

한국 남해안의 장마철 호우 시 850hPa 등압면 수증기 수송 주 경로 유형의 종관 특성

박 병 익*

Synoptic Characteristics of the Main Path Types of 850hPa Surface Water Vapor Flux for Heavy Changma Rainfall in the South Coastal Region of Korea

Park, Byong Ik*

요약 : 이 연구는 장마철 남해안 호우 사례의 850hPa 면 수증기 수송의 주축 유형에 대해 우리나라의 강수량 분포 특성, 동아시아 규모의 종관 특성과 장마전선의 구조를 밝히는 것을 목적으로 한다. 그 결과 유형 A(남중국해~화남~남해안)의 경우 아열대고기압이 화남지방에까지 영향을 미치고 황해를 중심으로 뚜렷한 저압부가 나타났다. 강수량도 대체로 동서 방향으로 분포하며 지형의 영향이 잘 나타나지 않았다. 유형 B(남중국해~타이완 부근~남해안), 유형 C(북태평양~남해안)에서는 타이완 부근에 열대저기압이 자주 나타났고 북서태평양고기압은 북쪽으로 이동하였다. 남해안 부근에서만 수증기 수송 주축이 나타나는 유형 D에서는 황해에 강한 저기압이 나타났다. 주축 유형 B, C, D의 경우 강수량 분포에서 북동~남서 방향이 잘 나타나며 지형의 영향이 뚜렷하게 나타났다. 상층 제트기류는 남해안의 북쪽에서 강화되었고 하층 제트기류는 수증기 수송 주축과 거의 일치하여 나타났다. 전선의 구조를 살펴본 즉, 거의 전체 사례에서 저기압성 순환이 대류권 상층에까지 나타나는 깊은 활동전선 유형을 보였다. 이 점에서 장마는 바이우계 동안 상당한 빈도로 얇은 활동전선 유형이 나타나는 일본 남서부 지역의 경우와 차이를 나타냈다.

주요어 : 장마철, 호우, 수증기 수송 주축 유형, 종관 특성, 전선 구조

Abstract : This study aims to investigate the differences of synoptic characteristics and frontal structures over East Asia according to the main path types of water vapor flux (WVF) of 850hPa surface in cases of the heavy rainfall in the south coastal region of Korea during the Changma season (June and July). In the cases of type A in which the main path of WVF is running from the South China Sea via the South China to the South Sea of Korea, the North Pacific subtropical anticyclone (NPSA) expands to the South China and strong cyclones appear in the Yellow Sea. In cases of type B and C in those the main paths of WVF are running from the South China Sea via the Western Pacific Ocean near Taiwan to the South Sea and from the Western North Pacific Ocean to the South Sea respectively, tropical cyclones appear frequently near Taiwan and the NPSA shifts northward. In the case of type D in which the main path of WVF appear only near the South Sea, strong cyclones appear near the Yellow Sea. In all cases upper jets are intensified in the northern part of the heavy rainfall region and low-level jets appear near the main paths of WVF. In the view of frontal structure, deep active-type of the Changma front is identified in most cases of all types. In this point the Changma season is different from the Baiu season in Western Japan where many cases of shallow active-type of the Baiu front appear.

Key Words : Changma season, heavy rainfall, main path types of water vapor flux, synoptic characteristics, frontal structure

1. 서론

우리나라의 남해안은 다우지역에 속할 뿐만 아니라 호우도 자주 나타나는 곳이다. 지점별로 볼 경우 남해관측지점에서 연간 호우는 4.7일로 가장 많았고 남해안 전체로도 호우일수가 많은 지역에 속한다(나득균 등, 2005). 장마철(6, 7월)의 경우 남해안 전체에서 호우는 1년에 평균 4.4일 나타

다(박병익, 2005).

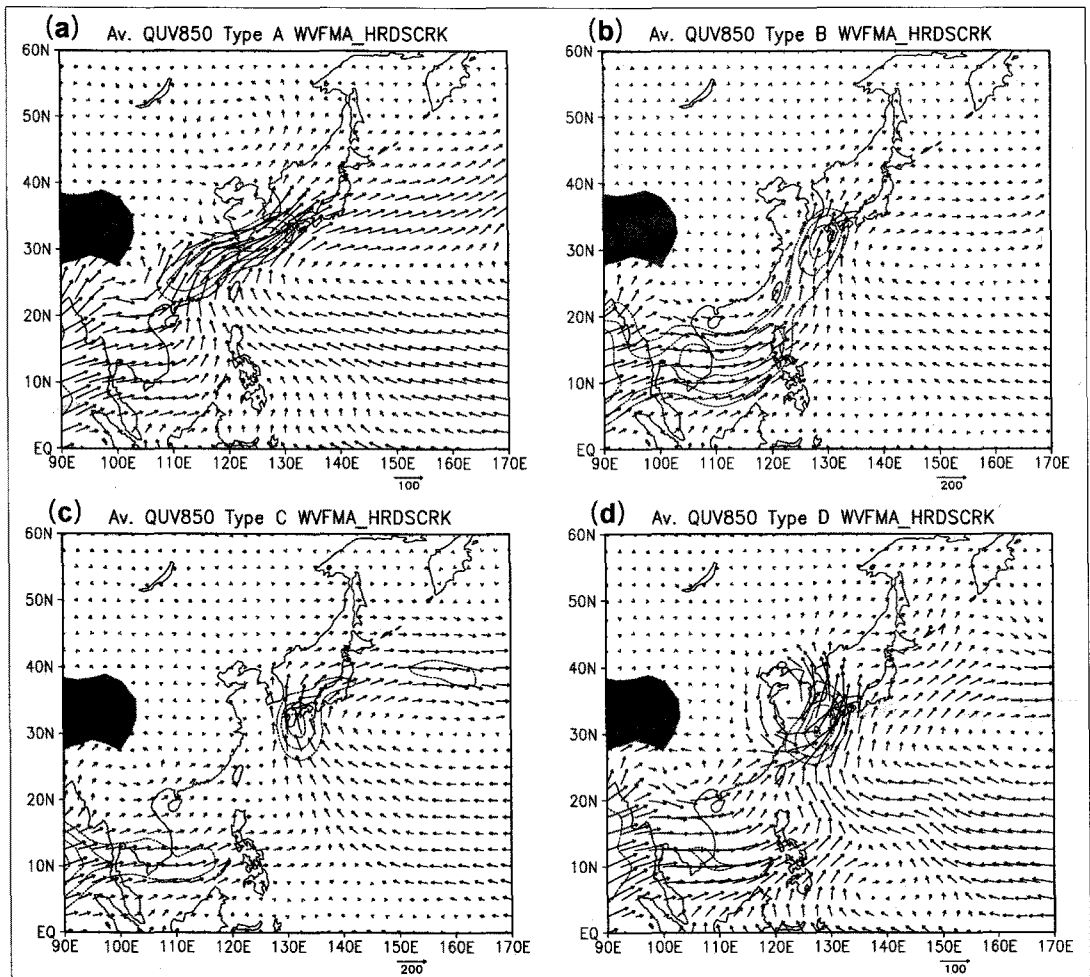
호우는 많은 피해를 가져오는 현상으로서 사회적 관심이 많아 이에 대한 연구는 매우 많다. 호우의 시·공간적 출현 특성이나 종관장에서 본 호우의 원인에 관한 연구들(이광호·김문일, 1982; 강만석, 1992, 2000; 나득균 등, 2005; 김민기·최영은, 2010; Lee, 1981; Xu *et al.*, 2009)과 호우 사례에 대한 자세한 관측 연구들(소선섭 등, 1995;

* 서울대학교 사범대학 조교수(Assistant Professor, Department of Geography Education, Seoul National University) (fbipark@snu.ac.kr)

황재돈·박정규, 2000; 윤원태 등, 2001; 송병현 등, 2004; Park *et al.*, 1986a, 1989; Ninomiya, 2001; Geng *et al.*, 2004, 2009; Shibagaki and Ninomiya, 2005; Chen *et al.*, 2006, 2008; Kato, 2006; Kim and Lee, 2006; Lee *et al.*, 2008)이 많다. 근래에는 관측 자료와 모델 자료를 혼용하여 호우에 대해 여러 측면에서 연구하고 있다(Ninomiya *et al.*, 2008; Yamasaki, 2008, 2009; Higashi *et al.*, 2010). 또한 여러 호우사례를 비교하는 연구도 근래 많아지고 있다(홍성유·이동규, 1996; 이광재 등, 2010; Ninomiya and Shibagaki,

2003, 2007; Lee and Kim, 2007; Tagami and Niino, 2007; Lee *et al.*, 2008).

호우가 나타날 때 혹은 강수가 많은 장마 기간에 많은 양의 수증기 수송이 나타난다(김성삼 등, 1983; 임정선·박순웅, 1991; 황재돈·박정규, 2000; Park *et al.*, 1986a, b). 수증기 수송은 주로 대기 하층에서 이루어지는데, 우리나라의 다우 장마의 경우 850hPa 면에서 최대의 수증기 수송이 이루어진다(김성삼 등, 1983). 또한 과우 장마의 경우 최대 수증기 수송은 700hPa 면에서 이루어지고 있으나 다우 장마의 경우와 비교할 때 강수량의



각 그림 오른쪽 아래의 화살표는 수증기 수송 크기의 기준을 나타내며(단위: $gkg^{-1} ms^{-1}$), 점선은 수증기 수송이 $100 gkg^{-1} ms^{-1}$ 이상인 지역을 보이고, 등치선 간격은 $20 gkg^{-1} ms^{-1}$ 이다. 음영은 개략적인 티베트 고원을 나타낸다.

그림 1. 850hPa 면의 수증기 주축 유형별 평균 수증기 수송장(박병익, 2005)

(a) 유형 A, (b) 유형 B, (c) 유형 C, (d) 유형 D

다과는 850hPa 면에서의 수증기 수송량의 다과와 일치한다(김성삼 등, 1983). 따라서 호우 시 혹은 장마철의 수증기 수송의 특성을 850hPa 면에서 살펴보는 것은 의미가 있다.

박병익(2005)은 장마철 남해안에 호우가 발생한 날의 850hPa 면의 수증기 수송의 주축을 4가지 유형으로 분류하여 그 출현 특성을 살펴보았다. 그 결과 남서기류에 의한 수증기 수송이 전 사례의 약 60%를 차지하며 나머지는 남풍이나 남남동풍에 의한 수송으로 나타났다. 그런데 이 연구에서 수증기 수송과 관련한 종관 특성을 조사하지 않았다. 수증기 수송은 바람장과 습도 분포의 영향을 받고 이는 종관특성의 영향을 받으므로 수증기 수송과 관련한 종관 특성을 살펴보는 것은 남해안 호우의 특성을 이해하는 데에 도움이 될 것이다.

