대류권계면 접힘에 의한 영동지방 집중호우사례의 특성분석

이혜영¹ · 고혜영² · 김경익³ · 윤일희^{1,*}

¹경북대학교 지구과학교육전공, 702-701, 대구광역시 북구 산격동 1370

²국립기상연구소 지구환경시스템연구과, 156-720, 서울특별시 동작구 신대방동 460-18

³경북대학교 천문대기과학과, 702-701, 대구광역시 북구 산격동 1370

An analysis of Characteristics of Heavy Rainfall Events over Yeongdong Region Associated with Tropopause Folding

Hye-Young Lee¹, Hye-Young Ko², Kyung-Eak Kim³, and Il-Hee Yoon^{1,*}

¹Department of Earth Science Education, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

²Global Environment System Research Laboratory, National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration, Seoul, 156-720, Korea

³Department of Astronomy and Atmospheric Science, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

Abstract: The synoptic and kinematic characteristics of a heavy rainfall that occurred in Gangneung region on 22 to 24 October 2006 were investigated using weather maps, infrared images, AWS observation data and NCEP global final analyses data. The total amount of rainfall observed in the region for the period was 316.5 mm, and the instantaneous maximum wind speed was 63.7 m s^{-1} . According to the analysis of weather maps, before the starting of the heavy rainfall, an extratropical low pressure system was developed in the middle region of the Korean Peninsula, and an inverted trough was formed in the northern region of the peninsula. In addition, a jet stream on the upper charts of 300 hPa was located over the Yellow Sea and the southern boundary of the peninsula. A cutoff low in the cyclonic shear side of the upper jet streak, which was linked to an anomaly of isentropic potential vorticity, was developed over the northwestern part of the peninsula. And there are analyzed potential vorticity and wind, time-height cross section of potential vorticity, vertical air motion, maximums of the divergence and convergence and vertical distribution of potential temperature in Gangneung region. The analyzed results of the synoptic conditions and kinematic processes strongly suggest that the tropopause folding made a significant role of initializing the heavy rainfall.

Keywords: heavy rainfall, NCEP global final analyses data, tropopause folding

요 약: 2006년 10월 22일에서 24일에 걸쳐 한반도 강릉지역에서 강한 집중호우가 발생했다. 이 기간에 대해서 집중호우가 발생하기 전과 강우강도가 가장 강했을 때 나타나는 종관적, 운동학적 특성을 조사하기 위하여 본 연구에서는 지상일기도, 상층일기도, 적외 위성영상, 자동기상관측장비(AWS) 자료, NCEP(National Centers for Environmental Prediction) 전구분석자료를 이용하였다. 분석 기간 동안 강릉에서 관측된 총 강수량은 316.5 mm이고, 최대 순간풍속은 63.7 m s^{-1} 이다. 일기도를 분석해보면 집중호우가 시작하기 전 온대저기압이 한반도 중부에서 발달하였으며 한반도 북부에 역전기압골이 형성되어 있다. 또한 300 hPa 상층일기도에서는 서해와 한반도 남부에 제트기류가 위치하며, 위치 소용돌이도 이상과 관련된 절리 저기압이 한반도 북서부에서 발달하고 있다. 강우강도가 가장 강했을 때의 특성을 좀 더 자세히 알아보기 위하여 강릉지역의 위치 소용돌이도 이상과 바람, 위치 소용돌이도의 시간-연직 단면도, 연직운동, 발산장과 수렴장, 역학적 온위의 연직분포에 대해 조사하였다. 종관적, 운동학적 과정을 분석해 본 결과 대류권계면 접힘이 집중호우 발생에 큰 역할을 한 것으로 사료된다.

주요어: 집중호우, NCEP 전구분석자료, 대류권계면 접힘

*Corresponding author: ihyoon@knu.ac.kr

Tel: 82-53-950-5922

Fax: 82-53-950-5946

서론

우리나라는 집중호우로 인하여 재산피해와 인명피해 등의 재해를 매년 입고 있다. 집중호우는 종관 패턴 및 하층제트(Low-Level Jet)와 밀접한 관련이 있다. Chen and Li(1995)는 집중호우가 발생하기 전 850 hPa 기압골의 전면에 발달한 하층의 남서기류가 불안정 대류를 야기시키고, 상승 온난기류에 의한 양의 소용돌이도 이류가 나타났으며 하층에 경압성이 강해질 때 상층의 경압성과 상층 기압골의 접근과 연관되어 가장 강한 집중호우가 하층 온난, 습윤한 곳을 따라 발생함을 보였다. 또한 하층에 700 hPa의 수분과 850 hPa 온난공기의 이류역이 집중호우 지역과 잘 일치한다고 하였다(Konrad, 1997). 하층제트와 관련된 2차 순환의 상승은 집중호우의 원인이 되며(Matsumoto, 1972), 집중호우 발생 12시간 전 700 hPa에서 최소 12.5 m s^{-1} 의 하층제트가 나타날 경우 집중호우 발생 가능성이 84% 정도이다(Chen and Yu, 1987). 또 하층제트는 집중호우 발생 전에는 증가하나 집중호우 발생 시와 발생 후에는 감소한다(Chen, 1977). Teixeira and Satyamurty(2006)는 집중호우가 나타나기 전에 중간 대류권 기압골의 깊이가 깊어지며, 지상에 저기압 중심이 형성되고 북쪽에는 하층제트가 형성되며 강한 수분속 수렴이 두드러짐을 밝혔다.

집중호우에 관한 국내의 선행연구를 살펴보면 노준우(2003)는 종관 배경에 따른 한반도의 집중호우를 분류 했으며, Song et al.(2004)은 한국의 집중호우와 연관된 종관 상황과 연직 운동 분석 결과 소용돌이도 이류 발생과 온난이류에 의해 상승운동이 발생하며 한랭이류에 의해 하강운동이 나타나는데 소용돌이도와 온도이류의 합에 의해 상승운동이 일어났음을 밝혔다. 또한 김동균과 전해영(2000)은 집중호우와 연관된 산악 효과에 대한 수치적 연구결과에서 프라우드(Froude) 수가 작을수록 풍상사면의 강수 증가율이 크며, 최대 강수율도 산의 중심으로 더욱 접근하고 강수 구간도 가장 길어 총 누적 강수량에 영향을 미쳤다고 하였다. 백선균 외(2003)에서는 윈드프로파일러를 이용하여 여름철 악기상을 분석한 결과 강수 발생 전·후 시점에 하층제트가 확인되었으며, 신철수와 이태영(2003)은 하층제트가 수증기 수송 및 수렴의 역할을 하고 대류세포를 생성하였으며, 2차 순환이 대류계를 강화시키고 지속시켰음을 밝혔다. 박창

현 외(2003)은 충분한 습기를 함유한 하층제트가 중 규모 강제력과 지형 강제력에 의해 상승하면서 거대 대류운을 형성하고 풍하층에 호우를 유발하였으며, 풍속이 줄어들면 총 강수량보다는 최다 강수시간과 강수대의 위치가 변함을 확인했다.

