 대기 밀도를 나타낸다. 위치소

용돌이도 경향진단법은 수학적식 2.1.2.1에 의해 정의된 위치소용돌이도를 이용하여 위치소용돌이도 경향진단법식을 다음 수학적식 2.1.2.2와 같이 나타낼 수 있다.

$$\underbrace{\frac{\partial q}{\partial t}}_{PV-DT} = \frac{1}{\rho} \underbrace{(\nabla \times F \cdot \nabla \theta)}_{PV-FRIC} - \underbrace{\frac{u \cdot \nabla q}{(PV-HADV+PV-WADV)}}_{PV\ advection} + \frac{1}{\rho} \underbrace{(\eta \cdot \nabla \dot{\theta})}_{PV-DIA}$$

수학적식 2.1.2.2

변수 F , u , 그리고 $\dot{\theta}$ 는 마찰흐름, 3차원 바람장, 그리고 비단열항을 나타낸다. 비단열항은 다음 수학적식 2.1.2.3과 같이 근사하여 나타낼 수 있다.

$$\dot{\theta} \simeq \frac{D\theta}{Dt}$$

수학적식 2.1.2.3

수학적식 2.1.2.3의 양의 비단열 값은 대기운동의 상승지역과 대체로 일치하며, 이와 반대로 음의 값은 대기의 하강지역을 나타낸다. 수학적식 2.1.2.2의 위치소용돌이도 경향진단법식에서 좌변의 위치소용돌이도의 시간에 대한 편미분은 위치소용돌이도의 시간경향(PV-DT)을 나타낸다. 우변의 첫 항 PV-FRIC과 마지막 항 PV-DIA는 시간에 따른 PV가 마찰흐름과 비단열 과정에 의한 생성과 소멸과정을 나타내며, 이러한 변화된 PV흐름은 PV advection항의 단열적 재분배를 통해 다시 적응(adjustment)될 수 있다. 다시 말해, 등온위면에서 보존되어야 할 PV가 마찰 및 비단열 과정에 의해 변화될 수 있고, 변화된 만큼 위치소용돌이도 이류항에 의해 PV 변화 주변으로 분배 및 적응됨을 나타낸다. 이에 본 연구에서는 위치소용돌이도 진단법을 이용하여 중관규모 대기운동에 의해 발생하는 강수형태를 각 위치소용돌이도 경향 방정식의 진단항을 통해 살펴보고자 한다. 본 연구에서는 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Reanalysis 5th generation (ERA5) 재분석자료와 기상청 초단기 예측시스템(KLAPS)의 동일시간대 비교를 수행하였다. 기본적으로 두 모델사이의 공간해상도 차이가 크기 때문에 두 모델사이에서 계산된 위치소용돌이도 경향 진단항과 비단열항 그림은 규모적으로 상당한 차이를 보일 수 있다. 다시 말해, 고해상도 자료의 KLAPS는 위치

소용돌이도의 더 상세한 변화를 모의할 수 있으나, 지역적으로 복잡하게 나타날 수 있는 반면, ERA5 재분석자료의 경우 대체로 큰 규모형태의 위치소용돌이도 변화를 보여줄 수 있다. ERA5 재분석자료는 시간경향향을 평가하기 위해 과거 -6시간의 PV와 현재시간 PV의 시간미분을 통해 구하였다. 두 자료 모두 마찰 변수가 제공되지 않기 때문에 위치소용돌이도 경향 진단법 수학적 2.1.2.2의 PV FRIC 계산 부분을 생략하였다. 이러한 마찰흐름의 위치소용돌이도 경향 진단항에 기여를 최소화하기 위해 본 연구에서는 850 hPa와 500 hPa의 두 대기층에 대해 위치소용돌이도 경향 진단항의 비교를 수행하였다. 표2.1.1.1에 나타낸 각 사례의 초기장 가운데 강수가 일어난 시점과 가장 가까운 마지막 초기장의 예측장에 대해 ERA5 재분석자료와 동일시간에 대해 비교 평가하였다. 본 연구에서 위치소용돌이도 경향 진단항과 시간경향항의 단위는 $PVU h^{-1}$ 이다.

나. 저기압 전면 수렴형: 2020년 6월 29일 0400 UTC과 2021년 6월 14일 1700 UTC

저기압 전면 수렴형 강수는 우리나라 서쪽에서 저기압이 접근하면서 시작되는 강수로 온난이류와 저기압 중심으로의 수렴 및 상승으로 인해 강수가 시작되고 넓은 강수지역이 나타난다(그림 2.1.1.1a). 그림 2.1.2.2부터 그림 2.1.2.5는 2020년과 2021년의 저기압 전면 수렴형 사례에 대한 위치소용돌이도 경향 진단항과 비단열항을 ERA5 재분석자료와 기상청 초단기 예측시스템 자료의 850 hPa과 500 hPa의 두 대기층에서의 결과를 나타내었다.

2020년 6월 29일 사례에서 위치소용돌이도 시간경향항은 두 층에서 서쪽에서 우리나라로 위치소용돌이도가 점차 증가하고 있음을 보여주고 있다. 저기압 이동이 양의 위치소용돌이도 시간 경향과 전반적으로 일치하는 것을 고려하면, 이는 저기압 전면 수렴형 강수의 특징을 잘 보여주고 있다고 생각된다(그림 2.1.2.2와 2.1.2.3). KLAPS 예측장 850 hPa에서 북위 약 35도에서 남동쪽으로 뻗은 강한 위치소용돌이도 시간경향의 변화와 그보다 약간 북동쪽에 위치하는 상대적으로 작은 위치소용돌이도 시간경향 영역이 관찰된다. KLAPS 예측장의 위치소용돌이도 비단열항의 주된 변화는 위치소용돌이도 시간경향이 큰 지역과 대체로 일치하며, 이는 우리나라 남쪽 및 남서쪽 지역에 집중되어 나타나는 특징을 보이고 있다. 비단열가열 항 역시 우리나라 서해와 제주도 부근에서 크게 집중되어 나타나는 경향이 있다. 결과적으로 비단열적 흐름에 의해 대기의 흐름이 바뀔 수 있음을 시사한다. 반면, ERA5 재분석자료는 두 개의 강한 위치소용돌이도 시간변화(첫번째 지역: 북위 약 34°; 두 번째 지역: 북위 약 36°)가 관찰되었다(그림 2.1.2.2). ERA5 재분석자료에서는 두 번째 지역의 시간경향항이 첫 번째 지역에 비해 다소 작게 관찰되지만, 위치소용돌이도 비단열항과 비단열가열 항에서는 두 번째 지역에서 크고 강하게 나타남을 볼 수 있다. 이는 잠재적으로 두 번째 지역에서 위치소용돌이도 비단열 과정을 통해 잠재적으로 더 성장할 수 있음을 보여준다. 500 hPa의 위치소용돌이도 시간 경향에서는 KLAPS가 복잡하고 상세한 PV변화를 보여주지만, 큰 흐름에서는 ERA5 재분석자료와 비슷한 패턴을 보여주고 있다(그림 2.1.2.3). 위의 850 hPa 분석에서와 같이 제주도 서쪽 및 우리나라 남서쪽 해상에서 여전히 위치소용돌이 비단열항과 비단열가열 흐름이 강하게 나타나지만, 상대적으로 우리나라 남동쪽(부산지역) 부근에서 남동-북서로 발달하는 비단열가열 흐름은 ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장 자료 모두 비슷하게 나타난다. 이러한 두 ERA5

재분석자료와 KLAPS자료 사이의 위치소용돌이도 경향의 공간적 불일치는 주 강수지역의 불일치를 설명할 수 있으며, 이러한 강수지역에 관한 내용은 2.2절의 초기장에 대한 강수 물리과정 예측 특성 분석절에 나타내었다.

2021년 6월 14일 같은 강수 유형 사례에 대해 ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장 두 자료 모두 850 hPa과 500 hPa층에서 위치소용돌이도 시간경향항과 비단열가열 항은 공간적으로 서로 비슷하게 나타난다(그림2.1.2.4와 2.1.2.5). 하지만, 강수지역 내에서 두 모델자료의 위치소용돌이도 비단열항의 분포는 서로 차이를 보이고 있으며, 이는 결국 위치소용돌이도 수평 및 연직이류항 역시 차이가 있음을 설명한다. 공간해상도 차이로 인해 위치소용돌이도 경향 진단항들에 대해 두 모델의 자료를 정량적 평가는 어렵지만, 정성적인 관점에서 실제로 KLAPS 예측장 자료에서는 850 hPa층에서 ERA5 재분석자료의 위치소용돌이도 수평이류항(PV-ADVH)이 보다 수평적으로 길게 발달된 형태를 보이며, 서해남부와 제주서쪽해상에서 위치소용돌이도 연직이류 성분의 분포 차이를 확인할 수 있었다. 강수지역에서 오른쪽 항의 총합(SYNTHESIS)항은 이러한 위치소용돌이도 수평이류항과 위치소용돌이도 비단열항이 상당히 강하게 반영되었음을 나타내는 동시에 연직으로의 위치소용돌이도 불균형 해소가 국지적으로 일어나고 있음을 보여준다. 이러한 특징은 500 hPa층에서는 비교적 해소된 측면이 있으나, 여전히 위치소용돌이도 연직이류항은 약하게 모의되는 경향이 있어 보인다. 요약하면, 이 사례의 경우 주 강수지역에서 두 모델의 강수 모의차이는 주로 대기하층에서의 역학 및 열역학적 차이에 나타날 수 있다.

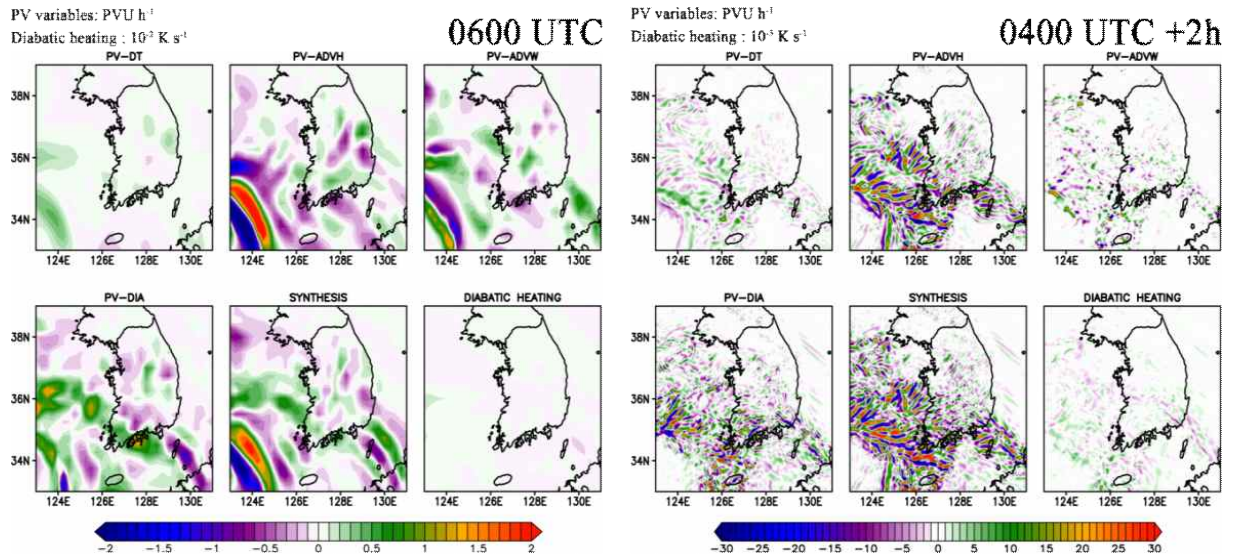


그림 2.1.2.2. 850 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2020년 6월 29일 0600 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2020년 6월 29일 0400 UTC+2h

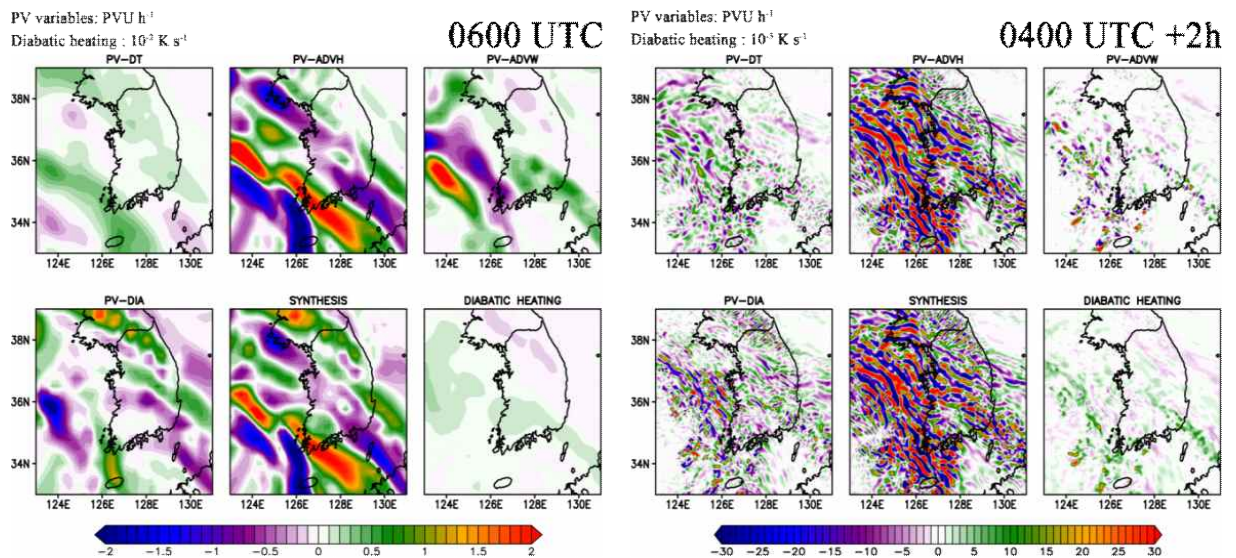


그림 2.1.2.3. 500 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2020년 6월 29일 0600 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2020년 6월 29일 0400 UTC+2h

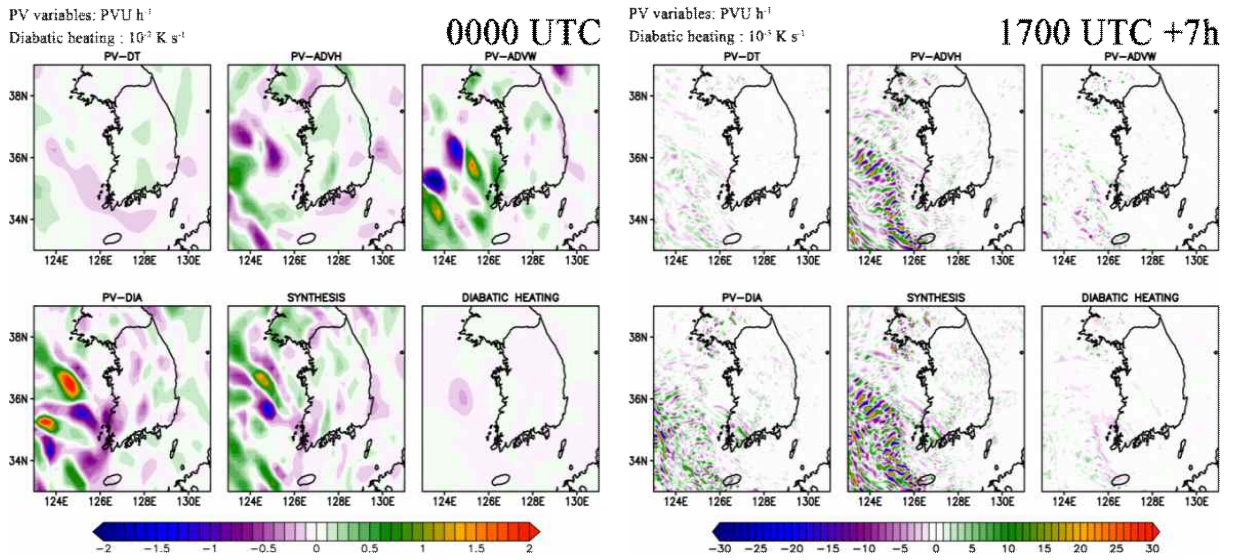


그림 2.1.2.4. 850 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2021년 6월 15일 0000 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2021년 6월 14일 1700 UTC+7h

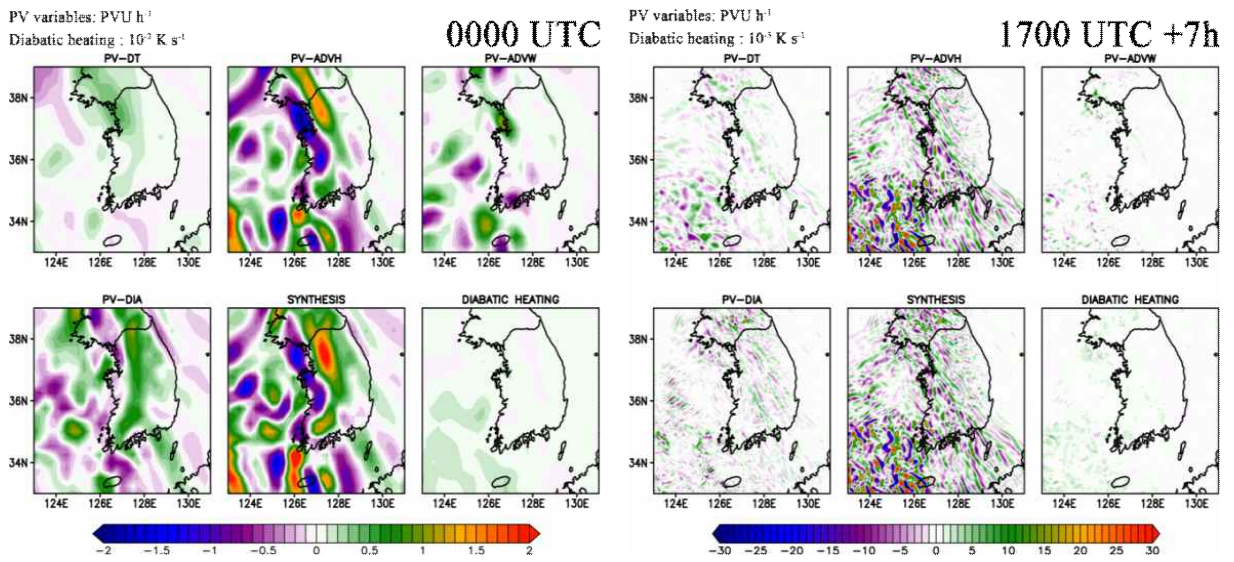


그림 2.1.2.5. 500 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2021년 6월 15일 0000 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2021년 6월 14일 1700 UTC+7h

다. 저기압 전선형: 2020년 7월 19일 1900 UTC과 2021년 9월 20일 1000 UTC

저기압 전선형 강수는 저기압이 한반도 북쪽으로 이동 및 통과하면서 저기압 중심에서 보통 남서쪽으로 수평적으로 길고 크기는 좁은 차가운 전선형 강수형태를 일컫는다(그림 2.1.1.1 b). 이와 같은 강수는 저기압 전면 수렴형보다 강수영역이 좁고 온도 및 풍향이 급변하는 특징을 가진다. 그림 2.1.2.6과 2.1.2.7은 2020년 7월 19일 저기압 전선형에 대해 850 hPa과 500 hPa층에서 ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장의 두 모델 자료로 계산된 위치소용돌이도 경향 진단항과 비단열항을 보여준다. 우선 두 모델자료에서 저기압 전선형 강수 특징인 꼬리형태의 강수패턴을 잘 나타나있으며, 상대적으로 저해상도 자료인 ERA5는 두 대기층에서 위치소용돌이도 경향항은 시간에 따라 위치소용돌이도가 단순히 서쪽에서 동쪽으로 이동해가는 것을 보여준다. 하지만, 고해상도 KLAPS의 경우 저기압 전선형 강수영역에서 위치소용돌이도 경향항은 남서쪽에서 북동쪽으로 양과 음이 교차하여 일어나는 보다 자세한 변화를 보여준다. 또한, 좁은 강수영역에 대해 위치소용돌이도 비단열항과 수평 및 연직이류항 모두 강수의 특징을 잘 묘사하고 있으며, 비단열흐름 또한 상대적으로 저해상도인 ERA5 재분석자료보다 잘 나타내고 있는 것으로 생각된다. 저기압 전선형 강수의 좁고 차가운 전선형 강수에서 위치소용돌이도 비단열항의 불균형을 위치소용돌이도 수평이류항이 전반적으로 상쇄하는 특징을 보여준다.

그림 2.1.2.8과 2.1.2.9는 2021년 9월 20일 저기압 전선형 사례에 대한 위치소용돌이도 경향 진단항과 비단열항을 보여준다. 두 모델자료에서 저기압 전선형의 강수형태의 위치소용돌이도 경향항을 확인할 수 있으며, KLAPS는 보다 상세한 위치소용돌이도 경향변화를 보여준다. 850 hPa층의 상승구역에서는 위치소용돌이도 비단열항이 증가하는 경향이 있으나, 이 사례의 경우 강한 비단열지역에서 음의 위치소용돌이도 비단열항이 두 모델자료에서 나타난다. 이는 강수지역의 서쪽에서 차갑고 밀도가 높은 공기가 대기하층에서 파고들면서 발생하는 강수형태의 특징으로 생각되며 (온도 및 지위고도에 대한 자세한 분석은 2.2.2절에서 수행하였음), 이때 발생한 음의 위치소용돌이도 비단열흐름은 위치소용돌이도 연직흐름에 의해 상당부분 분배 해소되는 것으로 나타났다. 반대로 강수지역 동쪽에서는 강한 양의 비단열흐름과 위치소용돌이도 비단열항이 관찰되며, 이러한 비단열로 인한 위치소용돌이도 불균형은 위치소용돌

이도 수평이류에 의해 해소되는 경향이 있다. 대기중층의 500 hPa에서는 이와 같은 흐름은 나타나지 않는 것으로 보인다. ERA5 재분석자료의 500 hPa에서 저기압 전선형 강수형태에 따라 위치소용돌이도 경향 진단항과 비단열흐름이 잘 나타나 있지 않은 반면, KLAPS 예측장 자료는 위치소용돌이도 경향진단항과 비단열흐름이 850hPa과 더불어 잘 묘사된 것으로 보인다.

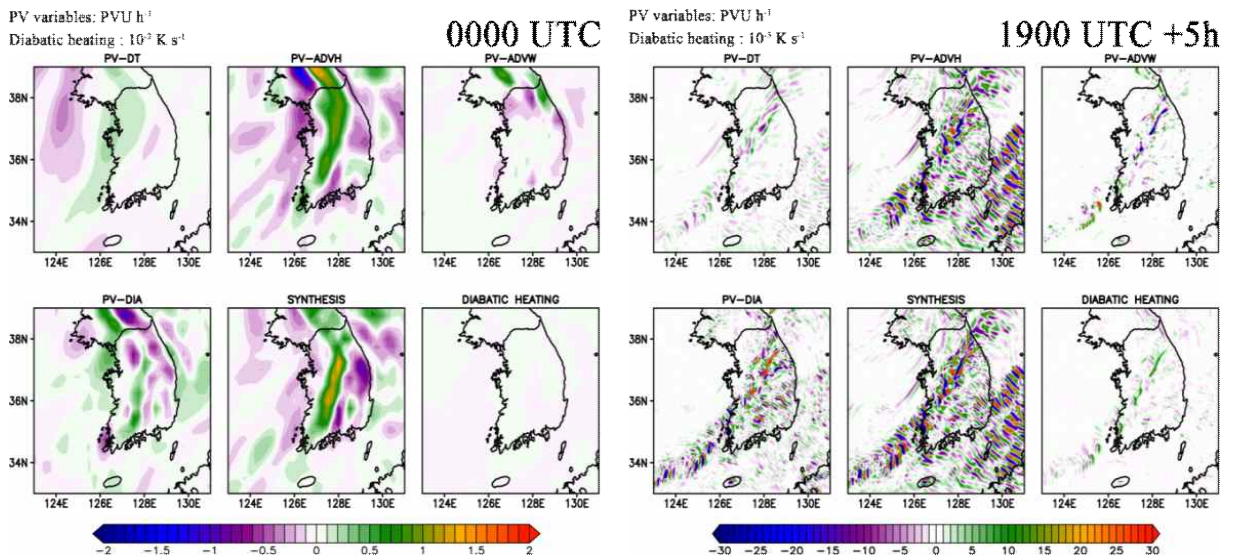


그림 2.1.2.6. 850 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2020년 7월 20일 0000 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2020년 7월 19일 1900 UTC+5h

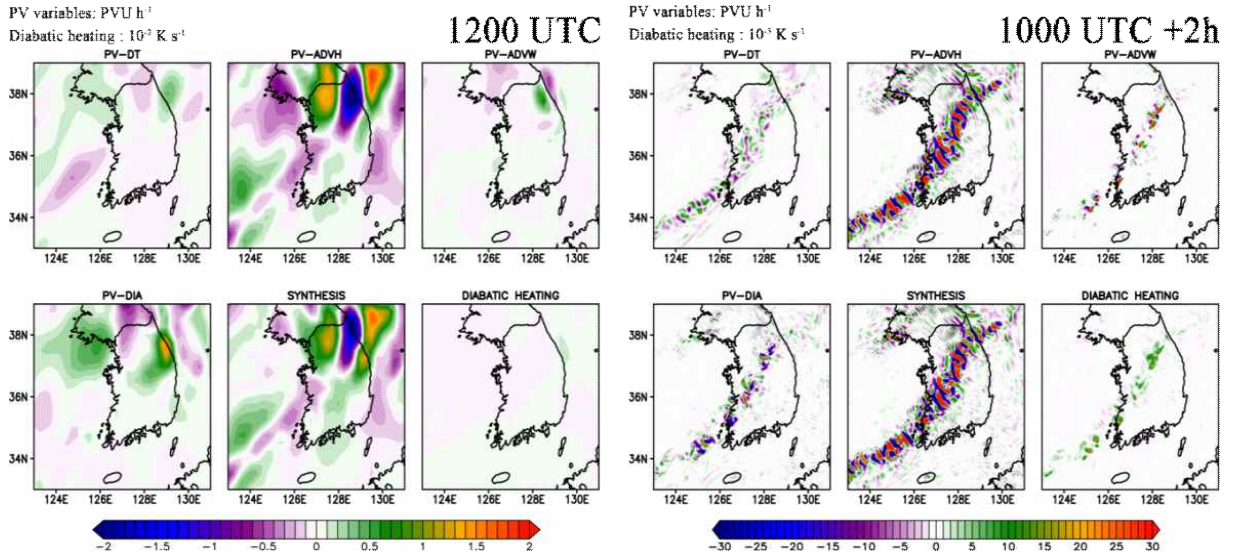


그림 2.1.2.7. 500 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2020년 7월 20일 0000 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2020년 7월 19일 1900 UTC+5h

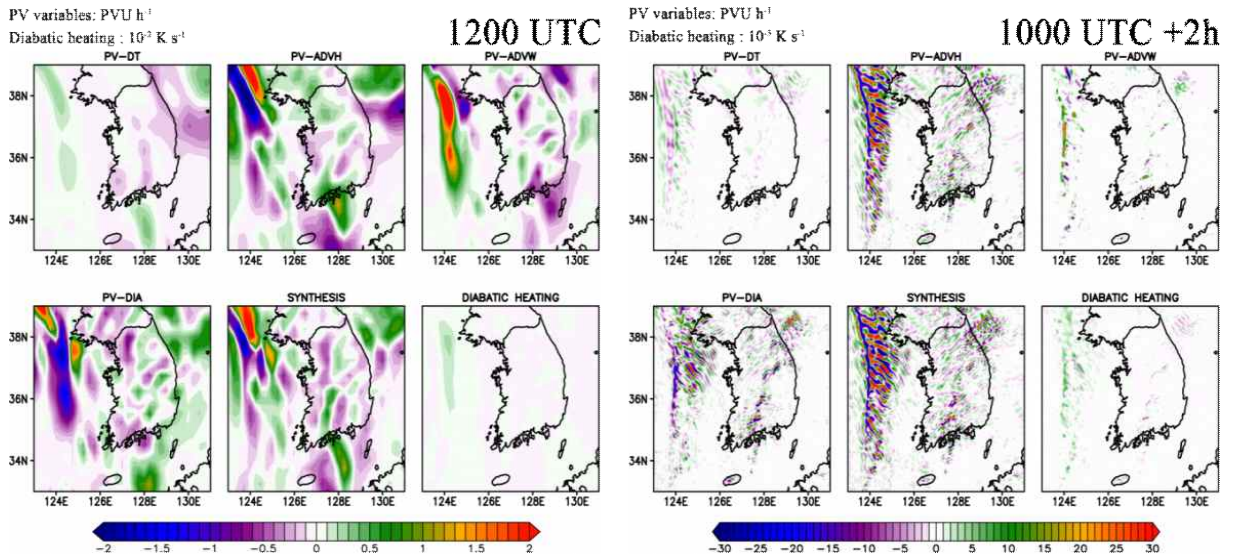


그림 2.1.2.8. 850 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2021년 9월 20일 1200 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2021년 9월 20일 1000 UTC+2h

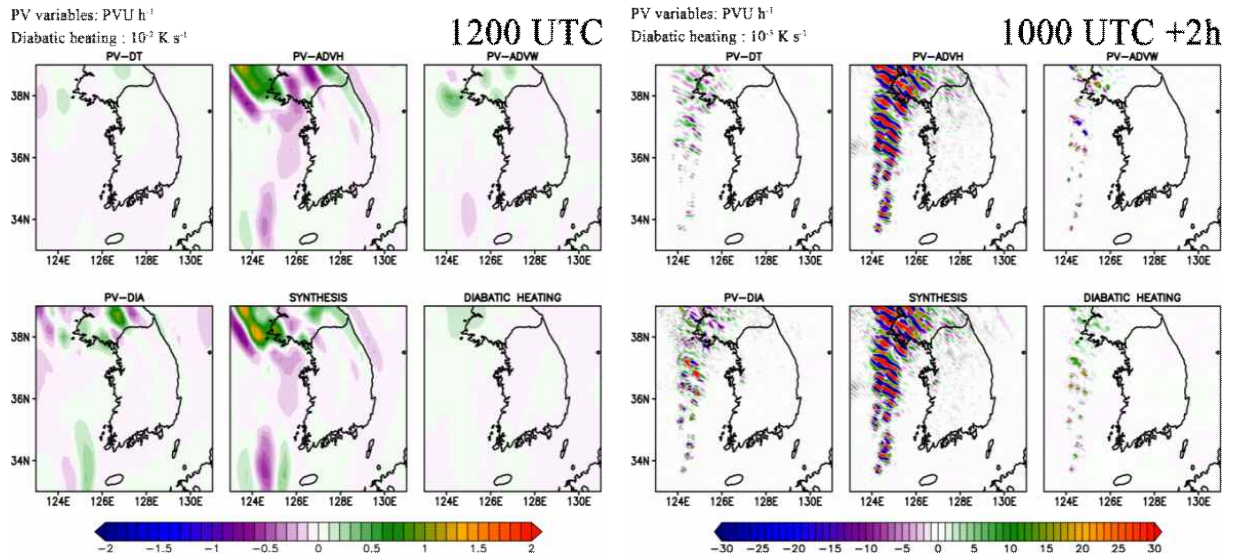


그림 2.1.2.9. 500 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2021년 9월 20일 1200 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2021년 9월 20일 1000 UTC+2h

라. 하층 제트형: 2020년 8월 14일 1800 UTC과 2021년 8월 28일 1200 UTC

하층 제트형 강수는 서로 다른 두 공기의 합류흐름으로 발생하는 형태로 대기하층에 강한 제트흐름이 나타나는 것이 특징이다(그림 2.1.1.1c). 그림 2.1.2.10과 2.1.2.11은 2020년 8월 14일 사례에 대해 ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장 자료에 대해 850 hPa과 500 hPa층에서 계산된 위치소용돌이도 경향 진단항과 비단열흐름을 나타내었다. 두 모델자료에서 수도권 서해 쪽에 비슷한 공간적 위치로 하층제트형 강수가 모의되었고, 그 결과 위치소용돌이도 경향 진단항들 역시 비슷한 공간적 위치에서 변화가 관찰되었다.

ERA5 재분석자료의 850 hPa층에서 위치소용돌이도 경향항의 변화는 KLAPS와 비교하여 잘 나타나지 않았다. 그러나 위치소용돌이도 경향 진단항에서는 위치소용돌이도 비단열항이 수도권 서해안을 기준으로 해상에서 위치소용돌이도의 비단열적 생성과 내륙에서는 비단열적 감소를 설명하고 있다. 이때 위치소용돌이도 수평이류항은 위치소용돌이도 비단열항과 반대의 부호로 관찰되며, 위치소용돌이도의 불균형을 해소하는 역할을 하는 것을 알 수 있다. 이는 위치소용돌이도가 강한 비단열 과정으로 인해 변화될 경우, 위치소용돌이도의 수평이류 성분이 강하게 발달함을 의미한다. 다시 말해 위치소용돌이도 비단열항과 수평이류항이 비슷한 위치에서 서로 다른 부호를 가지는 것은 위치소용돌이도 비단열 과정에 의해 발생하는 불균형이 결국 수평 바람성분의 증가로 이어짐을 의미한다. 한편, KLAPS 예측장은 ERA5 재분석자료보다 상당히 복잡한 위치소용돌이도 경향 진단항의 특징을 보여주지만, 비슷한 공간적 위치에서 ERA5 재분석자료와 유사하게 해상에서 위치소용돌이도 경향 진단항의 변화가 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그러나 ERA5 재분석자료와 비교하여 KLAPS 예측장은 두 가지 서로 다른 특징이 관찰된다. 첫째는 KLAPS 예측장은 수도권 서해안에서 강한 음의 비단열흐름을 모사하고 있다. 이와 같은 특징은 수평적 온도경도가 큰 경우와 2021년 저기압 전선형에서 본 것처럼 하층의 차갑고 밀도가 높은 하강류가 존재할 경우이다. 이 사례의 경우 서해상에서 위치소용돌이도 비단열항이 잘 발달한 사례로 보았을 때, 차가운 공기가 하층대기에서 침투하는 형태라기보다 수평적 온도경도에 의한 것으로 생각된다. 둘째는 KLAPS 예측장의 위치소용돌이도 비단열항의 경우 내륙보다 상대적으로 해양에서 그 생성 및 감소가 뚜렷하며 복합적으로 나타나며, 내륙에서는 감소하는 특징을 볼 수 있다. KLAPS 예측장과 ERA5 재분

석자료 모두 수도권으로 진입하기 전에 강수의 급격한 감소가 관찰되는데, 이는 850 hPa층에서 해상보다 내륙에서 상대적으로 온도가 낮은 공기가 존재하고 있기 때문으로 생각된다.

한편, KLAPS 예측장 500 hPa층의 위치소용돌이도 경향 진단항들은 대기하층의 위치소용돌이도 형태와 유사하게 나타났으며, 수도권 지역을 지나는 강수대에서만 강한 위치소용돌이도 경향 진단항이 모의되었다. 대기하층에서 보였던 해양과 내륙에서 나타났던 위치소용돌이도 경향 진단항들의 대조는 감소하였다. 특히, 중층대기에서 비단열흐름은 하층대기에서 음의 영역이었던 일부 영역이 양의 지역인 상승지역으로 변화하였다. ERA5 재분석자료는 850 hPa과 마찬가지로 500 hPa에서도 비단열흐름이 잘 나타나지 않았지만, 위치소용돌이도 경향 진단항들은 북한 지역 및 수도권 지역에서 비단열, 수평 및 연직흐름이 존재하는 것으로 모의하였다.

그림 2.1.2.12와 2.1.2.13은 2021년 8월 28일의 하층 제트형 강수의 ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장 자료로 계산된 850 hPa과 500 hPa에 대한 위치소용돌이도 경향진단항과 비단열항 결과를 보여준다. 두 자료로부터 모의된 주 강수구역이 달라 위치소용돌이도 경향진단항들의 위치는 서로 조금 다르지만, 공간해상도의 차이를 고려하면 위치소용돌이도 수평이류항과 비단열 흐름은 유사한 것으로 생각된다. 반면, 위치소용돌이도 비단열항과 연직이류항에서 차이를 보이며, 특히 KLAPS 예측장에서는 서해상에서 전라도 부근까지 발달된 좁고 긴 위치소용돌이도 비단열항, 연직이류항, 그리고 비단열 흐름이 모사되어 나타난다. 이러한 특징은 수치모델에서 좁고 길게 강하게 발달하는 선형성강수로 모의되었고, 이는 실제 레이더 관측자료와 비교하였을 때, 다소 과대 모의된 경향이 있다. 이러한 특징은 500 hPa층에서도 관찰되며, 이 강수지역에서는 강한 비단열흐름도 지역적으로 나타난다. 500 hPa층에서 KLAPS 예측장은 선형성 강수를 포함하여 위치소용돌이도 경향 진단항들이 ERA5 재분석자료와 비교하여 약간 남쪽으로 치우쳐있는 경향이 있으며, 결과적으로 이는 강수대의 위치차이로 나타난다.

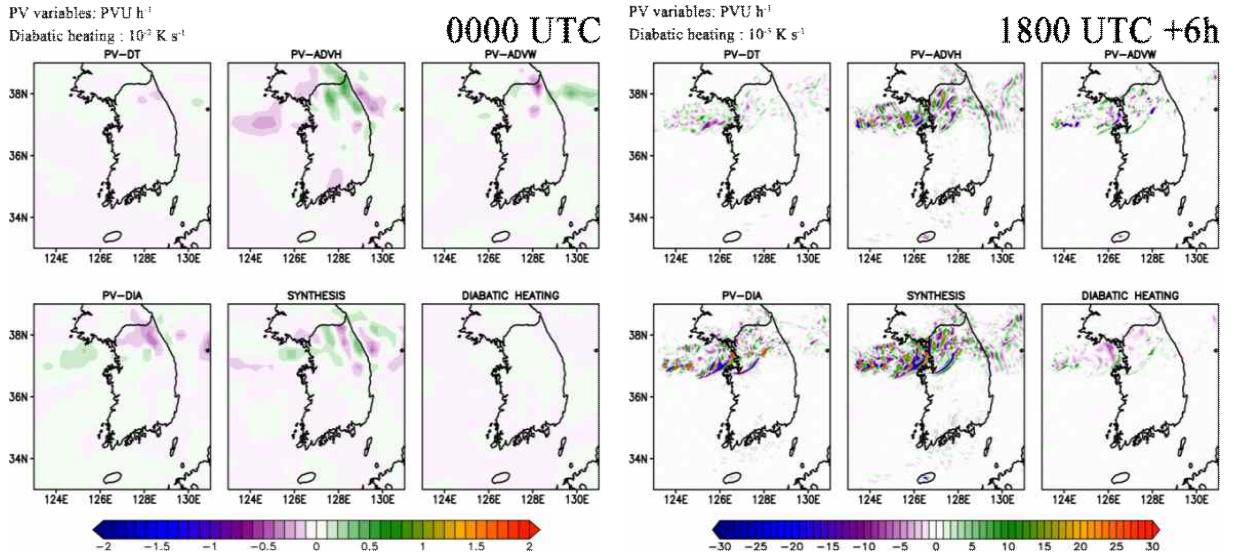


그림 2.1.2.10. 850 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2020년 8월 15일 0000 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2020년 8월 14일 1800 UTC+6h

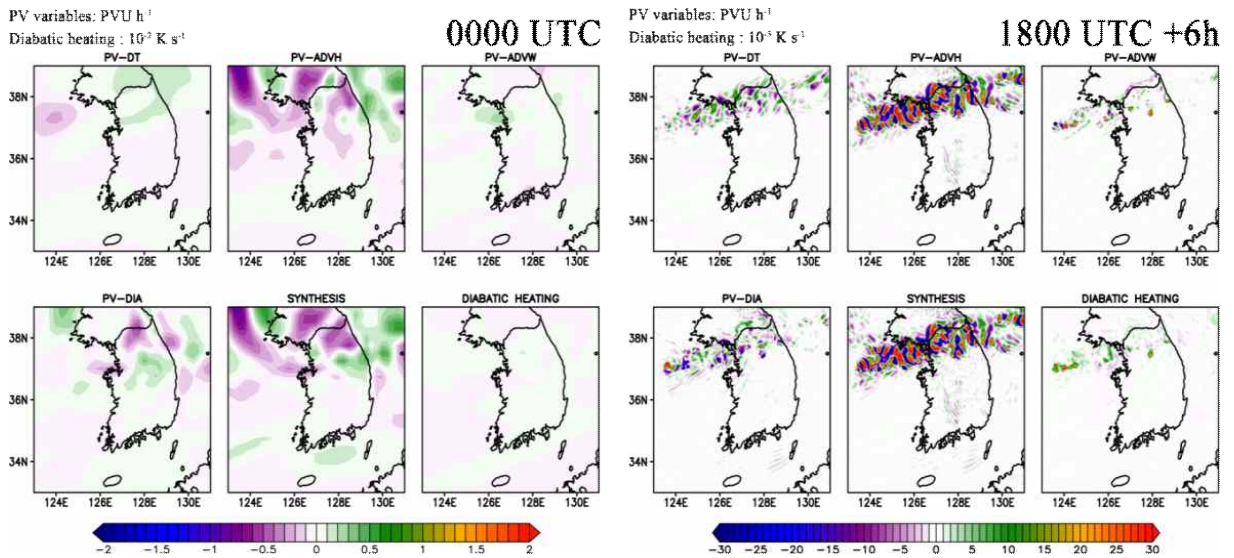


그림 2.1.2.11. 850 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2020년 8월 15일 0000 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2020년 8월 14일 1800 UTC+6h

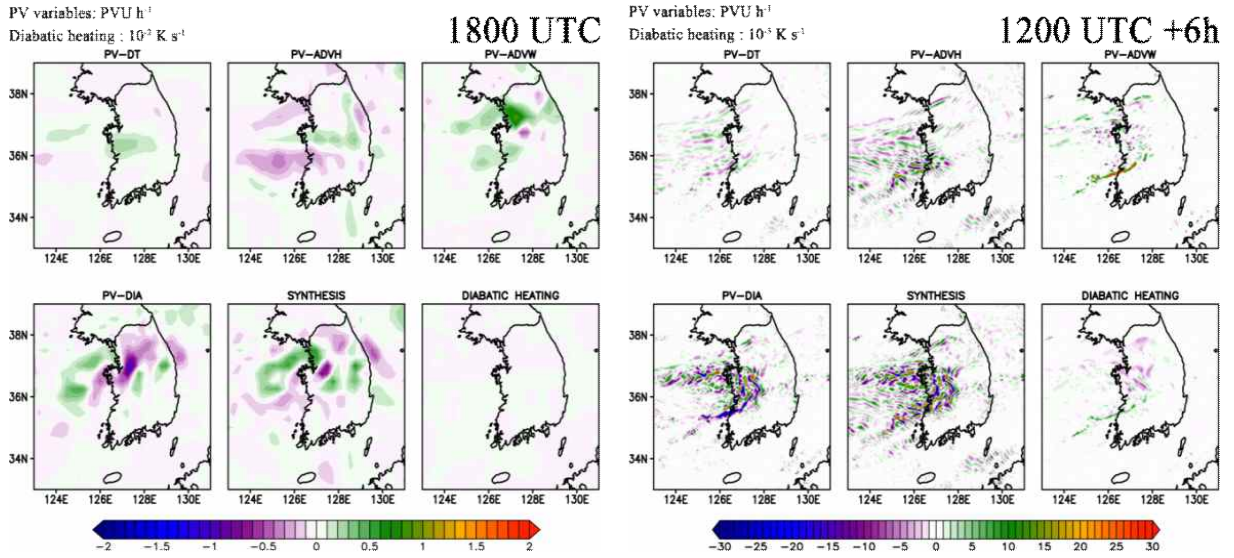


그림 2.1.2.12. 850 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2021년 8월 28일 1800 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2021년 8월 28일 1200 UTC+6h

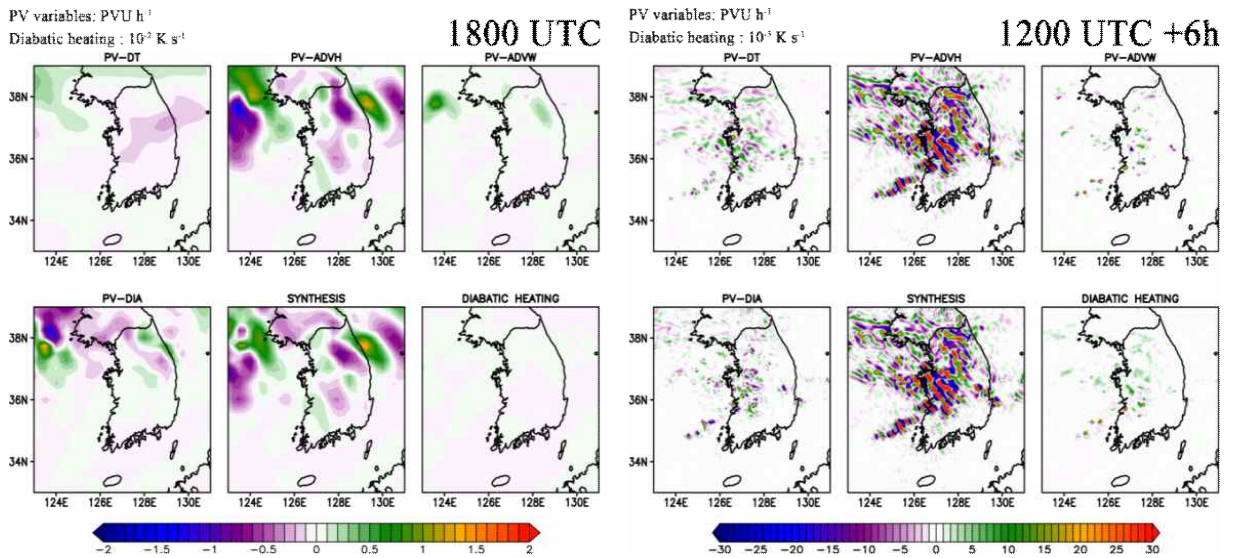


그림 2.1.2.13. 850 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2020년 8월 15일 0000 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2020년 8월 14일 1800 UTC+6h

마. 장마 전선형: 2020년 7월 06일 0700 UTC과 2021년 7월 03일 0200 UTC

북태평양 고기압의 가장자리와 상대적으로 작은 고기압 또는 저기압의 영향으로 정체전선이 발달하는 경우, 이를 장마전선형 강수라고 말한다. 그림 2.1.2.14와 2.1.2.15는 2020년 7월 6일 장마전선형 강수 사례이며, ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장 자료를 사용하여 위치소용돌이도 경향진단항과 비단열항을 나타내었다. 우선 850 hPa 결과를 보면, 우리나라 제주도 동쪽해상부터 일본후쿠오카에 걸쳐 발달된 강수영역에서, 위치소용돌이도 시간경향항과 진단항들이 뚜렷하게 나타나있다. 이 특징들은 이 구역에서 상당한 위치소용돌이도 변화가 일어나고 있음을 의미하며, 다른 지역보다 상대적으로 강수가 집중된 주장수영역임을 나타낼 수 있다. 그러나 ERA5 재분석자료와 비교하여 KLAPS 예측장 자료의 위치소용돌이도 경향진단항들은 상당히 국지적으로 발달된 특징을 보이며, 우리나라 서해 및 내륙에서도 불일치를 보이고 있다. KLAPS 예측장 자료에서는 우리나라 내륙에서 위치소용돌이도 비단열항과 수평 및 연직이류항이 발달된 모습을 보여주지만, ERA5 재분석자료는 대체로 서쪽 해안선에서 큰 변화를 보여준다. 이러한 차이는 500 hPa층에서도 뚜렷하게 관찰된다. 실제 레이더관측자료(2.2.2절에서 확인)와 비교하였을 때, KLAPS 예측장 자료는 우리나라 중부내륙에서 발달하는 강수특징을 잘 모사하였고, 이 특징은 ERA5 재분석자료가 잘 나타내지 못하였다. 두 자료의 500 hPa 위치소용돌이도 시간경향항은 제주도 동쪽부터 일본까지 발달된 강수지역을 제외하면 상당한 차이를 보여준다. ERA5 재분석자료는 우리나라 남해 전체에서 위치소용돌이도의 감소를 모의하고 있으나, KLAPS 예측장 자료의 위치소용돌이도 시간경향은 고해상도 자료임에도 그 변화가 잘 나타나지 않았다. 중부내륙강수지역에서의 위치소용돌이도 경향진단항들의 변화 또한 KLAPS 예측장 자료가 ERA5 재분석자료보다 잘 모의하였다.

그림 2.1.2.16과 2.1.2.17은 2021년 7월 3일 장마전선형 강수에 대한 ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장 자료로 계산된 850 hPa과 500 hPa 층의 위치소용돌이도 경향 진단항과 비단열항을 보여준다. 2020년 사례와 달리 2021년 사례의 경우 두 모델 자료에서 모의된 강수 영역이 대체로 일치하였으며, 두 모델 자료사이의 공간해상도 차이를 고려하면, 850 hPa과 500 hPa 층에서 위치소용돌이도 경향 진단항과 비단열 흐름들도 유사하게 나타나는 것으로 생각된다.

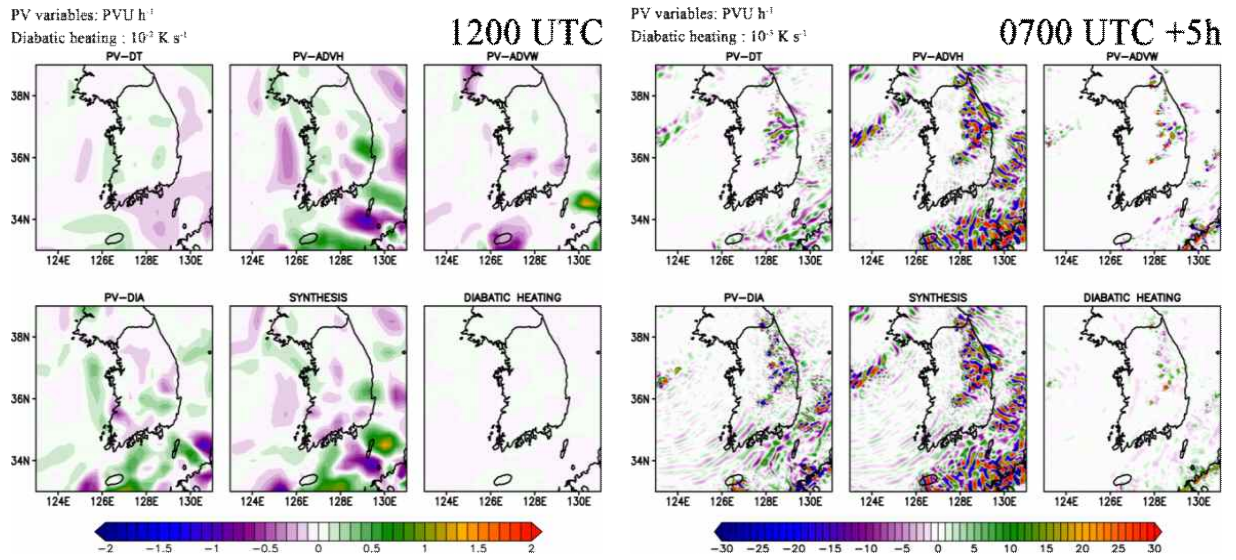


그림 2.1.2.14. 850 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2020년 7월 06일 1200 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2020년 7월 06일 0700 UTC+5h

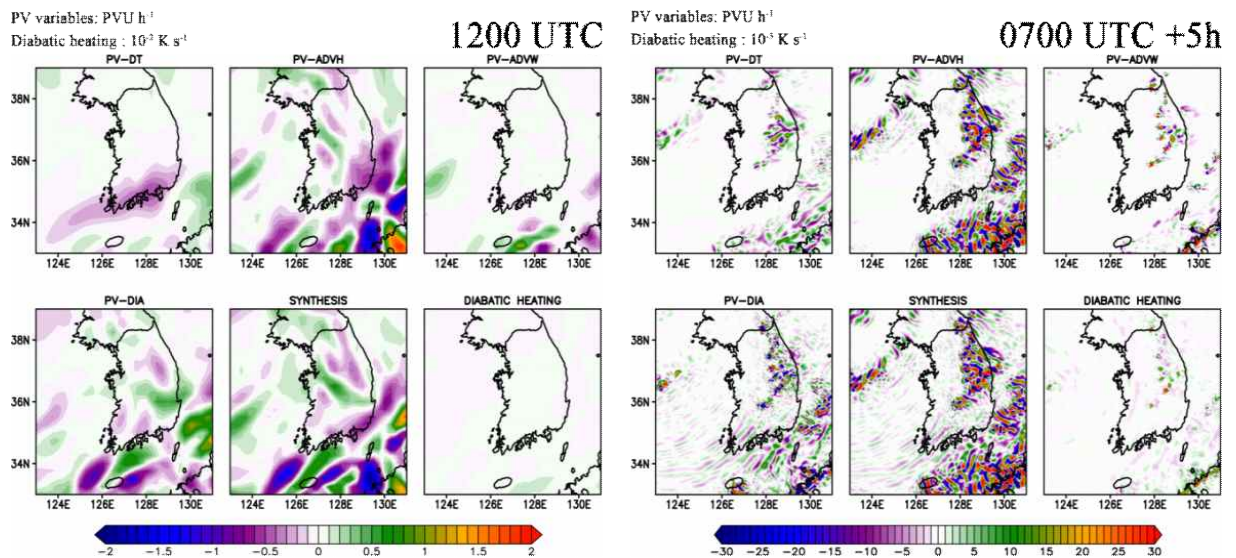


그림 2.1.2.15. 500 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2020년 7월 06일 1200 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2020년 7월 06일 0700 UTC+5h

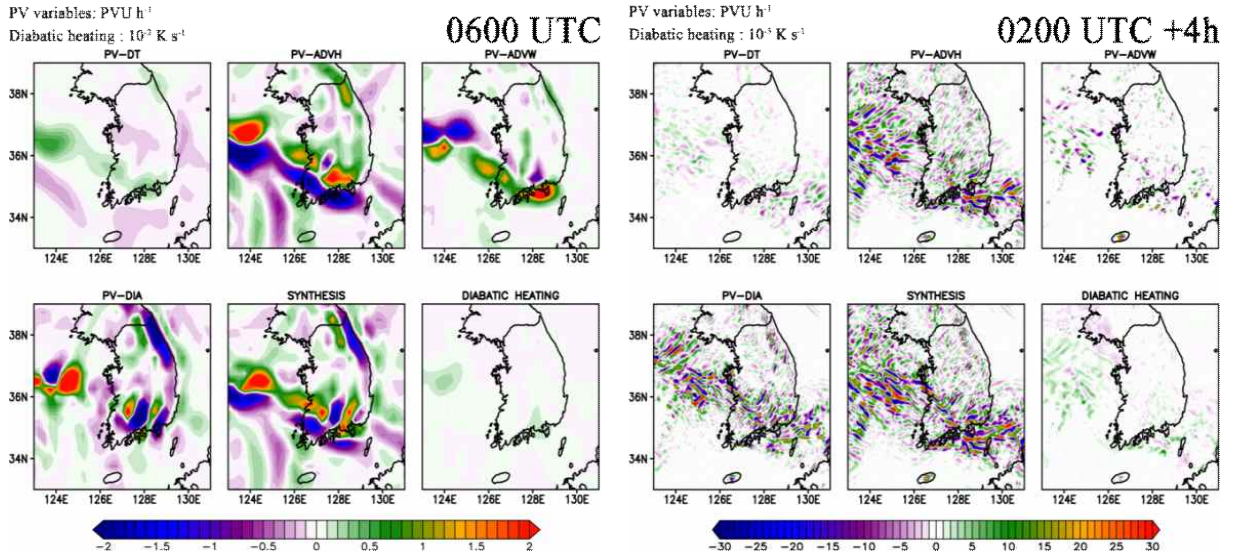


그림 2.1.2.16. 850 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2021년 7월 03일 0600 UTC와 (우) KLAPS 2021년 7월 03일 0200 UTC+4h

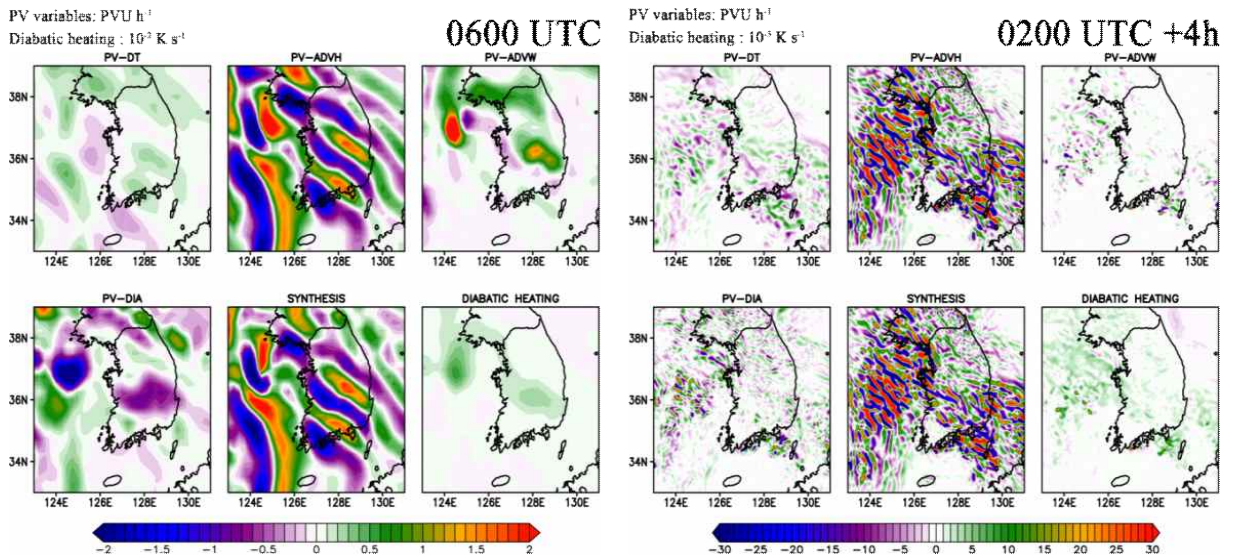


그림 2.1.2.17. 500 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2021년 7월 03일 0600 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2021년 7월 03일 0200 UTC+4h

바. 고기압 영향권 내 대류성 강수: 2020년 7월 17일 0600 UTC과 2021년 7월 09일 1700 UTC

고기압 영향권 내에서는 종관장의 영향을 받는 위의 네 개 사례유형과 달리 좁고 깊게 발달하는 대류성 강수가 잘 발달한다. 이 사례유형의 경우 공간해상도가 상대적으로 낮은 ERA5 재분석자료의 경우 강수발달 및 포착이 어려웠으며, 상대적으로 고해상도 자료인 KLAPS 예측장자료가 강수를 더 잘 모의하는 것으로 나타났다. 그림 2.1.2.18과 2.1.2.19은 ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장자료로부터 계산된 850 hPa과 500 hPa층의 위치소용돌이도 경향진단항과 비단열 흐름을 보여준다. 850 hPa층에서는 KLAPS 예측장 자료와 비교하여 ERA5 재분석자료의 경우 우리나라 내륙에서 위치소용돌이도 경향 진단항의 발달이 잘 나타나지 않았다. 반면, 500 hPa층에서는 우리나라 내륙에서 위치소용돌이도의 변화가 보이지만, 위치소용돌이도 진단항의 총합 항이 위치소용돌이도 시간경향항을 잘 모사하지 못하는 것을 볼 수 있다. 이는 ERA5 재분석자료의 강수가 여러 물리모수화에 의한 결과로 나타날 수 있음을 의미한다.

그림 2.1.2.20과 2.1.2.21은 2021년 8월 9일 대류성 강수사례에 대한 두 자료의 위치소용돌이도 경향진단과 비단열항 그림을 보여준다. 2020년 사례와 달리 두 모델 자료로부터 계산된 위치소용돌이도 경향진단항은 대기하층부터 중층까지 잘 나타나 있는 것으로 생각된다. 그러나 ERA5 재분석자료의 경우 앞선 사례와 비슷하게 위치소용돌이도 총합 항이 시간경향항을 잘 설명하지 못하는 것을 알 수 있다. 이에 반해 KLAPS 예측장은 위치소용돌이도 총합 항이 시간경향항을 대체로 잘 모사하는 것을 볼 수 있다. 이는 비록 고해상도 자료가 여러 물리모수화에 의해 모사되는 측면도 있으나, ERA5 재분석자료보다 명시적으로 규모를 모사할 수 있음을 나타낸다. 그럼에도 불구하고 ERA5 재분석자료(500 hPa층에서만)와 KLAPS 예측장 자료(850 hPa와 500 hPa)는 수도권 강수대에서 위치소용돌이도 비단열항과 비단열 흐름이 잘 모사되어 있는 것을 볼 수 있다. 반면, ERA5 재분석자료와 비교하여 KLAPS의 예측장 자료는 850 hPa층과 달리 500 hPa 중층대기에서 우리나라 남부지역의 위치소용돌이도 변화가 거의 나타나지 않는 것으로 모사하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 강수구름이 하층대기까지만 발달하는 비 강수 구름임을 나타내며, 실제 KLAPS 자료에 모의된 강수구역은 전반적으로 우리나라 중부 및 수도권과 북한지역에 발달해 있는 것을 볼 수 있다.

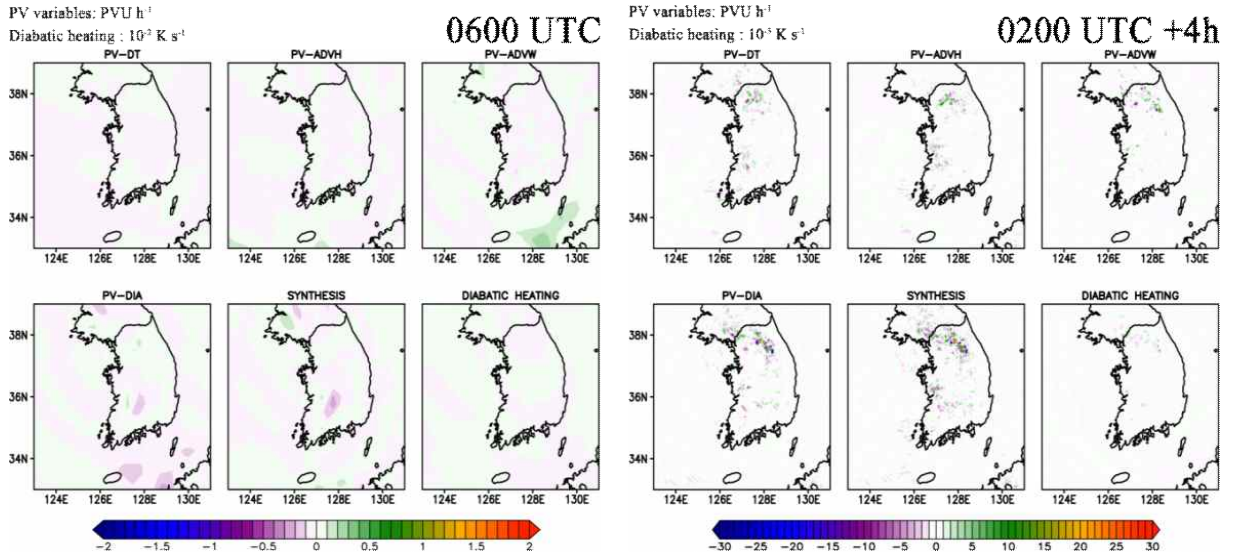


그림 2.1.2.18. 850 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2020년 7월 17일 1200 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2020년 7월 17일 0600 UTC+6h

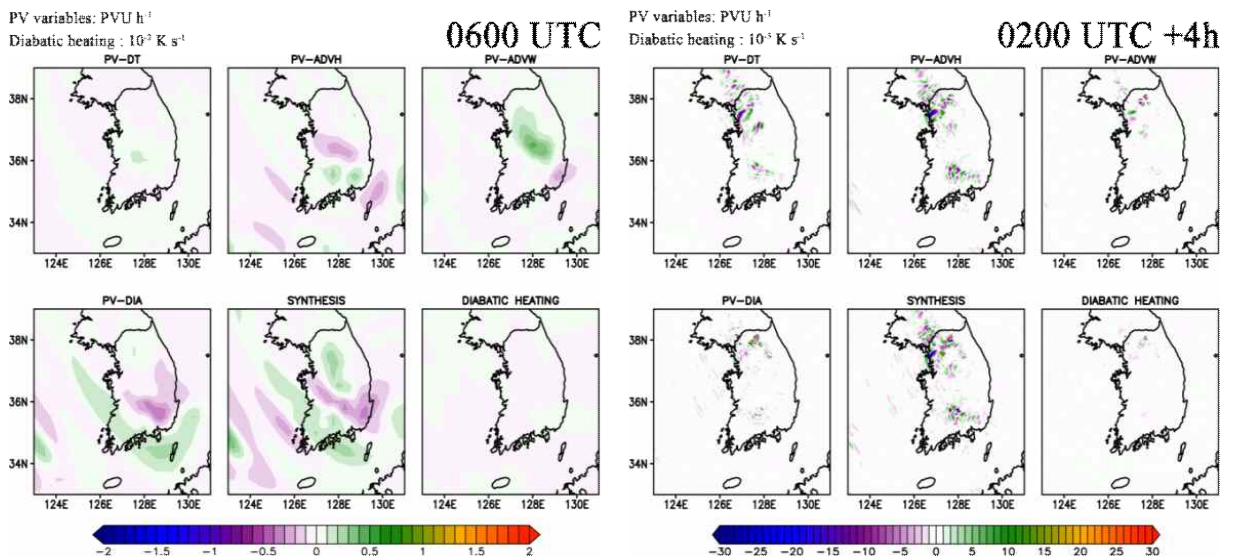


그림 2.1.2.19. 500 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2020년 7월 17일 1200 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2020년 7월 17일 0600 UTC+6h

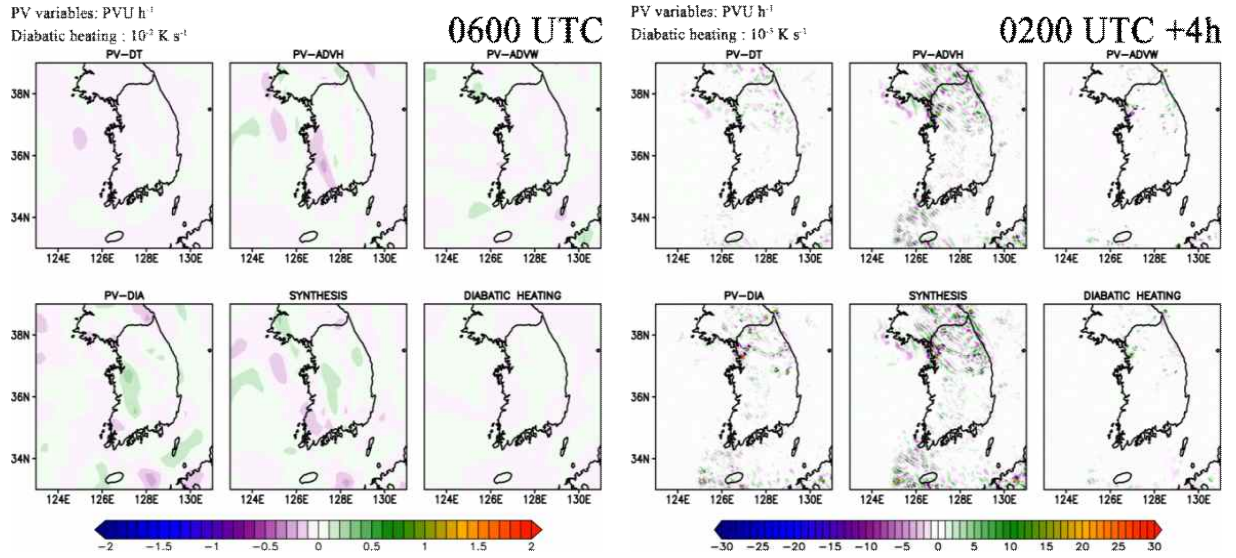


그림 2.1.2.20. 850 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2021년 7월 10일 0000 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2021년 7월 09일 1700 UTC+7h

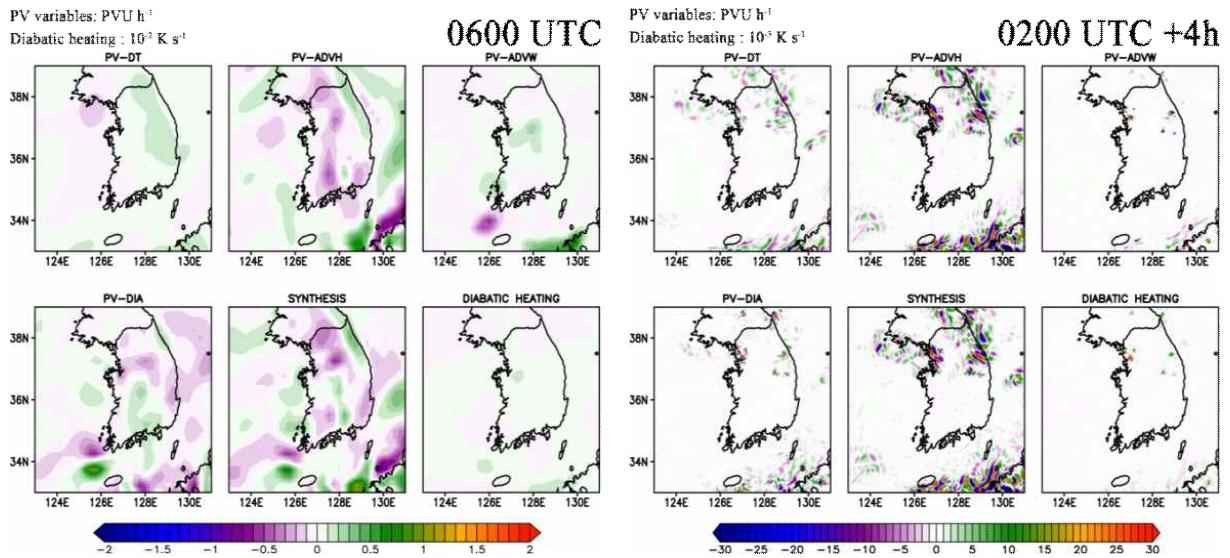


그림 2.1.2.21. 500 hPa의 위치소용돌이도 시간경향 및 경향진단항과 비단열항: (좌) ERA5 재분석자료 2021년 7월 10일 0000 UTC와 (우) KLAPS 예측장 자료 2021년 7월 09일 1700 UTC+7h

2.1.3. 요약

본 절에서는 여름철 강수 예측 특성분석을 위해 종관배경장의 영향을 받는 4가지 강수 유형인 저기압 전면 수렴형, 저기압 전선형, 하층 제트형, 그리고 장마전선형으로 구분하고 종관배경장의 영향을 받지 않는 형태로 고기압 영향권 내 대류성 강수로 사례분류를 하였다. 이는 기상청 초단기 예측시스템의 여름철 강한 강수 특성분석과 물리과정 예측 특성분석을 위해 2020년과 2021년에 대해 총 10가지의 강수 사례를 2.1.1절에서 선정하였다. 2.1.2절은 위의 총 10가지 강수사례에 대해 위치소용돌이도 경향진단방정식과 비단열항 계산을 통해 ERA5 재분석자료와 비교하여 그 특징을 살펴보았다. 2.1.2절에서는 위치소용돌이도 경향 진단항들과 비단열항을 바탕으로 ERA5 재분석자료와 강수시점과 가장 가까운 KLAPS 초기장의 예측장을 동일시간대에 대해서 비교 분석하였다. 두 자료의 공간해상도가 다르기 때문에, 위치소용돌이도 경향 진단항과 비단열항의 크기 차이는 본 연구에서 고려대상이 아니었으며, 전반적인 위치와 형태의 차이점을 주로 비교분석하였다.

