[UCI]I804:24011-200000241864

2011년 8월
석사학위 논문

KLAPS 재분석 자료를 활용한 2009년 7월 9일 호우사례에 대한 기상특성

조선대학교 대학원

대 기 과 학 과

김 진 아

2011년 8월 석사학위논문 KLAPS 재분석 자료를 활용한 2009년 7월 9일 호우사례에 대한 기상특성 김 진 아

KLAPS 재분석 자료를 활용한 2009년 7월 9일 호우사례에 대한 기상특성

A Study on the Meteorological Characteristics Associated with Heavy Rainfall Case of July 9, 2009 Using KLAPS Reanalysis Data

2011년 8월 25일

조선대학교 대학원

대 기 과 학 과

김 진 아

KLAPS 재분석 자료를 활용한 2009년 7월 9일 호우사례에 대한 기상특성

지 도 교 수 류 찬 수
공동지도교수 이 종 호

이 논문을 이학석사 학위신청 논문으로 제출함

2011년 4월

조선대학교 대학원

대 기 과 학 과

김 진 아

김진아의 석사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교	전문경력 객원교수	정 효 상 (인)
위 원	기 상 청	이학박사	김 백 조 (인)
위 원	조선대학교	교 수	류 찬 수 (인)

2011년 5월

조선대학교 대학원

목 차

List of Tables i

List of Figures ii

ABSTRACT iv

1. 서론 1

2. 자료 및 KLAPS 분석 5

2.1. 자료 5

2.2. KLAPS 재분석 체계 6

2.3. KLAPS 산출 역학지수 10

3. 결과 13

3.1. 2009년 7월 기상특성 13

3.2. 호우사례의 종관기상특성 16

3.3. 역학지수를 활용한 중규모 기상특성 25

4. 요약 및 결론 31

참고문헌 33

List of Tables

Table 1. List of heavy rainfall cases in 2009. ····· 5
Table 2. Data used in KLAPS reanalysis. ····· 7
Table 3. Intensive observing data employed in KLAPS reanalysis. ····· 8

List of Figures

Fig. 1. Domain in KLAPS reanalysis and its topography. ····· 8
Fig. 2. Process of KLAPS reanalysis. ····· 9
Fig. 3. Low system track passing over the Korean peninsula in July, 2009. ····· 14
Fig. 4. Rainfall distribution of (a) total summer and (b) July in 2009. ····· 15
Fig. 5. Rainfall anomaly distribution of (a) summer and (b) July in 2009. ····· 15
Fig. 6. Hourly rainfall distribution on July 9, 2009 : (a) 1300 LST, (b) 1400 LST, (c) 1500 LST, (d) 1600 LST, (e) 1700 LST, and (f) 1800 LST. ····· 16
Fig. 7. Surface weather chart at (a) 0300 LST and (b) 0900 LST on July 9, 2009. 17
Fig. 8. Geopotential height (unit:gpm) and temperature (unit:℃) field at 0900 LST on July 9, 2009 : (a) 850 hPa, (b) 700 hPa, and (c) 500 hPa. ····· 18
Fig. 9. 850 hPa Reflectivity (unit:dBZ) and wind (unit:m/s) distribution obtained from radar at (a) 0900 LST and (b) 1500 LST on July 9, 2009. 18
Fig. 10. Satellite imageries from MTSAT IR at (a) 0900 LST and (b) 1500 LST on July 9, 2009. ····· 19
Fig. 11. Equivalent potential temperature (shading) and wind (vector) distribution at 850 hPa on July 9, 2009 : (a) 1300 LST, (b) 1400 LST, (c) 1500 LST, (d) 1600 LST, (e) 1700 LST, and (f) 1800 LST. ····· 20
Fig. 12. The same as Fig. 11 except for wind streamline and speed. ····· 21
Fig. 13. The same as Fig. 11 except for velocity potential (shading) and wind speed (solid line). ····· 22
Fig. 14. The same as Fig. 13 except for 350 hPa. ····· 23
Fig. 15. Line for vertical cross section. ····· 23
Fig. 16. Hourly stream function (shading) and velocity potential (contour) from 0500 LST to 2000 LST on July 9, 2009. ····· 24
Fig. 17. Instantaneous contraction rate at 850 hPa on July 9, 2009 : (a) 1300 LST, (b) 1400 LST, (c) 1500 LST, (d) 1600 LST, (e) 1700 LST, and (f) 1800 LST. ····· 25
Fig. 18. The same as Fig. 17 except for horizontal velocity gradient tenor magnitude. ····· 26

Fig. 19. The same as Fig. 17 except for helicity. ·····28
Fig. 20. Superhelicity on July 9, 2009 : (a) 1300 LST, (b) 1400 LST, (c) 1500 LST, (d) 1600 LST, (e) 1700 LST, and (f) 1800 LST. ·····29
Fig. 21. 1-hour cumulative rainfall (shading) and 3-dimension helicity (contour) at 850 hPa on July 9, 2009 : (a) 1400 LST, (b) 1500 LST, (c) 1600 LST, (d) 1700 LST, and (e) 1800 LST. ·····30

ABSTRACT

A Study on the Meteorological Characteristics Associated with Heavy Rainfall Case of July 9, 2009 Using KLAPS Reanalysis Data

Jin-A Kim
Advisor : Prof. Ryu, Chan-Su Ph.D.
Prof. Lee, Jong-Ho Ph.D.
Department of Atmospheric Science
Gradate School of Chosun University

In this paper, meteorological characteristics associated with heavy rainfall of July 9, 2009 and its developing mechanism were examined by analyzing synoptic weather pattern and dynamical index obtained from KLAPS (Korea Local Analysis and Prediction System) reanalysis data. The KLAPS developed by Korea Meteorological Administration has some advantages of producing high-resolution reanalysis data with temporal resolution of 1 hour and spatial resolution of 5 km and assimilating intensive observing data from wind profiler and marine observation vessel. The dynamical indexes used in this study are instantaneous contraction rate (ICON), horizontal velocity gradient tensor magnitude (MAG), helicity, and superhelicity.

The synoptic weather analyses showed that heavy rainfall is caused by low system along the Changma front extending from Shangdong province, China to Japan peninsula through the central part of the Korean peninsula. This case was largely associated with higher (333 K more) equivalent potential temperature, strong LLJ, positive velocity potential more than $3.5 \times 10^2 m^2 s^{-2}$ at 850 hPa. Daily rainfall with 229.5 mm in Hongcheon and 190 mm in Seoul on July 9, 2009 intensively occurred over the central part of the Korean peninsula. The main rainfall belt moved southeastward and then reached northern part of Gyeongbuk province at 1800 LST 9 July, 2009, as indicated in radar reflectivity and satellite IR image.

The dynamical index analysis revealed that ICON and MAG well separate regions with and without heavy rainfall and the areas with positive and negative helicity alternatively well reflect strong rainfall belt of Seoul, Gyeonggi and Gangwon provinces. The maturity of rainfall cell can be confirmed by superhelicity, indicating the fact that large negative superhelicity shows the developing rainfall cell over the regions.

Finally, results from this case study showed that the high possibility of occurring heavy rainfall is well characterized by dynamical index from KLAPS reanalysis data. In particular, rainfall occur over the area where helicity and helicity density is around zero.

1. 서론

일반적으로 우리나라의 여름철 강수량은 열대 서태평양의 대류활동과 밀접한 관련이 있다. 최근 열대 서태평양에서의 대류활동이 약화되면서 상대적으로 우리나라 부근에는 대류활동의 강화와 장마전선이 활성화되고 있다. 장마전선상에서 발생하는 집중호우는 시・공간적으로 다양한 규모를 가질 뿐만 아니라 최근에 그 강수강도가 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 특성과 변화 경향으로 장마전선에서 발생하는 집중호우를 예측하기는 어렵고 그 발달 메커니즘에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

한반도 집중호우는 장마전선상에서 발달하는 중규모 요란, 태풍, 북태평양 고기압의 가장자리에서의 대기 불안정성, 열대저기압이나 중위도 저압계 등의 요인에 의해 발생하고 있으며, 단시간에 국지적으로 발생하는 중규모 기상현상이다. 한반도 지역에 나타난 집중호우의 원인을 밝히고 이를 예측하기 위한 여러 연구들이 진행되어 왔다.

장마전선과 연관된 중규모 저기압과 호우의 발달기구에 관한 연구로 정순갑과 김성삼(1983)은 준지균모델의 수치실험으로 장마전선에서 발생하는 저기압이 하층 제트류와 밀접한 관계가 있고, 이 저기압의 발달에 경압불안정이 중요한 역할을 한다는 것을 보였다. 황승언과 이동규(1993)는 1980~1990년의 장마기의 호우 발생 시에 하층 제트류의 출현율이 88%로서, 장마전선에서 저기압의 발달과 밀접하게 관련이 있음을 보였다. 이재병(2001)은 호남 지방의 여름철 호우가 발생하기 24시간 전의 선행 현상으로 850 hPa 고도의 하층 제트류, 온난이류 및 낮은층에서의 습윤역 이류, 500 hPa 고도의 온난이류, 상・하층 제트류의 상호작용 등을 제시하였다. 홍윤(2000)은 집중호우는 시・공간적으로 집중성이 강한 중규모 기상현상으로써 태풍이나 열대 저기압, 중위도 저기압 및 불안정과 관련된 중규모 대류계에 의해 발생한다고 하였다. 또한 대류에 의한 다량의 강수량은 하층 수증기량의 최대값과 높은 양의 상관관계를 보였으나, 대류시스템의 규모와 현업 수치모델의 격자규모로 인해 종종 제대로 모의되지 못하는 경우가 있다고 하였으며 호우예측을 위해서 대류불안정과 주변 바람장, 수증기 이류 및 상・하층 제트류 분석으로 호우가능성을 판단할 수 있다고 하였다. 또 Maddox(1980)는 중규모 대류계를 선형 형태와 원형 형태로, 중규모 대류계에 의한 집중호우를 synoptic event, frontal event, mesohigh event로 분류하였다. 특히 돌발홍수는 주로 대류성

요란에 의해 발생하며, 하부대류권내 약한 상승운동과 조건부불안정에 의해 발생한 중규모 대류계는 중간층의 meso-α규모의 기압골이 요란을 발달시킨다고 하였다. 중규모 대류계는 하층 습윤공기의 강한 유입에 의해 발달하고, 난핵이 지상의 중규모 고기압 위에 위치한 중규모 저기압을 생성하여 그 결과 수렴이 강화되어 성숙된다고 하였다.

장마 전선의 종관 구조에 대한 연구는 장마기의 기단 배치, 다우장마 시의 종관 구조, 다우장마와 과우장마의 비교 등이 수행되었다. 이병설과 김성삼(1983)은 500 hPa 고도장과 강수량의 상관관계를 조사하여 종관기후학적으로 장마전선의 북쪽 기단이 대륙성 기단과 오호츠크해 기단임을 보였다. 김성삼 등(1983)은 다우장마 시의 공통 특징으로 상층 제트류의 강화와 하층 제트류의 존재, 남북류의 강화, 하층의 강한 수렴과 저기압성 상대소용돌이도, 상층의 발산과 고기압성 상대소용돌이도 등을 제시하였고, 장마전선의 호우는 하층 제트의 북쪽에, 상층 제트의 남쪽에서 발생함을 밝혔다. 박순웅 등(1986)은 장마전선에서 종관 규모의 열·수증기 수지를 분석하였고, 장마전선의 남쪽에 위치한 하층 제트류와 북쪽에 위치한 상층 제트류 사이에서 호우가 발생함을 보였다. Park et al.(1986), 이동규(1991), 소선섭 등(1995)은 한반도에서 발생한 집중호우 사례에 대한 종관적 특성 분석에서 티베트 상층 고기압과 북서태평양 하층 고기압의 강도와 위치가 한반도 강우와 밀접한 관련이 있음을 밝혔다. 양진관(1999)은 하층 불안정과 중상층간 기온의 강한 차등이류가 중규모 대류계를 발달시키며, 그 이류방향과 속도를 분석하여 수치모델 결과에서 표출되는 강수현상을 역학적으로 진단할 수 있다고 하였다.

최근에 한반도 장마전선에서 호우를 발생시키는 강수 시스템에 대한 사례 분석과 수치실험 연구가 활발히 진행되고 있다. Lee et al.(1998)은 하층 제트류의 전면에 있는 강한 수렴이 동진하는 요란에 의한 호우의 발달에 중요한 역할을 한다고 밝혔다. Sun et al.(2002)은 한반도 장마전선에서 강한 호우를 발생시킨 준정체 대류 밴드의 형성과 발달을 연구하였으며, 이 대류 밴드의 발달에 좋은 조건으로 대규모로 수렴하는 흐름, 준지균강제에 의한 대규모의 상승류, 강한 남서류에 의한 수분 수송, 대류권 중층에서 건조공기의 유입에 의한 대류불안정 강화 등을 제시하였다.

지금까지 선행 연구를 보면 집중호우에 대한 많은 연구들이 수행되어 왔으나 대부분 종관분석이고, 중규모 분석을 하더라도 저해상도로 분석한 연구들이 다수였다. 그러나 집중호우는 단시간에 국지적으로 많은 양의 강한 비가 내리는 중규모 기상현상으로 열대 저기압이나 중위도 저기압, 기단내의 불안정과 관련하여 발생한다. 홍수, 산사태 등의 많은 재해를 유발하고 한반도에는 국지적인 집중호우가 매년 발생하고 있어 국민들의 인명과 재산에 피해를 주고 있다. 이와 같은 국지적인 기상현상은 기존의 수치예보 체계에서 예측하기에는 많은 어려움이 존재한다. 따라서 이에 대응할 수 있는 초단기 예측 기술의 지속적인 개발이 필요하다.

