여름철 집중호우 시스템의 특성 비교

- 2018년 6월과 8월 사례 중심으로 -

연세대학교 대학원

대 기 과 학 과

오 치 묵

여름철 집중호우 시스템의 특성 비교

– 2018 년 6 월과 8 월 사례 중심으로 –

지도교수 박 상 훈

이 논문을 석사 학위논문으로 제출함

2019 년 12 월 26 일

연세대학교 대학원

대 기 과 학 과

오 치 묵

오치묵의 석사 학위논문으로 인준함

심사위원 박 상 훈 (인)

심사위원 김 현 미 (인)

심사위원 이 태 영 (인)

연세대학교 대학원

2019 년 12 월 26 일

감사의 글

좋은 학교에서 훌륭한 교수님, 성실한 대학원 동기들과 하고 싶은 공부에 전념할 수 있었던 시간이었습니다. 잘 하는 것 하나 없던 저를 선뜻 제자로 받아주신 지도 교수이신 박상훈 교수님께 먼저 감사 드립니다. 기초부터 시작하여 심화적인 단계까지 하나하나 꼼꼼히 알려 주셨기에 학업 과정에서 많은 것들을 배울 수 있었습니다. 더불어 학위 논문 심사를 흔쾌히 맡아주신 이태영 교수님과 김현미 교수님께 감사 드립니다. 학교에 와서 가장 흥미로웠던 수업이 대기분석과 대기역학 이었습니다.

어색하게 만나 2년을 함께한 우주형과 든든한 연구실 식구들에게도 감사의 인사 전합니다. 그리고 학기 초 어려움이 많았던 시기에 아낌없이 도와주었던 박준, 조민광, 김대휘 친구에게 고마운 마음 전합니다.

사랑하는 부모님, 그리고 언제나 저를 응원해준 권정미씨께 정말로 고맙고 사랑하는 마음을 전합니다. 학업을 하면서 어려움도 있었지만 그 길을 함께 해준 모두가 있었기에 힘을 낼 수 있었습니다.

힘들었던 시간도 있었지만 연세대 대기과학과에 많은 것들을 배우고 좋은 사람들과 함께 했기에 행복했습니다. 학교에서 배운 지식과 가르침은 학교를 떠나서도 잊지 않고 더 많은 사람들에게 전하도록 하겠습니다.

차 례

그림 차례 iii

표 차례 vii

국문 요약 viii

제1장 서론 1

제2장 6월과 8월 하순의 정체전선 사례 2

2.1 사례의 선정 2

제3장 6월과 8월 하순의 평균 특성 6

3.1 일기도 분석 6

3.2 온도 및 습도 분석 8

3.3 바람 성분 분석 12

3.4 전선 분석 13

제4장 2018년 6월과 8월 사례 특징 15

4.1 일기도 분석 15

4.2 온도 및 습도 분석 18

4.3 바람 성분 분석 22

4.4 전선 분석 24

제5장 2018년 8월 사례와 8월 정체전선 유사 사례분석 25
5.1 2018년 8월 정체전선 유사 사례 선정 25
5.2 2018년 8월 하순 유사 사례 일기도 분석 26
5.3 2018년 8월 하순 유사 사례 온도 및 습도 분석 28
5.4 2018년 8월 하순 유사 사례 바람 성분 분석 31
5.5 2018년 8월 하순 유사 사례 전선 분석 33

제6장 요약 및 결론 34

참고 문헌 38
Abstract 39

그림 차례

Fig. 1. KMA surface editing weather chart 2018. 06.26 12UTC, 2018. 08.26.12UTC 3

Fig. 2. KMA AWS accumulated precipitation(36 hours) 3

Fig. 3. Mean 25yr(1994−2018) last ten days of June/Aug surface weather chart 6

Fig. 4. Mean 25yr(1994−2018) last ten days of June/Aug 850hPa, 300hPa weather chart 8

Fig. 5. Mean 25yr(1994−2018) last ten days of June/Aug 850hPa θ and θ_e meridional gradient K (deg lat)$^{-1}$ 9

Fig. 6. Mean 25yr(1994−2018) last ten days of June/Aug 850hPa moisture flux(g kg^{-1} · m s^{-1}) and its convergence (g kg^{-1} ·10^{-4}s^{-1}) 10

Fig. 7. Mean 25yr(1994−2018) last ten days of June/Aug vertical moisture flux(g kg^{-1} · m s^{-1}) and θ_e meridional gradient K (deg lat)$^{-1}$, vertical component(Pa s^{-1}), vertical component

multiply 10 times 11

Fig. 8. Mean 25yr(1994−2018) last ten days of June/Aug zonal wind zonal wind(m s^{-1}) and ageostrophic meridional wind(m s^{-1}) and vertical component(Pa s^{-1}), vertical component multiply 10 times 13

Fig. 9. Mean 25yr(1994−2018) last ten days of June/Aug 850hPa Petterssen Frontogenesis 2D, Ninomiya Frontogenesis 2D (K/100km/3h) 15

Fig. 10. 2018 last ten days of June/Aug case surface weather chart 16

Fig. 11. 2018 last ten days of June/Aug case 850hPa, 300hPa weather chart 18

Fig. 12. 2018 last ten days of June/Aug case 850hPa θ and θ_e meridional gradient K (deg lat)$^{-1}$ 19

Fig. 13. 2018 last ten days of June/Aug case 850hPa moisture flux (g kg^{-1} · m s^{-1}) and its convergence (g kg^{-1} ·$10^{-4}s^{-1}$) 20

Fig. 14. 2018 last ten days of June/Aug case vertical moisture flux ($g\ kg^{-1} \cdot m\ s^{-1}$) and θ_e meridional gradient K $(deg\ lat)^{-1}$, vertical component($Pa\ s^{-1}$), vertical component multiply 10 times 22

Fig. 15. 2018 last ten days of June/Aug case zonal wind($m\ s^{-1}$) and ageostrophic meridional wind($m\ s^{-1}$) and vertical component ($Pa\ s^{-1}$), vertical component multiply 10 times 23

Fig. 16. 2018 last ten days of June/Aug case θ_e Frontogenesis 2D (K/100km/3h) 25

Fig. 17. 2018 last ten days of Aug case and mean 10 case on last ten days of Aug surface weather chart 27

Fig. 18. 2018 last ten days of Aug case and mean 10 case on last ten days of Aug 850hPa, 300hP weather chart 28

Fig. 19. 2018 last ten days of Aug case and mean 10 case on last ten days of Aug θ and θ_e meridional gradient K $(deg\ lat)^{-1}$ 29

Fig. 20. 2018 last ten days of Aug case and mean 10 case on last ten days of Aug moisture flux($g\ kg^{-1} \cdot m\ s^{-1}$) and its convergence

(g kg^{-1} $\cdot 10^{-4} s^{-1}$) 30

Fig. 21. 2018 case and mean of 10case Aug vertical moisture flux (g kg^{-1} · m s^{-1}) and θ_e meridional gradient K (deg lat)$^{-1}$, vertical component(Pa s^{-1}), vertical component multiply 10 times 31

Fig. 22. 2018 case and mean of 10case Aug zonal wind(m s^{-1}) and ageostrophic meridional wind(m s^{-1}) and vertical component (Pa s^{-1}), vertical component multiply 10 times 32

Fig. 23. 2018 case and mean of 10case Aug θ_e Frontogenesis 2D (K/100km/3h) 33

표 차례

Table 1. 1994-2018 last ten days of June/Aug stationary front heavy rainfall case(city country area day precipitation >60mm) 4

국문요약

여름철 집중호우 시스템의 특성 비교

- 2018년 6월과 8월 사례 중심으로 -

본 연구의 목적은 우리나라에서 발생하는 여름철 집중호우 시스템 중 정체전선에 의한 강우의 기상학적 특성을 2018년 6월과 8월의 사례를 통해 분석하는데 있다. 여름철 정체전선에 의한 집중호우 사례는 국민의 생명과 재산에 피해를 주는 기상현상으로 국가적 재난을 예방하기 위해 연구되어야 할 필요성이 있다. 6월 하순에 우리나라에 영향을 주는 정체전선 사례는 중국과 일본의 Meiyu, Baiu와 연관되어 매년 발생하는 규칙성을 지니고 있다. 이 시기는 정체전선 상에서 오랜기간 동안 비가 지속되기 때문에 특별히 장마 시기라 부르고 한 달 정도의 강수의 시작과 끝이 존재한다. 하지만 장마 시기 이후에도 정체전선이 형성되어 집중호우가 발생하는데 주로 8월 하순부터 9월초에 발생하며 6월의 장마 시기와 다르게 매년 같은 시기에 반복되는 규칙성이 없다. 따라서 이번 연구에서 우리나라 여름철에 발생하는 장마시기와 장마시기 이후의 정체전선이 형성되어 비가 내리는 사례를 선정하여 각각의 사례에서 어떤 기상학적 특성이 존재하는지 살펴보고자 한다.

먼저 해당 연구를 수행하기 위해 1994-2018년까지 25년 동안 6월과 8월 하순에 우리나라에서 정체전선으로 인하여 시·군 단위지역에 일강수량 60mm 이상이 발생한 사례를 선정하였다. 이후 6월 하순과 8월 하순의 평균적인 배

경장을 확인하기 위해 ECMWF ERA-Interim 재분석 자료(0.75°×0.75°)를 사용하여 각 시기의 해면고도(sea level pressure), 상당온위(equivalent potentail temperature), 습류(moiture flux), 바람 성분(wind component)의 25년(1994-2018년)의 6월과 8월 하순의 평균장을 산출하였다.

6월과 8월의 하순의 평균장에서는 공통적으로 온위값은 위도를 기준으로 meridional gradient가 크게 나타나지 않았지만 상당온위(equivalent potentail temperature)의 meridional gradient는 온위값보다 크게 나타났다. 하지만 두 시기는 moisture flux(비습*바람성분)의 convergence(MFC)와 850hPa 하층 바람 성분에는 차이가 있었다. 6월 하순에는 우리나라를 기준으로 북태평양 고기압을 따라 우리나라 남해안에서 MFC와 하층 바람 성분이 8월 하순보다 크게 나타났다.

2018년 8월 하순의 장마 사례는 앞서 언급한 8월의 평균장과 다른 기상학적 특성을 지녔다. 북태평양 고기압이 평균장보다 우리나라 남동쪽으로 확장되어 우리나라 남해안에 MFC와 850hPa 하층 바람 성분이 크게 나타났다. 8월 하순에 정체전선으로 인한 집중호우 사례는 850hPa의 지위고도(geopotential height)를 가중치로 pattern corelation을 하였을 때 2018년 8월 사례처럼 북태평양 고기압이 우리나라 남동쪽으로 확장된 사례가 많았다.

이번 연구를 통해 6월 하순과 8월 하순에 정체전선을 형성하는데 있어 북태평양 고기압이 중요한 역할을 한다는 것을 확인하였다. 이는 향후 8월 하순에 정체전선으로 인하여 집중호우가 발생하는 원인을 밝히는데 있어 작은 도움을 제공할 수 있으리라 판단된다.

핵심되는 말: 상당온위, 북태평양 고기압, 850hPa 바람 성분

제1장. 서론

매년 6월 하순부터 우리나라는 장마전선의 영향을 받기 시작하여 7월 중순까지 집중 호우가 자주 발생한다. 그런데 장마 시기 종료 이후 8월 하순부터 9월 중순 사이에도 정체전선이 형성되어 마치 6월 하순의 장마 시기와 같이 집중호우가 발생하는데 언론에서는 이를 가을장마 부른다. 가을에 정체전선이 형성되어 영향을 주는 것은 일반적인 6월의 장마 사례와 같이 매년 반복되는 특성을 지니고 있지 않아 장마 시기와 차이가 있다. 따라서 이번 연구에서는 8월 하순에 6월 하순과 같은 정체전선이 형성될 수 있는 기상학적 특성은 무엇인지 살펴보고자 한다.

선행 연구에서 6월의 장마전선은 moisture factor를 많이 지니고 있기 때문에 온도보다 습도에 의한 gradient가 크며 그로 인해 상당온위를 사용하였을 때 전선 생성을 분석할 수 있다고 밝힌바 있다.(K. Ninomiya 1984) 또한 Meiyu-Baiu front 발생 매커니즘에 있어 하층 제트에 의한 warm advection과 상층제트의 발산 성분이 공존하는 시스템이 중요성을 언급하였다.(TAKEAKI SAMPE 2009, 김미애,허복행,김경인,이동인 2008) 서경환, 손준혁, 이준이(장마의 재조명, 2011)의 연구에서는 NCEP 재분석 자료를 사용하여 30년 평균장을 작성하였을 때 8.21-8.31 사이에 상당온위의 경도가 커지는 가을 장마 시기가 있음을 밝혔다.

본 연구는 Era-interim 25년 평균 자료(1994-2018)를 사용하여 6월 하순과 8월 하순의 평균적인 지상일기도, 상당온위, 상·하층 바람 성분을 계산하여 평균장을 구하고, 2018년 6월과 8월 하순 정체전선 사례와 8월 하순 정체전선 유사 사례에서 기상학적 특성이 어떻게 나타나는지 확인해 보고자 한다.

제2장 6월과 8월 하순의 정체전선 사례

2.1 사례의 선정

이 연구는 여름철 집중호우 사례 중 6월과 8월 하순에 정체전선에 의해 발생하는 집중호우의 기상학적 특성을 확인하기 위해 수행하였다. 2018년 6월과 8월 하순에 정체전선으로 2018년 6월에는 36시간 강수량 150mm 이상, 2018년 8월에는 36시간 강수량이 300mm이상 발생한 집중호우 사례로 정체전선에 의한 집중호우 분석에서 중심 사례로 선정하였다. 각 정체전선 사례는 1994-2018년의 25년 기간 동안 6월과 8월에 정체전선에 의하여 시·군 4개 지역 이상에서 일 강수량 60mm 이상이 발생했던 사례를 선정하였다. 기간은 일 강수량이 60mm 이상이 발생하였던 날짜를 기준으로 3일간의 자료를 분석하였는데 2018년 6월 사례는 2018년 6월 25일 18UTC~6월 27일 18UTC, 2018년 8월사례는 2018년 8월 25일 18UTC~8월 27일 18UTC까지 각각 3일 동안 정체전선이 형성되어 영향을 주었을 때가지의 기간을 지정하였다.

Fig.1 은 2018년 6월 26일과 8월 26일의 12UTC의 기상청 지상일기도를 나타낸 것이다. Fig.1에서 2018년 6월의 사례는 북태평양 고기압이 우리나라 남해안까지 위치한 가운에 중국의 화중 내륙에서 일본의 도쿄 지역까지 지상에 저기압을 동반하여 정체전선이 형성되었고, 2018년 8월의 사례는 우리나라 남쪽에 중국 화남지방의 TD(Tropical Depression)와 북태평양 고기압이 위치하여 남풍 계열의 바람이 불어 우리나라에 정체전선이 형성되었음을 확인할 수 있다.

