1993/1994년을 기점으로 나타난 한반도 여름철 강수량 변동의 종관기후학적 원인

김재훈* · 이태영

연세대학교 대기과학과/지구환경연구소

(접수: 2012년 9월 27일, 수정: 2012년 10월 31일, 게재확정일: 2012년 11월 13일)

Change of Synoptic Climatology Associated with the Variation of Summer Rainfall Amount over the Korean Peninsula Around 1993/1994

Jae-Hoon Kim* and Tae-Young Lee

Department of Atmospheric Sciences / Global Environment Laboratory, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

(Received: 17 September 2012, Revised: 31 October 2012, Accepted: 13 November 2012)

Abstract In this study, an investigation has been carried out to understand 1) temporal variation of rainfall amount in summer over south Korea during the 30-year period of 1979-2008 and 2) the relationship between the variation of rainfall amount and the change of large-scale monsoon circulation around 1993/1994 over East Asia. The analysis of rainfall amount is carried out separately for whole summer (June-August), climatological Changma period of 23 June-23 July, and August to consider variations within summer. To relate the variation of rainfall amount with the change of large-scale circulation, we have considered two 15-year periods of 1979-1993 and 1994-2008. This study has used observations at 58 stations in South Korea and NCEP-NCAR $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ reanalysis data. The major change in synoptic environment for the Changma period is characterized by the intensified anticyclone over Mongolia during 1994-2008, which results in a weak meridional oscillation of Changma front. As a result, rainfall amount for the Changma period and the frequency of extreme events have significantly increased after 1993/1994. A major change of synoptic environment for August is the significant westward extension of the western Pacific subtropical high, which allows not only more moisture transports but also stronger cyclonic circulation over the Korean peninsula. Rainfall amount for August and frequency of extreme events have also increased after 1993/1994. However, variability of rainfall amount is larger for August than that for the Changma period, with some years showing very dry August (monthly rainfall amount less than 150 mm).

Key words: Summer precipitation, Changma, post-Changma and synoptic environment

1. 서 론

동아시아 지역의 여름철은 여름 몬순의 영향을 받아 연 강수량의 상당부분이 집중된다. 여름 강수의 주

된 부분을 차지하는 집중호우는 홍수로 많은 인명 및 재산 피해를 초래하나 다른 한편으로는 수자원의 변동을 야기하여 생활, 농업, 공업 등 사회 전반에 걸쳐 상당한 영향을 미치게 되므로 여름철 강수 변동에 대한 이해는 매우 중요하다.

여름철 강수의 변동은 몬순을 구성하는 요소들의 경년 변동 또는 큰 규모의 변화로 유도되는데 동아시아 지역은 지난 70년대 후반, 90년대 초·중반을 기점으로 동아시아 여름 몬순의 순환 변화와 함께 일부

*Corresponding Author: Jae-Hoon Kim, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, 134 Shinchon-Dong, Seodamun-Gu, Seoul 120-749, Korea

Phone : +82-2-2123-3872, Fax : +82-2-365-5163

E-mail : jh.k@yonsei.ac.kr

지역에서 강수 특성이 뚜렷하게 변화하였다 (Hu 1997; Gong and Ho 2002; Ho *et al.*, 2003; Kwon *et al.*, 2005, 2007; Ding *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2010). Hu (1997)는 70년대 후반 서태평양 해수면 온도 증가와 관련하여 북반구 순환의 변화와 함께 과거에 비해 북서태평양 고기압이 강화됨을 보였고 Gong and Ho (2002) 역시 같은 시기 북서태평양 고기압이 뚜렷하게 서쪽으로 확장된 것과 관련하여 양쯔강 유역에 강수량이 증가하는 것을 보였다. 이러한 북서태평양 고기압의 서쪽 확장은 그 가장자리에서 하층제트 형성 과 수증기 수송을 주도하여 여름 몬순의 강도와 깊은 관련이 있다 (Huang and Sun, 1992; Chang *et al.*, 2000a; Lu, 2001; Lu and Dong, 2001).

Kwon *et al.* (2007)은 1993년과 1994년을 (93/94) 기점으로 동아시아지역 상층 바람장의 약화로 큰 규모의 순환 변화가 있었음을 보였으며 Wu *et al.* (2010)은 92/93을 기점으로 중국 화남지방의 강수량이 변동한 것에 대해 인도양 해수면 온도와 티벳 고원 적설량의 변화가 각각 동중국해와 화북지방 하층에서 발산역을 유도하였고 그로 인해 화남지방에서 수렴역이 강화된 것이 강수량 변동의 원인으로 설명하였다.

한반도 역시 지난 10여 년 간 여름철 강수량이 뚜렷하게 변동하였으며 강수의 특성이 과거에 비해 달라지고 있다는 많은 연구들이 진행되어왔다 (박성규와 하경자, 2002; 이승호와 권원태, 2004; 고정용 등, 2005; 이태영와 조남산, 2007; Chang and Kwon, 2007; 박창용 등, 2008). 박창용 등 (2008)은 1958년부터 2007년까지 10년 단위로 여름철 강수 변동을 분석한 결과, 과거에 비해 최근 10년 (1998~2007년) 강수량이 증가하였음을 보였으며 박성규와 하경자 (2002)는 90년대 초반을 전후로 나누어 일 강수 변동을 비교한 결과 7월 중순에서 8월 하순에 나타나는 여름철 강수량의 최대 값이 7월 상순과 8월 상순으로 이동하였음을 보였다. 또한 김원무와 전종갑 (2010)은 90년대 중반을 기점으로 한반도에서 나타난 여름철 강수 구조의 변화가 쿠르시오 지역과 인도양의 해수면 온도와 상관관계가 있음을 보였으며 Kim *et al.* (2011)은 90년대 중반 이후 나타나는 계절 내 진동 변화에 대해 장마 전선의 북상이 빨라진 것과 장마 후 북서태평양 고기압의 확장으로 인해 수분 수송의 증가를 보인 바 있다.