초단기 기상분석 및 예측 시스템(Korea Local Analysis and Prediction System, KLAPS)은 대기 상태를 3차원적으로 매시간 분석하고, 이 분석장을 이용하여 매시간 예측을 수행함으로써 초단기 분석 및 예보에 활용하고 있다. 현업에서의 3차원 실황 분석 자료는 빠른 분석을 위하여 제한된 관측 자료가 활용되고 있으나 위험기상 및 빗나간 예보 사례분석용으로 예보관과 기상학계에서의 사용빈도가 점차 높아지는 실정이다.

KLAPS를 활용한 선행 연구들을 살펴보면 김용상 등(2002)은 고해상도 분석 자료는 그 자체로써 단시간 예보에 활용될 수 있고, 나아가서 수치예보 모델의 초기 입력 자료로 이용할 수 있다고 하였다. 조희영 등(2007년)은 계산시간이 짧고 새로운 관측 자료의 입력이 용이하며, 다양한 응용지수 산출이 가능하다는 KLAPS의 장점을 활용하여 2006년 지리산의 집중호우를 분석하였고, 김은희 등(2010년)은 뇌우의 발달 기구를 분석하기 위해 대기 상・하층 소용돌이도와 바람장, 연직 상승속도 등 기상 변수들의 특성을 살펴보기 위하여 KLAPS 재분석 자료를 사용하였다. 이용희 등(2010)은 장마전선의 영향으로 남해안에 집중호우가 발생한 2009년 7월 28일 사례에 대하여 국립기상연구소에서 생산한 고해상도 재분석 자료(1시간 간격, 5 km 해상도)를 활용하여 발달기구를 분석하기도 하였다. 또 호남지방의 안개 특성 및 예측성을 연구하기 위한 자료로 1시간마다 제공되는 KLAPS를 이용한 연구(유근기 등, 2007)도 있었다. KLAPS는 수치예보 모델 결과를 개선시키는 관측자료와 그렇지 못한 자료를 가려낼 수 있는 판단의 기준으로서도 이용될 수 있다(김용상 등, 2002). 이처럼 KLAPS를 활용하여 한반도에서 발생하는 여름철의 집중호우나 겨울철의 폭설과 같이 짧은 시간 동안에 발달 또는 소멸 과정을 거치는 중・소규모의 악기상 현상을 분석한 연구들이 많이 있었지만 역학지수를 활용하여 중규모 기상현상이나 역학적 특성을 분석한 국내 연구는 드물게 있다.

이 논문에서는 KLAPS 재분석 자료를 활용하여 관측 자료만으로 분석하기 어려운 역학 지수를 계산하여 2009년 7월 9일 발생한 호우사례를 중심으로 강수의 역학적 특징 및 기작을 이해하고자 한다. 특히 5 km 해상도라는 재분석 자료의 장점을 살려 중규모 분석에 주력하여 역학적 특징을 분석하고 순간수축률, 속도구배텐서, 헬리시티 등의 새로운 지수를 정의하고 활용하여 호우 사례의 발달기구를 분석하였다.

2. 자료 및 KLAPS 분석

2.1. 자료

우리나라에서 1981년 이후 25년간의 각 지점별 또는 지역별 1회 80 ㎜ 이상의 호우와 1회 150 ㎜ 이상의 호우 빈도를 분석한 결과에서 호우를 일으키는 기압계를 7가지(저기압, 정체전선, 한랭전선, 태풍, 열대기류수렴, 기단뇌우, 지형효과)로 분류하였다. 이에 의하면 우리나라의 호우빈도는 저기압 통과, 정체전선, 태풍 영향의 순이며, 이들의 합계가 전체의 약 77%를 차지하고 있다. 각 기압계가 호우를 일으키는 빈도와 시기를 정리하면, 우리나라의 호우 시기는 6월부터 9월까지로서 전체 호우빈도의 약 73%를 차지하고 있다(기상청, 2010).

2009년 여름철(6~8월)에 발생한 호우 사례를 Table 1에 나타내었다. 호우가 발생한 기간, 강수량이 많은 지역과 강수량, 호우 유형에 대해서 정리하였다. 강수가 많이 내린 1, 2위 지역을 기상대 위주로 기술하였는데 대류불안정에 의한 국지적 호우가 내린 경우는 자동기상관측 장비의 강수량을 사용하기도 하였다. 호우 사례는 총 17개로 유형을 살펴보면 장마전선 8개, 저기압 5개, 대류불안정 3개, 마지막으로 태풍이 온대저압부로 변질된 사례 1개이다. 특히 2009년 7월 호우의 대부분은 장마전선의 영향으로 발생한 것으로 나타났다.

Table 1. List of heavy rainfall cases in 2009.

Period	Rainfall amount (mm)	Type
2009.6.2~3	InJe 118.5, Seoul Kwanak 51.5	Convective instability
2009.6.9~10	Sogwipo 84.5, GeoJe 61.5	Low
2009.6.20	Kunsan 105.5, SeoCheon 103.5	Low with front
2009.6.21~22	Miryang 112.0, Masan 106.0	Low
2009.7.2	Seoul Gangseo 127.0, Guri 107.5	Convective instability
2009.7.6~7	Busan 310.0, Masan 268.0	Changma front
2009.7.9	Hongchon 229.5, Chunchon 200.5	Changma front
2009.7.12	Icheon 304.0, Suwon 272.5	Changma front
2009.7.13~14	Chunchon 201.0, Hongchon 193.5	Changma front
2009.7.15~16	Busan 354.0, Sunchon 288.0	Changma front
2009.7.17~19	Hongchon 144.6, Wonju 134.0	Low with front
2009.7.21	Andong 129.5, Mungyeong 92.5	Changma front
2009.7.23~24	Sogwipo 130.0, SeongSan 99.0	Changma front
2009.7.27	Sunchang 110.0, ImSil 47.0	Convective instability
2009.7.28~29	Wando 136.0, SeongSan 91.0	Changma front
2009.8.11~12	Tongduchon 355.5, MunSan 304.0	Typhoon
2009.8.26~27	Baengnyeong 132.5, Cheorwon 131.0	Low with front

2.2. KLAPS 재분석 체계

국립기상연구소는 미국 기상청과 국제협력을 통해 한반도에 적합한 국지분석 및 예측에 관한 시스템을 구축하기 위하여 LAPS를 도입하여 한반도 특성에 맞게 수정하고 추가된 관측 자료의 입력 체계 등을 개발하여 초단기 기상분석 및 예측 시스템(Korea Local Analysis and Prediction System, KLAPS)을 현업에 운영하고 있다.

KLAPS는 짧은 시간에 발생하여 소멸하는 위험기상에 대한 신속한 대응을 위하여 개발되었으며 정시를 기준으로 6분 이내에 관측 자료를 수집하여 3차원 분석을 실시하고, 10분 이내에 예보관에게 제공하여 한반도 주변의 실황을 빠르게 파악할 수 있도록 구성되어 있다.

그러나 KLAPS 분석은 현업 체계상에서 정교한 분석의 한계가 있으므로 이를 보완하기 위하여 사후에 가용한 모든 관측 자료를 집대성하여 정교한 재분석자료의 생산이 요구되어 왔다. 이러한 요구에 맞추어 2009년도 KLPAS 재분석 자료를 생산하였는데 KLAPS 재분석 자료는 1시간 간격으로 수평해상도 5 km의 3차원 분석 자료로서 시・공간 해상도면에서 현재까지 생산된 재분석자료 중에서 고해상도에 해당한다. 재분석의 일반적인 목적은 특정 모델과 특정 자료 동화 시스템을 이용하여 대기 상태를 격자체계로 현실에 가깝게 표현하는 것이라고 볼 수 있다. 매 시간 제공되고 있는 KLAPS 분석장은 다양한 관측 자료를 3차원으로 분석할 수 있도록 수집・분석하기 때문에 대기 상태를 이해하고 분석하는데 도움을 주고 있다. KLAPS 분석장의 장점 중 하나는 빠른 시간 안에 최대한의 관측 자료를 수집하여 3차원장으로 분석하는 것이다. 관측 시각과 수신 시각을 고려해야 하므로 분석 시각 이내에 수집된 자료만 사용할 수 있다. 따라서 수신이 늦은 GTS 자료 혹은 후처리 과정이 늦은 자료 등 일부 자료는 현업에서 분석된 분석장에 포함되지 않는 경우가 발생한다. 시간 제약으로 포함할 수 없었던 자료를 충분히 수집하여 분석한 재분석 자료는 보다 현실에 가깝게 모의된다.

KLAPS의 분석에 사용되는 자료는 정규적으로 관측이 이루어지는 AWS (Automatic Weather System), AMEDAS (Automated Meteorological Data Acquisition System), METAR (METeorological Aerodrome Report), 수직측풍장비, 레이더, 위성 자료와 비행 또는 발생 시에 관측되는 항공기 기상관측자료(Aircraft Meteorological Data Relay, AMDAR)와 낙뢰 자료이다(Table 2).

Table 2. Data used in KLAPS reanalysis.

Dataset	Observation interval	File format
AMDAR	Irregular	BUFR
AMEDAS	1 hour	BUFR
AWS	1 min	Binary
GTS	3 hour	Binary
KMA Windprofiler	10 min	BUFR
Lightning	Irregular	ASCII
Satellite	30 min	Binary
METAR	10 min	ASCII
RADAR	10 min	UF
JMA Windprofiler	1 hour	BUFR

그러나 실시간으로 분석된 분석장과 재분석장은 분석 부분과 예측 부분의 일부 차이점이 있다. 먼저 분석 부분을 살펴보면 기존 분석에서는 항공기 관측 자료의 경우 고도가 2800 m 이상인 관측 자료를 사용하였으나 재분석에서는 200 m 와 8000 m 사이의 자료를 사용하였다. 또한 2009년에 수행한 특별관측 자료를 사용하였다. 특별관측 지점은 울릉도, 이어도, 기상2000호, 해남지역이며 관측 시작 및 종료 시점은 Table 3에 나타내었다. 예측 부분의 경우 기존의 예측 시스템은 WRF v2.3을 기반으로 하고 있으나 재분석에서는 WRF v3.1.1을 기반으로 하였다. WRF 버전 변경에 따라 새롭게 제공되는 토지사용도 부분을 수정하였다. 기존에 한반도 산악지역을 사바나로 분류하고 있는 USGS (United States Geological Survey)를 사용하였으나, 현실에 가깝게 산악지역을 혼합림으로 구분하고 있는 MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer)로 변경하여 사용하였다.

Table 3. Intensive observing data employed in KLAPS reanalysis.

Station	Observation interval	Starting Time	Terminating Time
Ulleungdo	12 hour	2009-04-02_1200	2009-09-30_1200
Haenam	6 hour	2009-08-24_0000	2009-09-10_1200
Gisang 2000	6 hour	2009-08-24_1200	2009-09-06_1800
Ieodo	6 hour	2009-08-25_0600	2009-09-06_1800

재분석을 위한 모델경계장은 5 km 영역(Fig. 1)이며, ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 자료를 사용하여 재분석의 안정성 및 신뢰성 확보에 주력하였다. ECMWF 자료는 수평 해상도가 0.25°×0.25°이며, 6시간 간격 자료이다.

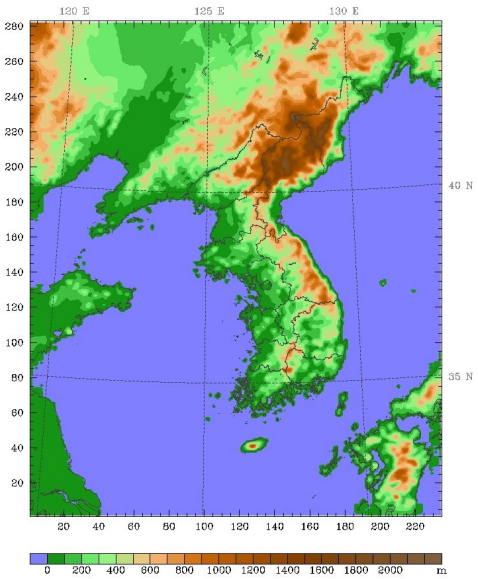

Fig. 1. Domain in KLAPS reanalysis and its topography.

Fig. 2는 KLAPS 재분석을 생산하기 위한 체계도를 나타낸 것이다. 5 km 영역에 대한 분석을 수행하기 위하여 WRF v3.1.1을 이용하여 24시간 간격으로 25시간 예측을 수행하였으며, 이 때 안정적인 배경장을 생산하기 위하여 WRF 기반의 모델 격자에 대해 분석완화법(Grid Four-Dimensional Data Assimilation, Grid FDDA)을 6시간 간격으로 적

용하여 ECMWF 모델 정보가 적분 기간 내에 충분히 반영되도록 설계하였다. 여기서 생산된 매시간 배경장을 이용하여 현업에서 사용하는 관측 자료와 2009년 특별관측 자료를 포함하여 매시간 분석장을 생산하였다.

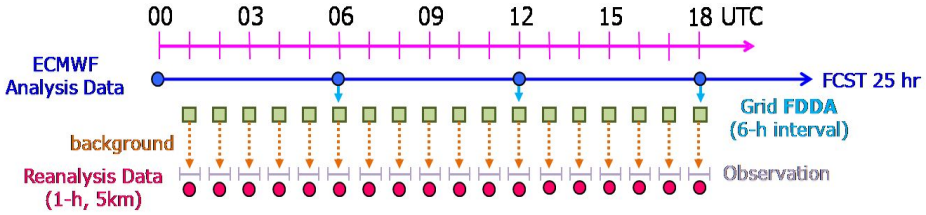

Fig. 2. Process of KLAPS reanalysis.