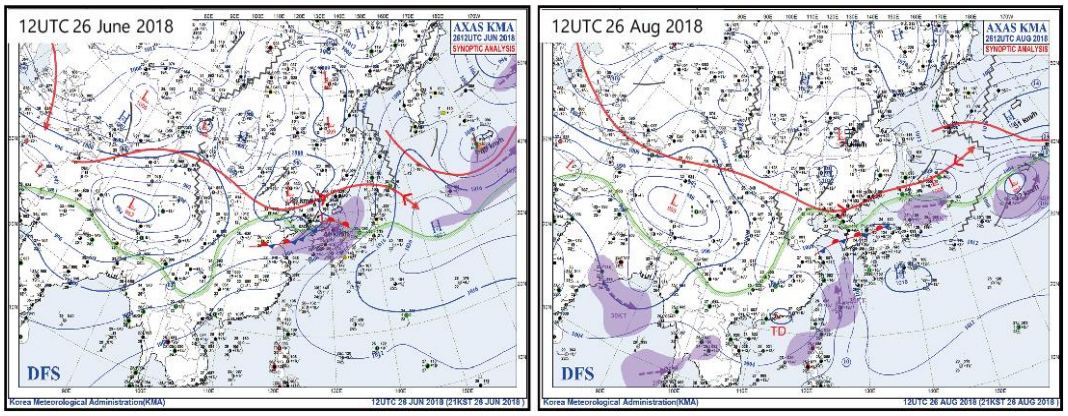

Fig.1. KMA surface editing weather chart 2018. 06.26 12UTC, 2018. 08.26.12UTC

Fig.2 는 2018년 6월과 8월 하순 사례에 대한 36시간의 누적강수량을 나타낸 것이다. Fig.2에서 2018년 6월 사례는 우리나라 북부 및 중부 지역에, 2018년 8월 사례는 우리나라 남부 지역에 누적강수량이 많음을 알 수 있다.

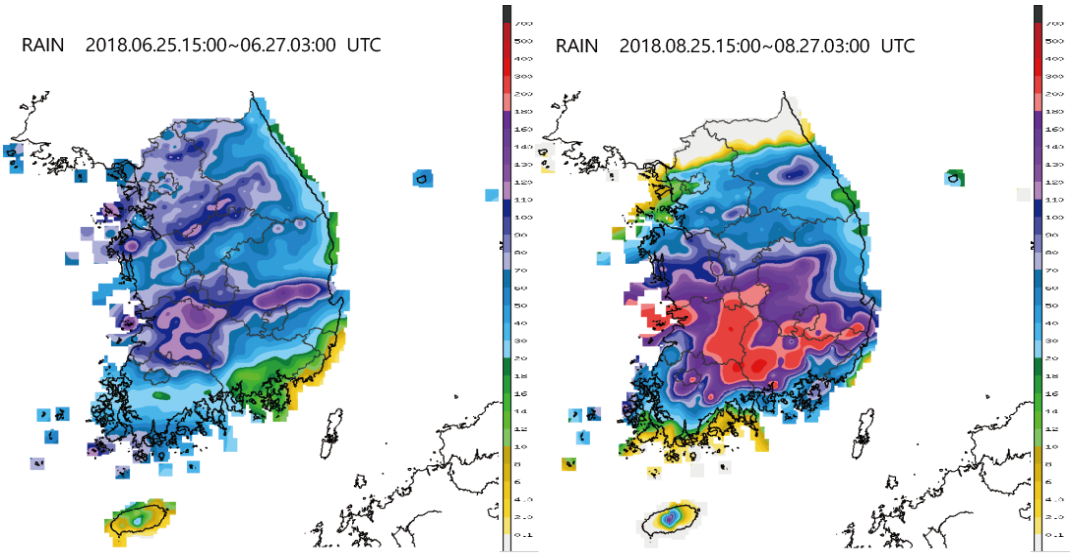

Fig.2. KMA AWS accumulated precipitation(36 hours)

6월과 8월의 정체전선 사례는 앞서 언급한 시·군 지역에서 정체전선의 영향으로 일강수량 60mm 이상이 발생한 날로 해당 사례는 Table.1과 같다. 6월과 8월의 정체전선 사례 중 2018년 6월과 8월의 강수 패턴과 유사한 사례는 pattern corelation을 사용하여 별도로 확인하였다. Era-interim의 기상변수 중에서 850hPa geopotential을 추출하여 2018년 6월과 8월 사례를 기준으로 동아시아 영역에서 6월과 8월의 전체 정체전선 사례들로 각각 3일간 pattern correlation을 수행했다. 3일 동안(6시간 간격) 총 12번의 pattern correlation을 구하고, 이 12번의 값을 평균하였다. 이후 전체 정체전선 사례 중 2018년 6월/8월 사례와 pattern correlation이 0.6 이상인 사례만 별도로 선정하였다. 각각의 pattern correlation 값은 Table.1의 해당 사례 하단에 괄호로 표기하였다. 이는 2018년 6월/8월 정체전선 사례가 6월과 8월 하순에 발생한 전체 정체전선 사례와 얼마나 유사성을 지니고 있는지를 확인하기 위함이다. 분석 결과 2018년 6월 사례는 6월 정체전선 사례 총 59회 중 53회, 2018년 8월 사례는 8월 정체전선 사례 총 22회중 11회의 유사 사례가 있음을 확인하였다. 이는 2018년 6월과 8월에 발생한 정체전선 사례가 6월 및 8월 하순에 정체전선에 의한 집중호우 사례 중 빈번하게 발생함을 의미한다.

Table 1. 1994-2018 last ten days of June/Aug stationary front heavy rainfall case(city country area day precipitation >60mm)

연도	6월 하순-7월 초순	8월 하순-9월 초순
1994	**30 June**, 05 July **(0.7891),** (0.5977)	28 Aug (0.2147)
1995	**02 July, 07 July, 09 July** **(0.8798), (0.7989), (0.8193)**	**20 Aug, 25 Aug, 30 Aug**, 02 Sep **(0.6955), (0.7038), (0.7025)**, (0.0957)
1996	**24 June, 04 July** **(0.7691), (0.8113)**	27 Aug (-0.2903)

1997	**25 June, 01 July, 05 July** **(0.6111), (0.8790), (0.8342)**	02 Sep (0.2209)
1998	**25 June, 30 June, 09 July** **(0.8327), (0.9092), (0.6138)**	-
1999	**23 June, 01 July** **(0.8933), (0.6757)**	**21 Aug**, 26 Aug, 30 Aug, 05 Sep **(0.7203)**, (0.4359), (0.5231), (0.4561)
2000	**26 June, 29 June** **(0.8647), (0.8057)**	**24 Aug** **(0.7529)**
2001	**24 June, 29 June**, 05 July **(0.8231), (0.7912)**, (0.4422)	-
2002	24 June (0.4048)	-
2003	**27 June, 03 July, 05 July, 09 July** **(0.7849), (0.8024), (0.6852), (0.8053)**	**20 Aug, 23 Aug**, 27 Aug, **02 Sep**, 07 Sep **(0.7714), (0.6952)**, (0.2567), **(0.6111)**, (0.4767)
2004	**24 June**, 02 July, **07 July** **(0.8417)**, (0.4534), **(0.8814)**	22 Aug (0.3780)
2005	**27 June, 01 July, 09 July** **(0.7514), (0.7915), (0.8714)**	-
2006	**22 June, 01 July**, 09 July **(0.7584), (0.8184)**, (0.5215)	-
2007	**04 July, 06 July** **(0.7714), (0.7056)**	-
2008	**21 June, 28 June, 02 July** **(0.6163), (0.6554), (0.8601)**	-
2009	**22 June, 29 June, 07 July, 09 July** **(0.8101), (0.8338), (0.9172), (0.7889)**	-
2010	**28 June** **(0.7721)**	**23 Aug** **(0.7152)**
2011	**22 June, 29 June, 03 July, 07 July** **(0.7800), (0.7453), (0.8510), (0.7591)**	-
2012	**05 July** **(0.7018)**	20 Aug (0.4165)
2013	**02 July, 07 July** **(0.8700), (0.8100)**	-
2014	**03 July** **(0.6211)**	**20 Aug** **(0.7147)**
2015	08 July (-0.0234)	-
2016	**01 July** **(0.8842)**	-
2017	**02 July, 08 July, 10 July** **(0.8158), (0.7996), (0.8454)**	-
2018	**26 June, 30 June** **(1), (0.6042)**	**26 Aug** **(1)**

제 3 장 6 월과 8 월 하순의 평균 특성

3.1 일기도 분석

2.1에서 2018년 6월과 8월 하순의 정체전선 사례는 6월과 8월 하순에 발생한 25년간의 정체전선 사례 중 발생빈도가 가장 많았던 사례임을 확인하였다. 해당 사례가 발생했던 6월과 8월 하순의 종관 기상학적 환경을 확인하기 위해 먼저 지상일기도의 25년 평균장을 산출하였다. ECMWF ERA-Interim reanalysis data (0.75° ×0.75° horizontal resolution; 6-hour interval)에서 mean sea level pressure 변수를 추출하여 해당 변수를 25년 평균하였다. Fig.3는 6월과 8월 하순의 25년 평균한 지상 일기도를 나타낸 것이다. 6월 하순의 평균 지상 일기도에서는 일본 동쪽 해상부터 중국 화남 지역까지 북태평양 고기압이 위치하여 우리나라에 남해안에 영향을 주고 있는 것을 확인할 수 있지만, 8월 하순의 평균 지상 일기도에서는 북태평양 고기압이 일본 동쪽에 위치하여 우리나라에서 6월 하순보다 북태평양 고기압의 세력이 크지 않음을 알 수 있다.

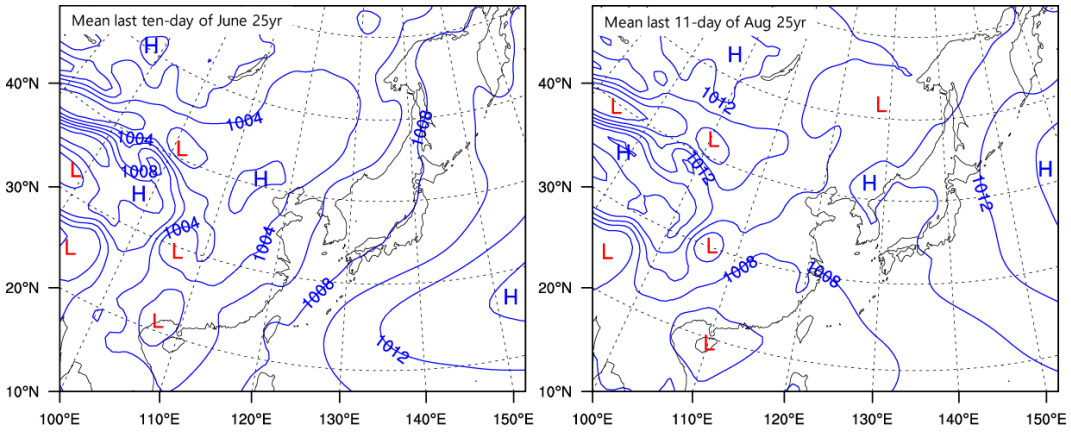

Fig.3. Mean 25yr(1994-2018) last ten days of June/Aug surface weather chart

Fig.4는 6월과 8월 하순의 850hPa(a,b), 300hPa(c,d) 25년 평균 일기도를 나타낸 것이다. 850hPa 평균 일기도는 지상 일기도와 동일하게 6월 하순의 평균 일기도에서는 북태평양 고기압이 중국 내륙부터 일본 남쪽 해상까지 위치하여 우리나라 남해안에 북태평양 고기압 가장 자리를 따라 바람 성분이 5kts 이상 나타난다. 반면 8월 하순의 850hPa 평균 일기도에서는 6월 하순에 비해 북태평양 고기압의 영향력이 축소되어 북태평양 고기압 가장 자리를 따라 나타나는 바람 성분도 6월보다 작다. 300hPa 평균 일기도는 6월 하순에는 우리나라 남쪽을 중심으로 gpm(geopotential meter)의 contour 간격이 조밀하게 나타나며, 8월 하순에는 우리나라 북쪽을 중심으로 gpm의 contour 간격이 조밀하게 나타나는데 300hPa 바람 성분도 6월 하순에는 우리나라 남쪽에서, 8월 하순에는 우리나라 북쪽으로 크게 나타난다.

6월과 8월 하순의 25년 평균 상·하층 일기도를 종합하여 분석하면 6월 하순에는 8월 하순보다 북태평양 고기압이 우리나라 남해안에서 뚜렷한 영향을 주고 있음을 확인할 수 있다. 6월 하순에는 북태평양 고기압 가장자리를 따라 우리나라 남쪽에서 하층(850hPa) 바람 성분이 8월 하순보다 크게 나타나며 상층에는 우리나라에서 300hPa의 제트의 max wind가 나타나 하층에서 바람 성분의 수렴과 상층에서의 바람 성분의 발산이 나타나는 구조를 지니고 있다. 그러나 8월 하순에는 6월 하순에 비해 북태평양 고기압의 세력이 축소되어 위치하며 북태평양 고기압 가장자리를 따라 나타나는 바람 성분도 6월 하순보다 작게 나타난다. 300hPa 제트의 max wind는 6월 하순보다 우리나라 북쪽에 치우쳐 나타나 하층의 바람 성분과 상층 바람 성분의 시어(shear)가 6월 하순에 비해 크게 나타난다. 8월 하순에는 하층과 상층의 바람의 시어는 크지만 하층(850hPa)에서의 바람 성분 자체는 6월 하순보다 작았다.