이들 선행연구에 기초하면, 90년대 초, 중반 동아시아 여름 몬순의 순환 변화가 한반도의 여름철 강수 변동과 밀접한 관련이 있는 것으로 보여진다. 하지만 앞선 큰 규모의 변화가 한반도 강수 환경에 어떠한 변화를 가져왔는지 알 수 없으며 한반도 강수 변동에 관한 대부분의 연구들은 그 원인이 되는 종관 환경 변화에 대해서 제시하지 않았다. 또한 많은 선행연구

들이 여름 몬순 기간을 6, 7, 8월 (JJA)로 정하여 강수 변동과 순환의 변화에 대해 분석을 수행하였으나 한반도에서 장마기간은 기후학적으로 7월 하순에 종료되고 (장마백서, 2011) 장마기간과 장마 후 강수 환경이 다르게 나타나는 것을 미루어 볼 때 계절 내 변동을 고려하여 장마기간과 장마 후 강수기간에 대해 각각 분석하는 것이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 첫째, 1979년부터 2010년까지 6, 7, 8월, 장마기간, 8월 (장마 후)의 강수량 변동을 비교하여 각각에서 나타나는 특징을 설명하고자 한다. 둘째, 한반도 강수 변동에 대해 1990년대 초·중반을 기점으로 장마기간과 8월에서 나타나는 한반도 주변 종관기후학적 환경의 변화를 각각 제시하고 마지막으로 변화된 종관기후 환경이 강수적인 측면에서 어떠한 역할을 하였는지 밝혀 한반도 강수변동의 원인을 규명하고자 한다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서는 1979년부터 2010년까지 전국 58개 기상청 관측소를 위도 36도를 기준으로 중부지방 29개, 남부지방 27개, 제주 2개 지점으로 나누어 사용하였다 (Fig. 1). 또한 사용된 58개 지점 관측소의 강수량 값에 대한 시·공간적인 대표성을 검증하기 위해 1990년부터 2010년까지 70개 관측소에 대해 같은

Fig. 1. Location of 58 meteorological stations in South Korea.

기간 동안 비교한 결과 전체 강수량 경향과 5년 이동 평균의 경향이 거의 유사하게 나타나 본 연구에서 사용한 58개 지점이 한반도에서의 강수변동을 대표한다고 판단하였다 (not shown).

장마전선은 6월 중순경 남쪽에서부터 북상하기 때문에 제주, 남부, 중부 지방의 기후학적인 장마 시작일과 종료일은 조금씩 차이가 나타나며 장마전선이 남북으로의 진동과 정체를 반복하여 기후학적 장마기간을 선정하는 기준은 상당히 모호하다. 따라서 본 연구에서는 기상청에서 발간한 장마백서 (2011)에 근거하여 위도상 중심에 위치한 남부 지방의 기후학적인 장마 시작일과 종료일을 사용하였고 시작일은 6월 23일, 종료일은 7월 23일로 31일을 장마기간으로 정하였다. Fig. 2(a)는 1979년부터 2010년까지의 일 평균 강수를 나타낸 것으로 6월 하순에서 7월 하순 최대 값을 보이고 8월에서 두 번째 최대 값을 보여 본 연구에서 정한 장마기간과 장마 후 강수기간이 적절

하다고 볼 수 있다.

분석 자료는 National Centers for Environmental Prediction/National Centers for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) reanalysis $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ data (Kalnay *et al.*, 1996)를 이용하였고 분석 방법은 동아시아 몬순 순환이 변화한 시기를 기준으로 이전 시기와 변화 후 시기에 대한 평균 종관장의 차이로 분석하였다. 많은 선행 연구들이 90년대 초·중반 동아시아 순환 변화 시기에 대해서는 동의하나 각 연구에서 사용한 방법과 분석 기간에 따라 그 기점은 약간씩 차이가 나타나는데 이에 대해 Ding *et al.* (2008)은 강수변동에 사용된 분석 방법과 분석 지역에 따라 변화된 기점이 차이가 나는 것을 보인 바 있다. 한편, Kwon *et al.* (2007)은 모분포를 추정하여 두 집합간의 통계적 유의미한 차이를 구하는 Lepage test (HK)를 통해 93/94를 기점으로 구하였고 김원무와 전종갑 (2010)과 Kim *et al.* (2011) 역시 같은 방법으로 한반도 여름철 강수에 대해 장마기간은 92/93, 장마 후 강수기간을 93/94로 구하였으며 93/94를 기점으로 분석한 바 있다.

따라서 본 연구에서는 Kwon *et al.* (2007)과 Kim *et al.* (2011)에서 통계적 기점으로 구한 93/94를 1990년대 동아시아 순환 변화의 기점으로 사용하였으며 1979~1993년을 전기, 1994~2008년을 후기로 나누어 각각 15년에 대해 동아시아 순환의 변화에 기인된 한반도에서의 평균적 종관 환경 변화를 살펴보았다.

3. 한반도 여름철 강수량 변동의 계절 내 차이

3.1. 강수량 변동

Fig. 2(b)는 90년대 초·중반 동아시아 순환의 변화에 따른 한반도의 강수량 변동을 살펴보기 위해 93/94를 기점으로 전기 (1979-1993)와 후기 (1994-2008)의 일 강수의 차이를 나타내었다. 장마기간 내 7월 하순에서 보이던 최대 값이 7월 초순으로 이동한 것을 보여 박성규와 하경자 (2002)의 연구 결과와 일치하였고 기후학적으로 휴지기에 해당하는 7월 하순의 강수량이 감소한 반면에 8월의 강수량이 뚜렷하게 증가하여 최근 장마 종료 후 강수량 증가에 대한 많은 선행 연구 결과들과도 일치하였다. 대부분의 선행 연구들이 6, 7, 8월의 평균 (JJA mean) 강수량을 이용하여 변동을 조사하였지만 위와 같이 계절 내에서의 강수량 변동이 다른 모습을 보이기 때문에 두 기간에 대한 별도의 분석이 필요하다.