2020년 6월 29일 전면 수렴형 사례에서는 위치소용돌이도 경향 진단항들은 전반적으로 유사한 형태를 보여주었으며, 강수코어를 모의하지 못한 부분은 역학적 필드가 잘 모사하지 못한 것으로 생각된다. 2021년 6월 14일 사례도 2020년 사례와 비슷하게 대체로 잘 모의되었으나, KLAPS 예측장의 위치소용돌이도 경향 진단항들은 ERA5 재분석자료와 비교하여 서해상의 북위 36°이상 지역에서 차이를 보였다. 이러한 차이는 강수영역의 차이와 비교적 일치하였다.

2020년 7월 19일 저기압 전선형 사례에서 위치소용돌이도 경향은 ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장 모두 잘 모의된 것으로 생각되지만, 고해상도 KLAPS의 예측장이 보다 더 저기압 전선형 형태를 잘 모사하고 있는 것을 볼 수 있다. 실제 강수위치와 KLAPS 예측장은 잘 일치했으며, 결과적으로 KLAPS 예측장이 강수구역에서 위치소용돌이도의 변화를 잘 설명하고 있음을 확인하였다. 특히, 저기압 전선형 강수의 좁고 차가운 전선형 강수에서 위치소용돌이도 비단열항의 불균형을 위치소용돌이도 수평이류항이 전반적으로 상쇄하는 특징을 보여준다. 이러한 특징은 2021년 9월 20일 저기압 전선형 강수사례에서도 유사하게 관찰되며, 이 사례 역시 ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장은 비슷한 위치소용돌이도 경향진단항과 비단열

향을 보여주지만, 고해상도 KLAPS 자료가 비교적 좁고 강한 강수 사례에 대한 위치소용돌이도의 자세한 변화를 모의하기에 좀 더 유리한 측면이 있는 것으로 생각된다.

2020년 8월 14일 하층 제트형 강수 사례에서 ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장은 비슷한 위치에서 위치소용돌이도 경향 진단항들의 변화를 설명하고 있다. KLAPS 850 hPa 예측장에서는 수도권 서쪽해안가에 강한 음의 비단열흐름을 보여주고 있으며, 이는 하강류 또는 수평적으로 육지와 해양의 큰 열적 대조를 나타내는 것으로 생각된다. 이러한 특징은 500 hPa 층에서는 다소 완화된 특징을 보인다. ERA5 재분석자료에서 해상과 내륙의 위치소용돌이도 비단열항의 대조가 뚜렷하게 관찰되고, KLAPS 예측장에서도 비슷한 특징을 확인하였다. 2021년 8월 28일 하층 제트형 강수에서는 우리나라 서해 및 중부지방 쪽 강수 구역에서 위치소용돌이도 경향 진단항들의 변화가 크게 나타났으며, ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장의 위치소용돌이도 이류항은 위도와 평행한 흐름을 잘 모사하였다. 다만, KLAPS 예측장에서 서해상과 전라도 쪽으로 좁고 강한 음의 위치소용돌이도 비단열 흐름이 관찰되었는데, 이러한 형태는 저기압 전선형 강수 사례의 위치소용돌이도 경향 진단항들과 유사하며, 실제 강수 자료와 비교해 본 결과 KLAPS 예측자료가 과대모의 한 강수였다.

2020년 7월 6일 장마 전선형 강수에서 ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장 자료는 위치소용돌이도 경향 진단항들이 비슷한 공간분포를 보여주고 있으나, KLAPS 예측장은 우리나라 중부내륙에서 강한 비단열 및 위치소용돌이도 비단열항을 모사하였고, 그 결과 수평 및 연직 흐름의 변화가 발생한 것을 알 수 있다. 2021년 7월 3일 장마 전선형 강수도 2020년 사례와 마찬가지로 위치소용돌이도 경향 진단항들이 비슷한 공간분포로 나타났으며, 이 사례의 경우 위치소용돌이도의 규모 차이를 제외하면 큰 차이는 발견되지 않았다.

2020년 7월 17일 고기압 영향권 내 대류성 강수 사례는 고해상도 KLAPS 예측장 자료가 보다 자세한 위치소용돌이도 경향 진단항 변화를 나타내고 있었으며, ERA5 재분석자료는 850 hPa에서는 유의미한 변화는 관찰되지 않았다. 2021년 7월 9일 같은 사례의 경우는 ERA5 재분석자료의 위치소용돌이도 경향 진단항들은 대기하층 및 중층에서도 시그널이 나타났으며, 고해상도 KLAPS 자료는 더 상세한 변화를 모사하였다. 2021년 사례의 경우 ERA5 재분석자료 및 KLAPS 예측장으로 계산된 위치소용돌이도 경향 진단항들은 공간 및 형태의 차이를 보였다.

2.2. 초단기 예측모델 강수 물리과정 예측 특성 분석

2.2.1. 강수 사례에 대한 강수 물리과정 각 수상체 모의 특성 분석

가. 강수 사례에 대한 수상체 모의 특성 분석 방법

본 연구에서는 KLAPS 예측장 자료를 바탕으로 예측시간과 초기장에 대해 강수예측의 일관성과 대기수상체 모의특성을 분석을 수행하였다. 각 강수사례에 대해 ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장 자료의 6시간 누적강수량을 정량적으로 비교분석을 수행하였고, 두 자료의 6시간 누적강수량 지역에서 비슷한 강수량과 특징이 나타나는 지역에서 반경 50 km에 대한 평균 대기수상체 연직프로파일을 비교하였다. 이는 서로 다른 지점에서 분석될 경우, 위치차이에 의한 대기수상체 차이가 존재할 수 있으므로 정성적 또는 정량적인 측면에서 정확한 비교를 하기 어렵기 때문이다. 한편, ERA5 재분석자료의 대기수상체 정보는 6시간마다 제공되기 때문에 평균 대기수상체의 정보는 단일 시간에 관한 결과이며, KLAPS의 경우 1시간 간격의 예측장 자료로 자료동화 및 모델 안정성을 고려하여 +2시간 이후부터 6시간 평균한 대기수상체 결과를 비교하였다. ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장 자료 내에서 모의된 대기수상체 종류가 두 모델 출력자료에서 서로 정확하게 일치하지 않기 때문에 본 연구에서는 최대한 서로 비슷한 대기수상체들에 대해서 비교 분석하였다. KLAPS의 대기수상체에 대해 보다 면밀한 분석을 위해 KLAPS 예측장 자료의 특정지점에서 모델 레이더 반사도와 실제 레이더 합성장 자료 WISSDOM(WInd Syntheses System using DOpler Measurements)의 반사도에 대해 Contour Frequency by Altitude Diagrams (CFADs, Yuter and Houze 1995) 방법을 사용하여 연직분포를 정량적으로 비교 분석하였다. 본 연구에서는 대기수상체 계산과 동일하게 반경 50 km 내에서 CFADs를 계산하였다. KLAPS 예측장 모델 출력자료에서는 따로 레이더 반사도 자료를 제공하고 있지 않음으로 본 연구에서는 ARWpost 프로그램을 이용하여 모델 자료의 레이더 반사도를 계산하였다. 모델 자료의 대기수상체 RAIN, SNOW, GRAUPEL의 세종류의 변수로 이루어진 Z_e 관계식으로 도출되는데, Z_e 값이 매우 작을 경우, 이는 -30 dBZ로 나타난다. 자세한 관계식은 ARWpost 프로그램의 module_calc_dbz.f90에 나타나 있다.

나. 저기압 전면 수렴형

그림 2.2.1.1과 2.2.1.2는 2020년 6월 29일 저기압 전면 수렴형 강수에 대해 6시간 평균 레이더 반사도, 누적강수량, 두 자료의 비슷한 지점에서의 반경 50 km 내의 평균 대기수상체 연직 프로파일, 그리고 모델의 레이더 반사도와 WISSDOM 자료의 레이더 반사도 CFADs 결과를 보여준다. ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장의 강수영역은 WISSDOM 자료의 평균 레이더 반사도 영역과 대체로 일치하는 모습을 보여준다(그림 2.2.1.1a-c). 그러나 레이더 반사도 자료와 비교해보면, KLAPS 예측장 강수가 우리나라 남해안 쪽으로 다소 과대 모의된 경향과 서해상의 강수코어를 과소모의한 점을 확인할 수 있다. ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장의 비슷한 위치에서 계산된 대기수상체 연직프로파일을 보면, KLAPS의 RAIN-WATER와 QRAIN 대기수상체는 ERA5 자료보다 양적인 측면에서 큰 차이를 보여준다. 또한 KLAPS 예측장 자료에서는 QRAIN이 감소함에 따라 QCLOUD 대기수상체가 크게 증가하지만, ERA5 재분석자료의 QCLOUD-LIQUID는 RAIN-WATER는 비슷하게 대기하층에서 존재하고 있음을 보여준다. 대기상층에서 KLAPS의 예측장 대기수상체 QSNOW와 QICE는 500 hPa과 100 hPa에서 크게 나타나지만, ERA5 재분석자료에서는 600 hPa과 250 hPa층에서 나타난다. 이는 ERA5 재분석자료가 KLAPS의 예측장 자료와 비교하여 이 강수사례에서 ICE 형태의 대기수상체가 상대적으로 낮게 분포하고 있음을 보여준다. KLAPS 강수지역에서 WISSDOM 레이더 반사도 CFADs 분포와 비교해보면 KLAPS 예측장의 CFADs 평균분포는 대기 중하층에서 약 15 dBZ 더 높게 나타났다(그림 2.2.1.2). 이는 KLAPS의 모델이 더 강한 강수를 모의하고 있음을 보여준다. 한편, 실제 레이더 자료의 CFADs는 1.5~2 km 대기층에서 반사도 분포가 연직적으로 점진적으로 변화되는 특징을 보여주지만, KLAPS 예측장의 레이더 반사도 변화는 고도에 따라 증가하다가 약 4-5 km 고도에서 빠른 대기수상체의 전이가 관찰된다. 비록 실제 WISSDOM자료의 반사도 CFADs를 보면 중층대기에서 CFADs값이 낮아지긴 하지만, KLAPS만큼 뚜렷하게 나뉘지는 특징은 보이지 않는다. 또한, 상층대기에서 실제 WISSDOM의 CFADs는 고도에 따라 반사도가 감소되는 기울기를 보이지만, KLAPS의 CFADs는 고도에 따라 대체로 일정한 반사도 값을 가짐을 볼 수 있다. 고도에 따라 감소하는 반사도는 빙정 형태의 대기수상체의 성장을 의미하는데, KLAPS는 이에 대한 모사가 잘 나타나지 않는

것으로 판단된다(그림 2.2.1.2).

그림 2.2.1.3과 2.2.1.4는 2021년 6월 14일의 저기압 전면 수렴형 강수에 관한 결과들을 보여준다. 우선, ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장 자료의 6시간 누적강수량은 WISSDOM 레이더 반사도 자료와 비교하여 대체로 유사하게 나타남을 확인할 수 있다(그림2.2.1.3). 이 사례의 경우 KLAPS의 QCLOUD 대기수상체를 제외하면 서로 비슷한 대기수상체 프로파일을 보여준다. KLAPS 예측장 자료의 반사도 CFADs는 2020년 사례와 비슷한 구조를 보이고 있으며, 약 5 km 부근에서 강한 반사도 군집이 확인된다 (그림 2.2.1.4a). 그러나 WISSDOM 레이더 반사도 CFADs와 비교해보았을 때, 대기하층부터 중층까지 CFADs 반사도 분포 및 군집도 차이는 상당히 크게 나타남을 볼 수 있다 (그림 2.2.1.4b). 2020년 사례와 유사하게 KLAPS는 5 km이상의 대기에서 고도에 따라 일정한 CFADs 반사도 값을 보여준다. 이는 앞서 언급한 것처럼 WISSDOM의 CFADs와 비교해볼 때 KLAPS 모델이 대기 상층의 빙정 대기수상체 성장을 잘 모사하지 못하는 것으로 판단된다. 한편, KLAPS 모델 자료의 레이더 반사도 CFADs 값에서 대기 중·상층에 -30 dBZ은 강수지역에서 대체로 QRAIN, QSNOW, QGRAUPEL의 값이 0인 지점이 많음을 보여준다.

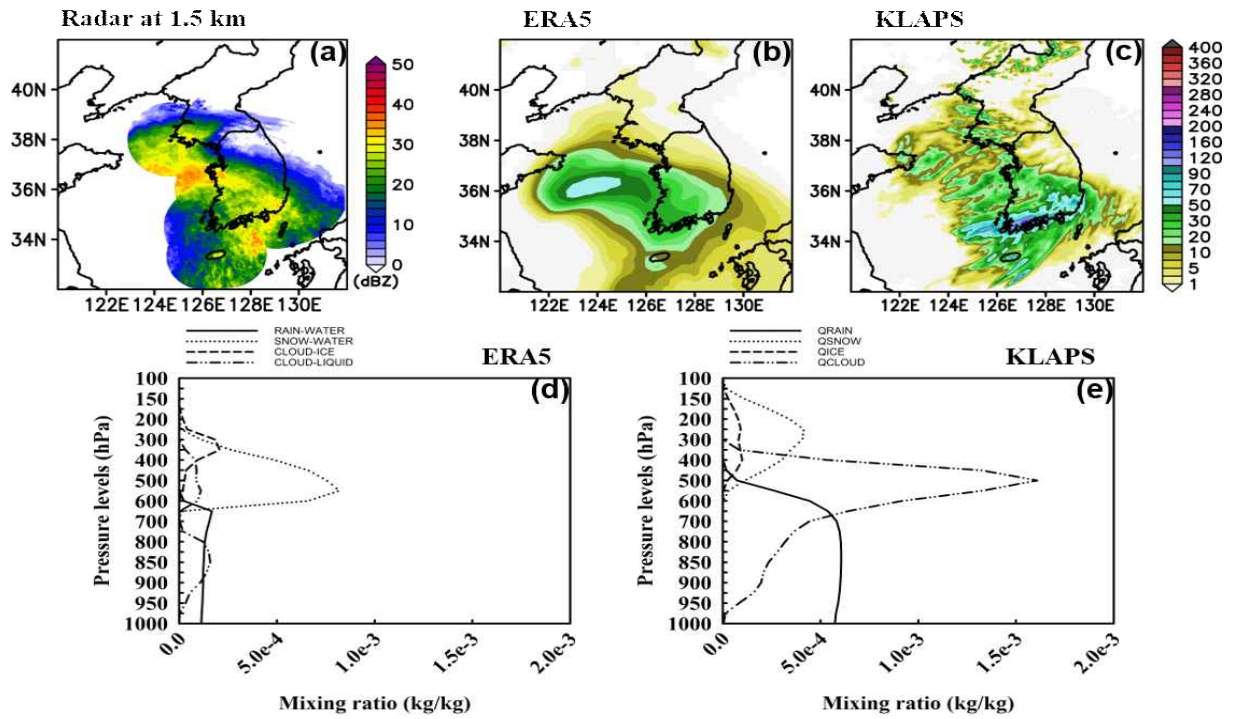


그림 2.2.1.1. 2020년 6월 29일 저기압 전면 수렴형 강수에 대한 (a) 1.5km 고도에서의 6시간 평균 레이더 반사도, (b) ERA5 재분석자료의 6시간 누적강수량, (c) KLAPS 예측장 자료의 6시간 누적강수량, (d) ERA5 재분석자료의 단일 시간 X지점에 대한 대기수상체 프로파일, 그리고 (e) KLAPS 예측장 자료의 6시간 평균 X지점에 대한 대기수상체 프로파일. (b)-(c)의 X는 우리나라 주변영역에서 6시간 최대누적강수량 위치를 나타낸다.

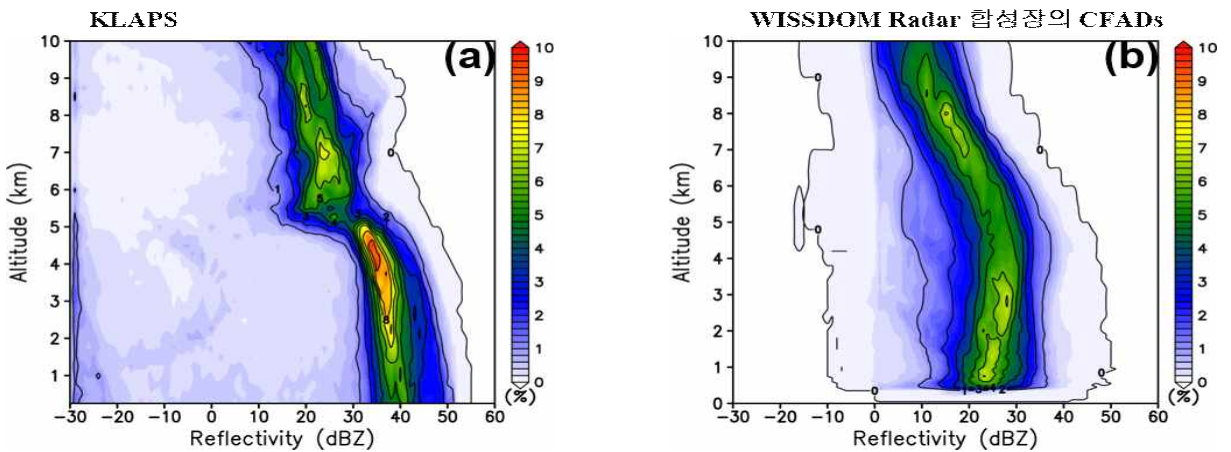


그림 2.2.1.2. 2020년 6월 29일 저기압 전면 수렴형 강수의 (a) KLAPS 예측장 자료의 X 지점에 대한 레이더 반사도 CFADs와 (b) 동일한 위치에서의 WISSDOM 레이더 반사도 CFADs

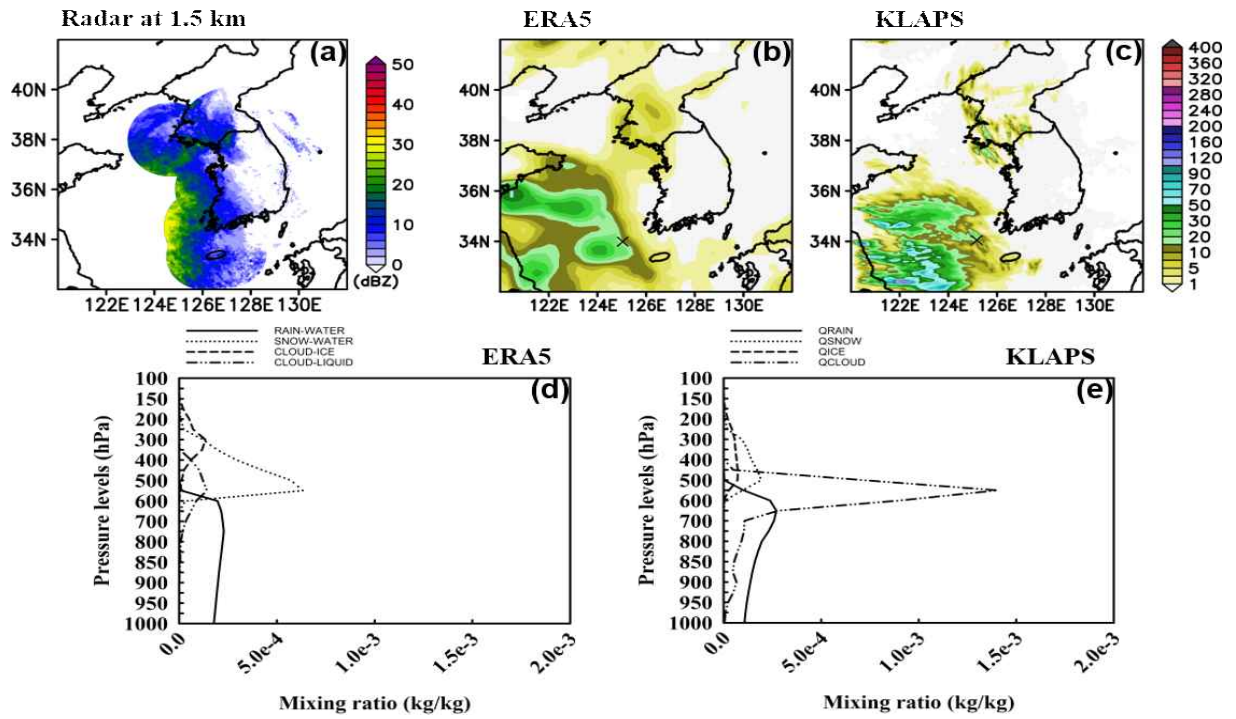


그림 2.2.1.3. 2021년 6월 14일 저기압 전면 수렴형 강수에 대한 (a) 1.5km 고도에서의 6시간 평균 레이더 반사도, (b) ERA5 재분석자료의 6시간 누적강수량, (c) KLAPS 예측장 자료의 6시간 누적강수량, (d) ERA5 재분석자료의 단일 시간 X지점에 대한 대기수상체 프로파일, 그리고 (e) KLAPS 예측장 자료의 6시간 평균 X지점에 대한 대기수상체 프로파일. (b)-(c)의 X는 우리나라 주변영역에서 6시간 최대누적강수량 위치를 나타낸다.

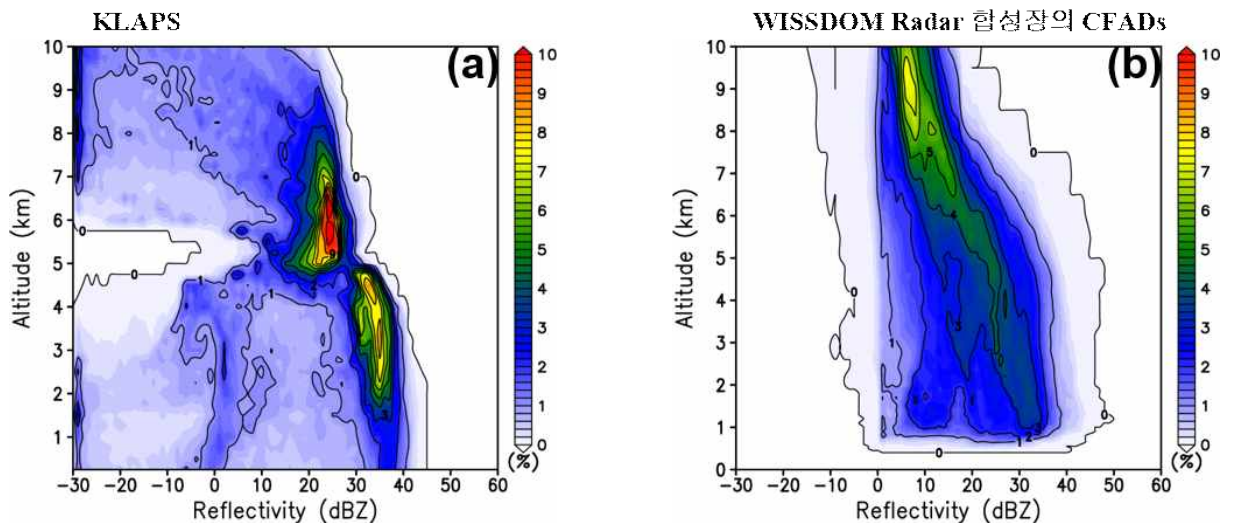


그림 2.2.1.4. 2021년 6월 14일 저기압 전면 수렴형 강수의 (a) KLAPS 예측장 자료의 X 지점에 대한 레이더 반사도 CFADs와 (b) 동일한 위치에서의 WISSDOM 레이더 반사도 CFADs

다. 저기압 전선형

그림 2.2.1.5과 2.2.1.6는 2020년 7월 19일의 저기압 전선형 강수에 대해 6시간 평균 레이더 반사도, 누적강수량, 두 자료의 비슷한 지점에서의 반경 50 km 내에서 계산된 평균 대기수상체 연직프로파일, 그리고 모델의 레이더 반사도와 WISSDOM 자료의 반사도 CFADs 결과를 보여준다. ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장 자료 모두 저기압 전선형 강수 형태를 보여주지만, KLAPS 예측장 6시간 누적강수가 ERA5 재분석자료보다 WISSDOM 자료의 1.5 km 고도 평균 레이더 반사도와 공간적 위치와 강수 형태를 잘 나타내고 있다(그림 2.2.1.5a-c). ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장 자료의 비슷한 강수 지역에서 계산된 대기수상체는 서로 많이 차이를 볼 수 있다(그림 2.2.1.5d-e). 우선 KLAPS 예측장 자료에서는 저기압 수렴 강수형태처럼 대기하층 및 중층에서 QCLOUD와 QRAIN의 대기수상체가 유의하게 관찰되지만, ERA5 재분석자료는 CLOUD-LIQUID가 RAIN-WATER보다 많음을 볼 수 있다. ERA5 재분석자료의 대기수상체는 단일 시간에 대해서 계산되었기 때문에 KLAPS와 정량적인 비교보다는 정성적비교가 적합할 것으로 생각된다. 따라서 두 자료의 큰 차이는 KLAPS의 QCLOUD의 분포가 대기 중층에서 상당히 증가한다는 점이다. 한편 대기 중·상층에서는 KLAPS의 QSNOW와 QICE형태는 ERA5 재분석자료의 SNOW-WATER와 CLOUD-ICE와 비교하여 약간 높은 곳에서 피크가 나타나지만 서로 비슷한 분포를 보여준다. KLAPS 예측장 자료가 실제 강수의 형태를 잘 나타내고 있는지를 분석하기 위해 WISSDOM 자료의 반사도 CFADs와 KLAPS 예측장 자료에서 계산된 레이더 자료의 CFADs를 비교 분석하였다(그림 2.2.1.6). KLAPS 예측장의 연직 레이더 반사도 분포는 저기압 전면수렴형 강수와 유사한 CFADs 분포를 보여준다(그림 2.2.1.1과 2.2.1.3). 서로 다른 강수 형태에서 유사한 반사도 연직분포가 나타나는 것은 수치모델의 미세물리과정의 특성인 것으로 생각된다. WISSDOM 레이더 반사도와 비교하였을 때, KLAPS 예측장에서 보여진 높은 반사도는 해당 지역에서 강수가 과대모의 되었을 가능성을 보여준다. 예를 들면, WISSDOM 자료의 반사도 분포를 보면 대부분 층운형 강수(30 dBZ이하)로 나타나지만, KLAPS 예측장 레이더 반사도는 일정 부분 대류성 강수(40 dBZ이상)가 포함되어 나타난다. 저기압 전선형 강수 유형에서도 저기압 전면 수렴형 강수유형과 유사하게 5 km 중·상층 대기의 CFADs를 보면 고도가 상승함에 따라 일정한 반사도 연직분포

는 앞서 언급한 것처럼 빙정 형태의 대기수상체 성장이 잘 묘사되지 않을 수 있음을 보여준다(그림 2.2.1.6a). 저기압 전면 수렴형 사례에서 본 바와 같이 KLAPS 모델 자료의 레이더 반사도 CFADs 값에서 강수 구역에서 -30 dBZ이 많이 관찰되는 이유는 저기압 전선형 강수의 후면의 비강수구역과 강수 구역 내에서도 QRAIN이 0인 지점이 포함된 결과로 판단된다. 이와 같은 특징은 2021년의 저기압 전선형 강수 사례와 이후 분석될 다른 사례의 KLAPS CFA Ds 분석에서 -30 dBZ CFADs 분포는 모두 비슷한 이유라고 할 수 있다.

그림 2.2.1.7과 2.2.1.8는 2021년 9월 20일의 저기압 전선형 강수에 대한 분석 그림을 보여준다. ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장의 6시간 누적강수는 WISSDOM 레이더의 6시간 평균반사도 비교하여 강수 형태가 비슷하다(그림 2.2.1.7a-c). 비슷한 위치에서 계산된 대기수상체 분포를 보면, ERA5 재분석자료와 비교하여 KLAPS의 QRAIN과 QCLOUD 형태의 대기수상체가 대기 하층에서 상대적으로 크게 나타난다(그림 2.2.1.7d-e). 이는 앞의 사례와 유사하게 QCLOUD 대기수상체의 비중이 ERA5의 재분석자료보다 상당히 크게 나타남을 알 수 있다(그림 2.2.1.7d-e). WISSDOM 레이더 반사도 자료의 CFADs와 KLAPS 예측장 반사도 CFADs는 전체적으로 보면 비슷한 분포를 보여주고 있으나, WISSDOM CFADs와 비교하여 KLAPS는 대기하층의 약한 강수가 잘 묘사되고 있지 않음을 알 수 있다.

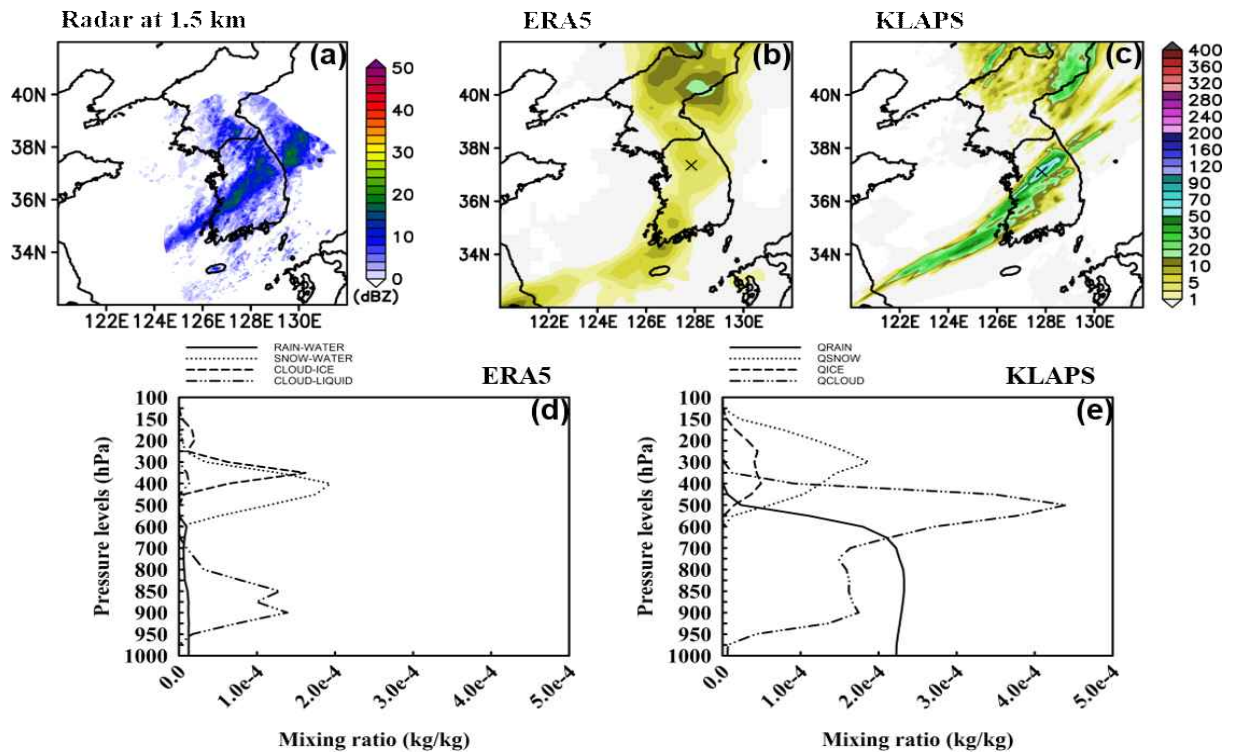


그림 2.2.1.5. 2020년 7월 19일 저기압 전선형 강수에 대한 (a) 1.5km 고도에서의 6시간 평균 레이더 반사도, (b) ERA5 재분석자료의 6시간 누적강수량, (c) KLAPS 예측장 자료의 6시간 누적강수량, (d) ERA5 재분석자료의 단일 시간 X지점에 대한 대기수상체 프로파일, 그리고 (e) KLAPS 예측장 자료의 6시간 평균 X지점에 대한 대기수상체 프로파일. (b)-(c)의 X는 우리나라 주변영역에서 6시간 최대누적강수량 위치를 나타낸다.

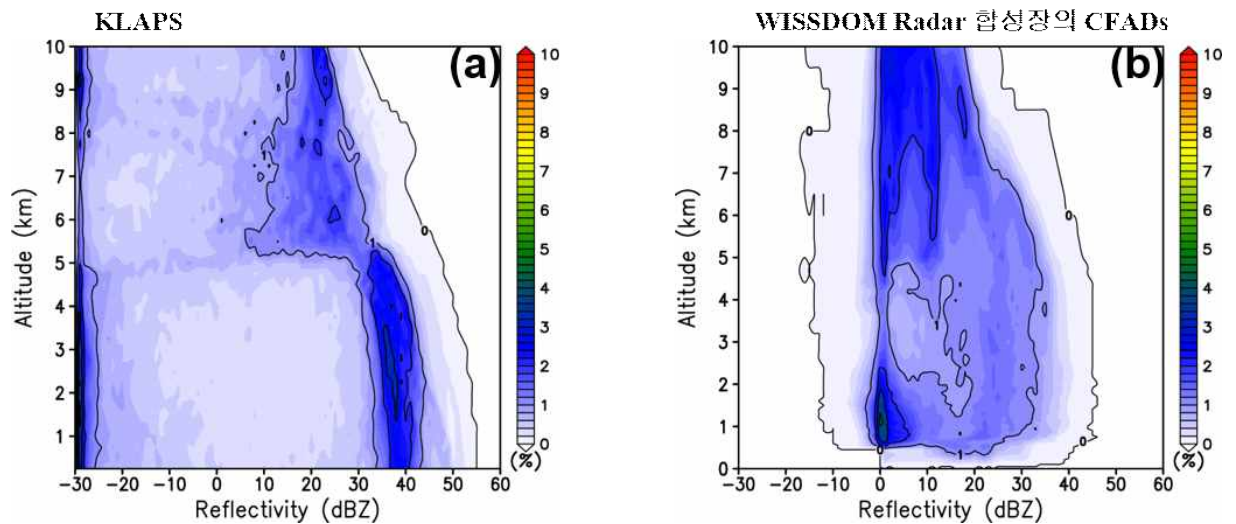


그림 2.2.1.6. 2020년 7월 19일 저기압 전선형 강수의 (a) KLAPS 예측장 자료의 X 지점에 대한 레이더 반사도 CFADs와 (b) 동일한 위치에서의 WISSDOM 레이더 반사도 CFADs

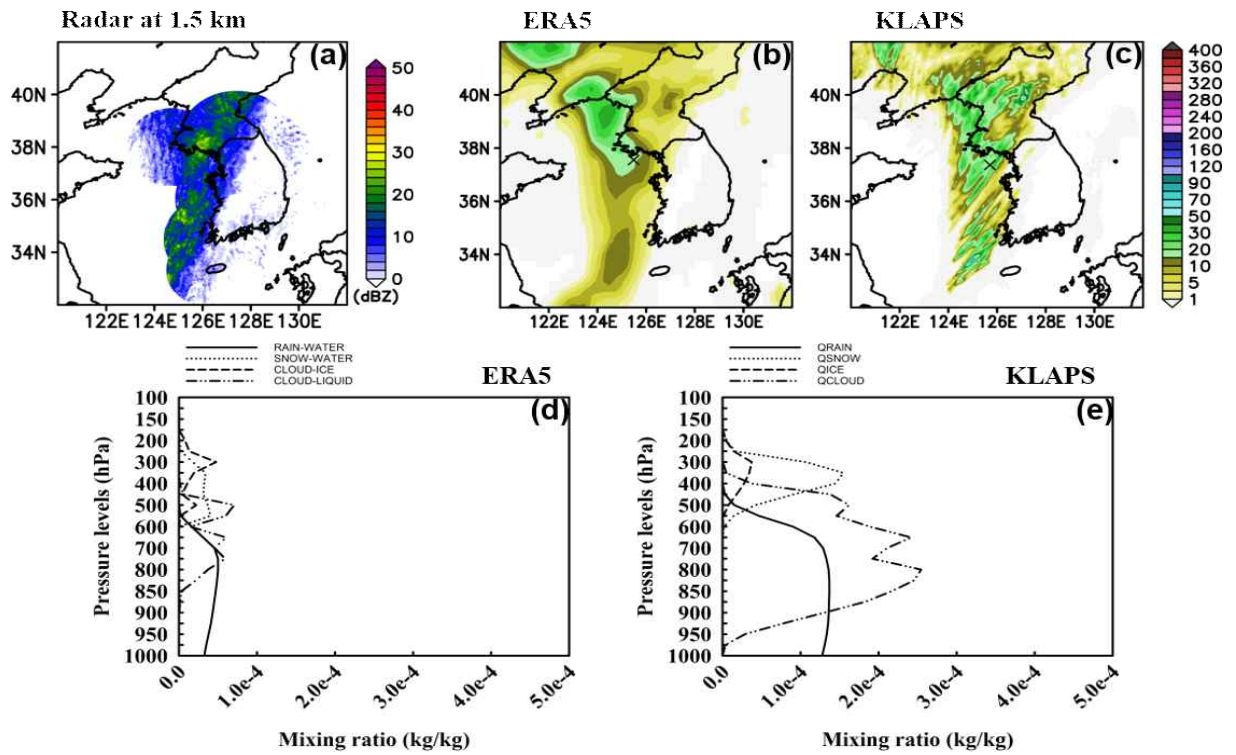


그림 2.2.1.7. 2021년 9월 20일 저기압 전선형 강수에 대한 (a) 1.5km 고도에서의 6시간 평균 레이더 반사도, (b) ERA5 재분석자료의 6시간 누적강수량, (c) KLAPS 예측장 자료의 6시간 누적강수량, (d) ERA5 재분석자료의 단일 시간 X지점에 대한 대기수상체 프로파일, 그리고 (e) KLAPS 예측장 자료의 6시간 평균 X지점에 대한 대기수상체 프로파일. (b)-(c)의 X는 우리나라 주변영역에서 6시간 최대누적강수량 위치를 나타낸다.

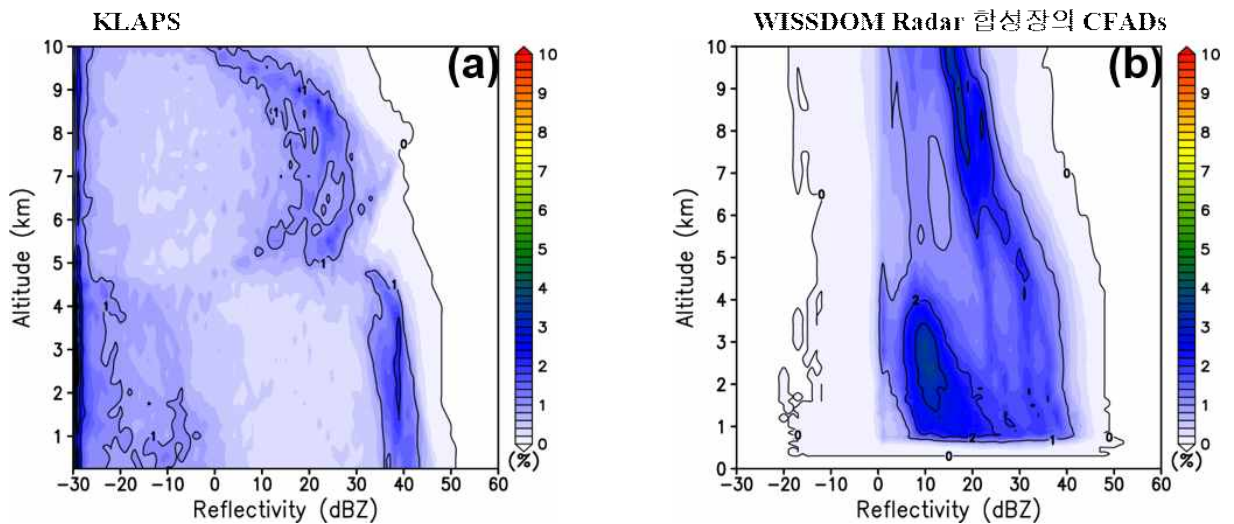


그림 2.2.1.8. 2021년 9월 20일 저기압 전선형 강수의 (a) KLAPS 예측장 자료의 X 지점에 대한 레이더 반사도 CFADs와 (b) 동일한 위치에서의 WISSDOM 레이더 반사도 CFADs

라. 하층 제트형

그림 2.2.1.9과 2.2.1.10는 2020년 8월 14일의 하층 제트형 강수에 대해 6시간 평균 레이더 반사도, 누적강수량, 두 자료의 비슷한 지점에서의 반경 50 km 내의 평균 대기수상체 연직프로파일, 그리고 모델의 레이더 반사도와 WISSDOM 자료의 반사도 CFADs 결과를 보여준다. WISSDOM 레이더 반사도와 비교하여 ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장 자료 모두 강수의 위치는 잘 나타내었으나, 두 자료 모두 수도권 서쪽에서 강수가 급격하게 약해지는 특징을 보여주고 있다(그림 2.2.1.9a-c). 이는 2.1.2절의 그림 2.1.2.10에서 볼 수 있듯이 서해상에서 발달한 구름이 하층의 차가운 공기로 인해 더 이상 동진하지 못하고 강수가 내려지는 특징으로 설명될 수 있다. 강수가 단절되는 지점에서 KLAPS 예측장의 대기수상체의 경우, 앞선 사례와 비슷하게 대기하층 및 중층에서 QRAIN과 QCLOUD 분포가 두드러지며, 상층에서는 QICE와 QSNOW의 빙정상태의 대기수상체가 크게 나타난다(그림 2.2.1.9d-e). ERA5 재분석자료의 경우 대기상층에서 빙정형태의 대기수상체만 유의하게 관찰된다. KLAPS 예측장 지점에서의 CFADs 분포는 다른 사례에서 살펴본 형태와 비슷하며, 이는 WISSDOM 반사도 CFADs와 큰 차이를 보인다. KLAPS 예측장의 누적강수량에서 나타난 것처럼 강수코어지역에서 강한 대류성 강수가 모의되고 있지만, WISSDOM자료의 반사도는 대체로 층운형 강수형태에 가까움을 볼 수 있다(그림 2.2.1.10). 한편 앞의 두 유형 강수와 마찬가지로 하층제트형 강수에서도 KLAPS의 CFADs는 대기 중·상층에서 고도에 따라 대체로 일정한 반사도 값을 보여준다. 강수유형에 관계없이 비슷한 형태의 CFADs는 현재 KLAPS 모델의 물리적 특성으로 판단된다.

그림 2.2.1.11과 2.2.1.12는 2021년 8월 28일의 하층 제트형 강수 분석 그림을 보여준다. ERA5 재분석자료의 누적강수는 WISSDOM 반사도 그림과 위치측면에서는 일치율을 보이나, 매우 적은 누적강수량을 모의하고 있다(그림 2.2.1.11a-b). 반면, KLAPS 예측장 누적강수량은 WISSDOM 반사도보다 약간 남쪽으로 주강수대를 모의하였고, 지역적으로 강한 강수코어를 동반하는 형태의 하층제트형 강수를 모의하였다(그림 2.2.1.11c). ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장 자료의 비슷한 위치에서 분석한 대기수상체를 보면, KLAPS는 앞선 여러 사례와 비슷한 대기수상체 분포를 보인다(그림 2.2.1.11e). 이러한 대기수상체의 고정적인 분포는 미세물

리규모 모수화에 의한 것으로 생각되며, 다양한 강수 형태와 강수 강도에 따른 미세물리과정의 수정이 필요할 것으로 생각된다. 두 자료의 대기수상체 양적인 차이를 제외하면 서로 비슷한 대기수상체 프로파일을 보여준다(그림 2.2.1.11d-e). 보다 정확한 대기수상체 연직프로파일을 분석하기 위해 WISSDOM CFADs와 KLAPS 예측장 자료로 계산된 CFADs를 비교하였다. 우선 KLAPS 예측장 자료의 CFADs는 앞의 여러 강수유형과 사례와 유사하게 하층대기에서 강한 반사도를 보여주고 있으나, 실제 WISSDOM 반사도 CFADs는 대부분 층운형 강수가 상당히 포함되어 있음을 알 수 있다(그림 2.2.1.12).

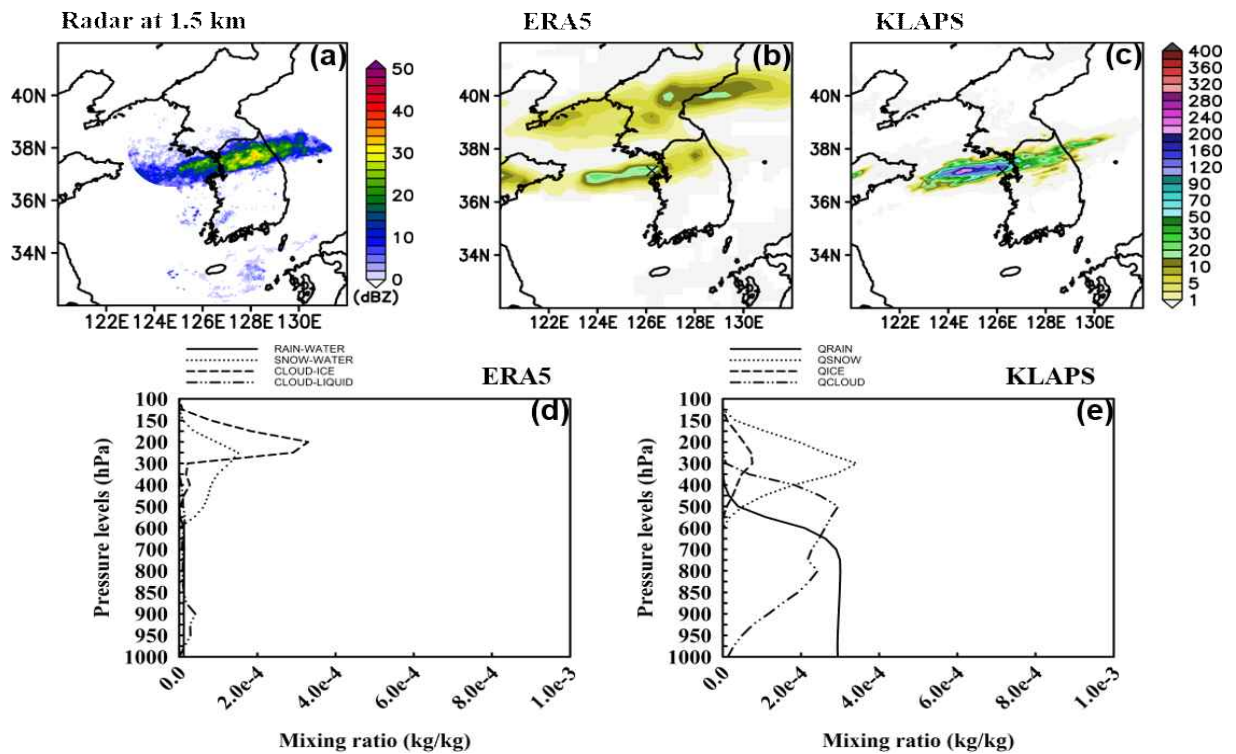


그림 2.2.1.9. 2020년 8월 14일 하층 제트형 강수에 대한 (a) 1.5km 고도에서의 6시간 평균 레이더 반사도, (b) ERA5 재분석자료의 6시간 누적강수량, (c) KLAPS 예측장 자료의 6시간 누적강수량, (d) ERA5 재분석자료의 단일 시간 X지점에 대한 대기수상체 프로파일, 그리고 (e) KLAPS 예측장 자료의 6시간 평균 X지점에 대한 대기수상체 프로파일. (b)-(c)의 X는 우리나라 주변영역에서 6시간 최대누적강수량 위치를 나타낸다.

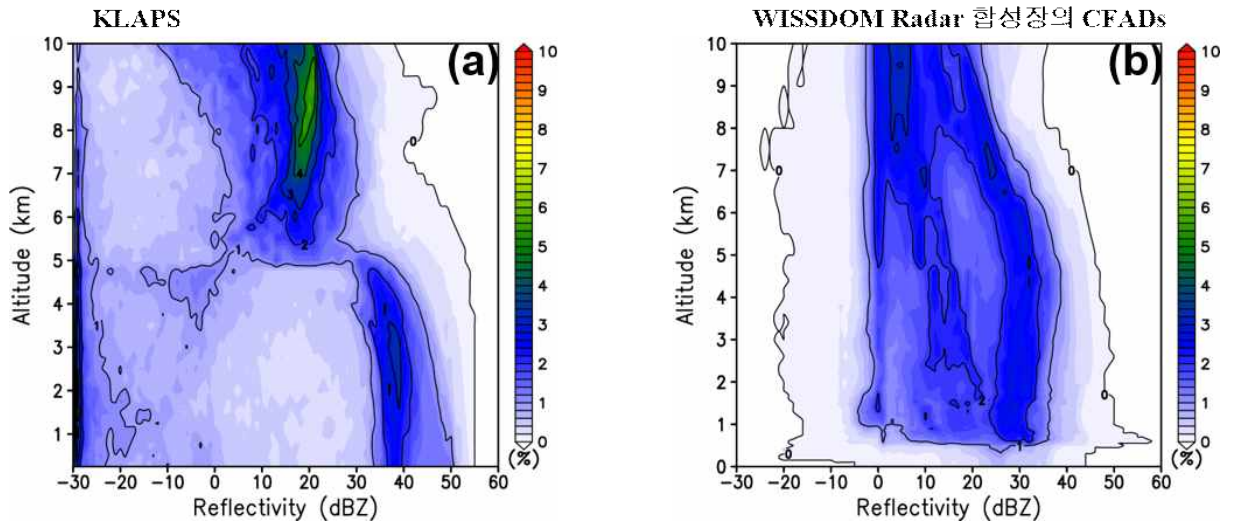


그림 2.2.1.10. 2020년 8월 14일 하층 제트형 강수의 (a) KLAPS 예측장 자료의 X 지점에 대한 레이더 반사도 CFADs와 (b) 동일한 위치에서의 WISSDOM 레이더 반사도 CFADs

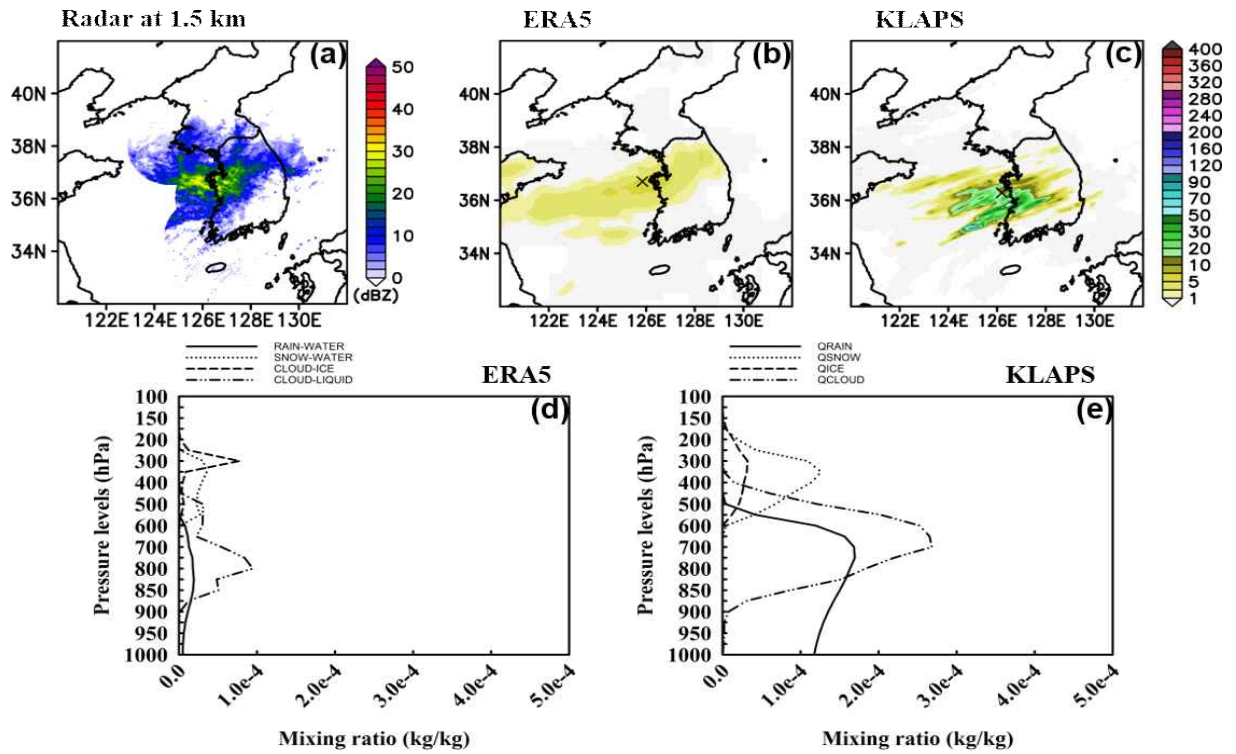


그림 2.2.1.11. 2021년 8월 28일 하층 제트형 강수에 대한 (a) 1.5km 고도에서의 6시간 평균 레이더 반사도, (b) ERA5 재분석자료의 6시간 누적강수량, (c) KLAPS 예측장 자료의 6시간 누적강수량, (d) ERA5 재분석자료의 단일 시간 X지점에 대한 대기수상체 프로파일, 그리고 (e) KLAPS 예측장 자료의 6시간 평균 X지점에 대한 대기수상체 프로파일. (b)-(c)의 X는 우리나라 주변영역에서 6시간 최대누적강수량 위치를 나타낸다.

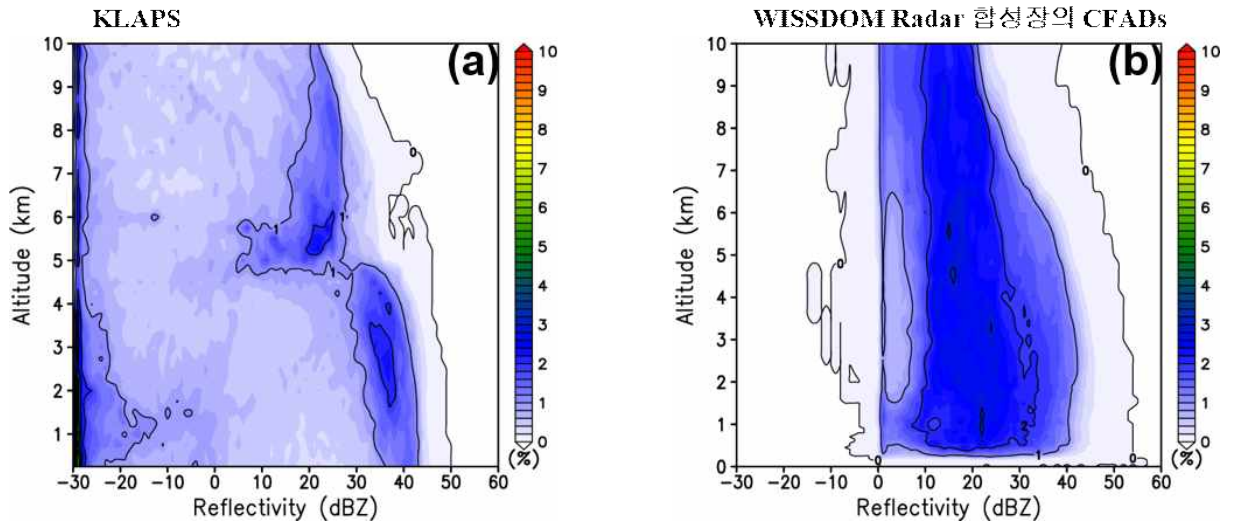


그림 2.2.1.12. 2021년 8월 28일 하층 제트형 강수의 (a) KLAPS 예측장 자료의 X 지점에 대한 레이더 반사도 CFADs와 (b) 동일한 위치에서의 WISSDOM 레이더 반사도 CFADs

마. 장마 전선형

그림 2.2.1.13과 2.2.1.14는 2020년 7월 6일의 장마전선형 강수에 대해 6시간 평균 레이더 반사도, 누적강수량, 두 자료의 비슷한 지점에서의 반경 50 km 내의 평균 대기수상체 연직프로파일, 그리고 모델의 레이더 반사도와 WISSDOM 자료의 반사도 CFADs 결과를 보여준다. WISSDOM 레이더 반사도와 비교하여 다소 강수 형태의 차이는 있으나 KLAPS 예측장 자료의 누적강수지역은 우리나라 내륙에서 발달한 강수를 잘 예측한 것으로 생각된다(그림 2.2.1.13a와 13c). ERA5 재분석자료의 경우 수도권 지역에 두드러진 누적강수량이 보인다(그림 2.2.1.13b). 두 자료의 비슷한 위치에서 대기수상체 분포를 보면, KLAPS 예측장의 QCLOUD는 ERA5 재분석자료의 CLOUD-LIQUID와 비슷한 위치에서 피크가 나타난다(그림 2.2.1.13d-e). 하지만, ERA5 재분석자료에서는 다른 대기수상체들은 유의미하게 관찰되지 않았고, KLAPS 예측장은 QRAIN이 대기하층에서 크게 나타나며, QICE와 QSNOW가 다른 사례보다 약 100 hPa 아래쪽에서 피크가 관찰된다. KLAPS 예측장의 반사도 CFADs는 양적인 차이를 제외하면 이전 사례들과 비슷한 CFADs 연직분포를 보여준다(그림 2.2.1.14a). WISSDOM 반사도 CFADs는 대체로 층운형 강수의 레이더 반사도를 나타내고 있는 것으로 판단된다(그림 2.2.1.14b).

그림 2.2.1.15과 2.2.1.16은 2021년 7월 3일의 장마전선형 강수에 결과를 보여준다. ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장 자료의 누적강수량이 WISSDOM 레이더 반사도 분포와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 두 모델자료의 누적강수량과 강수 중심지역이 비슷함을 볼 수 있다. 이로 인해 두 모델자료의 대기수상체 분포도 상당히 비슷하게 나타남을 볼 수 있다. 가장 큰 차이는 ERA5 재분석자료에서는 대기중층에서 SNOW-WATER 대기수상체가 크게 증가한 반면, KLAPS 예측장 자료에서는 QCLOUD 대기수상체가 증가한 점이다. 본 연구에서 분석한 사례 가운데 현재 사례는 두 모델 사이의 누적강수량 및 강수강도등이 매우 유사함으로 두 모델의 서로 가까운 누적 강수지역에서 대기수상체 프로파일의 두드러진 차이는 두 모델에 사용된 미세물리모수화의 차이를 잘 설명할 수 있을 것으로 생각된다(Forbes et al. 2011; Bae et al. 2018). KLAPS 예측장의 반사도 CFADs는 앞선 여러 사례에서 공통적으로 나타나는 연직구조이며, 다만 앞선 사례들보다 더 크고 밀집된 CFADs 연직구조를 보여준다. WISSDOM

반사도 CFADs와 비교해보면, 이 사례의 경우 KLAPS 예측장의 CFADs는 대기 상층에서 고도에 따라 약간 감소하는 특징을 보여준다. 대기 하층의 WISSDOM자료는 레이더 범위가 벗어나는 영역을 포함하기 때문에 상대적으로 CFADs 값이 낮게 나타날 수 있다. 본 사례의 경우 KLAPS 예측장이 비교적 다른 사례보다 누적강수량 및 대기수상체의 연직구조 등을 잘 나타낸 것으로 생각된다.

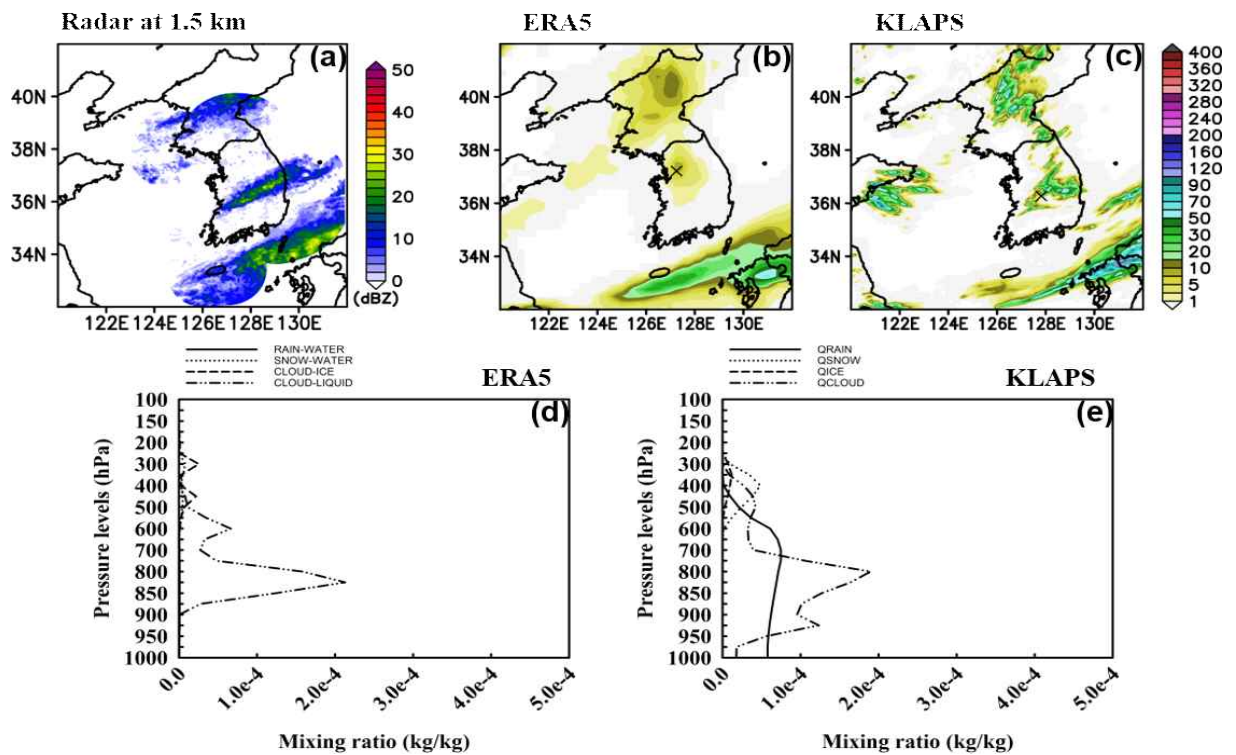


그림 2.2.1.13. 2020년 7월 6일 장마전선형 강수에 대한 (a) 1.5km 고도에서의 6시간 평균 레이더 반사도, (b) ERA5 재분석자료의 6시간 누적강수량, (c) KLAPS 예측장 자료의 6시간 누적강수량, (d) ERA5 재분석자료의 단일 시간 X지점에 대한 대기수상체 프로파일, 그리고 (e) KLAPS 예측장 자료의 6시간 평균 X지점에 대한 대기수상체 프로파일. (b)-(c)의 X는 우리나라 주변영역에서 6시간 최대누적강수량 위치를 나타낸다.

