



저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건 하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)



2011년 2월
석사학위논문

장마전선상에서 하층제트 유입으로
인한 집중호우에 관한 연구

조선대학교 대학원

대기과학과

최지영

2011년 2월 석사학위논문

장마전선상에서 하층제트유입으로 인한 접증호우에 관한 연구
최지영

장마전선상에서 하층제트 유입으로 인한 집중호우에 관한 연구

A Study on the Heavy Rainfall Cases Associated with
Low Level Jet Inflow along the Changma Front

2011년 2월 25일

조선대학교 대학원

대기과학과

최지영

장마전선상에서 하층제트 유입으로 인한 집중호우에 관한 연구

지도교수 류 찬 수

이 논문을 이학석사학위신청 논문으로 제출함

2010년 10월

조선대학교 대학원

대기과학과

최지영

최지영의 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 조선대학교 ^{전문경력}
교수 정효상 인

심사위원 기상청 이학박사 김백조 인

심사위원 조선대학교 교수 류찬수 인

2010년 11월

조선대학교 대학원

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
ABSTRACT	vi
제1장 서론	1
제2장 자료 및 분석방법	3
제3장 분석결과	4
제1절 한반도 집중호우 및 하층제트 발생 특성	4
1. 통계적 특성	4
2. 종관기상학적 유형분류	5
가. 집중호우	5
나. 하층제트	10
3. 집중호우와 하층제트 연관성 분석	12
제2절 경기남부지방 집중호우(2009.7.11~12) 사례분석 및 특성	12
1. 호우 특성	14
2. 종관기상 특성 분석	18
가. 지상	18
나. 850hPa	18
다. 500hPa	23
라. 200hPa	23
마. 보조일기도	26
바. 원격탐사	26

3. 국지기상분석(KLAPS)	31
제4장 결론	36
참고문헌	38

List of Tables

Table 1. Low-level jet observed date, station, time, and its wind direction and speed at 850 hPa in case of heavy rainfall.....	5
Table 2. List of the 25 cases of heavy rainfall recorded daily rainfall of more than 200mm for at least a station from 2000 to 2009.....	8
Table 3. Major heavy rainfall cases classified by synoptic patterns.....	9

List of Figures

Fig. 1. Occurrence frequency of heavy rainfall with more than 150mm/day by each synoptic type: Changma front, typhoon, cyclone, and mT boundary.	7
Fig. 2. Occurrence frequency of heavy rainfall with more than 150mm/day for Changma type : only Changma, Changma combined with cyclone, and Changma combined with typhoon.	7
Fig. 3. Schematic diagram for explaining the synoptic characteristics associated with heavy rainfall in each type.	9
Fig. 4. Schematic diagram for explaining the spatial location of upper and low-level jets related to heavy rainfall over the Korean peninsula in each type.	11
Fig. 5. 500 hPa geopotential height field for (a) July 2004, (b) July 2006, (c) July 2008, and (d) July 2009.	13
Fig. 6. Distribution of hourly precipitation at (a) 00 UTC, (b) 07 UTC, (c) daily precipitation, and (d) maximum instantaneous wind speed on 12 Jul, 2009.	15
Fig. 7. The distribution of hourly rainfall, temperature, dew point temperature, wind speed at (a) Icheon, (b) Suwon, and (c) Chungju on 12 Jul, 2009.	16
Fig. 8. Schematic diagram for explaining the synoptic characteristics associated with heavy rainfall on 12 July, 2009.	17
Fig. 9. Surface weather chart at (a) 12UTC 11 July and (b) 00UTC 12 July, 2009.	20
Fig. 10. 850 hPa geopotential height and temperature fields at (a) 00UTC and (b) 12UTC 11 July, (c) 00UTC and (d) 12UTC 12 July, 2009.	21
Fig. 11. 850 hPa moisture flux(vector arrow), upper and low level jet(shaded area) at (a) 12UTC 11 July and (b) 00UTC 12 July, 2009.	22
Fig. 12. 500 hPa geopotential height(solid line) and temperature(dashed line) at (a) 12UTC 11 July and (b) 00UTC 12 July, 2009.	24
Fig. 13. Same as Fig. 12 but for 200hPa.	25
Fig. 14. (a) K-index, (b) 850 hPa equivalent potential temperature, (c) 500 hPa vorticity, and (d) 700 hPa vertical velocity at 00UTC 12 July, 2009.	28
Fig. 15. Hourly imageries of MTSAT Enhanced IR from 20UTC 11 July to 01UTC 12 July, 2009.	29
Fig. 16. 2-hourly imageries of radar reflectivity from 20UTC 11 July to 06UTC 12 July, 2009.	30

Fig. 17. Longitude(127.0E)-altitude cross-section of temperature(heavy solid line), wind(vector arrow), and equivalent potential temperature(light solid line with shading) at (a) 12UTC 11 July and (b) 00UTC 12 July, 2009.	33
Fig. 18. Longitude(127.0E)-altitude cross-section of omega(shading area), divergence (line), and vertical circulation(streamline) at (a) 12UTC 11 July and (b) 00 UTC 12 July, 2009.	34
Fig. 19. Sounding in Suwon at (a) 12UTC 11 July and (b) 00UTC 12 July, 2009.	35

ABSTRACT

A Study on the Heavy Rainfall Cases Associated with Low Level Jet Inflow along the Changma Front

Choi, Ji-Young

Advisor : Prof. Ryu, Chan-Su Ph.D.

Department of Atmospheric Sciences,

Graduate School of Chosun University

In general, heavy rainfall in Korea is mostly associated with inflow of 850hPa low-level jet. It transports abundant heat and moisture flux to the Changma front. In this study, synoptic characteristics of heavy rainfall in Korea from a case study is examined by classifying heavy rainfall cases with synoptic patterns, in particular distribution of upper- and low-level jets, western North Pacific high, and moisture flux. The surface and upper-level weather charts including auxiliary analysis chart and radar and satellite images obtained from the Korea Meteorological Administration, and 500hPa geopotential heights from NCEP/NCAR are used and then KLAPS is applied to understand the local atmospheric structure associated with heavy rainfall.

Results show that maximum frequency in 60 heavy rainfall cases with more than 150mm/day appears in the Changma type of 43 cases (a proportion in relation to a whole is 52%) including the combined Changma types with typhoon and cyclone. As indicated in previous studies, most heavy rainfall cases are related to inflow of low-level jet. In addition, synoptic characteristics based on the analyses of weather charts, radar and satellite images, and KLAPS in heavy rainfall case of 12 July, 2009 reveal that the atmospheric vertical structure in particular equivalent potential temperature favorable for effective inflow of warm and moist southwesterly into the Changma front is linked to large potential instability and the strong convergence accompanied with low-level jet around Suwon contributes to

atmospheric upsilding along the Changma front, producing heavy rainfall.

제1장 서 론

최근 집중호우나 태풍을 비롯한 기상이변의 잦은 발생으로 기상재해에 의한 인명 및 경제적 피해가 증가하고 있다. 또한 지구 온난화로 인한 지표면과 해수면의 온도 상승으로 수분 증발량이 증가하고, 대기는 많은 양의 가강수량을 가지게 되어 지구 기후 시스템이 변화하고 있다. 특히 우리나라의 장마와 집중호우로 인한 여름철 강수 현상은 지구 기후 시스템의 주요 요소 중 하나로, 이에 대한 정확한 진단 및 예측 기술이 아직 미흡한 실정이다.

한반도는 중위도 지역 대륙의 동쪽에 위치하여 여름철인 6월에서 8월의 몬순기간동안에는 장마전선이나 태풍 등에 의한 강수가 빈번하며 이 기간의 강수량이 연강수량의 50 % 정도를 차지하는 등 계절적인 특성이 뚜렷하다 (허창의, 강인식, 1988). 장마기간인 6월 말에서 7월 말 사이에 장마전선상에서 발생하는 호우는 중국에서 발생한 교란에 기인한 것들이 적지 않은 것으로 추정된다 (박순웅 등, 1986). 이 같은 교란 중에는 전선을 타고 동진하면서 중규모 저기압으로 발달하여 한반도에 호우를 가져오는 경우들도 있으며 (이태영, 1998), 교란의 동진으로 인한 한반도 주변 환경의 변화가 집중호우를 유발시키는 경우도 있다 (이태영, 박상훈, 2005).

최근 Lee and Kim (2007)에서는 한반도에서 발생하는 집중호우의 유형을 구분하고, 각 유형별로 대표적인 사례의 분석 결과를 제시하였다. 특히 동아시아에 위치한 다른 나라에서는 우리나라의 장마와 밀접한 관련이 있는 현상인 Mei-yu 와 Baiu 에 관한 연구가 활발하게 진행되어 오고 있다. 두 현상은 아시아 몬순의 일부로서, 일본의 Baiu 전선은 북서태평양 아열대 고압대의 북쪽 연변의 경압대와 관련되어 나타나며, 한반도 남쪽 끝에서 발생하는 장마와 유사하게 나타난다. 그리고 중국의 Mei-yu 전선은 그 남쪽에 열대 해양기단(mT)과 그 북쪽에 다양한 기단(대륙성 열대기단, 해양성 한대기단 등)의 경계선에서의 수렴 지역으로, 수평 온도경도보다는 수증기 경도가 더 큰 특징을 가지며 한반도의 중부 지방이나 장마 후기에 영향을 준다. 이에 대한 최근 연구로서는 Yasunari and Miwa (2006), Zhang et al. (2006a, 2006b), Wakazuki et al. (2006) 등이 있다.

한반도의 경우는 지리적으로 경압성이 강한 동아시아에 위치하여 전반적으로 잘 구조화된 하층제트를 형성하여 호우의 제반 여건을 형성하므로, 하층제트의 영향에 직접적으로 관계되어 호우가 발생한다. 하층제트는 준 정체적인 북태평양 고기압의 서쪽

연변을 따라 남쪽에서 북쪽으로 수송되는 운동량이 전향력의 영향으로 남서에서 북동 방향으로 향하는 것으로 알려져 있으며, 그 호우역은 보통 하층 제트의 저기압성 취어 영역에서 풍속이 감소하는 곳이 나타난다. 그러므로 남부 해안 근처에서 해양성 기단이 마찰이 다른 육지에 상륙하거나, 산악을 지날 때 호우역을 만들기 쉽다. 또한, 하층 제트는 단독으로 집중호우를 일으키는 경우보다 이동중인 전선대의 온난역에 지속적으로 온난 습윤한 대기를 공급함으로써 대류불안정을 강화시키거나, 북상중인 태풍의 가장자리 영역을 따라 온난 습윤한 대기가 유입되어 호우의 강도를 더하게 된다.

동아시아 지역의 하층제트는 몬순과 같은 풍속과 순환과 관계되어 주로 장마기간 중에 출현하거나 발달된 저기압과 동반되어 나타나는데, 대부분은 북미지역의 하층제트보다는 훨씬 높은 고도에서 출현한다고 밝혔다 (Chen and Yu. 1988; Kuo and Chen). Chen et al. (1993)은 하층제트 발생 기간 동안 상층제트와 하층 대류권의 대기 순환 및 수증기 수송의 종관적 연구에서 뇌우에 의한 강수는 대류권 하층수렴에 의해서 수증기가 수렴되면서 유지됨을 밝혔다. 통계적 접근으로서 Matsumoto (1972)는 일본의 Baiu 기간 중에 하층제트의 풍속과 강수량과의 관계의 통계적 조사를 통하여 풍속이 증가할수록 강우강도가 큰 강수 현상의 빈도가 증가함을 보였고, Chen and Yu (1988)는 대만에서의 Mei-yu 기간 중 호우 출현 시 하층제트가 84 %가 존재하고, 하층제트가 관측될 때 호우 발생률이 91 %에 이른다는 연구 결과를 밝혔다. 이처럼 여름철의 호우는 하층제트의 출현과 매우 밀접한 관련이 있으며, 이에 대한 여름철 집중호우에 관한 연구의 중요성도 커지고 있다.

현재 지구온난화로 인하여 북태평양 고기압이 다소 고온다습해지고 동아시아로 확장함에 따라 중국에 상륙한 태풍이 세력이 약화되면서 온대저기압으로 변질된다. 이 과정에서 변질된 온대저기압이 다량의 수증기를 갖고 남서풍의 하층제트를 따라 장마전선에 유입함으로써 중국에서 발달한 후 동진하여 한반도에 집중호우를 발생시킨다. 그러나 다양한 연구의 노력에도 불구하고 우리나라의 여름철 몬순 현상인 장마와 장마전선상에서 발달하는 요란에 의하여 발생하는 집중호우에 대한 정확한 진단 및 예측 기술은 아직 미흡한 실정이므로, 이로 인한 강수현상을 분석함으로써 장마전선상에서 발생하는 집중호우에 대한 이해도를 높이고, 기상재해 경감 및 원활한 수자원 관리를 위한 일기예보의 정확성에 기여하고자 한다.

제2장 자료 및 분석 방법

최근에는 뚜렷한 장마의 종료 시점을 가늠하기 어려운 경향이 있다. 따라서 본 연구에서 장마 기간에 발생한 호우만으로 종관적 유형으로 분류하기에는 다소 무리가 있다고 판단하여, 장마 기간을 포함한 여름철 전체에 대한 집중호우를 분류하였다. 조사기간은 최근 10년(2000 ~ 2009년)간 6월에서 9월에 한반도에서 발생한 일강수량이 150 mm 이상인 호우에 대하여 종관적 배경에 의해 분류하였고, 호우와 관련된 하층제트의 출현 빈도, 호우발생시 하층제트와 관련된 강수의 특징을 조사하였다. 일강수량이 150 mm 이상인 호우사례를 정한 이유는 현재 기상청에서 정의한 일 누적 강수량이 80 mm 이상의 비가 내리는 경우 또는 연강수량의 10 % 이상의 비가 하루에 내리는 정도에 의해 더 많은 호우가 발생하였을 경우의 기상피해가 크므로 이와 같이 정하였다.

하층제트를 정의함에 있어서 연직쉬어와 수평쉬어의 기준도 고려해야 하나 자료의 성격상 쉬어값이 실제의 제트가 가지는 값이 연직쉬어와 수평쉬어보다 작다고 판단되어 이를 적용하지 않았다. 호우 발생시 하층제트의 출현은 우리나라 6개 지점(속초, 백령도, 인천, 포항, 광주, 흑산도)에서 850 hPa의 풍속이 25 kts(12.5 m/s)이상이 어느 지점에서라도 발생 했을 경우에 하층제트가 존재하는 것으로 정의하였다.

여름철 중규모 현상과 관련된 위험기상의 종관유형을 파악하기 위하여 지상일기도 및 상층(850, 500, 200 hPa)일기도를 분석하여 집중호우 발생 유형에 따라 장마전선형, 저기압 통과형, mT 연변형 및 태풍형으로 분류하고, 장마전선상에서 하층제트 유입으로 인하여 발생한 집중호우의 특성을 분석하는 과정에서 7월의 500 hPa 의 고도장을 NCEP/NCAR(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) 재분석 자료와 레이더 CAPPI(Constant Altitude Plan Position Indicator) 합성영상, 강조 적외 위성영상, 보조일기도에서 850 hPa Moisture Flux, 850 hPa Streamline and Isotach(>25kts), K-index, 850 hPa Equivalent Potential Temperature, 500 hPa Vorticity, 700 hPa Vertical Velocity 자료를 사용하였다. 웹기반의 기상분석시스템(WebFAS)자료를 이용하여 상·하층제트의 수평적인 흐름과 하층제트와 연결된 온난 습윤한 공기 유입을 파악하여 국지적인 기압계의 발달과 쇠퇴, 강수 분포를 추적하여 기상 현상을 분석하였으며, 비종관적인 특성으로서 대기의 3차원적인 입체 구조 분석을 통하여 정량적인 강수예측을 위해 KLAPS(Korea Local Analysis and Prediction System)를 이용하여 분석하였다.

