최근 5년간 발생한 우리나라 여름철 강수특성 연구

문자연¹ · 권영아¹ · 최영은² · 박인홍²

¹건국대학교 기후연구소 · ²건국대학교 지리학과

(2014년 11월 8일 접수, 2014년 11월 25일 수정, 2014년 11월 30일 게재 확정)

A Study on the Characteristics of Summer Rainfall over South Korea in Recent 5 years

Ja-Yeon Moon¹ · Young-Ah Kwon¹ · Youngeun Choi² · In-Hong Park²

¹Climate Research Institute, Konkuk University · ²Department of Geography, Konkuk University

(Received 8 November 2014, Revised 25 November 2014, Accepted 30 November 2014)

Abstract : In this study, we analyzed the characteristics of summer rainfall over South Korea during recent five(2009-2013) years using observation data. There was a significant contrast in interannual variability between July and August rainfall since 1998. Large increase of rainfall in July (2009 and 2011) and August (2010 and 2012) were found to be consistent over all 60 stations in South Korea. Enhanced precipitation over western tropical Pacific and anticyclonic anomaly to the east of Korean peninsula were the common features when there was rainfall increase both in July and August. Intraseasonal summer rainfall over South Korea evolves in time lag with intraseasonal Indian and Western North Pacific monsoon indices. The meridional tripole structure of intraseasonal convection from the Western North Pacific to East Asia and the baroclinic structure of intraseasonal circulation anomalies centered over Korean peninsula provided a favorable condition for the extreme rainfall(90 percentile) events to occur.

Key Words : summer rainfall, intraseasonal oscillation, extreme rainfall, Western North Pacific Monsoon, Indian Monsoon

주요어 : 여름철 강수, 계절안진동, 극한강수, 북서태평양몬순, 인도몬순

1. 서론

우리나라의 여름철 강수는 동아시아에서 발생하는 몬순에 의해 지배되고 열대 몬순골, 북서태평양 아열대 고기압, 메이유-바이유-장마밴드, 중위도 요란 등에 의해 직접적인 영향을 받으며, 멀

게는 적도까지 원거리 상호작용에 의해 간접적인 영향을 받는다(Moon *et al.*, 2011). 최근 기후변화와 더불어 우리나라의 여름철 강수량은 기온과 함께 증가하는 경향을 보이고 있으며(Chung *et al.*, 2004; Chung and Yoon, 2000), 월별 강수 특성의 변화와 함께 국지적으로 빠르게 발달하는 대류활

동에 의한 호우성 강수로 인한 극한 강수 발생이 점차 증가하고 있다(Choi, 2004; Park *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2011b; Heo *et al.*, 2014). 기록적인 극한 강수 현상은 매년 그 극값이 갱신되고 있는데 기온 상승과 함께 급세기 말에는 이러한 현상이 중위도 대륙 및 습윤한 열대에서 더 빈번하게 발생할 가능성이 높다고 전망하고 있다(IPCC, 2013).

여름철 강수현상의 특성 및 변화, 그리고 이에 따른 피해에 관해 많은 연구들이 수행되었다(Choi, 2002; Choi, 2004; Choi *et al.*, 2008; Moon *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2011a; Choi *et al.*, 2013; Heo *et al.*, 2014). Lee *et al.*(2011a)은 최근 10년(2001~2010년)의 우리나라 평균 연강수량을 분석한 결과, 강수량의 증가는 여름철이 가장 크게 기여함을 보였다. Choi *et al.*(2010)과 Moon *et al.*(2011)은 우리나라 강수량의 증가는 1990년대 후반에 뚜렷한 증가 경향이 나타남을 언급하였다. Choi *et al.*(2011)은 장기간(1954~2010년)의 우리나라 14개 지점 일강수량 자료를 대상으로 호우일(95와 99퍼센타일)과 미우일(1, 5, 30, 40 50퍼센타일)에 해당하는 강수량의 규모, 발생빈도, 연강수량에서 차지하는 강수비율을 분석하였는데 미우에 해당하는 강수사상의 규모는 감소하는 경향이 나타났고, 호우의 규모는 증가한 것으로 나타났다. 그리고 이러한 호우현상의 증가는 지역적 특성을 보이지만 우리나라 모든 지역에서 증가하는 경향을 보인다고 하였다. 우리나라를 포함하는 동아시아 여름몬순의 경우도 최근 증가하는 경향을 보이며(Liu *et al.*, 2012), 한국, 중국, 일본에서 매년 여름 호우로 인한 피해가 속출하고 있다.

여름철 강수는 계절 내에서도 그 변동 경향이 변화하였는데 과거 장마기간에 뚜렷한 강수량의 집중현상이 최근 장마종료 이후인 8월 및 9월에서도 많은 양의 강수증가가 발생하였고, 8월의 강수량의 변동폭이 크게 증가하였으며, 주로 호우로 인

한 기여도가 큰 것으로 밝혀진 바 있다(Ho *et al.*, 2003; Lee and Kwon, 2004; Park *et al.*, 2008). 또한 7월의 강수의 증가경향도 분석되었는데, Lee *et al.*(2011a)은 최근 10년의 7월 강수량이 증가하는 경향을 보임을 지적하였다.