Fig. 3은 6, 7, 8월, 장마기간 그리고 8월 강수량에 대해 각각 1979년부터 2010년까지 강수량 변동을 나타낸 것이다. 먼저 6, 7, 8월의 강수량을 평균한 Fig. 3(a)를 살펴보면 93/94를 기점으로 한반도의 여름철 강수량이 뚜렷하게 증가하였으며 2006/2007년 이후

Fig. 2. Mean daily precipitation amount for (a) climatology (1979-2010) and (b) 1979-1993 (dashed line) and 1994-2008 (solid line). The shaded areas indicate the difference between the two mean precipitation amounts (1994-2008 mean minus 1979-1993 mean).

약간 감소한 것을 알 수 있다. 장마기간 강수량 변동 역시 93/94 이후 강수량이 뚜렷하게 증가하였으며 2000년대에 들어서 좀 더 두드러진 증가를 보여 6, 7, 8월 평균과 약간 다르게 나타났다. 경년 변동을 살펴보면 두 가지 특징적인 면이 나타나는데 첫째, 전기에 비해 다우 장마 (wet Changma)의 강수량이 크게 증가한 것과 둘째, 경년 변동이 증가하였음에도 불구하고 전체적인 강수량 위상이 전기에 비해 뚜렷하게

증가하여 과우장마 (dry Changma)가 거의 나타나지 않는 것을 볼 수 있다 (Fig. 3(b)).

8월의 강수량 변동 또한 93/94를 기점으로 증가를 보이지만 그 변동은 90년대에 좀 더 뚜렷하게 나타나며 2000년대 중·후반에서는 오히려 감소하는 것을 보여 장마기간과는 다른 변동을 보이고 있다. 또 8월의 경년 변동을 살펴보면 과우해의 크기는 전기와 비교 하였을 때 여전히 비슷하게 나타나 최근 10년 장마기간 과우해가 거의 나타나지 않는 것과 상당한 대조를 이룬다. 위의 결과에 따르면 장마기간 강수량과 8월 강수량 모두가 93/94 부근에서 경향 변화를 보이나, 그 경향 변화는 장마기간과 8월이 서로 다르게 나타났다. 한편, 이 같은 두 기간 간의 경향 변화 차이에도 불구하고 6, 7, 8월 평균에서는 계절 내 변동이 고려되지 않을 뿐만 아니라 두 기간의 값들을 상쇄시켜 각각에서 나타나는 강수량 변동 특징이 구분되지 않기 때문에 오히려 한반도 여름철 강수량 변동에 대한 이해를 복잡하게 할 수 있는 것으로 보인다.

Fig. 3. Time series of 58-station mean precipitation amount accumulated for (a) JJA, (b) climatological Changma period (23 Jun-23 July) and (c) August from 1979 to 2010 (solid line). Dashed and dotted lines indicate 32-year average and 5-year moving average, respectively.

3.2. 평균 종관 기상장의 변동

동아시아 여름 몬순은 큰 규모 관점에서 북서태평양 고기압, 대륙성 고기압, 오호츠크 고기압, 열대 몬순 기단 등 주변 환경이 매우 복잡하게 구성되어 있는데 이 중 북서태평양 고기압은 그 가장자리를 따라 남서류를 형성하고 열대몬순 기단의 수증기를 전선상으로 수송하여 동아시아 여름철 강수 발달에 지배적인 역할을 한다 (Park *et al.*, 1988; Ninomiya and Akiyama, 1992; 서경환 등, 2011). 따라서 여름철 한반도에서 나타난 강수 환경의 변화와 장마기간과 8월의 계절 내 변동에서 나타나는 특징을 알아보기 위해서 북서태평양 고기압의 변동에 대해서 살펴볼 필요가 있다.

Fig. 4는 93/94를 기점으로 전기와 후기로 나누어 북서태평양 고기압의 세력으로 대표되는 5880 gpm을 6, 7, 8월 평균과 장마기간, 8월에 대해 각각 나타낸 것으로 서로 비교해 보면, 장마기간 북서태평양 고기압의 가장자리가 122°E 부근에 위치하여 있는 반면에 8월과 6, 7, 8월 평균에서는 130°~140°E 부근에서 변동하는 것을 보여 그 위치와 세력이 상당히 차가 나는 것을 알 수 있다. 또한 6, 7, 8월 평균과 장마기간은 전기와 후기 간의 북서태평양 고기압 변동이 거의 나타나지 않는 반면에 8월은 북서태평양 고기압의 세력이 전기에 비해 후기에 뚜렷하게 서쪽으로 확장하여 장마기간에 비해 남쪽 환경의 변화가 두드러지게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 93/94를 기점으로 동아시아 몬순 순환의 변화에 기인된 한반도 여름철 종관 환경 변화가 계절 내 변동에 의해 장마기간과 8월이 서로 다르게 나타나므로 6, 7, 8월 평균장만

Fig. 4. Location of 5880 gpm for (a) JJA, (b) Changma and (c) August. Left and right panels represent mean for the periods 1979-1993 and 1994-2008, respectively.

으로 접근하게 되면 정확한 강수량 변동 원인에 대해 이해하기 어렵다는 것을 보여준다.