나득균 등(2005)은 지상 일기도의 기압배치 유형을 10개 범주로 분류한 후 유형별로 호우와 다른 강수의 출현 특성을 통계적으로 조사하였다. 이 연구 결과는 강수 예보에 많은 도움이 될 것이나 기압 배치 유형 분류의 주관성과 모호성, 지상 일기도만을 사용하여 상층 순환 특성을 살펴볼 수 없는 점 등은 보완이 필요하다.

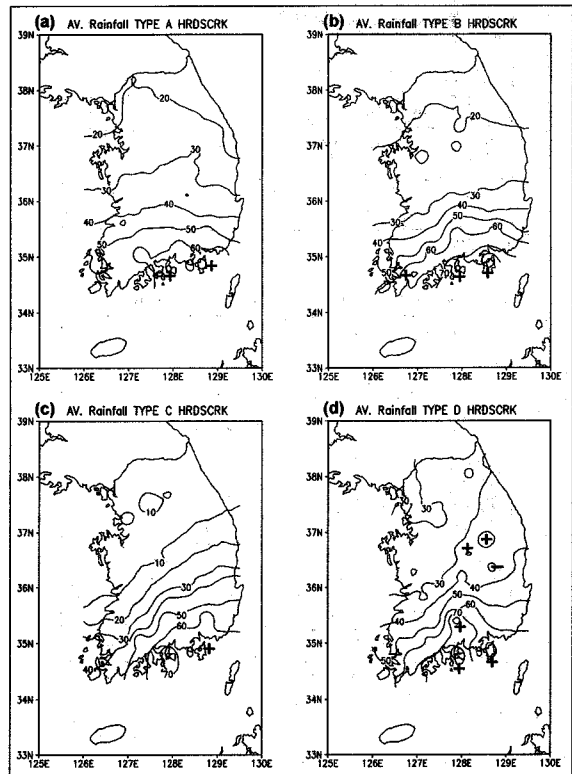
우리나라의 장마는 장마전선에 의해 형성되는 것으로 알려져 있으며, 같은 전선이 일본에서는 바이우(Baiu) 전선, 중국에서는 메이유(Mei-Yu) 전선으로 불린다. 이들 전선은 일기도상으로는 같아 보이며, 북서태평양고기압과 연동하여 변화한다. 이런 이유로 장마와 바이우가 같은 초하우계라고 생각하여 왔으나(Lee, 1976) 항상 같지는 않은 것으로 나타났다. 장마철 우리나라의 지역 평균 강수량으로 구분한 장기 강수(4일 이상의 강수)와 단기 강수(1~2일의 강수)의 전선구조를 살펴본 결과 모두 깊은 활동전선 유형(active deep-type, Akiyama, 1990)으로 나타났다(박병익, 2010). 그런데 일본 남서부 지역에서는 4일 이상 강수의 경우 전선의 구조를 보면 저기압성 소용돌이도가 대기 하층(850hPa, 700hPa)에서만 뚜렷한 얕은 활동전선 유형(active shallow-type)으로 나타나(Takahashi, 1993) 우리나라와 다르다. 그러므로 장마와 바이우가 어떤 경우에 그 특성이 유사하거나 다른지 여러 측면에서 살펴볼 필요가 있다.

특히 일본남서부 지역과 가까운 남해안 지역의 호우에 대한 조사가 필요할 것으로 판단된다.

이 연구는 박병익(2005)의 호우 사례에 대해 그 가 구분한 남해안 호우 시 850hPa면 수증기 수송 주축 유형별로 동아시아 규모에서의 종관특성과 장마전선의 구조를 살펴보는 것을 목적으로 한다. 이 연구는 남해안 지역에서 31년간 나타난 호우의 전 사례를 대상으로 한 것으로 연구가 잘 이루어진다면 장마철 남해안 호우의 특성을 보다 잘 이해할 수 있을 것이다.

2. 연구 자료 및 방법

이 연구에서 사용한 자료는 다음과 같다. 한국의 61개 관측지점에서 1973~2003년의 31년간 6, 7월의 일강수량 자료를 이용하였고, 일본 기상청의 지상일기도를 사용하였다.¹⁾ 종관 특성을 조사



그림의 +, -는 폐곡선 지역의 값이 주위보다 크거나 작다는 것을 의미함.

그림 2. 수증기 주축 유형 A(a), B(b), C(c), D(d)의 평균 강수량 분포 (단위: mm/day)

하기 위한 상층 자료는 NCEP/NCAR의 재분석자료(reanalysis data, Kalnay *et al.*, 1996)에서 구하였고,²⁾ 대류활동의 정도를 알아보기 위해 NOAA의 OLR(outgoing longwave radiation) 자료를 이용하였다.³⁾ 재분석자료는 00Z와 12Z의 자료를 사용하였고, OLR 자료는 일평균값이다. 다만 OLR 자료는 1974년부터 이용할 수 있었고, 1978년 자료는 누락되었다. 이들 자료는 경위도 2.5도의 해상도를 갖는다.

남해안 호우일(31년간 137사례)의 850hPa 면 수증기 수송의 주축을 4개 유형(이하 ‘수증기 주축 유형’으로 표기함)으로 분류한 박병익(2005)의 자료를 이용하여 같은 유형의 사례들에 대해 우리나라의 평균 강수량과 강수 계급별 출현빈도를 구하였다. 또한 재분석자료를 이용하여 주축 유형별로 합성도를 작성하여 종관 특성을 살펴보았다. 종관 특성은 주로 00Z에 대해 합성도를 작성하였고, 편차는 1973~2008년 평균에 대하여 계산하였다. 850hPa, 700hPa, 500hPa, 300hPa 면에서 상대 소용돌이도의 양의 큰 값(저기압성 소용돌이도)을 나타내는 지역을 중첩하여 표시함으로써 전선의 연직 구조를 살펴보았다.

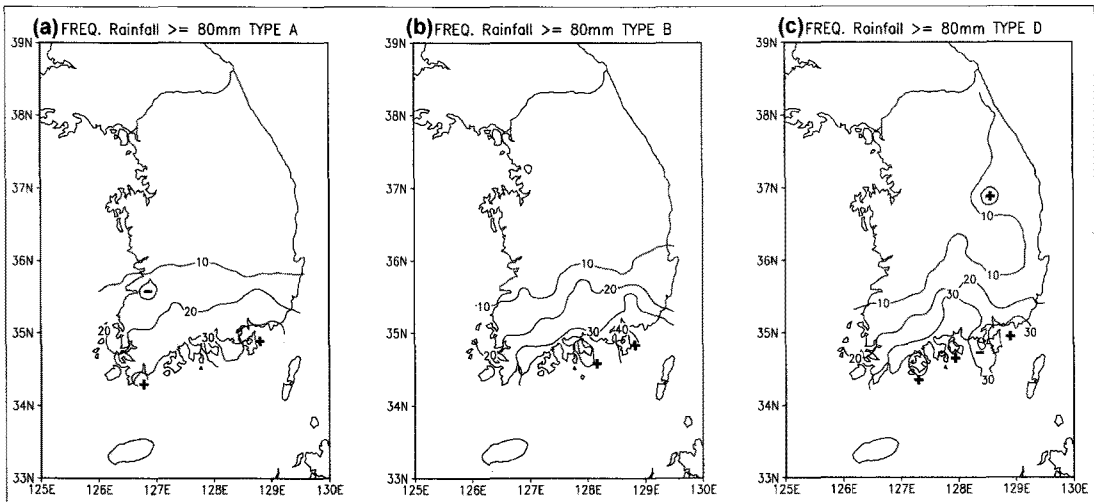
3. 수증기 주축 유형별 한국의 강수 분포

박병익(2005)은 남해안 호우 사례에 대해 850hPa

면 수증기 주축을 4개 유형(유형 A~D)으로 분류하였고, 각 유형별 평균 수증기 수송장을 작성하였다(그림 1). 각 유형의 사례수를 보면 유형 A가 77개, 유형 B가 36개, 유형 C가 9개, 유형 D가 15개로 총 137개이다.

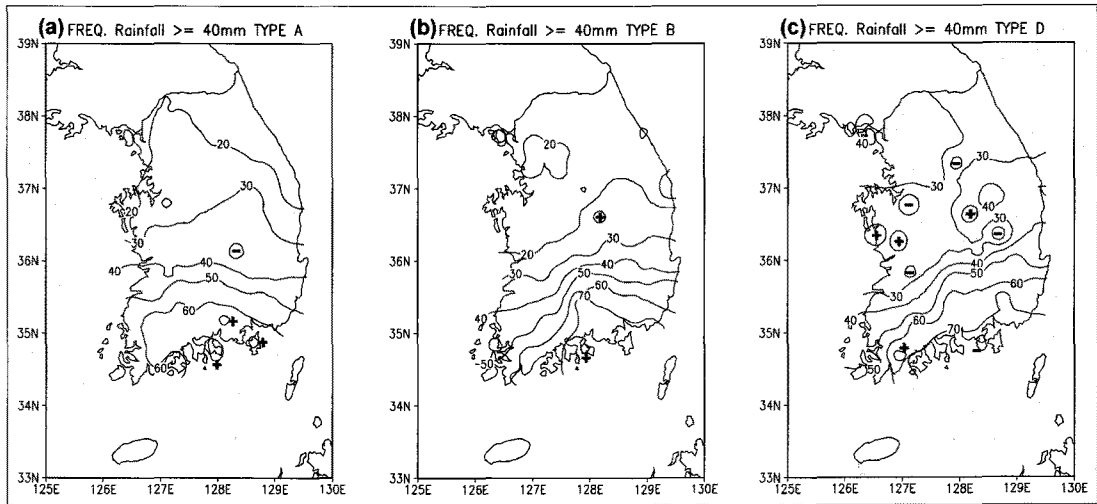
수증기 수송 주축 유형 A의 경우 남중국해에서 중국 화남지방을 경유하여 남해안으로 다량의 수증기가 수송되고 있으며, 여기에 북태평양에서의 수증기 수송도 합류하고 있다. 유형 B의 경우 남중국해에서 타이완 부근의 서태평양을 경유하여 남해안으로 다량의 수증기가 수송되고 있으며, 상대적으로 북태평양에서의 수증기 수송은 약하다. 유형 C와 D의 경우 수증기 수송의 주축이 남중국해에서 남해안까지 이어지지 않는 유형으로서 유형 C의 경우 주로 북태평양에서 수증기가 수송되며, 유형 D의 경우 황해 부근의 강한 저기압에 의한 영향으로 우리나라 부근에서만 주축이 나타나고 있다(박병익, 2005).