한편, 호우로 인한 강수량의 증가는 홍수 및 산사태와 같은 자연재해를 일으킨다. Heo *et al.*(2014)은 1981~2012년에 대해 여름철 집중 호우로 인한 재해지역의 월별 피해액의 변화를 시대별로 분석하였는데 7월에 가장 높은 수치를 보이고 8월, 9월, 6월 순으로 나타남을 보였다. 또한 월별 피해 집중시기가 시대별로 변화함을 언급하였고 1990년 이전 7월과 9월에 집중되던 것이 이후 7월과 8월로 이동하며 앞서 강수특성의 계절내 변화와 유사한 경향을 보임을 언급하였다.

최근 우리나라를 포함한 아시아 대륙에서는 해마다 기록적인 호우와 때로는 가뭄으로 여름철 이례적인 이상기상 및 지역적인 극한 현상이 지속적으로 발생하고 있다. 그 동안 여름철 강수의 빈도 및 강도의 변화경향에 초점을 맞춘 연구는 다수 진행되었지만 여름철 내의 강수특성 및 가장 최근의 변화를 분석한 연구는 상대적으로 적다. 이에 본 연구는 이전 연구들에서 밝혀진 바 있는 내용을 바탕으로 가장 기록적인 이상기상 현상이 매해 발생하였던 최근 5년간(2009~2013년)의 여름철 강수특성을 분석하고자 한다. 아울러 호우로 인한 피해가 급증함에 따라 극한 강수현상이 발생할 경우 나타나는 종관적 및 대규모적인 순환장의 특성을 조사하고 계절 내의 변동에 영향을 미치는 계절안진동의 기여도 가능성을 함께 알아보고자 한다.

2. 자료 및 연구 방법

본 연구에서 사용한 자료는 기상청의 한반도 60

개 기상관측소의 일 강수량으로, 각 관측지점은 Figure 1에 제시하였다. 최근 5년 및 과거 기후와의 비교를 위해 연구기간은 1979년부터 2013년까지로 하였으며 여름철은 6월부터 8월까지로 정의하였다. 주변 중관장 및 대규모 순환의 분석은 GPCP(Global Precipitation Climatology Project, Adler *et al.*, 2003) 월강수량, NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration) 일평균 OLR(Outgoing Longwave Radiation, 외향장파복사, Liebmann and Smith, 1996) 및 NCEP/NCAR(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research)의 일평균 및 월평균 200hPa, 500hPa, 850hPa 바람장과 고도장을 사용하였다(Kalnay *et al.*, 1996). 자료의 격자 크기는 전구 지역이 경도 및 위도 모두 2.5°로 나뉜다.

여름철 내의 강수변동 특성을 파악하기 위해 일 강수량 자료를 30~60일 주기로 분리하여 그 특징을 살펴보고 계절안진동과의 상호작용을 분석하기 위해 OLR, 바람장, 고도장의 일자료를 계절안 주기인 30~60일로 분리하였다. 30~60일 주기 분리는 Lanczos band-pass filter를 통해 수행하였다(Duchon, 1979). 계절안 주기에서의 순환장과 우리나라 여름철 강수의 관련성을 파악하기 위해 여름철 대표적인 몬순 영역인 인도 및 북서태평양 지역에 대해 850hPa 동서바람을 이용한 계절안 주기의 몬순 지수를 산출하였다(Wang and Fan, 1999).

인도 여름 몬순지수(Indian Summer Monsoon Index, ISMI), 북서태평양 여름 몬순지수(Western North Pacific Summer Monsoon Index, WNPSMI)는 하층동서바람의 영역평균을 통해 다음과 같이 정의하였다(Wang and Fan, 1999): (1) ISMI: $U_{850}[(5^{\circ}N \sim 15^{\circ}N, 40^{\circ}E \sim 80^{\circ}E) - (20^{\circ}N \sim 30^{\circ}N, 70^{\circ}E \sim 90^{\circ}E)]$ (2) WNPSMI: $U_{850}[(5^{\circ}N \sim 15^{\circ}N, 100^{\circ}E \sim 130^{\circ}E) - (20^{\circ}N \sim 30^{\circ}N, 110^{\circ}E \sim 140^{\circ}E)]$. 동아시아

Figure 1. Distributions of 60 weather stations in South Korea

아 여름강수지수(NorthEast Asian Summer Rainfall Index, NEASRI)는 $[30^{\circ}N \sim 50^{\circ}N, 110^{\circ}E \sim 145^{\circ}E]$ 구역에 대해 평균한 강수량으로 정의하고(Lee *et al.*, 2005) 우리나라 여름철 강수는 남한의 60개 관측소 평균 강수량으로 정의하였다.

3. 최근 5년(2009~2013년)간의 우리나라 강수현상 분석

최근 5년에 발생한 우리나라를 포함한 아시아 지역의 여름철 강수현상을 조사하고 극한강수가 발생한 시기를 정리하여 Table 1에 제시하였다. 2009년은 아시아 지역에서 곳곳에 기록적인 폭우가 발생한 해였으며 우리나라에서도 7월에 지속적인 강수와 중순에 기록적인 폭우가 남부지방을 중심으로 나타났다. 2010년 아시아에서는 파키스탄 홍수라는 4일간 내린 폭우에 의해 1929년 이래 최악의 집중호우가 발생하였고 우리나라는 7월 중순의 호우와 8월 태풍에 의한 호우기록이 있었다.