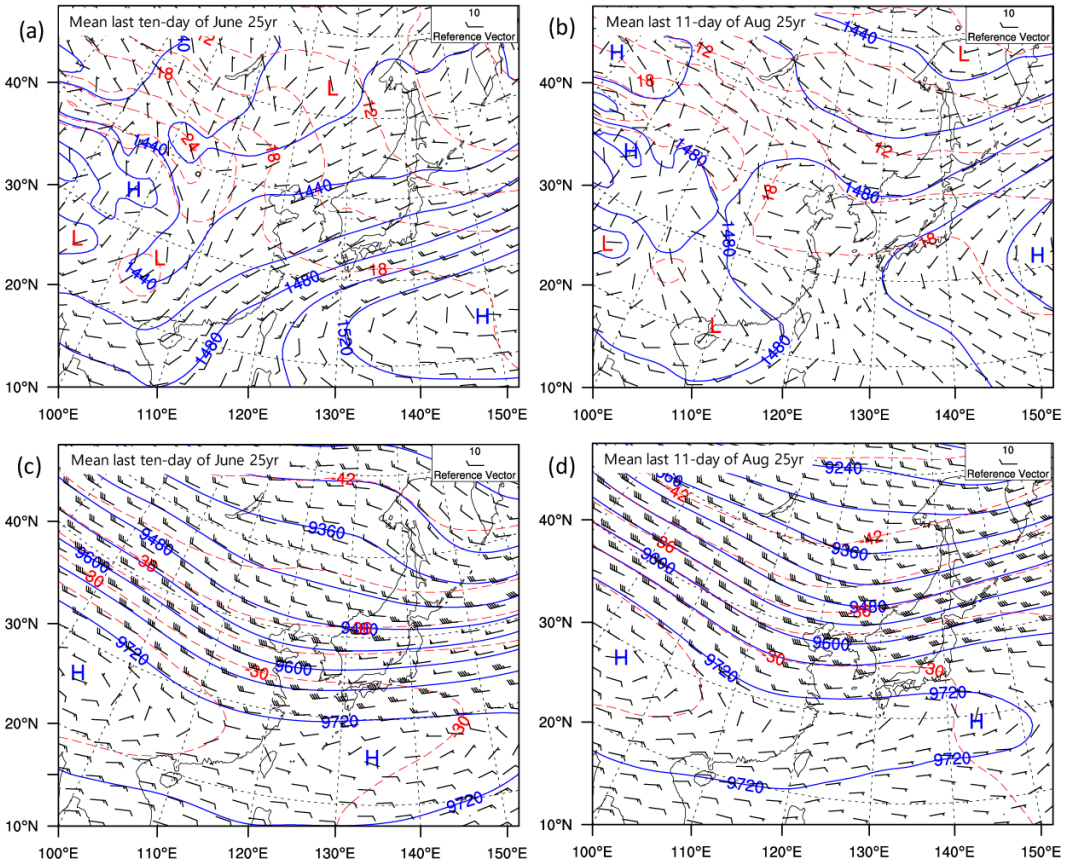

Fig.4. Mean 25yr(1994-2018) last ten days of June/Aug 850hPa, 300hPa wether chart

3.2 온도 및 습도 분석

우리나라의 여름은 1년 중 온도와 습도가 가장 큰 시기로 그로 인해 잦은 강수가 발생한다. 우리나라 6월과 8월 하순은 3.1에서 밝혔듯 북태평양 고기압의 영향 범위가 다르며 그에 따라 온도와 습도의 분포도 다르다. Fig.5는 6월과 8월 하순의 850hPa 온위(a,b)와 상당온위(c,d)를 나타낸 것이다. 녹색 실선은 온위와 상당온위 선을, 채색된 지역은 상당온위의 meridional

gradient(dθ_e/d latitude)를 의미한다. 6월 하순과 8월 하순의 25년 평균한 온위 및 상당온위의 meridional gradient를 비교했을 때 두 시기 모두 온위(a,b)보다 상당온위(c,d)의 gradient가 크게 나타남을 알 수 있다. 6월과 8월 하순에는 온도보다 습도의 meridional한 차이가 크게 발생하는데 6월 하순에는 우리나라 남해안에서, 8월 하순에는 우리나라 서해안과 동해안에서 차이가 크게 발생함을 알 수 있다. 3.1에서 8월 하순에는 북태평양 고기압의 영향력이 6월 하순에 비해 축소되는 것을 확인하였지만, 상당온위의 meridional gradient는 8월 하순에 우리나라에서 크게 분석됐다.

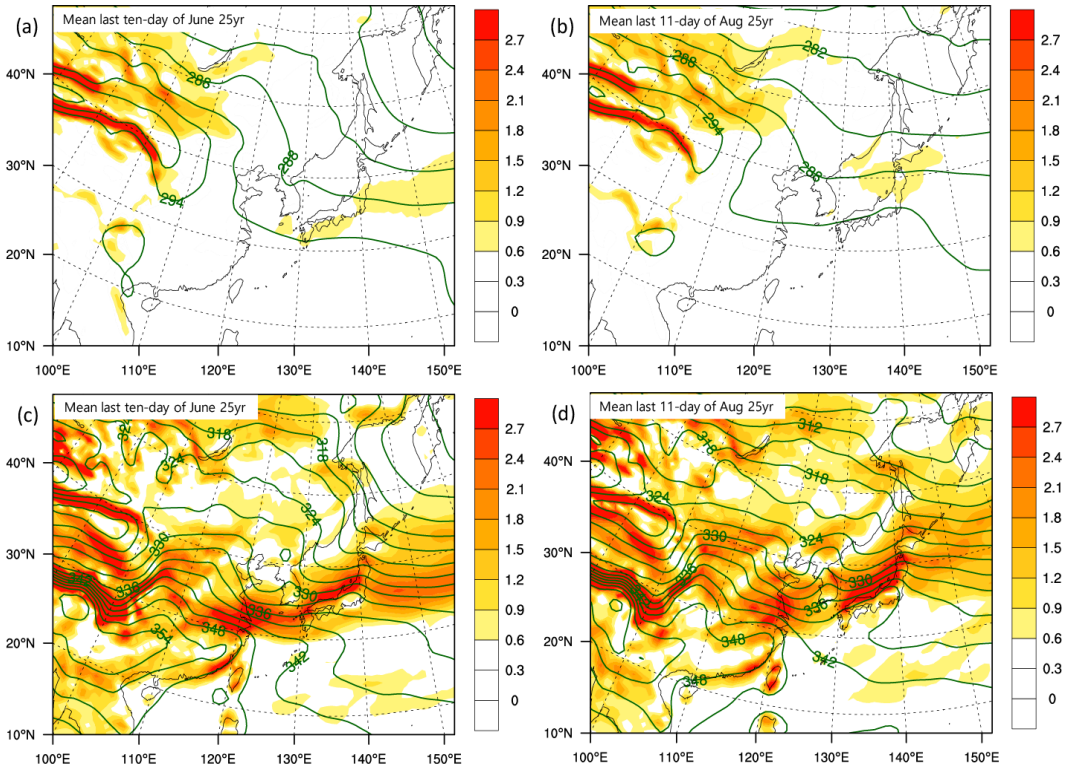

Fig. 5. Mean 25yr(1994−2018) last ten days of June/Aug 850hPa θ and θ_e meridional gradient K (deg lat)$^{-1}$

앞서 6월과 8월 하순에 우리나라에서 온위보다 상당온위의 meridional gradient가 크게 나타남을 확인하였다. 습도에 의한 gradient가 큰 환경임을 확인하였는데 이러한 moisture의 이동을 확인하기 위해 850hPa의 moisture flux 분석을 수행하였다. Fig.6는 6월과 8월 하순의 moisture flux(화살표)와 convergence(채색) 구역을 나타낸 것이다. 25년 평균에서 6월 하순(왼쪽)이 8월 하순(오른쪽)보다 우리나라 남해안에서 moisture flux의 크기가 나타나며 그에 따라 moisture flux의 convergence 구역도 6월 하순에 8월보다 크게 위치함을 알 수 있다. 6월 하순에는 북태평양 고기압의 영향력이 활성화되어 8월 하순보다 moisture flux의 크기가 크고 그에 따라 moisture flux의 convergence가 주로 우리나라 남쪽에 위치함을 알 수 있다.

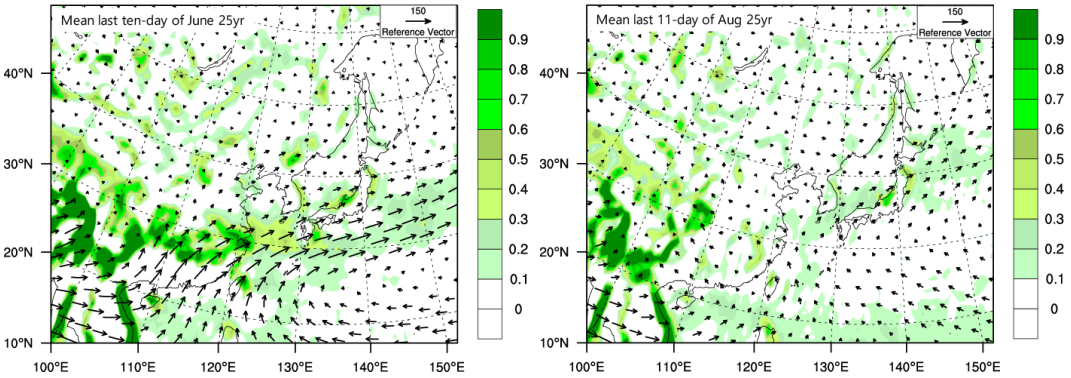

Fig. 6. Mean 25yr(1994−2018) last ten days of June/Aug 850hPa moisture flux(g kg^{-1} · m s^{-1}) and its convergence (g kg^{-1} ·$10^{-4}s^{-1}$)

6월과 8월 하순의 상당온위와 moisture flux의 25년 평균에서 6월에 우리나라 남해안에서 moisture flux의 convergence 구역이 위치함을 확인하였다. Fig.7은 경도 125E를 기준으로 연직적인 상당온위(녹색 실선)와 moisture flux(화살표), 상당온위의 meridional gradient(채색)의 25년 평균값을 나타

낸 것이다. 상당온위의 연직적 평균에서 6월 하순에는 8월 하순보다 대기 하층에서 meridional moisture flux의 크기가 크게 나타남을 확인할 수 있다. 6월 하순에는 위도 32N 남쪽(남해상)에서 대기 하층의 불안정 구역(상당온위의 크기가 주변보다 높게 나타나는 지역)이 위치하고 32N 북쪽인 우리나라 남해안에 대기 안정도가 중립인 구역(연직적인 온도 분포가 동일한 지역)이 나타난다. 8월 하순에는 대기 하층의 불안정 구역이 우리나라 전체에 위치하지만 850hPa 위층으로는 대기 안정도가 중립이 구역이 위치하고 있다. 6월과 8월 하순의 연직적인 상당온도의 분포에서 6월 하순은 대기 하층의 불안정 구역이 우리나라 남해상에 위치하며, 대기 안정도가 중립인 구역이 우리나라 남해안에 나타난다. 반면 8월 하순에는 대기하층에서 상당온위의 불안정 구역이 우리나라 전체에 위치하지만 850hPa 위로는 대기 안정도가 중립이 지역이 위치하여 850hPa 아래 대기 하층에서 불안정이 크게 나타난다.

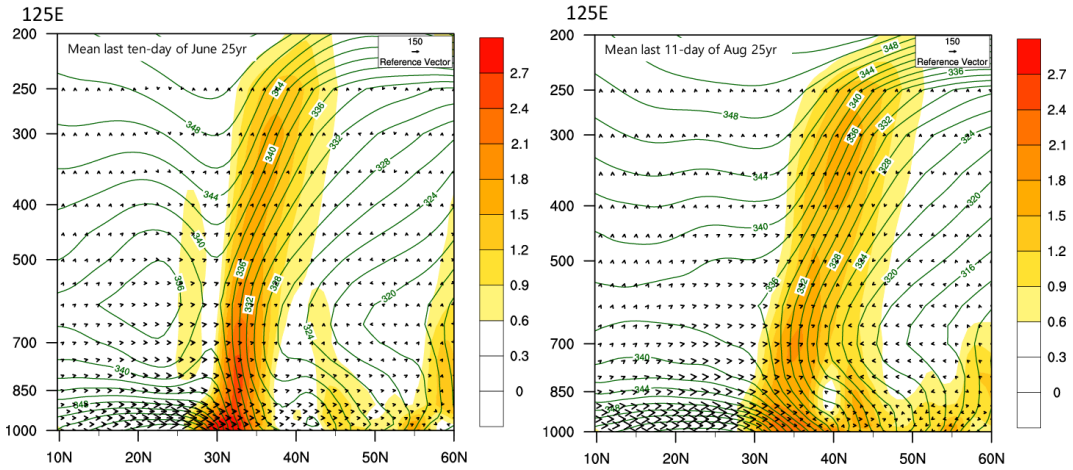

Fig. 7. Mean 25yr(1994−2018) last ten days of June/Aug vertical moisture flux(g kg^{-1} · m s^{-1}) and θ_e meridional gradient K (deg lat)$^{-1}$, vertical component(Pa s^{-1}), vertical component multiply 10 times

3.3 바람 성분 분석

3.1에서 6월 하순에는 8월 하순보다 북태평양 고기압이 우리나라 남쪽으로 확장되어 위치하여 북태평양 고기압을 따라 나타나는 하층 바람 성분이 크게 나타나는 것을 확인하였다. 300hPa 일기도에서 6월 하순에는 상층제트의 max wind가 우리나라에 위치하는 것을 알 수 있는데, 3.2의 850hPa moisture flux의 convergence 분석에서 우리나라 남해안으로 수렴되는 moisture를 300hPa 제트가 상층까지 끌어 올릴 수 있는 역할을 하고 있음을 알 수 있다. Fig.8은 25년 평균한 6월과 8월의 300hPa 바람(a,b)과 연직적인 비지균풍의 흐름(c,d)을 나타낸 것이다. Fig.8의 a,b에서 채색은 300hPa 바람이 20kt 이상인 지역을 의미하고, c,d에서 파란색 실선은 zonal wind의 풍속을, 화살표는 ageostrophic wind conponent를 의미한다. 6월 하순의 25년 평균에서 300hPa 바람의 max wind는 우리나라 남쪽에 위치해 있고 위도 30N 에서 하층 바람 성분이 8월 하순에 비해 크게 나타나 우리나라 남해안에서 비지균풍에 의한 상승운동이 하층부터 상층까지 잘 나타난다. 반면 8월 하순은 위도 30N 에서 하층의 바람 성분이 6월에 비해 작게 나타나 우리나라에서 비지균풍에 의한 상승 운동이 6월만큼 뚜렷하게 나타나지 않는다. 서론에서 언급한 선행 연구들에서 밝혔듯 6월 하순에는 우리나라 남해안에서 상·하층 바람 성분의 coupling(하층 수렴, 상층 발산)이 잘 나타나지만 8월 하순에는 하층 바람 성분이 작아 상·하층 바람 성분의 coupling이 6월 하순만큼 뚜렷이 나타나지 않음을 알 수 있다.