제3장 분석결과

제1절 한반도 집중호우 및 하층제트 발생 특성

1. 통계적 특성

최근 10년(2000 ~ 2009년)간 한반도 지역의 84개 지점에서 일 강수량이 150 mm 이상인 호우사례는 총 83 회로 이 중 태풍의 직접적인 영향(23 회)을 제외하면 60 회의 호우가 발생하였다. 150 mm/day 이상의 호우는 2003년과 2006년에 각각 9 회로 최고 빈도를 보였으며, 그 중에서도 200 mm/day 이상의 호우사례가 총 25 회로 2006년과 2009년에 각각 5 회로 가장 많이 나타났다. 매년 200 mm/day 이상의 호우가 전국에서 2 회 정도가 발생함으로써 강한 강도의 집중호우가 매년 발생하고 있음을 알 수 있다.

본 연구의 60 회의 사례 중에서 하층제트와 관련된 사례는 40 회(66.7 %), 200 mm/day 이상에서는 25 회 중에서 18 회(72 %)가 나타난 결과 황승연·이동규 (1993)의 “호우발생시 12.5 m/s 이상의 풍속을 가진 하층제트가 존재하는 확률이 75.8 %”라는 보고의 출현빈도보다 낮게 나타났다. 이는 Matsumoto (1973)가 일본의 Baiu 기간 중에 하층제트의 풍속과 강수량간의 관계를 통계적 조사를 통하여 “풍속이 증가 할수록 강우강도가 큰 강수현상의 빈도가 증가함을 보였다”는 주장과 비슷하다.

한반도에 발생한 하층제트와 관련된 총 40 회의 사례 중에서 월별 하층제트의 발생 빈도를 분석한 결과, 7월에 22 회(55 %), 8월에 10 회(25 %), 6월에 5 회(12.5 %), 9월에 3 회(7.5 %)로 7월에 하층제트와 관련한 호우의 빈도가 높음을 알 수 있다.

호우사례 기간 중 최대 강우강도를 보인 시간 전후의 하층제트 발생 시 바람자료를 보면 일강수량 150 mm/day 이상에서는 남서풍이 28 회(72 %)로 가장 높게 나타났으며, Table 1과 같이 200 mm/day 이상의 집중호우 시 남서풍이 12 회(67 %)로 가장 높게 나타났다. 이는 김철훈 등 (2002)이 수원에서 발생한 집중호우와 하층제트의 관련성에 대한 연구 결과와 유사하다. 이런 하층제트의 흐름이 한반도의 집중호우 시 남서쪽에서 고온다습한 수증기가 유입되면서 수렴대가 강화되어 집중호우를 유발한 것으로 해석하는 근거가 된다.

Table 1. Low-level jet observed date, station, time, and its wind direction and speed at 850hPa in case of heavy rainfall.

Date (year/month/day)	Station	Time (UTC)	850hPa		Wind speed(knots)
			Wind direction		
2000	Jul. 22	Pohang	00	W	46
	Jul. 23	Gwangju	00	SW	40
2001	Jun. 24	Jeju	12	SSW	40
	Jul. 15	Osan	00	SW	38
2002	Aug. 6	Sokcho	00	SW	41
2003	Jul. 9	Baengnyeongdo	00	SE	51
	Sep. 18	Sokcho	12	NW	35
2004	Jun. 20	Gwangju	12	SW	39
2006	Jul. 12	Baengnyeongdo	12	SW	33
	Jul. 16	Baengnyeongdo	12	SW	39
2007	Aug. 29	Incheon	12	SE	32
2009	Jul. 24	Pohang	12	SW	27
	Jul. 7	Heuksando	00	SW	35
	Jul. 9	Incheon	06	SW	58
	Jul. 12	Pohang	12	SW	50
	Jul. 14	Incheon	12	SW	59
	Jul. 15	Sokcho	12	NW	37
	Jul. 16	Gwangju	00	SW	34

2. 종관기상학적 유형분류

가. 집중호우

최근 10년 동안 한반도에 발생한 일강수량 150 mm 이상의 83 회의 호우 사례를 지상일기도를 이용하여 장마전선형, 저기압형, mT 연변형 및 태풍형의 4가지로 분류하였다.

본 연구사례를 분석한 결과, 장마전선에 의한 호우가 43 회(52 %)로 가장 많았고, 태풍에 의한 호우가 21 회(25 %), 저기압에 의한 호우 12 회(15 %), mT 연변 7 회(8 %) 순으로 나타난 것으로 보아 장마전선에 의한 영향이 많은 부분을 차지하고 있음을 알 수 있다(Fig. 1). Fig. 2는 장마전선에 의한 43 회의 호우 사례 중에서 다른 영향을 받지 않고 장마전선에 의한 영향을 받은 호우사례는 29 회, 장마전선과 저기압의 혼합에 의한 호우사례는 12 회, 장마전선에 태풍의 영향을 혼합한 사례는 2 회로 나타났다.

Table 2는 일강수량이 200 mm 이상인 40 회의 호우 사례 중에서 태풍의 직접, 간접적인 영향으로 인한 집중호우 사례를 제외한 25 회의 사례를 정리하였으며, Table 1에서와 같이 150 mm/3h 이상의 사례가 11 회, 200 mm/3h 이상의 호우는 2 회가 판측된 것으로 보아 단시간에 집중적으로 비가 많이 온 것임을 알 수 있다. Table 3는 Table 2에 해당되는 사례 중에서 종관유형별로 가장 특징적인 사례를 선정하여 Fig. 3에 모식도로 나타내었다.

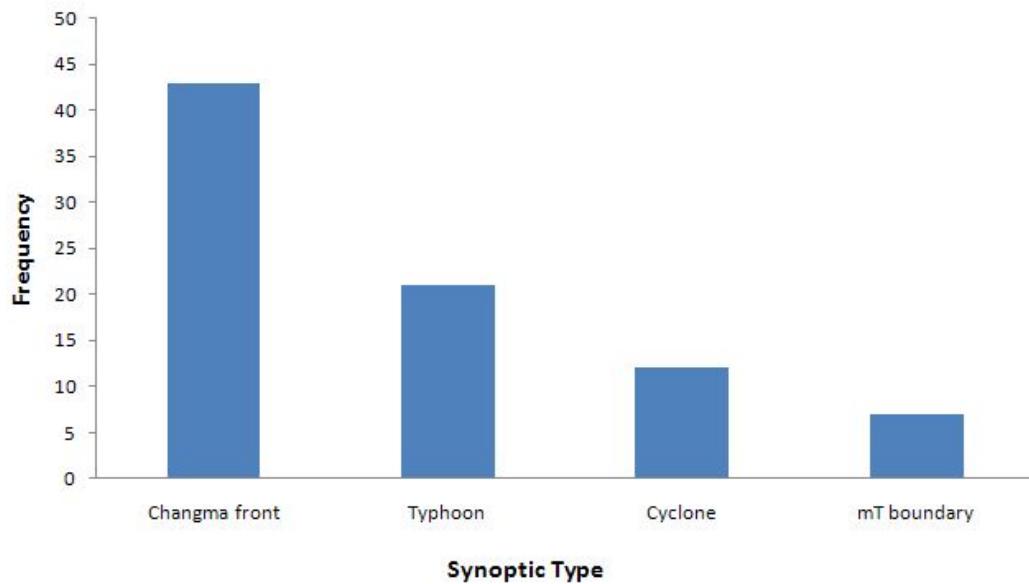


Fig. 1. Occurrence frequency of heavy rainfall with more than 150mm/day by each synoptic type: Changma front, typhoon, cyclone, and mT boundary

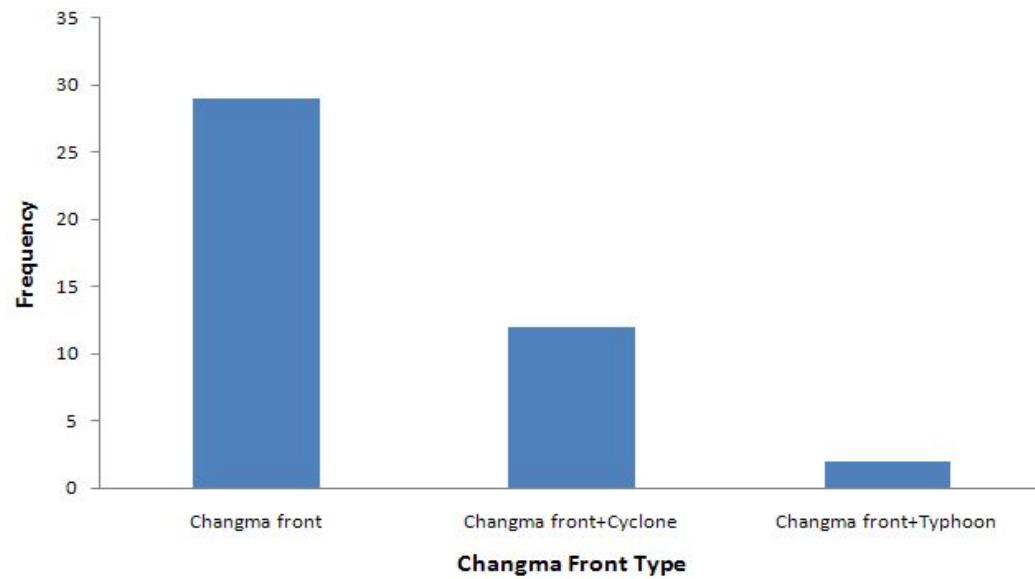


Fig. 2. Occurrence frequency of heavy rainfall with more than 150mm/day for Changma type : only Changma, Changma combinedwith cyclone, and Changma combined with typhoon.

Table 2. List of 25 cases of heavy rainfall recorded daily rainfall of more than 200mm for at least a station from 2000 to 2009.

	Date (year/month/day)	Type (Surface or 500hPa)	Maximum rainfall observed station	Rainfall amount (mm/d)	Low-level jet①	Rainfall intensity②
2000	Jul. 22	Cyclone	Suwon	333.2	LLJ	#
	Jul. 23,	Cyclone	Daejeon	227.6	LLJ	##
	Aug. 26	Cyclone	Gunsan	310		#
2001	Jun. 24	Changma front	Namhae	303	LLJ	##
	Jul. 15	Changma front	Seoul	273.4	LLJ	###
2002	Aug. 6	Changma front	Bongwhoa	241.5	LLJ	##
	Aug. 7	Changma front	Yangpyeong	320		#
2003	Jul. 9	Changma front	Boeun	202	LLJ	#
	Sep. 18	Cyclone	Ganghwa	216	LLJ	#
2004	Jun. 20	Cyclone	Jecheon	205	LLJ	#
	Aug. 22	Changma front	Seongsan	251.5		##
	Jul. 10	Changma front	Namhae	264.5		##
	Jul. 12	Changma front	Seoul	226.5	LLJ	#
2006	Jul. 15	Changma front	Innje	202		##
	Jul. 16	Changma front	Yangpyeong	285	LLJ	#
	Jul. 27	Changma front	Hongcheon	245.5		#
2007	Aug. 7	mT airmass	Jinju	207.5		#
	Aug. 29	Cyclone	Buan	250.5	LLJ	###
2008	Jul. 24	Cyclone	Dongducheon	265	LLJ	#
	Jul. 7	Changma front	Busan	310	LLJ	##
2009	Jul. 9	Changma front	Hongcheon	229.5	LLJ	##
	Jul. 12	Changma front	Icheon	304	LLJ	##
	Jul. 14	Cyclone	Chuncheon	200.5	LLJ	#
	Jul. 15	Cyclone	Jindo	206	LLJ	##
	Jul. 16	Changma front	Busan	266.5	LLJ	##

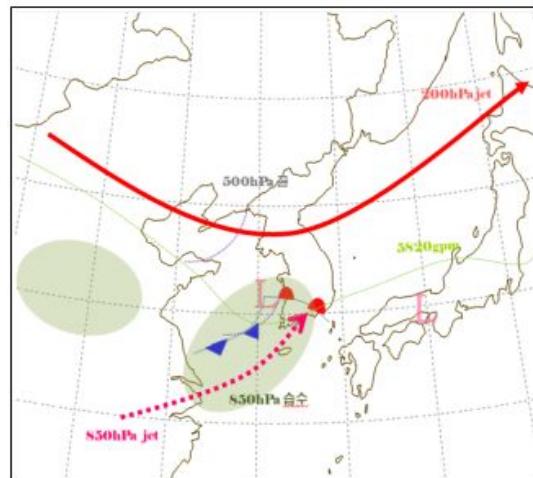
① LLJ means low level jet associated.

② Rainfall intensity : #>50mm/1h, ##>150mm/3hr, ###>200mm/3hr.

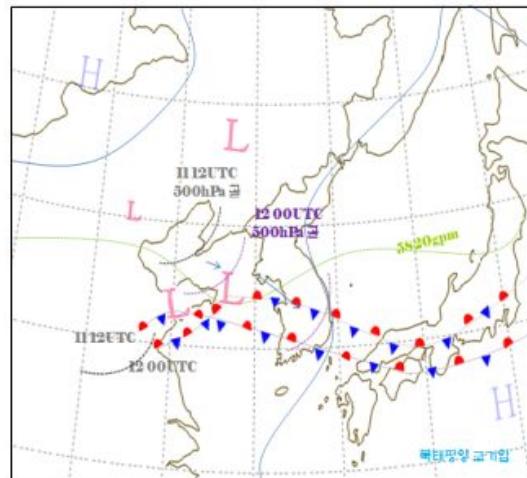
Table 3. Major heavy rainfall cases classified by synoptic patterns.

Synoptic pattern	Date (day/month/year)	Daily maximum rainfall(mm)	Hourly maximum rainfall(mm)	Affecting region
cyclone	29 Aug. 2007	250.5	48.5	Buan
changma front	12 Jul. 2009	304	41.5	Icheon
mT airmass	7 Aug. 2007	207.5	40	Jinju
typhoon	31 Aug. 2002	870	78.5	Gangneung

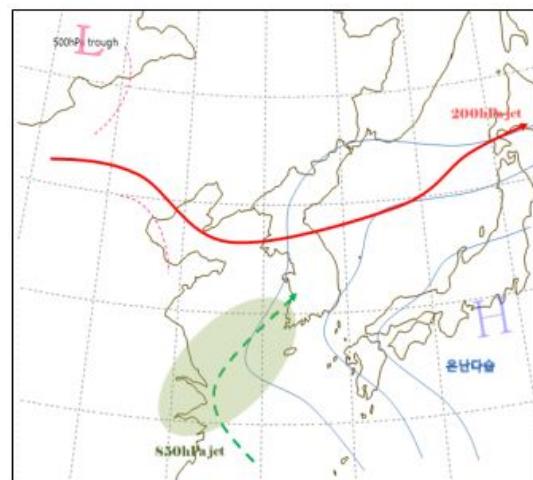
(a)



(b)



(c)



(d)

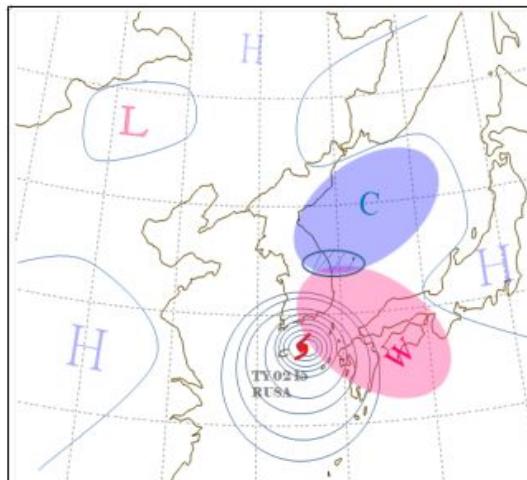


Fig. 3. Schematic diagram for explaining the synoptic characteristics associated with heavy rainfall in each type.

나. 하층제트

최근 한반도에서 하층제트의 영향에 의해서 우리나라에 집중호우를 유발한 사례를 분석한 결과 4가지 유형으로 분류하였다(Fig. 4).

2009년 7월 9일의 사례는 Fig. 4d의 유형과 비슷한 형태로 남고북저형의 패턴에서 우리나라 전 지역에 저기압이 위치하고 상층의 폭넓은 trough의 영향을 받으며 제트가 강화되었다. 우리나라 중부지방에서 남부지방에 걸쳐 장마전선이 길게 형성되었으며, 습윤역은 장마전선을 따라 동서로 넓게 나타났다. 남서쪽에서 하층제트가 위치하면서 다량의 수증기를 유입하고, 상층제트는 경기만 부근에 위치하여 상하층의 불안정이 강화되어 남부지방에 강한 집중호우가 발생하였다(Fig. 4a).

