



저작자표시-비영리-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.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 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](#)

2012年 2月

博士學位 論文

韓半島 集中豪雨 特性分析

- 장마期和 장마 後의 事例를 中心으로 -

2012年
2月

博士學位論文

韓半島
集中豪雨
特性分析

鄭然昂

朝鮮大學校 大學院

大氣科學科

鄭 然 昂

韓半島 集中豪雨 特性分析

－ 장마期和 장마 後의 事例를 中心으로 －

The Analysis of Characteristics of Heavy Rainfall over the Korean
Peninsular, through Case Studies of Heavy Rainfall Events
during the On - and Off - Changma Season

2012年 2月 24日

朝鮮大學校 大學院

大氣科學科

鄭 然 昂

韓半島 集中豪雨 特性分析

- 장마期와 장마 後의 事例를 中心으로 -

指 導 教 授 柳 贊 洙

共同指導教授 鄭 孝 相

이 論文을 理學博士 學位申請 論文으로 提出함

2011年 10月

朝鮮大學校 大學院

大 氣 科 學 科

鄭 然 昂

鄭然昂의 博士學位論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 名譽教授 曹 炆 煥 (印)

委 員 氣象專門人 理學博士 吳 玩 鐸 (印)
協 會

委 員 氣 象 廳 理學博士 崔 致 英 (印)

委 員 群長大學校 教 授 鄭 炳 玉 (印)

委 員 朝鮮大學校 教 授 柳 贊 洙 (印)

2012年 12月

朝鮮大學校 大學院

목 차

List of Tables	ii
List of Figures	iii
ABSTRACT	vi
제1장 서론	1
제2장 자료 및 분석방법	6
제3장 분석 및 토의	10
제1절 호우 환경 및 발생 조건	10
제2절 장마기 및 장마 후 집중호우 사례 특성분석	12
1. 장마기 호우사례 분석	12
가. 호우 당일 강수현황	12
나. 종관환경	15
다. 중규모 연직구조	38
라. 고양시 호우 개념도	47
2. 장마 후 호우사례 분석	49
가. 호우 당일 강수현황	49
나. 종관환경	51
다. 중규모 연직구조	71
라. 서울시 호우 개념도	80
제4장 요약 및 결론	82
참고문헌	86

List of Tables

Table 1. Synoptic-scale features to be analyzed.	8
Table 2. Mesoscale features to be analyzed with cross-section figures.	9
Table 3. Comparison of characteristic features of heavy rainfall events during the on- and off-Changma season.	83

List of Figures

Fig. 1. Data Assimilation of the Korea Local Analysis and Prediction System (KLAPS) of the Korea Meteorological Administration (from National Meteorological Research Institute, 2006).	7
Fig. 2. Examples of cross-section analysis over the heavy rainfall area, using data from the KMA's Forecast Analysis System.	7
Fig. 3. Conceptual model of super-cell cloud (a) cross-section, and (b) plain view (from Djuric, 1994).	11
Fig. 4. Hourly-accumulated precipitation over the Korean peninsular observed by the Automated Weather Stations from 18UTC 11 July to 04UTC 12 July 2006.	12
Fig. 5. Time-series of precipitation at Metropolitan area on 12 July 2006, (a) Goyang, (b) Gangseo, (c) Dobong, and (d) Songweol-dong.	14
Fig. 6. Satellite images and surface weather charts for the heavy rainfall event at Goyang city at (a) 06UTC, (b) 12UTC and (c) 18UTC 11 July, and (d) 00UTC 12 July 2006.	16
Fig. 7. 925hPa geopotential height(solid line) and temperature(dashed line) at (a) 12UTC 11 July and (b) 00UTC 12 July 2006.	18
Fig. 8. Same as Fig. 7. but for 850hPa.	22
Fig. 9. 850hPa geopotential height(solid line), temperature(dot line), wind (vector arrow) and mixing ratio fields(shaded area) at (a) 18UTC 11 July, (b) 21UTC 11 July, and (c) 00UTC 12 July 2006.	24
Fig. 10. Same as Fig. 9. but for 850hPa divergence(green area) and convergence (violet area) and strong winds fields(red line).	25
Fig. 11. Same as Fig. 9. but for 850hPa stream lines and strong wind fields over 25kts(shaded area).	26
Fig. 12. Same as Fig. 9. but for 850hPa moisture flux(vector arrow).	27
Fig. 13. Same as Fig.9. but for 700hPa geopotential height(blue line), temperature (red-dot line), wind(vector arrow) and ascending air fields(yellow area).	29
Fig. 14. Same as Fig. 9. but for 500hPa geopotential height(blue line),	

temperature(red-dot line), wind(vector arrow) and relative vorticity (yellow and red area).	31
Fig. 15. Same as Fig. 9. but for 200hPa wind(vector arrow) and classification of wind speed(solid line).	33
Fig. 16. Vertical wind shear between (a) surface wind(blue) and 500hPa wind (black) and (b) 850hPa(blue) and 200hPa(black) at 00UTC 12 July 2006.	35
Fig. 17. Atmospheric instability at 00~01UTC 12 July 2006, (a) K-Index and (b) Showalter Index.	37
Fig. 18. Cross-section of equivalent potential temperature(color images and purple line), temperature(green line) and wind(vector arrow) over Goyang city at (a) 18UTC 11 July, (b) 21UTC 11 July, and (c) 00UTC 12 July 2006.	38
Fig. 19. Same as Fig. 18. but for omega fields(ascending air flow, color images), vertical circulation(purple line) and divergence(green line) at (a) 18UTC 11 July, (b) 21UTC 11 July, and (c) 00UTC 12 July 2006.	41
Fig. 20. Same as Fig. 18. but for moisture flux divergence(color images and green line) and relative vorticity(purple line) at (a) 18UTC 11 July, (b) 21UTC 11 July, and (c) 00UTC 12 July 2006.	44
Fig. 21. Characteristics features of the heavy rainfall event at Goyang city occurred at 12 July 2006.	48
Fig. 22. Time-series of precipitation in Seoul on 21 September 2010(station No. 47108). 49	
Fig. 23. Hourly-accumulated precipitation over the Korean peninsular observed by AWS from 03UTC to 08UTC 21 September 2010.	50
Fig. 24. Satellite images and surface weather charts for the heavy rainfall event in Seoul at (a) 12UTC 20 September, (b) 18UTC 20 September, (c) 00UTC and (d) 06UTC 21 September 2010.	52
Fig. 25. 850hPa geopotential height(solid line) and temperature(dashed line) at (a) 12UTC 20 September, (b) 00UTC and (c) 12UTC 21 September 2010.	55
Fig. 26. 850hPa geopotential height(solid line), temperature(dot line), wind (vector arrow) and mixing ratio fields(shaded area) at (a) 00UTC, (b) 03UTC, and (c) 06UTC 21 September 2010.	57
Fig. 27. Same as Fig. 26. but for 850hPa stream lines and strong wind fields over	

25kts(shaded area).	59
Fig. 28. Same as Fig. 26. but for 850hPa moisture flux(vector arrow).	60
Fig. 29. Same as Fig. 26. but for 850hPa divergence(green area) and convergence (violet area) and strong winds fields(red line).	61
Fig. 30. Same as Fig. 26. but for 850hPa equivalent potential temperature.	62
Fig. 31. Same as Fig. 26. but for 700hPa geopotential height (blue line), temperature (red-dot line), wind(vector arrow) and ascending air fields(yellow area).	64
Fig. 32. Same as Fig. 26. but for 500hPa geopotential height(blue line), temperature(red-dot line), wind(vector arrow) and relative vorticity (yellow and red area).	65
Fig. 33. Same as Fig. 26. but for 200hPa wind(vector arrow) and divergence fields(violet area).	67
Fig. 34. Vertical wind shear between (a) surface(blue) and 500hPa (black) and (b) 850hPa(blue) and 200hPa(black) at 06UTC 21 September 2010.	68
Fig. 35. Surface wind vector at (a) 00UTC and (b) 06UTC 21 September 2010.	69
Fig. 36. Atmospheric instability at 06UTC 21 September 2010, (a) K-Index and (b) Showalter Index.	70
Fig. 37. Cross-section of equivalent potential temperature(color images and purple line), temperature(green line) and wind(vector arrow) over Seoul at (a) 00UTC, (b) 03UTC, and (c) 06UTC 21 September 2010.	72
Fig. 38. Same as Fig. 37. but for at (a) 09UTC and (b) 10UTC 21 September 2010.	73
Fig. 39. Same as Fig. 37. but for omega fields(ascending air flow, color images), vertical circulation(purple line) and divergence(green line) at (a) 00UTC, (b) 03UTC, and (c) 06UTC 21 September 2010.	74
Fig. 40. Same as Fig. 37. but for moisture flux divergence(color images and purple line) and relative vorticity(green line) at (a) 00UTC, (b) 03UTC, and (c) 06UTC 21 September 2010.	76
Fig. 41. Same as Fig. 40. but for at (a) 04UTC, (b) 05UTC, (c) 06UTC, (d) 07UTC, (e) 08UTC, and (f) 09UTC 21 September 2010.	79
Fig. 42. Characteristics of the heavy rainfall event in Seoul occurred at 21 September 2010.	81

ABSTRACT

The Analysis of Characteristics of Heavy Rainfall over the Korean Peninsular, through Case Studies of Heavy Rainfall Events during the On - and Off - Changma Season

Chung Yun Ang

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

Co-advisor : Chung Hyo Sang, Ph. D.

Department of Atmospheric Science

Graduate School of Chosun University

An attempt is made to analyse characteristic features of heavy rainfall which occurs at the metropolitan area in the Korean peninsular during the on- and off- Changma season. For this, two representative heavy rainfall episodes are selected; as the one during the on-Changma season, a torrential rain episode happened at Goyang city on 12 July 2006 and as the other during the off-Changma season, a heavy rainfall event in Seoul on 21 September 2006. Both recorded considerable amount of precipitation over 250mm in a half-day, which exceeded much more the amount expected by numerical prediction models at those times and caused a great damage to the property and life in the affected area.

It is analysed that in spite of the seasonal differences, two cases all were due to the strong instability locally developed on the quasi stationary front, rather than by the developed or systematic cyclone. Similarities in characteristics of both episodes were shown in the location of upper-level jet streak and divergence fields of the upper wind over heavy rainfall areas, significantly high equivalent potential temperatures in the low atmospheric layer due to the entrainment of hot and humid air by the low-level jet, and the existence of very dry air and cold air pool in the middle layer of the

atmosphere at the peak time of the rainfall.

Those factors brought convective instability in the atmosphere, which is analysed as one of the major reasons of the heavy rainfall at those times. Whereas, a few distinct differences exist between the events. Among them, differences in dynamic features of the low-level jet and the position of rainfall area along the low-level jet are remarkable.

Key words: heavy rainfall, on- and off-Changma, convective instability, upper and low-level jet, dry and cold air pool

제1장 서론

일반적으로 집중호우란 급작스러운 강수의 시작과 함께 상당량의 강수가 특정 지역에 집중적으로 내리는 현상으로, 이로 인하여 막대한 재해를 유발한다. 홍수, 하천범람, 산사태 등에 의한 인명과 재산상의 피해를 가져오고 돌풍과 뇌우 등이 동반되어 그 재해의 정도를 더 하기도 한다. 최근 지구온난화로 인한 기후변화로 인하여 이러한 집중호우의 패턴과 추세가 보다 재해성이 강한 측면으로 변화되고 있다. 즉 예측하기 어려운 급작스러운 돌발적 발생과 기록적인 단시간의 강수량, 그리고 국지성에 있어 그 정도가 심해지고 있으며, 특히 시간당 강수량이 증가하고 있는 것으로 보고되고 있다. 홍성길 등(2010)에 의하면 1971년부터 2005년까지 35년간 6~9월 사이에 1회(한 번의 강수현상 후 24시간 이상 무강수로 구분될 때)에 80mm 이상의 호우를 기록한 횟수가 1970년대에 153회, 80년대 155회, 90년대에 147회로 약 150회 정도의 빈도를 보이다가 2000년에 들어와서는 2005년까지 5년간 166회를 기록하여 급증하는 양상을 보이고 있다.

이러한 집중호우는 일반적으로 우리나라에서 여름철 장마기를 포함하여 6~9월 사이에 대부분 나타난다. 이 시기는 한반도에 영향을 끼치는 기단의 세력측면에서 한반도 북쪽으로부터의 기단 남하가 약해지고, 북태평양 고기압의 발달에 의한 고온 다습한 기단의 공기가 북상하는 가운데, 한반도를 중심으로 양 기단에 의한 남북간의 세력 균형에 의한 기압배치가 지배하는 시기이다. 이러한 시기에 우리나라에 호우를 일으키는 중관기압계를 유형으로 분류하려는 시도는 자주 사용되어 왔다.

연구마다 약간의 차이는 있으나 홍성길 등(2010)은 기압계 유형으로 크게 저기압 통과, 정체(장마)전선 상에서의 파동발달, 태풍에 의한 직·간접적 영향, 대기불안정에 의한 기단성 뇌우형 등으로 분류했다. Lee and Kim(2007)과 이태영 등(2007)은 2000년~2006년 사이에 발생한 101개의 집중호우에 대해 한반도 호우시스템을 크게 고립형 뇌우형, 대류밴드형, 스콜선, 구름무리형의 4가지 유형으로 구분하고, 이태영(2009)은 그 중 집중호우 유발가능성이 큰 대류밴드형에 대해 지형적 효과를 분석한 바 있다. 또한 박인태(2002)는 집중호우의 특성을 기단성, 산경사형, 스코올선, 전선성 집중호우 등으로 분류하고 이러한 호우의 원인과 발생요인들을 분석한 바 있다. 전선성 호우의 경우 상층풍속에 비해 하층풍속이 최대 35kts 이상

강한 풍속시어가 나타남을 보이기도 했다. 정상훈과 류찬수(2006)는 한반도 집중 호우시 안정도와 상층제트 축 동향에 관한 연구에서 제트형태에 따른 악기상 유형을 분류한 바 있다. 한편, 백선균 등(2005)은 윈드프로파일러 관측자료를 이용하여 대류형, 층운형으로 분류하는 등 연구자 마다 목적에 따라 다소 다른 각도로 유형을 분류하고 있다.

이러한 다양한 유형분류에도 불구하고 여름철 집중호우에 대한 원인과 주요 요인들에 대해서는 여러 연구에서 공통점을 제시하고 있다. 특히 장마전선 상의 호우에 대한 구조적 특징과 중관기상장의 변화 및 특성에 관한 연구들은 장마기 호우 발생 및 주요 발달 메카니즘으로 다음과 같은 점들을 제시하고 있다(김성삼 등, 1983; Park *et al.*, 1989; 박창근 등, 2008; 김미애 등, 2009): 상·하층제트의 위치와 역할, 대기층에 따른 고온습윤 및 한랭건조 공기의 유입, 상승·하강류의 중첩 및 혼합, 열적 가열 및 지형 등에 의한 대기불안정 발생 등의 다양한 요인과 원인들을 제시하고 있다.

한편, 호우의 선행조건을 찾아보려는 연구로 Maddox(1983)와, Augustine and Caracena(1994)는 특히 하층제트, 단파 기압골, 온난공기 이류를 중규모 대류시스템(MCC)의 중요 발달인자로 보았다. 이와 관련, 집중호우의 발생과 강도에 있어 무엇보다도 하층제트의 역할과 기여는 매우 중요한 것으로 여겨지고 있다. 호우시 하층제트의 발생빈도에 대해 황승연과 이동규(1993)는 1980년대 6~9월 사이 우리나라에서 발생한 58개의 호우 사례에 대해 75.8%의 경우가 하층제트와 관련되었음을 밝혔고 장마기간 중에는 88%가 넘는 하층제트의 발생빈도를 보였음을 밝혔다. 여기서 하층제트는 약 500km 이상의 길이 규모를 가지는 25kts 이상의 바람으로 정의하였다. 중국의 메이유 기간에 대해 Chen and Yu(1988)는 대만에서 메이유 기간 중 호우시 최소 25kts 이상의 하층제트가 나타나는 경우가 84%임을 보인바 있다.

하층제트의 역할에 대해서는 대기하층에 주로 수증기와 열을 지속적으로 수송 수렴하며 상층바람장과 연관된 연직 간접순환이 중규모 대류계의 발달 및 유지에 중요한 역할을 함이 밝혀졌다(Matsumoto, 1972; 김성삼 등, 1983; Park *et al.*, 1986, 1989; 이동규 등, 1999; 박창현 등, 2003). 정순갑과 김성삼(1983)은 장마시 집중호우와 연관이 있는 중간규모 요란이 하층제트와 밀접한 관계를 갖고 있으며 경압적으로 가장 불안정하지만 이러한 요란의 발달이 모두 경압불안정에 의한 것만은 아님을 밝혔다.

김정훈 등(2003)은 2003년 동아시아 규모의 장마전선 구조분석을 통해, 중국대륙에서 발달하는 장마전선과 일본열도 상의 장마전선이 구조적으로 차이를 보이는 가운데 이러한 전선위치에 경압불안정과 수증기 수렴도에서 차이가 있음을 보였다.

Chen and Chen(1995)의 호우시 하층제트의 발생시기와 호우역과의 위치 관계에 관한 연구도 호우 메카니즘 연구 분야에 있어 한 축을 형성하였다. 박순웅 등(1983)은 우리나라 부근에서 나타난 하층제트와 악기상에 관한 연구에서 악기상의 발생원인으로 상하층제트의 상호작용으로 인한 대류불안정의 경우와 강한 저기압성 와도 이류에 따른 대류를 원인으로 보고 후자의 경우 호우지역 부근 상공에서 상층발산과 하층수렴에 의한 일반적인 대류운동의 역학구조를 보였다. 백선균 등(2003)은 2003년 여름철 악기상 사례분석을 통해 강수발생 전후 시점에 하층제트가 존재함과 하층의 강한 연직시어의 발생을 보였다.

하층에서의 수증기 수송과 수렴은 하층제트와 맞물려 고려되는 사항으로 호우에 있어 또 다른 중요한 역할을 한다. 임정선 등(1991)은 장마기간에는 하층(1000~700hPa)에서 수증기 수렴, 그 위층에 수증기 발산이 나타나 상층으로의 수송이 이루어지나, 장마 종료 후에는 하층 수렴은 있으나 상층에서의 발산량이 적어 상층으로의 수증기 수송이 적음을 보였다. 이러한 수증기의 근원을 지구규모적 대기순환의 측면에서 연구하여 윤원태 등(2001)은 1998년 여름철 집중호우를 유발한 수증기 수렴이 아시아대륙에서의 수렴장과 동지나해상의 발산장 발달에 의한 결과로 보았고, 양하영 등(2002)은 장마기 호우시 사례조사를 통해 수증기 근원이 인도 몬순지역에서 이루어지는 사례를 보였다.

한편, 호우의 형성과 강화에 있어 지형효과는 큰 기여를 한다. 이와 관련하여 이태영 등(2007)은 한반도 집중호우 개념모델 개발 및 현업화 연구에서 대류밴드형 호우시스템의 발생원인을 유형별로 분류하여 호우시스템의 개념을 제시하고, 호우세포 발달에 있어 지형의 영향으로 밴드형 호우세포의 진행방향이 산맥의 진행방향과 같을 경우 발달하며, 산맥에 가로질러 분지로 나아갈 때 감소함을 보였다. 박창현 등(2003)은 산악 풍상측에서 호우세포가 강화되는 경우가 가장 빈번함을 보였고, 김원수 등(2007)은 대류밴드형 호우시스템에 나타난 지형효과 분석을 통해, 지형효과에 의한 호우 발생구역을 지리산일대, 가야산 및 차량산맥, 영서지역, 북한산일대의 4대구역으로 분류하고, 이러한 지역의 풍상측에서 많은 강수량을 확인한 바 있다. 김동균 등(2000)은 1998년 지리산 호우시 지형효과를 분석함에

있어 동진하는 대류운이 풍상측에서 정체 산악파에 의해 상승한 기류와 합쳐졌을 때 최대 강수가 있다고 하였다.

지형에 의한 강제적 상승효과 이외에, 열적 또는 운동학적 원인에 의한 상승류 또한 호우의 형성과 발달에 중요한 역할을 한다. Holton(1992)이 보인 와도 이류와 단열가열, 온난공기이류가 상승운동을 촉진시킴에 대해, Song *et al.*(2004)은 한반도 장마기간에 발생한 3개의 호우사례를 통해 이를 확인한 바 있다. 한편 김미애 등(2009)은 장마기간 중 발생한 저기압에 의한 호우사례를 통해 저기압의 발생, 발달 및 약화에 따른 상대와도와 상하층제트, 연직 상승속도 등의 특징을 조사한 바 있다. 저기압이 발생 발달함에 따라 최대 저기압성 상대와도는 점차 하강하여 850hPa까지 이르고 상승류는 600hPa 부근에서 최대임을 보였다.

이처럼 우리나라 여름철 집중호우는 장마시기의 장마전선 상에서 발달하는 저기압 또는 강한 대류운 등에 의한 호우가 여름철 집중호우의 한 축을 형성하고 있는 반면, 최근 들어와서는 장마 후 대기불안정 등에 의한 급작스러운 호우가 점차 늘어나고 있다. 장마 후인 8~9월 사이에는 북태평양 고기압의 확장파 수축에 따른 기압배치에서 그 연변에 놓인 한반도는 강한 일사에 의한 열적 가열과 함께 태풍 수렴역의 접근과 영향 등 기타 다른 여러 요인에 의해 고온다습한 공기가 지속적으로 유입되며, 상층에서는 기압골 통과에 따른 찬공기가 남하하는 종관적 환경 속에서 대기불안정이 강화되어 호우가 발생하는 경우가 많다. 특히, 장마 후의 호우는 지역적 강수량의 편중성이라든지 시간적 돌변성이 장마시기의 경우보다 강하여 그 예측이 보다 어려운 실정이다. 이에 이태영(2003)은 7월과 8월의 호우사례를 가지고 계절에 따른 호우의 종관 및 중규모 특징을 분석하였고, 신도식 외(2004)는 호우원인 중의 하나인 대기불안정을 강화·유지시키는 요인에 대한 연구를 통해 예보가이던스를 개발하려는 시도를 하였다.

이렇게 호우는 시, 공간적으로 다양한 요인에 의해 발생하고 그 유발 요인도 중첩 또는 복합되어 나타나서 개별적 사례연구를 통해 호우 유발 요인들에 대한 특징, 평균값과 차이점을 파악함이 필요하다. 또한 지금까지 집중호우 분석에는 주로 특정 사례에 대한 재분석자료를 활용한 경우가 많았는데, 본 연구에서는 실제 기상청 예보실에서 활용되고 있는 관측 및 분석시스템에서 생산, 제공되는 자료를 이용하여 위에서 언급된 호우 발달 및 유지, 강화 원인과 메카니즘들에 대해 장마기와 장마 후의 호우 사례를 통해 조사 분석하고 이를 모식화하여 향후 호우의 진단과 예측에

기여하고자 한다. 특히 수도권에 발생했던 집중호우 중, 예측했던 강수량을 훨씬 넘는 기록적인 호우로 많은 피해를 일으켰던 장마기인 2006년 7월 12일 경기도 고양시 집중호우와, 장마 후인 2010년 9월 21일 서울 지역의 집중호우를 택하여 여름철 수도권 지역에서 일어나는 국지성 집중호우의 특성을 조사 분석하고자 한다. 장마시기(7월)과 장마 후(9월)간의 각 기 다른 종관적 환경 속에서도 집중호우를 유발한 각각의 특성 비교를 통해 그 유사성과 차이점을 분석하고 개념화하여 그 진단 및 예측 가능성 증진에 기여하는데 연구의 목적이 있다.

제2장 자료 및 분석방법

1. 자료

한반도 중부지역, 특히 서울과 고양시 등 수도권 지역에서 장마기와 장마 후에 발생한 집중호우 사례를 분석하기 위해 기상청의 국지분석시스템(Korea Local Analysis and Prediction System, KLAPS)에서 생산되는 자료를 활용하였다. 이 시스템은 한반도에서 실시간으로 관측되는 기상청의 각 종 관측자료(자동기상관측자료, 레이더, 윈드프로파일, 낙뢰, 항공기상관측자료 등)와 위성사진, 수치예측자료를 사용하여 대기를 3차원적으로 분석한 자료이다. 기상연구소(2006)에 의해 개발된 이 시스템은 수평격자 간격 5km, 연직 35층의 해상도를 갖는 MM5 모델 예측장을 사용하고 있는데, 본 연구에서는 이를 이용하여 사례에 따른 중규모 및 중규모 현상분석을 실시하였다.

현재 이 시스템은 Fig. 1과 같이 관측 후 6분에서 10분 내에 위에 언급된 모든 가용 관측자료를 전처리, 분석하여 매시간 분석장을 제공하고, 1시간 마다 매 20분 이내에 예측장을 제공하는 초단기 기상분석 및 예측시스템이다. 특히 구름의 3차원 분석을 위해서는 위에서 기술한 가용 관측자료로부터 구름 분포를 분석하고 이와 역학적 균형을 이루는 초기장을 생산하기 위해 일련의 주요 변수들과 Shaw *et al.* (2001)이 개발한 마이크로 물리 과정의 초기화를 포함하고 있다.

본 연구에서는 이 KLAPS로부터 생산된 분석자료를 사용하였다. 장마기 호우사례(고양시)분석을 위해 2006년 7월 11일 ~ 12일, 장마 후의 호우(서울시)분석에는 2010년 9월 20일 ~ 21일의 지상 및 고층일기도, 위성사진, 850~200hPa의 KLPAS 분석장(바람, 기온, 기압, 수증기분포, 상승류, 상대와도, 상당온위 등)자료를 사용하였고, 기상청 예보분석시스템(Forecaster's Analysis System, FAS)에서 생산된 당시의 연직구조 자료를 활용하였다. 특히 상당온위, 상승류, 상대와도 등의 3차원 대기불안정 구조와 순환상태를 분석하기 위해 Fig. 2와 같이 고양의 경우(37.6°N, 125.8°E ~ 37.6°N, 127.9°E), 서울의 경우(34.9°N, 126.5°E ~ 34.9°N, 128.7°E)의 동서단면을 자르고, 각 각의 상공(고양 37.6°N, 126.9°E; 서울 34.9°N, 127.6°E) 연직구조를 분석하였다.

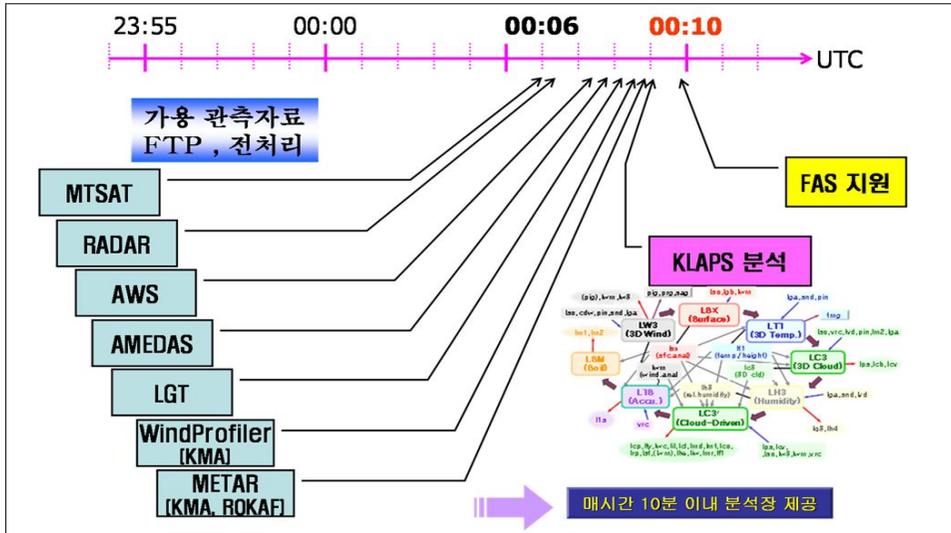


Fig. 1. Data Assimilation of the Korea Local Analysis and Prediction System (KLAPS) of the Korea Meteorological Administration (from National Meteorological Research Institute, 2006).

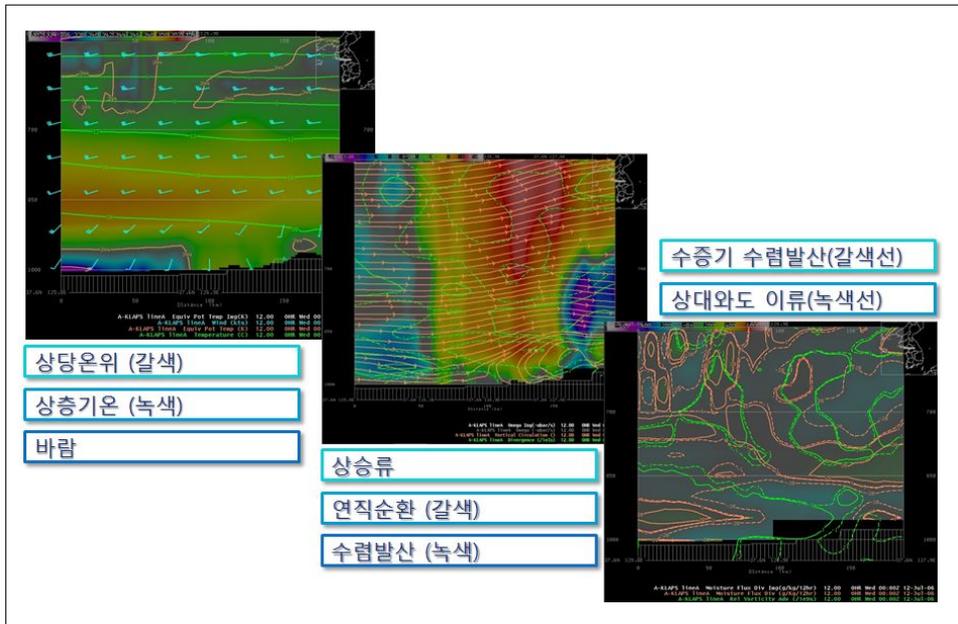


Fig. 2. Examples of cross-section analysis over the heavy rainfall area, using data from the KMA's Forecast Analysis System.

2. 분석 방법

자료의 분석은 KLAPS로 제공되는 동아시아 자료를 중심으로 종관장 분석과, FAS 자료를 사용하여 호우당시 연직구조 분석을 시행하였다. Table 1은 본 연구의 호우분석에 있어 조사되는 주요 종관적 분석요소들을 나타내었다.

Table 1. Synoptic-scale features to be analyzed.

Major elements and features to be analyzed	
o Satellite images	Cloud and front under synoptic pressure system, wave development, impacts from typhoon, movement and entrainment of upper dry-air using water-vapor channel images, etc.
o Surface wea. chart	Synoptic-scale pressure patterns, movement and development of high · low pressure and frontal systems, etc.
o 850hPa	Wind vector field : degree of cyclonic circulation, advection of cold and dry, warm and humid air → analysis of development or decay of baroclinic instability (impact on low pressure system) Equivalent potential temperature (its gradient and advection, especially area of over 330K) Inclination between low pressure center in the surface and strong vorticity area in the upper layer of atm. → analysis of development or decay of the system Temperature field : trough and ridge, southwesterly warm and humid air, northwesterly cold and dry air Low level jet(LLJ) : location, strength, intersection of upper level jet(ULJ) and upper divergence field Baroclinity, moisture flux, mixing ratio, etc.
o 700hPa	Omega field(strength, etc.), saturation and mixing ratio, stream line (confluence of SWly and NWly flow, line density, etc.) Dry area (matching with satellite image), water-vapor anomaly
o 500hPa	Geopotential height pattern(trough and ridge, curvature, movement, degree of increase/decrease of gpm, etc.), circulation of air, potential vorticity(advection, anomaly), impact of adjacent cutoff low(blocking high), temperature gradient, descending and southward cold air pool
o 200hPa	Disconnection and confluence of upper level jet(ULJ), increase/decrease of curvature, divergence/convergence of upper air nearby ULJ streak, Distance from LLJ and surface low center, wind shear, etc.

위성영상과 지상일기도로부터 전반적인 기압계의 구조와 이동, 발달상태를 알아보고, 850hpa과 700hPa의 분석을 통해 대기하층에서의 온난습윤공기의 이류, 상당온위의 분포 및 하층제트 등에 대해 분석하게 된다. 대기 중층의 500hPa 분석에서는 기압골의 유형과 이동상태, 잠재와도 등을 분석하며, 200hPa의 대기 상층분석에서는 상층제트 및 상층발산에 대해 주로 분석하게 된다.

Table 2는 FAS 자료를 이용한 연직단면도 분석을 통해 조사될 주요 중규모 분석 내용을 나타낸다. 특히 상당온위 연직구조 분석을 통해 대류불안정도의 판별, 상대와도의 강도와 위치 분석을 통해 대류운 발달여부, 대기 중층에의 한기 유입여부와 이에 따른 영향 등을 중점 분석한다.

Table 2. Mesoscale features to be analyzed with cross-section figures.

Major elements and features to be analyzed	
o equivalent potential temp.	Vertical structure and gradient of equivalent potential temperature, variation and advection due to wind, cold dome and warm pool. etc.
o relative vorticity	Cyclonic/anticyclonic vorticity (location, strength, inclination, variation, etc.)
o Omega field (ascending air)	Ascending/descending air (distribution, strength, intersection, etc.)
o wind field	Location of ULJ/LLJ, wind variation, etc.
o divergence/convergence	Divergence/convergence of air parcel (strength, variation, etc.)

이외에 기상청 수치모델에서 생산되는 보조선도 등의 자료를 분석에 활용하였다. 이러한 자료의 분석을 통해, 특히 호우역에 영향을 미치는 상하층 바람장의 분석, 대류불안정 및 경압불안정과 연계된 호우의 발달환경, 대기 및 수증기 수렴발산 등 각 중 호우 메카니즘에 대한 분석을 실시하였다.

제3장 분석 및 토의

제1절 호우 환경 및 발생 조건

집중호우를 유발하는 호우시스템이 발생하면 그 내부에서 대류운들이 서로 발달과 소멸을 반복하면서 보다 강력한 호우시스템으로 발달하게 된다. 이러한 과정에서 호우시스템을 유지, 발달시키는 중관적 환경이 필요하게 되는 데, 이태영 등(2007)에 의하면 북서태평양 고기압과 기압골 사이에서 하층수렴대의 지속적인 유지, 강한 대류불안정 형성, 하층제트에 의한 수증기의 지속적인 공급, 상·하층제트의 2차 순환에 의한 대류계의 발달과 유지 등을 필요한 조건으로 들고 있다. 이들은 서로의 상호작용을 통해 호우시스템의 형성에 기여한다. 즉 하층의 바람수렴에 의해 따뜻하고 습윤한 공기가 하층제트를 통해 지속적으로 공급되면서 대류불안정 환경이 조성된다. 이러한 환경 하에 대기 중층에서 건조공기가 유입되면 이 대류불안정은 보다 강화되고 가속화 되면서 상하층간의 2차 순환에 의해 호우시스템은 유지, 발달하게 된다. 특히, 강우지역의 풍상측에서 수평 풍속이 강화되면서 수평 운동량이 증가하는 가운데 호우가 지속적으로 유지된다.

이들을 대기의 층 개념에서 정리해 보면,

- 대기하층에서 수증기 수렴, 하층제트와 수렴역, 한기남하, 강한 수분속, 불안정, 높은 상당운위
- 대기중층의 기압골, 건조 공기의 유입과 수평적 한기 남하, 저기압성 상대와도
- 대기상층의 상층제트 및 발산장, 상하층간 연직시어, 수렴과 발산 등으로 구분할 수 있다.