2.3. KLAPS 산출 역학지수

2.3.1. 순간수축률 (Instantaneous Contraction Rate, ICON)

순간수축률은 두 인접 공기덩이 사이 거리에서 순간 변화율을 나타낸다. 이것은 온도 또는 혼합비 같은 공기의 일부 특성에서 경도 증가를 수반하는 전선의 발달 과정과 연관되어 있다. 순간수축률(ICON)은 식 ICON=1/2(DEFres-DIV)에 따라 운동학적 변수들과 관련되어 있다. 여기서 DEFres는 합성변형이고, DIV는 발산이다. 만약 수축이 존재하는 지역에서 수증기 온도와 같은 공기 특성에 약한 경도를 가지고 있다면 ICON이 큰 지역에서는 전선이 발생할 가능성이 크다.

$$\text{순간수축률(ICON)}=\frac{DEF_{res}-DIV}{2} \tag{1}$$

2.3.2. 속도구배텐서(Horizontal Velocity Gradient Tensor Magnitude, MAG)

기류의 운동학적 특성은 수평 속도의 1차 편도함수와 관련되어 있다. 두 속도 요소(u, v)와 두 좌표계 방향(x, y)이 있기 때문에 직각좌표계에 4개의 운동학적 속성이 있다. 이런 4개 편도함수로부터 형성된 텐서(tensor)의 크기는 기류에서 결합된 속도 기울기와 같다. 4개 편도함수들은 좌표에 독립인(불변인) 세 가지 스칼라 양(발산(divergence, DIV), 와도(vorticity, VOR), 합성변형(resultant deformation, DEFres))을 만들기 위해 조합될 수 있다. 속도구배텐서(MAG)의 크기는 $(MAG)^2$이 $DIV^2+VOR^2+DEF_{res}^2$에 비례하는 것에 따라 세 가지 불변 운동학적 속성과 관련되어 있다. 기류에서 강한 경계부분은 일반적으로 하나 혹은 더 많은 운동학적 속성들에서 큰 값으로 나타난다. 이 매개변수는 중요한 기류의 경계부분을 구별하고 추적하는데 유용하다. 이 경계부분은 상승 온난 기류 또는 수분 기울기와 관련이 있을 수 있다.

$$MAG^2=DIV^2+VOR^2+DEF_{res}^2 \tag{2}$$

2.3.3. 헬리시티(Helicity, h_v)

헬리시티는 식(3)과 같이 바람 속도 벡터와 소용돌이도 벡터의 스칼라 곱으로 정의된다. 따라서 헬리시티는 회전방향에서 유체의 운동이나 운동방향에서 유체 회전의 특성을 묘사하고 소용돌이관의 휘감는 구조를 반영한다.

$$h_v = \vec{v} \bullet \vec{\omega} \tag{3}$$

여기서 $\vec{v}$는 3차원 바람 벡터이며, $\vec{\omega}$는 와도벡터이다.

식(3)을 다른 형태로 표현하면 식(4)에서와 같이 x, y, z 방향의 바람 성분 u, v, w와 각 방향의 소용돌이도 성분의 곱의 합으로 쓸 수 있다.

$$h_v = u(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}) + v(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}) + w(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}) \tag{4}$$

식(3)에서 정의된 양은 헬리시티 밀도(normalized helicity density, D_{nh})라 한다. 대개 헬리시티는 h_v의 부피적분으로 정의한다. 헬리시티 밀도를 정규화하면, 즉 상대적인 헬리시티 밀도는 아래와 같다.

$$D_{nh} = \frac{\vec{v} \bullet \vec{\omega}}{|\vec{v}||\vec{\omega}|} = \cos\alpha \tag{5}$$

α는 바람 속도 벡터와 와도 벡터 사이의 각도로 $-1 \le D_{nh} \le 1$ 이다. 두 벡터가 같은 방향으로 운동할 때 값이 1 이고, 반대 방향으로 운동할 때는 값이 -1이다. 그러므로 D_{nh}는 속도와 와도장의 일관성을 측정하고 헬리시티 밀도가 0 근처인 곳이 난류지역이다.

속도와 와도가 어느 곳에서나 평행할 때, 즉 D_{nh}는 최댓값일 때 식(6)이 된다.

$$\vec{\omega} = \lambda \vec{v} \tag{6}$$

λ는 상수이고 헬리시티의 부호를 결정한다. 마찬가지로 식(6)은 식(7)를 의미한다.

$$\vec{\omega} \cdot \vec{v} = 0 \tag{7}$$

만약 운동이 식(7)를 만족하면, 이 흐름은 Beltrami 흐름이라 한다.

헬리시티는 심각한 폭풍의 발생과 발달을 묘사하는 데에 중요한 물리적인 양이고 또한 폭풍예보에 유용한 파라미터이다. 헬리시티는 낮고 높은 고도에서 크고, 중고도에서 작다. 이 특징은 비선형 에너지 수송 활동을 자극하고 중고도에서 대류의 발달에 유리하다.

2.3.4. 슈퍼헬리시티(Superhelicity)

헬리시티의 변화는 다른 스케일 중에서 에너지 수송을 통제하고 대류 폭풍의 수명주기와 진화에 영향을 미친다. 슈퍼헬리시티는 헬리시티의 변화에 마찰 효과를 고려한 것으로 소용돌이도의 꼬임 구조를 반영한다. 만약 마찰이 있다면, 슈퍼헬리시티는 헬리시티의 시간 변화를 반영하는 것이다.

$$h_{\omega} = \omega \cdot \nabla \times \omega \tag{8}$$

이것은 와도장의 왜곡 구조를 반영한다. Beltrima 흐름에서 슈퍼헬리시티는 헬리시티, 엔트로피와 운동 에너지의 합성 수량이다. 슈퍼헬리시티는 양의 방향에서 음의 값으로 진행된다. 음의 슈퍼헬리시티는 폭풍 단계로 발달하고 있는 헬리시티 밀도 부피 통합의 증가에 유리하다. 이것은 헬리시티의 변화 경향과 동일하다. 슈퍼헬리시티는 양의 값이 되자마자 헬리시티의 증가를 억제하는 반면 대류 세포는 성숙 단계로 들어간다. 따라서 슈퍼헬리시티는 대류 폭풍의 발달 과정에서 헬리시티의 조정을 이해하는데 도움이 될 수 있고 대류 폭풍의 발달 단계를 표시하는데 좋은 지시자로 사용할 수 있다.

3. 결 과

3.1. 2009년 7월 기상특성

먼저 2009년 7월의 기상특성을 살펴보면 7월 상순 전반에는 우리나라 북쪽으로 상층 기압골이 위치하여 대기가 불안정한 가운데 지역에 따라 소나기가 내린 날이 많았다. 상순 후반부터 중순까지 북태평양 고기압이 확장하면서 그 가장자리를 따라 다량의 수증기가 유입되었고, 상층 한기와 만나 전국적으로 집중호우를 동반한 많은 비가 자주 내렸다. 하순에는 오호츠크해 고기압이 확장하면서 동풍류가 유입되었고, 상층 한기가 남하하면서 동해안 지방을 중심으로 전국적인 저온 현상이 나타났다. 강수량은 발달한 남서류에 의한 많은 수증기 공급과 중국에서 주기적으로 발달한 저기압이 동진하면서 우리나라 부근에서 장마전선을 활성화시켜 평년보다 많았으며, 국지성 집중호우도 잦았다.

7월의 일별로 알아보면 1～4일에는 대기불안정에 의한 소나기가 자주 발생하였으며, 이후에는 중국에서 발달한 저기압과 그 뒤로 이어지는 장마전선의 영향으로 7일에는 남부지방, 9일, 12일과 14일에는 중부지방을 중심으로 집중호우 현상이 있었다. 15~16일은 남부지방, 17～18일에는 중부지방, 19일, 21일, 24～25일과 28～29일에는 남부지방에 다소 많은 비가 내렸다(Fig. 3). 특히 마산(7일 268.0 mm), 이천(12일 304.0 mm)에서 관측 이래 일강수량 최다 극값 1위를 경신하였으며, 6개 지역(마산 102.0 mm/16일, 안동 63.5 mm/21일 등)에서 관측 이래 1시간최다강수량 극값 1위를 경신하였다. 또한 마산, 이천을 포함한 4개 지역(부산 310.0 mm/7일, 진도 206.0 mm/15일)에서 관측 이래 7월 일강수량 최다 극값 1위를, 8개 지역(부산 90.0 mm/16일, 장흥 70.5 mm/15일 등)에서 7월 1시간최다강수량 극값 1위를 경신하였다.

7월에 주기적으로 잦은 비가 내린 원인은 첫째, 북태평양 고기압이 남해상에서 동서방향으로 발달하여 우리나라로 확장하면서 전형적인 장마전선이 동서로 형성된 가운데 북태평양 고기압 가장자리를 따라 다량의 습기를 포함한 남서류가 유입되어 장마전선의 활동을 크게 강화시켰기 때문이다. 또한 몽골 남쪽에서 연해주로 상층 저기압이 유지되면서 주기적으로 찬 공기가 북서풍을 따라 남하하여 서해상으로 유입되었고, 이로 인해 장마전선이 활성화되었으며 전선상에서 발달하는 저기압의 영향으로 주기적인 집중호우가 발생하였다. 중국 남해상의 열대저압부의 활동이 활발해지면서 다량의 수증기를 공급하는 역할을 담당하였다.

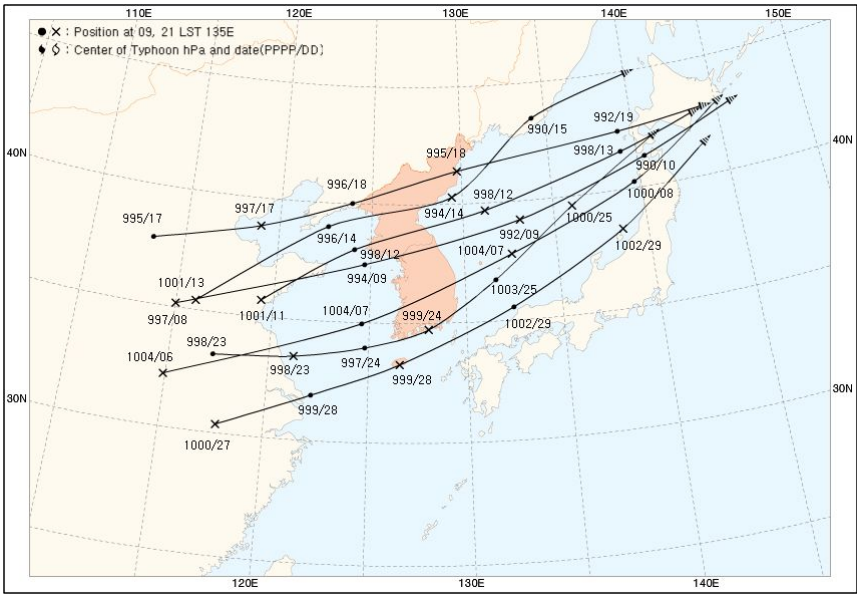

Fig. 3. Low system track passing over the Korean peninsula in July, 2009.

2009년 여름철 전국 평균 강수량은 780.8 ㎜ (전국 평균 평년비 111.6%)로 평년과 비슷하였다(Fig. 4-5). 7월 상순에는 전반에 우리나라 북쪽으로 상층 기압골이 위치하면서 대기가 불안정한 가운데 지역에 따라 소나기가 내린 날이 많았으며, 후반에는 북상하는 장마전선의 영향을 주로 받았다. 그로 인해 7일에는 남부지방을 중심으로, 9일에는 중부지방을 중심으로 집중호우가 내려 상순의 강수량은 평년보다 많았다(전국 평균 평년비 190.6%). 중순에는 장마전선 및 장마전선상에서 발달한 저기압의 영향을 자주 받아 흐리고 비가 오는 날이 많았으며, 12일과 14일에는 중부지방을 중심으로, 15～16일은 남부지방을 중심으로 집중호우가 내렸다. 17～18일에는 서울·경기도 및 강원 영서 지방에, 19일에는 남부 일부지방에 다소 많은 비가 내려 중순의 강수량은 평년보다 많았다(전국 평균 평년비 268.3%). 하순에는 오호츠크해 고기압의 확장과 더불어 장마전선이 주로 남해상에 위치하여 21일, 24～25일, 28～29일에 남부지방에 다소 많은 비가 내렸고, 하순의 강수량은 평년과 비슷하였다(전국 평균 평년비 90.2%). 월강수량은 201.1 ㎜ (제주)～886.1 ㎜ (부산)의 분포(전국 평균 평년비 186.2%)로 평년보다 많았으며, 1973년 이후 2번째로 많은 강수량을 기록하였다(1위 2006년 490.6 ㎜).

