

레짐이동에 따른 우리나라 여름철 강수의 특성변화와 그 원인

문자연* · 박창용** · 최영은***

Changes in the Characteristics of Summer Rainfall Caused by the Regime Shift in the Republic of Korea

Ja-Yeon Moon* · Changyong Park** · Youngeun Choi***

요약 : 본 연구에서는 장기간의 관측 자료를 분석하여 레짐이동에 따른 우리나라 여름철 강수의 특성변화 및 그 원인을 파악하였다. 우리나라 여름철 강수량의 시간적 변동을 분석한 결과, 1998년 이후 강수량의 변동 폭이 크게 증가하였다. 이는 장마 후 기간인 8~9월 강수량의 변동성 증가가 기여한 것으로 보이며, 6~7월의 강수량 역시 점차적인 증가 경향을 보였다. 강수량의 레짐이동에 따른 공간 분포의 변화는 1998년 이후 동아시아 전체에 걸쳐 밴드 형태의 강수량 증가 구역이 나타났으며, 8~9월에는 동아시아 지역 내에서 우리나라가 유일하게 큰 증가를 보였다. 특히 서울 및 경기 지역은 130mm 이상으로 강수량이 가장 크게 증가했다. 이는 우리나라 북쪽과 동쪽에 위치한 고기압성 흐름의 강화로 북쪽의 찬 공기와 남동쪽에서 불어오는 따뜻하고 습윤한 공기가 우리나라에서 수렴하게 되어 강수시스템 발달에 좋은 조건이 되기 때문인 것으로 나타났다. 우리나라 동쪽의 상층까지 발달한 키 큰 순압고기압은 동아시아와 북태평양의 해수면온도 상승에도 기여하여 온난한 공기의 유입이 우리나라 쪽으로 강화되었다.

주요어 : 레짐이동, 여름철 강수, 장마, 장마 후

Abstract : Changes of the characteristics in summer rainfall in the Republic of Korea by the regime shift and their causes were examined by analyzing long-term observational data. There has been an abrupt increase in rainfall variability since 1998, which was mainly due to the enhanced rainfall during August~September, although the gradual increase was also detected in June~July. In June~July, the enhanced rainfall developed as a band type covering the whole East Asia while in August~September, it is only found over the Republic of Korea with the greatest increase of 130 mm over Seoul and Gyeonggi area. The two intensified anticyclonic anomalies over the north-northwest/east of the Republic of Korea resulted in producing northerlies/southeasterlies, transporting cold/warm-wet air flows, respectively. The center of the convergence zone from the two separate systems located in the Republic of Korea, leading to a favorable condition for the development of the extreme rainfall. The enhanced barotropic anticyclonic anomalies also affected in warming the sea surface temperature anomalies covering from the eastern coast of East Asia to North Pacific Ocean, which in turn led to enhance warm air transporting back to the Republic of Korea.

Key Words : regime shift, summer rainfall, changma, post-changma

이 논문은 2008년도 정부재원 (교육과학기술부)으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2008-313-C00941)

* 미국 하와이대학교 국제태평양연구소 방문연구원(Visiting Scientist, International Pacific Research Center, University of Hawaii), mgy1011@gmail.com

** 건국대학교 지리학과 박사과정(Doctoral Student, Department of Geography, Konkuk University), kpotato@konkuk.ac.kr

*** 건국대학교 지리학과 부교수(Associate Professor, Department of Geography, Konkuk University), yechoi@konkuk.ac.kr

1. 연구배경 및 목적

우리나라의 여름철 기후는 동아시아에서 발생하는 몬순에 의해 지배되고 열대 몬순골, 북서태평양 아열대 고기압, 메이유-바이유-장마밴드, 중위도 요란 등으로 구성되며 가깝게는 중위도, 멀게는 적도까지 근거리 및 원거리 상호작용에 의해 직·간접적인 영향을 받는다. 우리나라의 연강수량은 장마, 집중호우, 태풍 등으로 인하여 1년 중 약 40~60%가 여름철에 집중되며 시기별 두 기간으로 나뉘어 7월 중순과 8월 하순에 각각 최대값을 보인다(KMA, 1995; Lee and Kwon, 2004; Cha *et al.*, 2007).

최근 기후변화와 더불어 우리나라의 여름철 강수량은 기온과 함께 증가하는 경향을 보이고 있으며 (Chung and Yoon, 2000), 강수의 시·공간적 특성 및 경향이 점차 달라지고 있어 이와 관련된 현상을 규명하는 연구들이 진행되고 있다(Ha and Park, 2002; Ho *et al.*, 2003; Lee and Kwon, 2004; Ko *et al.*, 2005; Cha *et al.*, 2007; Ha *et al.*, 2007; Park *et al.*, 2008; Ha *et al.*, 2009; Choi *et al.*, 2010). 이 연구들에 따르면 여름철 강수기간 중 두 번째 최대값이 나타나는 8월 하순~9월 초순이 최근 들어 8월 상순~중순으로 앞당겨지면서 점차 8월의 소우기가 사라지고 있다. 또한 장마기간과 장마 후 기간의 분리가 모호해지고 여름 전체기간의 강수량도 증가하고 있다고 밝혔다. 그러나 장마기간과 8월의 강수를 유발하는 강수과정은 다르다. 장마기간에는 우리나라에 위치하는 정체전선에 의해 강수가 발생하고 8월에는 주로 국지적으로 빠르게 발달하는 대류활동에 의한 호우성 강수가 나타난다. 특히 우리나라의 중서부는 최근 들어 장마와 장마 후 기간의 구분이 없어지고 장마 후 기간의 강수량 증가 경향이 가장 크게 나타난 지역이다(Park *et al.*, 2008).

위의 연구들은 통계적인 방법, 자료의 기간, 지역구분, 여름철 강수의 집중시기의 선택 등의 기준 선정에 따라 다르게 선정하여 강수량이 증가한 정확한 시점, 강수량의 변동성 및 변화의 시기에 관한 결과에는 다소 차이를 보여주었다. 우리나라 여름철 강수의 특성변화를 살펴보기 위해서는 강수량의 변화시점을

정확히 파악하여야 한다. 따라서 강수의 레짐이동(regime shift)¹⁾ 시기를 파악하여 그 이전과 이후의 특성을 비교하면 최근의 경향을 파악할 수 있다.

Ho *et al.*(2003)은 1970년대 후반부터 여름철 강수량과 호우성 강수가 증가하는 경향을 보이며 레짐이동이 발생하였다고 밝혔다. 그리고 동아시아에 위치하는 하층 대류권 고기압의 발달로 인해 북쪽으로부터의 차가운 공기가 우리나라 부근의 따뜻하고 습한 공기와 만나 수렴이 발생하여 강수를 유발한다고 주장하였다. Kim *et al.*(2002)은 11년 이동 평균한 강수량 자료를 통해 1980년대 초반에 강수량 증가의 레짐이동이 나타난다고 하였으며 Ha *et al.*(2005)과 Kim and Suh(2008)는 1990년대 중반부터 강수강도가 증가함을 보였다. 이들 중 가장 최근에 Choi *et al.*(2010)은 강수량의 레짐이동에 관한 이전 연구들을 기반으로 1959년부터 2008년까지의 우리나라 12개 지점 자료를 분석한 결과 1998년 이후 갑작스런 강수량의 증가가 나타났음을 밝히고 장마와 장마 후 기간 사이에 강수량 증가폭이 큰 원인은 대부분 우리나라 주변의 북쪽 고기압과 남쪽 저기압 시스템에 의한 습윤공기의 수렴에 의한 것임을 제시하였다.

최근 증가하는 기상이변과 더불어 기후변화에 의한 우리나라 여름철 강수시스템의 시간 및 공간 구조 변화를 정확히 이해하기 위해 본 연구에서는 1979년부터 가장 최근(2010년)까지의 관측자료를 업데이트하여 강수의 레짐이동 시기를 다시 진단하여 이전 연구에서 제시되지 않았던 장마 기간 및 장마 후 기간에 대한 우리나라 상세 지역별 변화를 파악하고 이에 영향을 미치는 동아시아 및 북태평양 지역의 강수, 순환, 바람장의 특성 변화를 분석하고자 한다. 그리고 장마로 인한 강수가 발생하는 6, 7월과 최근 강수량이 증가한 8, 9월에 나타나는 레짐이동 전과 후의 변화된 특성을 바탕으로 최근 강수특성의 변화 원인을 파악하고자 한다.