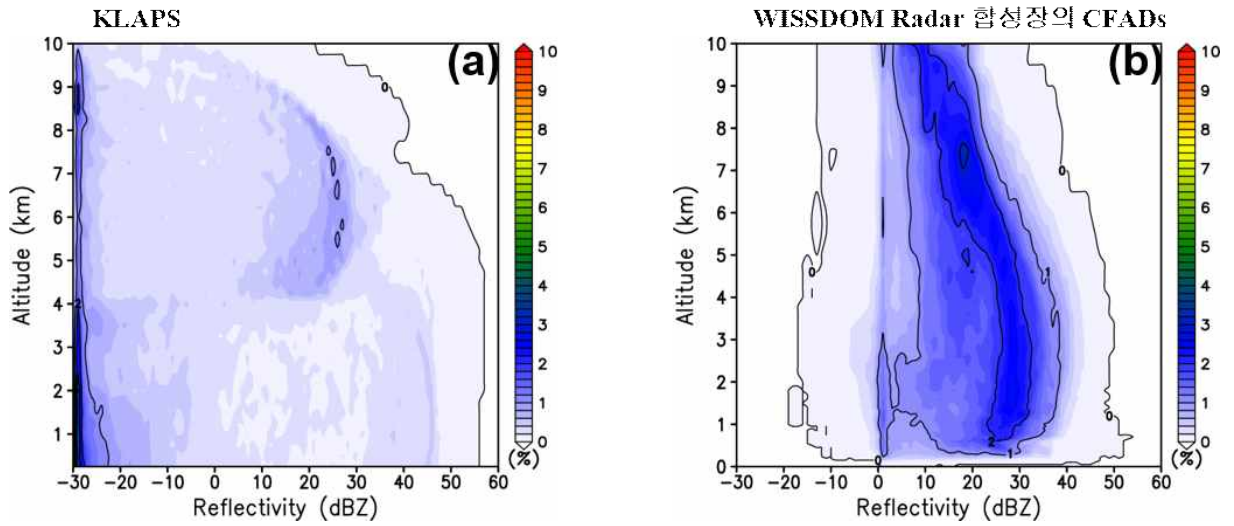


그림 2.2.14. 2020년 7월 6일 장마 전선형 강수의 (a) KLAPS 예측장 자료의 X 지점에 대한 레이더 반사도 CFADs와 (b) 동일한 위치에서의 WISSDOM 레이더 반사도 CFADs

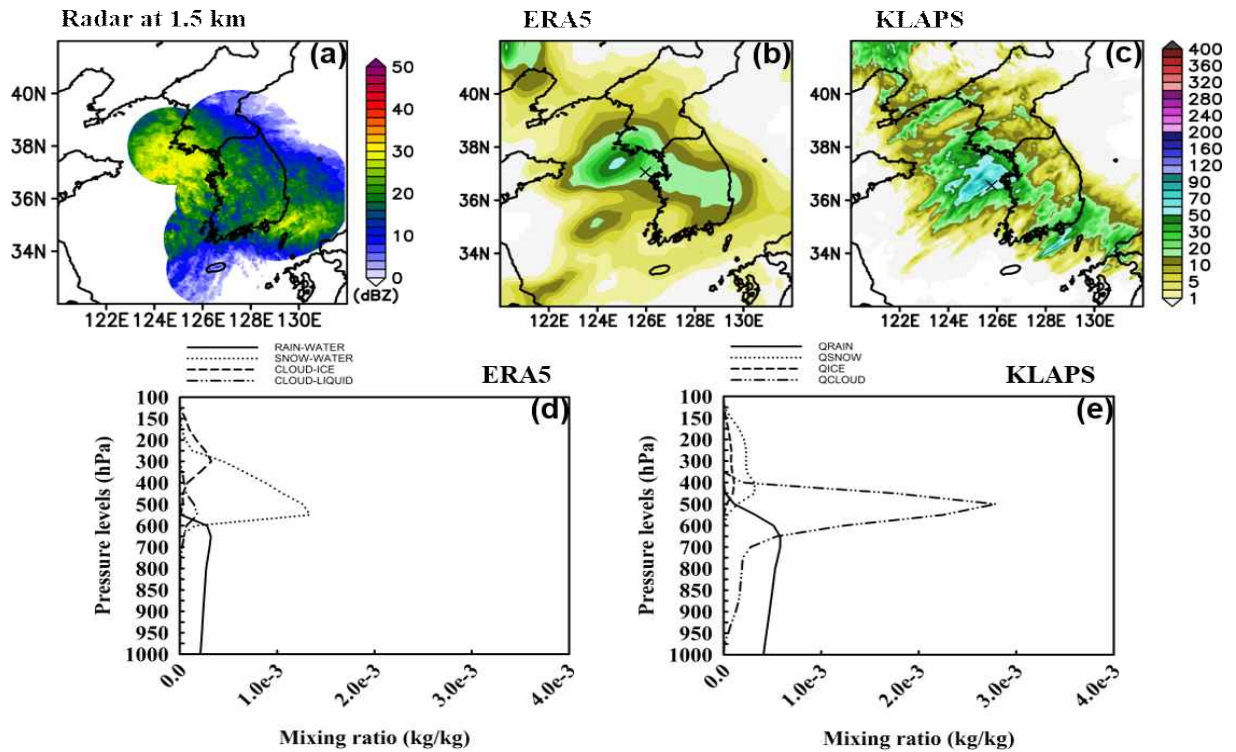


그림 2.2.15. 2021년 7월 3일 장마전선형 강수에 대한 (a) 1.5km 고도에서의 6시간 평균 레이더 반사도, (b) ERA5 재분석자료의 6시간 누적강수량, (c) KLAPS 예측장 자료의 6시간 누적강수량, (d) ERA5 재분석자료의 단일 시간 X지점에 대한 대기수상체 프로파일, 그리고 (e) KLAPS 예측장 자료의 6시간 평균 X지점에 대한 대기수상체 프로파일. (b)-(c)의 X는 우리나라 주변영역에서 6시간 최대누적강수량 위치를 나타낸다.

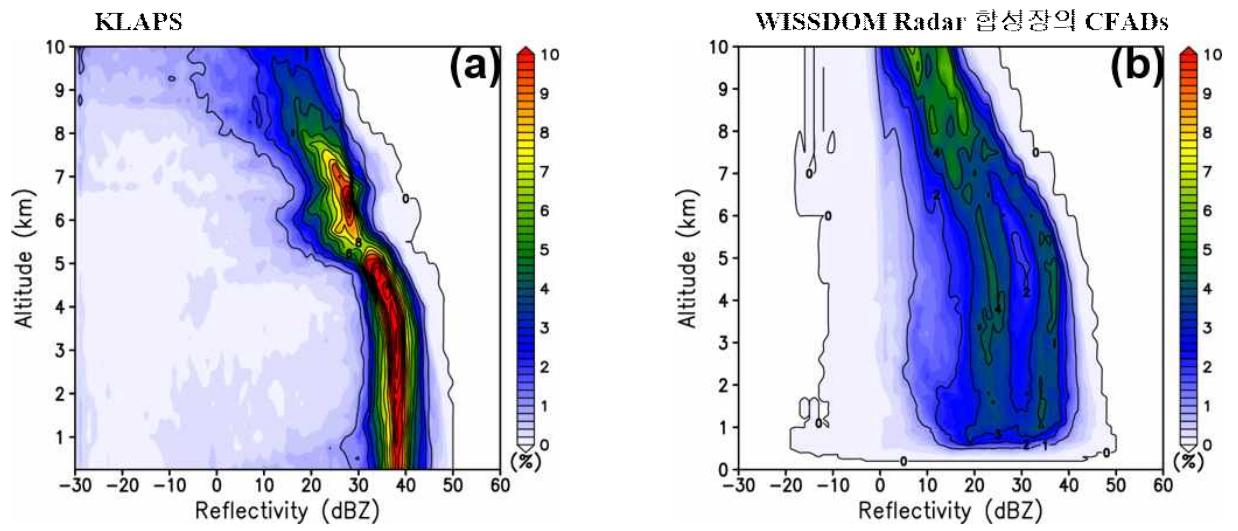


그림 2.2.1.16. 2021년 7월 3일 장마 전선형 강수의 (a) KLAPS 예측장 자료의 X 지점에 대한 레이더 반사도 CFADs와 (b) 동일한 위치에서의 WISSDOM 레이더 반사도 CFADs

바. 고기압 영향권 내 대류성 강수

그림 2.2.1.17과 2.2.1.18는 2020년 7월 17일의 고기압 영향권 내 대류성 강수에 대해 6시간 평균 레이더 반사도, 누적강수량, 두 자료의 비슷한 지점에서의 반경 50 km 내의 평균 대기수상체 연직프로파일, 그리고 모델의 레이더 반사도와 WISSDOM 자료의 반사도 CFADs 결과를 보여준다. WISSDOM 반사도와 비교해볼 때, KLAPS 예측장의 누적강수량이 ERA5 재분석자료의 누적강수량보다 공간적으로 고기압 영향권 내 대류성 강수를 잘 나타내고 있음을 보여준다(그림 2.2.1.17a-c). 두 모델 자료의 비슷한 위치에서의 평균 대기수상체를 보면, ERA5 재분석자료의 CLOUD-LIQUID와 KLAPS 예측장 자료의 QCLOUD가 대기 중층에서 피크가 나타난다(그림 2.2.1.17d-e). KLAPS 예측장 자료는 다른 앞선 사례와 같이 QRAIN, QICE, QSNOW, 그리고 QCLOUD가 강수유형과 관계없이 특정한 연직분포를 계속적으로 모의하고 있는 반면, ERA5 재분석자료에서는 강수 사례마다 서로 다른 대기수상체의 피크가 발견된다. 이는 강수량측면에서도 차이가 있기 때문에, 향후 두 자료에 대해 최대한 비슷한 공간해상도를 가지고 분석할 필요가 있다. KLAPS의 대기수상체는 WISSDOM 레이더 반사도 CFADs와 비교하여 상당히 다름을 볼 수 있다(그림 2.2.1.18). 비록 누적강수량의 공간적 측면에서는 잘 모의하였으나 강수가 대기수상체의 변화로 내린 강수가 아니므로 이에 대한 고찰은 필요해 보인다. 본 사례의 강수가 WISSDOM의 CFADs에서는 대부분 층운형 강수로 이루어져 있음을 주목할 필요가 있다(그림 2.2.1.18b). 한편 KLAPS 예측장 자료의 반사도 CFADs는 앞선 다른 사례에서도 관찰된 고정적인 CFADs 특징을 보여준다. 이러한 특징은 WISSDOM 반사도 CFADs에서는 뚜렷하게 나타나지 않았다(그림 2.2.1.18).

그림 2.2.1.19과 2.2.1.20는 2021년 7월 9일의 고기압 영향권 내 대류성 강수에 관한 결과를 보여준다. WISSDOM 반사도는 대부분의 강수가 수도권 및 경기 북부에 집중되어 있음을 알 수 있으며, ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장의 누적강수량은 대체로 WISSDOM 반사도 자료와도 잘 일치한다(그림 2.2.1.19a-c). 그 결과 두 모델 자료의 최대 누적강수량 위치는 비슷한 위치에서 나타났다. 이 경우 앞의 장마전선 사례 그림 2.2.1.15와 2.2.1.16처럼 ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장 자료 사이의 대기수상체에 대한 현실적인 비교가 가능할 수 있다. 우선 KLAPS 예측장은 앞의 다른 사례에서와 같이 QRAIN과 QCLOUD의 분포가 대기하층

및 중층에서 집중되어 나타나지만, ERA5 재분석자료에서는 매우 적은 양을 모의하고 있다 (그림 2.2.1.19d-e). 한편, 대기상층에서는 CLOUD-ICE, SNOW-WATER, QICE, QSNOW의 대기수상체가 비슷하게 관찰되었다. KLAPS 예측장의 반사도 CFADs는 WISSDOM 반사도 CFADs와 비교하여 비슷한 분포를 보여준다. 두 자료의 반사도는 고도 약 4~8 km까지 약 20 dBZ로 높은 비율이 관찰되고 이러한 중층대기의 약 20 dBZ 군집은 대체로 빙정형태의 대기수상체로 생각된다.

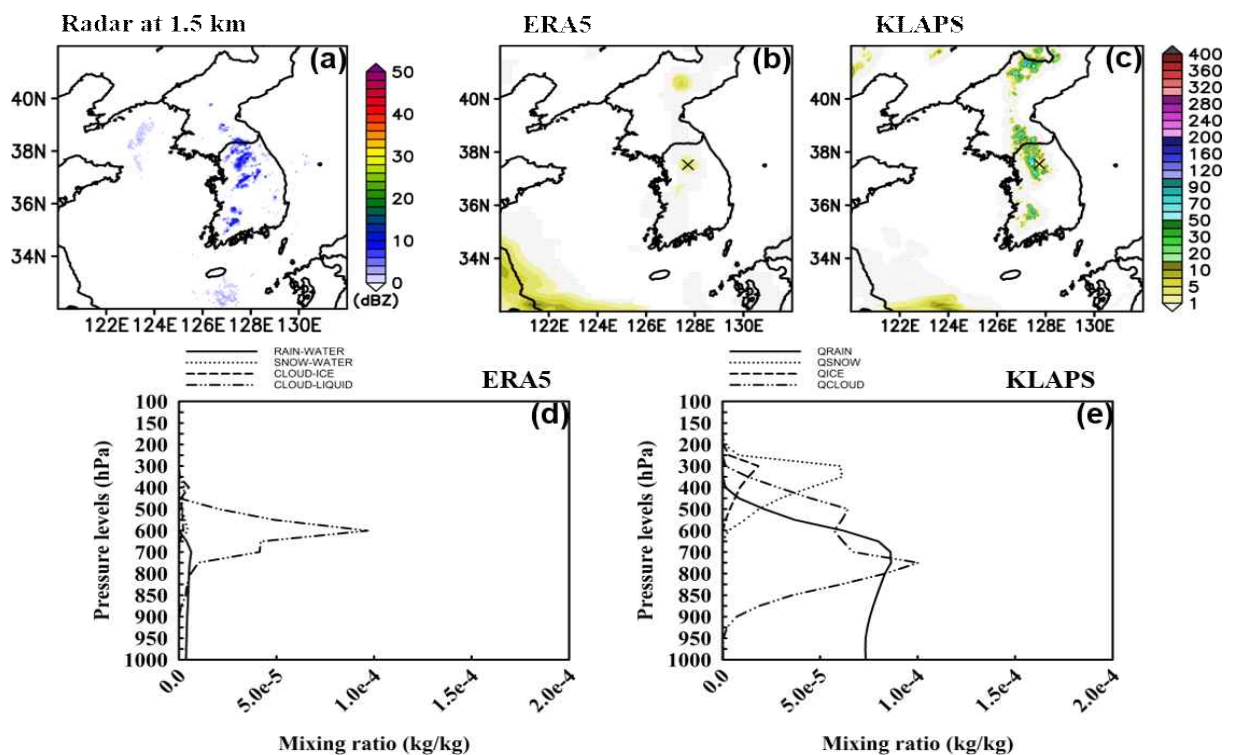


그림 2.2.1.17. 2020년 7월 17일 고기압 영향권 내 대류성 강수에 대한 (a) 1.5km 고도에서의 6시간 평균 레이더 반사도, (b) ERA5 재분석자료의 6시간 누적강수량, (c) KLAPS 예측장 자료의 6시간 누적강수량, (d) ERA5 재분석자료의 단일 시간 X지점에 대한 대기수상체 프로파일, 그리고 (e) KLAPS 예측장 자료의 6시간 평균 X지점에 대한 대기수상체 프로파일. (b)-(c)의 X는 우리나라 주변영역에서 6시간 최대누적강수량 위치를 나타낸다.

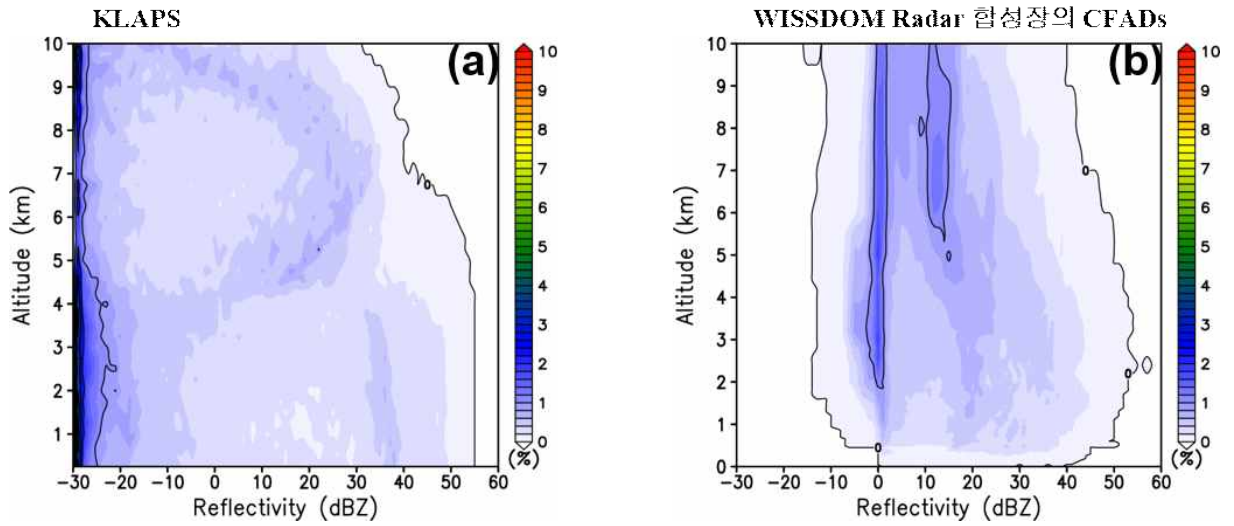


그림 2.2.1.18. 2020년 7월 17일 고기압 영향권 내 대류성 강수의 (a) KLAPS 예측장 자료의 X 지점에 대한 레이더 반사도 CFADs와 (b) 동일한 위치에서의 WISSDOM 레이더 반사도 CFADs

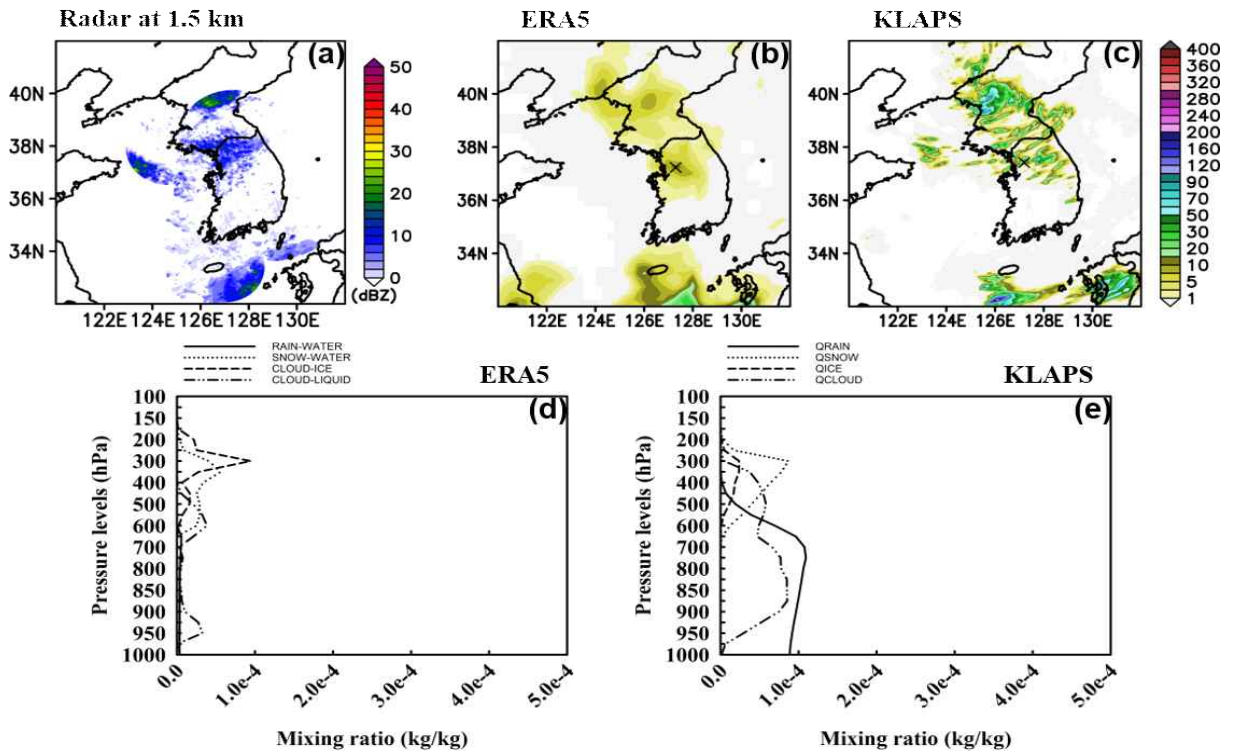


그림 2.2.1.19. 2021년 7월 9일 고기압 영향권 내 대류성 강수에 대한 (a) 1.5km 고도에서의 6시간 평균 레이더 반사도, (b) ERA5 재분석자료의 6시간 누적강수량, (c) KLAPS 예측장 자료의 6시간 누적강수량, (d) ERA5 재분석자료의 단일 시간 X지점에 대한 대기수상체 프로파일, 그리고 (e) KLAPS 예측장 자료의 6시간 평균 X지점에 대한 대기수상체 프로파일. (b)-(c)의 X는 두자료사이의 누적강수량 또는 최대강수량이 나타난 지점을 임의로 표시한 지점이다.

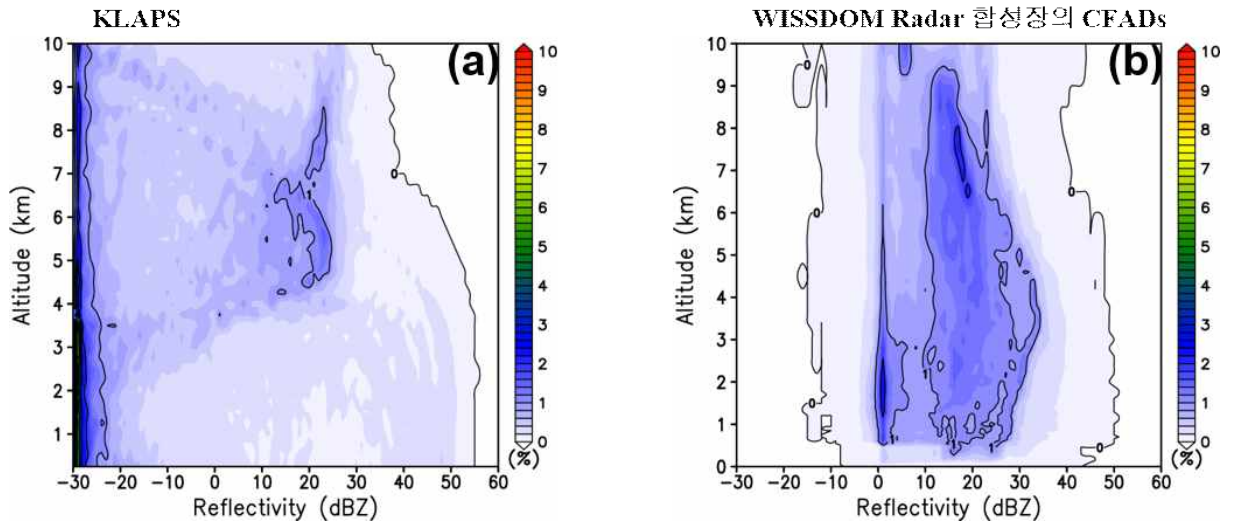


그림 2.2.1.20. 2021년 7월 9일 고기압 영향권 내 대류성 강수의 (a) KLAPS 예측장 자료의 X 지점에 대한 레이더 반사도 CFADs와 (b) 동일한 위치에서의 WISSDOM 레이더 반사도 CFADs

2.2.2. 초기장에 대한 강수 물리과정 예측 특성 분석

가. 강수사례의 강수량 정량비교분석 방법

기상청 초단기 예측시스템 KLAPS의 초기장에 따른 강수예측 특성을 객관적으로 검증하기 위해 본 연구에서는 ERA5 재분석자료, Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG)자료, 기상청 무인자동기상관측장비(Automatic Weather Station, AWS)자료와 비교하였다. ERA5 재분석자료는 약 27 km의 공간해상도와 1시간 시간해상도, IMERG 자료는 10 km 공간해상도와 30분 시간해상도, 그리고 AWS 관측자료는 우리나라 지점별 1시간 누적강수량자료이다. IMERG 자료는 원격탐사자료를 기반으로 추정된 강수량자료로, AWS 관측자료가 존재하지 않는 지역에서의 강수를 평가하기 위해 사용되었다. 또한, 약 10 km의 공간해상도를 가지고 있기 때문에 지역적으로 좁고 깊게 발달하는 대류성 강수에 대해서는 과소평가하는 경향이 존재한다. 한편, 본 연구에서는 수학적식 2.2.2.1의 지수함수기반의 보간 방법을 사용하여 AWS 관측자료를 보간하였다. 예를 들면, 관측지점에서 100% 자료정보가 보간되고, 반경에 따라 지수함수적으로 감소함으로써 관측지점의 주변으로 보간된다.

$$R_{rain}(r,\theta) = \frac{1}{6} \times P_{AWS} \times \exp \left[- \left\{ \frac{r^4}{8^4} \right\} \right] \quad \text{수학적식 2.2.2.1}$$

R_{rain} 과 P_{AWS} 는 보간될 강수의 반경과 AWS 관측자료를 나타낸다. 여기서 r 과 θ 는 반경과 방위각을 나타낸다. 여기서 반경은 2 km의 해상도를 가지고, 관측지점을 제외하고 보간되기 때문에, 위의 수학적식에서 r 은 항상 0보다 크다. 수학적식 2.2.2.1의 각 계수들은 여러 테스트를 통해 경험적으로 얻어진 계수이며, 본 연구에서는 강수강도와 상관없이 항상 일정한 기울기 및 영향반경을 가진다. KLAPS의 초기장에 따른 강수량을 동일시간대에 대해 검증하기 위해 그림 2.2.2.1 특정시간 6시간의 누적강수량을 비교하였다.

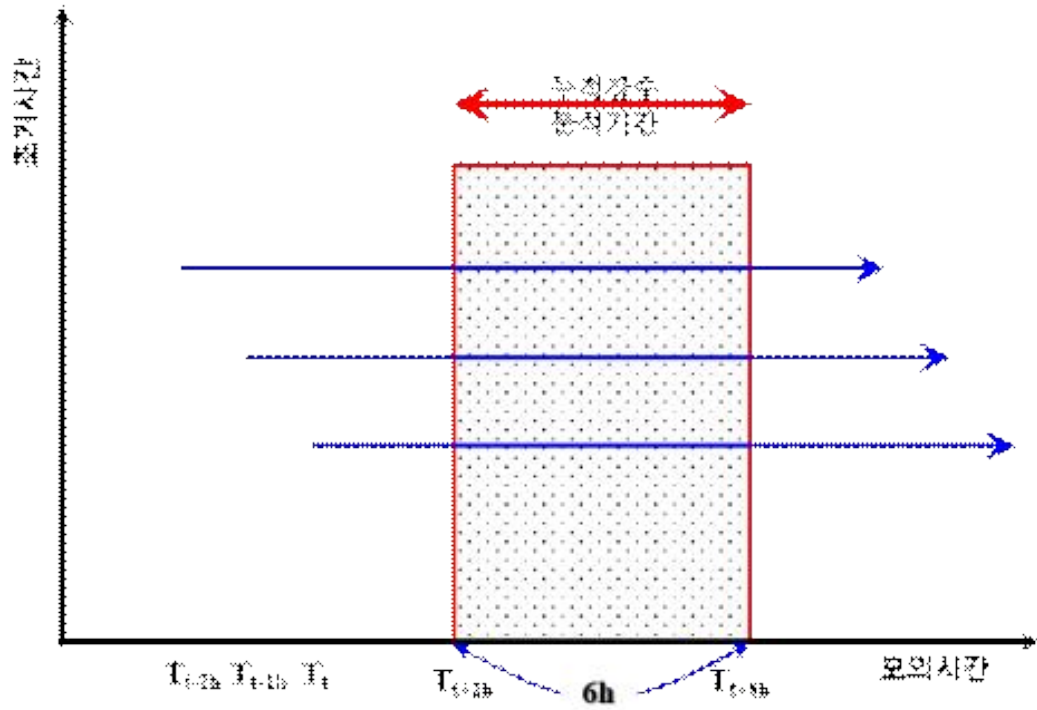


그림 2.2.2.1. KLAPS 모델 자료의 초기시간에 따른 누적강수량 정량평가 방법 모식도

나. 저기압 전면 수렴형

그림 2.2.2.2는 2020년 6월 29일 저기압 전면 수렴형 강수에 대한 IMERG, ERA5 재분석자료, AWS 관측자료, 그리고 KLAPS 예측장 자료의 6시간 누적강수량을 나타낸다. 전반적인 강수영역 측면에서 KLAPS 예측장은 IMERG, ERA5 재분석자료, 그리고 AWS 관측자료와 비교하여 잘 일치하는 경향을 보여준다. KLAPS는 IMERG와 ERA5 재분석자료와 비교하여 서해상의 강수코어가 잘 모의되지 않았으며, AWS 관측자료와 비교해보면, 남해안 강수는 대체로 과대 모의된 경향을 보인다. 하지만 제주도 산지의 강수는 다른 두 자료보다 현실적으로 잘 모의된 것으로 판단된다.

그림 2.2.2.3는 2020년 6월 29일 저기압 전면 수렴형 강수사례의 ERA5 재분석자료로 계산된 온도장, 온도경도장, 온도이류장, 지위고도장, 지위고도 경도장을 나타낸 그림이다. 대기하층과 중층의 남서쪽에서 상대적으로 따뜻한 공기가 위치해있으며, 온도 경도는 남동-북서쪽으로 나타난다. 온도이류는 저기압 전면에서 나타나고 있음을 볼 수 있다. 대기하층에서는 저기압 중심에 가까워서 관찰되며, 대기 중층에서는 저기압 전면에서 양의 온도이류가 발생하는 것을 볼 수 있다. 지위고도의 경우 대기 하층과 중층에서 위치가 다르며, 이는 저기압이 남쪽에서 북쪽으로 기울어져있는 형태를 예상할 수 있다. 대기하층에서 지위고도 경도가 강하게 나타나며, 이는 강수의 코어위치와 대체로 일치한다(그림 2.2.2.2). 그림 2.2.2.4와 2.2.2.5은 KLAPS 초기장 0200UTC부터 0400UTC으로 예측된 850 hPa과 500 hPa의 온도장, 온도경도장, 온도이류장, 지위고도장, 지위고도 경도장을 나타낸 그림이다. 전반적으로 큰 차이는 보이지 않지만, ERA5 재분석자료와 비교하여 저기압의 온도장이 남북으로 쌍극자(dipole)구조를 보이고 있다. 그로 인해, 온도경도장 및 이류장은 위도와 평행하게 나타나며, 대기하층에서 저기압으로 수렴하는 구조는 잘 나타나지 않았다. 지위고도장 중심위치는 KLAPS 자료가 ERA5 재분석자료보다 대기하층에서는 좀 더 동쪽에 위치하고 동서로 타원 형태로 발달한 구조를 보인다. 지위고도경도장의 쌍극자구조는 저기압 중심근처에서 약하게 나타났다. 대기중층에서는 0200UTC와 0300UTC는 ERA5 재분석자료보다 우리나라 쪽으로 좀 더 확장된 구조를 보였으나, 0400UTC의 KLAPS 초기장에서는 갑자기 지위고도장이 북서쪽으로 상당히 수축된 모습을 보였다. 대기중층의 지위고도 경도장의 패턴은 두 자료에서 비슷하게 나타났다.

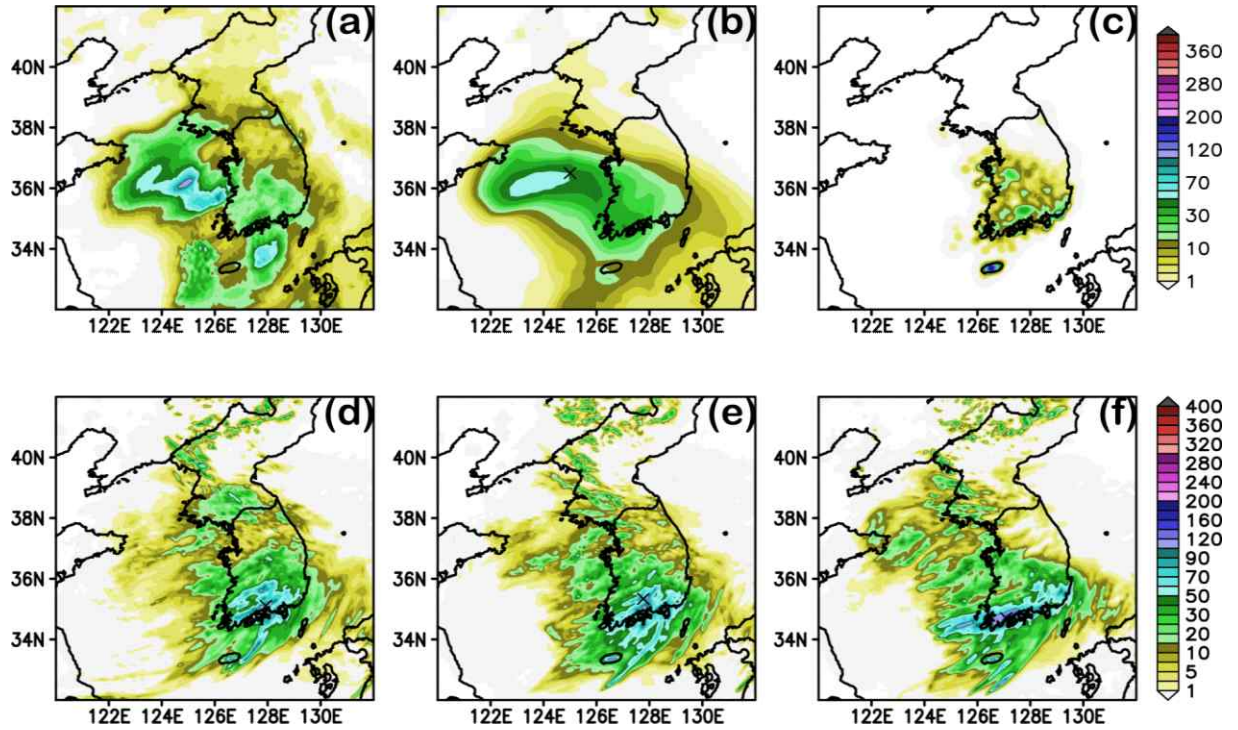


그림 2.2.2.2. 2020년 6월 29일 저기압 전면 수렴형 강수의 6시간 누적강수량 비교: (a) IMERG G, (b) ERA5 재분석자료, (c) AWS 관측자료, (d) KLASPS 0200 UTC, (e) KLASPS 0300 UTC, 그리고 (f) KLASPS 0400 UTC

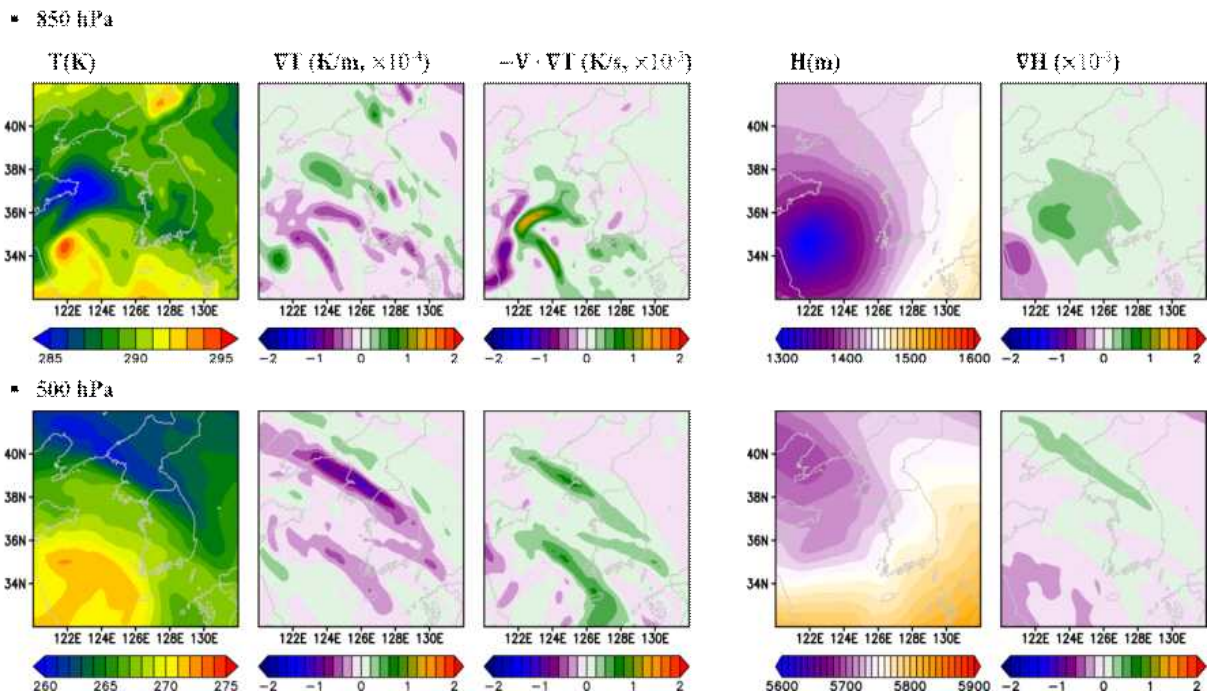


그림 2.2.2.3. 2020년 6월 29일 저기압 전면 수렴형 강수에 대한 ERA5 재분석자료의 온도장 (T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄

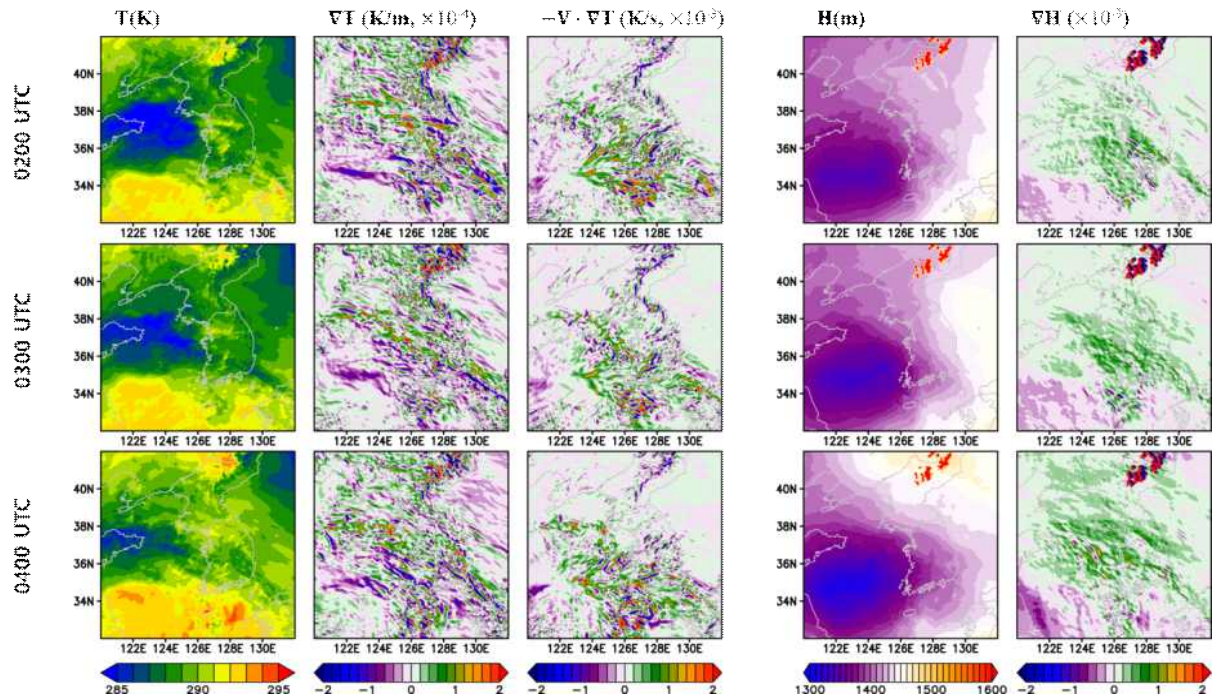


그림 2.2.2.4. 2020년 6월 29일 저기압 전면 수렴형 강수의 850 hPa에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄

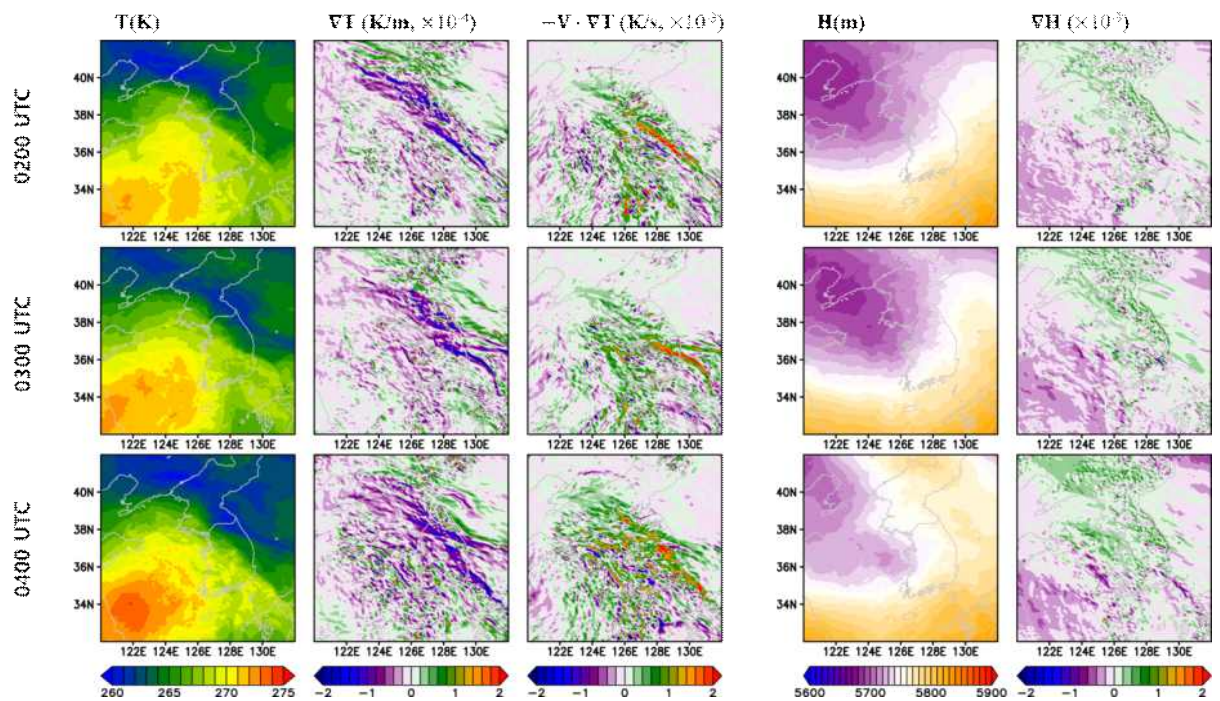


그림 2.2.2.5. 2020년 6월 29일 저기압 전면 수렴형 강수의 500 hPa에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄

그림 2.2.2.6는 2021년 6월 14일 저기압 전면 수렴형 강수에 대한 IMERG, ERA5 재분석자료, AWS 관측자료, 그리고 KLAPS 예측장의 6시간 누적강수량을 나타낸다. 전반적인 강수영역은 KLAPS가 IMERG, ERA5, 그리고 AWS 관측자료와 비교하여 잘 일치하는 모습을 보여준다. KLAPS는 IMERG와 비교하여 서해남부해상의 강수강도가 잘 모의된 것으로 생각되며, IMERG, ERA5 재분석자료, 그리고 AWS 관측자료와 비교하여 대체로 수도권 강수도 대체로 잘 모의된 것으로 보인다.

그림 2.2.2.7는 2021년 6월 14일 저기압 전면 수렴형 강수사례의 ERA5 재분석자료로 계산된 온도장, 온도경도장, 온도이류장, 지위고도장, 지위고도 경도장을 나타낸 그림이다. 앞선 2020년 사례와 비슷하게 대기하층과 중층의 남서쪽에서 상대적으로 따뜻한 공기가 위치해있으며, 온도 경도는 남동-북서쪽으로 발달한 모습이다. 온도이류 또한 이에 따라 발달하여 있다. 대기하층과 중층의 지위고도를 보면, 저기압의 연직구조는 남서에서 북동쪽으로 기울어진 형태를 보이는 것으로 판단되고 지위고도 경도는 대기하층과 중층 모두에서 크게 나타나지 않았다. 그림 2.2.2.8과 2.2.2.9는 KLAPS 초기장 1500UTC부터 1700UTC으로 예측된 850 hPa과 500 hPa의 온도장, 온도경도장, 온도이류장, 지위고도장, 지위고도 경도장을 나타낸 그림이다. ERA5 재분석자료와 비교하여 온도장과 지위고도장은 대체로 유사하게 나타나며, 1700 UTC의 KLAPS 예측자료에서는 앞의 1500 UTC와 1600 UTC보다 조금 약화된 온도장과 저기압 중심이 약 1° 정도 동쪽으로 이동한 지위고도장의 경향을 보여준다. 그 결과 대기하층에서 1500 UTC와 1600 UTC의 결과들과 비교하여 온도이류 형태가 달라졌으며, 지위고도 경도 또한 약화되었다. 이는 결국 강수패턴의 차이를 만들어 내는 것으로 생각된다(그림 2.2.2.6). 본 강수유형의 경우 ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장에서 저기압 중심근처 또는 전면에서의 온도이류와 지위고도 경도에 의해 강수가 만들어지는 형태를 잘 보여주고 있다.

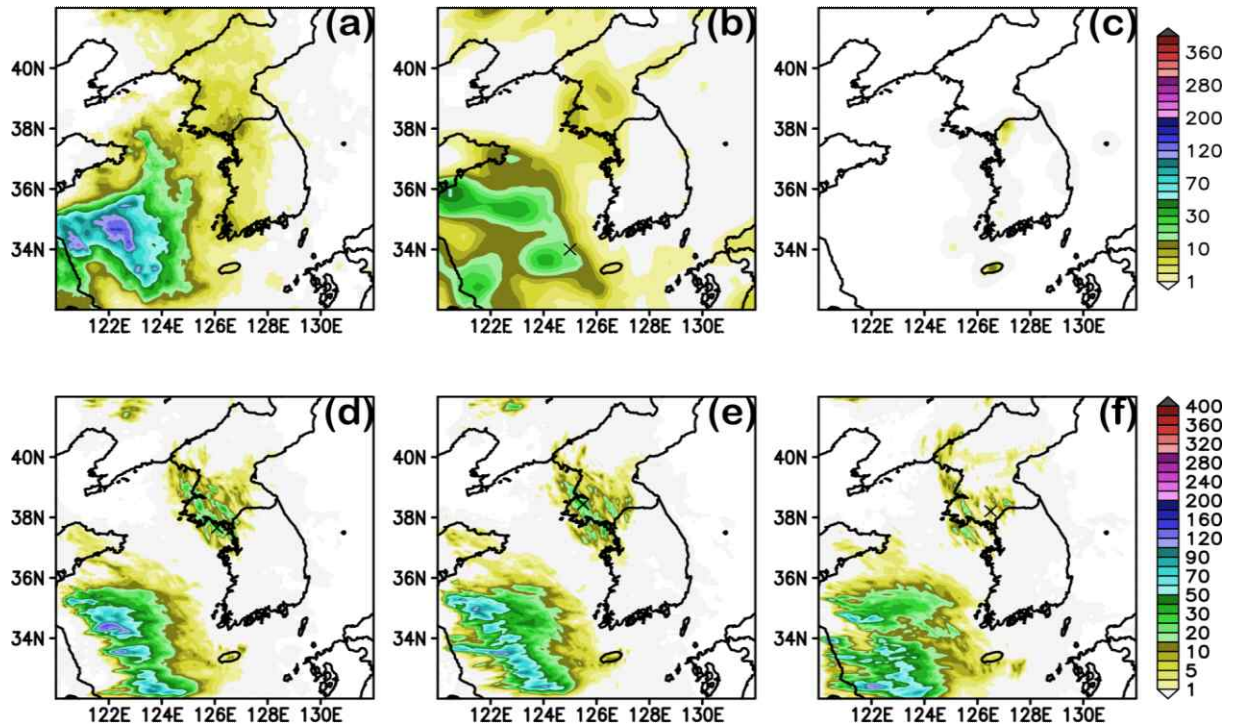
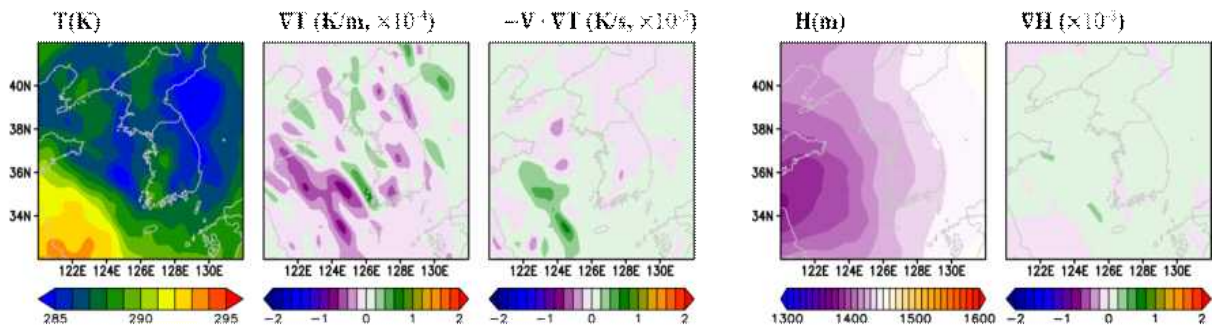


그림 2.2.2.6. 2021년 6월 14일 저기압 전면 수렴형 강수의 6시간 누적강수량 비교: (a) IMERG G, (b) ERA5 재분석자료, (c) AWS 관측자료, (d) KLAPS 1500 UTC, (e) KLAPS 1600 UTC, 그리고 (f) KLAPS 1700 UTC

▪ 850 hPa



▪ 500 hPa

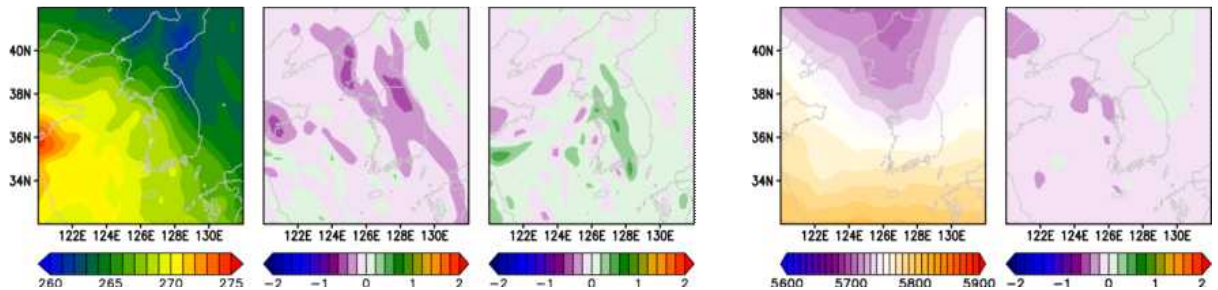


그림 2.2.2.7. 2021년 6월 14일 저기압 전면 수렴형 강수에 대한 ERA5 재분석자료의 온도장 (T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장 (∇H)을 나타냄

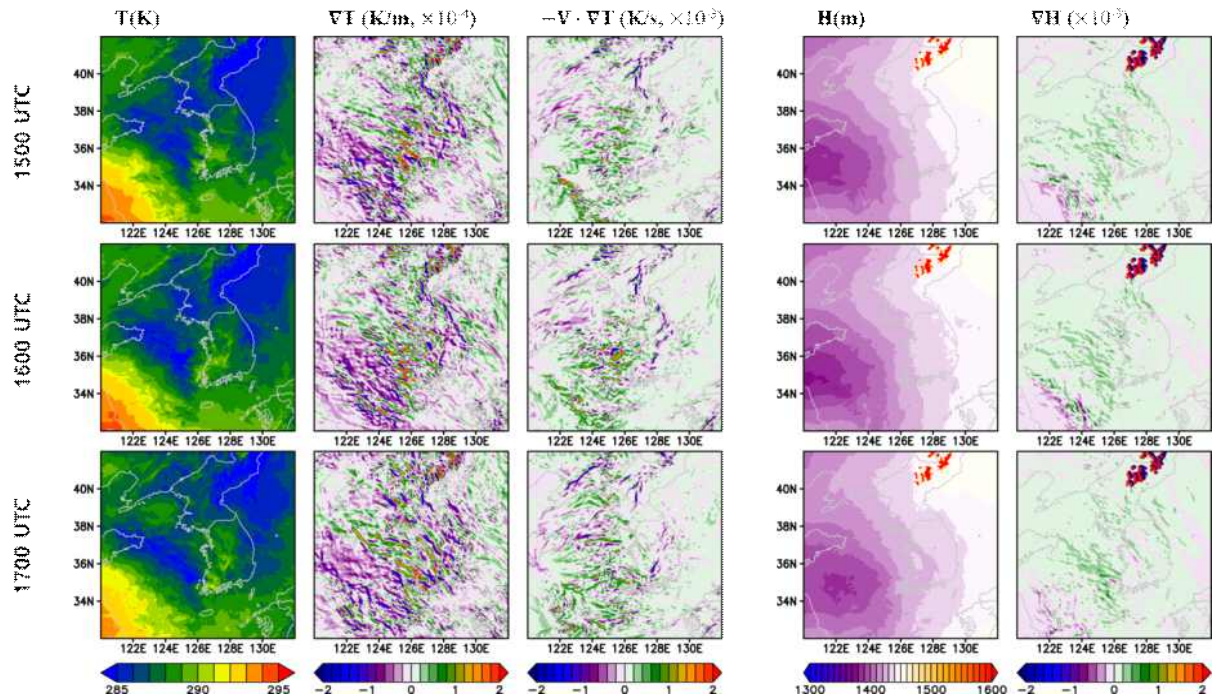


그림 2.2.2.8. 2021년 6월 14일 저기압 전면 수렴형 강수의 850 hPa에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄

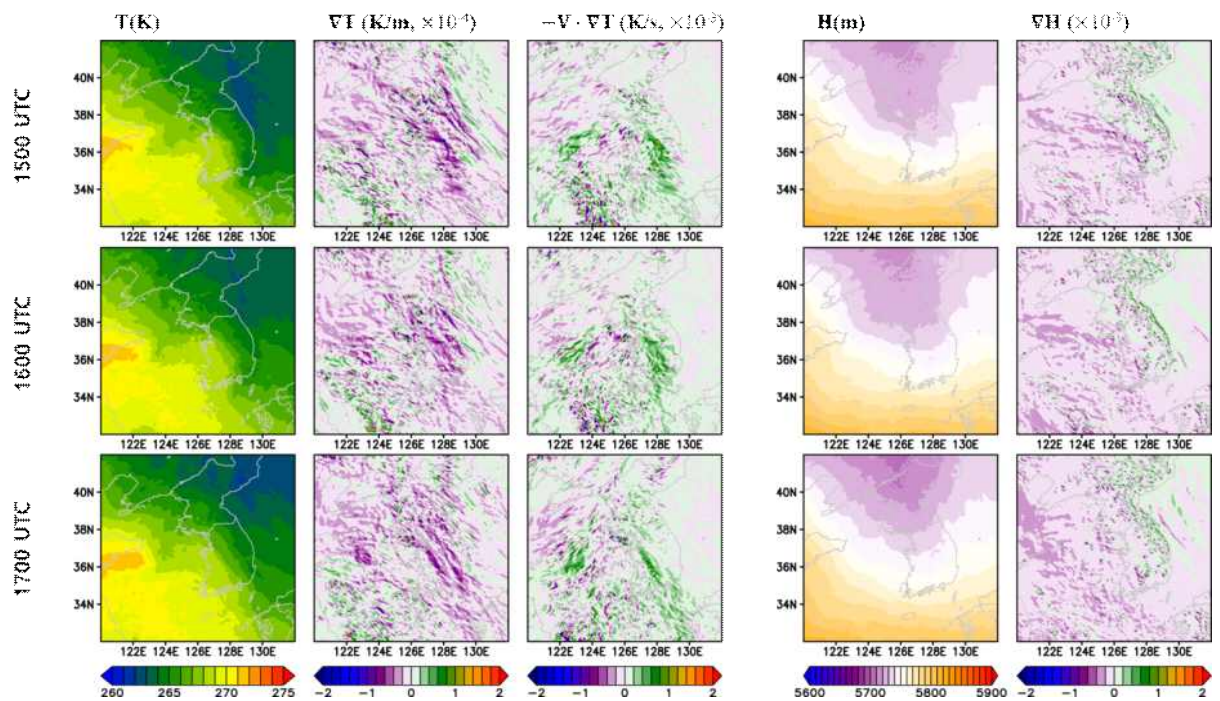


그림 2.2.2.9. 2021년 6월 14일 저기압 전면 수렴형 강수의 500 hPa에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄

다. 저기압 전선형

그림 2.2.2.10은 2020년 7월 19일 저기압 전선형 강수에 대한 IMERG, ERA5 재분석자료, AWS 관측자료, 그리고 KLAPS 예측장의 6시간 누적강수량을 나타낸다. KLAPS 1700 UTC 초기장은 IMERG와 AWS 관측자료의 6시간 누적강수량과 비교하여 유사함을 보여주며, 1800 UTC와 1900 UTC 초기장으로 갈수록 강수형태가 점차 보정되는 경향을 보인다. 다만, 지역적으로 강한 강수코어가 발달하는 경향이 나타나며, 이는 AWS 관측자료와 비교하여 과대모의된 것으로 판단된다. 이와 같은 강수코어의 과대모의는 미세물리규모모수화와 적운모수화 등과 같은 모델 physics와 관련 있을 수 있으며, 그러한 미세물리규모모수화의 특징은 그림 2.2.1.6에서 보았듯이, 강한 강수지역에서 KLAPS 모델은 항상 비슷한 레이더 CFADs를 보인 바 있다. 한편, KLAPS 예측장들은 ERA5 재분석자료와 비교하여 강수형태와 위치를 더 잘 모사한 것으로 생각된다.

그림 2.2.2.11은 2020년 7월 19일 저기압 전선형 강수사례의 ERA5 재분석자료로 계산된 온도장, 온도경도장, 온도이류장, 지위고도장, 지위고도 경도장을 나타낸 그림이다. 우선 저기압 전면 수렴형의 지위고도와 비교하여 전선형 강수의 지위고도는 대기하층과 중층에서 비슷한 위치에서 관찰된다(그림 2.2.2.3과 2.2.2.7). ERA5 재분석자료에서는 저기압 전선형 강수의 특징인 좁고 차가운 전선형 강수가 서해상에서 나타나지 않았으며, 그 결과 뚜렷한 온도경도나 온도이류가 대기 하층과 중층에서 관찰되지 않았다. 이와 비교하여 KLAPS 초기장 1700 UTC부터 1900 UTC의 예측장 자료는 850 hPa에서 ERA5 재분석자료와 유사한 온도장을 보여주고 있으나, 지위고도장 중심은 ERA5 재분석자료보다 약간 남쪽에서 나타나며 조금 더 낮은 값을 보여준다(그림 2.2.2.12). 이는 ERA5 재분석의 저기압보다 KLAPS 예측장의 저기압이 더 강하다는 것을 의미한다. 그 결과 ERA5 재분석자료와 비교하여, KLAPS는 남서쪽 해상에서 시작되는 좁고 차가운 전선형 강수 형태를 잘 모의하고 있으며, 강수구역에서 뚜렷한 온도경도, 온도이류, 그리고 지위고도 경도장을 강수 특징에 맞게 보여준다. 이러한 좁고 차가운 전선형 강수의 특징은 위치소용돌이도 경향진단 분석에서도 잘 관찰되었다(그림 2.1.2.6과 2.1.2.7). 500 hPa KLAPS 예측장 자료에서도 좁고 차가운 전선형 강수형태에 따라 온도경도, 온도이류 및 지위고도 경도의 변화가 관찰된다(그림 2.2.2.13).

