

# 조선 중기 이후 서울의 장마철 강수 평균과 극한강수현상의 변화

최광용\*

## Changes in Means and Extreme Events of Changma-Period Precipitation Since mid-Joseon Dynasty in Seoul, Korea

Gwangyong Choi\*

**요약 :** 본 연구에서는 조선시대 측우기(1777~1907년)와 현대적 기상장비(1908~2015년)로 측정한 강수량 자료를 종합 분석하여 서울의 장마철 강수량과 극한강수현상에 나타난 장기간 변화 양상을 밝히고자 하였다. 또한 이와 관련된 동아시아 영역의 종관 기후장에 나타난 변화 특징을 밝히고자 하였다. 약 239년 동안의 서울의 강수자료 시계열을 분석한 결과, 20세기 후반으로 올수록 장마철(6월 하순~9월 초순) 강수량이 증가하고, 경년변동성도 더 커짐을 알 수 있다. 특히 1990년대 초반부터는 장마철 중에서도 여름장마기(6월 하순~7월 중순)와 장마 휴지기(7월 하순~8월 초순)에 극한강수현상 중심의 강수량이 뚜렷하게 증가하면서 장마기의 구분이 모호해지고 있음을 알 수 있다. 이와 관련하여 변화가 뚜렷한 1990년 전후의 상층 종관기후장을 비교해 보면, 최근에는 북서태평양 주변의 해수면 온도가 상승하고 북태평양 아열대 고기압 강도가 강화되어 해양성 기단이 한반도 방향으로 더 확장하고, 유라시아 대륙 내부 몽골 지역을 중심으로 강한 고기압 편차핵이 형성되면서 고위도로부터 기류가 더 활발하게 유입되고 있음을 알 수 있다. 즉, 서로 다른 성질의 기류들이 강해지면서 이들 기류들이 만나는 북서태평양 연안 지역에 상승 기류 흐름이 활발해지면서 최근에는 서울의 장마철 강수 평균 및 극한강수현상이 증가하였다고 할 수 있다.

**주요어 :** 서울, 측우기, 장마, 극한강수현상, 종관 기후장

**Abstract :** In this study, long-term changes in means and extreme events of precipitation during summer rainy period called Changma (late June-early September) are examined based on rainfall data observed by Chukwooki during Joseon Dynasty (1777-1907) and by modern rain-gauge onward (1908-2015) in Seoul, Korea. Also, characterizations of the relevant changes in synoptic climate fields in East Asia are made by the examination of the NCEP-NCAR reanalysis I data. Analyses of 239-year time series of precipitation data demonstrate that the total precipitation as well as their inter-annual variability during the entire Changma period (late June-early September) has increased in the late 20th century and onward. Notably, since the early 1990s the means and extreme events during the summer Changma period (late June-mid-July) and Changma break period (late July-early August) has significantly increased, resulting in less clear demarcations of sub-Changma periods. In this regard, comparisons of synoptic climate fields before and after the early 1990s reveal that in recent decades the subtropical high pressure has expanded in the warmer Pacific as the advection of high-latitude air masses toward East Asia was enhanced due to more active northerly wind vector around the high pressure departure core over Mongolia. Consequently, it is suggested that the enhancement of rising motions due to more active confluence of the two different air masses along the

이 연구는 2015학년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원 사업에 의하여 연구되었음.

\* 제주대학교 지리교육전공 부교수(Associate Professor, Major of Geography Education, Jeju National University), tribute@hanmail.net

northwestern borders of the Pacific might lead to the increases of the means and extreme events of Changma precipitation in Seoul in recent decades.

**Key Words** : Seoul, Chukwooki, Changma, extreme precipitation events, synoptic climate field

## 1. 서론

우리나라 연강수량의 대부분은 여름에 집중되어 나타나고 특히 장마철 장마전선이 한반도에 수일 간격으로 불규칙하게 정체할 때 집중호우 형태로 큰 피해를 가져온다(이병설, 1983). 이러한 장마철 집중호우 현상은 장기간 역사적으로도 매해 여름철에 반복적으로 나타나는 전형적인 계절기후현상이다. 한반도 고대와 중세 시대의 역사를 기록한 〈삼국사기(三國史記)〉와 〈고려사(高麗史)〉 오행지 등에서도 장마철에 나타난 홍수(大水)와 가뭄(大旱) 등의 극한강수 기록을 다수 찾아볼 수 있다(기상청, 2014). 삼국시대(김연옥, 1983; 1992; 박창용·이혜은, 2007; 윤순옥·황상일, 2009)와 고려시대(김연옥, 1984a; 1992; 윤순옥·황상일, 2010)의 강수를 분석한 연구결과들에 따르면, 각 왕조말로 갈수록 가뭄과 홍수 등의 극한강수현상이 많이 발생하였음을 짐작할 수 있다. 조선시대에 접어들면서 기상 기후현상을 기록한 역사서(예. 조선왕조실록)의 양이 증가하여 다양한 연구들이 가능하게 되었다. 그러나 이와 관련된 대부분의 연구들(예. 김연옥, 1984b, 1987; 전종갑·문병권, 1997; Kim, 2000; 박정규 등, 2001; 임규호·심태현, 2002; Yoo *et al.*, 2015)은 역사서에 나타난 극한강수 현상을 지칭하는 용어의 출현빈도를 분석하는데 그쳐 실제 강수량이나, 그 지속기간, 발생 강도 등에 대한 상세한 연구들은 이루어지지 못하였다(최지영·박민규, 2013).

우리나라에서 실제 강수량에 관한 정보를 알 수 있게 된 것은 조선시대 세종 23년(1441년) 호조(戶曹)를 중심으로 측우기를 고안하면서 부터이다. 〈세종실록(世宗實錄)〉에 따르면 조선의 측우기 기반 우량 측정 제도는 1442년 5월에 확립되었고, 전국 팔도와 군

현을 중심으로 14개 지점에 강우 관측망이 구축되었다. 측우기를 설치하면서 조선시대의 주요 산업인 농업활동에 큰 영향을 미치는 가뭄, 홍수 등의 극한강수 현상에 관한 정량적인 정보들을 농민들에게 제공할 수 있게 되었다. 이러한 조선시대 측우기 관측망은 인도, 팔레스타인, 중국의 사례와 더불어 세계에서 오래된 우량계에 속한다(Strangeways, 2010). 그러나 16~17세기 왜구의 침략에 의한 임진왜란, 병자호란 등의 전란을 겪으면서 측우기 강우관측이 중단되었고, 이전의 측우기 관측 자료들도 대부분 소실되었다. 영조 이전의 측우기 관측 기록은 일부만이 조선왕조실록이나 특정인의 일기 속에 드물게 남아 있다(부경은 등, 2006; 기상청, 2014; 조하만 등, 2015). 18세기 후반 영조 46년(1770년 5월 1일)에 접어들어 서울 궁궐(창덕궁의 중희당과 창경궁의 규장각), 관상감(본감, 분감), 서울 감영(서대문밖)과 강화와 개성 등 양도 그리고 공주, 대구, 전주, 원주, 해주, 평양, 함흥 등 총 14개 지점을 중심으로 측우기가 다시 설치되면서 강우량 관측이 부활되었다. 이후 19세기 후반까지 20여개로 관측지점이 늘었는데, 이 중 관측의 누락이 거의 없이 오늘날 확인할 수 있는 측우기 관측 기록은 〈승정원일기(承政院日記)〉에 남아 있는 18세기 후반 영조 이후 왕이 머물던 왕궁에서 관측한 서울 지점 자료이다.

일제강점기에 접어들어 개항장을 중심으로 일본이 자원 수탈의 목적으로 현대적인 기상 관측기기를 설치하기 시작하였다. 인천관측소의 총감독이었던 와다유지(和田雄治)는 이러한 현대적 관측 이전에 수백 년 전부터 이미 조선의 독자적인 측우기 기반 강우량 측정 노력이 있었음을 인지하였다. 그는 조선 측우기 관측망의 우수성을 국제 학술지에 소개하였고(Wada, 1911a; 1911b), 일본 관저에서 관측한 1개년(1907) 자료와 비교하여 월단위로 보정한 측우기

자료를 모아 보고서로 발간하기도 하였다(와다유지, 1917). 이후 이 자료에 대해 일부 일본 학자(Arakawa, 1956)와 국내 학자들(정창희, 1969; 이병설, 1970; 조희구·나일성, 1979; 김연옥, 1985; Kim and Ha, 1989)이 관심을 두었으나, 현대적인 관측 자료를 분석한 연구결과물들에 비해서는 상대적으로 연구 논문들의 수가 적었다.

이러한 측우기 자료의 과학성이 재조명을 받게 된 것은 1990년대에 접어들어서이다. 서울대학교 대기과학전공 연구팀들에 의해 원문 자료가 디지털화되면서 와다유지의 보정 자료의 객관성에 의문을 제기하였다(Lim and Jung, 1992; 정현숙 등, 1999). 이후 원문을 분석하여 월 단위로 복원된 새로운 자료를 바탕으로 강수 변동성에 관한 다양한 연구결과들이 보고되기 시작하였다(Lim, 1992; Lim and Jung, 1992; 정현숙·임규호, 1994; 조신섭 등, 1996; 전종갑·문병권, 1997; 정현숙 등, 1999; Jung *et al.*, 2001; 유철상, 2000; 정현숙 등, 2000; Yoo, 2006; 김기욱 등, 2007; Kim *et al.*, 2010). 2000년대에 접어들어서는 계절 단위 강수량뿐만 아니라 일별 자료를 바탕으로 한 가뭄 및 호우사상 등의 극한강수현상에 대해 분석한 결과들이 보고되기 시작하였다(유철상 등, 2000, 2007; 유철상·유소라, 2003; Wang *et al.*, 2006; 김대하 등 2007; 연제문 등, 2007; Byun *et al.*, 2008; 박민규 등, 2010; Kim *et al.*, 2009, 2011; 임규호 등, 2012). 그러나 이들 연구들은 대부분 기상학적인 관점에서 특정 호우 사례를 분석하는데 초점을 두었고, 장기간 기후변화적 관점의 정보는 매우 드물게 제시되었다. 특히, 일부 측우기 자료를 분석한 연구들(예, Ha and Ha, 2006; Yoo, 2006; Wang *et al.*, 2006; 2007; 황석환 등, 2009b; 2009d; 황석환 등, 2010)과 현대적인 자료에서 밝혀진 20세기 후반의 우리나라 여름철 강수의 변화 양상(Choi *et al.*, 2008; 문자연 등, 2011; 최광용, 2015)을 결합하여 통합적인 시각에서 강우의 장기간 변화를 살펴본 연구 결과는 드물다.