이처럼 호우는 시공간적으로 다양하게 발생하며 그 유발 요인도 각 상황에 따라 다를 수 있다. 따라서 이러한 현상들을 모식화, 개념화 등 일반화하여 호우의 진단과 예측에 활용하는 방법이 사용되어 왔다. 그 중의 하나가 개념모델(conceptual model)에 의한 설명이다. Fig. 3은 Djuric(1994)에 의한 super-cell 스톱의 발달 모형으로, 대기 하층에서는 온난습윤한 공기가 하층제트를 통해 호우시스템으로 유입된다. 이러한 하층 유입공기는 구름 속에서 상승기류로 이어져 위로 상승하게 된다. 이때에 대기의 불안정도, 연직 바람시어, 또는 지형에 의한 강제상승 등이 상승효과로 작용하게 된다. 상승류는 상층으로 갈수록 연직 바람시어가 순전 하면서

풍속이 증가하면 더욱 강화되어 구름 속으로 보다 많은 수증기를 공급하게 된다. 이렇게 상승된 공기는 대류권계면까지 상승하여 모루구름을 통해 상층에서 빠져나가 상층기류와 합류하게 된다. 한편 대기 중층에서는 중층 대류권의 건조한 환경으로부터 유입되는 하강기류가 존재하게 된다. 이 하강기류는 상승기류로부터 공급 받는 빗방울의 증발로 인한 냉각과 낙하하는 과정에서 발생하는 강수의 하중에 의해 하강기류를 가속화하여 스콜과 같은 강한 강수를 유발한다. 이와 같은 거대 세포에서 상승기류와 하강기류는 몇 시간 동안 준 정체상태에서 공존하고 있는 것으로 알려져 있다.

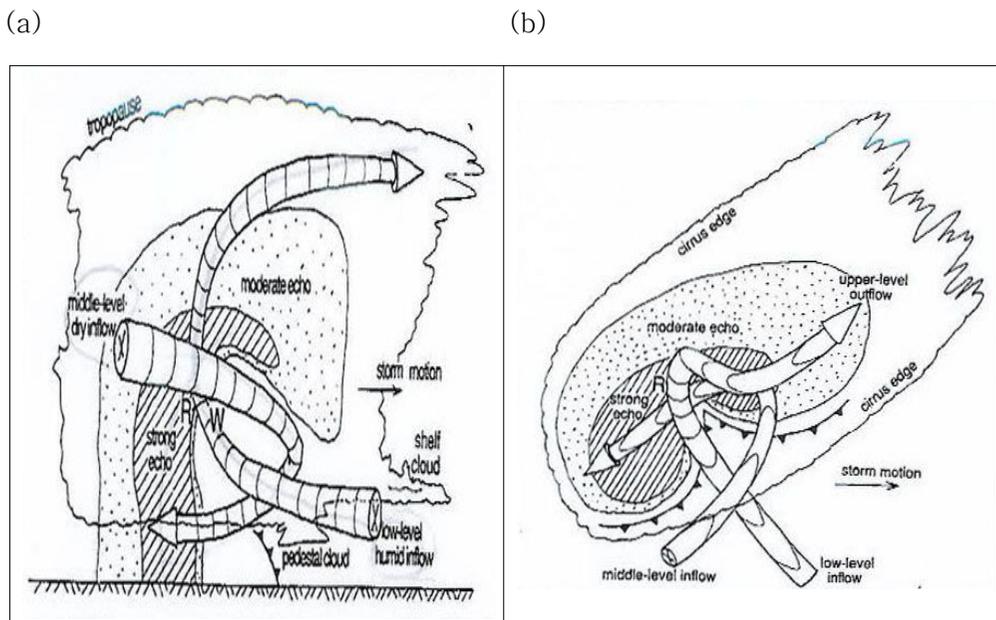


Fig. 3. Conceptual model of super-cell cloud (a) cross-section, and (b) plain view (from Djuric, 1994).

본 연구에서는 이와 같은 모식도에서 나타난 호우 요인과 현상들에 대해 우리나라 장마기와 장마 후의 호우사례를 이용하여 실제의 관측 및 분석자료에서 어떻게 표현되어 나타나는지를 찾아보는 한편, 그들의 유사성과 차이점을 판별하여 이들의 향후 호우 진단 및 예측에 기여하고자 하였다.

제2절 장마기 및 장마 후 집중호우 사례 특성 분석

1. 장마기 호우 사례분석

가. 호우 당일 강수현황

2006년 7월 12일 경기도 고양시를 포함한 수도권지역에는 북동진하는 강수대의 영향으로 300~400mm에 달하는 집중호우가 내렸다. Fig. 4는 당시 자동기상관측 시스템(AWS)의 60분 누적강수량 분포로, 2006년 7월 11일 18UTC ~ 12일 04UTC까지 2시간 간격으로 나타내었다.

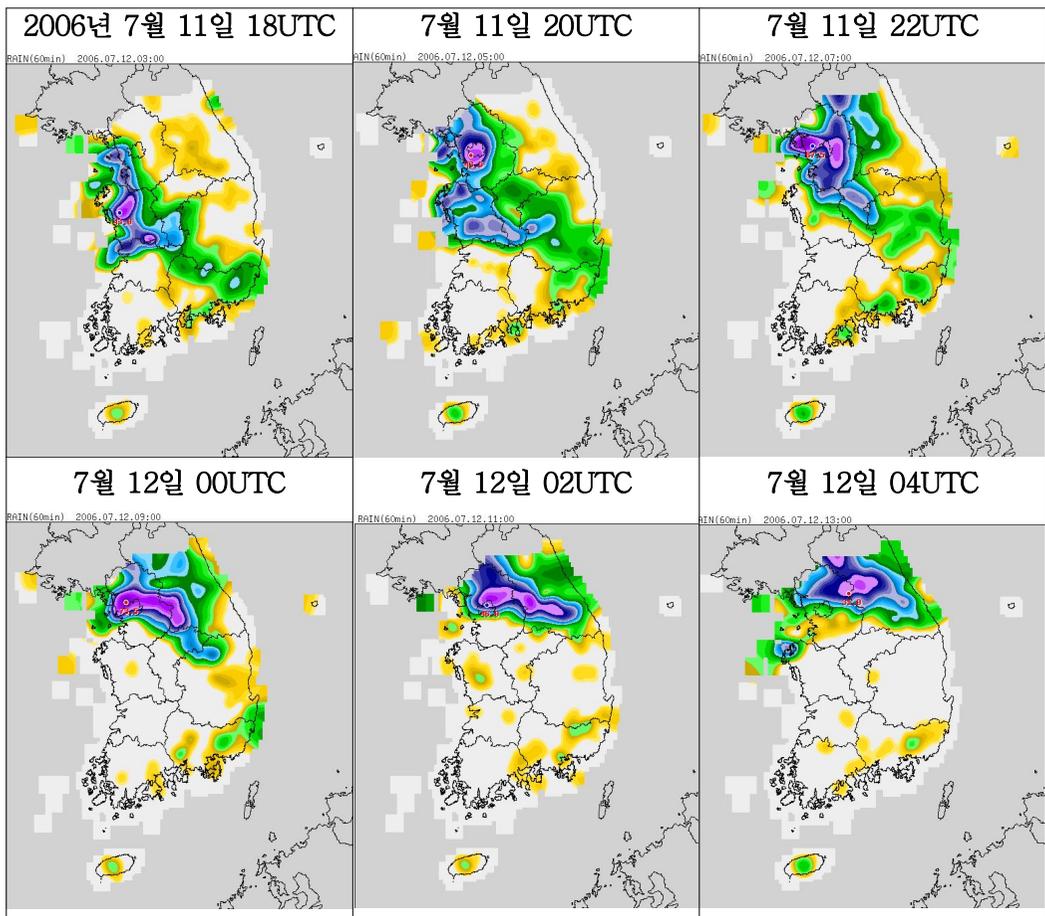
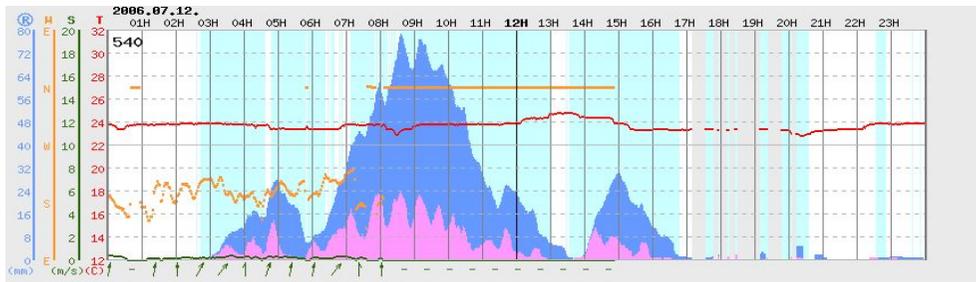


Fig. 4. Hourly-accumulated precipitation over the Korean peninsular observed by the Automated Weather Stations from 18UTC 11 July to 04UTC 12 July 2006.

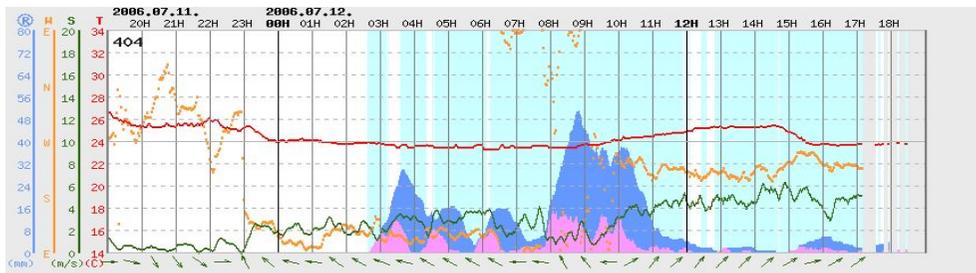
Fig. 4에서 보듯이, 강수에코는 초기에 수도권지역을 향해 충청남도지방에서 북동진하여 수도권지역에 영향을 주고 강원지방으로 이동한 뒤, 수도권지역은 다시 경기북부지방을 동진하는 약한 에코에 의해 3차 강수가 있었다. 전반적으로, 수도권지역에 호우로 큰 피해를 가져온 강수 현상은 11일 22UTC ~ 12일 04UTC 사이 약 6시간의 강수로 이때의 총 강수량은 당일 누적강수량의 75%에 달한다. 피해가 있었던 수도권 지역의 시계열 강수량을 Fig. 5에 나타내었다. 한강을 중심으로 강북지역의 경기도 고양(Fig. 5a)과 도봉(5b), 강남지역의 강서(5c)와 송월동(5d)의 자료를 나타낸 것으로, 강수의 강도와 양은 전반적으로 강북지역에서 강하고 많음을 알 수 있다. 이는 서쪽으로부터 대류밴드형 강수에코가 접근시 지형의 영향을 받아 북한산의 풍상층에 많은 강수가 있다는 김원수 등(2007)의 결과와 잘 일치한다고 판단된다. 특히 고양시 일대에는 약 12시간 동안 총 370mm의 집중호우로 많은 재산과 인명피해가 있었다. Fig. 5a의 경기도 고양시 강수는 11일 18UTC에 1차 강수가 시작되어, 1시간만인 19UTC부터 시간 당 10~20mm 이상으로 강화된 후 21UTC에 잠시 소강상태를 보였다. 이후 다시 22UTC부터 2차 강수가 시작되어 시간당 40mm정도 이상으로 강화되면서, 11일 23UTC ~ 12일 01UTC사이에는 시간당 60~70mm가 넘는 강한 호우가 있었다. 특히 12일 00UTC를 전후로 해서는 시간당 80mm에 가까운 호우가 내렸다. 이 강한 강수는 12일 01UTC를 지나면서 약화되어 03UTC에 시간당 약 30mm로 급격히 감소한 후, 2시간정도 소강상태 보이다가 다시 05~07UTC 사이에 시간당 10~30mm의 제3차 강수현상이 있는 후 종료되었다.

강수량 측면에서 실제 강수량은 기상청 수치모델의 당일에 대한 강수량예보와는 차이가 있었다. 기상청 수치모델 RDAPS(Regional Data Assimilation and Prediction System)의 7월 11일 12UTC 및 12일 00UTC 예측장은 실제 강수의 10~20%만을 예측하였고, 호우역도 다소 불일치한 것으로 예보되었다. 또한 초단기 강수예측모델 VSRF(Very Short Range Forecast)의 1시간 예측장(11일 23UTC)도 실제 강수의 30% 정도만 예측하였다. 최지혜 등(2006)은 강수량과 강우구역의 예측에 있어 초단기 강수예측모델(VSRF)에 의한 예측이 지역예측모델(RDAPS)보다 상대적으로 정확했으나, 실제 현상에 대한 예측과는 역시 많은 차이가 있었음을 보였다. 따라서 본 연구는 경기도 고양시를 중심으로 이 시간대에 영향을 끼친 종관적, 중규모적 환경과 호우요인 분석을 하였다.

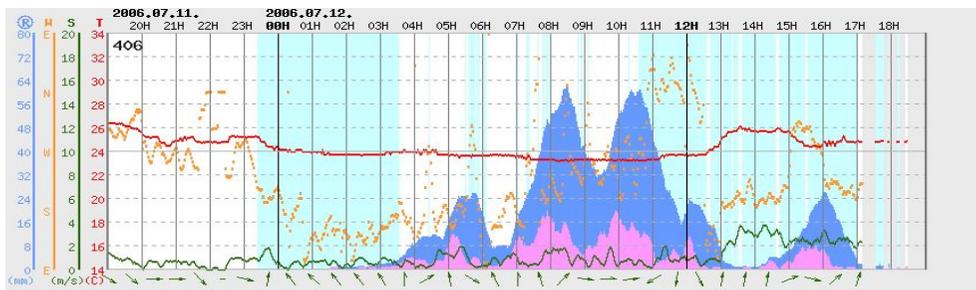
(a)



(b)



(c)



(d)

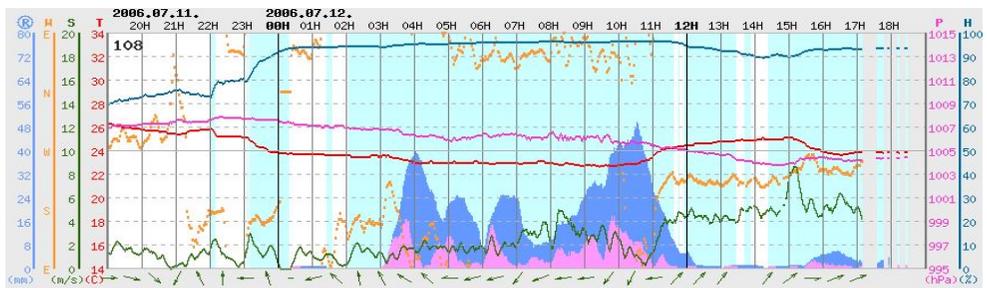


Fig. 5. Time-series of precipitation at Metropolitan area on 12 July 2006, (a) Goyang, (b) Gangseo, (c) Dobong and (d) Songweol-dong.

나. 종관환경

1) 위성영상 및 지상, 925hPa 일기도

호우 당시의 종관적 환경을 분석하기 위해, 최대 강수시각인 2006년 7월 12일 00UTC를 기점으로 6시간 간격의 강수 전과 강수시각대의 위성사진, 지상일기도 및 925hPa 일기도를 Fig. 6과 Fig. 7에 각 각 나타내었다.

Fig. 6의 위성영상에 의하면 한반도 중부지방과 그 이남지방은 100~140°E에 걸쳐 위도 폭 10도 정도의 규모를 갖고 비교적 동서로 길게 늘어진 장마전선 상에 위치한다. 이 전선대는 몽골 북동쪽에 중심을 둔 폐색저기압의 온난역과 연계된 전선대로서, 전선상의 구름역은 아직 파동발달 초기 단계로, 한반도 중부와 남부지방은 그 파동의 중심부에 속하고 있으며, 경기북부지방에 형성되는 대류운은 전선대 구름역의 북쪽 부문에 위치한다. 한편 제주도 이남의 30°N 부근에는 동서로 길게 매우 불안정한 구름역이 존재하고 있다. 종관기압계에서, 한반도는 북태평양 고기압의 북서 연변에 위치하고 있어 남서류에 의한 수증기 유입이 매우 용이한 종관적 환경하에 놓여 있다. 몽골 북서쪽에 중심을 1011hPa 고기압은 남동방향으로 장출하면서 그 경압역이 만주 지방에 형성되어 그 아래의 한반도 북부지방은 상대적으로 맑은 날씨를 보이고 있다. 서해상에는 암역이 우리나라 중부지방을 중심으로 파고 들고 있음을 볼 수 있고, 태풍 Bilis는 아직 20°N 부근의 대만 남동쪽 해상에서 아직 전향하기 전으로서, 우리나라에 수증기 공급 등 직접적인 영향은 주지 않고 있다.

이동규 등(1999)은 지리산 집중호우를 유발했던 1998년 집중호우의 종관적 특징 연구를 통해, 당시 중국 중부에서 우리나라를 거쳐 일본에 까지 이르는 수렴대가 대류계의 발달에 매우 좋은 환경을 제공하였다고 하였다. 이 수렴대의 북쪽인 중국 북부에서는, 본 연구 사례와 같이 경압역이 형성되고, 남쪽에서는 북태평양 고압대의 북서 연변에 우리나라가 위치하고 있어 불안정한 환경을 잘 구축하고 있음을 보여주고 있다. Sun and Lee(2002)과 Shin and Lee(2005)는 한반도 중부지방 집중호우시 형성된 대류밴드에 대한 수치실험을 통해, 종관기압계하에 이 지역의 하층에서 형성되는 대규모 수렴적 공기흐름과 이 들의 대류시스템과의 상호작용, 하층 남서류에 의한 수증기 유입이 준 정체선 대류밴드의 형성과 유지에 중요한 역할을 하고, 이 과정에서 지상에서의 잠열발생이 중요한 인자임을 밝힌 바 있다.

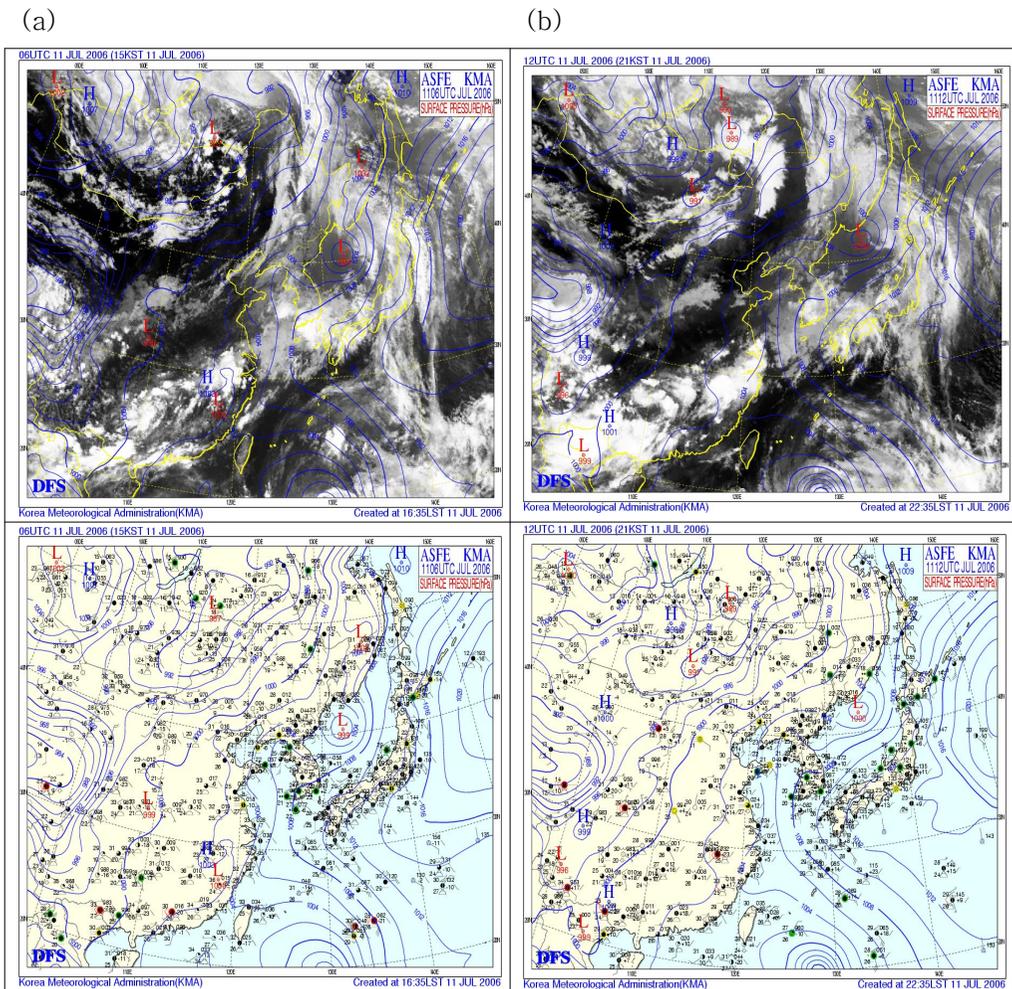
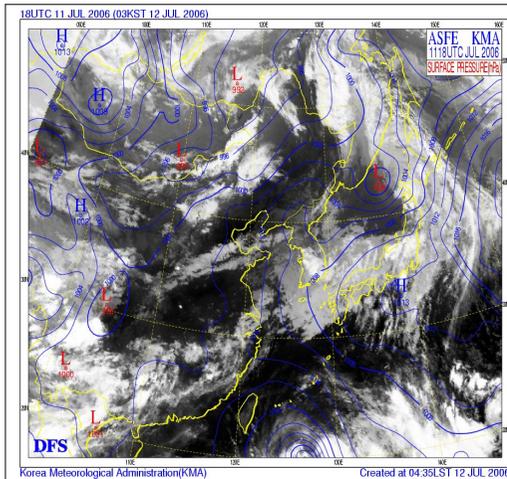


Fig. 6. Satellite images and surface weather charts for the heavy rainfall event at Goyang city at (a) 06UTC, (b) 12UTC and (c) 18UTC 11 July, and (d) 00UTC 12 July 2006.

(c)



(d)

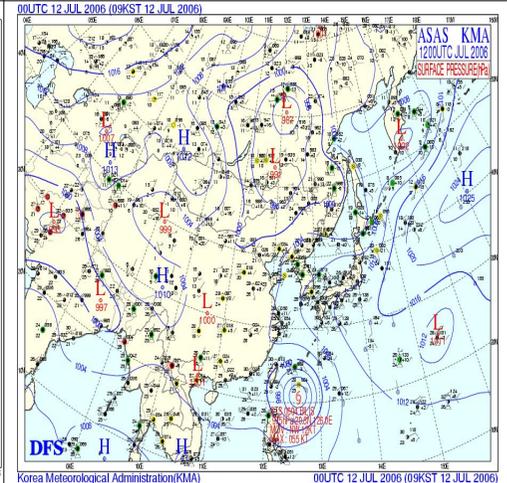
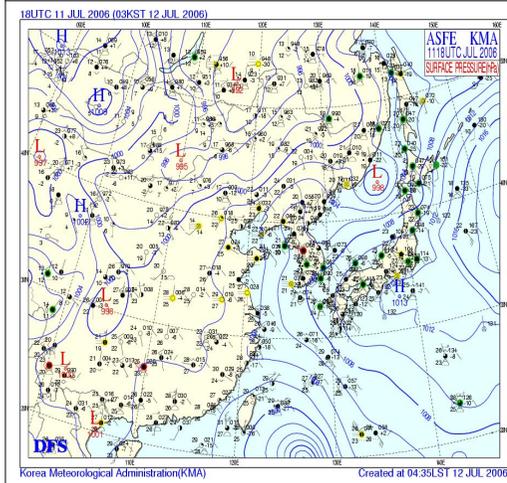
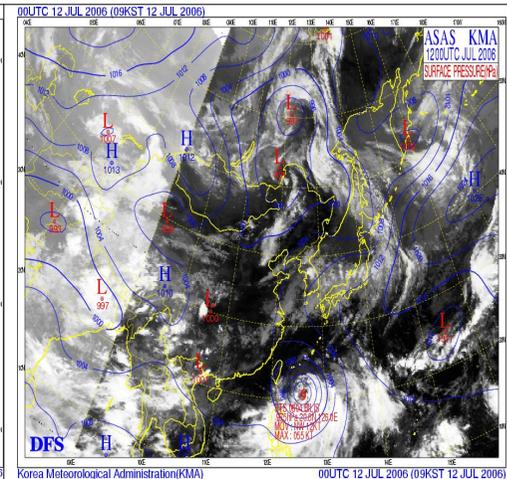
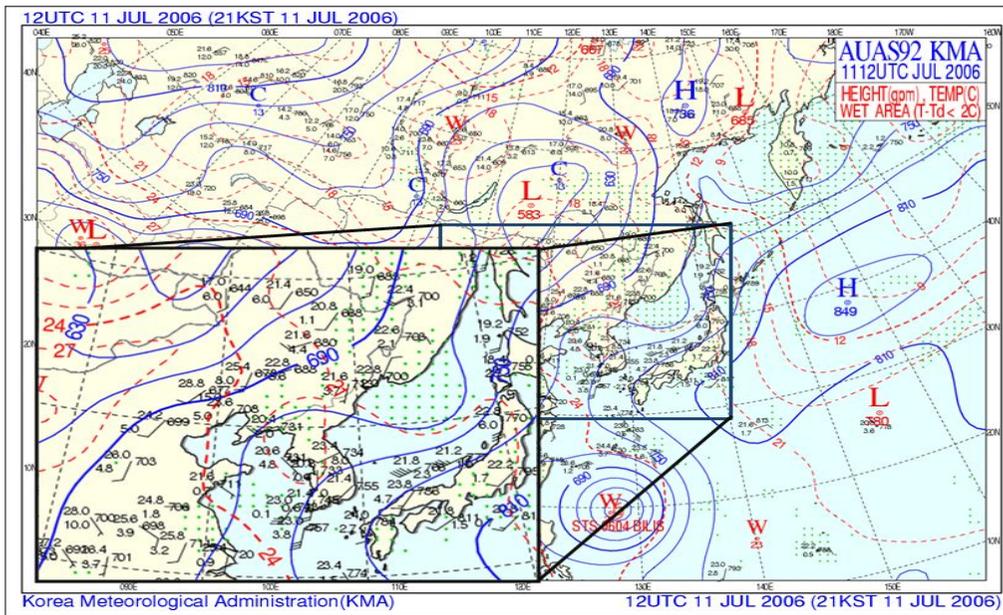


Fig. 6. Continued.

Fig. 7의 925hPa 일기도를 보면, 북태평양 고기압의 북서 연변에서 한반도를 향해 강한 남서류가 유입되고 있음을 알 수 있다. 11일 12UTC 오산의 대기하층 풍속은 10kts 정도였으나 12일 00UTC에는 35kts로 강화되어 한반도 중·남부 지방에는 온난공기가 이루어지고 있음을 알 수 있다.

(a)



(b)

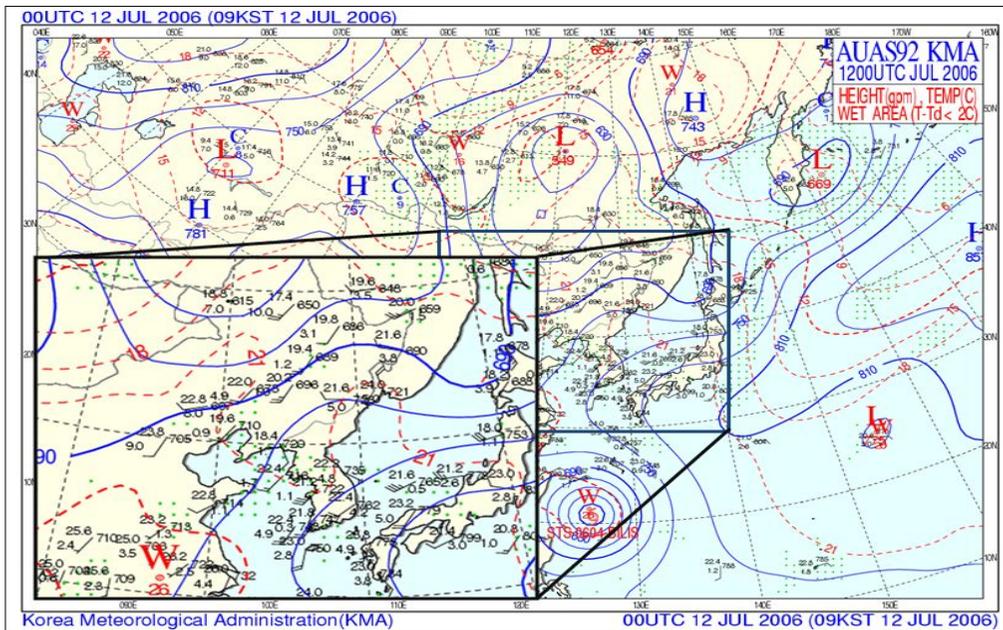


Fig. 7. 925hPa geopotential height(solid line) and temperature(dashed line) at (a) 12UTC 11 July and (b) 00UTC 12 July 2006.

일반적으로 저기압이 발달하려면, 상공에 저기압성 와도구역이 존재하고 그것과의 경사도(연직기울기)에 의해 발달여부를 판단할 수 있다. 즉 한반도 중부지방과 북부지방 상공의 구조에 대해 보다 자세한 분석여부를 바탕으로 발달여부를 판단할 수 있다. 결과적으로, 호우당시 이 지역은 발달된 저기압 보다는, 전선상에서 파동이 생성되는 초기의 단계로서, 이러한 상층의 발달구조 없이 많은 강수량을 기록한 바, 이는 다른 요인 즉 대류불안정 등과 같은 현상들이 복합적으로 가미된 것으로 분석되며, 그 이유와 구조를 판별하는 것이 본 연구에서 하나의 중요한 과제이다.

저기압의 발달 환경이 아닌 상층의 중관 구조하에서, 불안정이 존재하게 됨에는 여러 요인을 들 수 있다. 우선 지형적 요인이다. 이번 강수사례의 경기도 고양시는 서풍계열의 대류운이 동진하여 들어올 때 북한산의 풍상측에 해당한다. 김원수 등(2007)에 의하면, 북한산 지역은 지형효과에 의한 호우 발생구역에 해당되는 곳으로 이러한 지형효과가 불안정에 충분히 기여하였을 것으로 판단된다. 또 다른 요인으로는 한냉공기의 남하로 인한 불안정이다. Fig. 7의 상층장 분석에서 보이는 한반도 북부의 한냉풀(pool) 규모가 너무 뚜렷하여 이의 효과도 매우 클 것으로 판단된다. 북태평양 고기압 연변을 따라 강한 온난 습윤공기가 유입되고 있는 환경속에서, Fig. 7에서 보듯이 한반도 중부지방에는 북쪽으로 부터 18℃ 선이 내려와 덮고 있다. 이처럼 상대적으로 차가운 공기가 한반도 중·북부지방까지 남하하여 지상부근에서도 중부지방을 경계로 한·난공기의 혼합(충돌)이 이루어지고 있다고 분석되며 이러한 한기 남하에 따라 불안정은 가속되었다고 판단된다. 이와 관련하여 Fig. 6의 위성영상에서, 한반도 북부지방까지 상층에는 수증기가 없는 한냉공기가 존재함을 확인 할 수 있다.

2) 대기하층의 수증기 분포와 하층제트

집중호우에서 하층제트는 매우 중요한 역할을 한다. 강수현상 특히 집중호우가 있기 위해서는 대기 하층이 비교적 따뜻하며 수증기를 많이 함유하여 대류불안정의 요건을 갖추는 것이 필요하다. 이러한 측면에서 하층제트는 고온다습한 공기를 지속적으로 하층에 공급하는 매개체의 역할을 하기 때문에 집중호우에 있어 없어서는 안 될 중요한 요소가 된다. 즉 하층제트는 단독적으로 집중호우를 일으키기

보다는 지속적으로 온난습윤공기를 공급함으로써 대류불안정을 강화시키거나 호우의 강도를 강하게 한다.

이에 따라 집중호우와 관련된 원인을 규명하는 연구에 있어 하층제트에 관련된 많은 연구가 있어 왔다. 하층제트는 크게 아메리카 중서부의 야간제트와 아프리카 동안의 소말리제트와 같이 기후학적으로 장소가 결정되어 있는 하층제트, 그리고 장마전선 부근에서 요란에 수반되어 나타나는 하층제트가 있다(소선섭, 2009). 우리나라를 포함한 동아시아지역에서 나타나는 경우는 후자의 것으로, 북미지역에서 300~800m 상공에 나타나는 야간 하층제트보다는 훨씬 높은 고도인 850~700hPa 사이에서 나타난다. Zhang *et al.*(2003)은 동아시아 대만해협상의 중규모 대류운(MCC)에 대한 수치실험에서 850hPa부근에서 중규모 하층제트가 출현됨을 밝히고, 이러한 중규모적 하층제트의 초기 발달과 성숙에는 기압경도력과 수평이류가 중요한 역할을 한다고 하였다. Matsumoto *et al.*(1971)은 약 700hPa 부근에 나타나는 하층제트의 위에서 발견되는 온난습윤공기의 흐름이 적운대류활동에 따른 수증기의 상향수송과 잠열의 방출효과에 기인한다고 하였다. 또한 Matsumoto(1972)는 하층제트 축을 중심으로 형성된 불균형장에 의해 열과 에너지의 간접순환이 초래되는 것을 보인 바 있다.

호우시 하층제트의 출현빈도와 관련하여, Chen and Yu(1988)는 대만에서 메이유 기간 중 호우 발생시 700hPa 풍속이 25kts를 넘는 하층제트가 84% 존재하고 호우발생에 앞서 약 12시간 전에 700hPa부근에 출현한다고 하였다. 황승언과 이동규(1993)는 1980~1989년까지 10년 동안 6~9월에 한반도에서 발생한 일강수량 100mm 이상, 2일 강수량이 150mm가 넘는 58개 사례의 호우에 대해, 하층제트의 출현 빈도와 지역적 분포, 강수특징 등을 조사한 바 있다. 그들은 하층제트를 풍속 25kts 이상, 그리고 수평길이 500km이상의 길이 규모를 갖는 바람으로 정의하고, 이러한 정의 하에 호우 발생시 하층제트가 나타난 것은 75.8%, 특히 6~7월 사이의 장마기간 중 호우에는 88.2%가 넘는 높은 하층제트가 발생함을 보였다. 그리고 하층제트는 호우 발생시각에 최대 빈도를 나타냄과, 호우 발생 직전에 빈도수의 증가가 가장 컸음을 밝혔다. 다만 장마나 저기압의 통과 없이 국지적으로 그리고 2~8시간의 단 시간내에 있었던 호우에는 하층제트가 나타나지 않는 중규모 스톰에 의한 경우도 있다고 하였다.

Fig. 8은 850hPa 일기도로, 11일 12UTC에 한반도 북쪽으로부터 상대적으로 차가운 공기(20℃ 선)가 한반도 중부 이남지방까지 내려와 있음을 볼 수 있다. 이 한기는 12일 00UTC에는 더 강화되어 18℃ 선까지 남하하여 북서쪽으로부터 한냉 공기가 계속해 내려오음을 보인다. 이렇게 북쪽에서 내려온 차가운 공기는 남서쪽에서 올라온 하층제트에 의한 온난습윤공기와 만나 불안정한 환경을 형성하였으리라 판단된다. 하지현 등(2008)은 2006년 고양 집중호우사례에 대해 예보연구모델(WRF)를 활용한 레이더와 자동관측장비(AWS)의 자료동화를 통해 하층제트에 의한 온난이류가 당시 호우에 중요한 역할을 하였음을 보였다.