국내에서 집중호우에 관한 많은 연구가 이루어지고 있지만 대부분의 경우가 장마, 태풍 등을 동반한 종관 패턴 및 하층제트와 관련되어 있으며 대류권계면 접힘과 집중호우와 관련된 연구는 활발히 이루어지지 않은 상황이다. 대류권계면 접힘 현상과 악기상과 관련된 국내의 선행연구로는 이홍란 외(2001)의 연구가 있다. 대류권계면 파상운동과 한반도의 겨울철 악기상과의 관계를 분석한 연구에서 극지방 성층권 공기가 중위도 대류권으로 유입되면서 상층의 양의 위치 소용돌이도 이상에 의해 저기압성 순환이 하층에 유도되고 그 순환의 동·서쪽 온도 이상에 따른 하층 대기의 경압성 증가와 하부 성층권에서의 온난한 공기의 대류권으로의 유입이 공기 기둥내의 순 가열을 유도하고 이는 기둥 하층의 기압하강으로 이어져 지상 저기압이 발달하였다. 또한 대류권계면 파상운동의 동쪽에 발달한 상승운동에 의해 하층의 질량이 북쪽으로 이동함으로써 상·하층 대기의 양의 되먹임 작용으로 대류권계면 파상운동이 더욱 발달한다고 분석했다. 이홍란 외(2002)의 급격히 발달하는 저기압과 관련된 대류권계면 파상운동에 관한 연구에서는 지상 저기압과 상층의 양의 위치 소용돌이도 이상은 상층 제트의 저기압성 시어쪽에 위치하고 대류권계면은 상층 제트 왼쪽 입구의 약한 풍속대를 따라서 하강한다. 그리고 상층 일기도에서는 절리 저기압과 원형모양의 제트가 나타남을 보였으며, 상·하층 대기의 위치 소용돌이도 양의 되먹임 작용에 의해 저기압이 급격히 발생했음을 밝혔다. 급격히 발달하는 저기압과 관련된 대류권계면 파상운동은 상부 대류권과 하부 성층권에 존재하는 온난풀 및 파상운동의 동쪽 경사 부분에 존재하는 온난이류핵과 밀접한 관계가 있다고 하였으며 900 hPa 이하 하층에서는 연직 대류가 경사 대류보다 우세하게 일어나는 것으로 급격한 저기압의 발달은 대기 하층의 대류 불안정으로 인한 연직 대류에 기인함을 보였다.

본 연구는 한반도에서 태풍이나 장마를 동반하지 않은 집중호우의 경우로 대류권계면 접힘의 영향을 더 뚜렷이 볼 수 있다고 판단된다. 따라서 급격히 발달한 저기압과 관련된 2006년 10월 23일 집중호우

Fig. 1. Surface charts for (a) 1200 UTC 22, (b) 0000 UTC 23, (c) 0300 UTC 23, (d) 1500 UTC 23 October 2006.

사례를 선정하여 대류권계면 접합의 진화 및 구조를 알아보고 대류권계면 접합과 지상 저기압과의 관련성을 알아봄으로써 한반도에서 급격히 발달하는 저기압의 발달기구를 밝히고 악기상 예보의 정확성을 향상 시키는데 도움을 주고자 한다.

자료 및 분석방법

영동지방에서 발생한 집중호우를 연구하기 위하여 지상 관측소에서 관측된 강수량을 기준으로 하여 최근 5년(2003-2007) 동안 집중호우가 있었던 날 중에서 2006년 10월 23일 사례를 선정하였다. 2006년 10월 22일 오후부터 24일 새벽까지 속초에서는 258.5 mm, 강릉에서는 316.5 mm의 비가 내렸으며 10월 23일 하루 동안에 속초에서는 232 mm, 강릉에서는 304 mm의 많은 비가 내렸다. 태풍이나 장마를 동반하지 않은 보기 드문 집중호우가 있었던 사례이다 (Fig. 1).

영동지방 집중호우와 대류권계면 접합과의 관련성을 조사하기 위해 분석한 영역은 한반도를 포함한 동아시아지역(110-140°E, 20-50°N)이고 분석기간은 지상 저기압이 급격히 발달한 기간을 전·후한 2009년 10월 22일 1200 UTC에서 10월 24일 0000 UTC까지이다. 분석에 이용한 자료는 지상 관측소에서 관측된 일강수량자료, 기상청에서 제공한 지상, 850, 500, 300 hPa(0000, 1200 UTC) 일기도, 1경도×1위도 분해능을 가지는 6시간 간격의 NCEP 전구분석자료이다. 본 연구에서는 세계기상기구(WMO, 1986)의 정의에 따라 위치 소용돌이도가 1.6 PVU(Potential Vorticity Unit, $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ K kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$)인 곳을 역학적 대류권계면으로 정의하고 1.6 PVU 이상의 소용돌이도를 양(positive)의 위치 소용돌이도 이상(anomaly)으로 고려했다.

영동지방에 집중호우가 발생하기 전과 후의 종관적인 특징을 알아보기 위해 지상과 상층일기도를 분석했다. 대류권 상부 및 성층권 하부는 수증기량은 적

Fig. 2. Same as in Fig. 1 except for 850 hPa charts for (a) 1200 UTC 22, (b) 0000 UTC 23 October 2006.

고, 건조 단열과정에서 온위는 보존되므로 대류권계면을 통한 성층권 공기의 유입을 추적하기 위하여 온위(θ)를 계산하였다. NCEP 재분석자료는 등압면 자료를 제공하므로 각 격자점에서 위치 소용돌이도를 계산한 다음 등압면상의 위치 소용돌이도를 305 K 등온위 자료계로 변환하여 사용하였다. 중위도 종관 규모에서 소용돌이도 방정식의 규모 분석을 통하여 상대소용돌이도는 행성소용돌이도에 비해 매우 작음을 알 수 있다(박지훈, 2006). 이상의 상대소용돌이가 나타나면 강력한 저기압으로 간주할 수 있으므로 상대 소용돌이도를 계산하였다. 마지막으로 지상 저기압과 관련된 수평기압경도는 연속수환을 생성하므로 대류권 상·하층 대기의 발산과 수렴의 정도를 알아보기 위해 발산장을 계산하였다.