4. 장마기간 강수 환경의 변화

4.1. 한반도 주변 환경의 변화

앞의 3장에서 분석한 바와 같이 93/94를 기점으로 장마기간 한반도 강수량 변동이 뚜렷하게 나타났으며 몇몇 다우해에 의한 변동이 아니라 전체적인 강수량

이 증가한 것으로 나타났다. 따라서 4장에서는 장마기간에 대해 93/94를 기점으로 전기와 후기 사이에서 나타난 한반도 주변 종관 환경 변화가 강수량 변동에 어떤 영향을 주었는지 살펴보고자 한다.

장마기간에 대해 전기와 후기 간의 지위고도장과 바람장의 차이를 500 hPa와 850 hPa에서 조사하였다 (Fig. 5). 먼저 500 hPa 지위고도장의 차이를 살펴보면 (Fig 5(a)), 한반도 북서쪽 몽고 지역 부근의 지위고도장이 크게 상승하였다. 이러한 북쪽 환경의 변화는 티

Fig. 5. Differences between 1994-2008 mean and 1979-1993 mean during Changma period of (a) 500 hPa geopotential height (contours, m), (b) 850 hPa geopotential height (contours, m), (c) 500 hPa horizontal wind (arrow, m s^{-1}) and (d) 850 hPa horizontal wind (arrow, m s^{-1}). The shaded areas indicate the values significant at the 95% confidence level using t-test. Bold and dashed lines are zero and negative values, respectively.

벧 고원의 적설량 증가와 관련되어 나타나는데 Wu *et al.* (2010)은 90년대 초반 이후 티벳 고원의 적설량의 증가가 주변과의 온도경도를 강화시켜 화북지방에서의 고기압성 바람장을 유도하였고 그로 인해 하강류와 하층 발산이 강화되는 것을 보인 바 있다. 또한 지위고도 상승으로 유도되는 바람장의 변화는 90년대 중반을 전후로 동아시아 상층 바람장의 변화를 보인 Kwon *et al.* (2007)의 결과와 일치하게 나타나 선행 연구들과 일치한 결과를 보였다 (Fig 5(c)). 하층에서는 한반도 북서쪽 지위고도 상승역은 90% 신뢰수준에 포함되었으며 (not shown) 한반도로 유입되는 남서류가 증가하였고 그 위로는 오힌크 부근에서 이어지는 기압골이 형성되어 강수량이 증가할 수 있는 좋은 환경으로 변한 것을 볼 수 있지만 Fig. 4에서 나타나듯이 장마기간 북서태평양 고기압의 동서방향의 변동이 거의 없어 남쪽 환경의 변화가 유의하지 않았다 (Fig. 5(c)와 (d)).

한반도 북쪽 환경의 변화는 지위고도 상승으로 유

도되는 북풍 anomaly가 전선의 북쪽으로부터 전선 상으로 상대적으로 차고 건조한 공기의 유입이 강화될 수 있는 환경을 (Fig. 5(d)) 조성하게 되고 이는 온도와 습도의 남북 경도가 증가하여 전선 강도가 강해질 수 있는 환경을 조성한다 (Zhou *et al.*, 2005). 하지만 남북 상당온위 경도와 남북 온도 경도의 차이를 확인해 본 결과, 한반도 주변에서 뚜렷한 변화를 찾기 어렵고 통계적으로도 유의하지 않아 전선 강도 변화가 강수량 변동에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다 (not shown). 다른 한편으로는 북쪽의 대륙성 기단 강화는 북서태평양 기단과 오힌크 기단 사이에서 형성되는 장마전선의 남북 진동을 제한하면서 좀 더 한반도에 정체할 수 있게 하고, 기후학적으로 장마기간 한반도 남쪽에서 형성되는 남서류로부터 지속적인 수증기를 공급받게 되어 강수량을 증가시킬 수 있게 된다.

이를 확인하기 위해 장마전선이 북상하고 남북으로 진동하는 것을 고려하여 장마기간 중 중기에 해당되

Fig. 6. Differences between 1994-2008 mean and 1979-1993 mean for 4-13 July of (a) standard deviation of meridional gradient of 850 hPa equivalent potential temperature and (b) 850 hPa meridional moisture flux ($\text{g m kg}^{-1} \text{s}^{-1}$) from 6-hourly reanalysis data. The shaded areas, bold and dashed lines are same as Fig. 5.

는 시기인 7월 4일~13일을 대상으로 전기와 후기의 상당온위 남북경도의 표준편차와 남북 방향의 수분속 차이를 나타내었다 (Fig. 6). 두 결과 모두 한반도 부근에서 95% 신뢰수준에 포함되어 나타났으며 전기에 비해 후기의 장마전선 남북 진동이 뚜렷하게 감소하여 한반도에서 장마전선이 좀 더 정체되었고 전선상으로는 남쪽으로부터 공급되는 수증기량이 뚜렷하게 증가하는 것을 볼 수 있어 93/94를 기점으로 나타난 한반도 강수량 변동의 주요한 원인으로 볼 수 있다. 뒷받침하는 결과로 박성규와 하경자 (2002)는 장마기간 동아시아 지역에서의 다강수대가 90년대 초·중반 이후 북쪽으로 이동한 것을 보였으며 Kim *et al.*

(2011) 역시 90년대 중반 이후 장마전선의 북상이 빨라짐을 보인 바 있다. 이는 북서태평양 고기압의 북상을 의미하므로 장마전선의 남북 진동 약화는 두 기단의 변화와 상당부분 관련이 있어 보이고 이러한 환경 변화는 최근 장마기간에서 평년 대비 과우해가 거의 나타나지 않는 것에 대해 일정부분 설명이 된다.

한편, 전선의 남북 진동약화로 인한 한반도 정체와 그 전선상으로의 수증기 유입의 증가는 강수량 증가에 분명 좋은 환경임에도 불구하고 교란적인 측면에서 모두 설명되지는 않는다. 또한 앞선 서론에서 언급한 바와 같이 한반도를 지나는 강수시스템의 규모를 고려하였을 때 중관 규모의 교란 변화와 좀 더 관련되어 있을 것으로 판단된다.

