우리나라 광주에서의 4월 평균 강수량에 대한 장기변동성 분석

최기선 · 김백조 · 김정윤 · 박기준 · 안숙희

국립기상연구소 정책연구과

(2014년 7월 31일 접수, 2014년 8월 20일 수정, 2014년 8월 23일 게재 확정)

Long-term change in April mean Precipitation in Gwangju, South Korea

Ki-Seon Choi · Baek-Jo Kim · Jeoung-Yun Kim · Ki-Jun Park · Suk-Hee Ahn

Policy Research Division, National Institute of Meteorological Research

(Received 31 July 2014, Revised 20 August 2014, Accepted 23 August 2014)

Abstract : We found that, in 1984, there was a climate regime shift in April mean precipitation in Gwangju of Jeollanam-do province, Korea using a statistical change-point analysis. During the period of post-1984(1985-2013), the April mean precipitation in the years post-1984 showed a distinct decrease, compared to the pre-1984 period(1954-1984). This regime shift was also observed in China and Japan, excluding southern China. One of the major causes for the decreasing April mean precipitation during the recent three decades was the increased snow depth in the mid-latitude regions of continental East Asia. The increased snow depth resulted in strengthened cold and dry anticyclone anomaly over continental East Asia and a relatively weakened subtropical anticyclone anomaly over the western North Pacific. The anomalous synoptic condition supported a continuation of the typical winter pressure pattern of 'high-West and low-East' over East Asia in April. The intensified northerly winds from this zonal pressure pattern anomaly played a significant role in restricting the northern movement of the subtropical anticyclone and there by preventing the inflow of warm and humid air into Korea.

Key Words : statistical change-point analysis, April mean precipitation, cold and dry anticyclone

주요어 : 통계적 시점변화 분석, 4월 평균 강수량, 한랭고기압

1. 도입

한반도를 포함한 동아시아 지역에서는 연강수량의 대부분이 여름우기에 집중되어 겨울 건조기간 이후 봄철까지는 강수량이 부족하다. 그러나 봄철은 일년의 농사를 시작하는 계절이므로 강수량의 작은 변동에 따른 사회경제적 반응이 매

우 민감하고 중요한 시기이다. 하지만 봄 강수량의 변동 특성에 대한 연구는 여름 강수량에 비해 아직 미흡한 상태이다(Kim *et al.*, 2002; Park and Ryu, 2005; Kim *et al.*, 2006)

한반도와 중국에서 봄철 내에서도 일시적으로 강수량이 증가하는 시기가 있다. 한반도에서 이는 봄 장마(3월 28일~5월 23일)라고 불리우기도

한다(Byun *et al.*, 1992a, b; Byun and Han, 1994; Byun, 1996). Byun and Lee(2002)는 이 봄 장마의 기간을 지역별로 나누어서 정의하였고, Han and Byun(2006)은 한반도의 봄 장마(Spring Rainy Period in Korea; SPR)의 발생 메커니즘을 설명했다. 한편, 중국의 양자강 유역에서는 이를 Spring Persistent Rain(SRP; Tian and Yasunari, 1998)이라 부르며 한반도의 봄 장마 보다 먼저 발생한다(2월 25일~5월 10일).

그러나 봄철에 비가 적게 오는 원인이나 현상에 관심을 둔 연구는 별로 많지 않다. Kim *et al.* (2005)은 한반도 봄 강수량의 감소가 유라시아 대륙에서의 대륙성 고기압의 비정상적인 발달과 북태평양에서의 아열대 고기압의 약화와 연관되어 있다고 분석하였다. Lee and Kim(1997)은 한반도 봄 강수량이 부족한 해에는 300 hPa에서 한대제트의 남하현상이 뚜렷함을 제시하였다. 이들 두 연구를 통해 동아시아 대륙의 저온 현상과 연관되어 봄 강수량 부족이 발생함을 유추할 수 있으나 더 이상의 연구가 진행될 바가 없다. 한편 Byun *et al.* (1992a, b)은 한반도의 봄철을 더 세분하여 특별히 건조한 기간을 구분하고 이를 '장마 전 건기'라 하였으며, 그 원인으로 아시아 대륙 동안에서 북고·남저의 특이한 기온분포 편차가 생기는 것을 지적하였다. 그러나 장마 전 건기(5월 중순~6월 중순)를 Byun and Han(1994)은 봄 건기기간(5월 23일~6월 13일)이라 하였는데 이 기간은 봄과 여름 사이의 전이기간이다.