2. 연구자료 및 방법

본 연구에서는 기상청 61개 기상관측소의 월 강수량

자료를 사용하였고, 연구기간은 1979년부터 2010년까지이다. 여름철은 6월부터 9월까지로 정의하였고, 장마와 장마 후 기간을 6, 7월과 8, 9월로 각각 정의하였다. 중위도 지역 대순환장의 분석은 동일 기간에 대하여 NCEP/NCAR(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research)의 월평균 재분석 상층(500hPa) 및 하층(850hPa) 바람장과 고도장, CMAP(Climatic Prediction Center Merged Analysis of Precipitation)의 강수량 자료를 사용하였다. 자료의 격자 크기는 각각 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 이다. 장기간의 여름철 강수량 시계열 자료를 이용하여 정확한 변화시점을 찾기 위해 변화점 분석(Choi *et al.*, 2010)을 수행하여 99% 신뢰구간에서 유의한 변화 시기를 찾았다. 강수량의 변화가 나타난 시점을 기준으로 이전과 이후의 여름철 전체, 장마기간, 장마 후 기간 강수량의 공간 합성도를 산출하여 평년과 편차분포를 비교하였다. 우리나라 여름철의 기후는 주변지역 뿐만 아니라 원거리 상호관계에 의해서도 상당한 영향을 받기 때문에 우리나라 지역에서부터 점차 분석 영역을 확장하여, 동아시아 지역과 적도를 포함한 북반구 중위도 지역에 대해 각각의 공간적인 변화특성을 분석하였다.

3. 여름철 강수량의 시계열 변화특성

61개 관측지점을 이용하여 1979년부터 2010년까지의 여름철(6~9월), 6~7월, 8~9월 강수량의 시계열 변화를 제시하였다. 우리나라에 해당하는 전구 강수량 자료의 신뢰성을 평가하고자 CMAP 강수량을 함께 제시하였다. 61개 관측지점 평균(실선) 및 우리나라에 대한 격자지점 평균 CMAP(점선)의 여름철 강수량 시계열은 2~5년 주기의 경년 변동을 뚜렷하게 가지며 두 관측 자료가 매우 유사한 변동성을 보여준다(Figure 1(a)). 우리나라 지역을 포함하는 성긴 격자의 평균 강수량(CMAP)을 이용하여도 강수량의 시계열 변화가 비교적 정확하게 표현됨을 알 수 있다.

이 두 관측 자료로부터 나타난 여름철 전체 기간의

가장 뚜렷한 특징은 1979~1997년과 1998~2010년에 나타나는 강수량의 규모 및 변동성의 차이이다. 1998년 이후에는 강수량 변동이 이전 기간에 비해 크게 나타나고 1979~2010년 평균(이후, 기후값)에 비해 다우 또는 소우로 나타나는 해의 강수량의 값이 모두 증가하여 두 기간의 평균 강수량은 1998년 이전은 842mm, 그 이후는 1003mm로 커다란 차이가 있다.

여름철 강수량에 크게 영향을 미치는 장마기간 강수와 장마 후 기간 강수의 시간적 변동을 각각 살펴보기 위해 6~7월(Figure 1(b) 실선)과 8~9월(Figure 1(b) 점선)로 나누어 제시하였다. 여름철 전체 기간에 비해 6~7월 강수량은 증가하는 시기가 뚜렷하지 않지만, 1990년 후반부터 소우인 해의 강수량이 증가하는 경향을 보이고 2000년대에는 강수량의 최다기록을 보인 해가 3회 나타났다. 연구기간 중에 가장 많은 강수량을 기록한 해는 2006년이며 가장 적은 강수량은 1994년에 발생했다.

이에 비해 8~9월 강수량은 1998년 이전과 이후의 강수량의 변화가 뚜렷하게 나타나며 변동성 또한 커지는 것을 볼 수 있다. 즉 여름철 전체 기간에 나타났던 강수량의 갑작스런 증가는 장마 후 기간인 8~9월 강수량의 변화가 크게 영향을 미쳤음을 알 수 있다. 아울러, 1998년 이전과 이후로 비교했을 때 소우인 해의 최저 강수량은 이전 시기와 비교하여 변화가 없는 반면 다우인 해의 최대 강수량은 현저하게 증가하여 변동의 폭이 커졌다. 8~9월 강수량은 1979년 이후 2007년이 가장 많은 강수량을 보였지만 1998, 1999, 2000, 2002, 2010년에도 상당한 양의 강수량이 기록되었다. 반면, 1996년이 가장 적은 강수량이 나타난 해이며 1988, 2001, 2006, 2008, 2009년도 유사한 양으로 적은 강수량을 기록한 해이다. 여름철 강수량의 시계열 변화에서 나타난 특성은 강수량의 증가 경향과 함께 1998년 이후에 갑작스런 증가 폭의 향상이 있었다. 이러한 현상은 8~9월 강수량에 의해 기인한 것으로 보이나 6~7월 강수량에서도 1990년대 후반부터 점차 증가하는 경향은 나타났다.

Figure 1에서 제시된 결과들이 통계적으로 유의성을 확인하기 위해 12개 대표 관측지점의 장기간(1959~2010년) 자료를 이용해 여름철(6~9월) 강수량의 변화

점 분석(change point analysis)을 수행하였다(Figure 2). 강수량의 경년 변동 분포를 통해 알 수 있듯이 12 개 지점 평균 시계열은 Figure 1에서 보여준 61개 관측 지점 평균 시계열을 대표할 수 있는 유사한 변동성을 나타낸다. 변화점 분석에서 제시되는 t 값의 분포는 강수량이 증가할 경우 증가하는 추세, 감소할 경우 감소하는 추세를 나타낸다. Figure 2에서 -2.5 이하로 나타나는 값은 99% 신뢰구간에서 유의한 기간을 의미한다. 따라서 1959년부터 2010년까지의 여름철 강수량(원모양 실선) 분포는 함께 제시된 t 값(실선)에 따라 크게 세 구간으로 나누어 질 수 있다. 즉, -2.5 또는 그 이하의 최저값을 기록한 1977/78년과 1997/98년을 기점으로 1959~1977년, 1978~1997년, 1998~2010년으로 각각의 레짐이동이 나타나는데 이 중 1998년이 99% 신뢰구간에서 뚜렷한 변화시점으로 나타났다.

위의 결과는 Choi *et al.*(2010)의 연구와 일치하며,

Kwon *et al.*(2005, 2007)이 1990년대 중반에 동아시아 지역 여름철 강수량의 기후이동이 발생하였음을 보여준 결과와도 유사하다. Kwon *et al.*(2005, 2007)의 연구는 중국남동부를 중심으로 강수량의 변화를 분석하였기 때문에 이 연구에서 나타난 레짐이동의 시기와 차이가 있을 수 있다. Figure 1과 2로부터 1998년은 강수량의 레짐이동이 발생한 시기로 정의할 수 있음을 확인했으며 이 시기를 중심으로 우리나라 및 주변 지역에 발생하는 상, 하층 순환장의 변화와 여름철 강수량 특성의 변화요인을 다음 장에서 제시한다.