4.2. 전선상 교란의 변화와 호우 빈도

장마기간 한반도에서의 교란 및 대류의 변화를 살펴보기 위해 전기와 후기의 850 hPa 와도와 발산의 차이와 600 hPa와 925 hPa의 상당온위를 이용해 대류 불안정도의 차이를 Fig. 7에서 나타내었다. 이를 살펴보면, 한반도 영역에서는 전기에 비해 후기 하층에서의 수렴과 양의 와도가 증가하였으며 600 hPa와 925 hPa의 상당온위 차가 음의 값을 나타내 장마기간 한반도에서의 대기가 좀 더 불안정해 진 것으로 나타났다. 또한 세 변수 모두 비슷한 위치에서 수렴과 불안정도는 95%, 상대와도는 90% 신뢰수준에 속해 통계적으로 유의미한 값을 보여 전선상의 하층 교란에 의한 호우 시스템 발달이 한반도 강수량 변동에 주요한 원인으로 보여진다. 이러한 변화의 원인으로는 장마기간 한반도 남쪽에서 형성되는 남서류와 함께 한반도 북쪽에서 지위고도 상승으로 유도되는 북동류 (혹은 북풍)가 전기에 비해 정체되는 장마전선 상에서 수렴을 강화시킬 수 있는 조건을 형성하였으며 (Fig. 5(d)), 결과적으로 두 바람장 사이에서 양의 와도가 증가한 것으로 판단된다 (Fig. 7(a)와 (b)). 또한 북동류의 증가는 중층에서 상대적으로 차고 건조한 공기를 유입할 수 있게 하여 대류적으로 더 불안정해질 수 있는 환경을 조성하였다 (Fig. 7(c)). 반면, 중층과 상층에서는 뚜렷한 변화를 찾을 수 없었으며 통계적으로도 유의미한 값을 나타내지 않았다 (not shown).

하층 교란의 강도와 불안정도 증가가 강수량 변동에 미친 영향을 구체적으로 살펴보기 위해, 각 강수일에서 최대 일 강수량을 기록한 관측소 자료만을 이용하여 30 mm day^{-1} 와 80 mm day^{-1} 이하의 강수량 빈도와 강수량 상위 1% (240 mm day^{-1}), 5% (150 mm day^{-1}), 10% (120 mm day^{-1})로 나누어 호우의 빈도와 강도 변화를 살펴 보았다 (Fig. 8). 그 결과, 한반도에서의 작은 강수량 빈도 변화는 거의 나타나지 않았으며, 93/94 이후 작은 강수량의 빈도는 오히려 약간

Fig. 7. As in Fig. 5. but for (a) divergence ($1e-05 \text{ s}^{-1}$), (b) relative vorticity ($1e-05 \text{ s}^{-1}$) at 850 hPa, and (c) $\theta_e(600 \text{ hPa})$ - $\theta_e(925 \text{ hPa})$ (K).

감소한 것을 보인다 (Fig. 8(a)). 반면 상위 1%, 5%, 10% 이상의 강수 빈도는 93/94 이후로 뚜렷하게 증

Fig. 8. Time series of the number of daily precipitation amount (a) less than 30 mm (dashed line) and 80 mm (solid line), and (b) equal or greater than 120 mm (10 percentile, dashed line), 150 mm (5 percentile, dotted line) and 240 mm (1 percentile, solid line) during the Changma period.

가하였고 특히 상위 1% 이상에 해당하는 극단적인 사례의 빈도가 크게 증가하여 (Fig. 8(b)) 장마기간 호우의 빈도가 강수량 증가에 상당 부분 기여한 것으로 보여진다.

종합하면, 장마기간 강수 환경변화는 93/94 이후 장마전선의 남북 진동 약화로 과거에 비해 장마 전선이 한반도에서 더 체류하였으며 하층 수렴 역의 강화와 저기압성 와도의 증가로 전선상에서의 하층 교란 증가를 유도하였고, 그 결과, 한반도와 주변에서 종관 및 중규모 시스템을 발생 또는 발달시킬 수 있는 환경으로 변화였다. 또한 하층에서 고온 다습한 공기의 유입이 증가하였고 중층에서는 차고 건조한 공기의 유입이 증가하여 대류적으로 불안정해져 한반도에서의 대류활동 강화로 인한 호우의 빈도 증가가 강수량 변동의 원인으로 판단된다.

5. 8월 강수 환경의 변화

5.1. 한반도 주변 환경의 변화

앞의 Fig. 4(c)에서 보인 바와 같이 8월은 장마기간과 달리 후기에 북서태평양 고기압이 서쪽으로 확장하여 기압계의 뚜렷한 공간변동이 있었다. 이러한 환경 변화는 북서태평양 고기압의 가장자리를 따라 평년 보다 많은 양의 수증기를 한반도로 수송하게 되어 (Kim *et al.* 2011) 8월의 강수량이 장마기간과 비교하였을 때도 작지 않은 강수량을 보일 수 있는 가장 큰 원인으로 보여진다.

좀 더 구체적으로 8월의 평균 종관규모 환경 변화를 살펴 보기 위해 전기와 후기의 지위고도장과 바람장의 차이를 조사하였다 (Fig. 9). 500 hPa과 850 hPa 모두 한반도 남쪽에서 뚜렷한 지위고도 상승으로 북서태평양 고기압이 강화되었고 하층에서는 그 가장자리를 따라 한반도로 유입되는 남서류가 강화 되는 것을 볼 수 있다 (Fig. 9(d)). 또한 장마기간과 유사하게 전기에 비해 한반도 북서쪽에서 지위고도장이 상대적으로 크게 증가하였으며, 장마 기간은 한반도 남쪽에서 통계적으로 유의미한 값을 가지지 못한 반면에 8월 평균 종관환경 변화는 중층과 하층 모두 한반도

남쪽에서 95% 신뢰수준에 속하여 그 변화가 더욱 뚜렷하게 나타난다.