Table 1. Rainfall events occurred over Asia during 2009-2013.

Year	Rainfall events (Extreme Climate Newsletter(KMA, 2009-2013))
2009	<ul style="list-style-type: none"> - June-July: record-breaking rainfall and flooding occurred in southern China. Taiwan experienced 3,000 mm of rainfall and also southeast China suffered the worst flooding in 50 years by Typhoon Morakot. - July: South Korea had frequent rainfall. June and August: less than normal - July, 15th: rain started from the evening around South coast of Jeonnam recorded 211.0 mm/day over Gogunmyeon, Jindo-gun, second highest on record. - July, 16th: rain concentrating over Mt. Jiri, Busan, South coast of Gyeongnam, recording 283mm in Nam-gu, Busan. Third highest on record. At Changwon and Jangsu, one hour maximum precipitation renewed the record by 102.0 mm and 63.0 mm, respectively.
2010	<ul style="list-style-type: none"> - Over the Asian continents (China, Pakistan, India, the Philippines), beyond the scale of extreme weather events such as the heavy rain, floods, typhoons occurred. - July, 26th: 4 days of worst torrential rains recorded since 1929 in Pakistan. - South Korea had less rainfall in June, normal in July, heavy rain damage and 5 typhoons in August. - July 16-17th: over the South and the Midwest regions of South Korea, heavy rainfall more than 200 mm and Yeosu experienced 288mm of daily maximum, renewing the record.
2011	<ul style="list-style-type: none"> - June and July: continuous heavy rainfall causing floods in the south-central region, China. - August-September: Abnormal temperature occurred in Japan and Korea. - June: South Korea suffered serious damage from Typhoon Maeari. July: torrential rainfall occurred over the central regions and recorded the highest daily precipitation on record. August: damaged by Typhoon Mui Fa - June 26th: precipitation recorded 164 mm in Ulsan, 148 mm in Ulleungdo when Typhoon Maeari passed, the highest rainfall, renewing the record. - July, 26-28th: rain started from Seoul and Gyeonggi area, record-breaking amount of 1-hour maximum rainfall.
2012	<ul style="list-style-type: none"> - June: China had worst drought in 50 years. Korea also had heat waves and tropical nights through July and August. From late July, successive four hurricanes landed. Great fluctuations in precipitation. - July, 6th: Renewed daily maximum precipitation on record. Wonju, 255.5 mm, Yeongwol 173.5 mm, Taebaek 172.5 mm. Heavy rainfall over Jeolla and Jeju by the northward migration of trough over the west coast, recorded 30 mm/hour, renewing the highest on record. Yeosu (1st), Seogwipo (3rd).
2013	<ul style="list-style-type: none"> - East Asia had heat wave lasting through the summer, Korea also had above normal temperature and less than normal precipitation due to the early development of the North Pacific subtropical high. - July 11-15th: Five days of continuous heavy rain recorded 429 mm in Chuncheon, 417 mm in Cheorwon. - Middle of August: the precipitation over South Korea recorded 4.8 mm, extremely low on record, damaged by the drought in east coast, southern area, and Jeju.

2011년은 6월부터 7월까지 연속적인 많은 비와 폭우로 중국 및 우리나라에 많은 양의 강수가 기록되었다. 6월에 이른 태풍 메아리가 있었고 7월에는 중부지방을 중심으로 엄청난 양의 폭우로 일 최대 강수량을 기록하였으며 8월에 다시 태풍 무이파로 피해를 입었다.

2012년과 2013년 우리나라는 북태평양 고기압의 이른 발달로 폭염과 가뭄이 지속적으로 이어진 해이었으며 강수현상이 2012년의 경우 주로 태풍에 의해 발생하였고 2013년은 장기간의 고온현상

이 지속되었다. 반면, 2009년부터 2011년은 태풍에 의한 호우도 발생하였고 대류성 강수로 인한 집중호우나 그 외의 영향에 의한 잦은 강수로 인해 극한강수가 자주 발생하였다.

우리나라 여름철 강수량의 변동 특성을 1979년부터 2013년까지 기간에 대해 6, 7, 8월 각 월별 및 6~8월 평균에 대해 검토해보았다. Figure 2는 우리나라 전체 60개 관측지점 평균 강수량의 연도별 변동을 나타내며 동아시아 지역(110°~150°E, 30°~45°N)의 몬순지수(Figure 2(c) 점선)도 함께 제시