수증기 수송 주축의 각 유형에 대해 우리나라의 관측 지점에 대해 평균 강수량을 계산하였다(그림 2). 모든 유형에서 강수량은 남해안에서 북쪽으로 가면서 점차 감소한다. 최대 강수량은 유형 B와 D에서 90mm 이상이 나타나며 유형 C에서도 80mm 이상이 나타난다. 또한 유형 B, C, D의 경우 포항에서 목포를 잇는 선을 중심으로 하는 지역에서 강수량의 등치선이 촘촘하게 나타난다. 이는



호우일은 일강수량 80mm 이상을 의미하며, 단위는 %인.

그림 3. 수증기 주축 유형 A(a), B(b), D(c)의 사례에 대한 호우일 출현 비율



다우일은 일강수량 40mm 이상을 의미하며, 단위는 %임.

그림 4. 수증기 주축 유형 A(a), B(b), D(c)의 사례에 대한 다우일 출현 비율

이 선을 경계로 그 남북에서 강수 기구에 차이가 나타난다는 것을 의미한다. 이들 유형에서는 수증기가 주로 남풍 계열의 바람과 함께 수송되므로 소백산맥과 가야산으로 이루어진 지형의 영향으로 이런 차이가 나타난 것으로 보인다. 이에 비해 유형 A에서는 이들 지형의 영향이 뚜렷하게 나타나지 않는다. 그리고 유형 D의 경우 지리산 동쪽에서 북쪽으로 상당한 거리까지 많은 강수량이 나타난다.

〈그림 3〉은 수증기 수송 주축 유형의 사례에서 호우일(일 강수량 80mm 이상인 날)의 출현비율⁴⁾을 보인 것이다. 유형 C의 경우 사례수가 적어서 제외하였다. 호우일의 출현 비율이 20% 이상인 지역이 남해안을 중심으로 나타나며 유형 A, B의 경우 출현비율 10% 등치선이 대체로 포항과 군산을 잇는 선과 일치한다. 유형 D의 경우 동해안을 따라 더 북쪽까지 10% 이상의 지역이 나타난다. 호우 출현비율이 30% 이상인 지역은 유형 A에서 가장 좁게 나타나고 유형 B와 D에서 넓게 나타난다. 호우 출현비율이 가장 큰 값은 유형 B의 50% 이상이다.

〈그림 4〉는 수증기 수송 주축 유형의 사례에서 다우일(일 강수량 40mm 이상인 날)로서 박병익(1996) 참조의 출현비율을 나타낸 것이다. 마찬가지로 유형 C의 경우는 제외하였다. 대체로 남해안

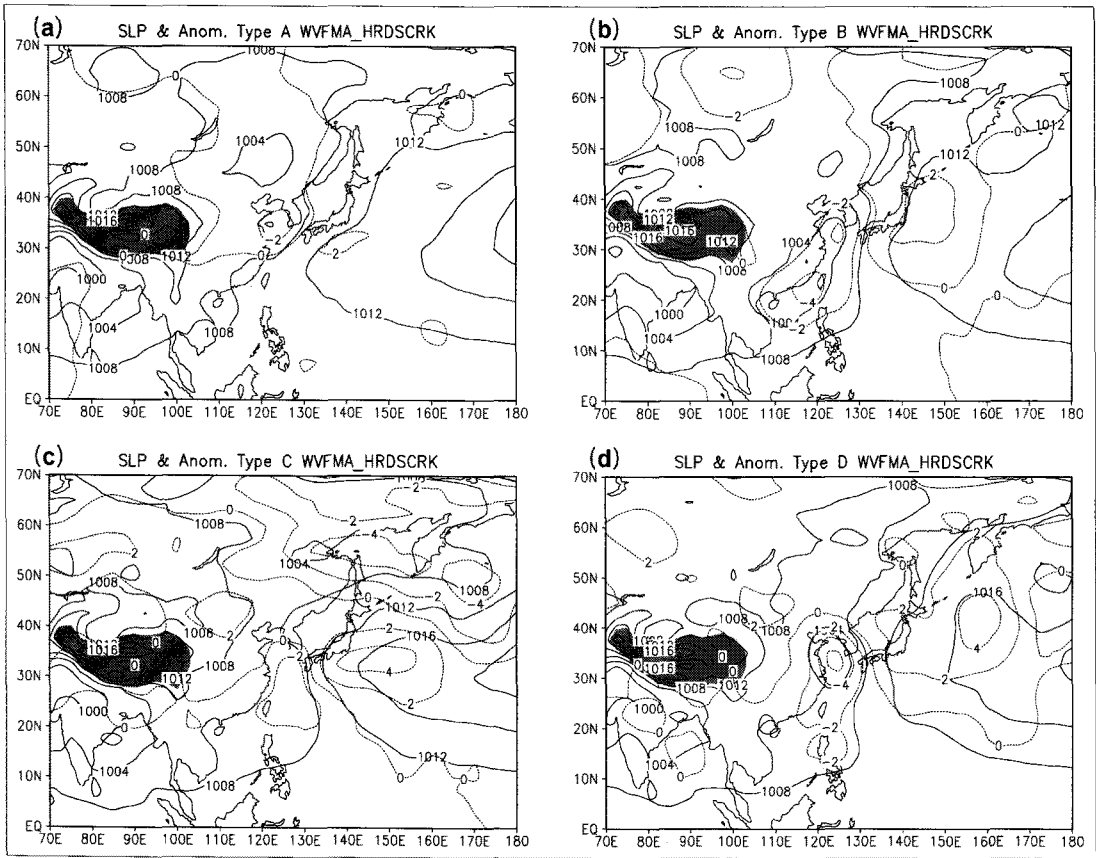
지역에서 전체 사례의 50% 이상의 날에 다우가 나타난다. 평균 강수량의 경우와 같이 유형 B와 D에서 소백산맥의 남쪽 부분에서 등치선이 촘촘하게 나타나 지형의 영향이 있음을 알 수 있다. 출현비율 70% 이상의 지역을 보면 유형 A에서는 남해와 거제 부근에서만 나타나나 유형 B와 D에서는 상당히 넓은 지역에서 나타난다. 특히 유형 B의 경우에는 80% 이상의 출현비율도 나타난다.

이상을 요약하면 다음과 같다. 즉 유형 A의 경우 수증기가 거의 남서풍에 의해 수송되므로 강수량, 호우와 다우의 출현비율이 대체로 동서로 길게 나타나는 경향이 있고, 지형의 영향이 적은 것으로 나타난다. 이에 비해 유형 B, C, D의 경우 수증기가 상대적으로 남풍계열의 바람과 함께 수송되므로 강수량, 호우와 다우의 출현비율이 보다 남북으로 분포하는 경향이 나타난다. 또한 소백산맥 등 지형의 영향이 잘 나타나는 것으로 판단된다.

4. 수증기 주축 유형별 종관 특성

1) 동아시아 종관장의 특성

수증기 주축 유형별 평균 해면기압과 장기 평균(1973~2008년)에 대한 편차의 분포도를 작성하였다(그림 5). 유형 A의 경우 황해에 작은 폐곡선의



평균 해면기압(실선)은 4hPa 간격, 기압 편차(점선)은 2hPa 간격의 등치선으로 표시되어 있다.

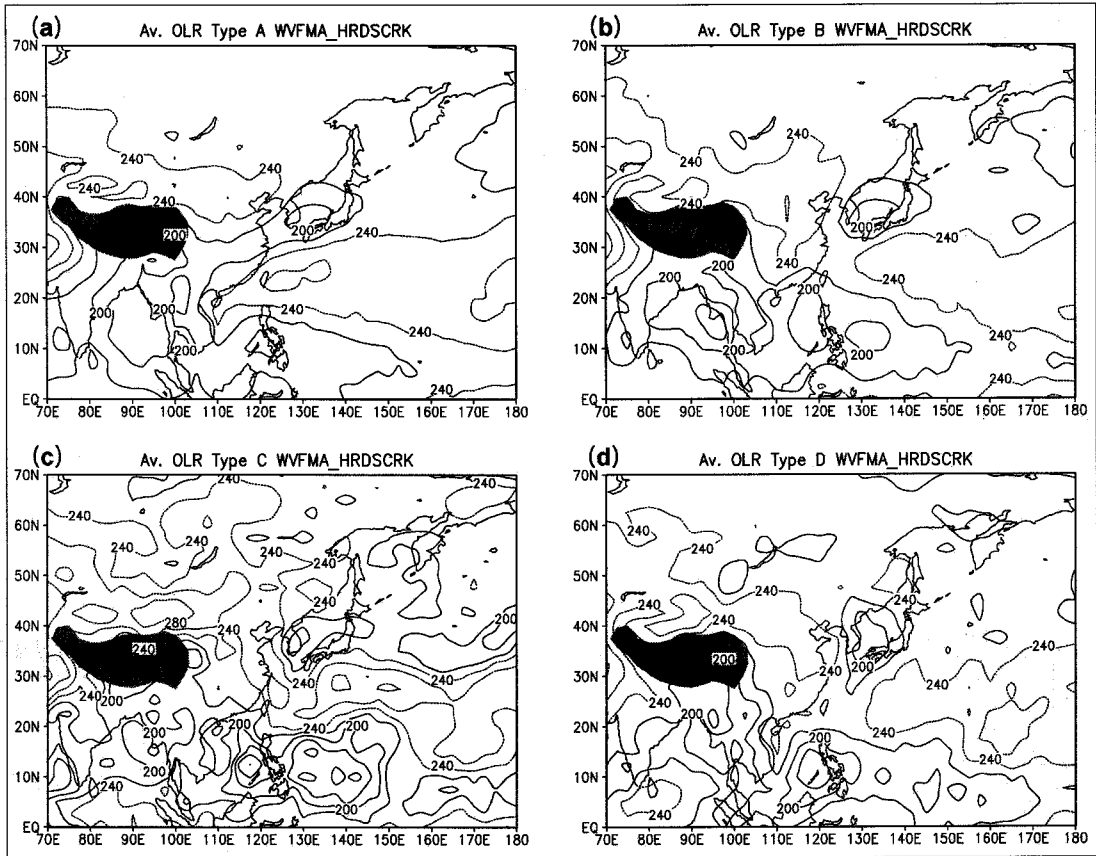
그림 5. 수증기 주축 유형별 해면기압의 평균과 편차 분포
(a) 유형 A, (b) 유형 B, (c) 유형 C, (d) 유형 D

저기압이 있고 일본 남쪽으로 고기압이 있어 우리나라 부근에서 기압경도가 커 남서풍이 강하게 불고 있다. 기압 편차를 보면 황해에 음 편차가, 일본 남쪽에 양 편차가 나타나고 있다. 또한 북서태평양고기압의 기압능은 타이완 방향으로 뺏어있다. 유형 B의 경우 황해에서 타이완 부근을 거쳐 남중국해 북부까지 저압부가 나타나고, 북서태평양고기압은 일본 동쪽까지 북상하고 있다. 기압 편차도 황해~남중국해의 저압부에서 음 편차가, 일본 동쪽에 양 편차가 나타나 우리나라 부근에는 강한 남풍이 불고 있다. 유형 C의 경우 일본 남동쪽의 고기압이 매우 강하게 발달하고 황해 남부에서 타이완 부근까지, 타이완에서 동쪽으로 저압부가 발달하여 저압부의 동쪽에서 등압선이 대략 남동~북서로 달려 우리나라로 남동풍이 강하게 불

고 있다. 유형 D의 경우에는 황해에 매우 강한 저기압과 큰 음의 편차역이 나타난다. 이 음 편차역과 동쪽의 양 편차역의 사이에서 강한 남풍이 나타난다.