이를 바탕으로 1990년대의 8월 강수 환경의 변화를 설명하면, 후기 북서태평양 고기압의 서쪽 확장은 그 가장자리가 한반도와 매우 인접한 남쪽에 위치하여 한반도로 유입되는 남서류를 강화시킬 수 있는 환경으로 변화하였으며 남해와 화북지방에서 발산 역 증가 역시 한반도로의 수증기 유입을 좀 더 증가시키는 원인이 된다 (Fig. 10(a)와 b). 또한 장마 종료 후 북서태평양 고기압이 좀 더 북상하여 한반도 북쪽에서 지위고도 상승역에 의한 북동류와 남서류 사이에서 저기압 순환이 강화되었고 그 결과 중, 하층 모두에서 양의 와도가 증가하여 (Fig. 10(c)) 서해상에서 호우 시스템이 발생 또는 발달할 수 있는 더 좋은 종관 규모 환경으로 변화하였다 (Fig. 10(d)).

한편, 서해상에서 상층 바람장의 남북 성분 강화와 발산 역이 크게 증가한 것으로 나타났다 (not shown). 이는 2차 순환의 강화로 상층 발산역이 위치한 하층에서 상승류를 강화시킬 수 있는 환경이지만 역학적 측면에서 이러한 발산이 상층제트 입구 남쪽에서 발달하여 하층의 상승을 유도한 것인지 시스템의 발달로 인한 상승류의 강화가 상층 발산역을 강화시킨

Fig. 9. Same as Fig. 5, except for August.

Fig. 10. Difference of (a) specific humidity (g kg^{-1}), (b) divergence ($1\text{e-}05 \text{ s}^{-1}$), (c) relative vorticity ($1\text{e-}05 \text{ s}^{-1}$) at 850 hPa and (d) vertical p-velocity (Pa s^{-1}) at 500 hPa between 1994-2008 mean and 1979-1993 mean for August. The shaded areas, bold and dashed lines are same as Fig. 5.

Fig. 11. Time series of the number of daily precipitation amount (a) less than 30 mm (dashed line) and 80 mm (solid line), and (b) equal or greater than 120 mm (10 percentile, solid line), 170 mm (5 percentile, dotted line) and 270 mm (1 percentile, dashed line) for August.

것인가에 대한 판단은 본 연구만으로 내리기는 어렵다.

8월의 호우 빈도 변화를 살펴 볼 필요가 있는데 장마기간과 같이 8월 중 한반도에 발생한 모든 강수 중 30 mm day^{-1} 와 80 mm day^{-1} 이하의 강수량 빈도와 전

체 강수량 중 상위 1% (270 mm day^{-1}), 5% (170 mm day^{-1}), 10% (120 mm day^{-1}) 이상을 기록한 사례에 대해 그 빈도를 시계열로 나타내었다 (Fig 11). 장마기간과 유사하게 작은 강수량의 빈도의 변화에서 뚜렷

한 변화를 볼 수 없지만 93/94 이후 큰 강수량 (5%, 10%)의 빈도가 증가하였으며 장마기간과 같이 상위 1% 사례의 빈도가 증가하여 8월 강수의 강도가 강해진 것을 볼 수 있다. 또한 앞선 8월 강수량의 연별 변동에서 나타났듯이 2000년대부터 5년 이동평균이 감소하는 것을 볼 수 있는데 (Fig. 3(c)), 호우 빈도 역시 2000년대부터 1%, 5%, 10% 모두 90년대에 비해 감소하였고 연 강수량 변동과 유사하게 나타나는 것을 볼 때 8월의 강수량 변동이 호우빈도와 상당부분 관련 있어 보인다.

8월의 강수량 변동은 한반도로 접근하는 태풍의 활동과도 밀접한 관련을 가지게 된다 (이태영과 조남산, 2007). 태풍의 직접효과에 의한 강수 변동을 살펴보기 위해 Regional Specialized Meteorological Center-Tokyo (RSMC-Tokyo) Best track data를 이용하여 8월 중 20~40°N, 120~132°E를 지나는 모든 태풍에 대해 강수를 제거하고 분석을 실시하였다. 해당 영역은 문일주와 최의수 (2011)에 의하면 1951년부터 2009년까지 해당 영역을 지나는 모든 태풍에 대해 조사한 결과 한반도에 영향을 미친 태풍 중 9개의 태풍이 누락되는데 모두 강수와의 관련이 없었다. 태풍의 직접효과에 의한 강수를 제거한 결과, 전체 강수량은 감소하였으나 전기와 후기의 변화 경향은 8월 강수량 변동과 비교하였을 때 뚜렷한 차이가 나타나지 않았다 (not shown). 비슷한 결과로 Kim *et al.* (2011)은 93/94를 기준으로 한반도를 지나는 태풍의 개수의 변화는 크지 않는 것을 보인 바 있다. 한편, 태풍의 간접효과는 한반도를 지나는 기압골과 연결되어 나타나는 것을 고려하여 포함하지 않았다.

5.2. 2000년대 강수량 감소의 원인

2000년대에 10년 평균 강수량은 평년에 비해서는 큰 값을 가지지만 93/94 이후 뚜렷하게 증가를 보이던 8월 강수량이 2000년대 들어서 다소 감소하는데 (Fig. 3(c)), 이러한 변화는 같은 시기 장마기간의 강수량 변동과 상당히 대조적인 모습을 보이므로 그 원인에 대해서 살펴 볼 필요가 있다.