그런데 봄철 강수량에서 기후 레짐 이동(climate regime shift)이 있었음이 발견된 것은 최근이다. Xin *et al.* (2006)은 양자강 부근지역에서 1981년 이후로 늦봄(4월 20일~5월 20일)의 강수량 부족이 강화되고 있음을 발견했다. Hu *et al.* (2003)과 Zhai *et al.* (2005) 등도 이 지역의 봄 강수량의 감소 추세를 지적한 바 있다. 반대로 양

자강의 중·하류 지역에서 1980년대 중반 이후로 오히려 호우의 빈도 및 강도가 증가했다는 연구도 있다(Buda *et al.*, 2007). 또 다른 연구는, 1970년대 후반 이후 중국 남부 지역에서는 봄 강수량이 증가 하고 중국 중부 지역에서는 감소하였으며, 이러한 두 지역에서의 봄 강수량 분포의 추세는 여름이 되면서 완전히 역전됨을 보였다(Yang and Lau, 2004). 중국 지역의 봄 강수량에 대한 이와 같은 연구경향과는 달리, 한반도에서 강수량의 기후 레짐 이동에 대한 연구로 Ho *et al.* (2003)이 있으나 여름 강수량만을 다루어 사회경제적으로 봄철 강수량에 대한 중요성이 부각되지 않았다. 사실, 1970년대 후반 또는 1980년대 초에 발생하는 기후 레짐 이동은 국지적인 변화가 기여하는 이 영역에서의 기후자료변화도 반드시 언급이 되어야 한다고 본다. 예를 들어 이 지역의 지형 및 지표면의 변화 등 도시화로 야기되는 지구온난화 기여분이 제거되어지지 않았다. 또한 이러한 레짐은 동아시아에서만 나타나는 현상이 아니라, 태평양에서의 해양 및 대기 인자에서 발생하는 기후변동이다. 예를 들어, 북태평양에서는 Niebauer(1998)가 1970년대 후반 이후의 레짐 동안 증가한 남풍 편차 때문에 베링해 부근에서의 해빙은 1970년대 후반 이전의 레짐 동안에 비해 약 10% 정도 감소하였음을 보인바 있다. 열대 태평양에서는 Stephens *et al.* (2001), Wu *et al.* (2005), Ye and Hsieh(2006)들이 1970년대 후반 이후의 레짐 동안 대기수렴 가열율(atmosphere convergence heating rate)의 동쪽으로의 이동을 통해 엘니뇨 현상이 강화되었음을 수치실험을 이용하여 보였다. 여기에 Chang *et al.* (2000)은 최근 동아시아 여름 몬순 강수량의 증가는 1970년대 후반 이전의 레짐에 비해 1970년대 후반 이후의 레짐 동안 적도 태평양에서의 해수면 온도 상승에 기인함을 제시하였다. 게다가 Ho *et al.* (2004)은 1970년대 후반

이후의 레짐 동안에 서쪽으로 더욱 강화된 북태평양 고기압으로 인해 태풍의 이동경로에도 변화가 있었음을 보였다. 위의 모든 기후 레짐 이동은 1970년대 후반 및 1980년대 초반에 태평양에서 발생하는 태평양 십년 규모 변동(Pacific Decadal Oscillation, PDO)의 기후 레짐 이동과 연관된다(Bond *et al.*, 2003). 태평양에서 이러한 1970년대 후반 또는 1980년대 초반에 발생한 기후 레짐 이동은 1970년대 후반 이후의 레짐부터 지구온난화의 또 다른 시작을 의미한다. 따라서 1980년대 초반 이후 발생한 우리나라에서의 4월 평균 강수량의 감소추세 역시 이런 지구온난화의 한 부분으로 보아야 할 것으로 판단된다. 이에 본 연구는 우리나라 광주의 4월 평균 강수량에 대한 최근 기후 레짐 이동에 관심을 가진다. 주요 원인으로 동아시아 대륙에서의 적설량에 주목하였다. 몇 가지 기존연구에서 둘 사이의 연관 가능성이 발견되었기 때문이다. 우리나라 여름(6~9월) 강수량은 이전 겨울철 티벳지역의 눈 덮임(snow cover)과는 유효한 상관이 존재하지 않으며(Choi *et al.*, 1998), 유라시아 서쪽지역과 동쪽지역에서의 이전 한랭시즌(10~4월) 동안의 적설량(snow depth)과는 각각 음과 양의 상관관계가 있다고 알려져 있다(Kripalani *et al.*, 2002). Wu and Kirtman(2007)은 유라시아 지역에서 눈 덮임과 적설량에 대해 겨울(11~2월)과 봄(3~5월) 동안 자료의 연속성 및 두 자료의 유사성을 조사하였다. 그 결과 유라시아의 많은 지역에서 두 시기 사이 자료의 연속성은 적설량이 더 뛰어난 것을 보였다. 또한 두 시기에 눈 덮임과 적설량 사이에는 큰 차이가 없으며, 특히 봄에는 두 자료가 거의 일치하는 특성을 보여 적설량을 이용하여 동아시아 여름몬순의 특성을 분석하여도 좋다는 결론을 내렸다. 그런데 이들 연구는 여름철 강수량만을 다루었고 2000년도 이후의 강수량 자료를 분석에 포함시키지 않았