본 연구의 목적은 지난 239년 간(1777~2015) 서울의 조선시대 측우기 및 20세기 초반 이후 현대적 기상관측기에서 측정된 일강수량 자료를 종합적으로 분석하여 장기간 관점에서 조선 중기 이후 우리나라

중부지방의 여름철 계절 내(여름장마기, 장마휴지기, 늦장마기, 장마기간 전체) 강수량 및 호우사상의 변화 특징을 밝히는 것이다. 또한, 본 연구에서는 이러한 장기간 시계열에 나타난 변화 시점 전후의 상층 중관기후장에 나타난 변화 특징을 밝히고자 하였다.

## 2. 연구자료 및 연구방법

본 연구에서는 과거 239년간(1777~2015년) 서울에서 6~9월 동안 관측된 조선시대 영조이후 측우기 기반 관측망 자료(1777~1907년)와 현대적인 기상관측망 강수량 자료(1908~2015년)를 종합적으로 분석하였다. 영조 시대 이후부터 일제강점기 이전까지 강우량 자료는 왕이 주로 머물던 창덕궁과 일부 경희궁에 설치된 높이 1척 5촌(약 30cm), 지름 7촌(약 14cm) 철제 원통으로 된 측우기에서 관측한 강우량 자료이다(Figure 1a). 승정원일기에서 발견되는 영조시대 첫 관측기록에서도 볼 수 있듯이(Figure 1b), 측우기 자료는 연속된 각각의 강수현상에 관하여 주척(周尺)으로 측정된 누적 강수량과 강수의 시작 및 종료 시각을 기록하고 있다. 주척의 측정 단위인 척(尺), 치(寸), 분(分)은 오늘날의 단위로 환산하면 각각 약 200mm, 20mm, 2mm에 해당한다. 이와 더불어 일제강점기 이후부터 오늘날(1908~2015년) 서울특별시 종로구 송월동에서 현대적 관측기기로 관측한 24시간(0~24시) 일별 누적 강수량 자료를 분석하였다. 시계열 자료 구축 시 측우기 기반 강수량 최소 관측 단위는 1푼(약 2mm)이므로 0.1mm 단위로 측정 하는 20세기 초반 이후의 오늘날의 근대 측기 기반 관측 자료에서 2mm 미만 기록은 제외하였다. 현대적 관측 자료에는 한국전쟁이 있었던 시기(1950년 9월~1953년 10월)에는 강수량 관측이 중단된 시기가 있으므로 시계열 분석에서 제외하였다.

분석에 사용한 측우기 자료는 서울대학교 대기과학전공에서 영조 이후 기록을 디지털화한 일별 강우량 자료이다. 측우기 자료에는 초봄과 늦가을의 강설 기록은 누락되어 있으므로(정현숙·임규호, 1994),

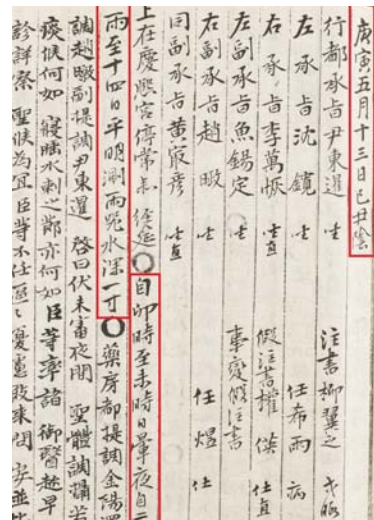
본 연구에서는 이러한 영향이 거의 없는 6~9월의 강수량만을 분석하였다. 이 디지털 자료를 분석한 기존 연구 결과들(황석환 등, 2009a; 2009b)을 살펴보면 측우기 자료와 2mm 이상의 현대적 여름철 누적 강수량 간 등질성에는 큰 문제가 없음을 알 수 있다. 실제 측우기와 현대적 관측이 이루어진 장소도 수 킬로미터 이내이다. 그러나 서울대학교에서 디지털화한 자료는 누적 강수량을 강우 지속 시간으로 균등하게 나눈 시간자료로 실제 1일 이내 각 기간별 호우 발생 시간동안 강우특성은 불확실성이 포함되어 있다(Lim and Jung, 1992). 측우기 기록의 음양력 변환 등 상세한 자료 디지털화 과정에 관한 사항은 Lim and Jung (1992)과 정현숙·임규호(1994)를 참고하기 바란다.

본 연구에서는 장마철 기간(6월 하순~9월 초순)을 크게 여름장마기(6월 하순~7월 중순), 장마휴지기(7월 하순~8월 중순), 늦장마기(8월 하순~9월 초순)로 구분하여 지난 239년 간(1777~2015년)의 강수량과 극한강수현상의 시계열 자료를 구축하였다. 장마철 세부 기간은 연구기간 전체 자료를 일별로 평균

한 후 이 일별 시계열에서 강수변화가 뚜렷한 시점을 찾아 6월 22일~7월 18일을 여름장마기, 7월 19일~8월 10일을 장마휴지기, 8월 11일~9월 14일은 늦장마기로 구분하였다. 이러한 구분은 대체로 기존 연구들(예, Wang *et al.*, 2007)에서의 구분한 것과 거의 유사하다. 극한강수분석에는 강수량을 강수일수로 나눈 강수강도뿐만 아니라 장기간 평균적인 연중 2일 이상 다중일 95퍼센타일 이상 강수량 값을 사용하였다. 95퍼센타일의 이상 누적강수량 산출시 측우기 강수량 자료는 강우시작 시각과 종료시각 그리고 누적강수량을 표기되어 있어서, 서울대학교에서 디지털화한 자료는 강수량을 강우지속시간으로 나누어 균등배분한 후 일자료로 변환한 것이다. 즉, 서울대학교 측우기 일자료를 그대로 사용하면 특정 시간에 집중되는 극한강수현상의 특성이 다소 누락되어 측우기 관측 자료와 현대적 관측자료 기간의 특성이 달라질 수 있다(Kim *et al.*, 2007). 따라서 본 연구에서는 이러한 극한강수집중 효과의 영향을 배제하기 위해 다중일 누적강수량을 바탕으로 95퍼센타일을 산정한 후 누



(a)



(b)

Figure 1. Chukwooki installed at Gongju Provincial Office during Joseon Dynasty (a) and the first record of the revived Chukwooki rainfall observation on June 6, 1770 (May 13 of King Yeongjo 46th year) appeared in Seungjungwon diary since King Yeongjo (b). Original photos were provided by the Korea Meteorological Administration and by Gyujangkak at Seoul National University, respectively

그림 1. 공주감영의 측우기(a)와 승정원일기에 처음 기록된 영조 46년 5월 13일(1770년 6월 6일) 측우기 강우량 관측 기록(b)

적강수량을 산출한 후 다시 일단위로 보정하기 위해 전체 누적일 수로 나눈 값을 사용하였다. 상대적 임계치 산정치 표준 연도는 겨울철 일자료까지 불확실성이 거의 없는 현대적 관측기기에 의해 관측한 최근 100년(1911~2010년) 자료로 하였다. 장마철 강수량과 극한강수현상의 변화율을 정량화하기 위해 세계 열 자료에 나타난 일차추세선의 기울기 값을 'mm/10년' 또는 '일/10년' 단위로 환산하였다. 이때 이러한 일차추세선 기울기 값에 대하여 비모수검정법인 Kendall's tau 검정을 하여, p-value가 0.05 이하인 경우(95% 이상의 통계적 유의성) 해당 변화추세가 통계적으로 유의미한 것으로 간주하였다.

한편, 전체 연구기간(1777~2015년) 중 서울 장마철(6월 하순~9월 초순) 강수량 평균과 극한강수현상이 모두 높게 나타난 시점을 찾아서 전후 장기간 평균 종관장을 비교 분석하였다. 장마철 강수량과 극한강수현상이 장기간 평년에 비해 많으면서 증가 규모가 가장 큰 20세기 후반의 변화시점을 정하기 위해 1970년대 이후의 매년 기준 장마철 전체 및 세부 시기별 강수량을 두 개의 그룹으로 나눈 뒤 기존 연구들에서 널리 사용되었던 Mann Whitney U 검정을 실시하여 통계적 유의성의 평균값이 가장 높은 연도를 추출하였다. 이후 이와 같이 결정된 변화시점을 중심으로 장마철 전체 및 세부 시기별(여름장마기, 장마휴지기, 늦장마기)의 동아시아 영역(80~180°E, 20~70°N)의 상층 종관장 자료를 분석하였다. 종관분석에는 NCEP-NCAR reanalysis I 자료(Kalnay *et al.*, 1996)를 사용하였는데, 이 자료는 1948년부터 자료가 가용하나 상층 관측의 수가 적은 1957년 이전 자료는 다소 불확실성이 크다고 판단되어 1958년 이후의 자료만 분석에 포함시켰다. 우선 강수현상의 강화와 관련하여 대류권 하층 수증기 이류(advection) 현상에 나타난 변화 양상을 살펴보기 위해 변화시점 전후의 장마철 세부 시기별 장기간 평균적인 850hPa 바람의 동서성분(u-wind)과 남북성분(v-wind)의 편차를 합성한 바람벡터(wind vector) 그리고 비습(specific humidity)과 가강수량(precipitable water)의 편차 분포를 살펴보았다. 이후 대류권 평균적인 대기 상태의 변화를 변화시점 전후의 장기간 평균적인 장마철 세부 시기별

500hPa의 기온 및 지오폠펌셜 고도를 분석하였다. 또한 변화시점 전후의 강수현상의 강약에 영향을 주는 열역학적 상하층 간 연직 흐름의 변화를 살펴보기 위해 500hPa 오메가(omega,  $\omega$ ) 값을 분석하였다. 오메가( $\omega$ )값이 음(-)일 때에는 해당 지역에 주로 저기압성 흐름과 관련된 양(+)의 왜도(vorticity)의 수평적 이동이 있거나, 따뜻한 열적 수평적 이동이 더 활발해지면서 강수현상과 관련된 대기의 상승기류도 더 강하게 발달하게 된다. 오메가( $\omega$ )값이 양(+)일 때에는 반대 경향이 나타나면서 하강기류에 의해 강수현상이 둔화되는 경향을 보인다. 마지막으로 장마철 평균 대류권 상층의 제트 기류의 위치 변화를 살펴보기 위해 Frauenfeld and Davis(2003)의 연구 결과를 바탕으로 300hPa상의 9360m 지오폠펌셜 고도의 위도 상 위치를 비교하였다. 부가적으로 대기 중 수증기 공급에 영향을 미치는 해양의 역할을 살펴보기 위해 NOAA OISST V2 자료를 바탕으로 서태평양의 해수면 온도(sea surface temperature, SST) 변화를 살펴보았다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 1) 장마철 강수량과 강수일수 변화

