온난수송대 접근에 의한 한라산 봄철 호우 현상의 종관적 특징

오영숙¹ · 최광용²

¹제주지방기상청 기후과 · ²제주대학교 지리교육전공

(2014년 9월 5일 접수, 2014년 9월 16일 수정, 2014년 9월 19일 게재 확정)

Synoptic Characteristics of the Spring Heavy Rainfall Events Across Mt. Halla by the Approach of Warm Conveyor Belts

Young-Sook Oh¹ · Gwangyong Choi²

¹Division of Climate, Jeju Regional Meteorological Administration

²Major of Geography Education, Jeju National University

(Received 5 September 2014, Revised 16 September 2014, Accepted 19 September 2014)

Abstract : The purpose of this study is to identify the characteristic synoptic patterns of the spring (March to May) heavy rainfall events over Mt. Halla by the approach type of the warm conveyor belts around migratory extratropical cyclones. Analyses of synoptic atmospheric conditions show that the spring warm conveyor belts in the form of low-level jets appear at lower elevation than that in summer. Most of spring heavy rainfall events over Mt. Halla at the warning stages or watch result from forward-sloping ascent warm conveyors belts accompanying active convection. Particularly, the spring heavy rainfall events at the warning level over Mt. Halla is intensified by the elongation of the forward-sloping ascent warm conveyor belts when the east high-west low pressure systems, the upper level jet in the northern region-southwesterly low level jet and the migratory low pressure system at mature stage heading for the Korean Peninsular are combined. These findings can be used in improving the predictability of the spring heavy rainfall events over Mt. Halla.

Key Words : spring heavy rainfall events, warm conveyor belt, synoptic atmospheric conditions, Mt. Halla

주요어 : 봄철 호우 현상, 온난수송대, 종관 대기 상태, 한라산

1. 서론

우리나라 호우는 장마전선이나 태풍에 의해 여름철에 흔히 발생하지만, 봄철에도 이동성 저기압이 수송하는 수증기의 이류에 의해 호우가 발

생할 수 있다. 특히, 제주도는 한반도보다 저위도 지역에 위치해 있고 사면이 바다로 둘러싸여 수증기가 해양으로부터 풍부하게 유입될 수 있고, 섬의 중심에는 한라산이 자리 잡고 있어 수증기를 머금은 기류와 지형의 상호 작용에 의해 봄철에도

호우의 발생 가능성이 높다. 실제 최근 연구에 따르면, 한라산 산간 지역에서는 여름철 이외의 시기에도 일강수량 80 mm 이상의 집중호우현상이 발생하고 있음을 알 수 있다(Choi, 2013). 그러나 지금까지 우리나라 연중 강수 발생에 관한 대부분의 연구들은 여름철 장마전선이나 태풍의 종관기상학적 특징에 관한 것으로 다른 계절의 강수현상과 관련된 종관기상학적 또는 종관기후학적 연구들은 상대적으로 그 수가 적다. 특히, 최근에는 우리나라의 남부 지역에도 봄철에도 호우가 발생할 가능성이 높아지고 있지만 이를 유발하는 이동성 저기압의 세부구조에 관해서는 거의 연구된 바가 없어 봄철 호우 예보에 많은 어려움이 있다.

전세계적으로 20세기 초반 처음 중위도 저기압 주변의 구름과 강수 발달에 관한 이론이 정립되었고(Bjerknes and Solberg, 1922; Bjerknes, 1932), 20세기 후반에 관측 자료가 누적되어 중위도 온대 저기압 주변에는 건조수송대, 한랭수송대, 온난수송대 등 세부구조의 존재가 밝혀졌다(Reed and Danielsen, 1959; Green *et al.*, 1966; Palmén and Newton, 1969; Harrold, 1973; Carlson, 1980; Browning, 1986; Browning and Roberts, 1994). 이들 연구들은 한랭전선과 온난전선 사이에 위치한 하층제트(low-level jet)에 동반되는 온난수송대가 저기압의 저위도 아열대 지역 대류권 하층에서 고위도 지역 대류권 상층으로 많은 수증기를 이동시켜 호우를 유발시킴을 밝혔다.

21세기에 접어들면서 최근에는 장기간 누적된 종관자료를 바탕으로 이동성 저기압 주변에 형성되는 온난수송대가 중위도 지역의 구름 및 강수 패턴에 어떤 영향을 미치는지에 대한 종관 기후학적 연구들(Stohl, 2001; Eckhardt *et al.*, 2004; Boutle *et al.*, 2011; Madonna *et al.*, 2014; Pfahl *et al.*, 2014)과 인위적인 기후변화에 의해 지역규모에서 이러한 온난수송대(warm conveyor belt)의

발생빈도와 분포가 어떻게 변화할 것인지를 전망하는 연구들(Lavers *et al.*, 2013)도 수행되고 있다.