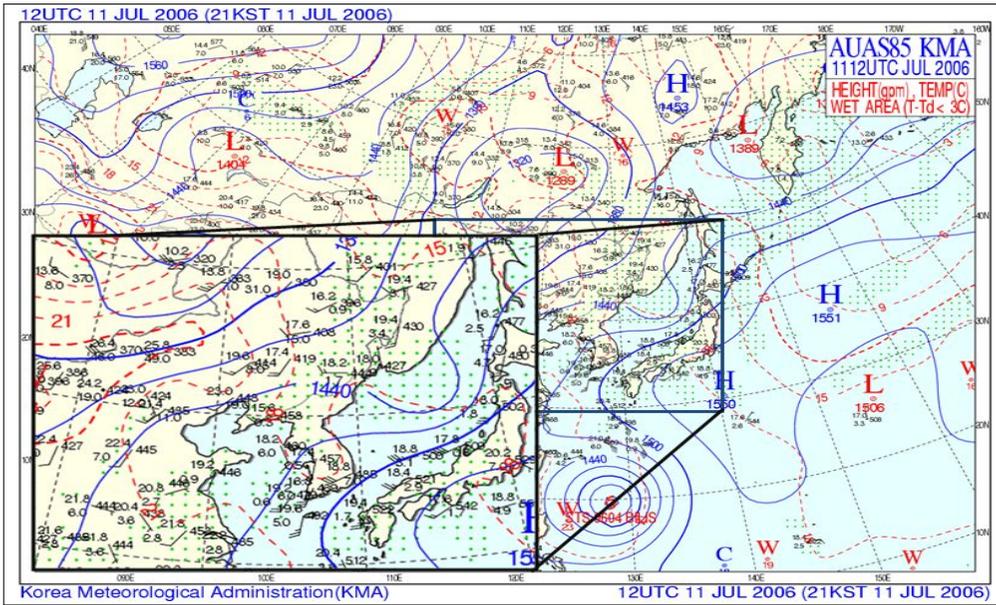
바람은 북태평양 고압대의 연변에서 11일 12UTC보다 12일 00UTC에 중부 지방에서 남서류가 40kts까지 매우 강하게 불고 있다. 이는 북태평양 고기압의 연변을 따라 강한 하층 습윤공기의 유입이 더욱 증폭되고 있음을 나타낸다. 이러한 40kts의 남서풍은 당시 대기 전층에 걸쳐 가장 강한 풍속이다(500hPa에서도 25~35kts 정도). 이처럼 강한 하층제트가 한반도 주변에 형성되고 있음을 보이고, 상층보다도 강하다는 것이 이번 사례의 하나의 특징이다. 한편, 상층제트와 연계하여 뒤에서도 기술하겠지만, 이러한 하층제트가 상층제트와 우리나라 부근에서 중첩 되지는 않고 있다. 상층제트는 40°N 부근의 한만국경 북쪽에 위치하고 있고, 하층 제트의 최대풍은 한반도 중부지방을 지나고 있어 한반도 상공에서 직접 상하로 직교 하고 있지는 않다.

종관적 환경을 보면, 중국 동남부지방으로부터 한반도 중부지방을 지나는 하층 제트의 빠른 남서류 강풍대가 뚜렷이 보인다. 특히 이 남서류는 우리나라로 다가 오면서 점차 강해져 한반도 중부지방에서는 30~40kts의 최대풍을 보이고 있다. 당시 우리나라는 폐색전선의 저기압 온난역과 연계된 정체전선의 영향을 받고 있는 상황 에서, 지속적으로 남쪽 해상으로부터 강한 남서류에 의한 온난습윤한 공기 유입되고 있어, 집중호우에 필요한 종관적 환경을 잘 갖추고 있음을 보여주고 있다. 한편 일본 오키나와 남부해상의 남동풍에 의한 강한 하층바람은 태풍 Bilis와 관련된 것으로 아직 우리나라에 직접적인 영향을 주지는 않고 있는 것으로 사료된다.

전반적으로 저기압 발달의 조짐은 뚜렷이 보이지 않는 한반도 주변의 종관 환경이다. 따라서 12일 00UTC의 집중호우는 북태평양 고기압 연변에서의 불안정 요인에 의해 강수효과가 증폭된 것으로 보이는 환경으로, 유입된 하층 습윤공 기를 대류불안정 또는 지형적 원인 등에 의해 상층으로 수송하는 메카니즘을

자세히 살펴보는 것이 필요하다고 생각된다.

(a)



(b)

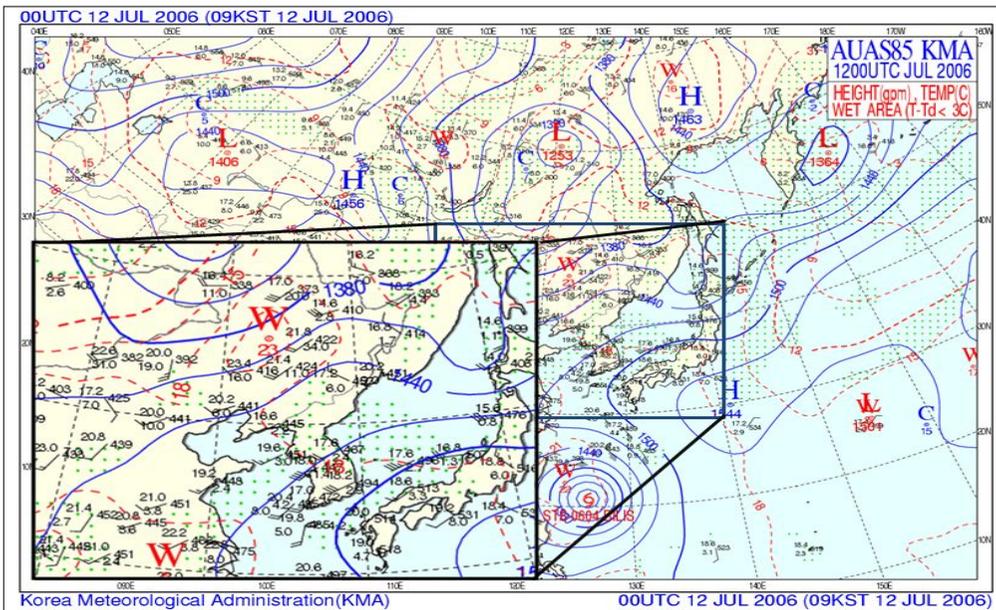


Fig. 8. Same as Fig. 7. but for 850hPa.

대기하층의 수증기분포와 하층제트를 분석하기 위해 850hPa의 기온과 바람 및 혼합비(Fig. 9), 수렴발산도(Fig. 10), 유선도(Fig. 11) 및 수분속(Fig. 12) 분포를 각각 나타내었다. Fig. 8 보다 세밀하게 표현된 Fig. 9의 대기 하층의 기온분포는, 한반도 북쪽으로부터 한기가 남하하여 한반도 중부지방에 한냉pool(18°C 선)이 존재한다. Fig. 9(c)를 보면 서해상으로부터 20g/kg에 달하는 높은 혼합비의 난기가 유입되고 있어, 한난의 공기가 한반도 중부지방을 중심으로 충돌하는 환경을 보인다. Fig. 3의 호우 모식도에서 보듯이 이러한 환경은 찬공기 위를 더운 공기가 상승할 수 있는 조건을 잘 보여주며, 대기불안정의 환경을 잘 형성하고 있다고 판단된다. 바람분포를 보면, 서해상에서 하층제트는 점차 강화되어 40~ 45kts의 강한 바람이 분다. 특히 경기만 인천 앞바다 부근에서는 45kts의 매우 강한 풍속이 계속 유지되어 이러한 바람을 타고 남쪽의 고온 습윤공기가 한반도 중부지방으로 지속적으로 유입되고 있음을 알 수 있다. 이러한 바람의 강도는 일반적인 호우시 하층제트의 수렴속도에 비해서도 매우 강한 하층바람이다. 1961~ 1990년까지 한반도 중부지방에서 300mm 이상의 강우가 있었던 12개 경우에 대해 중관기압계의 특성을 분석한 최정부(1991)은 호우시 850hPa의 하층바람은 35kts 이상이었음 보인바 있다.

2002~2006년까지 5년간 발생했던 집중호우의 주요 호우인자를 연구한 김진철 등(2008)은 습설의 구조에 대해 수증기의 수평분포가 풍향과 일치하며, 수증기 수렴역에서 수평풍속의 시어나 하층제트가 존재함을 밝혔다. Fig. 10과 11에서 하층제트의 전면인 서해안과 중부지방에 수렴역이 형성되어 있으며, 특히 수평 바람경도가 매우 강함을 알 수 있다. 하층제트와 호우역의 위치에 관한 문제에 대해, Shin and Lee(2005)는 하층제트류의 전면에 있는 강한 수렴역이 동진하는 요란에 의한 호우발달에 중요한 역할을 함을 보인 바 있다. 이태영(2009)은 장마전선상의 교란 발생 연구를 통해, 하층제트의 전면에 수렴대가 강하게 존재한다고 밝힌 바 있는데, 본 연구의 사례는 이와 잘 일치한다.

유선의 합류역과, 밀도가 조밀한 지역에서는 공기의 수렴에 의해 호우의 가능성이 높다. 또한 약한 유선속이라도 북서류와 남서류가 합류하는 지역에서는 공기가 수렴하는 곳으로 호우가 발생하는 좋은 조건을 갖는다. Fig. 11의 850hPa 유선도를 보면 한반도 중부지방을 중심으로 유선이 조밀지역이 형성되어 있고, Fig. 12에서는 중부지방으로 강한 수분속이 통과하고 있어 호우의 조건을 잘 갖추고 있다고 판단된다.

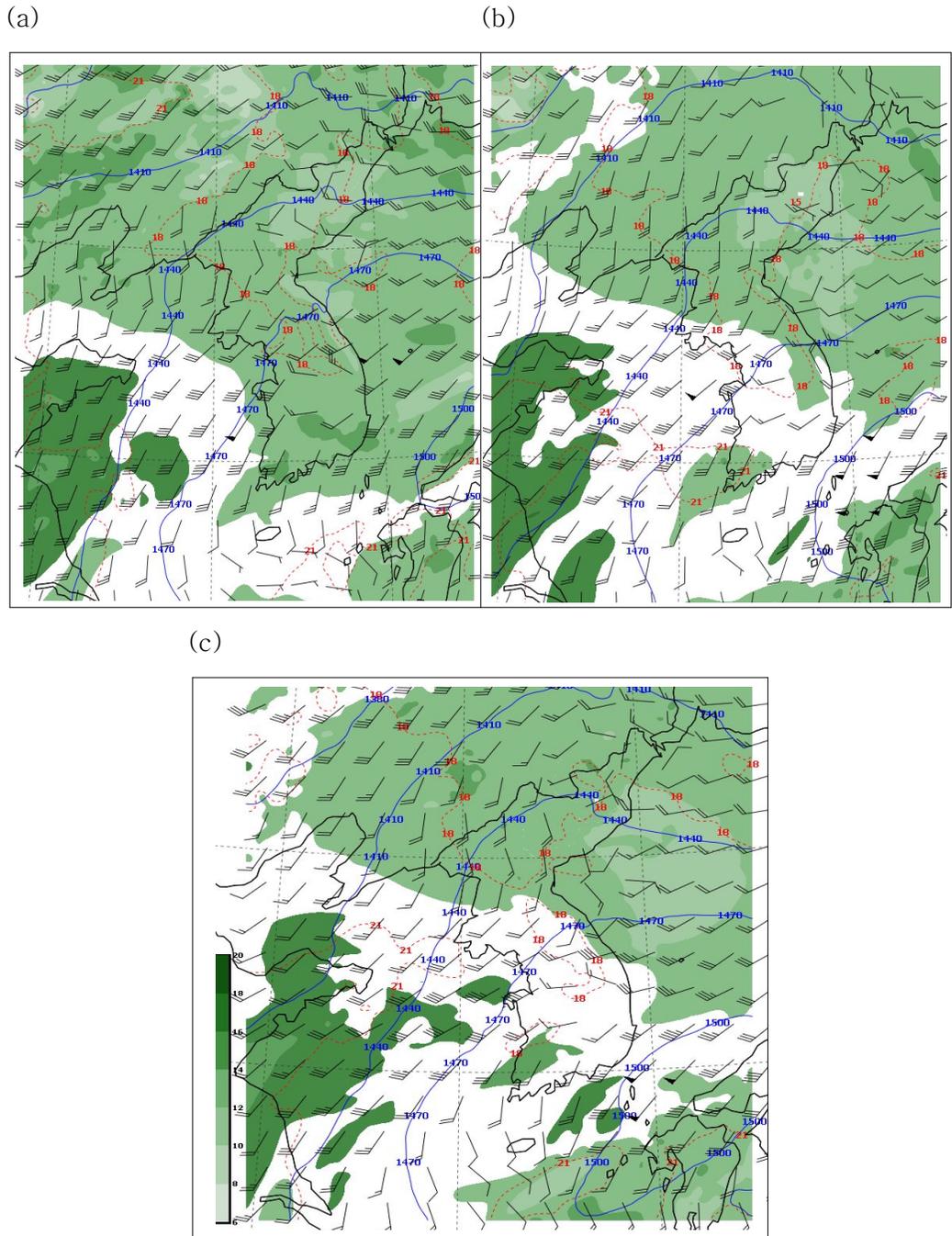


Fig. 9. 850hPa geopotential height(solid line), temperature(dot line), wind (vector arrow) and mixing ratio fields(shaded area) at (a) 18UTC 11 July, (b) 21UTC 11 July, and (c) 00UTC 12 July 2006.

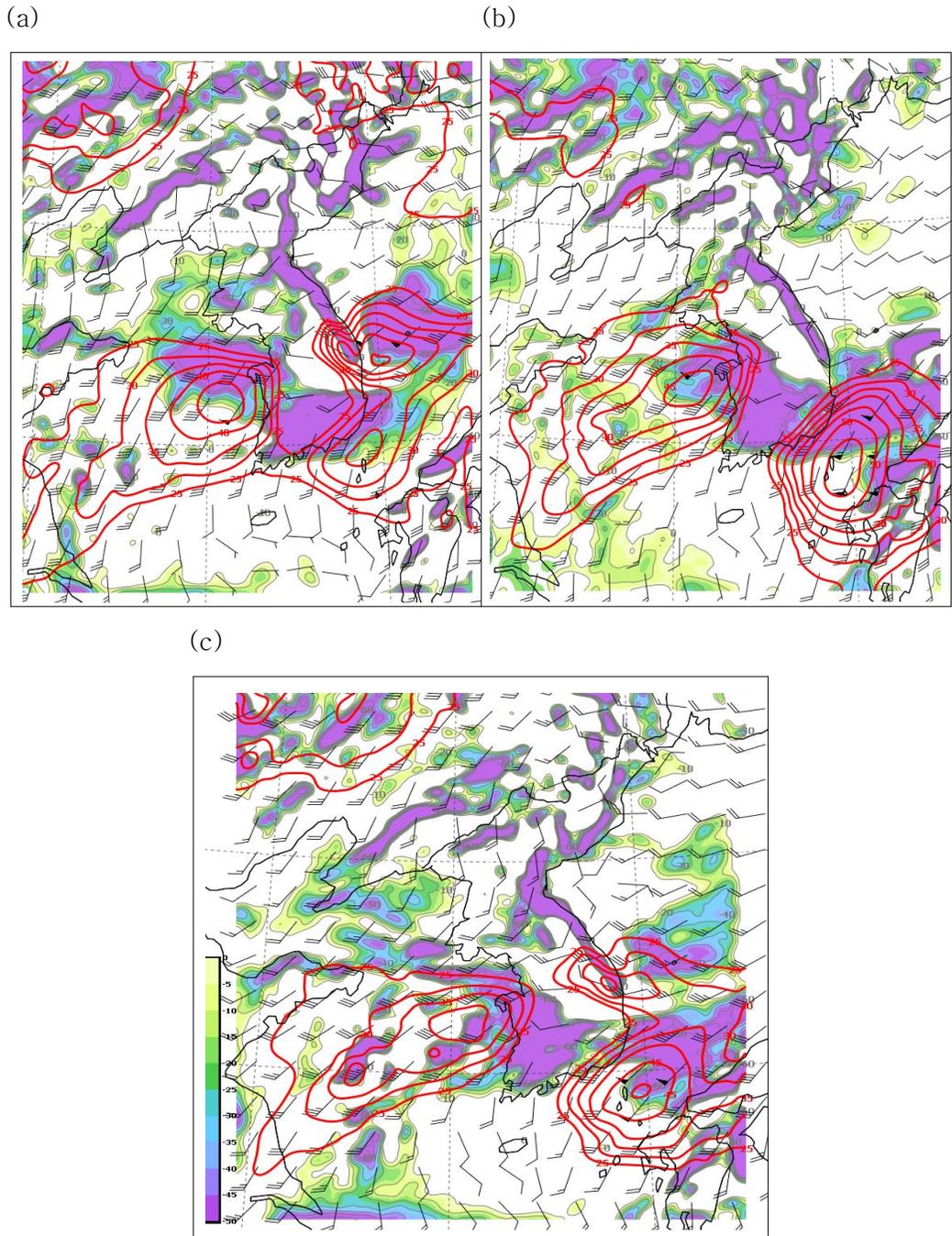
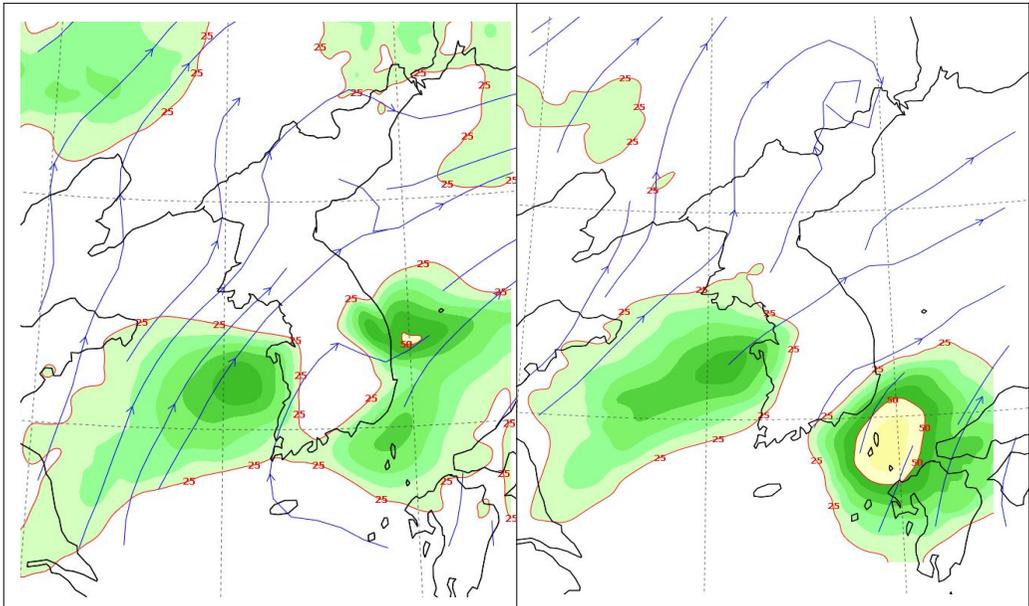


Fig. 10. Same as Fig. 9. but for 850hPa divergence (green area) and convergence (violet area) and strong winds fields (red line).

(a)

(b)



(c)

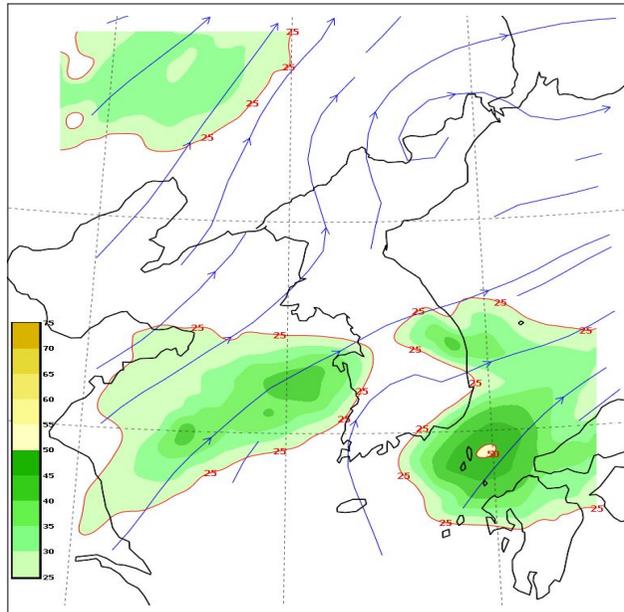


Fig. 11. Same as Fig. 9. but for 850hPa stream lines and strong wind fields over 25kts(shaded area).

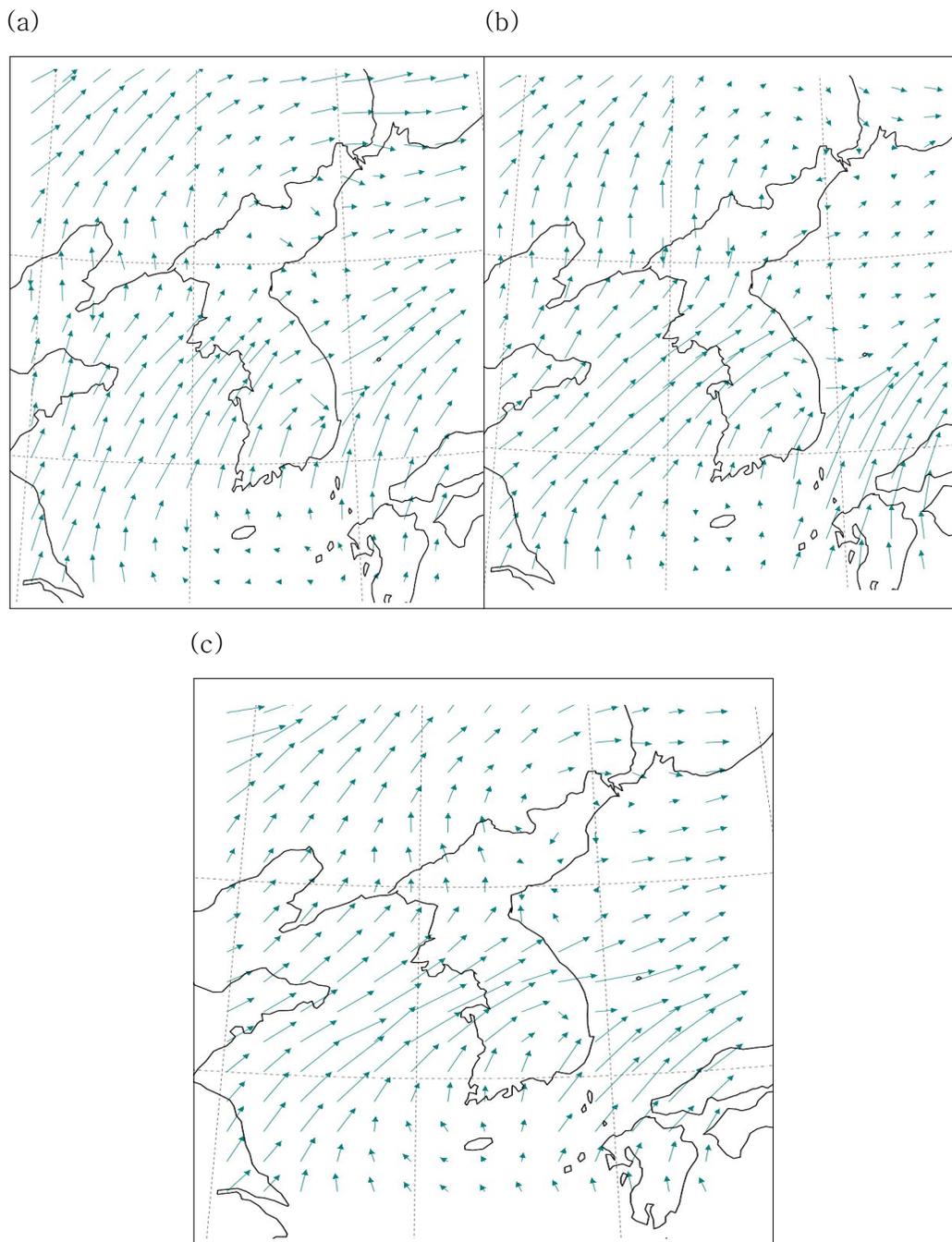


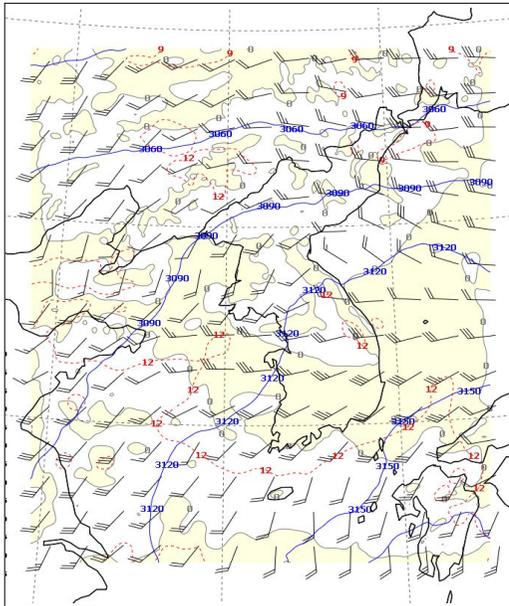
Fig. 12. Same as Fig. 9. but for 850hPa moisture flux(vector arrow).

3) 대기 중하부권 바람과 상승류

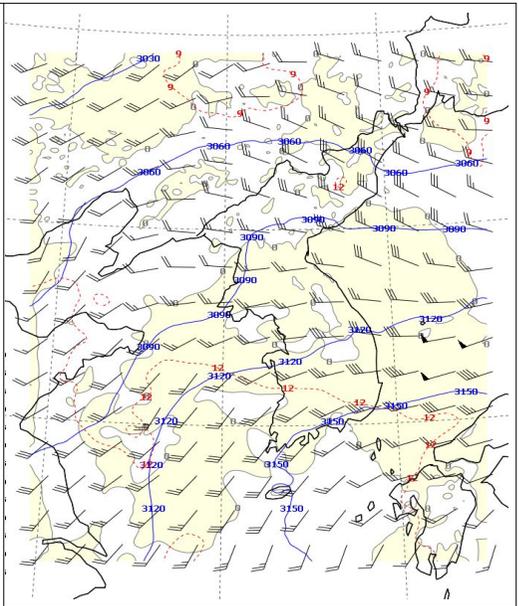
Fig. 13은 700hPa의 고도와 기온, 그리고 연직상승류의 수평분포를 나타낸 것으로 풍향은 전반적으로 북태평양 고기압의 연변을 따른 남서류가 주를 이루고 있다. 풍속은 불안정역이 존재하는 서해상과 한반도 중부이남지방이 다른 지역보다 강한 분포를 보이고 호우시각(Fig. 13c)에는 보다 증가된 분포를 보이지만, 이 층의 풍속은 전반적으로 850hPa보다 약하다. 즉, 서해상과 한반도 중부지방에서 850hPa의 40kts 보다 적은 35kts 정도로 700hPa으로 올라가면서 풍속의 증가는 안 보인다. 이 점은 오히려 850hPa의 바람이 상대적으로 매우 강한 하층제트를 형성하고 있다고 판단된다.

남서류에 의해 유입된 하층의 온난 습윤공기를 수증기로 응결키 위한 하나의 메카니즘으로 상승류가 존재해야 한다. 이러한 상승류는 지면가열, 하층수렴 및 상층발산, 전선면이나 산맥에 의한 강제상승 등에 의해 증폭되는데 일반적 상승류의 강도는 대류에너지와 관련이 있다. Maddox(1983)과 Jirak and Cotton(2004)은 하층 온난이류에 의해 유발된 중규모 수렴과 하층제트 전면의 수렴, 공기괴의 상승이 중규모대류시스템(MCC)의 형성과 초창기 뇌우운의 발달에 기여함을 보였다. 또한 Jirak and Cotton(2007)은 이렇게 형성된 MCC가 더욱 발달하기 위해서는 지속적인 하층 온난이류와 하층 연층바람시어 그리고 대류불안정이 있어야 함을 보였다. 하층에 온난 습윤공기가 유입되면 공기의 대류활동을 야기시키는 환경(척도), 즉 대류 응결고도(CCL)와 치올림응결고도(LCL)가 낮아지고 이것은 결국 양의 대류에너지를 증가시켜 상승류를 유지 발달시킨다(소선섭, 2009). 상승류는 700hPa에서 음의 값으로 나타나는데, Fig. 13에 의하면 상승류의 동아시아지역 분포는 서해상과 한반도 중남부지역을 중심으로 한 불안정역에서 고른 상승류 분포(5~10 cm/s)를 보이고 있지만 종관적 규모로 본 한반도 중부지방 호우역에서의 강한 상승류는 보이지 않는다. 따라서 당시 종관적 환경은 일반 저기압에 수반되는 연직상방의 흐름이나 비활성 전선면 위를 난기가 상승하는 정도의 약한 상승류에 의한 분포를 보이고 있다고 분석되며, 이번 호우에 있어 필요한 상승류의 특징은 이와 같은 종관적 규모보다는 중규모적 분포에서 보다 상세하게 나타날 것으로 보인다. Kim and Lee(2006)은 종관환경에서는 보이지 않는, 종관규모운동에서 기인된 하층수렴이 상승운동을 유발하여 대류운의 형성에 기여함을 보인 바 있다.

(a)



(b)



(c)

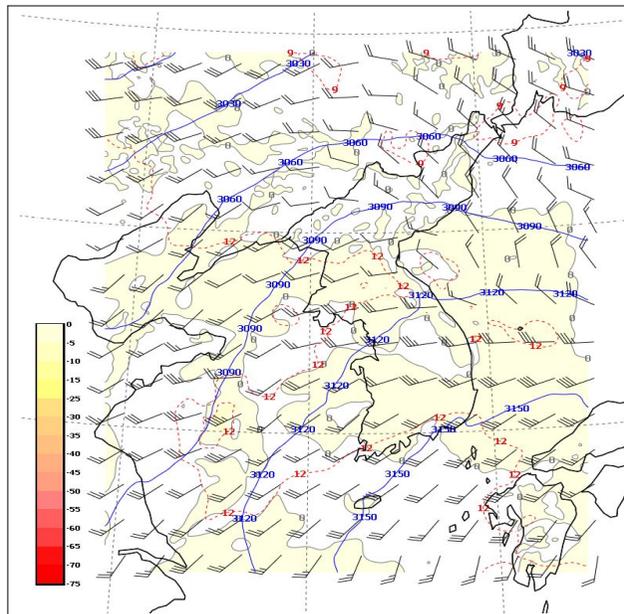


Fig. 13. Same as Fig.9. but for 700hPa geopotential height(blue line), temperature(red-dot line), wind(vector arrow) and ascending air fields(yellow area).

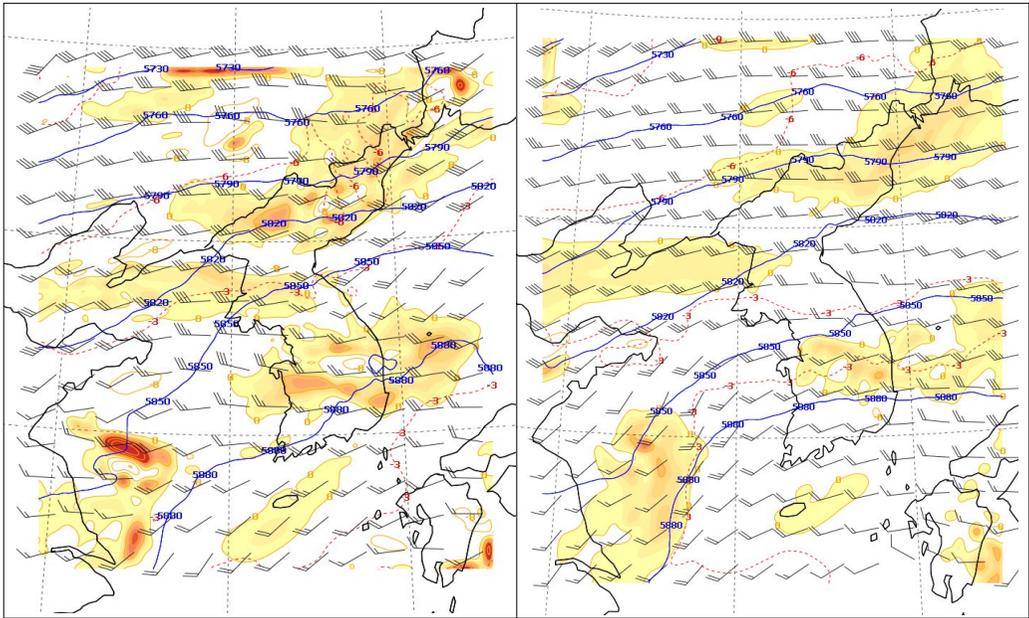
4) 대기 중층의 종관적 환경

Fig. 14는 500hPa의 고도, 기온, 바람 및 상대와도분포를 나타낸다. 한반도에서 장마의 북상과 남하 등 장마전선의 이동과 움직임을 분석하는 데 참고하는 5820gpm선이 한반도 북부지방까지 올라가 있다. 호우시각 당시(Fig. 14 c) 이 선을 중심으로 강한 상대와도 구역이 호우역 보다는 다소 북쪽인 한반도 북한지방을 중심으로 형성되어 있고, 이 구역에서는 주변보다 강한 50kts의 강한 바람이 불고 있다. 상층골 또한 그다지 심하지 않고 발해만을 중심으로 약하게 형성되어 있고, 이것은 호우시간대 기점으로 이전 12시간에 비해 그다지 발달하지 않고 약간 동~동남동진 하였다. 따라서 대기 중층에서 상대와도와 기압골에 관한 분석으로는, 수도권권을 포함한 한반도 중부지방은 약한 상층 기압골의 전면에서 강수현상은 예상될 수 있는 환경이나, 호우에 의한 위험기상은 예측되기 어려운 종관적 환경이다. 이러한 점들에 의해 당시 수치모델에 의한 예측 강수량도 실제보다 매우 적었던 것으로 판단된다.

바람은 한반도 중남부지방을 중심으로 남서류가 유입되고 있지만, 북한지방 서~서북서풍계의 바람이 불어 그 경계, 즉 수도권권을 포함한 중부지방에서는 한냉과 온난공기의 합류가 예상된다. 풍속은 점차 강해져 호우시간대(Fig. 14 c)인 12일 00UTC에는 약 45kts의 강한바람이 서해상에서 불어 들어오고 있다. 한편, Fig. 14에서 기온 분포는 온난공기 이류가 한반도를 지나 동해까지 깊게 분포하고 있음을 볼 수 있다. 즉, 상층(대기 중층)까지 더운 공기가 올라와, 북쪽의 한기와 이렇게 파고드는 난기가 충돌하며 상층에도 불안정을 가져오는 환경을 만들고 있다고 판단된다.

(a)

(b)



(c)

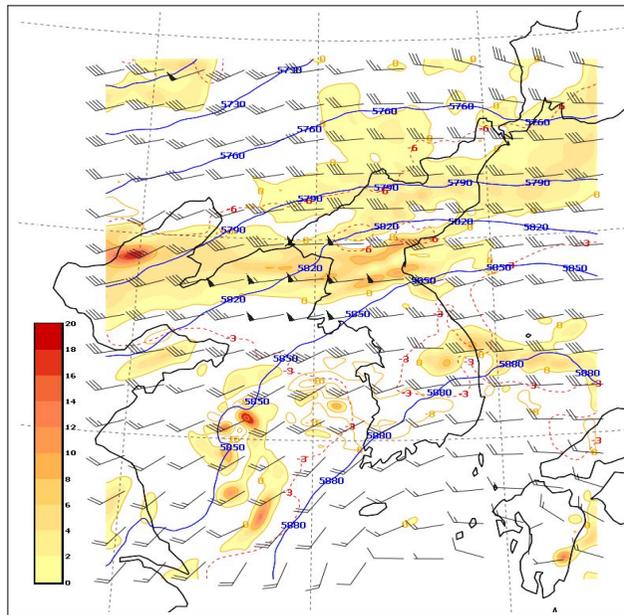


Fig. 14. Same as Fig. 9. but for 500hPa geopotential height(blue line), temperature (red-dot line), wind(vector arrow) and relative vorticity(yellow and red area).

5) 대기 상부와 상층제트

Fig. 15는 200hPa의 바람장이다. 11일 18UTC(Fig. 15 a)를 보면 90kts에 달하는 상층제트 streak가 한반도 북쪽의 중국 북부지방에 이르고 있고, 특히 그 출구가 중국 북동부지방에서 이르고 있다. 이 상층제트는 축을 중심으로 남쪽으로 점차 감속되어 700km 이상 떨어진 한반도 중부지방에서는 20kts로 급격히 약화되고, 풍향은 축 부근에서 서남서풍으로 불던 강한 바람이 남쪽으로 내려오면서 서북서풍으로, 바람의 발산장 패턴을 보인다. 즉 중국북부지방에서는 남서류, 한반도 중남부지방에서는 서북서류를 이루고 있어 한반도 중부지방에 발산역이 형성되고 있음을 보인다. 이러한 환경은 이 상층 발산역을 향해 하층제트와 하층 수렴에 의한 2차 순환이 형성될 수 있다고 판단된다.