연구기간 전체(1777~2015년) 서울의 장마철(6월 하순~9월 초순) 강수량의 5년 이동평균 시계열을 살펴보면 18세기 중엽~19세기 후반까지는 십년주기 증감 패턴이 반복적으로 나타나지만, 뚜렷한 장기간 변화추세는 관찰되지 않는다(Figure 2a). 19세기 후반 이전 장마철 강수 기록들을 살펴보면 1787년 1219.8mm, 1821년 1487.3mm, 1846년 1388.6mm, 1879년 1459mm으로 우리나라 평균 연강수량보다 많은 해들도 있었다. 반면 19세기 후반 이전 장마철 강수량이 적은 해에는 대체로 300mm 내외로 장기간 평균값의 50% 이하로 나타났다. 그러나 19세기 후반 약 30년 동안(1880년대~1900년대)에는 서울의 장마철 강수량이 뚜렷하게 감소하여 소우기를 형성하였다. 가령, 장마철 강수량은 1888년에 201.1mm, 1901년에는 139.6mm

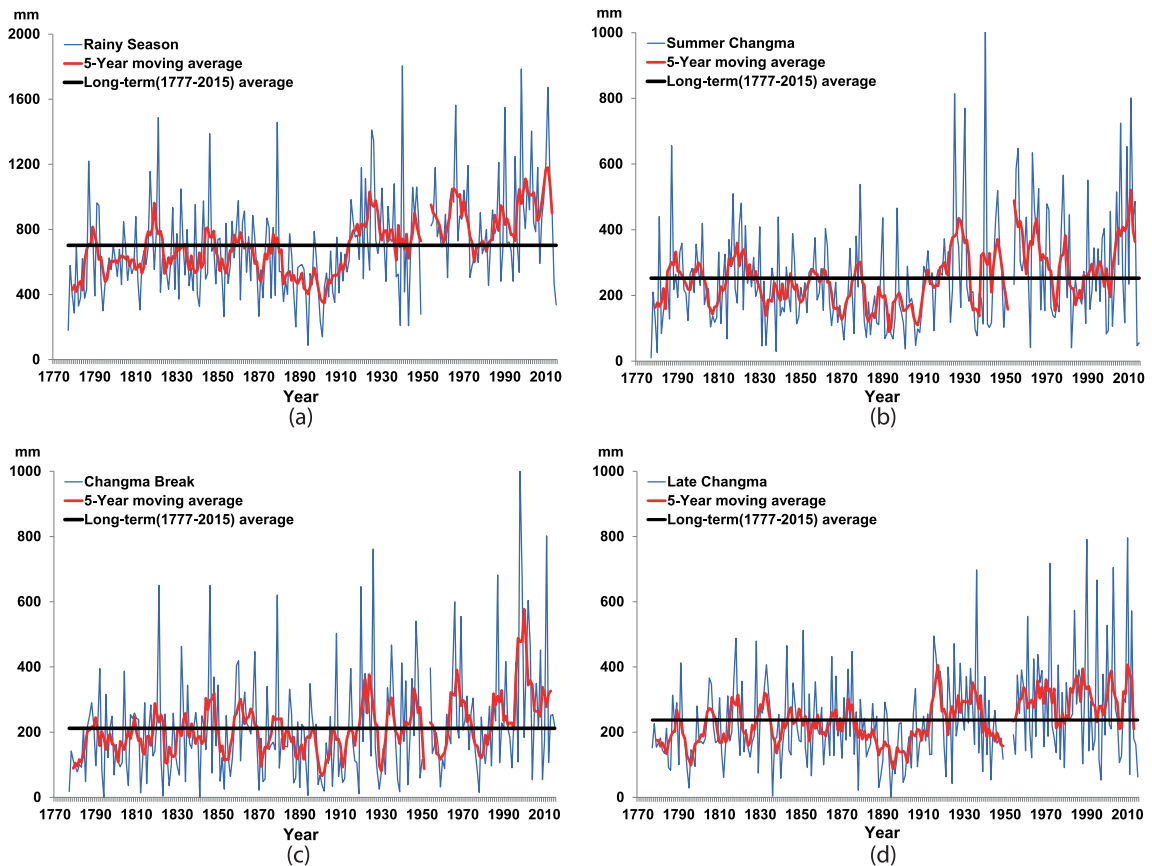


Figure 2. Inter-annual variations of Changma-period precipitation totals exceeding 2mm in Seoul, Korea for the last 239-year (1777~2015) period: (a) the entire Changma period (late June~early September), (b) summer Changma period (late June~mid-July), (c) Changma break period (late July~early August), and (d) late Changma period (mid-August~early September)

그림 2. 지난 239년간(1777~2015년) 서울의 장마철 강수량 경년변화: (a) 장마철 전체(6월 하순~9월 초순), (b) 여름장마기(6월 하순~7월 중순), (c) 장마휴지기(7월 하순~8월 초순), (d) 늦장마기(8월 중순~9월 초순)

을 기록하였고, 특히 1894년 장마철 강수량은 88mm로 연구기간 전체 기간 동안 최솟값에 해당한다. 그러나 그 이후에는 십년변동 폭이 증가하면서 20세기 후반으로 올수록 장마철 강수량은 증가하는 장기간 변화 추세를 보였다. 장마철 강수량은 1890년대 중반부터 1920년대 중반(1894~1925년) 동안 +191.9mm/10년 비율로 증가하였고, 19세기 중반 이후 전체 기간(1894~2015년) 동안에는 +10.5mm/10년의 통계적으로 유의미한 증가 추세를 보였다. 20세기 후반에는 장마철 강수량이 더 증가하였는데, 특히 1970년대 중

반이후부터 21세기 초반(1973~2011년)에는 105.3mm/10년 비율로 증가하는 추세를 보였다. 또한, 연구기간 전체 중 장마철 30년, 20년, 10년 평균 강수량이 가장 많았던 기간은 각각 1984~2013년(955mm), 1994~2013년(1006mm), 2003~2012년(1066mm)으로 모두 1990년대에 접어들어 나타났다. 이는 우리나라 전체 1970년대 이후의 현대적 관측망 자료를 분석한 이전 연구들(Choi *et al.*, 2008; 문자연 등, 2011; 최광용, 2015)에서 밝힌 20세기 후반의 강수 증가현상은 수백년 이상의 측우기 자료를 고려한 경우에도 이례적인

현상임을 가리킨다.

장마철 각 세부 시기별 시계열 자료를 살펴보면 19세기 말까지는 십년변동에 의해 평균값의 극값들이 주기적으로 발생하는 패턴을 보였으나, 장기간 점진적인 증가 또는 감소 추세는 나타나지 않았다(Figures 2b-d). 20세기 이전 여름장마기 강수량은 1787년에 656.2mm, 1897년에 538mm, 1817년에 509.9mm로 장기간 평균의 2배 이상으로 많았고, 반대로 1777년, 1780년, 1831년, 1833년, 1838년에는 장기간 평균 대비 20% 이하로 매우 적었다. 장마휴지기의 강수량은 20세기 이전에는 경년변동성이 뚜렷하여 1794년과 1841년에는 강수량이 전혀 기록되지 않았으나, 1821년에는 650.4mm, 1846년에는 649.9mm, 1879년에는 620.5mm로 장기간 평균에 비하여 약 3배에 달하는 많은 강수가 기록되기도 하였다. 20세기 이전 늦장마기 강수량은 1795년, 1836년, 1878년, 1888년, 1894년에는 장기간 평균의 20% 이하로 매우 적었고, 특히 1894년에는 2mm 이상 강수현상이 전혀 기록되지 않았지만, 1818년에는 488.1mm, 1828년에는 479.2mm, 1851년에는 512.1mm로 장기간 평균의 2배에 달하였다. 또한, 19세기 후반 이후 약 30여년 동안의 늦장마기의 강수량은 여름장마기 또는 장마휴지기의 강수량 감소폭과 비교하여 더 뚜렷하게 감소하였다. 이는 19세기 후반 장마철에 소우기가 나타난 것은 장마철 세부 시기 중 주로 늦장마기의 강수가 감소한 것과 밀접한 관련성이 있음을 가리킨다.

이와 같이 뚜렷한 장기간 증감 패턴을 보이지 않던 장마철 세부 시기별 강수량은 모두 20세기에는 후반으로 올수록 점차 경년변동성이 커지면서 강수량도 통계적으로 유의미하게 증가하는 경향이 관찰된다(Figures 2b-d). 시기별로 비교해보면, 늦장마기 보다는 여름장마기와 장마휴지기를 중심으로 20세기 후반의 강수 증가 경향이 더 뚜렷하게 나타났다. 그러나 각 장마철에 강수량이 가장 많이 증가한 시점은 세부 시기별로 다르게 나타났다. 여름장마기(6월 하순~7월 중순) 강수량은 전체 연구기간 중 1920년대~1960년대, 2000년 중반 이후에 뚜렷하게 높게 나타났는데 특히, 1950대 후반과 2010년대에 장기간(1777~2015년) 평균 대비 +2.0 표준편차 이상 초과하는 값을 보

였다. 여름장마기 강수 최솟값(1022.3mm)은 집중호우에 의해 1940년에 기록되었으나, 장기간 평균 대비 3.0 표준편차 이상(520.8mm)을 나타낸 여름장마기 강수 5년 이동 평균 최솟값은 2009~2013년에 기록되었다. 반면, 장마휴지기 강수량은 1920년대 이후로 증가폭이 점차 증가하다가 1990년대 중반부터 2000년대 중반에 가장 큰 값을 보인다. 그 결과 장마휴지기 강수량 최솟값(1003.9mm)은 영향 태풍이 없었지만 집중호우에 의해 1998년에 기록되었고, 장기간 평균 대비 +4.0 표준편차 이상의 5년 이동 평균 장마휴지기 강수량 최솟값(577.1mm)도 1998~2002년 기간에 나타났다. 늦장마기 강수량의 경우에는 강수량 극값이 대체로 2000년대 초반과 2010년대에 나타났는데, 그 규모는 여름장마기와 장마휴지기에 비해 상대적으로 작음을 알 수 있다. 단일연도 늦장마기 최솟값(796.0mm)은 2010년에 기록되었고, 5년 평균 늦장마기 강수량의 최솟값(406.5mm)도 1998~2002년 기간에 기록되었으나 여름장마기와 늦장마기에 비해 장기간 평균값 기준 편차가 상대적으로 작게 나타났다. 즉, 장마기 전체 강수량이 1990년대 이후 뚜렷하게 증가하는 패턴은 주로 1990년대 중반~2000년대 중반 사이 장마휴지기 강수량 증가 그리고 2000년대 중반 이후 여름장마기의 강수량 증가 현상이 결합하여 나타난 것임을 알 수 있다.