우리나라가 속한 동아시아에서도 여름철에 중국 남해안에서 발달하는 하층제트에 의해 한반도 지역으로 많은 수증기가 유입되면서 집중호우가 자주 발생한다고 알려져 있다(예, Park and Lee, 1987; Tai-Jen Chen and Yu, 1988). 한반도 주변에서는 상·하층 제트의 결합 형태에 따라 남서-북동방향으로 기울어진 장마전선 주변지역의 호우의 발생 공간 분포와 호우의 강도가 달라진다는 연구 결과들도 제시되었다(Park *et al.*, 1983; Hwang and Lee, 1993; Byun and Kim, 1993; Park *et al.*, 2003).

특히, 제주도는 위도 약 33°N에 위치하여 아열대 기후대에 속하므로 한반도 지역에 비해 호우를 유발할 수 있는 수증기 수송이 시작되는 연중 시기도 더 이를 것으로 짐작된다. 실제 최근 10년간(2002~2011) 자동기상관측망 자료 분석에 따르면, 제주도 중산간~산간지대에는 봄철(3~5월)에도 일강수량 80 mm 이상의 집중호우가 약 2~6회 발생하고 있으며, 한라산 지형효과로 전체 계절 누적 강수량에서 차지하는 비율도 해발고도가 높아짐에 따라 산간지역에서는 최대 70%까지 증가하는 패턴이 나타남을 알 수 있다(Choi, 2013). 공간적으로 제주도는 하층 제트가 유입되는 길목에 위치하고 있으므로 이와 관련된 온난수송대가 호우 발생에 미치는 영향에 대한 연구가 시급하다고 판단된다.

본 연구는 온난수송대 유형별 한라산 산간지역에 발생하는 봄철 호우의 종관적 특징을 밝혀 제주도 산간 지역의 집중호우 예보력 향상에 필요한 과학적 기반을 마련하는 것을 목적으로 한다.

2. 연구자료 및 연구방법

본 연구에서는 호우 시 전형적인 종관 기후학적 특징을 파악하기 위해 최근 5년간(2010~2014년) 봄철(3~5월) 호우 발생 사례(총 37회) 중 기상청 선진예보시스템에 의해 호우주의보 단계 이상의 예보에 성공한 사례(총 28회)를 대상으로 연직 대기 구성 요소 간 상관관계를 분석하였다. 호우 사례 분석 시 기상청의 기본 지침을 참고하여 호우가 시작된 이후에 2시간 이상 강수가 소강상태에 접어들게 되면 해당 호우 사례는 종료된 것으로 간주하였다. 호우일의 종관 기후학적 분석에는 전체 예보 적중 성공 사례의 수증기 이류와 관련된 925 hPa, 850 hPa, 500 hPa의 기온, 기압, 상

대습도, 풍향 및 풍속 등의 요소들을 포함시켰다.

그 후, 호우 특보의 적중 사례를 그 수준에 따라 호우경보, 호우주의보 등 2개의 범주로 나누어 열과 수증기를 유입시키는 온난수송대의 유형에 따라 비지균(ageostrophic) 바람성분에 관한 대표적인 사례일의 대기의 수평 및 연직 구조를 분석하였다. 이를 위해 Browning(1986)의 연구 결과를 참고하여 저기압의 발달단계에서 온난수송대의 연직 이동 방향에 따라 온난수송대를 크게 '전사면 상승 온난수송대'와 '후사면 상승 온난수송대'로 구분하는 방법을 기준으로 하였다. 전사면 상승 유형은 온난수송대가 움직이는 앞쪽 온난전선 사면을 따라 상승하고 넘어가서 아래로 내려가는 수증기의 흐름을 가리키며, 후사면 상승 유형

Figure 1. 2-dimensional (upper panels) patterns and 3-dimensional (lower panels) profiles of the forward-sloping ascent warm conveyor belt (a) and the rearward-sloping ascent warm conveyor belt (b) suggested by Browning (1986).

Table 1. Representative extreme cases of the spring heavy rainfall events at warning or watch levels around Mt. Halla for the recent 5 years (2010~2014) period that were successfully predicted by the Korea Meteorological Administration.

Episode (Prediction)	History of report; areas	Type of warm con- veyor belt	Precipitation (mm)			
			1 hour max.	12hour (6hour) total	Daily total	Duration (hours)
2012.4.20 ~4.21 (Warning)	Warning: High mountain Warning: Southern mid-mountain Warning: Northern mid-mountain Watch: Western coastal region Watch: Eastern coastal region	Forward- sloping ascent	66.0 33.0 42.0 23.0 20.0	552.5 200.5 270.0 122.5 119.5	614.5 234.5 304.5 150.5 147.5	Mountain: 33 Coastal: 20
2013.5.27 ~5.28 (Warning)	Warning: High mountain Warning: Northern mid-mountain Watch: Southern mid-mountain	Forward- sloping ascent	91.0 28.5 28.0	565.5 149.5(6hr) 137.5	971.5 209.5 173.0	Mountain, Northern: 30 Southern: 24
2014.5.11 ~5.12 (Warning)	Warning: High mountain Watch: Southern mid-mountain	Forward- sloping ascent	56.5 16.5	360.5 73.5(6hr)	405.5 94.0	Mountain: 20 Southern: 12
2014.5.20 (Watch)	Watch: High mountain Watch: Southern mid-mountain Watch: Western coastal region	Forward- sloping ascent	23.0 16.5 19.5	74.5(6hr) 80.5(6hr) 70.5(6hr)	109.5 85.0 84.5	Mountain: 20 Southern, Western: 10
2013.4.5 ~4.6 (Watch)	Watch: High mountain	Rearward- sloping ascent	22.5	130.5	147.5	Mountain: 24
2012.3.30 (Watch)	Watch: High mountain	Rearward- sloping ascent	17.5	121.5	124.5	Mountain: 12