8월 강수량이 감소하기 시작한 2003년부터 2010년까지의 8월 지위고도장, 상대 와도장을 평균하여 나타내었다. Fig. 4(c)와 Fig. 12(a)를 서로 비교해 보면 최근 북서태평양 고기압의 서쪽 확장이 더욱 두드러지게 나타남에 따라 남해 부근에서 지위고도장이 크게 증가 하였으며, 500 hPa의 와도장의 차이 역시 한반도 영역에서 고기압성 와도가 나타나 하강류 형성, 수증기 유입 차단 등 강수 발달이 상대적으로 어려운 환경으로 변화 된 것을 볼 수 있다 (Fig. 12(b)). 이와 비슷한 연구결과로 김재훈과 이태영 (2011)은 장마기간 북서태평양 고기압의 동서 방향 변동이 한반도

Fig. 12. (a) Geopotential height (m) and (b) relative vorticity ($1e-05 \text{ s}^{-1}$) at 500 hPa averaged for August during 2003-2010. The thick solid lines represent 5880 gpm in (a) and zero value in (b), respectively.

에 미치는 영향에 대해 조사한 결과, 북서태평양 고기압의 서쪽 확장이 장마기간 한반도 강수환경에 유리한 조건을 형성하지만 그 확장이 화남 지방까지 영향을 미치는 경우 다우 장마해에 비해 서해상에서 연직으로 전달되는 수증기 양이 감소하는 것을 보인 바 있다. 이는 장마 종료 후 한반도로 좀 더 북상하게 되는 북서태평양 고기압이 동서 방향으로 변동할 때 8월 강수량 변동에 매우 큰 영향을 줄 수 있는 요소임을 시사하고 앞선 Fig. 3(c)에서 나타났듯이 93/94 이후에도 과우해가 과거와 비슷한 크기를 가질 수 있는 원인이 될 수 있음을 나타낸다. 또한 선행연구들에서 대부분 8월 강수의 증가 추세에 대해 언급하고 있지만 최근 북서태평양 고기압이 과거에 비해 상대적으로 강화 및 확장되는 경향을 보이므로 8월 강수의 변

동 추세에 대해서는 경년 변동의 원인이 밝혀진 뒤 충분한 기후학적 검토가 이루어져야 할 것으로 보여진다.

6. 요약 및 결론

본 연구는 한반도 여름철 강수량 변동에 대해 1993년과 1994년을 기점으로 나타난 동아시아 여름철 몬순 순환 변화와 연관하여 기점 전과 후에 나타난 한반도 주변 환경의 변화와 그에 기인된 평균 종관 기상상의 변화를 분석하여 강수량 변동의 원인을 밝히고자 하였다. 또한 계절 내 변동 차이를 고려하여 기후학적인 장마기간 (6월 23일-7월 23일)과 8월을 구분하여 별도의 분석을 수행하였다.

장마기간과 8월의 강수량은 93/94를 기점으로 뚜렷한 증가를 보였으며 모두 후기에 평년보다 많은 강수량을 기록하였다. 하지만 두 기간 (장마와 8월)의 변동 특징은 서로 다르게 나타나는데, 그 예로 장마기간은 전기에 비해 후기에 거의 과우해가 사라진 반면에 8월은 여전히 과우해의 크기가 과거와 비슷하게 나타나 대조적인 모습을 보였다. 또한 장마기간은 북서태평양 고기압의 공간 변동이 크게 나타나지 않는 반면에 8월은 93/94 이후 북서태평양 고기압의 서쪽 확장이 두드러지게 나타남에 따라 같은 시기 남쪽 환경의 변화가 서로 다르게 나타났다. 따라서 한반도 여름철 강수량 변동 분석 시 6-8월 전체를 보기보다는 장마와 8월을 나누어 분석하는 것이 바람직해 보인다.

장마기간 강수량 변동의 원인은 전기와 후기 간의 전선 강도 변화 차이보다는 한반도 북서쪽 지위고도장 상승으로 인한 대륙성 기단 강화가 주요한 것으로 나타났고, 이는 장마전선의 남북 진동 약화를 유도하여 전기에 비해 후기에 장마전선이 한반도에서 좀 더 정체할 수 있게 하였다. 또 전선상에서 하층 교란의 증가와 유입되는 수증기양의 증가가 한반도에서 강수 시스템의 발생 또는 발달에 유리한 환경으로 변화하였으며 한반도 부근에서의 대류 활동을 강화시켰다. 그 결과 한반도에서의 호우 시스템의 빈도와 강도가 증가하였으며 특히 극단적 사례의 빈도가 뚜렷하게 증가하여 강수량 변동에 상당부분 기여한 것으로 나타났다.

8월 강수량의 변동 원인은 종관 환경적인 측면에서 장마기간과 유사하게 나타나지만 북서태평양 고기압이 과거에 비해 뚜렷하게 서쪽으로 확장함에 따라 남쪽 환경 변화가 유의하게 나타났다. 이러한 한반도 남쪽 환경의 변화는 한반도로의 수증기 유입 증가에 결정적인 역할을 하였으며 한반도 북서쪽에서 강화된 대륙 기단과의 사이에서 저기압성 순환을 강화하였다. 그로 인해 서해상에서 저기압성 와도의 증가와 남해와 중국 화중지방에서 강화된 발산 역 사이에서 기압골을 따라 서해상에서 수렴대의 강화로 과거에 비해

호우 시스템이 생성 및 발달 될 수 있는 환경으로 변화하였고, 8월 역시 93/94 이후 강한 호우의 빈도가 증가한 것이 8월 강수량 변동에 상당부분 기여한 것으로 나타났다. 반면 2000년대 중반 이후 북서태평양 고기압은 더욱 서쪽으로 확장함에 따라 한반도에서 하강류 형성과 고기압성 와도를 증대시켜 강수 발달에 오히려 저해되는 것을 보였고 이는 8월 강수량 변동에 매우 중요한 역할을 한 것으로 보여진다.