한편, 지난 239년 간(1777~2015년) 서울의 장마철 전체(6월 하순~9월 초순) 일강수량 2mm 이상 강수일 발생빈도도 십년 주기 증감 패턴은 보이지만, 강수량 변동 추세와는 달리 장기간 증가하거나 감소하는 추세는 뚜렷하게 나타나지 않았다(Figure 3a). 연구기간 전체 장마철 평균 일강수량 2mm 이상 강수일은 약 27.7일로 십년변동에 의해 특정 해에는 극값을 보인다. 장마철 전체 일강수량 2mm 이상 강수일 발생빈도는 평년대비 1777년, 1794년, 1888년, 1894년, 1990년, 1901년, 1906년, 1919년, 1939년, 1943년에는 -2.0 표준편차 이하로 낮게 나타났고, 1787년, 1791년, 1821년, 1846년, 1860년, 1879년, 1947년, 1990년, 2003년에는 +2.0 표준편차 이상으로 높게 나타났다. 장마철 세부기간별로 장기간 평균 일강수량 2mm 이상의 강수일 발생빈도를 살펴보면, 전체 시계열

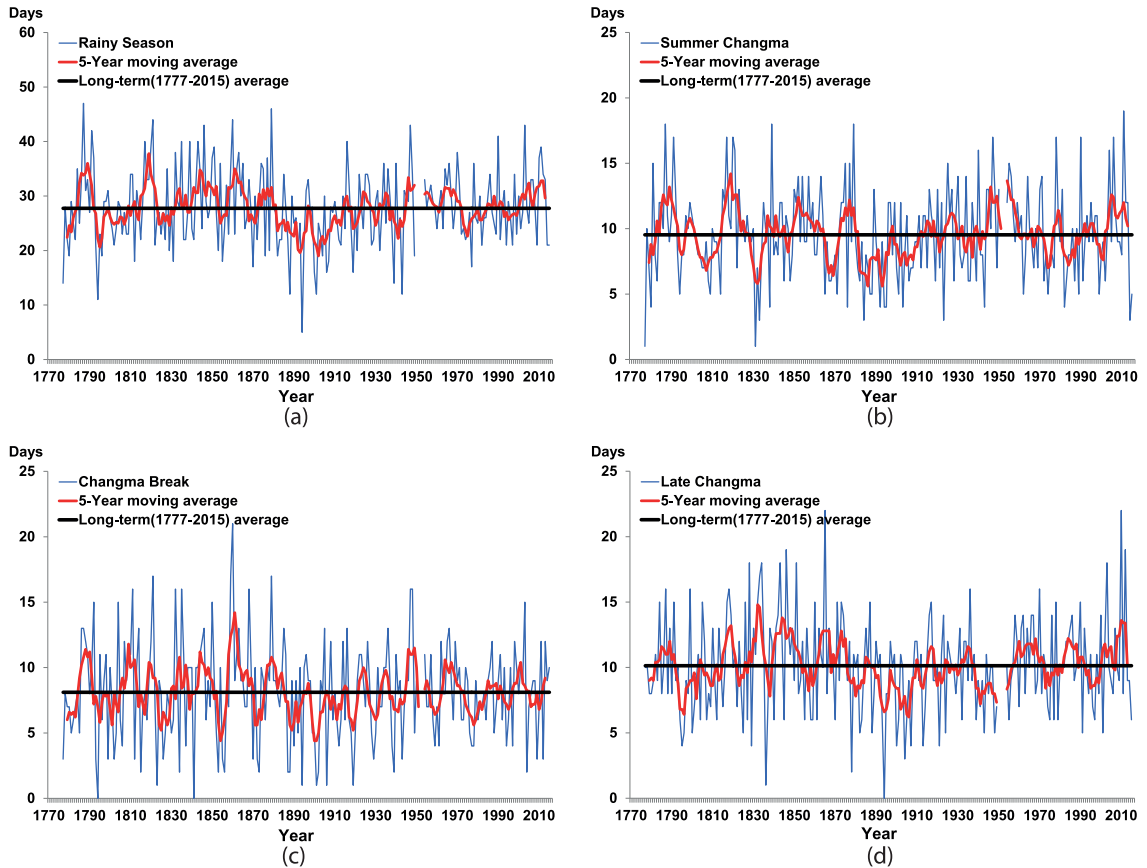


Figure 3. Same as in Figure 2, but for Changma-period precipitation days exceeding 2mm

그림 3. 지난 239년간(1777~2015년) 서울의 강수일수 경년변화: (a) 장마철 전체(6월 하순~9월 초순), (b) 여름장마기(6월 하순~7월 중순), (c) 장마휴지기(7월 하순~8월 초순), (d) 늦장마기(8월 중순~9월 초순)

과 마찬가지로 장기간 시계열에는 특별한 증가 또는 감소 추세가 관찰되지 않는다(Figures 3b-d). 장기간 평균적 발생빈도는 여름장마기에는 9.5일, 장마기 휴지기에는 약 8.1일, 늦장마기에는 약 10.1일을 나타내고 십년변동에 의해 특정 해에는 극값을 보였다. 여름장마기 일강수량 2mm 이상의 강수일 발생빈도는 1787년, 1791년, 1817년, 1839년, 1879년, 1947년, 1990년, 2006년, 2011년에는 +2.0 표준편차 이상으로 높게 나타났고, 반대로 1777년, 1831년, 1884년, 1923년, 2014년에는 -2.0 표준편차 내외로 낮게 나타났다. 장마휴지기 강수일은 1881년, 1821년, 1832년, 1835년, 1860년, 1868년, 1947년, 1948년에 +2.0 표

준편차 이상의 발생빈도를 보였지만, 1794년, 1823년, 1841년, 1894년, 1919년에는 -2.0 표준편차 내외로 발생빈도가 매우 낮았다. 늦장마기 강수일 발생빈도는 1828년, 1834년, 1843년, 1846년, 1851년, 2003년, 2010년, 2012년에는 +2.0 표준편차 이상으로 높았고, 1836년, 1878년, 1894년, 1904년에는 반대로 -2.0 표준편차 내외로 매우 낮게 나타났다.

## 2) 장마철 강수강도와 극한강수량의 변화

19세기 후반까지는 강수량을 강수일수로 나는 서울의 강수강도는 강수량의 장기간 변동 패턴과 유사



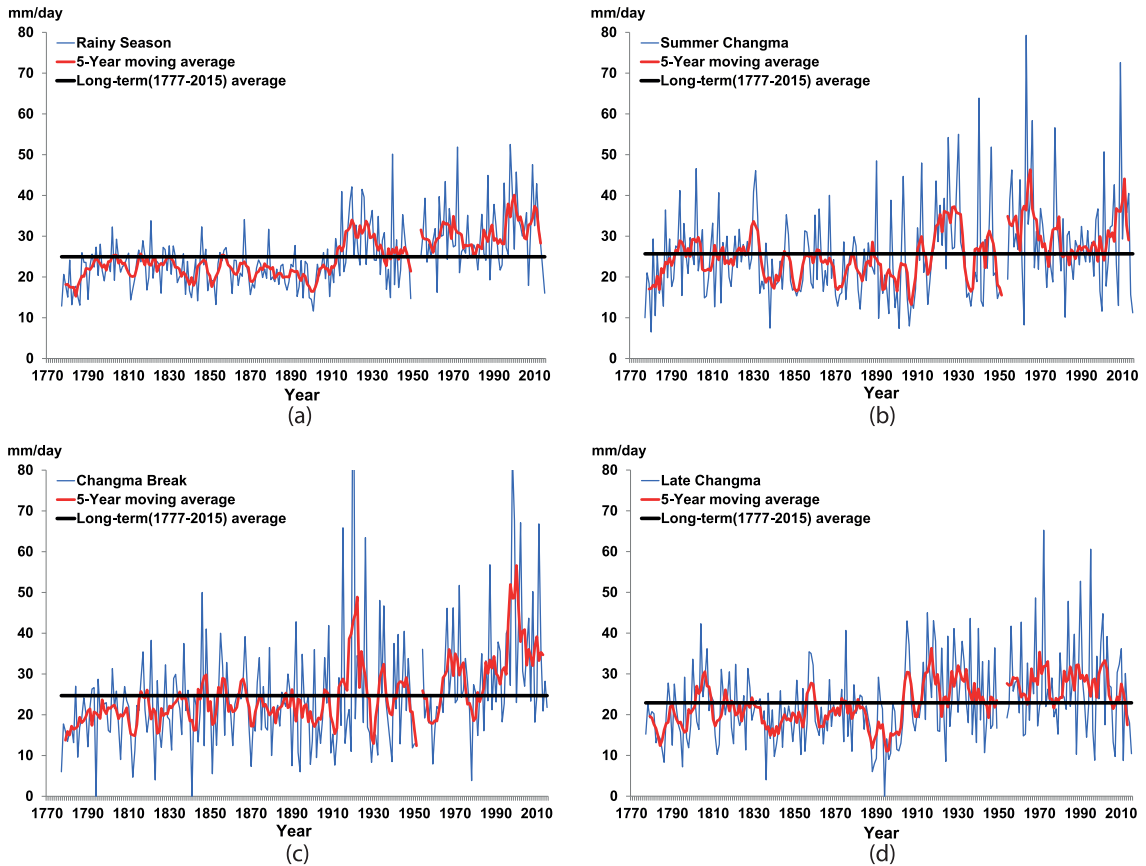


Figure 4. Same as in Figure 2, but for the average intensity of Changma-period precipitation exceeding 2mm

그림 4. 지난 239년간(1777~2015년) 서울의 장마철 2mm 이상 강수현상의 평균적인 강수강도 경년변화: (a) 장마철 전체(6월 하순~9월 초순), (b) 여름장마기(6월 하순~7월 중순), (c) 장마휴지기(7월 하순~8월 초순), (d) 늦장마기(8월 중순~9월 초순)