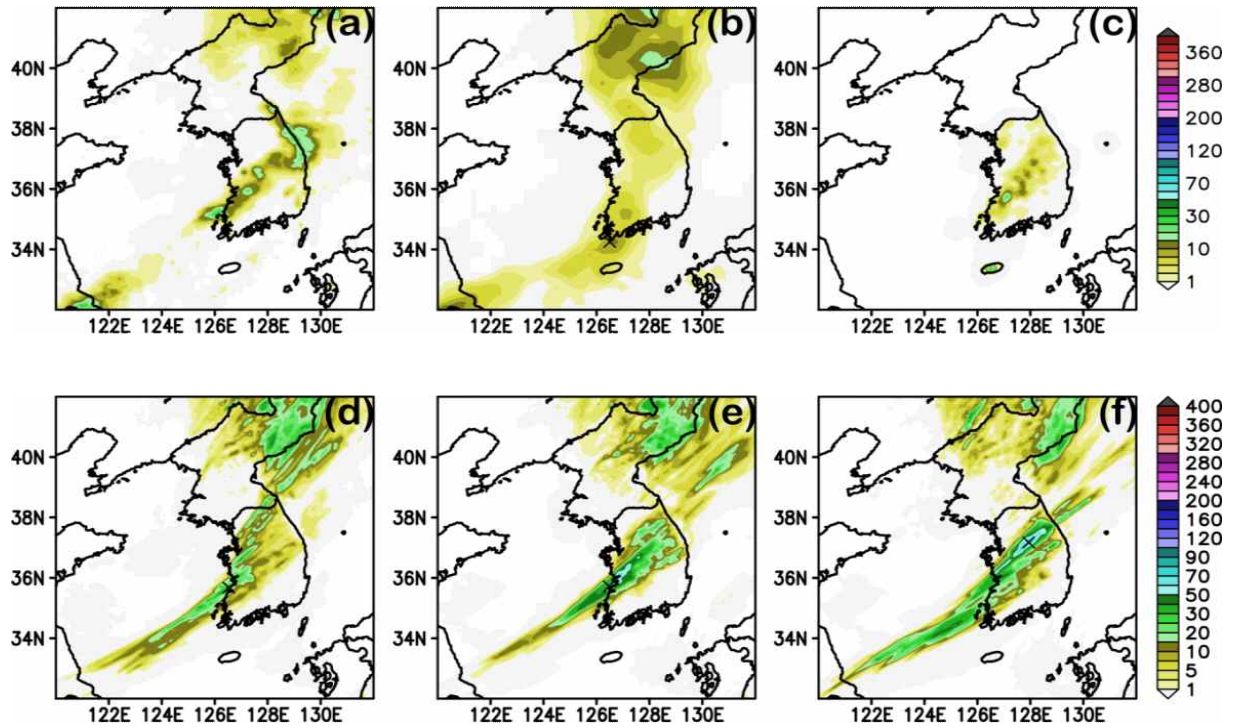


그림 2.2.2.10. 2020년 7월 19일 저기압 전선형 강수의 6시간 누적강수량 비교: (a) IMERG, (b) ERA5 재분석자료, (c) AWS 관측자료, (d) KLAPS 1700 UTC, (e) KLAPS 1800 UTC, 그리고 (f) KLAPS 1900 UTC

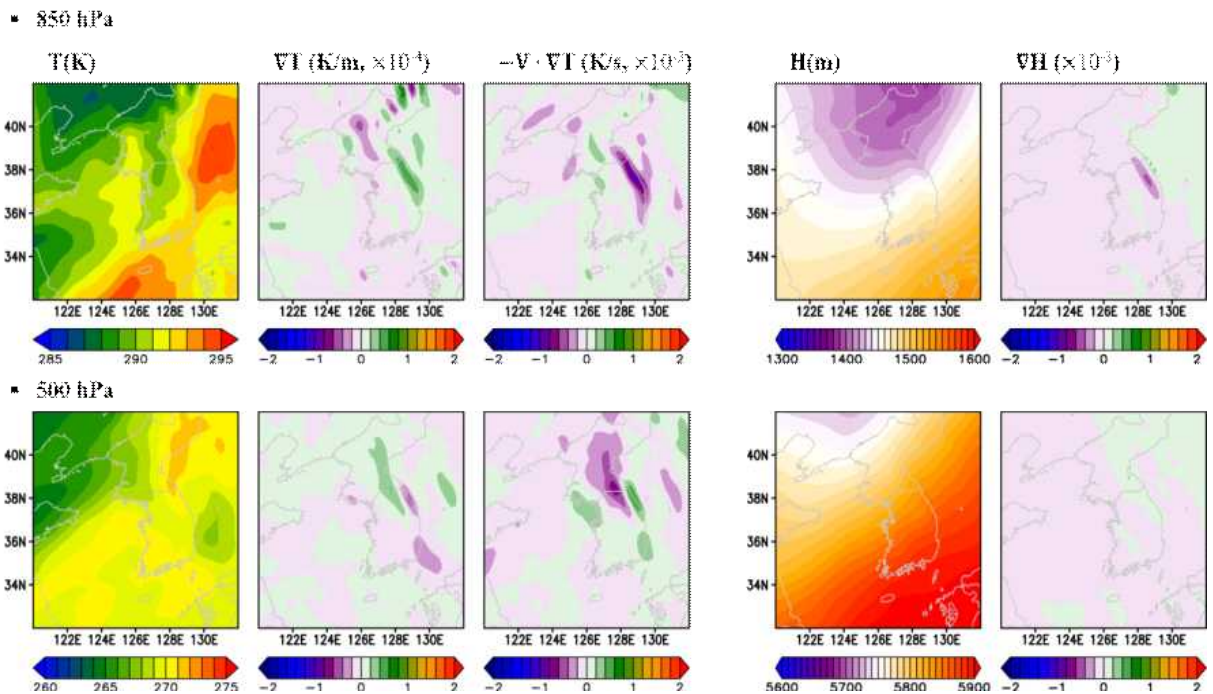


그림 2.2.2.11. 2020년 7월 19일 저기압 전선형 강수에 대한 ERA5 재분석자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄

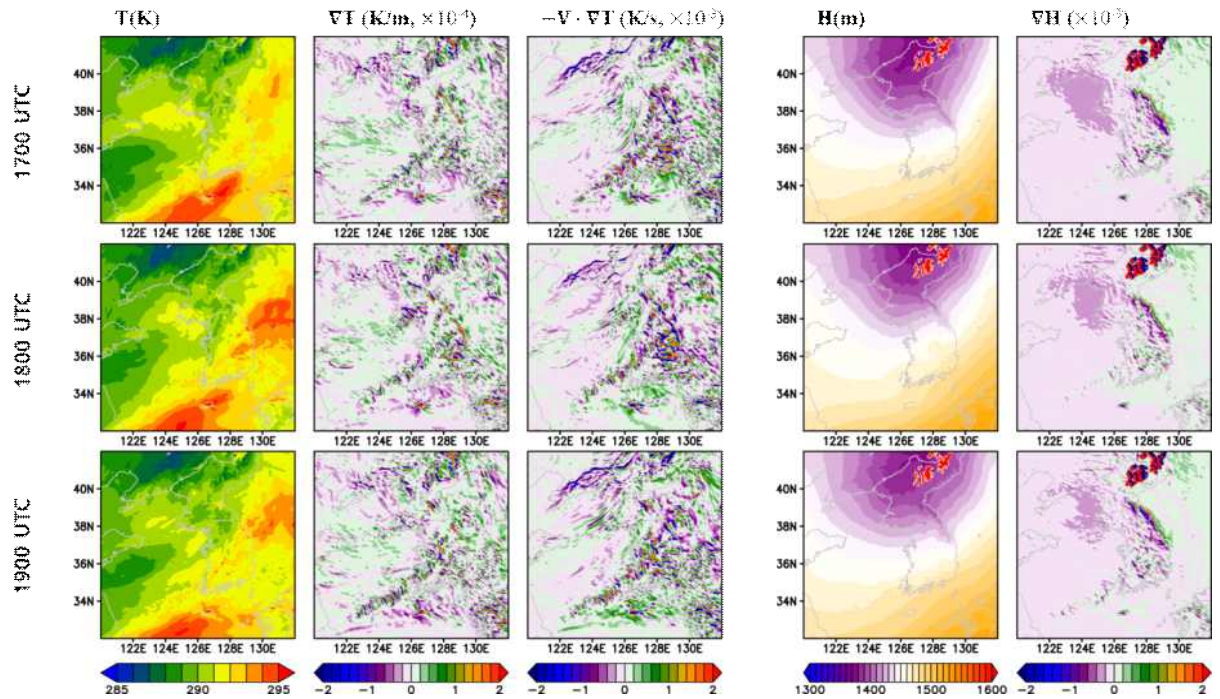


그림 2.2.2.12. 2020년 7월 19일 저기압 전선형 강수의 850 hPa에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄

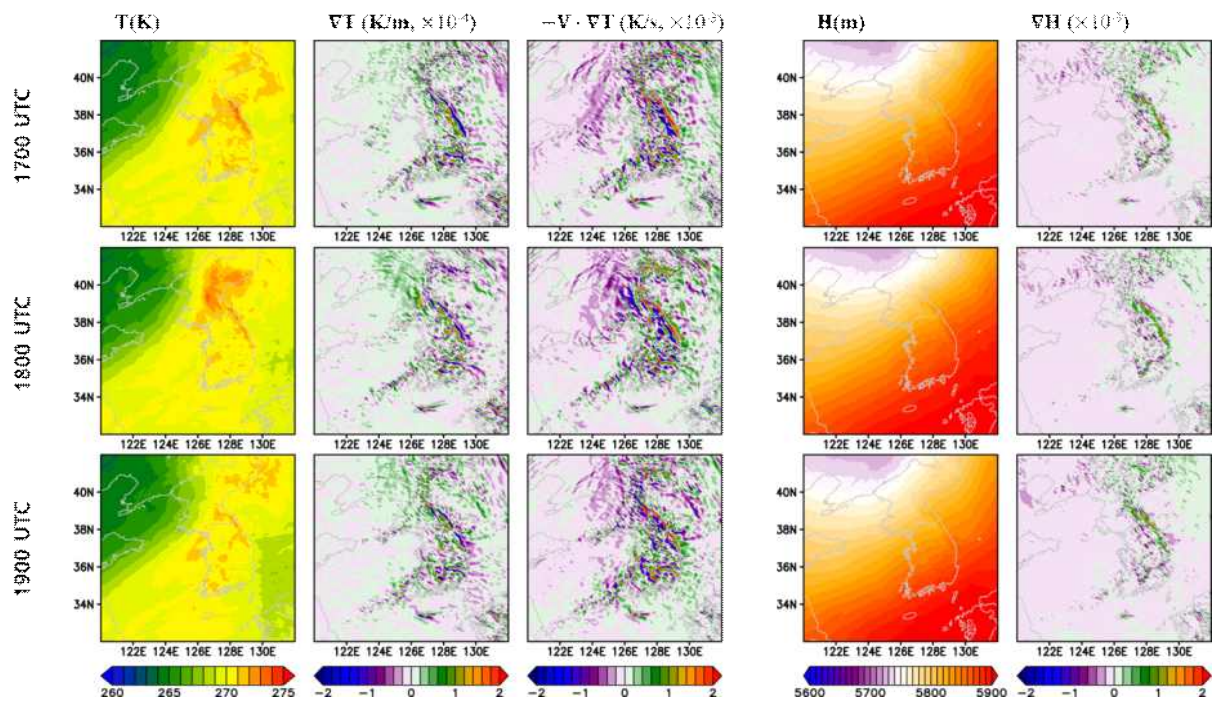


그림 2.2.2.13. 2020년 7월 19일 저기압 전선형 강수에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장 (T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장 (∇H)을 나타냄

그림 2.2.2.14는 2021년 9월 20일의 저기압 전선형 강수에 대한 IMERG, ERA5 재분석자료, AWS 관측자료, 그리고 KLAPS 예측장의 6시간 누적강수량을 보여준다. ERA5 재분석자료와 KLAPS 0800 UTC부터 1000 UTC의 초기장에서 예측된 6시간 누적강수량은 IMERG자료와 대체로 비슷하게 나타나며, AWS 관측자료에서 나타난 수도권 강수피크는 두 모델자료에서 매우 약하게 모의되었다. 그림 2.2.2.15, 2.2.2.16, 그리고 2.2.2.17은 2021년 9월 20일 저기압 전선형 강수사례의 ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장으로 계산된 온도장, 온도경도장, 온도이류장, 지위고도장, 지위고도 경도장을 나타낸 그림이다. KLAPS 자료의 온도장은 대기하층의 강수구역 서쪽과 동쪽에서 ERA5 재분석자료보다 따뜻하게 나타났다. 그 결과, KLAPS 예측장의 온도경도는 우리나라 서해남쪽에서 ERA5 재분석자료보다 상대적으로 약하게 나타나는 경향을 보인다. ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장의 온도경도 및 온도이류를 보면, 상당히 다른 패턴을 보이고 있다. 우선 ERA5 재분석자료에서는 온도경도가 동서로 나타나고 온도이류도 이와 유사하게 나타난다. 이와 반대로 KLAPS 예측장에서는 온도경도와 온도이류의 방향이 약 90°정도 오른쪽으로 회전되어 나타난다. 이러한 특징은 KLAPS 6시간 누적강수량의 패턴과 비슷하게 켜기형태의 남서쪽에서 북서쪽으로 발달하는 형태를 설명하는 할 수 있을 것으로 생각된다. 이러한 형태는 두 모델 자료의 500 hPa 층에서도 유사하게 나타난다.

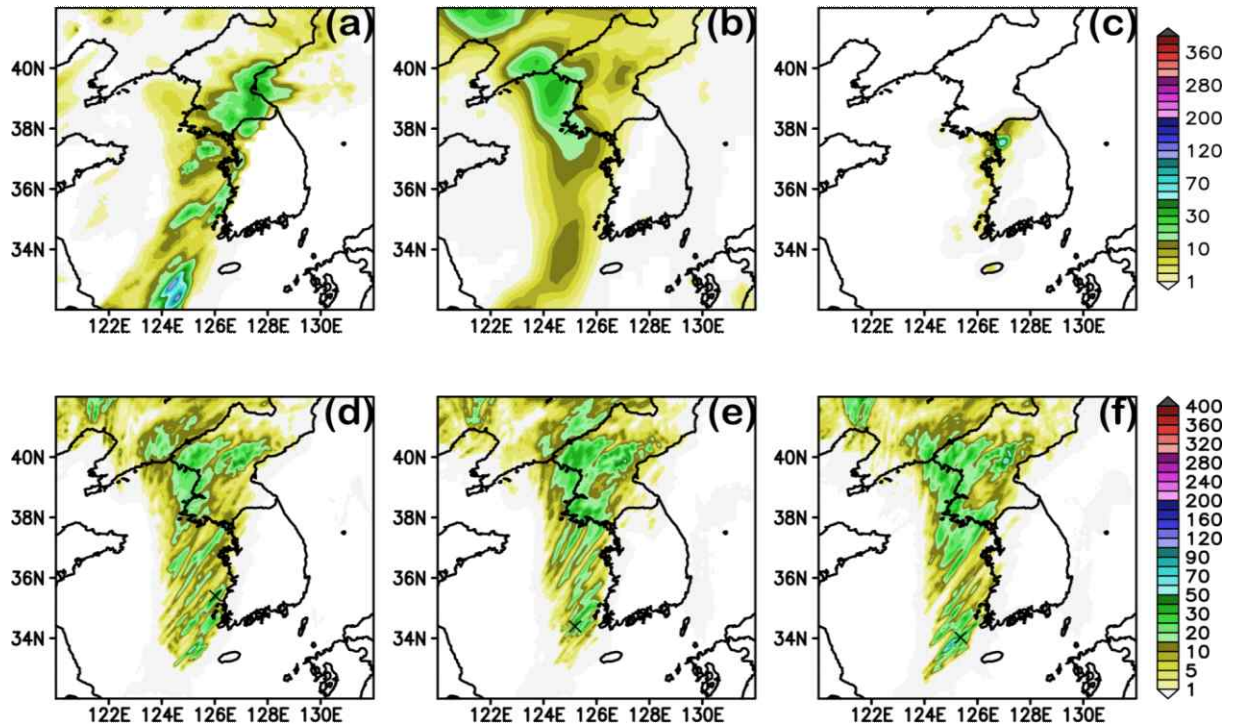
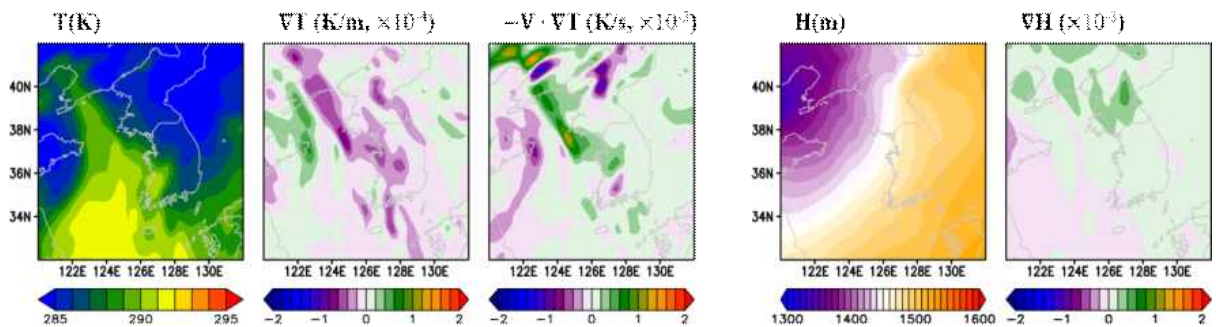


그림 2.2.2.14. 2021년 9월 20일 저기압 전선형 강수의 6시간 누적강수량 비교: (a) IMERG, (b) ERA5 재분석자료, (c) AWS 관측자료, (d) KLAPS 1700 UTC, (e) KLAPS 1800 UTC, 그리고 (f) KLAPS 1900 UTC

▪ 850 hPa



▪ 500 hPa

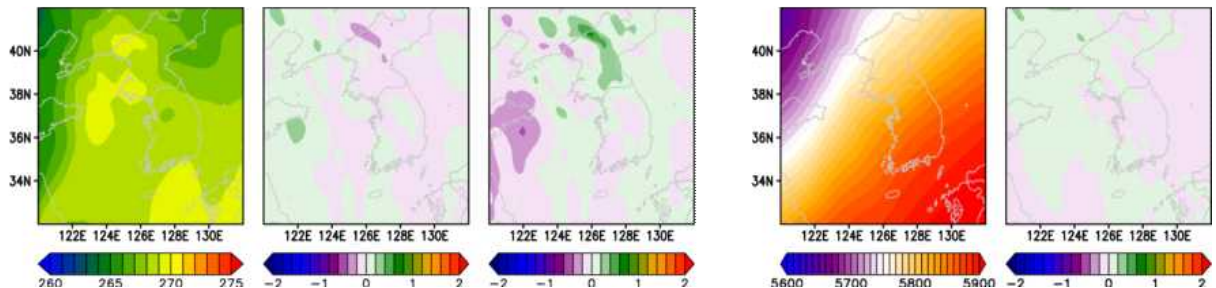


그림 2.2.2.15. 2021년 9월 20일 저기압 전선형 강수에 대한 ERA5 재분석자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄

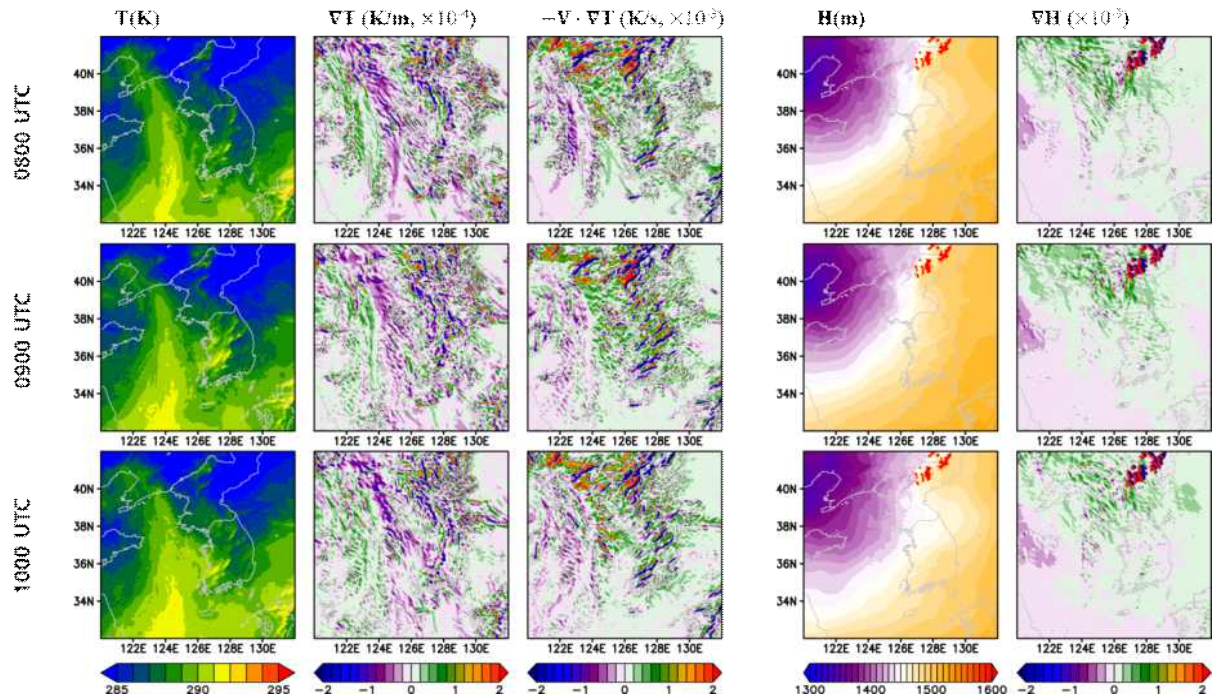


그림 2.2.2.16. 2021년 9월 20일 저기압 전선형 강수의 850 hPa에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄

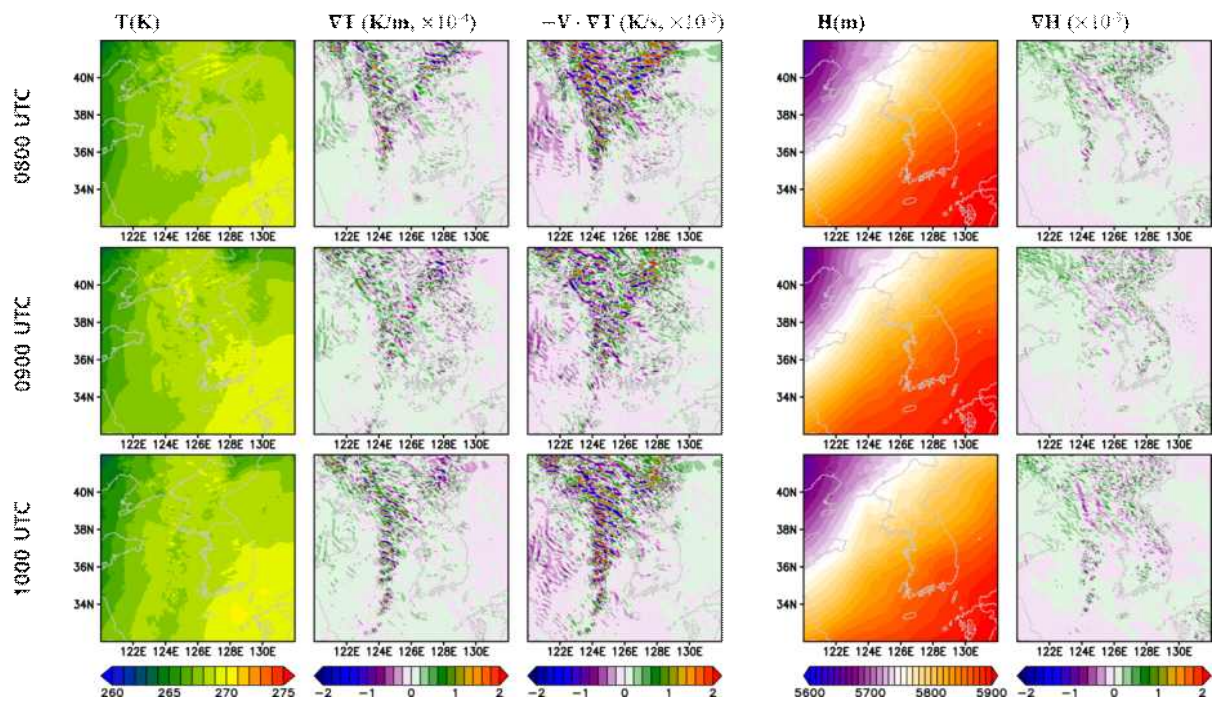


그림 2.2.2.17. 2021년 9월 20일 저기압 전선형 강수에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄

다. 하층 제트형

그림 2.2.2.18은 2020년 8월 14일 하층 제트형 강수에 대한 IMERG, ERA5 재분석자료, AWS 관측자료, 그리고 KLAPS 예측장의 6시간 누적강수량을 나타낸다. ERA5 재분석자료와 KLAPS 1600 UTC부터 1800UTC 초기장의 예측장은 IMERG와 AWS 관측자료와 비교하여 대체로 하층제트형 강수의 강수대를 잘 모의하였다. 그러나 본 사례의 경우 실제 강수가 수도권에 집중된 반면, ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장 자료의 누적강수량은 대부분 해상에 집중되어 나타나 있다. 강수가 해상에서 내륙으로 들어오면서 갑자기 약화되는 원인으로는 강한 육지와 해양의 강한 온도 대조로 생각된다. 이 부분에 대한 분석을 위해 온도장, 온도경도장, 온도이류장, 지위고도장, 지위고도 경도장을 살펴보았다.

그림 2.2.2.19는 2020년 8월 14일 하층 제트형 강수사례의 ERA5 재분석자료로 계산된 온도장, 온도경도장, 온도이류장, 지위고도장, 지위고도 경도장을 나타낸 그림이다. ERA5 재분석자료의 850 hPa 온도장에서는 수도권 및 중부내륙지방에 상대적으로 차가운 공기가 위치하지만, 850 hPa 온도경도, 온도이류장, 그리고 지위고도 경도장에서는 육지와 해양의 온도 대조를 보여주는 특징이 잘 나타나있지 않았다. 500 hPa층에서는 차가운 공기가 우리나라 동쪽으로 더 이동해 나타났으며, 850 hPa층과 마찬가지로 육지와 해양의 온도 대조를 보여주는 유의미한 특징은 보이지 않았다. KLAPS 1600 UTC, 1700 UTC, 그리고 1800 UTC의 초기장으로 예측된 850 hPa 온도장, 온도경도장, 온도이류장, 지위고도장, 지위고도 경도장을 보면, 온도장과 지위고도장은 유사하게 나타난다. 하지만 KLAPS 예측자료에서는 수도권 서해안 쪽을 중심으로 지역적으로 발달한 차가운 공기가 잘 나타나 있고, 이에 따라 온도경도 및 온도이류장은 동서로 양과 음이 교차하는 형태를 보여준다(그림 2.2.2.20). KLAPS에서 모의된 하층 제트형의 강수 중심지역에서는 지위고도 경도장 또한 온도경도장과 유사하게 동서로 양과 음이 교차로 나타나는 형태를 보여준다. 그림 2.2.2.21은 KLAPS 자료의 500 hPa 결과를 보여준다. 중층대기에서는 온도장과 지위고도장은 ERA5 재분석자료 비교하여 전체적으로 유사하나 미미한 차이를 보이며, 하층에서 나타난 육지와 해양의 온도 대조는 중층에서는 뚜렷하게 나타나 있지 않아 보인다. 그러나 온도경도장, 온도이류장, 그리고 지위고도 경도장을 보면 대기하층과 마찬가지로 강수 구역에서 동서로 양과 음이 교차되는 형태로 나타나 있다. 500 hPa층에

서 이러한 특징이 보다 더 길게 동서로 발달된 것을 고려할 때, KLAPS 예측장의 강수가 내륙으로 들어오면서 약화된 것은 전형적인 육지와 해양의 대조에 의한 것으로 판단된다. 각 초기장의 예측장을 보면 점차 차가운 공기가 수도권 서쪽 해안가에서 발달하는 것으로 나타나는데, 이는 KLAPS의 자료동화 영향으로 인한 것으로 판단된다.

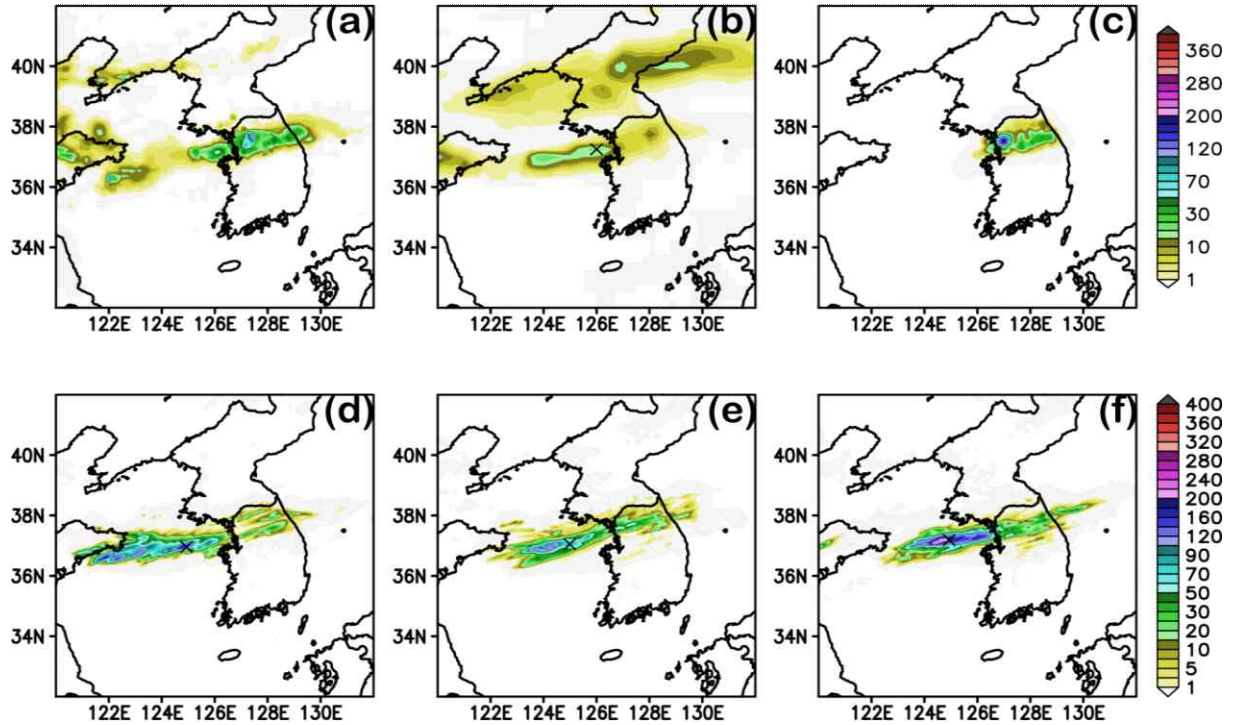
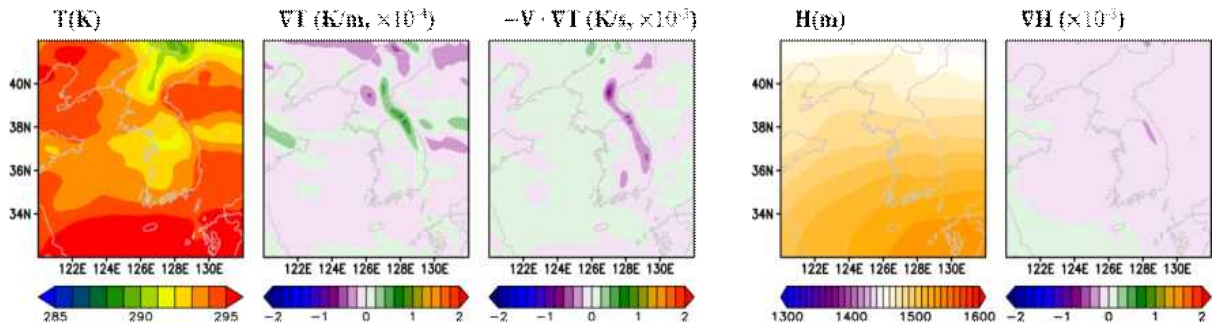


그림 2.2.2.18. 2020년 8월 14일 하층 제트형 강수의 6시간 누적강수량 비교: (a) IMERG, (b) ERA5 재분석자료, (c) AWS 관측자료, (d) KLAPS 1700 UTC, (e) KLAPS 1800 UTC, 그리고 (f) KLAPS 1900 UTC

▪ 850 hPa



▪ 500 hPa

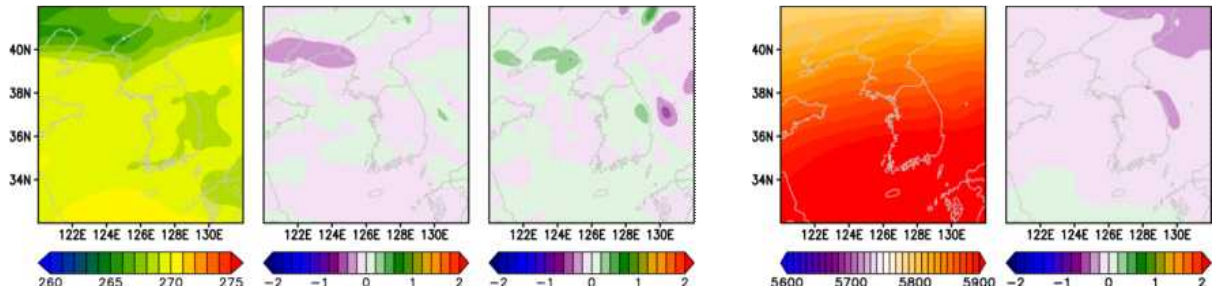


그림 2.2.2.19. 2020년 8월 14일 하층 제트형 강수에 대한 ERA5 재분석자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄

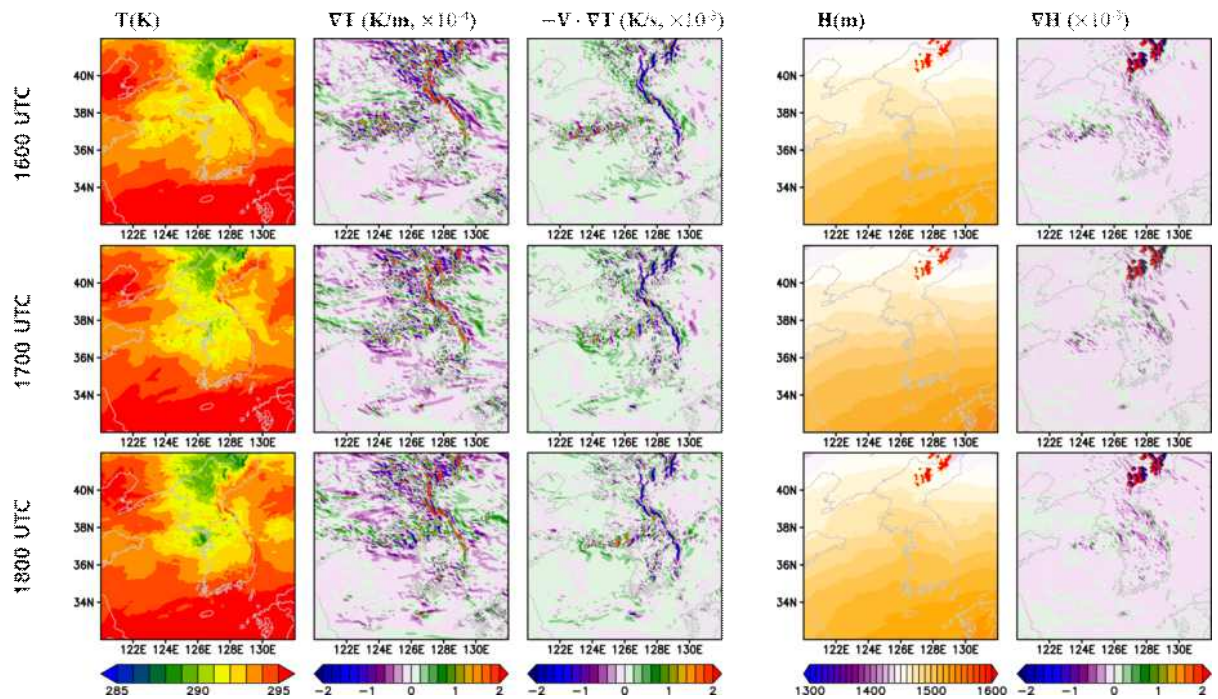


그림 2.2.2.20. 2020년 8월 14일 하층 제트형 강수의 850 hPa에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄

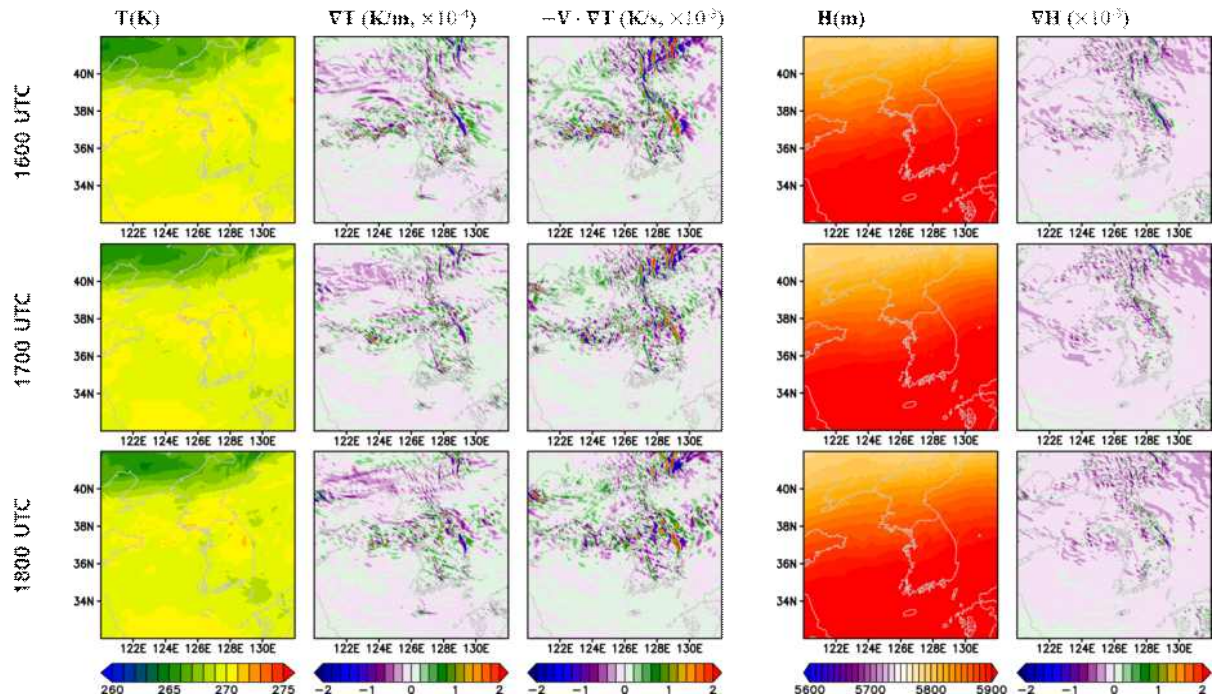


그림 2.2.2.21. 2020년 8월 14일 하층 제트형 강수에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄

그림 2.2.2.22은 2020년 8월 28일 하층 제트형 강수에 대한 IMERG, ERA5 재분석자료, AWS 관측자료, 그리고 KLAPS 예측장의 6시간 누적강수량을 나타낸다. ERA5 재분석자료와 KLAPS 1000 UTC부터 1200UTC 초기장의 예측장은 IMERG와 AWS 관측자료와 비교하여 대체로 하층제트형 강수의 강수대를 잘 모의하였다. 그러나 IMERG와 AWS 관측자료를 보면, 본 사례의 경우 실제 강수가 수도권에 집중된 반면, ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장 자료의 누적강수량은 대부분 해상에 집중되어 나타나 있다. 이는 강수가 해상에서 내륙으로 들어오면서 갑자기 약화되는 전형적인 육지와 해양의 대조를 보여준다. 이 부분에 대한 분석을 위해 온도장, 온도경도장, 온도이류장, 지위고도장, 지위고도 경도장을 살펴보았다.

그림 2.2.2.19는 2020년 8월 14일 하층 제트형 강수 사례의 ERA5 재분석자료로 계산된 온도장, 온도경도장, 온도이류장, 지위고도장, 지위고도 경도장을 나타낸 그림이다. ERA5 재분석자료의 850 hPa 온도장에서는 수도권 및 중부내륙지방에 상대적으로 차가운 공기가 위치하지만, 850 hPa 온도경도, 온도이류장, 그리고 지위고도 경도장에서는 육지와 해양의 대조를 보여주는 특징이 잘 나타나 있지 않았다. 500 hPa층에서는 차가운 공기가 우리나라 동쪽으로 더

이동해 나타났으며, 850 hPa층과 마찬가지로 육지와 해양의 대조를 보여주는 유의미한 특징은 보이지 않았다. KLAPS 1600 UTC, 1700 UTC, 그리고 1800 UTC의 초기장으로 예측된 850 hPa 온도장, 온도경도장, 온도이류장, 지위고도장, 지위고도 경도장을 보면, 온도장과 지위고도장은 유사하게 나타난다. 하지만 KLAPS 예측자료에서는 수도권 서해안 쪽을 중심으로 지역적으로 발달한 차가운 공기가 잘 나타나 있고, 이에 따라 온도경도 및 온도이류장은 동서로 양과 음이 교차하는 형태를 보여준다(그림 2.2.2.20). KLAPS에서 모의된 하층 제트형의 강수 중심지역에서는 지위고도 경도장 또한 온도경도장과 유사하게 동서로 양과 음이 교차형태로 나타난다. 그림 2.2.2.21은 KLAPS 자료의 500 hPa 결과를 보여준다. 중층대기에서는 온도장과 지위고도장은 ERA5 재분석자료 비교하여 전체적으로 유사하나 미미한 차이를 보이며, 하층에서 나타난 육지와 해양의 온도 대조는 중층에서는 뚜렷하게 나타나 있지 않아 보인다. 그러나 온도경도 및 온도이류, 그리고 지위고도 경도장을 보면 대기하층과 마찬가지로 강수구역에서 동서로 양과 음이 교차되는 형태로 나타나 있다. 500 hPa층에서 이러한 특징이 보다 더 길게 동서로 발달된 것을 고려할 때, KLAPS 예측장 강수가 내륙으로 들어오면서 약화되는 원인은 육지와 해양의 온도 대조에 의한 것으로 판단된다. 이는 KLAPS의 서로 다른 초기 예측장이 수도권 서쪽 해안가 쪽에서 점차 차가운 공기가 발달하는 것으로부터 예상할 수 있다.

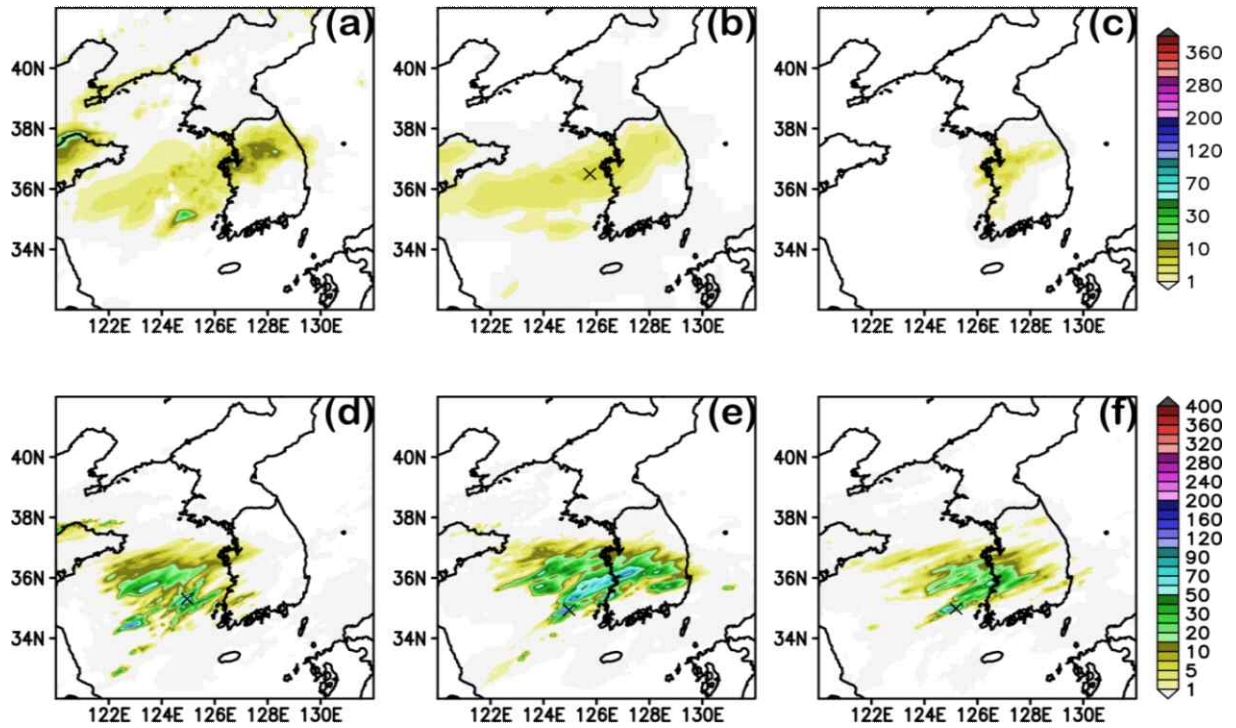


그림 2.2.22. 2021년 8월 28일 하층 제트형 강수의 6시간 누적강수량 비교: (a) IMERG, (b) ERA5 재분석자료, (c) AWS 관측자료, (d) KLAPS 1700 UTC, (e) KLAPS 1800 UTC, 그리고 (f) KLAPS 1900 UTC

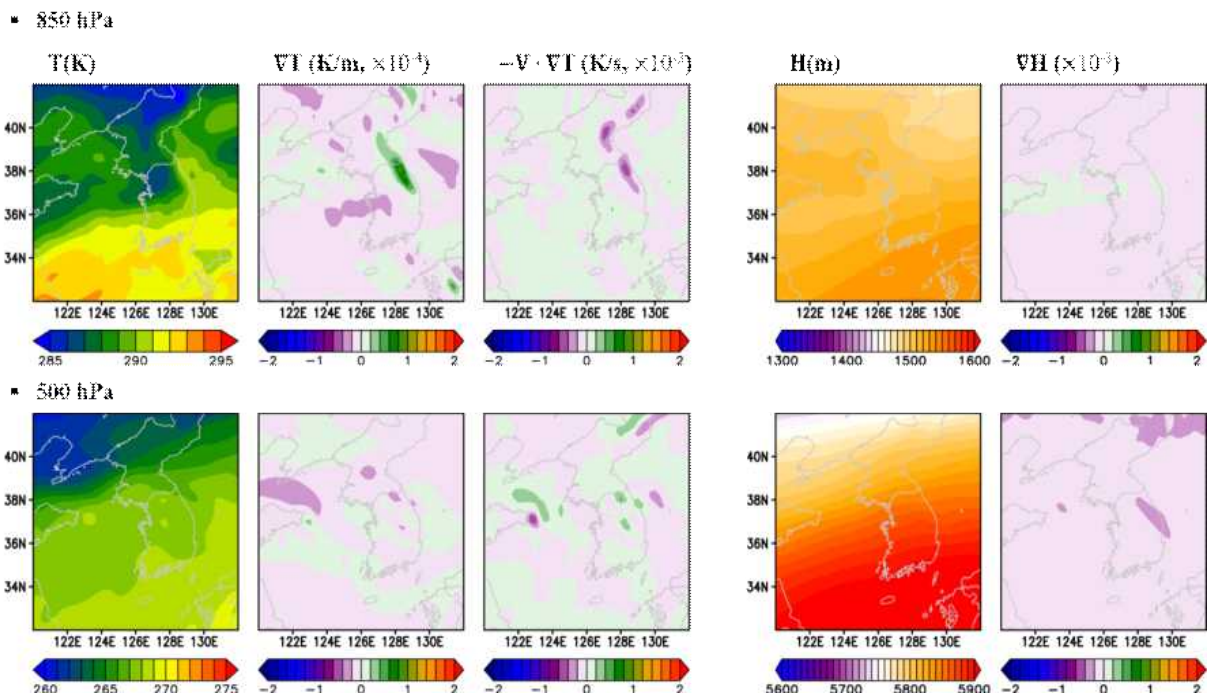


그림 2.2.23. 2021년 8월 28일 하층 제트형 강수에 대한 ERA5 재분석자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-\mathbf{V} \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄

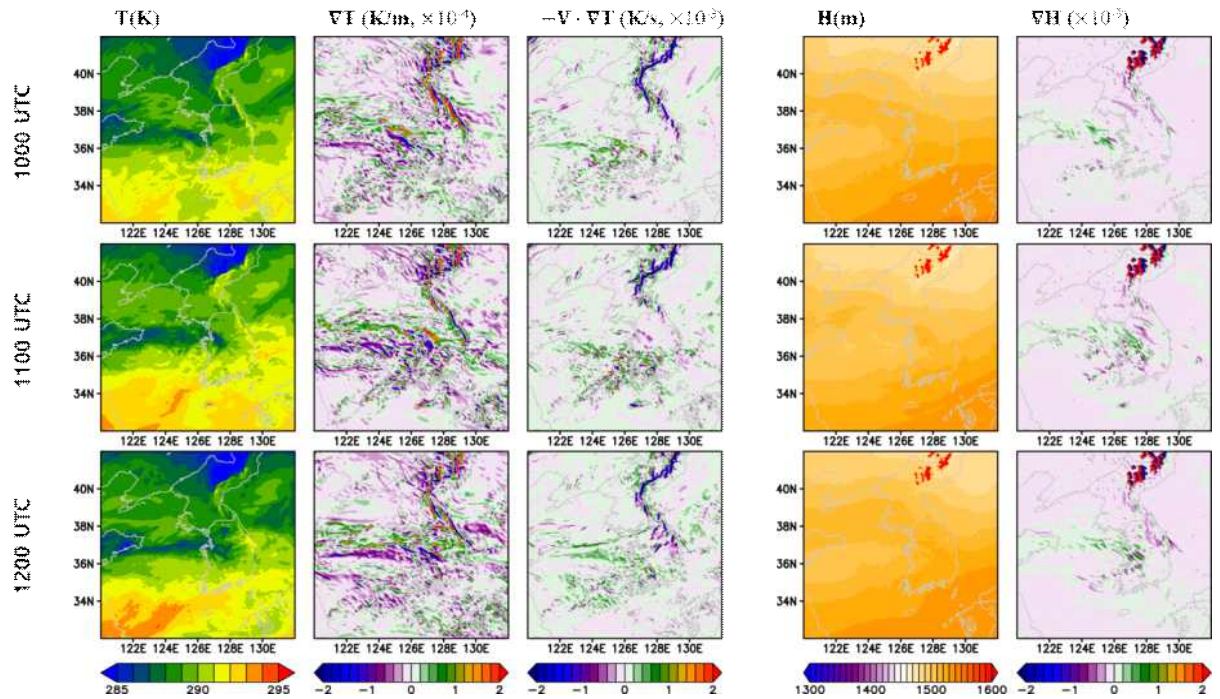


그림 2.2.2.24. 2021년 8월 28일 하층 제트형 강수의 850 hPa에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄

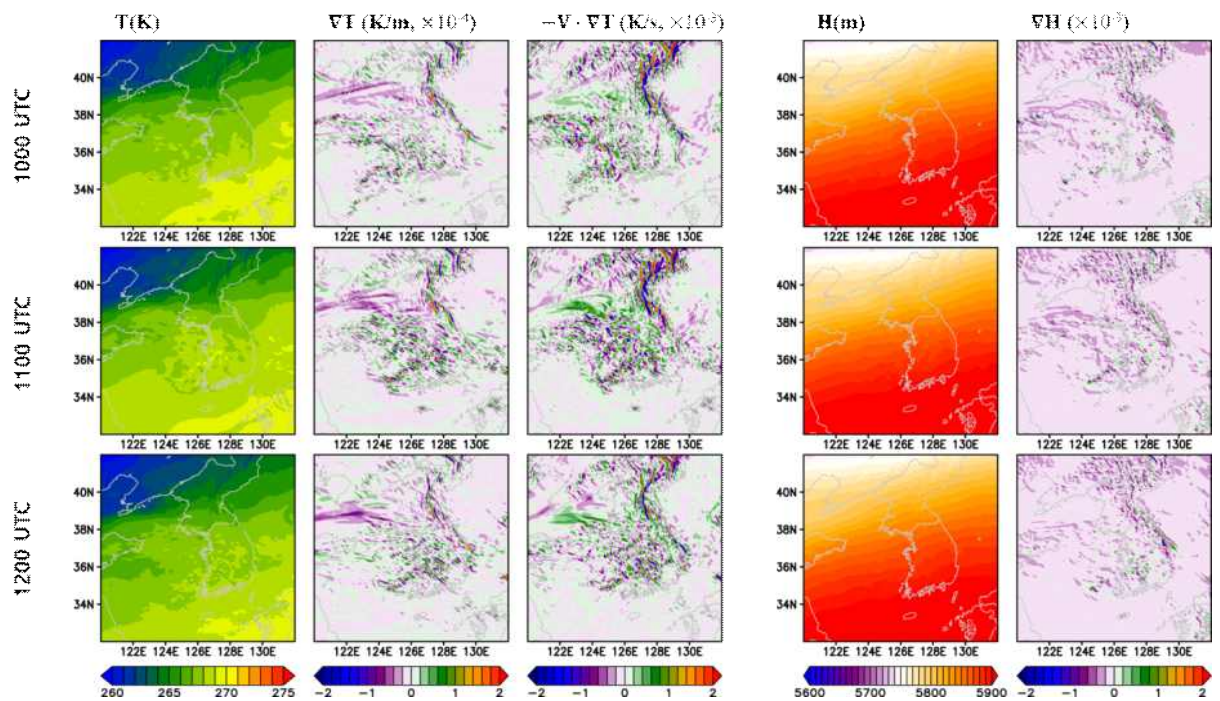


그림 2.2.2.25. 2021년 8월 28일 하층 제트형 강수에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄

라. 장마 전선형

그림 2.2.2.26은 2020년 7월 6일 장마 전선형 강수에 대한 IMERG, ERA5 재분석자료, AWS 관측자료, 그리고 KLAPS 예측장의 6시간 누적강수량을 나타낸다. ERA5 재분석자료와 KLAPS 0500 UTC부터 0700UTC 초기장의 예측장은 IMERG와 비교하여 장마전선의 주 강수대를 잘 모의하였다. 그러나 AWS 관측자료와 비교해보면, ERA5 재분석자료보다 KLAPS의 예측장 자료가 우리나라 남서쪽에서 북동쪽으로 지나가는 강수를 잘 모의했음을 알 수 있다. 보다 상세한 분석을 위해 이 사례에 대한 온도장, 온도경도장, 온도이류장, 지위고도장, 지위고도 경도장을 살펴보았다.

그림 2.2.2.27은 2020년 7월 6일 장마 전선형 강수 사례의 ERA5 재분석자료로 계산된 온도장, 온도경도장, 온도이류장, 지위고도장, 지위고도 경도장을 나타낸 그림이다. 850 hPa 층에서 우리나라 남쪽에 상대적으로 따뜻한 공기가 존재하며 북태평양 고기압 경계를 따라 이류하는 특징을 보여준다. 이 사례의 경우 약한 저기압이 북태평양 고기압 경계를 지나면서 동서로 정체전선을 만든 형태로, 강수 구역을 따라 동서로 약한 온도경도 및 지위고도 경도가 나타난다. 같은 사례의 KLAPS 0500UTC부터 0700 UTC의 850 hPa과 500 hPa 예측장으로 계산된 온도장, 온도경도장, 온도이류장, 지위고도장, 지위고도 경도장을 보면, 우리나라 남쪽의 강수 구역에서 온도경도 및 지위고도 경도가 ERA5 재분석자료와 유사하게 나타난다(그림 2.2.2.28과 2.2.2.29). 또한, 우리나라 내륙 강수 구역에서 남동에서 북동쪽으로 발달된 강수는 저기압 전선형 강수와 닮았지만, 온도 경도 및 지위고도 경도가 저기압 전선형 강수와는 다르며, 이는 내륙에서 발달한 대류성 강수가 우리나라 주변 기압 흐름에 따라 발달한 것으로 생각된다.

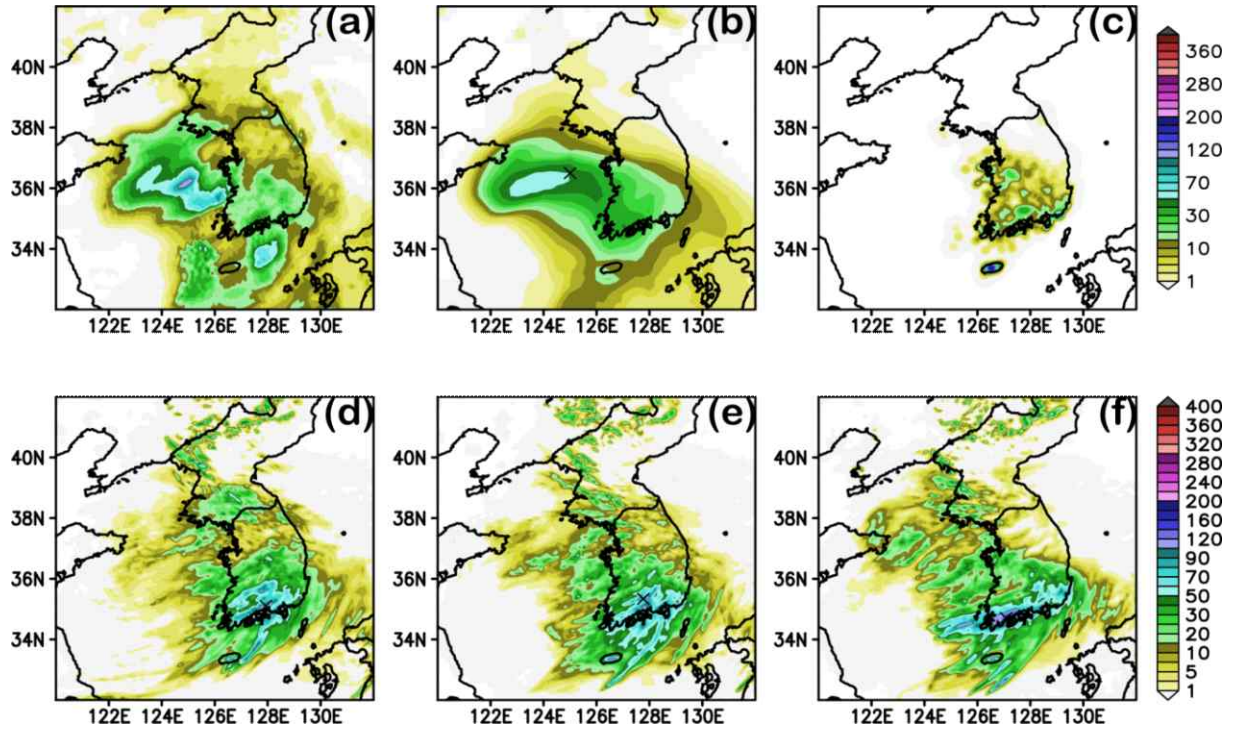


그림 2.2.26. 2020년 7월 06일 장마전선형 강수의 6시간 누적강수량 비교: (a) IMERG, (b) ERA5 재분석자료, (c) AWS 관측자료, (d) KLAPS 1700 UTC, (e) KLAPS 1800 UTC, 그리고 (f) KLAPS 1900 UTC

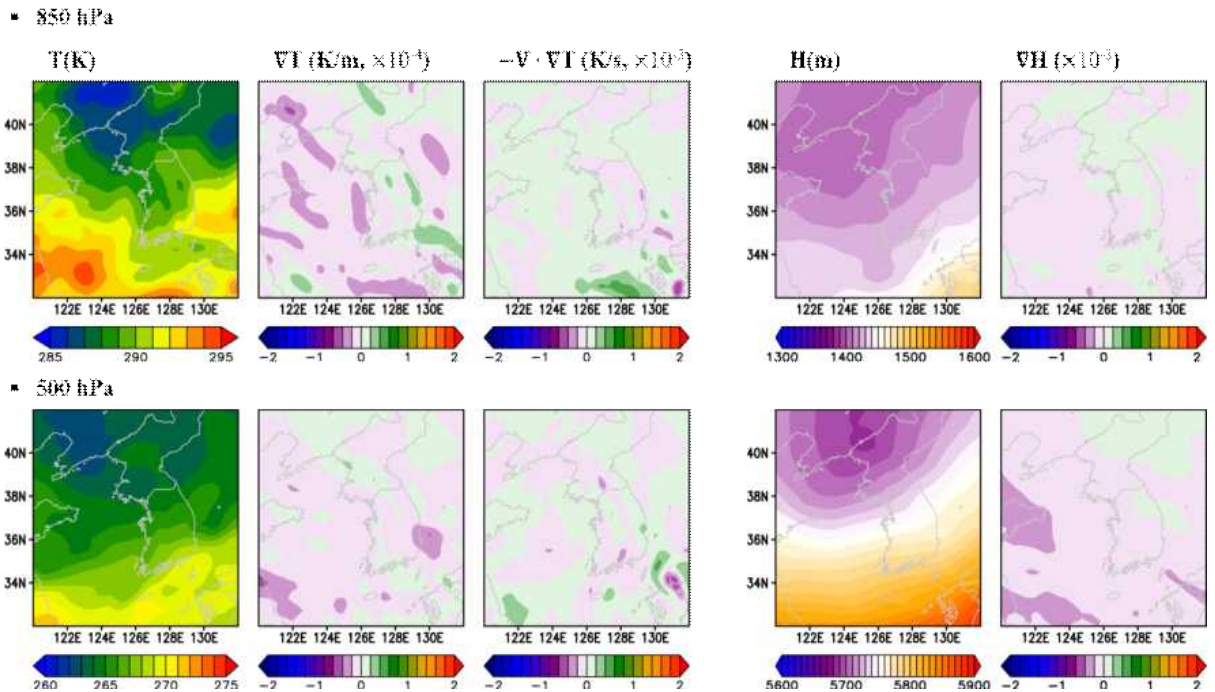


그림 2.2.27. 2020년 7월 06일 장마전선형 강수에 대한 ERA5 재분석자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-\mathbf{V} \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄

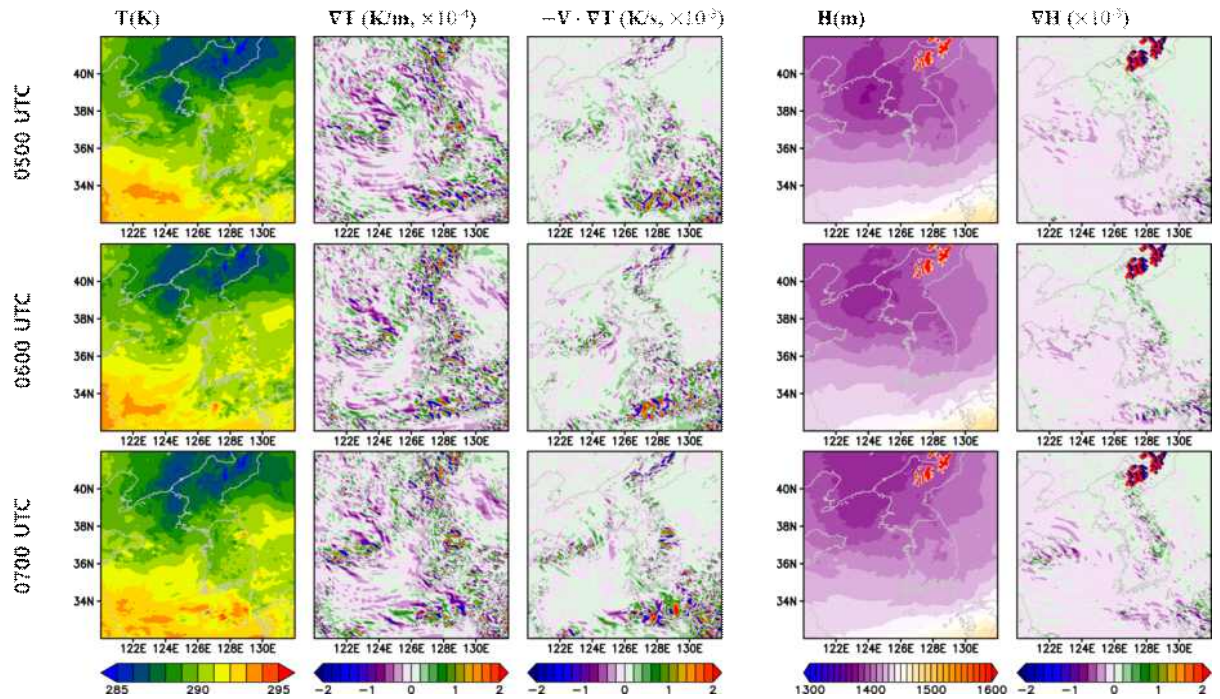


그림 2.2.2.28. 2020년 7월 06일 장마전선형 강수의 850 hPa에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄

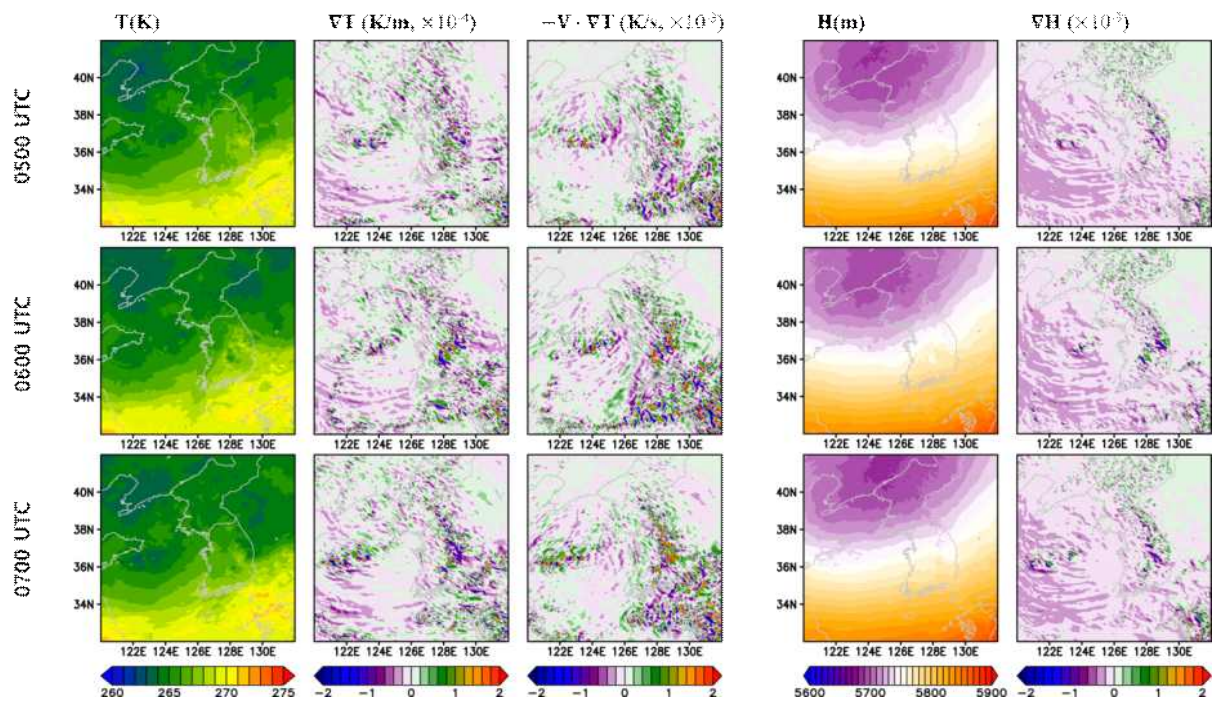


그림 2.2.2.29. 2020년 7월 06일 장마전선형 강수에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄

그림 2.2.2.30은 2021년 7월 3일 장마 전선형 강수사례에 대한 IMERG, ERA5 재분석자료, AWS 관측자료, 그리고 KLAPS 예측장의 6시간 누적강수량을 나타낸다. IMERG자료와 비교하여 ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장 자료는 서해상 강수코어를 잘 모의한 것으로 판단된다. 특히, KLAPS의 초기장이 강수 시점에 가까워질수록 서해상 강수코어의 형태가 잘 묘사된 것으로 유추해볼 때, 이는 KLAPS의 자료동화 효과를 보여주는 것으로 생각된다. IMERG와 AWS 관측자료와 비교하여 ERA5 재분석자료 및 KLAPS 예측장 누적강수량의 강수패턴과 분포는 전반적으로 유사하다. 그림 2.2.2.31은 ERA5 재분석자료로 계산된 온도장, 온도경도장, 온도이류장, 지위고도장, 지위고도 경도장을 나타낸 그림이다. 2020년 사례와 마찬가지로 작은 저기압이 고기압 경계를 따라 지나가면서 만든 강수 형태로, 우리나라 서해상에서 서해 내륙까지 온도경도, 온도이류 및 지위고도 경도가 관찰된다. 이 사례의 경우, 저기압 전면 수렴형 강수 형태와 닮아있으며, 강수 형태의 구분을 위해 보다 면밀한 분석이 요구된다. 그림 2.2.2.32와 2.2.2.33은 KLAPS 예측장으로 계산된 온도장, 온도경도장, 온도이류장, 지위고도장, 지위고도 경도장 그림으로 ERA5 재분석자료와 대체로 비슷한 온도 및 지위고도 구조를 보인다.