2009년 7월 11 ~ 12일 경기도 남부지방을 중심으로 장마전선의 북쪽에 지속시간이 길고 넓은 지역에 강한 집중호우가 발생한 사례의 모식도이다. mT와 cT(대륙고기압) 사이에 형성된 장마전선이 남북으로 진동하고 저기압이 장마전선에 합류되면서 서해상에서 장마전선을 따라 좁고 강한 수렴대가 중부지방으로 형성되어 강한 비구름대가 발달하였다. 상층 한기가 우리나라 북서쪽에서 중부지방으로 이류 되면서 불안정이 커졌고, 서한만 부근에 위치한 상층제트와 상해 남서쪽에서 강화된 하층제트의 합류로 중부지방에 강한 집중호우가 발생하였다(Fig. 4b).

2009년 7월 15일은 우리나라 북쪽에 저기압의 중심을 두고 한랭전선이 강원도에서 경기도지방으로 폭넓게 형성되었으며, 시간이 지남에 따라 저기압이 이동하면서 한랭전선 끝자락에 위치한 정체전선이 남부지방에 걸쳐 나타났다. 또한 습윤역이 mT 연변을 따라 넓게 위치하고, 하층제트에 의해 남쪽에서 난기 유입과 북쪽에서의 한기 남하로 중부지방에 이어 남부지방으로 수렴대가 강화되었다(Fig. 4c).

2006년 7월 16일에 발생한 집중호우 사례는 mT(북태평양고기압)가 남부지방까지 나타나고 남부지방에 걸쳐 정체전선이 형성되었으며, 하층제트가 mT연변을 따라 위치하면서 남서류가 강하게 나타난 형태의 경우로 남서쪽에서는 하층 제트에 의한 수증기의 유입이 강화되고, 습윤역이 우리나라를 중심으로 동서로 광범위하게 나타났다. 이와 유사한 유형의 사례는 2006년 7월 26일에도 발생하였다(Fig. 4d).

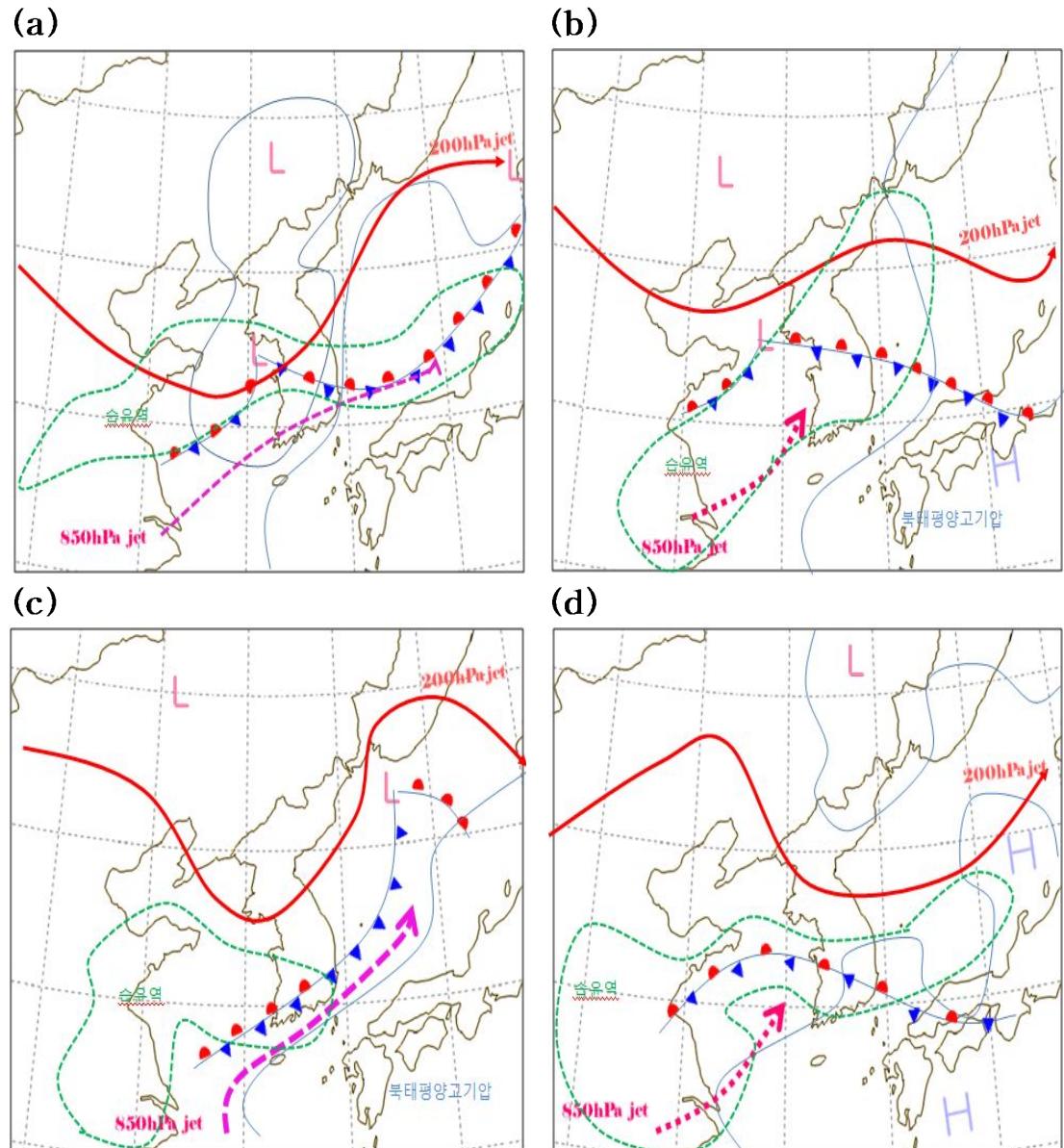


Fig. 4. Schematic diagram for explaining the spatial location of upper- and low-level jets related to heavy rainfall over the Korean peninsula in each type.

3. 집중호우와 하층제트 연관성 분석

최근 10년간 한반도에 발생하는 일강수량이 150 mm 이상인 집중호우를 종관적 유형별로 분석한 결과 장마전선에 의한 호우가 절반이상을 차지하고 있음을 알 수 있으며, 장마기간인 6월 말에서 7월 말 기간에 하층제트의 발생빈도가 높게 나타남으로써 장마전선상에 다량의 수증기가 하층제트를 따라 지속적으로 유입되면서 한반도에 집중호우가 발생하였다. 일반적으로 하층제트를 따라 수증기가 수송되면 이보다 북쪽에 있는 상층제트 사이의 어떤 곳(상승류의 절대치가 가장 약한 곳)에 호우가 발생하기도 하며, 상·하층제트의 발달과 합류로 인한 상호작용이 집중호우를 발생시킨다. 남서쪽에 접근하는 하층제트가 동반되어 하층제트 핵의 출구 상공에 상층제트의 입구가 존재하고, 하층제트가 상승하는 길목에 따라 상층제트까지 강풍대가 연결될 때, 하층제트의 북쪽 주변에서 북동풍이 유입되고, 이 북동풍은 주변 고압대에서 유입된 한랭 건조한 기류로 온난 습윤한 상승류의 남서풍과 강한 온도 및 습도 경도를 이루면서 하층제트의 활동을 보조면서 집중호우가 발생한다.

Fig. 5는 최근 10년간 하층제트의 발생빈도가 높았던 2004년, 2006년, 2008년, 2009년의 7월의 500 hPa의 고도장의 NCEP/NCAR(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) 재분석 자료이다. 7월 자료를 이용한 이유는 최근 10년간 6월에서 9월 기간에 하층제트의 유입으로 인한 집중호우의 발생빈도가 7월에 가장 높게 나타났기 때문이다. 이를 분석한 결과 하층제트의 발생빈도가 높았던 2009년도와 2006년도의 5880 gpm 고도선이 120 °E 까지 동서방향으로 넓게 확장하였으며, 위도 35 °N에서 45 °N 사이의 등압선이 전선으로 접근하면서 간격이 좁아지고, 이로 인하여 상승기류가 발달하고 장마전선의 활동이 활발하여 강도가 강한 집중호우가 발생하였다. 그러나 하층제트가 발달한다고 하여 강한 강도의 집중호우가 발생하지는 않았다. 2008년도에는 하층제트의 발생률이 높았으나 북태평양 고기압이 충분히 발달하지 못하고, 다량의 수증기 공급원이 적었기 때문에 2009년도에 비해 적은 강수가 발생하였다. 즉, 하층제트가 발달하기 쉬운 구조를 갖더라도 다량의 수증기 공급원이 제공되지 않았을 경우에는 강한 강도의 집중호우가 발생하지 않았다. 현재 지구온난화로 인한 한반도 주변해역의 수온 상승 및 중국의 대륙온도 상승으로 인한 다량의 수증기 공급원이 증가하고 있으며, 이러한 수증기가 하층제트를 따라 장마전선 상에 유입되어 강한 강도의 집중호우가 발생할 확률이 높을 것으로 판단된다.

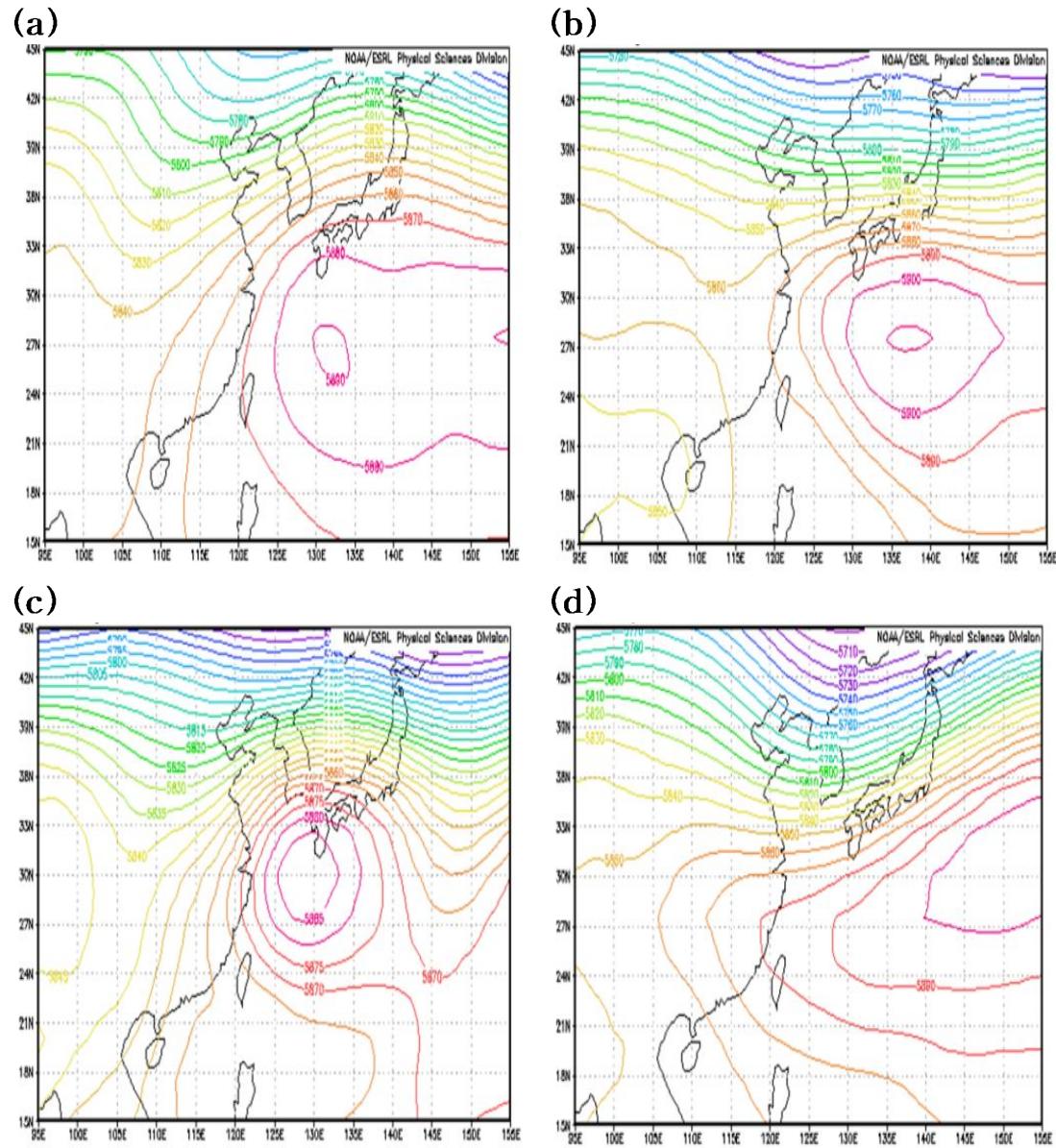


Fig. 5. 500 hPa geopotential height field for (a) July 2004, (b) July 2006, (c) July 2008, and (d) July 2009.

제2절 경기남부지방 집중호우(2009.7.11~12) 사례분석 및 특성

1. 호우 특성

본 연구에서 선택한 사례는 최근 10년(2000 ~ 2009년)간 장마전선상에 하층제트 유입으로 인한 집중호우의 발생빈도가 가장 높았던 2009년도에 일강수량이 200 ~ 300 mm 이상 발생한 2009년 7월 11 ~ 12일의 사례이다. 본 사례기간에는 장마전선상에 남서풍의 하층제트가 유입되기 쉬운 기압구조를 가지고 있으며, 산동반도에서 발달한 저기압이 장마전선과 합류되면서 경기도 남부지방을 중심으로 강한 호우역이 발생하였다.

장마전선에 동반된 저기압이 서해상에서 점차 접근하면서 서해안지방을 중심으로 6 ~ 14 m/s의 강한 풍속이 관측되었으며, 12일의 순간 최대 풍속은 일부지역을 제외하고 15 m/s 이상 관측되었다. 장마전선상에서 발달한 저기압이 중부지방을 통과하면서 서울, 경기도지방에 호우주의보, 호우경보가 발표되어 강한 호우가 있었다. 오후에 들면서 북서쪽지방부터 점차 호우특보가 해제되었으나 한랭전선 끝자락이 충청도지방과 전라북도 지방에 걸쳐 통과하면서 호우주의보가 발표되었다(Fig. 6).

Fig. 7은 2009년 7월 12일에 이천, 수원, 충주지역의 기온, 이슬점온도, 풍속, 시간당 강수량을 나타낸 자료이다. 이천지역에서는 일강수량이 304 mm로 가장 높게 나타났으며 05시경에 41.5 mm, 11시경에 38 mm의 강한 호우가 발생하였다. 수원지역에서는 09시경에 44.5 mm로 시간당 강수량이 가장 높게 나타났으며, 6시간 안에 200 mm 이상의 호우가 발생하였다. 16시경에는 충주지역에 39 mm의 호우가 발생하였으며, 그 외에 한랭전선의 영향으로 전라북도 익산지역에는 시강수량이 35 mm를 기록하여 호우주의보가 발표되었다.

Fig. 8은 본 사례기간의 모식도이다. mT와 cT사이에 형성된 장마전선이 남북으로 진동하고 서해상에서 장마전선을 따라 좁고 강한 수렴대가 중부지방으로 형성되어 강한 비구름대가 발달하였고, 우리나라 북서쪽에서 상층 한기가 중부지방으로 이류 되면서 불안정이 커졌다. 상층제트는 서한만 부근에 위치하고, 하층제트는 화남 남서부 지방으로부터 수증기 유입이 강화되면서 상 · 하층 제트축이 좁아지면서 수렴대가 강화되었다. 여기에 잠재 불안정도가 큰 산동반도 서쪽에서 발생한 저기압이 장마전선과 합류하여 호우의 발생을 강화시켰다. 이러한 유형의 또 다른 사례는 2006년 7월 27일 ~

28일 충청북부와 경기도지방을 중심으로 한 집중호우와 비슷한 유형으로 장마전선의 북쪽에 지속시간이 길고 넓은 지역에 집중호우가 발생하였다.