〈그림 6〉은 수증기 주축 유형별로 구한 평균 OLR의 분포도이다. 대체로 OLR은 열대 지역의 대류 활동을 잘 나타내고 있으며, 우리나라 부근에서도 여름철의 경우 대류활동의 좋은 지표로 흔히 사용되고 있다. 보통 OLR 값이 220Wm^{-2} 이하인 곳이 대류가 활발한 지역이라고 판단된다 (Murakami and Matsumoto, 1994; Qian and Lee, 2000). 그러므로 〈그림 6〉에서 평균적인 장마 전선의 위치는 OLR 값이 적은 대상의 지역으로 나타날 것으로 판단된다.

주축 유형 A의 경우 우리나라 부근에서 중국



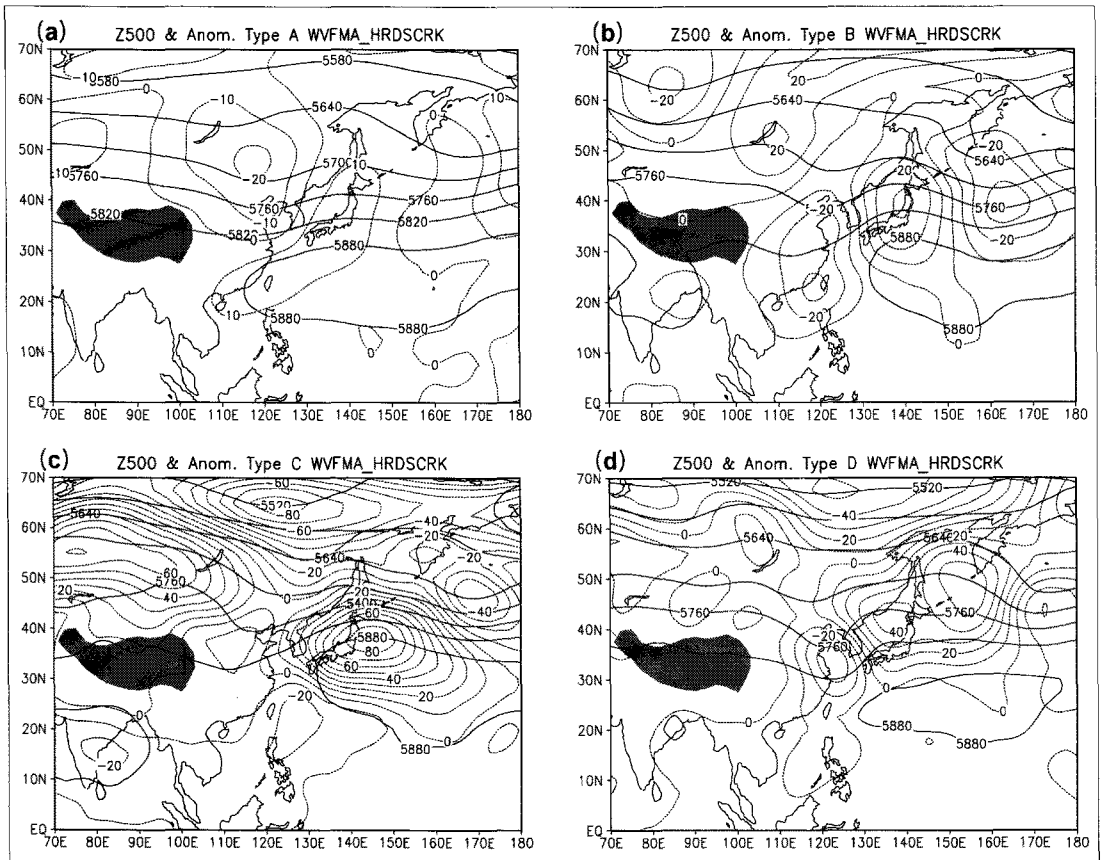
실선은 $220Wm^{-2}$ 이하를, 점선은 $240Wm^{-2}$ 이상을 나타내며, 등치선 간격은 $20Wm^{-2}$ 이다.

그림 6. 수증기 주축 유형별 평균 OLR 분포
(a) 유형 A, (b) 유형 B, (c) 유형 C, (d) 유형 D

화남지방의 서부까지 대상으로 대류활동이 활발한 지역이 나타난다. 특히 OLR 값이 $200Wm^{-2}$ 이하로 대류활동이 강한 곳이 남해안을 중심으로 나타난다. 또한 화남지방 동부에서 북태평양까지 대상으로 대류활동이 매우 약한 지역이 나타나며 타이완 동쪽 부근에 특히 큰 OLR 값이 나타난다. 이는 타이완 부근에 고기압의 중심이 있다는 것, 화남지방까지 고기압의 영향이 미친다는 것을 나타낸다. 유형 B의 경우 우리나라 부근과 인도에서 필리핀을 경유하여 그 동쪽까지 대상의 지역에서 대류활동이 강하게 나타난다. 중국의 화북지방에서 중국 북서부 건조지역까지, 북태평양에서 일본 남쪽부근까지의 지역에서 대류활동이 약하다. 유형 C의 경우 유형 B와 유사하나 북태평양에서 동중국해를 경유하여 중국 화북지방까지 대상으로

대류활동이 약한 지역이 나타나는 점이 다르다. 유형 D의 경우 유형 B와 유사하나 우리나라 부근의 대류활동이 강한 지역의 형태가 약간 다르다. 또한 필리핀 부근의 대류활동이 D 유형에서 더 강하다.

〈그림 7〉은 수증기 주축 유형별로 구한 500hPa 등압면 고도 평균과 편차의 분포도이다. 보통 500hPa 등압면에서 5880gpm 등치선은 북서태평양고기압의 범위로 알려져 있다(Lee, 1976). 유형 A의 경우 북서태평양고기압이 타이완 부근까지 확장되어 동서로 길게 나타나고 있으며, 황해 북부에 약한 기압골이 나타난다. 고도 편차를 보면 남중국해 북부에서 타이완 부근을 경유하여 일본 북부지방까지 양의 편차역이 대상으로 나타나며, 황해에서 바이칼 호 부근까지 음의 편차역이 나타



평균 고도(실선)는 60gpm 간격, 고도 편차(점선)는 10gpm 간격의 등치선으로 표시되어 있다.

그림 7. 수증기 주축 유형별 500hPa 등압면 고도의 평균과 편차 분포
(a) 유형 A, (b) 유형 B, (c) 유형 C, (d) 유형 D

난다. 이러한 고도 분포에서는 우리나라 부근에서 남서풍이 강해지고, 또한 남중국해에서 화남지방을 거쳐 북태평양까지 하층의 기류가 강하게 나타날 것으로 예상된다.

유형 B의 경우 북서태평양고기압이 일본 남쪽까지 북상하고 있으며 황해 북부에서 화중지방까지 기압골이 나타난다. 고도 편차를 보면 일본 열도를 중심으로 강한 양의 편차역이, 황해에서 타이완 부근까지 음의 편차역이 나타나 우리나라 남쪽에서 남풍이 강화되는 것으로 나타난다. 유형 C의 경우 북서태평양고기압은 더 북상하고 있으며 서쪽의 기압골은 더 강화되고 있다. 고도 편차는 일본 동부를 중심으로 매우 강한 양의 편차역이 나타나고, 타이완의 동쪽에 음의 편차역이 나타나 우리나라 남쪽에서 남동풍이 강하게 나타난다. 유

형 D의 경우 북서태평양고기압의 위치는 일본 남쪽에 머물고 있으나 황해의 기압골은 매우 강하게 나타난다. 고도 편차를 보면 동해와 일본 동쪽 북태평양에 양의 편차역이 나타나고, 황해에 강한 음의 편차역이 나타난다. 이러한 고도 편차는 황해를 중심으로 강한 저기압과 기압골이 형성되어 나타나는 것으로 보인다.