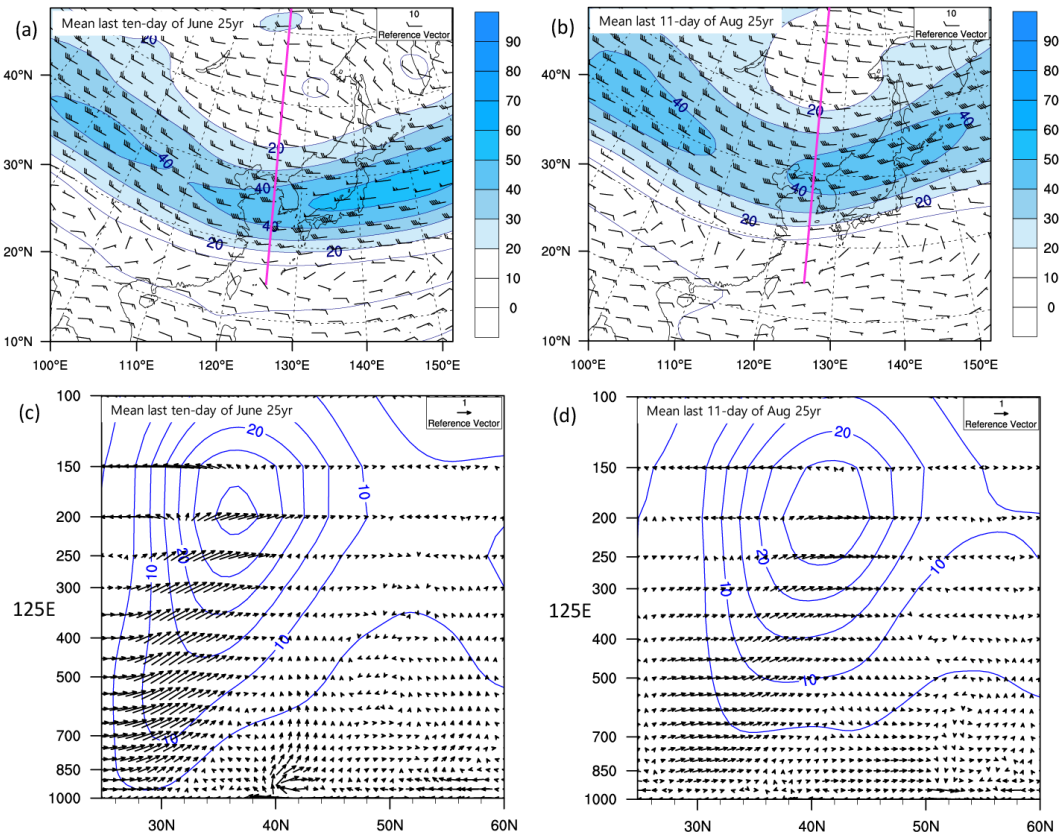

Fig. 8. Mean 25yr(1994−2018) last ten days of June/Aug zonal wind zonal wind(m s^{-1}) and ageostrophic meridional wind(m s^{-1}) and vertical component(Pa s^{-1}), vertical component multiply 10 times

3.4 전선 분석

3.2에서 우리나라의 6월과 8월 하순에는 온위의 meridional한 gradient보다 상당온위의 meridional한 gradient가 크게 나타남을 확인하였다. 상당온위의 연직구조에서 6월 하순에는 우리나라 남해안에 상당온위의 불안정 구역이 위치하고, 8월 하순에는 850hPa 아래 하층 영역에서 우리나라에 상당온위의 불안정 구역이 위치함을 분석하였다. 3.3에서 6월 하순의 25년 평균한

850hPa 하층 바람 성분이 우리나라 남해안에서 8월 하순보다 크게 나타남을 확인하였다. Petterssen(1956)은 Diabatic effect와 tilting effect를 제외하고 온위와 바람에 의한 온위선의 confluence와 difluence로 2D 평면에서 전선의 생성과 소멸을 정의한 바 있다($\mathrm{F} = \frac{1}{2}|\nabla\theta|\{Def\ \ cos2\beta - Div\}$, Def $= \left[(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y})^2 + (\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y})^2\right]^{\frac{1}{2}}$, $\beta =$ angle between the isentropes and the axis of dilatation). 그러나 우리나라의 6월과 8월 하순은 온위의 meridional gradient가 크지 않아서 상당온위를 사용한 frontogesis의 분석이 필요한데 Ninomiya(1984)는 Baiu에서 frontogesis를 분석함에 있어 θ_e 를 사용했을 때 전선 생성을 확인할 수 있음을 밝힌바 있다. 그 중 deformation에 의한 항이 가장 크게 작용하여 deformation에 의한 수식은 (FG3 $= -\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{|\nabla_e|}\cdot\left[\left\{\left(\frac{\partial\theta_e}{\partial x}\right)^2 - \left(\frac{\partial\theta_e}{\partial y}\right)^2\right\}A + 2\frac{\partial\theta_e}{\partial x}\cdot\frac{\partial\theta_e}{\partial y}\cdot B\right]$, $\mathrm{A} \equiv \frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{x}} - \frac{\partial v}{\partial y}$, $B \equiv \frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{x}} + \frac{\partial u}{\partial y}$)과 같다. Fig.9는 Petterssen Frontogenesis 2D(a, b)와 Ninomiya Frontogenesis 2D(c,d)를 사용하여 각각 6월과 8월 하순 25년 평균장의 defrormation에 의한 850hPa의 frontogensis를 보인 것이다. Fig.9에서 녹색 실선은 상당온위를 채색은 frontogenesis(K/100km/3h)의 크기를 의미한다. 6월과 8월 하순 모두 상당온위의 meridional gradient 가 크기 때문에 Ninomiya의 정의에 의한 상당온위를 사용한 frontogenesis를 사용하여 계산하였을 때 front 생성을 확인할 수 있다. 6월 하순에는 앞서 밝혔듯 850hPa의 하층 바람과 moisture flux의 convergence 구역이 위치하는 우리나라 남해안에서 전선 생성이 잘 나타나고, 8월 하순에는 대기 하층의 바람 성분이 작아서 6월 하순보다 우리나라에서 전선 생성이 약함을 확인할 수 있다. 8월 하순은 6월 하순보다 850hPa의 하층 바람 성분이 약하지만 우리나라 서해안과 동해안에 상당온위의

meridional한 gradient가 크기 때문에 전선이 약하게 생성됨을 알 수 있다.

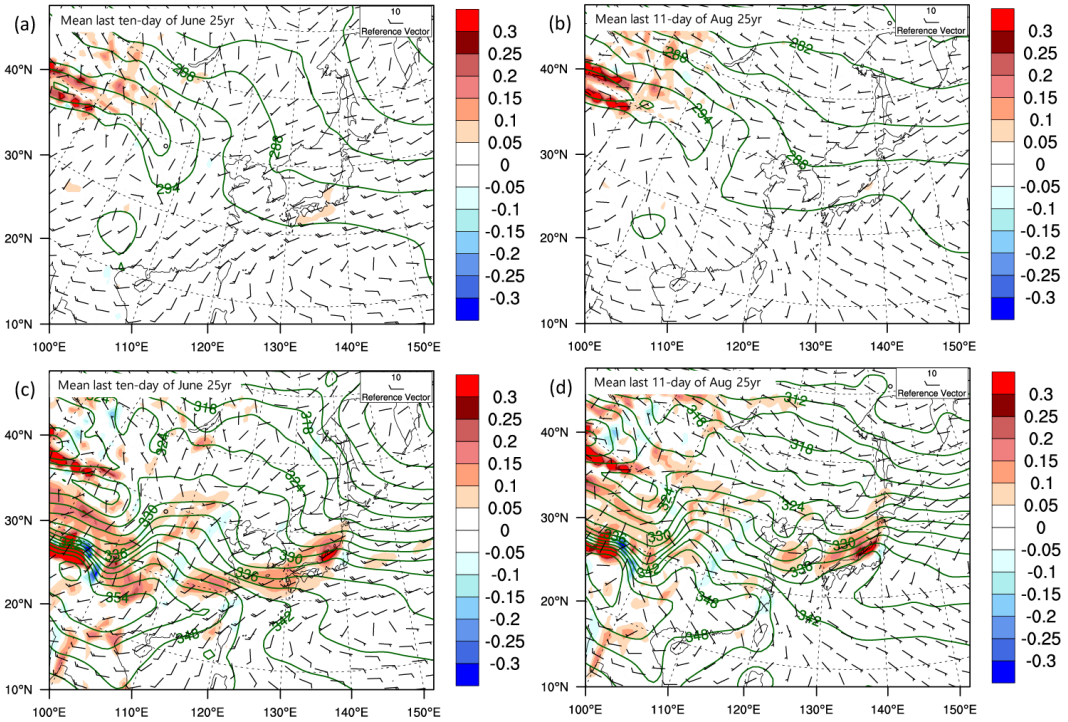

Fig. 9. Mean 25yr(1994-2018) last ten days of June/Aug 850hPa Petterssen Frontogenesis 2D, Ninomiya Frontogenesis 2D (K/100km/3h)

제4장. 2018년 6월과 8월 사례 특징

4.1 일기도 분석

3.1에서 6월과 8월 하순의 25년 평균 일기도 분석을 통해 6월 하순에는 북태평양 고기압이 우리나라 남쪽에 위치하여 북태평양 고기압 가장자리를 따라 바람 성분이 크게 나타나는 특성을 분석했다. 반면 8월 하순에는 북태평양 고기압이 일본 동쪽 해상으로 물러나 6월 하순에 비해 우리나라 남쪽에 지배

적으로 위치하지 않음을 확인했다. Fig.10은 2018년 6월과 8월 하순 정체전선 사례를 3일 평균한 지상 일기도이다. 2018년 6월 하순 정체전선 사례는 3.1의 6월 하순 평균 지상일기도와 같이 우리나라 남쪽으로 북태평양 고기압이 위치하고 우리나라 북쪽에는 닫힌 형태의 저기압이 위치하여 우리나라 남부 지역에서 남·북간의 기압 경도가 크게 형성되어 있음을 확인할 수 있다. 2018년 8월 사례의 경우 3.1의 8월 하순 평균 일기도에서 일본 동쪽으로 물러나 있던 북태평양 고기압이 우리나라 남동쪽으로 확장되어 있고, 중국 화남 지역에는 열대성 저기압(TD, Tropical Depression)이 위치하여 동쪽에 위치한 북태평양 고기압과 함께 우리나라 남쪽에서 동·서 간의 기압 경도를 크게 만들고 있다. 2018년 6월 정체전선 사례는 3.1에서 분석한 6월 하순의 평균 일기도와 비교하여 북태평양 고기압의 위치가 유사하고 북태평양 고기압 가장자리를 따라 기압 경도가 크게 나타나는 특성을 지니고 있지만, 2018년 8월 정체전선 사례는 3.1의 8월 하순 평균 일기도와 비교하여 우리나라 남쪽으로 북태평양 고기압이 확장되어 있고, 중국 화남 지역으로는 열대성 저기압이 위치하여 우리나라 남쪽에서 기압 경도를 크게 만드는 특성을 지니고 있다.

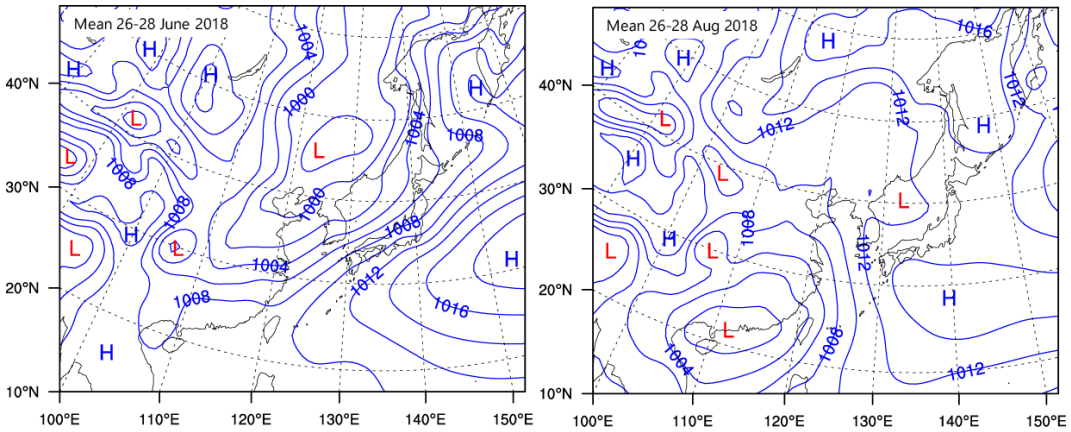

Fig.10. 2018 last ten days of June/Aug case surface weather chart

3.1의 6월과 8월 하순의 상·하층 평균 일기도에서 6월 평균의 하층일기도는 우리나라 남해안으로 북태평양 고기압 가장자리를 따라 나타나는 바람 성분이 강하고 상층으로는 우리나라에서 제트 기류의 max wind 지역이 위치하여 상·하층 간의 coupling에 의해 정체전선이 발달할 수 있는 구조를 갖고 있음을 확인하였다. 반면 8월 하순의 평균은 하층에서는 북태평양 고기압의 영향이 잘 나타나지 않고, 상층에서만 우리나라 쪽으로 max wind 구역이 위치하여 6월 하순의 평균에서 분석된 상·하층 간의 coupling이 나타나지 않았다. Fig.11은 2018년 6월과 8월 하순 정체전선 사례의 850hPa(a,b)과 300hPa(c,d) 일기도이다. 2018년 6월 하순 정체전선 사례는 3.1의 하층 일기도와 같이 북태평양 고기압이 우리나라 남쪽에 위치하여 북태평양 고기압 가장자리를 따라 우리나라 남서에서 북동으로 바람 성분이 크게 나타남을 확인할 수 있다. 6월 하순의 평균 일기도와 비교하여 2018년 6월의 정체전선 사례에서는 850hPa geopotential height의 경도가 우리나라 남해안에서 6월 하순의 평균보다 크게 나타남을 확인할 수 있다. 300hPa의 max wind 역시 2018년 6월 정체전선 사례는 6월 하순의 평균보다 북상하여 우리나라 중부 지역에 위치한다. 반면, 2018년 8월 정체전선 사례는 3.1의 평균 850hPa 일기도보다 우리나라 남쪽에서 북태평양 고기압과 열대성 저기압에 의해 geopotential height의 경도가 크게 나타나고 그로 인해 남풍 계열의 바람이 강했다. 2018년 8월 정체전선 사례의 300hPa max wind 지역은 8월 하순의 평균과 같이 우리나라 북쪽에 나타났다. 2018년 6월 사례는 6월 하순의 평균 일기도와 비교하여 850hPa과 300hPa의 max wind 구역이 우리나라 쪽으로 북상하여 위치하여 있음을 알 수 있다. 2018년 6월의 정체전선은 우리나라에서 6월 하순 평균보다 하층과 상층의 max wind 지역이 북상하여 위치하고, 2018년 8월의 정체전선은 8월 하순 평균보다 우리나라 남부 지역에서

850hPa 바람이 강하게 분석됐다.