다. 따라서 본 연구는 우리나라 광주의 4월 평균 강수량과 4월 동아시아 지역에서의 적설량과의 관련성을 최근 2013년까지의 업데이트 된 자료로 이용할 경우 어떠한 변동이 존재하는지 분석해 본다.

2. 자료 및 분석 방법

1) 자료

이 연구는 1950~1953년 동안의 우리나라전쟁으로 인해 1954~2013년(60년) 동안 우리나라 광주 지방기상청에서 관측된 4월 평균 강수량 자료를 사용하였다. 우리나라 광주 지방기상청은 1939년 5월 1일부터 기상관측을 시작하였으며, 위경도 35.17°N, 126.88°E 및 해발고도 70.53m에 위치해 있다. 본 연구에서 광주지역을 선정하는 이유는 Choi *et al.*(2010)의 연구결과에서 우리나라 광주에서 최근 4월 강수량의 감소추세가 더욱 뚜렷하다고 언급하였기 때문이다.

이 연구는 미국 국립환경예측센터-국립대기과학연구센터(National Center for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research, NCEP-NCAR)에서 제공하는 재분석 자료(지위고도(gpm), 수평바람($m s^{-1}$))를 사용하였다(Kalnay *et al.*, 1996; Kistler *et al.*, 2001). 기온($^{\circ}C$), 비습($g kg^{-1}$) 및 가강수량($kg m^{-2}$). 이 자료는 위·경도 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 및 연직 17층(비습은 8층, 가강수량은 단층)의 공간해상도로 구성되어 있다. 여기서 가강수량은 육지와 함께 해상에서의 강수량의 변동을 살펴보기 위해 사용되었다. 이 자료들은 1948년부터 현재까지 사용 가능하다. 또한 가우시안 격자로 된 현열($W m^{-2}$) 및 적설량(water equivalent of accumulated snow depth, WEASD, $kg m^{-2}$)의 자료를 사용하였다. 현열과

적설량 자료는 1948년부터, 해수면 온도 자료는 1854년부터 사용 가능하다. 위의 재분석 자료들은 모두 NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center¹⁾(CDC)에서 이용 가능하다. 적설량 자료에 대한 자세한 설명은 Wu and Kirtman(2007)을 참고하기 바란다.

또한 이 자료는 위·경도 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 의 공간해상도를 가진 해수면 온도(extended reconstructed sea surface temperature, SST, Reynolds *et al.*, 2002)가 사용되었다.

2) 분석방법

이 연구에서 두 평균 사이의 유의성 비교는 독립표본 t-검정(independent two-sample t-test)을 사용하였다. 두 독립변수의 시계열이 t-분포를 따르고, 표본의 평균이 각각 $\bar{x}_1$, $\bar{x}_2$ 로 정의될 경우, t-test의 식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_{x1x2} \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$$

여기서 S_{x1} , S_{x2} 는 표준편차이고 n_1 , n_2 는 두 시계열에서 총 개수이다. 만약 위의 식으로부터 t의 절대값이 유의수준의 문턱값보다 크게 산출되면, 귀무가설(null hypothesis)은 $\alpha(\times 100)\%$ 의 신뢰수준에서 기각되어 낮은 신뢰수준을 보이며, 기각되지 않으면 높은 신뢰 수준을 보이는 것으로 정의된다(Wilks, 1995).

또한 본 연구에서 주어진 시계열에 대해 통계적 시점변화 분석(statistical change-point analysis)이 적용되었다. 이 분석 방법을 적용하게 되면 t값이 산출되는데 t의 절대값이 가장 큰 해에 기후 레짐 이동이 존재한다는 것을 의미한다. 이 분석에 대한 좀 더 자세한 내용은 Elsner *et al.*(2000), Chu(2002), Ho *et al.*(2004)의 연구를 참고하기

바란다.

본 연구에서는 광주에서 4월 강수량의 감소추세의 원인을 파악하기 위해 대기환경을 분석하였다.