분석 결과

지상일기도 및 상층일기도

한반도 중부에 중심을 둔 저기압이 남동쪽으로 빠져나가면서 지상 저기압이 급격히 발달한 2006년 10월 23일 0000 UTC-0600 UTC 사이의 전·후인 22일 1200 UTC에서 24일 0000 UTC까지의 종관 상태를 조사하기 위해 지상, 850, 500, 300 hPa의 등압면 일기도를 분석했다.

지상 저기압이 급격히 발달하기 전인 10월 22일 1200 UTC의 지상일기도(Fig. 1a)를 보면, 만주 북부 지방에 중심기압이 1035 hPa인 대륙성 고기압이 위치해 있으며, 한반도에는 중부와 남부(128°E, 32°N)에 걸쳐 중심기압이 1010 hPa인 저기압이 남서쪽으로

로 한랭전선, 그리고 남동쪽으로 온난전선을 동반한 상태로 저기압이 발달해 있다. 그리고 이 저기압을 중심으로 역전 기압골(inverted trough)이 발달되어 있다. 한반도 북부(130°E, 40°N)에 등압선이 매우 조밀한 것으로 보아 한반도 북부 지역의 남북 기압경도가 매우 크게 나타날 것으로 판단된다. 10월 23일 0000 UTC(Fig. 1b)에는 저기압의 중심이 1006 hPa로 낮아지고 전선은 동쪽으로 이동했으며 만주 북부에 위치하던 고기압이 남하하면서 등압선 간격이 더 조밀해졌다. 10월 23일 0300 UTC(Fig. 1c)에는 저기압의 중심은 1007 hPa로 3시간 전에 비해 조금 높아졌으며 속초지방에 뇌우가 나타났다. 10월 23일 1500 UTC(Fig. 1d)에는 저기압 중심시도는 1010 hPa로 일본 열도에 위치해 있으며 등압선 간격은 12시간 전에 비하여 넓어져 기압경도가 작아졌음을 알 수 있다.

Fig. 2는 850 hPa 등압면 일기도이다. 10월 22일 1200 UTC(Fig. 2a)에 850 hPa면에서 저기압의 위치와 지상에서(Fig. 1a) 역전 기압골의 위치가 잘 일치하는 것으로 보아 저기압 중심고도가 850 hPa 고도까지 확장되어 있음을 알 수 있다. Fig. 2b에서는 지상 저기압의 이동과 함께 850 hPa면에서 저기압의 위치도 동쪽으로 이동했다.

700 hPa 등압면 그림은 제시되어 있지 않지만 10월 22일 1200 UTC와 10월 23일 0000 UTC에 한반도에 850 hPa와 거의 같은 위치에 저기압성 순환이 있는 것으로 보아 지상 저기압이 700 hPa 고도까지 확장되어 있다고 판단된다.

500 hPa 등압면 일기도에 의하면 2006년 10월 22

Fig. 3. Same as in Fig. 1 except for 500 hPa charts for (a) 1200 UTC 22, (b) 0000 UTC 23, (c) 1200 UTC 23, (d) 0000 UTC 24 October 2006.

일 1200 UTC에 신의주 북쪽(123°E, 40°N)부근에 기압골이 발달해 있으며 그 중심에 절리저기압(cutoff low)이 위치한다(Fig. 3a). 이 기압골은 강한 북서류의 영향을 받아 24일 0000 UTC까지 계속해서 남동진했다(Fig. 3b, 3c, 3d).

대류권 상층의 상태를 분석하기 위하여 300 hPa 등압면 일기도를 분석했다(Fig. 4). 상층 저기압의 전면에는 약한 온도능이 발달되어 있으며 후면에는 온도골이 발달되어 있다. 온도능의 남서쪽에는 하층제트가 발달하여 따뜻한 공기를 유입시키고 강한 북서풍이 온도골을 따라 한랭한 공기를 한반도로 유입시키고 있다. 10월 23일 1200 UTC(Fig. 4c)에는 한반도 남해상 부근에서 한대제트의 곡률이 증가하였으며 Fig. 5d와 비교하면 위치소용돌이도 이상이 상층제트의 저기압성 시어쪽에 위치한다. 그 후 상층 제트는 계속 동진했다.

지상 일기도 및 상층 일기도 분석으로부터 지상

저기압 발달은 500 hPa 등압면에서 절리 저기압의 통과와 300 hPa 등압면의 상층제트와 관련이 있다고 판단된다.

상 · 하층 대기의 등온위 위치 소용돌이도

305 K 등온위면은 이흥란 외(2001)의 연구 결과에 따라 한반도에서 대류권계면 부근의 모습을 가장 잘 반영한다고 생각되어 상층공기의 흐름을 파악하고자 2006년 10월 22일 1800 UTC에서 10월 23일 1200 UTC까지의 305 K 등온위면의 위치 소용돌이도와 바람장을 NCEP 전구분석 자료를 이용하여 분석했다.

Fig. 5는 상층대기의 등온위 위치 소용돌이도의 분포를 나타낸 것으로 굵은 실선은 1.6 PVU, 즉 역학적 대류권계면을 나타낸다. 양의 위치 소용돌이도는 10월 22일 18 UTC 한반도 서쪽(126°E, 37°N) 부근에 나타나 시간이 지남에 따라 점차 동진하고 있다.

바람장을 분석해보면 양의 위치 소용돌이도 이상의

Fig. 4. Same as in Fig. 1 except for 300 hPa charts for (a) 1200 UTC 22, (b) 0000 UTC 23, (c) 1200 UTC 23, (d) 0000 UTC 24 October 2006.

후면에는 북풍이, 전면에는 서풍과 남서풍이 나타난다. 바람의 방향을 보면 양의 위치 소용돌이도 이상을 중심으로 반시계 방향으로 바람이 불어 들어가는 것으로 보아 저기압성 소용돌이도도 있다고 판단된다. Fig. 4와 비교해보면 305 K 등온위면의 위치 소용돌이도 이상은 상층제트 스트리크의 저기압성 시어 쪽에 위치하며 지상 저기압은 상층의 위치 소용돌이도 종류의 하류인 한반도 북부 지방에 위치한다(Fig. 1). Fig. 5c의 10월 23일 0600 UTC에는 양의 위치 소용돌이도 이상과 지상 저기압의 기울기가 거의 수직이 된 상태로 동해 상공에 위치했고 이때 지상 저기압은 더 이상 발달이 없었다.