하게 십년변동 패턴이 나타나면서 특정해 가령, 1777년, 1782년, 1786년, 1790년, 1811년, 1844년, 1853년에 비하여 1802년, 1821년, 1846년, 1867년에는 2배 이상 높게 나타났다(Figure 4a). 그러나 20세기에 접어들면서 장마철 강수일 발생빈도에는 그 이전과 비교하여 큰 변화가 없었으나 최근으로 올수록 강수량은 증가하여 강수강도도 증가하는 패턴을 보였다. 전체 연구기간 동안(1777~2015년) 평균적으로 장마철 강수강도는 25.0mm/일 정도이지만 5년 이동 평균 시계열 자료에 따르면 1920년, 1970년, 2000년 전후의 강수강도는 이러한 장기간 평균값에 비해 뚜렷하게 높게 나타났다. 그러나 장마철 세부 기간별로 강수강

도의 변화를 살펴보면 시기별로 경년변동의 폭과 극값의 발생시기는 모두 상이함을 알 수 있다(Figures 4b-d). 대체로 늦장마기에 비해 여름장마기와 장마휴지기의 강수강도는 경년변동의 폭이 상대적으로 커서 특정연도의 강수강도는 장기간 평균에 비해 이례적으로 높게 나타났다. 여름장마기 5년 이동 평균 강수강도 시계열을 살펴보면 장기간 평균값(25.7mm/일)에 비해 1970년 전후, 2000년 전후, 1920년 전후 순으로 높은 강수강도를 나타냈다. 반면 장마휴지기 강수강도는 장기간 평균값(24.7mm/일)에 비해 1920년의 단일연도 극값의 영향으로 1920년대 전후시기에 상대적으로 높게 나타났지만, 2000년대 전후시기의

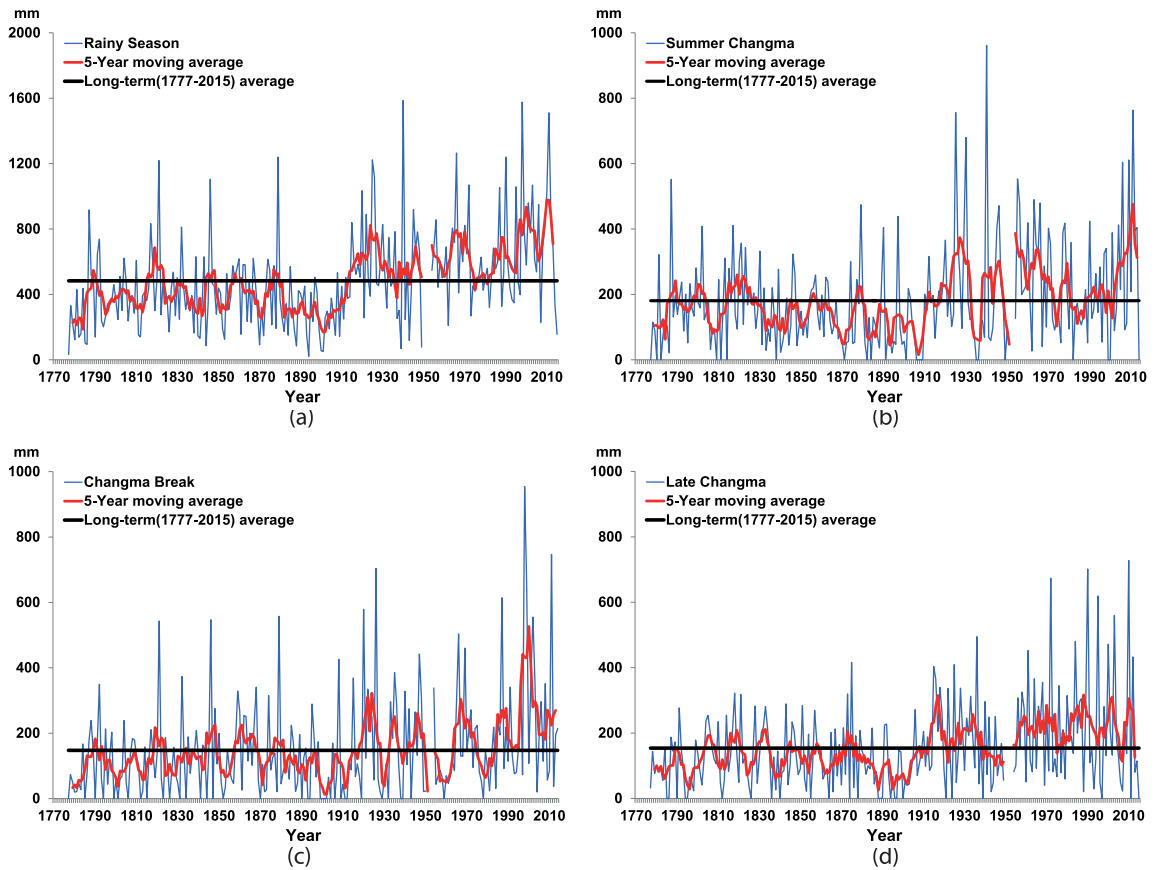


Figure 5. Same as in Figure 2, but for Changma-period extreme precipitation exceeding the 95th percentile value  
 그림 5. 지난 239년간(1777~2015년) 서울의 장마철 95퍼센타일 이상 극한강수량 경년변화: (a) 장마철 전체(6월 하순~9월 초순), (b) 여름장마기(6월 하순~7월 중순), (c) 장마휴지기(7월 하순~8월 초순), (d) 늦장마기(8월 중순~9월 초순)

5년 이동평균 강수량도는 이보다 더 높게 나타났다. 늦장마기의 강수량도는 5년 이동 평균은 장기간 평균(22.9mm/일)에 비하여 1925년 전후, 1970년 전후, 2000년 전후에 높게 나타났는데, 20세기 후반으로 갈수록 점차 더 높게 나타났다. 이와 같이 여름철 개별 시기별로는 강수량도의 극값을 나타내는 시기와 변화 추세가 상이하지만, 이를 종합한 장마철 전체의 강수량도는 20세기 초반에서 21세기 초로 갈수록 더 증가하는 추세를 보였다. 특히 1995~2004년 동안의 서울의 장마철 평균 강수량도는 36.0mm/일로 장기간 평균값의 3.0 표준편차 이상을 보였다.

단일연도 장마철 전체 평균 강수량도 상위 1~3위 기록을 살펴보면 1998년 52.5mm/일, 1972년 51.9mm

/일, 1940년 50.1mm/일의 순으로 높게 나타났다. 반면 여름장마기 평균 강수량도의 상위 1~3위 기록은 1963년 79.3mm/일, 2009년 72.6mm/일, 1940년 63.9mm/일로 나타났고, 장마휴지기에는 1920년 129.2mm/일, 1998년 83.7mm/일, 2002년 67.1mm/일의 순서로 높게 나타났다. 늦장마기 평균 강수량도 상위 1~3위 극값 기록은 1972년 65.3mm/일, 1995년 60.6mm/일, 1990년 52.7mm/일 순으로 나타났다. 이러한 결과들은 일반적으로 강수량 극값의 경우에 장마휴지기, 여름장마기, 늦장마기 순으로 오히려 장마휴지기에 가장 높게 나타남을 가리킨다.

한편 최근 100년 간(1911~2010년) 서울의 연중 2일 누적강수량의 95퍼센타일의 일평균(39.9mm/일) 이

상의 값을 나타내는 극한강수일의 누적강수량을 분석한 결과 장마철 강수량과 유사한 경년변동 및 장기간 변화추세를 보였다(Figure 5). 장마철 동안의 95퍼센타일 이상 누적강수량도 1890년대 이전에는 십년 변동성 이외에는 장기간 증가 또는 감소추세는 관찰할 수 없다. 그러나 1890년대 중반 이후와 1990년대 중반 이후 뚜렷한 증가 양상을 보이면서 19세기 후반 이후에는 전반적으로 통계적으로 유의미한 증가 추세를 보였다. 1890년대 중반이후 시계열에 나타난 일차추세선을 그려보면 95퍼센타일 이상 극한강수현상은 31.4mm/10년 규모로 증가하였고, 1920년 전후, 1960년 전후, 1990년대 중반 이후에는 이러한 장기간 증가추세선을 초과하는 더 많은 극한강수량을 기록하였다. 장마철 세부 시기별로 살펴보면, 여름장마기와 늦장마기에는 1920년대 이후 장기간 평균이상의 95퍼센타일 누적강수량을 보이는 경우가 자주 나타났고, 특히 20세기 후반에는 뚜렷하게 증가한 경향을 관찰할 수 있다. 단일 연도 여름장마기 95퍼센타일 누적강수량 상위 1~3위 기록을 살펴보면 1940

년 961.6mm, 2011년 763.5mm, 1925년 756.5mm 순으로 크게 나타났지만, 5년 이동평균이 가장 높은 기간은 2009~2013년이였다. 장마휴지기 95퍼센타일 이상 극한강수 누적량의 상위 1~3위 기록은 1998년 954.6mm, 2011년 747.0mm, 1926년 704.4mm, 순이었지만, 5년 이동평균 최댓값은 1998~2002년 기간에 나타났다. 늦장마기 95퍼센타일 이상 극한강수 누적량 상위 1~3위 기록은 2010년 727.8mm, 1990년 701.5mm, 1972년 673.7mm 순으로 나타났고, 5년 이동평균 최댓값은 1986~1990년 기간에 기록되었다. 이러한 결과들은 전체 239년 연구기간 중 대체로 1980년대 중반 이후에 서울의 장마철 극한강수현상의 규모가 뚜렷하게 증가하였음을 가리킨다.