하였다. 6월 강수량은 특별한 증가나 감소의 경향이 없이 경년변동의 특징을 보여주며 1990년에 가장 많은 강수량을 보였고 2011년에 두 번째로 많은 강수를 기록하였다. 최근 5년간은 2011년의 많은 값을 제외하면 평년(1981~2010년 평균, 7.7mm/day) 보다 적은 양을 기록하고 있다. 7월 강수량(평년값: 12.2mm/day)은 증가하는 시기가 뚜렷하지 않지만, 1990년 후반부터 소우인 해의 강수량도 과거에 비해 증가하는 경향을 보이고 2000년 이후로 강수량의 최다기록을 보인 해가 3회 나타났다. 가장 많은 강수량을 기록한 해는 2006년이며 최근 5년 중 2009년과 2011년에 전 기간 대비 두 번째 및 세 번째로 많은 강수가 발생하였다. 가장 적은 강수량은 최악의 무더운 여름이었던 1994년으로 나타났다. 8월 강수량(평년값: 11.8 mm/day, Figure 2(b) 점선)은 1990년대와 2000년대에 변동의 폭이 커졌음을 알 수 있다. 1979년 이후 2002년이 가장 많은 강수량을 보였지만 1987, 1993, 1995, 1998, 2012년에도 상당한 양의 강수가 기록되었다. 아울러 2001년이 가장 적은 강수량이 나타난 해이며 1988, 1996, 2006, 2009년도 유사한 양으로 적은 강수량을 기록한 해이다.

7월과 8월의 강수량 변동 특성 중 가장 특이한 점은 이전 연구에서 1998년을 기점으로 여름철 강수의 레짐이동에 대해 언급된 바 있지만(Moon *et al.*, 2011) 그것과 함께 7월과 8월의 강수량 변동 경향의 현저한 역의 상관성이 나타난다는 점이다. 즉, 7월에 강수량이 많은 해는 8월에 강수량이 감소하고 7월에 적은 해는 8월에 증가하는 경향을 1998년 이후로 뚜렷하게 보여준다. 최근 5년에서도 그러한 경향은 뚜렷하게 나타나며 이로부터 여름철 내의 계절안 진동의 경향이 최근 들어 더욱 뚜렷하게 보임을 알 수 있다. 7월과 8월 사이의 상관계수는 전 기간(1979~2013년)에는 -0.2 , 1998년 이후에는 -0.5 로 상승하고 최근 5년에는 -0.7

의 높은 음의 상관을 보인다.

여름철 전체 기간(6~8월)의 평균에 대해 살펴보면, 가장 뚜렷한 특징은 1979~1997년과 1998~2013년에 나타나는 강수량의 규모 및 변동성의 차이이다. 1998년 이후에는 강수량 변동이 이전 기간에 비해 크게 나타나고 장기간 기후값에 비해 다우 또는 소우로 나타나는 해의 강수량의 값이 모두 증가하여 두 기간의 평균 강수량이 1998년 이전과 이후에 큰 차이가 있다. 최근 5년에는 2011년만 뚜렷한 증가 경향을 보이고 나머지 해들은 변동폭이 크지 않고 강수량도 평년수준(10.7mm/day)을 보여준다. 북동아시아 지역에 대한 여름철 몬순 지수(Figure 2(c) 점선)는 1994년 우리나라와 마찬가지로 가장 낮은 강수량을 기록하고 있으며 1993년과 1998년에 가장 많은 강수가 발생하였다. 1990년대와 2000년대 중반까지 경년변동의 폭이 가장 크게 나타나며 최근에는 그 폭이 다소 감소하는 것을 볼 수 있다.

앞서 보여준 연별 강수량의 증가 및 감소 경향이 우리나라의 지역적인 현상인지 전체적인 경향인지를 살펴보기 위해 우리나라의 최근 5년간의 각 해별 그리고 여름철 각 월별 강수분포를 Figure 3에 평년대비 편차장으로 제시하였다. 6월의 경우 2009년 경기도와 강원도 북부를 제외한 나머지 지역, 2010년과 2012년은 우리나라 전역, 2013년 충청도와 경상북도 북부 지역을 제외한 모든 지역에서 강수량이 평년대비 감소한 것으로 나타난다. 2011년의 경우 전라도 일부 지역을 제외한 모든 지역에서 아주 많은 강수량 편차값이 위치한다. 7월의 경우 2009년과 2011년에 우리나라 모든 지역에 걸쳐 현저한 강수량의 증가 경향을 보여주며 2010년은 서해안 및 남부 지역에서는 강수량의 증가, 서울 경기, 강원도, 충청, 경북 지역에서는 감소가 나타난다. 2012년은 증가 및 감소 경향이 크지 않고 2013년은 서울 경기 및 강원도 지역을 중심으

Figure 2. (a) June (b) July(solid) and August(dash) (c) JJA(solid) precipitation in South Korea during 1979~2013. Dashed line in (c) indicates averaged precipitation over East Asia(110°-150°E, 30°-45°N).