은 온난수송대가 후면에서 빠르게 다가오는 한랭 전선을 타고 상승하는 수증기의 흐름을 가리킨다 (Figure 1). Lee *et al.* (2010)의 연구결과를 참고하여 호우특보 사례의 위성영상의 건조역과 그 전면에 발달한 운형 및 Skew T-Log P 다이어그램에 시간 경과에 따라 나타난 건조선과 습윤 구역의 연속 변화를 종합분석하여 온난수송대 유형을 분류하였다. 예를 들어, 서쪽에서 다가오는 건조역의 전면에 구름대가 길게 발달하고 특히 대류에 의한 구름의 발달이 탁월하고 호우일에 시간이 경과하면서 Skew T-Log P 다이어그램에서 건조 구역이 대류권 중층에서 하층으로 온난전선을 타고 이동하는 경우를 전사면 상승 온난수송대 유형으로

분류하였다. 이때 온난수송대는 등온위면을 따라 흐르는 것으로 가정하여 300K면을 분석하였다. 더 나아가 세부적으로 기상청 호우 특보 기준에 따라 산간 및 해안지역에 ‘호우경보’가 발표되는 12시간 강수 180 mm 이상 또는 6시간 강수 110 mm 이상, ‘호우주의보’가 발표되는 12시간 강수 110~180 mm 또는 6시간 강수 70~110 mm, 그리고 호우로 분류되지 않는 6시간 강수 70 mm 이하 등의 세부 호우 사례로 세분하였다.

이러한 방법으로 분류된 한라산 산간지역 호우 특보 적중일(총 28일)의 강수량 및 온난수송대 유형 분류 결과를 살펴보면, 대체로 모든 호우경보 사례(총 13일)는 전사면 상승 온난수송대 형성 시

나타나고, 후사면 상승 온난수송대는 호우주의보 수준의 호우만을 유발시킴을 알 수 있다(Table 1). 이러한 대표적인 사례 중 ‘전사면 상승 온난수송대’가 나타나고 한라산 산간지역에 1시간 최대 강수량이 기록된 2013년 5월 27일과 ‘후사면 상승 온난수송대’가 형성되고 1시간 최대 강수량이 기록된 2013년 4월 5일의 지상 및 상층 상·하층 제트 위치를 포함한 종관 기상 상태를 비교·분석하였다. 이 사례들의 2차원의 종관장 분석에는 기상청에서 제공한 MTSAT위성과 천리안(COMS) 위성의 근적외선(IR), 수증기(WV), 합성영상자료와 동일 시각의 기상레이더 합성영상 및 UMRDAPS 수치모델자료 등을 사용하였다. 또한, 수치자료를 기상청의 통합기상분석시스템과 3차원 기상표출시스템을 이용하여 해당 사례일의 연직 종관 상태를 분석하였다. 이외에도 제주고층 기상관측소(고산)의 자료 기반으로 그려진 해당 사례일의 Skew T-Log P 다이어그램을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

1) 봄철 한라산 호우일의 종관 기후요소의 상관성

최근 5년간 한라산 봄철 호우 특보 적중 사례들의 종관 기후요소들 간 상관관계를 분석해 보면, 봄철 호우 발생 시에는 하층 대기의 수증기 수송이 활발해지고, 불안정한 대기 연직 구조가 형성되어 활발한 대류현상이 나타남을 알 수 있다(Figures 2-3). 봄철 호우 특보 사례들의 대류권 하층의 925 hPa과 850 hPa의 상당온위(equivalent potential temperature)를 비교해 보면, 각각 310~349K와 306~339K로 서로 유사하고, 두 지오포텐셜 고도에서 모두 상당온위가 증가할수록 총강수량(total precipitable water)도 증가하는 패턴이 관찰된다(Figure 2). 상당온위 상승에 따른 925 hPa의 총강수량 증가율은 +9.8 mm/cm²/10K이다. 유사하게 850 hPa에서의 증가율은 +8.7 mm/cm²/10K인데, 850 hPa 지오포텐셜 고도의 경우 산

Figure 2. Relationships between total precipitable water (mm/cm²) and equivalent potential temperature (K) at (a) 925hPa and (b) 850hPa levels for the spring heavy rainfall events across Mt. Halla predicted by the Korea Meteorological Administration for recent 5 year (2010~2014) period.