사례기간 동안 지상 저기압이 급격히 발달함에 따라 1.6 PVU 등치선과 지상 저기압의 연직 기울기는 점점 증가했다. 큰 위치 소용돌이도를 가진 성층권 공기가 양의 위치 소용돌이도 이상에 의해 중간 대류권으로 유입되어 하층의 바람과 온도 분포 등에

영향을 줌으로써 지상 저기압의 급격한 발달에 큰 영향을 미쳤다고 판단된다.

하층 대기에서 온위의 이상은 위치 소용돌이도 이상으로 생각할 수 있다. 즉, 하층 대기의 온난이상(warm anomaly)은 하층 대기의 양의 등온위 위치 소용돌이도 이상으로 생각할 수 있으며 한랭이상(cold anomaly)은 음의 등온위 위치 소용돌이도 이상으로 생각할 수 있다(이흥란, 2002). 그래서 우리는 온위의 연직 분포를 분석하였다.

Fig. 6은 2006년 10월 22일 1800 UTC와 10월 23일 0000 UTC의 925 hPa의 온위와 바람장을 나타낸 그림이다. Fig. 5a에서 저기압성 순환이 위치하는 곳과 Fig. 6a에서 수렴이 일어나는 곳이 잘 일치함을 알 수 있다. 분석지역인 영동지방은 동해에서 한반도 쪽으로 습윤한 공기가 유입되며, 동해에 매우 좁은 등온위선이 분석되며 온난이류가 나타나는 것이 확인된다. 10월 23일 0000 UTC(Fig. 6b)에 동해의 조밀

Fig. 5. Potential vorticity anomaly and wind vector on the isentropic surface of 305 K for (a) 1800 UTC 22, (b) 0000 UTC 23, (c) 0600 UTC 23, (d) 1200 UTC 23 October 2006.

한 등온위선의 아래에는 온난이류가 나타나며 위에서는 한랭이류가 나타난다. 또 6시간 전에 비해 영동지방 등온위선이 해안선에 평행한 남-북 방향으로 위치하는 것으로 보아 동-서 방향으로 온위의 수평 경도가 증가한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 2006년 10월 22일 1800 UTC에서 10월 23일 1200 UTC까지 6시간 간격으로 등고도선, 바람장 및 등온도선을 나타낸 그림이다. 집중호우가 발생하기 전인 10월 22일 18 UTC(Fig. 7a)에 한반도 중부와 영남지방을 포함하여 큰 원형의 등고선이 보이며 저기압이 위치해 있음을 알 수 있다. 바람은 중부

지방을 중심으로 반시계 방향으로 불어들어가 저기압이 위치하는 곳과 잘 일치하며 영동지방은 온난이류와 관련하여 주위보다 온도가 높다. 집중호우가 가장 강했던 10월 23일 0000 UTC(Fig. 7b)에는 영동지방 해상을 중심으로 더 조밀하고 뚜렷한 원형의 등고선이 보이며 바람의 방향도 6시간 전 보다 반시계방향의 운동이 강해졌으며 역시 등고선의 아랫부분에 온난이류에 의해 온도가 높음을 볼 수 있다. 10월 23일 0600 UTC(Fig. 7c)와 1200 UTC(Fig. 7d)에는 원형의 저기압이 남동쪽으로 이동하였으며 영동지방에 바람장도 북풍이 우세해졌고 바람장 간격도 넓어졌다.

Fig. 6. Potential temperature (K) and wind vector at 925 hPa for (a) 1800 UTC 22, (b) 0000 UTC 23 October 2006.

그리고 한랭이류에 의하여 온도가 낮아졌음을 볼 수 있다. Fig. 5에서 보이는 양의 위치 소용돌이도와 저기압, 수렴구역이 매우 잘 일치함을 볼 수 있다.

상층의 양의 위치 소용돌이도 이상의 전면의 등온 위선은 등위도선에 거의 평행한 모습을 보이며 조밀한 등온위선에서는 대부분 온난이상이 나타난다. 앞서 온위의 온난이상은 저기압성 소용돌이와 관련이 있다고 하였는데 이로 인해 상층의 양의 위치 소용돌이도 이상으로 인한 바람장에 온난이상으로 인한 저기압성 소용돌이도가 저기압성 순환을 유도한다고 사료된다.

상·하층 대기의 양의 위치 소용돌이도 이상이 한반도에 위치하고 온난이상이 나타나며 온위의 수평경도가 커짐으로써 급격하게 발달한 지상 저기압으로 인해 2006년 10월 23일 최대 순간 풍속 63.7 m s^{-1} 의 강풍을 동반한 집중호우가 발생한 것으로 해석된다.

대류권계면 시계열 분석

위치 소용돌이도가 1.6 PVU인 곳은 역학적 대류권계면으로 어떠한 지점에서 시간에 따른 위치 소용돌이도의 1.6 PVU 등치선의 변화 경향을 보면 대류권계면의 움직임을 알 수 있다. 본 사례에서는 한반도 영동지방인 강릉(128°E , 37°N)을 중심으로 NCEP 전구분석 자료를 통한 1.6 PVU의 위치 소용돌이도를 이용하여 대류권계면 접힘을 알아보았다. Fig. 8은 한반도 영동지방인 강릉부근에서 위치 소용돌이도

의 기압에 따른 시계열 분포를 나타낸다.

지상 저기압이 급격히 발달하기 전인 22일 0000 UTC에서 1200 UTC까지는 대류권계면이 약 250 hPa 고도에 위치하며 12시간동안 거의 위치 변화가 없었으나 온난전선이 한반도에 위치하기 시작한 10월 22일 1200 UTC부터 대류권계면이 급격히 하강하기 시작하여 지상에 저기압이 가장 강하게 발달한 10월 23일 0000 UTC에는 대류권계면이 약 900 hPa 고도에 위치했다. 그 후 대류권계면은 다시 상승하여 하강 상승을 반복한 후 저기압이 발달하기 전과 비슷한 고도에 위치했다. 10월 23일 0000 UTC에 대류권계면이 900 hPa 근처까지 내려 온 것으로 보아 성층권의 대기가 지상 저기압 발달에 영향을 미쳤다고 판단된다.