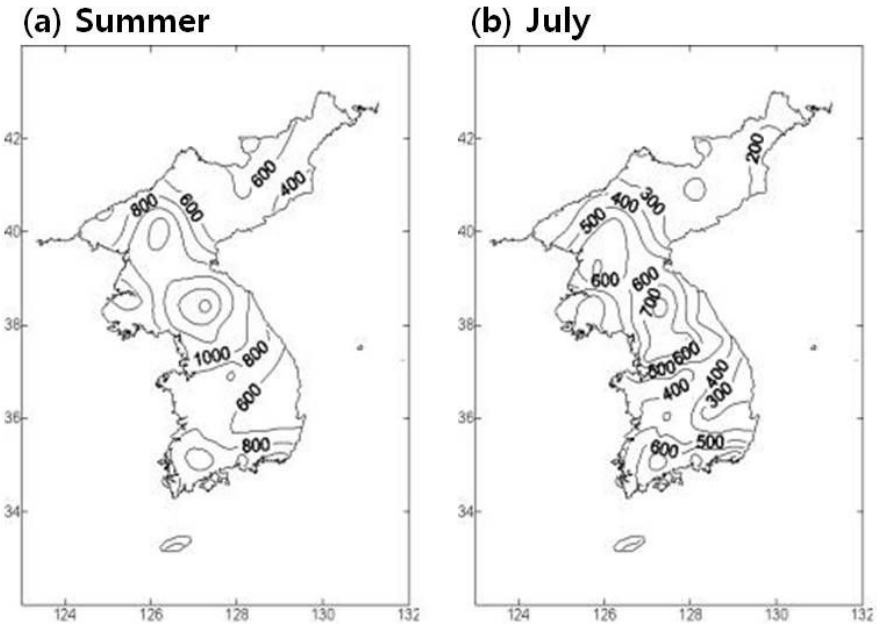

Fig. 4. Rainfall distribution of (a) total summer and (b) July in 2009.

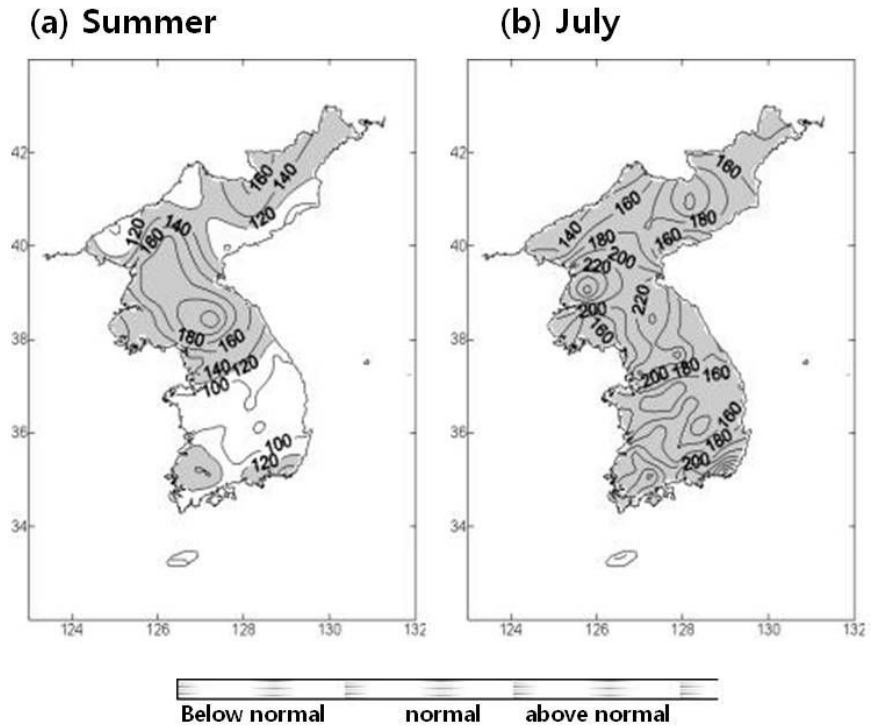

Fig. 5. Rainfall anomaly distribution of (a) summer and (b) July in 2009.

3.2. 호우사례의 종관기상특성

이 연구에서 살펴 본 2009년 7월 9일 사례는 저기압을 동반한 장마전선이 중국 산둥반도에서 우리나라 중부지방을 지나 일본열도 방향으로 걸쳐 있는 상황에서 서쪽으로부터 진행되어 중부지방에 놓이는 장마전선상에서 발달한 저기압에 의해 집중호우가 내렸다. 이 사례는 짧은 시간, 좁은 영역에 발생한 강한 강우로 중부지역에 띠 모양을 형성한 것으로 저기압이 점차 동해상으로 빠져나가면서 남하한 장마전선은 남해상에 위치하면서 남부지방에도 5 mm 미만의 약한 강우가 있었다.

이 사례의 일강수량 분포 특징을 살펴보면, 서울을 포함한 경기 지역과 강원도 지역에서 2009년 7월 9일에 150 mm 이상의 일강수량을 기록하였다. 이 날 홍천 229.5 mm, 춘천 200.5 mm, 서울 190.0 mm, 양평 184.0 mm, 동두천 160.5 mm, 인제 150.0 mm 등 주로 중부지방에 강수가 집중적으로 내렸다.

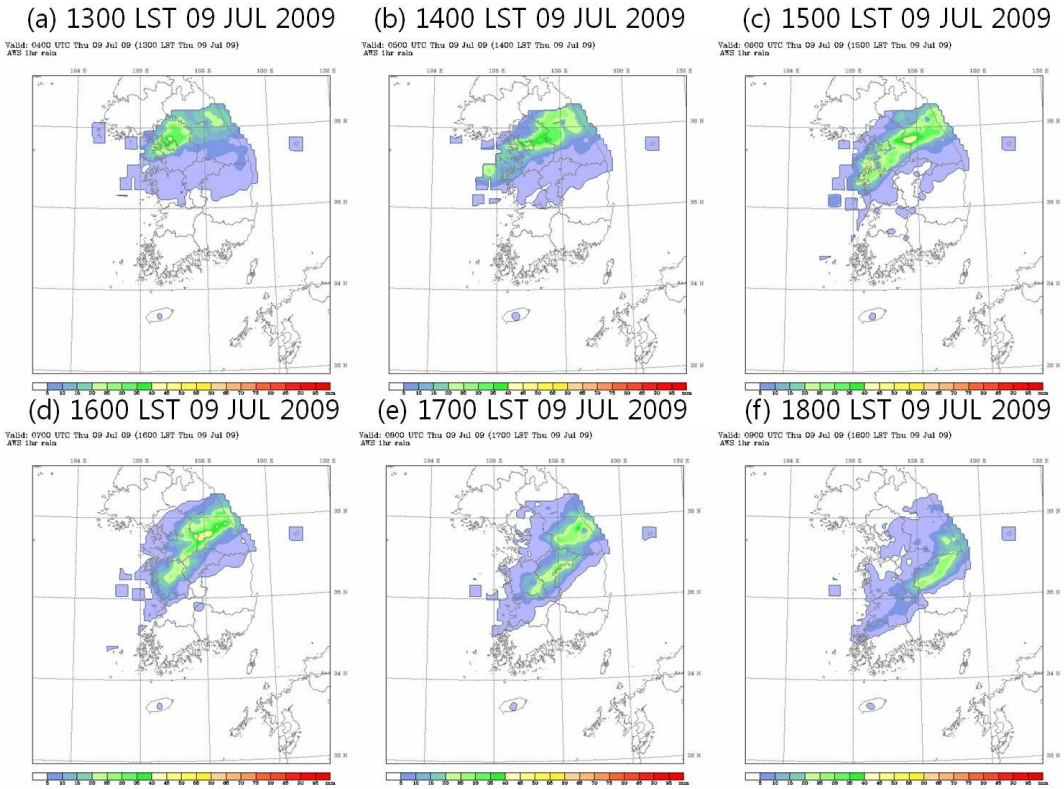

Fig. 6. Hourly rainfall distribution on July 9, 2009 : (a) 1300 LST, (b) 1400 LST, (c) 1500 LST, (d) 1600 LST, (e) 1700 LST, and (f) 1800 LST.

Fig. 6은 2009년 7월 9일 1300-1800 LST의 1시간누적 강수량을 나타낸 것이다. Fig. 6a-c를 보면 시간강우량이 동두천 33.5 mm, 서울 39.0 mm, 대관령 35.5 mm 등 서울, 경기 및 강원 지역에서 1300-1500 LST에 30 mm 이상의 강한 강수가 발생하였다. 중부지방에 집중적으로 내리는 강수는 1600 LST에 차츰 서울 지역을 벗어나 남진하는 모습을 보였고(Fig. 6d), 1700 LST부터 서울, 경기 및 강원 지역에 걸쳐져 있던 강수 띠가 점차 남하하여 충북 지역에 영향을 주었다(Fig. 6e). Fig. 6f에서 1800 LST에는 경북 북부 지역에 20 mm 이상의 강한 강수대가 나타나며, 이 강수대는 이후 지속적으로 남동진하고 있음을 보여주었다.

Fig. 7에서 지상일기도를 보면 7월 9일 03 LST에 산둥반도 부근에 995 hPa의 저기압이 위치해 있고, 경기만으로 기압골이 들어오기 시작하였다(Fig. 7a). 7월 9일 09 LST에는 서해상에 991 hPa의 저기압이 위치하였다. 이 저기압은 서해를 지나면서 발달하였으며 경기만 지역으로 진입하였다(Fig. 7b).

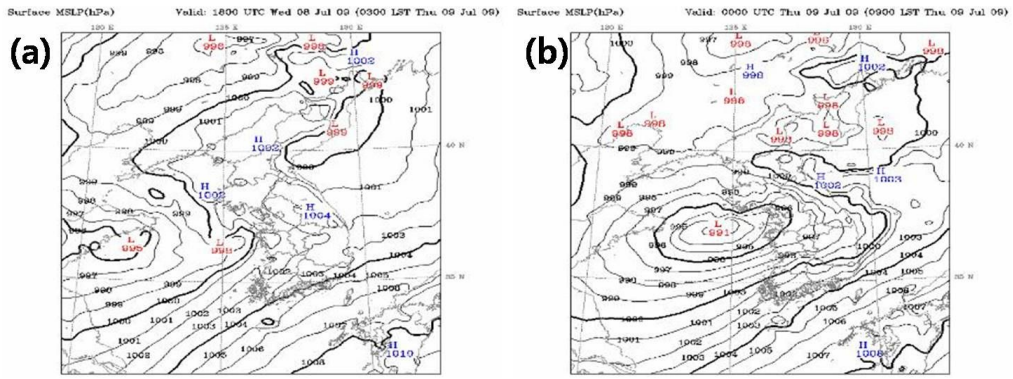

Fig. 7. Surface weather chart at (a) 0300 LST and (b) 0900 LST on July 9, 2009.

Fig. 8에서 850 hPa과 700 hPa 일기도는 지상 저기압에 대응하여 산둥반도 부근에 저기압이 있었다(Fig. 8a-b). 산둥반도의 기압골이 접근하여 서해중부해상에 위치하였고 장마전선이 북상하여 중부지방에 위치하고 있었다. 우리나라 부근으로 기압경도가 강화되면서 남서류가 강하게 유입되어 불안정이 강해졌다. 500 hPa 상층 일기도에서 우리나라는 5820 gpm선이 제주도 부근에 위치하였고, 북한 지방에 고도골이 형성되었다(Fig. 8c).

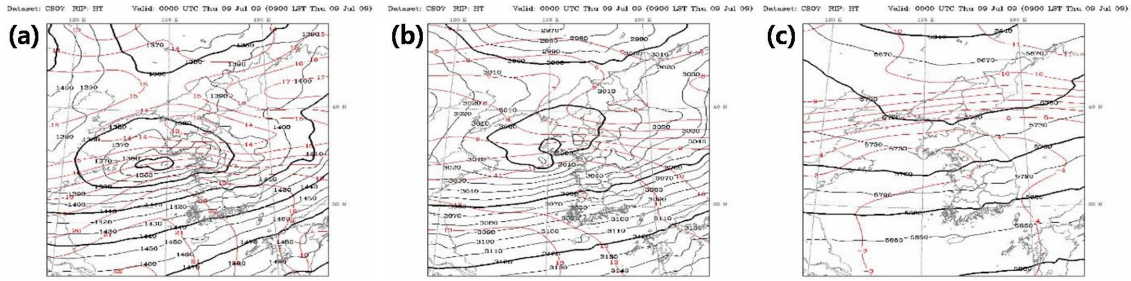

Fig. 8. Geopotential height (unit:gpm) and temperature (unit:℃) field at 0900 LST on July 9, 2009 : (a) 850 hPa, (b) 700 hPa, and (c) 500 hPa.

850 hPa 레이더 반사도와 MTSAT 영상에서 7월 9일 0900 LST에는 국지적으로 35 dBZ 이상의 값이 나타나기도 하였으며, 서해안 지역과 경기 북부지역에 30~35 dBZ 이상의 강한 강수에코가 발생하고 있었다. 1500 LST에는 충남 북부지역에서 강원도 북부지역까지 띠 모양의 에코가 나타나고 있으며 최고 50 mm의 강수량을 보였다. 이 강수 에코는 동북동진하면서 수도권과 강원도 지방에 강한 비를 내렸다(Fig. 9).

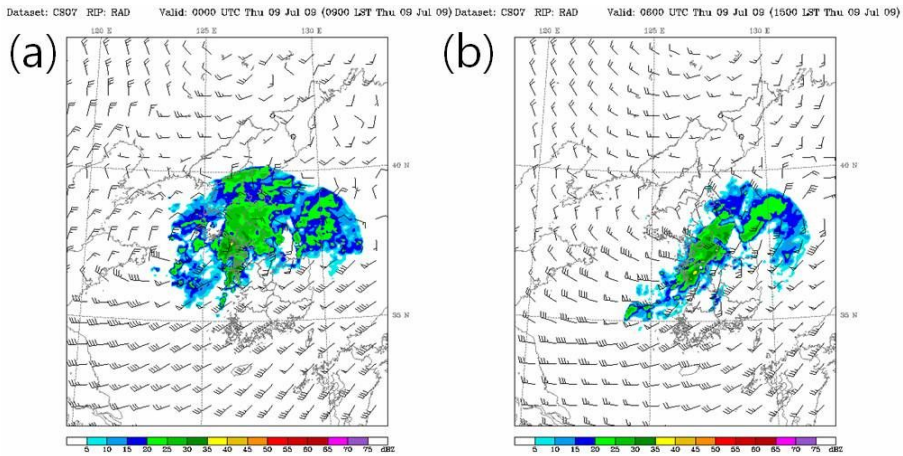

Fig. 9. 850 hPa Reflectivity (unit:dBZ) and wind (unit:m/s) distribution obtained from radar at (a) 0900 LST and (b) 1500 LST on July 9, 2009.