12일 00UTC(Fig. 15 c)에도 80~90kts에 달하는 상층제트 축은 한반도에서 널리 떨어진 중국북부지방을 지나고 있으나 전 시간에 비해 상당히 남하하였다. 그러나 한반도에서의 상층발산 정도는 보다 강화되어, 한반도 북부지방까지는 상층제트의 남단에 의한 서남서류가 깊게 내려오고(백령도 부근 서남서풍 45kts) 있음에 비해, 한반도 중부와 남부지방은 현저한 북서류가 15~20kts로 불고 있어, 호우지역 부근에서 수평시어에 의한 상층발산장이 지배적인 것으로 판단된다.

상하층제트의 위치와 호우시 이들이 교차여부와 관련, 850hPa 바람장(Fig. 11)과 200hPa 상층제트(Fig. 15)를 비교분석해 본다. 일반적으로 상층제트와 관련된 상층발산역은 하층제트와 연계되어, 직접적인 상승류를 유발하기 보다는 대기 하층에서 유입된 공기를 대기 상부로 유출시키는 2차 순환의 역할을 한다. Fig. 3의 모식도에서도 보듯이 하층제트로 유입된 공기는 권계면부근까지 올라온 모루구름의 정점부근에서 유출되어 나간다. 이때에 상층제트나 상층발산은 운정 고도에서의 유출을 촉진시킨다. 한편 호우역과 상하층제트의 위치와 관련해서, 외국의 사례 경우 상하층제트가 서로 교차하는 구역에서 호우가 발생하는 가능성이 많은 것으로 조사되고 있다. Chen and Yu(1988)는 상층제트가 동서로 형성되고 하층제트가 그 밑에서 남북으로 존재할 때, 두 제트간의 간격이 가까울수록 호우의 가능성이 높다고 하였다. 홍성길 등(2010)을 비롯한 우리나라의 연구들도 한반도 상공까지 남하한 상층제트 축의 출구 남쪽에 형성된 상층발산과 한반도로 향한 하층제트가 비교적 가까운 수평거리 내에 존재하는 가운데 호우가 발생함을 보이고

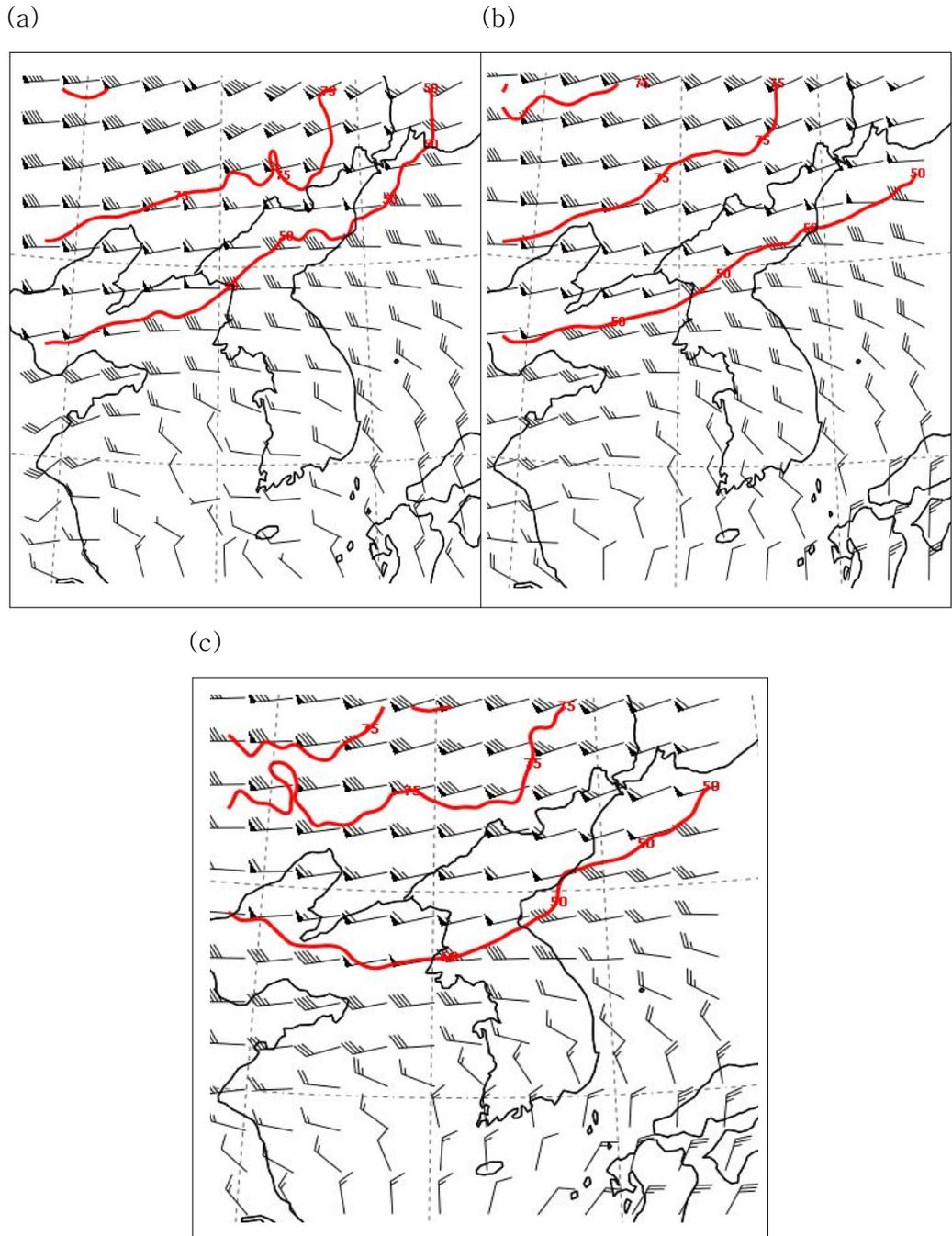


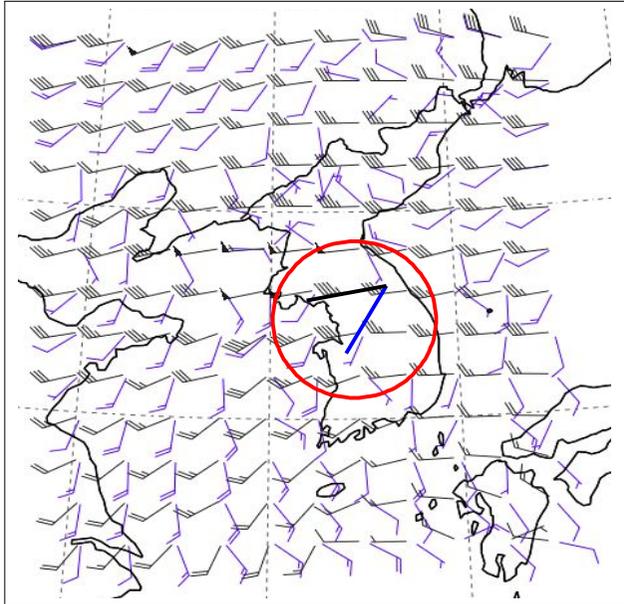
Fig. 15. Same as Fig. 9. but for 200hPa wind(vector arrow) and classification of wind speed(solid line).

있는데, 이러한 것들은 장마전선 상에서 발달한 저기압에 의한 호우의 경우로 사료된다. 그러나 본 사례에서는 상층제트 축은 중국 북동부지방을 지나고, 이 상층제트 축과 연계된, 보다 뚜렷한 상층발산장(수평 풍향시어에 의한)은 700~1000km 이상 남쪽으로 멀리 떨어진 한반도 중남부지방에 형성되고 있다. 즉, 본 사례의 호우는 발달된 저기압에 의한 호우사례가 아닌 경우로서, 호우지역 상공의 상층발산장은 상층제트의 축과는 멀리 떨어진 곳에서 형성되었고 이것이 서해상에서 들어오는 하층제트와 연관되어 2차 순환을 가져온 것으로 판단된다. 이러한 분석은 Fig. 6의 위성영상에서 보면 잘 뒷받침된다. 영상사진에서 보듯이 호우를 유발한 고양시 상공의 대류운은 수평규모 20~30km의 중간규모적 국지적 현상임으로, 2차 순환이 유발되는 상층발산장도 중국 북동부 대륙지역에 형성된 상층제트 축과는 매우 떨어진 곳에서 형성되고 있다고 해석된다.

6) 바람의 연직시어

Fig. 16은 지상과 500hPa의 바람장, 850hPa와 200hPa의 바람장을 한 지점에 대해 같이 표현한 것으로 상하층간의 바람 연직시어를 보인다. 연직시어가 클수록 대기가 불안정한 지역에서는 강한 적난운이나 대류운이 발달하기 쉽다. 또 대기가 불안정 상태에서 바람의 연직시어가 순전(veering)하면서 높이에 따라 풍속이 증가하면 강한 상승류는 계속 강화되어 호우의 발생가능성이 높다. 일반적으로 약 30도 이상 순전하고 풍속차가 30% 이상 정도가 되면 강한 뇌우 등이 유발하는 좋은 조건을 갖는다고 본다. 우리나라의 호우를 분석한 김진철 외(2008)은 대기의 연직풍향이 40도 이상으로 순전하면 호우를 유발할 환경이 잘 조성됨을 보인바 있다. 이것은 하층에서는 온난공기의 유입을, 상층에서는 찬공기의 남하를 유발한다고 볼 수 있기 때문이다. Fig. 16에 의하면 호우가 발생한 수도권 지역을 중심으로 두 경우 모두 40도 이상의 연직시어가 존재함을 보여 준다. 지상과 500hPa의 바람장(Fig. 16 a)을 보면 경기북부와 수도권지역으로 표시된 지역에서 지상 바람은 남남서풍 5kts, 500hPa는 서남서 40~45kts를, 850hPa와 200hPa 바람장(Fig. 16 b)을 보면, 850hPa 바람은 남서풍 20kts, 200hPa는 서풍 40~45kts로 대기

(a)



(b)

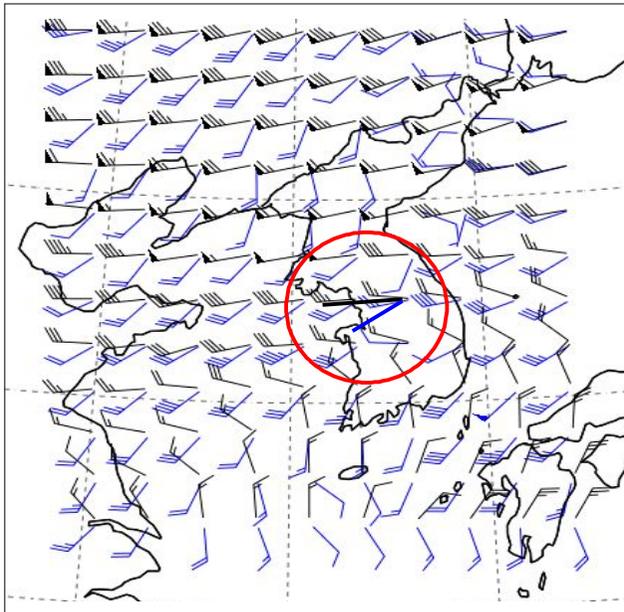


Fig. 16. Vertical wind shear between (a) surface wind(blue) and 500hPa wind(black) and (b) 850hPa(blue) and 200hPa(black) at 00UTC 12 July 2006.

상하층간에 강한 연직시어를 보이고 있다. 이러한 연직시어는 결국 대기 중간층에 국지적인 기압하강을 유발하고 이로 인한 중간고도의 낮은 기압을 따라 상승류가 증가하게 되고, 대류운이 발달 유지하게 되어, 수도권지역이 다른 지역에 비해 호우의 조건을 잘 갖추고 있다고 분석된다.

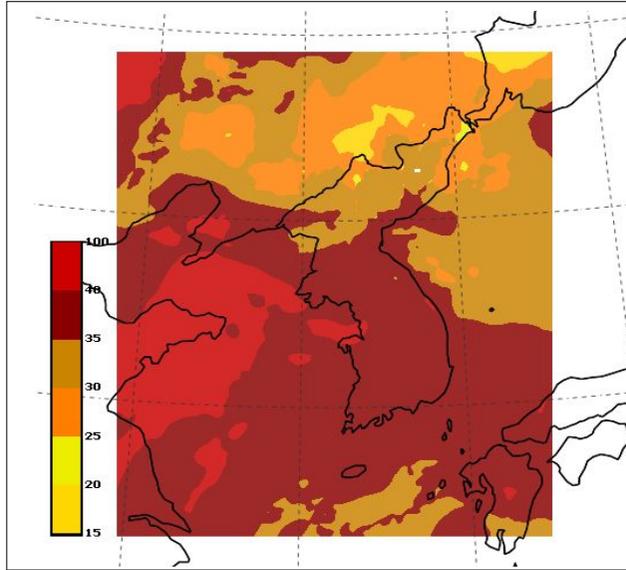
7) 기타 불안정 요인 분석

기타 대기불안정 환경을 살펴보기 위해 불안정지수와 관련된 요인들을 살펴볼 필요가 있다. 기단의 경계나 전선의 형성 등의 척도가 되는 상당온위는 그 경도가 클수록 즉 수평거리 100km에 10K 이상 강한 경도를 갖을수록 불안정한 대기를 형성하여 호우발생 가능성이 높다. 한편 상당온위가 333K 이상인 경우 아열대 기단의 성질을 갖는 불안정지역으로 볼 수 있는데, 한반도 지역에서 약 330K 이상의 고온습윤한 공기분포를 보일 때 호우조건을 잘 갖추고 있다고 본다. 특히 우리나라는 여름철 강한 일사와 난기이류에 의해 대기 하층에 높은 상당온위가 형성되어 대류 불안정 조건에 쉽게 노출될 수 있다.

대기안정도를 보이는 Fig. 17의 불안정지수 그림에서 보듯이, 우리나라 대부분의 지역이 K-Index(Fig. 17 a)는 40 이상 Showalter 지수(Fig. 17 b)는 -2 정도로 매우 강한 불안정역에 들고 있음을 보여준다. K-index(KI)는 대기 하층에서의 대류 정도를 가늠할 수 있는 지표로서, 기온(850hPa와 500hPa간의 기온차)과 하층의 습기구조(850hPa와 700hPa의 노점온도 차)를 이용하여 분별한다. 높은 850hPa 노점온도와 낮은 700hPa 노점온도에 의한 습기구조는 온난습윤공기가 대기 중층까지 높게 자랄 수 있는 환경을 만들고, 특히 850hPa와 500hPa간의 기온차가 크면 대기 불안정은 더욱 강화됨을 의미한다. 일반적으로 그 수치가 25를 넘으면 뇌우를 동반하는 대류운이 크게 발생할 수 있는 불안정한 환경으로 본다. 한편 Showalter 지수(SI)는 850hPa 공기괴의 안정도를 평가하는데 사용되는데, 음의 SI지수는 상부 행성경계층이 불안정하다는 것으로 해석될 수 있고, 일반적으로 0~-3의 지수값은 뇌우가능성이 급증하는 불안정한 환경으로 본다. 따라서 본 사례에서 보인 KI 40, SI -2의 종관적환경은 당시 호우를 유발하는 대류운이 크게 발달할 수 있는 강한 대기불안정 상태로 판단된다. 종관적으로 볼 때 700hPa에서의 약한 상승류

분포, 500hPa에서 약한 기압골의 접근을 감안하면 큰 불안정 요소가 없는 대기 중상층의 환경 속에서, 이렇게 불안정지수가 높게 나타난 것은 고온습윤한 공기에 의한 대기불안정이 불안정지수를 높이는 데 크게 작용한 것으로 판단된다.

(a)



(b)

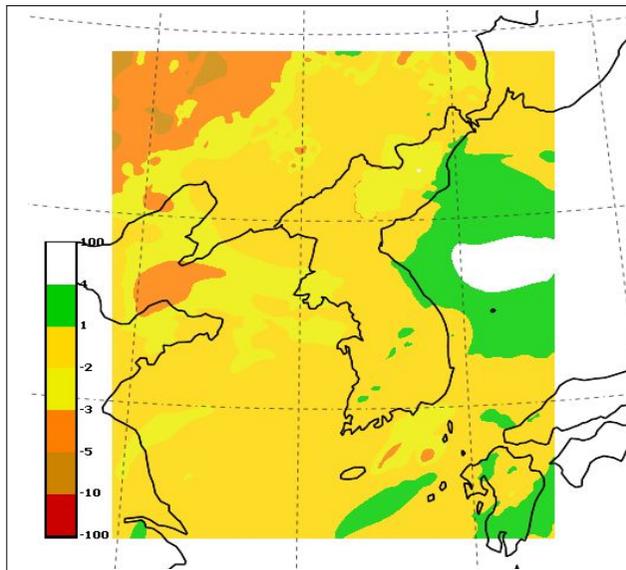


Fig. 17. Atmospheric instability at 00~01UTC 12 July 2006, (a) K-Index and (b) Showalter Index.

다. 중규모 연직구조

1) 대류불안정 분석

앞에서도 기술한 바와 같이 호우 사례의 중규모 특성을 분석하기 위해 호우 당시의 고양시와 서울 지역의 연직단면도를 조사하였다. Fig. 18은 고양시 상공의 상당온위와 온도 그리고 바람장의 연직 동서단면도를 나타낸다. 연직단면은 37.6°N, 125.8°E ~ 37.6°N, 127.9°E의 단면도이고, 단면도의 중심부분이 고양시의 위치를 뜻한다.

(a)

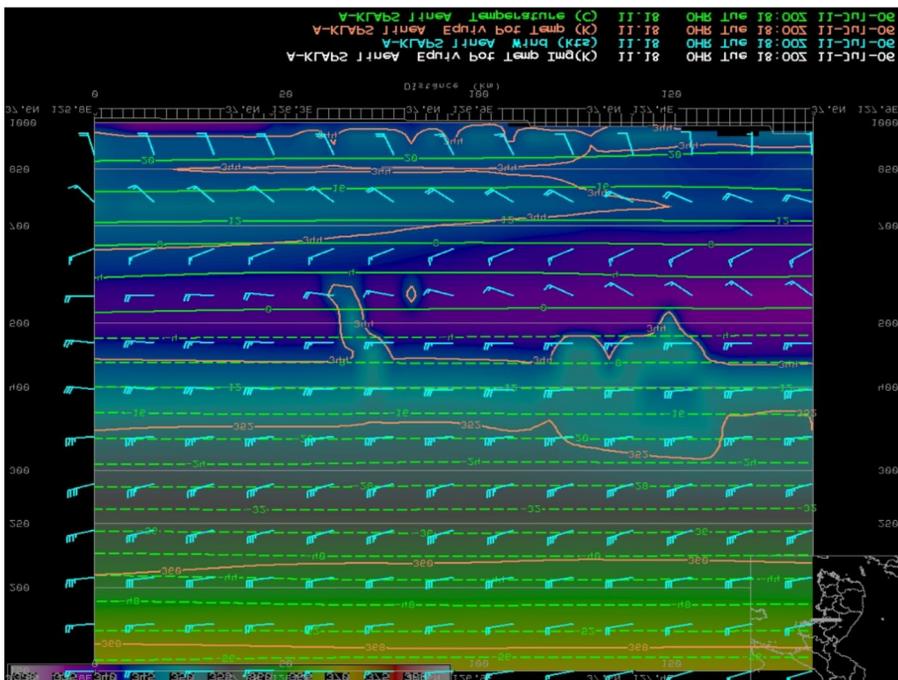
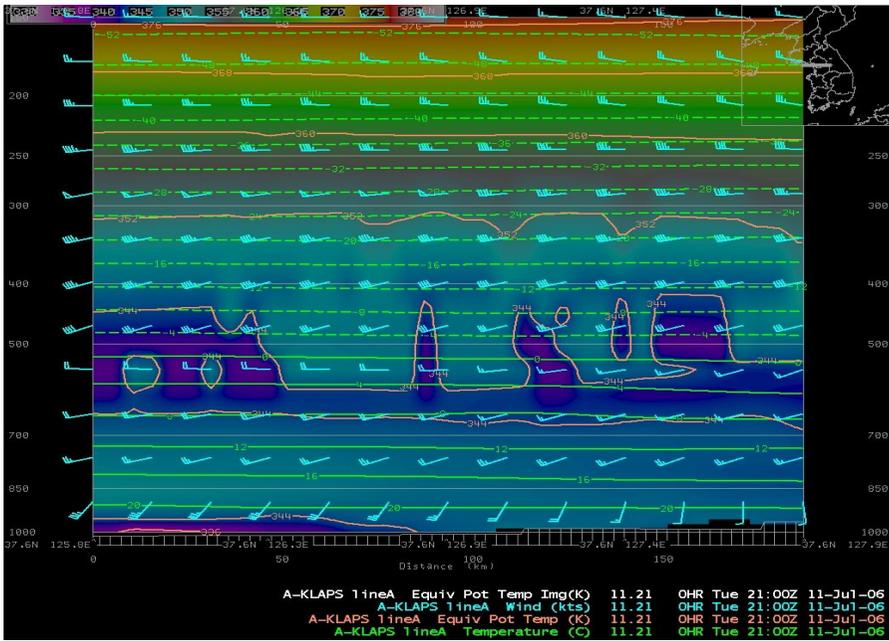


Fig. 18. Cross-section of equivalent potential temperature(color images and purple line), temperature(green line) and wind(vector arrow) over Goyang city at (a) 18UTC 11 July, (b) 21UTC 11 July, and (c) 00UTC 12 July 2006.

(b)



(c)

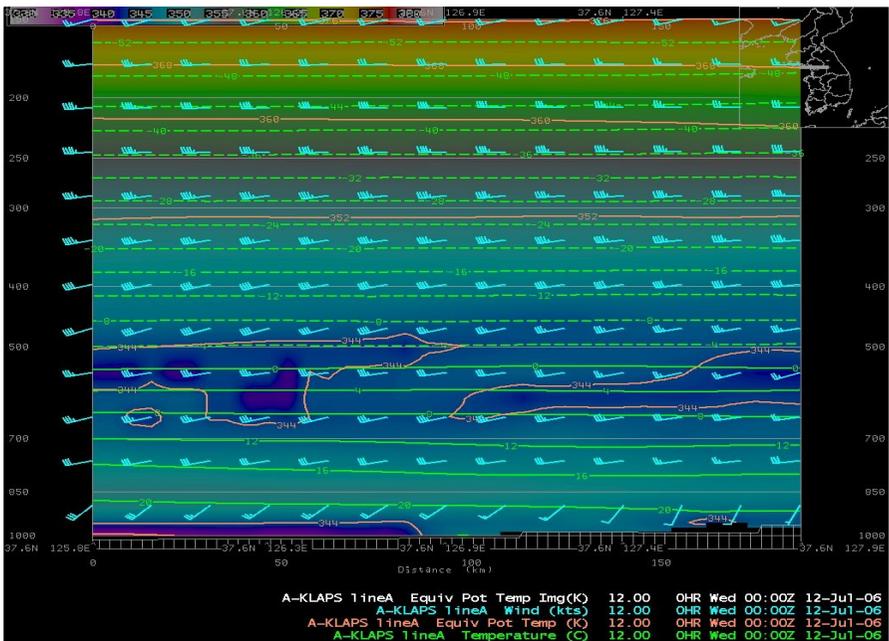


Fig. 18. Continued.

상당온위는 그 경도가 클수록 불안정한 대기를 형성하여 호우의 발생가능성을 높인다. 일반적으로 상당온위가 333K 이상인 경우 더운 기단으로 분류하며, 그 이상의 지역과 공기괴는 아열대기단의 성질을 갖는 불안정 지역으로 볼 수 있다. Fig. 18의 동서 연직단면도를 보면, 고양시를 포함하는 수도권지역 상공에는 340K가 넘는 덥고 습한 공기가 지배하고 있다.

일반적으로 상당온위의 연직분포는 중하부 대류권(400~500hPa 이하)의 등상당온위면 조밀도(연직경도)가 대기 상부 성층권(400hPa 이상)의 연직경도 보다 상대적으로 조밀하여 대기하층이 덜 안정된 구조를 보인다. 대기층의 연직기온 분포와 관련하여, 이혜영(2010)은 중하층 대류권에 한냉돔(dome), 450hPa 이상의 상부 대류권에서 온난풀(pool)의 존재가 집중호우의 발생에 좋은 조건을 제공한다고 하였다. 강수가 시작되기 전인 11일 15UTC에서 11일 18UTC(Fig. 18 a)까지는 전반적으로 상층으로 갈수록 상당온위가 증가하는 안정한 대기구조를 갖는다. 물론 500hPa 부근은 지상보다 다소 낮은 상당온위 분포로 약간의 불안정은 보이지만 그다지 강하지 않다. 강수가 시작되는 11일 18UTC를 시작으로 대기하층(700hPa 까지)에는 344K가 넘는 온난습윤한 공기가 점차 유입되고 있다. 이러한 공기가 유입되는 층에는 남서류가 주풍을 이루고 있다. 고양시 상공을 보면, 700~ 650hPa부근까지 이 더운 공기가 계속 유입되고 있고, 그 위의 대기 중층(650~ 500hPa)에는 한냉공기 풀(파란색 구역)이 있다. 이러한 구조는 한냉공기 풀이 450hPa 이하에 나타나고, 그 이상의 하부 성층권에서 온난 풀이 나타남을 보인 이혜영(2010)의 사례와 고도 차이는 다소 있으나 전반적인 구조에서 일치한다. 한편 본 사례에서 보인 대기중층의 한냉 공기는 하층에 더운공기와 상층에 찬공기 구조를 형성하게 함으로써 대류불안정의 중요한 역할을 한다. 이 한냉공기 풀은 집중호우 시간대인 11일 22UTC ~ 12일 00UTC(강수 최대시각, Fig. 18 c) ~ 12일 03UTC까지 규모는 작지만 뚜렷하게 존재하고 있어 매우 불안정 환경을 보인다고 판단된다. 이 대기 중층의 한냉 공기는 강수 쇠퇴기(12일 04UTC 이후)에는 모두 사라져서 대기는 하층에서 상층으로 올라갈수록 상당온위가 증가하는 안정적 조건을 보인다. 즉, 강수 쇠퇴기에는 대기 중층의 한냉공기로 인하여 상당온위(θ)의 연직구조가 위로 올라 갈수록 감소하는 즉, $\partial \theta / \partial z < 0$ 를 보이는 강한 연직 대류불안정 구조를 보이고 있다. 따라서 Fig. 13과 Fig. 14에서 보인 700hPa과 500hPa의 평이한 중관적 환경에도 불구하고 이러한 강한 대류불안정이 당시 호우를 발생하게 한 하나의 중요한 증규모적 요인이 된 것으로 판단된다.

2) 연직상승류 및 수렴발산

Fig. 19는 고양시 상공의 상승류, 연직순환 및 수렴발산장의 연직분포이다. 강수 시작 전인 11일 15UTC이전에는 대기 하층(700hPa 이하)에는 하강기류가 존재하다가, 15UTC부터 점차 대기하부에 상승류와 연직순환류 발생하여, 강수 시작 전인 11일 16~18UTC(Fig. 19, a)에 점차 상승류(붉은색 계열구역)가 대기하층에 걸쳐 증가하였다. 즉 강수 시작 전부터 상승류의 증가, 수렴역의 형성 및 증가 경향이 나타나고 있다. 이러한 강수시작 전부터의 상승류 증가는 앞에서 기술한 상당온위의 불안정조건 보다 먼저 발생하여, 호우예측에 있어 선행현상으로 보기에 좋은 지표가 될 것으로 판단된다.

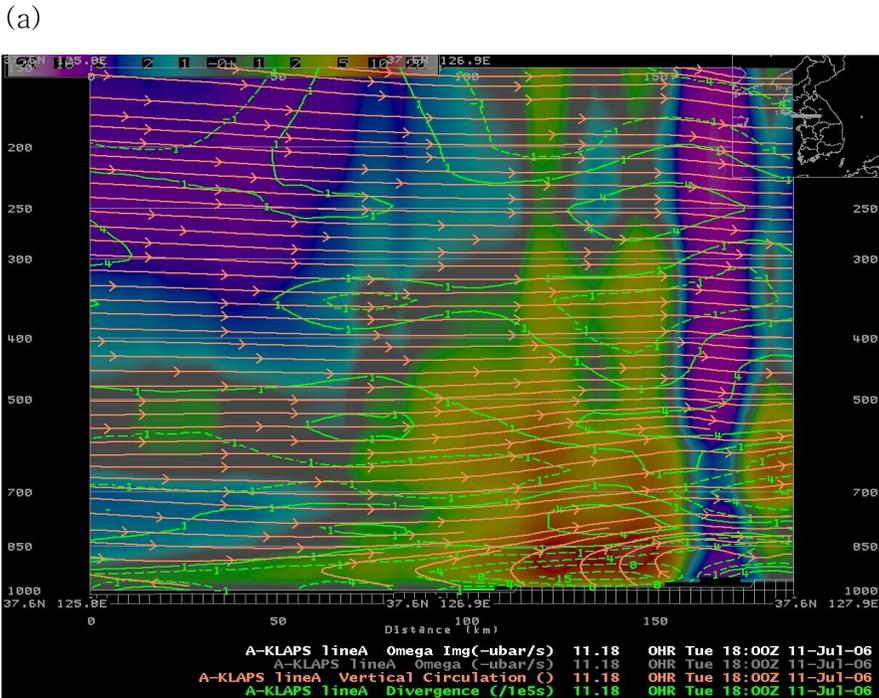
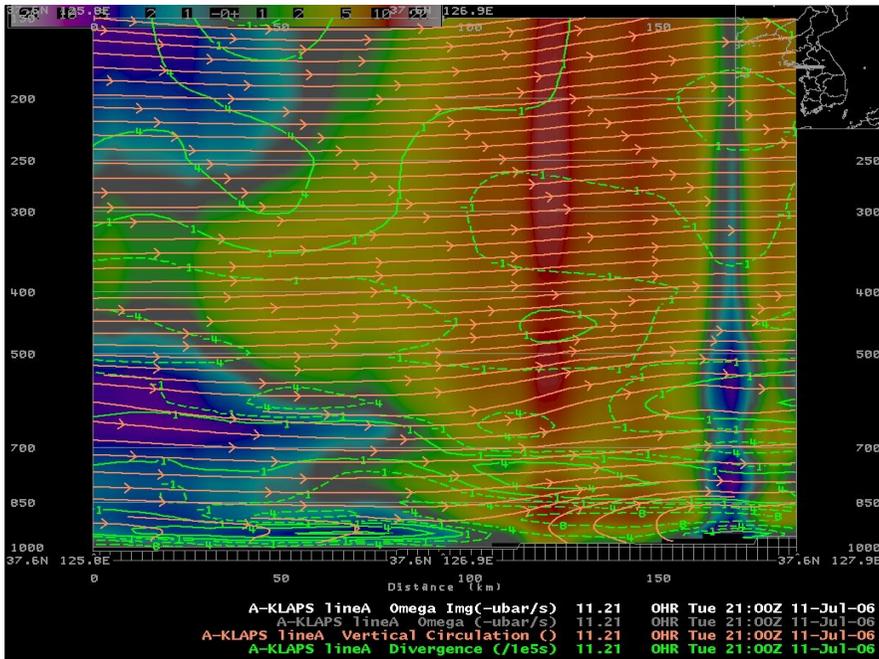


Fig. 19. Same as Fig. 18. but for omega fields(ascending air flow, color images), vertical circulation(purple line) and divergence(green line) at (a) 18UTC 11July, (b) 21UTC 11 July, and (c) 00UTC 12 July 2006.

(b)



(c)

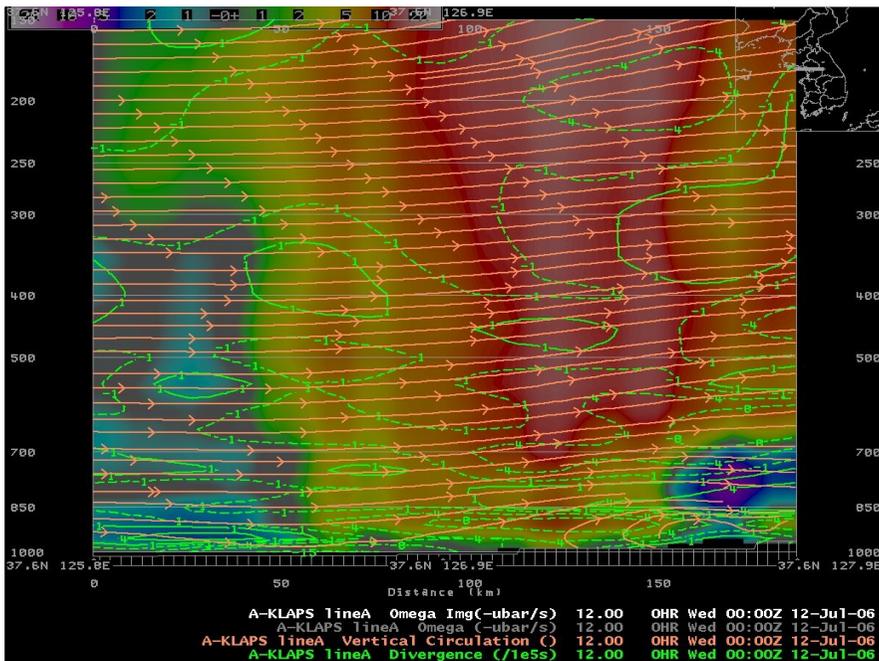


Fig. 19. Continued.

강수 최성기(Fig. 19 c)에는 대기 전층에 걸쳐 $10\sim 20\ \mu\text{bar/s}$ 에 달하는 강한 상승류, 대기 하층(850hPa 이하)에 수렴역 형성, 특히 850hPa 이상에서 강한 상승류가 존재함을 보인다. 이 상승류는 제1차 peak시인 11일 20UTC에 전 층에 형성되어 소강기인 21~22UTC에서도 그 정도를 유지하다가, 최성기인 12일 00UTC(c)에는 대기 하층(850hPa 이하)에 $5\sim 15\ e^{-5}/s$ 정도의 강한 수렴역 (특히 하층에서 강하고 상부로 올라갈수록 감소)과 함께 상승류의 강도가 점차 상부로 올라 갈수록 증가하여, 700hPa이상에서 최대 상승류를 보인다.

보통 20~50km의 규모를 갖는 호우세포들은 상승기류와 하강기류가 동시에 나타나 몇 시간 동안 준 정체상태에서 공존하는 특성이 있다고 알려져 있다(Djuric, 1994). 이 경우, 특히 대기 중간층에는 하강기류가 건조한 공기의 유입과 함께 존재한다. 하강, 상승기류들은 서로 방해하지 않고, 상승기류를 통해 형성된 물방울을 하강기류를 통해 강수형태로 낙하한다. 이때 찬 공기의 하강과 강수의 낙하는 하강기류를 촉진시킨다. 12일 00UTC인 최대 강수 기록시, 고양시 상공의 서쪽과 동쪽에 각각 하강기류 존재하여, 호우셀이 서로 상승, 하강의 순환을 하며 발달함을 알 수 있다. 이는 모식도에서도 보였듯이 대기 중층에서의 하강기류 현상을 잘 보여주는 좋은 사례로 여겨진다. 한편 지표부근에는 강한 수렴역 ($12\ e^{-5}/s$)이 있고, 대기 상부까지 (~500hPa까지) 오메가 상승류 구역에 폭넓은 수렴역이 존재하고 있다. 이는 수렴역이 700hPa 이하에 나타나고 600hPa 이상에서는 발산역을 보인 이해영(2010)의 경우와는 다소 차이를 보이고 있다. 이는 분석에 있어 규모의 크기에 따른 차이의 결과로 (본 사례의 연직단면 경우 수평 규모는 50km 정도) 사료된다.