본 연구를 겨울철 지상 저기압이 한반도를 통과하면서 한반도 전체에 악기상을 초래한 사례를 대류권계면 이상과 연관하여 분석한 이흥란 외(2001; 2002)의 연구결과와 비교하면, 겨울철 및 10월로 계절상으로는 차이가 있으나 두 사례 모두 대류권계면 이상과 관련이 있으며, 저기압의 발달과 영향이 있음을 나타낸다. 이흥란 외(2001; 2002)에서 급격히 발달하는 저기압의 경우 대류권계면 접힘 전과 접힘 시의 최저 고도의 차이가 190, 370 hPa로 크게 나타났다. 이는 본 사례에서 최저 고도의 차이가 약 650 hPa으로 이흥란 외(2001; 2002)의 연구에서보다 더 큰 차이를 나타내었으며 이러한 차이는 저기압이 급격하게 발달

Fig. 7. Isotherm ($^{\circ}\text{C}$), wind vector and isohypse at 925 hPa for (a) 1800 UTC 22, (b) 0000 UTC 23, (c) 0600 UTC 23, and (d) 1200 UTC 23 October 2006. The dashed (solid) lines within (a),(b),(c) and (d) indicates temperature.

했으며 대류성 강수운이 더 크게 발달할 수 있음을 나타낸다.

위치 소용돌이도 이상의 시계열을 Fig. 3 및 Fig. 5와 비교해보면 대류권계면의 급격한 하강은 500 hPa의 절리 저기압과 상층의 등온위 위치 소용돌이도 이상과 관련있으며, 10월 23일 0000 UTC-0300 UTC 사이에 대류권계면이 매우 급격히 하강하여 큰 위치 소용돌이도 이상을 가진 성층권 공기가 한반도 영동 지방인 강릉의 대류권(약 900 hPa)으로 유입되어 지상에 매우 급격한 저기압이 발달되었다고 사료된다.

연직 상승속도와 상대 소용돌이도 분석

Fig. 9a는 2006년 10월 23일 0000 UTC의 NCEP 전구분석 자료를 이용하여 연직 상승속도를 나타낸 것으로 굵은 실선은 1.6 PVU인 역학적 대류권계면, 점선은 상승속도, 실선은 하강속도를 나타낸다. 대류권계면이 가장 아래까지 내려온 10월 23일 0000 UTC(Fig. 9a)에는 위도 41°N , 500 hPa 부근에 $7 \times 10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$ 이상의 하강기류 핵이 나타나며, 위도 38°N , 500 hPa 부근에 $-22 \times 10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$ 이하의 상승기류 핵이 나타난다. 그리고 전 층에 걸쳐 매우 강한

Fig. 8. Time series of vertical profile of potential vorticity from 0000 UTC 22 to 1800 UTC 24 October 2006 (Gangneung).

Fig. 9. (a) Vertical velocity for 0000 UTC 23, and (b) Relative vorticity 0000 UTC 23 October 2006.

상승 운동이 뚜렷하게 나타났다. Fig. 1의 지상일기도와 비교해보면 저기압의 영향으로 상승기류가 한반도 전체에 영향을 미쳤음을 알 수 있다. 그림에는 나타나지 않았지만 23일 0000 UTC 전과 후를 분석해보면 대류권계면 접힘 현상이 발생하기 전에는 상승기류가, 대류권계면 접힘 현상 후에는 하강 기류가 활발하게 나타났으며, 이러한 결과는 이홍란 외 (2002)의 연구와 잘 일치한다.

Fig. 9b는 2006년 10월 23일 0000 UTC의 NCEP

전구분석 자료를 이용한 상대 소용돌이도를 나타낸 것으로 굵은 실선은 역학적 대류권계면을 나타내며 점선은 음의 소용돌이도인 고기압성 소용돌이도, 실선은 양의 소용돌이도인 저기압성 소용돌이도를 나타낸다. 대류권계면이 지표 근처로 내려온 0000 UTC에는 38°N, 약 400 hPa의 위치에 $3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 이상의 핵을 가지는 저기압성 소용돌이도가 대기 전 층에 걸쳐 매우 강하게 발달해 있다. 특히 중간 대류권(500 hPa 부근)의 상대 소용돌이도 값은 매우 크게

Fig. 10. Vertical cross section of potential temperature (dash-dotted line, K) and total wind speed (solid line, ms^{-1}) for (a) 1200 UTC 22 and (b) 0000 UTC 23 October 2006 at 37°N . The dynamic tropopause (1.6 PVU) is denoted by heavy solid line. The “L” denote the surface low and jet streak, respectively.

변했다. 즉 대류권계면 접힘 현상이 발달하면서 큰 저기압성 소용돌이도를 가진 상층의 공기가 지표 근처까지 하강하였다.

대류권계면 접힘 전 · 후 특성 비교

지상 저기압의 발달과 관련해 나타나는 대류권계면 접힘의 공간적 규모, 대기의 역학 및 열역학적 특성, 그리고 상 · 하층 대기의 상호작용 및 역할을 조사하기 위해 NCEP 전구분석자료를 이용하여 영동지방에 집중호우가 발생하기 전인 2006년 10월 22일 1200 UTC와 대류권계면이 가장 아래로 내려왔을 때인 10월 23일 0000 UTC의 연직단면도를 분석했다. 연직 단면도는 37°N 의 동 · 서 단면도를 이용하였으며 Fig. 10-Fig. 14에서 보이는 모든 굵은 실선은 역학적 대류권계면을 나타내고, ‘L’은 지상저기압의 위치를 ‘J’는 제트기류를 나타낸다. 대류권계면 접힘 전과 접힘 시 최저 고도와와의 차이는 450-670 hPa이고, 수평규모는 10월 22일 1200 UTC에는 8° , 10월 23일 0000 UTC에는 13° 이다. 본 결과는 선행연구보다 수평규모는 작고 연직규모는 더 크다.

대류권계면은 파상운동을 하기 때문에 정확한 연직 규모와 수평규모를 측정하기는 어렵지만 이번 연구결과를 다른 연구결과와 비교해 보면 동쪽으로 이동하는 저기압이 급격히 발달하는 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 대류권계면이 많이 하강했으며 지상 저기압은 대류권계면 접힘 시 가장 낮은 부분의 동쪽에 위치하여 대류권계면과 동 · 서의 기울기를 가지고 발달하였다. 그림에는 나타나지 않았지만 저기압이

약화될 때는 대류권계면과 지상의 저기압의 기울기가 거의 수직에 가까워졌다.