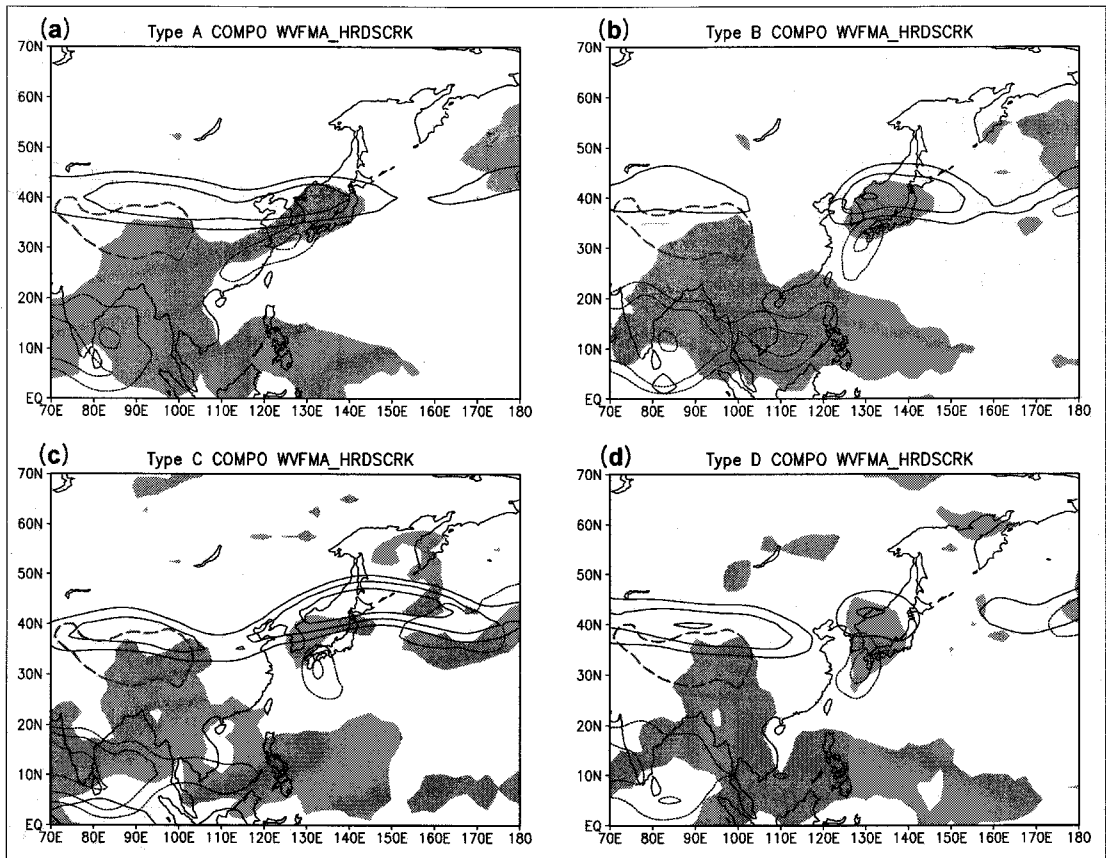
위에서 수증기 수송 주축 유형별로 해면기압, OLR, 500hPa 등압면 고도의 평균과 편차를 살펴 보았다. 이들을 정리하면 다음과 같다. 유형 A의 경우 아열대 고기압이 화남지방까지 확장하고 있으며 남중국해에서 하층의 기류가 그 연변을 따라 화남지방을 경유하여 우리나라 부근까지 불고 있다. 우리나라 부근에서는 하층에 저압부가 있고 상층에 기압골이 나타나 황해의 저기압이 종관적

한국 남해안의 장마철 호우 시 850hPa 등압면 수증기 수송 주 경로 유형의 종관 특성

기압이라는 것을 나타낸다. 지상일기도에서 살펴 보면 전선만 표기된 경우가 17개, 전선과 저기압이 표시된 사례가 60개로서 전체의 약 78%에서 저기압이 나타난다. 즉, 장마철에 우리나라 남해안에 호우가 나타날 경우 대부분의 경우에 저기압이 우리나라에 접근하고 있거나 우리나라 부근에 위치하고 있다고 할 수 있다. 유형 B의 경우에는 타이완 부근이나 중국 상하이 부근에 태풍이 나타나는 사례가 25개로서 유형 B 사례 전체의 69%를 차지한다. 이런 이유로 타이완 부근에서 황해까지 저압부가 나타나거나 음의 편차역이 분포한다. 또한 대류활동은 동중국해에서 강하거나 약하지 않은 것으로 나타난다. 유형 C의 경우 태풍과 관련된 사례가 7개로서 대부분을 차지한다. 다만 사례

수가 적어서(9개) 일반화하기에는 다소 어려움이 있다. 유형 D의 경우 종관저기압이 9사례, 태풍 혹은 태풍이 약화된 열대저기압이 나타난 사례가 6개로서 종관저기압의 사례가 더 많다.

호우의 형성에서 하층 제트기류와 상층 제트기류의 역할은 매우 크다(황승언·이동규, 1993; 이광재 등, 2010; Chen and Yu, 1988; Lee *et al.*, 1998 등). 하층 제트기류는 수증기의 수송과 온난이류를 담당하고, 상층 제트기류는 호우역의 역학적 불안정을 유도함과 동시에 찬 공기의 유입을 이끌어 호우역의 공기를 불안정하게 만든다. 상층 제트기류는 보통 200hPa 면에서 인식되며 하층 제트기류는 850hPa 면에서 많이 나타난다(Chen *et al.*, 2005).



가는 실선은 200hPa 면 풍속이 25ms^{-1} 이상인 곳을 나타내며 등치선 간격은 5ms^{-1} 이다. 가는 점선은 850hPa 면 풍속이 9ms^{-1} 이상인 곳을 나타내며 등치선 간격은 3ms^{-1} 이다. 음영은 OLR 값이 220Wm^{-2} 이하인 지역을 나타낸다. 굵은 파선은 개략적인 티베트 고원의 위치를 나타낸다.

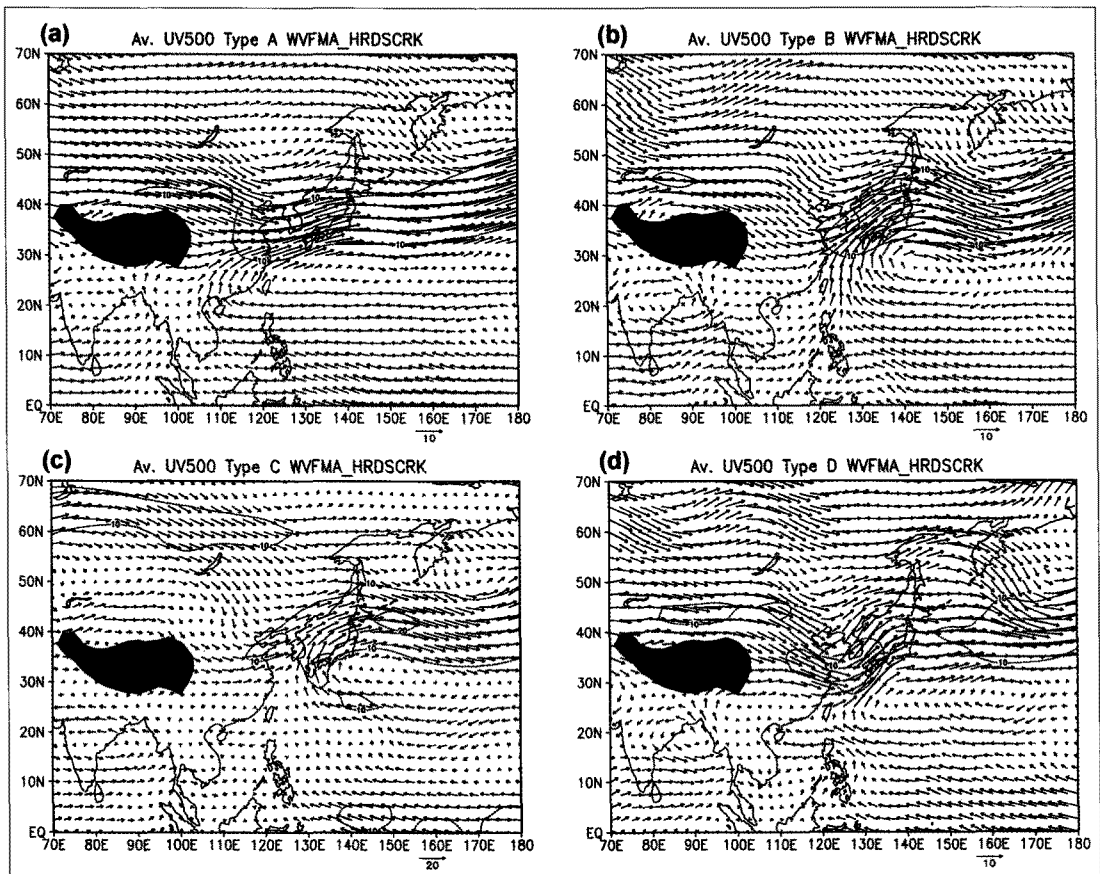
그림 8. 수증기 주축 유형별로 구한 상층 제트기류, 하층 제트기류의 위치와 대류 활발 지역
(a) 유형 A, (b) 유형 B, (c) 유형 C, (d) 유형 D

〈그림 8〉은 수증기 주축 유형별로 상층 제트기류(200hPa 면에서 풍속 25ms^{-1} 이상의 지역)와 하층 제트기류(850hPa 면에서 풍속 9ms^{-1} 이상인 지역), 대류활동이 활발한 지역(OLR 값이 220Wm^{-2} 이하인 지역)을 중첩하여 보인 것이다. 〈그림 8〉과 〈그림 1〉에서 하층 제트기류와 수증기 주축이 거의 일치함을 알 수 있다. 이 그림에서 상하층의 제트기류와 호우역의 상대적인 위치관계를 파악할 수 있다.

유형 A의 경우 상층 제트기류는 티베트 고원 북쪽에서 한반도 부근까지 거의 동서로 달리고 있으며 우리나라 부근에서 제트기류가 강화되고 있다. 다만 중국의 화북지방에서 약간의 북풍 성분이 가미된 바람이 불고 있는데, 이 북풍 성분은

하층으로 갈수록 더 뚜렷하게 나타나(그림 9), 850 hPa 면에서는 중국 동해안 지역에서 폭 넓게 북풍이 부는 지역이 나타난다(그림 10). 이 북풍은 하층 저기압의 후면에서 불고 있다(그림 5). 하층 제트기류의 경우 화남지방에서 남해로 대상으로 나타나며, 최대 풍속은 동중국해에서 나타난다. 이러한 제트기류의 위치관계로 우리나라 부근에서 많은 강수가 나타날 것으로 예상되며 이는 OLR의 값이 우리나라 부근에서 매우 작은 것에서 알 수 있다(그림 6). 이와 유사한 상하층 제트기류의 공간적 분포와 우리나라 부근 호우역의 위치관계는 Lee *et al.*(2008)에서도 제시되고 있다.

수증기 주축 유형 B의 경우 상층 제트기류가 우리나라 부근에서 시작하여(제트 입구) 일본 동



각 그림 오른쪽 아래의 화살표는 풍속의 기준을 나타내며(단위: ms^{-1}), 점선은 풍속 등치선으로서 등치선 간격은 10ms^{-1} 이다.