3) 수증기 속과 상대와도

Fig. 20은 고양시 상공의 수증기 속(Moisture Flux)와 상대와도 연직구조이다. 강수 시작 전인 11일 15UTC에는 850~700hPa의 대기 하부에 수증기 수렴층이 형성되어 있었다. 17~18UTC(Fig. 20, a)에 대기 중층(650~400hPa)에는 수증기 수렴역(파란색 계열 구역)과 발산역(녹색 계열 구역)이 형성되어 있어 주위로의 유출과 유입이 일어나고 있음을 보인다. 11일 18~21UTC(1차 강수기) 및 최성기(11일 23UTC~12일 01UTC)에는 지표 부근(1000~850hPa)에 20g/kg에 달하는 수증기 수렴역이 폭넓게 존재한다. 그 상부(850~700hPa)에는 비교적 약한 발산역(1g/kg)이 형성되어 있다. 대기 중층(500hPa 부근)에서는 10g/kg 규모의 수렴과 발산이 혼재하여 나타나고 있다. 이처럼 대기층에 걸쳐 수렴과 발산역이 연직으로 다소 교차하며 나타나는 것이 특징으로 여겨진다. 이는 호우시 대기층에서 상승과 하강기류가 서로 교차하는 것과 연관되어 있다고 사료된다.

(a)

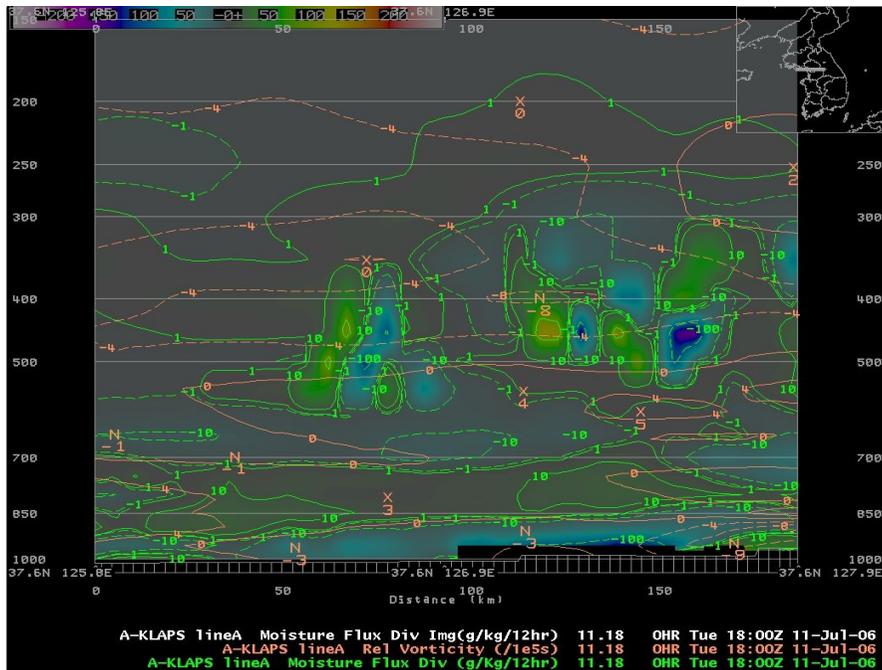
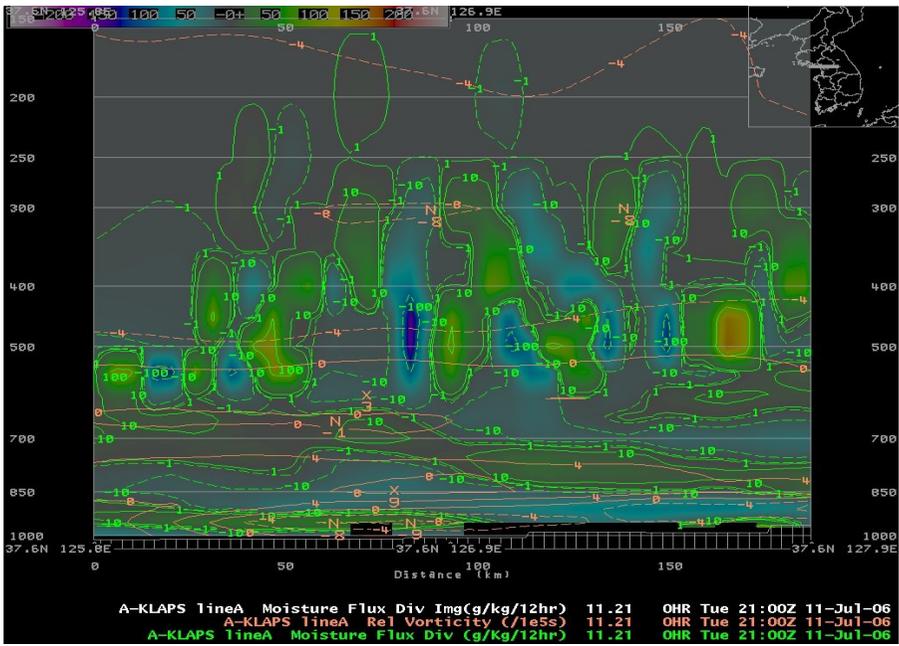


Fig. 20. Same as Fig. 18. but for moisture flux divergence(color images and green line) and relative vorticity(purple line) at (a) 18UTC 11 July, (b) 21UTC 11 July, and (c) 00UTC 12 July 2006.

(b)



(c)

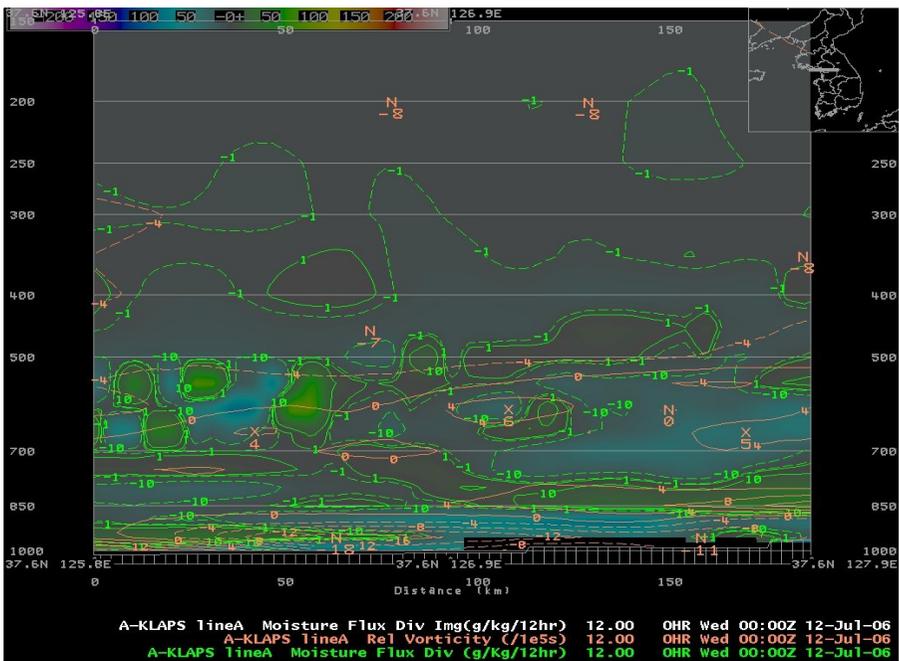


Fig. 20. Continued.

한편, 갈색선으로 표시되는 상대와도는 하부에서 저기압성 와도, 상부에서는 고기압성 와도 구조를 나타내고 있다. 김미애 등(2009)은 호우시 사례분석을 통해 저기압 발달시 상대와도가 400hPa 이하에서는 저기압성 와도, 그 이상에서는 고기압성 와도 분포를 보이고, 700hPa와 지상부근에서 최대 저기압성 와도, 200hPa에서는 최대 고기압성 와도를 보인 바 있다. 본 사례에서는 850~500hPa 대기층에서 최대 $5e^{-5}/s$ 정도의 약한 저기압성 와도, 그 상부(400hPa)이상에는 최대 $-8e^{-5}/s$ 의 고기압성 와도를 보여 저기압 발달의 경우가 아님에도 불구하고, 상대와도 분포에 있어 선행연구와 비슷한 연직 구조를 갖는다. 이는 호우와 같은 강한 강수현상이 일어날 경우, 상대와도의 연직 분포에 있어서 하층에서 수렴에 의한 저기압성 와도는 강한 상승류와 함께 필수적인 요소로 존재한다고 판단된다.

라. 고양시 호우 개념도

호우를 포함한 위험기상은 시기적으로, 규모적으로, 또 역학적으로 여러 상이한 요인과 원인이 복합적으로 작용하여 발생한다. 따라서 개개의 사례 분석 등을 통해, 호우 유발요소에 대한 유사성이나 차이점 등을 파악하여 이를 모식화 하는 등의 일반화 작업이 필요하다. 지금까지 여러 연구들은 호우와 관련된 개념모델의 경우, 대부분 하층제트에 의한 고온의 수증기 유입을 가장 중요한 원인으로 하여 특징적 패턴을 가진 개념모델을 찾고자 하였다. 앞서서도 기술한 바와 같이 우리나라의 집중호우는 대개 장마기나 장마후의 위험기상에 의해 발생한다. 따라서 이 두 경우의 집중호우 사례분석을 통해, 호우의 원인이 되는 역학적 원인이나 종관, 중규모적 특징을 개념 모델화하는 것은 향후 대기의 진단과 예측에 크게 기여할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 장마기와 장마후의 호우 사례에 대한 차이점과 유사점 분석을 통해 호우의 진단과 예측에 기여하고자 함에 목적이 있다. 이를 염두에 두고 앞에 분석한 고양시 호우의 종관적 환경과 중규모적 연직구조 및 특징 등을 바탕으로 이를 간략히 표현한 개념도를 Fig. 21과 같이 구성하였다.

그림에서 보듯이 대기를 지상과, 대기하층(850hPa), 대기중층(500hPa) 그리고 대기상층(200hPa)으로 분류하고 해당 등압면에서 나타난 주요 특징을 나타내었다. 고양시 호우의 경우, 지상기압계의 구조는 폐색저기압의 온난역과 연계된 준 정제 전선 상의 북쪽구역에 호우가 발생한 종관환경 가운데, 850hPa에서 북태평양 고기압 연변에서 340K가 넘는 고온 습윤공기가 40kts에 달하는 서해상의 강한 남서류 하층제트에 의해 유입되고, 하부 대기는 높은 상당온위와 온위경도에 의해 대류불안정의 조건을 잘 갖추고 있다. 호우역은 하층제트 전면 수렴역에서 발생하고 있다. 대기 중층에서는 -6°C 이상의 한기가 남하하여 온난이류와 충돌하여 불안정을 가속화하며, 한반도는 서해상에서 다가오는 약한 기압골의 전면에 위치한 가운데, 40도 이상 순전하는상하층간 바람시어에 의해 불안정이 증폭되고 있다. 대기 상층에는 상층발산장이 형성되어 있다. 이 발산장은 중국 북부지방을 지나고 있는 상층제트의 축과는 700km이상 먼 거리에 떨어져 있으나 하층제트로 유입되는 공기를 대기 상부로 올려 보내는 2차 순환의 역할을 충분히 담당하고 있다고 판단된다.

대기 연직구조는, 대기 중층까지 대류불안정의 조건(상당온위의 상향 감소)을 잘 갖추고 있으며, 대기 중층에서 상승, 하강류(수렴, 발산장)의 혼재가 특징으로 나타나고 있다. 따라서 이러한 특징을 장마 후의 호우 특징과 비교하여, 호우예측과 진단에 활용할 수 있으리라 생각한다.

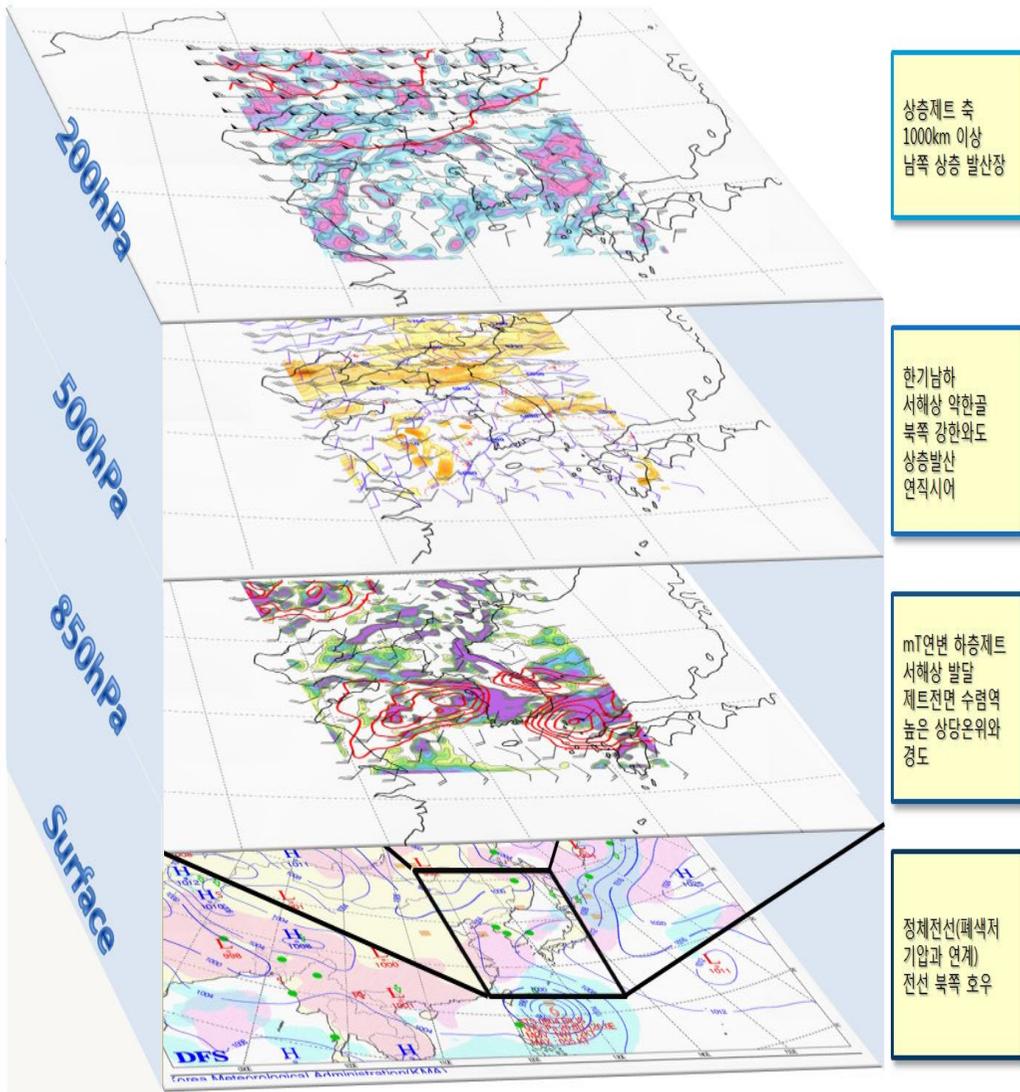


Fig. 21. Characteristic features of the heavy rainfall event at Goyang city occurred at 12 July 2006.

2. 장마 후 호우 사례분석

가. 호우 당일 강수현황

2010년 9월 21일 추석연휴 첫날, 서울과 인천 등 수도권 일대에 최고 300mm에 가까운 집중호우가 내렸다. 9월 강수로는 예전에 없는 기록적인 폭우로서 서울을 포함한 수도권 지역은 순식간에 물바다로 변하여 많은 피해를 가져왔다. 당시 서울 강서구 288mm, 마포구 275mm, 인천 공촌동 260mm에 달하는 집중호우가 쏟아졌다. 수치모델에 근거를 둔 당시 예보는 10mm정도의 보통 가을철 강수량을 예측하였으나 실제로는 30배에 달하는 예기치 못한 강수가 있었다. 이로 인해 9월 24일 기준으로 인명피해 2명, 7,859세대 19,479명의 이재민이 발생하였다(이윤영 등, 2010). 특히 서울에서는 우수 유입으로 인해 지하철 4개 노선 일부 구간이 침수되어 통제되는 등, 서울을 중심으로 피해가 심각하였다.

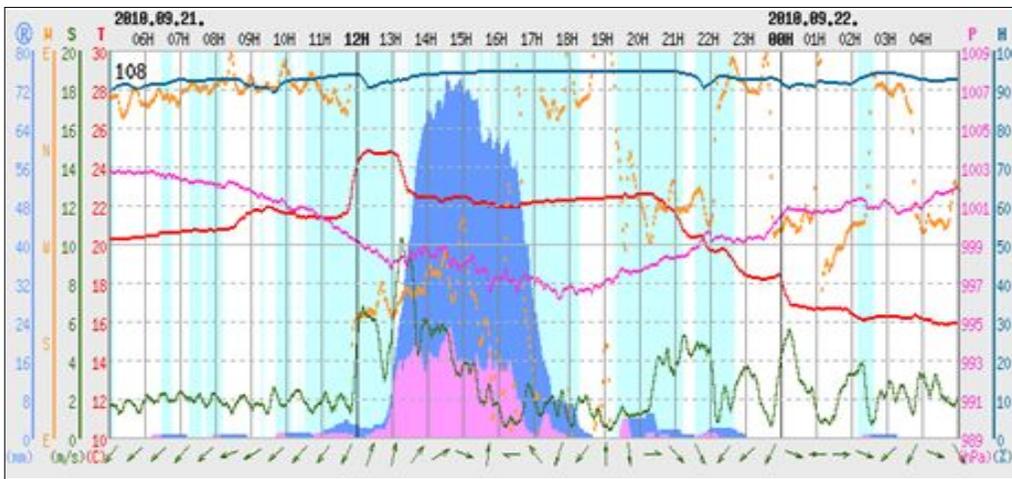


Fig. 22. Time-series of precipitation in Seoul on 21 September 2010 (station No. 47108).

Fig. 22는 당시 서울 송월동관측소의 시계열 강수량으로, 강수는 9월 20일 21UTC~21일 14UTC까지 있었다. 20일 21UTC에 시작된 강수는 21일 04UTC까지는 산발적으로 시간당 5mm 이하의 약한 강수형태를 보였다. 이후 21일 04UTC부터 급격히 강화되어 21일 04~09UTC사이에는 시간당 최대 강수 70mm가

넘는 기록적인 호우를 포함하여 강한 강수현상이 있었다. 특히 21일 05~ 08UTC의 3시간 사이에는 시간당 60~70mm이 넘는 폭우가 기록되었다. 이 비는 21일 10UTC에 1차로 잠시 꺾혔다가, 다시 산발적으로 14UTC까지 지속되었다. 당시 강수 에코는, Fig. 23에서 보듯이 21일 03UTC에 인천과 경기북부지방을 중심으로 북동~남서방향으로 누운 강한 에코밴드가 통과하기 시작해서 서울지방에 가장 강한 강수를 보인 21일 05~08UTC에는 강수에코가 동서로 누우면서 지속적인 그리고 매우 강한 강수가 있었다.

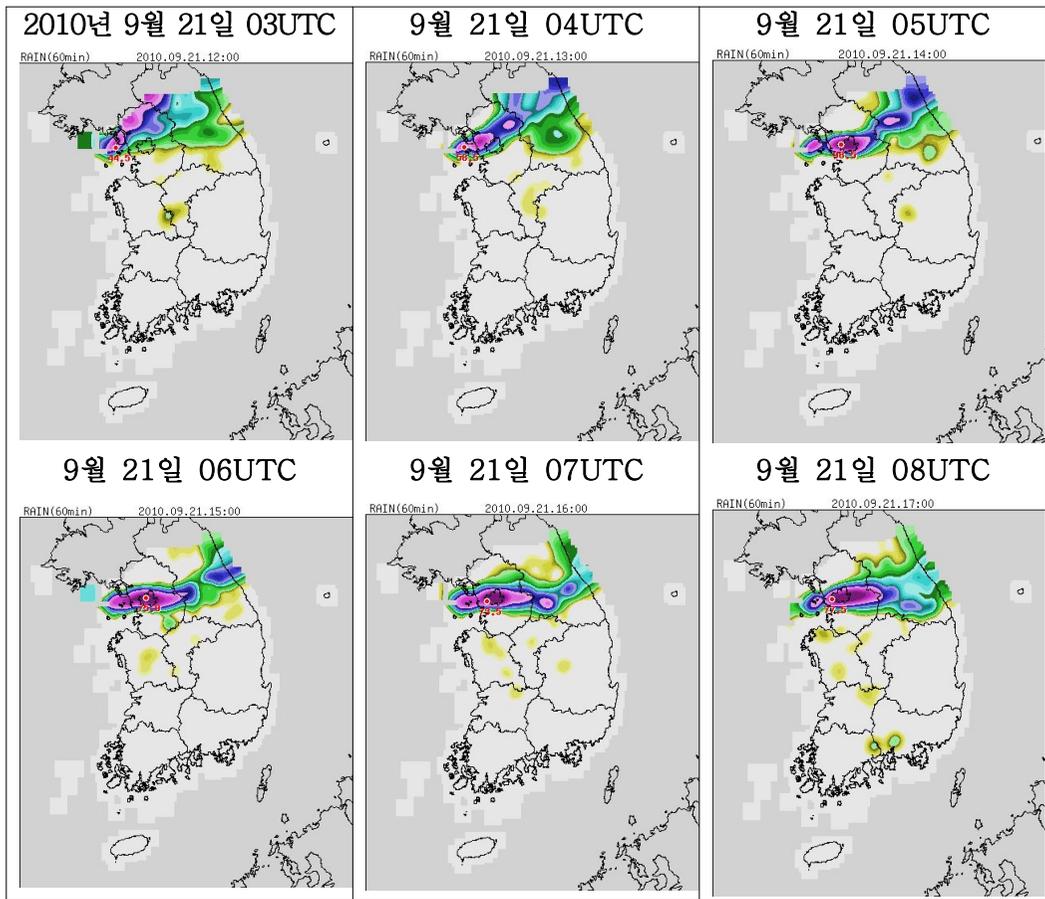


Fig. 23. Hourly-accumulated precipitation over the Korean peninsular observed by AWS from 03UTC to 08UTC 21 September 2010.

나. 종관환경

1) 위성영상 및 지상일기도

서울 호우 사례의 경우, 강수 최대시각은 21일 06UTC를 기점으로 2~3시간 동안이었다. 따라서 당시의 종관환경을 분석하기 위해, 최대 강수시각을 기점으로 3~6시간 간격으로 강수 이전과 강수시각 대의 위성사진과 지상일기도를 Fig. 24에 각 각 나타내었다. 그림의 위성사진에 의하면 한반도는 약 1000km의 폭을 가지고 비교적 동서(35~45°N, 110~140°E)로 길게 늘어진 준 정체전선의 영향권에 들어가 있다. 이 전선대는 위성사진 상 나뭇잎 모양의 형상으로 아직 파동 발달하지 않은 단계로서, 한반도 중·북부지방은 이 전선대 구름역의 남단에 속하고 있다. 일반적으로 이러한 정체전선의 남쪽부분은, 특히 해양성기단의 북쪽 연변과 충돌할 경우 불안정한 구역으로 위험기상이 발달하기 쉬운 종관적 환경을 갖는다. 하지만 20일 12UTC 위성사진(Fig. 24 a)에서 보듯이, 이 전선대는 전반적인 하층운의 형태로 한반도 중부지방에 해당되는 남쪽부분에도 불안정에 의한 대류운은 보이지 않고 있다. 그러나 21일 00UTC의 Fig. 24 c에서 보듯이, 3~4시간 전에 서해상에서 발생하기 시작한 대류운이 한반도 중부지방으로 동진하여 오면서 급격히 발달하는 모습을 보여주고 있다. 상기 위성사진과 일기도에 의하면 이 전선대의 낮은 하층운역은 당시 몽골 북서쪽에 중심을 1045hPa의 고기압이 한반도를 향해 남동쪽으로 장출하면서 생기는 경압불안정에 의한 것으로 분석된다. 이에 따라 한반도 북부지방과 한만 국경지방에는 하층운에 의한 광범위한 강수구역을 보였다. 20일 17UTC ~ 21일 03UTC까지의 시간당 5mm 미만의 약한 강수는 이러한 하층운역에 의한 약한 강수로 판단된다.

이처럼 약한 강수는 20일 18UTC 이후 대류운이 서해상에서 발달하여 점차 경기만 북부지방으로 진입하면서, carrot형 구름으로 발달, 형성되면서 왼쪽 끝을 강화부근에 중심을 두고 tapering화 한 21일 05~07UTC시 부근에 매우 강한 집중호우 현상을 수도권지역에 보였다. 21일 06UTC의 위성사진(Fig. 24 d)에는 대류운이 수도권지역상공에서 발달하고 있음을 보인다. 결국 강한 강수는 carrot형 구름의 시작 지점부근과, 확산부근에서 강함을 보임을 알 수 있다. 특히 21일 06UTC를 중심으로 중국남동내륙에 상륙한 태풍의 북동 영역으로 부터 수증기의 유입에 의한

일련의 대류운 발생과 연결되어, 서울지방을 중심으로 형성된 대류운에 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 당시 모델 예측장은 이러한 대류운의 발달을 예측치 못하고 층운에 의한 강수량만을 예측하여 결과적으로 강수량에 있어서 큰 오차를 보인 것으로 생각된다.

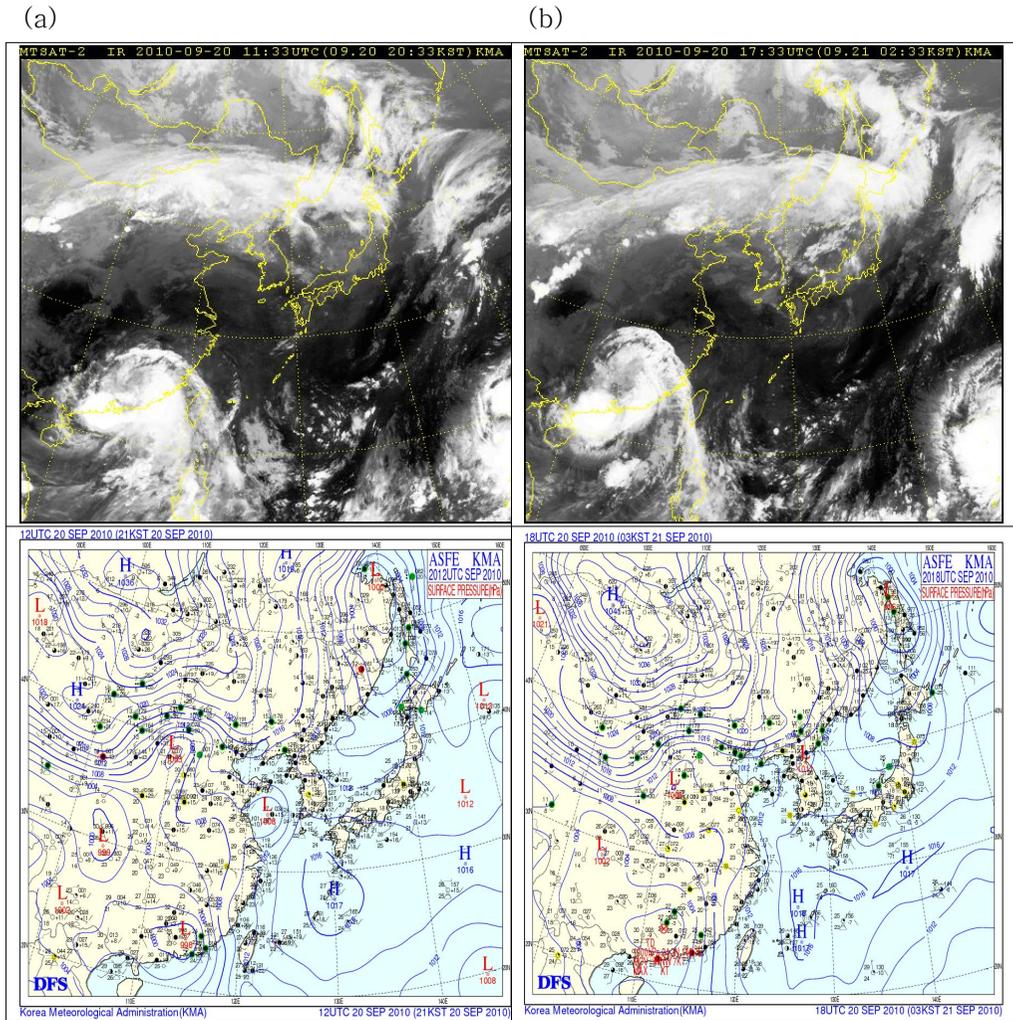
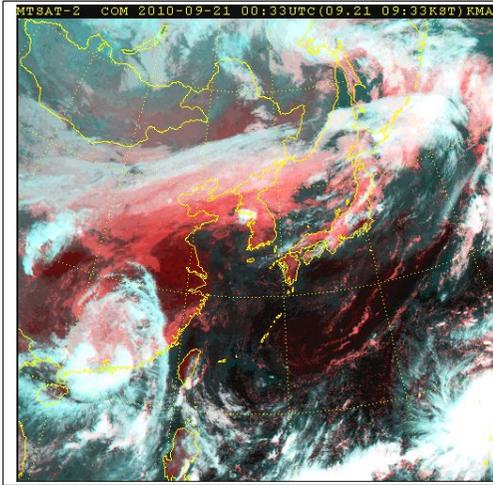


Fig. 24. Satellite images and surface weather charts for the heavy rainfall event in Seoul at (a) 12UTC 20 September, (b) 18UTC 20 September, (c) 00UTC and (d) 06UTC 21 September 2010.

(c)



(d)

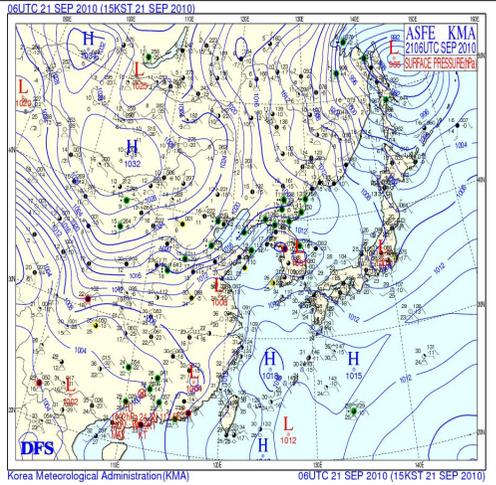
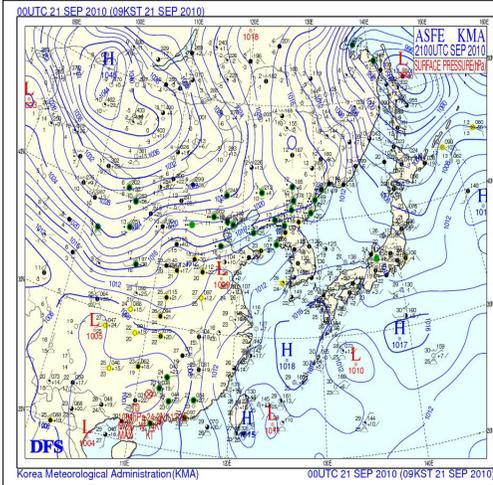
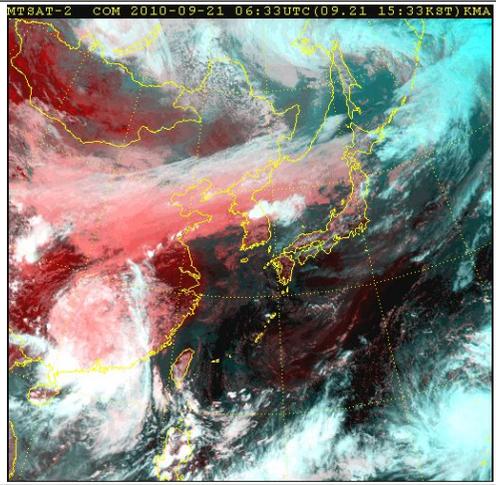


Fig. 24. Continued.

이러한 구름분포를 보인 지상기압계를 살펴보면, 한반도는 안장부에 속함을 알 수 있다. 즉, 북서쪽으로는 몽골 북서쪽에 중심을 둔 1034hPa의 고기압이 위치해 있고, 남동쪽으로는 1018hPa 북태평양 고기압의 연변에서 그 영향을 받고 있다. 북동쪽으로는 캄차카반도 부근에 중심을 둔 988hPa 폐색 저기압이 위치해 있고, 남서쪽에는 중국남동내륙에 상륙한 태풍이 위치한 가운데, 한반도는 그 가운데의 안장부상에 놓여 있다. 이러한 안장부는 기압의 골에 위치한 형태로서 여러 변형장을 유발하기 좋은 환경을 갖는다. 최대 강수를 보인 21일 06UTC의 종관 지상기압분포는 북태평양 고기압이 한반도 남부까지 진출하여 세력을 끼치는 가운데, 몽골 북서쪽 중심 고기압이 한반도를 향해 남동쪽으로 장출하면서 한반도북부지방에는 등온선과 등압선의 교차가 심한 경압불안정 상태를 보이고 있다. 이 경압역의 남단부분(한반도 중부지방)에서는 불안정이 가속되고 있는 환경이다.

2) 대기하층의 수증기 분포와 하층제트

2010년 9.21일 당시 서울을 포함한 수도권지역의 집중호우는 최대 강수시각이 21일 06UTC를 전후로 이루어졌다. 따라서 종관장 분석을 위해서는 이 시각대의 상층자료를 분석해야 하는데, 실제 전 지구적 관측은 하루에 2번 즉 00UTC와 12UTC에 이루어져 최대 강수시각대의 자료를 얻을 수 없다. 따라서 본 사례연구에서는 최대 강수시각대의 동아시아 종관환경 분석을 위해서, 부득이 강수시각 이전인 20일 12UTC와 21일 00UTC, 그리고 강수 이후인 21일 12UTC의 850hPa 상층일기도를 활용하여 종관적 환경의 변화 추이를 분석하고, 그 사이에는 KLPAS의 21일 00, 03, 06UTC의 한반도 상공 주변장을 분석함으로써 자세한 분석이 이루어지도록 하였다.

Fig. 25 b의 850hPa 일기도(21일 00UTC)를 보면, 한만국경을 포함한 40°N 부근에는 몽골 북서쪽에 중심을 둔 고기압에서 장출하는 대륙성 고기압의 영향으로 등온선이 조밀하고, 등압선과 이루는 교차각이 큰 경압역이 형성되어 있다. 등온선은 40°N를 기준으로 약 300~400km내에 3~12°C선이 밀집해 있어 강한 기온경도를 보이며, 등압선과의 교차는 거의 90도에 이른다. 이러한 경압역은 남쪽의 북태평양 고기압과 마주쳐서 한반도 중부지방은 그 경계역에 이르고 있다. 즉, 앞에서 기술한 장마기의 고양시 경우와는 달리, 이 당시 종관적 환경은 장마 후에 북쪽 고압대의

장출로 인해 경압불안정을 이루면서, 한반도까지 올라 온 북태평양 고압대의 연변을 따른 난기의 이류, 특히 중국 남동부에 상륙한 태풍의 북동전면에서 북태평양 고압대의 연변을 따른 수증기의 유입과 결합되어 불안정이 더욱 가속된 것으로 분석된다.