3. 4월 강수량의 시계열 분석

Figure 1a는 최근 60년(1954~2013년) 동안 우리나라 광주에서의 4월 평균 강수량에 대한 시계열을 나타낸 것이다. 이 시계열은 뚜렷한 연 변동성과 십년간 변동성을 나타내고 있으며, 전체적으로 강수량이 감소하는 추세를 나타낸다(thick dashed line). 이 추세는 90% 신뢰수준에서 유의하다. 이는 최근 한반도 봄(3~5월) 강수량이 감소하고 있다는 것을 보여준 Choi *et al.*(2010)의 결과와 일치한다.

이후 4월 평균 강수량의 감소추세로부터 기후 레짐 이동의 해가 존재하는지를 알아보기 위해 이 시계열에 통계적 시점변화 분석을 적용하였다. 분석결과, 1984년에 가장 큰 t값이 존재하였으며(점선에서 화살표) 따라서 1954~1984년 동안의 다우기간과 1985~2013년 동안의 소우기간으로 나뉘어 질 수 있다. 1954~1984년 다우기간의 4월 평균 강수량은 119.8mm이며(굵은 실선), 1985~2013년 소우기간의 4월 평균 강수량은 77.4mm로서(파선) 두 기간 사이에 약 40mm의 차를 나타낸다. 두 기간 사이에 4월 평균 강수량의 차는 95% 신뢰수준에서 유의하다.

우리나라 광주에서 보여지는 4월 평균 강수량의 변동에서 1984년에 나타나는 기후 레짐 이동은 4월 평균 강수량의 5년 이동평균에서도 확인할 수 있다(Figure 1b). 우리나라 광주에서의 60년 기후평균 4월 강수량은 100.8mm로서(실선) 1983년까지는 이 기후평균 강수량보다 많다가 1984년

Figure 1. Time series of (a) April mean precipitation in Gwangju of Jellanam-do of Korea (solid line) and t-value through statistical change-point analysis (dotted line) and (b) 5-year running average (solid line with a closed circle) and climatological mean (100.8) (solid line).

이후에는 기후평균 강수량보다 적은 강수량을 나타낸다(담혀진 원으로 된 실선).

따라서 이후에는 우리나라 광주에서 최근 4월 평균 강수량이 감소하는 이유를 알아보기 위해 1985~2013년 동안의 소우기간과 1954~1984년 동안의 다우기간 사이의 차를 분석한다.

4. 소우기간과 다우기간 사이의 강수량 및 대기환경에 대한 차

1) 강수량의 연변동

4월 이외의 계절 동안에 두 시기에 대한 강수량의 상태를 비교하기 위해 우리나라 광주에서의 강수량에 대한 계절 변동성을 분석하였다(Figure 2). 이는 이전 겨울 강수량의 감소가 4월 강수량 감소로 이어지는지 알아보기 위해서이다. 이 연구에서는 계절 변동성의 분석을 위해 7일 이동평균 강수량이 사용되었다. Ha *et al.* (2005)은 7일 이동평균 강수량을 이용하여 한반도 8월 강수량의 연 변

Figure 2. Temporal variations of 7-day running averaged rainfall for (a) the mean of the period 1954~1984 (solid line) and (b) the mean of the period 1985~2013 (dotted line), and the difference between the mean of the period 1985~2013 and the mean of the period 1954~1984 in Gwangju of Jellanam-do of Korea.

동에서 1960년대 후반을 기준으로 기후 레짐 이동이 있었음을 효과적으로 분석한 바 있다.

기후학적으로 우리나라의 우기는 봄 우기(4월 초순~5월 중순), 장마(6월 중순~7월 하순), 이차장마(8월 하순~9월 초순)와 같이 세 기간으로 나뉘어진다(Byun and Lee, 2002). 다우기간(1954~1984년)과 소우기간(1985~2013년)에 대한 봄 우기의 상태를 살펴보면 1954~1984년 다우기간에는 기후학적 봄 우기의 기간에 따라 4월 초순에 강수량이 증가하여 5월 중순까지 이어지지만(실선), 1985~2013년 소우기간에는 뚜렷하게 증가하는 경향을 보이지 않는다(점선). 따라서 두 기

간 사이의 차에서 3~5월 동안의 봄 강수량 중 4월에 가장 큰 차이를 보이게 된다(Figure 2b). 이후 5월 중순부터 6월 초순까지 두 기간에는 강수량의 휴지기간을 나타내는데 이 기간이 장마 전 건기로 정의된다. 이후 6월 중순부터 장마가 시작되는데 1954~1984년 다우기간 동안에는 강수량의 정점없이 7월 말까지 강수량이 완만하게 이어지지만, 1985~2013년 소우기간 동안에는 7월 중순에 최대의 정점에 도달한 뒤 급격하게 강수량이 감소하는 경향을 보인다. 이는 단기간에 많은 강수가 내렸다는 것을 의미한다. 따라서 이 결과는 최근 장마기간에 강수 경향이 집중호우의 형태를 나타