포도에서 벗어난 자료로 판단되는 상당온위가 가장 작은 2014년 3월 12일 사례를 제거하면 증가율도 $9.5 \text{ mm/cm}^2/10\text{K}$ 로 거의 차이가 없게 된다. 이러한 증가율은 모두 95% 이상의 통계적 유의수준을 지닌 값들이다. 특히, 봄철 호우특보일 총가강수량이 30 mm/cm^2 이상 되는 850 hPa면의 상당온위는 315K로, 우리나라 기상청의 여름철 호우 예측 기준인 850 hPa의 상당온위 333K보다 낮게 나타난다. 이러한 결과는 온난수송대를 따라 잠열발생에 의해 상당온위는 호우 현상이 없을 때보다 두 계절 모두 높게 나타나지만, 하층제트가 850 hPa를 중심으로 탁월하게 형성되는 여름철과 비교하여 봄철의 불안정한 대기가 형성되는 연직층은 더 낮은 고도에서 형성됨을 가리킨다.

한편, 한라산 지역 봄철 호우특보 사례일의 K지수는 24~37의 범위를 나타낸다(Figure 3a). 일반적으로 K지수는 대기의 중층 이하 대기층에서 불안정 요소를 진단하기 위해 사용되는데 26이상의 값을 나타낼 때에는 대류의 가능성이 있는 상태를 가리킨다(George, 1960). 일차선형회귀선을

그려 보면 봄철 호우특보 사례일에는 평균적으로 K지수가 10 증가할수록 총가강수량도 17 mm/cm^2 정도 증가함을 알 수 있다. 이러한 증가율은 95% 이상의 통계적 유의수준을 나타내는 값이다. 특히, 봄철 총가강수량 30 mm/cm^2 인 호우특보일의 K지수는 25로 여름철 호우 예측 기준인 K지수 30보다 작게 나타난다. 봄철 호우 특보일의 대류권 중층(500 hPa) 기온은 $-5 \sim -15^\circ\text{C}$, 하층(925 hPa) 기온은 $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 을 각각 나타낸다. 즉, 두 연직층의 기온차는 $20 \sim 30^\circ\text{C}$ 정도로 고도 변화를 고려하면 중위도 평균 기온감률($0.6^\circ\text{C}/100 \text{ m}$)에 비하여 호우 시에는 기류 상승시 방출되는 잠열에 의해 연직 기온차가 줄어들음을 알 수 있다. 대기의 연직 흐름 측면에서 대류권 하층(925 hPa)과 중층(500 hPa) 사이의 호우일 평균적인 연직방향 풍향 변화를 살펴보면, 대류권 하층에서는 남풍(90°)이고, 고도가 상승하여 대류권 중층으로 올라갈수록 남서풍(240°) 계열로 풍향이 바뀌는 것을 확인할 수 있다(Figure 3b). 즉, 봄철 호우 발생 시에는 대류권 하층부터 중층까지 수증기의 수렴에 유리한 풍

Figure 3. Same as in Figure 2, but for (a) relationships between total precipitable water (mm/cm^2) and K-index(George, 1960) and (b) vertical variations of wind direction (90: easterly, 180: southerly, 270: westerly). Thick line in (b) is the average of all cases represented by thin lines.

향이 시계방향으로 변하는 순전(veering)의 바람 연직 패턴이 형성됨을 알 수 있다. 특히, 봄철 호우특보일의 총강수량 30 mm/cm^2 인 경우 850 hPa 에서의 평균 풍속은 30 knots 이상에 달한다.

2) 온난수송대 접근 유형별 한라산 호우 발생 사례일의 종관 상태

최근 5년간 제주도에 봄철 호우 특보를 적중사례(총 28회)를 살펴보면, 전사면 상승 온난수송대 유형 약 79%(22회), 후사면 상승 온난수송대 유형 약 14%(4회), 유형 미분류 사례는 약 7%(2회)를 차지한다. 호우 특보 중 호우경보가 발표되고 전사면 상승 온난수송대가 나타난 사례는 100%(13회/13회)이고, 호우 특보 중 호우주의보가 발표되고 전사면 상승 온난수송대가 나타난 사례는 69%(9회/13회), 후사면 상승온난수송대가 나타난 사례는 31%(4회/13회)이다. 즉, 강한 호우는 대부분 전사면 상승 온난수송대가 동반되어 나타남을 알 수 있다.

1시간 최대 강수를 기록한 온난수송대 전사면 상승 유형(예, 2013년 5월 27일, 산간지역 호우 특보, 1시간 최대 강수량 91 mm , 일강수량 971.5 mm) 사례일에는 한반도 북부지역에 상층제트가 위치하고, 그 남쪽 지역에 중국 동안에서 발생한 저기압이 경기만으로 이동해 들어오면서 그 세력이 성숙단계에 이르는 경기만으로 이동하는 패턴이 관찰된다(Figure 4a). 이때 이 저기압에 발달한 한랭전선 전방과 온난전선 후방 지역에서 온난수송대가 하층제트의 형태로 형성되어 북상하기 좋은 조건을 이룬다. 전사면 상승 온난수송대가 발달한 이러한 사례일에는 후사면 상승 온난수송대가 형성된 경우에 비하여 우리나라 남부지방의 대류권 중층(500 hPa) 지오폠펜셜 고도가 상대적으로 높은 값을 나타낸다. 즉, 전사면 상승 온난수송대 접근 시에는 한반도 남쪽에는 따뜻한 공기가 대류

권 중층까지 유입되어 있음을 알 수 있다. 하층 제트의 풍속은 50 knots 로 한라산을 남북으로 가로질러 남서풍의 형태로 불고 있다. 이때 국지적으로 한라산 지형효과에 의해 남서쪽에서 이루어온 수증기가 사면을 따라 강제상승하면서 대류가 더욱 활발해져 해발고도 상승에 따라 호우의 강도도 증가할 수 있는 조건이 형성된다.