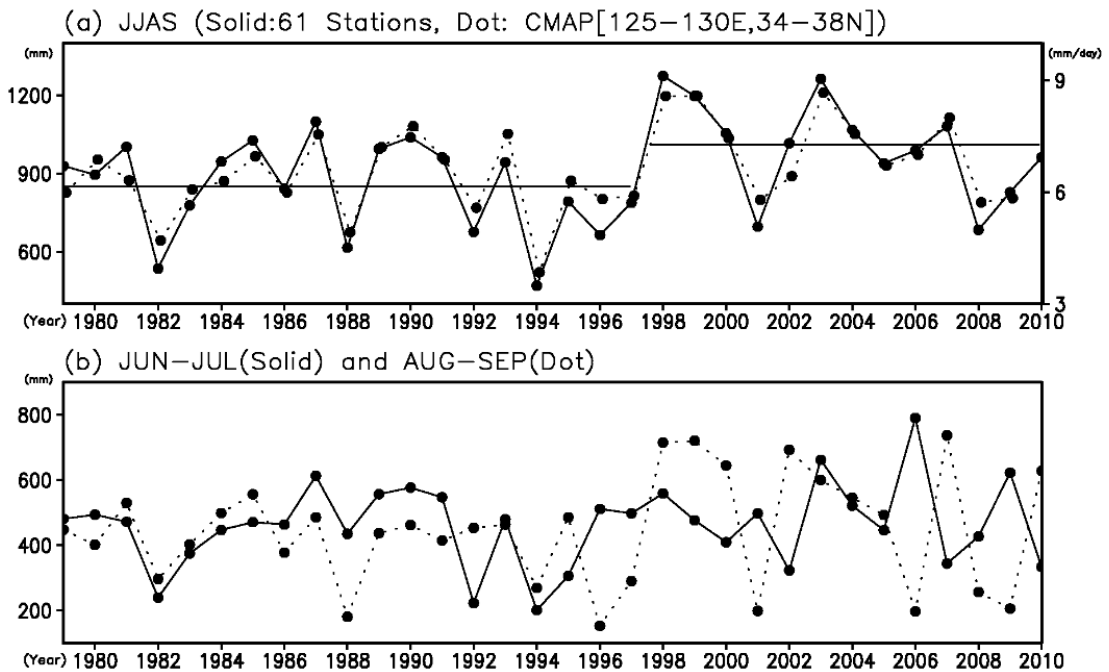


Figure 1. Time series of total rainfall (mm) averaged over 61 stations in the Republic of Korea (solid) and area-averaged [125°-130°E, 34°-38°N] CMAP(dotted) during (a) June~September (JJAS), (b) June~July (solid) and August~September (dot). 우리나라 61개 지점 평균(실선) 및 지역평균 CMAP 강수량(점선)(mm)의 시계열 변화 (a) 여름철 6~9월, (b) 6~7월(실선), 8~9월(점선)

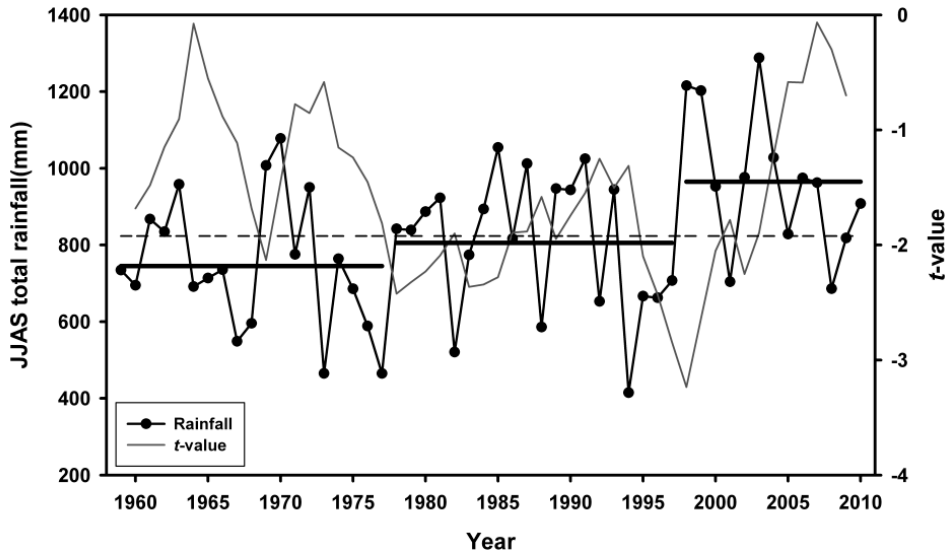


Figure 2. Interannual variation (solid line with a circle) of total rainfall in 12 weather observation stations in the Republic of Korea during the summer (June-September). Thick solid (circle), dashed, and solid lines indicate period average, 52-year average, and t value of change-point analysis. 52년(1959~2010)간의 우리나라 12개 지점 평균 6~9월 총 강수량의 시계열분포(굵은 실선(원)). 실선은 기간별 평균, 점선은 52년 평균을 나타냄. 변화점 분석의 t 값은 얇은 실선으로 나타냄

4. 레짐이동에 따른 여름철 강수량의 변화

1) 우리나라

1998년을 기준으로 여름철(6~9월), 6~7월, 8~9월 강수량의 변화를 살펴보기 위해 기후값 및 기후값으로부터의 1979~1997년과 1998~2010년 평균 편차의 공간 분포를 Figure 3에 제시하였다. 편차의 공간 분포에서 실선은 양의 값을, 점선은 음의 값을 나타낸다. 여름철 강수량의 공간 분포(Figure 3(a))는 대관령, 남해·거제를 포함한 남해안, 서울·경기·강원 지역이 많은 강수량을, 충청남·북도와 경상북도 지방이 상대적으로 적은 강수량을 보인다. 6~7월은(Figure 3(d)) 동서방향으로 위치하는 장마전선의 남북이동에 따라 남해안과 중부지역이 가장 많은 강수량 분포를, 서쪽 내륙 지역이 동쪽보다 많은 강수량 분포를 나타낸다. 8~9월은(Figure 3(g)) 남해안 일부와 영동지방이 현저

하게 많은 강수량을 보여주며 서울도 비교적 많은 양의 강수가 나타난다. 이처럼 6~7월과 8~9월의 평균 강수량 공간 분포는 강수량이 많은 지역이 두 시기 모두 서울·경기·강원 지역과 남부지역으로 유사하지만 8~9월은 공간적 규모가 더 작게 나타나는 특징이 있고 6~7월은 지형적인 영향과 함께 동서방향으로 확장되어 나타난다.

1998년 전·후에 대한 여름철 강수의 변화를 살펴보면 강수량의 차이가 현저하고 강수량의 증가 및 감소 지역이 뚜렷한 대칭의 구조를 보인다. 즉 1998년 이전의 기간은 모든 시기에 걸쳐 평년에 비해 강수량이 감소하는 추세를 나타내고, 이후의 기간은 모든 지역에서 증가한다. 이때 감소 및 증가 지역은 1998년을 기준으로 반대의 부호를 가지면서 6~7월 및 8~9월 모두 같은 패턴을 보인다. 6~7월에는 1998년 이전에 수원, 서산, 홍천, 속초, 강릉, 산청, 순천, 남해, 통영, 거제, 완도 등을 중심으로 가장 큰 폭의 감소(Figure 3(e))가, 1998년 이후에 증가가 나타난다(Figure 3(f)). 즉 경기