낸다는 다른 연구결과와 일치하는 특성을 보여준다(Seo *et al.*, 2011). 이후 1954~1984년 다우기간 동안에는 기후학적 평균과 같이 7월 하순에서 8월 중순까지 강수량의 휴지기간을 가진 뒤 8월 하순부터 9월 초순까지 이차장마를 나타낸다. 특히 이차장마 기간의 강수량의 정점은 장마기간 때보다 높다. 반면 1985~2013년 소우기간 동안에는 7월 말에 짧은 강수량의 휴지기간을 가진 뒤 8월 초순부터 강수량이 증가하기 시작하여 9월 초순까지 이어지는 이차장마 기간을 가진다. 이는 6월 중순부터 9월 초순까지 강수현상이 비교적 꾸준히 지속되었음을 의미한다. 이럴 경우 장마 및 이차장마의 시종시기를 정의한다는 것은 무의미해질 수 있다. 따라서 이 결과는 장마와 이차장마의 시종시기를 정의하기 어려울 정도로 최근 여름철 강수 형태가 바뀌었음을 주장한 이전 연구결과와 잘 일치한다(Seo *et al.*, 2011). 1985~2013년 소우기간 동안 6월부터 8월까지의 이러한 강수 형태로 인해 여름(6~8월) 동안에는 1985~2013년 소우기간 동안에 강수량이 더 많다(Figure 2b). 즉 1985~2013년 소우기간 동안 봄 강수량은 1954~1984년 다우기간보다 적고 여름 강수량은 더 많은 특징을 나타낸다. 하지만 우리나라의 겨울은 건조기간이기 때문에 두 기간 사이에 강수량의 차이가 거의 없다. 따라서 이전 겨울 강수량의 감소가 4월 강수량 감소로 이어지지 않는음을 알 수 있다.

2) 4월 종관 환경 특징

우리나라 광주에서 나타나는 4월 평균 강수량의 최근 감소가 지역적으로 국한되는 현상인지 알아보기 위해 두 기간 사이에 4월 가강수량의 차를 분석하였다(Figure 3). 4월 강수량 분석에서 CMAP (Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation) 자료를 사용할 수 있지만, 이 자료는 1979년부터 제공되기 때문에 좀 더 장기

Figure 3. Difference in percentile water between 1985~2013 and 1954~1984 means. Contour interval is 1 kg m^{-2} . Shaded areas are significant at the 95% confidence level.

간의 강수량 분석을 위해 가강수량 자료를 사용하게 되었다. 전체적으로 분석영역에서 25°N 를 기준으로 북쪽지역은 음의 편차가, 남쪽 지역은 양의 편차가 분포되어 있다. 특히 음의 편차의 중심은 중국 북부지역으로부터 한반도를 지나 일본까지 이어져 있다. 따라서 우리나라 광주에서 나타나는 최근 4월 강수량의 감소현상은 일부 지역에 국한되는 현상이 아닌 중위도 동아시아 대부분의 지역에서 나타나는 현상임을 알 수 있다.

위에서 분석된 것처럼 우리나라 광주뿐만 아니라 중위도 동아시아 지역에서 나타나는 4월 평균 강수량의 감소현상의 원인을 알아보기 위해 두 기간 사이에 4월 850 hPa 유선에 대한 차를 분석하였다(Figure 4a). 전체적으로 동아시아 대륙에는 고기압성 편차가, 북서태평양에는 저기압성 편차가 위치해 있다. 이는 동아시아에서 나타나는 서고동저형의 전형적인 겨울철 기압배치이다. 이러한 기압배치의 편차로 인해 우리나라뿐만 아니라 중위도 동아시아 지역에서는 북풍의 편차가 강화되어 있다. 따라서 최근 우리나라 광주를 포함해서 중위도 동아시아 지역에서 나타나는 4월 평균

강수량의 감소의 원인은 차고 건조한 북풍 편차 때문임을 알 수 있다.