로 강수량의 증가가, 그 이외의 지역에서는 강수량의 감소가 나타난다. 8월에는 2009년은 전체적인 강수량의 감소가 나타나며 2010년에는 동해안 일부지역을 제외하면 모든 지역에서 강수량이 뚜렷하게 증가했고 2012년 역시 전 지역에서 강수량의 증가 경향이 나타났다. 2011년은 경기 북부 및 강원도와 경상북도 및 경상남도 동해안을 따라 강수량이 감소했고 그 이외의 지역에서는 증가하는 분포를 보여준다. 2013년 8월은 우리나라 전역에 걸친 이상고온 현상과 함께 가뭄이 지속되었던 시기로 강수량의 감소경향이 뚜렷하다. 여름철 전체 기간 평균 분포를 살펴보면 2009년은 남북으로의 편차구조가 나타나고 2010년은 동서로 구분되는 편차구조를 보인다. 2011년은 전 지역에 대해 강수량이 증가하였으며 2012년은 강원도 지역만 감소하는 경향이며 2013년은 경기도 및 강원도 일부 지역을 제외하면 평년대비 감소하는 추세를 보여주었다. 이로부터 우리나라의 각 지점에 나타나는

월별 강수량 편차 분포는 지역적인 특성을 보이긴 하지만, 앞의 연별 변동과도 유사하게 7월과 8월에 증가하는 경향을 보였던 대조적인 해들에서는 우리나라 전역에 걸친 공통적인 특징을 보여주었다. 즉, 2009년과 2011년은 7월에 우리나라 전역에 걸쳐 강수량이 증가했고 2010년과 2012년에는 8월에 전체적인 강수 증가분포를 나타내었다.

우리나라 및 주변 순환장의 특성을 살펴보기 위해 Figure 3과 같은 최근 5년간의 월별 편차분포를 7월과 8월에 대해 각각 강수(음영), 500hPa 고도(선), 850hPa 바람(벡터)장으로 Figure 4에 제시하였다. 먼저 강수량의 분포를 살펴보면 2009년 7월에는 인도에서부터 서태평양까지 이어지는 강수밴드가 남쪽에 발달하고 우리나라와 일본에 걸친 강수밴드를 볼 수 있다. 8월에는 이러한 경향이 모두 반대로 건조 구역으로 나타난다. 2010년에도 인도 지역은 2009년과 유사하며 필리핀 부근은 2009년에 비해 보다 남쪽에서 강수구역이 발생하는 것을 알 수 있다. 8월에도 이러한 경향은 유지가 되며 우리나라에 강수구역이 위치한다. 2011년 7월은 필리핀부터 그 동쪽으로 넓은 규모의 강수구역이 발달하고 우리나라에서도 양의 강수구역이 나타난다. 8월은 이러한 강수구역이 감소하며 우리나라에서도 감소한다. 2012년의 경우 7월에 적도의 시그널이 강하지 않고 우리나라도 강수 편차값이 나타나지 않는데 8월에는 필리핀 북쪽부터 우리나라까지 이어지는 남북으로 발달한 강수구역이 위치한다. 2013년에는 7월, 인도에서부터 필리핀 남쪽으로 강수구역이 위치하며 한반도의 북부를 지나가는 강수밴드가 위치한다. 8월에 강수구역이 감소하며 우리나라에서도 감소한다. 앞의 월별 차이에 서처럼 우리나라에서의 7월과 8월의 대조적인 차이가 보다 넓은 규모에서도 2009년의 경우 대조적인 특징을 보여주는 것을 알 수 있다. 즉, 2009년의 경우 7월과 8월의 계절내 변동이 원거리 상관에

Figure 3. Monthly(June to August) and summer mean(JJA) precipitation anomalies of 60 stations in South Korea from 2009 to 2013.

Figure 4. (a) July and (b) August anomalies of precipitation(shading), 500hPa geopotential height (contour), and 850hPa wind(vector) from 2009 to 2013.

의한 영향을 크게 받았을 가능성을 제시해준다. 2009년과 2011년 7월은 우리나라를 중심으로 강수량이 증가한 해이며 두 해 모두에서 우리나라 남동쪽으로 고기압성 순환이 발달하고 남쪽으로 열대에 강수구역이 존재하게 된다. 따라서 남쪽으로부터의 습윤한 공기가 우리나라로 유입되어 강수현상이 발생하기 쉬운 조건을 제공하고 있다. 2010년과 2012년 8월에는 우리나라를 중심으로 동쪽에는 고기압성 순환이 북서쪽에는 저기압성 순환이 대비를 이루며 우리나라 방향으로 남서기류가 유입되며 이 또한 강수현상을 유발한다. 2013년의 경우 우리나라에 중심이 위치하는 고기압성 순환이 7월과 8월에 지속적으로 발달하여 그 주변지역에서 모두 강수가 감소하는 경향을 보인다.

4. 최근 5년간의 계절안 주기 (30~60일) 강수현상 분석

우리나라 여름철 강수의 계절 내 변동은 앞에서 언급한 바와 같이 1998년 이후로 월별 변동성이 강하게 나타났다(Figure 2). 이 절에서는 우리나라 여름철 강수현상 중 30~60일로 분리된 특성을 살펴보기 위해 사용된 각 변수들을 계절안 주기로 분리하여 이용하였다. 북반구 여름철의 계절안 진동

은 그 자체의 주기적인 진행에 의한 대류활동의 전개 뿐만 아니라 북반구 여름철 발생하는 지역별 몬순의 시작/소멸과도 밀접한 관련이 있다. 인도몬순, 북서태평양몬순, 북미몬순 등이 직접적인 관련이 있으며 동아시아 몬순 또한 계절안 진동에 의한 몬순의 시작과 이것의 갑작스런 북진에 의해 그 영향을 받게 된다(Annamalai and Sperber, 2005; Wheeler and Hendon, 2004).