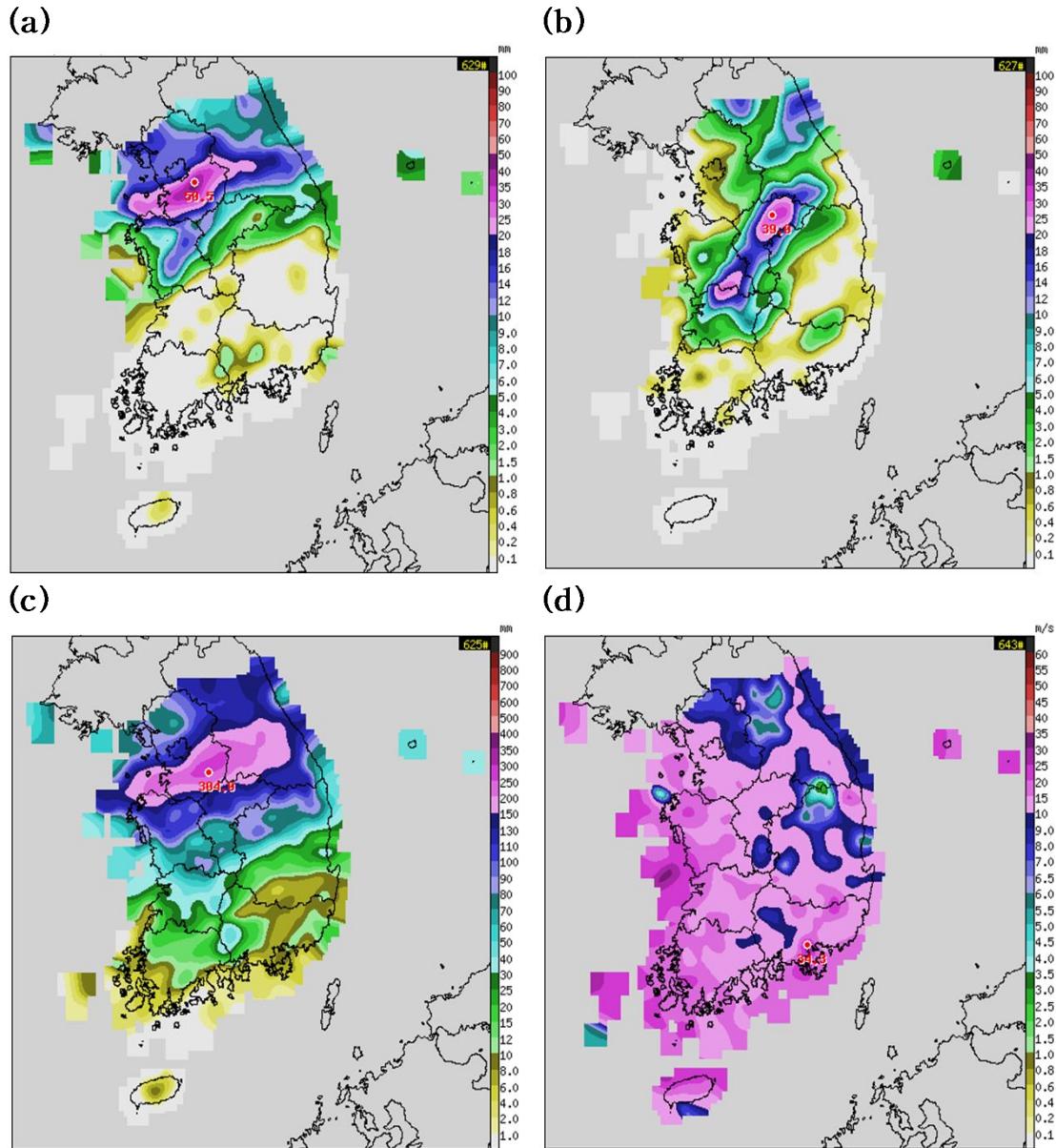


Fig. 6. Distribution of hourly precipitation at (a) 00 UTC, (b) 07 UTC, (c) daily precipitation, and (d) maximum instantaneous wind speed on 12 Jul, 2009.

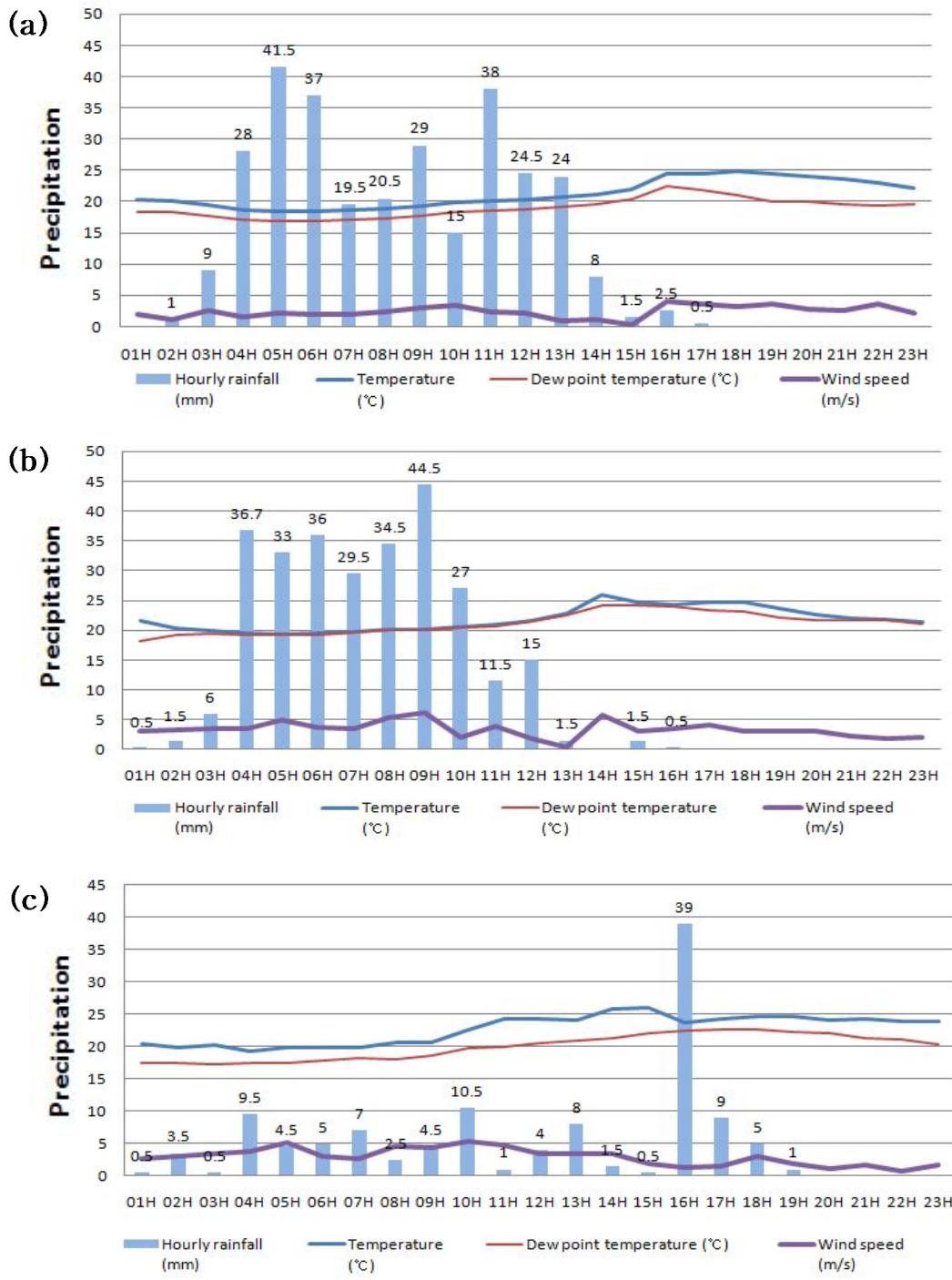


Fig. 7. The distribution of hourly rainfall, temperature, dew point temperature, wind speed at (a) Icheon, (b) Suwon, and (c) Chungju on 12 Jul, 2009.

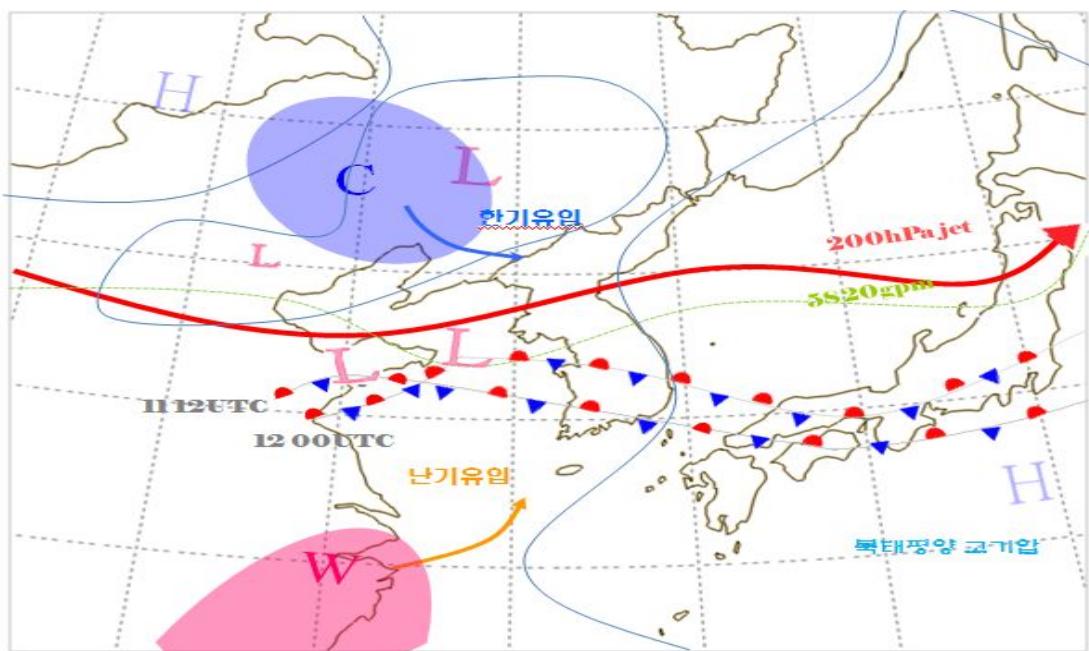


Fig. 8. Schematic diagram for explaining the synoptic characteristics associated with heavy rainfall on 12 July, 2009.

2. 종관기상 특성 분석

가. 지상

장마기의 일기도는 장마전선이 북태평양 고기압과 오헤츠크해 고기압 사이에 놓여 있고, 만주 지방과 양쯔강 유역에 광범위한 저압부가 있는 특징을 갖는다. 또한, 2 ~ 3 일 주기로 전성상에 약한 저기압이 양쯔강 유역의 저압부로부터 장마전선을 따라 동진하면서 북태평양 고기압에서 흘러나오는 온난 다습한 공기가 오헤츠크해 고기압에서 흘러나오는 한랭 다습한 북동 기류를 타고 상승하기 때문에 비가 내리는 구역이 장마전선의 북쪽에 지속시간이 길고 넓은 지역에 많은 호우가 발생하였다.

Fig. 9는 2009년 7월 11일 12 UTC와 7월 12일 00 UTC의 지상일기도로 북태평양 고기압이 한반도 남쪽까지 확장되어 있다. 우리나라 북쪽으로 mP 기단이 남쪽으로 mT 기단이 놓여있고 장마전선이 우리나라 중부지방에 형성되어 남서기류가 한반도로 유입되는데 유리한 기압배치를 하고 있다. 또한 필리핀 동쪽해상에서 발생한 태풍이 위도 20 °N에 거의 평행하게 이동하면서 중국 남부로 서진하고, 장마전선상에서 발달한 저기압이 서해 중부해상을 거쳐 북동진하면서 중부지방에 강한 호우가 발생하였다.

나. 850hPa

Fig. 10은 2009년 7월 11일 12 UTC와 7월 12일 00 UTC의 12시간 간격의 850 hPa 일기도이다. 11일 12 UTC에서 850 hPa 등압면의 기준고도인 1500 gpm 고도선은 한반도 남부해상을 따라 일본열도을 지나가고 있으며 한반도 남서쪽에서 약 20 ~ 30 kts의 풍속이 관측되었고, 12일 00 UTC에는 약 40 kts의 강한 남서풍의 하층제트가 관측되었다. 이를 분석한 결과, 북태평양 연변을 따른 남서 기류에 의한 수증기 유입을 예상할 수 있다. 온도 분포를 살펴보면 중국남부와 일본남부는 온난지역에 속하고, 한반도 북부지역은 한랭지역에 위치하고 있다. 11일 12 UTC에서 12일 00 UTC까지 18 °C 온도선은 그대로 유지되고 있으나 15 °C 온도선이 12일 00 UTC에 한반도 북부지방까지 남하하여 온도경도가 증가하고 있다. 서해상에서 발달한 기압골이 중부지방을 지나고 있으며, 기압골의 끝자락이 남동진하면서 여산, 함열 등 전라북도 지방으로 다소 많은 호우가 발생하였다. 습윤 분포를 보면 11일 12 UTC에 중국내륙과 한반도 서해상

지역에 습윤 구역이 분포하고 있고, 12일 00 UTC에는 중국내륙에서 동중국해, 한반도에 이르기까지 습윤 구역이 분포하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 11은 2009년 7월 11일 12 UTC와 12일 00 UTC의 12시간 간격의 WebFas를 이용한 자료이다. 850 hPa과 200 hPa의 수분속과 풍속을 나타낸 자료로, 하층제트라 할 수 있는 25 kts 이상의 지역이 서해상에 위치하고 있으며, 약 50 kts 이상의 상층제트가 11일 18 UTC에 한반도 전역에 위치하고 있다. 7월 11일부터 18 UTC부터 온난한 수증기가 지속적으로 공급되어 12일 오전에 그 수송량이 중부지방으로 최대치를 보였다. 남서풍의 하층제트는 다량의 수증기를 한반도 내륙지방으로 지속적으로 유입되면서 하층제트의 강한 상승류가 상층제트로 이어지는 입체적인 풍계를 형성하여 한반도 중부지방에 수렴과 합류로 인한 강한 집중호우가 발생하였다.

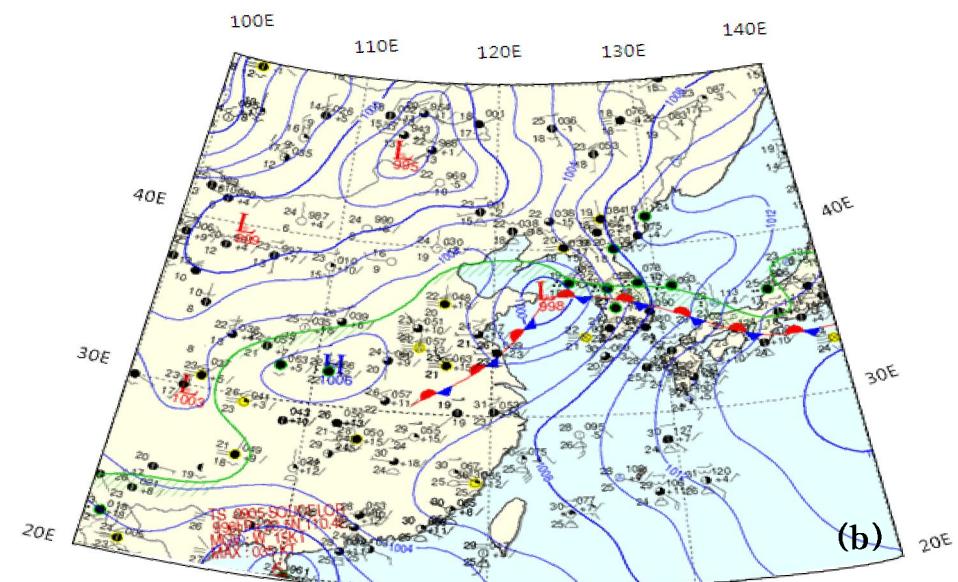
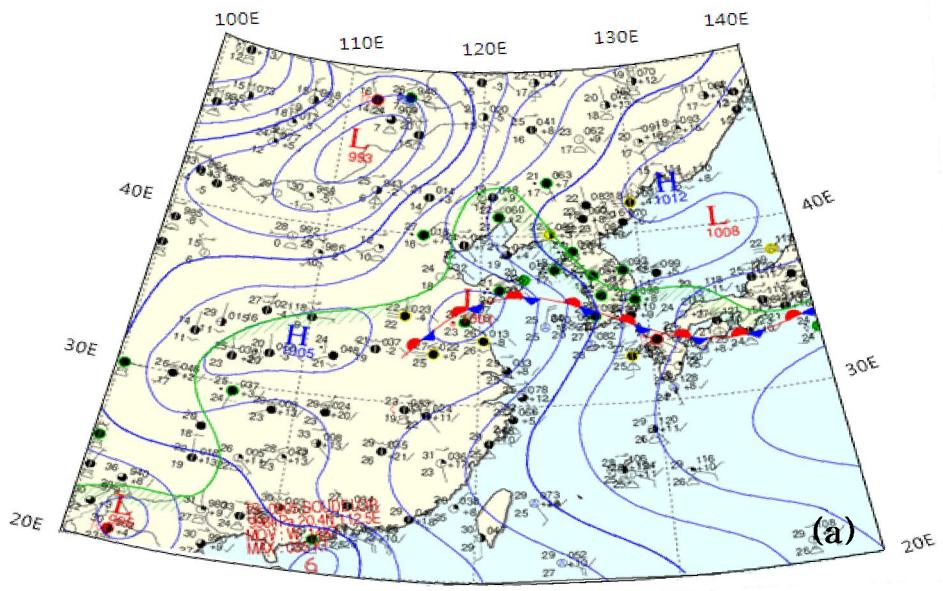


Fig. 9. Surface weather chart at (a) 12UTC 11 July and (b) 00UTC 12 July, 2009.