온위와 바람장의 연직 구조

영동지방 대류권계면 접힘이 발생하기 전과 가장 크게 발달했을 때의 대기의 열역학적인 특성과 운동학적인 특성을 온위와 바람장을 중심으로 분석했다. Fig. 10은 2006년 10월 22일 1200 UTC와 10월 23일 0000 UTC의 온위(파선)와 풍속(실선)을 나타낸 것이다. Fig. 10a의 온위 분포를 보면 대류권계면 접힘 현상의 골이 지나고 있는 123°E , 450 hPa 고도 이하의 층에서는 주위보다 온위가 낮은 한랭돔(cold dome)이 형성되어있고 450 hPa 고도 이상의 하부 성층권에는 온난풀(warm pool)이 형성되어있다. 대류권계면 접힘의 골과 지상 저기압은 동 · 서 방향으로 기울어져 있으며 경사부분 동쪽에서 지상 저기압이 발달한다고 판단된다. 등온위면의 연직 경도를 보면 중 · 하부 대류권의 등온위면의 경도보다 하부 성층권의 등온위면의 경도가 훨씬 커서 중 · 하부 대류권은 상대적으로 덜 안정한 영역이 형성되어있고 하부 성층권에는 등온위의 간격이 매우 조밀한 안정한 영역이 형성되어있다. 이런 구조는 중위도 대류권계면 파상운동구조의 전형적인 경우에 해당하며 성층권의 안정한 공기가 대류권계면의 하강으로 중 · 하부 대류권까지 내려오고 있다고 판단된다(이홍란, 2002). 강한 풍속대는 한랭돔의 영역과 거의 일치하며 대류권계면 접힘 현상에 의해 대기 하층까지 내려온 것으로 보인다. 따라서 한랭돔은 대류권계면 접힘 현상의 골부

Fig. 11. Same as in Fig. 9 except for meridional component of the wind. The dashed (solid) lines indicates northerly (southerly) wind.

분과 약간의 차이는 있지만 잘 일치하는 것으로 해석된다.

대류권계면이 가장 아래로 내려왔을 때인 23일 0000 UTC(Fig. 10b)에서는 12시간 전에 비해 지상 저기압과 대류권계면 접힘의 골 부분과의 연직 기울기는 더 증가하였다. 온위의 분포를 보면 124-128°E, 400 hPa 부근에 한랭돔이 형성되어 있으며 이로 인해 수평적으로 122°E에서 132°E까지, 연직으로는 400 hPa에서 지표까지 강한 경압역이 형성되어있다. 제트는 모두 12시간 전에 비해 좀 더 아래로 내려온 것으로 보아 대류권계면 접힘 현상에 의해 상층의 강한 바람이 아래로 내려왔다고 생각된다.

온위와 바람장 분석 결과 대류권계면의 하강은 중·하부대류권 온위의 연직 경도가 작아 상대적으로 덜 안정한 영역을 따라 일어났으며 제트에 의한 강한 풍속대를 따라서 대류권계면 접힘 현상이 발달했고 이러한 대류권계면 접힘 현상이 지상 저기압의 급격한 발달을 초래한다고 판단된다.

Fig. 11은 바람의 남-북 성분의 연직분포를 나타내며 점선은 음의 값으로 북풍, 실선은 양의 값으로 남풍을 의미한다. Fig. 11a, 11b 모두 대류권계면 접힘이 일어난 가장 낮은 곳을 기준으로 오른쪽은 남풍이 불고 왼쪽은 북풍이 분다. Fig. 11a에서는 남풍의 최대 풍속은 지상저기압이 위치한 127°E, 400 hPa에서 15 m s^{-1} 이상이며 북풍의 최대 풍속은 120°E, 450 hPa에서 25 m s^{-1} 이상으로 전체 풍속에 비해서는 값이 낮게 나타난다. 지상저기압이 급격히 발달했을 때(Fig. 11b)는 남풍의 최대풍의 위치가 약간 북쪽으로 이동하였으며, 세기도 20 m s^{-1} 이상으로 조

금 더 강해지고 강풍대도 확장되었다. 북풍의 경우는 최대풍의 위치가 조금 더 높아졌으며 최대풍의 크기와 규모는 12시간 전과 비교해 큰 차이가 없었다.

대류권계면 접힘 현상의 골을 중심으로 동쪽은 남풍성분으로 동-서 연직단면도 그림 안으로 들어 가며, 서쪽은 북풍성분으로 동-서 연직단면도 그림 밖으로 나오는 저기압성 순환을 형성하고 있다.

연직 상승속도와 상대 소용돌이도장

Fig. 12은 연직 상승속도를 나타낸 것으로 점선은 음의 값으로 공기의 연직 상승기류를 나타내고 실선은 양의 값으로 연직 하강기류를 나타낸다. 그림에서 특징적으로 나타나는 것은 대류권계면 접힘 골 부분의 오른쪽은 상승기류, 왼쪽은 하강기류가 나타나는 것이다. 이러한 현상은 기존의 연구 결과와 유사하다 (Bluestein, 1993; 이흥란 외, 2001; 2002).

지상저기압이 급격히 발달하기 전인 2006년 10월 22일 1200 UTC(Fig. 12a)에는 지상저기압의 약간 서쪽 500 hPa 부근에서 $-5 \times 10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$ 이하의 상승역이 250-600 hPa까지 나타나며 대류권계면 접힘 서쪽 경사 부분 50 hPa 부근에 $12 \times 10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$ 이상의 강한 하강역이 위치한다. 이런 하강역은 Fig. 10a의 바람장의 연직 분포에서 나타난 대류권계면 접힘 왼쪽 마루 부분에 있는 강한 풍속대의 하강기류역과 잘 일치한다.

지상저기압이 급격히 발달할 때인 10월 23일 0000 UTC(Fig. 12b)에는 대류권계면 접힘 현상이 있는 대부분에서 상승운동이 활발히 일어나고 있으며 지상저기압 바로 위인 130°E, 450 hPa 근처에 상승역이 위

Fig. 12. Same as in Fig. 9 except for vertical velocity. The dashed (solid) line indicates ascending (descending) motion.