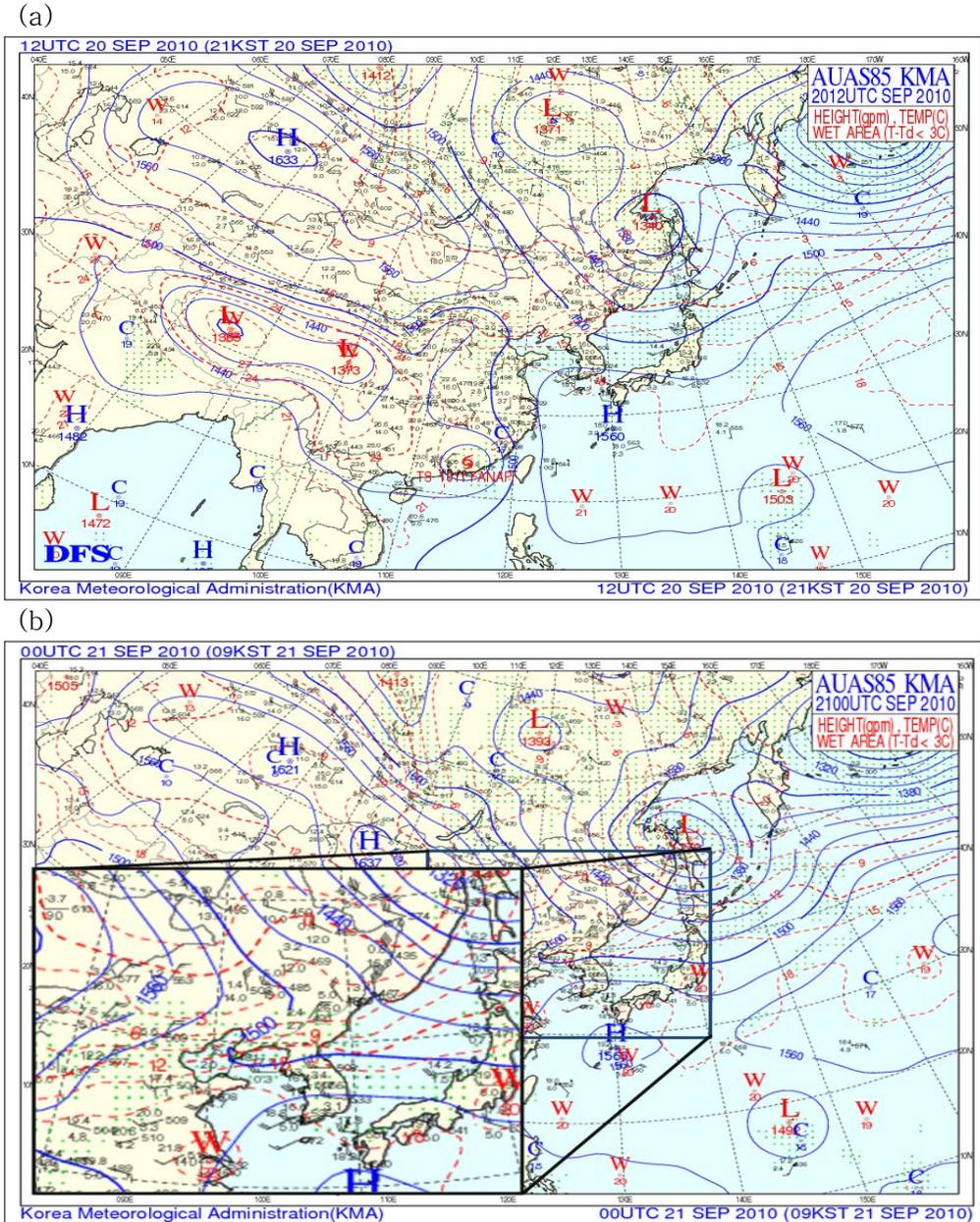


Fig. 25. 850hPa geopotential height(solid line) and temperature(dashed line) at (a) 12UTC 20 September, (b) 00UTC and (c) 12UTC 21 September 2010.

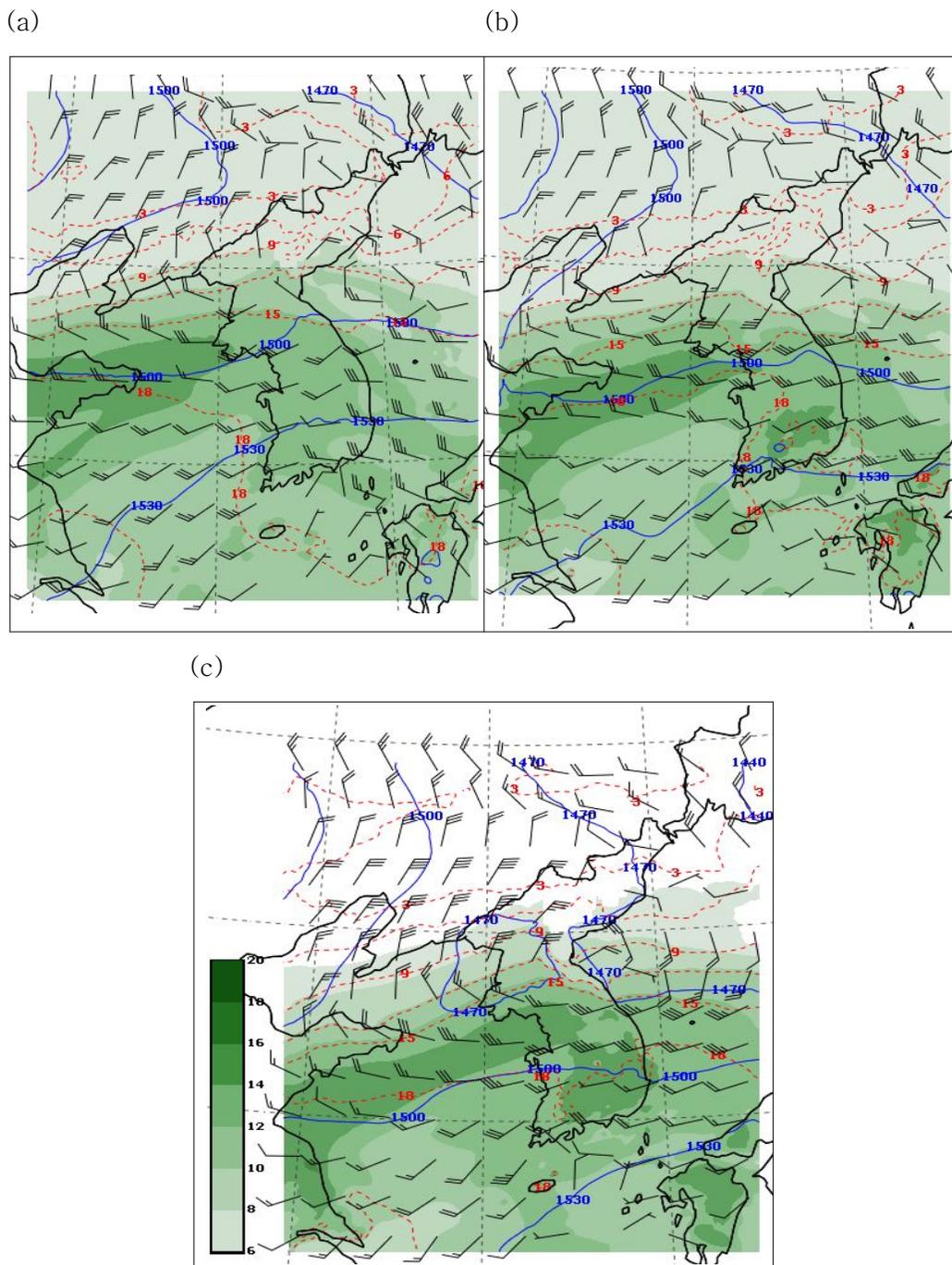


Fig. 26. 850hPa geopotential height(solid line), temperature(dot line), wind(vector arrow) and mixing ratio fields(shaded area) at (a) 00UTC, (b) 03UTC, and (c) 06UTC 21 September 2010.

하층제트와 관련하여 바람장을 분석해 보면, 당시 호우역에 해당하는 한반도 중북부지역을 향한 하층의 강한 바람은 북태평양 고기압 연변을 따른 남서류에 의한 것으로 보기 보다는 원산만 중심 저기압성 순환과 연계된 바람으로 판단된다. 서해안과 내륙지방에는 서북서~서~서남서 30~35kts에 달하는 서풍계열의 강한 바람이 증폭되고 있음을 볼 수 있다. 그러나 이 바람은 고양시 호우사례의 40~45kts 만큼 강하지 않다. 이러한 현상은 Fig. 27의 850hPa 유선도를 보면 뚜렷이 알 수 있다. 전반적인 강한 바람은 저기압성 순환을 중심으로 발해만 부근과 한반도 중부지방 관통하여 형성되어 있다. 하층제트라 하면 적어도 수 백km 이상의 수평 규모를 갖고 지속적으로 부는 바람으로 정의한 선행 연구(Chen and Yu, 1988; 황승언과 이동규, 1993)에 비추어, 장마후의 서울시 호우 사례는 장마전의 고양시 사례에서 보여준 하층제트의 패턴과는 다른 하층 흐름을 보여준다. 이러한 차이는 Fig. 28의 수분속 패턴에서도 나타난다. 하층 강한 바람의 발생과 흐름이 저기압성 회전을 중심으로 이루어져 있다. 이처럼 규모가 큰 중관규모적 하층제트와 다른 형태의 하층의 강한 흐름은 강한 중규모 대류시스템(MCC)와 연계되어 존재하는 경우가 있음을 Chen *et al.*(1998)은 대만해협의 메이유에 대한 수치실험을 통해 보인 바 있다. 수렴역의 형성도 Fig. 29에서 나타나듯이 고양시 사례와 다른, 하층의 강한 바람역 내부에서 발생하고 있다. 즉, 25kts가 넘는 하층의 강한 바람이 이미 서해상과 중부지방을 지나 동해까지 부는 가운데, 수렴역이 이 강풍역의 전면이 아니라 내부에 폭넓게 형성되어 있다. 따라서 이러한 차이는 하층제트와 연계하여 호우역의 위치를 예측하는데 어려움을 주리라고 생각된다.

Fig. 30은 서울시 호우 당시 상당온위의 수평적 분포이다. 333K를 넘는 고온 습윤한 공기가 한반도 중북부지방까지 올라와 있다. 계절적으로 9월 하순 초에 해당함에도 상당히 높은 상당온위의 공기괴에 덮혀 있다. 특히 경기북부지방에는 높은 상당온위 경도를 보이고 있고, 서해상에서는 345K의 강한 고온습윤공기가 내륙을 향해 세력을 뻗히고 있다. 이러한 상태는 고양시 사례와 같이 매우 불안정한 중관적 대기환경을 조성한다고 판단되며, 다른 호우요인이 첨가된다면 보다 쉽게 호우유발 구름역이 발달할 가능성을 갖고 있다고 생각된다.

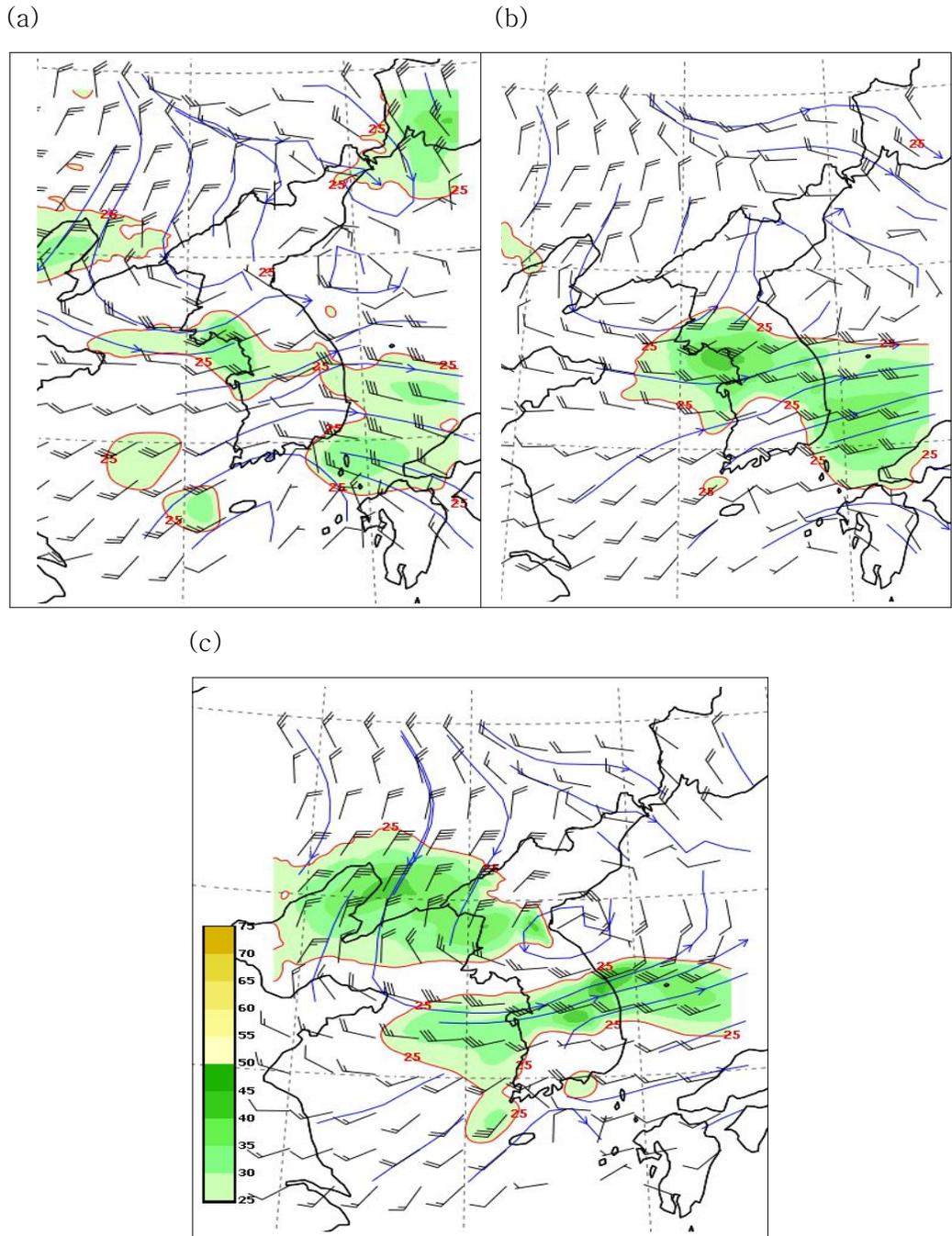


Fig. 27. Same as Fig. 26. but for 850hPa stream lines and strong wind fields over 25kts(shaded area).

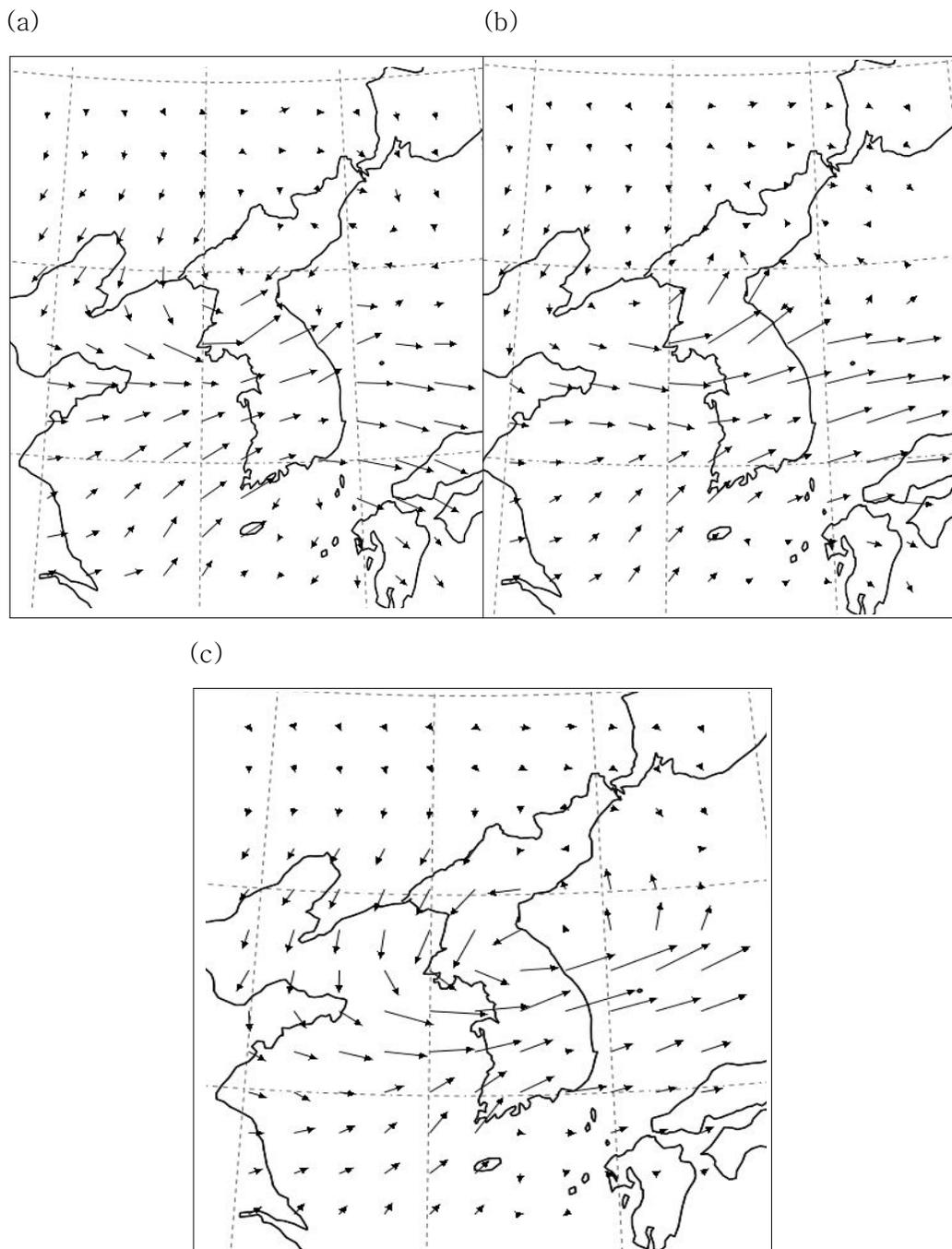


Fig. 28. Same as Fig. 26. but for 850hPa moisture flux(vector arrow).

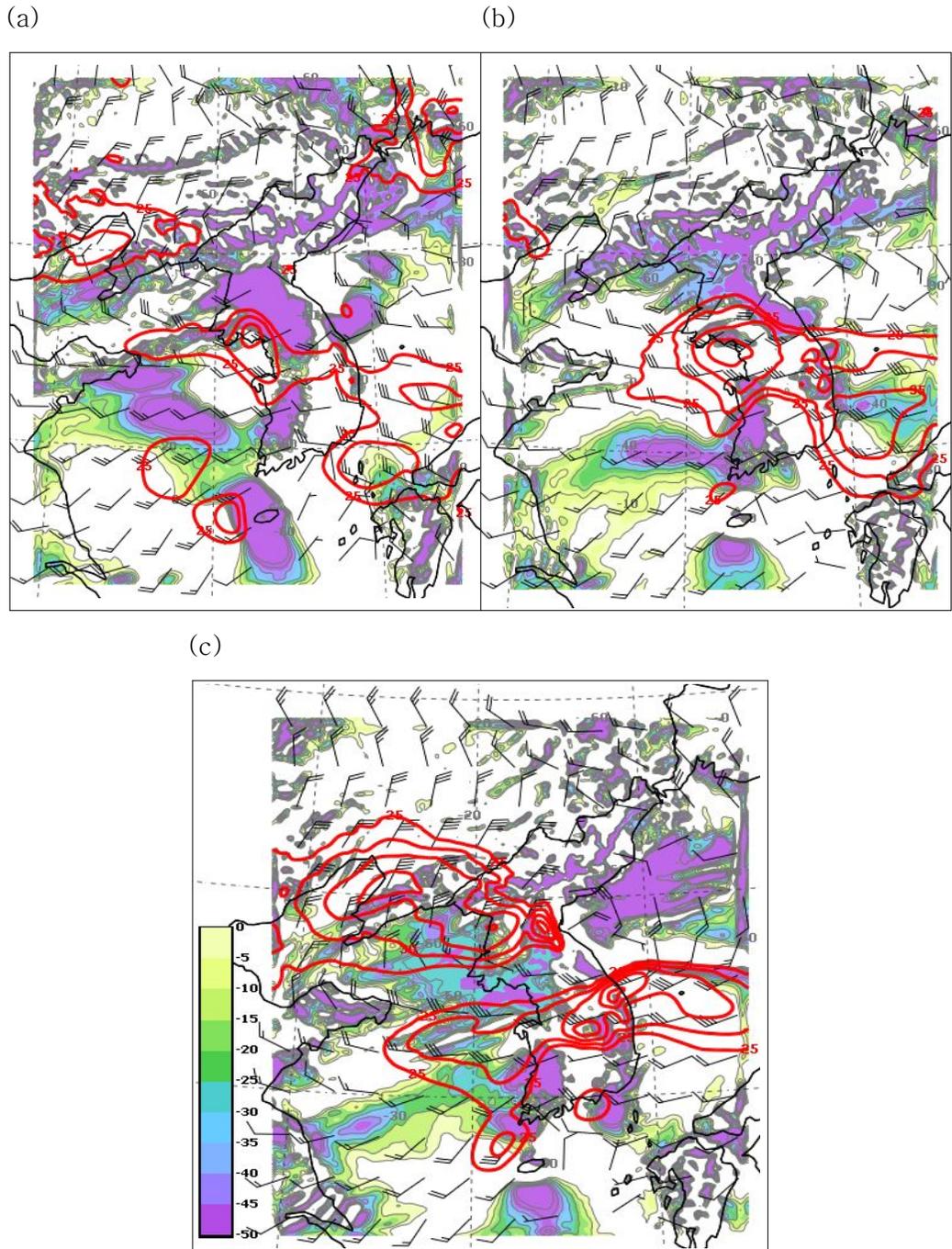
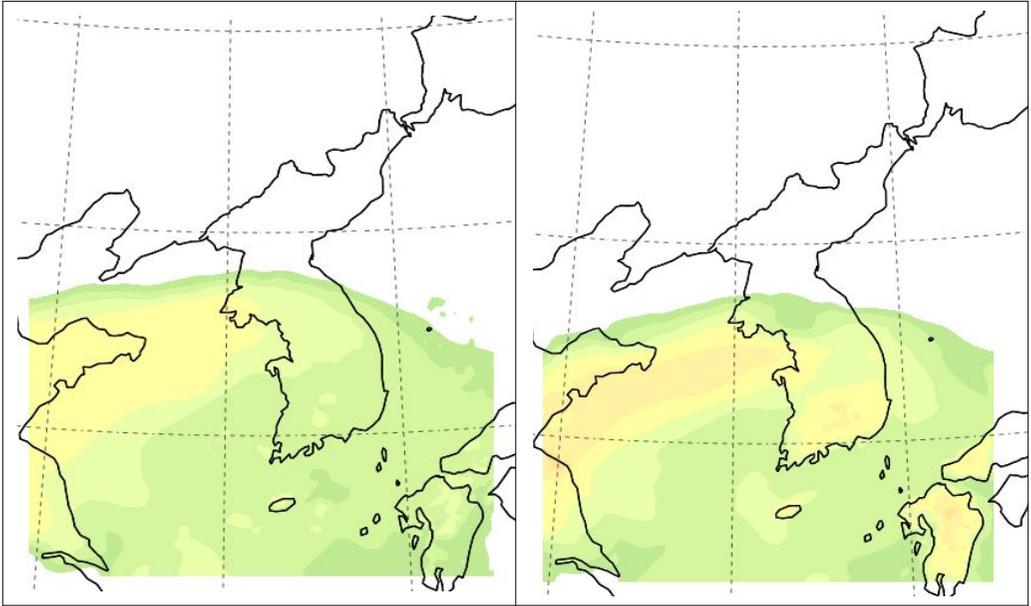


Fig. 29. Same as Fig. 26. but for 850hPa divergence (green area) and convergence (violet area) and strong winds fields (red line).

(a)

(b)



(c)

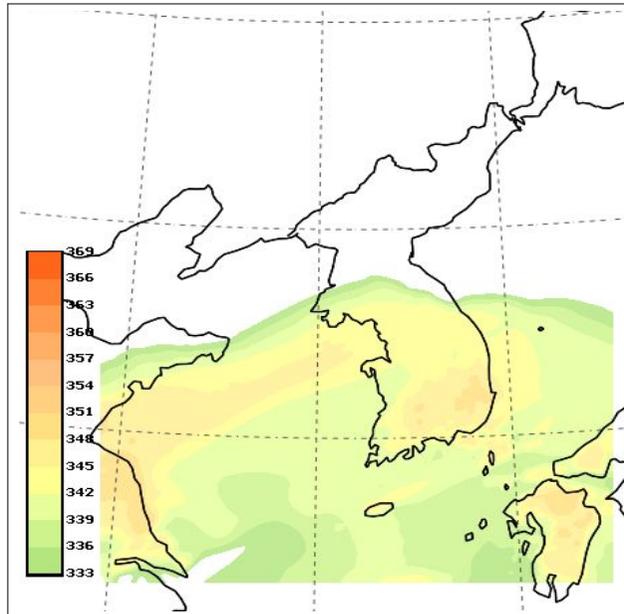


Fig. 30. Same as Fig. 26. but for 850hPa equivalent potential temperature.

3) 대기 중하부권 기온과 상승류

Fig. 31은 700hPa의 고도와 기온, 그리고 연직상승류의 수평분포를 나타낸다. 기온경도가 강하고 등고선과의 교차각이 큰 경압역은 700hPa에서도 뚜렷이 보인다. 한만국경을 포함하여 한반도 북부지방까지 이러한 경압역이 점차 내려오고 있고, 호우구역은 강한 경압역의 남쪽하단인 한반도 중북부지방에 형성되었음을 알 수 있다. 바람은 한반도 남부지방에서는 북태평양 고기압 연변을 따른 남서기류, 중북부지방은 서풍계열 바람 30~40kts로 850hPa에 비해 다소 증가하고 있는 환경이다. 이는 고양시 사례와는 다른 점으로, 고양시 호우의 경우 850hPa에서 최대풍 45kts에 달하는 강한 하층제트가 호우지역에 형성되어 있었다. 다만 상승류의 수평적 분포는 고양의 경우와 같이 종관적으로 그다지 강한 상승류 구역이 없이 평이한 상황이다. 지난 6시간이내에 수평적으로 상승류는 700hPa에서 큰 증강이 없었다. 따라서 당시 호우역에서 발생한 강한 상승류는 중간규모적으로 발생하였을 것으로 사료된다.

4) 대기 중층의 종관적 환경

Fig. 32는 500hPa의 고도, 기온, 상대와도와 바람분포를 나타낸다. 5820gpm선은 점차 남하하여 호우 시각 당시인 9월 21일 06UTC (Fig. 32, c)에는 황해도 부근까지 내려와 있다. 백령도 부근을 중심으로 서해상에는 약한 기압골이 형성되어 있으나 다소 zonal한 상태이며 한반도 중북부지방은 그 전면에 놓여 있다. 강한 와도역은 호우시각 전인 21일 03UTC (Fig. 32 b)에는 중부내륙지방에 형성되어 있다가 호우시에는 해소되어 강한 와도역이 보이지는 않는다. 따라서 그다지 심한 강수 현상이 예견되기에는 쉽지 않은 종관적 환경이다. 그러나, 강한 경압역이 한만국경부근의 상층에 계속 형성된 가운데, 영하 3℃의 상층 한기가 남부지방까지 내려와 있어 남쪽에서 올라온 더운 공기와 충돌하여 불안정을 유발하여 위험기상을 초래할 충분한 종관적 환경을 보인다고 생각된다.

바람은 호우역 부근에서 50kts 정도로 동서 zonal한 상태이다. 수평시어가 별로 형성되어 있지 않은 종관환경으로, 호우시 서해상보다 호우지역인 경기북부지방에서 풍속이 다소 낮게 나타나고 있고, 이러한 감속현상은 남부지방으로 내려갈수록

크게 나타나고 있다. 따라서 전반적으로 대기 중층에서 호우의 특성을 수평바람 분포에서 찾아보기는 쉽지 않다. 다만 뒤에 보이겠지만(Fig. 34 참조), 이러한 구조임에도 불구하고 지상과의 바람이 40도 이상 순전(veering)하는 연직시어가 존재하여 불안정의 요인을 다른 각도에서 함유하고 있음을 알 수 있다.

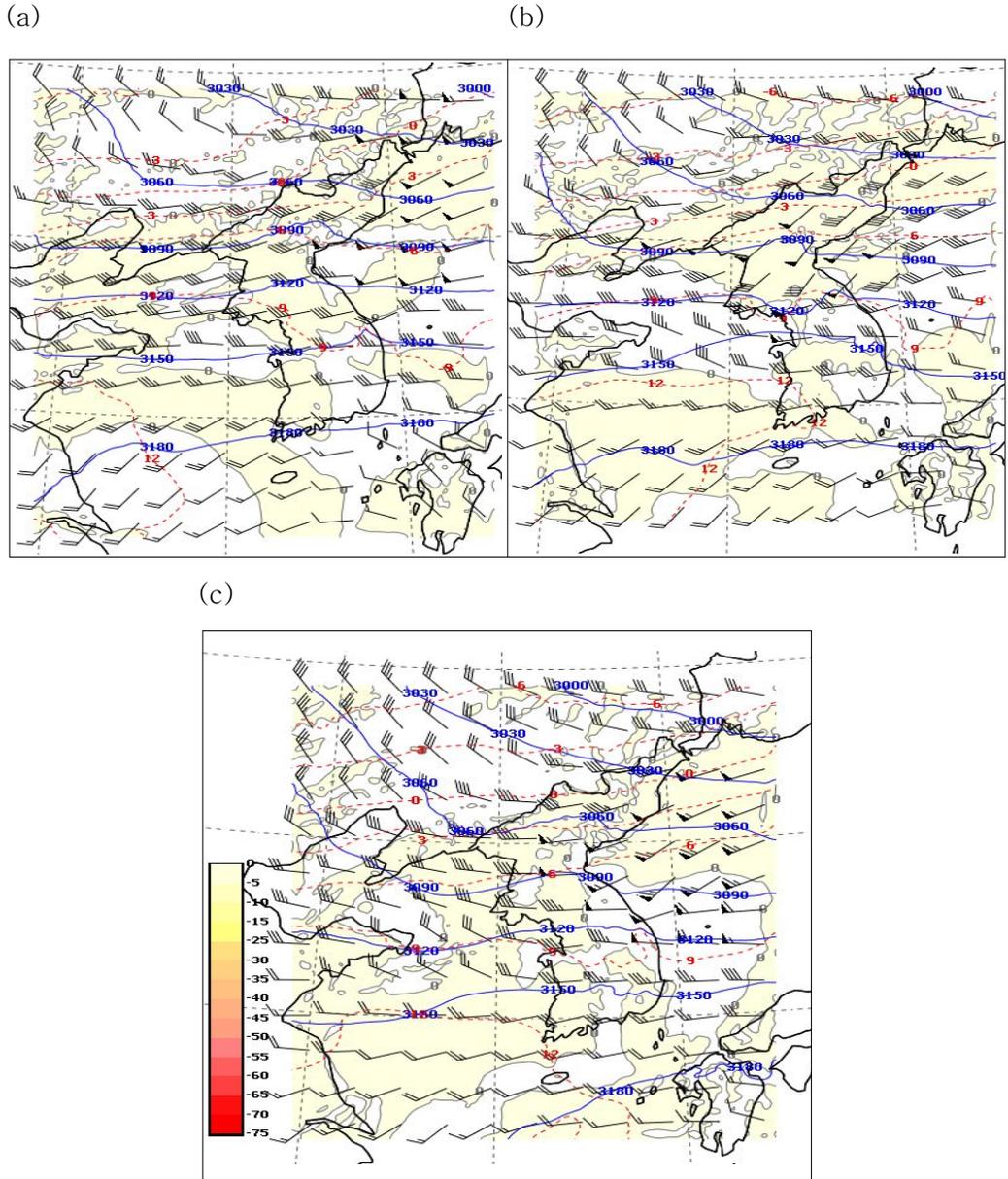


Fig. 31. Same as Fig. 26. but for 700hPa geopotential height(blue line), temperature (red-dot line), wind(vector arrow) and ascending air flows(yellow area).

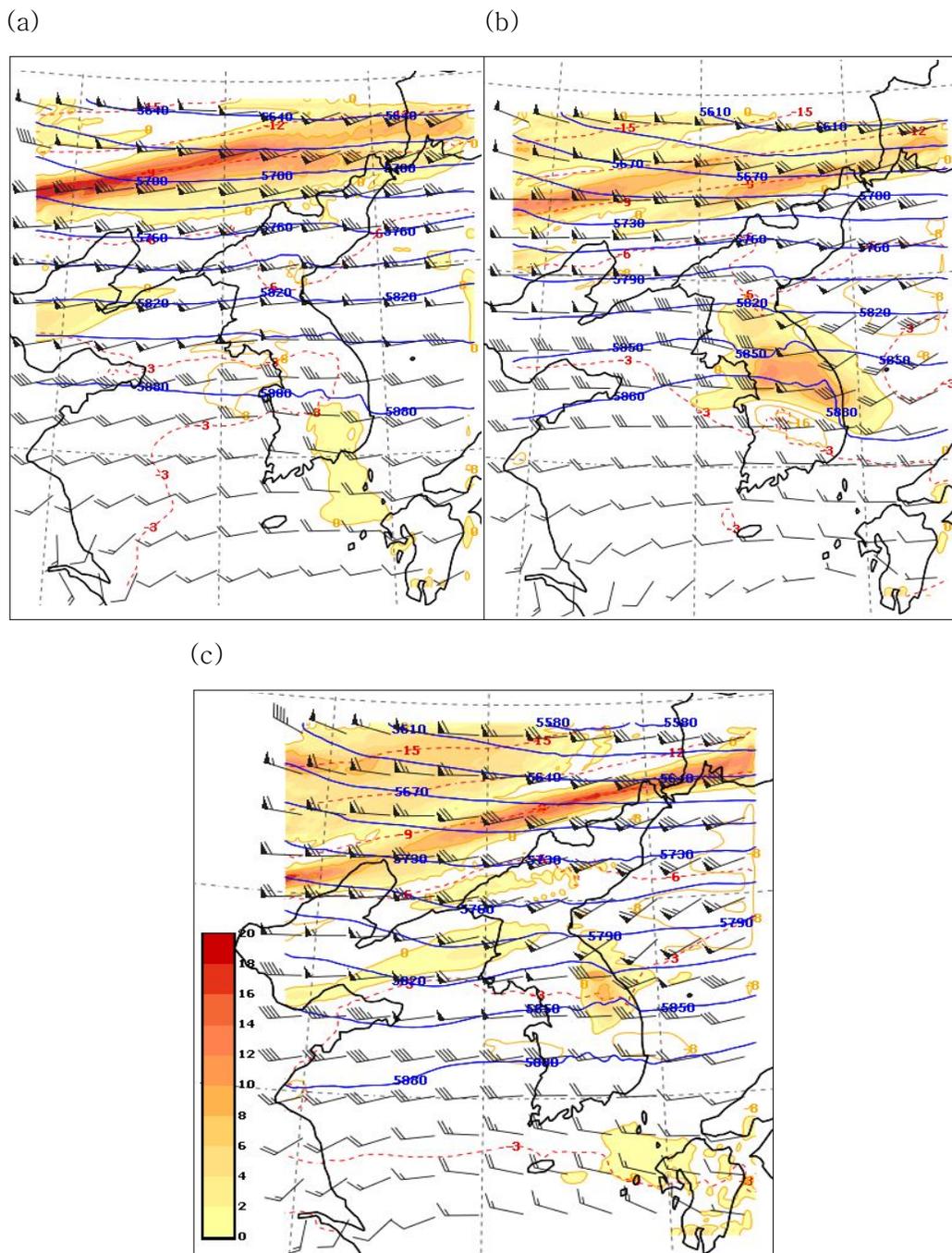


Fig. 32. Same as Fig. 26. but for 500hPa geopotential height(blue line) temperature(red-dot line), wind(vector arrow) and relative vorticity (yellow and red area).