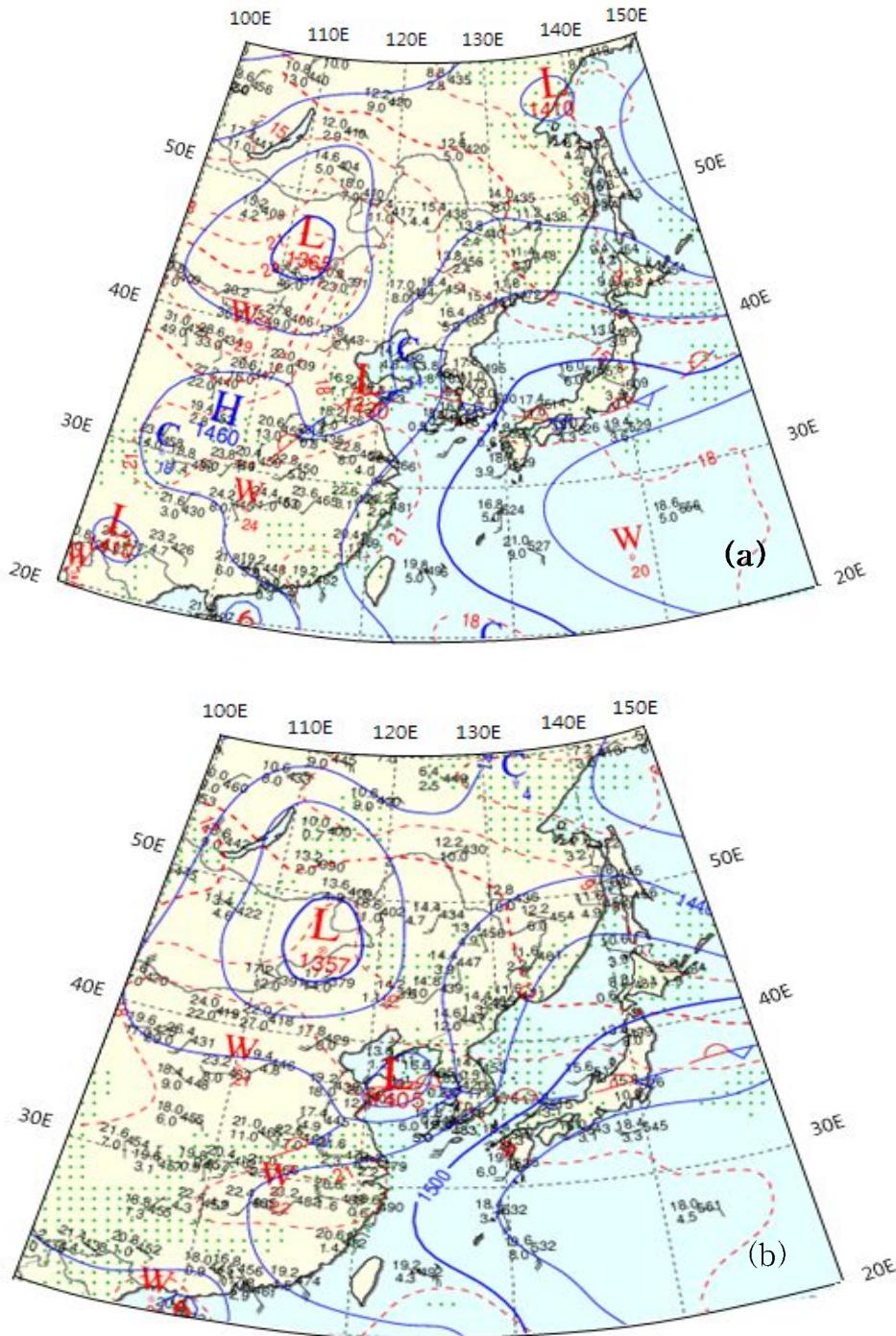


Fig. 10. 850 hPa geopotential height and temperature fields at (a) 00UTC and (b) 12UTC 11 July, (c) 00UTC and (d) 12UTC 12 July, 2009.

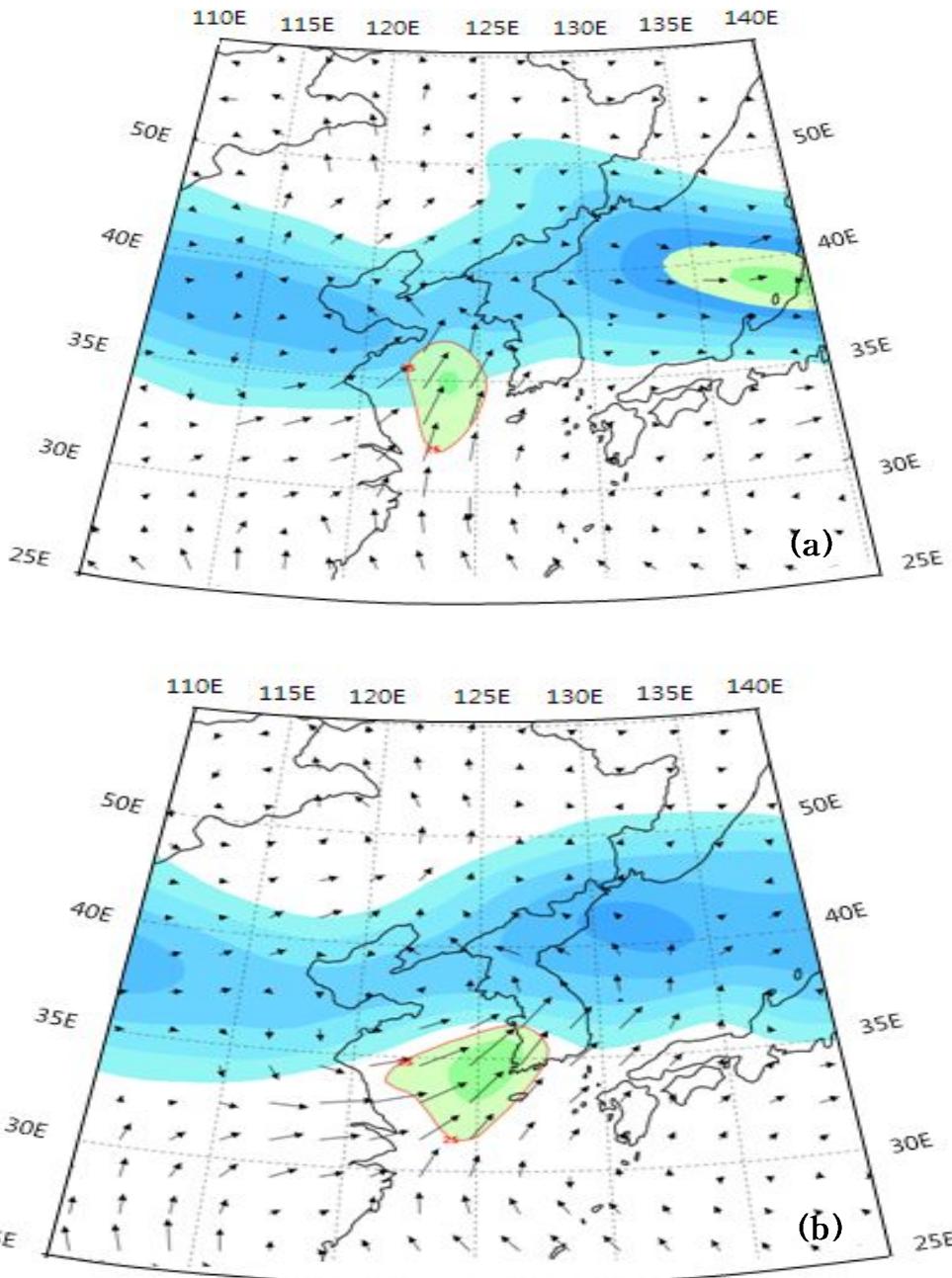


Fig. 11. 850 hPa moisture flux(vector arrow), upper and low level jet (shaded area) at (a) 12UTC 11 July and (b) 00UTC 12 July, 2009.

다. 500hPa

Fig. 12는 2009년 7월 11일 12 UTC와 7월 12일 00 UTC의 12시간 간격의 500 hPa 고층일기도이다. 11일 12 UTC에 발해만 위로 기압골이 위치하고 있으며, 같은 시간에 5820 gpm 고도선은 중국 상해와 한반도 중부지방을 지나고 있다. 12일 00 UTC에는 중국 동해상에 자리잡고 있는 한기를 동반한 기압골이 중위도 편서풍을 따라 동쪽으로 이동하고, 제주도 남쪽으로부터 고온다습한 남서류가 유입되고 있다. 500 hPa 기압골이 북부지방으로 통과하면서 5820 gpm 고도선은 중부지방까지 남하하여 주 강수대를 보였으나 기압골의 끝부분이 전북지방에 걸치면서 일부지방에도 많은 강수가 있었다.

온도 분포를 살펴보면 11일 12 UTC에 -5°C 온도선이 한반도 서해안을 따라 중국 내륙까지 이어져 있다. 12일 00 UTC에는 -5°C 온도선은 한반도 중부지방을 거쳐 일본열도로 이어져 있으므로 한반도 중부지역이 온난한 지역에 속한다. 500 hPa 고도의 풍향을 살펴보면 남서쪽을 가리키고 있는데 이는 지속적인 남서류의 유입으로 강한 풍속과 함께 습윤한 공기를 지속적으로 공급되어 지상저기압이 발달되고 날씨가 악화되었다.

라. 200hPa

Fig. 13은 2009년 7월 11일 12 UTC와 7월 12일 00 UTC의 200 hPa 고층일기도이다. 고 상당온위역이 중부지방에 위치하고 후면에 한기를 동반한 건조역이 접근하면서 강한 대류운이 형성되었으며, 상층제트는 40°N 부근, 하층제트는 36°N 부근에서 남북방향으로 형성되었고 상층제트와 하층제트가 우리나라에서 만나면서 중부지방에 100 ~ 300mm의 많은 강수를 유발하였다.

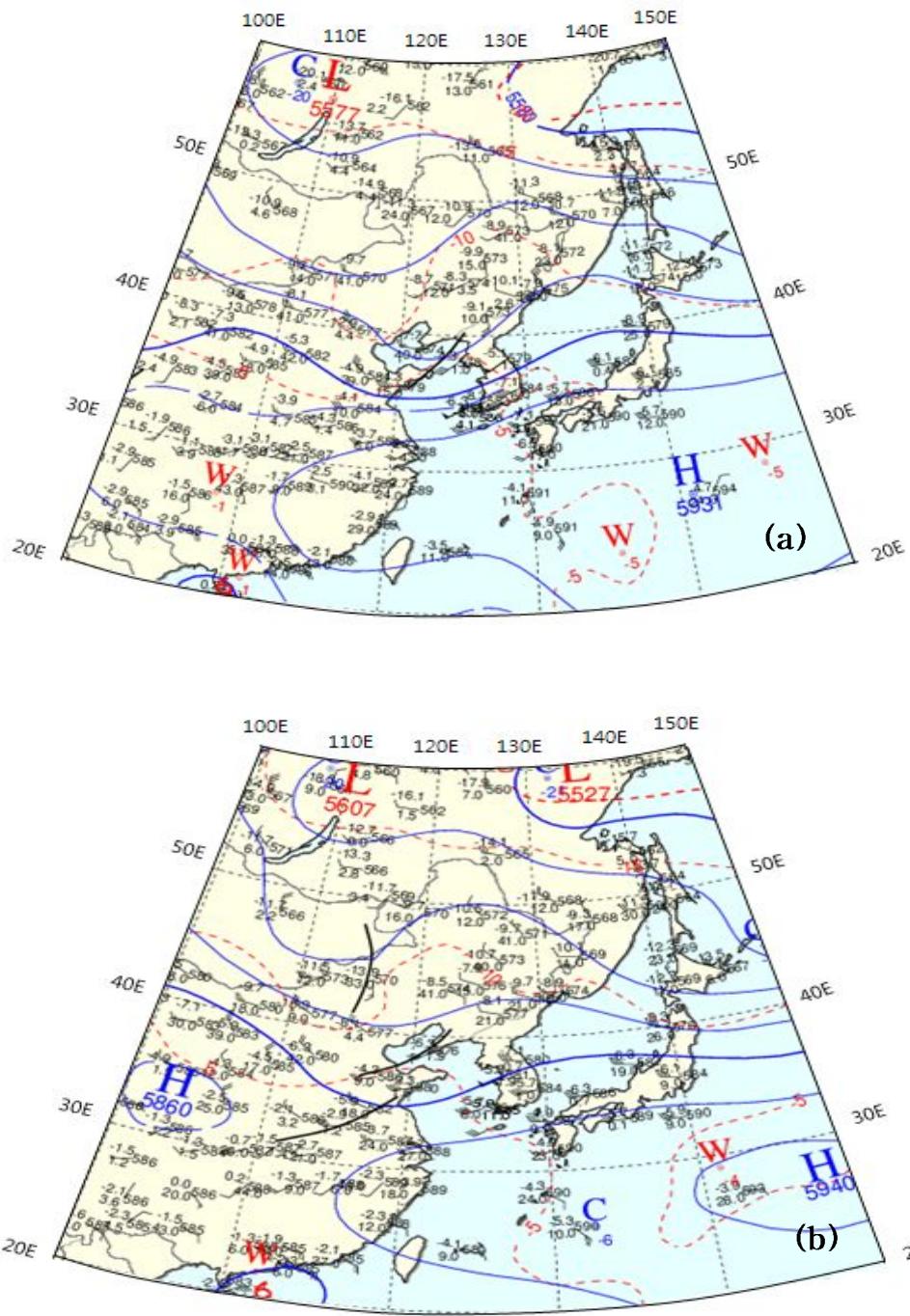
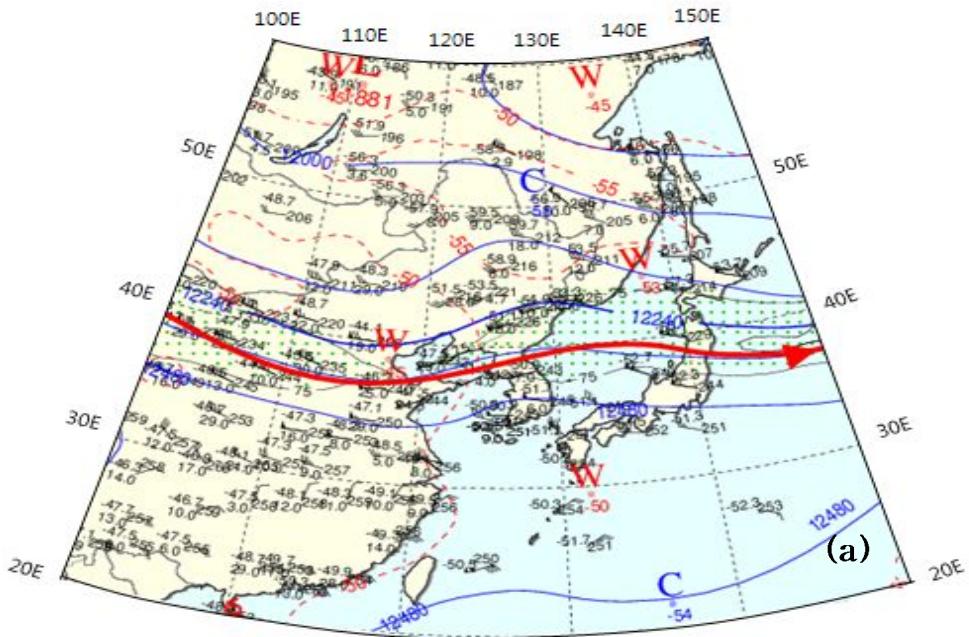
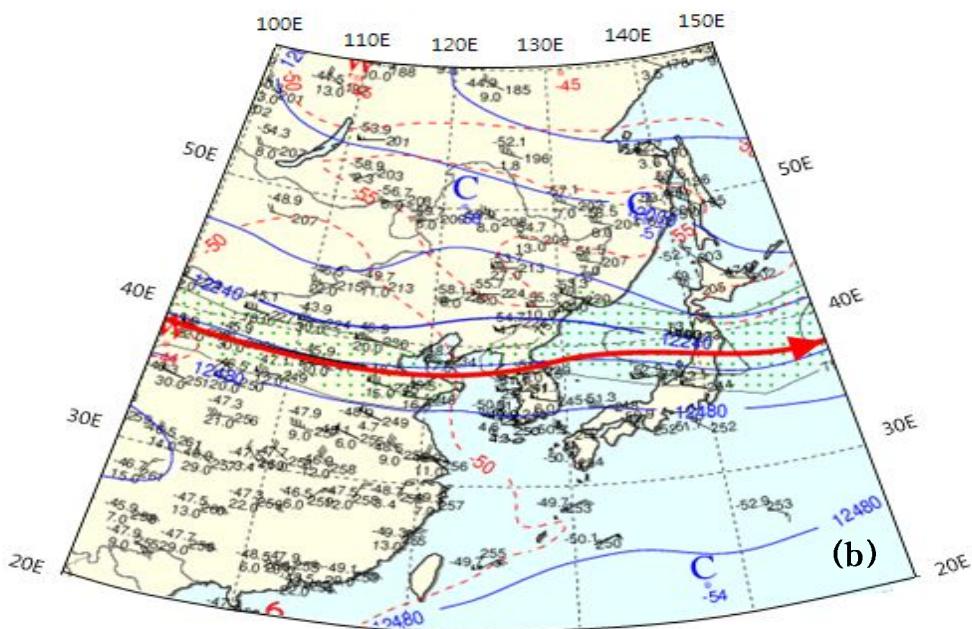