반면, 산간 호우주의보가 발효된 후사면 상승 온난수송대 유형의 경우(예, 2013년 4월 5일, 산간지역 1시간 최대 강수량 22.5 mm , 일강수량 147.5 mm)에는 제주도 남부해안에 상층제트가 자리 잡고 있으며, 중국 동안에서 발생한 저기압이 한반도 남서부 해상을 통과하는 패턴을 보인다(Figure 4b). 이때 전사면 상승 온난수송대 유형과 유사하게 제주도 남서부 지역에서 하층제트가 유입되고 있지만 동풍계열의 흐름 의해 수증기의 남북 방향 이동은 약화된다. 특히, 상·하층 두 제트의 위치가 매우 근접하여 전사면 상승 온난수송대 접근 시에 비하여 상층에는 찬 공기가 남하하여 한반도를 덮게 된다. 따라서 후사면 상승 온난수송대의 남북 이동과 그 주변의 연직 대류 현상이 상대적으로 줄어들어 한라산 주변의 강수 강도도 약해짐을 알 수 있다. 온난수송대 두 유형의 비교를 통해서 한라산 지역 봄철 호우의 강도를 결정하는 대류현상에는 기류를 유입시키는 하층제트의 세력뿐만 아니라 극지방의 찬 공기의 영역을 결정하는 상층 제트의 상대적인 위치도 중요함을 알 수 있다.

2013년 5월 27일 근적외선 영역의 구름 영상을 살펴보면, 전사면 상승 온난수송대는 대체로 중부지방에 위치한 저기압을 향하여 남북 자오선 방향으로 길게 형성되는 것을 알 수 있다(Figure 5a). 전사면 상승 온난수송대의 서쪽에는 건조수송대가 형성되어 아열대 지역에서 발원한 수증기의 남북 방향 이동 패턴을 강화시키고 있다. 500

Figure 4. Typical synoptic atmospheric conditions of the spring heavy rainfall event over Mt. Halla by (a) the forwarding warm conveyor belt (May 27, 2013) and by (b) the backward warm conveyor belt (April 5, 2013).

Figure 5. 500 hPa synoptic weather charts (blue line: geopotential height, red dotted line: isotherm and red arrow: dry conveyor belt) superimposed on an infra-red satellite imagery (upper panels) and 850 hPa vapor flux (red dotted line: warm conveyor belt) fields (lower panels) on the heavy rainfall days over Mt. Halla by the forward-sloping ascent warm conveyor belt (KST 21h on May 27, 2013) (a) and by the rearward-sloping ascent warm conveyor belt at (KST 21h on April 5, 2013) (b), respectively.

hPa면의 기압패턴을 살펴보면 저기압 중심에서 왼쪽으로 찬 공기가 남하하여 경압성(baroclinicity)이 큰 구역이 형성되어 있고, 저기압의 중심 오른쪽 가장자리를 따라 중국남부해안에서 우리나라 서쪽 지역으로 기류가 이동하는 패턴이 관찰된다. 이때 일본열도 동쪽에는 고기압이 자리 잡아 남북 자오선 방향의 전사면 상승 온난수송대의 흐름을 강화시킨다. 이와 관련된 850 hPa 면의 강수와 바람장의 특징을 살펴보면, 이동성 저기압이 반시계 방향으로 회전하면서 온난수송대가 저기압 남쪽에서 중심을 향해 동쪽으로 빠르게 이동하는 패턴이 나타난다.

반면, 2013년 4월 5일 후사면 상승 온난수송대가 접근한 경우에 제주도 주변에 발달한 저기압 주변의 반시계 흐름에 의해 북쪽에 위치한 한라산 지역에 동풍계열의 대상 흐름이 탁월하게 나타난다(Figure 5b). 이때 500 hPa 지오폠펜셜 고도와 등온선 분포도를 살펴보면 중국 동부 해안 지역에 약한 기압골이 자리 잡고 있지만, 황해상의 경압성이 전사면 상승 유형에 비하여 그 세력이 약함을 알 수 있다. 근적외선 위성영상에 나타난 이동성 저기압의 구름도 동서 방향으로 산개해 있고, 건조 수송대의 구역도 전사면 상승 온난수송대 접근시에 비하여 상대적으로 좁다. 또한, 동아시아 영역의 850 hPa 수증기장을 살펴보면, 중국 양쯔강 지역에서 동서 방향의 편서풍이 불어오다가 한반도 남서부 지역을 지나는 이동성 저기압과 일본열도 남서부 지역의 고기압 사이로 동풍의 형태로 나타나는 기류 흐름에 의해 약화되는 패턴이다. 이 반시계 방향의 저기압성 종관 규모 흐름이 편서풍대에 접어들어 약화되어 전사면 상승 온난수송대 접근 시보다 풍속도 더 작게 나타난다.