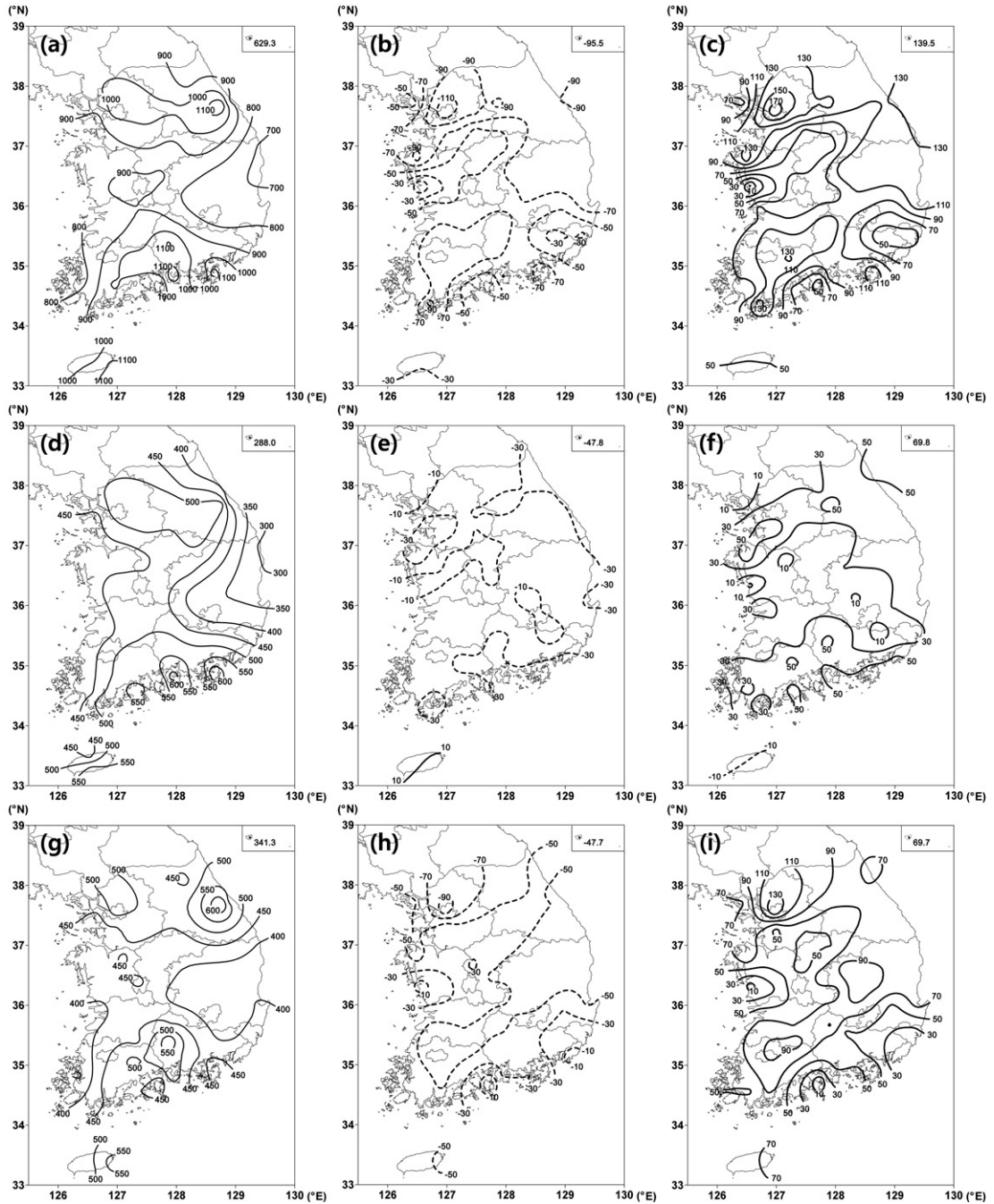


Figure 3. Spatial distributions of precipitation climatology (1979~2010) over 61 station during (a) June~September (JJAS), (d) June~July, (g) August~September. Deviations of 1979~1997 and 1998~2010 mean from the climatology during (b) and (c) for June~September, (e) and (f) for June~July, and (h) and (i) for August~September, respectively. Solid and dotted line show positive and negative values, respectively.

1979~2010년 평균 우리나라 여름철(a), 6~7월(d), 8~9월(g), 이로부터의 1979~1997 평균 편차 (b), (e), (h) 및 1998~2010년 평균 편차 분포도 (c), (f), (i). 실선은 양의 값, 점선은 음의 값을 나타냄

및 강원 영서 지역, 동해안과 남해안을 따라 강수량의 변화가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 반면 8~9월에는 서울, 춘천, 문경, 의성, 구미, 남원, 광주 등을 중심으로 가장 큰 폭의 변화가 나타난다. 즉, 서울, 경기도, 강원도, 경상북도, 전라남·북도에 걸쳐 강수량의 감소 및 증가가 1998년 이전 및 이후로 각각 발생한다. 6~7월에 큰 폭으로 변화가 발생했던 남해안 지역은 8~9월에는 상대적으로 작은 변화를 보였고 충청남·북도 지역도 그 변화폭이 적다. 이들 중 가장 큰 폭으로 증가 및 감소한 지역은 서울 및 경기 일원으로 1998년 이후 8~9월 평균 강수량이 평년에 비해 130mm 이상 증가했다.

2) 동아시아

우리나라에 나타난 여름철 강수량의 변화가 국지적 현상인지 더 넓은 규모와 관련된 특성인지 파악하고자 동아시아 지역에 대해 1998년 이전과 이후 하층 바람장/고도장 및 강수량 그리고 상층(500hPa) 고도장 및 해수면온도의 분포를 각각 Figure 4와 5에 제시하였다. Figure 4는 하층(850hPa) 바람장(벡터)과 고도장(선), 강수량(색)에 대한 것으로 여름철 전체, 6~7월, 8~9월로 구분하고 1998년 이전과 이후에 대해 기후값으로부터의 편차를 나타내었다. 우리나라의 분포(Figure 3)에서 나타난 것과 유사하게 더 넓은 영역으로 확장하여도 1998년 이전(Figure 4(a))과 이후(Figure 4(b))의 분포는 -0.9 이상의 상관성을 가지는 분포를 보이며 같은 패턴에 반대의 부호를 보여준다. 즉 1998년을 기준으로 나타나는 수십 년 변동이 우리나라에만 국한된 현상이 아니라 중국 남동부, 동지나해 일부에서도 강수량이 1998년 이후 증가하고 있다.

우리나라 북쪽인 중국 북동부 지역에 고기압성 순환의 중심이 위치하며 남서쪽에 저기압성 순환이 나타난다(Figure 4(a)). 그리고 일본 동쪽으로 고기압성 순환이 강해져 우리나라를 중심으로 하층바람의 수렴이 발생하고 있다(Figure 4(b)). 1998년 이전에는 1998년 이후와 반대의 패턴을 나타내 우리나라가 발산지역의 중심에 위치하고 있다. 우리나라 여름철은 남서 또는 남동쪽에서 불어오는 따뜻하고 습윤한 바람에 의해 강수

가 발달하는데 1998년 이전은 이러한 남쪽으로부터의 바람이 약하고 북서쪽으로부터의 바람편차가 강하다. 1998년 이후는 우리나라 북동쪽으로부터의 차가운 바람과 남서 및 남동쪽으로부터의 따뜻하고 습윤한 바람이 강화되어 강수가 발생할 확률이 높아지게 된다.

6~7월의 경우를 살펴보면 강수량의 증가 및 감소 지역이 우리나라를 포함하여 동서방향의 밴드 형태로 중국 남동부에서부터 동지나해, 일본 남쪽 해안까지 나타난다. 1998년 이후 우리나라 북서쪽에 고기압성 순환의 중심이 위치하며 남쪽의 저기압성 순환은 여름철 분포에서보다 북쪽으로 약간 이동해 있다. 그리고 일본 북동부 지역에 저기압성 순환의 중심역이 나타나고 그 남쪽으로 고기압성 순환이 나타난다. 따라서 우리나라를 중심으로 네 개의 편차중심이 위치하여 우리나라 남쪽과 일본 남부에 수렴역을 형성시키게 된다. 따라서 북쪽으로부터의 찬공기와 남쪽의 따뜻한 공기가 만나는 지역을 중심으로 강수량의 증가 지역이 발생한다.

8~9월에는 1998년 이후 강수량의 증가가 두 지역으로 분리되어 한반도 전체와 중국 남동부 일부지역에 나타나지만 우리나라에서 그 증가가 가장 뚜렷하게 나타난다는 것이 주목할 점이다. 6~7월에 비해 우리나라 인근 북쪽으로 강한 고기압성 순환이 발달하고 이는 일본 전체를 포함해 훨씬 동쪽까지 그 세력이 확장된다. 그 아래 남쪽으로 저기압성 순환이 동서로 길게 뻗어 위의 고기압성 순환과 나란히 동아시아 및 북태평양에 걸쳐 발달하는 것을 볼 수 있다. 우리나라가 이 두 시스템이 만나는 경계 지역에 위치하며 강한 남동풍과 북동풍의 영향을 받게 되고 강력하게 발달한 고기압의 영향으로 고온다습한 여름이 되고, 이러한 때에 남쪽의 습한 공기는 순간적으로 발달하는 대류시스템을 생성할 수 있다.