Fig. 10은 한반도 영역에 대한 1시간 간격의 MTSAT 위성영상 자료이다. 중부지방에 집중호우가 내렸던 구름의 발달을 파악하기 위해 1시간 간격의 자료를 분석하였다. 9일 09 LST에 한반도 전역에 구름대가 동서로 위치하고 있었다. 내륙에 밝은 영역을 보이며, 여러 개의 호우 세포가 강하게 발달하고 있음을 알 수 있었다. 점차 장마전선 위에서 발달한 중규모 저기압이 발달하면서 빠른 속도로 남동진하였다. 이러한 호우 세포들이 한반도 중부지방을 중심으로 강한 비구름이 발달하였다.

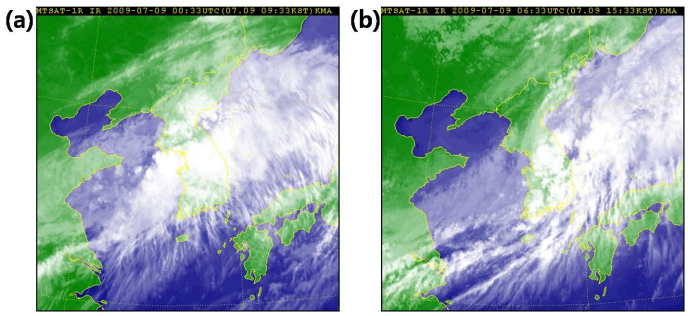

Fig. 10. Satellite imageries from MTSAT IR at (a) 0900 LST and (b) 1500 LST on July 9, 2009.

Fig. 11은 2009년 7월 9일 1300-1800 LST까지 850 hPa 333 K 이상 상당온위를 나타낸 것이다. Fig. 11a-b에서는 남부지방이 주변에 비해 342K 이상의 높은 상당온위역이 나타났다. 1500-1600 LST에 333 K 이상의 상당온위가 북한지방까지 나타나고 있어 우리나라는 고온습윤한 기단의 영향을 받는 것으로 나타났다(Fig. 11c-d). 1700 LST 이후 333 K 이상의 상당온위는 점차 남동진하여 강수 영향권이 중부지방에서 멀어졌다(Fig. 11e-f). 상당온위는 대기의 습도 분포를 파악하는 데 사용하는 변수 중의 하나로 습윤공기의 위치 에너지를 나타낸 것이므로 공기의 연직 운동의 잠재성을 진단할 수 있어 안정도, 대류 등을 분석할 때 효과적이다.

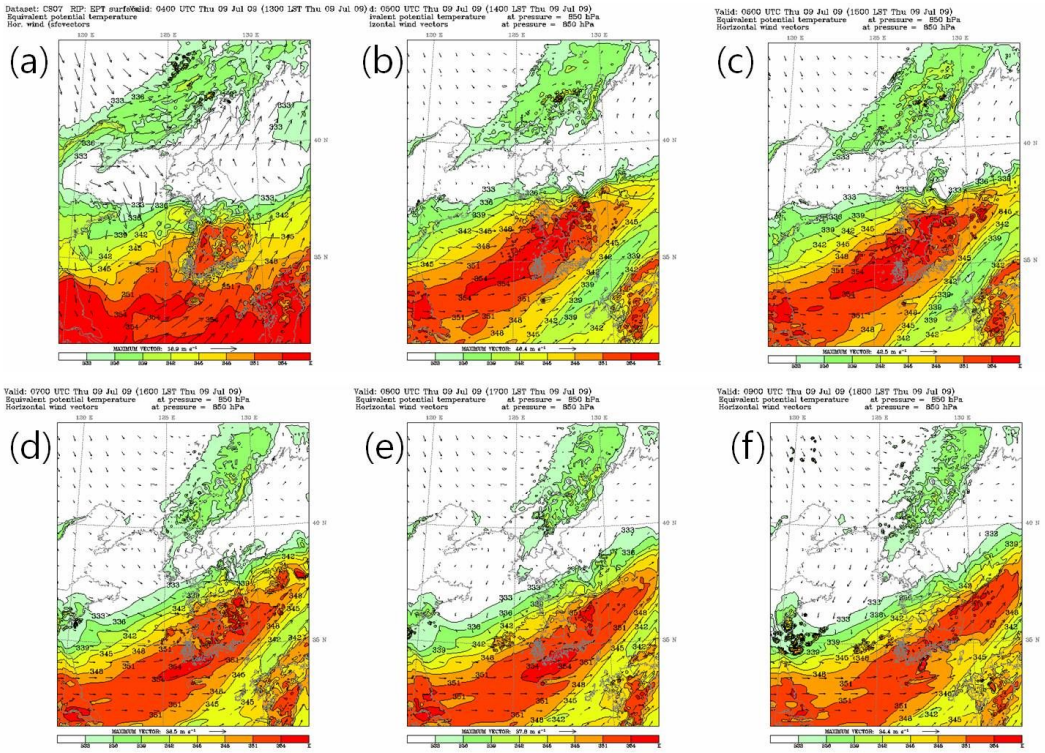

Fig. 11. Equivalent potential temperature (shading) and wind (vector) distribution at 850 hPa on July 9, 2009 : (a) 1300 LST, (b) 1400 LST, (c) 1500 LST, (d) 1600 LST, (e) 1700 LST, and (f) 1800 LST.

바람을 분해하면 회전 성분을 나타내는 유선함수(stream function)와 수렴·발산을 나타내는 속도퍼텐셜(velocity potential) 성분으로 구분할 수 있다. 속도퍼텐셜은 약 500 hPa에서 거의 0인 값을 나타내어 500 hPa를 비발산 고도라고 하기도 한다. 또한 이 값이 음인 경우는 발산을 나타내며, 양인 경우는 주변공기가 수렴하고 있음을 보여준다. 유선함수 값이 양수인 경우는 고기압성(시계방향) 회전을 나타내며, 음수인 경우는 저기압성(반시계 방향) 회전을 의미한다. 따라서 유선함수와 속도퍼텐셜을 구분해서 살펴봄으로써 바람의 분포 및 특성을 보다 쉽게 살펴볼 수 있다.

유선분석으로 구한 수렴축과 풍상측의 지형이 현저한 산맥이나 해안지방에 습설을 수렴하거나 상승운동을 촉진시키는 지형에서 집중호우 가능성이 크다(광주지방기상청, 2000). 850 hPa의 유선도를 보면 중북부 지역에 바람이 수렴하고 있으며, 서해 중·남부해상에서 우리나라 중부와 남부지방으로 하층제트가 형성되어 남서기류가 강하게 유입되고 있다(Fig. 12).

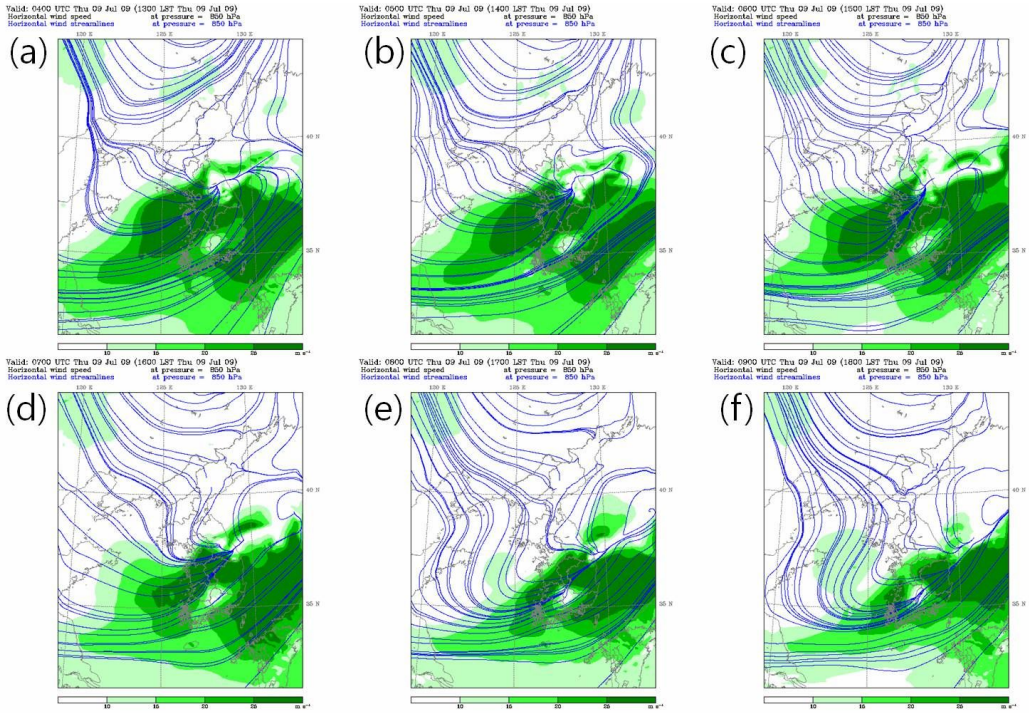

Fig. 12. The same as Fig. 11 except for wind streamline and speed.

하층 바람의 수렴과 강풍대의 존재 및 위치를 자세히 살펴보기 위해 850 hPa, 350 hPa의 속도퍼텐셜(Velocity Potential)과 풍속을 분석하였다. 상하층제트는 850 hPa에서 풍속 12.5 m/s 이상, 350 hPa에서 25 m/s 이상인 영역이다. 상・하층의 제트기류가 교차하면서 하층에서 수렴, 상층에서 발산이 있는 곳의 상승기류가 강하면 호우 가능성이 커지고 하층 제트기류에 의한 습윤공기가 북서쪽에서는 상층 제트기류에 의한 건조공기가 유입될 때 그 일치점에서는 호우가 발생한다.

Fig. 13은 2009년 7월 9일 1300-1800 LST의 850 hPa 속도퍼텐셜(음영)과 풍속장(붉은색 실선)을 나타냈다. 속도퍼텐셜은 양의 값을 가지면 수렴하고 음의 값을 가지면 발산이 일어날 가능성이 높다. Fig. 13a-c에서 1300, 1400, 1500 LST에 850 hPa 등압면에서 $3.5\times10^{2}m^{2}s^{-2}$ 이상의 강한 양의 값을 가진 수렴구역이 중부지역에 위치하고 있으며, 시간에 따라 강도는 약화되었다. 이 수렴구역은 1600 LST를 기점으로 점차 약해져 1700-1800 LST에 속도퍼텐셜의 양의 값이 동해상에서 나타났으며, 한반도 서쪽에서부터 음의 영역이 나타났다(Fig. 13d-f).

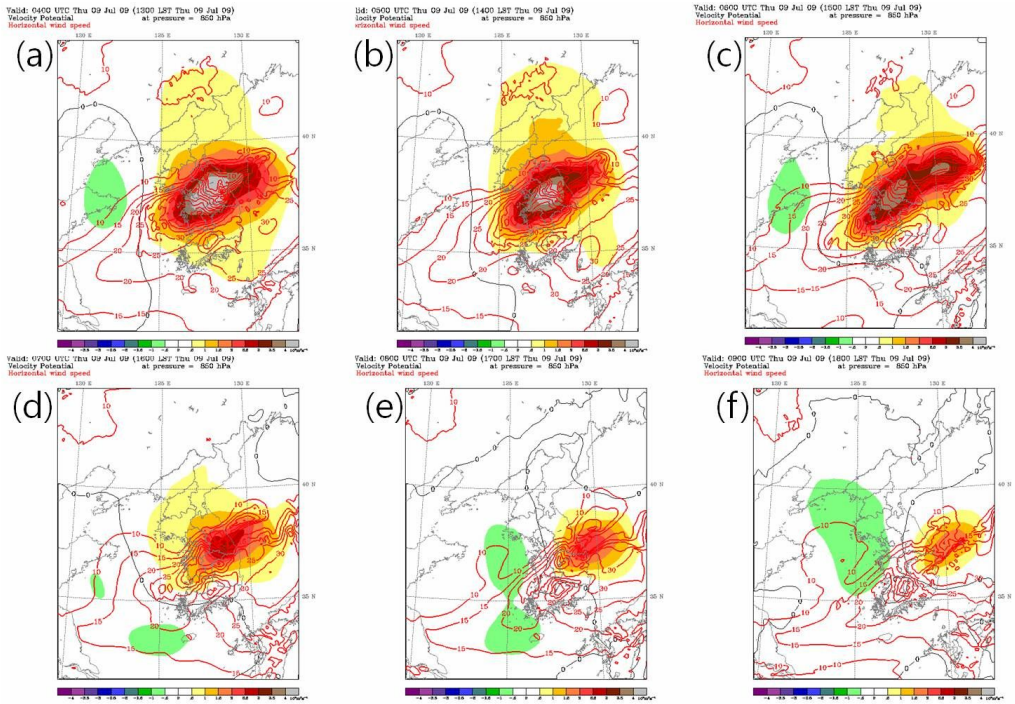

Fig. 13. The same as Fig. 11 except for velocity potential (shading) and wind speed (solid line).