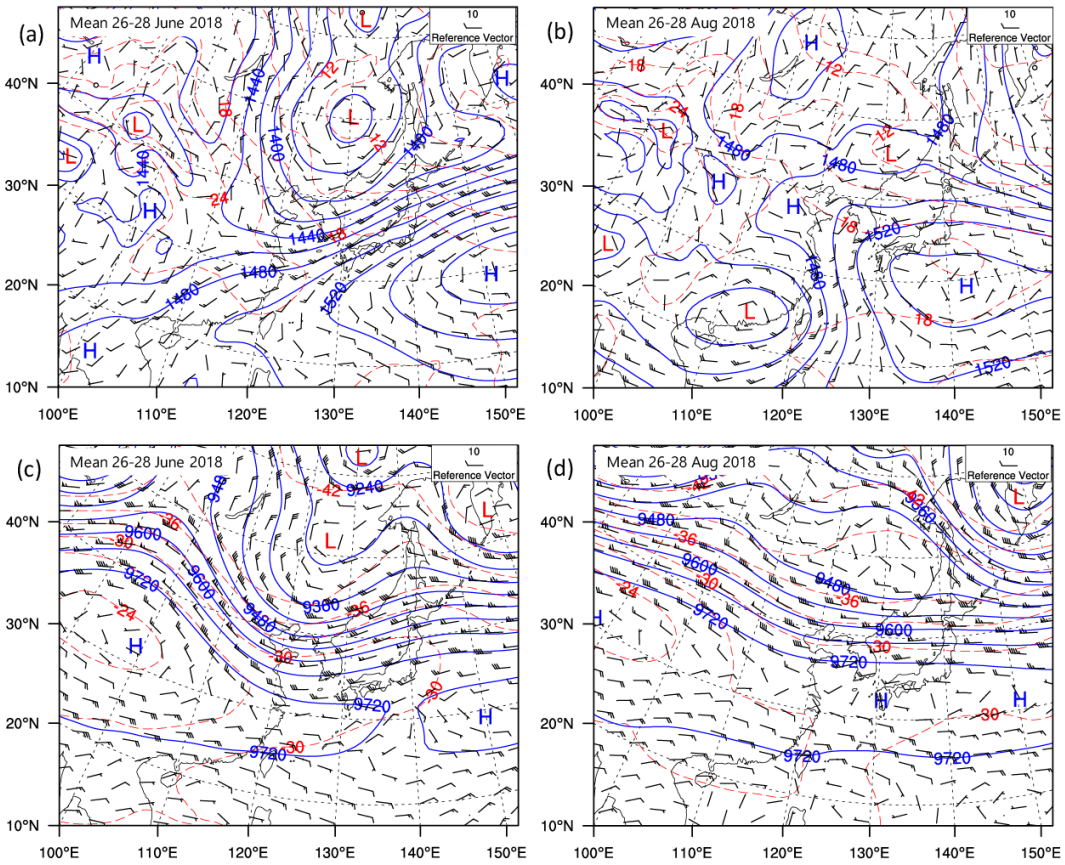

Fig.11. 2018 last ten days of June/Aug case 850hPa, 300hPa weather chart

4.2 온도 및 습도 분석

3.2의 6월과 8월 하순의 온위와 상당온위의 평균값에서 6월과 8월 하순은 온위보다 상당온위의 meridional한 gradient가 크게 나타나는 시기임을 확인하였다. 6월 하순의 평균은 우리나라 남해안에서 8월 하순의 평균은 우리나라 서해안과 동해안에서 상당온위의 gradient가 크게 나타났다. Fig.12는 2018년 6월과 8월 하순 정체전선 사례의 3일 평균한 온위(a,b)와 상당온위(a,b)

값을 나타낸 것이다. 2018년 6월과 8월 사례에서도 우리나라에서 온위보다 상당온위의 meridional gradient가 크게 나타남을 확인할 수 있다. 다만 2018년 6월과 8월 정체전선 사례를 3.2의 평균값과 비교했을 때는 2018년 6월 사례는 평균보다 상당온위 gradient가 큰 지역이 북상하여 우리나라 서해안과 중국 화북지역에서 나타나며, 2018년 8월 사례는 25년 8월 하순 평균과 상당온위 gradient가 큰 지역의 위치가 비슷하지만 우리나라 중부 지역에서 상당온위 경도의 크기가 매우 크게 나타남을 알 수 있다.

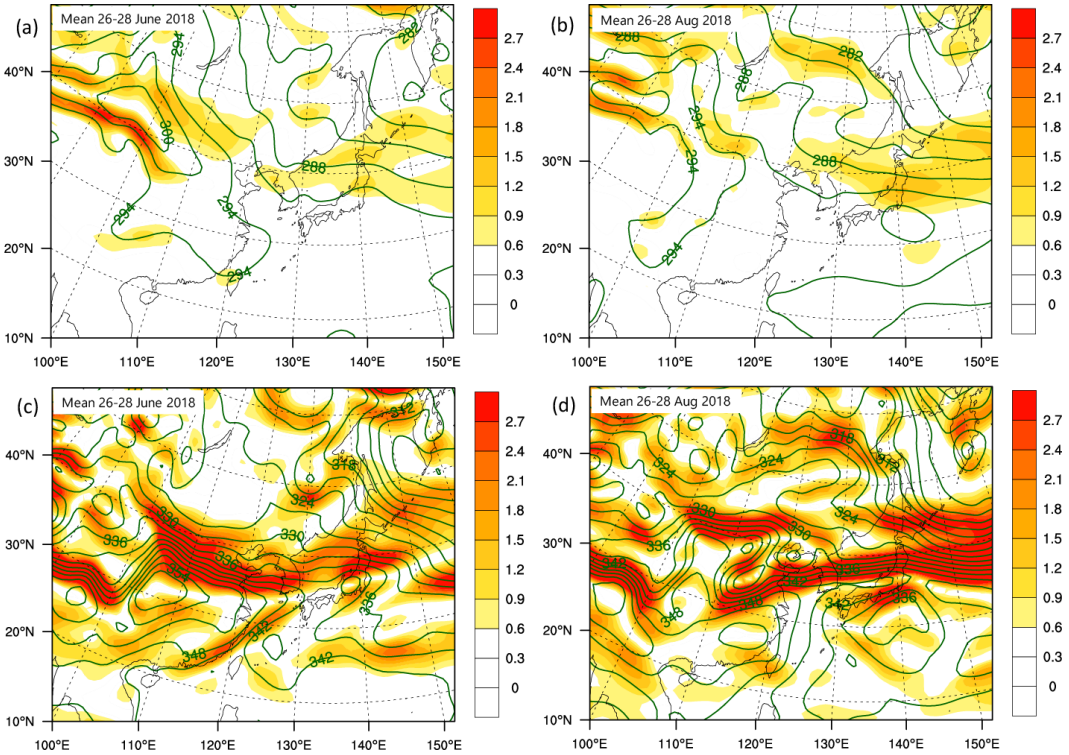

Fig. 12. 2018 last ten days of June/Aug case 850hPa θ and θ_e meridional gradient K (deg lat)$^{-1}$

앞서 3.2의 moisture flux의 6월과 8월 하순의 평균값에서 6월 하순에는

우리나라 남해상에 moisture flux convergence 구역이 위치하고, 8월 하순에는 moisture flux가 6월 하순보다 약하고 moisture flux convergence 구역도 우리나라 남쪽에서 6월 하순보다 약하게 나타남을 확인하였다. Fig.13은 2018년 6월과 8월 하순의 moisture flux(화살표)와 moisture flux convergence(녹색 채색)를 나타낸 것이다. 2018년 6월 하순 사례는 우리나라 남서에서 북동 방향으로의 moisture flux가 잘 나타나는데 3.2의 평균값과 비교하여 moisture flux와 moisture flux convergence 구역이 남해안과 우리나라 남부 지역을 중심으로 뚜렷이 나타난다. 2018년 8월 하순 사례는 우리나라 남쪽에서 북동 방향으로 moisture flux의 이동이 잘 나타나는데 moisture flux convergence 구역은 우리나라 중부지역에서 크게 나타난다. 2018년 6월 하순 정체전선 사례는 우리나라의 서쪽에서 동쪽으로 움직이는 moisture에 의해 형성되었고, 2018년 8월 하순 정체전선은 우리나라 남쪽에서 북동쪽으로 이동하는 moisture에 의해 영향을 받았음을 알 수 있다.

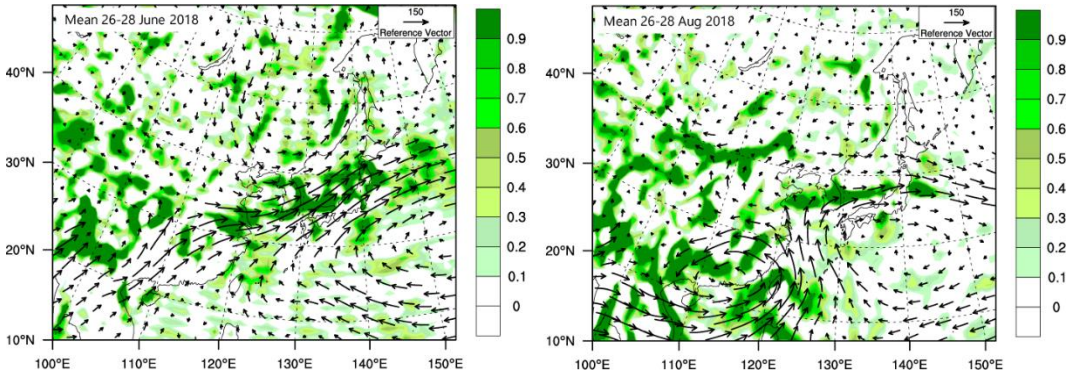

Fig. 13. 2018 last ten days of June/Aug case 850hPa moisture flux ($g\ kg^{-1} \cdot m\ s^{-1}$) and its convergence ($g\ kg^{-1} \cdot 10^{-4} s^{-1}$)

3.2에서 6월과 8월 하순의 상당온위의 연직 분포는 6월 하순에는 우리나라

남해상에 상당온위의 불안정 구역이 위치하고, 8월 하순에는 우리나라 전 영역에 상당온위의 불안정 구역이 위치하지만 850hPa 아래의 대기 하층 영역에서 주로 상당온위의 불안정 구역이 위치함을 확인하였다. Fig.14는 경도 125E를 기준으로 2018년 6월과 8월 하순 사례를 3일 평균한 moisture flux(화살표)와 상당온위(녹색 실선), 상당온위의 meridional vertical gradient(채색)를 나타낸 것이다. 2018년 6월과 8월 사례 모두 우리나라 남부 지역(위도 35N)에서 moisture flux의 수렴 구역이 위치하는데 850hPa 아래의 대기 하층 영역에서 moisture flux 크기가 크게 나타남을 알 수 있다. 2018년 6월 하순 사례는 3.2의 6월 하순의 상당온위 평균값과 비교하여 상당온위의 불안정 구역이 우리나라 남해상에서 우리나라 남부 지역(위도 35N)까지 북상하였음을 보여준다. 2018년 8월 하순 사례는 우리나라 남부 지역에 상당온위의 불안정 구역이 위치하는데 우리나라 중부 및 북부 지역(위도 35N 북쪽)에서는 상당온위의 연직적인 중립 구역이 2018년 6월 사례보다 뚜렷하게 분석된다는 것을 알 수 있다. 2018년 8월 하순 정체전선 사례는 우리나라 남부 지역(위도 35N)에서 moisture의 수렴이 강하게 발생하는데, 위도 35N 남쪽으로는 상당온위의 불안정 구역이 북쪽으로는 연직적인 중립 지역이 위치하여 있어 위도 35N 에서 연직적인 moisture의 상승운동이 발생함을 알 수 있다. 즉 2018년 6월과 8월 하순 정체전선을 발생시키는 기상학적 원인은 대기 하층에 존재하는 moisture의 수렴과 상당온위의 불안정 구역이 겹쳐서 나타나는 것인데, 2018년 8월 사례는 위도 35N 북쪽에서 상당온위의 연직적인 중립 구역이 매우 크게 나타나 moisture의 연직적인 상승도 크게 나타난다는 것을 알 수 있다.

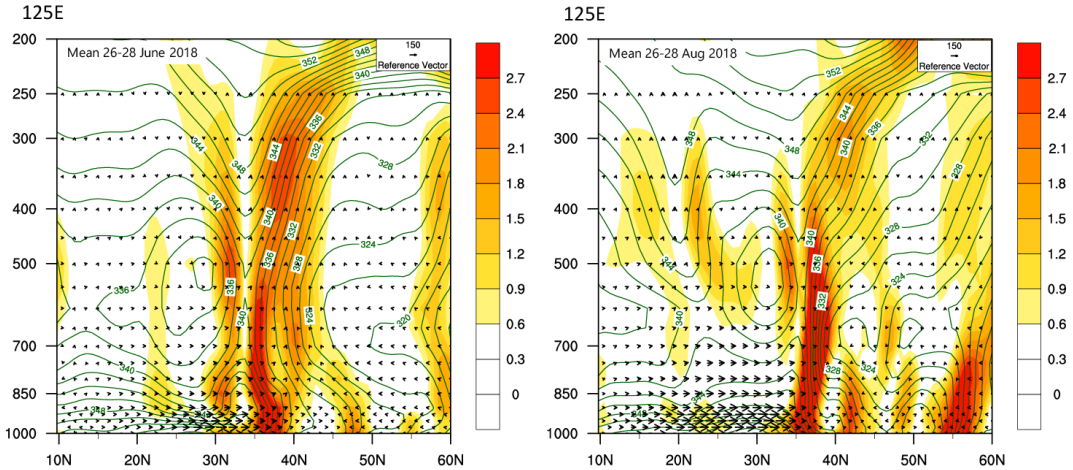

Fig. 14. 2018 last ten days of June/Aug case vertical moisture flux ($g\ kg^{-1} \cdot m\ s^{-1}$) and θ_e meridional gradient K $(deg\ lat)^{-1}$, vertical component ($Pa\ s^{-1}$), vertical component multiply 10 times

4.3 바람 성분 분석

3.3의 6월 하순 평균장에서 우리나라 남해상에서 하층 바람 성분이 크게 나타나고 상층에는 우리나라 남부 지역에서 제트의 max wind가 분포하여 우리나라 남해안에서 비지균풍에 의한 연직 상승 운동이 발생한다는 것을 확인하였다. 반면 8월 하순 평균은 대기 하층의 바람 성분이 약해서 비지균풍에 의한 연직 상승 운동이 6월 하순의 평균처럼 뚜렷이 나타나지 않았다. Fig.15는 2018년 6월과 8월 하순의 300hPa 바람 성분(a, b), 비지균풍(c,d 의 화살표), 연직적인 zonal wind 성분의 풍속(파란색 실선)을 나타낸 것이다. 2018년 6월 정체전선 사례는 6월 하순의 평균값에 비해 우리나라 남해안과 남부 지역에서 하층 바람 성분이 크게 나타나고 우리나라 중부 지역에 제트기류의 max wind 지역에 위치하여 우리나라 남부 및 중부 지역에서 비지균 성분에 의한 연직 상승 운동이 잘 나타난다. 2018년 8월 정체전선 사례는 8월

하순 평균에 비해 우리나라 남부 지역에서 대기 하층의 바람 성분이 더 크게 나타나며, 상층 제트의 max wind 구역은 우리나라 북부 지역에 분석된다. 2018년 8월 정체전선 사례는 우리나라 남부 지역(위도 35N)에서 비지균풍에 의한 상승운동이 잘 나타나는데 주로 대기 하층에서 비지균풍에 의한 상승운동이 있음을 알 수 있다. 이는 2018년 6월 사례가 하층-상층 대기가 함께 연직 상승 운동을 만드는 형태인데 비해 2018년 8월 사례는 주로 대기 하층에서의 비지균 성분이 연직 상승운동에 관여함을 알 수 있다.