우리나라 여름철 기후에 큰 영향을 미치는 북태평양 고기압의 변화 및 주변 순환장의 변화를 보기 위해 1998년 이전과 이후 500hPa 고도 편차장(얇은 선)의 분포를 Figure 5에 제시하였다. 북태평양 고기압의 형태를 알려주는 5880gpm 값을 기후값(굵은 점선), 1998년 이전 및 이후(굵은 실선) 평균으로 구분하여 나타내었고 해수면온도의 변화를 함께 파악하기 위해

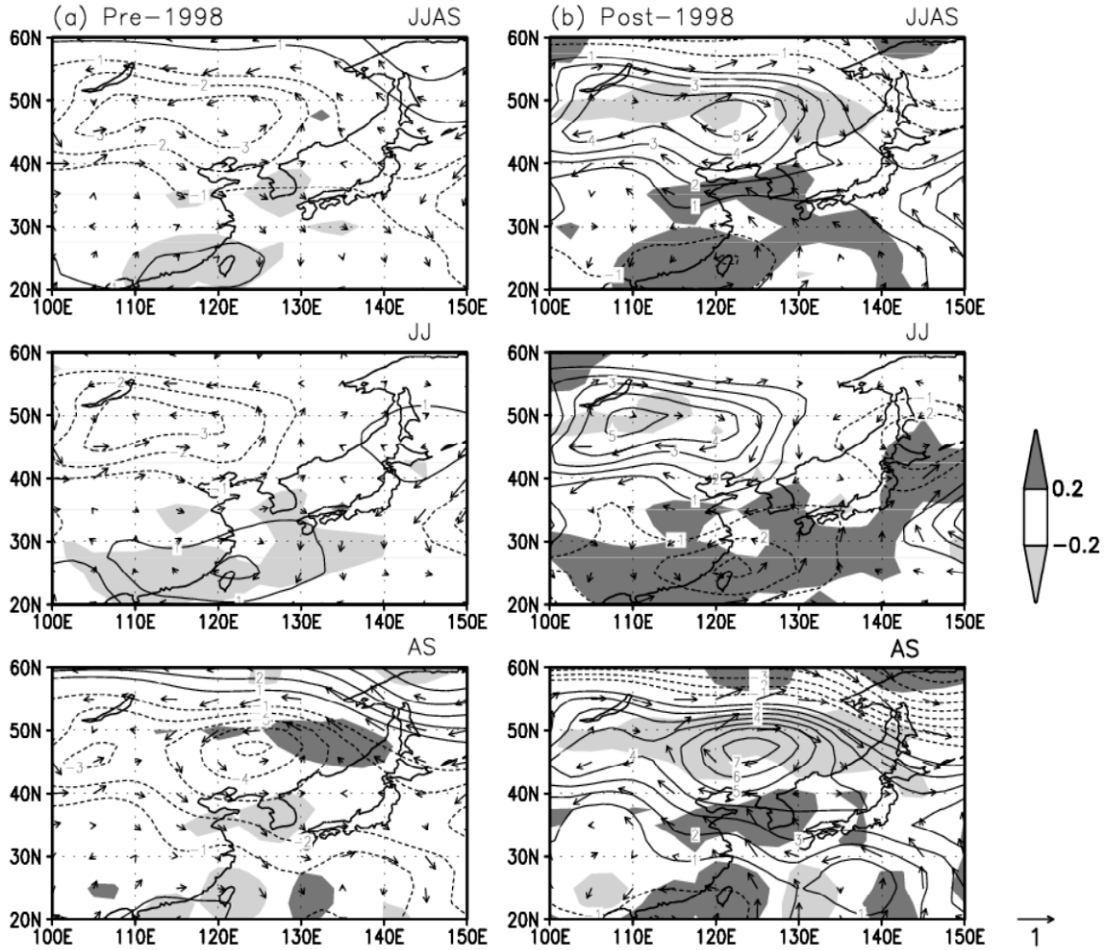


Figure 4. Spatial distributions of precipitation (shading), geopotential height (contour) and wind (vector) at 850hPa level for (a) pre-1998 and (b) post-1998 during June~September (JJAS), June~July (JJ), August~September (AS). The anomalies indicate the deviation from climatology (1979~2010), respectively.

우리나라 주변 지역의 강수량(음영), 850 hPa 고도장(선), 바람장(벡터)의 1998년 이전(a)과 이후(b) 여름철, 6~7월, 8~9월의 편차에 대한 공간 분포. 편차는 기후값과의 차이를 나타냄

음영으로 표시하였다.

1998년 이전과 이후의 여름철 고도장의 편차는 뚜렷한 대비를 이루며 40°N~50°N 위도 대에 최대 및 최소 값이 위치하고 동서로 길게 뻗은 형태로 중위도 아시아 및 북태평양 영역에 나타난다. 1998년 이후에 우리나라 북쪽에 고기압성 순환의 중심과 일본 동쪽 북태평양 지역에 또 다른 고기압성 순환의 중심이 위치하여 우리나라 주변은 강화된 고기압성 순환의 영향을 받게 되며 1998년 이전은 이와 반대로 저기압성 순환

의 영향이 강하다. 북태평양 고기압의 규모 변화를 살펴보면 평년에 비해 1998년 이전은 축소되고 남쪽에 위치하지만, 1998년 이후는 보다 넓게 확장하고 북서쪽으로 이동하여 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 1998년 이후는 북서쪽으로 이동한 북태평양 고기압이 평년에 비해 남동 및 남서쪽에서 유입되는 바람의 방향을 전향시키는 역할을 하여 우리나라로 직접 불어가는 바람이 강해지게 된다.

6~7월도 여름철 전체의 분포와 유사한 경향을 보여

주는데 평년에 비해 1998년 이후는 북태평양 고기압이 동서로 확장되고 이전은 축소되며 서쪽 끝 경계부분은 약간 더 서쪽에 위치하는 것을 알 수 있다. 남북으로의 영역은 1998년 이전은 남쪽으로, 1998년 이후는 북쪽으로 치우쳐져 있어 동아시아 대륙이 북태평양에 의해 받는 영향이 보다 가까워 질 수 있음을 나타낸다.

8~9월은 1998년 이후 우리나라 북쪽에 위치하던 고기압 중심이 보다 우리나라 쪽으로 가깝게 위치하여 강화된 고기압성 순환의 세력에 영향을 받고 일본 동쪽의 고기압성 순환도 더 강해진다. 북태평양 고기압

의 위치 변화도 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서, 평년에 비해 규모의 변화가 동서남북으로 모두 넓어져 우리나라 쪽인 고기압의 북서쪽이 아주 크게 확장한다. 고기압의 서쪽 경계를 따라 들어오는 남동풍은 우리나라와 일본 남부로 직접 불어오게 되어 상층으로부터 유입되는 차가운 공기와의 경계가 우리나라에서 발생하게 된다. 중위도에 있어서의 해수면온도는 상층 대기의 순환장의 상태를 제시해주는데 상층 고기압의 세력이 강하면 하층의 대기온도와 해수면온도가 상승하게 된다. 1998년 이전과 이후의 우리나라