Fig.14는 2009년 7월 9일 1300-1800 LST의 속도퍼텐셜(음영)과 풍속장(붉은색 실선)을 나타내었다. Fig. 14a-c를 보면 1300-1500 LST에 350 hPa 등압면에서 속도퍼텐셜은 음의 영역이 중부지방에 위치하였으며, 또한 1600 LST에도 중부지방에 음의 속도퍼텐셜 영역으로 발산하고 있음을 알 수 있었다(Fig. 14d). 1700 LST 이후 발산의 강도는 점차 약해지며, 1800 LST에 동해상에서 음의 영역이 나타났다(Fig. 14e-f).

이것으로 850 hPa 고도에서 하층 수렴, 350 hPa 고도에서 상층발산의 구조로서 상·하층의 연직 운동이 강하게 일어나 키가 큰 저기압성 시스템으로 강수가 많이 발생한 것을 알 수 있었다.

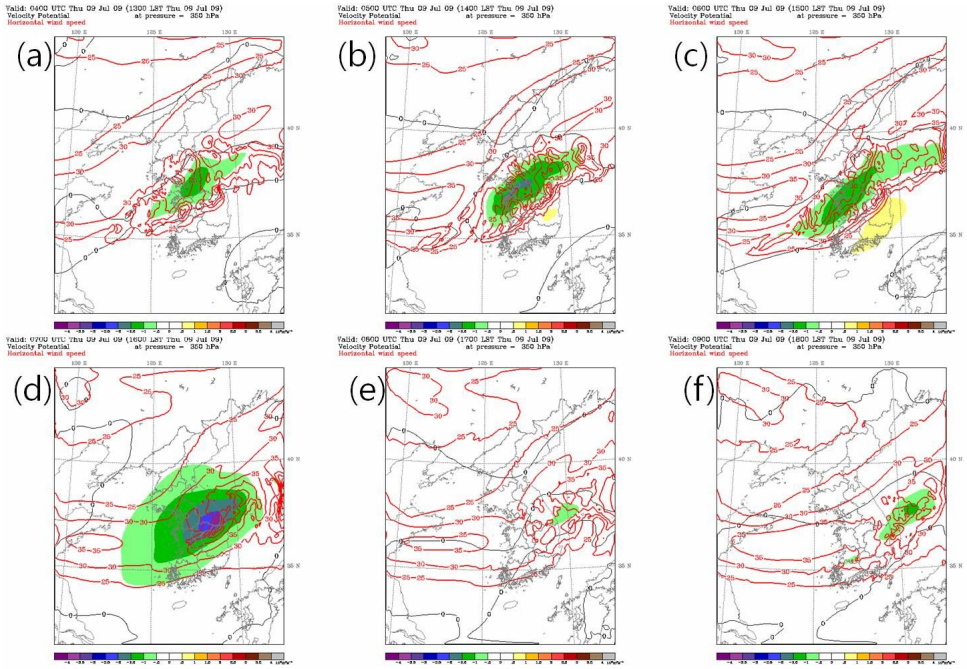

Fig. 14. The same as Fig. 13 except for 350 hPa.

Fig. 15는 Fig. 16에 표시된 지역에 대하여 유선함수와 속도퍼텐셜의 연직단면도를 나타낸 것이다.

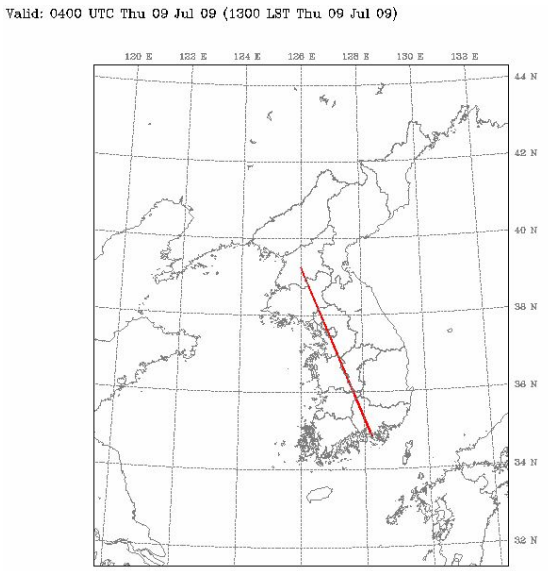

Fig. 15. Line for vertical cross section.

Fig. 16은 7월 9일 5 LST부터 20 LST까지 1시간 간격으로 나타낸 것이다. 먼저 유선함수를 살펴보면 상층에서는 고기압성 회전이 분포하고 하층은 저기압성 회전이 나타났다. 특히 하층지역은 속도퍼텐셜 값이 양의 값을 나타내어 수렴이 발생하고 있음을 알 수 있었다. 저기압성 회전과 수렴 구간이 시간의 흐름에 따라 저기압성 회전 강도가 강화되며 점차 남진하는 것을 나타내었다.

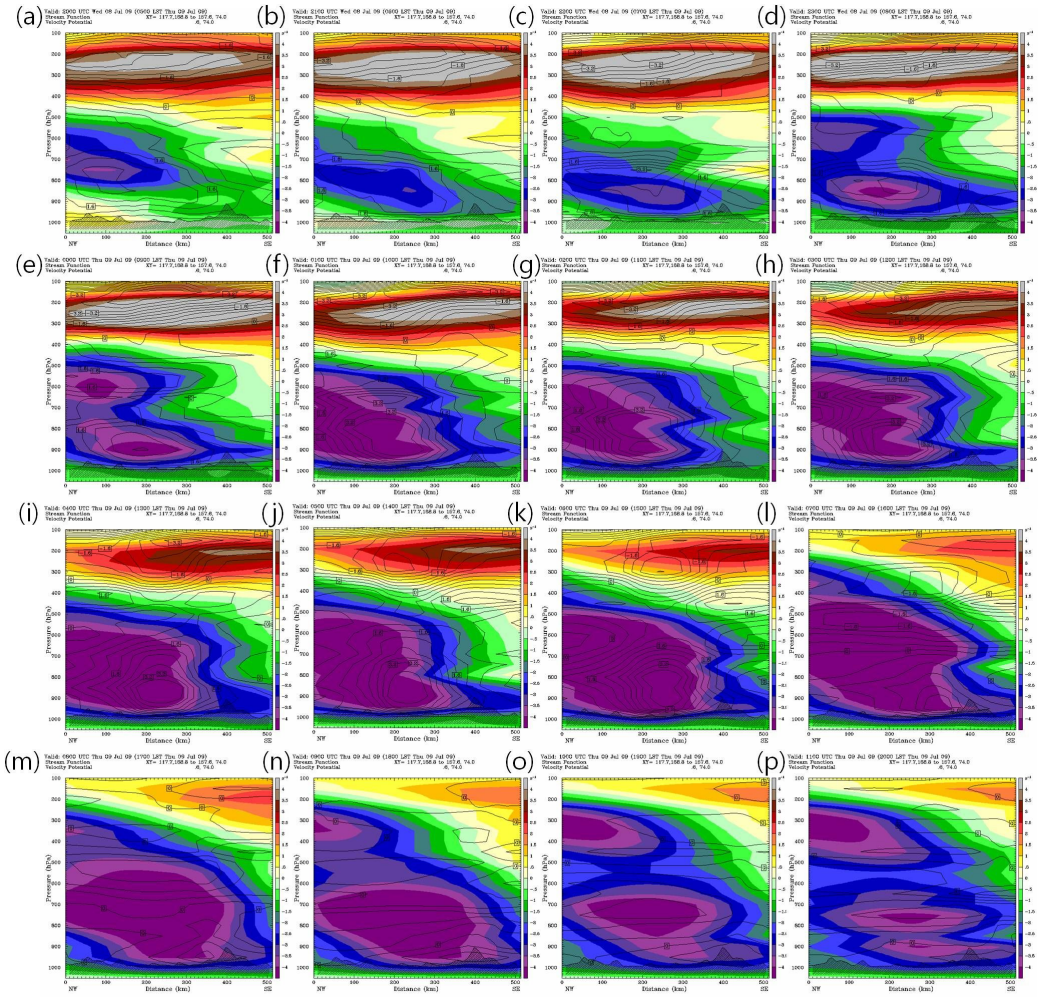

Fig. 16. Hourly stream function (shading) and velocity potential (contour) from 0500 LST to 2000 LST on July 9, 2009.

3.3 역학지수를 활용한 중규모 기상특성

위험기상 현상은 서로 다른 기단의 경계를 따라 종종 발생한다. 전선은 기단의 가장자리에서 기류가 수렴과 변형을 할 때 등온선이 조밀하게 모이는 흐름으로 서로 다른 기단 경계의 대표적인 예이다. 전선 발생을 진단하기 위한 여러 운동학적인 표현식 중에서 순간수축률과 속도구배텐서에 대해서 살펴보았다.

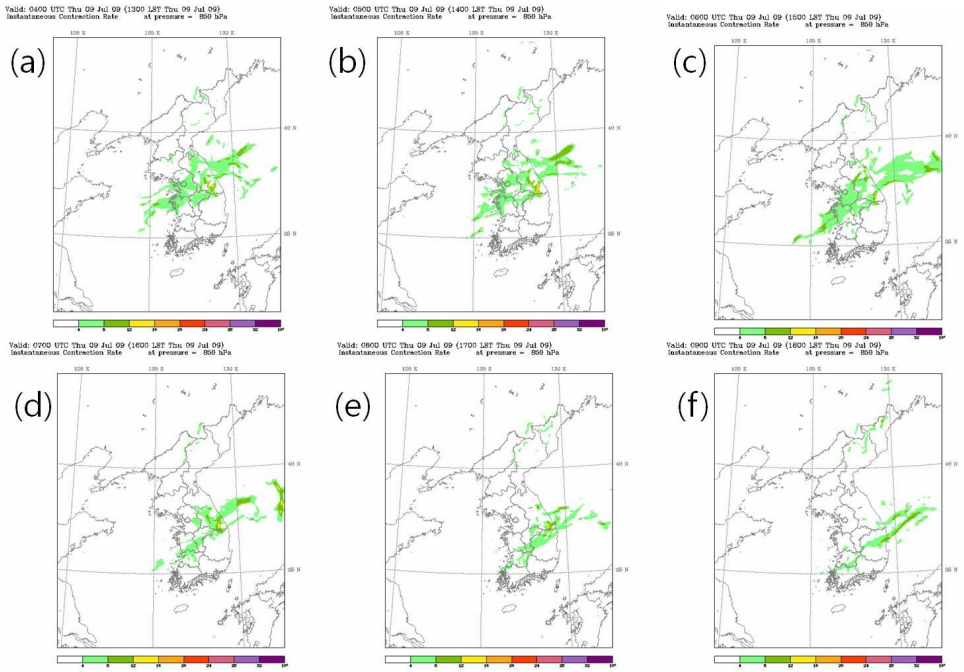

Fig. 17. Instantaneous contraction rate at 850 hPa on July 9, 2009 : (a) 1300 LST, (b) 1400 LST, (c) 1500 LST, (d) 1600 LST, (e) 1700 LST, and (f) 1800 LST.

Fig. 17은 850 hPa의 순간수축률을 나타낸 것으로 Fig. 11의 상당온위와 바람분포에서 살펴보았듯이 서울, 경기지역 및 강원 지역에 공기가 수렴하는 지역과 일치하고 있었다. Fig. 17a-c에서 1300-1500 LST에 순간수축률은 강수 분포와 마찬가지로 남서에서 북동방향으로 비스듬하게 서울, 경기 및 강원 지역에 집중된다. Fig. 17d-f는 1600 LST 이후 순간수축률이 점차 남하하는 것을 나타내는데 이것은 남부지방으로 강수대가 이동하는 것과 일치하였다.

순간수출률은 인접한 두 공기 입자 사이의 거리의 순간 변화율을 나타내는 값이다. 이 지수의 값이 큰 지역은 수증기 온도와 같은 공기 특성의 약한 변화가 있다면 전선이 존재할 수 있음을 알려준다. 이 사례에서 각각의 시간대에 대하여 시간당 강수량과 비교해 볼 때 강수가 있는 지역과 강수가 없는 지역에 대한 경계를 상대적으로 잘 나타내었다.

Fig. 18은 1300-1800 LST의 850 hPa 속도구배텐서를 나타낸다. 속도구배텐서는 합성변형장과 발산항이 공통으로 사용되기 때문에 순간수축률과 매우 유사한 패턴을 보인다. Fig. 18a-c는 중부지방에 위치해 있는 강수대와 속도구배텐서의 영역이 일치함을 보여주었다. 하지만 속도구배텐서의 높은 값은 강수가 집중되는 지역 전면에 위치하였는데 이는 지형적인 요인으로 인한 것이다. Fig. 18d-f에서 강수띠의 이동과 동일하게 속도구배텐서가 이동하였다. 따라서 속도구배텐서의 경우는 한반도 지역에 강수가 있는 지역과 강수가 없는 지역에 대한 값이 차이가 있음을 알 수 있었다.