지상관측자료를 바탕으로 전사면 상승 온난수송대 접근 시 한라산 산간지역에 호우경보가 발효되었던 사례일(Figure 6)과 후사면 상승 온난

수송대 접근 시 한라산 산간지역에 호우주의보가 발효되었던 사례일(Figures 7)의 한라산 주변에 기록된 하루 중 기상요소들의 변화를 비교해보면, 온난수송대 접근 유형에 따라 호우의 강도와 시공간적 분포에 뚜렷한 차이가 있음을 알 수 있다. 우선, 전사면 상승 온난수송대가 접근하였던 2013년 5월 27일의 경우에는 전반적으로 시간의 진행에 따른 호우의 강도도 더 높았고, 그 한라산 주변의 호우 발생 공간적인 범위도 더 넓게 나타났다. 가령, 한라산 서부 산간에 위치한 윗세오름(해발고도 1,673 m) 자동기상관측지점에서 풍속(녹색선, S)은 8~16 %로 다소 강한 편이었고, 풍향(노란색선, H와 하단의 화살표)은 주로 남풍 또는 남서풍을 기록하였다(Figure 6a). 이때 호우에 의해 3시간 누적강수량(파란색 영역, R)은 30~70 mm까지 증가하였지만, 기온(적색선, T)은 변화가 뚜렷하지 않아 일교차가 상대적으로 작게 나타났다. 산간지역 윗세오름의 3시간 누적 강수량은 30~230 mm의 범위까지 큰 변동패턴을 보였다. 호우가 발생한 시각을 포함한 12시간 누적 강수량 최대치가 한라산 대부분 지역에서 180 mm 이상으로 호우 경보 지역에 속하였다(Figure 6b). 온난수송대가 서해안을 따라 남북 자오선 방향으로 길게 발달하여 남서부 해안 산지 지역에서도 강수량이 100 mm 이상으로 높게 나타났다(자료 미제시). 해발고도 상승에 따른 강수 자료의 분포 패턴을 살펴보면, 해안지역에서는 강수량이 적으나 한라산의 해발고도 상승에 따라 강수량이 10배 이상으로 늘어나는 패턴을 확인할 수 있다. 이 사례일의 제주도 동서방향 대류권 하층에서 중층 사이(925~500 hPa)의 수증기 수송 연직 단면도를 살펴보면, 강한 호우가 시작하기 시작한 오후 3시에 비하여 호우의 강도가 강해진 오후 9시의 풍속은 훨씬 더 강해져 25 % 이상을 기록하였다(Figure 6c). 특히, 한라산과 접하는 지역에서는 600 hPa

Figure 6. Synoptic meteorological conditions of a spring heavy rainfall event by forward-sloping ascent warm conveyor belt (May 27, 2013): (a) Time series of meteorological variables observed at Witseoreum (# 871 in (c), m.s.l 1,673m), (b) maximum of 12 hours cumulative precipitation, and (c) vertical profile of winds in the west-east direction of Jeju Island at KST 21h.

Figure 7. Same as in Figure 6, but for a spring heavy rainfall event by the rearward-sloping ascent warm conveyor belt (April 5, 2013).

이상까지 강제 상승하는 지형성 대류 현상이 뚜렷하게 관찰된다. 제주 고층기상관측소의 연직 관측 자료를 바탕으로 한 Skew T-Log P 다이어그램을 분석해 보면(자료 미제시), 지상에서 상층 925 hPa 사이에 풍속이 50 knots 이상으로 강하게 나타나고 그 이상의 대류권 중층으로 갈수록 풍속이 감소하는 패턴이 관찰된다. 이러한 결과들은 전사면 상승 온난수송대 접근 시에는 한라산 주변 지역에서는 대류권 하층에서 중층 대기로 강하게 이동하는 지형성 강제 상승 패턴이 형성됨을 잘 보여준다.

대조적으로, 후사면 상승 온난수송대 접근 시 한라산 산간지역에 호우주의보가 발효되었던 2013년 4월 5일에는 호우의 강도도 상대적으로 낮고, 호우 발생 공간 범위도 산간지역에만 국한되었음을 알 수 있다. 한라산 산간 윗세오름에서 관측한 자료들의 시계열을 살펴보면, 3시간 누적강수량(파란색 영역, ⑧)은 20 mm 이하로 전사면 상승 온난수송대 접근 시 보다 작게 나타났다(Figure 7a). 처음 호우가 발생하던 시간 간격(4월 5일 16시~4월 6일 11시)의 풍속(녹색선, S)은 6~12 %로 전사면 상승 온난수송대 접근에 의한 호우경보 발효일의 풍속에 비하여 약하고, 풍향(노란색선, H와 하단의 화살표)도 주로 동풍 계열의 바람이 탁월하게 나타났다. 12시간 누적 강수량 최대치 분포에서도 110 mm 이상을 나타내는 공간 범위도 한라산 정상 주변에만 나타났다(Figure 7b). 또한, 제주도 동서방향 수증기 수송과 관련된 수증기와 풍향을 표현한 대기 연직 단면도를 살펴보면(Figure 7c), 주로 동풍계열의 수증기가 제주도로 유입되어 한라산 동사면을 따라 상승하고 있는 패턴이 관찰된다. 이때 그 수증기 이류와 관련된 풍속은 전사면 상승 온난수송대에 비하여 약하게 나타났다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 최근 5년간(2010~2014) 동아시아 지역의 상층과 하층 종관일기도, 위성영상과 고층 및 지상관측자료 등을 종합적으로 분석하여 한라산 산간 지역의 봄철 호우현상과 관련된 전형적인 종관 대기 상태의 특징을 밝히고 있다. 특히 이동성 저기압 주변에 형성되는 온난수송대 유형별로 나타나는 한라산 지역 봄철 호우 발생 시 전형적인 수증기의 이류 및 대류현상과 관련된 대기의 3차원적 종관 패턴의 차이를 유발하는 종관 대기 상태를 비교·분석하여 제시하고 있다. 이를 바탕으로 한 한라산 지역에 봄철 호우를 유발하는 종관 패턴을 요약해 보면 다음과 같다.