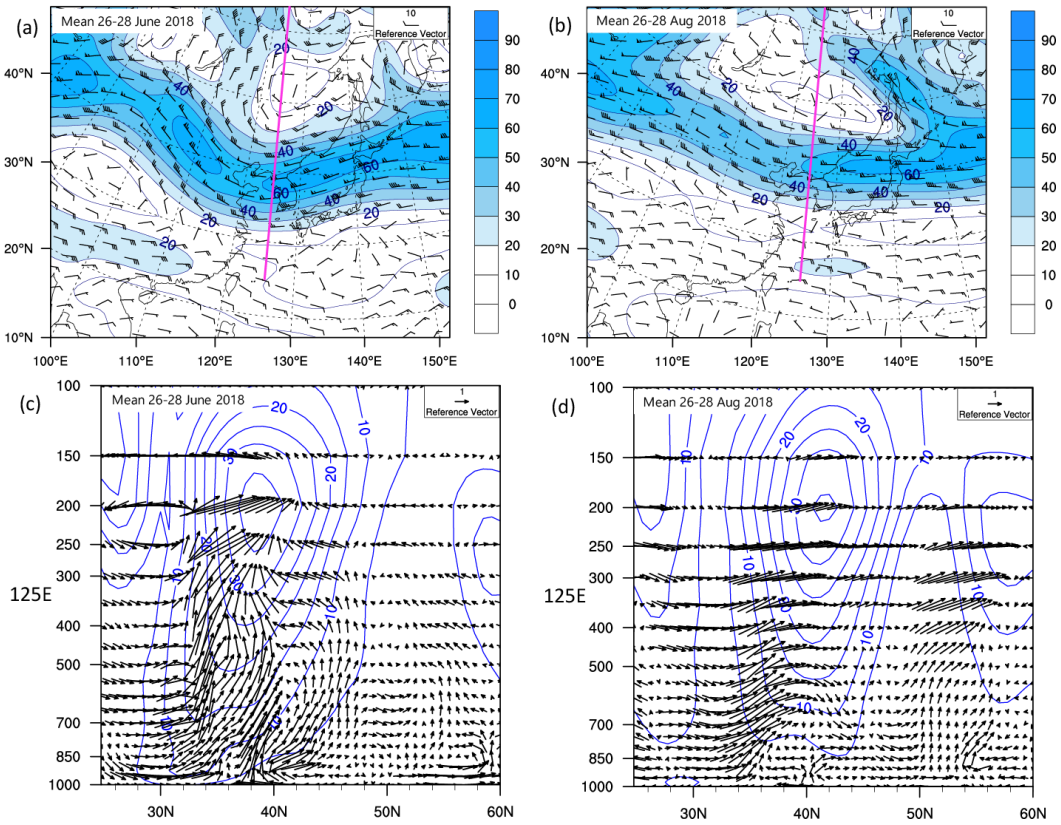

Fig. 15. 2018 last ten days of June/Aug case zonal wind(m s^{-1}) and ageostrophic meridional wind(m s^{-1}) and vertical component (Pa s^{-1}), vertical component multiply 10 times

4.4 전선 분석

3.4에서 6월과 8월 하순은 우리나라에서 온도보다 습도에 의한 gradient가 크게 나타나기 때문에 온위를 사용하여 전선을 분석한 Petterssen Frontogenesis 2D(1956)보다 상당온위를 사용한 Ninomiya Frontogenesis 2D(1984)를 사용하였을 때 defrormation에 의한 frontogenesis 가 잘 분석됨 확인하였다. Fig.16은 Ninomiya Frontogenesis를 사용하여 2018년 6월과 8월 하순의 850hPa에서 전선 생성을 확인한 것이다. 앞서 2018년 6월의 정체전선 사례는 6월 하순의 평균값에 비해 북태평양 고기압 가장자리를 따라 나타나는 moisture의 수렴 구역이 우리나라 남부 지역으로 북상하여 위치함을 확인하였다. 상당온위를 사용하여 전선을 분석한 결과에서도 2018년 6월에는 우리나라의 남부 지역과 동해안에서 전선 생성이 크다는 것을 확인하였다. 2018년 8월의 정체전선 사례는 대기 하층 영역에서 우리나라 남부 지역을 중심으로 moisture flux의 수렴 구역이 크게 나타났었는데 front는 moisture flux 수렴 구역 위쪽인 우리나라 중부 및 북부 지역에서 잘 발생한다는 것을 보여준다. 2018년 6월 하순의 정체전선은 우리나라 서쪽에서 동쪽으로 이동하는 바람 성분이 우리나라에서 남북으로 경도가 크게 나타나는 상당온위선을 동·서로 신장시키면서 전선이 발생하고, 2018년 8월 하순의 정체전선은 우리나라 남쪽에서 북동쪽으로 수증기가 이동하면서 우리나라 중부 지역에 매우 조밀하게 위치한 상당온위선을 동·서로 신장시키면서 전선이 생성된다. 즉, 전선 발생에 있어 우리나라에서 남·북으로 상당온위의 gradient가 크게 위치하는 것도 중요하지만 우리나라에서 상당온위 경도가 남·북으로 큰 지역을 하층에서의 바람이 수평적으로 얼마나 동·서로 신장시켜줄 수 있는지도 매우 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

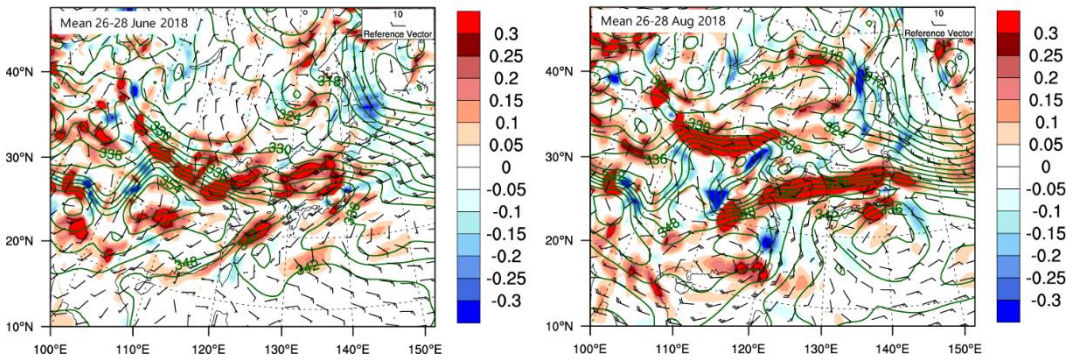

Fig.16. 2018 last ten days of June/Aug case θ_e Frontogenesis 2D (K/100km/3h)

제5장. 2018년 8월 사례와 8월 정체전선 유사 사례

5.1 2018년 8월 정체전선 유사 사례 선정

2.1에서 2018년 6월과 8월의 정체전선 사례를 선정함에 있어 25년(1994-2018)간 정체전선의 영향으로 6월과 8월 하순에 집중호우가 발생한 사례들을 확인하였다. 이러한 25년간의 정체전선에 의한 집중호우 사례에서 ERA-interim의 geopotential을 변수로 사용하고 2018년 6월과 8월 사례를 기준으로 하여 각 사례들과 3일간의 pattern correlation을 수행하고 그 평균값을 산출하여 2018년 6월과 8월의 정체전선 사례와 유사한 사례는 얼마나 발생하였는지 확인하였다. 8월 하순의 정체전선에 의한 집중호우 사례는 6월 하순에 비해 발생빈도가 작고 2018년 6월 사례와 같이 정형화된 유사성이 나타나지 않았다. 3장에서 8월 하순의 기상학적 평균 특성을 분석하였을 때도 6월 하순에 비해 8월 하순에는 북태평양 고기압의 세력이 축소되어 종관환경에서 정체전선이 형성되기 어려운 환경임을 확인하였다. 다만 2018년 8월 하순에 정체전선으로 인해 집중호우가 발생한 사례는 8월 하순에 발생한 정체

전선 사례 중 발생 빈도수가 가장 많은 유형에 속해 있어 8월 하순 정체전선 사례 중 2018년 8월 하순의 정체전선 사례와 correlation이 높았던 사례들을 분석하면 8월 하순에 정체전선을 발생시키는 기상학적 원인을 찾아낼 수 있다. 8월 하순에 2018년 8월의 사례를 기준으로 geopotential을 활용한 3일간의 pattern correlation을 수행하였을 때 correlation이 0.6이상 이었던 사례는 총 10개가 있었다. 각 사례는 1995년 8월 20일, 1995년 8월 25일, 1995년 8월 30일, 1999년 8월 21일, 2000년 8월 24일, 2003년 8월 20일, 2003년 8월 23일, 2003년 9월 2일, 2010년 8월 23일, 2014년 8월 20일이다.

5.2 2018년 8월 하순 유사 사례 일기도 분석

4.1에서 2018년 8월 하순 정체전선 사례는 8월 하순의 평균 지상 일기도에 비해 북태평양 고기압이 우리나라 남동 해안까지 확장되어 영향을 주었고, 그로 인해 우리나라 남해안에서 중국 화남 지역의 열대성 저기압과 북태평양 고기압 사이에서 동·서간의 기압 경도가 크게 발생함을 확인하였다. 5.1 에서 pattern correlation을 통해 2018년 8월 정체전선 사례와 correlation이 높았던 10개의 사례를 선정하여 10개 사례에 대한 평균값을 계산했다. Fig.17은 2018년 8월 하순의 정체전선 사례(좌측)와 2018년 8월 하순 유사 사례 10가지를 평균한 지상 일기도이다. 2018년 8월 하순 유사 사례의 평균 일기도는 2018년 8월 하순 정체전선 사례와 같이 우리나라 남동해안까지 북태평양 고기압이 위치하여 영향을 주고 있음을 할 수 있다. 2018년 8월 하순의 유사 사례에서 우리나라 남해안이 북태평양 고기압 가장자리에 위치하여 전반적인 기압 배치가 2018년 8월 하순 정체전선 사례와 유사함을 알 수 있다.

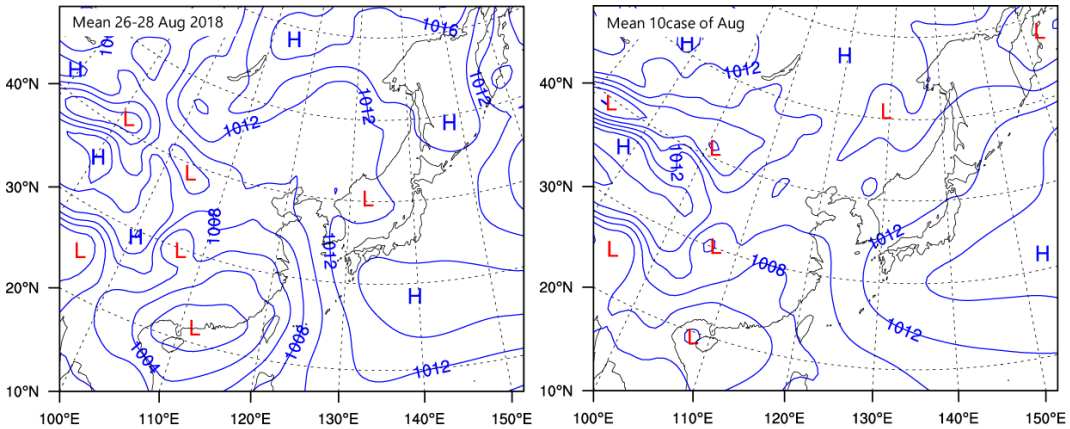

Fig.17. 2018 last ten days of Aug case and mean 10 case on last ten days of Aug surface weather chart

4.1에서 2018년 8월 하순 정체전선 사례는 우리나라 남동쪽에 위치한 북태평양 고기압과 중국 화남 지역에 위치한 열대 저기압 사이에서 우리나라 남해안을 중심으로 동·서 간의 기압 경도가 크게 나타나고 그로 인해 남풍 계열의 하층 바람이 크게 나타남을 확인하였다. Fig.18은 2018년 8월 하순 정체전선 사례와 2018년 8월 하순 유사 사례의 850hPa 일기도(a,b)와 300hPa 일기도를 나타낸 것이다. 850hPa 일기도에서 2018년 8월 하순 유사 사례는 2018년 8월 하순 사례와 같이 북태평양 고기압 고기압을 따라 우리나라에서 남풍 계열의 하층 바람 성분이 크게 나타남을 확인할 수 있다. 300hPa 일기도 역시 2018년 8월 유사 사례의 평균에서도 우리나라 북부 지역을 중심으로 제트의 max wind 구역이 위치함을 확인할 수 있다. 따라서 2018년 8월 유사 사례에서는 2018년 8월 사례와 같이 우리나라 중부 지역에서 하층 바람 성분의 수렴과 상층 바람 성분의 발산이 잘 이루어짐을 확인할 수 있다.