5) 대기 상부와 상층제트

Fig. 33은 200hPa의 바람과 상층발산장이다. 상층제트 streak는 한반도 북부지방에서 다소 떨어진 45~50°N 정도에서 형성되어 중국 북동부지방을 지나고 있다. 다만, 상층제트의 남쪽에서, 즉 제트축과는 약 1000km 정도 떨어진 한반도 중북부 지방 상공에 상층발산이 형성되어 있다. 이는 고양시 호우 사례와 비슷하여 상층제트가 다소 우리나라에서 북편하여 지나고 있는 환경에서 호우지역부근에는 상층발산이 존재한다는 것이다. 호우시각 당시인 Fig. 33, c에서 보듯이 한반도 북부지방은 서~서남서류, 호우지역 부근에서는 서풍계의 바람으로, 수평 시어적으로 약한 ($5 \text{ e}^{-5}/\text{s}$) 상층발산 환경을 보이고 있다. 지금까지 상층제트와 하층제트가 교차하거나 그에 가까운 지역에서 집중호우가 발생할 가능성이 높다는 것과는 다소 다른 2차 순환구조를 즉, 약한 상층 바람 구조하에 하층제트로 인한 하층 습윤공기가 상층제트의 축에서 수 백 km 이상 떨어진 상층 발산역에 의해 상승할 수 있음을 보여주는 구조로서 이는 향후 호우 진단시에 충분히 고려되어야 할 요인이라고 판단된다.

6) 바람의 연직시어와 기타 불안정 요인 들

Fig. 34는 지상과 500hPa의 바람장, 850hPa와 200hPa의 바람장을 한 지점에 대해 같이 표시한 상하층간의 바람이다. 지상과 500hPa의 경우 서울을 중심으로 한 호우지역 상공에서 상하층간의 풍향과 풍속의 연직시어가 약 40도 정도로 가장 큰 것으로 나타나고 있다. 그러나 850hPa와 200hPa의 경우 호우지역에서의 연직시어는 큰 각을 이루고 있지는 않지만, 한반도 북부지방에서의 연직시어가 반전(backing)함에 비해, 호우지역에서는 순전(veering)하고 있어, 상대적인 불안정의 요인을 갖추고 있다고 판단된다. 보조일기도인 Fig. 35의 지상바람벡터는 21일 00UTC에 황해도 지방을 중심으로 저기압성 회전을 형성하고 있음을 보인다. 이 저기압성 회전역은 점차 남하하여, 강수 최성기인 21일 06UTC에는 서해상에서 경기북부까지 풍향의 급변역 (북동풍과 남서풍이 만나는 지역)이 형성되어 남쪽의 더운 공기가 위로 상승하는 충분한 환경을 만든다. 이러한 풍향의 급변지역을 참고하여 호우 유발환경을 예측 할 수 있을 것으로 사료된다. 불안정지수를 나타내는 Fig. 36에서 고양시 호우사례와 같이 전반적으로 주변 환경이 심한 불안정지수를

보이고 있지는 않지만, 호우구역에서는 K-Index 40 이상, 쇼윌터지수 -2 정도의 대기불안정 환경을 잘 보여준다. 이는 700hPa와 500hPa의 기온분포에서 보듯이, 한반도 북부지방에서 강한 기온경도를 보이는 가운데, 북쪽으로부터 찬공기가 내려 오고, 남부내륙에 형성된 더운 공기괴가 남서풍을 타고 올라와 중부지방에서 강한 불안정 요인을 생성하고 있기 때문 인 것으로 사료된다.

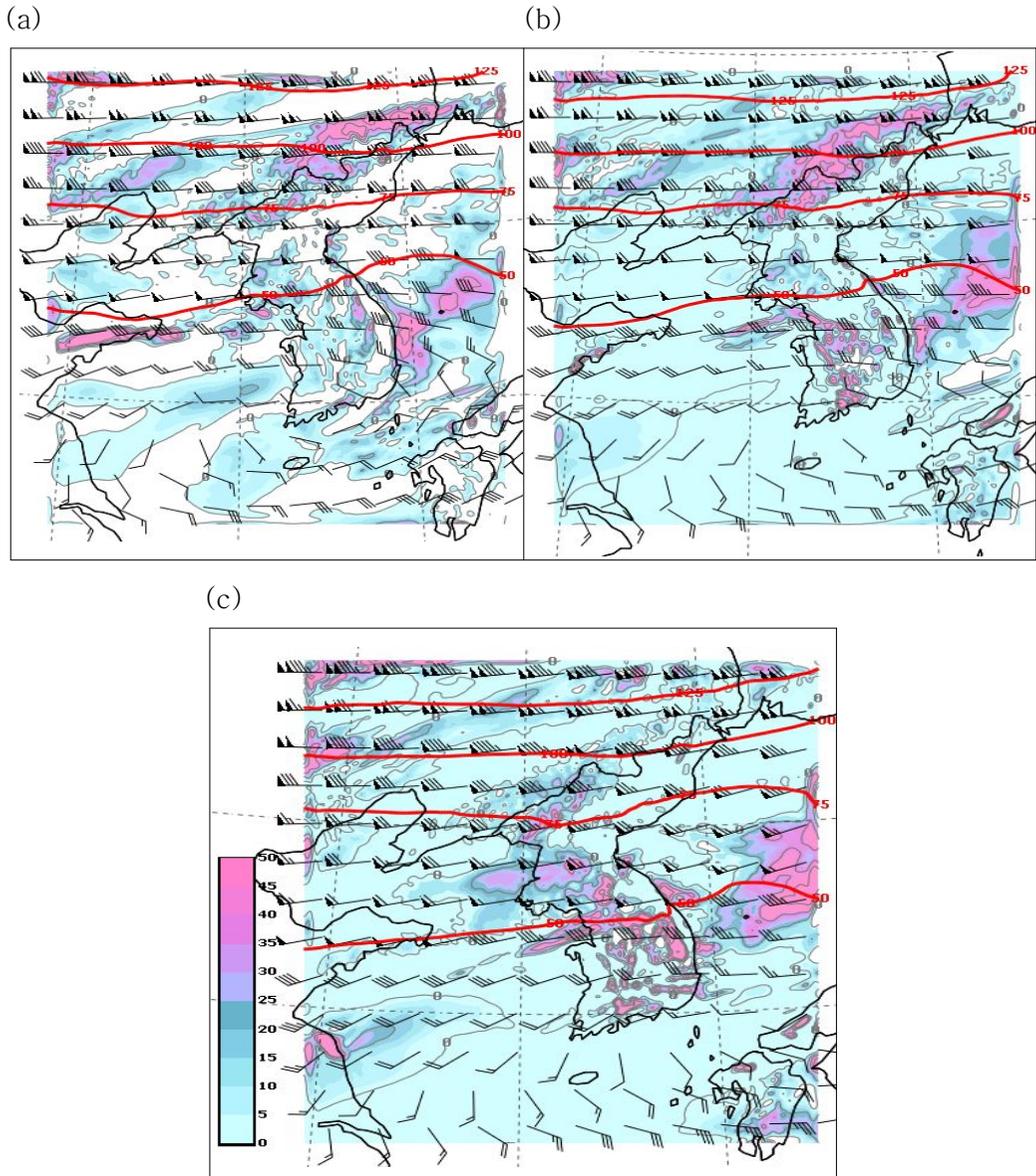
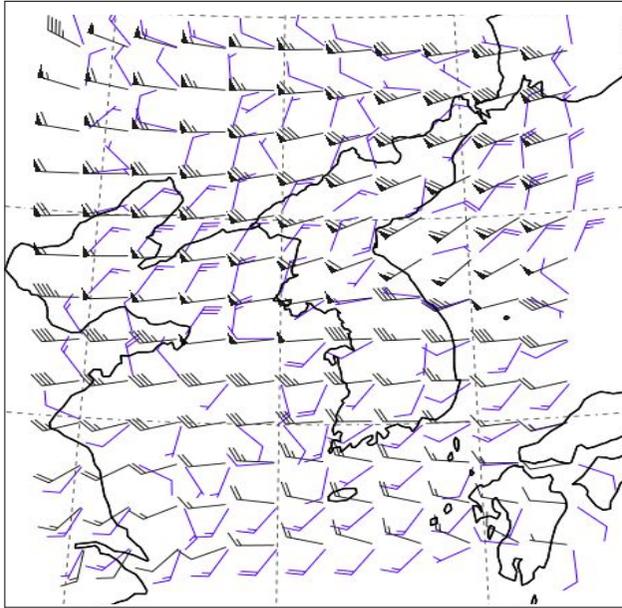


Fig. 33. Same as Fig. 26. but for 200hPa wind(vector arrow) and divergence fields(violet area).

(a)



(b)

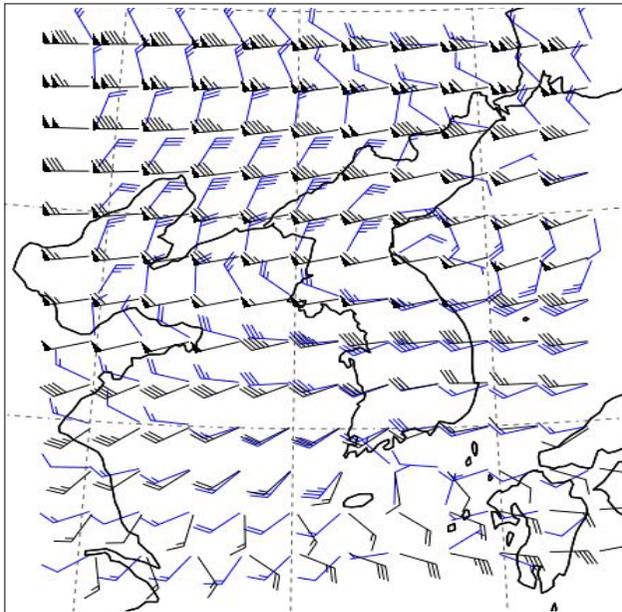


Fig. 34. Vertical wind shear between (a) surface(blue) and 500hPa(black) and (b) 850hPa(blue) and 200hPa(black) at 06UTC 21 September 2010.

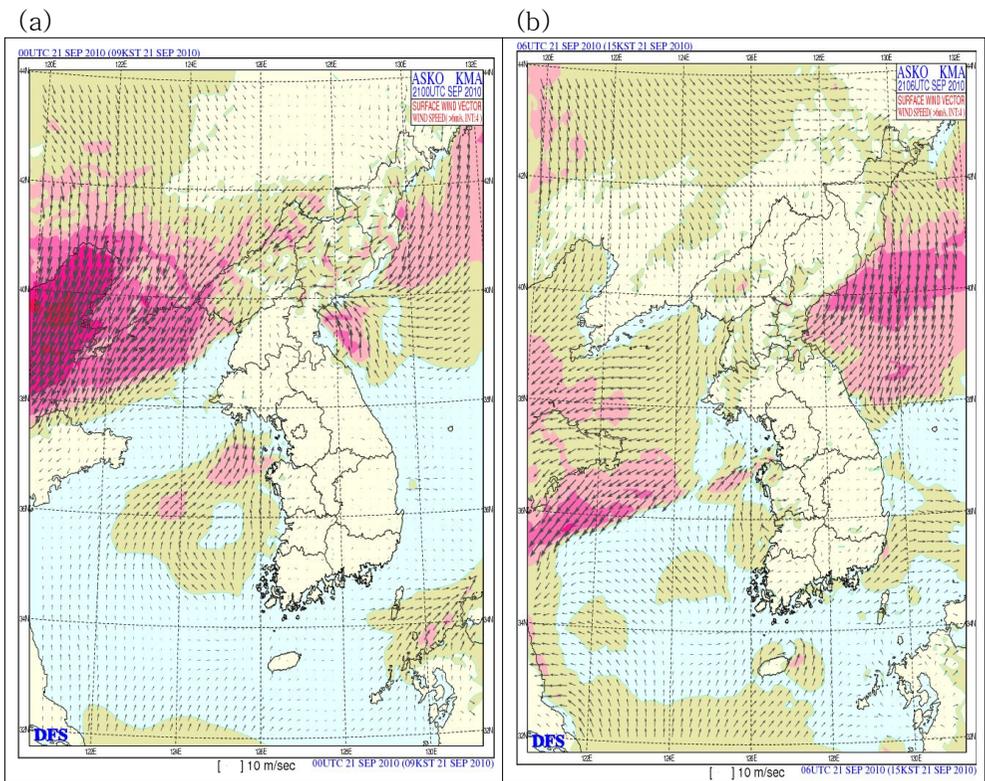
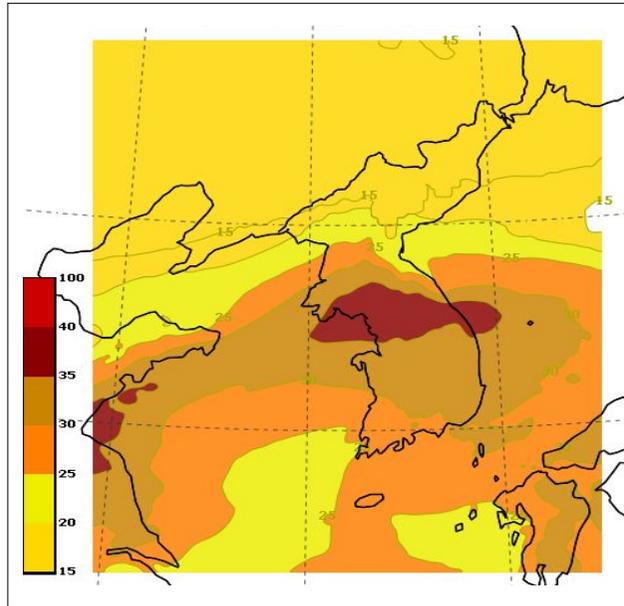


Fig. 35. Surface wind vector at (a) 00UTC and (b) 06UTC 21 September 2010.

(a)



(b)

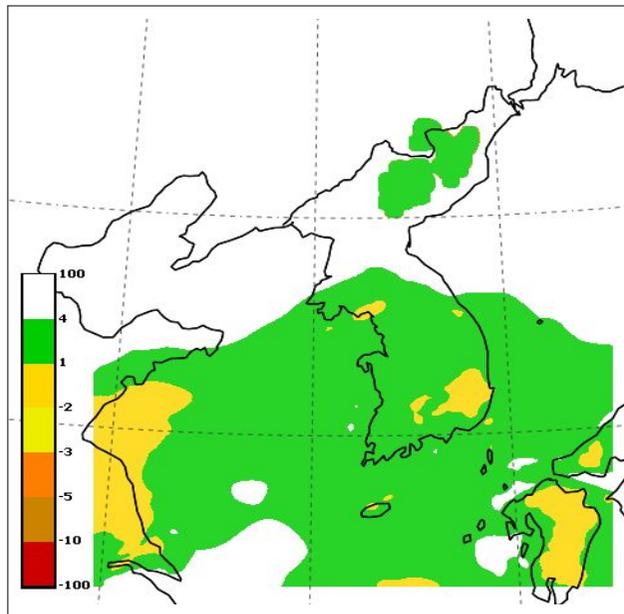


Fig. 36. Atmospheric instability at 06UTC 21 September 2010, (a) K-Index and (b) Showalter Index.

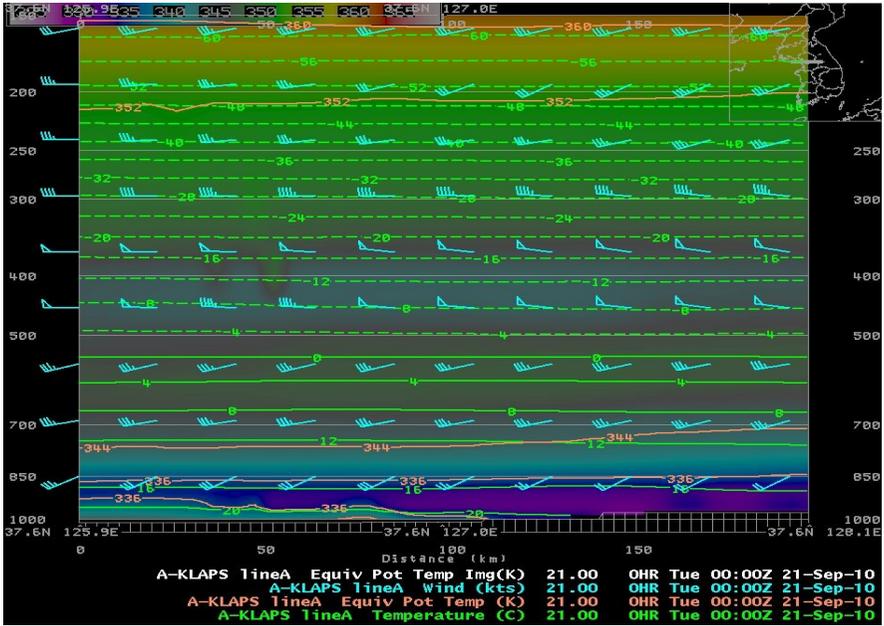
다. 중규모 연직구조

1) 대류불안정 분석

장마 후 서울을 중심으로 한 수도권 지역 호우사례의 중규모적 특성을 분석하기 위해 서울지역 상공의 동서 연직단면(37.6°N, 125.9°E ~ 37.6°N, 128.1°E)을 조사하였다. Fig. 37은 강수가 시작되기 전인 9월 21일 00UTC에서 강수 최대 시각인 21일 06UTC까지 3시간 간격의 상당온위, 온도 및 바람장의 연직단면도이다. 단면도의 중심부분이 서울시 상공을 뜻한다.

강수 시작 전 그림(Fig. 37 a)를 보면, 강수시작 전 대기는 비교적 상층으로 갈수록 상당온위가 증가하며, 그 경도도 완만한 안정적인 구조를 띠고 있다. 지상에는 336K에 달하는 고온 습윤한 공기가 덮고 있고, 600hPa이하의 대기 하층에서는 남서류가, 그 이상의 상층에서는 300hPa까지 북서풍계의 바람이 불고 있다. 점차 지속적으로 하층에서 더운 공기가 유입됨을 알 수 있다. 따라서 강수시작 직전인 03UTC(Fig. 37 b)에는 하층대기가 점차 더워져 지상에도 344K의 공기로 덮혀 있다. 하층의 바람도 다소 강해졌으며 남서류는 500hPa를 넘는 층까지 두꺼워졌다. 이러한 대기 구조는 강수 최성기(9월 21일 05~07UTC)중 가장 최대값을 보인 21일 06UTC(Fig. 37 c)에는 대기 하층이 불안정한 상태로 변하고 있음을 보여 준다. 344K의 습윤공기가 750hPa까지 상공에까지 두껍게 덮고 있어 기층이 상당히 고온 습윤한 공기로 이루어져 있으나, 그 하층의 900~850hPa사이에 상대적으로 차가운 공기가 유입되고 있어 불안정한 하층구조를 나타낸다. 특히 서울시 상공 600hPa부근에 344K의 다소 차가운 공기의 pool이 있음을 볼 수 있다. 이 역시 고양시 호우 사례와 같이, 대기 중층에 존재하는 한냉 공기로서 지상에서 대기 중층으로 올라가면서 상당온위가 감소하는 불안정한 구조를 갖게 한다. 즉, 지상을 포함한 대기 하층에 더운공기, 상층으로 가면서 찬공기의 구조로 대류불안정이 이루어지는 중요한 역할을 한다. 강수가 종료된 09UTC 이후(Fig. 38)에는 고양시 호우사례와 동일하게 이 한냉풀이 사라져 다시 연직적으로 평이한 상당온위의 연직구조포를 갖게 된다.

(a)



(b)

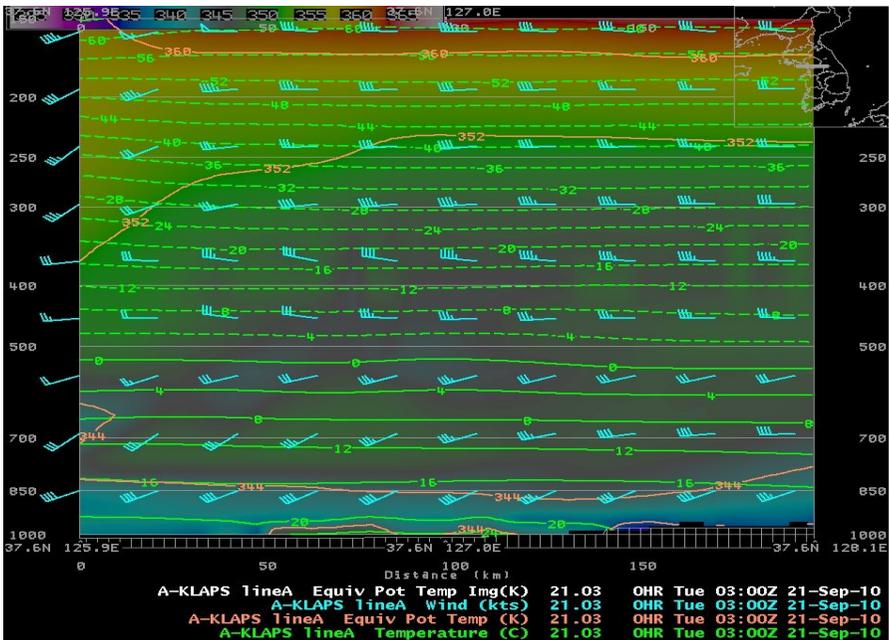


Fig. 37. Cross-section of equivalent potential temperature (color images and purple line), temperature (green line) and wind (vector arrow) over Seoul at (a) 00UTC, (b) 03UTC, and (c) 06UTC 21 September 2010.

(c)

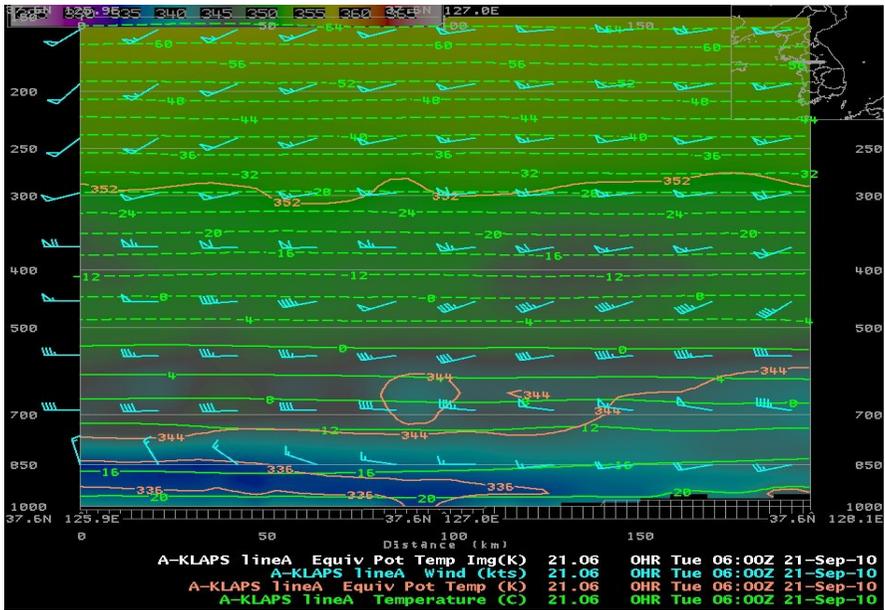
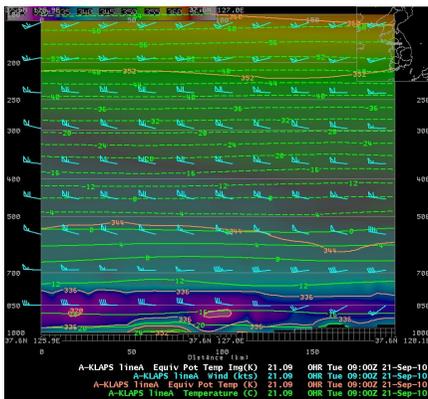


Fig. 37. Continued.

(a)



(b)

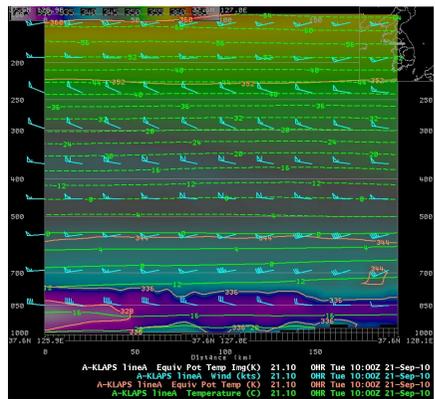


Fig. 38. Same as Fig. 37. but for at (a) 09UTC and (b) 10UTC 21 September 2010.

2) 연직상승류 및 수렴발산

Fig. 39는 9월 21일 00~06UTC 서울시 상공의 연직상승류 및 수렴발산장의 분포를 나타낸다. 강수시작 전(Fig. 39 a) 지표부근에 하강기류가 다소 존재하나 서울시 상공의 대기 전체는 전반적으로 상승기류(붉은 색 계열 구역)가 지배한다. 이는 고양시 호우사례와 유사하여, 이러한 강수시작 전부터의 상승류 증가경향과 형태는 호우예측의 선행현상으로 보기에 좋은 지표가 될 것으로 판단된다.

이후 강수가 시작되기 직전인 03UTC(Fig. 39 b)에는 그 상승류 규모가 감소되었으나, 강수 최성기인 06UTC(Fig. 39 c)에는 대기 상부 (250hPa)까지 상승류가 형성되어 있고, 강한 수렴역($-8 \text{ e}^{-5}/\text{s}$)이 600hPa의 대기 중층에 존재하고 있음을 보인다. 한편, 최대 강수 기록시 06UTC에 서울 상공의 서쪽과 동쪽에 각각 폭넓은 하강기류가 존재하고 있다. 이는 고양시 호우사례와 유사하여, 호우세포에 상승기류와 하강기류(파란색 계열 구역)가 동시에 존재하며 서로 상승, 하강의 교환을 하며 발달함을 보여준다고 생각된다.

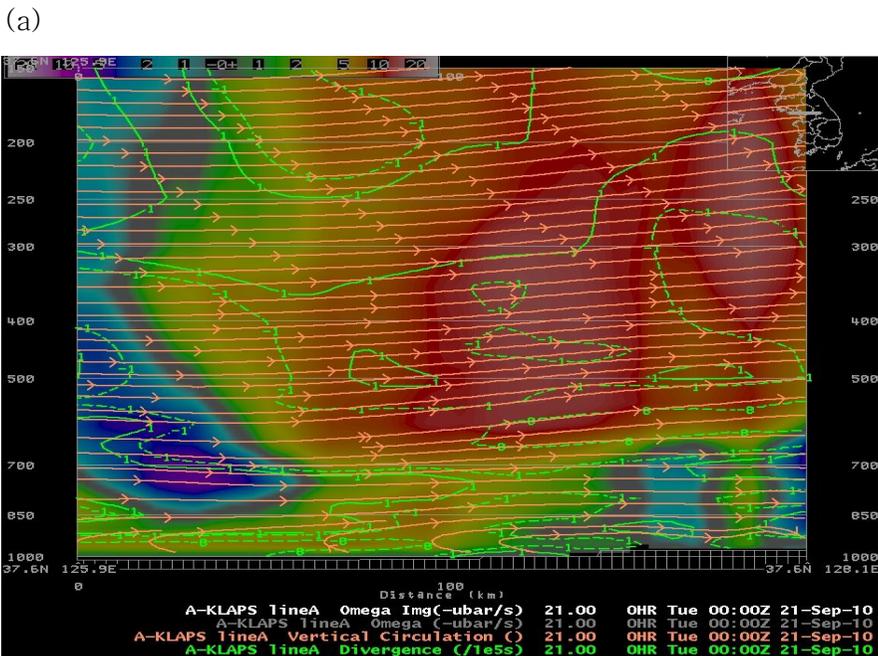
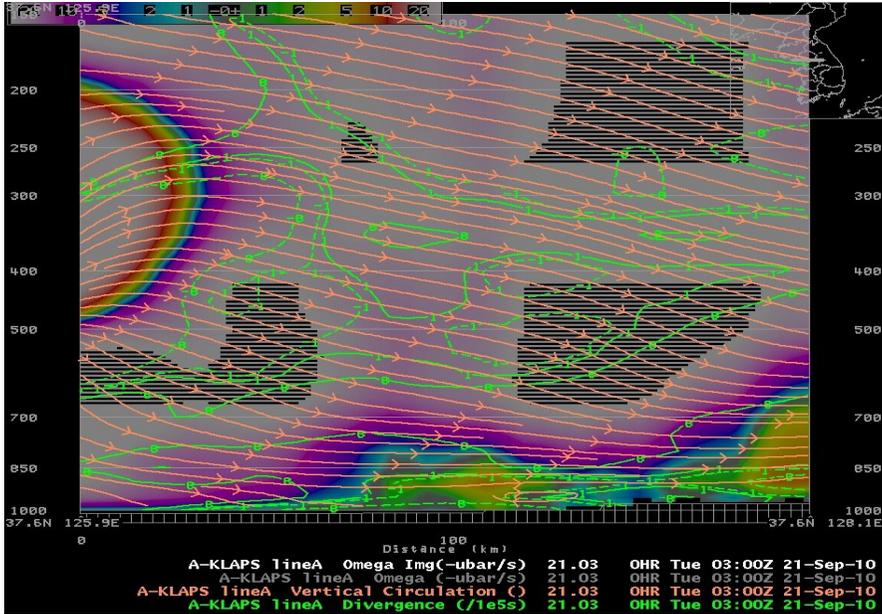


Fig. 39. Same as Fig. 37. but for omega fields(ascending air flow, color images), vertical circulation(purple line) and divergence (green line) at (a) 00UTC, (b) 03UTC, and (c) 06UTC 21 September 2010.

다만 전반적으로 고양시 사례보다는 상승류의 규모가 다소 적게 나타났는데 이는 양 사례의 불안정지수 분포에서 보듯이 (Fig. 17과 Fig 36 참조) 불안정 규모의 차이로 생각된다.

(b)



(c)

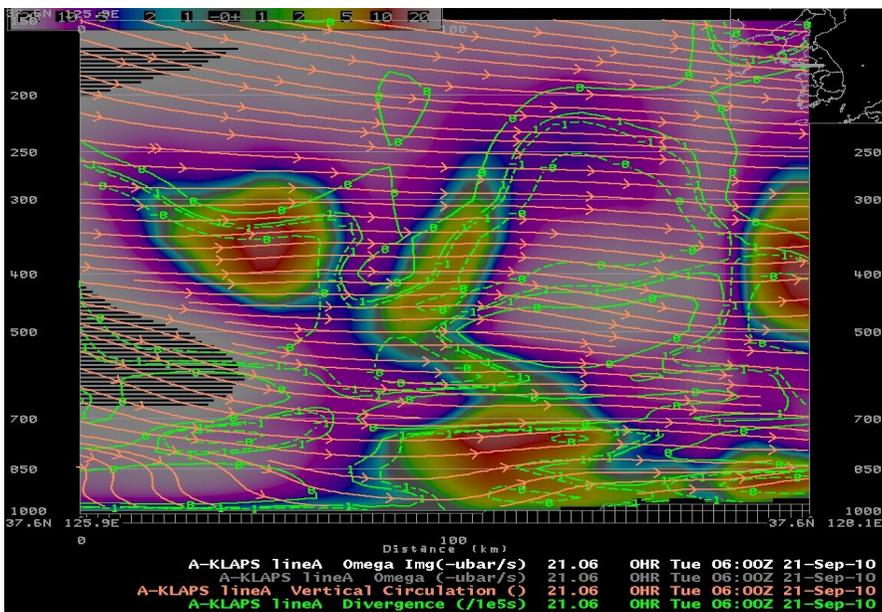


Fig. 39. Continued.

3) 수증기 속과 상대와도

Fig. 40은 9월 21일 00~06UTC 서울시 상공의 수증기 속과 상대와도의 연직 구조를 나타낸다. 강수시작 전(Fig. 40 a와 b), 대기 중층(650~400hPa)에 수렴역(녹색과 붉은색 구역)과 발산역(파란색 구역)이 수평적으로 점차 혼재하면서 강화되고 있어. 이는 주위로의 유출과 유입이 함께 일어나고 있음을 보인다(고양시 호우사례와 유사). 전반적으로 지표부근에는 발산역이, 그 이상의 700hPa부근에서는 수렴역이 지배하는 가운데, 650~400hPa의 대기 중층에서는 수렴과 발산이 함께 존재하는 중규모적 환경이다. 이러한 현상은 보다 심화되어 최대 강수시각인 21일 06UTC(Fig. 40 c)에는 700hPa 부근에 비교적 강한 수렴역(100g/kg/12hr 이상)이 형성되어 있고 500~400hPa의 대기층에서는 강한 수렴과 발산장이 혼재하고 있음을 보여 준다. 다만, 고양시 호우 사례와는 달리, 대기 하층에서 강한 수증기 수렴은 보이지 않고 있다.

(a)

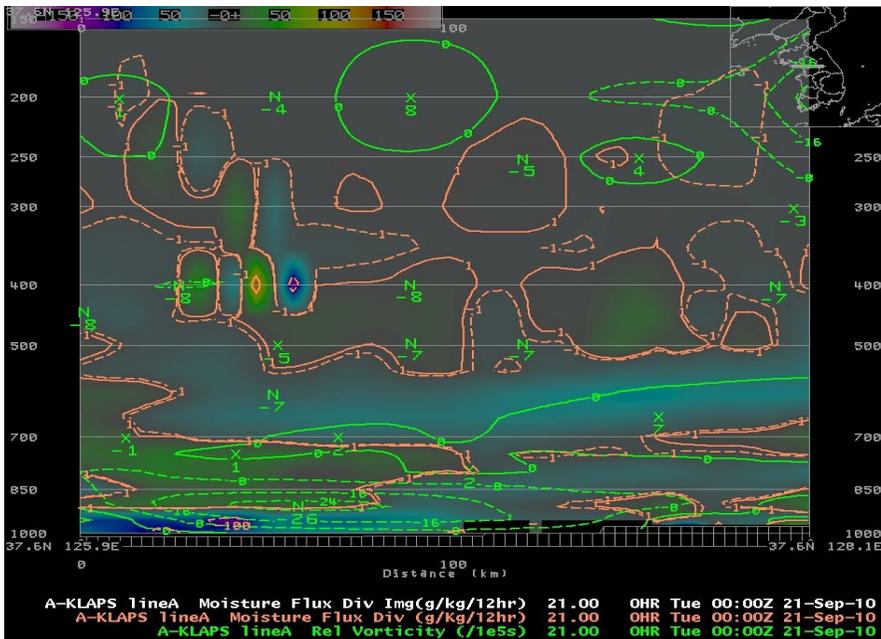
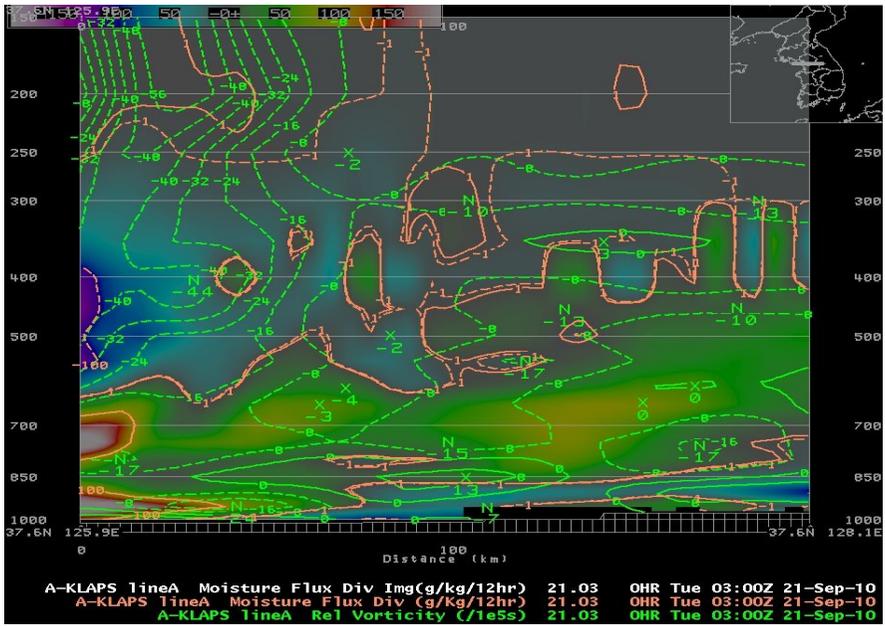


Fig. 40. Same as Fig. 37. but for moisture flux divergence(color images and purple line) and relative vorticity(green line) at (a) 00UTC, (b) 03UTC, and (c) 06UTC 21 September 2010.