Fig. 12. 500 hPa geopotential height(solid line) and temperature(dashed line) at
(a) 12UTC 11 July and (b) 00UTC 12 July, 2009.



(a)



(b)

Fig. 13. Same as Fig. 12 but for 200 hPa.

마. 보조일기도

Fig. 14는 12일 00 UTC 보조일기도(가)와 보조일기도(나) 자료를 분석하였다.

여름철 대기하층의 안정도, 수증기의 절대량, 수증기의 포화정도에 의해 결정되는 K-index는 소나기 구름의 발생 확률이 40 % 이상일 경우 음영 영역으로 표시되는데, 중국의 남부 지방 전역과 우리나라 전역에 +35이상으로 분포하고 특히 서울경기지방을 +39으로 불안정역이 강화되어 심한 뇌우 가능성 나타낸다. 이번 집중호우 기간 중 장마전선이 남북으로 진동한 충청도지방과 경기도 지역을 중심으로 강한 풍속과 함께 강수를 보였다(Fig. 14a).

기단의 상호비교와 전선 구분에 사용되는 850 hPa Equivalent potential temperature 자료이다. 열대기단의 성질을 갖는 불안정지역인 333 K선이 12일 00 UTC에는 서해상을 비롯한 중부내륙지방에 폭넓게 분포하고, 화남지방으로부터 주변지역보다 강한 불안정 지역(W, 357 K)이 형성되어 유입됨을 알 수 있다(Fig. 14b).

500 hPa Vorticity 자료로 기압골 전면에서는 양의 와도(저기압성 와도), 기압능 전면에는 음의 와도(고기압성 와도)로 와도의 강도와 지역을 파악함으로써 저기압의 발달 정도를 파악할 수 있다. 경기도지방을 포함한 우리나라 중부지방은 음영부분으로 양의 와도에 해당되며, 호우가 발생하고 있음을 알 수 있다(Fig. 14c).

700 hPa Vertical Velocity 자료는 대기의 상승 및 하강 운동을 파악하는 데 이용된다. 여기서 연직속도는 p-velocity로서 시간당 기압의 변화량을 말하며, 음의 구역이 상승구역이고, 양의 구역이 하강 구역이다. 12일 00 UTC에는 서해상에 점차 북상하여 한반도 중부지방이 -9의 음의 영역으로 상승류가 급격히 발달하고 수증기의 상승에 따라 포화로 인해 옹결함으로서 국지적인 강수가 발생함을 알 수 있다(Fig. 14d).

마. 원격탐사

Fig. 15는 2009년 7월 11일 20 UTC(a)에서 7월 12일 01 UTC(f)까지의 한반도 영역에 대한 1시간 간격의 MTSAT 강조 적외 위성영상 자료이다. 수원 지방에 집중호우가 내렸던 12일 00 UTC를 중심으로 구름의 발달을 파악하기 위해 1시간 간격의 자료를 분석하였다. 11일 20 UTC에 한반도 전역에 구름대가 동서로 위치하고 있으며 서해상에 밝은 영역을 보이며, 여러 개의 호우 세포가 강하게 발달하고 있음을 알 수 있다.

점차 장마전선 위에서 발달한 중규모 저기압이 발달하면서 빠른 속도로 동진하고, 서해 해상에 여러 개의 대류밴드가 동시에 발달하면서 동북동 방향으로 이동해 가고 있다. 이러한 호우 세포들이 내륙에서 모여 넓은 지역에 큰 구름무리를 형성하여, 내륙으로 이동하여 한반도 중부지방을 중심으로 강한 비구름이 발달하였다.

한반도에서 발생하는 중규모 대류계에 의한 집중호우는 해안선 근처에서 급격하게 발생하여 짧은 시간과 좁은 영역에 걸쳐 많은 비를 내리기 때문에 작은 공간적 차이에서 큰 강수량 차이가 나타나는 것이 특징이다. 그러므로 급격하게 발달하는 중규모 대류계를 포착하기 위해 레이더 영상을 분석하였다.

Fig. 16은 2009년 7월 11일 20 UTC부터 7월 12일 06 UTC(f)까지 2시간 간격으로 강수에코를 측정한 레이더 영상이다. 서해중부해상에서 발달한 저기압이 장마전선상에 합류되어 하층제트를 따라 다량의 수증기가 지속적으로 유입되면서 중부내륙지방을 중심으로 동서방향으로 강한 강수에코가 발생하였다. 시간이 지남에 따라 상층의 제트핵이 동진하고 있으며 하층제트는 서해상으로 유입되어 레이더 에코는 남부지방에 거쳐 중부지방에 강하게 나타나며, 상층 제트와 만나는 부근 38선 부근에 강한 강수에코가 나타났다. 강수역은 전시간보다 다소 동진하여 서울, 경기, 강원도에 이르는 중부지방에 위치하면서 상·하층제트의 합류와 하층제트의 북쪽 주변에서 북서풍이 유입되고, 이 북서풍은 온난 습윤한 상승류의 남서풍과 강한 온도 및 습도 경도를 이루면서 하층제트의 활동을 강화시켜 하층에 수렴과 상층의 발산역이 위치하여 매우 강한 대류불안정을 가속화 시켰다. 12일 02 UTC에는 장마전선의 끝자락이 충청도 와 전라북도를 통과하면서 강수현상을 발생시켰다. 12일 04 UTC부터는 전라남도 지방에 한랭전선 전면에 강한 에코가 나타나며 단시간에 강한 호우가 발생하였다. 점차 한랭전선을 따라 호우세포들이 동진하여 경기도 및 전라도 지방은 호우역에서 벗어났다.

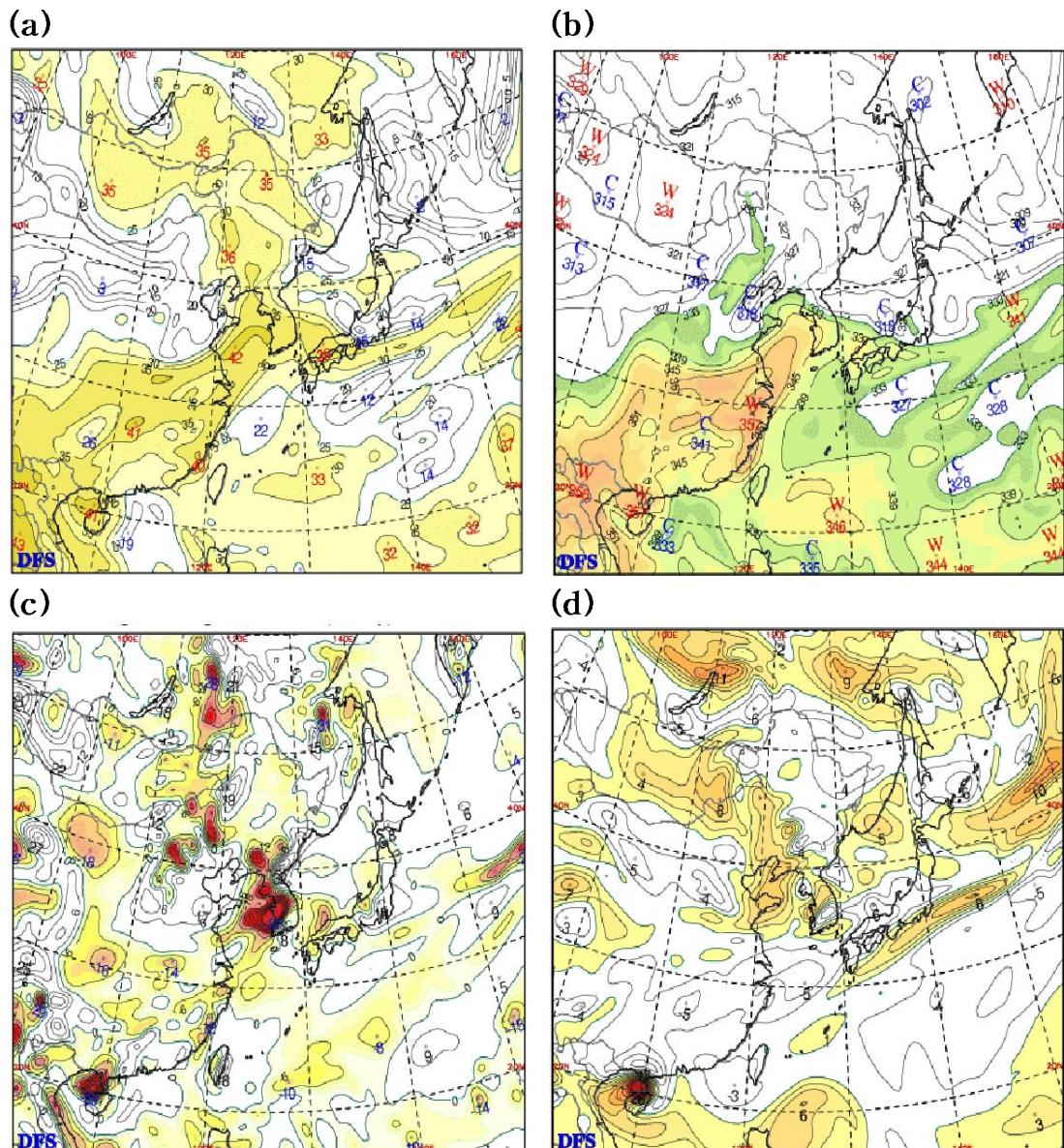


Fig. 14. (a) K-index, (b) 850 hPa equivalent potential temperature, (c) 500hPa vorticity, and (d) 700 hPa vertical velocity at 00UTC 12 July, 2009.

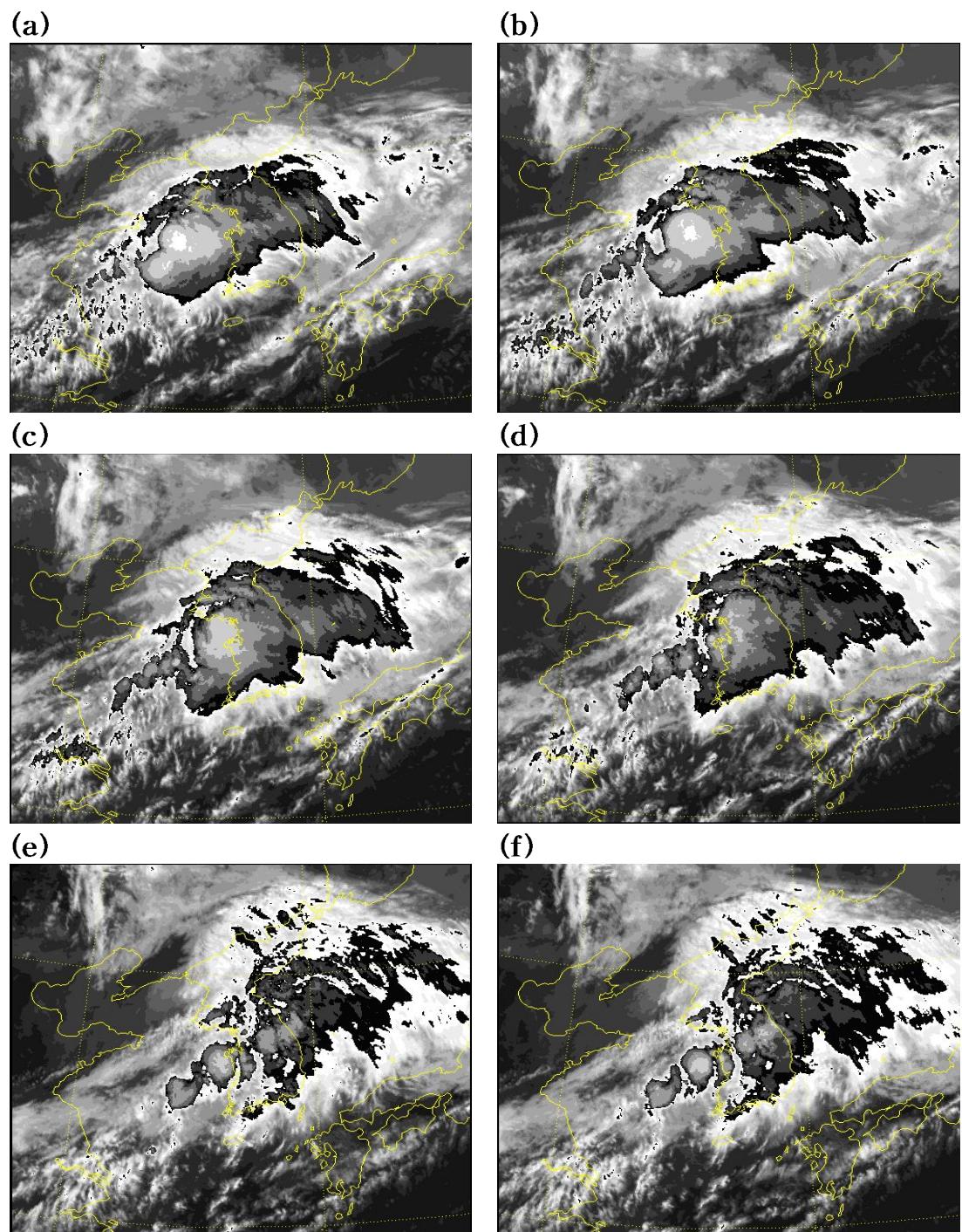


Fig. 15. Hourly imageries of MTSAT Enhanced IR from 20UTC 11 July to 01UTC 12 July, 2009.