인도 몬순 및 북서태평양 몬순지수의 기후학적 연주기 분포를 먼저 살펴보았다(Figure 5). 두 계절안 몬순의 연주기 분포는 모두 여름철에 가장 높은 값을 보여주는데 인도몬순의 경우 5월부터 증가하여 가장 높은 값이 6~8월에 걸쳐 나타난다. 북서태평양 몬순의 경우 5월부터 점차적으로 증가하여 가장 높은 값은 7월 중순에서 10월 초순까지 나타난다. 따라서 두 지역 간의 최대값이 나타나는 시기가 인도몬순이 한달 정도 앞에 발생하여 두 몬순의 최대값이 나타나는 시기에 차이가 있다.

최근 5년간 우리나라 60개 관측지점 일평균 강수량(실선), 계절안 주기의 인도몬순(.....), 북서태평양몬순(---), 우리나라 계절안 강수(—)에 대한 연도별 여름철 내 일 변동분포를 Figure 6에 제시하였다. 각 해별 몬순지수의 변동을 비교하면 여름철 내에서 약 2회의 계절안 주기를 반복하며 서로 시간적 지연을 두고 진동하는 것을 볼 수 있

Figure 5. Annual cycle of intraseasonal Indian(left) and Western North Pacific(right) summer monsoon index(Index defined by Wang and Fan(1999)).

Figure 6. Intraseasonal indices of Indian(dot), Western North Pacific(dash), and intraseasonal rainfall(thick line) and daily rainfall(thin line) over South Korea during 2009-2013 June to August.

다. 각 해별 분포를 보면 인도몬순과 북서태평양 몬순의 경년변동이 특정 해에는 함께 강하게 나타나지만 대부분은 각 몬순지수별 강하거나 약한 상태의 변동성이 서로 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 북서태평양 몬순의 경우 일반적으로 인도몬순과 약 5~10일 정도의 시간차를 두고 후에 발생하는 진동주기를 가지는데(Moon *et al.*, 2013) 2013년을 제외하면 나머지 해에서는 이러한 특징을 보여준다. 2013년은 특이하게도 북서태평양과 인도몬순이 동시에 같은 위상으로 발생하는 이례적인 특징을 나타낸다. 2009년은 인도몬순 및 북서태평양 몬순지수가 모두 가장 강한 폭의 진동을

보여주어 계절안주기 몬순활동이 강한 해임을 시사한다.

우리나라의 계절안 주기 강수는 일 강수량의 약 40%를 설명하는데(Kang *et al.*, 1989) 이들의 진동 모습을 살펴보면 북서태평양 또는 인도몬순 지수와 같은 위상으로 중첩되거나 시간적인 지연을 두고 발생하는 특성을 보이고 각 해별로 일 강수량 분포에 따라 많은 강수량과 빈번한 강수가 발생하는 시점에서 그 최대 피크를 두고 여름철 내에 약 2.5번의 최대값과 최저값을 가진다.

5. 극한 강수 발생 시 계절 안 주기 순환장 분석

여름철(6~8월) 우리나라의 극한 강수 발생시 주변 종관장 및 전구적인 순환의 특성을 알아보기 위해 평년(1981~2010)의 일평균 강수량의 90퍼센타일 값을 구하여 그 이상이 되는 날들의 일수와 그 해의 여름철 평균 강수량을 Figure 7에 제시하였다. 가장 많은 일수를 나타내는 해는 1985년과 2002년으로 4일에 해당하며 그 다음으로 1979년, 1989년, 1997년, 1999년, 2000년, 2009년, 2011년으로 3일로 나타난다. 가장 낮게 나타난 해로는 1981년, 1984년, 1988년, 1992년, 1994년, 2007년, 2010년, 2013년으로 0일에 해당하며 많은 부분이 라니냐 해에 해당하기도 한다. 극한 강수가

Figure 7. Extreme(90 percentile) rainfall days(bar) and JJA mean rainfall(line) over South Korea during 1979-2013 summer(June to August).

Figure 8. Composite maps of intraseasonal OLR(shading), 850hPa(blue), and 200hPa(red) geopotential height anomalies during extreme rainfall events over South Korea(1979-2013 summer(June to August)).

발생할 때 많은 강수량으로 이어지긴 하지만 위의 그림으로부터 반드시 다우인 해와 극한강수일이 많은 해가 일치하지는 않는 것을 알 수 있다. 최근 5년간을 살펴보면 2009년과 2011년 7월에 강수의 증가경향을 보였던 해에 3일의 극한 강수일이 나타났으며 2010년과 2013년은 극한 강수일은 0일로 나타났다.