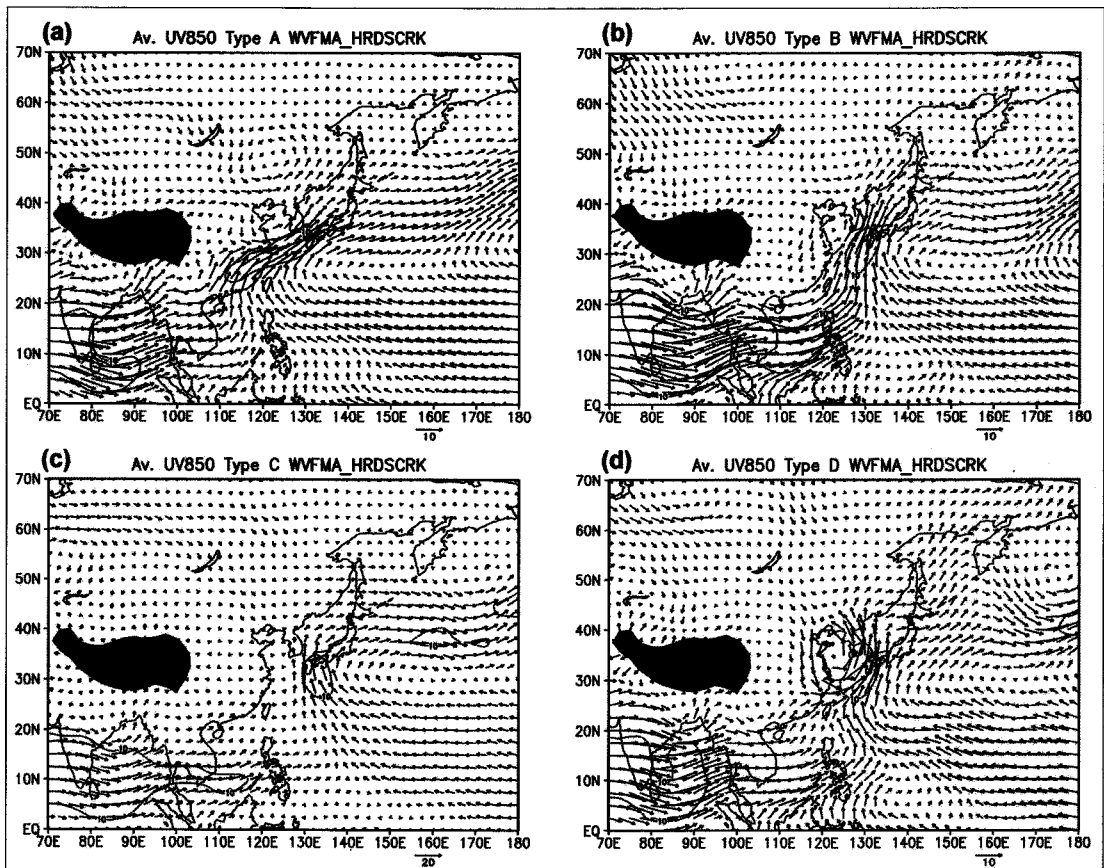
그림 9. 수증기 주축 유형별로 구한 500hPa 면 평균 바람 벡터
(a) 유형 A, (b) 유형 B, (c) 유형 C, (d) 유형 D

쪽까지 나타나며 최대풍속은 동한만 부근에서 나타난다(그림 8). 제트입구의 오른쪽(하류로 향할 때)에서는 상층에 발산장이 나타나므로(박선기·이동규, 1987) 이곳에서 저기압의 발달이 나타날 수 있다. 하층 제트기류는 남해에 남서풍으로 나타나며, 하층 제트기류의 북쪽에 대류활동이 활발한 지역이 나타난다. 상하층 제트기류의 이러한 배치는 우리나라에서 자주 발생하는 형태로 보인다(Lee *et al.*, 1998). 또한 중국 동해안 지역 중층의 바람은 북서풍으로 나타나며(그림 9), 하층에서는 북풍이 되어 화남지방에까지 영향을 미친다(그림 10). 그리고 남중국해 전역에서 서풍이 강하고 대류활동이 강하다(그림 8).

수증기 주축 유형 C의 경우 발해만 부근에서

상층 제트입구가 나타나며 동한만 북동부에서 제트기류의 풍속이 강해진다(그림 8). 발해만 부근의 중층에서 북서풍이 잘 나타나나(그림 9), 하층에서의 북풍은 현저하게 약화된다(그림 10). 특히 대기 하층에서는 북서태평양고기압 주변에서 강풍이 소규모로 나타나며, 우리나라 부근으로는 거의 남동풍으로서 하층 제트기류가 나타난다. 대류활동은 하층 제트기류의 북쪽, 상층 제트기류의 남쪽에서 활발한 것으로 나타난다. 이러한 상하층 제트기류의 위치관계는 그렇게 많이 나타나지는 않으나 1978년 6월 16~20일의 남부 장마기간에 유사한 경우가 나타났다(Park, *et al.*, 1986b).

수증기 주축 유형 D의 경우 상층 제트기류는 우리나라 북부지방에서 일본 동북지방까지 나타나



각 그림 오른쪽 아래의 화살표는 풍속의 기준을 나타내며(단위: ms^{-1}), 점선은 풍속 등치선으로서 등치선 간격은 10ms^{-1} 이다.

그림 10. 수증기 주축 유형별로 구한 850hPa 면 평균 바람 벡터
(a) 유형 A, (b) 유형 B, (c) 유형 C, (d) 유형 D

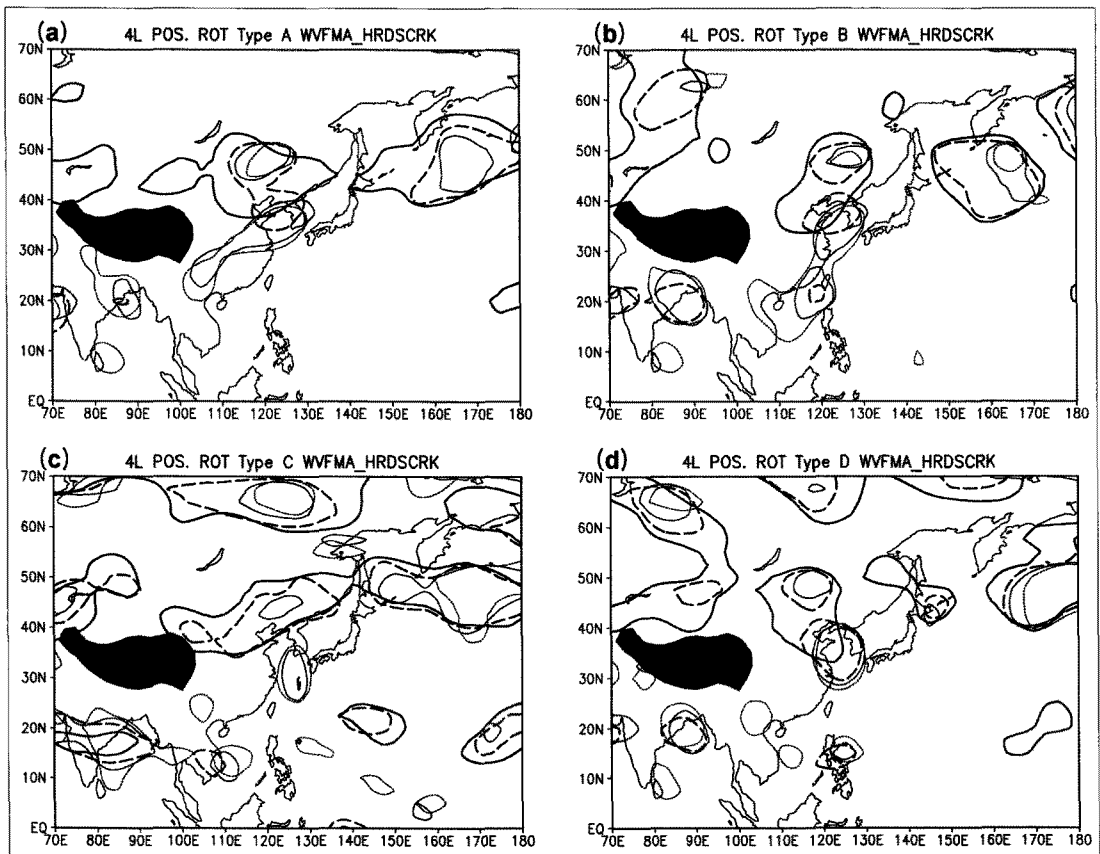
길이는 짧고 폭은 넓게 나타난다(그림 8). 풍속이 30ms^{-1} 이상인 곳은 동한만 북부에만 나타나 제트기류의 강화가 호우의 결과인 것으로 보인다. 하층 제트기류는 남풍으로서 불고 있는데, 이는 유형 B와 유사하다. 다만, 유형 B에서는 남중국해의 하층 풍속이 강했으나 유형 D에서는 이것이 약하게 나타난다. 남중국해의 서풍 풍속은 남중국해 몬순의 강도와 관련이 있으며(Wang and Fan, 1999), 약한 서풍의 경우 남중국해 북부에서 대류활동이 약한 것으로 나타난다. 이 유형은 황해에 강한 저기압이 있어서 하층 제트기류와 호우역이 형성되고, 이로 인해 상층 제트기류가 강화된 것으로 보인다. 이와 유사한 상하층 제트기류의 위차관계는 여러 연구에서 살펴볼 수 있다(박선기·

이동규, 1987; 이동규 등, 1991).

2) 장마전선의 구조

수증기 주축 유형별로 850hPa, 700hPa, 500hPa, 300hPa 등압면에서 상대 소용돌이도 분포도를 작성한 후 저기압성 소용돌이도가 $10 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ 이상, Akiyama, 1990) 지역을 중첩하여 전선의 구조를 살펴보았다(그림 11). 이 그림에서 전선이 대류권 하층에서만 나타나는지, 대류권 상층까지 잘 나타나는지를 파악할 수 있다(박병익, 2010; Akiyama, 1990).

수증기 주축 유형 A의 경우 중국의 화남지방에서 한반도까지 대상의 전선대가 700hPa 면 이하



300hPa(굵은 실선), 500hPa(굵은 파선), 700hPa(가는 실선), 850hPa(가는 점선) 면의 소용돌이도 분포도에서 $10 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ 의 등치선을 중첩하였다.