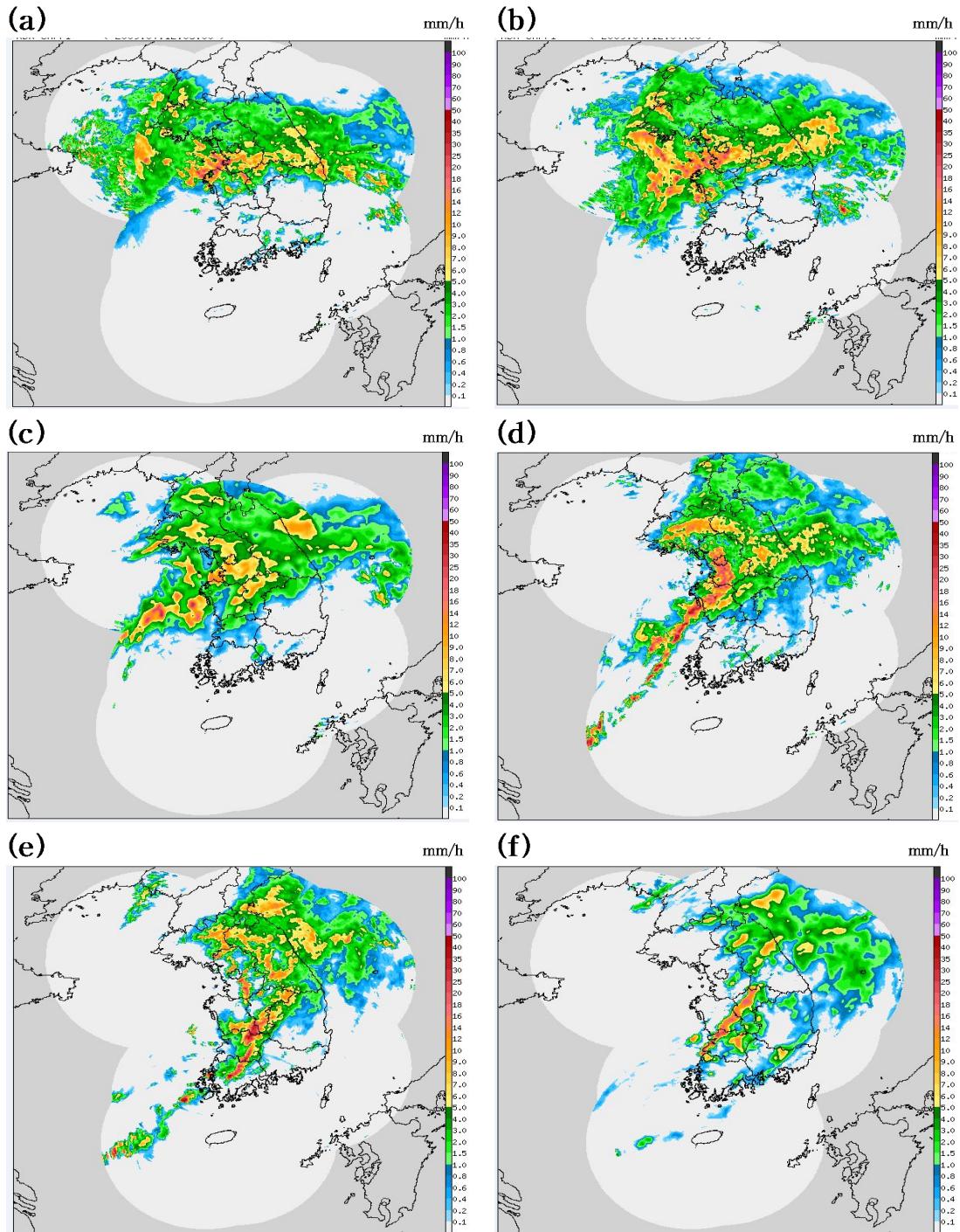


Fig. 16. 2-hourly imageries of radar reflectivity from 20UTC 11 July to 06UTC 12 July, 2009.

3. 국지기상분석(KLAPS)

본 연구에서는 KLAPS(Korea Local Analysis and Prediction System)를 통해 산출된 자료를 분석하였다. KLAPS 자료는 자료 수집 모듈과 분석 모듈을 거쳐 최종적으로 산출된 자료로 3차원 그래픽 도구에 의해 현재 대기상태를 나타내는 그림으로 표출되어 실황 예보에 활용되고, 3차원 격자점 자료로 변환되어 수치예보모델의 기초 자료로 쓰이며 KLAPS의 좌표계는 수평 2 ~ 20km의 해상도로 람페트 공형(Lambert conformal) 및 극평사(polar stereo graphic) 등의 도법이 가능하고 연직 좌표계는 등압면 좌표계로 25 hPa의 해상도까지 분석이 가능하다. 이를 통해 meso- β 에서 meso- γ 에 이르는 국지규모 기상 현상을 분석 할 수 있다.

Fig. 17은 수원(37.3 °N, 126.9 °E)에서 100km 범위 내의 남북 연직단면으로 2009년 7월 11일 12 UTC와 12일 00 UTC의 1000 hPa - 150 hPa 층의 Temperature, Wind, Equivalent potential temperature를 나타낸 것이다.

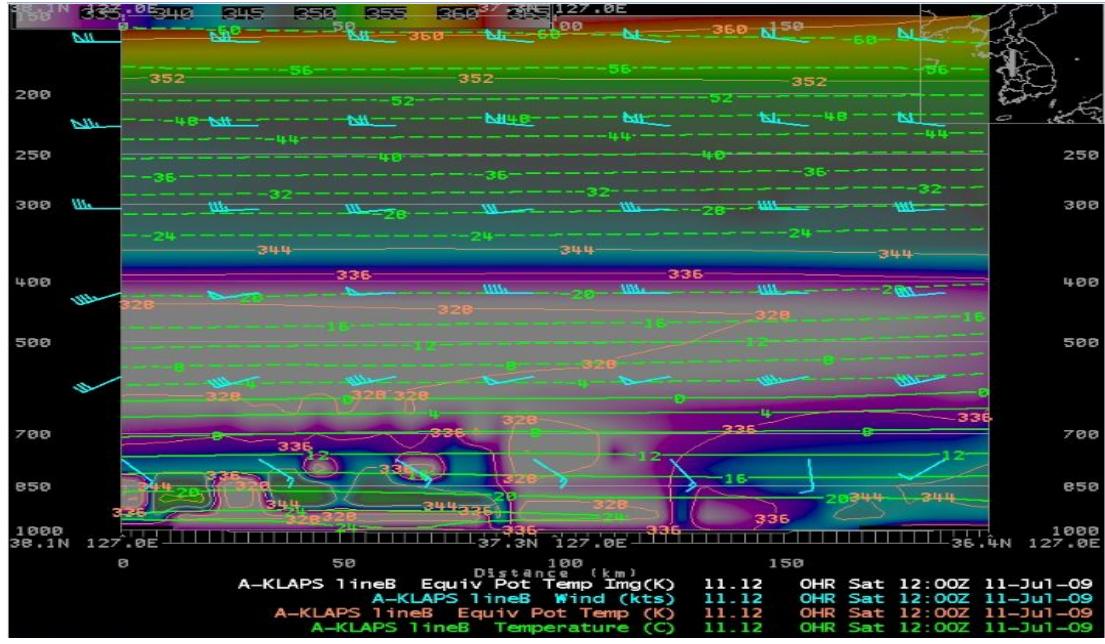
수원을 중심으로 328 K의 저상당온위가 커다란 기둥의 형태로 1000 hPa - 400 hPa 까지 위치하고 있으며, 1000 hPa - 700 hPa 층에서는 상대적으로 높은 고상당온위가 저상당온위와 대치되고, 700 hPa - 400 hPa 층에는 저상당온위역이 전층에 나타나면서 대기의 불안정으로 기상이 악화됨을 알 수 있다(Fig. 17a). 12일 00 UTC 자료에서는 저상당온위가 700 hPa - 500 hPa 전층에 넓게 위치하고 있고, 그 밑으로 고상당온위가 넓게 분포하고 있다(Fig. 17b). 이로 인하여 대기불안정역이 형성되었고, 지속적으로 하층의 온난 다습한 습기이류로 인하여 불안정역이 더욱 가중되어 강수가 발생하였다. 상층의 바람은 40 ~ 50 kts 이상의 서풍이 지속적으로 불고 있으며, 강한 강도의 집중호우가 발생하기 전에는 하층에 남동풍의 바람이 관측되었으나, 저기압이 통과하면서 30 kts 이상의 남서풍을 보이면서 온난한 수증기가 유입되어 강한 강도의 집중호우가 발생하였다. 즉, 바람장에 의한 상하층의 연관은 700hPa 이하 고도의 하층대기에 남북방향으로 강한 수평적 온도, 습도, 경도와 바람취어가 존재하는 경압성 지역을 형성하게 되면서 강한 집중호우가 발생하였다.

Fig. 18은 Fig. 17에서와 같은 방법으로 2009년 7월 11일 12 UTC와 12일 00 UTC의 1000 hPa - 500 hPa 층의 Omega, Divergence, Vertical circulation을 나타낸 남북 연직단면도이다. 11일 12UTC에서는 수원을 중심으로 북쪽 지역에서는 양의 Omega 값이 전층에 위치하고 있어 대기의 상승작용이 활발하고, 수원을 중심으로 남쪽으로 100

km 이내에는 하강역이 나타나면서 수원을 중심으로 강한 수렴역이 발생하여 기상이 악화됨을 알 수 있다(Fig. 18a). 양의 Omega 값이 위치하고 있는 수원을 중심으로 북쪽 100 km 이내 지역에서는 Divergence와 Vertical circulation을 통해서도 대기의 상승을 확인할 수 있다. 강수가 발생한 12일 00 UTC에서는 양의 Omega 영역이 점차 수원을 중심으로 남북으로 강한 수렴으로 인한 대기의 상승역으로 기상악화 현상이 발생하여 강도가 강한 집중호우가 발생함을 알 수 있다(Fig. 18b). 이러한 대기의 상승작용은 Divergence와 Vertical circulation을 통하여 확인할 수 있다.

Fig. 19는 탐측자료로 11일 12 UTC 자료에 1000 hPa - 700 hPa 층에는 남동풍이 불고 있으며, K-index는 +29로 뇌우의 발생확률이 40 ~ 60%를 나타낸다(Fig. 19a). 12일 00 UTC에는 1000 - 900 hPa 층에 남풍이 관측되고, 900 hPa 이상의 고도에는 남서풍의 강한 풍속이 관측되었다. K-index는 +49로 소나기가 발생함을 알 수 있다 (Fig. 19b).

(a)



(b)

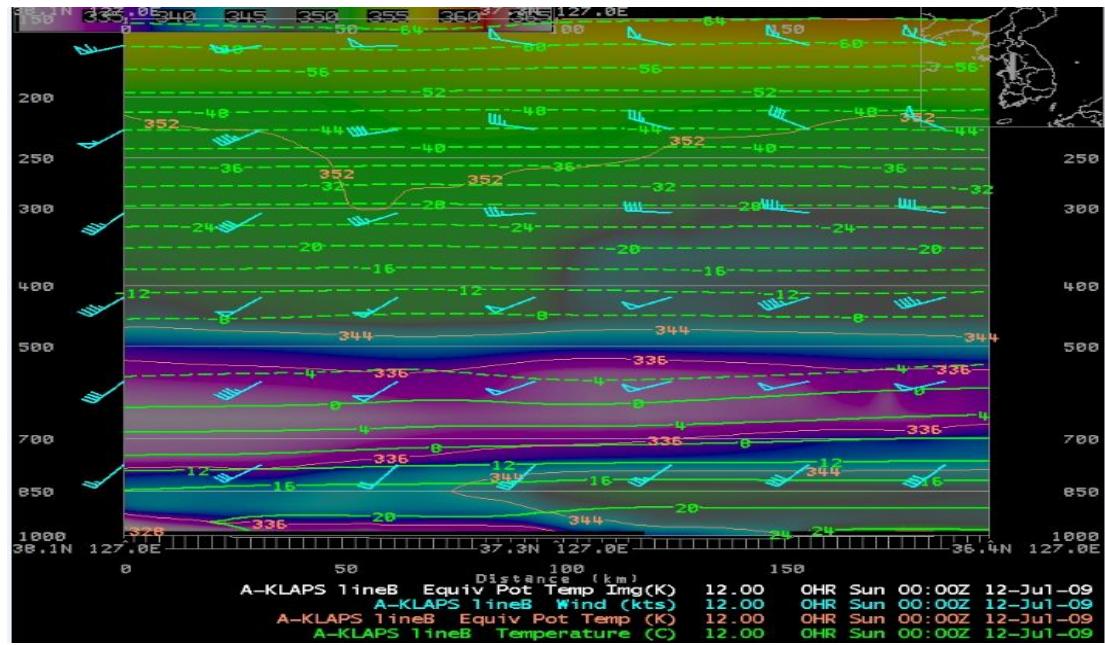
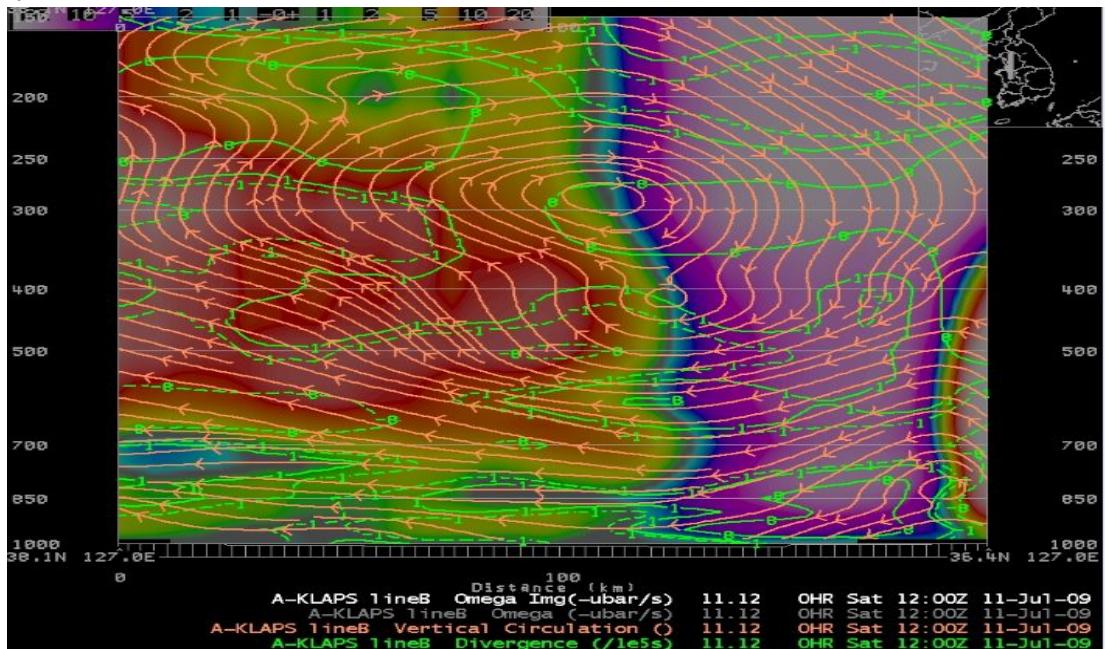


Fig. 17. Longitude(127.0E)-altitude cross-section of temperature(heavy solid line), wind(vector arrow), and equivalent potential temperature(light solid line with shading) at (a) 12UTC 11 July and (b) 00UTC 12 July, 2009.