첫째, 장기간 호우 특보일의 종관 기후 요소 분석 결과에 따르면, 한라산 산간지역 호우(가령, 기상청에서 호우일로 정의하는 총가강수량 30 mm/cm²) 발생 시에는 수증기의 이류 및 대류 현상이 활발하게 나타날 수 있는 종관 대기 상태(925 hPa 상당온위 315K 이상, 850 hPa 풍속 30 knots 이상, K 지수 25 이상, 20℃ 이상의 대류권 중층(500 hPa)과 하층(925 hPa)의 온도차 등)이 형성됨을 알 수 있다.

둘째, 호우 특보일의 온난수송대 형태를 구분해 본 결과 한라산 산간지역 봄철 강한 호우는 주로 '후사면 상승 온난수송대 유형'보다는 '전사면 상승 온난수송대' 접근 시 발생함을 알 수 있다. 전사면 상승 온난수송대가 접근할 때에는 한라산 전역에 걸쳐 호우경보 단계까지 강화되지만, 후사면 상승 온난수송대가 접근할 때에는 상대적으로 산간지역에서만 호우주의보 단계 정도로 제한됨을 알 수 있다.

셋째, 강한 봄철 호우를 유발하는 전사면 상승 온난수송대에 의한 남북 수증기 수송에는 상·하층 제트의 상대적인 위치가 중요한 역할을 함을

알 수 있다. 특히, 상층 제트가 하층 제트에 비하여 북쪽에 위치하게 되면 찬 공기의 남하하지 못하도록 하고, 온난수송대가 상대적으로 많은 양의 수증기를 남북 자오선 방향으로 공급할 수 있는 종관 상태가 형성된다. 이때 한반도 서부지역에 저기압이 발달하여 통과하고 서태평양에는 고기압이 자리 잡는 동고-서저 기압패턴이 형성되면서 한반도 상의 수증기 수송과 관련된 온난수송대의 남북방향 장출 현상이 강화된다.

넷째, 전사면 상승 온난수송대 접근 경우와는 대조적으로 후사면 상승 온난수송대가 접근할 때에는 상층제트가 하층제트가 있는 위도까지 남하하여 수증기의 남북 수송 흐름과 호우의 강도가 약화된다. 상층 제트가 남하하면서 이동성 저기압의 위치도 한반도 남부지역으로 낮아져 수증기의 동서 흐름은 강화되지만, 남북 방향 흐름이 약화된다. 그 결과, 한라산 지역 강수 강도가 약화되고, 호우 발생의 공간 범위로 전사면 상승 온난수송대의 경우보다 상대적으로 좁아지게 된다.

이러한 연구결과들은 최근 기후변화에 의해 아열대 기후대의 북한계선이 점차 제주도에서 한반도 지역으로 북상하는 가운데 온난화에 의해 더 빈번하게 발생 할 수 있는 한반도 지역의 봄철 호우 예보력을 향상시키는데 기초정보로 활용가능할 것이다. 그러나 봄철 호우에는 이 연구에서 다룬 온난수송대 이외의 한랭수송대, 건조수송대 등도 큰 영향을 미칠 것으로 짐작되고, 이러한 이동성 저기압 주변의 지역규모 기후 시스템이 미치는 영향은 계절마다 다를 것으로 생각되므로 이와 관련된 후속연구들이 이루어져야 할 것이다. 또한, 이 연구는 주로 아열대 기후대에 속하는 제주의 강수량에 국한하여 호우사례를 분석하였으나, 전사면 상승 온난수송대 유형의 경우에는 남북으로 길게 발달하여 한반도 남부지역까지 봄철에 호우를 유발할 가능성이 있으므로 한반도 지

역의 호우에 미치는 영향에 대해서도 차후 분석해 볼 필요성이 있다. 이 연구에서는 자료의 사용한 자료의 기간이 제한되어 5년 자료만을 분석하고, 그 중 대표적인 사례 위주로 일반화한 내용들을 제시하였다. 따라서 후속 연구에서 봄철 호우 예보에서 불확실성을 줄이기 위해 보다 장기간 자료를 구축할 필요성이 있다. 그러나 현재 우리나라에서는 이와 같이 불확실성을 줄이기 위한 필수 자료로 활용되는 고품질의 위성영상, 레이더영상 등의 원격탐사영상들이 단기간 예보 시 사용 후 저장 공간 부족 때문에 데이터베이스화 되지 못하고 사라지고 있는 경우도 비일비재하다, 따라서 국가적 차원에서 디지털 기후 자료를 체계적으로 관리할 수 있는 제도, 인력, 하드웨어를 마련하는 것이 시급한 과제라고 판단된다.