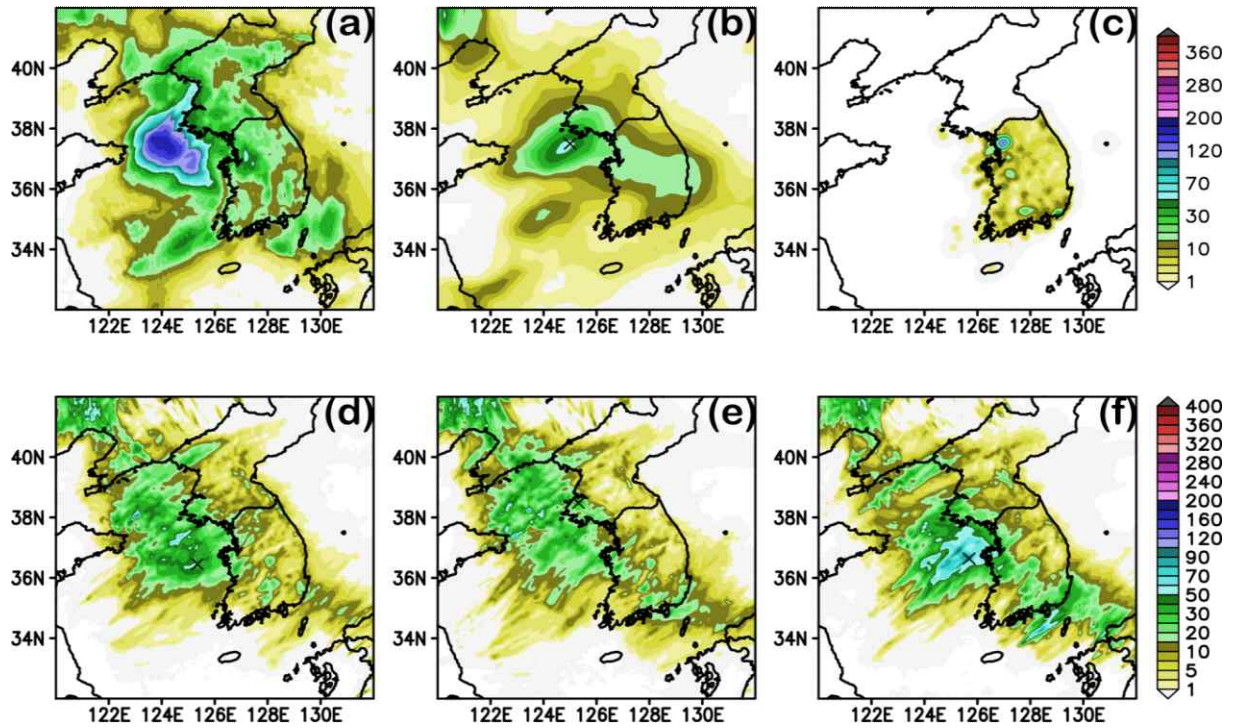


그림 2.2.2.30. 2021년 7월 03일 장마전선형 강수의 6시간 누적강수량 비교: (a) IMERG, (b) ERA5 재분석자료, (c) AWS 관측자료, (d) KLAPS 1700 UTC, (e) KLAPS 1800 UTC, 그리고 (f) KLAPS 1900 UTC

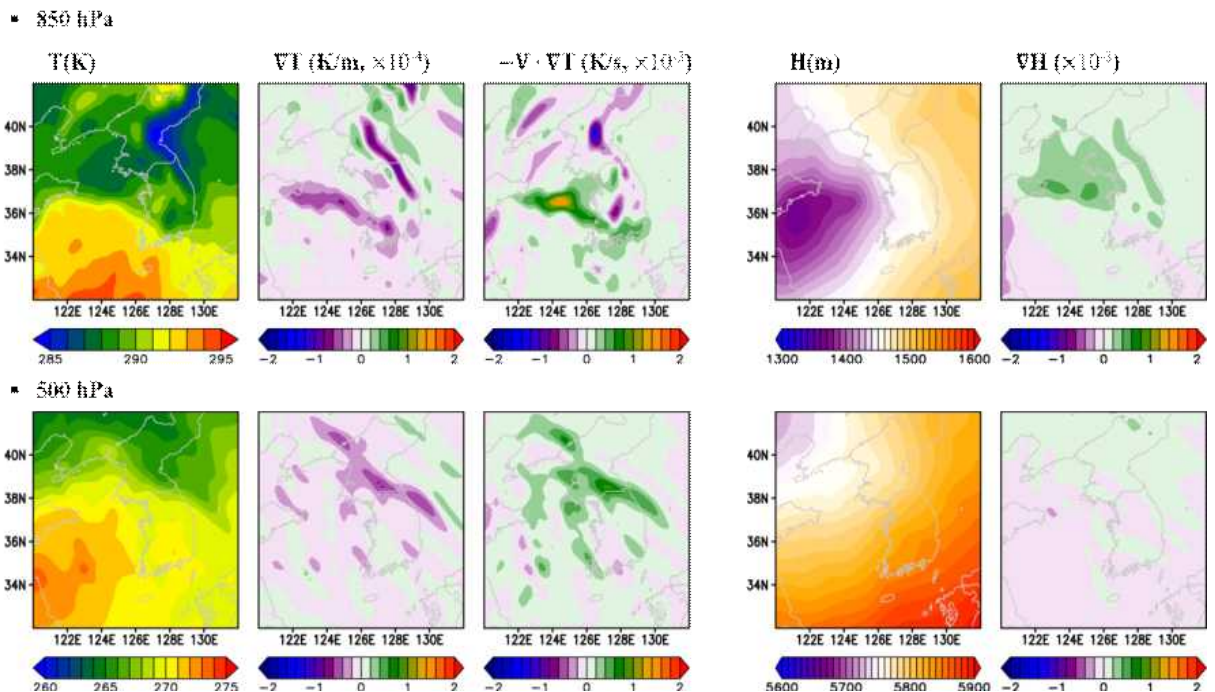


그림 2.2.2.31. 2021년 7월 03일 장마전선형 강수에 대한 ERA5 재분석자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄

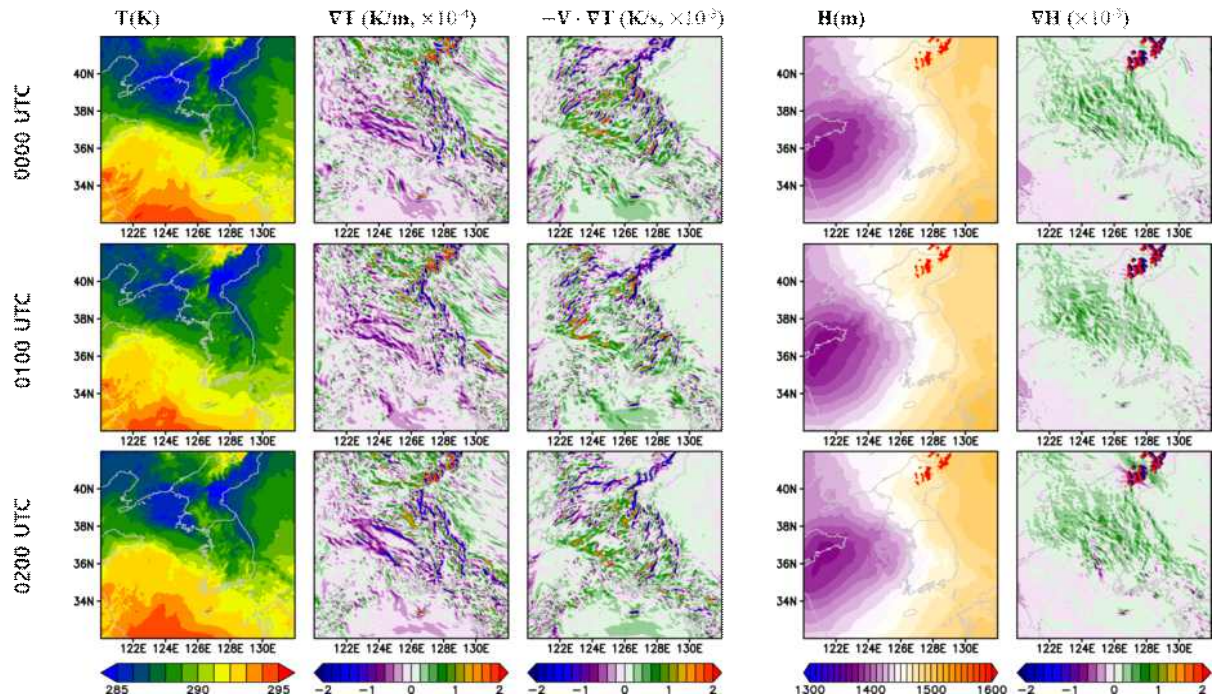


그림 2.2.2.32. 2021년 7월 03일 장마전선형 강수의 850 hPa에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄

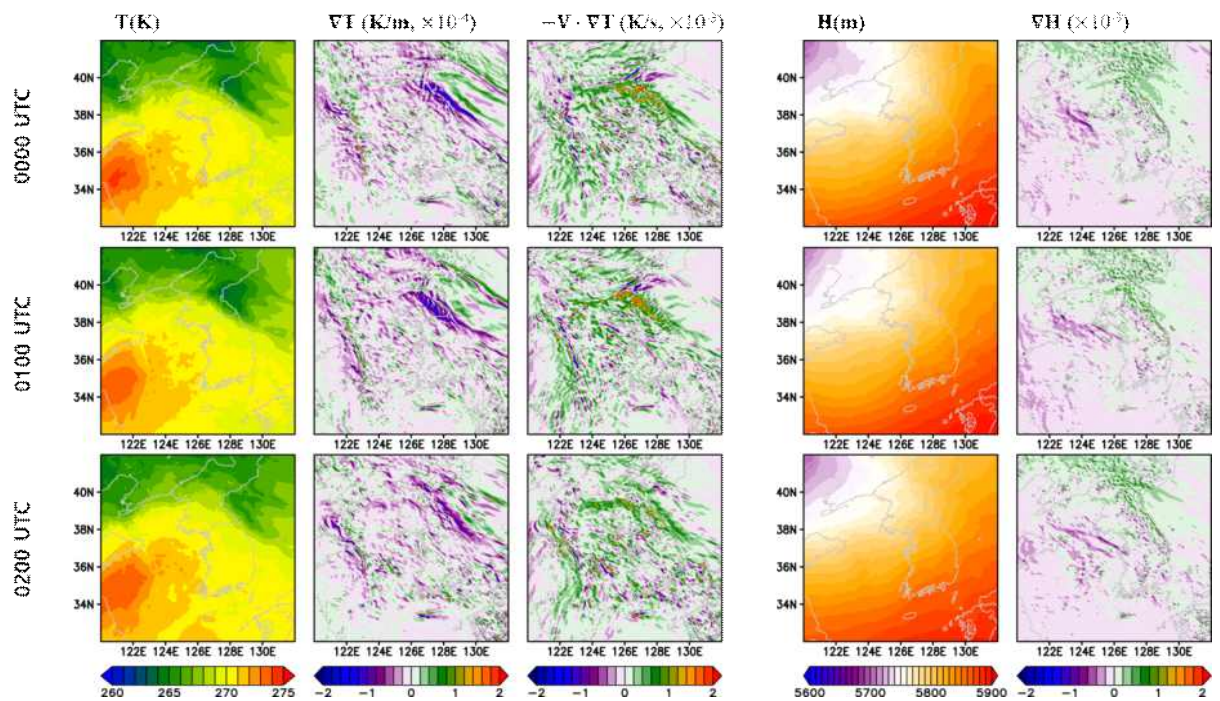


그림 2.2.2.33. 2021년 7월 03일 장마전선형 강수에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄

마. 고기압 영향권 내 대류성 강수

그림 2.2.2.34은 2021년 7월 17일 고기압 영향권 내 대류성 강수 사례에 대한 IMERG, ERA5 재분석자료, AWS 관측자료, 그리고 KLAPS 예측장의 6시간 누적강수량을 나타낸다. IMERG와 ERA5 재분석자료의 경우 10 km 이상의 공간 해상도에서는 이러한 대류성 강수는 잘 모의되지 않거나 관측되지 않았다. 이에 AWS 관측자료와 비교해보았을 때, KLAPS 예측장 6시간 누적강수량은 지역적으로 과대 모의하는 경향은 있으나 강수 위치를 잘 모의하였다.

그림 2.2.2.35는 ERA5 재분석자료로 계산된 온도장, 온도경도장, 온도이류장, 지위고도장, 지위고도 경도장을 나타낸 그림이다. 지위고도장을 보면 우리나라는 전형적으로 고기압 영향권에 속해있으며, 850 hPa 대기 하층과 500 hPa 대기 중층에 상대적으로 차가운 공기가 위치해 있음을 볼 수 있다. 우리나라 내륙 850 hPa 대기 하층에서는 약한 온도경도가 관찰되지만, 뚜렷한 온도이류와 지위고도 경도는 관찰되지 않는다. 그림 2.2.2.36과 2.2.2.37은 KLAPS 예측장으로 계산된 850 hPa과 500 hPa 온도장, 온도경도장, 온도이류장, 지위고도장, 지위고도 경도장을 나타낸 그림이다. 전체적인 패턴은 ERA5 재분석자료와 비슷하지만, 고해상도 KLAPS 850 hPa 예측장은 우리나라 내륙에서 주변보다 따뜻한 온도장이 지역적으로 발달된 것이 관찰된다. 이는 대류에 의해 주변보다 따뜻한 공기가 상승된 것을 나타내며, 그림 2.2.2.34에서 강수지역과 대체로 일치한다. 또한, 우리나라 내륙에서 더욱 복잡한 온도 경도 및 강수 지역에서 온도이류 및 지위고도 경도를 모사하고 있다. 이는 고해상도 자료가 대류성 강수를 모의하기 위해서는 최소 KLAPS 예측장이 가지고 있는 5 km 공간해상도 이상은 필요함을 보여준다.

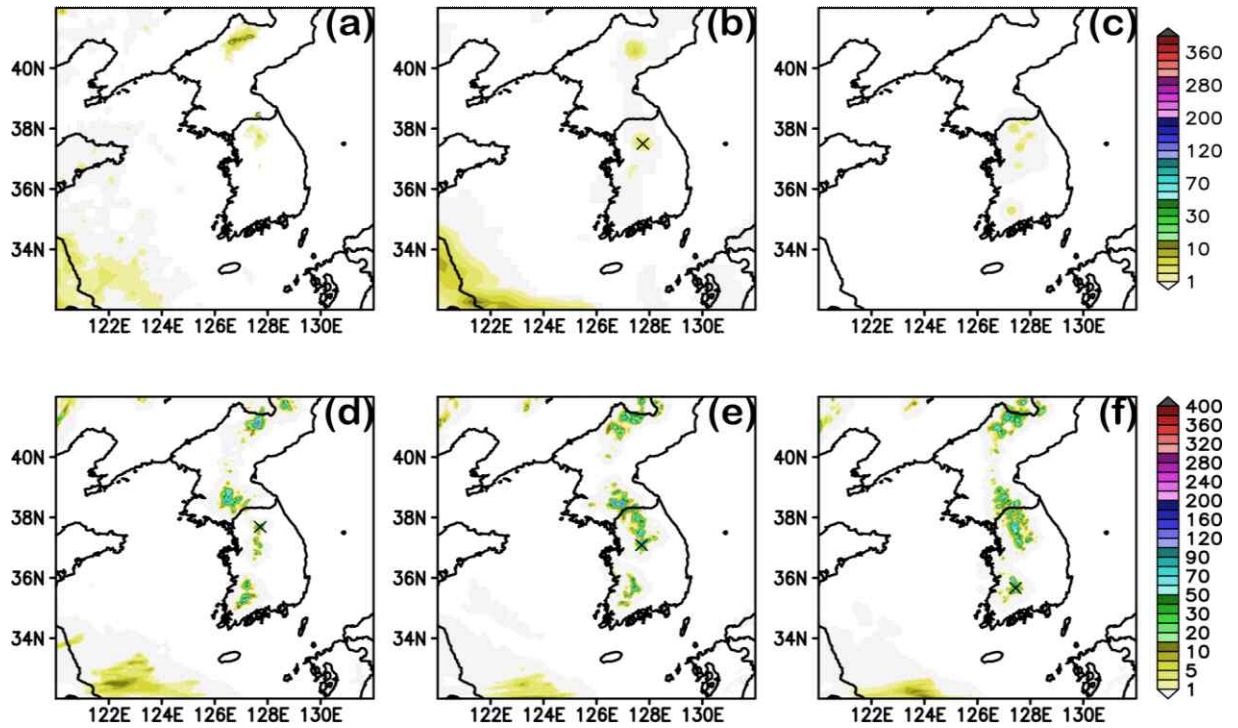
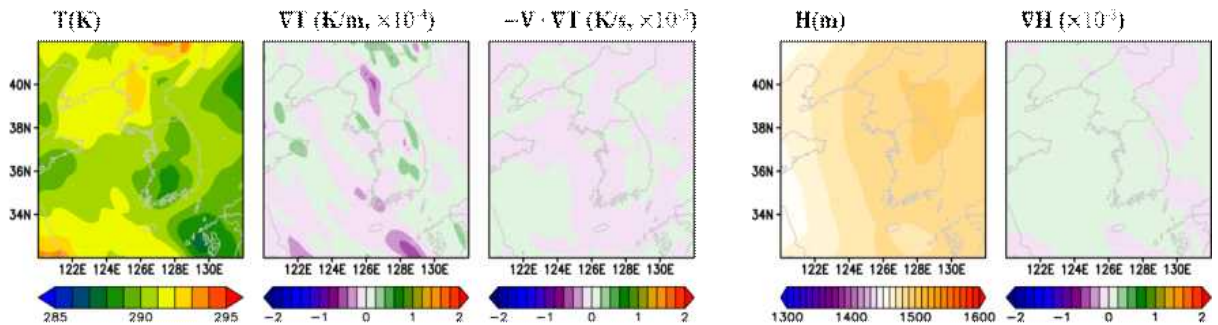


그림 2.2.2.34. 2020년 7월 17일 고기압 영향권 내 대류성 강수의 6시간 누적강수량 비교: (a) IMERG, (b) ERA5 재분석자료, (c) AWS 관측자료, (d) KLAPS 1700 UTC, (e) KLAPS 1800 UTC, 그리고 (f) KLAPS 1900 UTC

▪ 850 hPa



▪ 500 hPa

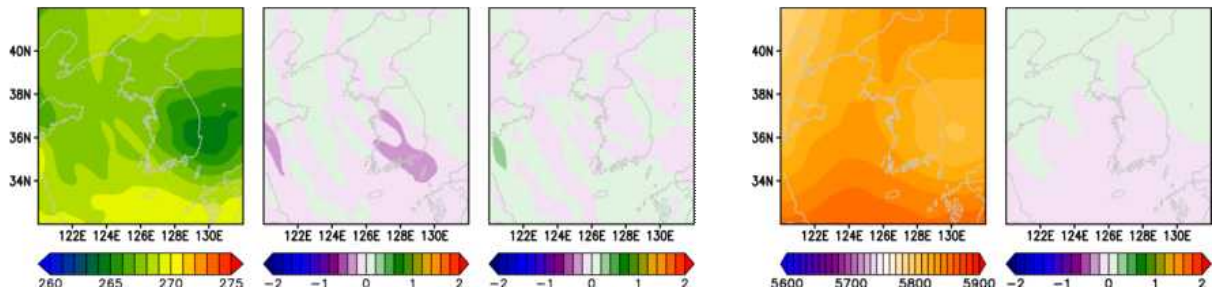


그림 2.2.2.35. 2020년 7월 17일 고기압 영향권 내 대류성 강수에 대한 ERA5 재분석자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄

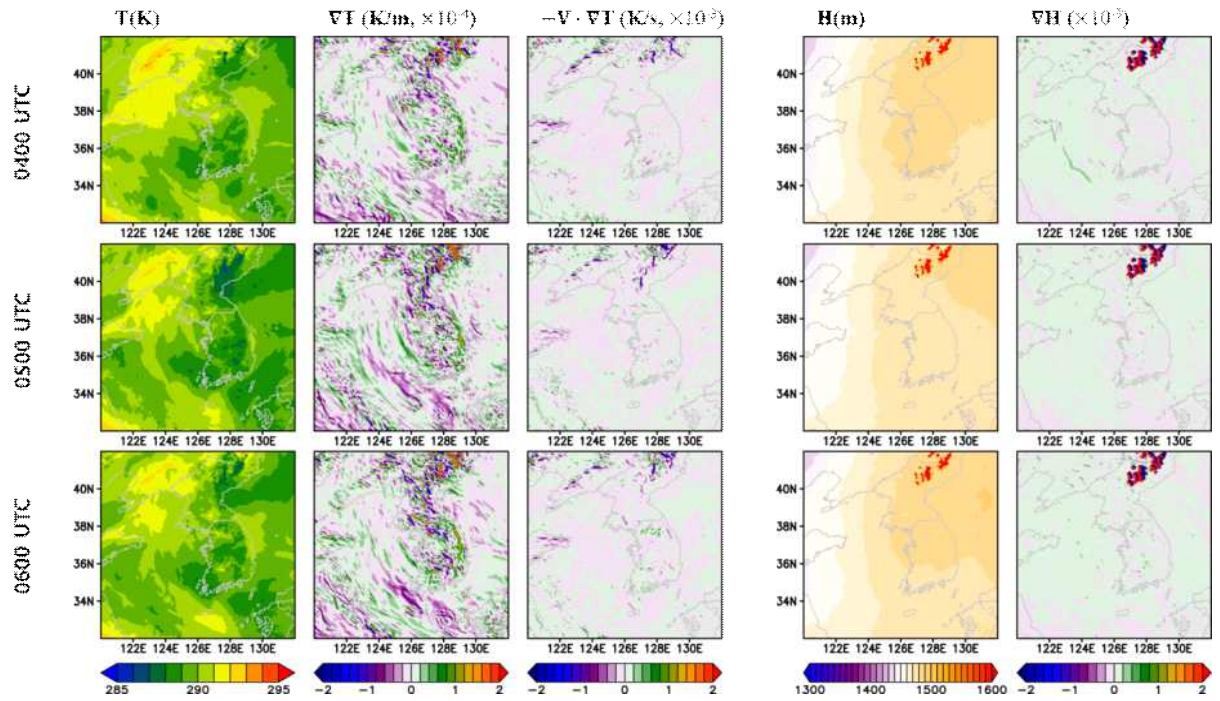


그림 2.2.2.36. 2020년 7월 17일 고기압 영향권 내 대류성 강수의 850 hPa에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄

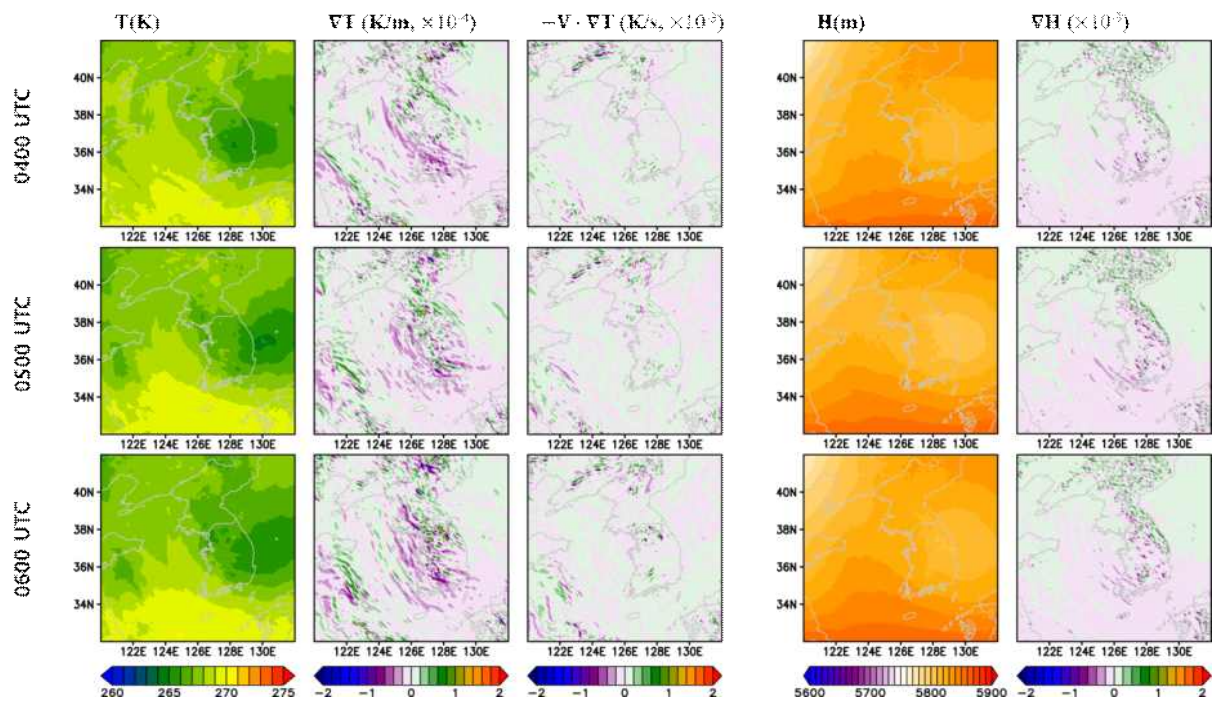


그림 2.2.2.37. 2020년 7월 17일 고기압 영향권 내 대류성 강수에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄

그림 2.2.2.38은 2021년 7월 9일 고기압 영향권 내 대류성 강수사례에 대한 IMERG, ERA5 재분석자료, AWS 관측자료, 그리고 KLAPS 예측장의 6시간 누적강수량을 보여준다. 2020년 사례와 달리 2021년 강수 사례의 경우 IMERG와 ERA5 재분석자료에서 강수가 모의된 것을 볼 수 있다. ERA5 재분석자료는 IMERG와 AWS 관측자료와 비교하여 강수 강도 및 위치가 잘 모의되었다. 한편, KLAPS 1500 UTC와 1600 UTC 초기장은 산둥반도의 강수는 잘 모의하였으나, 우리나라 수도권에 내리는 강수는 모의하지 못하였다. 그러나 강수 시점과 가장 가까운 1700 UTC 자료에서는 산둥반도 강수가 약화되고 우리나라 수도권 및 북한지방의 강수를 IMERG 자료와 AWS 관측자료와 비교하여 잘 모의된 것을 확인하였다. 이러한 초기장시간에 따라 강수 강도 및 패턴의 향상은 KLAPS의 자료동화 효과를 잘 보여준다고 할 수 있다.

그림 2.2.2.39는 ERA5 재분석자료로 계산된 온도장, 온도경도장, 온도이류장, 지위고도장, 지위고도 경도장을 나타낸 그림이다. 지위고도장을 보면 위도 40° 부근에 약한 저기압이 지나가고 있으며, 우리나라는 고기압 가장자리에 위치하고 있음을 알 수 있다. 이로 인해 대부분의 강수가 수도권 및 북한지역, 그리고 산둥반도 쪽에 집중된 경향을 보인 것으로 판단된다. 온도경도는 동서로 약하게 발달해 있으며, 지위고도 경도는 매우 약하게 나타나있다. 그림 2.2.2.40과 2.2.2.41은 KLAPS 예측장으로 계산된 850 hPa과 500 hPa 온도장, 온도경도장, 온도이류장, 지위고도장, 지위고도 경도장을 나타낸 그림이다. 대기 하층과 중층에 산둥반도 근처 강수 지역에 나타난 상대적으로 차가운 공기는 1700 UTC 초기장 자료에서는 대부분 사라졌으며, 1500 UTC에서 1700 UTC로 초기장이 강수 시점에 가까워질수록 약 위도 34°부근에서 북동쪽으로 따뜻한 공기가 발달한 것을 볼 수 있으며, 약 위도 38° 부근에서는 차가운 공기가 더 남하했음을 알 수 있다. 결과적으로 서해상의 약 37° 부근의 남북 온도경도 및 지위고도 경도는 약화되었으며, 온도이류도 약화된 것을 확인하였다. 이와 같은 온도 및 지위고도 경도의 약화는 산둥반도 근처의 강수 약화를 설명할 수 있을 것이다. 이러한 대류성 강수 사례를 통해 단시간에 발달하는 강수의 경우 KLAPS의 자료동화 시스템은 강수 모의에 효과적으로 대응할 수 있을 것으로 생각된다.

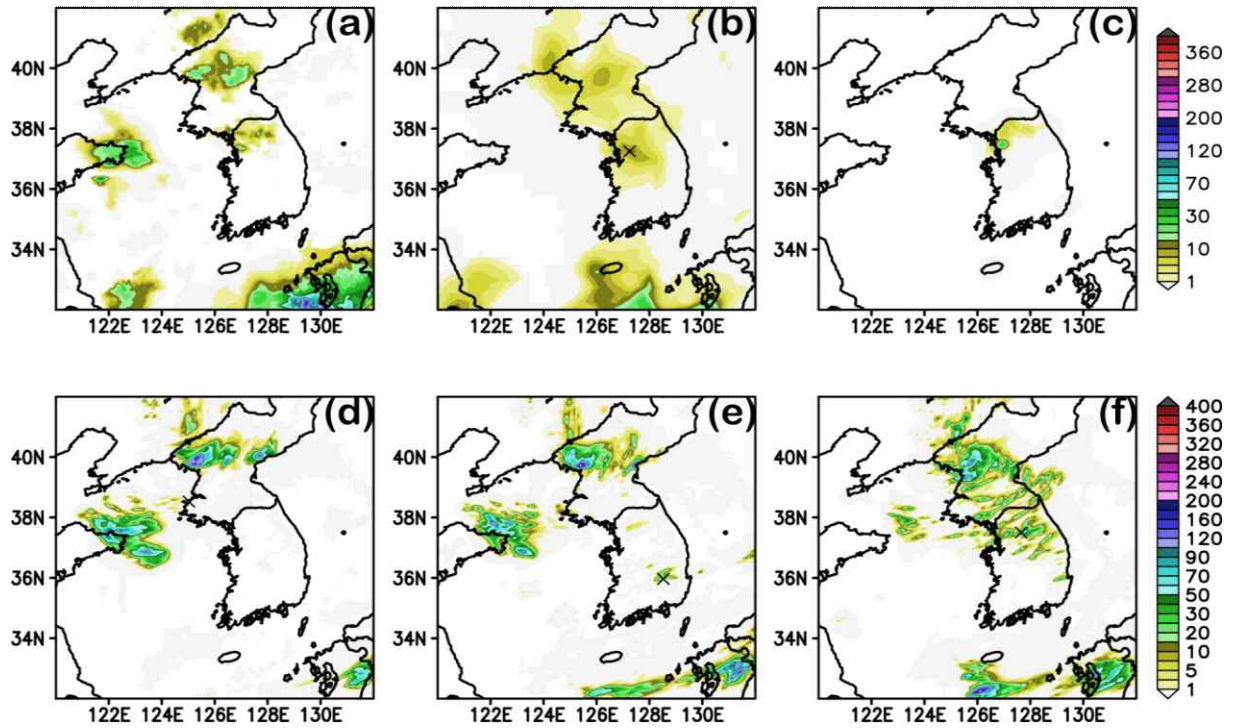
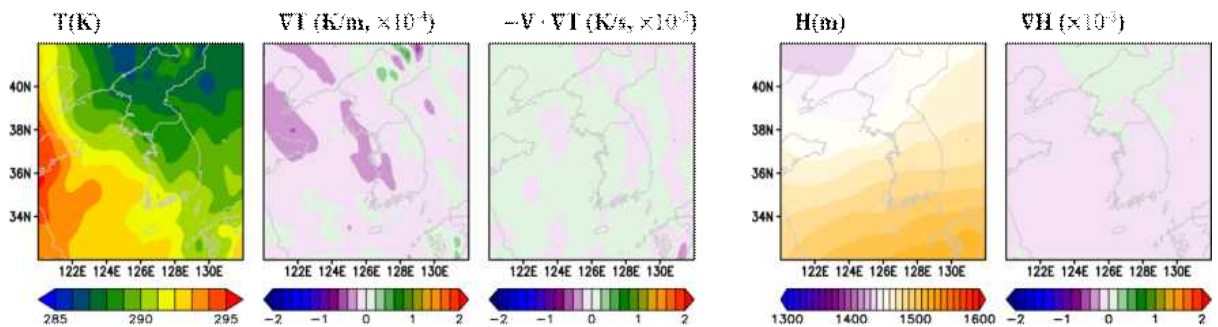


그림 2.2.2.38. 2021년 7월 09일 고기압 영향권 내 대류성 강수의 6시간 누적강수량 비교: (a) IMERG, (b) ERA5 재분석자료, (c) AWS 관측자료, (d) KLAPS 1700 UTC, (e) KLAPS 1800 UTC, 그리고 (f) KLAPS 1900 UTC.

▪ 850 hPa



▪ 500 hPa

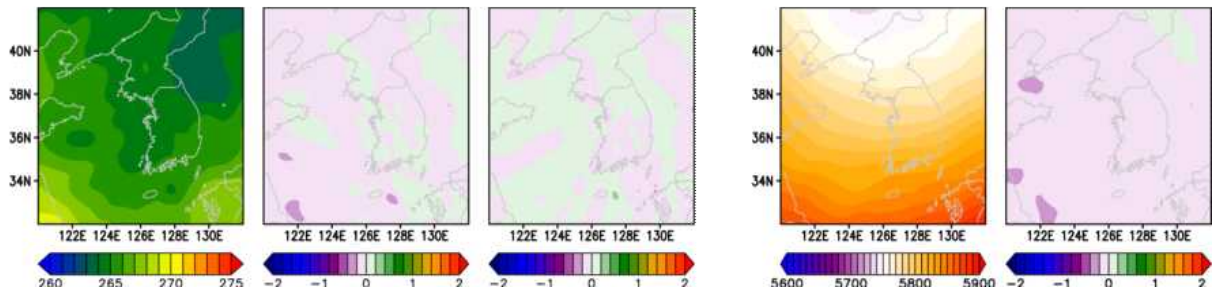


그림 2.2.2.39. 2021년 7월 09일 고기압 영향권 내 대류성 강수에 대한 ERA5 재분석자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도경도장(∇H)을 나타냄.

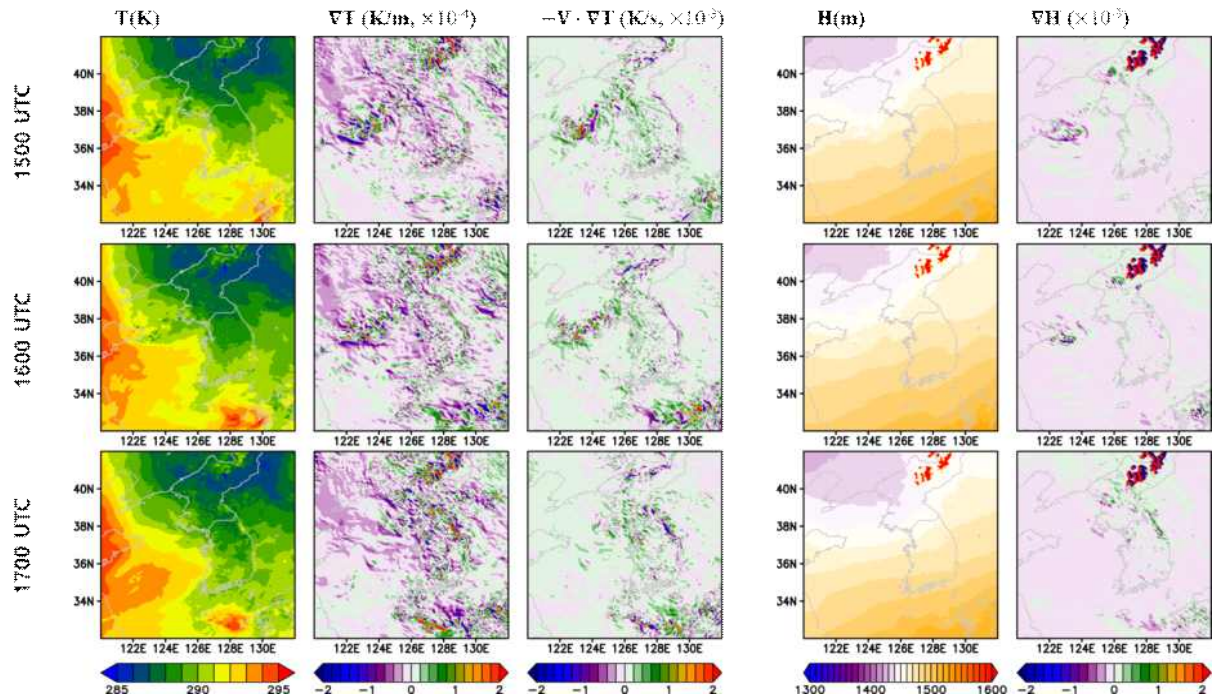


그림 2.2.2.40. 2021년 7월 09일 고기압 영향권 내 대류성 강수의 850 hPa에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄.

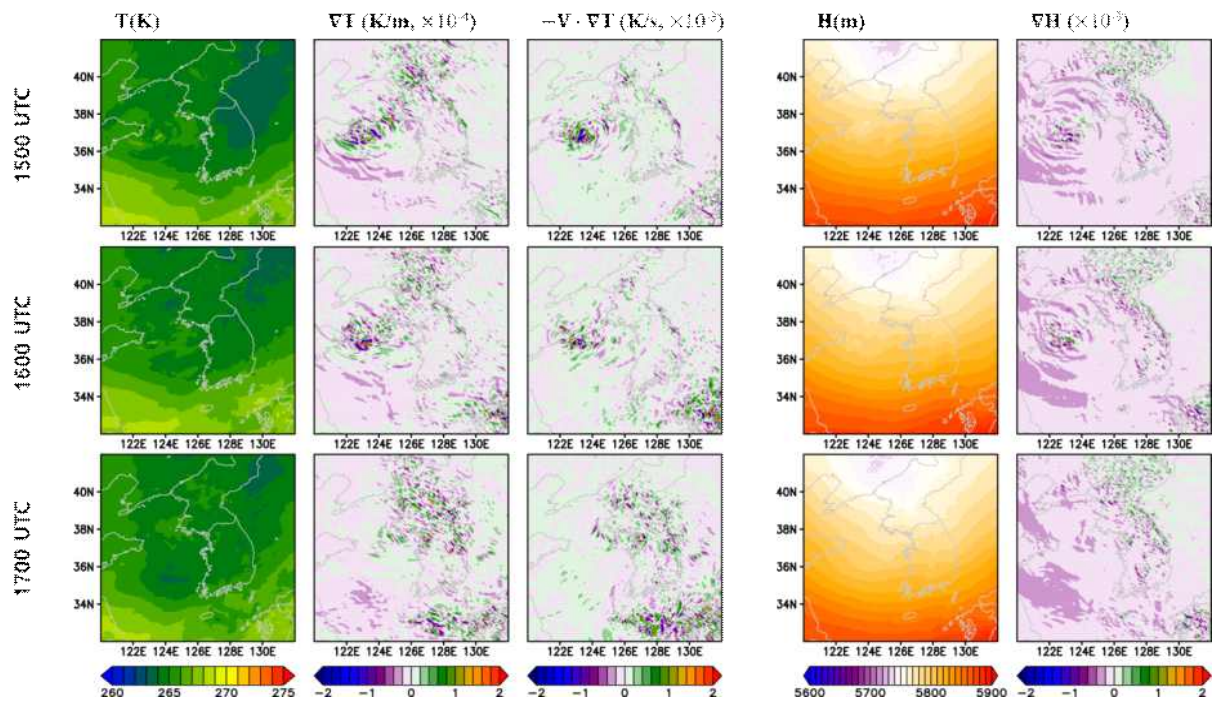


그림 2.2.2.41. 2021년 7월 09일 고기압 영향권 내 대류성 강수에 대한 KLAPS 예측장 자료의 온도장(T), 온도경도장(∇T), 온도이류장($-V \cdot \nabla T$), 지위고도장(H), 그리고 지위고도 경도장(∇H)을 나타냄.

2.2.3. 요약

2.2.1과 2.2.2 절에서는 강수 사례에 대한 대기수상체 특성 분석과 KLAPS 자료의 초기장에 대한 강수 물리과정 예측 특성을 분석하였다. 2.2.1절의 대기수상체 특성에 있어서, ERA5 재분석자료와 달리 KLAPS는 강수 지역에서 비슷한 형태의 특징 대기수상체 분포를 항상 모의하는 경향을 보였다. 특히, 강수 지역에서 계산된 KLAPS 반사도 CFADs는 몇몇 사례를 제외하고 WISSDOM 반사도 CFADs와 비교하여 대체로 대기수상체 분포가 강수구조나 형태에 따라 적절히 모의되고 있지 않은 것으로 판단된다. 따라서 강수 형태나 구조를 모의하기 위한 적절한 미세물리규모 모수화 방안에 대한 고찰이 필요하다고 판단된다. 2.2.2절의 초기장에 대한 강수 물리과정 예측 특성에서는 KLAPS의 초기장 자료가 강수 시점에 가까울수록 누적강수량이 IMERG와 AWS 관측자료의 누적강수량을 잘 모의하는 것을 알 수 있었다. KLAPS 자료의 경우 몇몇 사례에서 누적강수량을 과대 모의하는 경향이 있었으며, 이와 같은 특징은 2.2.1절의 미세물리규모방안 또는 적운모수화등과 같은 모델 물리과정의 결과로 생각된다. 한편, KLAPS의 자료동화 시스템은 단시간에 발달하는 강수의 특징에 효과적으로 대응할 수 있는 장점을 보였으며, 특히 대류성 강수 유형과 같이 강수 시점에 가까울수록 잘 모의하는 경향을 볼 수 있었다.

2.3. 초단기 통계적 낙뢰 예측기법 개발

2.3.1. 낙뢰 예측을 위한 특성인자 분석

낙뢰는 대기 중 또는 대기-지표면 간의 높은 전하 차에 의해 발생하는 방전현상이다. 연직으로 발달한 구름에서 대기-지표 간의 전하차 형성이 유리하기 때문에 대류운 또는 뇌우(storm)와 관련된 적란운(Cumulonimbus, CB)에서 낙뢰가 빈번하게 발생한다. 낙뢰는 크게 구름-지면(운대지: Cloud-to-Ground, CG) 번개와 구름-구름(운대운: Cloud-to-Cloud, CC) 번개로 구분할 수 있다. 구름-지면 번개는 집중호우가 발생하는 악기상 환경에서 함께 동반되어 많은 인명 및 재산 피해를 초래하고 구름-구름 번개는 여름철 항공 운항에 큰 영향을 주기 때문에 낙뢰탐지에 대한 연구가 중요하다. 따라서 이번 장에서는 사전 연구를 통한 낙뢰에 연관된 특성인자를 조사하였고 원격탐사 자료와 수치모델 재분석 자료를 이용하여 낙뢰 특성인자 산출 및 분석을 수행하였다.

(1) 사전연구 분석을 통한 가용 특성인자 정의

1) 낙뢰발생 원리

① Ice microphysics

발달하는 적란운 내부에서는 강한 상승기류가 존재하고 수적(cloud droplet) 간 다양한 미세물리 과정이 발생한다. 구름 상층부(-40 °C 이하인 구름층)에서는 핵화 과정(Homogeneous ice nucleation)을 통해 생성된 얼음입자들로 구성되어 있으며 vapor deposition 과정 등을 통해 성장한다. 구름 중층부(-40~0 °C인 구름층)에서는 상승기류에 의해 치올려진 액체상 수적과 상층 구름에서 성장한 고체상 수적이 혼재한다. 이 구름층에서 얼음입자들은 고체상 수적 간의 상호작용 (aggregation) 또는 과냉각 수적과 상호작용 (riming)을 통해 성장한다. 또한 얼음입자들 간의 충돌로 인해 부서지면서 다수의 작은 얼음입자들이 생성(secondary ice production)된다. 따라서 적란운 내부에서는 얼음 미세물리 과정을 통하여 다양한 크기의 얼음입자들이 형성할 수 있으며 이런 고체상 수적들은 상승기류와 액체상 수적과 더불어 낙뢰 형성에 중요한 요소이다. 그림 2.3.1.1은 발달하는 구름에서 다양한 미세물리 과정을 통해 수적들이 성장하는 과정을 나타내는 도식도이다.

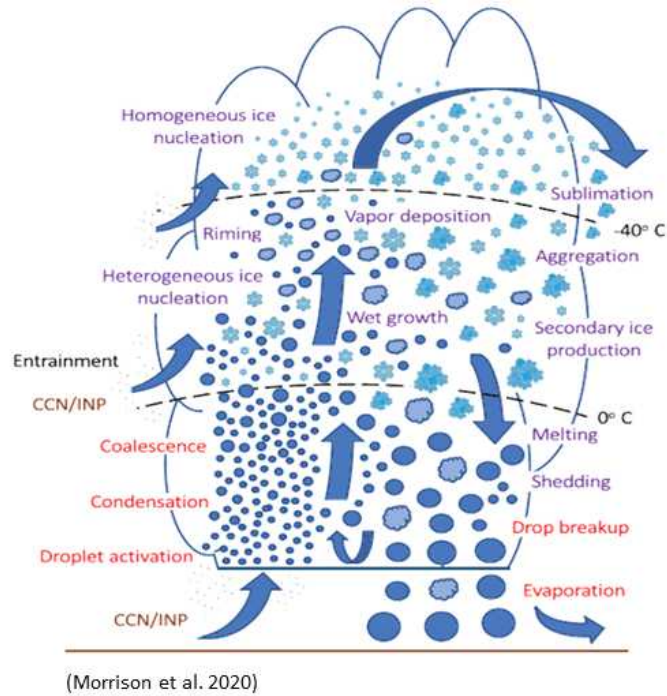


그림 2.3.1.1. 미세물리과정을 통한 구름 수적의 발달과정 모식도 (Morrison et al., 2020)

② Non-inductive charging (NIC)

하부 구름층(0 °C 이상 구름층)에서 공기상승에 의해 포화된 습윤한 공기는 액체상 수적을 생성한다. 생성된 액체상 수적은 지속적인 상승기류에 의해 중층 구름 고도까지 도달하게 되며 중층 구름층에 존재하는 다양한 얼음입자(ice crystal)와 접촉하여 상고대화 입자 또는 싸락우박 (graupel)을 형성한다. 상승기류 영역 내에서 상대적으로 무거운 싸락우박은 하층 구름으로 낙하하게 되고 가벼운 얼음입자는 상승기류를 타고 상층 구름으로 이동하면서 분리하게 된다. 낙하한 무거운 싸락우박은 주변 작은 눈입자나 과냉각 수적과 충돌하여 큰 입자로 성장하면서 음의 전하를 띠게 되고 상층 구름으로 연직 이류된 가벼운 얼음입자는 양의 전하 특성을 갖게 된다. 그림 2.3.1.2는 적란운에서 발달하는 낙뢰 형성 모식도를 나타낸다. 음의 전하로 대전된 무거운 입자는 주로 -15~-10 °C 혼합운 영역에서 존재하고 있음을 보여준다. 그리고 음전하 영역 아래에 약한 양전하 영역이 용해층 고도 근처에 형성되어 있다. 또한 중층 구름 영역에서 음전하가 누적되면서 지표면에서는 양전하를 유도하게 된다. 결과적으로 낙뢰 발생은 다양한 크기의 얼음입자(싸라우박과 작은 빙정 등) 수농도와 그에 관련된 얼음 미세물리 그리고 상승기류에 밀접한 연관성이 있음을 반영한다.

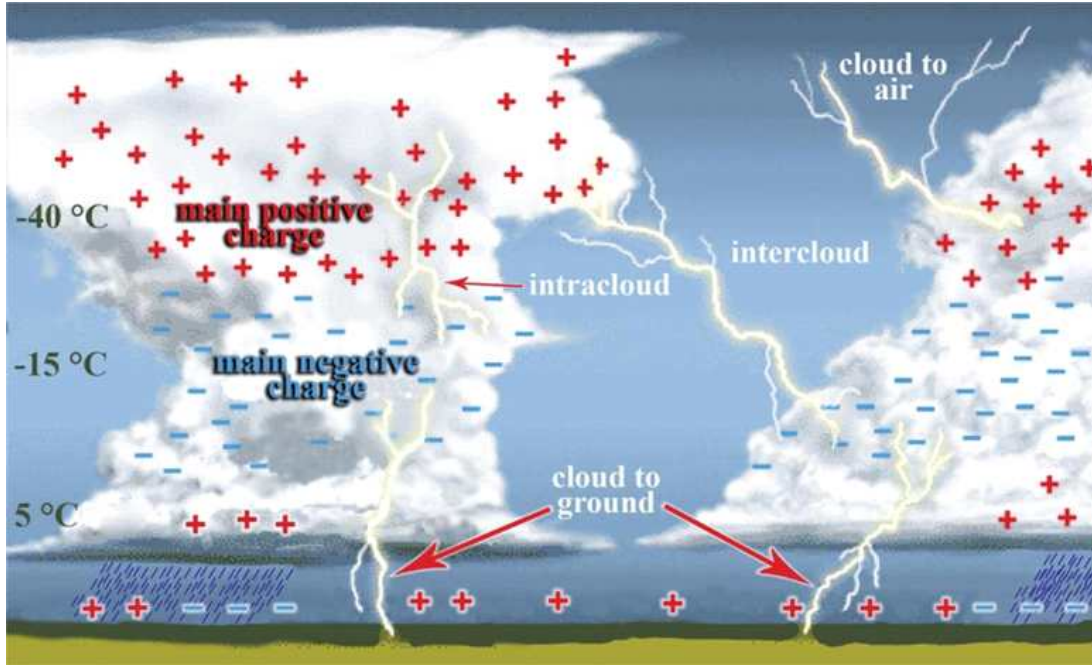


그림 2.3.1.2. 적란운 영역의 낙뢰 형성 모식도 (Dwyer and Uman, 2014)

2) 낙뢰 특성인자

앞에서 소개한 것처럼 구름 영역에서 전하 유도는 대한 개념은 구름 중층인 혼합운 영역에서 싹락우박 또는 상고대화 입자의 수농도와 IWC(Ice water content), 구름 상층부에서의 작은 빙정의 수농도와 IWC 그리고 상승기류가 존재해야 함을 보여준다. 따라서 해당 고체상 입자와 상승기류 특성을 잘 관측할 수 있는 관측변수들을 활용하면 낙뢰 유발에 대한 정보 유추가 가능하다. 따라서 원격탐측장비(위성 또는 지상레이더)를 관측자료와 수치모델 분석장 및 예측장 자료를 기반으로 낙뢰 감시 및 예측을 수행한 다양한 사전연구를 조사하여 낙뢰 특성을 잘 반영할 수 있는 특성인자를 선정하였다.

① 레이더 기반 특성인자

지상레이더는 위성에 비해 낙뢰 예측 선행시간이 짧지만 강수 영역에 대한 여러 산출물을 직접 제공하기 때문에 낙뢰 발생 위치에 대한 정확한 정보를 제공이 가능한 장점을 갖는다. Thurmond(2014) 연구에서는 이중편파 레이더망과 지상 낙뢰 관측망의 관측 산출물을 이용하여 운대지 낙뢰 전조탐지를 위한 알고리즘을 개발하였다. 그리고 개발된 알고리즘을 이용하여 낙뢰전조 탐지에 적합한 반사도와 이중편파 변수의 기준값을 조사하였다. 그 결과 반사도와

Z_{DR} 자료를 융합한 기준치(-15 °C 등온층: $Z \geq 35$ dBZ & $Z_{DR} \geq 0.5$ dB, 또는 -10 °C 등온층: $Z \geq 30$ dBZ & $Z_{DR} \geq 0.5$ dB)가 기존 레이더에서 사용되는 기준치(-10 °C 등온층: $Z \geq 30$ dBZ)보다 더 나은 낙뢰 전조 탐지에 적합함을 제안하였다.

Park(2012)에서는 장기간의 지상레이더 반사도 기반으로 UVIL(Upper Vertical Integration Liquid water contents)와 echo top, CMAX(Column MAX reflectivity)와 같은 특성인자를 생성하고 낙뢰와 비낙뢰 영역에서의 통계적 특성을 연구하였다. 그림 2.3.1.3은 낙뢰와 비낙뢰 영역에서 특성인자의 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF)를 나타낸다. 검은실선은 낙뢰영역에서의 특성변수 PDF이고 검은파선 또는 회색파선은 비낙뢰영역의 특성변수 PDF를 나타낸다. 낙뢰 영역에서의 특성인자들 모두 비낙뢰 영역의 특성인자에 비해 높은 관측치 구간에 집중적으로 분포하였다.

Rigo et al.(2010)에서는 뇌우의 발달단계에 따른 낙뢰발생 빈도와 레이더 기반 특성변수 간의 관계성을 연구하였다. 그림 2.3.1.4는 뇌우의 지속시간에 대한 정규화된 구름영역과 운대지 낙뢰 밀도, 대류성 강수강도 비율과 1 km 고도에서의 CAPPI 최대 반사도를 나타낸다.

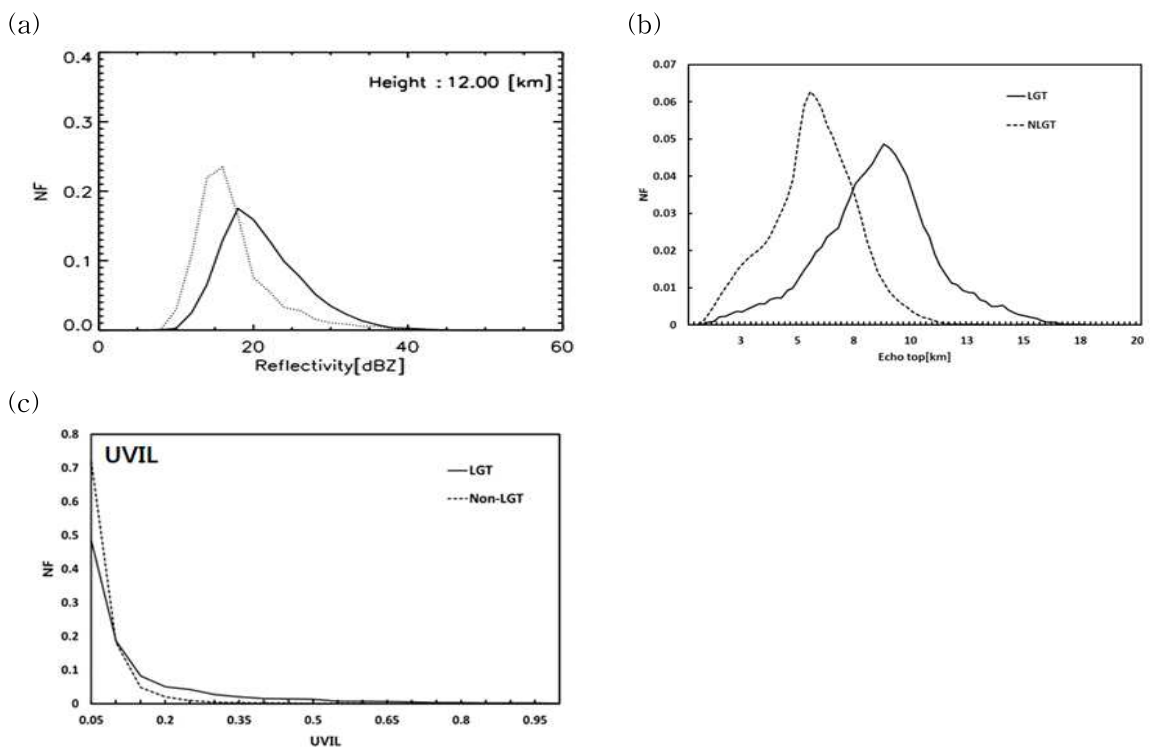


그림 2.3.1.3. 낙뢰와 비낙뢰 영역에서의 레이더 반사도 기반 특성인자들의 (a) 반사도, (b) Echo top, (c) UVIL 확률밀도함수 (Park, 2012).

여기서 정규화 지속시간(Normalized duration)에서 0~30 까지는 초기단계, 30~80 구간은 중간(성숙)단계 그리고 80 이상인 구간에서는 소멸단계로 구분하였다. 구름 영역과 1 km 고도에서의 CAPPI 반사도는 성숙단계에서 최댓값으로 일정하게 유지되는 특성을 보이고 있으며 CG 낙뢰횟수는 성숙단계의 초반부 (약 40)까지는 증가하다가 성숙단계 중반부부터 점차 감소하였다. 그리고 대류성 강수가 차지하는 비율은 초기단계에서 최대로 나타났다. 그림 2.3.1.5는 그림 2.3.1.4과 비슷하지만 여러 레이더의 Echo top과 최대 반사도를 추가하여 대류운 지속시간 동안 낙뢰발생과 레이더 특성인자 간의 경향성을 보여준다. 모든 레이더의 Echo top과 최대반사도는 IC와 CG 발생횟수가 최대로 나타는 성숙기 초반부(40)에서 첨두값이 나타났다. 따라서 낙뢰 발생 밀도와 레이더 기반 Echo-top, 최대 반사도 강도는 서로 밀접한 관련성이 있음을 반영한다.

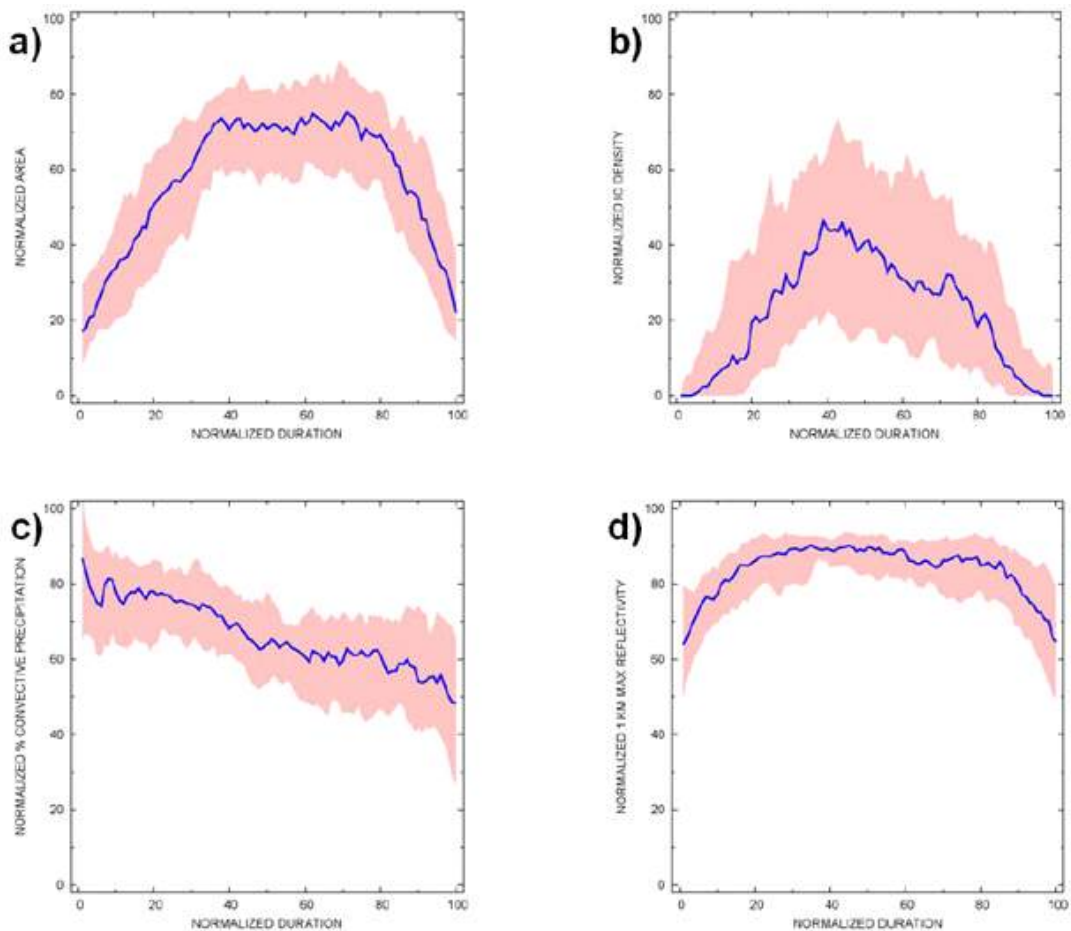


그림 2.3.1.4. 대류운 정규화 지속시간에 대한 (a) 대류운 영역, (b) CG 낙뢰횟수밀도, (c) 대류성 강수비율, (d) 1 km 고도에서의 CAPPI 최대 반사도의 시계열 분포 (Rigo et al., 2010)

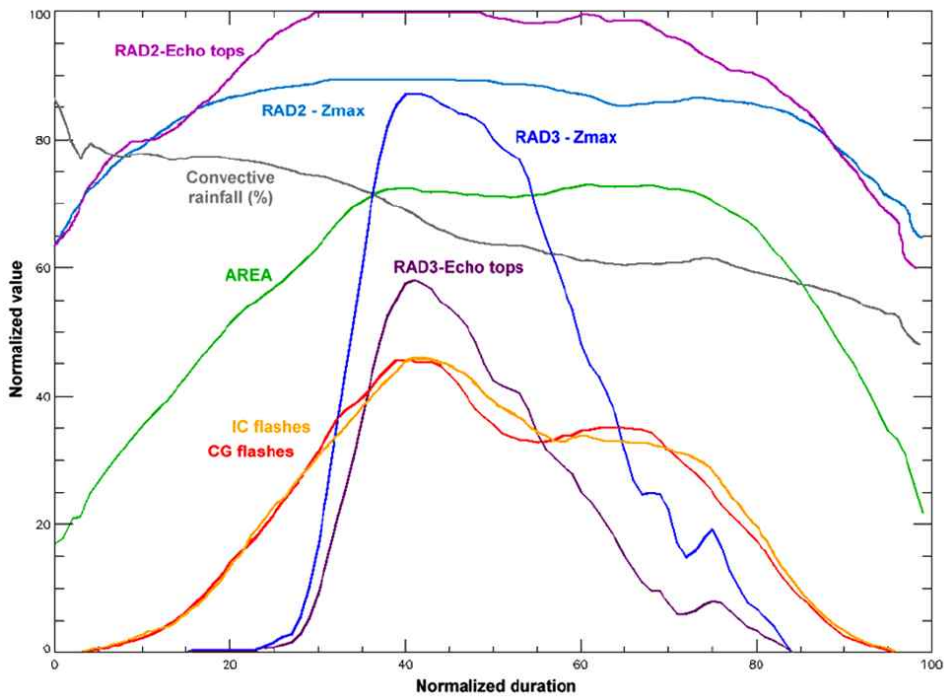
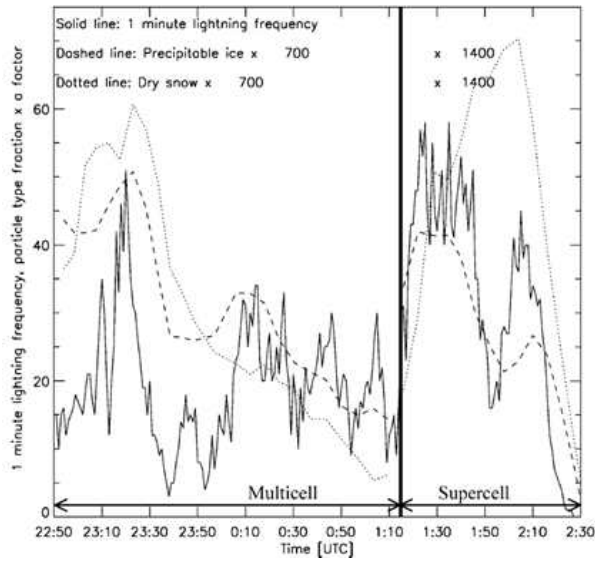


그림 2.3.1.5. 대류운 정규화 지속시간 동안의 레이더망의 특성인자와 낙뢰발생밀도의 시간변동에 대한 모식도 (Rigo et al, 2010)

Deierling et al. (2005)에서는 지상레이더와 낙뢰자료를 이용하여 -45°C 등온층 위의 Dry snow와 0°C 등온층 위의 precipitable ice 그리고 1분 동안 발생한 낙뢰횟수 간의 관계성을 조사하였다. 레이더 관측영역에서의 얼음입자 유형 분류는 Vivekanandan et al. (1999)에서 개발한 PID (Particle Identification Algorithm)을 이용하여 분류를 수행하였다. 그림 2.3.1.6a는 1분간 낙뢰 발생수(실선)와 -45°C 등온층 위의 Dry snow(파선), 0°C 등온층 위의 precipitable ice의 fraction 시계열 변화를 나타내고 그림 2.3.1.6b는 6a와 같은 낙뢰 발생수에 대하여 두 수상체의 product 시계열 변화를 보여준다. 두 그림 모두 낙뢰 횟수가 증가할 수록 두 얼음 수상체의 fraction과 product 모두 증가하는 패턴을 나타내고 있다.

Deierling et al. (2008)에서도 지상레이더와 낙뢰자료를 이용하여 최대 상승기류와 낙뢰 발생 빈도 수간의 관계성을 분석하였다. 상승기류는 레이더 관측자료 기반의 바람 산출물 생성 알고리즘(The NCAR VDRAS system)을 이용하여 계산하였다. 그림 2.3.1.7a는 최대 상승기류와 1분 평균 낙뢰발생 수의 산포도를 나타내며 두 특성인자는 양의 상관관계를 가지고 있음을 보여준다. 그림 2.3.1.7b는 1분 낙뢰 발생수와 연직속도, precipitable ice의 시계열을 나타낸다. 연직속도와 precipitable ice 모두 낙뢰 발생 수가 증가할수록 증가하는 패턴을 보였다.

(a)



(b)

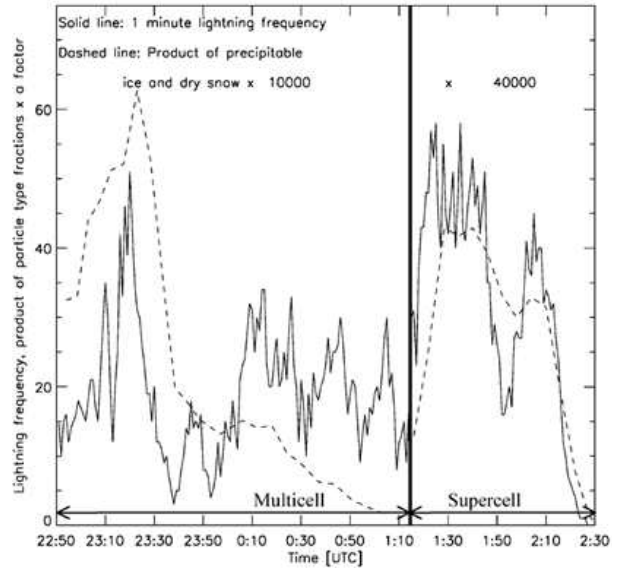
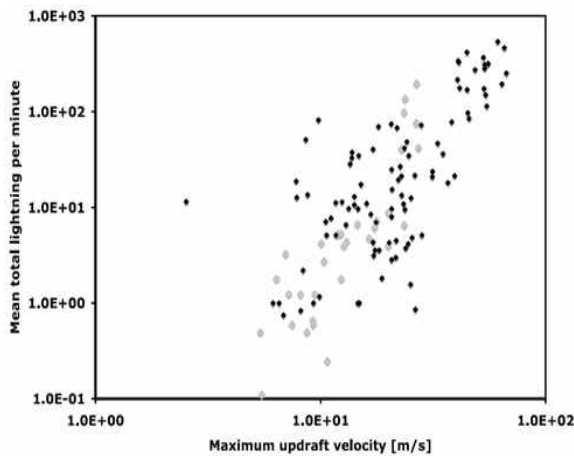


그림 2.3.1.6. 1분 평균 낙뢰 발생에 대하여 (a) Dry snow와 Precipitable ice의 fraction과 (b) Dry snow와 Precipitable ice의 product 경향성에 대한 시계열 (Deierling et al., 2005)

(a)



(b)

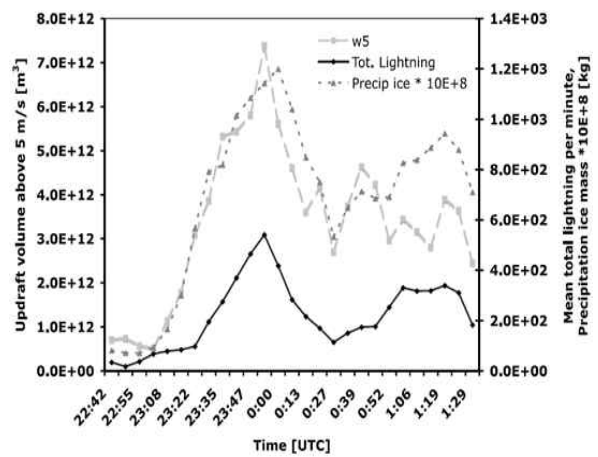


그림 2.3.1.7. (a) 최대 상승기류와 1분 평균 낙뢰 총 발생수에 대한 산포도, (b) 1분 평균 낙뢰 발생수에 대하여 5 ms⁻¹ 이상의 상승기류 volume과 Dry snow와 Precipitable ice의 fraction에 대한 시계열 (Deierling et al., 2008)

② 위성 기반 특성인자

위성자료는 다른 원격탐측장비에 비해 넓은 영역을 관측할 수 있기 때문에 뇌우 발달과 낙뢰 발생이전 긴 선행시간에 대하여 낙뢰발생 가능성에 대한 정보를 제공할 수 있는 장점이 있다. Mecikalski and Bedka(2006) 연구논문에서 GOES 위성 관측자료를 기반으로 대류운 발생 전조탐지 특성을 연구하였다. 2개의 IR 채널($10.7 \mu\text{m}$, $13.3 \mu\text{m}$)과 1개의 수증기 채널($6.5 \mu\text{m}$) 이 이용하여 총 6개의 특성인자를 생산하였고 대류운 전조탐지에 적합한 기준치를 산출하였다. 여기서 산출된 특성인자는 $10.7 \mu\text{m}$ 휘도온도(T_B , Brightness temperature), $10.7 \mu\text{m}$ 휘도온도 경향(trend), 수증기 채널과 적외 채널 간의 BTD(Brightness Temperature Difference)와 BTD trend로 구성하였다.