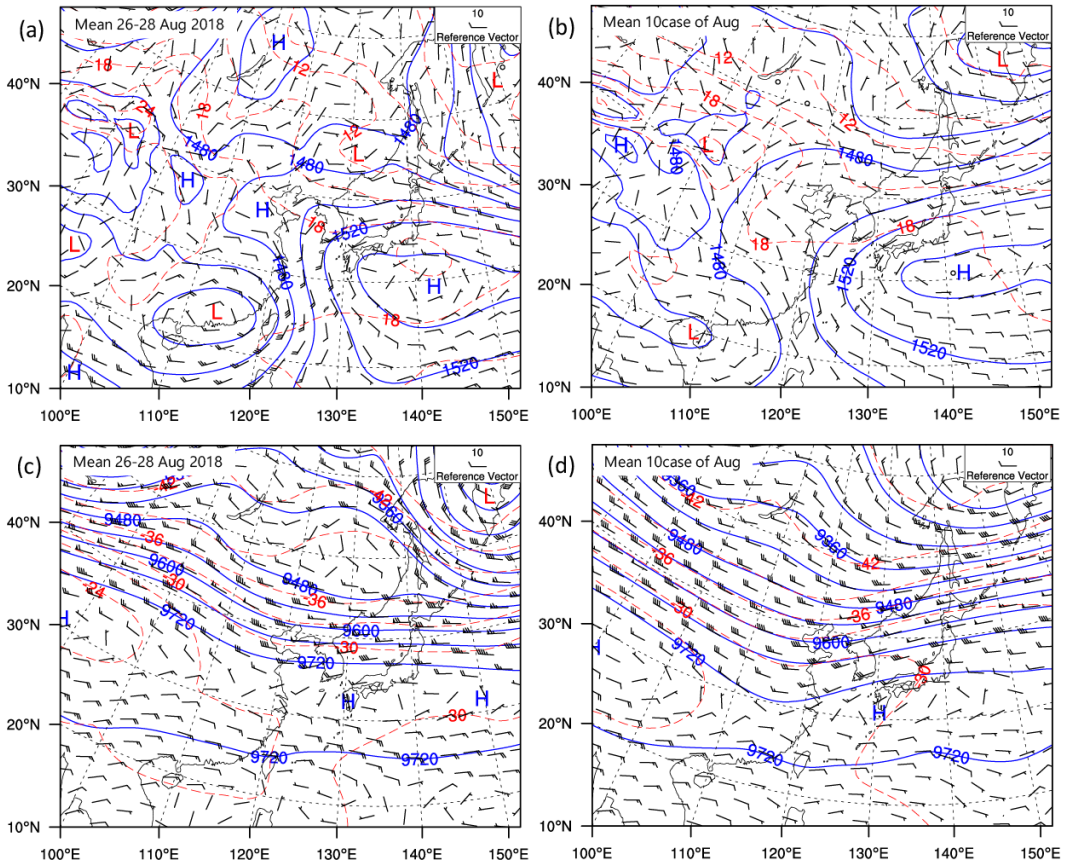

Fig.18. 2018 last ten days of Aug case and mean 10 case on last ten days of Aug 850hPa, 300hP weather chart

5.3 2018년 8월 하순 유사 사례 온도 및 습도 분석

4.2에서 2018년 8월 하순 정체전선 사례는 8월 하순의 평균보다 우리나라에서 상당온위의 meridional gradient가 매우 크게 나타나는 특성을 갖고 있음을 확인하였다. Fig.19는 2018년 8월 하순 사례와 2018년 8월 하순 유사 사례의 온위(a,b)와 상당온위(c,d)의 meridional gradient(채색)를 나타낸 것이다. 2018년 8월 하순 유사 사례의 평균값에서 2018년 8월 사례와 같이 우

리나라에서 온위보다 상당온위의 gradient가 크게 나타남을 확인할 수 있다.

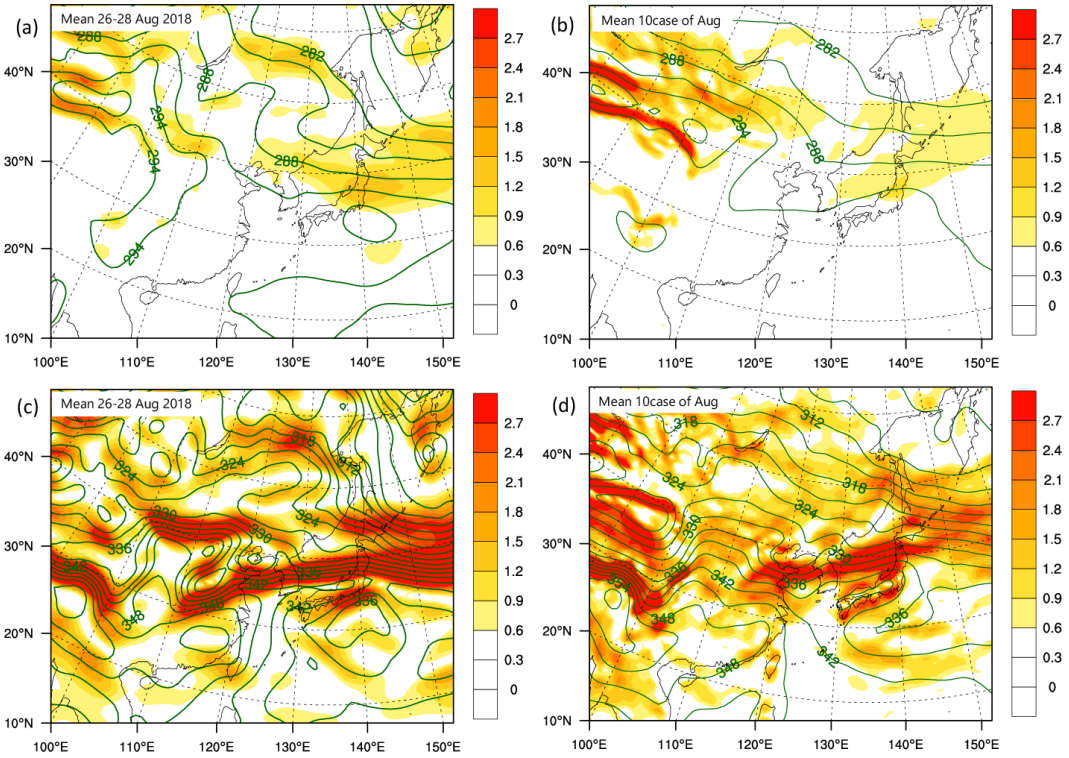

Fig. 19. 2018 last ten days of Aug case and mean 10 case on last ten days of Aug θ and θ_e meridional gradient K (deg lat)$^{-1}$

4.2.에서 2018년 8월 하순 정체전선 사례는 우리나라 남쪽에서 북동쪽 방향으로 moisture flux가 크게 나타나며 그로 인해 우리 나라 중부 지역에서 moisture flux convergence 구역이 위치함을 확인하였다. Fig.20은 2018년 8월 사례와 2018년 8월 유사 사례의 moisture flux와 moiture flux convergence를 나타낸 것이다. 2018년 8월 유사 사례는 2018년 8월 사례와 같이 북태평양 고기압 가장자라를 따라 우리나라 남쪽에서 북동쪽으로 moisture flux의 크기가 크게 나타남을 확인할 수 있다. 다만 moisture flux

convergence 구역에 있어서는 우리나라 중부지역에서 moisture flux convergence의 max가 나타났던 2018년 8월 정체전선 사례에 비해 2018년 8월 하순 유사사례는 우리나라 동해안에서 moisture flux convergence의 max가 나타남을 확인할 수 있다.

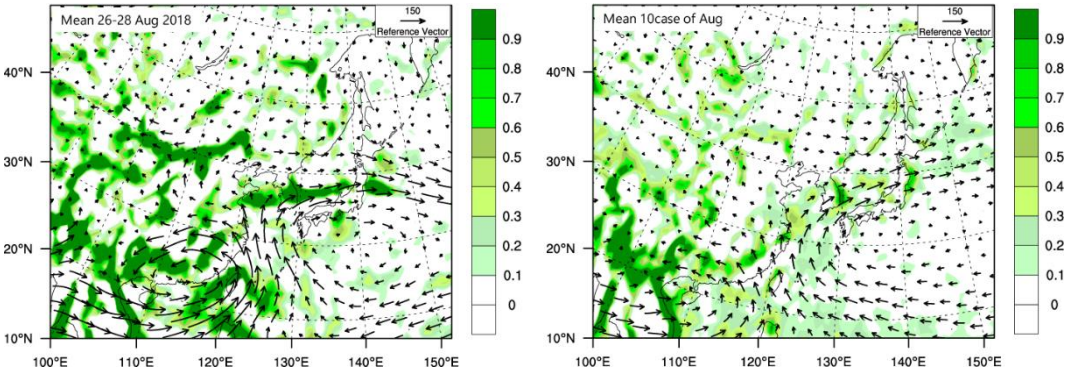

Fig. 20. 2018 last ten days of Aug case and mean 10 case on last ten days of Aug moisture flux($g\ kg^{-1} \cdot m\ s^{-1}$) and its convergence ($g\ kg^{-1} \cdot 10^{-4} s^{-1}$)

4.2.에서 2018년 8월 하순 정체전선 사례는 3.2의 8월 하순 평균값에 비해 우리나라 중부지역(위도 35N 북쪽)에 상당온위의 중립(연직적인 온도 변화가 없는)구역이 위치하고 우리나라 남부 지역에 상당온위의 불안정 구역(대기 하층에 상당온위값이 높게 나타나는)이 뚜렷이 나타남을 확인하였다. Fig.21은 2018년 8월 사례와 2018년 8월 유사 사례 평균의 moisture flux(화살표)와 상당온위(녹색 실선)의 연직분포 및 gradient(채색)를 나타낸 것이다. 2018년 8월 유사 사례는 2018년 8월 사례와 같이 우리나라 남부 지역에서 850hPa 아래의 하층 영역에서 moisture flux가 크게 나타남을 알 수 있다. 다만 상당온위의 중립 구역이 2018년 8월 사례와 비교하여 우리나라 중북 및 북부 지역에 위치하고 상당온위의 불안정 구역이 2018년 8월 사례

보다 북쪽인 우리나라 중부 지역까지 분석됨을 알 수 있다. 그러나 전반적인 moisture flux의 수렴 구역이 850hPa 아래의 대기 하층 영역에서 이루어지며, 우리나라 남부 지역을 중심으로 대기 하층에 불안정 구역이 크게 위치하는 공통적인 특성을 지니고 있다. 이를 통해 앞서 850hPa의 moisture flux convergence 구역이 위치하는 우리나라 중부 지역에서 moisture의 급격한 변화가 이루어지고 상당온위의 meridional gradient 역시 연직적으로 우리나라 중부 지역에서 매우 크게 나타남을 알 수 있다.

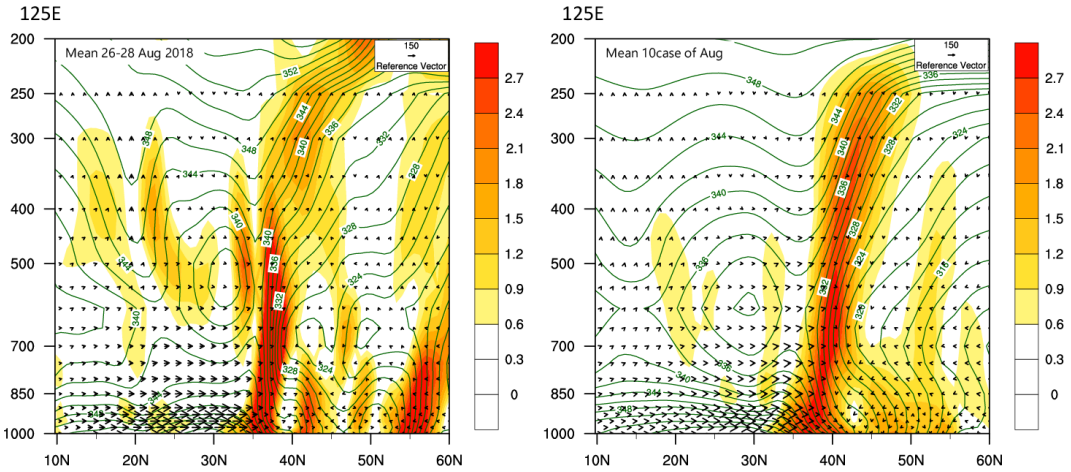

Fig. 21. 2018 case and mean of 10case Aug vertical moisture flux ($g\ kg^{-1} \cdot m\ s^{-1}$) and θ_e meridional gradient K $(deg\ lat)^{-1}$, vertical component ($Pa\ s^{-1}$), vertical component multiply 10 times

5.4 2018년 8월 하순 유사 사례 바람 성분 분석

4.3에서 2018년 8월 하순 사례는 8월 하순의 평균값에 비해 우리나라 남부 지역에서 대기 하층의 바람 성분이 크게 나타나며 비지균풍에 의한 상승운동도 우리나라 남부 지역에서 크게 나타남을 확인하였다. 300hPa 제트의 max wind 구역은 우리나라 북부 지역에 위치하여 있어서 주로 대기 하층의

바람 성분의 수렴으로 비지균풍에 의한 대기의 연직 상승 운동이 발생함을 확인하였다. Fig.22는 2018년 8월 사례와 2018년 8월 유사 사례를 평균한 300hPa 바람성분(a,b), zonal wind speed 및 meridionla한 ageostrphic wind 성분(c,d)을 나타낸 것이다. 2018년 8월 유사 사례는 2018년 8월 정체전선 사례보다 우리나라 남해안에서 대기 하층의 풍속 성분이 강하게 나타나며, 2018년 8월 사례와 같이 대기 하층에서 ageostrphic wind에 의한 vertical한 상승 운동이 잘 나타남을 확인할 수 있다.

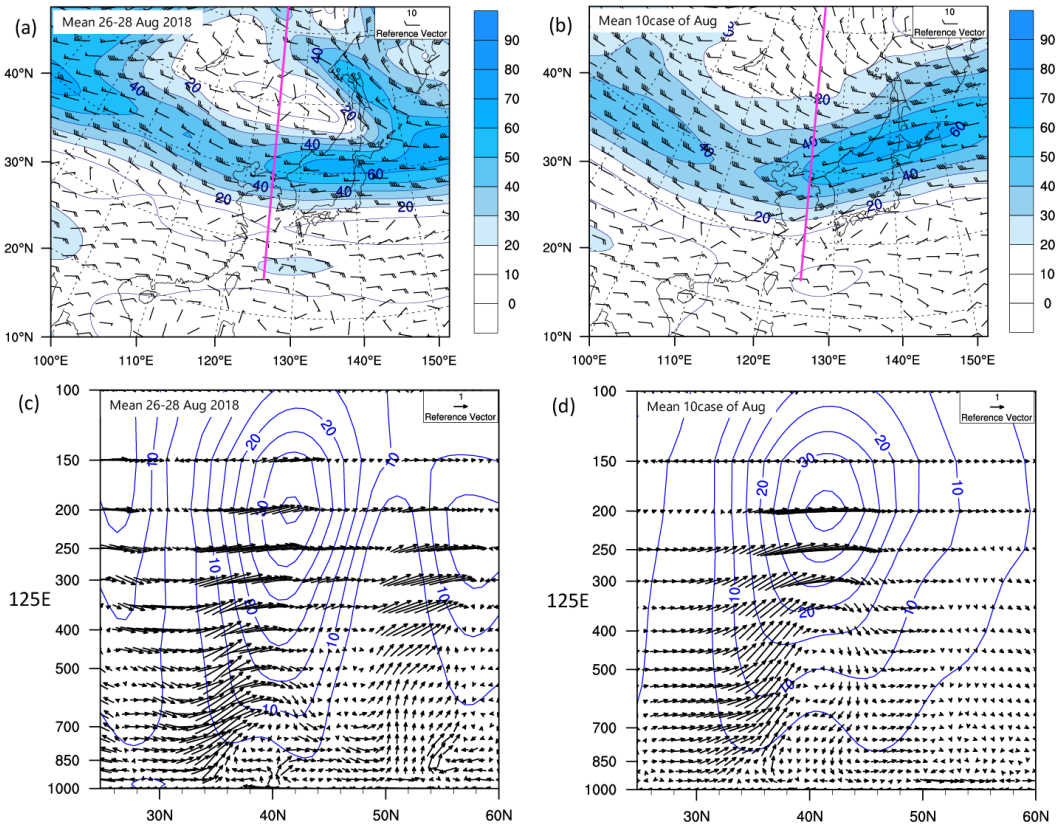

Fig. 22. 2018 case and mean of 10case Aug zonal wind(m s^{-1}) and ageostrophic meridional wind(m s^{-1}) and vertical component (Pa s^{-1}), vertical component multiply 10 times

5.5 2018년 8월 하순 유사 사례 전선 분석

4.4.에서 2018년 8월 하순 사례는 우리나라 중부 지역에서 상당온위의 meridional한 경도가 가장 크게 나타나며, 상당온위 경도가 큰 지역에서 대기 하층의 바람 성분이 강하게 나타나 우리나라에서 동·서 방향의 front가 생성됨을 확인하였다. Fig.23은 2018년 8월 하순의 정체전선 사례와 2018년 8월 하순 유사 사례 평균장의 850hPa에서 상당온위를 사용하여 2D 평면에서 deformation에 전선 생성을 나타낸 것이다. 2018년 8월 하순 유사 사례 평균은 2018년 8월 하순 사례와 같이 우리나라 중부 지역에서 상당온위의 meridional한 경도가 최대로 나타나며, 북태평양 고기압 가장자리를 따라 우리나라 남쪽에서 북동쪽으로 부는 850hPa 바람 성분에 의한 상당온위 경도가 큰 지역이 동·서로 신장되는 특성을 갖고 있다. 그로 인해 2018년 8월 하순 사례와 같이 우리나라 중부 지역에서 동·서 방향으로 전선 생성이 최대로 나타남을 확인할 수 있다.