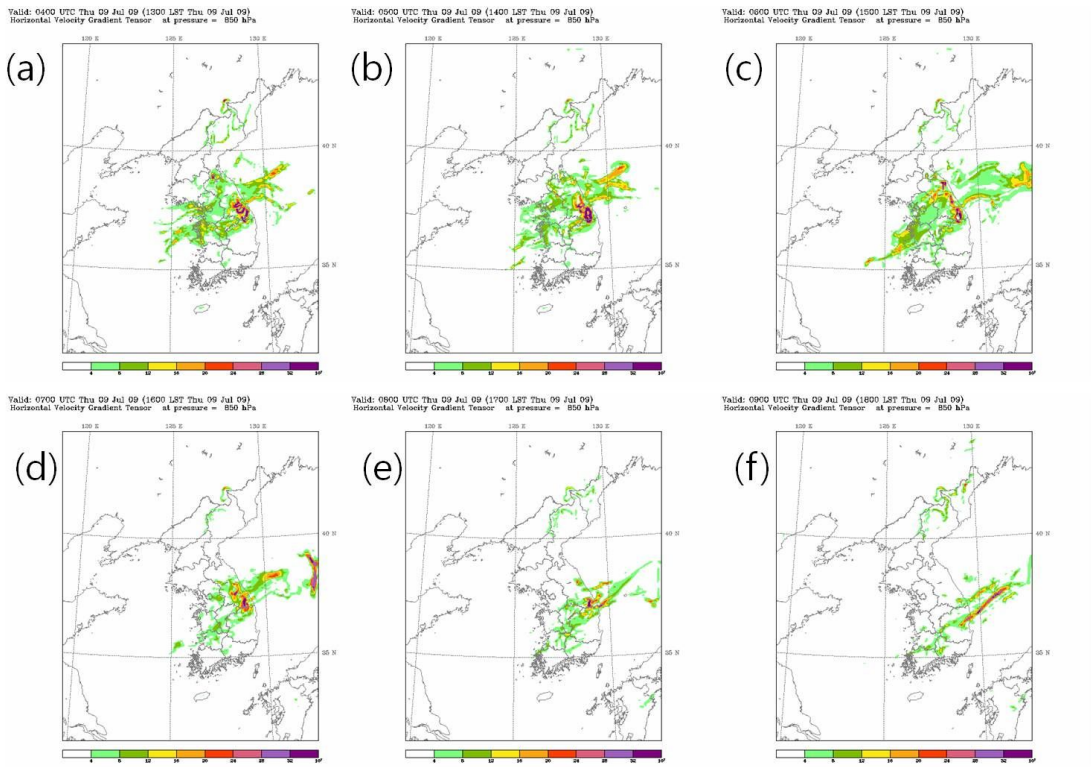

Fig. 18. The same as Fig. 17 except for horizontal velocity gradient tenor magnitude.

집중 호우 혹은 강한 바람과 같은 위험기상 현상은 불안정한 환경 속에서 발달하며 강한 회전과 상승 운동에 의해 시스템의 전개가 이루어진다(Fei Shiqiang and Zhemin, 2001). 또한 관측과 수치모의 자료로부터 생명력이 긴 폭풍은 회전하면서 변화하는 환경에서 자주 나타난다(Davies-Jone, 1984; Weisman and Klemp, 1984). 이러한 특징으로부터 폭풍의 구조를 이해하기 위해 폭풍의 연직속도와 와도 그리고 회전성분과 관련된 헬리시티를 분석하였다. 헬리시티는 위험한 폭풍의 생성과 발달을 설명하는데 중요한 물리량으로 폭풍 예측에 유용한 변수이다(Lilly, 1986; Elting, 1985; Tan and Wu, 1994). 또한 헬리시티 밀도(normalized helicity density)는 바람 벡터와 소용돌이도 벡터 사이의 각도를 코사인으로 계산한 값을 나타낸다. 이 두 벡터가 같은 방향일 때는 1이 되고, 반대 방향일 때는 -1이 된다. 또한 0인 경우는 두 벡터의 각도가 직각인 경우로 난류지역으로 생각할 수 있으며, 이러한 조건을 만족하는 경우가 벨트라미 흐름(Beltrami flow)이다(Elting, 1985; Lilly, 1986). 토네이도가 많이 발생하는 날은 헬리시티의 값이 높은 것이 특징인데, 이것은 대기 상태에서 헬리시티의 높은 값이 토네이도 발생 가능성을 보다 크게 한다는 것을 암시한다(Kim et al., 2008).

헬리시티가 음에서 양으로 변화하는 지점에 위치소용돌이도(Potential Velocity, PV)가 1.6 PVU (1 PVU = $10^{-6}m^2Kkg^{-1}s^{-1}$)인 지점이 일치하고 있음을 보여준다. PV가 1.6 PVU인 지점은 대류권계면을 나타낸다. PV가 1.6인 지점은 대류권계면을 나타낸다. Reid and Vaughan(2004)은 0.11°의 수평 해상도를 가지는 Cullen(1993)의 중규모 모델과 관측 데이터의 결과를 비교하는 권계면 접힘 모의실험에서 권계면 접힘이 한랭전선의 후방에서 발달하고, 접힘 동안에 건조한 성층권 공기를 하강시킴으로서 대류 불안정이 높아지는 것을 보여주었다. 불안정한 하층 대기 위에 강한 와도의 상층 공기가 유입됨에 따라서 하층의 저기압성 순환이 강화되고 운동량의 교환이 발생된다. 그러므로 두 변수 사이의 연관성을 살펴볼 필요가 있다.

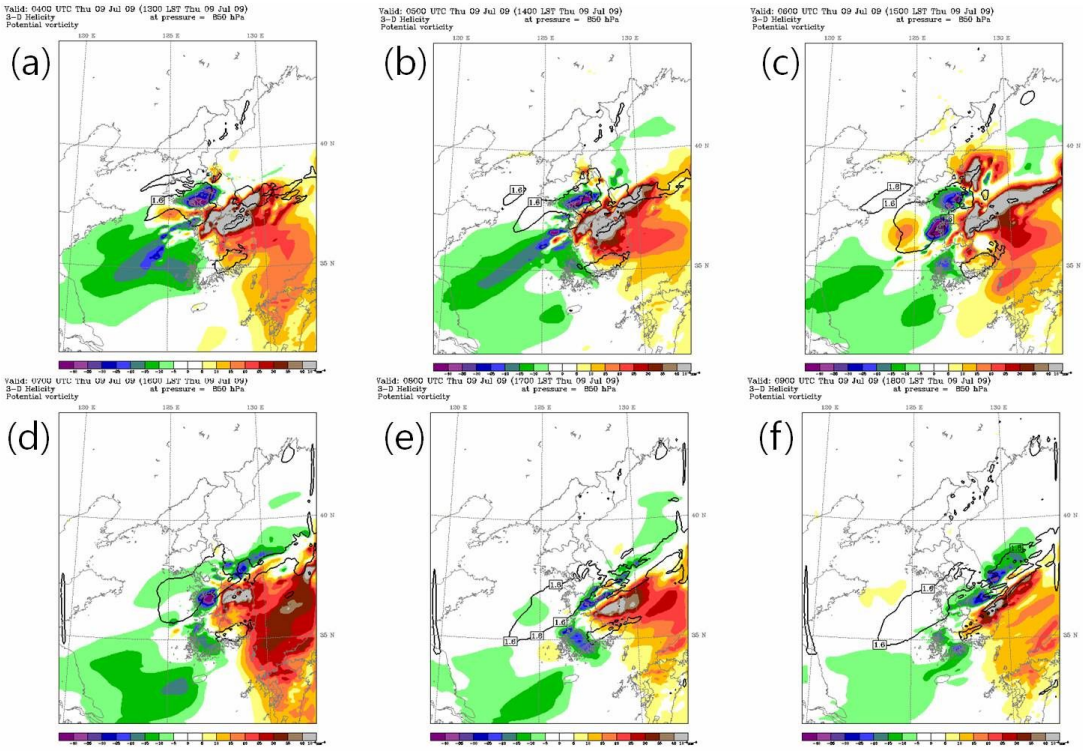

Fig. 19. The same as Fig. 17 except for helicity.

Fig. 19는 2009년 7월 9일의 850 hPa의 헬리시티를 나타내며, 이 사례에서 헬리시티는 최하층보다 850 hPa 고도에서 중부지방에 발달하는 강수 셀을 뚜렷하게 보여주었다. 헬리시티 값은 양의 지역을 따라 음의 지역이 뒤따르는 형태로 7월 9일 1300-1400 LST에 서울, 경기지역과 강원 지역에서 헬리시티 0선이 지나갔다(Fig. 19a-b). 이러한 특징은 이후 시간대에서도 동일하게 나타났다. 1500 LST에 경상 지역에 양의 헬리시티가 나타났고 서울, 경기 지역으로 양과 음의 헬리시티가 교차하는 영역을 따라 강수대가 나타났다(Fig. 19c). 1600-1800 LST에는 이미 많은 강수를 내리고 남동진한 강수 셀에서 음의 헬리시티 값이 나타났다(Fig. 19d-f). 이처럼 강수대와 헬리시티 0선이 일치하는 것을 보아 헬리시티와 강수와의 연관성을 추측해볼 수 있었다.

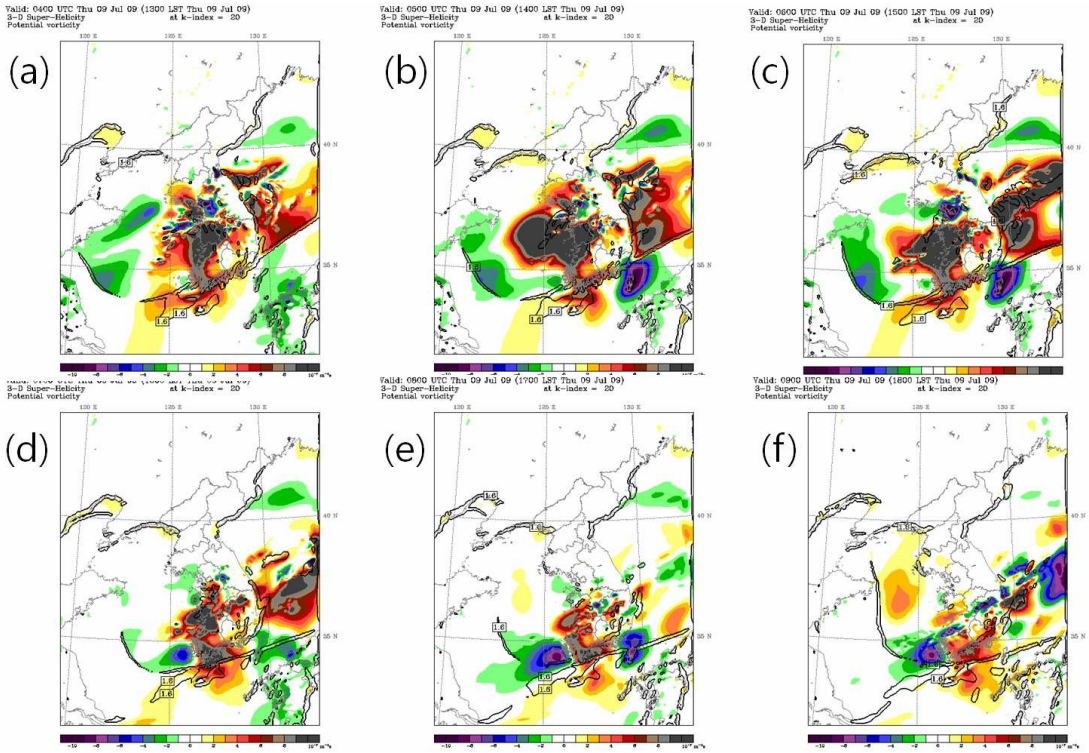

Fig. 20. Superhelicity on July 9, 2009 : (a) 1300 LST, (b) 1400 LST, (c) 1500 LST, (d) 1600 LST, (e) 1700 LST, and (f) 1800 LST.

Fig. 20은 2009년 7월 9일 1300-1800 LST까지 슈퍼헬리시티를 나타낸 것이다. 1300 LST에 서울지역은 음의 슈퍼헬리시티를 양의 슈퍼헬리시티가 둘러싸고 있는 형태였다(Fig. 20a). 1400 LST에 경기만으로 양의 슈퍼헬리시티가 중부지방으로 다가오는데 이는 강수 셀이 성숙기로 접어들기 시작한 것으로 보였다(Fig. 20b). Fig. 20c를 보면 1500 LST에 서울, 경기 지역에서 강한 음의 슈퍼헬리시티가 나타나 강수 셀이 발달하고 있는 것을 보여주었다. 이후 1600-1800 LST에서 약한 양의 슈퍼헬리시티는 강수대의 이동경로를 앞질러 성숙 단계인 양의 값이 지나가는 것을 나타내었다(Fig. 20d-f).

슈퍼헬리시티는 헬리시티의 시간적 변화를 반영한다. 음의 헬리시티는 헬리시티의 증가로 연결된다. 일반적으로 슈퍼헬리시티는 발달 단계에서 음의 값을 가지고 대류가 성숙 기간에 접근할 때 양의 값으로 바뀐다. 따라서 슈퍼헬리시티는 폭풍이 성숙한지 아닌 지를 판단하는 지표로 사용할 수 있다(Fei Shiqiang and Tan Zhemin, 2001).