대류운 발생과 최초 낙뢰 탐지 시간은 얼음 미세물리적 측면에서 밀접한 관련성을 가지고 있다. 이에 따라 Siewert(2008)과 Harris et al.(2010)에서는 낙뢰 전조탐지 분석을 위하여 Mecikalski and Bedka(2006)에서 사용한 특성인자에서 $3.9 \mu\text{m}$ 채널을 기반으로 산출한 특성인자를 추가하여 낙뢰 전조탐지 분석을 수행하였다. 여기서 $3.9 \mu\text{m}$ 채널 기반의 특성인자는 $3.9 \mu\text{m}$ fraction reflectance와 $3.9 \mu\text{m}$ reflectance trend, $3.9 \mu\text{m}$ 와 $10.7 \mu\text{m}$ 채널 간 BTD와 BTD trend로 구성되었다. 표 2.3.1.1은 여러 사전 연구에서 제안한 낙뢰 전조에 관련된 특성인자들 목록과 기준치들을 보여준다.

그림 2.3.1.8은 낙뢰가 발생하기 1시간 전부터 낙뢰 발생후 15분까지 GOES-12의 가시채널(VIS)과 $10.7 \mu\text{m}$ 의 휘도온도 이미지 영상을 나타낸다 (Harris et al. 2010). 여기서 낙뢰 발생 위치도 가시채널에 나타내었으며 CG 낙뢰는 빨강색 십자가 모양으로 CC 낙뢰는 노랑색 삼각형으로 나타내었다. 낙뢰가 발생하기 약 75분 전에 VIS 채널에서 발달하는 대류운을 관측하였으며(검은원 부분) IR 채널에서도 약 15분 전에 CTT(Cloud top temperature)가 0°C 이하인 영역이 감지되었다. 따라서 낙뢰 전조 탐지 측면에서 위성자료 기반 특성인자가 유용하게 활용할 수 있음을 보여준다.

그림 2.3.1.9은 낙뢰전조 특성인자 중 하나인 $3.9 \mu\text{m}$ reflectance의 시계열 상자그림을 나타낸다(Harris et al. 2010). 낙뢰 발생 1시간 전에는 중간값이 0.16이었다가 최초 낙뢰 발생 시간에 갈수록 급격하게 감소하는 패턴을 보이다가 낙뢰 발생시간에 최솟값(약 0.45)으로 나타났다. 이를 통하여 $3.9 \mu\text{m}$ reflectance의 감소는 낙뢰 전조 탐지에 유용한 변수임을 보여준다. 그림

2.3.1.10은 낙뢰 전조 탐지에 사용된 모든 특성인자의 시계열 모식도이다(Harris et al 2010). 10.7 μm 휘도온도와 10.7 μm 휘도온도 경향성, 3.9 μm reflectance와 3.9 μm reflectance 경향은 낙뢰 시간에 다다를수록 감소하는 특성을 나타낸다. 반면에 BTD(6.5 μm , 10.7 μm), BTD(13.3 μm , 10.7 μm), BTD(3.9 μm , 10.7 μm)와 BTD들의 경향은 낙뢰 시간이 도달할수록 증가하는 특성을 보인다.

Interest field	Mecikalski and Bedka (2006)	Siewert (2008) LI value	Harris et al (2010) 15-30min LI 집계치	설명
10.7 μm T_B	< 0°C	$\leq -13^\circ\text{C}$	< 0°C	Cloud tops cold enough to support supercooled water and ice mass growth; cloud-top glaciation
10.7 μm T_B time trend	$< -4^\circ\text{C} / 15 \text{ min}$ $[\Delta T_B / 30 \text{ min} < \Delta T_B / 15 \text{ min}]$	$\leq -10^\circ\text{C} / 15 \text{ min}$	$\leq -6^\circ\text{C} / 15 \text{ min}$	Cloud growth rate (vertical)
Timing of 10.7 μm T_B drop below 0°C	Within prior 30 min	not used	not used	Cloud-top glaciation
6.5-10.7 μm T_B difference	-35°C~-10°C	$\geq -17^\circ\text{C}$	> -30°C	Cloud-top height relative to mid/upper troposphere
13.3-10.7 μm T_B difference	-15°C~-5°C	$\geq -7^\circ\text{C}$	> -13°C	Cloud-top height relative to mid/upper troposphere; better indicator of early cumulus development but sensitive to cirrus
6.5-10.7 μm T_B time trend	$> 3^\circ\text{C} / 15 \text{ min}$	$\geq 5^\circ\text{C} / 15 \text{ min}$	$\geq 5^\circ\text{C} / 15 \text{ min}$	Cloud growth rate (vertical) toward dry air aloft
13.3-10.7 μm T_B time trend	$> 3^\circ\text{C} / 15 \text{ min}$	$\geq 5^\circ\text{C} / 15 \text{ min}$	$\geq 4^\circ\text{C} / 15 \text{ min}$	Cloud growth rate (vertical) toward dry air aloft
3.9-10.7 μm T_B difference	not used	not used	> 17°C	Cloud-top glaciation
3.9-10.7 μm T_B time trend	not used	$T-T(t-1) < -5^\circ\text{C}$, $T-T(t+1) < -5^\circ\text{C}$	$> 1.5^\circ\text{C} / 15 \text{ min}$	Sharp decrease, then increase indicates cloud-top glaciation
3.9 μm fraction reflectance	not used	≤ 0.05	< 0.11	Cloud top consists of ice (ice is poorer reflector than water at 3.9 μm)
3.9 μm fraction reflectance trend	not used	not used	< -0.02/15min	Cloud-top glaciation rate

표 2.3.1.1. 낙뢰 전조에 관련된 위성 특성인자 목록과 기준치 (Mecikalski and Bedka, 2006; Siewert, 2008; Harris et al. 2010)

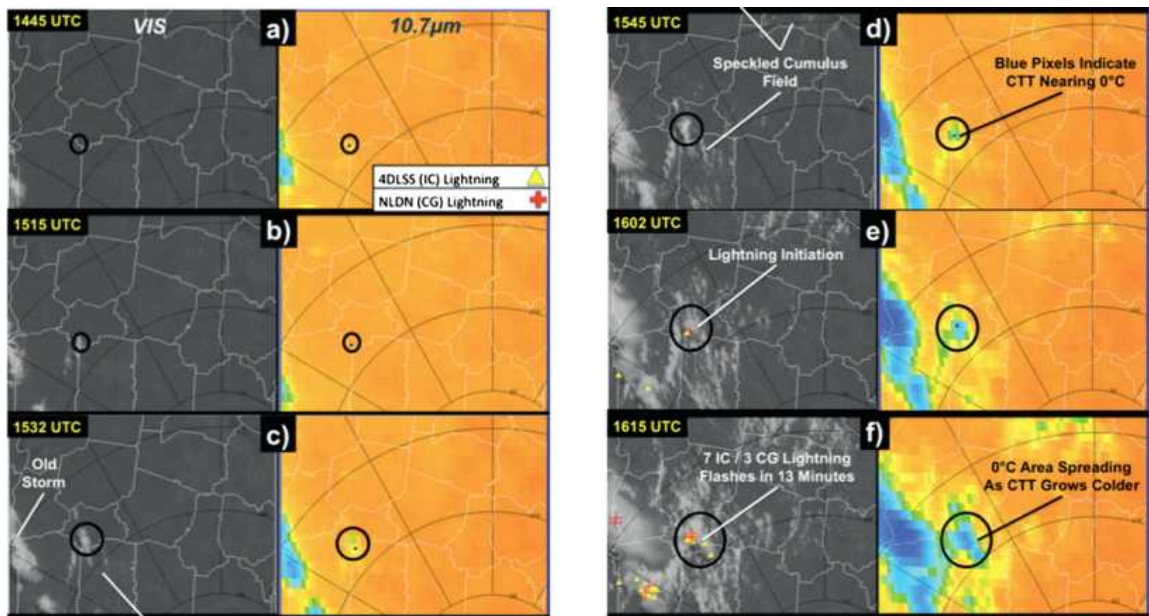


그림 2.3.1.8. 낙뢰 발생 1시간 전부터 낙뢰 발생 15분 후 시간 구간에서의 GOES-12의 VIS(좌)와 IR(10.7 μm , 우)의 영상 (Harris et al. 2010)

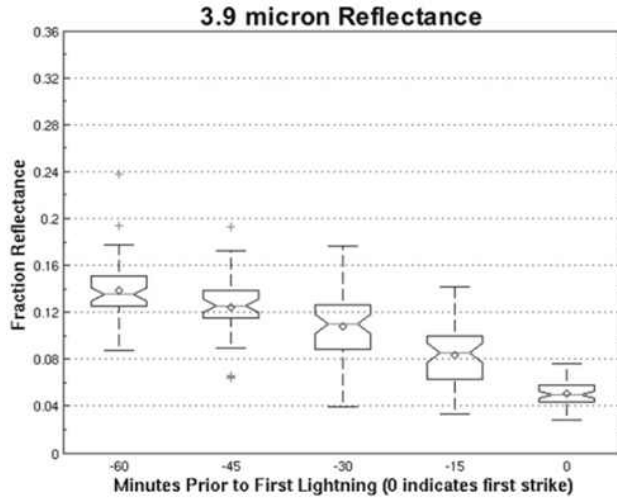


그림 2.3.1.9. 3.9 μm reflectance의 시계열 상자
그림 (Harris et al., 2010)

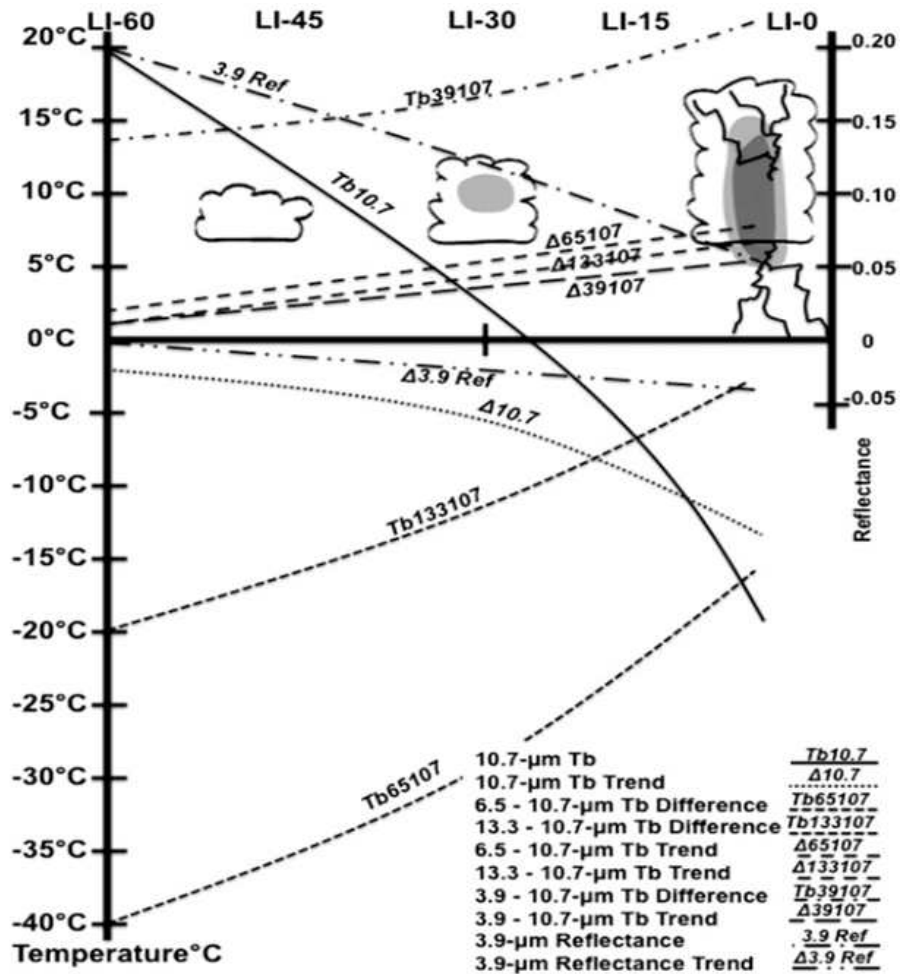


그림 2.3.1.10. 낙뢰 전조 관련 위성 특성인자의 시계열 모식도
(Harris et al., 2010)

③ 수치모델 기반 특성인자

수치모델을 이용한 낙뢰가능성 예측은 주로 열역학 불안정도 지수들을 이용하여 수행되었다. 표 2.3.1.2는 낙뢰 확률 예측을 위해 사용된 예측인자(predictor) 후보군 예시를 나타낸다(Burrow et al. 2005). 여기서 500-1000 hPa DZ(Thickness of layer)은 대규모 상승운동을 유발하는 전선운동에 밀접한 관련이 있으며 캐나다에서 뇌우발생에 주요한 영향을 주는 변수이다. 그리고 CLTOPZ(Potential cloud-top height)은 공기덩이의 부력을 기반으로 산출하였으며 구름 연직성장에 관련된 변수로 낙뢰예측에 활용 가능성이 있음을 보여준다. 하지만 낙뢰는 미세물리과정에서 발생하는 전하 분리가 가장 중요한 원인이기 때문에 열역학 변수보다는 미세물리와 직접 연관된 고해상도 수치모델 자료를 활용하는 것이 유리하다. 따라서 DZ0TRO(Thickness of height of 0 °C level to tropopause)나 DZ0CT(Thickness of height of 0 °C level to potential cloud top)처럼 대류운에서 0 °C 이하인 얼음 구름층의 두께를 나타내는 인자가 낙뢰예측 활용에 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 분석된다.

Acronym	Description	Acronym	Description
CAPE	Convective available potential energy calculated from the highest THW in the lowest 200 hPa (mxavch)	GZ	Geopotential height at 1000 and 500 hPa (mxavch)
CIN	Convective inhibition calculated from the surface (mxavch)	DZ	Thickness of layers: 500-1000, 850-1000, 700-850, and 700-1000 hPa (mxavch)
HE	Relative helicity (mxavch)	W	Vertical motion (700 hPa) (mnavch)
THW	Maximum wet-bulb potential temperature in a vertical column (mxavch)	WUT	Depth of ascent (WU) and descent (WD), in deep layers: T = 250-1000 hPa and L = 700-1000 hPa (mxavch)
		WDT	
		WUL	
		WDL	
SHO	Showalter index and lifted index (mnavch)	TROP	Tropopause (TRO): pressure (P), temperature (T), and height (Z) (mxavch)
LI		TROT	
		TROZ	
SWEAT	Severe weather threat index	DZ0TRO	Thickness (DZ): 1) height of 0°C level to tropopause (0TRO) and 2) 0°C to potential cloud top (0CT) (mxavch)
SI	Storm severity index	DZ0CT	
PW	Precipitable water in the troposphere (mxavch)	CLTOPZ	Potential cloud-top height (mxavch)
PWU	Precipitable water in the upper troposphere (700-400 hPa) (mxavch)	TOPOG	Topography elevation
TD	Dewpoint temperature (surface, 850 hPa, 700 hPa), (mxavch)	LAW	Land-water fraction (0 to 1)
TT	Temperature at 850, 700, and 500 hPa (mxavch)	VEG	Vegetation type
MSLP	MSL pressure (mxavch)	LAT	Gridpoint latitude
PRI	Price and Rind lightning parameterization function	LON	Gridpoint longitude

표 2.3.1.2. 낙뢰 확률 예측을 위해 사용된 예측인자(predictor) 후보군 (Burrow et al., 2005)

그림 2.3.1.11은 2003년 6월 28일 0000 UTC 강수사례에 대하여 캐나다와 미국 영역에서의 21~24 시간 낙뢰 예측 모의 결과를 나타낸다(Burrow et al., 2005). 미국 중부 영역과 캐나다 알버타와 서스캐치원 북부 그리고 온타리오와 매나토바 경계에서 낙뢰 확률이 80% 이상 나타나는 영역이 존재하였다. 그리고 캐나다와 미국 동부 해안에서도 90% 이상의 낙뢰 예측 영역이 길게 분포하였다.

그림 2.3.1.12는 캐나다와 미국 동부 영역에 대하여 낙뢰 예측 영역(그림 2.3.1.11의 동부영역과 동일)과 실제 낙뢰 발생 영역 간의 매칭 결과를 보여준다. 여기서 파랑 등치선과 빨강 등치선은 각각 25%, 75% 이상인 낙뢰 확률을 나타내며 연두색에서 초록색 음영영역은 실제 낙뢰가 관측된 영역을 보여준다. 동부 해안에서 발생한 낙뢰 공간분포는 전반적으로 25% 이상 예측된 영역과 실제 낙뢰가 관측된 영역이 잘 일치하였다. 하지만 캐나다와 미국 내륙지역에서는 실제 낙뢰가 발생한 영역을 모의하지 못하는 영역이 존재하였다. 이를 통하여 전선(frontal zone)의 전면과 후면부의 경계 영역에서는 예측장이 잘 모의하였으나 내륙에서 발달하는 다세포 뇌우에 대해서는 낙뢰 예측의 한계점이 존재하였음을 보여주었다.

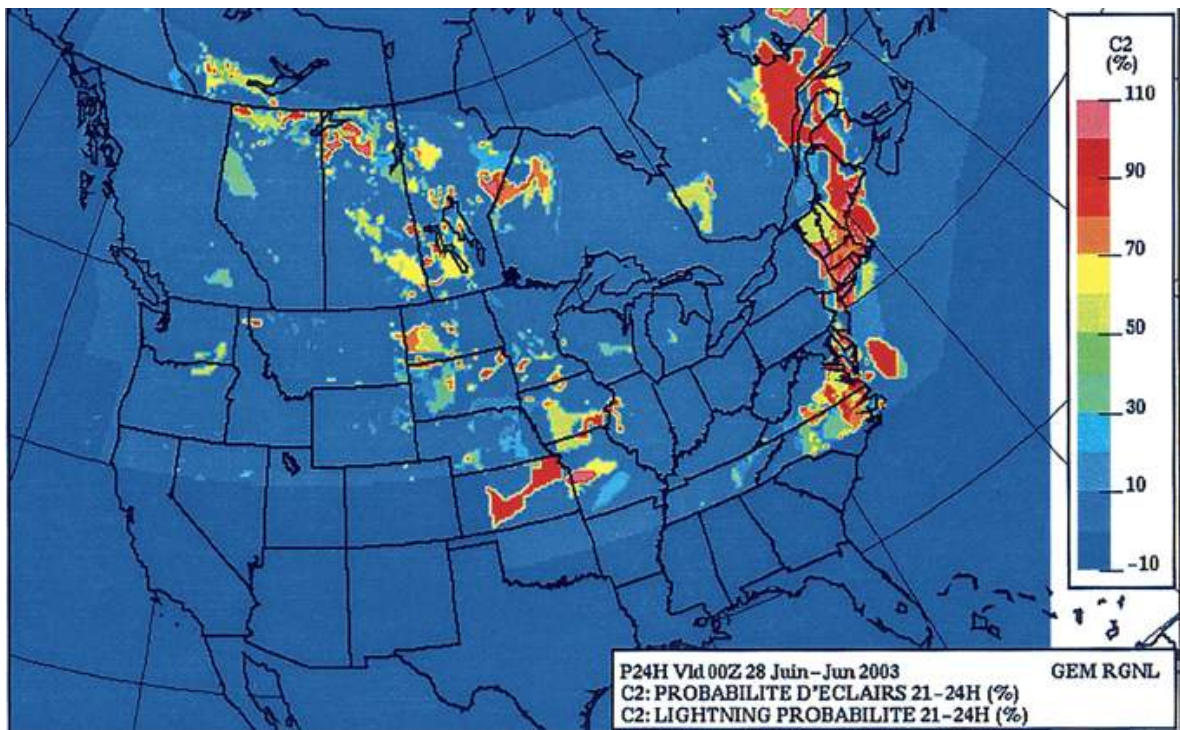


그림 2.3.1.11. 2003년 6월 27일 2100 UTC ~ 6월 28일 0000 UTC 사례에 대하여 북아메리카 영역에서 21~24 시간 낙뢰 예측 모의 결과 (Burrow et al., 2005)

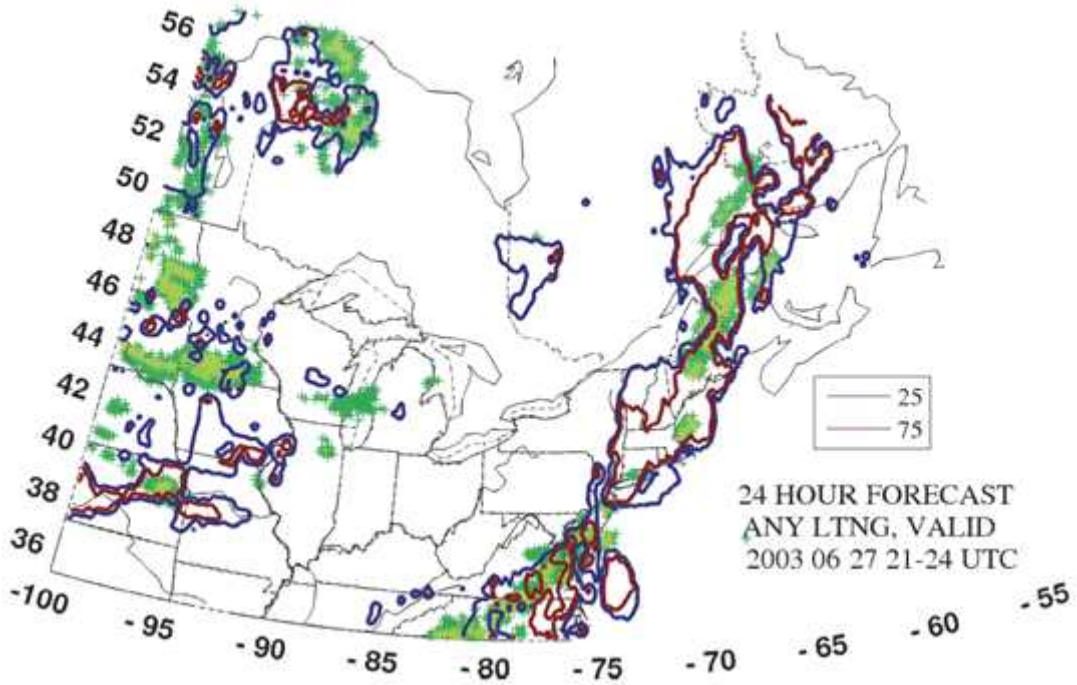


그림 2.3.1.12. 그림 2.3.1.11에서 캐나다와 미국 동부 영역에 대하여 낙뢰 확률 예측 결과(빨강색과 파랑색 등치선)과 실제 관측된 낙뢰 영역(연두색~녹색 영역)의 공간분포 (Burrow et al., 2005)

Mccaul et al.(2009)에서는 WRF 모델을 기반으로 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 고도층에서 상방향(upward) 싸락눈의 플럭스(flux)를 계산하고 이를 낙뢰밀도와 연계하여 분석하였다. 계산식 2.3.1.1은 낙뢰 밀도의 최댓값과 싸락우박 플럭스량(wq_g) 간의 함수식을 나타낸다.

$$F_1 = f[(wq_g)_m] \quad (2.3.1.1)$$

여기서 F_1 는 낙뢰 밀도 최댓값을 의미하며 w 는 연직속도, q_g 는 싸락우박의 혼합비(mixing ratios)를 나타낸다. 그리고 첨자 m 은 혼합상 영역에 해당하는 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 고도층에서 싸락눈의 플럭스를 나타내는 지표이다.

또한 싸락눈, 강설입자, 구름 얼음입자의 연직으로 적분한 얼음함량 정보를 이용하여 낙뢰 밀도간의 관계성을 분석하는 모델을 구성하였다. 계산식 2.3.1.2는 낙뢰 밀도와 얼음함량 플럭스량 간의 함수식을 나타낸다.

$$F_2 = h \left[\int \rho(q_g + q_s + q_i) dz \right] \quad (2.3.1.2)$$

여기서 ρ 는 국지(local) 공기 밀도를 나타내고 q_g , q_s , q_i 는 각각 싸락눈, 강설입자, 구름 얼음입자의 혼합비를 나타낸다.

그림 2.3.1.13은 최대 낙뢰 강도밀도와 WRF 모델에서 모의된 상방향 싸락우박 플럭스량 그리고 얼음함량의 플럭스량 간의 산포도를 각각 나타낸다. 두 그림 모두 최대 낙뢰 강도와 플럭스량이 선형적 관계식을 가지고 있음을 보여주고 있다. 이에 따라 계산식 2.3.1.1과 2.3.1.2는 아래와 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$F_1 = k_1 [(wq_g)_m] \quad (2.3.1.3)$$

$$F_2 = k_2 \int \rho(q_g + q_s + q_i) dz \quad (2.3.1.4)$$

여기서 k_1 과 k_2 는 각각 0.042, 0.2를 각각 나타낸다. 또한 얼음입자의 플럭스량과 낙뢰 최대 밀도는 양의 상관관계를 가지고 있으며 상관계수는 각각 0.67와 0.83으로 각각 나타났다.

그림 2.3.1.14a는 레이더와 낙뢰관측장비(LMA)에서 실제 관측된 낙뢰 확률밀도와 반사도 공간분포를 나타내고 그림 2.3.1.14b는 WRF 모델에서 산출된 낙뢰밀도(계산식 2.3.1.3 사용)와 고도 -15 °C에서의 모의된 반사도 공간분포를 보여준다. 여기서 색 등치선은 낙뢰 확률밀도를 나타내고 회색음영은 관측 또는 모의된 반사도를 의미한다. 관측자료 기반 결과에서 지상반사도가 60 dBZ 인 지점이 존재하였으며 해당 영역에서 낙뢰밀도도 10 % 이상 나타났다. WRF에서 모의된 낙뢰밀도 공간분포는 비록 남쪽 호수 영역에서는 일부 낙뢰가 모의되지 않는 영역이 존재하였지만 전반적으로 지상 관측자료 결과와 유사하게 모의되었다.

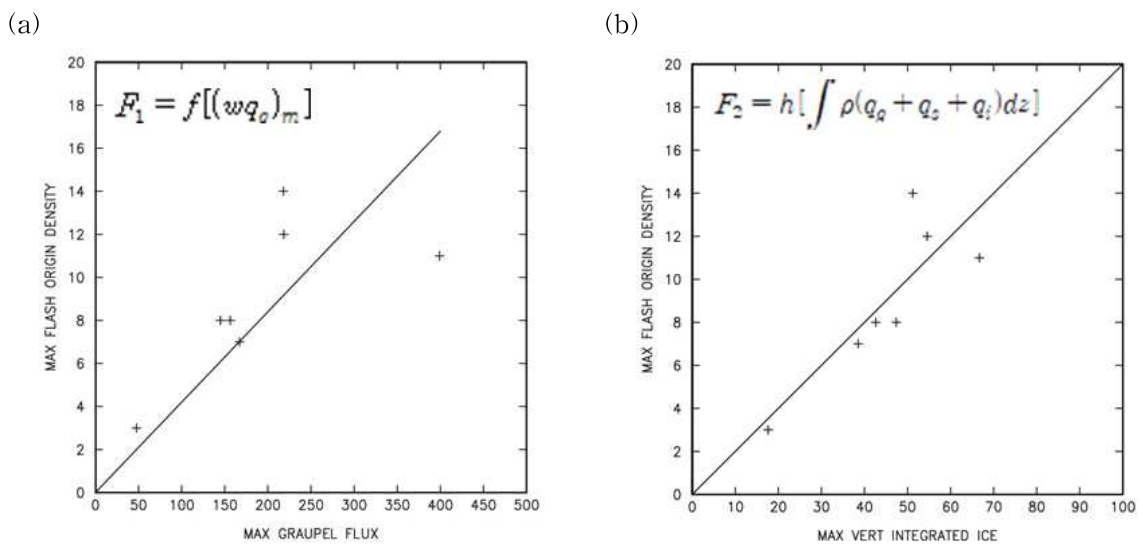
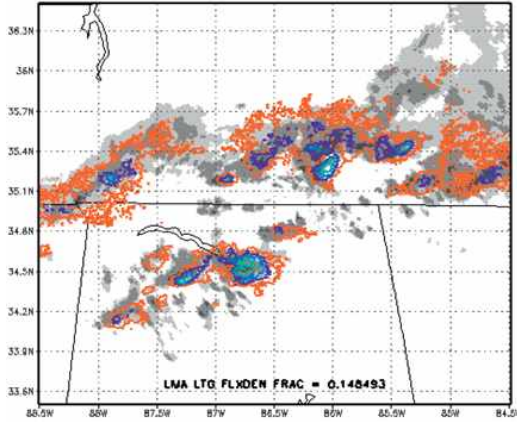


그림 2.3.1.13. (a) 최대 낙뢰(섬광) 강도밀도와 상방향 싸락우박 플럭스량에 대한 보정된 산포도, (b) 최대 낙뢰 강도밀도와 얼음함량 연직 적분성분 간의 보정된 산포도 (McCaul et al., 2009)

(a)



(b)

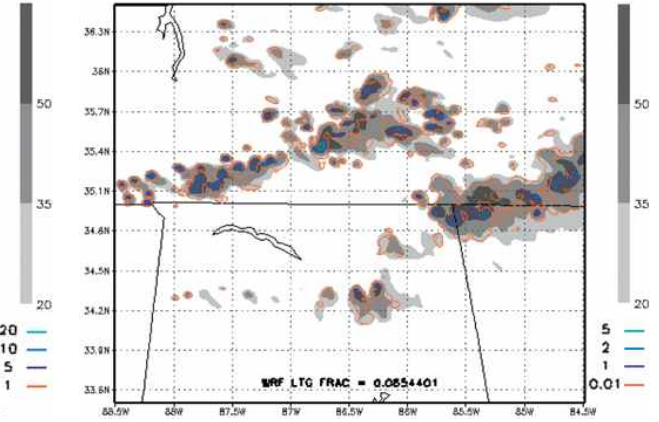


그림 2.3.1.14. 2002년 3월 30일 0400 UTC 강수사례에 대하여 (a) LMA에서 관측된 낙뢰밀도(색 등치선)과 KHTX 레이더에서 관측된 하층 반사도(회색음영)의 공간분포, (b) WRF에서 모의된 낙뢰밀도(색 등치선)과 고도 -15 °C에서의 반사도(회색음영)의 공간분포 (McCaul et al., 2009)

유사한 방법으로 Lynn and Yair (2010)에서는 주요 대전(charging) 인자들의 플럭스로 정의되는 LPI(Lightning Potential Index) 또한 수치모델에서 낙뢰 예측에 많이 활용된다. 계산식 2.3.1.5은 LPI에 대한 정의를 나타낸다.

$$LPI = \frac{1}{V} \iiint \epsilon w^2 dx dy dz \quad (2.3.1.5)$$

여기서 V 는 모델 단위 부피(volume), w 는 연직 바람성분(ms^{-1})을 나타낸다. ϵ 는 상승기류에 대한 규모(scaling) 인자이며 아래와 같이 정의하였다(계산식 2.3.1.6).

$$\epsilon = 2(Q_i Q_l)^{0.5} / (Q_i + Q_l) \quad (2.3.1.6)$$

여기서 Q_l 은 총 액체수질량(total liquid water mass)의 혼합비를 나타내며 Q_i 는 부분 얼음입자의 혼합비로 아래와 같이 정의하였다(계산식 2.3.1.7).

$$Q_i = q_g \left[\left(\frac{(q_s q_g)^{0.5}}{(q_s + q_g)} \right) + \left(\frac{(q_i q_g)^{0.5}}{(q_i + q_g)} \right) \right] \quad (2.3.1.7)$$

그림 2.3.1.15는 이탈리아와 이스라엘에서 발생한 강수사례에 대하여 24시간 누적 낙뢰횟수와 격자점 해상도에 따른 WRF에서 모의된 LPI 분포를 나타낸다. 두 지역 모두 격자점 해상도가 4 km인 LPI에서 실제 낙뢰 발생 횟수와 유사하게 분포하였다.

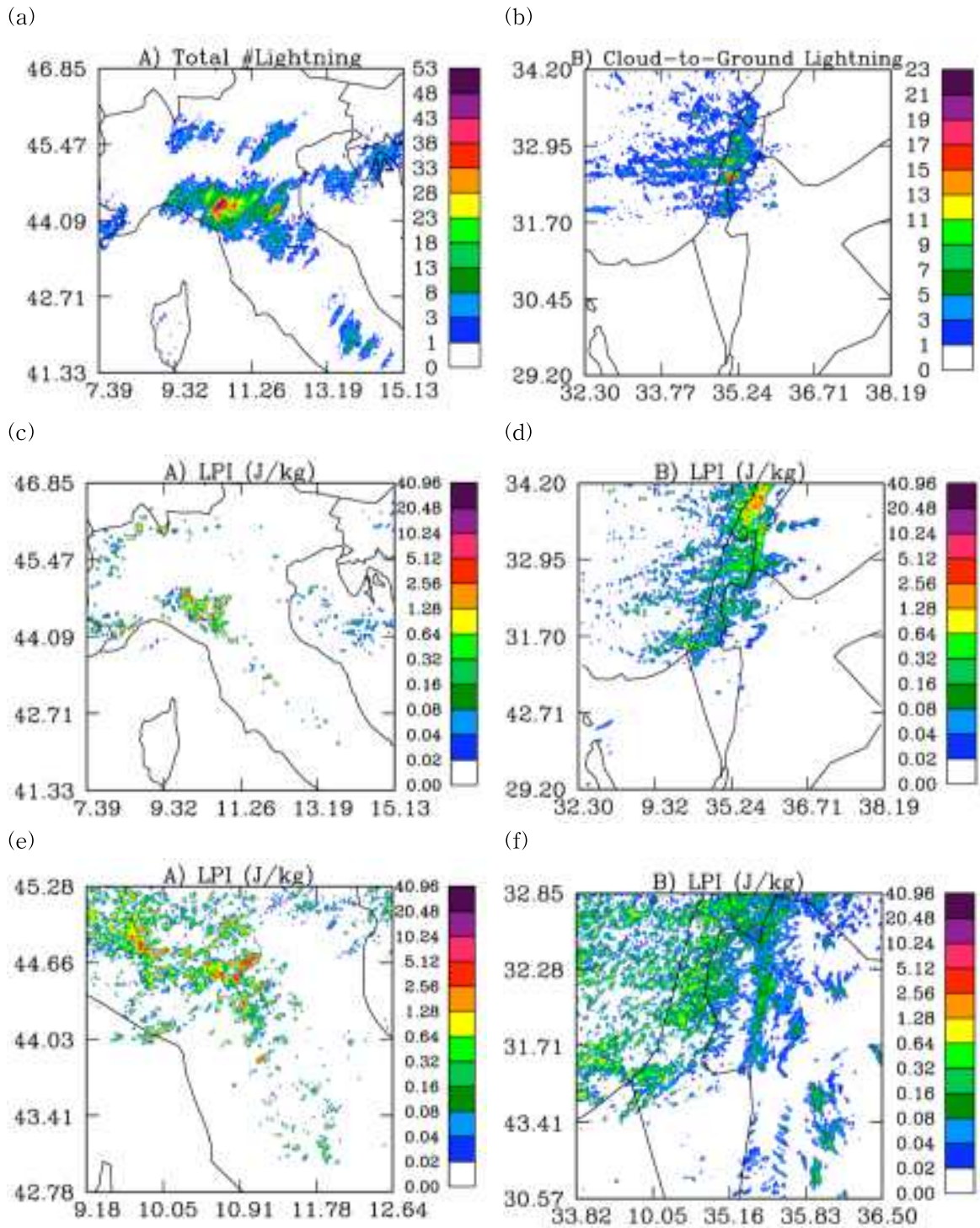


그림 2.3.1.15. 2008년 9월 9일 강수사례(이탈리아)에 대하여 (a) 24시간 누적 낙뢰횟수와 (c) WRF 기반으로 산출된 4 km 격자점 해상도에서의 LPI 와 (e) 1.33 km 격자점 해상도에서의 LPI 그리고 2009년 2월 28일 강수사례(이스라엘)에 대하여 (b) 24시간 누적 낙뢰횟수와 (d) WRF 기반으로 산출된 4 km 격자점 해상도에서의 LPI 와 (f) 1.33 km 격자점 해상도에서의 LPI

3) 한반도 낙뢰 특성

Park (2012)에서는 장기간(2002~2008)의 낙뢰 관측자료를 이용하여 한반도에서 발생하는 낙뢰 공간분포 특성을 조사하였다. 그림 2.3.1.16a는 6년 동안 한반도 영역에서 낙뢰밀도의 공간분포이다. 서해와 남해 그리고 한반도 남서지역 풍상측에서 낙뢰밀도가 상대적으로 높게(5.0 이상) 나타났다. 그림 2.3.1.16b는 한반도 중부지역(위도: 33°N ~ 39°N, 경도 : 121°E ~ 131°E)에서의 Hövmoller 도식도이다. 낙뢰밀도는 6 LST, 16 LST 시간대에 4.0 이상인 첨두값이 존재하였다. 이른 아침에 발생한 낙뢰(오전 낙뢰)는 해양(서해)에서 형성된 구름이 동진하는 동안 발달하면서 낙뢰를 유발한 것으로 보인다. 반면 오후 낙뢰는 한반도 내륙지역에서 집중적으로 분포하였다. 이는 지표면 가열에 의한 적운형 구름들이 급격하게 발달하면서 낙뢰가 발생한 것으로 분석된다.

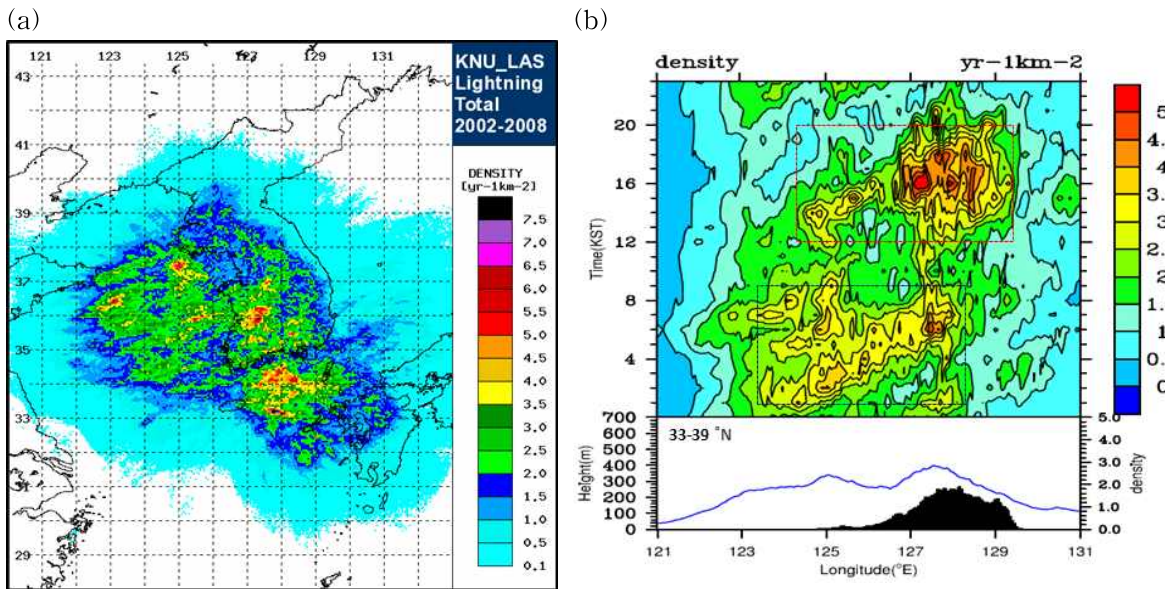


그림 2.3.1.16. 2002 ~ 2008년간 한반도에서 발생한 (a) 낙뢰밀도 공간분포와 (b) 한반도 중부지역에서의 Hövmoller 도식도 (Park, 2012).

(2) 관측자료/분석장을 이용한 낙뢰 특성인자 산출 및 분석

1) 레이더 기반 특성인자

낙뢰 및 비낙뢰 영역에 대한 기상레이더 관측자료의 특성을 알아보기 위해 3차원 레이더 관측자료와 퍼지로지직 기반의 뇌우판별 및 추적 알고리즘(Fuzzy logic Algorithm for Storm Tracking, FAST)을 활용하였다. FAST는 3차원 레이더 반사도를 사용하여 뇌우 영역을 판별하고 퍼지로지직으로 뇌우를 추적하는 방법이다(Jung and Lee, 2015). 본 연구에서는 FAST 기법을 사용하여 뇌우 영역을 판별하고 낙뢰와 비낙뢰에 대한 관측변수의 빈도분포를 산출하고 분석하였다. 분석에 사용된 특성변수는 레이더 반사도(Reflectivity, Z), 차등반사도(Differential reflectivity, Z_{DR}), 비차등위상차(Specific differential phase, K_{DP}), 교차상관계수(Cross correlation coefficient, ρ_{HV})이고, 레이더 반사도와 계산식 (2.3.1.8)을 이용한 연직액체수함량(Ve rtical integrated liquid water content, VIL)이 함께 사용되었다.

$$VIL(kg/m^2) = 3.44 \times 10^{-6} \int_{h_b}^{h_t} Z_e^{4/7} dh \quad (2.3.1.8)$$

여기서 Z_e 와 dh 는 레이더 반사도 인자(mm^6m^{-3})와 연직해상도(m)이고, h_b 과 h_t 는 각각 연직으로 적분하고자 하는 최저 및 최고 높이를 의미한다.

낙뢰 발생지점을 중심으로 반경에 따른 특성 변수별 빈도분포를 산출하기 위해 그림 2.3.1.17의 모식도와 같이 낙뢰반경을 적용하였다. 즉, FAST로 판별된 뇌우 영역에서 임의 낙뢰반경에 포함되는 모든 격자점의 자료를 빈도분포 산출에 사용하였다. 그림 2.3.1.18는 2020년 8월 2일 15:00 KST 시간의 낙뢰발생 위치, FAST 뇌우탐지, VIL 산출 결과이다. 경기만과 태안반도를 중심으로 낙뢰가 발생했고 FAST에서 이 영역으로 뇌우가 탐지되었다. 또한 낙뢰가 발생한 위치를 따라서 VIL이 상대적으로 크게 산출되었다.

그림 2.3.1.19은 같은 시간의 레이더 관측변수를 나타낸 것이다. 이때 3차원 자료의 각 연직기둥(column)에서 레이더 반사도가 가장 큰 값을 가지는 고도의 자료를 2차원으로 투영시켜 생성하였다.

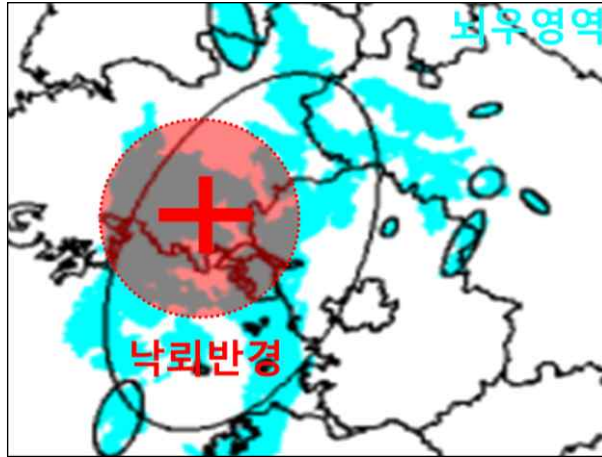
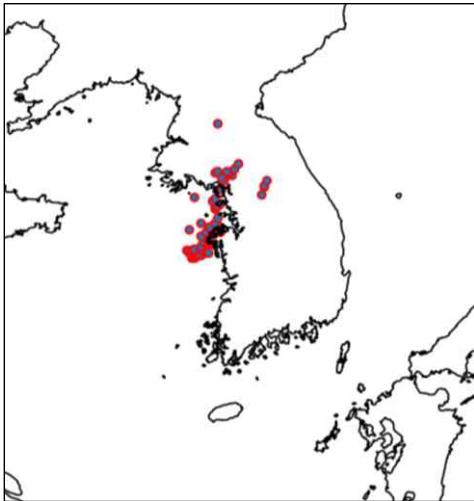
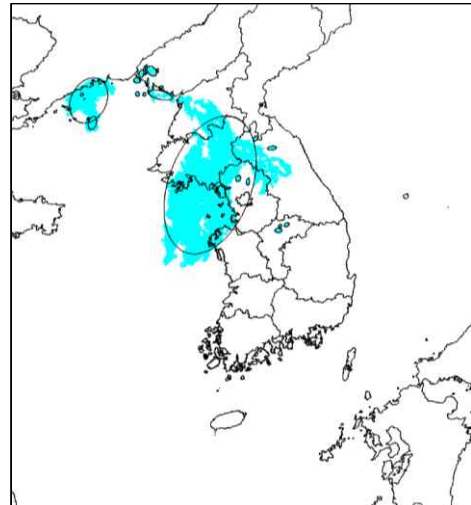


그림 2.3.1.17. FAST 뇌우 영역 판별 및 낙뢰반경 모식도

(a) Lightning



(b) Storm identify



(c) VIL

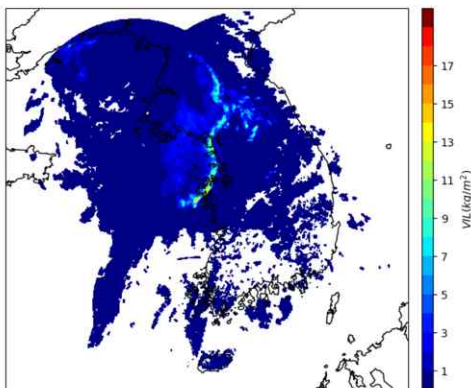
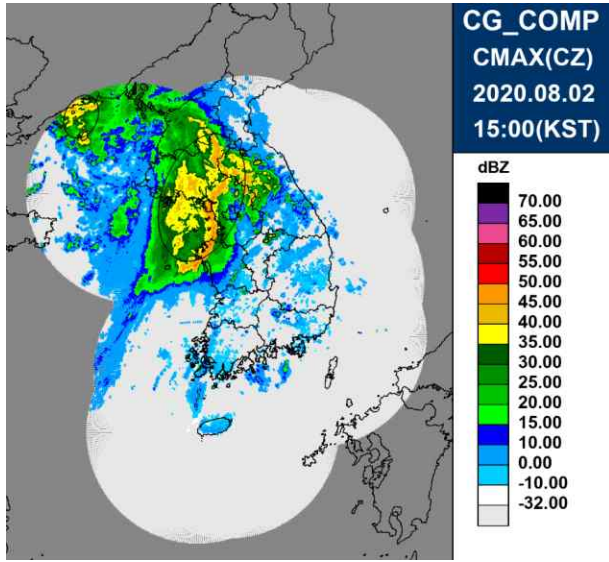
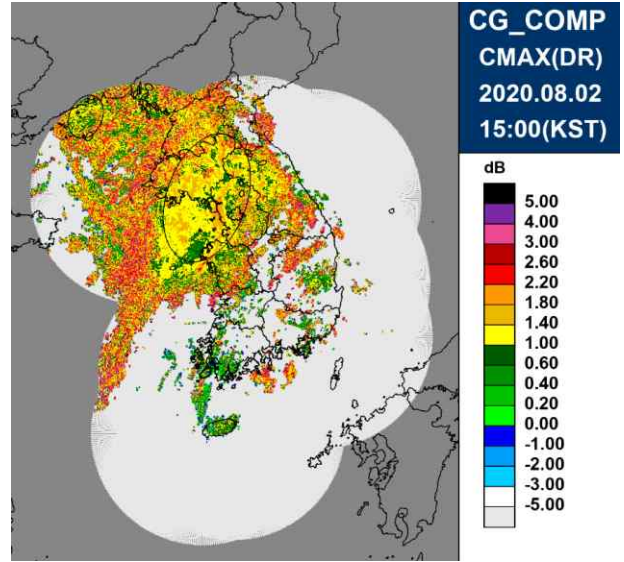


그림 2.3.1.18 2020년 8월 2일 15:00(KST)의 낙뢰, 뇌우 판별영역, VIL 산출 결과

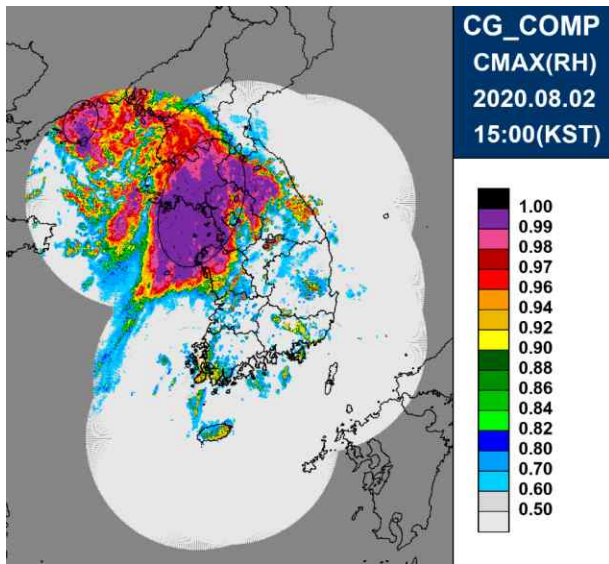
(a) Reflectivity



(b) Differential reflectivity



(c) Cross correlation coefficient



(d) Specific differential phase

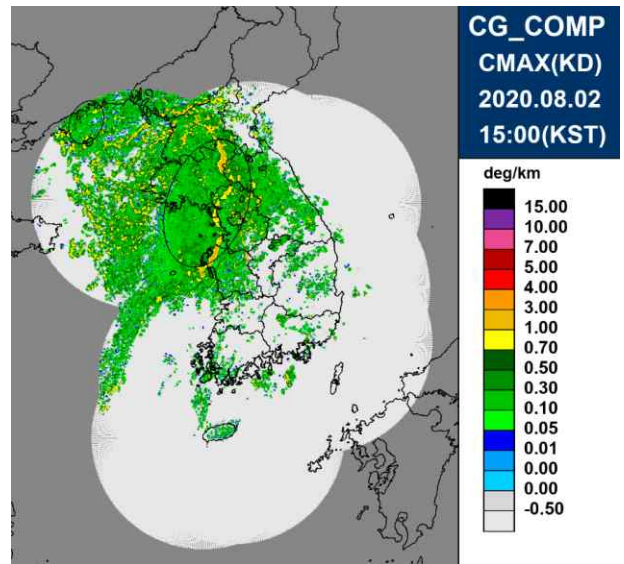


그림 2.3.1.19. 2020년 8월 2일 15:00(KST)의 낙뢰사례에 대한 레이더 관측변수

마찬가지로 낙뢰가 발생한 위치에서 주변보다 상대적으로 반사도가 높고 차등반사도와 비차등위상차 또한 주변보다 높은 것을 볼 수 있다. 이것은 강수입자의 직경이 크고 단위 시간당 강수량 또한 클 것으로 보인다. 해당 영역의 교차상관계수는 대부분 0.99 이상의 큰 값으로 관측되었는데 강수입자가 비교적 균질한 것을 알 수 있다.

2) 위성기반 특성인자

GK2A 위성은 한반도 및 동아시아 영역을 고분해능의 시공간 해상도로 관측을 수행하며 G OES-12와 비슷한 채널 영역의 산출물을 생산한다. 이에 따라 본 연구에서는 GK2A의 채널자료를 이용하여 Harris et al. (2010)에서 낙뢰 전조탐지에 사용된 변수들을 산출하여 낙뢰와 비 낙뢰 영역에서의 특성을 조사하였다. 이때 사용한 채널자료는 근적외 채널(3.8 μm)과 수증기 채널(6.7 μm) 그리고 적외 채널 2개(10.5 μm , 13.3 μm)으로 구성하였으며 총 10종의 특성인자를 산출하였다. 산출된 위성 특성인자 종류를 아래에 정리하였다.

- 3.8 μm reflectance (Ref_38), T_B 10.5 μm
- BTD(3.8 μm , 10.5 μm), BTD(6.7 μm , 10.5 μm), BTD(13.3 μm , 10.5 μm)
- 3.8 μm reflectance trend (Δ Ref_38), 10.5 μm T_B trend (Δ T_B 10.5 μm)
- BTD(3.8 μm , 10.5 μm) 10 min. trend (Δ BTD(3.8 μm , 10.5 μm))
- BTD(6.7 μm , 10.5 μm) 10 min. trend (Δ BTD(6.7 μm , 10.5 μm))
- BTD(13.3 μm , 10.5 μm) 10 min. trend (Δ BTD(13.3 μm , 10.5 μm))

위성 특성인자 중에서 Ref_38는 다음과 같이 정의하였다.

$$Ref_{38} = \frac{R_{3.8\mu\text{m}} - B_{3.8\mu\text{m}}(T_{B, 10.5\mu\text{m}})}{S_{3.8\mu\text{m}}(r, \xi) - B_{3.8\mu\text{m}}(T_{B, 10.5\mu\text{m}})} \quad (2.3.1.9)$$

여기서 $R_{3.8\mu\text{m}}$ 은 3.8 μm 채널의 radiance로 GK2A 위성 관측자료에서 직접 획득하였으며 아래와 같이 정의하였다.

$$R_{3.8\mu\text{m}} = Ref_{3.8\mu\text{m}} - e_{3.8\mu\text{m}} R_{emit\ 3.8\mu\text{m}}(T) \quad (2.3.1.10)$$

태양 플럭스(solar flux) $S_{3.8\mu\text{m}}$ 은 아래식을 이용하여 계산하였다.

$$S_{3.8\mu\text{m}} = [R_{emit\ 3.8\mu\text{m}}(T_{sun})] \left(\frac{R_{sun}}{r_E} \right)^2 \cos \xi \quad (2.3.1.11)$$

여기서 T_{sun} 은 태양 표면온도(5800 K)이고, R_{sun} 태양 반경(6.96×10^8 km)이며 r_E 은 지구궤도 반지름(1.496×10^{11} km), ξ 는 태양 천정각을 나타낸다. 그리고 $R_{emit\ 3.8\mu\text{m}}(T_{sun})$ 은 다음과 같이 정의하였다.

$$R_{emit\ 3.8\mu\text{m}}(T_{sun}) = \frac{fk_{1\ 3.9\mu\text{m}}}{\exp\left(\frac{fk_{2\ 3.9\mu\text{m}}}{bc_{1\ 3.9\mu\text{m}} + (bc_{2\ 3.9\mu\text{m}} T_{sun})}\right) - 1} \quad (2.3.1.12)$$

여기서 $fk_{1.3.9\mu m}$ 와 $fk_{2.3.9\mu m}$ 은 각각 0.20096×10^{-6} , 0.39602×10^{-6} 이며 $bc_{1.3.9\mu m}$ 와 $bc_{2.3.9\mu m}$ 은 각각 0.69703, 0.99902로 나타낸다(CMISS/SSEC, cited 2010). 마지막으로 방출 $3.9 \mu m$ 플랑크 흑체 복사(the $3.9\text{-}\mu m$ emitted Plack blackbody radiance)인 $B_{3.8\mu m}(T_{B\ 10.5\mu m})$ 은 다음과 같이 계산하였다.

$$B_{3.8\mu m}(T_{B\ 10.5\mu m}) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_{B\ 10.5\mu m}}\right) - 1} \quad (2.3.1.13)$$

여기서 c_1 과 c_2 는 각각 $1.19104 \times 10^{-16} \text{ Wm}^{-2}(\text{str})^{-1}$, 0.01438769 mK 이며 λ 는 $3.8 \times 10^{-6} \mu m$ 이다. 그리고 $T_{B10.5\mu m}$ 는 지구 적외채널 휘도온도로 GK2A 위성 관측자료에서 직접 얻을 수 있다.

그림 2.3.1.20은 위성 특성인자 중 Ref_38과 $T_B\ 10.5 \mu m$, ΔRef_{38} , $\Delta T_B\ 10.5 \mu m$ 의 공간분포를 나타낸다. 강수사례는 2020년 6월 28일 06:00 UTC이며 검은점은 낙뢰가 발생한 지점을 의미한다. Ref_38과 $T_B\ 10.5 \mu m$ 모두 주변보다 낮은 영역에서 낙뢰가 집중분포하고 있음을 보여준다. 하지만 경향을 나타내는 특성인자에서는 낙뢰에 대한 뚜렷한 특성을 반영하지 못했다.

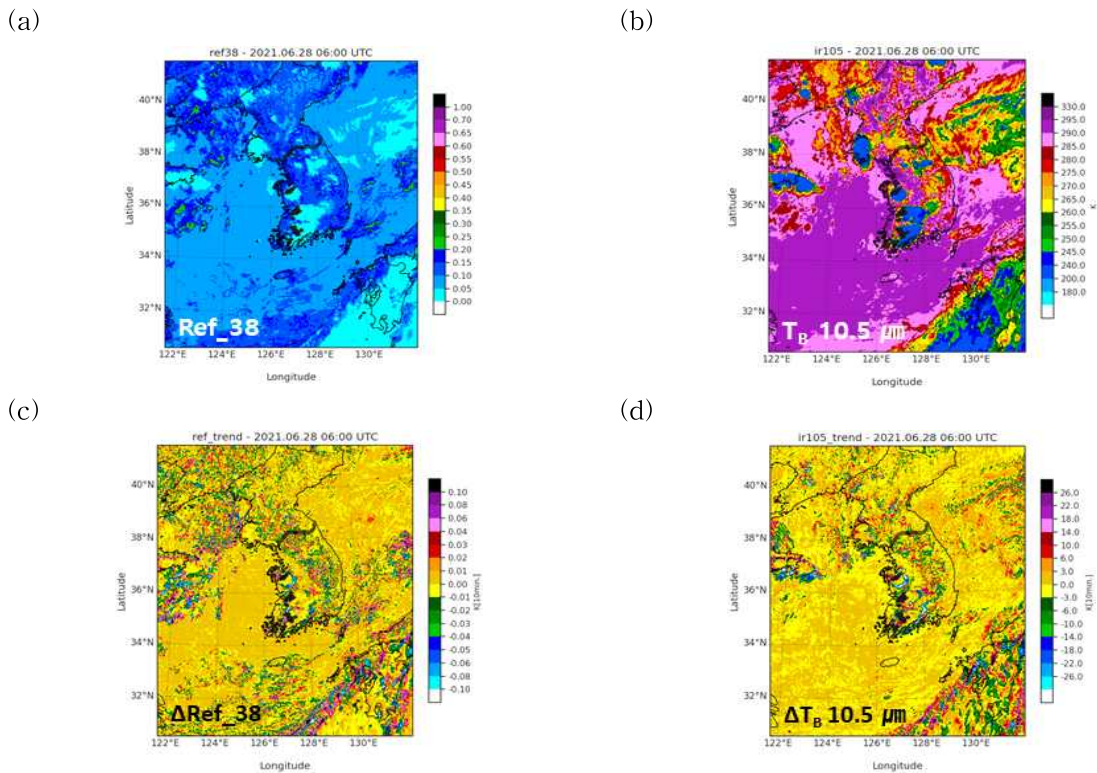


그림 2.3.1.20. 위성기반 낙뢰 특성인자인 (a) Ref_38, (b) $T_B\ 10.5 \mu m$, (c) ΔRef_{38} , (d) $\Delta T_B\ 10.5 \mu m$ 의 공간분포 예시. 검은점은 낙뢰가 발생한 지점을 나타냄.

그림 2.3.1.21은 위성 특성인자 중 BTD와 BTD의 경향성에 대한 공간분포를 나타낸다. 모든 BTD 분포에서 낙뢰는 주변 지역보다 상대적으로 높은 영역에서 집중분포하였다. 그리고 BTD의 경향에서는 낙뢰지점에 대하여 뚜렷한 특성을 보여주지는 못했다. 결론적으로 한반도 영역에서 발생한 낙뢰에 대하여 경향성을 나타내는 특성인자에 대해서는 낙뢰 특성 분석이 어려운 한계점이 있지만 Ref_38과 T_B 10.5 μm , BTD 인자는 낙뢰 특성 분석에 유용하게 활용할 수 있음을 보여준다.

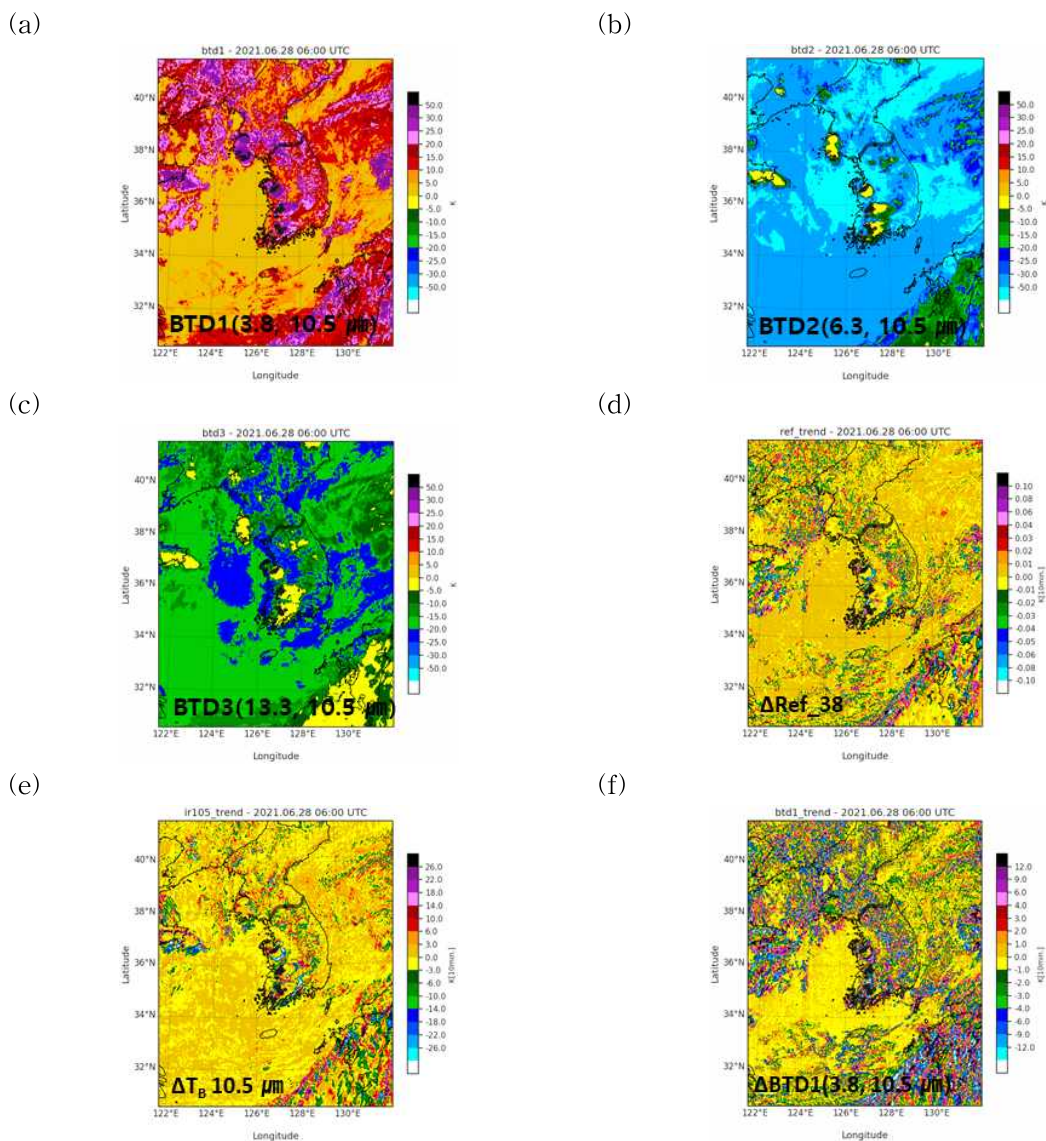


그림 2.3.1.21. 위성기반 낙뢰 특성인자인 (a) BTD(3.8 μm , 10.5 μm), (b) BTD(6.7 μm , 10.5 μm), (c) BTD(13.3 μm , 10.5 μm), (d) Δ BTD(3.8 μm , 10.5 μm), (e) Δ BTD(6.7 μm , 10.5 μm), (f) Δ BTD(13.3 μm , 10.5 μm)의 공간분포 예시. 검은점은 낙뢰가 발생한 지점을 나타냄.