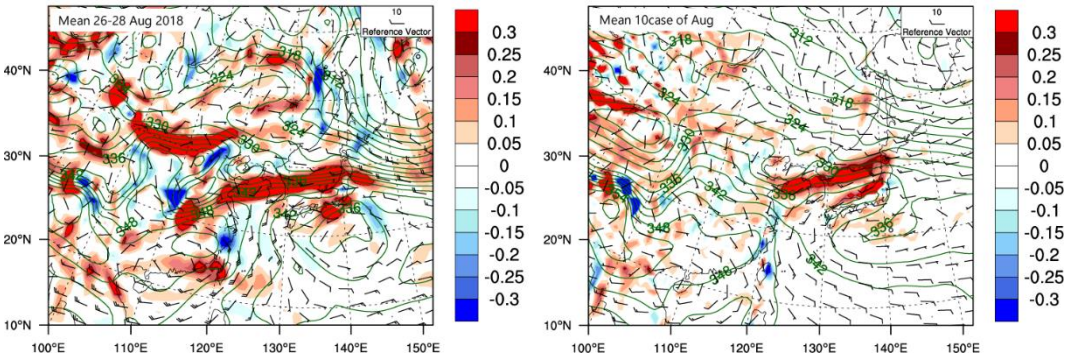

Fig. 23. 2018 case and mean of 10case Aug θ_e Frontogenesis 2D (K/100km/3h)

제6장. 요약 및 결론

본 연구는 여름철 집중호우 시스템 중 2018년 6월과 8월에 발생한 정체전선 사례를 중심으로 6월과 8월 하순에 정체전선에 의해 발생하는 집중호우의 특성을 확인하기 위해 수행되었다.

먼저 2장에서는 6월과 8월 하순에 정체전선에 의한 집중호우를 사례를 선정하고 그 중에서 2018년 6월과 8월에 있었던 정체전선 사례와 유사한 사례가 얼마나 되는지를 pattern correlation을 사용하여 확인하였다. 2018년 6월과 8월 사례를 기준으로 850hPa의 geopotential을 사용하여 25년간 6월과 8월 하순에 발생했던 정체전선 사례와 correlation이 0.6이상이었던 사례를 유사 사례로 선정하였는데 그 결과 2018년 6월 사례는 6월 하순의 총 59개의 정체전선 사례 중 53개 사례가 2018년 8월 사례는 8월 하순의 총 22개의 정체전선 사례 중 11개 사례가 유사성이 있음을 확인하였다. 즉 2018년 6월의 정체전선 사례는 매년 발생하며 각 사례간에 유사성이 매우 높은 특징을 갖고 있지만, 2018년 8월 정체전선 사례는 매년 발생하지 않으며 각 사례간에 유사성도 6월에 비해 높지 않음을 확인하였다. 그러나 2018년 8월의 정체전선 사례는 8월 정체전선 사례 중 발생 빈도가 가장 높게 나타나는 사례로 2018년 8월 사례와 유사성이 높은 사례라 판단하여 8월 하순에 정체전선이 발달하는 특징을 살펴보았다.

3장에서는 6월과 8월의 종관환경 분석을 위해 6월과 8월 하순의 25년 평균한 지상일기도, 온위와 상당온위, moisture flux convergence, 상 · 하층의 ageostrophic한 풍속 성분을 분석하고 마지막으로 Ninomiya의 상당온위를 사용한 전선 분석 방법에 의해 frontogenesis 분석을 실시하였다. 분석 결과

6월 하순의 25년 평균장은 우리나라 남쪽으로 북태평양 고기압의 영향이 뚜렷이 나타나고 북태평양 고기압 가장자라리를 따라 나타나는 하층 바람에 의한 moisture flux convergence가 잘 나타남을 확인하였다. 또한 우리나라 남부 지역을 중심으로 300hPa 상층 제트의 max wind가 위치해 있어서 우리나라 남해안에서 대기 하층 바람 성분의 수렴과 상층 바람 성분의 발산으로 비지균풍에 의한 상승 운동이 있음을 확인하였다. 반면 8월 하순 25년 평균장은 북태평양 고기압이 우리나라 동쪽으로 세력이 약화되어 있어 우리나라 남해안에서 6월 평균장에 비해 850hPa의 대기 하층의 바람 성분이 작고 그로 인해 우리나라에서 moisture flux convergence 구역 및 비지균 성분에 의한 연직 운동이 잘 나타나지 않음을 확인하였다.

4장에서는 2018년 6월과 8월의 정체전선 사례의 특성을 확인하였다. 2018년 6월의 사례는 25년 동안 6월 하순을 평균하여 분석한 값과 유사하게 북태평양 고기압 가장 자리를 따라 850hPa의 하층 바람 성분이 크게 나타남을 확인하였다. 다만 6월 하순의 평균값에 비해 전반적으로 2018년 6월의 사례는 moisture flux의 수렴 구역과 상당온위의 연직적인 불안정 구역이 우리나라 남부 지역까지 북상하여 위치하여 있음을 확인하였다. 그로 인해 frontogenesis를 분석하였을 때 2018년 6월 하순의 정체전선 사례는 25년 평균값에서 우리나라 남해안에서 생성되던 전선 생성 구역이 우리나라 남부 및 동해안까지 나타남을 확인하였다. 반면 2018년 8월 하순의 정체전선 사례는 8월 하순의 25년 평균한 값과 비교하여 매우 다른 특성을 지니고 있었다. 평년값에 비해 우리나라 남동쪽으로 북태평양 고기압의 세력이 확장되어 위치하여 있고, 중국 화남 지역으로는 열대성 저기압이 위치하여 우리나라 남해안에서 남풍 계열의 풍속 성분이 25년 평균값보다 크게 나타남을 확인하였다. 그로 인해 우리나라 중부 지역에 moisture flux의 수렴 구역이 위치하고 우리

나라 중부 지역에서 비지균풍에 의한 상승 운동이 있음을 확인하였다. 2018년 8월 하순은 우리나라 중부 지역에서 상당온위의 경도가 매우 크게 나타났는데 그로 인해 전선 분석에서도 우리나라 중부 지역을 따라 850hPa 하층 바람 성분에 의해 상당온위의 신장축이 형성되어 우리나라 동·서 방향으로 전선 생성이 있음을 확인하였다.

6장에는 8월 하순의 정체전선의 사례 중 2018년 8월 하순 정체전선 사례와 유사성이 컸던 10가지 사례를 선정하여 10가지 사례의 평균값을 구하여 2018년 8월 사례와 기상학적 특성을 비교 분석 하였다. 8월 하순 유사 사례는 2018년 8월 사례와 북태평양 고기압의 위치가 비슷하였고 그로 인해 대기 하층(850hPa)에서의 바람 성분이 크게 나타났다. 우리나라 남쪽에서 북동쪽으로 부는 바람의 특성으로 8월 하순 유사 사례에서는 우리나라 동해안 지역을 중심으로 moisture flux의 수렴이 크게 분석됐다. 우리나라 남부 지역을 중심으로 상당온위의 연직적인 불안정 구역이 위치하였고, 우리나라 중부 지역에서 대기 하층의 비지균 성분에 의한 상승 운동이 뚜렷이 나타났다. 그로 인해 850hPa 전선 분석에서도 2018년 8월 하순의 정체전선 사례와 같이 상당온위 경도가 크게 나타나는 우리나라 중부 지역에서 하층 바람 성분에 의한 상당온위선의 신장이 이루어지면서 우리나라 동·서 방향으로 전선이 잘 발달할 수 있음을 알 수 있었다.

본 연구를 통해 8월 하순 평균의 기상학적 특성은 6월 하순 평균에 비해 북태평양 고기압 세력이 뚜렷이 나타나지 않고, 그로 인해 우리나라 남해안에 이류되는 moisture flux가 매우 작게 나타남을 확인하였다. 8월 하순은 6월 하순과 같이 정체전선이 같은 시기에 매년 생성되지 않았는데, 이는 8월 하순을 정체전선이 규칙적으로 형성되는 6월 하순의 장마와 똑같이 명칭하기에 어려움이 있음을 의미한다. 8월 하순의 평년 특성에서 정체전선이 규칙성을

지니고 장시간에 걸쳐 생성되는 기상학적 특성이 없기 때문에 단순히 8월 하순의 정체전선에 의한 집중호우 사례라 칭하는 것이 더 적절해 보인다.

그럼에도 8월 하순에 정체전선에 의해 집중호우가 발생했던 사례들을 종합하여 분석하였을 때 8월 하순에 정체전선이 형성되는 공통적인 특성은 찾을 수 있었다. 8월 하순에 정체전선에 의해 집중호우가 발생하는 데에는 북태평양 고기압이 평년에 비해 확장하는 것이 매우 중요하게 작용하였다. 2018년 8월 하순의 정체전선 사례와 2018년 8월 하순 정체전선 유사사례의 평균 분석을 통해 북태평양 고기압이 평년보다 확장하여 우리나라에서 850hPa의 하층 바람 성분이 평년보다 커져서 상당온위 선을 신장시키는 역할을 하면 전선이 발생할 수 있음을 규명하였다. 다만, 8월 하순에 북태평양 고기압이 평년에 비해 확장하는 이유와, 북태평양 고기압이 평년보다 확장했던 시기에는 항상 정체전선이 형성되어 집중호우가 발생하는지는 향후 더 연구해 보아야 한다.

참고문헌

김미애,허복행,김경인,이동인, 2008:. 장마전선에서 발생한 2006년 6월 25일의 호우 사례에 대한 종관자료의 운동학적 특성 분석. 한국기상학회 봄 학술대회 논문집, 43-46

서경환, 손준혁, 이준이, 2011: 장마의 재조명. 한국기상학회 봄 학술대회 논문집, 114-117

서동일,변희룡, 2002: 한반도 여름·가을우기의 기간정의와 발생요인. 한국기상학회 가을 학술대회 논문집, 403-404

정효상, 정연앙, 김창모, 류찬수, 2012: 장마기와 장마 후의 한반도 집중호우 특성 사례분석, Jounal of the Environmental Science, 1517-1519

Byun, and Lee, A., 2011: Remote effects of tropical cyclones on heavy rainfall over the Korean peninsula - statistical an composite analyiss. *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 13, 17*

K., Ninomiya, J., 1984: Characteristics of Baiu Front as Predominant Subtropical Front in the Summer Northern Hemisphere, Journal of the Meteorological Society of Japan, 891-892

Takeaki Sampe Shang-Ping Xie, Large-Scale Dynamic of the Meiyu-Baiu Rainband : Environmental Forcing by the Westerly Jet, 114-118, doi :10.1175/2009JCLI3128.1

TOCHIMOTO Eigo, KAWANO Tetsuya, Numerical Investigation of Development Processes of Baiu Frontal Depressions Part I: Case Studies, Journal of the Meteorological Society of Japan , 91-93, doi :10.2151/jmsj.2017-005

TOCHIMOTO Eigo, KAWANO Tetsuya, Numerical Investigation of Development Processes of Baiu Frontal Depressions(Part 2) An Idealized Study, Journal of the Meteorological Society of Japan , 218-220, doi :10.2151/jmsj.2017-012

Abstract

Comparison on characteristic of heavy rainfall system
– Case study in June 2018 and Aug 2018 –

Oh, Chimook

Dept. of Atmospheric sciences

The Graduate School

Yonsei University

Purpose of this study is to analyze the Korean peninsula heavy rain system in summer season through case of June and Aug 2018. Summer heavy rainfall which is cause of stationary front is damage to life and property of people, so it has to be studied. The last ten days of June stationary front which affects Korean peninsula is connected to Meiyu and Baiu and it is generated regularly. This season has long rainy day, we call it Changma in Korea and this season lasts one month. After the end season of Changma stationary front is generated at the last ten day of Aug to first ten day of Sep. But this season stationary front generation doesn't have regularity. So in this study I'd like to determine the meteorological characteristic of Changma season and after Changma season stationary front.

First, I choice the stationary front case in Korean peninsula which has

heavy rainfall(more than one day rainfall 60mm)during the 25 years(1994-2018). Then I calculate the mean field on 25 years last ten days of June and Aug using ECMWF Era-Interim reanalysis(0.75°×0.75°) which is sea level pressure, equivalent potential temperature, moisture flux, wind component.

At the mean field on 25years last ten days of June and Aug, I found potential temperature meridional gradient is small in Korean peninsula but equivalent potential temperature meridional gradient is big in Korean peninsula. This two season which are mean last days of June and Aug moisture flux and moisture flux convergence(MFC) is different in Korean peninsula. At the mean of last ten days of June MFC and 850hPa wind component are bigger than mean of last ten days of Aug MFC and 850hPa wind.

The case which last ten days of Aug 2018 meteorological feature is different mean on 25years last ten days of Aug. North Pacific high expands to southeast area of Korean peninsula MFC and 850hPa wind component big in the southern coast of Korea. When analyzing the heavy rainfall case of 25 years mean on the last ten days of Aug using the 850hPa geopotential height pattern correlation, many stationary front case on last ten days of Aug is North Pacific high expands to Korea similarly as case on last ten days of Aug 2018.

Through this study I find North Pacific high significant effect to generate the stationary front in the last ten days of June and Aug. This study

provides help to determine the cause of heavy rainfall which occurred by stationary front in the last ten days of Aug.

Keywords: Equivalent potential temperature, North Pacific high, 850hPa wind component