Figure 4a에서 분석된 중위도 동아시아 지역에서의 북풍 편차가 차고 건조한지를 알아보기 위해 두 기간 사이에 4월 850 hPa 기온(Figure 4b)과 4월 850 hPa 비습(Figure 4c)에 대한 차를 분석하였다. 먼저 850 hPa 기온에서는 중국 내륙으로부터 한반도를 지나 일본까지 중위도 동아시아 지역에 음의 편차가 형성되어 있다. 이는 앞서 분석되었듯이 가강수량 감소의 중심지역과 일치한다. 한편 850 hPa 비습에서는 앞서 분석된 가강수량의 공간분포와 유사하게 중위도 동아시아 대부분의 지역에서 음의 편차를 나타낸다. 특히 음의 편차의 중심은 중국 중부지역으로부터 동중국해를 지나 일본까지 이어져 있다. 따라서 위와 같은 분석 결과에 의해 최근 4월에 중위도 동아시아 지역에 강화된 북풍 편차는 차고 건조한 특성을 나타내며, 이로 인해 이 지역에서 4월 평균 강수량이 최근에 감소하고 있음을 알 수 있다.

높은 해수면 온도는 대기불안정을 야기하여 강수형성에 영향을 줄 수 있다. 따라서 4월 해수면 온도에 대해 두 기간 사이의 차를 분석하였다(Figure 5). 전체적으로 일본 동쪽해상을 제외한 대부분의 해역에서 음의 편차를 나타내고 있다. 따라서 낮은 해수면 온도는 대기의 불안정을 야기할 가능성이 낮기 때문에, 이로 인해 우리나라 광주를 포함한 중위도 동아시아 대부분의 지역에서 4월 평균 강수량이 감소하게 된다.

앞서 분석된 것처럼 최근 동아시아 지역에서 서고동저형의 기압배치 편차가 강화되는 원인을 알아보기 위해 4월 적설량에 대한 두 기간 사이의 차를 분석하였다(Figure 6a). 그 결과 중국 일부 지역을 제외한 동아시아 대부분의 지역에서 양의 편차를 나타낸다. 눈은 알베도 효과에 의해 태양복사를 반사시킬 뿐만 아니라 태양복사로 인해 눈

Figure 4. Differences in (a) 850 hPa streamline, (b) 850 hPa air temperature, and (c) 850 hPa specific humidity between the 1985~2013 and the 1954~1984 means. Contour intervals are 0.3°C for 850 hPa air temperature and 0.3 g kg^{-1} for 850 hPa specific humidity. Shaded areas are significant at the 95% confidence level.

Figure 5. Same as in Figure 3, but for sea surface temperature. Contour interval is 0.1°C. Shaded areas are significant at the 95% confidence level.

이 녹을 때 주위공기로부터 잠열을 흡수하기 때문에 주변지역의 공기를 냉각시키는 역할을 한다. 따라서 최근에 동아시아의 많은 지역에서 나타낸 양의 적설량 편차로 인해 동아시아 지역이 냉각되었는지를 알아보기 위해 4월 현열에 대한 두 기간 사이의 차를 분석하였다(Figure 6b). 예상했던 것처럼 동아시아 대부분의 지역에서 음의 편차가 강화되어 있다. 따라서 이러한 동아시아 대륙에 많

은 적설량으로 인한 주변지역의 냉각 효과가 서고 동저형의 겨울철 기압배치 편차를 강화시켜 중위도 동아시아 지역에 최근 4월 평균 강수량이 감소되었음을 알 수 있다. 이러한 결과는 한반도 봄 강수량이 부족한 해에는 300 hPa에서 한대제트의 남하현상이 뚜렷하다는 Lee and Kim(1997)의 결과를 뒷받침 한다. 또한 한반도 봄 강수량의 감소가 유라시아 대륙에서의 대륙성 고기압의 비정상적인 발달과 북서태평양에서의 아열대 고기압의 약화와 연관되어 있다고 분석한 Kim *et al.* (2005)의 연구에서 좀 더 보강된 연구결과라고 볼 수 있다.

5. 요약 및 결론

이 연구는 통계적 변화시점 분석을 이용하여 우리나라 광주에서 4월 평균 강수량의 십년간 변동성을 분석하였다. 그 결과 1984년에 기후 레짐 이동이 존재하였으며, 우리나라 여름(June-August) 강수량의 증가추세(Ho *et al.*, 2003)와는 다르

Figure 6. Differences in (a) water equivalent accumulated snow depth (WEASD, kg m^{-2}) and (b) sensible heat net flux (W m^{-2}). Shaded areas are positive values for WEASD and negative values for sensible heat net flux.

계, 최근(1985~2013년) 4월 평균 강수량이 과거(1954~1984)에 비해 상당히(평균 약 42mm) 감소하였음이 밝혀졌다. 이러한 특성은 가강수량 분석을 통해 한반도뿐만 아니라 중위도 동아시아 지역 대부분에서 나타나는 현상임을 알 수 있었다.