Fig. 13. Same as in Fig. 9 except for relative vorticity. The dashed (solid) line indicates negative (positive) anticyclonic (cyclonic) vorticity.

치한다. 바람의 연직 상승속도와 풍속의 분포를 통해 대류권계면 접힘 현상의 골은 상층의 강한 바람 영역의 하강기류와 관련이 있으며 강한 하강기류가 대류권계면 접힘을 발달시킨 것으로 해석된다. 지상저기압은 상승기류가 지상저기압의 연직에 오면서 상승운동을 활발히 하여 더 발달한 것으로 판단된다. Fig. 11과 비교해보면 상승운동이 일어나는 곳과 남풍이 부는 곳, 하강운동이 일어나는 곳과 북풍이 부는 곳이 거의 일치함을 알 수 있다.

Fig. 13는 상대 소용돌이도의 연직 분포를 나타낸 것으로 실선은 양의 값으로 저기압성 소용돌이도, 점선은 음의 값으로 고기압성 소용돌이도를 나타낸다. 10월 22일 1200 UTC(Fig. 13a)에는 하부 성층권(450 hPa 부근)에서 $2.6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 이상의 최대 저기압성 소용돌이도가 나타나고, 저기압성 소용돌이는 대류권계면 접힘 현상이 일어나는 전 대기층에 걸쳐서 약간

북서쪽으로 기울어진 소용돌이관을 형성하고 있다. 이 영역은 강한 경압 불안정을 의미하며 이흥란 외 (2002)의 연구에서도 비슷한 결과를 보여준다. 10월 23일 0000 UTC(Fig. 13b)에 최대 저기압성 소용돌이도는 400 hPa로 그 고도가 상승하였고 크기는 $3.8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 이상으로 증가하였다. 저기압성 소용돌이관의 직경이 커졌으며 좀 더 연직으로 기울어져 있다. Fig. 12과 비교해보면 저기압성 소용돌이도는 연직 상승운동과 거의 일치함을 볼 수 있다.

발산장 분석

Fig. 14은 수렴과 발산의 연직분포를 나타낸 것으로 실선은 양의 값으로 발산, 점선은 음의 값으로 수렴($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)을 나타낸다. 지상 저기압이 급격히 발달하기 전(Fig. 14a)에는 대류권계면 접힘 현상의 가장 낮은 부분을 기준으로 동쪽은 수렴, 서쪽은 발산이

Fig. 14. Same as in Fig. 9 except for divergence. The dashed (solid) lines indicates convergence (divergence).

나타난다. 한반도가 위치한 곳(37°N, 127°E)에서는 700 hPa 고도까지는 수렴이 나타나고 그 위로 600 hPa 고도까지는 발산이 나타난다. 이는 Fig. 12a에서 보여지듯이 700 hPa 고도면에서 상승속도가 감소하여 수렴이 일어나고 그 위로는 다시 상승속도가 증가하여 발산이 일어난 것으로 사료된다. 지상 저기압이 급격히 발달했을 때(Fig. 14b)는 12시간 전과 반대의 현상이 나타난다. 대류권계면 접힘 현상 골 부분의 동쪽은 발산, 서쪽은 수렴이 나타난다. 연직 발산이 12시간 전에 비해 매우 큰 것을 볼 수 있으며 한반도가 위치한 곳에서는 800 hPa 고도면까지 발산이 매우 강하게 일어났다. 2006년 10월 23일 0000 UTC에 영동지방에 강한 집중호우가 있었던 것은 상층의 연직 발산에 의한 활발한 상승 운동이 영향을 주었다고 판단된다.

요약 및 결론

한반도에서 급격히 발달하는 저기압 발달기구를 이해하고 집중호우와 같은 악기상과의 관련성을 알아보기 위해 적외 위성영상, PV 분석 등을 이용해 대류권계면 접힘의 진화 및 구조를 알아보고 지상 저기압과 대류권계면 접힘과의 관련성을 알아보고자 집중호우가 발생했던 2006년 10월 23일을 사례로 선정하여 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

2006년 10월 23일 영동지방에 집중호우가 발생하였으며 10월 23일 하루 동안 속초 232 mm, 강릉 304 mm의 비가 내렸다. 10월 23일 0000 UTC의 지상 일기도를 보면 한반도 북부(130°E, 40°N)에 등압선이 매우 조밀한 것으로 보아 기압경도가 매우 크

게 나타났다. 그리고 위치 소용돌이도 이상에 의해 형성된 것으로 판단되는 500 hPa 등압면에 형성된 절리 저기압은 지상의 온난전선의 위치, 위치 소용돌이도 이상의 위치와 거의 일치한다. 또한 500 hPa 등압면에 한랭 저기압이 한반도를 통과하고 있으며, 500 hPa 기압골 전면에서 지상 저기압이 위치한다. 지상 저기압이 상층제트의 저기압성 시어쪽과 위치 소용돌이도 이류의 하류 쪽에 위치하여 지상 저기압의 계속적인 발달에 영향을 미친 것으로 사료된다.

상층공기의 흐름을 파악하고자 305 K 등온위면의 위치 소용돌이도와 바람장을 분석 한 결과 반시계 방향으로 바람이 불어 들어가는 것으로 보아 저기압성 소용돌이도가 있다고 판단되며 사례기간동안 지상 저기압이 발달함에 따라 1.6 PVU 등치선과 지상 저기압의 연직 기울기는 점점 증가했다. 양의 위치 소용돌이도 이상에 의해 성층권 공기가 중간 대류권으로 유입되어 하층의 바람과 온도 분포 등에 영향을 줌으로써 지상저기압의 급격한 발달에 영향을 미쳤다고 판단된다. 925 hPa의 온위와 바람장을 분석 한 결과 상층의 양의 위치 소용돌이도 이상으로 인한 바람장과 온난이상으로 인한 저기압성 소용돌이도가 저기압성 순환을 유도한다고 사료된다.

시간에 따른 대류권계면의 모습을 알아보기 위해 강릉에서 1.6 PVU의 시간에 따른 연직분포를 시계열로 분석한 결과 시간이 지남에 따라 대류권계면은 급격히 낮아져 10월 23일 0000 UTC에서 0300 UTC 사이에는 900 hPa 까지 하강한 후 다시 상승했으며 대류권계면 접힘 전 고도와 접힘 시 최저 고도와의 차이는 약 650 hPa 정도이고 하강속도는 약 $7.8 \times 10^{-1} \text{ km hr}^{-1}$ 이다.