### 3) 최근 장마철 종관기후장의 변화

전체 연구기간 중 20세기 후반 서울의 장마철 강수현상이 뚜렷하게 증가한 정확한 시점을 찾기 위해 1970년대 이후 매해를 기준으로 전후 시기로 나누는 자

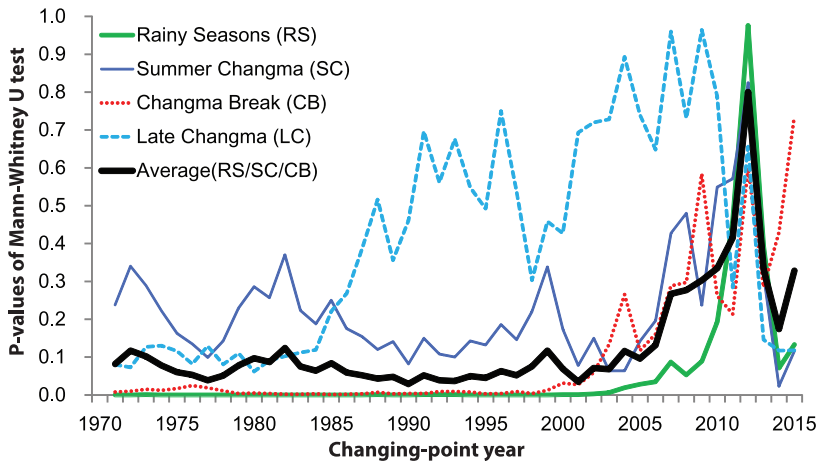


Figure 6. Inter-annual variations of p-values of Mann-Whitney U test for the rainy season (RS) and sub-rainy season (SC: summer Changma, CB: Changma break, LC: late Changma) precipitation(1777~2015) as well as the average (thick line in black) of Mann-Whitney U test p-values for RS, SCA and CB between the former and latter periods based on the giving changing-point year in the late 20th century and onward showing the significant increases of precipitation in Seoul, Korea

그림 6. 전체 연구기간(1777~2015년) 중 가장 뚜렷한 상승 경향을 보인 20세기 후반 매해 기준 전후 시기의 서울의 장마철 세부 시기 및 장마철, 여름장마기, 장마휴지기 등 세 시기의 평균적인(검은색 굵은색) 강수량 변화의 통계적 유의성을 나타내는 Mann Whitney U 검정 p 값의 경년변화

료들을 대상으로 Mann Whitney U 검정을 수행한 결과 각 시기별로 통계적 유의성이 높은 시기는 상이하게 나타났다(Figure 6). 장마철 강수량은 1970년부터 2002년까지 모두 매해 기준 전후 시기의 강수량의 변화에 관한 Mann Whitney U 검정의 p-value는 0.01이하, 즉 모두 99% 이상의 통계적 유의성을 보였다. 2000년 이전의 장마철 세부시기별 매해 기준 강수량 변화의 통계적 유의성을 살펴보면, 여름장마의 경우에는 p-value가 최솟값을 보이는 통계적으로 가장 뚜렷한 변화는 1990년을 기준으로 살펴본 전(1777~1989년)·후(1990~2015년) 두 시기에 나타났다. 장마휴지기 강수량의 변화의 통계적 유의성은 1978~1997년 사이에 모두 99% 이상으로 높게 나타났다. 반면, 20세기 동안 경년변동 이외에 20세기 후반에 뚜렷한 증가추세를 보이지 않았던 늦장마기의 1970년 이후 강수량의 매해 기준 통계적 유의성은 모두 90% 이하로 상대적으로 낮게 나타났다. 20세기 후반에 상대적으로 뚜렷한 변화를 보이지 않은 늦장마기를 제외한 장마철 전체, 여름장마기, 장마휴지기 강수량을 각각 1990년을 기점으로 나눈 두 그룹간의 Mann Whitney U 검정의 p-value 평균값이 0.03 이하로 가장 낮게 나타났다. 즉, 서울의 장마철 강수량은 239년 기간 중 20세기 후반에 증가되는 경향을 보였는데 특히 1990년을 기점으로 뚜렷한 변화가 나타났음을 알 수 있다. 이러한 결과는 20세기 중반 이후 현대적인 관측 자료를 분석하여 제시한 기존 연구들(Choi *et al.*, 2008; 문자연 등, 2011; 최광용, 2015)의 내용과도 유사하다.

이러한 결과를 바탕으로 1990년을 기준으로 한 이전(1958~1989년)과 이후(1990~2015년) NCEP-NCAR reanalysis I 장마철 종관장 자료를 비교해 보면 상층 대기장에도 뚜렷한 변화가 있었음을 알 수 있다(Figure 7a). 이전과 비교한 1990년대 이후의 대류권 중층(500hPa) 종관장을 살펴보면 유라시아 대륙과 북극해가 인접한 지역(70~85°N, 70~140°E)에서는 저기압 편차가 약하게 형성되었지만, 동아시아 대륙 내부 몽골 주변(35~55°N, 75~120°E)에는 고기압 편차핵이 강하게 발달하였음을 알 수 있다(Figure 7a). 해양 상에는 베링 해를 중심으로 고기압 편차핵

이 형성되고 북태평양 넓은 지역에 걸쳐 평균적으로 양(+)의 편차장이 약하게 형성되었음을 알 수 있다. 또한, 1990년대 이후에는 아시아 대륙과 인접한 북서태평양의 해수면 온도는 모두 1°C 이상의 양(+)의 편차 값을 보여 해양에서 대기로 수분의 증발 현상에 유리한 상태를 보이고 있다(미제시). 상층 제트기류의 위치 변화를 살펴보면 1990년 이전에는 300hPa의 상층 제트 기류(파란색 굵은선)는 장마철에 북위 50°N에 위치해 있었으나, 그 이후에는(붉은색 굵은선) 몽골 지역에 발달한 고기압 편차핵의 북쪽 지역을 중심으로 고위도 방향으로 더 이동한 것을 살펴볼 수 있다. 북태평양 고기압의 범위를 나타내는 500hPa의 5880m 지오폠펌셜 고도의 위치를 비교해 보면 1990년 이전에 비하여 그 이후에 북태평양에서 동아시아 남부영역(20~35°N, 120~140°E)으로 더 확장한 것을 알 수 있다. 즉, 이러한 상층제트의 극지방 북상 이동은 상대적으로 고온다습한 저위도의 아열대 해양기단이 동아시아 지역으로 확장 발달하는데 영향을 미쳤을 것으로 사료된다.

동아시아 여름몬순의 수증기 이류와 관련된 850hPa의 바람벡터장(파란색 화살표)을 살펴보면 동아시아 영역으로 확장 발달한 북태평양 고기압 주변 바람장에는 뚜렷한 변화가 없지만 대륙 내부에 발달한 고기압 편차핵 주변의 동아시아 지역을 따라 찬공기의 이류가 활발해지는 패턴이 관찰된다(Figure 7a). 1990년대 이후 몽골 지역에 발달한 고기압 편차의 서쪽 가장자리 지역을 따라 동시베리아 고위도 지역에서 북서태평양과 인접한 동아시아 지역에 유입되는 패턴이 확인된다. 즉, 몽골 지역을 중심으로 한 고기압 편차는 고위도의 상대적으로 차고 건조한 기류를 고온다습한 동아시아 영역으로 유입시켜 동아시아 여름몬순 전선대가 더욱 강하게 발달할 수 있는 종관 기후 환경을 제공하고 있음을 가리킨다. 이러한 두 흐름이 만나는 중국남부와 한반도 지역에서 실제 대기 연직 방향의 흐름을 보여주는 500hPa 오메가( $\omega$ )를 살펴보면 1990년대 이후 음(-)의 값, 즉 상승 기류가 더 활발해졌음을 알 수 있다. 장마철 850hPa 가강수량(precipitable water)도 1990년대 이후에 북서태평양 연안을 따라 양(+)의 편차를 보였다(미제시). 이러한

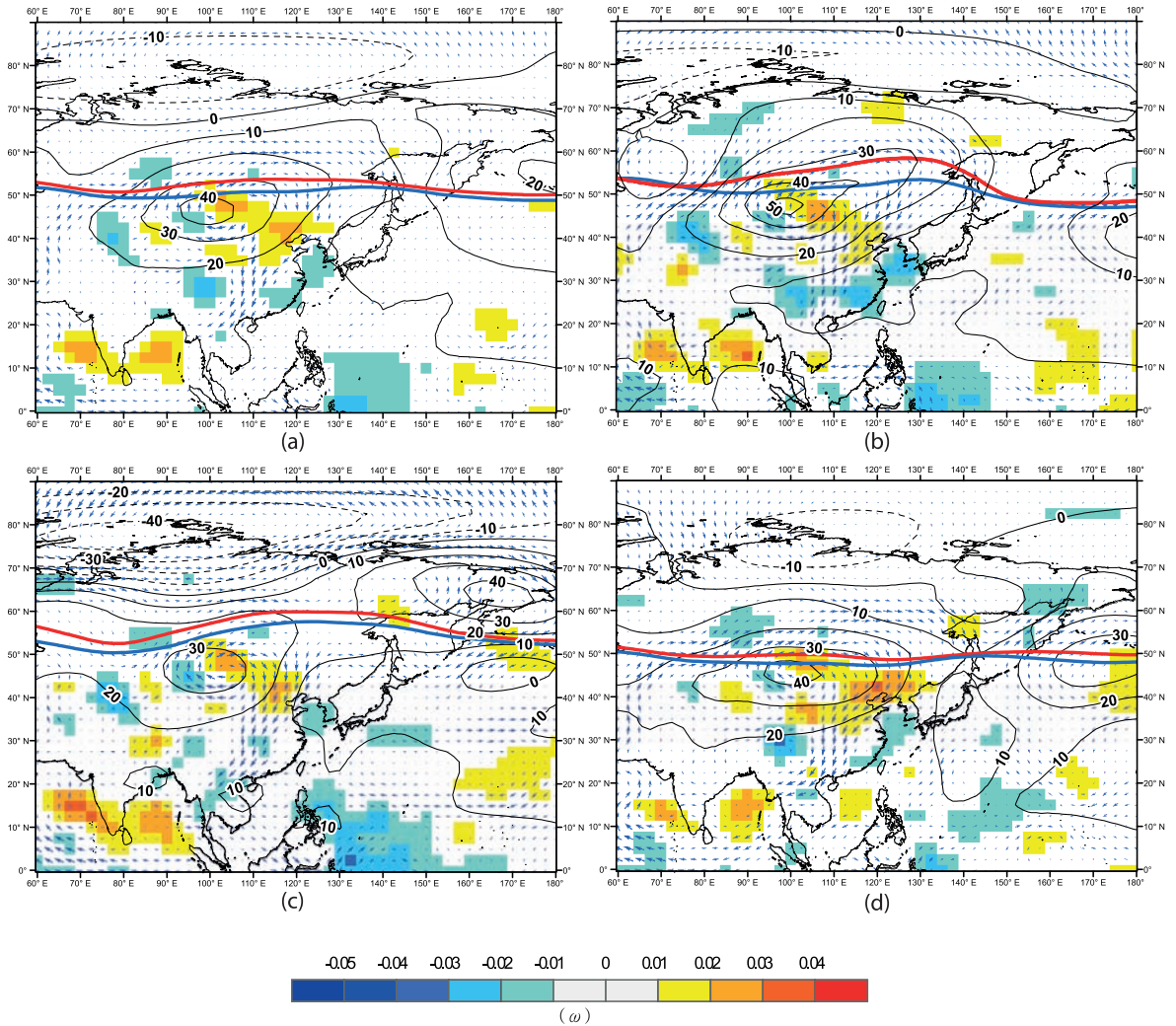


Figure 7. Differences (P2 minus P1) of 500 hPa geopotential height (the solid line with labels) and Omega ( $\omega$ , grid cell in colors), and 850 hPa wind vector (proportionally fitted to the cell size; 2m/s=100% of a given grid cell) in East Asia between the former (1958~1989) (P1) and the latter (1990~2015) (P2) periods based on the most distinct changing point year (1990) and changes in the locations of 300 hPa Jet stream(the thick line indicating 9360 m of geopotential height; blue line for P1 and red line for P2): (a) the entire Changma period (late June~early September), (b) summer Changma period (late June~ mid-July), (c) Changma break period (late July~early August), and (d) late Changma period (mid-August~early September)