사사

이 논문은 2014학년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원사업에 의하여 연구되었음.

References

- Bjerknes, J., 1932, Exploration de quelques perturbations atmospheriques a l'aide de sondages rapproches dans le temps (Exploration of some atmospheric disturbances using soundings close in time), *Geofysiske Publikasjoner*, 9(9), 3-4.
- Bjerknes, J. and Solberg, H., 1922, Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation, *Geofysiske Publikasjoner*, 3, 1-18.
- Boutle, I. A., Belcher, S. E., and Plant, R. S., 2011, Moisture transport in midlatitude cyclones, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(655), 360-373.
- Browning, K. A., 1986, Conceptual models of precipi-

- tation systems, *Weather Forecasting*, 1, 23-41.
- Browning, K. A. and Roberts, N. M., 1994, Structure of a frontal cyclone, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 120, 1535-1557.
- Byun, H. R. and Kim, Y. S., 1993, The role of the confluence of the upper and low level jet and the cause of the concentration of rainfall appeared on a heavy rainfall event of September 11 1990, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Science*, 29(4), 263-279 (in Korean).
- Carlson, T. N., 1980, Airflow through midlatitude cyclones and the comma cloud pattern, *Monthly Weather Review*, 108, 1498-1509.
- Choi, G., 2013, Spatial patterns of seasonal extreme precipitation events in Mt. Halla, *Journal of Climate Research*, 8(4), 267-280 (in Korean).
- Eckhardt, S., Stohl, A., Wernli, H., James, P., Forster, C., and Spichtinger, N., 2004, A 15-year climatology of warm conveyor belts, *Journal of Climate*, 17, 218-237.
- George, J. J., 1960, *Weather and forecasting for aeronautics*, NY: Academic Press.
- Green, J. S. A., Ludlam, F. H., and McIlveen, J. F. R., 1966, Isentropic relative-flow analysis and the parcel theory, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 92, 210-219.
- Harrold, T. W., 1973, Mechanisms influencing the distribution of precipitation within baroclinic disturbances, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 99, 232-251.
- Hwang, S. O. and Lee, D. K., 1993, A study on the relationship between heavy rainfalls and associated low-level jets in the Korean Peninsula, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Science*, 29(2), 133-146.
- Lavers, D. A., Allan, R. P., Villarini, G., Lloyd-Hughes, B., Brayshaw, D. J., and Wade, A. J., 2013, Future changes in atmospheric rivers and their implications for winter flooding in Britain, *Environmental Research Letters*, 8(3), 034010 doi:10.1088/1748-9326/8/3/034010.
- Lee, K. J., Heo, K. Y., Suh, A. S., Park, J. S., and Ha, K. J., 2010, Application of images and data of satellite to a conceptual model for heavy rainfall analysis, *Atmosphere*, 20(2), 131-151 (in Korean).
- Madonna, E., Wernli, H., Joos, H., and Martius, O., 2014, Warm conveyor belts in the ERA-Interim dataset (1979-2010). Part I: Climatology and potential vorticity evolution, *Journal of Climate*, 27(1), 3-26.
- Palmén, E. and Newton, C. W., 1969, *Atmospheric circulation systems: Their structures and physical interpretation*. International Geophysics Series, 13, Academic Press.
- Park, C. H., Lee, H. W., and Jung, W. S., 2003, The effects of low-level jet and topography on heavy rainfall near Mt. Jirisan, *Journal of Korean Meteorological Society*, 39(4), 441-458.
- Park, S. K. and Lee, D. K., 1987, Synoptic aspects of a northeastward moving extratropical cyclone developed in the East Asia coast, *Journal of Korean Meteorological Society*, 23(1), 1-25 (in Korean).
- Park, S. U., Kim, S. S., and Lim, G. H., 1983, Low level jets associated with severe storms over Korea, *Journal of Korean Meteorological Society*, 19(2), 20-36.
- Pfahl, S., Madonna, E., Boettcher, M., Joos, H., and Wernli, H., 2014, Warm conveyor belts in the ERA-Interim dataset (1979-2010). Part II: Moisture origin and relevance for precipitation, *Journal of Climate*, 27(1), 27-40.
- Reed, R. and Danielsen, E., 1959, Fronts in the vicinity of the tropopause, *Archiv fur Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie*, A11, 1-17.
- Stohl, A., 2001, A 1-year Lagrangian "climatology" of airstreams in the Northern Hemisphere troposphere and lowermost stratosphere, *Journal of Geophysical Research*, 106 (D7), 7263-7279.
- Tai-Jen Chen, G. and Yu, C. C., 1988, Study of low-level jet and extremely heavy rainfall over northern Taiwan in the Mei-Yu season, *Monthly Weather Review*, 116(4), 884-891.

책임 편집: 박창용

영문 교열: 조창현