이 감소추세에 대한 원인을 알아보기 위해 중관 환경 분석이 이루어졌다. 1985~2013년 소우기간에 동아시아 대륙에서는 고기압성 순환 편차, 북서 태평양에서는 저기압성 순환 편차와 같은 겨울철의 전형적인 기압배치인 서고·동저형의 기압 분포 편차가 뚜렷했다. 이로 인해 우리나라를 포함하는 중위도 동아시아 지역에서는 차고 건조한 북풍의 편차가 강화되었으며, 이 북풍 편차의 성질은 기온과 비습 분석을 통해 확인되었다. 이 북풍 편차는 강수형성에 용이하도록 온난 습윤한 남풍 편차를 공급해주는 아열대 고기압의 북상을 저지하는 역할을 하였다.

이러한 서고·동저형의 기압분포 편차로부터 비롯된 중관 상태는 동아시아 대부분의 지역에서 증가된 적설량과 연관되어 있었다. 1985~2013년 소우기간에 이 지역에서 증가된 적설량은 알베도 효과에 의해 지표 및 하층대기의 기온을 하강시켜 봄철 동아시아 대륙에 한랭고기압을 강화시키는 역할을 하였다.

이 연구는 우리나라 광주에서의 4월 평균 강수량 변동의 주 요인으로서 4월에 동아시아 대륙에서의 적설량의 변동을 지적하였다. 우리나라의 여름 강수량도 그 이전 겨울 동안의 유라시아 눈 덮임과 높은 음의 상관관계가 있음이 증명된 바 있다(Choi *et al.*, 1998). 따라서 우리나라의 봄 및 여름 강수량의 예측을 위해 봄철 동아시아 대륙에서의 눈의 상태가 주요 예측인자로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

한편, 이 연구는 우리나라 광주에서의 4월 평균 강수량에 대한 장기적인 변동성 분석이 이루어졌

다. 그 결과 중위도 동아시아 지역의 대부분에서 4월 평균 강수량이 감소되었음을 확인하였다. 따라서 차후 연구에서는 분석영역을 좀 더 확장하여 중위도 동아시아 지역에 대한 장기간의 4월 평균 강수량을 이용하여 분석될 예정이다.

사사

본 연구는 국립기상연구소 2014년 주요사업 “예보기술지원활용연구”의 지원으로 수행되었습니다.

주

1) <http://www.cdc.noaa.gov/Datasets>

References

- Bond, N. A., Overland, J. E., Spillane, M., and Stabeno, P., 2003, Recent shifts in the state of the North Pacific, *Geophysical Research Letters*, 30, 10.1029/2003GL018597.
- Buda, S., Tong, J., Guoyu, R., and Zhenghong, C., 2007, Trends of extreme precipitation over the Yangtze river basin of China in 1960-2004, *Advances in climate Change Research*, 3, 45-50.
- Byun, H. R., 1996, On the atmospheric circulation caused the drought in Korea, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 32, 455-469 (in Korean).
- Byun, H. R. and Han, Y. H., 1994, On the existence of the seasonal drought in the Korean peninsula, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 30, 457-467 (in Korean).
- Byun, H. R., Lee, D. K., and Jeong, C. H., 1992a, A study on the atmospheric circulation during the dry period before the Changma. Part I: exis-

- tence and characteristics, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 28, 72-85 (in Korean).
- Byun, H. R., Lee, D. K., and Jeong, C. H., 1992b, A study on the atmospheric circulation during the dry period before the Changma. Part II: compared with those before and after the period, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 28, 86-102 (in Korean).
- Byun, H. R. and Lee, D. K., 2002, Defining three rainy seasons and hydrological summer monsoon in Korea using available water resources index, *Journal of Meteorological Society of Japan*, 80, 33-44.
- Chang, C. P., Zhang, Y., and Li, T., 2000, Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part II: The meridional structure of the monsoon, *Journal of Climate*, 13, 4326-4340.
- Choi, B. C., Davies, T. D., Osborn, T. J., and Lee, S. H., 1998, On the relationship between Eurasian snow cover and summer rainfall in South Korea Part I: Statistical analysis, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 34, 478-485 (in Korean).
- Choi, K. S., Kim, D. W., and Byun, H. R., 2010, The regime shift in the early 1980s of spring precipitation in Korea, *International Journal of Climatology*, 30, 721-732.
- Chu, P. S., 2002, Large-scale circulation features associated with decadal variations of tropical cyclone activity over the central North Pacific, *Journal of Climate*, 15, 2678-2689.
- Elsner, J. B., Jagger, T., and Niu, X. F., 2000, Changes in the rates of North Atlantic major hurricane activity during the 20th century, *Geophysical Research Letters*, 27, 1743-1746.
- Ha, K. J., Yun, K. S., Jhun, J. G., and Park, C. K., 2005, Definition of onset/retreat and intensity of Changma during the Boreal summer monsoon season, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 41, 927-942 (in Korean).
- Han, S. U. and Byun, H. R., 2006, The existence and the climatological characteristics of the spring rainy period in Korea, *International Journal of Climatology*, 26, 637-654.
- Ho, C. H., Baik, J. J., Kim, J. H., and Gong, D. Y., 2004, Interdecadal changes in summertime typhoon tracks, *Journal of Climate*, 17, 1767-1776.
- 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.
- Hu, Z. Z., Yang, S., and Wu, R. G., 2003, Long-term climate variations in China and global warming signals, *Journal of Geophysical Research*, 108, 4614, doi:10. 1029/2003JD003651.
- 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, R., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Janne, R., and Joseph, D., 1996, The NCEP/NCAR 40-Year reanalysis project, *Bulletin of American Meteorological Society*, 77, 437-471.
- Kim, M. K., Kim, H. S., Kwak, C. H., So, S. S., Suh, M. S., and Park, C. K., 2002, Long-term forecast of seasonal prediction in Korea using the large-scale predictors, *Journal of Korean Earth Science Society*, 23, 587-596.
- Kim, S., Park, C. K., and Kim, M. K., 2005, The regime shift of the northern Hemispheric circulation responsible for the spring drought in Korea, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 41, 571-585 (in Korean).
- Kim, S. S., Jang, S. M., Baek, H. J. Choi, H. Y. and Kwon, W. T., 2006, Climatological variability of temperature and precipitation in Jeju, *Journal of Korean Earth Science Society*, 27, 188-197.