그림 7. 동아시아 영역의 1990년 기준 전(1958~1989년; P1) 후(1990~2015년; P2) 시기 간 500hPa 지오포텐셜 고도(실선)와 오메가(색으로 된 격자들), 850hPa 바람벡터(격자 최대 크기(2m/s)를 표준화된 파란색 화살표)의 편차(P2-P1)와 300hPa 상승 제트 기류(9360m 지오포텐셜 고도선) 위치 변화(전: 파란색 선, 후: 붉은색 선): (a) 장마철 전체(6월 하순~9월 초순), (b) 여름장마기(6월 하순~7월 중순), (c) 장마휴지기(7월 하순~8월 초순), (d) 늦장마기(8월 중순~9월 초순)

결과들을 종합하면, 1990년대 이후 서로 다른 성질의 기류들이 북서태평양 연안을 따라 유입됨으로써 우리나라를 포함한 동아시아 지역의 대기 불안정도가 상승하면서 서울의 장마철 강수가 증가하게 되었음을 알 수 있다.

장마철 세부 시기별로 나누어 종관장을 살펴보면, 장마철 강수발생에 유리한 종관상태는 장마 세부 시기 중에서 여름장마기에 가장 뚜렷하게 나타났고, 장마휴지기와 늦장마기로 갈수록 다소 약해지는 차이를 보였다(Figures 7b-d). 장마철 세부기간 중 여름장마기에서는 1990년대 이전과 비교하여 그 이후에는 500hPa 기압면 몽골 지역에 자리 잡은 고기압 편차핵을 중심으로 최대 지오포텐셜 고도가 50m 이상 높게 나타나면서 극동지역에서 동아시아 지역으로 이동하는 찬 기류도 강하게 나타났다. 또한, 몽골 지역에 나타난 고기압의 편차핵 북쪽에 위치한 장마철 제트기류도 동아시아 영역에 해당하는 경도 80~140°E 지역을 중심으로 다른 장마철 시기에 비하여 더 북상하였다. 한편, 대기 연직 흐름을 나타내는 오메가( $\omega$ )도 한반도와 중국 양쯔강 이남 지역을 따라 다른 시기에 비해 절대값이 더 큰 음(-)의 상태를 나타냈다. 즉 다른 시기에 비해 여름장마기에 고위도의 찬 기류와 중위도의 상대적으로 고온다습한 기단이 더욱 강하게 만나 북서태평양안 연안 지역을 따라 대기가 불안정해지면서 상승기류의 흐름도 더 강하게 나타났음을 알 수 있다. 이러한 종관 패턴은 장마휴지기에도 나타났으나 상층 제트 기류의 북상정도가 여름장마기에 비해서 덜하고, 여름장마기에 베링 해 남부에 자리 잡았던 고기압 편차핵이 북극의 뷰포트 해로 북상함에 따라 몽골지역에 발달한 고기압 편차핵의 중심값도 상대적으로 작아 고위도에서 저위도로 이동하는 찬 기류의 강도도 상대적으로 약화되었다. 이에 따라 동아시아에서 오메가가 음(-)의 값을 보여 상승 흐름이 나타나는 범위도 한반도, 황해, 일본 남쪽 해상 정도로 다소 축소되었음을 알 수 있다. 늦장마기에는 몽골 지역에 발달한 고기압 편차핵이 다소 동서 방향으로 분포하여 제트기류의 북상 정도도 크지 않고, 장마휴지기에 뷰포트 해까지 북상하였던 고기압 편차핵이 다시 남하하여 베링 해에 자리 잡으면서 상승기류가

활발한 음(-)의 오메가( $\omega$ )를 나타내는 구역이 한반도 남부에서 중국남부해안 지역까지 다시 길게 발달하였다. 이와 같은 장마철 세부 시기별 음(-)의 오메가를 보이는 구역의 변화는 실제 1990년 이후 서울의 강수량이 증가한 시점에 영향을 주었음을 알 수 있다. 즉, 서울의 경우에는 이러한 종관장의 변화에 따라 여름장마기와 장마휴지기에는 상승 기류가 활발해진 지역에 속하여 1990년대 이후에 강수가 증가한 패턴이 나타났지만, 늦장마기에는 이 지역의 상승기류 변화가 뚜렷하지 않아 강수패턴도 1990년대 이전과 비교하여 뚜렷한 변화가 없었음을 알 수 있다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 지난 239년(1777~2015년) 동안의 측우기 자료와 현대 강수량 관측기 일강수량 자료를 분석하여 서울의 장마철 전체 및 세부 시기별(여름장마기, 장마휴지기, 늦장마기)의 강수량 및 극한 강수현상의 변동 및 변화 특징을 분석하였다. 또한, NCEP-NCAR reanalysis I 자료를 바탕으로 20세기 후반에 나타난 이례적인 장마철 강수 변화와 관련하여 변화시점 전후 종관장의 변화 특성을 밝혔다. 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 서울의 장마철 강수량은 18세기 중엽에서 19세기 중반까지는 십년변동에 의해 가뭄과 호우가 발생한 시기가 반복적으로 나타나다가 19세기 후반에는 늦장마기의 강수 감소현상에 의해서 소우기가 나타났다. 그러나 20세기에 접어들면서 십년변동폭이 점차 증가하면서 20세기 후반 이후에 강수량이 뚜렷하게 증가한 기간이 나타나 전체적으로는 서울의 장마철 강수가 증가하는 추세를 보였다. 이는 현대적 관측 자료를 분석한 기존 연구들(Choi *et al.*, 2008; 문자연 등, 2011; 최광용, 2015)에서 제시한 20세기 후반의 서울을 포함한 우리나라 강수량 증가패턴은 측우기 자료까지 확장한 장기간 관점에서도 이례적인 변화임을 가리킨다. 특히, 장마철 전체 강수량 증가는 세부 시기 중에서도 늦장마기의 강수량 변화보다

는 1990년대와 2000년대 여름장마기 강수 증가 패턴과 1990년대 장마휴지기 증가 패턴에 의해 나타났음을 알 수 있다.

둘째, 연구기간 동안 서울의 장마철 강수일 발생빈도에는 큰 변화가 없었으나, 20세기 동안이 강수량이 뚜렷하게 증가함에 따라 강수강도도 증가하였음을 알 수 있다. 특히, 장마철 강수량과 유사하게 95퍼센타일 이상 누적 강수량이 증가하였는데 이는 20세기 후반의 서울의 강수 증가는 주로 극한강수현상에 의해 나타난 것임을 가리킨다. 이러한 결과는 기후변화에 따라 점점 더 강해지고 있는 극한강수 중심의 호우 피해에 대비하기 위해서는 상향 조정된 호우 기준을 바탕으로 한 장마철 방재 대책 마련이 필요함을 가리킨다.

셋째, 장마철 강수가 증가한 20세기 후반의 변화시점을 분석한 결과 1990년을 기점으로 여름장마기와 장휴지마기를 중심으로 한 서울의 장마철 강수량 증가현상이 가장 뚜렷하게 발생하였음을 알 수 있다. 이와 관련하여 1990년 전후 동아시아 영역의 상층 중관장을 비교 분석해 보면 최근 장마철에는 몽골지역에 고기압 편차핵이 강하게 형성되면서 제트기류가 북상하여 북태평양 아열대 기단이 동아시아 영역으로 확장 발달하고, 고위도에서 동아시아 지역으로 유입하는 찬 기류의 흐름이 강화되었음을 알 수 있다. 그 결과 고온다습한 북태평양 아열대 기단과 고위도의 찬 기류가 최근에 더 강하게 만나 상승 기류가 활발해지는 대기 불안정 구역이 중국남부에서 우리나라에 걸쳐 형성되면서 서울의 장마철 강수량도 증가하였음을 알 수 있다.

이러한 연구결과들은 전 세계적으로 드문 측우기 기반 장기간 강수량 자료와 현대 관측 자료를 종합적으로 분석하여 최근 서울을 포함한 우리나라 장마철 강수량의 변화가 이례적임을 밝힌 것으로 현재 동아시아 몬순지역에서 여름철 강수현상에 나타나고 있는 기후변화에 대비하기 위해 개선된 수자원 관리 대책 마련에 기초 근거로서 활용이 가능할 것으로 사료된다. 특히 본 연구에서는 상층 중관 분석에서 북태평양 고기압의 확장과 고위도 지역의 찬 기류의 이동 강화 패턴이 서울을 포함한 우리나라 지역의 장마철

강수를 증가시키는데 영향을 미치고 있음이 새롭게 제시되었다. 향후 연구에서는 이와 관련하여 고위도 찬 기류의 이류 관련 유라시아 대륙 내부에 형성되는 기압장 변화에 영향을 미칠 것으로 예상되는 요인들(예, 봄철 눈피복의 감소, 북극해빙의 감소 등)과 북태평양 고기압의 경년변동성에 영향을 미치는 요인들(예, ENSO, 인도양 warm pool 현상 등)을 종합적으로 고려하여 장기간의 기후변화 전망뿐만 아니라 단기 계절 강수 변동성 예측력도 향상할 수 있는 지수를 개발할 필요성이 있다고 판단된다.