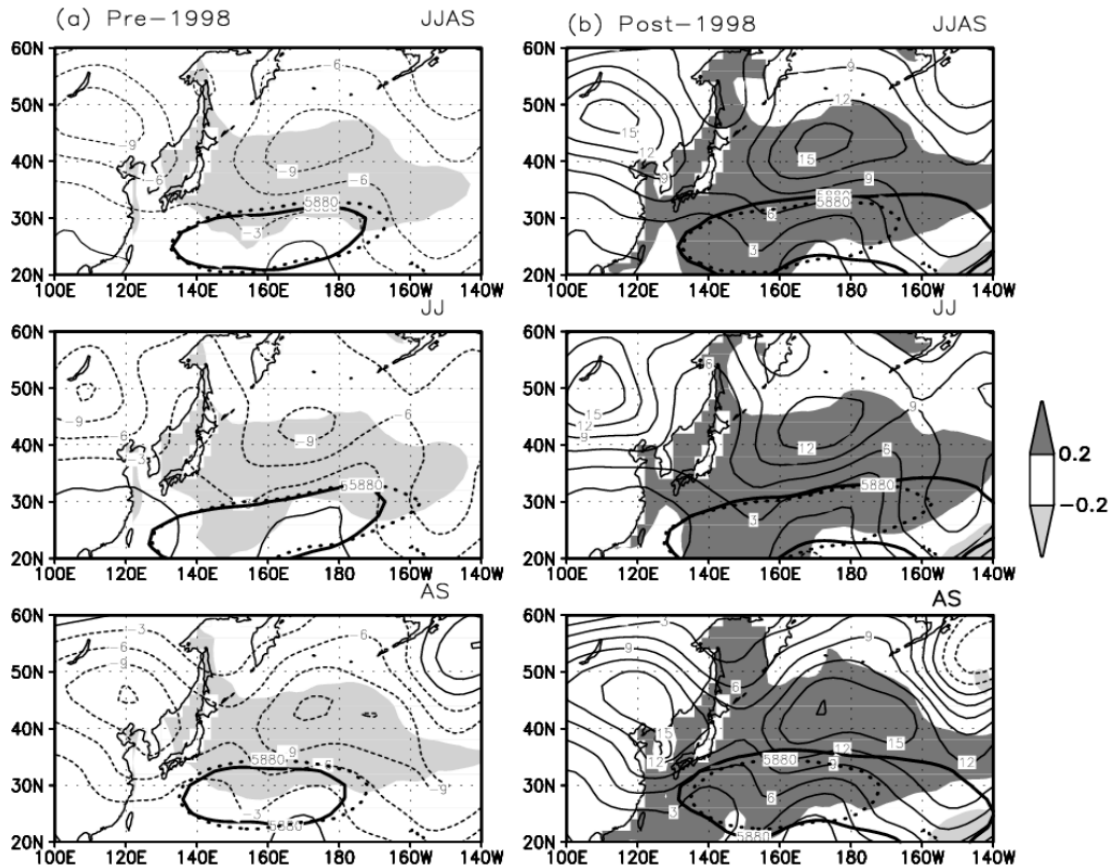


Figure 5. Spatial distributions of 500hPa geopotential height anomalies (thin contour) and mean at the value of 5880gpm (thick contour) for (a) pre-1998 and (b) post-1998 during June~September (JJAS), June~July (JJ), and August~September (AS). The anomalies indicate the deviation from climatology (1979~2010), respectively. 우리나라 주변 지역에 대한 500hPa 고도장(얇은 선) 및 해수면온도(음영)의 1998년 이전(a)과 이후(b) 여름철, 6~7월, 그리고 8~9월의 편차에 대한 공간 분포. 편차는 기후값으로부터의 차이를 나타냄. 굵은 실선은 1998년 이전과 이후(실선) 기간 평균, 굵은 점선은 기후값으로 5880gpm 값만을 나타냄

주변 해역의 해수면온도의 분포를 비교하면 이러한 특성을 확인할 수 있다. 1998년 이전은 우리나라 동쪽해안으로부터 북태평양까지 중위도 해수면온도가 평년에 비해 하강하지만 1998년 이후는 이와는 반대로 상승한다. 그리고 상승한 지역이 남북으로 보다 확장하여 발생한다. 순환장의 변화에 따라 상승한 해수면온도는 주변 지역으로 유입되는 공기의 온도 및 수증기량을 증가시키는 역할을 하게 된다. 따라서 보다 높은 온도 및 수증기량을 가지고 발생하는 강수의 강도는 더 세질 가능성이 있다.

3) 적도-북반구 중위도

적도에서 유입되는 온난습윤한 공기는 여름철 남동 및 북동 아시아 몬순의 강도를 조절한다. 이러한 영향의 변화를 알아보기 위해 1998년 이전과 이후 6~7월 및 8~9월의 대규모 강수량과 하층 바람의 차이를 Figure 6에 제시하였다. 양의 지역(짙은 회색)은 1998년 이후 강수량이 더 많아지고 음의 지역(연한 회색)은 1998년 이전이 더 많은 강수량이 발생하는 것을 의미한다.

1998년 이전과 이후의 6~7월 강수량의 변화는 위도별로 그 차이가 나타남을 알 수 있다. 1998년 이전은 북반구 적도-아열대 밴드 형태로 인도양에서부터 태평양까지 전 지역에 걸쳐 강수량이 이후에 비해 많았다. 그리고 적도 중태평양 및 동태평양에 많은 강수량이 나타나며 남반구 인도양과 북태평양에서도 지역적으로 나타난다. 반면 적도를 중심으로 아라비아 해, 수마트라 반도, 인도네시아에서 서태평양까지, 중위도 아시아대륙에서부터 동아시아 북동쪽까지는 1998년 이후에 강수량이 증가한다. 특히 아시아 대륙 및 북태평양으로 이어진 지역은 6~7월 중위도 강수밴드가 위치하는 지역과 일치하여 우리나라뿐만 아니라 동아시아 여름철 몬순이 일본 남부 지역을 제외하고 1998년 이후 함께 증가하는 것을 보여준다.

하층 바람장의 분포를 살펴보면 적도 태평양 전체 지역에 1998년 이후 동풍이 강화되며 이는 인도양까지 이어져 남서풍으로 인해 발생하는 인도 및 남아시아 지역의 몬순이 약화되는 경향을 보여주고 있다. 일본

동쪽 북태평양에 고기압성 순환이 강화되어 남쪽으로 부터의 습한 공기의 영향을 받게 되는 고기압의 서쪽 지역은 강수량이 증가하고 동쪽 지역은 감소한다. 8~9월은 6~7월에 비해 1998년 이후 강수량이 증가하는 지역이 감소하고 보다 지역적인 규모로 발생한다. 특이한 점은 북반구에서 우리나라를 중심으로 매우 큰 강수량의 증가가 있다는 것이며 동아시아 지역에서도 일본이나 중국 남동쪽 해안 지역을 제외하고 중국 대부분 지역은 강수량의 변화가 현저하게 나타나지 않고 있다는 것이다. 남아시아 지역 중 인도 동쪽 지역부터 해안 부근, 동지나해, 필리핀과 인도네시아에는 1998년 이후 강수량의 증가가 나타난다. 1998년 이전은 인도양과 태평양의 적도 및 아열대 바다에서 강수량이 증가하며 우리나라 북쪽으로 중위도 지역에서도 증가 지역이 나타난다.

하층 바람의 순환 분포는 8~9월 북태평양에 위치하던 고기압성 순환이 보다 넓은 지역으로 1998년 이후 강해지며 한반도 북쪽에 강해진 고기압성 순환으로부터 내려오는 북쪽 찬 공기와 북태평양의 습하고 따뜻한 공기가 만나는 경계지역이 우리나라에서 발생함을 알 수 있다. 6~7월과 8~9월에 나타난 강수량 및 순환장의 공간 특성 중 또 다른 한 가지는 6~7월의 경우는 차이의 분포가 남북 방향으로 위치해 있는 반면 8~9월에는 동서 방향으로 차이가 나타난다는 것이다.

동아시아 여름몬순은 적도로부터 불어오는 남서류에 의해 남아시아 여름몬순에 이어 북으로의 갑작스런 이동에 따라 밴드 형태로 발생하게 된다. 시간에 따른 강수량의 이동모습이 어떠한 변화특성을 나타내는지 알아보기 위해 동아시아 지역 경도평균 강수량의 연주기 분포(시간(월)-위도 단면도)를 1998년 이전과 이후의 차이로 Figure 7에 나타내었다. 양의 지역은 1998년 이후 강수량이 증가하는 것이고 음의 지역은 반대로 1998년 이전에 증가하는 경우이다. 평균적으로 동아시아 지역에는 4월 말부터 적은 양의 강수가 시작되어 시간에 따라 점점 증가하며 6월에 많은 강수량이 있고, 7월에 가장 높은 위도까지 북상하였다가 서서히 남하하는 과정을 거친다. 이러한 연 주기가 1998년 이전의 경우 1월부터 5월까지 동아시아 남쪽 아열대 지역이 평년에 비해 건조하고 6월부터 9월까지 습윤하게