3) 수치모델 기반 특성인자

KLAPS 수치모델을 활용한 낙뢰 예측기법 개발을 위해 표 2.3.1.3과 같이 특성변수를 정의하고 그림 2.3.1.22의 절차대로 특성변수를 산출하였다. 낙뢰예측을 위한 주요 특성변수인 PRI (Price and Rind lightning function)와 SI(Storm severity index)는 각각 식 (2.3.1.14)와 식 (2.3.1.15)를 적용하였다(Price and Rind, 1992; Turcotte and Vigneux, 1987).

$$PRI = \begin{cases} 3.44 \times 10^{-5} H^{4.9} & \text{(for continental flash)} \\ 6.40 \times 10^{-4} H^{1.73} & \text{(for marine flash)} \end{cases} \quad (2.3.1.14)$$

$$SI = 100 \times [2 + (0.276 \times \ln(SHR)) + (2.011 \times 10^{-4} CAPE)] \quad (2.3.1.15)$$

CAPE: Convective available potential energy	PRI: Price and Rind lightning function
CIN: Convective Inhibition	GZ1000: Geopotential height at 1000hPa
TSRH: Total storm relative helicity	GZ500: Geopotential height at 500hPa
THW: Maximum wet bulb temperature	DZ1: Thickness of layers: 500–1000hPa
SHO: Showalter Index	DZ2: Thickness of layers: 850–1000hPa
LI: Lifted index	DZ3: Thickness of layers: 700–850hPa
SWEAT: Severe Weather Threat Index	DZ4: Thickness of layers: 700–1000hPa
SI: Storm severity index	PW: Precipitable water in the troposphere
MSLP: Mean sea level pressure	PWU: Precipitable water in the upper troposphere (700–400hPa)
TDsfc: Dewpoint temperature at surface	SHR: Mean vertical wind shear (surface~12,000ft)
TD850: Dewpoint temperature at 850hPa	TTI: Total totals index
TD700: Dewpoint temperature at 700hPa	CTT: Cloud top temperature
TT700: Temperature at 700hPa	CTH: Cloud top height
TT500: Temperature at 500hPa	CTP: Cloud top pressure
TROZ: Tropopause height	DZ0TRO: Thickness of layer (0°C level to tropopause)
TROP: Tropopause pressure	DZ0CT: Thickness of layer (0°C level to CTH)
TROT: Tropopause temperature	W700: Vertical motion at 700hPa

표 2.3.1.3. KLAPS 기반의 특성변수 목록(Burrows et al. 2005)

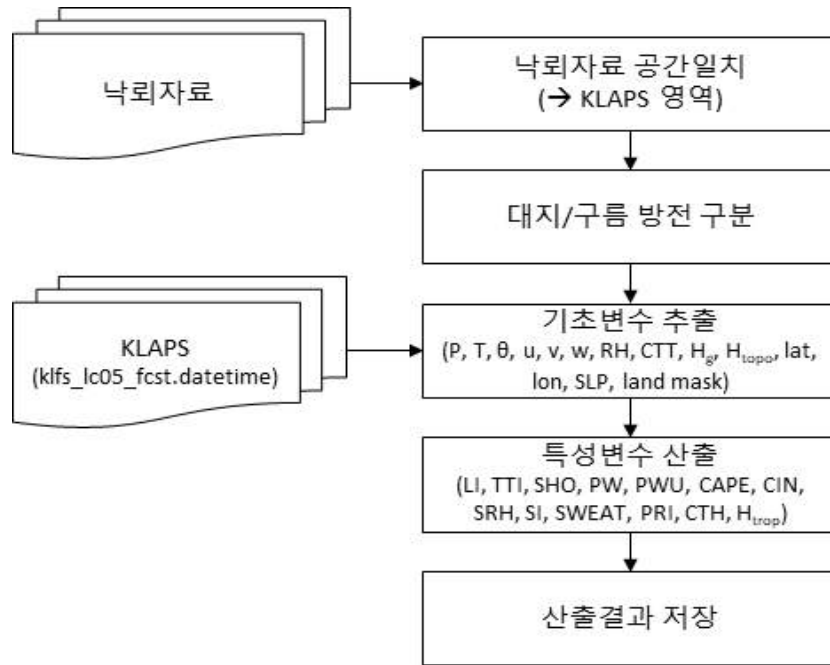


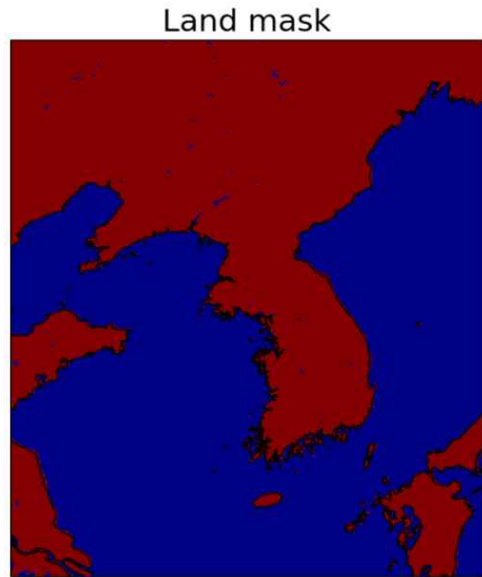
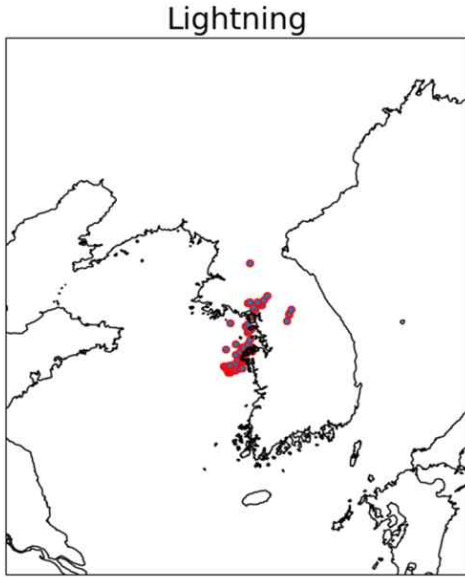
그림 2.3.1.22 KLAPS 기반 특성변수 산출 흐름도

PRI 지수는 지면 상태에 따라 육지와 해양에 대한 산출식이 다른 것을 볼 수 있다. 여기서 H 는 구름꼭대기 높이(km)를 적용하였다. SI는 SHR과 CAPE를 사용하여 산출하였다. SHR은 지면에서 12,000 ft (약 3.6 km)까지의 평균 연직바람시어를 의미하고 CAPE는 대류가용잠재에너지(Convective available potential energy)를 의미한다.

그림 2.3.1.23은 2020년 8월 2일 15:00 KST 시간에 대한 낙뢰발생 위치와 KLAPS 기반의 PRI 지수 생성 결과와 PRI 산출에 사용된 구름꼭대기고도, 육지/해양 구분 마스크를 함께 나타낸 것이다. 낙뢰가 발생한 위치의 구름꼭대기 높이가 10 km 이상으로 매우 높은 것을 볼 수 있다. 낙뢰가 발생했던 수도권을 중심으로 20 이상의 큰 값으로 PRI 지수가 산출되었다. 그렇지만 경기만과 태안반도 사이는 구름꼭대기 높이는 매우 높지만, PRI는 매우 작게 산출되는 것을 볼 수 있다. PRI를 이용한 해양에 대한 낙뢰 발생 가능성을 예측하는 데에는 한계가 있을 것으로 보인다. 동일 사례에 대한 SI 지수 산출 결과와 중간 산출물인 SHR 및 CAPE는 그림 2.3.1.24와 같다. 낙뢰가 발생한 영역의 SHR이 주변에 비해 상대적으로 높게 산출되었다. 이와는 반대로 CAPE는 낙뢰발생 영역이 그렇지 않은 영역보다 작게 산출되었다. 따라서 SI 또한 낙뢰발생 영역이 주변보다 작게 산출되는 것을 볼 수 있다.

(a) Lightning

(b) Land sea mask



(c) Cloud top height

(d) PRI

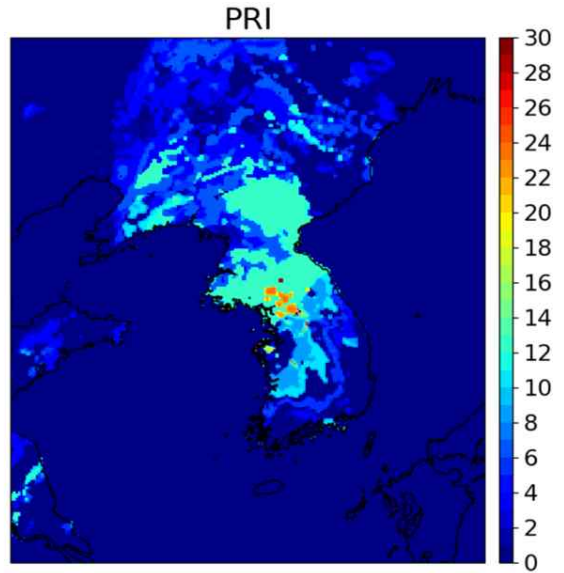
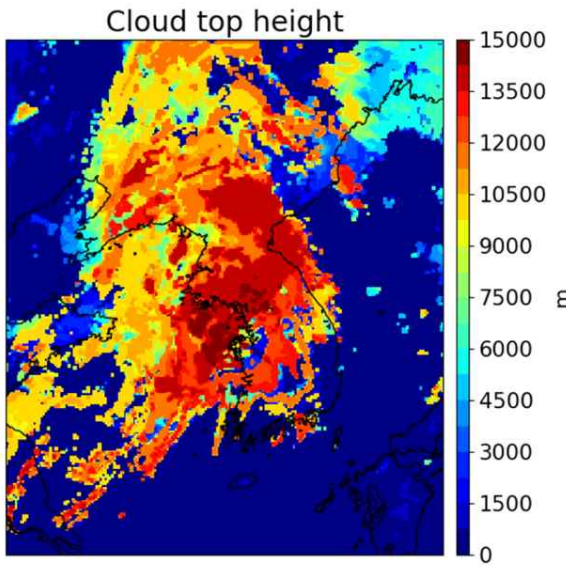
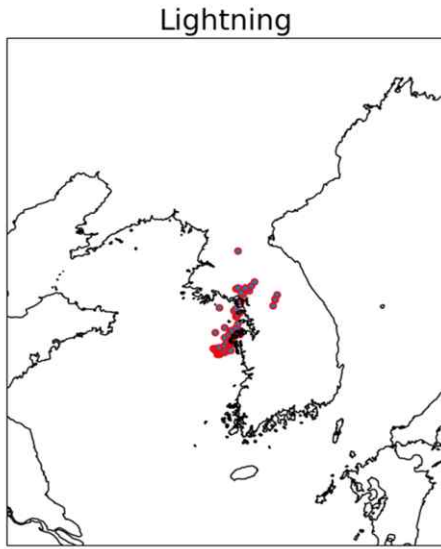
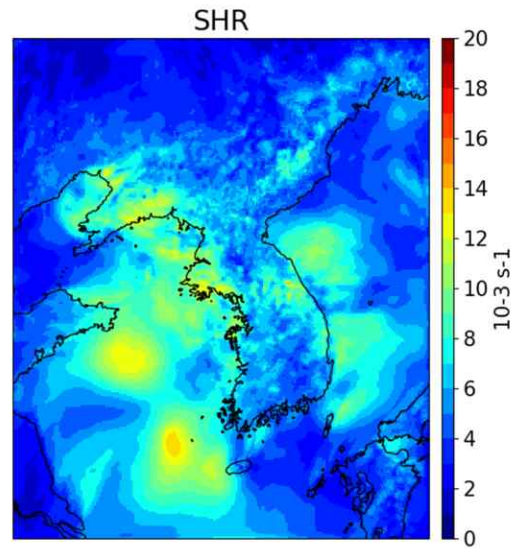


그림 2.3.1.23 2020년 8월 2일 15:00(KST)의 낙뢰사례에 대한 PRI 산출결과

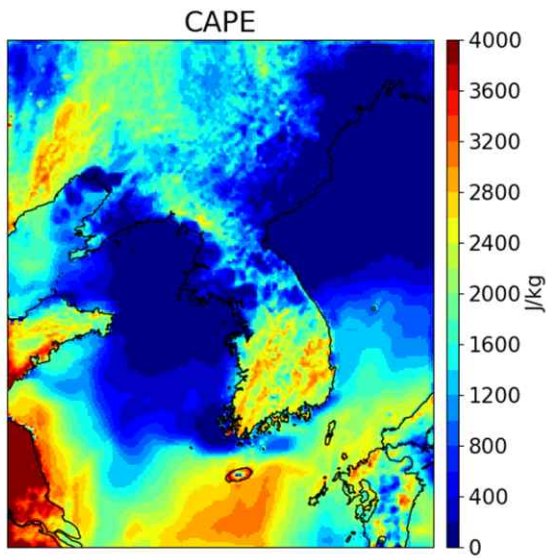
(a) Lightning



(b) SHR



(c) CAPE



(d) SI

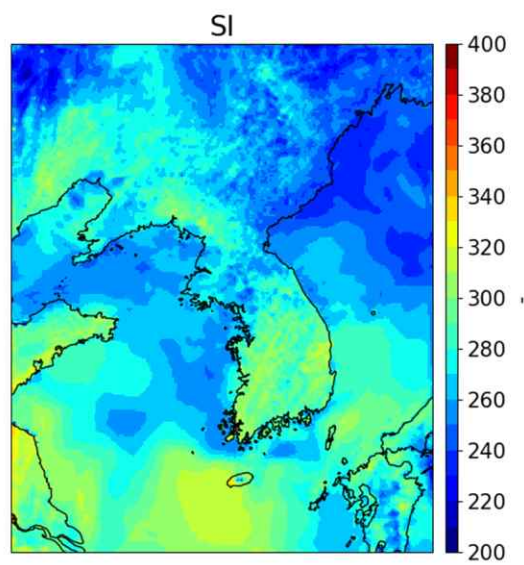


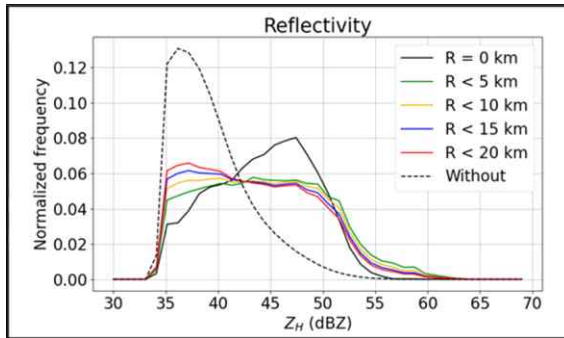
그림 2.3.1.24 2020년 8월 2일 15:00(KST)의 낙뢰사례에 대한 SI 산출결과

2.3.2. 통계적 낙뢰 예측기법 개발

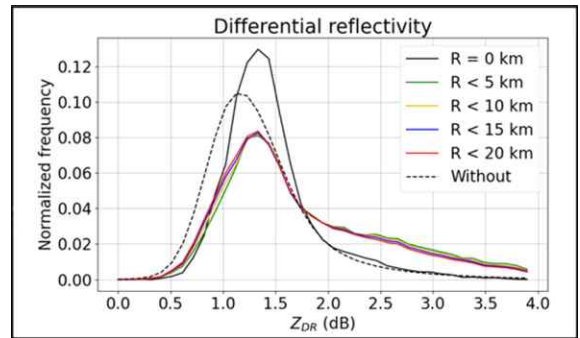
(1) 낙뢰/비낙뢰 시 특성인자 통계분석을 통한 낙뢰 예측인자 가능성 진단

1) 레이더 기반 특성인자

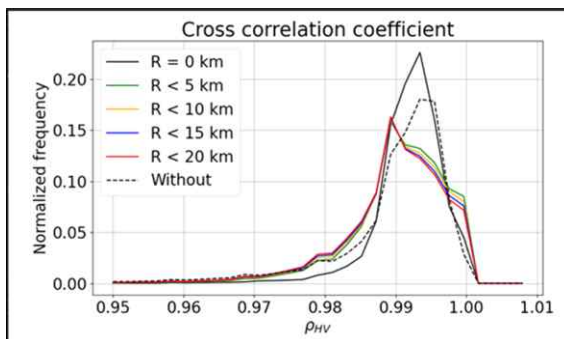
(a) Reflectivity



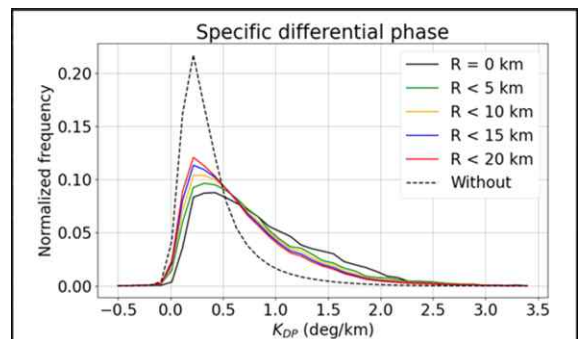
(b) Differential reflectivity



(c) Cross correlation coefficient



(d) Specific differential phase



(e) VIL

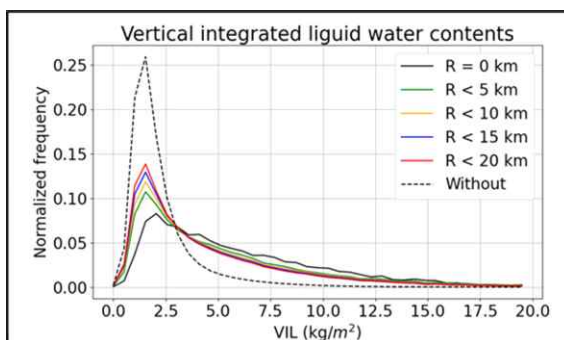


그림 2.3.2.1 반경에 따른 낙뢰(실선) 및 비낙뢰(점선) 영역의 레이더 관측변수 빈도분포

그림 2.3.2.1은 2020년 6, 7, 8월 낙뢰가 발생한 사례에 대한 낙뢰반경에 따른 레이더 기반 특성변수의 정규빈도분포이다. 낙뢰가 동반된 영역은 그렇지 않은 영역에 비해 상대적으로 강한 반사도에서 빈도가 높은 것으로 분석되었다. 이러한 빈도는 낙뢰반경이 커질수록 낮은 반사도 구간의 빈도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 차등반사도 또한 마찬가지로 낙뢰 영역에서

값이 큰 구간에서 빈도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 교차상관계수는 낙뢰 발생과 관계없이 대부분 0.95 이상의 큰 값을 가지고, 낙뢰반경이 클수록 비교적 넓은 분포를 보인다. 비차등위상차는 반사도와 유사하게 낙뢰가 발생한 영역에서 큰 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 낙뢰가 발생하지 않은 영역에서는 대부분 0.0 ~ 0.5 deg/km의 값을 가진다. 낙뢰가 없는 영역은 대체로 강수입자의 크기가 작다는 것을 알 수 있다. VIL은 비차등위상차와 매우 유사한 분포를 가진다. 즉 낙뢰가 발생한 영역은 대체로 강수량이 많고 낙하하는 강수입자의 크기 또한 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다.

그림 2.3.2.2와 그림 2.3.2.3은 2020년 6, 7, 8월 사례에 대한 낙뢰(With) 및 비낙뢰(Without) 영역의 레이더 기반 특성변수 정규빈도분포이다. 여기서 CMAX Z는 각 영역에서 연직으로 가장 큰 반사도 값을 의미하고, VIL은 앞선 분석과 마찬가지로 연직액체수함량을 의미한다. UVIL은 상층 연직액체수함량을 나타내는데, 고도 6km 이상의 VIL로 정의된다. Echo top height (ETH)는 각 영역에서 반사도가 35 dBZ 이상인 최대 고도를 나타내고, CAPPI(Constant Altitude Plan Position Indicator)는 특정 고도층의 수평단면을 의미한다.

CMAX Z를 보면 낙뢰가 발생한 영역의 연직 최대 반사도가 낙뢰가 발생하지 않은 영역보다 더 큰 것을 볼 수 있다. VIL과 UVIL 또한 낙뢰가 발생했을 때 더 큰 것으로 나타났다. 이것은 낙뢰가 발생했을 때 반사도가 더 크게 관측되었기 때문으로 분석된다. 강수시스템이 발달한 최대고도를 의미하는 ETH는 낙뢰가 발생한 영역은 약 6km 이상의 고도 범위에서 더 많은 빈도를 차지하였다. 낙뢰가 발생하지 않은 영역의 ETH는 약 5km에서 최대빈도를 보인다. 본 연구에 사용된 3차원 레이더 관측자료의 최대 관측고도가 10km 이기 때문에 10km 이상으로 발달한 강수시스템은 반영할 수 없다는 한계가 있다. 임의고도(3, 5, 8km) CAPPI에 대한 레이더 변수별 빈도분포를 살펴보면, 상층으로 갈수록 반사도의 최대치가 작아지는 것을 볼 수 있으며, 전체적으로 낙뢰와 비낙뢰 영역에 대한 구분이 잘 되는 것을 볼 수 있다. 고도가 낮아질수록 반사도는 강해지고 분포의 폭이 좁아지는 것을 볼 수 있다. 5km 고도에서 차등반사도는 상대적으로 구분이 어렵고 8km 고도에서는 낙뢰 영역에서 최대빈도의 값이 작고 분포 폭 또한 좁은 것을 볼 수 있다. 3km에서 낙뢰에 대한 차등반사도는 비낙뢰에 비해 큰 값에 빈도가 더 많은 것으로 나타났다. 이것은 하층에서 강수입자의 성장에 따른 효과로 해석할 수 있다. 마찬가지로 상층에서 하층으로 갈수록 낙뢰 영역의 비차등위상차 값이 증가하는 것을 볼 수 있다.

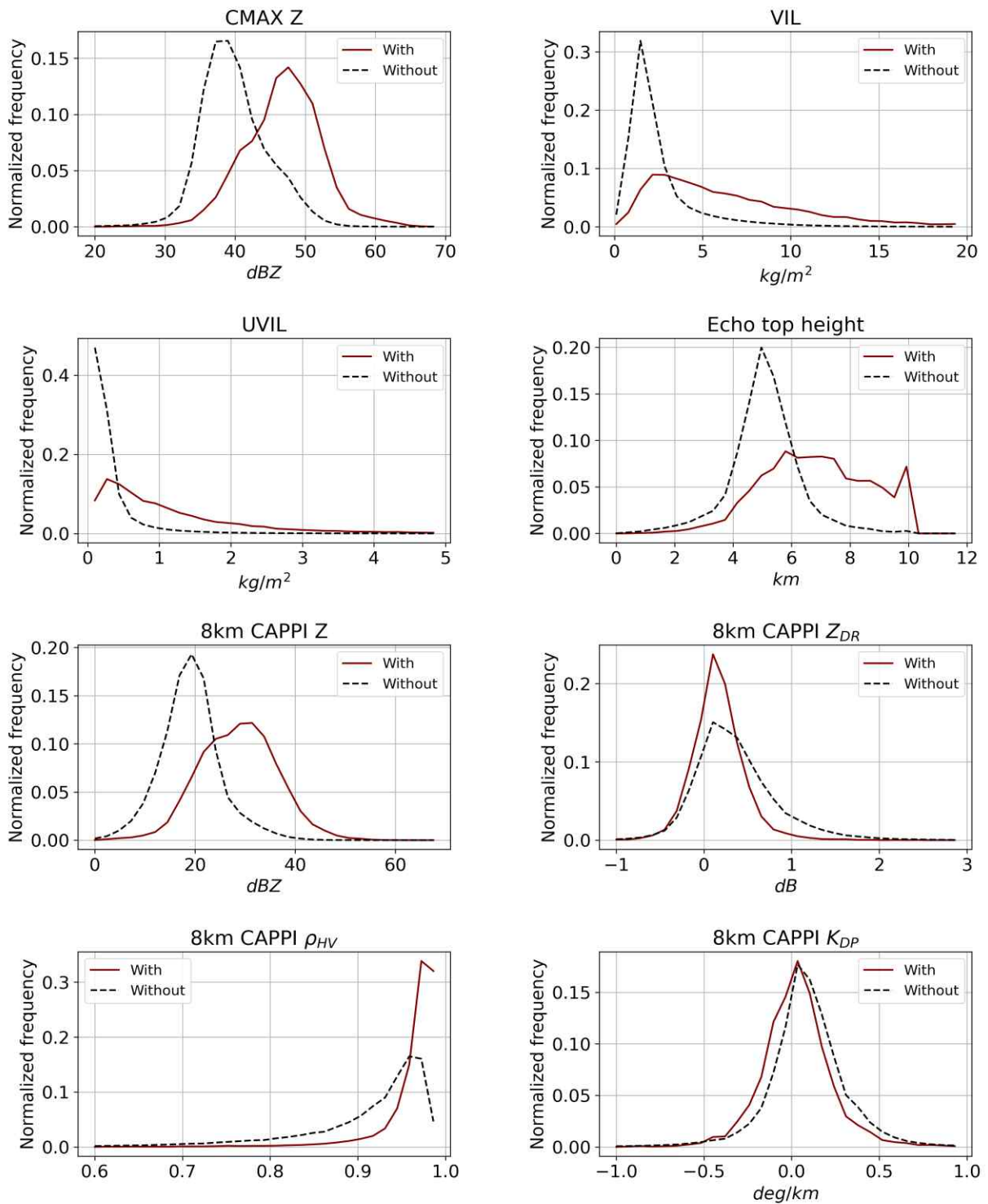


그림 2.3.2.2 낙뢰(With) 및 비낙뢰(Without) 영역에 대한 레이더 기반 특성변수의 빈도분포

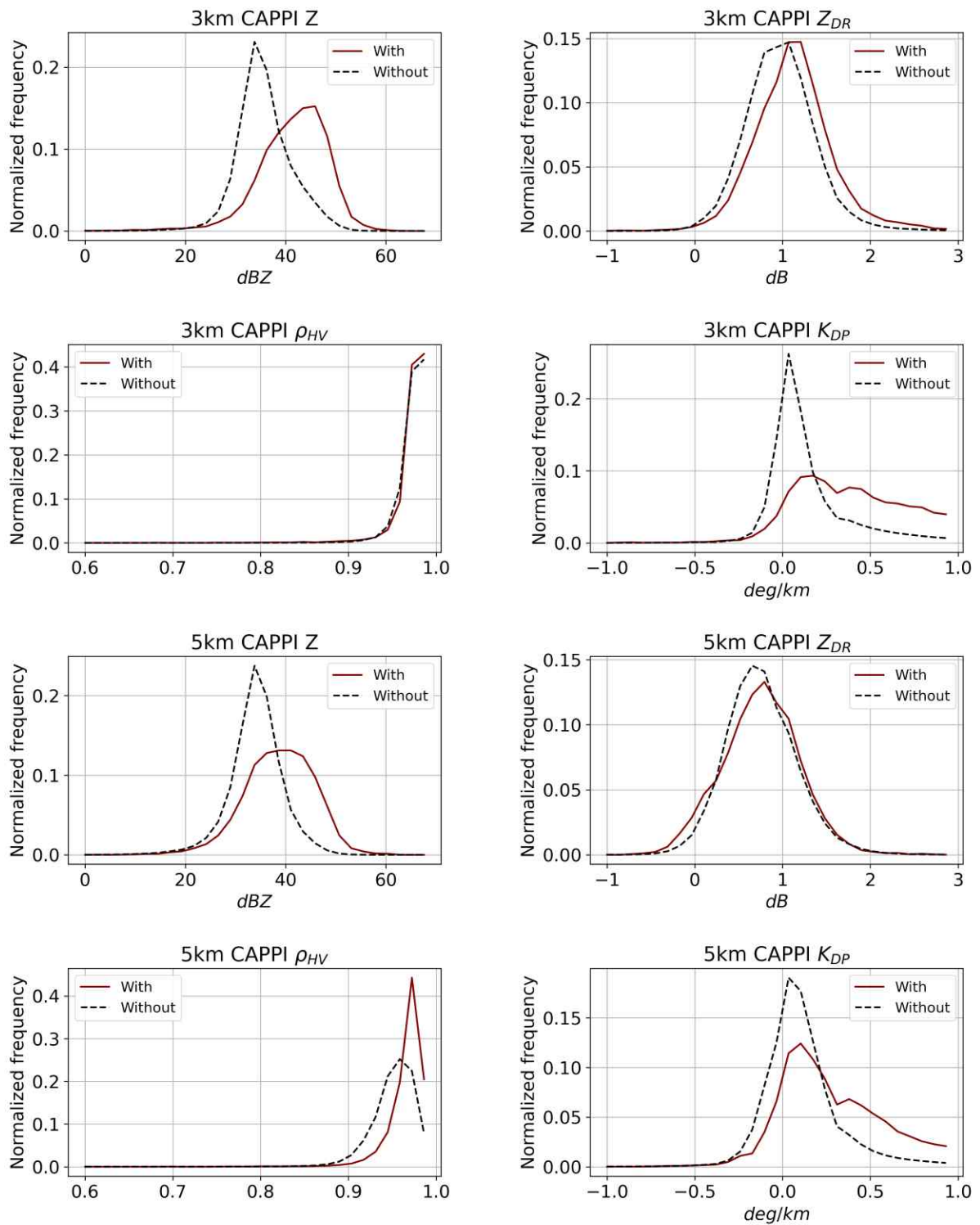


그림 2.3.2.3 낙뢰(With) 및 비낙뢰(Without) 영역에 대한 레이더 기반 특성변수의 빈도분포 (계속)

2) 위성기반 특성인자

2.3.1절에서 소개한 위성기반 특성인자 10종을 이용하여 낙뢰 영역과 비낙뢰 영역별 특성을 조사하였다. 그림 2.3.2.4와 2.3.2.5는 Ref_38과 T_B 10.5 μm , ΔRef_38 , ΔT_B 10.5 μm , BTD와 BT D의 경향성에 대한 PDF를 나타낸다 여기서 경향성을 나타내는 인자들은 10분 전과 현재시간의 T_B 10.5 μm , Ref_38, 또는 BTD 자료에 대하여 특정 격자점을 중심으로 5×5 픽셀 영역에서 상위 25%에 해당하는 값을 선정하여 계산하였다. 낙뢰영역에서 T_B 10.5 μm 는 220 ~ 230 K에 주로 밀집되어 있으며 약 222 K에서 첨두값이 나타났다. 반면 비낙뢰 영역에서의 T_B 10.5 μm 는 280 K 이상 구간에서 집중분포한다. 낙뢰 영역에서 Ref_38 또한 0.04 이하 구간에서 밀집되어 있으며 약 0.01 부근에서 첨두값이 나타났다. 비낙뢰 영역에서의 Ref_38은 0.04 이상 구간에서 넓게 퍼진 패턴이 나타났으며 0.05에서 최댓값이 나타났다. ΔT_B 10.5 μm 에서는 대부분 0 K 부근에서 비낙뢰 영역의 PDF와 중첩된 패턴을 나타냈다. ΔRef_38 또한 일부 -0.01 이하에서 빈도분포가 존재하였으나 0.0 부근에서 비낙뢰 영역의 PDF와 중첩하였다.

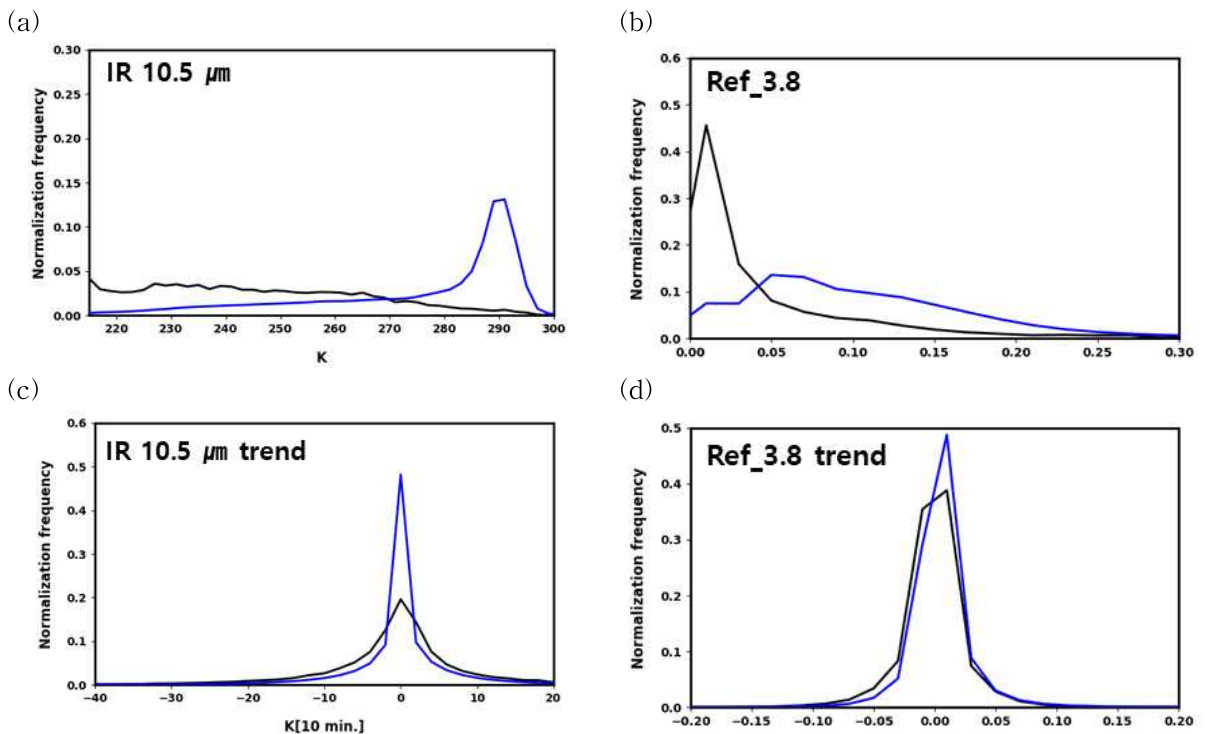


그림 2.3.2.4. 낙뢰와 비낙뢰 영역에서의 (a) Ref_38, (b) T_B 10.5 μm , (c) ΔRef_38 , (d) ΔT_B 10.5 μm 의 확률밀도함수. 검은 실선과 파랑 실선은 각각 낙뢰영역과 비낙뢰영역을 나타냄

한편 모든 낙뢰영역에서 BTD PDF는 비낙뢰영역보다 높은값 구간에서 집중분포하였다. 반면 BTD 경향을 나타내는 특성인자에서는 모두 0.0 부근에서 비낙뢰영역의 PDF와 중첩하였다. 따라서 낙뢰예측인자 가능성 측면에서 경향성을 나타내는 특성인자(ΔRef_{38} , ΔT_B 10.5 μm , $\Delta \text{BTD}(3.8 \mu\text{m}, 10.5 \mu\text{m})$, $\Delta \text{BTD}(6.7 \mu\text{m}, 10.5 \mu\text{m})$, $\Delta \text{BTD}(13.3 \mu\text{m}, 10.5 \mu\text{m})$)는 활용하기 어려울 것으로 분석된다. 반면 Ref_{38} 과 T_B 10.5 μm 와 BTD 정보는 낙뢰와 비낙뢰에 대한 뚜렷한 특성을 나타내고 있어 낙뢰 예측인자로 활용 수 있음을 보여주었다.

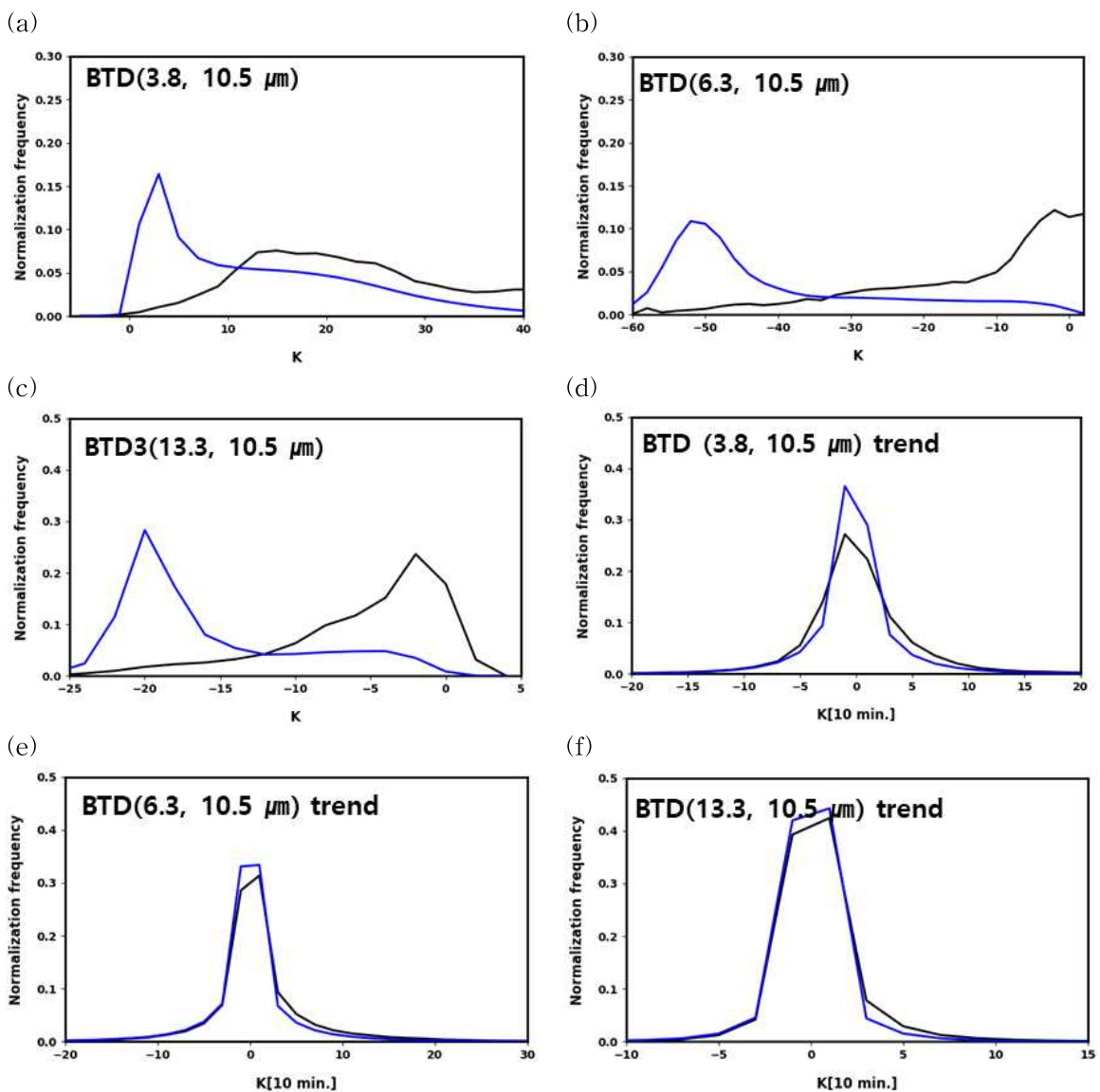


그림 2.3.25. 낙뢰와 비낙뢰 영역에서의 (a) BTD(3.8 μm , 10.5 μm), (b) BTD(6.7 μm , 10.5 μm), (c) BTD(13.3 μm , 10.5 μm), (d) $\Delta \text{BTD}(3.8 \mu\text{m}, 10.5 \mu\text{m})$, (e) $\Delta \text{BTD}(6.7 \mu\text{m}, 10.5 \mu\text{m})$, (f) $\Delta \text{BTD}(13.3 \mu\text{m}, 10.5 \mu\text{m})$ 의 확률밀도함수. 검은 실선과 파랑 실선은 각각 낙뢰영역과 비낙뢰 영역을 나타냄

3) KLAPS 기반 특성인자

2019, 2020, 2021, 2022년 6, 7, 8월 사례에 대한 낙뢰 및 비낙뢰 영역에 대한 각 특성변수의 정규빈도 분포는 그림 2.3.2.6에서 그림 2.3.2.10까지 나타냈다. 대기불안정도를 나타내는 지표와 낙뢰연구에 통상적으로 많이 사용되는 SHO, LI, SWEAT, SI, TTI는 낙뢰와 비낙뢰 구분이 비교적 잘 되는 것으로 분석되었다. 이 외에도 선행연구에서 제시되었던 PRI, GZ500, PW, PWU, TD850, TD700, CTT, CTH, CTP와 같은 변수도 구분을 위한 좋은 변수가 될 수 있을 것으로 생각된다. 그렇지만 CAPE과 CIN, W700은 일반적으로 알려진 것과는 다르게 낙뢰 구분을 위한 변수중요도가 낮을 것으로 보인다.

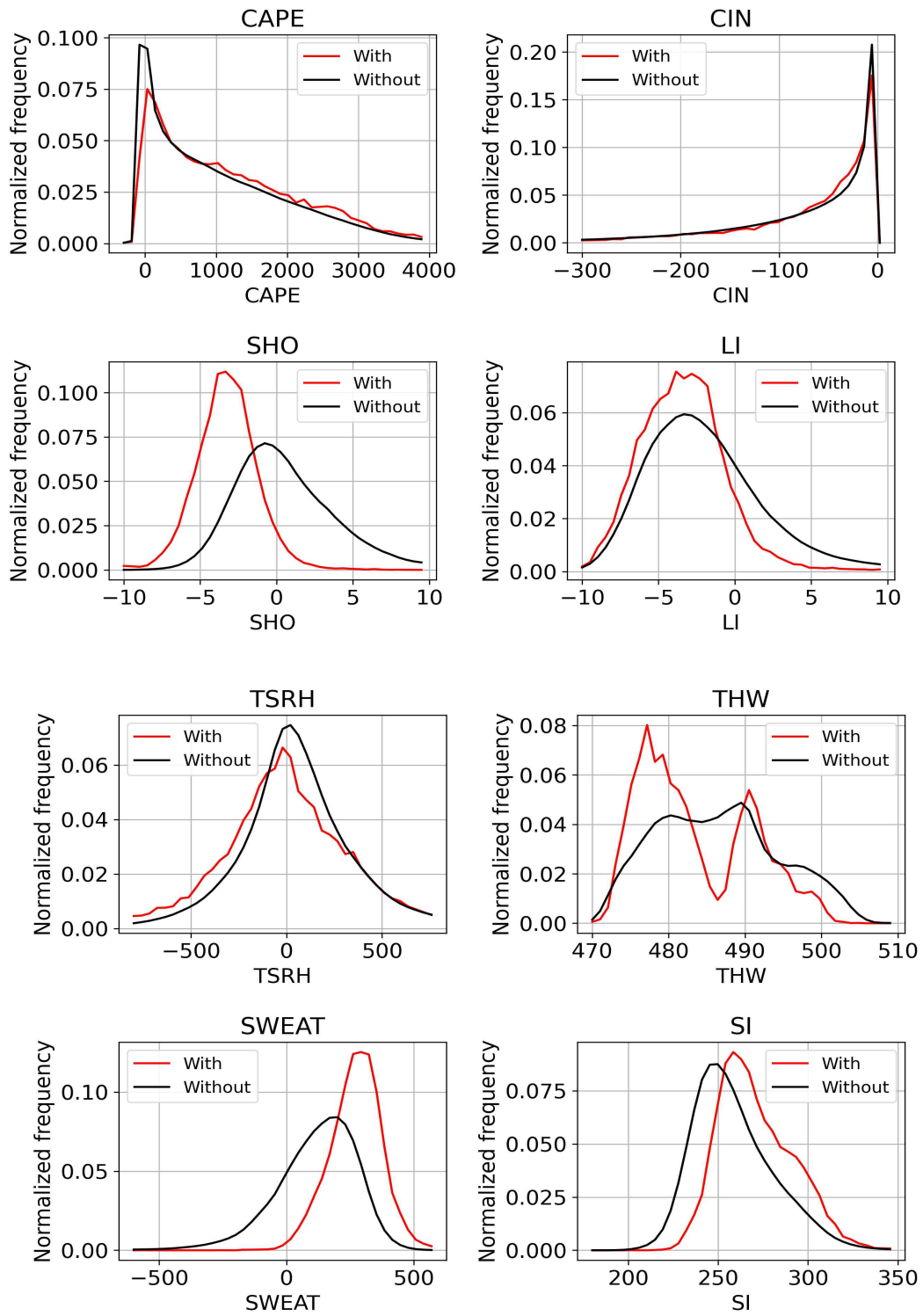


그림 2.3.2.6 낙뢰(With) 및 비낙뢰(Without) 영역에 대한 KLAPS 기반 특성변수의 빈도분포

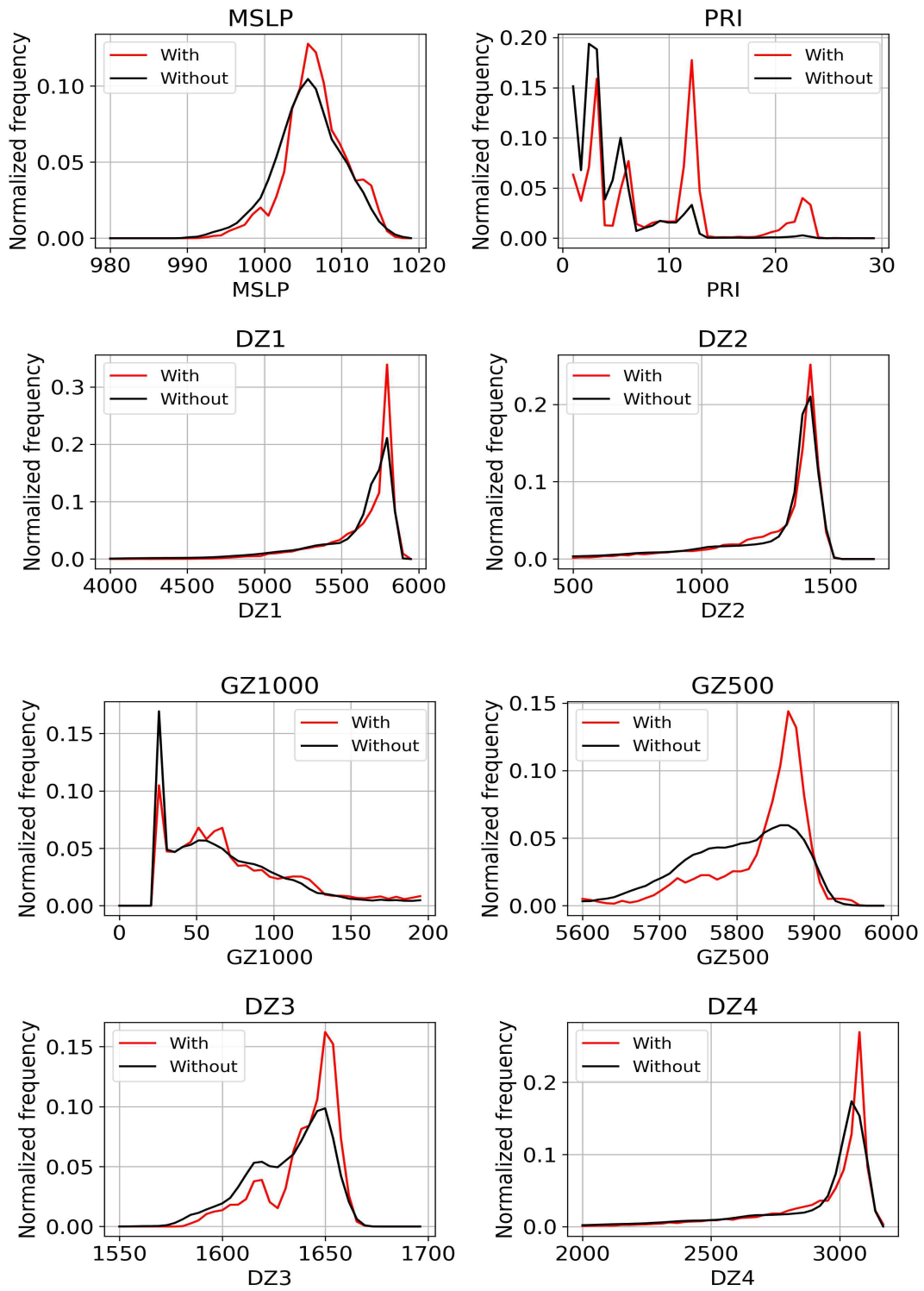


그림 2.3.2.7 낙뢰(With) 및 비낙뢰(Without) 영역에 대한 KLAPS 기반 특성변수의 빈도분포(계속)

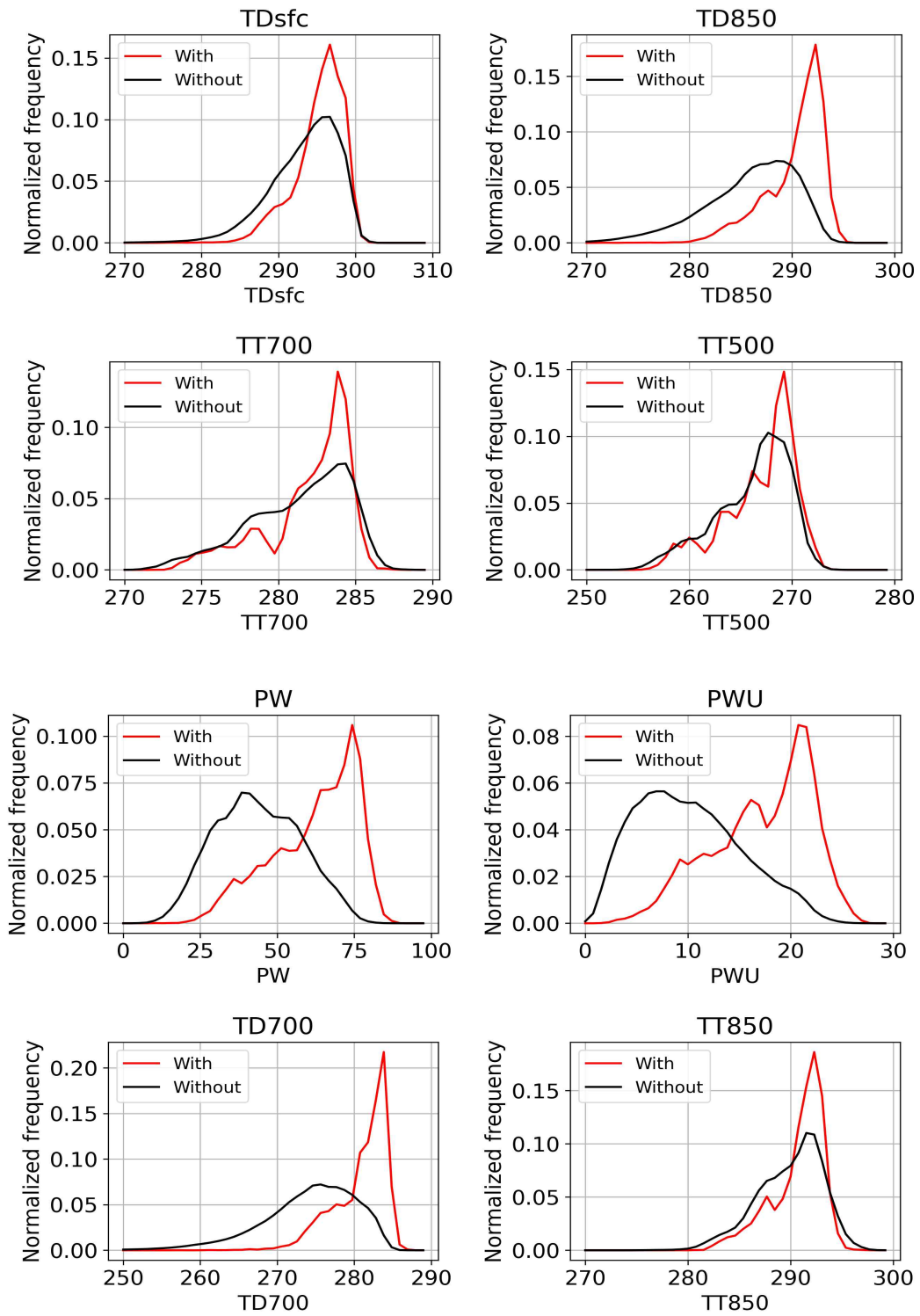


그림 2.3.2.8 낙뢰(With) 및 비낙뢰(Without) 영역에 대한 KLAPS 기반 특성변수의 빈도분포(계속)

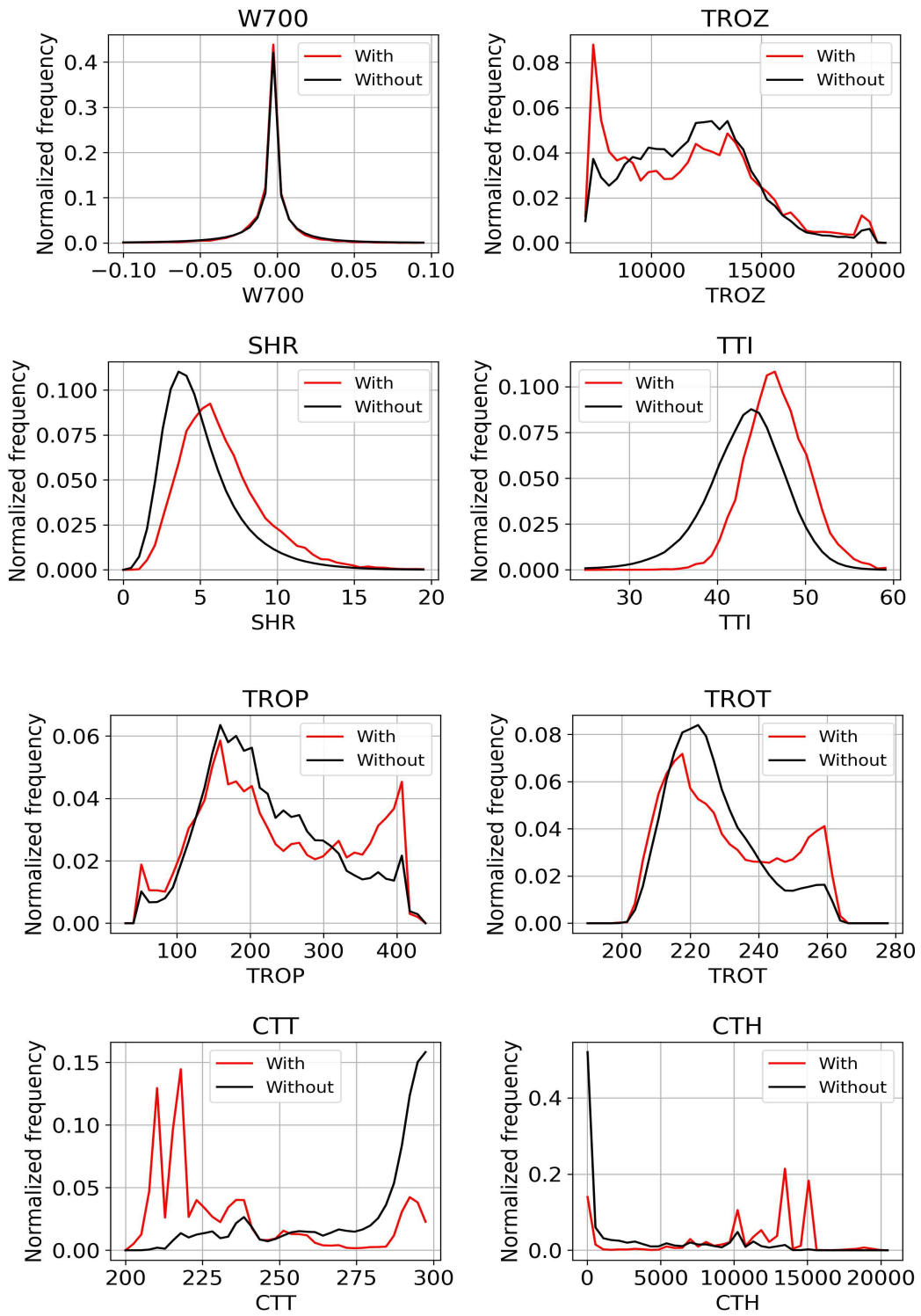


그림 2.3.2.9 낙뢰(With) 및 비낙뢰(Without) 영역에 대한 KLAPS 기반 특성변수의 빈도분포(계속)

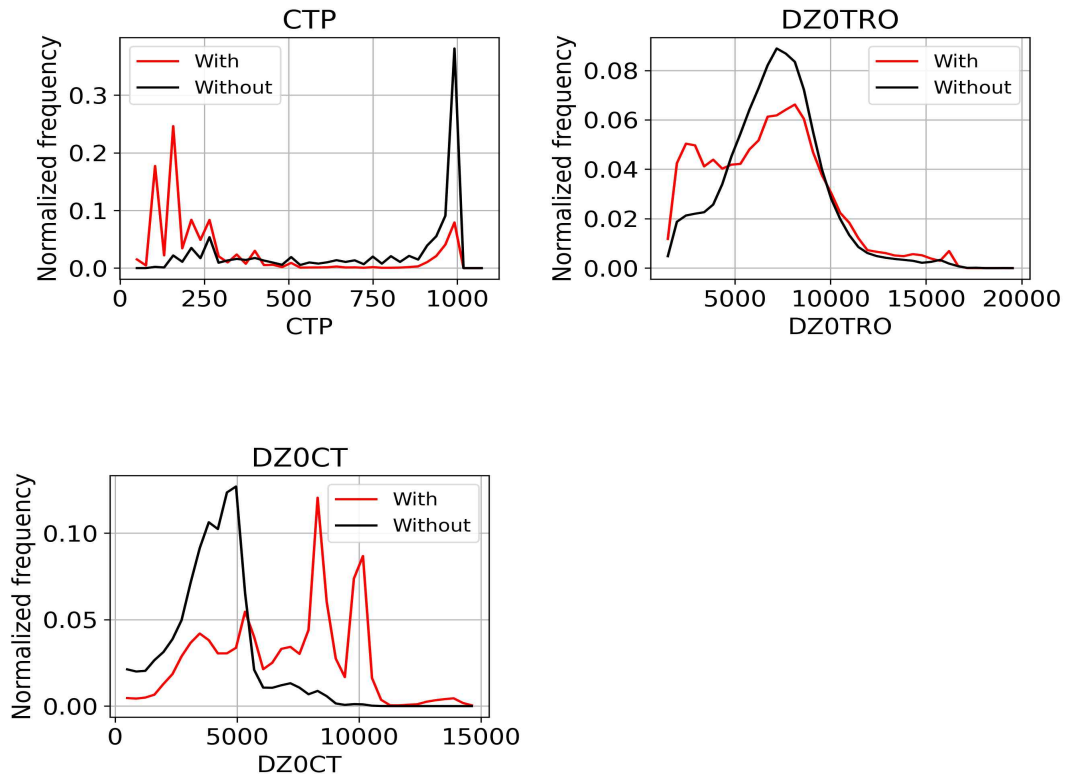


그림 2.3.2.10 낙뢰(With) 및 비낙뢰(Without) 영역에 대한 KLAPS 기반 특성변수의 빈도분포(계속)

(2) 통계 또는 머신러닝을 이용한 낙뢰 예측 기법개발 기초 연구

1) 머신러닝을 이용한 KLAPS 낙뢰 예측기법 개발 기초연구

① 학습자료 구축

머신러닝(기계학습)을 이용한 KLAPS 낙뢰 예측기법 개발을 위한 기초 연구를 수행하였다. 머신러닝 학습에 사용된 자료는 KLAPS 분석장 자료이며, 학습자료에 사용된 사례 기간은 2019년부터 2021년까지 3년간의 여름철 낙뢰 사례(6월~8월)이다. KLAPS 분석장의 시간 해상도는 1시간이고, 공간 해상도는 5km×5km 이다. 학습자료 생산 시 자료가 없는 격자는 제외하였다.

총 사례 기간 중 낙뢰가 발생한 격자의 수는 15,816개이고, 낙뢰가 발생하지 않은 격자의 수는 낙뢰 발생 격자의 약 4100배인 64,894,121개이다. 기계학습 구현 시 학습자료의 불균형은 기계학습의 성능을 저하시킬 수 있다. 따라서, 낙뢰가 발생하지 않은 격자의 수를 과소추출(under-sampling)하여 낙뢰 발생 격자 수와 일치시킴으로써 카테고리 간 자료 개수의 불균형을 해소하였다. 그림 2.3.2.11은 낙뢰발생 유무에 따른 히스토그램을 나타낸 것이다. 과소추출을 통해 종속변수의 불균형을 해소하였다.

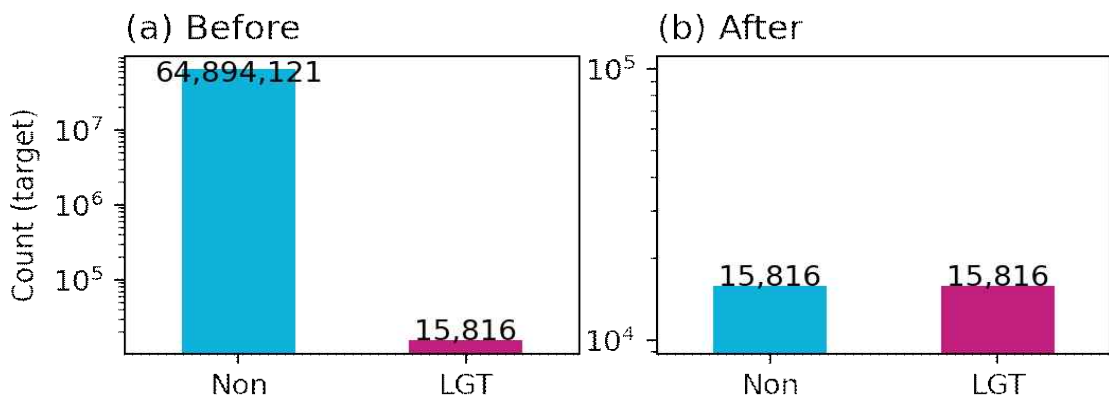


그림 2.3.2.11. (a)과소추출 전과 (b) 과소추출 후의 낙뢰발생 유무에 따른 히스토그램

② 모델 설정

머신러닝 적용을 위해 종속변수와 독립변수를 설정하였다. 종속변수는 예측하고자 하는 대상이며, 독립변수는 종속변수를 예측하는데 사용되는 변수를 의미한다. 종속변수는 낙뢰 발생 유무(낙뢰: 1, 비낙뢰: 0)로 설정하였으며, 독립변수는 KLAPS 특성 인자 35개로 설정하였다.

표 2.3.2.1은 KLAPS 기반 특성 인자 목록을 나타낸다.

번호	변수명	설명	번호	변수명	설명
1	CAPE	Convective available potential energy	18	PWU	Precipitable water in the upper troposphere (700-400 hPa)
2	CIN	Convective Inhibition	19	TDsfc	Dewpoint temperature at surface
3	TSRH	Total storm relative helicity	20	TD850	Dewpoint temperature at 850 hPa
4	THW	Maximum wet bulb temperature	21	TD700	Dewpoint temperature at 700 hPa
5	SHO	Showalter Index	22	TT700	Temperature at 700 hPa
6	LI	Lifted index	23	TT500	Temperature at 500 hPa
7	SWEAT	Severe weather threat index	24	W700	Vertical motion at 700 hPa
8	SI	Storm severity index	25	TROZ	Tropopause height
9	MSLP	Mean sea level pressure	26	TROP	Tropopause pressure
10	PRI	Price and Rind lightning function	27	TROT	Tropopause temperature
11	GZ1000	Geopotential height at 1000 hPa	28	SHR	Mean vertical wind shear (surface ~12,000 ft)
12	GZ500	Geopotential height at 500 hPa	29	TTI	Total totals index
13	DZ1	Thickness of layers: 500-1000 hPa	30	CTT	Cloud top temperature
14	DZ2	Thickness of layers: 850-1000 hPa	31	CTH	Cloud top height
15	DZ3	Thickness of layers: 700-850 hPa	32	CTP	Cloud top pressure
16	DZ4	Thickness of layers: 700-1000 hPa	33	DZ0TRO	Thickness of layer (0°C level to tropopause)
17	PW	Precipitable water in the troposphere	34	DZ0CT	Thickness of layer (0°C level to CTH)

표 2.3.2.1. KLAPS 특성 인자 목록

사용한 머신러닝 모델은 랜덤 포레스트(Random forest)이다. 랜덤 포레스트는 의사결정나무(Decision tree)를 학습하는 앙상블 방법이다(Breiman, 2001). 랜덤 포레스트는 무작위 복원 추출로 생성된 부트스트랩 샘플로 구축된 다수의 의사결정나무들로 구성된다. 각 의사결정나무는 무작위로 선택된 독립변수를 사용하여 개별적으로 성장(학습)한다. 랜덤 포레스트의 최종 예측값은 각 의사결정나무의 예측값 중 다수의 나무가 예측한 값(Majority-Voting)으로 결정된다.

③ 변수 중요도 분석

랜덤 포레스트의 MDI (Mean Decrease in Impurity) 값을 통해 변수 중요도를 분석하였다. MDI는 각 의사결정나무에서 해당 변수를 기준으로 분류되는 마디에서의 불순도 감소의 총합을 계산 후, 모든 의사결정나무에서 계산한 불순도 감소 값을 평균한 것이다. 마디별 불순도가 낮을수록 분류가 잘 되었다는 것을 뜻하므로, 불순도가 감소하는 정도가 큰 변수가 분류 예측에 중요한 변수로 작용하였음을 의미한다. 그림 2.3.2.12는 사용한 독립변수 35개에 대한 MDI 값을 나타낸다.

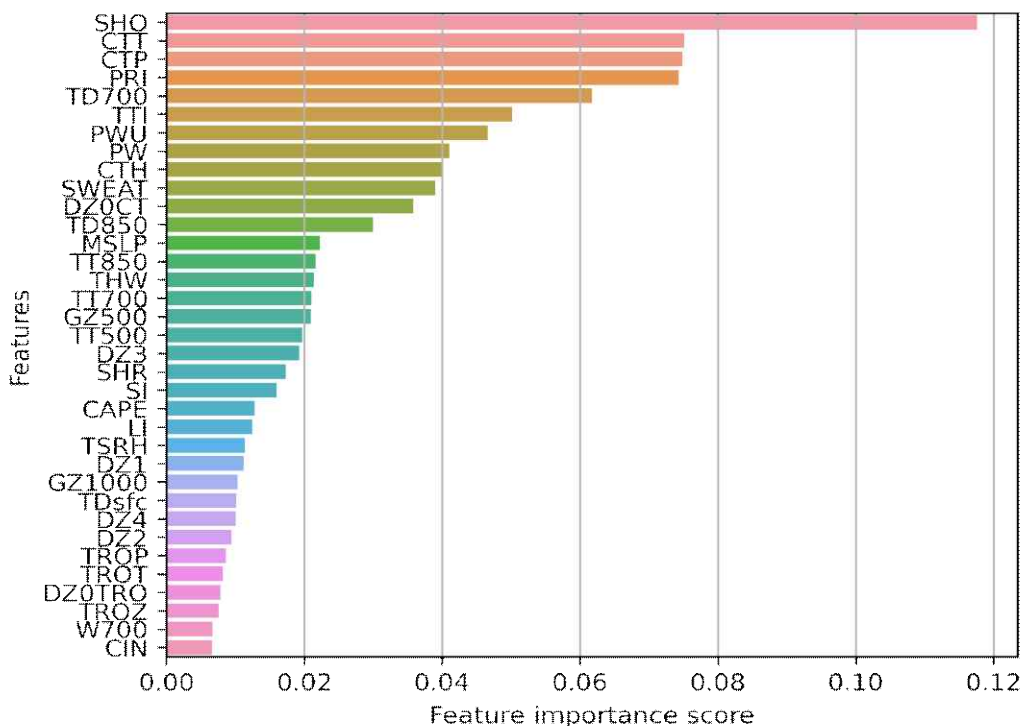


그림 2.3.2.12. 랜덤 포레스트의 변수 중요도

낙뢰 발생 유무 예측에 가장 중요하게 작용한 변수는 SHO이고, 그 다음으로 CTT, CTP, PRI, TD700, TTI, PWU, PW, CTH, SWEAT 순으로 변수 중요도가 높았다. 중요도가 가장 높았던 SHO는 쇼월터 지수(Showalter stability index; Showalter, 1953)로, 850 hPa 층의 공기덩이를 건조단열적으로 500 hPa까지 상승시켜서 구한 기온(T_L)을 500 hPa 층의 기온(T_{500})으로부터 뺀 수치이다. 일반적으로 대기불안정 상태를 진단하고 예측하는 데 많이 활용된다.

$$SHO = T_{500} - T_L \quad (2.3.2.1)$$

CTT와 CTP는 구름 정상에서의 온도와 압력을 나타내는 변수이며, 상위 9번째 변수인 CTH는 구름 정상의 높이를 나타낸다. 4번째로 변수 중요도가 높았던 PRI는 Price and Rind lightning function (Price and Rind 1992)을 의미한다. 아래 식은 PRI 식을 나타내며, H는 구름 정상 높이를 의미한다.

$$F_c = 3.44 \times 10^{-5} H^{4.9} \quad (\text{for continental flash}) \quad (2.3.2.2)$$

$$F_m = 6.4 \times 10^{-4} H^{1.73} \quad (\text{for marine flash}) \quad (2.3.2.3)$$

TD700은 700 hPa에서의 노점 온도를 의미한다. TTI는 total totals index로, 대기 중·하층의 불안정 판단에 사용되는 불안정 지수이다(Miller, 1972). TTI의 계산 식은 아래와 같다.

$$TTI = VT + CT = (T_{850} - T_{500}) - (T_{d850} - T_{500}) \quad (2.3.2.4)$$

PWU와 PW는 각각 대류권에서의 가강수량과 700-400hPa의 가강수량을 나타낸다. 마지막으로 10번째 중요도를 가진 SWEAT는 Severe Weather Threat Index를 의미한다. SWEAT 지수는 뇌우 발달과 관련된 CT(Cross Totals)와 TT(Total Totals)를 개선한 불안정 지수이다. 대기 중·하층의 풍속차이와 바람시어가 고려되었다. 아래 식은 SWEAT 지수의 계산식이다. 여기서 TTI는 total totals index를 의미하며, WS와 WD, T_d 는 각각 풍속과 풍향, 노점 온도이다.

$$SWEAT = 12 \times T_{d850} + 20 \times (TTI - 49) + 2 \times WS_{850} + WS_{500} + 125 \times [\sin(WD_{500} - WD_{850}) + 0.2]$$

(2.3.2.5)

④ 머신러닝 모델 검증

기계학습 모델은 분류성능평가지표인 정밀도(Precision), 재현율(Recall), F1 score를 사용하여 분류 성능을 평가하였다. 표 2.3.2.2는 성능평가지표 산출을 위한 분류결과표(Confusion matrix)를 나타낸다.