(a)



(b)

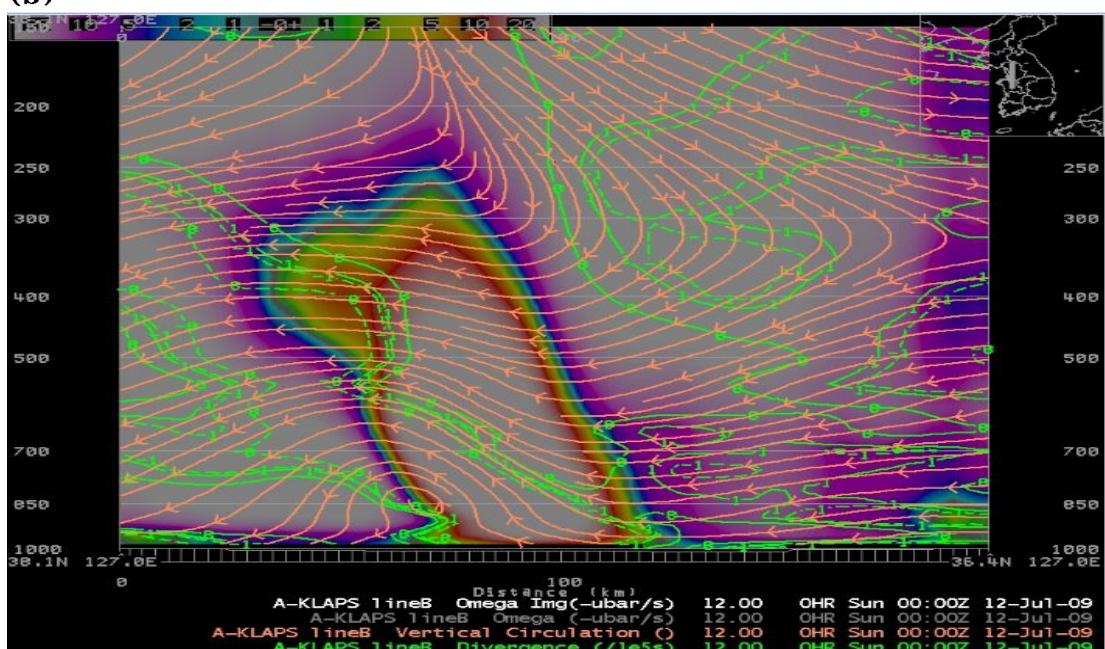
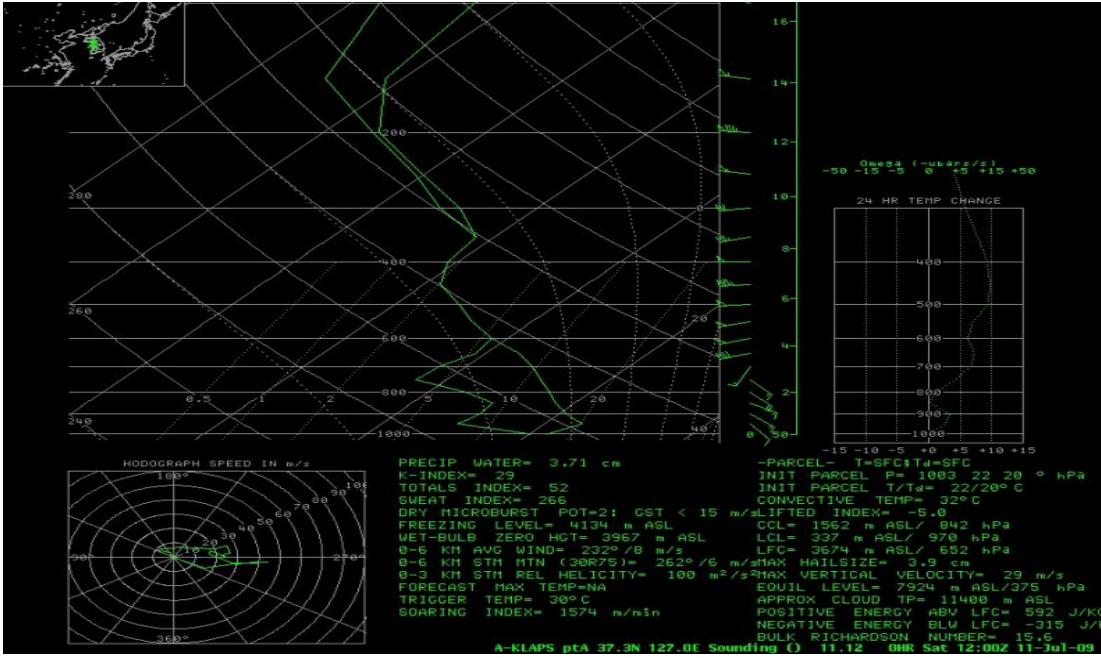


Fig. 18. Longitude(127.0E)-altitude cross-section of omega(shading area), divergence(line), and vertical circulation(streamline) at (a) 12UTC 11 July and (b) 00UTC 12 July, 2009.

(a)



(b)



Fig. 19. Sounding in Suwon at (a) 12UTC 11 July and (b) 00UTC 12 July, 2009.

제 4장 결론

본 연구에서는 최근 10년(2000 ~ 2009)간 6월에서 9월 사이에 한반도에서 발생한 집중호우에 대하여 일강수량이 150 mm 이상인 총 83 회의 호우 중에서 태풍의 직접적인 영향(23 회)을 제외 한 60 회의 호우사례를 종관유형별로 분류하고, 장마전선에 의한 호우와 하층제트와 관련된 강수의 특징을 조사하였다.

일강수량 150 mm 이상의 60 회 호우 중 종관유형별 호우발생 빈도를 보면 장마전선에 의한 호우가 43 회(52 %)로 가장 많았고, 태풍에 의한 호우가 21 회(25 %), 저기압에 의한 호우 12 회(15 %), mT연변 7 회(8 %) 순으로 나타난 것으로 보아 장마전선에 의한 호우 영향이 많은 부분을 차지하고 있음을 알 수 있다. 장마전선에 의한 43 회의 호우 사례 중에서 순수히 장마전선에 의한 영향을 받은 호우사례는 29 회, 장마전선과 저기압의 혼합에 의한 호우사례는 12 회, 장마전선에 태풍의 영향을 혼합한 사례는 2 회로 나타났으며, 이를 분석한 결과 장마전선상에서 중국에서 발생한 저기압이 동진하여 우리나라에 집중호우를 일으키거나, 화남지방에 도달한 태풍이 온대저기압으로 변질되는 과정에서 점차 북태평양 고기압은 약화되고 다량의 수증기가 하층제트를 따라 장마전선에 유입하여 한반도에 집중호우를 발생시켰다.

하층제트와 관련된 사례는 일강수량이 150 mm 이상인 60 회의 호우 사례 중에서 40 회(66.7 %)가 발생하였으며, 200 mm/day 이상의 25 회 사례 중에서는 18 회(72 %)가 발생한 결과 Matsumoto (1973)가 일본의 Baiu 기간 중에 하층제트의 풍속과 강수량과의 관계를 통계적 조사를 통하여 분석한 결과 “풍속이 증가 할수록 강우강도가 큰 강수현상의 빈도가 증가함을 보였다”는 주장과 유사하였다. 하층제트와 관련된 호우가 출현한 총 40 회의 호우 사례 중에 7월에 22 회(55 %), 8월에 10 회(25 %), 6월에 5 회(12.5 %), 9월에 3 회(7.5 %)로 7월에 하층제트와 관련한 호우의 빈도가 높게 나타났다.

본 연구에서 선택한 사례기간은 2009년 7월 11일 ~ 12일이다. 본 사례기간에는 우리나라의 북쪽으로는 mP 기단이, 남쪽으로 mT 기단이 놓여 있어서 남서풍의 하층제트가 발생하기에 유리한 기압배치를 가지고 있으며, 장마전선상에 강한 하층제트가 유입되면서 경기도 남부지방을 중심으로 일강수량이 200 ~ 300 mm 이상 발생하였다. 우리나라의 북서쪽에서는 상층 한기가 중부지방으로 이류 되면서 불안정이 커졌으며, 상층제트는 서한만 부근에 위치하고 하층제트는 화남 남서부 지방으로부터 수증기가

유입되어 강화되었고, 상·하층 제트축이 좁아지면서 수렴대가 강화되었다. 여기에 잠재 불안정도가 큰 산동반도 서쪽에서 발생한 저기압이 장마전선과 합류하여 호우의 발생을 강화시켰다. 북태평양 고기압에서 흘러나오는 온난 다습한 공기는 오후초크해 고기압에서 흘러나오는 한랭 다습한 북동 기류를 타고 상승하면서 장마전선의 북쪽에 지속시간이 길고 넓은 지역에 많은 호우가 발생하였다.

KLAPS자료를 통해 수원을 중심으로 남북 연직단면 자료를 분석한 결과 수원지방을 중심으로 강한 수렴으로 인한 대기의 상승작용으로 집중호우 현상이 발생하였다. 상·하층제트의 합류와 하층제트의 북쪽 주변에서 유입된 북서풍은 남서풍계열의 온난 습윤한 상승류와 강한 온도 및 습도 경도를 이루면서 하층제트의 활동이 강화시켰고, 매우 강한 대류불안정을 가속화 시켰다. 또한, 고상당온위와 저상당온위의 대치와 음과 양의 소용돌이도의 대치, 양의 Omega 값이 존재하면서 대기의 불안정으로 인한 기상 악화현상이 발생하였고, 상·하층에 남서풍 계열의 바람이 40 ~ 50 kts가 관측되어 따뜻한 수증기가 하층제트를 따라 유입되어 집중호우가 발생하였다.

장마전선상에서 하층제트 유입으로 인한 집중호우의 특성은 우리나라의 북쪽으로 mP 기단, 남쪽으로는 mT 기단이 놓여 있는 기압배치 하에서 여름철 북태평양 고기압이 서쪽으로 확장하면서 남서풍의 하층제트가 발생하기 쉬운 구조를 갖고, 그 남단을 따라 세력이 약화된 태풍이 편서풍과 상호작용하여 온대저기압으로 변질된다. 이 때, 다양한 수증기가 하층제트를 따라 지속적으로 유입되면서 온대저기압과 함께 그 세력을 잃지 않고 장마전선상으로 동진하여 남서풍계열의 하층제트가 상층제트로 이어지는 입체적인 풍계를 형성하면서 한반도 중부지방으로 수렴과 합류로 인한 집중호우가 발생하였다.

본 연구는 기존의 장마전선상의 중규모 호우와 하층제트에 관한 연구를 바탕으로 최근 10년 동안 장마전선상에서 다양한 수증기가 하층제트를 따라 지속적으로 유입되면서 발생하는 집중호우에 관한 사례를 분석하였다. 현재 지구온난화로 인한 온도상승으로 한반도로 유입되는 수증기 공급원이 증가하고, 하층제트가 발생하기 쉬운 종관적 구조를 갖는다면 앞으로 한반도에 발생하는 집중호우의 강도는 강해질 것이며, 기상재해로 인한 피해도 증가할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 김철훈 · 권오웅, 2002: 수원 지방에 발생한 호우사례와 하층 jet의 관련성에 관한 연구. 수료연구논문집, 77-103.
- 박준웅 · 정창희 · 김성삼 · 이동규 · 윤순창 · 정영근 · 홍성길, 1986: 1984년 9월 1 ~ 3일에 한국에서 발생한 호우의 종관적 특징분석. 한국기상학회지, 22(1), 42-81.
- 이태영, 1998: 한반도에서 발생하는 밴드형 대류계의 발달기구 8월 5 ~ 6일 사례연구, 대기지, 11, 54-57.
- 이태영, 박상훈, 2005: 장마전선 상에서의 중규모 저기압 발달 기구 사례연구, 10, pp24-25.
- 허창희 · 강인식, 1988: 한국 지역 강수의 변동성에 관한 연구, 한국기상학회지, 24(1), 38-48.
- 황승언 · 이동규, 1993: 한반도에서 발생한 호우와 하층 jet의 관련성에 관한 연구. 한국기상학회지, 29(2), 133-146.
- Chen, G.T.J.,and Yu, 1988: Study of low-level jet and extremely heavy rainfall over northen Taiwan in the Mei-yu season. *Mon.Wea.Rev.*, 116, 884-891.
- Chen, S.-J., Y.-H. Kuo, W. Wang, Z. -Y. Tao, and B. Cui, 1998: A modeling case study of heavy rainstorms along the Mei-Yu front. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 2330-2351.
- K. Ninomiya and S. Youshizumi: 1971, Characteristic features of Baiu front associated with heavy rainfall. *J. Metro. Soc. Japan*, 49, 267-281.
- Lee, T.Y and Y.H. Kim, 2007: Heavy precipitation Systems over the Korean Peninsula and their Classification. *J. Korean Meteor. Soc*, 43, 367-396.
- Matsumoto, S., 1972: Unbalanced low-level jet and solenoidal circulation associated with heavy rainfalls. *J. Metro. Soc. Japan* 50, 194-203.
- Matsumoto, S., 1973: Lower tropospheric wind speed and precipitation activity. *J. Meteor. Soc.Japan*, 51, 101 - 07.
- Wakazuki, Y., K. Tsuboki, and T. Takeda, 2006: Periodic evolution of multiscale precipitation systems developed within a Baju frontal cloud cluster, *J. Meteor. Soc.*

Japan, 84, 497–518.

- Yasunari, T. and T. Miwa, 2006: Convective cloud systems over the Tibetan Plateau and their impact on meso-scale disturbances in the Meiyu/Baiu frontal zone. A case study in 1998. *J. Meteor. Soc. Japan*, 84, 783–803.
- Zhang, C-Z., H. Uyeda, H. Yamada, and B. Geng, 2006a: Characteristics of convections of medium depth to south of the Meiyu front analyzed by using numerical simulation. *SOLA*, 2, 160–163.

감사의 글

2002년도 조선대학교에 입학하여 대학원을 졸업하기 10년이라는 세월이 흘렀습니다. 입학하면서 열심히 배우고 익혀서 더욱 유능한 사람이 되어 나가겠다고 마음먹었던 일이 엊그제 같은데 벌써 이렇게 졸업을 준비하게 되었습니다. 많은 분들의 격려와 도움이 있었기에 부족한 제가 이 논문을 완성할 수 있었습니다. 그분들께 감사의 마음을 전하고자 합니다.

먼저 입학해서부터 지금까지 많은 관심과 격려로 지도해주신 류찬수 교수님과 정효상 교수님께 머리 숙여 감사를 드립니다. 그리고 본 논문이 완성되기까지 전 과정에 큰 도움과 가르침을 주신 김백조 박사님께 깊은 감사를 드립니다.

논문이 나오기까지 많은 배려를 해주신 한국기상기후아카데미의 홍윤 원장님, 김병남 팀장님께 감사드리며, 옆에서 많은 힘이 되어준 윤선영, 김지원, 김선민, 박순영, 고정은, 최지훈에게 고마운 마음을 전합니다. 그리고 대기과학과 실원들 양세환, 김도완, 김진아, 김창모, 서성용, 전대훈, 허솔잎, 황성은에게 고마운 마음을 전하며, 대학원 수업을 들으며 많은 격려를 해주신 강인숙 교장선생님, 양하영, 안보영님께 고마운 마음을 전합니다. 그리고 누구보다 저에게 가장 큰 힘이 되어주신 부모님께 감사드리고 언제나 건강하시기를 바랍니다. 그리고 옆에서 든든하게 있어준 오빠에게도 고마움을 전합니다.

본 논문이 완성되기까지 여러 가지로 도움 주신 분들께 다시 한 번 감사드립니다.

모두 건강하시길 바라고 앞으로 더욱 발전된 모습을 보여드릴 것을 약속드리며 이 작은 결실을 바칩니다.

저작물 이용 허락서					
학 과	대기과학과	학 번	20097381	과 정	석사
성 명	한글: 최 지 영 한문 : 崔 志 英 영문 : Choi, Ji-Young				
주 소	광주광역시 북구 두암동 307-1번지				
연락처	E-MAIL : chjy38317@hanmail.net				
논문제목	한글 : 장마전선상의 하층제트 유입으로 인한 집중호우에 관한 연구 영어 : A Study on the Heavy Rainfall Cases Associated with Low Level Jet Inflow along the Changma Front.				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

- 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함.
 - 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
 - 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
 - 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
 - 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
 - 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음.
 - 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의() 반대()

2011년 2월

저작자: 최지영 (서명 또는 임)

조선대학교 총장 귀하