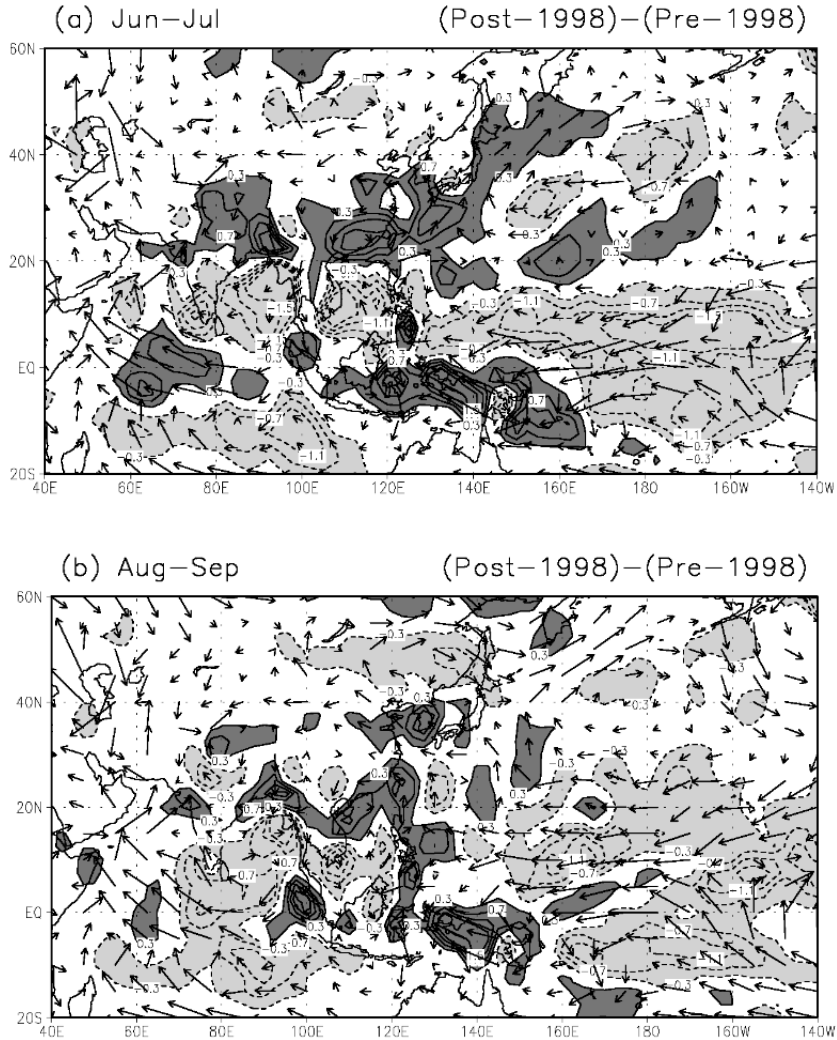


Figure 6. Precipitation (shading) and 850hPa wind (vector) difference between post-1998 and pre-1998 for (a) June~July and (b) August~September. (a) 6~7월 및 (b) 8~9월 1998~2010년과 1979~1997년 사이의 강수량(음영) 및 바람(벡터)의 편차 분포

나타나는 것을 알 수 있다. 반면 중위도 지역은 건조한 상태를 보이며 10월부터 12월까지 평년보다 건조한 경향이 유지된다. 1998년 이후는 이와는 반대 경향으로 4~5월 인도 및 동남아시아에서 시작한 강수밴드가 모두 강화되고 6월에 발생하는 갑작스런 점프 및 동아시아의 장마 밴드가 모두 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 중위도 지역의 강수량의 증가는 9월까지 지속된다. 반면 6월부터 9월까지 동아시아 남쪽의 아열대 지

역은 강수량이 현저하게 감소한다. 이로부터 평년 강수량의 기후학적인 분포에 상대적으로 1998년 이전의 경우 여름철 전체 기간에 대해 강수밴드가 남쪽에, 1998년 이후에는 북쪽으로 이동 및 강화되는 것을 알 수 있다.

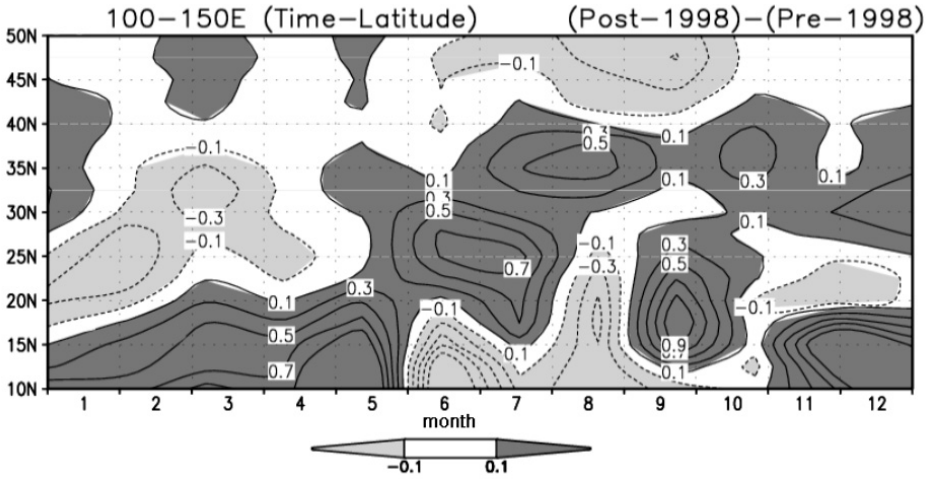


Figure 7. Longitudinal (100°E-150°E) mean time-latitude cross section of precipitation difference between pre-1998 and post-1998 from January to December. 1998년 이전과 이후 강수량의 차이에 대한 경도 평균 (100°E-150°E) 시간(월)-위도 단면도

5. 결론

본 연구는 우리나라 여름철 강수의 레짐이동에 따른 시간 및 공간적 특성의 변화 및 그 요인을 분석하였다. 이를 위해 1979년부터 2010년까지의 기상청 61개 기상관측지점 월평균 강수량 및 NCEP/NCAR 재분석 월평균 자료, CMAP 월평균 강수량 자료를 이용하였다. 여름철 전체기간은 6~9월로 정의하고 장마기간 및 장마 후 기간 강수시스템의 구조 변화를 각각 알아보기 위해 여름철을 6~7월과 8~9월로 구분하였다.

우리나라의 61개 관측지점과 CMAP 격자 평균자료에 나타난 여름철 강수량 시계열은 2~5년 주기의 경년 변동이 뚜렷하며 두 관측 자료가 매우 유사한 변동성을 보여주었다. 또한 시간에 따른 강수량의 증가 경향이 나타났으며 1998년을 기점으로 갑작스런 변동성의 증가를 나타냈다. 이러한 경향은 8~9월 강수량이 크게 기여한 것으로 보이며 6~7월의 강수량 역시 1990년대 후반부터 점차 증가하는 경향을 보였다. 이 결과는 우리나라의 장기간 (1959~2010년) 여름철 12개 관측지점 강수량을 이용한 변화점 분석을 통해 99% 신뢰구간에서 유의함을 확인하였고 우리나라 여름철 강수량은

1998년에 가장 뚜렷한 변화시점이 나타남을 검증했다.

1998년을 기점으로 전과 후 기간에 대한 여름철 강수의 공간 특성 변화를 분석한 결과, 1998년 이후 6~7월에는 경기도 및 강원도 영서지역, 동해안, 남해안을 중심으로 강수량의 큰 증가가 나타났고 8~9월에는 서울, 경기도, 강원도, 경상북도, 전라남·북도를 중심으로 가장 큰 폭의 강수량 증가가 나타났다. 6~7월에 증가했던 남해안 지역은 8~9월에는 상대적으로 적은 변화를 보였고 충청도 지역도 그 변화 폭이 적었다. 가장 큰 폭으로 증가한 지역은 서울 및 경기도 지역으로, 특히 1998년 이후 8~9월 평균 강수량이 평년에 비해 130mm 이상이 증가했다. 이러한 최근 강수량의 증가는 우리나라에만 국한된 현상이 아닌 것으로 나타났다. 6~7월의 경우 강수량의 증가 및 감소 지역이 우리나라를 포함하여 동서 밴드 형식으로 중국남동부에서부터 동지나해, 일본 남쪽 해안까지 나타났고 8~9월에는 두 지역으로 분리되어 한반도 전체와 중국 남동부 일부지역에 강수량의 증가가 발생했는데 동아시아 전체에서 특히 우리나라의 증가 폭이 가장 컸다. 우리나라를 포함한 중위도 지역의 강수량은 최근 증가한 반면 북반구 적도 및 아열대 지역의 인도양에서부터 태평양까지의 강수량은 현저하게 감소했다. 6~7월에는

북반구 강수량의 증가 및 감소의 변화 구조가 남북으로 배치되어 있었고 8~9월에는 동서 방향으로 나타났다.