Observed \ Predicted	Non-lightning (0)	Lightning (1)
	Non-lightning (0)	True Negative (TN)
Lightning (1)	False Positive (FP)	True Positive (TP)

표 2.3.2.2. 분류결과표

낙뢰 발생에 대한 정밀도, 재현율, F1 score의 계산식은 다음과 같다.

$$precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2.3.2.6)$$

$$recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2.3.2.7)$$

$$F1\ score = \frac{2}{\frac{1}{precision} + \frac{1}{recall}} \quad (2.3.2.8)$$

머신러닝 검증을 전체 자료의 70%로 모델을 학습하고 30%로 검증하는 70-30 hold-out 검증을 수행하였다. 그림 2.3.2.13은 70-30 hold-out 검증 분류 결과를 나타내며, 표 2.3.2.3은 검증 결과이다.

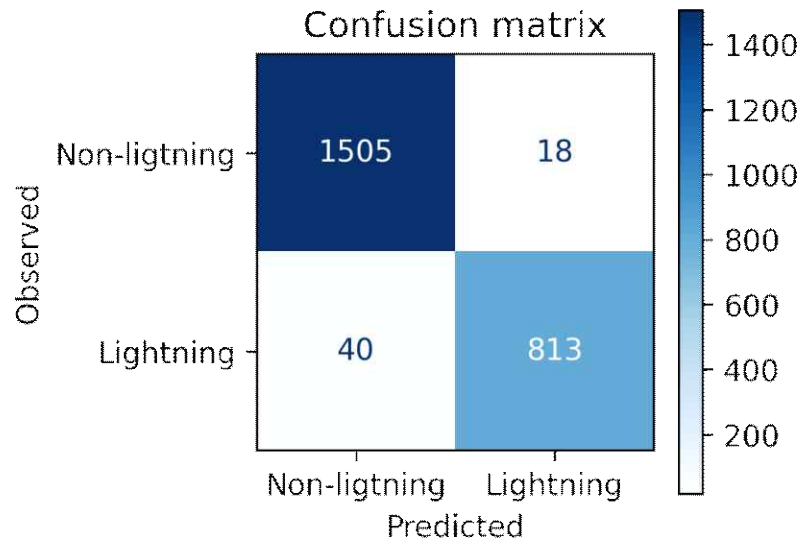


그림 2.3.2.13. 70-30 hold-out 검증 분류 결과

	Non-lightning	Lightning
Precision	0.9741	0.9783
Recall	0.9882	0.9531
F1 score	0.9811	0.9656

표 2.3.2.3. 70-30 hold-out 검증 결과

70-30 hold-out 검증 결과, 낙뢰로 예측한 831개의 격자 중 실제 낙뢰가 발생한 경우는 813개이고, 비낙뢰로 예측한 1545개 중 실제로 비낙뢰인 격자는 1505개이다. 낙뢰의 경우 정밀도는 0.9783, 재현율은 0.9531로 비교적 좋은 성능을 나타냈다. 낙뢰와 비낙뢰 모두 0.95 이상의 정밀도를 나타냈다.

70-30 hold-out 검증은 전체 학습자료를 임의로 분리하여 학습과 검증을 수행하므로, 동일한 강수시스템이 섞여 있을 수 있다. 따라서, 보다 정확한 모델 검증을 위하여 검증자료를 학습자료와 독립된 사례로 수행하였다. 2021년 8월 이전 자료(2019년 6월~2021년 7월)를 학습자료로 설정하고, 2021년 8월 자료를 검증자료로 설정하였다. 그림2.3.2.14와 표 2.3.2.4는 2021년 8월 사례에 대한 랜덤 포레스트 분류 결과와 검증 결과이다.

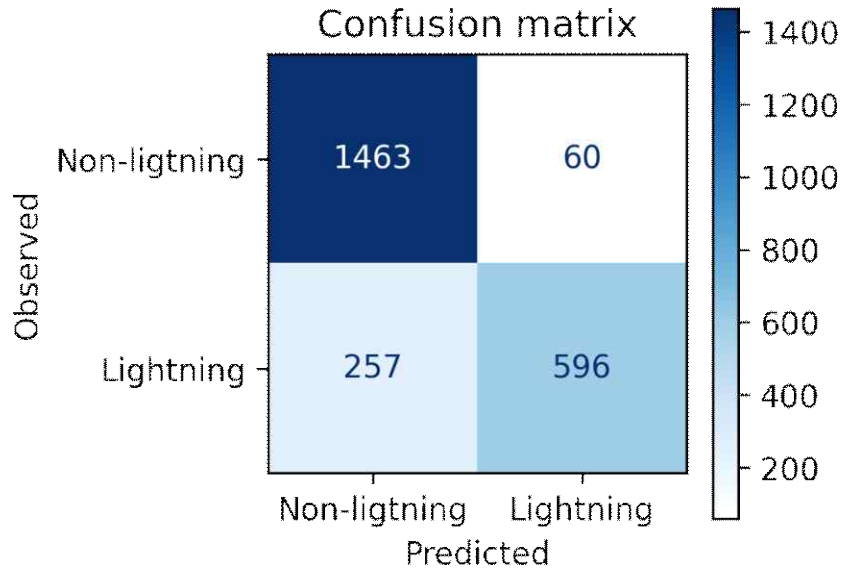


그림 2.3.2.14 2021년 8월 자료에 대한 랜덤포레스트 분류 결과

	Non-lightning	Lightning
Precision	0.8506	0.9085
Recall	0.9606	0.6987
F1 score	0.9023	0.7899

표 2.3.2.4. 2021년 8월 자료에 대한 검증 결과

랜덤 포레스트 예측결과. 낙뢰로 예측한 656개의 격자 중 실제 낙뢰가 발생한 경우는 596개이고, 비낙뢰로 예측한 1720개 중 실제로 비낙뢰인 격자는 1463개이다. 낙뢰의 경우 정밀도는 0.9085, 재현율은 0.6987로 비교적 좋은 성능을 나타냈다. 낙뢰와 비낙뢰 모두 0.85 이상의 정밀도를 나타냈다. 70-30 hold-out 검증 결과보다 낮은 성능을 나타냈지만, 학습자료와 독립된 사례로 이루어진 자료로 검증함에도 불구하고 좋은 성능을 나타냈다.

⑤ 2차원 적용

2021년 8월 이전 관측자료로 학습한 모델은 2021년 8월 사례의 KLAPS 분석장 자료에 적용하여 2차원 예측을 수행하였다. 그림 2.3.2.15는 2021년 8월 3일 21 UTC 사례의 레이더 HS R 강우 영상을 나타낸다. 서해상에서 한반도로 밴드형 시스템이 진입하는 사례이다.

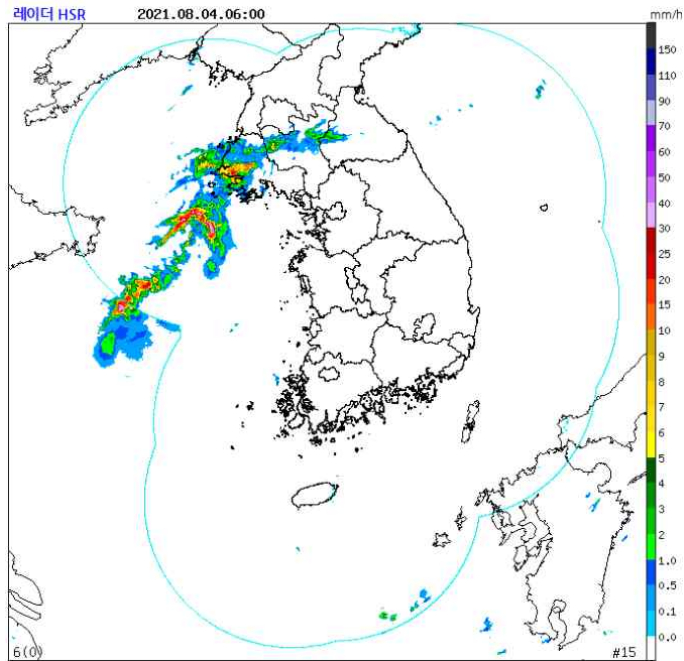
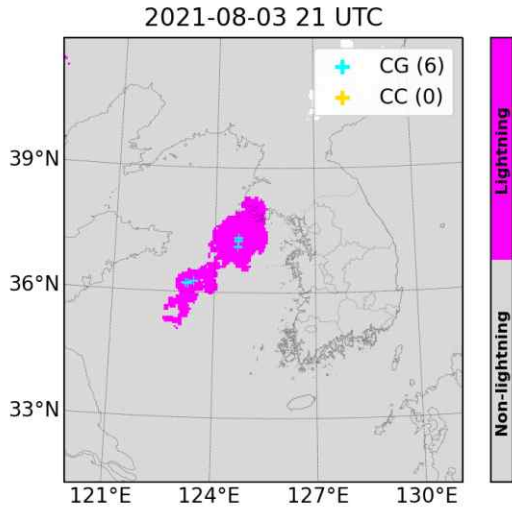


그림 2.3.2.15. 레이더 HSR 강우 영상(2021.08.03.
21 UTC)

그림 2.3.2.16은 2021년 8월 3일 21 UTC 사례에 대한 랜덤 포레스트 예측결과와 낙뢰 발생 예측확률을 나타낸 것이다. 랜덤 포레스트 낙뢰 발생 예측확률 그림에서 확률이 0.9 이상인 지점을 등치선으로 표시하였다. 실제 관측된 낙뢰는 십자가로 표시하였으며(하늘색: 대지 방전, 노란색: 구름 방전), 괄호 안 숫자는 관측된 낙뢰의 개수를 의미한다. 낙뢰 관측자료는 예측한 시간의 전후 5분 관측자료를 사용하여 비교했다.

예측결과, 랜덤포레스트가 Lightning 지역으로 예측한 부분(그림 2.3.2.16a의 자주색 영역)에서 실제 낙뢰가 관측되었음을 확인할 수 있다. 또한, 랜덤 포레스트 낙뢰 발생 예측확률 결과에 따르면 보면 낙뢰가 발생한 지역은 낙뢰 발생 확률이 0.9 이상으로 매우 높게 예측되었다.

(a) 랜덤 포레스트 예측 결과



(b) 랜덤 포레스트 낙뢰 발생 예측확률

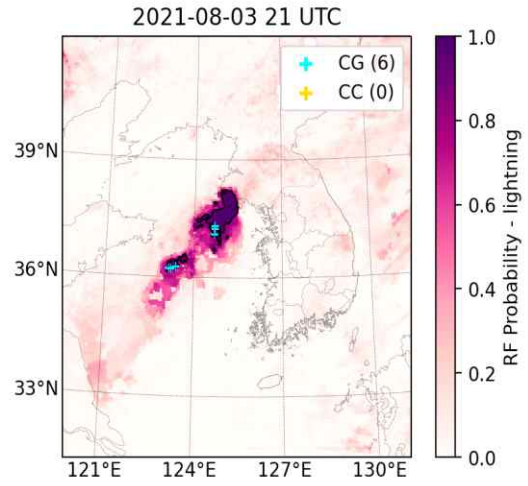


그림 2.3.2.16. (a) 랜덤 포레스트 예측결과 와 (b) 랜덤 포레스트 낙뢰 발생 예측확률 (2021.08.03. 21 UTC)

두 번째 사례는 2021년 8월 19일 16 UTC 사례이며, 내륙에 강한 셀들이 나타나며, 동해상에 20 mm/hr 이상의 강우가 내린 사례이다. 그림 2.3.2.17은 해당 사례의 레이더 HSR 강우 영상이다.

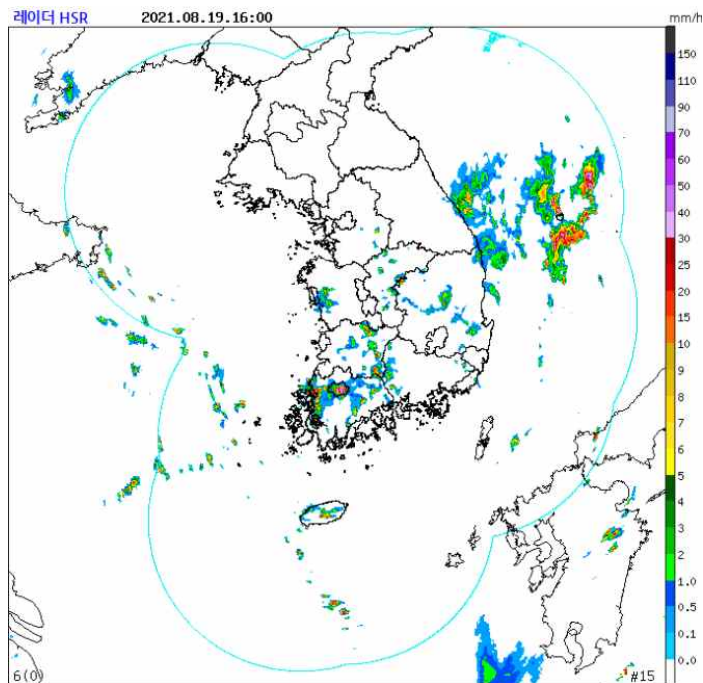


그림 2.3.2.17. 레이더 HSR 강우 영상 (2021.08.19. 07 UTC)

그림 2.3.2.18은 랜덤 포레스트 예측결과와 랜덤 포레스트의 낙뢰 발생 예측확률을 나타낸다. 예측결과, 내륙 및 동해상에 낙뢰 영역을 잘 예측함을 확인할 수 있다. 큰 시스템이 아닌 내륙에서 발생한 영역이 작은 셀 형태의 강우 시스템임에도 불구하고 낙뢰 발생 예측 지역과 실제 낙뢰 발생 지역이 일치하였다. 특히 낙뢰가 다수 관측된 전라남도과 광주 지역은 랜덤 포레스트의 낙뢰 발생 예측확률이 0.9 이상으로 높게 나타났다.

(a) 랜덤 포레스트 예측 결과

(b) 랜덤 포레스트 낙뢰 발생 예측확률

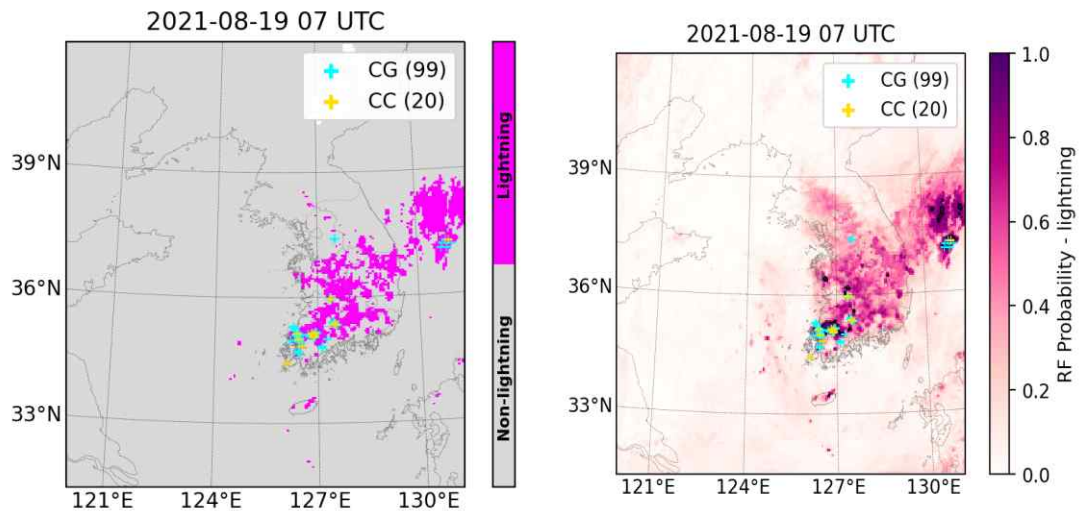


그림 2.3.2.18. (a) 랜덤 포레스트 예측결과와 (b) 랜덤 포레스트 낙뢰 발생 예측확률 (2021.08.19. 07 UTC)

⑥ 예측장 적용

2019년부터 2021년까지 3년간의 여름철 자료로 학습한 랜덤 포레스트 모델을 2022년 KLA PS 예측장 자료에 적용하였다. 첫 번째 사례는 내륙에 남북으로 긴 강수밴드가 발생한 사례로, 2022년 6월 11일 07 UTC 예측장에 적용하였다. 그림 2.3.2.19는 현재 시간(t_0)부터 3시간 선행 예측(t_3)까지의 랜덤 포레스트로 낙뢰 발생 예측확률을 나타낸다. 그림 2.3.2.20은 동일한 시간의 레이더 반사도 CMAX 영상이다. 현재 시간과 1시간 선행 예측의 낙뢰 발생 예측 확률을 보면 실제 낙뢰가 발생한 지역에 대해 높은 낙뢰 발생 예측확률을 나타내고 있다. 특히 분석장이 아닌 1시간 선행 예측장임에도 강수밴드를 따라 높은 확률로 낙뢰 발생을 예측하였다 (빨간색 원). 하지만, 선행 시간이 길어질수록 랜덤 포레스트는 내륙에 밴드 구조를 유지하며

낙뢰 발생을 예측한 반면, 실제 낙뢰는 내륙에 두세지점에서만 발생하였다. 또한 2시간 선형 예측과 3시간 선형 예측에 해당하는 09 UTC와 10 UTC의 레이더 반사도 CMAX 영상에서 강수밴드 구조가 깨지고 내륙에 셀 형태로 강수가 발생함을 확인 할 수 있다.

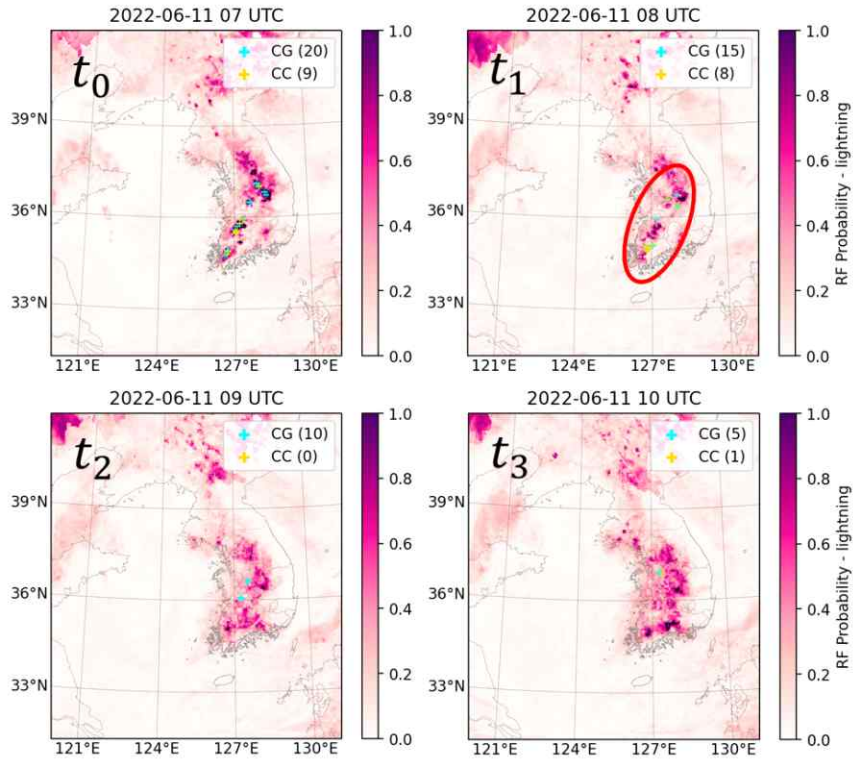


그림 2.3.2.19. 랜덤 포레스트 낙뢰 발생 예측확률(2022.06.11. 07 UTC 예측장)

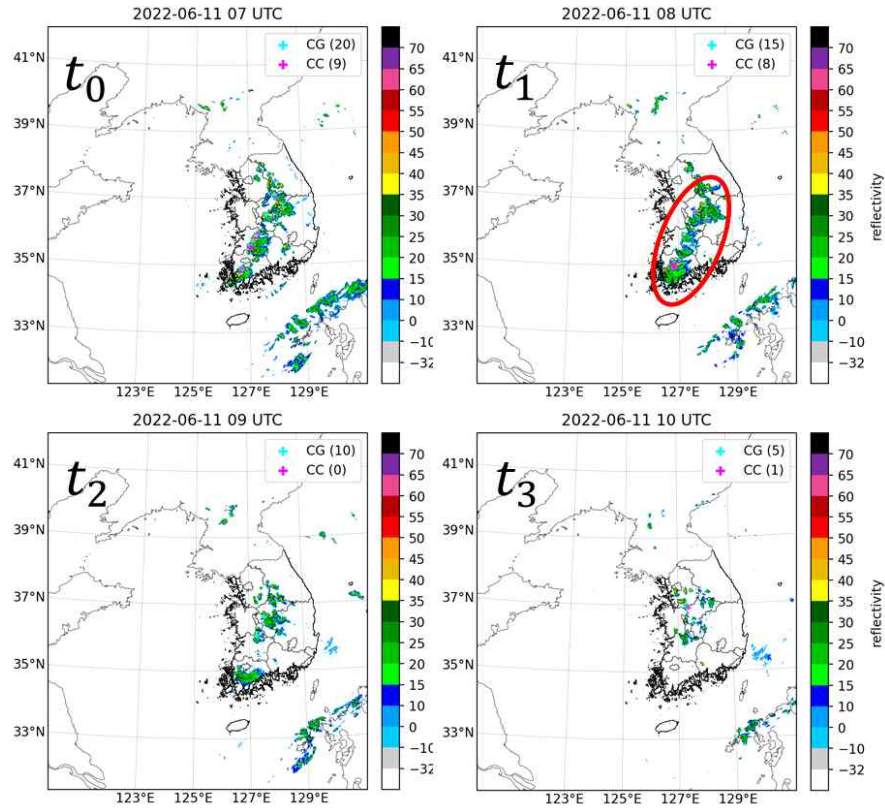


그림 2.3.2.20. 레이더 반사도 CMAX 영상(2022.06.11. 07~10 UTC)

두 번째 사례는 충청도와 경상도 내륙에 CC형태로 강수 셀이 나타난 사례이다. 2022년 7월 3일 07 UTC 예측장 자료에 랜덤 포레스트를 적용하였다. 그림 2.3.2.21은 현재 시간(t_0)부터 3시간 선행 예측(t_3)까지의 랜덤 포레스트로 낙뢰 발생 예측확률을 나타내며, 그림 2.3.2.22은 동일한 시간의 레이더 반사도 CMAX 영상이다. 내륙에 산발적으로 발생한 강수임에도 랜덤 포레스트로 예측한 낙뢰 발생 지역이 실제 낙뢰 발생 지역과 비교적 일치함을 확인 할 수 있다. 현재 시간과 1시간 선행 예측의 경우 포항 인근에 랜덤 포레스트의 낙뢰 발생 확률이 높게 나타났으나 실제 낙뢰는 발생하지 않았다. 하지만 레이더 CMAX 영상과 비교하였을 때 포항 지역에 반사도가 강한 작은 강수 셀이 나타났다.

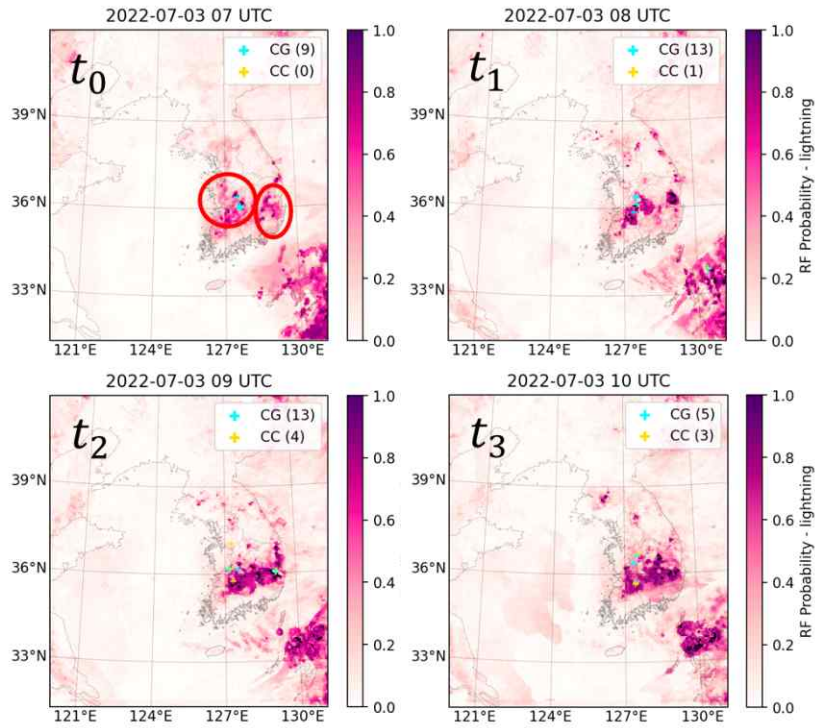


그림 2.3.2.21. 랜덤 포레스트 낙뢰 발생 예측확률(2022.07.03. 07 UTC 예측장)

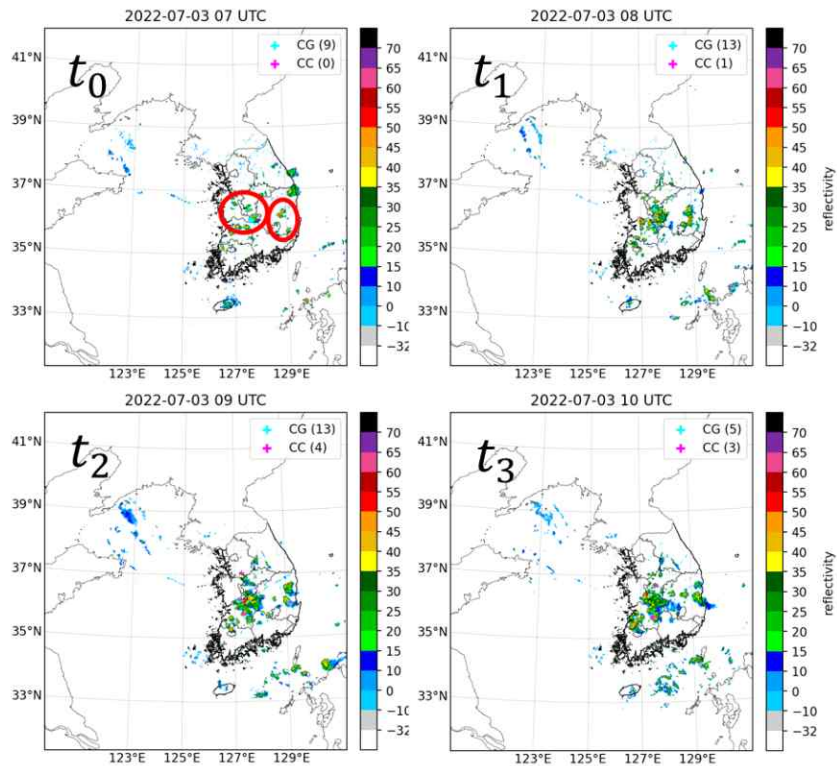


그림 2.3.2.22. 레이더 반사도 CMAX 영상(2022.07.03. 07~10 UTC)

세 번째 사례는 서해에서 수도권으로 큰 강수 시스템이 들어오는 사례이다. 2022년 8월 13일 06 UTC 예측장 자료에 적용하였다. 그림 2.3.2.23은 현재 시간(t_0)부터 3시간 선행 예측(t_3)까지의 랜덤 포레스트로 낙뢰 발생 예측확률을 나타내며, 그림 2.3.2.24는 같은 시간의 레이더 반사도 CMAX 영상이다. 강수 시스템과 랜덤 포레스트의 낙뢰 발생 예측 영역(확률이 0.5 이상)이 일치하였으며, 실제 낙뢰 발생 영역과도 비교적 일치함을 확인할 수 있다.

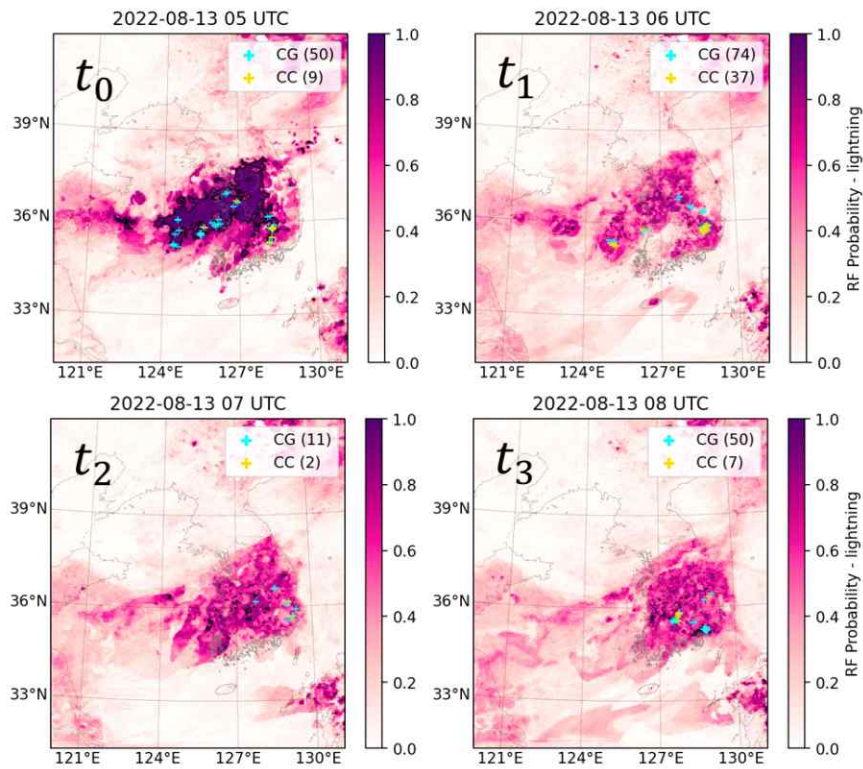


그림 2.3.2.23. 랜덤 포레스트 낙뢰 발생 예측확률(2022.08.13. 05 UTC 예측장)

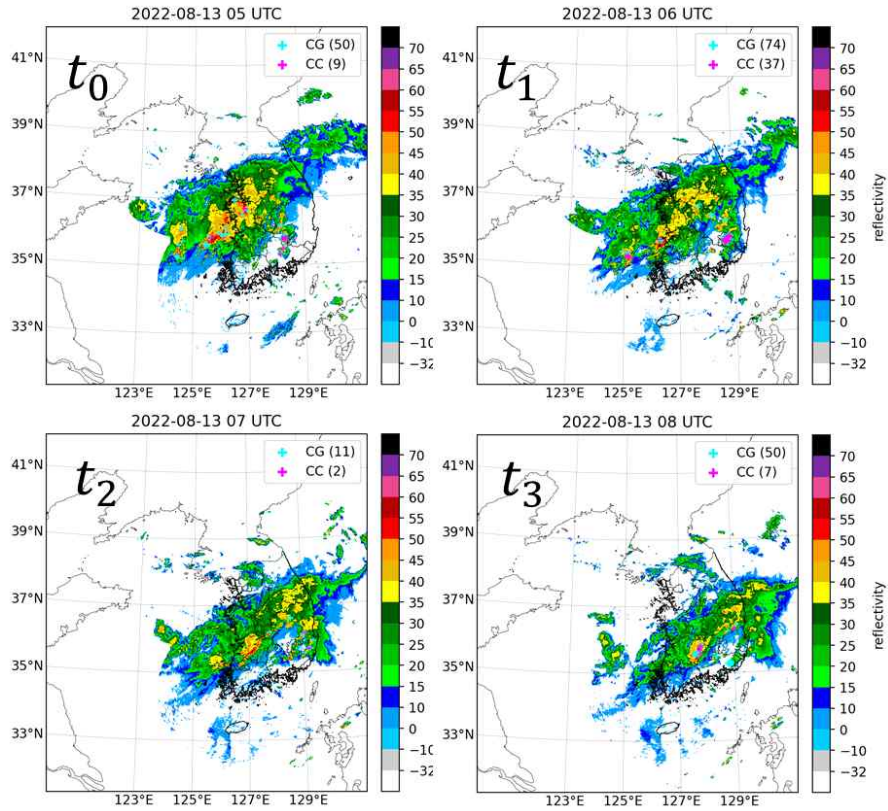


그림 2.3.24. 레이더 반사도 CMAX 영상(2022.08.13. 05~08 UTC)

그림 2.3.25는 2022년 6월부터 8월까지 총 41시간의 예측장 자료에 대해 랜덤 포레스트를 적용한 결과이다. 랜덤 포레스트로 예측된 낙뢰 발생확률을 낙뢰 발생 격자를 포함하여 3×3 격자에 대해 평균하여 예측시간에 따라 나타냈다. 예측시간이 길어질수록 낙뢰가 발생한 격자에 대한 낙뢰 발생확률이 낮아지나, 6시간 선행 예측까지 실제 낙뢰가 관측된 격자에 대해 랜덤 포레스트의 낙뢰 발생 예측확률이 0.5 이상을 나타냈다. 본 분석을 통해 6시간 선행시간까지 랜덤 포레스트로 낙뢰 발생 예측을 효과적으로 수행할 수 있음을 알 수 있다.

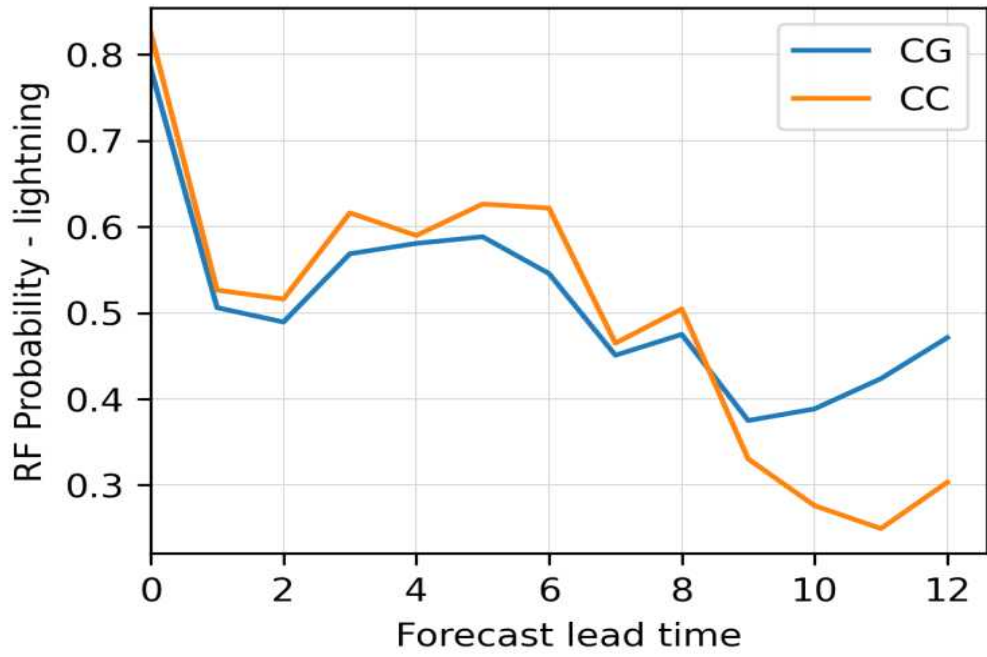


그림 2.3.2.25. 예측 선행 시간에 따른 랜덤 포레스트 낙뢰 발생 예측확률

2.3.3. 요약

낙뢰는 다양한 크기의 얼음입자 수농도와 그에 관련된 미세물리 그리고 상승기류에 밀접한 연관성이 있으며 주로 위성이나 지상레이더와 같은 원격 관측자료 기반으로 여러 사전연구가 수행되었다. 지상레이더 기반으로 수행된 사전연구에서는 이중편파 변수의 문턱값이나 반사도 기반 특성인자(echo top, UVIL, CMAX 등)을 이용하여 낙뢰 특성을 분석하였다. 기상위성 기반으로 수행된 사전연구에서는 적외채널과 수증기 채널를 기반으로 BTD와 10분 경향 산출물을 생성하여 낙뢰 특성과 낙뢰 전조 탐지의 가능성을 보여주었다. 수치모델을 이용한 낙뢰 가능성 예측은 열역학 불안정도 지수들(예: CAPE, CIN, LI, SWEAT 등)이나 0 °C 이하인 얼음 구름층의 두께를 나타내는 인자(예: DZOTRO 등), 상방향 싸락우박 플럭스량 및 얼음입자 플럭스량, LPI 등을 기반으로 다양한 모델링 기법을 이용하여 낙뢰예측을 수행하였다.

3차원 레이더 관측자료와 퍼지로지직 기반의 뇌우관별 및 추적 알고리즘(FAST)을 이용하여 낙뢰 및 비낙뢰 영역에 대한 기상레이더 관측자료와 특성변수의 특성을 조사하였다. 뇌우 영역은 FAST 알고리즘을 통하여 관별하였고 관별된 뇌우 영역에서 발생한 낙뢰 위치를 중심으로 일정한 반경을 선정하였다. 그 후에 반경 내에 포함되는 모든 격자점에 해당하는 반사도와 이중편파 관측변수(Z_{DR} , K_{DP} , ρ_{HV})와 특성변수 VIL을 조사하여 레이더 관측자료의 낙뢰 특성을 분석하였다. 낙뢰가 발생한 위치에서 반사도와 K_{DP} , ρ_{HV} , 그리고 특성인자 VIL은 주변 영역(비낙뢰 영역)에 비해 상대적으로 높게 나타나는 특성을 보였다.

GK2A 위성은 한반도 및 동아시아 영역을 고분해능의 시공간 해상도로 관측을 수행한다. 따라서 근적외채널(3.8 μm)과 적외채널(10.5 μm , 13.3 μm)과 수증기 채널(6.7 μm)를 이용하여 총 10종의 특성인자를 산출하여 낙뢰 예측인자 활용 가능성을 진단하였다. 근적외채널 자료 기반으로 산출된 특성인자인 Ref_38과 10.5 μm 채널의 휘도온도(T_B 10.5 μm)에서 낙뢰는 주변보다 낮은 영역에서 집중분포하였다. 반면에 특성인자 BTD(3.8 μm , 10.5 μm), BTD(6.3 μm , 10.5 μm), BTD(13.3 μm , 10.5 μm)에서는 낙뢰는 주변보다 높은 영역에서 집중분포하였다. 그러나 Ref_38과 T_B 10.5 μm , BTD에 대한 시간 경향을 나타내는 특성인자에 대해서는 낙뢰지점에 대한 뚜렷한 특성을 보여주지는 못했다. 비록 시간경향성을 나타내는 특성인자에서는 한반도 지역에서 발생한 낙뢰에 대한 특성을 분석하기 어려운 한계점이 있었지만 Ref_38과 T_B 10.5 μm , BT D 인자는 낙뢰 특성 분석에 유용하게 활용할 수 있음을 보여준다.

KLAPS 수치모델을 활용한 낙뢰 예측기법에서 생산되는 특성인자를 이용하여 낙뢰지역의 특성을 조사하였다. 특성인자 산출은 낙뢰자료와 KLAPS 예측장을 이용하여 수행하였다. 이때 낙뢰자료는 대지와 구름 방전을 구분하는데 활용하였고 KLAPS 예측장에서 기초변수를 추출한 후 기초변수를 기반으로 열역학적 변수와 구름 운정고도 정보, 0 °C 이하인 구름 층 두께 등으로 구성된 특성변수를 산출하였다. 특성인자 중 PRI는 일부 낙뢰 지역에 대하여 20 이상의 높은 값을 나타내었으며 SHR 또한 주변에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 반면 CAP E와 SI는 낙뢰 발생 영역에서 주변보다 작게 산출되었다.

여름철 낙뢰가 발생한 사례에 대하여 낙뢰반경에 따른 레이더 기반 관측변수와 특성변수의 통계적 특성(확률밀도함수)을 조사하였다. 낙뢰가 동반된 영역에서 레이더 반사도는 높은값 구간에서 집중분포하였으며 낙뢰반경이 커질수록 강한 반사도 구간의 빈도가 증가하였다. 또한 차등반사도와 특성변수 VIL도 낙뢰 영역에서 더 강하게 나타났으며 교차 상관계수는 0.95 이상이었다. 따라서 낙뢰가 발생한 영역은 대체로 강수량이 많고 낙하하는 강수입자의 크기 또한 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다. 연직방향으로 최대반사도인 특성변수 CMAXZ도 낙뢰 영역에서 더 크게 나타났으며 35 dBZ 이상인 반사도가 나타난 최대고도로 정의한 ETH도 낙뢰 영역에서 약 6 km 이상인 구간에 주로 분포하였다.

위성기반 특성인자를 이용하여 낙뢰와 비낙뢰 영역에 대하여 낙뢰 특성을 분석하였다. 낙뢰 영역에서 T_B 10.5 μm 는 220 ~ 230 K 구간에 밀집된 빈도분포 패턴을 보여주었으며 비낙뢰 영역에서의 T_B 10.5 μm 는 280 K 이상 구간에서 빈도가 집중분포하였다. 낙뢰 영역에서 Ref_38는 대부분 0.04 이하 구간에서 존재하였으며 비낙뢰 영역에서의 Ref_38은 0.04 이상 구간에서 넓게 퍼진 패턴이 나타났다. 낙뢰 영역에서의 모든 BTD 특성인자들은 비낙뢰 영역의 특성인자들에 비해 높은 온도차 구간에서 빈도가 집중분포하였다. 그러나 경향을 나타내는 특성인자들은 모두 0.0 부근에서 중첩된 패턴이 나타나 낙뢰 특성 분석에 한계를 보여주었다. 결론적으로 Ref_38과 T_B 10.5 μm 와 BTD 정보는 낙뢰와 비낙뢰에 대한 뚜렷한 특성을 나타내고 있고 낙뢰 예측인자로 활용 가능성을 보여주었다.

장기간(2019~2022년) 여름철 낙뢰사례에 대하여 낙뢰 및 비낙뢰 영역에 대한 KLAPS 기반 특성변수의 정규빈도 분포 특성을 분석하였다. 대기불안정도를 나타내는 지표이자 낙뢰연구에 통상적으로 사용되는 SHO, LI, SWEAT, SI, TTI는 낙뢰와 비낙뢰 영역에 대하여 비교적

상반되는 패턴을 보여주었다. 그리고 선행연구에서 제안된 PRI, GZ500, PW, PWU, TD850, TD700, CTT, CTH, CTP도 낙뢰 예측에 활용 가능성을 보여주었다.

머신러닝(기계학습)을 이용한 KLAPS 낙뢰 예측기법 개발을 위한 기초 연구를 수행하였다. 머신러닝의 학습에 사용된 자료는 KLAPS 분석장 자료이며, 학습자료에 사용된 사례 기간은 2019년부터 2021년까지 3년간의 여름철 낙뢰 사례(6월~8월)이다. 낙뢰와 비낙뢰 자료의 개수 불균형을 해소하기 위해 비낙뢰 격자 수를 과소추출하여 학습자료를 구성하였다. 사용한 머신러닝 기법은 랜덤 포레스트이며, 변수 중요도 분석 결과 쇼월터 지수가 가장 높은 변수 중요도를 나타냈다. 랜덤 포레스트 모델은 70-30 hold-out 검증과 학습/검증자료를 독립적으로 구성한 검증을 수행하였다. 검증 결과 낙뢰와 비낙뢰 예측 모두 정밀도가 0.85 이상으로 높은 성능을 나타냈다. 2021년 8월 이전 자료로 학습한 모델로 2021년 8월 사례의 KLAPS 분석장에 적용하여 2차원으로 낙뢰 발생 예측을 수행하였다. 수행결과 실제 낙뢰 발생 지역과 랜덤 포레스트로 예측한 낙뢰 발생 영역이 비교적 일치하였으며, 낙뢰 발생확률을 0.9 이상으로 높게 예측하였다. 3년간의 자료로 학습한 모델을 2022년 6~8월까지의 KLAPS 예측장 자료에 적용하였을 때 현재 시간과 1시간 선행 예측장에서 비교적 낙뢰 발생 영역과 랜덤 포레스트의 낙뢰 발생 예측 영역이 일치하였다. 예측 선행 시간에 따른 랜덤 포레스트의 낙뢰 발생 예측 확률을 나타냈을 때, 6시간 선행 예측까지 랜덤 포레스트로 비교적 정확한 낙뢰 발생 예측이 가능함을 보였다.

3. 요약 및 제언

본 연구에서는 기상청 초단기예측시스템인 KLAPS 시스템의 여름철 강수 모의 능력을 평가하기 위하여 강수 발생 메커니즘에 따라 2020-2021년 사례들을 수집하고 강수 발생 핵심 구조의 모의 성능을 평가하였다. 대표 사례는 종관배경장의 영향을 받는 4가지 강수 유형인 저기압 전면 수렴형, 저기압 전선형, 하층 제트형, 그리고 장마전선형으로 구분하고 종관배경장의 영향을 받지 않는 형태로 고기압 영향권 내 대류성 강수로 사례분류를 하였다. 시간에 따른 기압장, 바람, 수분장의 구조 발달을 우선 평가하였는데, 전반적으로 KLAPS는 강수 구조를 잘 모의하였다. 하지만 종관 저기압에 있어 기압 구조와 상승을 잘 모의하였음에도 수분 수송이 약한 구역에서 강수를 과소모의 하거나 강수의 중심 위치를 모의하지 못하는 한계점도 보였다. 전선 강수의 경우는 재분석에 비해 강한 경계면 구조를 모의하면서 IMERG에 비해 강수 과대모의를 보였으나 중규모 구조에서 나타나는 전선 구조는 KLAPS에서 모의된 결과가 타당성이 있는 것으로 판단되었다. 하층 제트는 구조를 잘 모의하였으나 경기만에서 강수를 강하게 모의하고 육상으로 유입되는 강수를 과소모의하는 해양-육지 경계 특징을 보였다. 장마 구조에서 나타나는 작은 규모의 강수 구조는 고해상도의 KLAPS가 우수한 모의 성능을 보였다. 종관 강제력이 약한 고기압 권역내의 대류성 강수의 경우는 IMERG나 ERA5에 비해 강한 강수 모의를 보였으나, 이 역시 중규모 강수 모의 능력은 KLAPS에서 우수한 것으로 판단되었다.

선정된 강수사례에 대해 위치소용돌이도 경향진단방정식과 비단열항 계산을 통해 ERA5 재분석자료와 비교하여 그 특징을 살펴보았다. 저기압 전면 수렴형 사례에서는 위치소용돌이도 경향 진단항들은 전반적으로 유사한 형태를 보여주었으며, 강수코어를 모의하지 못한 부분은 역학적 필드가 잘 모사하지 못한 것으로 생각된다. 저기압 전선형 사례에서 위치소용돌이도 경향은 ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장 모두 잘 모의된 것으로 생각되지만, 고해상도 KLAPS의 예측장이 보다 더 저기압 전선형 형태를 잘 모사하고 있는 것을 볼 수 있다. 실제 강수 위치와 KLAPS 예측장은 잘 일치했으며, 결과적으로 KLAPS 예측장이 강수구역에서 위치소용돌이도의 변화를 잘 설명하고 있음을 확인하였다. 특히, 저기압 전선형 강수의 좁은 후면 강수에서 위치소용돌이도 비단열항의 불균형을 위치소용돌이도 수평이류항이 전반적으로 상쇄

하는 특징을 보여준다. 전반적으로 고해상도 KLAPS 자료가 비교적 좁고 강한 강수 사례에 대한 위치소용돌이도의 자세한 변화를 모의하기에 좀 더 유리한 측면이 있는 것으로 생각된다. 하층 제트형 강수 사례에서 ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장은 비슷한 위치에서 위치소용돌이도 경향 진단항들의 변화를 설명하고 있다. KLAPS 850 hPa 예측장에서는 수도권 서쪽해안가에 강한 음의 비단열흐름을 보여주고 있으며, 이는 하강류 또는 수평적인 열차이가 큰 육지-해양 대조를 나타내는 것으로 생각된다. 이러한 특징은 500 hPa 층에서는 다소 완화된 특징을 보인다. 장마 전선형 강수에서 ERA5 재분석자료와 KLAPS 예측장 자료는 위치소용돌이도 경향 진단항들이 비슷한 공간분포를 보여주고 있으나, KLAPS 예측장은 우리나라 중부내륙에서 강한 비단열 및 위치소용돌이도 비단열항을 모사하였고, 그 결과 수평 및 연직흐름의 변화가 발생한 것을 알 수 있다. 고기압 영향권 내 대류성 강수 사례는 고해상도 KLAPS 예측장 자료가 보다 자세한 위치소용돌이도 경향 진단항 변화를 나타내고 있었으며, ERA5 재분석자료는 850 hPa에서는 유의미한 변화는 관찰되지 않았다.

강수 사례에 대한 대기수상체 특성 분석과 KLAPS 자료의 초기장에 대한 강수 물리과정 예측 특성을 분석하였다. 대기수상체 특성에 있어서, ERA5 재분석자료와 달리 KLAPS는 강수 지역에서 항상 비슷한 대기수상체 분포와 변화를 보여주었다. 특히, KLAPS의 강수지역에서 계산된 반사도 CFADs와 WISSDOM 반사도 CFADs는 KLAPS 예측장의 대기수상체 분포를 강수구조나 형태에 따라 적절히 모의되고 있지 않음을 보여준다. 예를 들면, 대기 중층 5 km 고도부근에서 KLAPS 예측장의 반사도 CFADs 대기수상체의 뚜렷한 상변화되는 지역이 나타나며, 대기상층에서는 고도에 따라 KLAPS의 CFADs가 감소하지 않는 것으로 볼 때, 이는 KLAPS가 대기 상층에서 빙정형태의 대기수상체 성장을 잘 모의하고 있지 않은 것으로 판단된다. 또한, 실제 WISSDOM 반사도 CFADs와 비교하여 대체로 KLAPS 모델자료의 CFADs 분포에서 -30 dBZ 값은 모델 격자점에서 QRAIN, QSNOW, QGRAUPEL에 의해 계산되는 Z_e 값이 0이 되는 지점을 포함하기 때문인데, 이는 비강수구역과 강수구역 내에서도 위의 대기수상체가 모두 0이 되는 격자지점을 포함했기 때문으로 분석된다. 특히 좁은 구역내에서 발달한 강수의 경우 지역적으로 강하게 모의되는 특성을 보였으며, 그 결과 QRAIN이 대기하층에서 국한되는 형태가 관찰되었다. 따라서 강수형태나 구조를 모의하기 위한 적절한 미세물리 규모모수화 방안에 대한 고찰이 필요하다고 판단된다.

초기장에 대한 강수 물리과정 예측 특성에서는 KLAPS의 초기장 자료가 강수시점에 가까울수록 누적강수량이 IMERG와 AWS 관측자료의 누적강수량을 잘 모의하는 것을 알 수 있었다. KLAPS 자료의 경우 몇몇 사례에서 누적강수량을 과대 모의하는 경향이 있었으며, 이와 같은 특징은 2.2.1절의 미세물리규모방안 또는 적운모수화 등과 같은 모델 물리과정의 결과로 생각된다. 한편 KLAPS의 자료동화 시스템은 단시간에 발달하는 강수의 특징에 효과적으로 대응할 수 있는 장점을 보였으며, 특히 대류성 강수 형태에 대해 강수시점에 가까울수록 잘 모의하는 경향을 볼 수 있었다. 본 연구에서는 KLAPS 예측장 자료와 공간해상도가 같은 재분석자료가 존재하지 않기 때문에, 보편적으로 품질 측면에서 신뢰성 높은 ERA5 재분석자료와 비교하였다. 비록 KLAPS 예측장 자료와 ERA5 재분석자료 간의 공간해상도 차이로 인해 정량적 비교(위치소용돌이도 경향진단 및 비단열항, 온도장, 지위고도장, 온도경도 및 이류 등)에 어려움이 있으나, 두 모델 자료로 분석된 자료 사이의 정성적 비교 및 설명은 어느 정도 유의하다고 판단된다.

낙뢰는 다양한 얼음입자 수농도와 미세물리과정 그리고 상승기류가 발달한 적란운에서 빈번하게 발생한다. 이러한 낙뢰의 특성을 분석하기 위하여 위성이나 지상레이더와 같은 원격탐측장비를 이용한 여러 사전연구가 수행되었다. 지상레이더에서 생산하는 이중편파 변수와 반사도 기반으로 산출된 특성인자를 이용하여 낙뢰 특성 분석이 가능하였고 위성 기반 특성인자를 이용하여 낙뢰 전조탐지 및 특성 분석의 가능성을 보여주었다. 그리고 수치모델 기반으로 산출된 열역학 불안정도 지수들과 0 °C 이하 얼음 구름층을 두께 또는 얼음입자들의 플럭스량을 나타내는 특성인자, LPI 등 다양한 특성인자를 이용하여 낙뢰 예측이 가능하였다.

3차원 레이더 관측자료와 퍼지로지 기반의 뇌우판별 및 추적알고리즘(FAST)를 이용하여 낙뢰 및 비낙뢰 영역에 대한 기상레이더의 관측변수와 특성변수의 특성을 조사하였다. 우선 FAST 알고리즘을 이용하여 뇌우 영역을 판별하였고 뇌우 영역에서 발생한 낙뢰위치를 중심으로 일정한 반경을 선정하여 낙뢰 영역을 분류하였다. 그 후에 낙뢰 영역과 비낙뢰 영역에 대하여 관측변수와 특성인자의 공간분포와 통계적 특성을 분석하였다. 낙뢰의 공간분포 특성 측면에서 반사도와 K_{DP} , ρ_{HV} , 그리고 특성인자 VIL가 상대적으로 높은 영역에서 낙뢰가 집중적으로 분포하였다. 여름철 낙뢰가 발생한 강수사례를 기반으로 수행된 낙뢰와 비낙뢰 영역에 대한 관측 및 특성변수의 통계적 특성 분석에서도 레이더 반사도는 높은값 구간에서 빈도가

집중분포하였으며 낙뢰반경이 커질수록 강한 반사도 구간의 빈도가 증가하였다. 낙뢰 영역에서 차등반사도와 VIL, CMAXZ도 반사도와 유사한 빈도 분포 패턴을 보여주었으며 35 dBZ 이상인 반사도가 나타난 최대고도로 정의한 ETH도 낙뢰 영역에서 약 6 km 이상인 구간에 주로 분포하였다.

GK2A 위성의 고분해능 관측산출물을 기반으로 특성인자를 계산하였고 낙뢰 영역에서 특성인자의 공간분포 특성과 통계적 특성을 조사하였고 낙뢰 예측인자 활용 가능성을 진단하였다. 공간분포 특성 분석 결과로 근적외채널 자료 기반으로 산출된 특성인자인 Ref_38과 10.5 μm 채널의 휘도온도(T_B 10.5 μm)에서 낙뢰는 주변보다 낮은 영역에서 집중분포하였으며 특성인자 BTD(3.8 μm , 10.5 μm), BTD(6.3 μm , 10.5 μm), BTD(13.3 μm , 10.5 μm)에서는 낙뢰는 주변보다 높은 영역에서 주로 관측되었다. 통계적 특성분석 결과에서 낙뢰 영역의 T_B 10.5 μm 와 Ref_38는 비낙뢰 영역에 비해 낮은 값 구간에서 빈도가 집중적으로 분포하였고 낙뢰 영역의 BT D 특성인자는 비낙뢰 영역의 BT D 특성인자들에 비해 높은 온도차 구간에서 밀집된 빈도 분포 패턴을 보여주었다. 하지만 경향을 나타내는 특성인자들은 모두 0.0 부근에서 중첩된 패턴이 나타나 낙뢰 특성 분석에 한계를 보여주었다. 결론적으로 시간경향성을 나타내는 특성인자에서는 한반도 지역에서 발생한 낙뢰에 대한 특성을 분석하기 어려운 한계점이 있었지만 Ref_38과 T_B 10.5 μm , BT D 인자는 낙뢰 특성 분석에 유용하게 활용할 수 있음을 보여준다.

KLAPS 수치모델을 활용한 낙뢰 예측기법에서 생산되는 특성인자를 이용하여 낙뢰지역의 특성을 분석하였다. 특성인자들은 대지와 구름 방전을 구분하는데 활용되는 낙뢰자료와 KLA PS 예측장에서 생산되는 기초변수들을 이용하여 산출하였으며 역학적 변수와 구름 운정고도 정보, 0 $^{\circ}\text{C}$ 이하인 구름 층 두께 등으로 구성하였다. 낙뢰영역에 대한 특성인자의 공간분포 분석 결과로 PRI와 SHR 인자는 비낙뢰 영역에 비해 상대적으로 높게 나타났으며 CAPE와 SI 는 비낙뢰 영역에 비해 낮게 산출되었다. 장기간 여름철 낙뢰사례를 이용한 특성변수들의 통계적 특성 결과로 다양한 특성인자들(예: SHO, LI, SWEAT, SI, TTI, PRI, GZ500, PW, PW U, TD850, TD700, CTT, CTH, CTP)이 낙뢰 예측에 활용할 수 있는 가능성을 보여주었다.

머신러닝 방법인 랜덤 포레스트 방법을 이용하여 KLAPS 낙뢰 예측을 수행하였다. KLAPS 분석장에 적용한 결과 실제 낙뢰 발생 지역과 랜덤 포레스트로 예측한 낙뢰 발생 영역이 비교적 일치하였으며, 낙뢰 발생 확률을 0.9 이상으로 높게 예측하였다. 또한, 2022년 6~8월까지

의 KLAPS 예측장 자료에 적용하였을 때 1시간 선행 예측까지 랜덤 포레스트의 낙뢰 발생 예측 영역과 실제 낙뢰 발생 영역이 높은 일치성을 보였다. 6시간 선행 예측까지 랜덤 포레스트로 비교적 정확한 낙뢰 발생 예측함을 확인했으며, 이를 통해 머신러닝을 활용한 낙뢰 예측 기법 개발의 가능성을 확인하였다.

참 고 문 헌

- 박홍목, 2012: 한반도 낙뢰의 기후학적 특성과 TRMM PR을 이용한 낙뢰발생 강수계의 구조에 관한 연구, 경북대학교, 71pp
- Bae, S.-Y., Hong, S.-Y., and Tao, W.-K., 2018: Development of a single-moment cloud microphysics scheme with prognostic hail for the Weather Research and Forecasting (WRF) model. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, **55**, 233-245, <https://doi.org/10.1007/s13143-018-0066-3>.
- Burrows, W. R., C. Price, and L. J. Wilson, 2005: Warm season lightning probability prediction for Canada and the northern United States. *Weather and Forecasting*, **20**, 971-988, <https://doi.org/10.1175/WAF895.1>.
- CIMSS/SSEC, cited 2010: ASPB and CIMSS calibration projects and research. [Available online at <http://cimss.ssec.wisc.edu/goes/calibration/>.]
- Deierling, W., W. A. Petersen, J. Latham, S. M. Ellis, and H. J. Christian Jr., 2005: On the relationship of thunderstorm ice hydrometeor characteristics and total lightning measurements. *Atmospheric Research*, **76**, 114-126, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2004.11.023>.
- Deierling, E., and W. A. Petersen, 2008: Total lightning activity as an indicator of updraft characteristics, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **D16210**, <https://doi.org/10.1029/2007JD009598>.
- Dwyer, J.R., and M.A., Uman, 2014: The physics of lightning, *Physics Reports*, **534**, 147-241, <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2013.09.004>.
- Forbes, R.M., Tompkins, A.M. and Untch, A., 2011: A new prognostic bulk microphysics scheme for the IFS. *ECMWF Technical Memorandum 649*, ECMWF, Reading, UK, <https://www.ecmwf.int/node/9441>.
- Germann, U., I. Zawadzki, 2002: Scale-dependence of the predictability of precipitation from continental radar images. Part I: Description of the methodology. *Monthly Weather Review*, **130**, 2859-2873, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2002\)130<2859:SDOTPO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2002)130<2859:SDOTPO>2.0.CO;2).
- Harris, R. J., J. R. Mecikalski, W. M. MacKenzie Jr., P. A. Durkee, and K. E. Nielsen, 2010: The definition of GOES infrared lightning initiation interest fields. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **49**, 2527-2543, <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2575.1>.

- Haynes, P. H. and McIntyre, M. E., 1987: On the evolution of vorticity and potential vorticity in the presence of diabatic heating and frictional or other forces. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **44**, 828–841, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1987\)044<0828:OTEOVA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1987)044<0828:OTEOVA>2.0.CO;2).
- Holton J. R. and G. J. Hakim, 2013: An introduction to dynamical meteorology, 5th edition.
- Lynn, B. H. and Yair Y., 2010: Prediction of lightning flash density with the WRF model. *Advances in Geosciences*, **23**, 11–16, <https://doi.org/10.5194/adgeo-23-11-2010>.
- McCaul, E. W., S. J. Goodman, K. M. LaCasse, and D. J. Cecil, 2009: Forecasting lightning threat using cloud-resolving model simulation. *Weather and Forecasting*, **24**, 709–729, <https://doi.org/10.1175/2008WAF2222152.1>.
- Mecikalski, J. R., and K. M. Bedka, 2006: Forecasting convective initiation by monitoring the evolution of moving cumulus in daytime GOES imagery. *Monthly Weather Review*, 134,49–78
- Miller, R. C., 1972: Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central. Tech. Rept. 200(R), Headquarters, Air Weather Service, USAF, 190 pp
- Morrison, H., and Coauthors, 2020: Confronting the challenge of modeling cloud and precipitation microphysics. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **12**, e2019MS001689, <https://doi.org/10.1029/2019MS001689>.
- Price, C., and D. Rind, 1992: A simple lightning parameterization for calculating global lightning distributions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **97**, 9919–9933, <https://doi.org/10.1029/92JD00719>.
- Rigo, T., N. Pineda, and J. Bech, 2010: Analysis of warm season thunderstorms using an object-oriented tracking method based on radar and total lightning data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **10**, 1881–1893, <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1881-2010>.
- Rotunno, R., J. B. Klemp, and M. L. Weisman, 1988: A theory for strong, long-lived squall lines. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **45**, 463–485, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1988\)045<0463:ATFSSL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1988)045<0463:ATFSSL>2.0.CO;2).
- Showalter, A. K., 1953: A stability index for thunderstorm forecasting. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **34**, 250–252.
- Siewert, C., 2008: Nowcasting lightning initiation through the use of infrared observations from the GOES satellite. M.S. thesis, Atmospheric Science Dept., University of Alabama in Huntsville, 105 pp.

- Thurmond, K. R., 2014: Operational cloud-to-ground lightning initiation forecasting utilizing s-band dual-polarization radar. M.S. thesis, Air Force Institute of Technology, 91pp.
- Tory, K. J., Kepert, J. D., Sippel, J. A. and Nguyen, C. M., 2012: On the use of potential vorticity tendency equations for diagnosing atmospheric dynamics in numerical models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **69**, 942–960, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-10-05005.1>.
- Turcotte V and D. Vigneux, 1987: Severe thunderstorms and hail forecasting using derived parameters from standard RAOBS data. In 2nd CMOS Workshop on Operational Meteorology; 142 - 153.
- Wu, C.-C., Huang, T.-S., Huang, W.-P. and Chou, K.-H., 2003: A new look at the binary interaction: Potential vorticity diagnosis of the unusual southward movement of Tropical Storm Bopha (2000) and its interaction with Supertyphoon Saomai (2000). *Monthly Weather Review*, **131**, 1289–1300, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131<1289:ANLATB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131<1289:ANLATB>2.0.CO;2).
- Wu, L. and Wang, B., 2000: A Potential Vorticity Tendency Diagnostic Approach for Tropical Cyclone Motion. *Monthly Weather Review*, **128**, 1899–1911, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2000\)128<1899:APVTDA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128<1899:APVTDA>2.0.CO;2).
- Yamada, H., Nasuno, T., Yanase, W. and Satoh, M., 2016: Role of the vertical structure of a simulated tropical cyclone in its motion: A case study of Typhoon Fengshen (2008). *SOLA*, **12**, 203–208, <https://doi.org/10.2151/sola.2016-041>.
- Yuter, S. E., and R. A. Houze Jr., 1995: Three-dimensional kinematic and microphysical evolution of Florida cumulonimbus. Part III: Vertical mass transport, mass divergence, and synthesis. *Monthly Weather Review*, **123**, 1964–1983, [doi:10.1175/1520-0493\(1995\)123<1964:TDKAME>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1995)123<1964:TDKAME>2.0.CO;2).

주 의

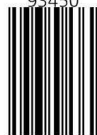
1. 이 보고서는 기상청 수치모델링센터에서 시행한 연구개발 사업으로 「수치예보 지원 및 활용 기술 개발」 사업의 연구용역과제 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 기상청 수치모델링센터에서 시행한 연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.
4. 이 보고서와 관련된 문의사항은 기상청 수치모델링센터 수치자료응용과, 전화 042-481-7544로 하시면 됩니다.

비매품/무료

93450



9 791192 755595



ISBN 979-11-92755-59-5