그림 11. 수증기 수송 주축 유형별 850hPa, 700hPa, 500hPa, 300hPa 면 평균 소용돌이도 분포에서 양의 값 구역을 중첩한 지도
(a) 유형 A, (b) 유형 B, (c) 유형 C, (d) 유형 D

의 대류권 하층에서 뚜렷하게 나타난다. 동시에 우리나라 부근에서는 300hPa 면까지 저기압성 소용돌이도의 양의 값이 나타나 우리나라 부근의 저기압은 키가 큰 요란임을 알 수 있다. 이와 같은 모양은 장마철 4일 이상 강수가 계속된 사례에서 강수가 시작된 다음날의 양의 소용돌이도 지역 중첩 지도와 유사하다(박병익, 2010, 760). 우리나라 부근에서 저기압성 순환이 대류권 하층에서 상층까지, 그리고 상층으로 가면서 북서쪽으로 기울어져 나타난다. 이는 경압성이 강한 종관저기압에서 보통 나타나는 형태로 알려져 있다. 이와 같은 형태는 일본 서부지역의 얇은 활동전선 유형(Akiyama, 1990; Takahashi, 1993)과는 다른 것이다. 그러므로 장마철 남해안의 호우 사례는 평균적으로는 깊은 활동전선 유형에 속한다고 할 수 있다. 이는 남해안 호우 사례의 장마전선과 일부 일본 남서부 지역의 바이우 전선은 그 구조가 서로 다르다는 것을 의미한다. 물론 개별 사례에 대해 분석할 경우 위와는 다른 결과가 나타날 수도 있으나, 위의 결과가 사례에 대한 합성에서 나온 것인 만큼 얇은 활동전선 유형을 보이는 개별 사례는 많지 않을 것으로 보인다.⁵⁾

수증기 주축 유형 B의 경우 하층의 전선이 우리나라 부근에서 타이완 부근까지 남서방향으로 뻗어있는 것을 제외하면 유형 A와 유사하다. 그러므로 이 유형의 전선도 깊은 활동전선 유형에 속한다고 할 수 있다. 그리고 타이완 부근에서 대류권 중층(500hPa 면)까지 저기압성 순환이 나타나며, 남중국해에서 하층의 저기압성 순환이 강하게

나타난다. 수증기 주축 유형 C의 경우 동중국해에 고립된 저기압성 순환이 대류권 중층까지 나타나고, 우리나라 북쪽의 대상으로 나타나는 저기압성 순환과는 분리되어 있다. 이는 우리나라 남서쪽에 열대저기압이 많이 나타난 결과로 보인다. 수증기 주축 유형 D의 경우 황해를 중심으로 대류권 중층까지 거의 원형의 저기압성 순환이 나타나며 300hPa 면에서 저기압성 순환의 중심이 북서쪽으로 기울어져 나타난다. 아마도 이와 같은 요란의 구조가 나타난 것은 종관저기압과 열대저기압이 혼재되어 있어서 나타난 결과로 보인다. 수증기 주축 유형 C의 경우와는 다르게 우리나라 북쪽의 저기압성 순환은 대상으로 나타나지 않고 남북으로 분포한다. 또한 필리핀 부근에 500hPa 면에 이르는 저기압성 요란이 뚜렷하게 나타난다.

이상의 결과를 요약하면 다음과 같다. 비록 일부 사례에서 얇은 활동전선 유형이 나타나 대부분의 남해안 호우 사례에서 깊은 활동전선 유형이 나타난다. 이는 일본 남서부 지역에서 일부 기간에, 혹은 4일 이상 강수가 계속되는 사례에서 얇은 활동전선 유형이 나타나는 것과는 다르다는 것을 의미한다.

마지막으로 수증기 수송 주축 유형에서 전형적인 사례로 판단되는 호우일의 적외선영상을 <그림 12>에 보인다. 주축 유형 C의 사례는 생략하였다. <그림 12(a)>에서는 수증기 수송의 주축을 따라 장마전선이 발달하는데, 양쯔 강 하류 부근의 구름과 우리나라 남해안 지역의 구름이 서로 다르다는 것을 알 수 있다(Akiyama, 1984). 북서태평양

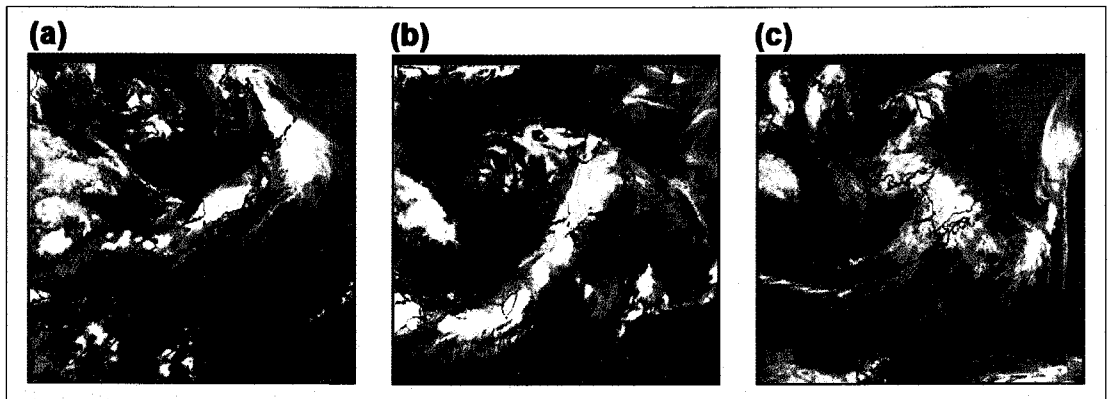


그림 12. 수증기 수송 주축 유형 A(a, 2003년 7월 11일 00UTC), B(b, 2003년 6월 12일 00UTC), D(c, 2003년 7월 18일 00UTC) 사례의 적외선 영상.

고기압이 화남지방까지 영향을 미친다는 것을 구름이 거의 없는 지역의 분포를 통해 알 수 있다. <그림 12(b)>에서는 수증기 수송이 활발한 남중국해에서 타이완 부근을 지나 우리나라 남해안 지역까지 발달한 구름띠가 나타난다. 황해의 저기압 후면의 찬 북풍계의 바람과, 필리핀 부근까지 발달한 북서태평양고기압 서쪽의 고온 습윤한 기류가 수렴하며 대량의 수증기가 수송되는 지역에서 구름띠가 형성되는 것으로 판단된다. <그림 12(c)>에서는 황해에 종관저기압이 있고 그 주위로 발달한 구름들이 분포한다. 저기압의 서쪽으로는 구름이 거의 없는 지역이 나타난다. 또한 남중국해, 타이완 부근, 서태평양에 걸쳐 넓은 지역에서 구름이 적게 분포한다.

5. 요약 및 결론

이 연구는 장마철 남해안의 호우 사례에 대해 박병익(2005)이 구한 850hPa 면 수증기 수송의 주축 유형에 대해 우리나라의 강수량 분포 특성, 동아시아 규모의 종관 특성과 장마전선의 구조를 살펴본 것으로 31년간 남해안 호우의 전 사례를 분석하였다. 이 연구에서 얻어진 결과들은 다음과 같다.

수증기가 남서방향에서 주로 수송되는 주축 유형 A의 경우 강수량, 호우와 다우의 출현비율 분포도에서 등치선이 대개 동서 방향으로 달리고 있으며, 지형의 효과가 뚜렷하게 나타나지 않는다. 이에 비해 수증기가 주로 남풍 계열의 바람에 의해 수송되는 주축 유형 B, C, D의 경우 강수량, 호우와 다우의 출현비율 분포도의 등치선이 대체로 남서~북동방향으로 달리고 있고, 소백산맥 등 지형의 영향이 잘 나타난다.

수증기 주축 유형 A의 경우 북서태평양고기압이 화남지방 부근까지 서쪽으로 확장하고 있으며 황해를 중심으로 저압부가 나타나 수증기 수송의 주축이 남중국해~화남지방~남해로 이어진다. 또한 수증기 수송 주축을 따라 하층 제트기류가 나타나며 이 지역을 따라서 대류활동이 활발하다. 지상 일기도를 살펴보면 전선과 저기압이 함께 나타나는 사례가 대부분을 차지하여 호우의 형성에 저기압이 중요한 역할을 하고 있다. 수증기 주축

유형 B의 경우 타이완 부근에 열대저기압이 나타나는 사례가 많아 황해에서 타이완 부근까지 저압부가 나타난다. 북서태평양고기압은 일본 남쪽까지 북상하여 남중국해에서 타이완 부근을 경유하여 수송된 수증기가 남해에서는 거의 남풍 계열의 바람에 의해 수송되게 한다. 이 유형에서 남중국해의 대류활동이 가장 활발하다. 수증기 주축 유형 C, D의 경우 타이완 부근이나 남해, 황해에 열대저기압이나 종관저기압이 나타나는 사례로서 우리나라 동쪽에 500hPa 면 고도의 양 편차역이, 그 서쪽에 음의 편차역이 나타나 남풍계열의 바람이 강하게 분다. 결론적으로 남해안 호우의 경우 일기도에서 저기압이 나타나지 않는 정체전선에 의해 형성된 사례가 매우 적다고 할 수 있다.

남해안 호우의 사례에서 호우는 하층 제트기류의 북쪽, 상층 제트기류의 남쪽에서 나타나며, 호우가 나타난 지역 북쪽의 상층 제트기류는 강화된다. 또한 제트기류에 동반하여 대류권 중층에서 건조한 공기가 호우지역으로 유입된다. 주축 유형 A의 경우 상층 제트기류가 동서로 길게 나타나며, 이의 영향은 강수 분포 등에서 나타난다. 유형 B, C, D의 경우 남풍계열의 바람으로 하층 제트기류가 남해안으로 유입하며 그 북쪽에서 상층 제트기류가 강화되는 제트입구가 나타난다. 이런 경우 상하 제트기류의 상호작용으로 호우가 나타난다고 알려져 있다.

대류권의 4개 층에서 저기압성 소용돌이도가 큰 지역을 중첩하여 장마전선의 구조를 살펴본 결과, 소수의 사례에서 얇은 활동전선 유형이 나타나나 대부분의 사례에서 깊은 활동전선 유형이 나타난다. 이는 일본 남서부 지역의 바이우 계절에 상당한 빈도로 얇은 활동전선 유형이 나타나는 것과는 다른 양상이다.

이상에서 남해안 호우의 사례에 대해 종관 특성을 살펴보았다. 그 결과 아열대고기압과 저기압, 상하층 제트기류의 특성에 따라 수증기 수송의 주축 유형과 대류활동이 활발한 지역 등이 달라짐을 살펴보았다. 앞으로 중부지방의 호우에 대해서도 살펴볼 필요가 있다. 또한 호우 이외의 강수 현상에 대해서도 일본의 바이우와 어떤 면에서 같고 다른지를 조사하는 것도 흥미 있는 연구 주제가 될 것이다.