- Kistler, R., Collins, W., Saha, S., White, G., Woollen, J., Kalnay, E., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Kanamitsu, M., Kousky, V., van den Dool, H., Jenne, R., and Fiorino, M., 2001, The NCEP/NCAR 50-year reanalysis, *Bulletin of American Meteorological Society*, 82, 247-267.
- Kripalani, R. H., Kim, B. J., Oh, J. H., and Moon, S. E., 2002, Relationship between Soviet snow and Korean rainfall, *International Journal of Climatology*, 22, 1313-1325.
- Lee, D. K. and Kim, Y. A., 1997, Springtime weather types over the Northeast Asia and relationship with yellow sand events during 1980-1989, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 33, 17-40 (in Korean).
- Niebauer, H. J., 1998, Variability in Bering Sea ice cover as affected by a regime shift in the North Pacific in the period 1947-1996, *Journal of Geophysical Research*, 103, 27717-27737.
- Park, H. W. and Ryu, C. S., 2005, The variation patterns over a period of 10 days and precipitation regions of summer precipitation in Korea, *Journal of Korean Earth Science Society*, 26, 417-428.
- Reynolds, R. W., Rayner, N. A., Smith, T. M., Stokes, D. C., and Wang, W., 2002, An improved in situ and satellite SST analysis for climate, *Journal of Climate*, 15, 1609-1625.
- Seo, K. H., Son, J. H., and Lee, J. Y., 2011, A new look at Changma, *Atmosphere*, 21, 109-121 (in Korean).
- Stephens, C. S., Levitus, S., Antonov, J., and Boyer, T. P., 2001, On the Pacific Ocean regime shift, *Geophysical Research Letters*, 28, 3721-3724.
- Tian, S. F. and Yasunari, T., 1998, Climatological aspects and mechanism of spring persistent rain over central China, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 76, 57-71.
- Wilks, D. S., 1995, *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Academic Press, 467.
- Wu, L., Lee, D. E., and Liu, Z., 2005, The 1976/1977 North Pacific climate regime shift: The role of subtropical ocean adjustment and coupled ocean-atmosphere feedback, *Journal of Climate*, 18, 5125-5140.
- Wu, R. and Kirtman, B. P., 2007, Observed relationship spring and summer East Asia rainfall with winter and spring Eurasian snow, *Journal of Climate*, 20, 1285-1304.
- Xin, X., Yu, R., Zhou, T., and Wang, B., 2006, Drought in late spring of South China in recent decades, *Journal of Climate*, 19, 3197-3206.
- Yang, F. and Lau, K. M., 2004, Trend and variability of China precipitation in spring and summer: Linkage to sea-surface temperatures, *International Journal of Climatology*, 24, 1625-1644.
- Ye, Z. and Hsieh, W. W., 2006, The influence of climate regime shift on ENSO, *Climate Dynamics*, 26, 823-833.
- Zhai, P. M., Zhang, X. B., Wan, H., and Pan, X. H., 2005, Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China, *Journal of Climate*, 18, 1096-1108.

책임 편집: 허인혜

영문 교열: 조창현