대류권계면 접힘 시 대기의 연직 상승속도는 $-22 \times 10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$ 로 크기가 매우 크며 대류권계면이 하강하는 동안 상층의 강한 저기압성 소용돌이도($2.2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)가 지표근처까지 내려왔다. 이 중에서 중간대류권(500 hPa 부근)의 상대 소용돌이도 값은 매우 크게 변했다. 그리고 저기압성 소용돌이는 대류권계면 접힘 현상이 일어나는 전 대기층에 걸쳐 북서쪽으로 기울어진 소용돌이관을 형성해 강한 경압 불안정을 의미한다. 450 hPa 이하의 영역에서는 한랭돌이, 그 이상에서는 온난돌이 나타나며 한랭돌과 대류권계면 접힘 현상의 골부분과 잘 일치한다. 바람의 남-북 성분의 연직분포를 보면 대류권계면 접힘 현상의 골 부분을 기준으로 오른쪽은 남풍이 불고 왼쪽은 북풍이 불어 저기압성 순환을 형성하고 있다.

대류권계면 접힘 서쪽 경사 부분에 $12 \times 10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$ 이상의 강한 하강역이 위치하며 이런 하강역은 대류권계면 접힘 왼쪽 마루 부분에 있는 강한 풍속대의 하강기류역과 잘 일치한다. 대류권계면 접힘 현상의 골은 상층의 강한 바람 영역의 하강기류와 관련이 있으며 강한 하강기류가 대류권계면을 발달시켰다고 판단된다. 발산장 분석 결과 대류권계면 접힘이 일어나기 전에는 대류권계면 접힘 현상의 골 부분을 기준으로 동쪽은 수렴, 서쪽은 발산이 나타났으나 지상 저기압이 급격히 발달했을 때는 동쪽은 강한 발산, 서쪽은 수렴이 나타나는 것으로 보아 상층의 연직 발산에 의한 활발한 상승운동이 집중호우에 영향을 주었다고 판단된다.

따라서 2006년 10월 23일 영동지방의 집중호우 사례에서 지상 저기압이 급격히 발달하는 동안 대류권계면 접힘 현상의 최저 고도가 900 hPa에 위치하며, 건조하고 안정하며 소용돌이도가 큰 성층권 공기가 대류권계면 접힘 현상에 의해 대류권으로 유입되면서 양의 위치 소용돌이도 이상이 저기압성 순환을 강화시키고 이로 인해 하층의 경압성이 증가되어 지상 저기압이 급격히 발달한 것으로 사료된다.

305 K 등온위면에서 양의 위치 소용돌이도 이상, 대류권계면 접힘의 시 · 공간적인 분포, 대기의 연직 단면, 상층 양의 위치 소용돌이도 이상과 지상 저기압 연직 기울기 등을 분석한다면 이와 관련된 악기상을 좀 더 정확하게 예측하는데 도움을 줄 수 있을 것이다.

본 연구는 집중호우와 대류권계면 이상과의 관련성을 분석한 사례연구로써 연구 결과를 일반화시키기에

는 무리가 있다. 그러므로 집중 호우 등의 악기상 현상이 발생할 때 대류권계면의 변화의 경향, 관련성 등에 대한 추가적인 사례연구가 필요하다.

사 사

본 연구는 기상청 기상지진기술사업(CATER 2009-2109)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김동균, 전해영, 2000, 집중호우와 연관된 산악 효과에 대한 수치적 연구. 한국기상학회지, 36, 441-454.
- 노준우, 2003, 종관 배경에 따른 한반도 집중호우의 분류. 대기, 13, 94-95.
- 박지훈, 2006, 동해상에서 발달한 중규모 강설운에 의한 봄철 대설 사례 연구. 경북대학교 대학원 석사 학위 논문, 86 p.
- 박창현, 이화운, 정우식, 2003, 지리산 부근 집중호우 발생 시 하층제트와 지형의 영향. 한국기상학회지, 39, 441-458.
- 백선균, 조천호, 김정훈, 송희영, 2003, 윈드프로파일러를 이용한 2003년 여름철 악기상 현상 분석. 한국기상학회지, 13, 156-157.
- 신철수, 이태영, 2003, 2002년 8월 6-7일의 중부지방 집중호우를 가져온 교란의 구조와 호우 발생 기구. 한국기상학회지, 25, 90-91.
- 이홍란, 김경익, 유정문, 민경덕, 2001, 대류권계면 파상운동에 의해 발생한 한반도 겨울철 악기상의 연구. 한국기상학회지, 37, 195-224.
- 이홍란, 김경익, 유정문, 이우진, 2002, 급격히 발달하는 저기압과 관련된 대류권계면 파상운동. 한국기상학회지, 38, 431-463.
- Bluestein, H.B., 1993, Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes: vol. II, Oxford University Press, UK, 594 p.
- Chen, Y.L. and Li, J., 1995, Large-Scale Conditions Favorable for the Development of Heavy Rainfall during TAMEX IOP 3. Monthly Weather Review, 123, 2978-3002.
- Chen, G.T.J., 1977, An analysis of moisture structure and rainfall for a Mei-Yu regime in Taiwan. Proceeding of the National Science Council, 1, 1-21. [Available from National Science Council, 2 Kuang-Chou St, Taipei, Taiwan, ROC]
- Chen, G.T.J. and Yu, C.C., 1987, Study of Low-Level Jet and Extremely Heavy Rainfall over Northern Taiwan in the Mei-Yu Season. American Meteorological Society, 884-891.
- Konard II, C.E., 1997, Synoptic-Scale Features Associated with Warm Season Heavy Rainfall over the Interior

- Southeastern United States Weather Forecasting, 12, 557-571.
- Matsumoto, S., 1972, Unbalanced low-level jet and solenoidal circulation associated with heavy rainfalls. Journal of Meteorological Society of Japan, 50, 194-203.
- Song, B.G., Kim, Y.S., and Youn, Y.H., 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.
- Teixeira, Tateus da Silva and Satyamurty, Prakki, 2006, Dynamical and Synoptic characteristics of Heavy Rainfall Episodes in Brazil. Monthly Weather Review, 106, 598-671.
- World Meteorological Organization, 1986, Atmospheric ozone 1985, Global ozone research and monitoring report, Rep. No. 16, WMO, Geneva, Switzerland, 392 p.

2010년 5월 20일 접수
2010년 6월 30일 수정원고 접수
2010년 8월 4일 채택