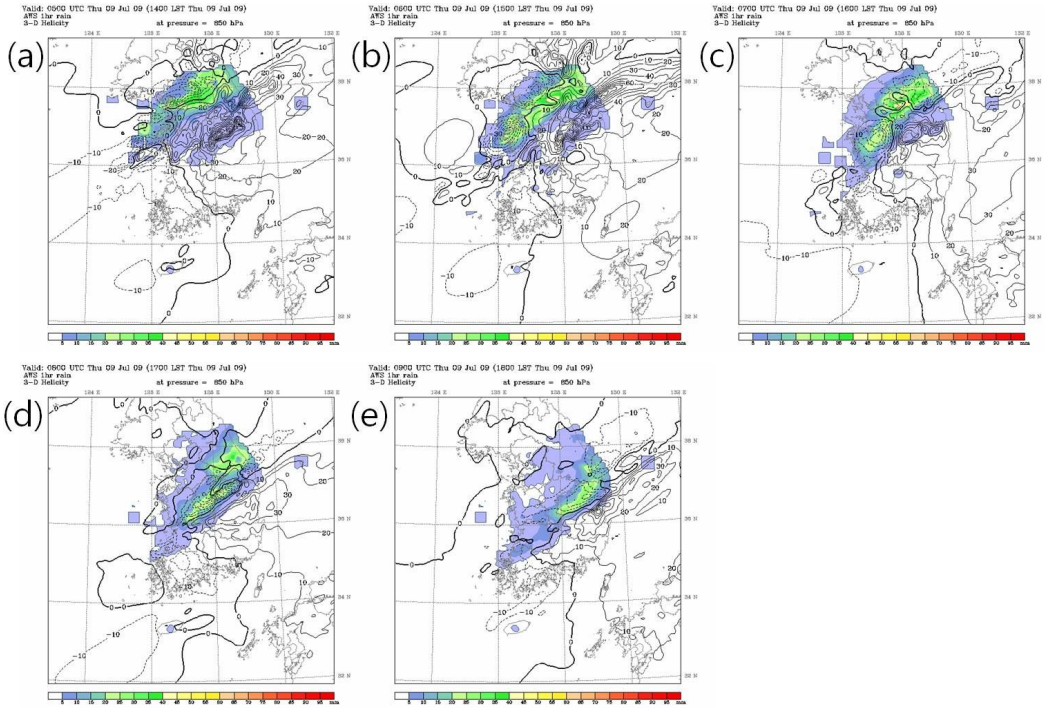

Fig. 21. 1-hour cumulative rainfall (shading) and 3-dimension helicity (contour) at 850 hPa on July 9, 2009 : (a) 1400 LST, (b) 1500 LST, (c) 1600 LST, (d) 1700 LST, and (e) 1800 LST.

Fig. 21은 AWS 1시간 누적 강수와 850 hPa 헬리시티의 분포를 나타낸 것이다. 헬리시티와 강수 영역을 살펴보면 시간당 20 mm 이상의 강한 강수대와 헬리시티의 0선이 일치하는 것을 볼 수 있었다. 양과 음의 헬리시티가 교차하는 영역을 따라 강수대가 나타났고 서울, 경기 지역과 강원도 지역을 중심으로 하는 강한 강수대가 나타나는 곳에 강한 음의 헬리시티가 나타나고 있었다. 이는 강수셀이 발달하고 있는 것을 나타낸다.

4. 요약 및 결론

초단기 기상분석 및 예측 시스템(KLAPS)은 매시 약 10분에 분석장을 생산하여 예보관들에게 지원하고 있다. 이러한 분석시간으로 인해 GTS 자료 등 일부의 관측 자료가 현업의 실시간 분석장 생산에 사용되지 못하고 있다. 초단기 예측의 정확성을 향상시키고, 사후 분석을 위해 정교한 고품질의 재분석 자료가 요구되어 왔다. 이에 따라 KLAPS를 활용하여 초단기 기상현상의 분석 능력 강화, 재해기상에 대한 사후 분석 등을 위해 한반도 영역의 고해상도 재분석 자료가 생산되었다. 재분석에 사용된 자료는 국내에서 수집되는 자동기상관측자료, 레이더, 위성, 낙뢰, 수직측풍기, 민간항공기 관측 자료 등 가용한 모든 자료를 포함하고 있다. 따라서 실제 대기 상태를 최대한 반영한 자료라고 할 수 있다. KLAPS 재분석 자료는 1시간 간격으로 5㎞의 수평해상도를 가지는 3차원 분석 자료로 종관 규모 및 중규모의 기상 현상을 분석할 수 있는 최적의 자료라 할 수 있다.

2009년 7월 9일 사례는 장마기간 동안 발생한 강수 사례이며, 9일 1300 LST부터 1600 LST 사이에 발생한 강수를 중심으로 KLAPS 기반의 고해상도 재분석 자료를 이용하여 강수의 역학적 특징 및 강수 기작을 살펴보고자 하였다. 이를 위해 1시간 누적 강수량, 지상 및 850 hPa, 500 hPa 일기도, 속도퍼텐셜, 유선함수의 분포를 살펴보았으며, 고해상도의 장점을 살려 중규모 분석에 주력하여 종관 및 운동학적 위험기상 지수의 특징을 분석하였다. 강수의 역학적 특성을 설명하는 헬리시티와 헬리시티 밀도의 분포를 설명하였고 위험기상 지수는 순간수축률, 속도구배텐서 등의 변수들이며, 위험기상 현상을 유발하는 기단의 경계를 나타내었다.

이 사례는 저기압을 동반한 장마전선이 동진함에 따라 중부지방에 1300-1800 LST 동안 강한 강수를 내린 사례로 서울, 경기 및 강원 지역에 걸쳐져 있던 띠모양의 강수는 차츰 남하하여 경북 지역에 영향을 주었으며, 이후 지속적으로 남동진하였다. 1300-1500 LST에 333 K 이상의 상당온위가 북한지방까지 나타나고 있어 우리나라는 온난습윤한 기단의 영향을 받는 것으로 나타났다. 이때 속도퍼텐셜은 중부지방에 남서에서 북동방향으로 비스듬하게 850 hPa에서 양의 영역이 존재하였고, 200 hPa에서 음의 영역이 존재하고 있어 대기의 연직 활동이 활발함을 알 수 있었다. 순간수축률과 속도구배텐서는 강수가 있는 지역과 강수가 없는 지역에 대한 경계를 상대적으로 잘 나타내고 있었다. 대기 하층(950-800 hPa)에 역학적 대류권계면에 해당하는 PV가 1.6 PVU

이상인 영역이 존재하여 한기의 유입으로 대기가 역학적으로 불안정한 상태였다. 양과 음의 헬리시티가 교차하는 영역을 따라 서울, 경기 지역과 강원도 지역을 중심으로 하는 강한 강수대가 나타났다. 강수 셀의 성숙도는 슈퍼헬리시티를 통하여 확인할 수 있었으며, 서울, 경기 지역에서 강한 음의 슈퍼헬리시티가 나타나 강수셀이 발달하고 있는 것을 보여주었다.

사례 분석에서 집중호우가 발생한 지역 부근에 위험기상 지수가 잘 나타나고 있음을 확인하였다. 또한 강한 회전과 상승으로 나타나는 중규모 저기압은 헬리시티라는 변수로 표현할 수 있는데 헬리시티와 헬리시티 밀도가 0인 부근에서 집중호우가 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 이를 통해 한반도에서 발생하는 위험기상의 구조와 원인 규명에 대한 연구에 보탬이 되고자 한다.

참고문헌

광주지방기상청, 2000: 호남지방예보분석 지침서, 2000.

기상청, 2010: 호우예보 연구개발결과의 현업활용체제 구축 연구, 259pp.

김성삼·정창희·박순웅·이병설, 1983: 다우장마와 과우장마시의 장마전선의 구조적 특징. 한국기상학회지, 19, 12-32.

김은희·이용희·하종철·이정순·장동언, 2010: KLAPS 재분석 자료를 이용한 뇌우 사례 분석 : 2008년 6월 8일. 2010년도 한국기상학회 봄 학술대회 논문집.

김용삼·박옥란·황승언, 2002: 기상연구소의 국지규모 기상 분석 및 예측 시스템(KLAPS)의 실시간 운영. 한국기상학회지, 38, 1, 2002, p. 1-10.

박순웅,윤일희, 정순갑, 1986: 1978년 하계 장마시 장마전선과 관련되어 나타난 열과 수증기의 원에 관하여. 한국기상학회지, 22, 2001-2027.

소선섭·임재준·나득균, 1995: 한국 근대기상관측이래 최다 일강수량을 나타낸 장흥 지방의 집중호우의 분석. 한국기상학회지, 31(3), 281-299.

양진관, 1999: 서해상에서 발생하여 중서부지방에 강서현상을 초래하는 중규모저기압. 기상청사례연구, p.44.

유근기·원효성·류찬수, 2007: 호남지방의 안개 특성 및 예측성 연구. 2007년 한국기상학회 가을 학술대회 논문집.

이동규, 1991: 1985년 한반도 강우와 관련된 동아시아 몬순 순환의 특징. 한국기상학회지, 37(3), 205-219.

이병설·김성삼, 1983: 장마계의 종관적 특성. 한국기상학회지, 19, 1-11.

이용희·김은희·하종철·이정순·장동언, 2010: KLAPS 재분석 자료를 이용한 2009년 7월 28일 남해안 호우의 발달기구 분석. 2010년 한국기상학회 가을 학술대회 논문집.

이재병, 2001: 전남 서부남해안 지방 집중호우의 종관적 예측 방법. 대기, 11, 129-131.

정순갑·김성삼, 1983: 장마전선에서의 선형 경압불안정성에 관한 연구. 한국기상학회지, 19, 2037-2046.

조희영·김유원·조서환·임병숙·이희상, 2007: KLAPS를 이용한 지리산 풍하측 집중호우 특징 고찰. 2007년도 한국기상학회 가을 학술대회 논문집.

홍윤,2000: 집중호우의 발생환경. 기상청 사례연구.

황승언·이동규, 1993: 한반도에서 발생한 호우와 하층제트의 관련성에 관한 연구. 한국기상학회지, 29, 133-146.

Cullen, M.J.P., 1993: The unified forecast/climate model. Meteorological Magazine, 122 , 81-84

Davies-Jones, R. P., 1984: Streamwise vorticity: The origin of updraft rotation in supercell storms. J. Atmos. Sci., 41, 2991-3006.

Elting, D., 1985: Some aspects of helicity in atmospheric Flows. Beitr. Phys. Atmos., 58, 88-100.

Fei Shiqiang and Tan Zhemin, 2001: On the Helicity Dynamics of Severe Convective Storms. Adv. Atmos. Sci., 18, 67-86.

Kim, J. H., S. M. Oh, and S. K. Park, 2008: Gusty Wind in Korea and Possibility of Tornado Occurrence. 2008년 한국기상학회 봄 학술대회 논문집.

Lee, T. Y., Y. Y. Park, and Y. H. Kim, 1998: A numerical modelling study of heavy rainfall developmnet over the Changma front. Proceedings of the International Conferences on Monsoon and Hydrologic Cycle, April 22-25, 1998, Kyongju, Korea, 72-75.

Lilly, D. K., 1986: The structure, energetics, and propagation of rotating convective storms. Part I: Energy exchange with the mean flow. J. Atmos. Sci., 43, 113-140.

Maddox, R. A.,1980: Mesoscale Convective Complexs. Mon. Wea. Rev. 61, 1374-1387.

Park, S. U., C. H. Joung, S. S. Kim, D. K. Lee, S. C. Yoon, Y. K. Jeong, and S. G. Hong, 1986: Synoptic scale features of the heavy rainfall occurred over Korea. J. Korean Meteor. Soc., 22(1), 42-81.

Reid, H. J, and Vaughan, G., 2004: Convective mixing in a tropopause fold. The Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 130, 1195-1212.

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.

Tan Zhemin and Wu Rongsheng, 1994: Helicity dynamics of atmospheric flow. Adv. Atmos. Sci., 11, 175-188.

Weisman, M. L., and J. B. Klemp, 1984: The structure and classification of numerically simulated convective storms in directionally varying shears. Mon. Wea. Rev., 112, 2479-2498.

http://www.spc.ncep.noaa.gov/exper/mesoanalysis/frames.php?sector=7

http://190.1.29.194/heavy_new.html

감사의 글

이 작은 소망의 열매를 맺기까지 어렵고 힘든 가운데서도 주위의 많은 분들의 관심과 격려에 힘입어 본 논문이 완성되었기에 글로서 저의 마음을 대신하고자 합니다.

먼저 입학해서부터 지금까지 많은 관심과 격려로 지도해주신 류찬수 교수님께 한없는 존경과 감사를 드립니다. 그리고 본 논문이 완성되기까지 세심하게 하나하나 지도하고 심사하여 주시며 많은 조언을 해주신 김백조 박사님께 진심으로 감사를 드립니다. 또한 지대한 관심으로 학문적인 지도와 격려를 아끼지 않으시고 더 넓은 세상을 바라 볼 수 있도록 길을 인도해 주신 정효상 교수님, 이종호 교수님께도 깊은 감사의 마음을 전합니다.

부족한 제가 논문을 끝마칠 수 있도록 저에게 용기와 애정으로 많은 조언과 가르침을 주신 국립기상연구소 예보연구과의 장동언 과장님, 이용희 연구관님, 하종철 연구사님, 이정순 연구원님, 김은희 연구원님 등 모든 예보연구과 연구원분들께 감사드리며, 옆에서 많은 힘이 되어준 2010년 수치예보 교육훈련생 동기들에게 고마운 마음을 전합니다. 그리고 대학원에 재학하는 동안 서로 의지하며 같이했던 대기과학과 실원들 최지영, 김도완, 양세환, 김창모, 서성용, 전대훈, 허솔잎, 황성은에게 고마운 마음을 전하며, 논문이 나오기까지 많은 격려를 해주신 한국기상기후아카데미 홍윤 원장님, 이현 본부장님, 김병남 부장님, 윤선영부장님, 김지원, 김선민, 박순영, 손승원, 이재은, 박준상에게도 감사하고 늘 행운과 건강이 함께하길 기원합니다.

끝으로 언제나 변함없는 사랑으로 지켜봐 주시는 부모님과 크고 작은 어려움이 있을 때마다 큰 후원자가 되어 용기를 실어준 민국오빠에게도 고마움을 전하고 싶습니다.

이 작은 결실을 맺기까지 여러 가지로 도움 주신 모든 분들께 다시 한 번 감사드리며 앞으로 더욱 성숙된 모습을 보여드릴 것을 약속드리며 열심히 노력하겠습니다.

2011년 8월