극한 강수가 발생할 때의 우리나라 및 주변 그리고 대규모 계절안 주기의 순환장의 특성을 파악하기 위해 우리나라 60개 관측지점 평균 일 강수량의 여름철(6~8월) 동안 90퍼센타일 이상이 나타나는 날들의 계절안 주기 합성도를 상하층 고도장 및 외향장과복사 자료를 이용해 Figure 8에 제시하였다. 대류활동의 경우 북서태평양 지역에 활발한 지역이 자리 잡고 있으며 그 남쪽과 북쪽으로는 반대로 건조구역이 위치한다. 그리고 한반도를 중심으로 강한 대류활동 구역이 위치하여 남북으로 발달된 대류구역의 발산-수렴 구조는 계절안 주기의 북서태평양 몬순이 활발할 때 나타나는 구조와 아주 유사한 형태를 보인다(Moon *et al.*, 2013). 단, 북서태평양 지역에서의 대류구역이 북서태평양 몬순지수에 의한 경우보다 필리핀 북쪽에 위치하며 남북으로의 대류-건조-대류 구역의 tripole 구조가 보다 조밀하게 나타난다.

하층(850hPa) 고도장은 우리나라를 중심으로 남동쪽에 고기압성 순환, 남서쪽에 저기압성 순환 아노말리가 발생하며 북태평양에 풍하층 wave-train 형태가 나타난다. 상층 고도장은 우리나라를 중심으로 강하게 발달한 고기압성 순환 아노말리가 한반도의 중심을 덮고 있으며 그 북동쪽 방향으로 하층과 순압구조를 이루며 wavetrain 형태의 구조로 나타나고 있다. 이러한 상하층의 순환 구조에서는 하층에서 유입되는 남서기류로부터의 따뜻한 수증기가 남서저기압-남동 고기압 사이로 유입되기 쉬우며 상하층 고도에 따른 연직 경압구조로 인해 우리나라 부근에 극한 강수를 유발하게 되는 특징을 보여준다. 따라서, 여름철 지역적인 강수현상 발생 시 보다 넓은 대규모적 순환에서의 배경순환이 충분한 양의 열과 수증기를 더 공급하게 되면 극한 강수현상이 발생하기 더 쉬운 조건을 만들게 될 것으로 본다.

6. 요약 및 결론

우리나라 여름철 강수의 분포 및 특성, 그리고 변화에 관한 연구는 많은 연구자들에 의해 분석된 바 있다. 본 연구에서는 이전 연구들을 바탕으로

이상적인 기후 현상과 함께 매해 기록적인 강수량을 갱신했던 최근 5년(2009~2013년)에 대한 강수 특성을 분석하였다.

1979년부터 2013년까지의 장기간 관측자료를 통해 우리나라 여름철 월별 강수량의 변동 특성을 분석한 결과, 1998년 이후로 7월과 8월이 대조적인 구조를 이루며 격년 변동하는 모습이 뚜렷하였다. 2009년과 2011년은 우리나라를 중심으로 강수량의 증가경향이 7월에 뚜렷하게 나타났고 2010년과 2012년은 8월에 현저하였다. 즉, 격년 별로 7월과 8월의 강수 최대값이 발생하였다. 2013년은 가뭄이 지속되었던 8월에 현저한 강수감소 구역이 한반도를 중심으로 위치하였다. 우리나라 강수 증가가 발생한 시기에는 7월과 8월에 각각의 고유 특성이 있긴 하지만 공통적으로 나타난 특징은 적도 부근 서태평양에서의 강수역이 발달하고 우리나라 동쪽으로 고기압성 순환이 존재하였다. 8월에는 이러한 분포와 함께 우리나라 북서쪽 저기압성 순환이 함께 발달하여 남쪽으로부터의 수증기 유입이 용이한 구조를 보였다.

계절안 주기로 분리된 우리나라 강수지수는 일 강수량의 빈도, 강도에 따라 여름철 내 약 2회 나타났다. 2013년을 제외한 나머지 해에서 인도몬순과 북서태평양 몬순은 시간지연을 두고 인도몬순보다 약 5~10일 후에 북서태평양 몬순이 진행하는 구조를 보였으며 계절안 주기 우리나라 강수지수와도 시간지연을 두고 나타났다. 계절안 진동이 가장 뚜렷한 2009년과 2011년에서 2009년은 인도몬순이 양의 지수로 발생한 약 5일 뒤에 우리나라 계절안 주기 강수의 양의 지수값이 나타났고 2011년은 북서태평양 몬순이 발달한 약 5일 뒤에 우리나라 계절안 강수의 양의 지수값이 나타났다.

우리나라 지역의 극한 강수(90퍼센타일 이상) 발생 시, 계절안 주기에서는 북서태평양 지역에 강수구역이 발생하고 그로부터 북쪽으로 건조한

지역이 위치하는 강수구역의 남북 tripole 구조형태를 보였다. 이와 관련된 상하층 순환은 우리나라를 중심으로 남동쪽에 고기압성 순환, 북서쪽에 저기압성 순환이 하층에서 발달하며 상층에서는 우리나라를 중심으로 강한 고기압성 순환이 위치하여 연직으로 경압성 순환이 발달하고 풍하층으로는 wavetrain 형태의 순압구조가 생성된다. 따라서 우리나라 부근에 극한 강수는 북서태평양으로부터 유입되는 충분한 양의 열과 수증기, 그리고 상하층의 경압성 구조에 의해 발생하게 되는 것으로 나타났다.