최근 몇몇 연구들에 의해 국지적으로 발생하는 극단적인 기상현상을 기후변화와 관련하여 그 원인을 규명하려는 시도가 진행되고 있다. 하지만 나타나는 현상과 기후변화가 어떻게 연결되어 있으며 어떤 요소가 어떻게 작용하였는가에 대해 명확하게 밝혀내는 것은 상당한 도전이다. 한반도 역시 최근에 들어 극단적인 기상현상이 빈번하게 발생하는데, 이에 본 연구는 장마기간과 8월에 대해서 강수량 증가시기에 나타난 종관 환경 변화와 그에 기인된 호우 빈도의 변화로 강수량 변동의 원인을 제시하였으며 최근 증가하고 있는 극단적 사례의 빈도가 증가함을 보여 향후 한반도에서 나타나는 극단적인 기상 현상의 원인 규명에 일정 부분 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 기상청 기상기술개발사업 (CATER 2012-6070)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 기상청, 2011: 장마백서. 268 pp.
- 고정웅, 백희정, 권원태, 2005: 한반도 우기의 강수특성과 지역분. *한국기상학회지*, **41**(1), 101-114.
- 김원무, 전종갑, 2010: 1990년대 중반에 나타난 한반도 여름철 강수 구조의 변화. *2010 한국기상학회 가을 학술대회 논문집*, 164-165.
- 김재훈, 이태영, 2011: 북서태평양 고기압의 공간 변동성이 장마에 미치는 영향. *2011 한국기상학회 가을 학술대회 논문집*, 332-333.
- 서경환, 손준혁, 이준이, 2011: 장마의 재조명. *대기*, **21**(1), 109-121.
- 박성규, 하경자, 2002: 장마의 종관 특성과 장마 형태 변화에 관한 고찰. *대기*, **12**(3), 348-351.
- 박창용, 문자연, 차은정, 윤원태, 최영은, 2008: 최근 한반도 여름철 강수특성의 변화. *대한지리학회지*, **43**(3), 324-336.
- 이승호, 권원태, 2004: 한국의 여름철 강수량 변동 -순별 강수량 중심으로-. *대한지리학회지*, **39**(6).

- 이태영, 조남산, 2007: 한반도 8월 강수의 변동성과 특징. 2007 한국기상학회 가을 학술대회 논문집, 488-489.
- Chang, C.-P., Y.-S. Zhang, and T. Li, 2000a: Interannual and interdecadal variations of the East Asia summer monsoon and tropical Pacific SSTs.. Part I: Roles of the subtropical ridge. *J. Climate*, **13**, 4310-4325.
- Chang, H.-J. and W.-T., Kwon, 2007: Spatial variations of summer precipitation trends in South Korea, 1973-2005. *Environ. Res. Lett.*, **2**(2007), 045012(9pp).
- Ding, Y., Z. Wang and Y. Sun, 2008: Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asia summer monsoon. Part I: Observed evidences. *Int. J. Climatol*, **28**, 1139-1161.
- Gong, D.-Y. and C.-H. Ho, 2002: Shift in the summer rainfall over the Yangtze River valley in the late 1970s. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1436, doi:10.1029/2001GL014523.
- Ho, C.-H., J.-Y. Lee, M.-H. Ahn, and H.-S. Lee, 2003: A sudden change in summer rainfall characteristics in Korea during the late 1970s. *Int. J. Climatol*, **23**, 117-128.
- Hu, Z.-Z., 1997: Interdecadal variability of summer climate over East Asia and its association with 500hPa height and global sea surface temperature. *J. Geophys. Res.*, **102**, 19403-19412.
- Huang, R.-H and F.-Y. Sun, 1992: Impacts of the Tropical Western Pacific on the East Asia Summer Monsoon. *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**(1), 243-256.
- Kalnay, E. and Coauthors, 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437-471.
- Kim, W.-M., J.-G. Jhun, K.-J. Ha, and M. Kimoto, 2011: Decadal Changes in Climatological Intraseasonal Fluctuation of Subseasonal Evolution of Summer Precipitation over the Korean Peninsula in the mid-1990s. *Adv. atom. Sci.*, **28**(3), 591-600.
- Kwon, M., J.-G. Jhun, B. Wang, S.-I. An, and J.-S. Kug, 2005: Decadal change in the relationship between east Asian and WNP summer monsoons. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L16709, doi:10.1029/2005GL023026.
- _____ and K.-J. Ha, 2007: Decadal change in east Asian summer monsoon circulation in the mid-1990s. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L21706, doi:10.1029/2007GL31977.
- Lu, R., 2001: Interannual variability of the summer time North Pacific subtropical high and its relation to atmospheric convection over the warm pool. *J. Meteor. Soc. Japan*, **72**, 771-783.
- _____ and B. Dong, 2001: Westward Extension of North Pacific Subtropical High in Summer. *J. Meteor. Soc. Japan*, **79**(6), 1229-1241.
- Ninomiya, K. and T. Akiyama, 1992: Multi-scale features of Baiu. The summer monsoon over Japan and the East Asia. *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**(1), 467-495.
- Park, S.-U., H.-J. Ahn, and Y.-S. Chun, 1998: Evolutionary features of the large-scale circulation over East Asia during the Changma period of 1985. *J. Korean Meteor. Soc.*, **24**(3), 22-43.
- Wu, R., Z. Wen, S. Yang, and Y. Li, 2010: An Interdecadal Change in Southern China Summer Rainfall around 1992/93. *J. Climate*, **23**, 2389-2403.
- Zhou, Y., G. Deng, T. Lei, and J. Ju, 2005: The Thermodynamic and Dynamical Features of Double Front Structures During 21-31 July 1998 in China. *Adv. Atmos. Sci.*, **22**(6), 922-955.