주

- 1) 日本氣象協會에서 발행한 1971~'75年 天氣圖集成, 1976~'80年 天氣圖集成, 1981~'85年 天氣圖集成, 1986~'90年 天氣圖集成, 1991~'95年 天氣圖集成, 1996년 이후는 일본기상청의 天氣圖 CD-ROM의 지상일기도를 참고하였다.
- 2) 재분석자료(reanalysis data)는 NOAA Earth System Research Laboratory of the Physical Sciences Division (PSD)의 웹 사이트 <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>에서 내려받았다(download). 자료 제공에 감사드린다(Thanks for data).
- 3) OLR은 기상 위성에서 관측한 장파복사로서 지표면 혹은 구름 꼭대기 등 장파복사를 방출한 표면 온도의 4승에 비례한 값을 갖는다. 따라서 열대지역이나 여름철의 중위도 지역에서는 대류 활동을 비교적 잘 나타낸다고 알려져 있다. 다만, 지면 온도가 낮은 겨울철이나 티베트 고원과 같은 고도가 높은 지역에서는 대류 활동을 충실하게 반영하지 않을 수도 있다.
- 4) 호우일과 다우일의 출현 비율은 수증기 수송 유형별로 각 지점에 대해 계산한다. 호우일/다우일의 출현 비율은 유형별 전체 호우 사례 수에 대한 호우일/다우일 출현 일수의 백분율이다.
- 5) 모든 개별 사례에 대해 전선구조를 살펴본 결과 알은 활동전선 유형과 유사한 사례가 1개(1983년 7월 21일) 있었다. 그런데 그 다음날에는 다시 깊은 활동전선 유형으로 되어 알은 활동전선 유형이 일시적으로 나타난 것으로 보인다.

문헌

강만석, 1992, 한국 호우의 기후학적 특성, 효성여자대학 연구논문집, 44, 467-495.

강만석, 2000, 한국의 여름 강수량 변동의 지역성, 한국지역지리학회지, 6, 139-152.

김민기·최영은, 2010, 최근 지역별 호우발생의 특성 및 변화 -강릉, 서울, 부산을 사례로-, 기후연구, 5, 16-28.

김성삼·정창희·박순웅·이병설, 1983, 多雨장마와 寡雨장마시 장마前線의 構造的 特徵, 한국기상학회지, 19(1), 12-32.

나득균·곽종흠·서명석·홍윤, 2005, 종관적 특징에 따른 남한 강수 특성 분석: 30년(1973~2002) 기후 통계, 한국지구과학회지, 26, 732-743.

박병익, 1996, 韓國의 장마철 降水分布型과 綜觀場의 對應關係에 관하여, 지리학논집(공주대학교 사범대학 지리교육과), 22, 61-89.

박병익, 2005, 장마철의 남해안 호우시 수증기 수

송의 주 경로, 지리교육논집, 49, 175-185.

박병익, 2010, 장마철 우리나라 강수의 지속성에 따른 종관 특성의 차이, 대한지리학회지, 45, 748-765.

박선기·이동규, 1987, 아시아 동안에서 북동진하며 발달하는 온대저기압의 종관적 특성, 한국기상학회지, 23(1), 1-25.

소선섭·임재준·나득균, 1995, 한국 근대기상관측 이래 최대 일강수량을 나타낸 장흥지방의 집중호우의 분석, 한국기상학회지, 31, 281-299.

송병현·남재철·남경엽·최지혜, 2004, 레이더 자료를 이용한 충청지역 집중호우 사례 특성 분석, 대기, 14, 24-43.

윤원태·박정규·이재원·이현수·민승기, 2001, 1998년 여름철 한반도 집중호우 특성 분석, 한국기상학회지, 37, 181-194.

이광재·허기영·서애숙·박중서·하경자, 2010, 호우사례 분석을 위한 개념모델 구성에 위성영상과 위성자료의 활용 연구, 대기, 20, 131-151.

이광호·김문일, 1982, 집중호우의 종관기후학적 연구, 한국기상학회지, 18(2), 11-17.

이동규·정창희·박순웅·윤순창·이천우·윙화쿠오·시몬 로우-남, 1991, 아시아 동안에서 급격히 발달하는 저기압의 수치모의, 한국기상학회지, 27, 1-21.

임정선·박순웅, 1991, 1988년 장마기간에 한반도를 중심으로 한 수증기수송과 수지, 한국기상학회지, 27, 221-240.

홍성유·이동규, 1996, 한반도에서 발생한 집중호우의 열과 수분수지, 한국기상학회지, 32, 85-102.

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

황재돈·박정규, 2000, 1999년 한반도 여름철 호우와 관련된 동아시아 대기순환 특성 분석, 한국기상학회지, 36, 573-582.

Akiyama, T., 1984, A medium-scale cloud cluster in a Baiu front. Part I: Evolution process and fine structure, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 62, 485-504.

Akiyama, T., 1990, Large, synoptic and meso

- scale variations of the Baiu front, during July 1982. Part II: Frontal structure and disturbances, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 68, 557-574.
- Chen, G.T.J. 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, 884-891.
- Chen, G.T.J., Wang, C.C. and Lin, D.T.W., 2005, Characteristics of low-level jets over northern Taiwan in Mei-Yu season and their relationship to heavy rain events, *Monthly Weather Review*, 133, 20-43.
- Chen, G.T.J., Wang, C.C. and Lin, L.F., 2006, A diagnostic study of a retreating Mei-Yu front and the accompanying low-level jet formation and intensification, *Monthly Weather Review*, 134, 874-896.
- Chen, G.T.J., Wang, C.C. and Chang, S.W., 2008, A diagnostic case study of Mei-Yu frontogenesis and development of wavelike frontal disturbances in the subtropical environment, *Monthly Weather Review*, 136, 41-61.
- Geng, B., Yamada, H., Reddy, K.K., Uyeda, H. and Fujiyoshi, Y., 2004, An observational study of the development of a rainband on a Meiyu front causing heavy rainfall in the downstream region of the Yangtze River, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 82, 1095-1115.
- Geng, B., Yamada, H. and Reddy, K.K., 2009, Mesoscale development and along-frontal variation of a Meiyu/Baiu front and precipitation observed in the downstream region of the Yangtze River, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 87, 423-457, doi:10.2151/jmsj.87.423.
- Higashi, K., Kiyohara, Y., Yamanaka, M.D., Shibagaki, Y., Kusuda, M. and Fujii, T., 2010, Multiscale features of line-shaped precipitation system generation in central Japan during late Baiu season, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 88, 909-930.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, B., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Jenne, R. and Joseph, D., 1996, The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 437-471.
- Kato, T., 2006, Structure of the band-shaped precipitation systems inducing the heavy rainfall observed over Northern Kyushu, Japan on 29 June 1999, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 84, 129-153.
- Kim, H.W. and Lee, D.K., 2006, An observational study of mesoscale convective systems with heavy rainfall over the Korean Peninsula, *Weather and Forecasting*, 21, 125-148.
- Lee, B. K., 1981, Statistical and synoptic studies of heavy rain in Korea, *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University*, 16, 1-48.
- Lee, B.S., 1976, Weather-climatological study of Changma and Kaul Changma in Korea in relation to two rainy season of East Asia, *Journal of the College of Education(Sadae Non-chong)*, Seoul National Univ., 14, 185-218.
- Lee, D.K., Kim, H.R. and Hong, S.Y., 1998, Heavy rainfall over Korea during 1980-1990, *Korean Journal of Atmospheric Sciences*, 1, 32-50.
- Lee, D.K., Park, J.G. and Kim, J.W., 2008, Heavy rainfall events lasting 18 days from July 31 to August 17, 1998, over Korea, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 86, 313-333.
- Lee, T.Y. and Kim, Y.H., 2007, Heavy precipitation systems over the Korean Peninsula and their classification, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 43, 367-396.
- Murakami, T. and Matsumoto, J., 1994, Summer Monsoon over the Asian Continent and Western North Pacific, *Journal of the*

- Meteorological Society of Japan*, 72, 719-745.
- Ninomiya, K., 2001, Large λ -shaped cloud zone formed around July 6, 1991 with pole-ward moisture transport from intense rainfall area in Meiyu-Baiu front, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 79, 805-813.
- Ninomiya, K. and Shibagaki, Y., 2003, Cloud system families in the Meiyu-Baiu Front observed during 1-10 July 1991, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 81, 193-209.
- Ninomiya, K. and Shibagaki, Y., 2007, Multi-scale features of the Meiyu-Baiu front and associated precipitation systems, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 85, 103-122.
- Ninomiya, K., Suzuki, T. and Nishimura, T., 2008, Differences between the intense precipitation associated with subsynoptic-scale Baiu frontal depression simulated by an AGCM and described in observational studies, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 86, 563-573.
- Park, S.U., Ahn, H.J. and Chun, Y.S., 1989, Evolution of synoptic scale features associated with a long-lived convective system(21-23 July 1987), *Journal of the Korean Meteorological Society*, 25, 168-191.
- Park, S.U., Joung, C.H., Kim, S.S., Lee, D.K., Yoon, S.C., Jeong, Y.K. and Hong, S.G., 1986a, Synoptic-scale features of the heavy rainfall occurred over Korea during 1-3 September 1984, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 22(1), 42-81.
- Park, S.U., Yoon, I.L. and Chung, S.K., 1986b, Heat and moisture sources associated with the Changma front during the summer of 1978, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 22(2), 1-27.
- Qian, W. and Lee, D.K., 2000, Seasonal march of Asian summer monsoon, *International Journal of Climatology*, 20, 1371-1386.
- Shibagaki, Y. and Ninomiya, K., 2005, Multi-scale interaction processes associated with development of a sub-synoptic-scale depression on the Meiyu-Baiu frontal zone, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 83, 219-236.
- Tagami, H. and Niino, H., 2007, A study of meso- α -scale disturbances on the Baiu Front and their environmental field, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 85, 767-784.
- Takahashi, H., 1993, Synoptic condition over East Asia during the early-summer rainy season(Baiu season) from the point of view of the temporal continuity of rainfall in the southwestern part of Japan, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 71, 611-632.
- Wang, B. and Fan, Z., 1999, Choice of South Asian summer monsoon indices, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80, 629-638.
- Xu, W., Zipser, E.J. and Liu, C., 2009, Rainfall characteristics and convective properties of Mei-Yu precipitation systems over South China, Taiwan, and the South China Sea. Part I: TRMM observations, *Monthly Weather Review*, 137, 4261-4275.
- Yamasaki, M., 2008, A study of Fukui heavy rainfall in 2004, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 86, 369-376.
- Yamasaki, M., 2009, A study of the mesoscale convective system under vertical shear flow in the latently unstable atmosphere with north-south asymmetry, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 87, 245-262.
- 교신 : 박병익, 151-742, 서울시 관악구 관악로 599, 서울대학교 사범대학 지리교육과(이메일: fbipark@snu.ac.kr, 전화: 02-880-9029)
- Correspondence : Park, Byong Ik, Department of Geography Education, College of Education, Seoul National University, Gwanak-ro 599, Gwanak-gu, Seoul, 151-742, Korea(e-mail: fbipark@snu.ac.kr, phone: +82-2-880-9029)
- (접수: 2011.1.25, 수정: 2011.2.27, 채택: 2011.3.25)