여름철 강수 및 극한 강수의 특성 및 변화 경향은 앞으로도 지속적으로 연구되어야 할 부분이며 적도 지역으로부터의 계절안 주기의 영향 또한 심도 있는 연구가 추가적으로 필요할 것으로 본다.

사사

이 논문은 2012년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.2012R1A1A2005137)이며 기상청 이상기후 대응을 위한 장기예보 서비스 체계 구축 사업의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- Adler, R. F., Huffman, G. J., Chang, A., Ferraro, R., Xie, P., Janowiak, J., Rudolf, B., Schneider, U., Curtis, S., Bolvin, D., Gruber, A., Susskind, J. and Arkin, P., 2003, The Version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979-Present), *Journal of Hydrometeorology*, 4, 1147-1167.
- Annamalai, H. and Sperber, K. R., 2005, Regional heat

- sources and the active and break phases of boreal summer intraseasonal(30-50 day) variability. *Journal of Atmospheric Sciences*, 62, 2726-2748.
- Choi, G. Y., Kwon, W. T., Boo, K. O., and Cha, Y. M., 2008, Recent spatial and temporal changes in means and extreme events of temperature and precipitation across the Republic of Korea. *Journal of Korean Geographical Society*, 43(5), 681-700.
- 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 and Applied Climatology*, 102, 275-286.
- Choi, Y. E., 2002, Changes on frequency and magnitude of heavy rainfall events in Korea, *Journal of the Korean Data Analysis Society*, 4(3), 269-282.
- Choi, Y. E., 2004, Trends on temperature and precipitation extreme events in Korea, *Journal of the Korean Geographical Society*, 39(5), 711-721.
- Choi, Y. E., Lee, H. S. and Kwon, J. I., 2013, Recent change on frequency-magnitude of summer extreme rainfall events over the Republic of Korea, *Journal of the Korean Association of Regional Geographers*, 47(1), 83-97(in Korean).
- Chung, Y. S. and Yoon, M. B., 2000, Interpretation of recent temperature and precipitation trends observed in Korea, *Theoretical Applied Climatology*, 67, 171-180.
- Chung, Y. S., Yoon, M. B. and Kim, H. S., 2004, On climate variation and changes observed in South Korea, *Climate Change*, 66, 151-161.
- Duchon, C. E., 1979, Lanczos filtering in one and two dimensions, *Journal of Applied Meteorology*, 18, 1016-1022.
- Heo, I. H., Jeong, J. H. and Lee, S. H., 2014, Changes of disaster regions by heavy rainfall in South Korea. *Climate Research*, 9(2), 93-106(in Korean).
- 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.
- IPCC, 2013, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working group 1 contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Kalnay, E. and Co authors, 1996, The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project, *Bulletin of American Meteorological Society*, 77, 437-471.
- Kang, I. S., An, S. I., Joung, C. H., Yoon, S. C. and Lee, S. M., 1989, 30-60 day oscillation appearing in climatological variabion of outgoing longwave radiation around East Asia during summer, *Journal of Korean Meteorological Society*, 25(4), 221-232.
- Lee, E. J., Jhun, J. G. and Park, C. K., 2005, Remote connections of the Northeast Asian summer rainfall variation revealed by a newly defined monsoon index. *Journal of Climate*, 18, 4381-4393.
- Lee, K. M., Baek, H. J., Cho, C. H. and Kwon, W. T., 2011a, The recent(2001-2010) change on temperature and precipitation related to normals(1971-2000) in Korea. *Journal of the Korean Association of Regional Geographers*, 45(2), 237-248(in Korean).
- 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).
- Lee, S. H., Kim, E. K., and Heo, I. H., 2011b, A study on variability of extreme precipitation by basin in South Korea. *Journal of the Korean Association of Regional Geographers*, 17(5), 505-520(in Korean).
- Liebmann, B. and Smith, C. A., 1996, Description of a Complete (Interpolated) Outgoing Longwave

- Radiation Dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 1275-1277.
- Liu, H. W., Zhou, T. J., Zhu, Y. X. and Lin, Y. H., 2012, The strengthening East Asia summer monsoon since the early 1990s, *Chinese Science Bulletin*, 57, 1553-1558.
- Moon, J. Y., Park, C. Y. and Choi, Y. E., 2011, Changes in the characteristics of summer rainfall caused by the regime shift in the Republic of Korea. *Journal of the Korean Geographical Society*, 46(3), 277-290(in Korean).
- Moon, J. Y., Wang, B., Ha, K. J. and Lee, J. Y., 2013, Teleconnections associated with Northern Hemisphere summer monsoon intraseasonal oscillation, *Climate Dynamics*, 40, 2761-2774.
- Park, C., Moon, J. Y., Cha, E. J., Yun, W. T. and Choi, Y., 2008, Recent changes in summer precipitation characteristics over South Korea, *Journal of the Korean Geographical Society*, 43(3), 324-336(in Korean).
- Wang, B. and Fan, Z., 1999, Choice of South Asian Summer Monsoon indices, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(4), 629-638.
- Wheeler, M. C. and Hendon, H. H., 2004, An all-season real-time multivariate MJO index: development of an index for monitoring and prediction. *Monthly Weather Review*, 132, 1917-1932.

책임 편집: 허인혜

영문 교열: 이은결