(b)



(c)

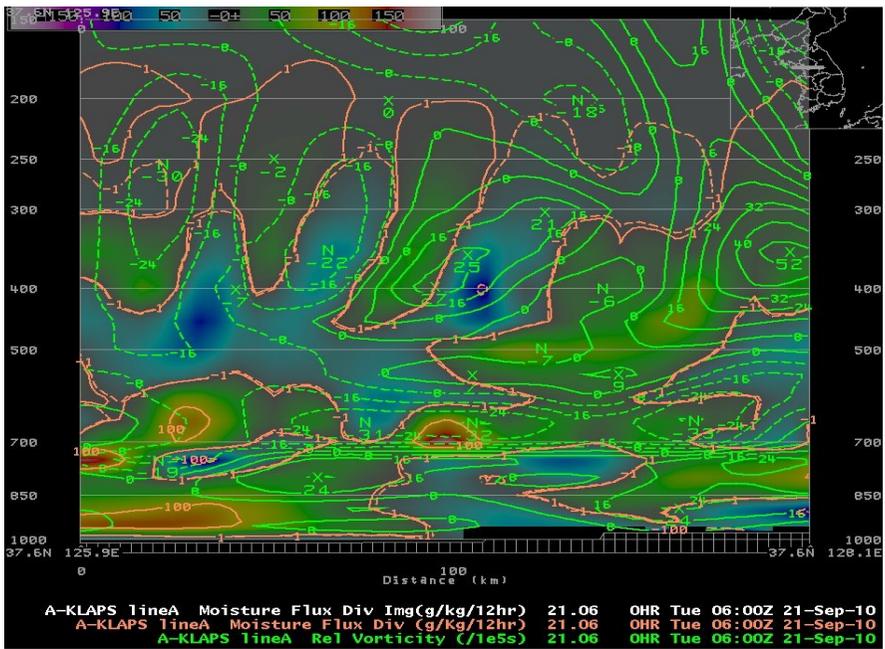


Fig. 40. Continued.

한편, 상대와도의 연직분포를 살펴보면, 강수 최대 시각시(Fig. 40 c) 서울 상공의 지상에서 750hPa 이하의 대기 하층에서는 저기압성, 그 이상의 대기층(700~600hPa)에서는 광범위한 고기압성 와도가 존재함을 보여, 고양시 사례와 다소 상이한 연직구조를 보인다. 특히 차이점으로는 700~600hPa사이에 강한 고기압성 와도($32 e^{-5}/s$)가 존재하는 것이다. 그리고 400hPa 부근에 다시 강한 저기압성 와도($25 e^{-5}/s$)가 있다. 이러한 구조에 대한 자세한 분석을 위해 다시 강수 최대시간대(9월 21일 04~07UTC) 및 강수 종료기(21일 08~09UTC)의 상대와도 연직구조를 1시간 간격으로 Fig. 41에 나타내었다.

그림에서 보듯이, 1000~700hPa의 대기 하부에서는 강수 최대시간 대에 전반적으로 저기압성 와도를 보인다. 그 상부 즉, 700~500hPa사이에 강한 고기압성 와도가 존재하는 것을 상세히 살펴보면, 04UTC(Fig. 41 a)에 서쪽으로부터 그 층에 강한 고기압성 와도($42 e^{-5}/s$)가 들어오는 것을 볼 수 있다. 이것은 05UTC(Fig. 41 b)에 보다 동진하여 서울 상공에까지 들어오고, 강수 최대값을 보인 06UTC(Fig. 41 c)에는 그러한 고기압성 와도는 감소되고 그 위층인 400hPa 부근에 강한 저기압성 와도($25 e^{-5}/s$)가 존재한다(이 저기압성 와도는 강수가 강해지는 04UTC부터 서울 상공 300hPa부근에서 발생하여 점차 하강). 이러한 현상은 대기 하층(1000~700hPa)에서는 저기압성 와도와 연계된 상승류가 존재하는 가운데, 강수 최대값 시각(06UTC)에는 700~600hPa사이에 $32 e^{-5}/s$ 규모의 고기압성 와도가 있지만(이 규모는 전 시간 보다 감소), 그 위의 500~300hPa까지는 크게 저기압성 와도가 존재하는 것으로 보인다. 따라서 하층에서 수렴에 의해 상승되는 기류가 300hPa상공까지 올라와 빠져나가고 있음을 보여 준다고 생각된다. 이처럼 최대 강수를 보이는 시점에서 상대와도의 분포는 전반적으로 지상에서 약 400hPa상공까지 저기압성 와도가 지배적이라고 볼 수 있다. 다만, 한때 700~600hPa사이에 존재하는 고기압성 와도는 대기 중층에서의 하강기류에 의한 현상으로 판단된다. 이러한 현상은 강수가 최대 정점을 지나 소강상태에 들어가는 07UTC(Fig. 41 d)이후 부터는 급격히 상층의 저기압성 와도는 사라지고 고기압성 와도가 700hPa 이상의 대기층을 지배하여 호우를 유발한 공기회전과 순환의 구조는 사라졌다고 판단된다.

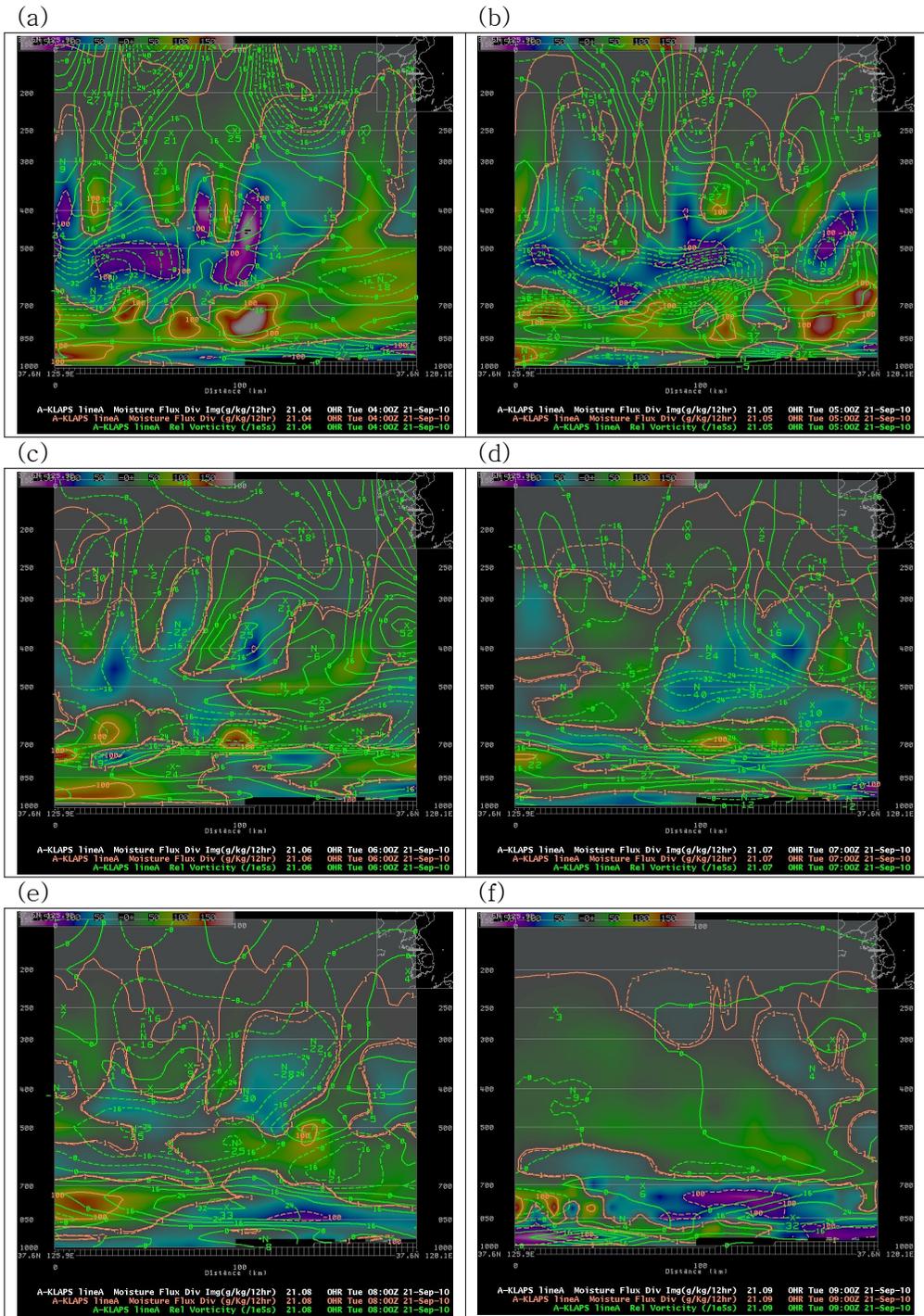


Fig. 41. Same as Fig. 40. but for at (a) 04UTC, (b) 05UTC, (c) 06UTC, (d) 07UTC, (e) 08UTC, and (f) 09UTC 21 September 2010.

라. 서울시 호우 개념도

앞에서 조사, 분석한 장마 후의 서울시 호우사례에 대한 종관적, 중규모적 특징을 바탕으로 이를 요약한 개념도를 Fig. 42와 같이 구성하였다. 그림에서 보듯이, 서울시 호우 사례의 경우 지상기압계의 구조는 한반도를 중심으로 북서쪽으로는 몽골 북서부지방에 중심을 둔 고기압이 우리나라를 향해 장출하고 있고, 남동쪽으로는 북태평양 고기압의 북서연변에 위치해 있다. 북동쪽으로는 캄차카반도에 중심을 둔 폐색저기압에 의한 전선역이 한반도를 향해 뻗혀있고, 남서쪽에서는 중국 남동내륙에 상륙한 태풍에 의한 저기압 세력이 한반도를 향해 영향을 미치고 있다.

이러한 기압계의 균형은 한반도를 안장부 패턴에 있게 하여 변화에 민감한 기압장을 형성하고 있다고 판단된다. 한편 북서쪽 고기압 장출로 인한 경압불안정역에 의한 준 정체전선대가 한반도 북부지방에까지 영향을 미치고 있으며, 호우지역인 서울을 포함한 경기북부지방은 이 전선대의 남쪽 하단에 속하여 북태평양 고기압의 연변에서 불안정에 취약한 종관적 환경을 이루고 있다. 이러한 지상의 종관적 환경속에서 850hPa의 하부 대기층에서는, 9월 하순 초에 속하는 계절적 변화에도 불구하고 333K가 넘는 높은 상당온위의 고온습윤공기와 그 강한 경도구역이 수도권을 포함한 경기북부지방에 형성되어 있고, 이러한 고온습윤공기는 원산만 부근에 중심을 둔 저기압성 회전에 의한 강한 바람의 영향으로 고양시 사례와는 다른 패턴의 하층 강한바람이 서해상에서 서풍 계열의 바람을 타고 강하게 중부내륙으로 유입되고 있다. 대기 중층의 500hPa에서는 경압불안정에 의한 구름역과 북서풍에 의한 한기가 남하하는 가운데, 서해상의 약한 골의 전면에서 한반도 중북부지방 상공에는 상하층간의 바람시어에 의해 불안정이 뚜렷하다. 200hPa의 대기 상층에서는 상층제트의 축이 호우역과는 약 1000km이상 북쪽으로 떨어진 가운데, 호우역 상공에서는 상층 수평발산장이 형성되어 있다. 중규모적으로 살펴본 대기의 연직 구조는, 고양시 사례와 유사하게 대기 중층까지 상당온위가 감소하는 대류불안정 환경과, 상승·하강류가 혼재하는 역학적 구조, 그리고 대기 하층의 강한 저기압성 와도에 의한 수렴과 강수 후 비교적 빠르게 자리 잡는 대기 상층의 고기압성 와도 등이 특징으로 분석된다.

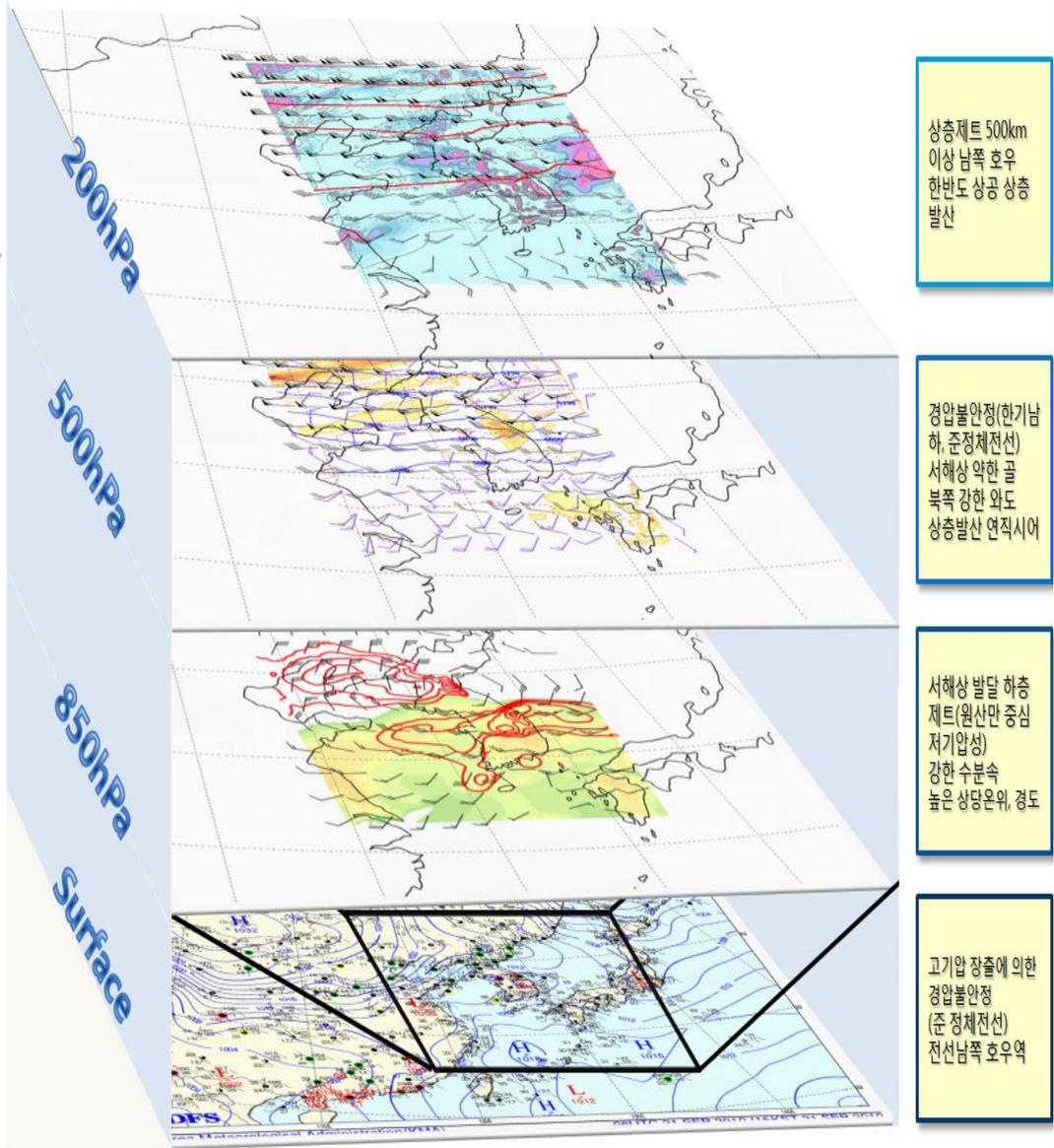


Fig. 42. Characteristics features of the heavy rainfall event in Seoul occurred at 21 September 2010.

제4장 요약 및 결론

본 연구에서는 우리나라 장마기와 장마 후에 일어난 호우, 특히 우리나라 수도권 지역에서 발생한 집중호우 중 예측량을 훨씬 뛰어넘는, 12시간내에 300mm에 달하는 기록적인 강수에 의해 피해를 입었던 두 사례, 즉 장마기인 2006년 7월 12일 고양시를 중심으로 경기북부지방에 있었던 집중호우와, 장마 후 2010년 9월 21일 서울시에 내린 호우에 대해 종관적 및 중규모적 특징을 조사 분석하였다. 그 결과 Table 3에 보인 바와 같이 이 들에 대한 유사성과 차이점을 구별하고 이를 모식화하여 향후 여름철 장마기와 장마 후에 일어 날 수 있는 호우에 대한 진단과 예측에 기여하고자 하였다.

두 사례는 장마기와 장마 후라는 계절적인 차이에도 불구하고, 종관기압계는 정체 전선 또는 준정체전선에 기반을 둔 강한 불안정에 의한 국지성 집중호우임을 보였다. 발달한 저기압 또는 기압골에 의한 시스템적 강수라기 보다는 대류불안정 등 불안정의 효과가 크게 작용한 호우였다. 여기에는 북쪽 고기압의 장출에 의한 한기 남하와 고온습윤공기의 유입으로 인한 불안정 증폭과 상층발산, 연직시어, 강한 상승류 등의 복합적 작용에 의한 불안정 가속이 그 원인으로 분석된다.

- 호우의 중요한 요인으로 대두되는 상하층제트의 역할에 대해 조사한 결과, 상층 제트의 축은 두 사례 모두 한민국경을 넘어 중국 북동부지방을 동서로 지나고 있었다. 외국의 사례 또는 기존 조사연구에서는 비교적 상하층제트가 직교하거나 그 위치가 서로 가까운 곳의 아래구역 부근에서 집중호우의 가능성이 높은 것으로 조사되고 있다. 이와는 달리 본 연구의 두 사례 경우는 모두 상층제트의 축이 한반도 중부지방까지 남하하거나 그 가까운 북한지방 상공에 걸쳐 있기 보다는, 호우지역에서 약 1000km 이상 떨어진 중국 북동부지역을 지나고 있었다. 다만 호우지역인 한반도 중북부지방의 상공에는 상층발산장이 뚜렷이 형성되어 있었다. 따라서 이러한 상층발산장이 하층제트에 의해 유입된 공기의 상승을 유발하여 2차 순환을 하게 하는 역할을 충분히 담당하였다고 판단된다.

Table 3. Comparison of characteristic features of heavy rainfall events during the on- and off-Changma season.

	Case of heavy rainfall during on-Changma	Case of heavy rainfall during off-Changma
Synoptic surface pressure system (location of heavy rainfall area, etc.)	Peninsular is under the influence of stationary frontal system associated with occluded low pressure system. / Heavy rainfall area located north of frontal band. (Heavy rain due to localized strong instability, not by the passage of well-developed cyclone or trough.)	Affected by sub-stationary frontal system under the pressure system of saddle pattern. / Heavy rainfall area located south of frontal band. (Localized strong instability / remarkable baroclinic instability under the influence of continental high pressure system)
Lower troposphere (LLJ, equivalent potential temp. (θ_e), etc.)	Typical SWly LLJ along mT boundary (Max. windspeed 40kts in west sea at 850hPa / Heavy rainfall area in front of LLJ Hot and humid air over 350K of θ_e at 850hPa Vertically decrease of θ_e up to mid-atm. layer \rightarrow causing convective instability	Strong wind at lower atm associated with cyclonic circulation nearby heavy rainfall area (Max. 30-35kts at 850hPa) / Heavy rainfall area left of and north within max. wind speed area Hot and humid air over 340K of θ_e at 850hPa Same as left
Middle troposphere	Entrainment of cold and dry air into mid-atm layer (cold air pool) Coexistence of ascending/descending air and divergence/convergence of air in mid-atm layer Weak trough in West sea at 500hPa Strong relative vorticity north of heavy rainfall area Strong vertical wind shear (veering of over 40 degree)	Same as left Same as left Same as left Same as left (veering of about 30 degree)
Upper troposphere	ULJ streak at northeastern part of China about 1000km north of heavy rainfall area in Korea Divergence in the upper layer over heavy rainfall area in Korea \rightarrow causing 2nd vertical circulation for development of convective cloud band	Same as left Same as left

- 대기 하층에서 높은 상당온위에 의한 고온다습한 공기의 유입은 역시 호우의 발달과 유지에 매우 중요한 역할을 차지하였다. 장마 후 서울지방을 중심으로 한 수도권지역에 있었던 호우의 경우, 9월 하순 초라는 계절적 환경에도 불구하고 상당온위가 333K를 넘는 고온습윤한 공기의 유입이 하층대기를 불안정하게 하는 큰 요인이 되었다. 이러한 하층에서의 고온습윤한 공기의 유입은 또한 대기 중층에서의 건조공기 유입과 맞물리어 강한 대류불안정을 유발하였다고 분석된다. 두 사례 모두, Fig. 18과 Fig. 37에서 보듯이, 강수 시작 전에는 상층으로 갈수록 상당온위가 증가하는 비교적 안정적인 대기 연직구조를 보이나, 강수 최대시점에는 호우지역 상공의 지상에서 500hPa까지 위로 갈수록 상당온위가 감소하는 대류불안정의 연직구조가 뚜렷하다. 이러한 구조는 강수 쇠퇴기에는 모두 사라져 이 대류불안정이 집중호우의 중요한 원인 중 하나가 되었음을 나타낸다.
- 한편 강수 최대시기 당시, 대기 중층(650~500hPa)에는 건조공기의 유입에 따른 한냉공기의 풀이 존재하고 있음을 보여 주고 있고, 이로 인해 수렴과 발산장이 혼재하는 연직구조를 나타낸다. 이러한 구조들은 집중호우의 개념을 뒷받침하는 좋은 유사사례로 여겨지며 다른 사례분석을 통해 이를 공고화하는 작업이 필요하다 하겠다. 이 한냉공기 풀 역시 강수 쇠퇴기에는 모두 사라졌다.
- 이외에 상하층간 바람의 강한 순전(veering)형 연직시어 존재, 강수 최대시기에 강한 상승류와 주변의 하강기류 특히 대기 중층에서의 동시 출현 등이 집중호우 사례의 유사점으로 특징 지워진다.
- 이와 같은 두 사례의 유사성 요인과 함께 몇몇 차이점도 뚜렷하다. 그 중의 하나가 하층제트에 관한 것이다. 일반적으로 하층제트는 대기의 하층에 고온습윤공기를 가져오는 중요한 매개체 역할을 한다. 우리나라에서 호우를 일으키는 하층제트는 대부분 북태평양 고기압의 연변을 따른, 수평이동거리가 수백km에 달하는 남서류의 제트를 말한다. 이는 한반도 남쪽에 있는 해양상의 따뜻하고 습한 공기를 한반도로 끌어올려 하층대기를 불안정하게 하는 큰 매개체의 역할을 충분히 담당한다. 장마기 고양시의 사례는 이러한 하층제트의 유형을

잘 보여준다. 그러나 장마 후 서울시 호우사례는 북태평양 고기압의 연변을 따른 남서류의 하층제트라기 보다는 당시 원산만 부근에 중심을 둔 저기압성 회전에 의한 강한 바람의 영향으로 서해상에서 서풍 계열의 바람을 타고 강하게 중부 내륙으로 유입된 바람으로 분석된다. 이 사례가 집중호우에 있어 하층제트의 또 하나의 다른 유형을 형성한다고 보기에는 보다 많은 사례 조사가 있어야 하겠지만, 적어도 집중호우시 대기 하층에 고온습윤공기를 가져오는 하층제트의 분석에 있어 남서류 하층제트라는 통상적인 개념의 하층제트와 함께 하층에서의 강한 수분속을 보여주는 다른 환경과 요인들도 살펴 볼 필요가 있음을 의미한다고 판단된다.

- 한편 이러한 차이는 하층제트와 연관된 호우역의 위치에도 영향을 주었다. 남서류 제트에 의한 고양시 호우사례 경우 호우역은 하층제트의 전면에 형성되었고, 저기압성 순환과 관련된 서울시 호우사례의 경우 호우역은 하층 최대풍역의 중간 좌측역에 존재하였다. 이외에 호우의 종관적 환경차이에서 오는 경압 불안정의 형성과 강도, (준)정체전선 상의 불안정(호우역)의 위치, 상대와도의 연직구조와 분포 등이 차이점들로 나타났다.

본 연구에서는 기술한 바와 같이 장마기와 장마 후의 집중호우 요인에 대한 공통점과 차이점을 살펴보았다. 조사된 이러한 유사성과 차이점들은 향후 집중호우의 진단과 예측, 그리고 관련 연구에 활용될 수 있으리라 생각된다. 앞으로도 보다 다양한 여러 호우 사례가 더 조사되고 또 유사한 사례의 분석을 통해 개념화에 필요한 요소들을 공고히 하는 작업이 요구된다. 특히 수치모델링 등을 통해 이러한 유사성과 차이점들이 호우발생 구름장의 형성과 발달에 각각 어떠한 역할을 하는지에 대한 조사가 필요하다고 생각된다. 이와 관련된 모델개선 등을 통해 한반도 집중호우 예측력 향상에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

- 기상연구소, 2006: 단시간 강수예측능력 향상 연구(III), 247pp.
- 김동균, 전해영, 2000: 집중호우와 연관된 산악 효과에 대한 수치적 연구. 한국기상학회지, 36, 441-454.
- 김미애, 허복행, 김경익, 이동인, 2009: 장마전선에서 발생한 2006년 6월 25일 호우사례에 대한 중관자료의 운동학적 특성분석. 대기, 19(1), 37-51.
- 김성삼, 정창희, 박순웅, 이병설, 1983: 다우장마와 과우장마시 장마전선의 구조적 특징. 한국기상학회지, 19, 12-32.
- 김원수, 김영화, 이태영, 2007: 대류밴드형 호우시스템에 나타난 지형효과 분석. 한국기상학회 가을학술대회논문집, 288-289.
- 김진철, 박옥란, 허진호, 양진관, 2008: 우리나라에서 발생하는 집중호우의 주요 호우인자 도출. 한국기상학회 봄학술논문집, 278-279.
- 김정훈, 송희영, 조천호, 김백조, 백선균, 2003: 2003년 장마전선 구조분석. 대기, 13, 404-405.
- 박순웅, 김성삼, 임규호, 1983: 우리나라 부근에서 나타난 하층제트와 악기상에 관한 연구. 한국기상학회지, 19, 20-36.
- 박인태, 2002: 중규모 요란에 의한 집중호우 분석. 대기, 12, 258-261.
- 박창근, 이태영, 2008: 장마전선상에서 발생한 중규모 호우계 구조에 대한 연구. 한국기상학회 가을학술대회논문집, 24~25.
- 박창현, 이화운, 정우식, 2003: 지리산 부근 집중호우 발생시 하층제트와 지형의 영향. 한국기상학회지, 39, 441-458.
- 백선균, 조천호, 김정훈, 송희영, 2003: 윈드프로파일러를 이용한 2003년 여름철 악기상 현상 분석. 한국기상학회지, 13, 156-157.
- 백선균, 조천호, 2005: 윈드프로파일러를 이용한 여름철 강수형태의 분류. 한국기상학회지 봄철학술대회논문집, 114-115.
- 소선섭, 2009: *역학대기과학*. (주) 교문사, 787pp.
- 신도식, 박윤희, 2004: 장마 후 호우매커니즘 분석과 예보가이드스 개발. 한국기상학회 가을학술대회논문집, 326-327.

- 양하영, 박상미, 류찬수, 2002: 우리나라 호우의 특성. 대기, 12(3), 534-537.
- 윤원태, 변영화, 박정규, 2001: 1998년 여름철 한반도 집중호우 특성분석. 한국기상학회지, 37(2), 181-193.
- 이동규, 위태권, 이승우, 이조한, 하종철, 1999: 1998년 집중호우의 종관적 특성. 한국기상학회 봄학술논문집, 25-30.
- 이운영, 이광준, 김상선, 2010: 9월 21일 서울, 인천, 경기 집중호우 피해현황과 원인. 물과 미래, 43(10), 106-113.
- 이태영, 2003: 7월 호우와 8월 호우의 종관규모 및 중규모적 특징 사례연구. 대기, 13(3), 80-81.
- 이태영 김영화, 조남산, 김원수, 박상훈, 2007: 한반도 집중호우 개념모델 개발 및 현업화 연구(I). 기상청, 126pp.
- 이태영, 김영화, 김원수, 조남산, 2007: 한반도 호우시스템의 유형구분. 2007년 한국기상학회 봄철대회논문집, 54-55.
- 이태영, 2009: 장마전선에서의 교란발생-이해와 예측에 관한 연구. 기상청, 125pp.
- 이혜영, 고혜영, 김경익, 윤일희, 2010: 대류권계면 접힘에 의한 영동지방 집중호우 사례의 특성분석. 한국지구과학회, 31, 354-369.
- 임정선, 박순웅, 1991: 1988년 장마기간에 한반도를 중심으로 한 수증기 수송과 수지. 한국기상학회지, 27, 221-240.
- 정상훈, 류찬수, 2006: 한국기상학회 봄철학술대회논문집. 316-317.
- 정순갑, 김성삼, 1983: 장마전선에서의 선형 경압불안정성에 관한 연구. 한국기상학회지, 19, 37-46.
- 최정부, 1991: 집중호우형 종관기압계의 특성, 예보기술, 2(2), 1-12.
- 최지혜, 남경엽, 장기호, 오성남, 2006: 초단기 강수예보모델을 이용한 2006년 고양 집중호우 사례분석. 한국기상학회 가을학술대회논문집, 18-19.
- 하지현, 최석진, 이동규, 2008: 고양 집중호우에 대한 레이더와 AWS 자료동화. 한국기상학회 가을학술대회논문집, 42-43.
- 황승언, 이동규, 1993: 한반도에서 발생한 호우와 하층제트의 관련성에 관한 연구. 한국기상학회지, 29, 133-146.
- 홍성길, 홍사선, 양해본, 박병진, 기원도, 2010: 호우예보 연구개발결과의 현업활용 체제 구축 연구. 기상청, 258pp.

- Augustine, J.A. and F. Caracena, 1994: Lower-tropospheric precursors to nocturnal Mesoscale Convective System development over the central United States. *Weather Forecasting*, 9, 116–135.
- Chen, G.T.J. and C.C. Yu, 1988: Study of Low-Level Jet and Extremely Heavy Rainfall over Northern Taiwan in the Mei-Yu Season. *Mon. Wea. Rev.*, 116, 884–891.
- Chen, X.A. and Y.L. Chen, 1995: Development of Low-Level Jets during TAMEX. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 1695–1719.
- Chen, S.J., Y.H. Kuo, W. Wang, Z.Y. Tao, and B. Cui, 1998: A modelling case study of heavy rainstorms along the Mei-yu season. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 2330–2351.
- Djuric, D., 1994: *Weather Analysis*, Prentice hall, 304pp.
- Holton, J.R., 1992: *An introduction to dynamic meteorology*, Academic Press, 511pp.
- Jirak, I.L. and W.R. Cotton, 2004: Environmental precursors to Meteorological Convective System development. Preprints, Mesoscale Convective Systems Session 6.5, *22nd Conference on Severe Local Storms*, Amer. Meteor. Soc.
- Jirak, I.L. and W.R. Cotton, 2007: Observational analysis of the predictability of Mesoscale Convective Systems. *Weather Forecasting*, 22, 813–838.
- Kim, H.W. and D.K. Lee, 2006: An observational study of mesoscale convective systems with heavy rainfall over the Korean peninsula. *Weather Forecasting*, 21, 125–148.
- 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.
- Maddox, R.A., 1983: Large-scale meteorological conditions associated with midlatitude, Mesoscale Convective Complexes. *Mon. Wea. Rev.*, 111, 1475–1493.

- Matsumoto, S., K. Ninomiya, and S. Yoshizumi, 1971: Characteristic features of “Baiu” front associated with heavy rainfall. *J. Meteor. Soc. Japan*, 49, 267–280.
- Matsumoto, S., 1972: Unbalanced low-level jet and solenoidal circulation associated with heavy rainfalls. *J. Meteor. Soc. Japan*, 50, 194–203.
- Park, S.U., I.H. Yoon, and S.K. Chung, 1986: Heat and moisture sources associated with the Changma front during the summer of 1978. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 22(2), 1–27.
- Park, S.U., H.J. Ahn, and Y.S. Chun, 1989: Evolution of synoptic scale features associated with a long-lieue convective system (21–23 July 1987), *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 25(3), 168–191.
- Shaw, B.L., J.A., McGinley, and P. Schultz, 2001: Explicit initialization of clouds and precipitation in mesoscale forecast models. Preprints, *18th Conference on Weather Analysis and Forecasting and 14th Conference on NWP*, Amer. Meteor. Soc.
- Shin, C.S. and T.Y. Lee, 2005: Development mechanisms for the heavy rainfalls of 6–7 August 2002 over the middle of the Korean peninsula. *J. Metero. Soc. Japan*, 83, 683–709.
- Song, B.G., Y.S. Kim, and Y.H. Youn, 2004: Synoptic conditions and diagnosis of vertical motion associated with heavy rainfall over Korea. Korean Meteorological Society, *Proceedings of the Autumn meeting of KMS*, 2004.
- Sun, J. and T.Y. Lee, 2002: A numerical study of an intense quasi-stationary convection band over the Korean peninsula. *J. Meteor. Soc. Japan*, 80, 1221–1245.
- Zhang, Q.H., K.H. Lau, Y.H. Kuo, and S.J. Chen, 2003: A numerical study of a Mesoscale Convective System over the Taiwan Strait. *Mon. Wea. Rev.*, 131, 1150–1170.

감사의 글

학창시절 대기과학을 공부하여 졸업 후 같은 분야에 입사하고 30년이 넘는 오랜 직장생활을 하였습니다. 그동안 하고 싶은 한 가지가 있었는데, 이를 직장생활 후반기에 만학의 과정으로 시작하여 지금까지 오게 되었습니다. 이제 마음속에 담아왔던 하나의 소망을 이룰 수 있게 되었다는 기쁨 속에, 지금까지 이끌어 주시고 함께하여 주신 여러분들에게 감사의 마음을 표하고자 합니다.

무엇보다도 먼저 류찬수 교수님께 깊은 감사의 뜻을 올립니다. 광주지방기상청장으로 재직하던 시절, 학문에 대한 지속적인 정진의 권고를 받고 시기적으로 늦지 않았나 싶어 망설였으나 끊임없는 격려와 함께 많은 조언, 세심한 배려 덕분에 이 쉽지 않은 과정을 시작하고 또 마무리하지 않았나 싶습니다. 참 하나하나가 소중한 사랑으로 다가옵니다. 머리 숙여 감사를 포함합니다.

또 하나의 깊은 감사를 정효상 교수님께 올립니다. 논문의 방향과 일정을 잡지 못해 여러 시간을 보내고 있을 때 다양한 아이디어와 자료를 제공해 주셨으며 그리고 격려와 함께, 학문과정의 단계 단계마다 마치 큰 형님처럼 돌보아 주셨습니다. 교수님의 끊임없는 관심과 도우심 덕분에 오늘의 이 기쁨이 있음을 보며 다시금 감사드립니다.

볼 때 마다 부족함이 묻어나오는 논문에 애정을 가지고 살펴 조언하여 주신 조주환 교수님, 오완탁 박사님, 그리고 예리한 감각으로 더 논문다운 논문이 되도록 충언을 아끼지 않은 최치영 청장님, 그리고 정병욱 교수님, 참 감사합니다. 덕분에 마무리 할 수 있었습니다. 그리고 자료의 작성과 수정 등 굳은 일에 애써준 CATER의 김석철 계장, 조선대의 황성은 씨, 그리고 기상청의 도성수, 김동주 씨에게도 감사의 마음을 전합니다.

언제나 함께하는 가족인 아내와 아들 인교를 생각합니다. 늘 곁에 같이 있어 주는 것만으로 큰 힘이 되는 가족에게 늦게나마 이 한편의 책을 드리고 싶습니다. 내 삶의 하나이며 이유인 사랑하는 아내와 인교가 있었기에 가능했다고 말하겠습니다. 하나님께서 우리에게 주신 것은 두려워하는 마음이 아니요 오직 능력과 사랑과 근신하는 마음이라는 말씀을 가슴에 새기며, 이 모든 것을 있게 하시며 처음부터 끝까지 인도하여 주신 하나님께 모든 감사와 영광을 올려드립니다.