이러한 레짐이동에 따른 최근 강수량의 증가는 주변 순환장의 변화로 설명되었다. 1998년 이후 우리나라 주변 지역의 순환장에 나타난 가장 뚜렷한 구조 변화는 우리나라 북-북서쪽에 발달한 고기압성 순환과 동아시아 동쪽 북태평양에서 발달한 고기압성 순환의 강화이다. 이는 하층에서부터 상층까지 순압구조를 보이며 깊은 고기압 구조를 가져 우리나라를 경계로 평년보다 훨씬 강한 북으로부터의 찬 기류와 남동쪽으로부터의 따뜻하고 습한 기류가 수렴하는 결과를 유도했다. 중위도의 해수면온도는 상층 대기의 순환장의 상태를 제시해주는데 우리나라 주변에 강화된 순압 고기압의 세력에 의해 동아시아 해안부터 북태평양까지 해수면온도 역시 상승하였다. 여름철 북태평양에 발달하는 아열대 고기압은 8~9월 가장 큰 변화를 보였다. 북태평양 고기압의 규모는 1998년 이후 평년에 비해 동서 및 남북으로 아주 큰 확장을 보였으며 북서쪽으로 이동해 있었다. 이로 인해 여름철 남서기류가 고기압에 의해 남풍으로 방향이 바뀌며 평년에 비해 더 서쪽과 우리나라 바로 아래에서 전향하여 남동기류와 함께 습하고 더운 바람이 우리나라에 직접적으로 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

동아시아 지역에 대한 위도-시간별 강수량의 연주기 분포 변화특성을 통해 여름뿐만 아니라 연 전체에 대한 강수량의 변화 경향을 살펴본 결과, 1998년 이후 4~5월 인도 및 동남아시아에서 시작한 강수밴드가 강화되고 6월에 발생하는 갑작스런 점프 및 동아시아의 강수 밴드가 모두 북쪽으로 이동하는 것을 알 수 있었다. 그리고 중위도 지역의 강수량의 증가는 9~10월까지 지속되며 6월부터 9월까지 동아시아 남쪽의 아열대 지역 강수량은 현저하게 감소했다. 이로부터 강수량의 기후학적인 분포에 상대적으로 1998년 이전의 경우 여름철 전체 기간에 대해 강수밴드가 남쪽에 1998년 이후에는 북쪽으로 이동 및 강화되는 것을 알 수 있었다.

본 연구는 1998년을 기점으로 여름철 강수의 변동폭이 증가하며 지역 규모의 대류성 호우 형태가 잦은 장마 후 기간(8~9월)에 그러한 경향이 크게 나타남을

보여주었다. 이는 동아시아 주변의 순환장의 변화가 중요한 요인으로 작용하여 1998년 이후 우리나라 동쪽 북태평양 해역의 온도 증가 및 고기압성 순환의 강화로 인해 높은 온도의 수증기가 우리나라로 직접 유입되었다. 높은 온도와 많은 양의 수증기는 차가운 공기와 수렴에 의해 호우성 강수를 유발할 수 있어 여름철 강수강도의 증가에 기인하게 된다. 향후, 이러한 순환장의 변화가 기후변동의 주된 모드들과 어떠한 상호작용을 하고 있는지 분석할 예정이며 우리나라 지역에 대한 보다 상세한 강수 특성의 변화가 추가적으로 연구될 것이다.

주

- 1) 안정된 상태의 시스템이 갑작스런 변화로 인해 새로운 시스템으로 변화/구성되는 현상

참고문헌

- Cha, E. J., Kimoto, M., Lee, E. J., and Jhun, J. G., 2007, The recent increase in the heavy rainfall Events in August over the Korean Peninsula, *Journal of Korean Earth Science Society*, 28(5), 585-597.
- Chung, Y. S. and Yoon, M. B., 2000, Interpretation of recent temperature and precipitation trends observed in Korea, *Theoretical Applied Climatology*, 67, 171-180.
- Choi, K. S., Moon, J. Y., Kim, D. W., Byun, H. R., and Kripalani, R. H., 2010, The significant increase of summer rainfall occurring in Korea from 1998, *Theoretical Applied Climatology*, Doi: 10.1007/s00704-010-0256-0.
- Ha, K. J. and Park, S. K., 2002, Synoptic characteristics of Changma, *Atmosphere*, 12(1), 362-364 (in Korean).
- Ha, K. J., Park, S. K., and Kim, K. Y., 2005, On interannual characteristics of climate prediction center merged analysis precipitation over the

- Korean Peninsula during the summer monsoon season, *International Journal of Climatology*, 25, 99-116.
- Ha, K. J., Yun, K. S., and Lee, S. S., 2007, August mode in precipitation and its association with circulations, *Proceedings of the Autumn Meeting of KMS 2007*, 478-479.
- Ha, K. J., Jhun, K. S., Jhun, J. G., and Li, J. P., 2009, Circulation changes associated with the interdecadal shift of Korean August rainfall around late 1960s, *Journal of Geophysical Research*, 114:D04115. doi:10.1029/2008JD011287.
- Ho, C. H., Lee, J. Y., Ahn, M. H., and Lee, H. S., 2003, A sudden change in summer rainfall characteristics in Korea during the late 1970s, *International Journal of Climatology*, 23, 117-128.
- Kim, B. J., Kripalani, R. H., Oh, J. H., and Moon, S. E., 2002, Summer monsoon rainfall patterns over South Korea and associated circulation features, *Theoretical Applied Climatology*, 72, 65-74.
- Kim, C. S. and Suh, M. S., 2008, Change-point in the recent (1976-2005) precipitation over South Korea, *Atmosphere*, 18, 110-120.
- Ko, J. W., Baek, H. J., and Kwon, W. T., 2005, The Characteristics of precipitation and Regionalization during Rainy Season in Korea, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 41(1), 101-114 (in Korean).
- Korea Meteorological Administration (KMA), 1995, *Changma White Book*, pp345.
- Kwon, M. H., Jhun, J. G., Wang, B., An, S. I., and Kug, J. S., 2005, Decadal change in relationship between east Asian and WNP summer monsoons, *Geophysical Research Letters*, 32:L16709. doi:10.1029/2005GL023026.
- Kwon, M. H., Jhun, J. G., and Ha, K. J., 2007, Decadal change in East Asian summer monsoon circulation in the mid-1990s, *Geophysical Research Letters*, 34:L21706. doi:10.1029/2007GL031977.
- Lee, S. H. and Kwon, W. T., 2004, A variation of summer rainfall in Korea, *Journal of the Korean Geographical Society*, 39(6), 819-832 (in Korean).
- Park, C. Y., Moon, J. Y., Cha, E. J., Yun, W. T., and Choi, Y. E., 2008, Recent Changes in Summer Precipitation Characteristics over South Korea, *Journal of the Korean Geographical Society*, 43(3), 324-336 (in Korean).
- 교신: 최영은, 143-701, 서울시 광진구 화양동 1번지 건국대학교 지리학과(이메일: yechoi@konkuk.ac.kr, 전화: 02-450-3447, 팩스: 02-3436-5433)
- Correspondence: Youngeun Choi, Department of Geography, College of Science, Konkuk University, 1 Hwayang-dong, Gwangjin-gu, Seoul, 143-701, Korea (e-mail: yechoi@konkuk.ac.kr, phone: +82-2-450-3447, fax: +82-2-3436-5433)

최초투고일 2011. 6. 13
수정일 2011. 6. 27
최종접수일 2011. 6. 30