## 사사

본 연구에 사용된 측우기 자료와 현대 기상관측 자료를 제공해준 서울대학교 임규호 교수님과 기상청에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 기상청 국립기상연구소, 2014, 기상역사자료집.  
 김기욱·유철상·박민규·김현준, 2007, “강우빈도 해석에  
 서의 측우기자료의 유용성 평가,” 한국수자원학  
 회 논문집, 40(11), 851-859.  
 김대하·유철상·김현준, 2007, “조선왕조실록 및 측우기  
 기록에 나타난 주요호우사상의 평가: 2. 정량적  
 평가,” 한국수자원학회 논문집, 40(7), 545-554.  
 김연옥, 1983, “한국 고대의 기후환경-삼국사기 기후자  
 료의 분석-지리학의 과제와 접근방법,” 석천 이  
 찬 박사 회갑기념논문집, 231-273.  
 김연옥, 1984a, “고려시대의 기후환경-사료분석을 중  
 심으로,” 이화여자대학교 한국문화연구원 논총,  
 44, 113-121.  
 김연옥, 1984b, “한국의 소빙기 기후,” 지리학과 지리교  
 육, 14, 1-16.  
 김연옥, 1985, 한국의 기후와 문화, 이화여자대학교 출판  
 부.  
 김연옥, 1987, “조선시대의 기후환경: 사료분석을 중심으

- 로,” 지리학논총, 14, 411-423.
- 김연옥, 1992, “중세 온난기의 기후사적 연구,” 문화역사 지리, 4, 285-304.
- 문자연·박창용·최영은, 2011, “레짐이동에 따른 우리나라 여름철 강수의 특성변화와 그 원인,” 대한지리학회지, 46(3), 277-290.
- 박민규·유철상·김현준, 2010, “연최대 호우사상 계열을 이용한 측우기자료 및 현대자료의 비교,” 대한토목학회 논문집, 30(2B), 137-147.
- 박정규·황재돈·전영신, 2001, “조선왕조실록에 기록된 강수현상,” 한국기상학회지, 37(4), 433-441.
- 박창용·이혜은, 2007, “삼국시대의 가뭄 및 호우에 관한 연구,” 기후연구, 2(2), 94-104.
- 부경은·권원태·김상원·이현정, 2006, “19세기 공주감영 측우기 강우량 18년 복원,” 대기, 16(4) 343-350.
- 연제문·변성호·이정규·김태용, 2007, “이차원 가뭄빈도 해석을 통한 서울지역의 가뭄 평가,” 한국수자원학회 논문집, 40(4), 335-343.
- 와다유지(和田雄治), 1917, 조선고대관측기록조사보고(朝鮮古代觀測記錄調査報告), 조선총독부 관측소(朝鮮總督府 觀測所).
- 유철상, 2000, “서울지점 연강수량 자료에 나타난 장기 건조기의 재현 가능성에 관한 고찰,” 한국수자원학회 논문집, 33(5), 519-526.
- 유철상·김대하·김현준, 2007, “조선왕조실록 및 측우기 기록에 나타난 주요호우사상의 평가: 1. 정성적 평가,” 한국수자원학회 논문집, 40(7), 533-543.
- 유철상·김보운·노재경, 2000, “서울지점 연강수량 자료에 나타난 다우해 및 과우해의 재현 특성에 관한 연구,” 한국수자원학회 논문집, 33(3), 307-314.
- 유철상·류소라, 2003, “서울지점 가뭄의 재현 및 지속 특성 분석,” 한국수자원학회논문집, 36(4), 561-573.
- 윤순옥·황상일, 2009, “삼국사기를 통해본 한국 고대의 자연재해와 가뭄주기,” 대한지리학회지, 44(4), 497-509.
- 윤순옥·황상일, 2010, “고려사를 통해본 한국 중세의 자연재해와 가뭄주기,” 한국지형학회지, 17(4), 85-98.
- 이병설, 1970, “서울의 연강수량 및 하기강수량의 Normality에 관한 연구,” 한국기상학회지, 5, 11-14.
- 이병설, 1983, “장마계의 종관적 특성,” 한국기상학회지, 19(1), 1-11.
- 임규호·심태현, 2002, “조선왕조실록의 기상현상기록빈도에 근거한 기후,” 한국기상학회지, 37(4), 343-354.
- 임규호·최은호·구교상·원명수, 2012, “서울의 강우와 강설일수 자료에 나타난 17세기 말엽의 건조기,” 대기지, 22(3), 381-386.
- 전종갑·문병권, 1997, “측우기 강우량 자료의 복원과 분석,” 한국기상학회지, 33(4), 691-707.
- 정창희, 1969, “서울 지방 7월 강수량의 Periodogram에 관하여,” 한국기상학회지, 5(1), 11-14.
- 정현숙·임규호, 1994, “서울지역 월강수량과 강수일수: 1770-1907,” 한국기상학회지, 30(4), 487-505.
- 정현숙·임규호·오재호, 1999, “서울 지역 강수량의 시계열에 나타난 시간 변동성 해석,” 한국기상학회지, 35(3), 354-371.
- 정현숙·박정수·임규호·오재호, 2000, “측우기 자료를 포함한 서울 강수량 시계열에 대한 추세분석 및 파열분석,” 응용통계연구, 13(2), 525-540.
- 조신섭·이정형·김병수, 1996, “시계열 모형을 이용한 측우기 자료의 분석,” 응용통계연구, 9(2), 25-43.
- 조하만·김상원·전영신·박혜영·강우정, 2015, “조선시대 측우기 등장과 관측망에 대한 역사적 고찰,” 대기, 25(4), 719-734.
- 조희구·나일성, 1979, “18세기 한국의 기후변동: 강우량을 중심으로,” 동방학지, 22, 83-103.
- 최광용, 2015, “우리나라 사계절 다중일 누적 극한강수 현상의 시공간적 변화,” 한국지역지리학회지, 21(1), 98-113.
- 최지영·박민규, 2013, “정성적 분석을 이용한 실록호우사상의 평가,” 한국방재학회논문집, 13(5), 211-217.
- 황석환·김중훈·유철상·유도근, 2009a, “강우자료의 정량적 동질성 분석,” 한국방재학회논문집, 9(4), 29-35.
- 황석환·김중훈·유철상·정성원·유도근, 2009b, “Bootstrap기법을 이용한 서울지점 강우자료의 통계적 동질성 분석,” 한국수자원학회 논문집, 42(10), 795-807.
- 황석환·김중훈·유철상·정성원·정진희, 2009c, “서울지점 강우자료와 기후지표 자료에 나타난 동아시아



- 아 기후의 종관적 변화특성,” 대한토목학회논문집, 29(5B), 409-417.
- 황석환·김중훈·유철상·정성원·주진걸, 2009d, “마코프 연쇄를 이용한 서울지점 일강우의 발생특성 변화 연구,” 한국수자원학회 논문집, 42(9), 747-758.
- 황석환·김중훈·유철상·정성원, 2010, “BH 베이지안 분석을 통한 서울지점 강우자료의 확률적 변화시점 추정,” 한국수자원학회 논문집, 43(7), 645-655.
- Arakawa, H., 1956, On the secular variation of annual total of rainfall at Seoul from 1770 to 1944, *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology*, 7(2), 205-211.
- Byun, H.R., Lee, S.J., Morid, S., Choi, K.S., Lee, S.M., and Kim, D.W., 2008, Study on the periodicities of droughts in Korea, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 44(4), 417-441.
- Choi, G., 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 the Korean Geographical Society*, 43(5), 681-700.
- Frauenfeld, O.W. and Davis, R.E., 2003, Northern Hemisphere circumpolar vortex trends and climate change implications, *Journal of Geophysical Research*, 108(D14), 4423, doi:10.1029/2002JD002958.
- Ha, K.J. and Ha, E., 2006, Climate change and interannual fluctuations in the long-term record of monthly precipitation for Seoul, *International Journal of Climatology*, 26, 607-618.
- Jung, H.S., Lim, G.H., and Oh, J.H., 2001, Interpretation of the transient variations in the time series of precipitation amounts in Seoul, Korea. Part I: Diurnal variation, *Journal of Climate*, 14, 2829-3004.
- 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., Jenne, R., and Joseph, D., 1996, The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bulletin of the American meteorological Society*, 77(3), 437-471.
- Kim, C.J., Qian, W., Kang, H.S., and Lee, D.K., 2010, Interdecadal variability of East Asian summer monsoon precipitation over 220 years (1777-1997), *Advances in Atmospheric Sciences*, 27(2), 253-264.
- Kim, D.W., Byun, H.R., and Choi, K.S., 2009, Evaluation, modification, and application of the effective drought index to 200-year drought climatology of Seoul, Korea, *Journal of Hydrology*, 378(1), 1-12.
- Kim, D.W., Byun, H.R., Choi, K.S., and Oh, S.B., 2011, Spatiotemporal analysis of historical droughts in Korea, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(9), 1895-1912.
- Kim, H.J., 2000, Flood records in the Joseon Dynasty, *Journal of Korea Water Resources Association*, 33(S1), 365-370.
- Kim, J.W. and Ha, K.J., 1987, Climatic changes and interannual fluctuations in the monthly amounts of precipitation at Seoul, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 23(3), 54-69.
- Kim, K., Yoo, C., Park, M., and Kim, H.J., 2007, Evaluation for usefulness of Chukwoo-ke data in rainfall frequency analysis, *Journal of the Korea Water Resources Association*, 40(11), 851-859.
- Lim, G.H., 1992, Statistical nature of the dry and wet periods defined in the time series of annual precipitation (1771-1990) of Seoul, *The Korean Journal of Applied Statistics*, 5, 123-137.
- Lim, G.H. and Jung, H.S., 1992, Interannual variation of the annual precipitations at Seoul, 1771-1990, *Journal of Korean Meteorological Society*, 28, 125-132.
- Strangeways, I., 2010, A history of rain gauges, *Weather*, 65(5), 133-138.
- Wada, Y., 1911a, Korean meteorological-old and new, *Nature*, 85, 341-342.
- Wada, Y., 1911b, Korean rain-gauge of the fifteenth century, *Quaternary Journal of the Royal Meteorological Society*, 37, 83-36.
- Wang, B., Ding, Q., and Jhun, J.G., 2006, Trends in Seoul (1778-2004) summer precipitation, *Geophysical Research Letters*, 33, L15803, doi:10.1029/2006GL026418.

- Wang, B., Jhun, J.G., and Moon, B.K., 2007, Variability and singularity of Seoul, South Korea, rainy season (1778-2004), *Journal of Climate*, 20, 2572-2580.
- Yoo, C., 2006, Long term analysis of wet and dry years in Seoul, Korea, *Journal of Hydrology*, 318, 24-36.
- You, C., Park, M., Kim, H.J., Choi, J., Sin, J., and Jun, C., 2015, Classification and evaluation of the documentary-recorded storm events in the Annals of the Choson Dynasty (1392-1910), Korea, *Journal of Hydrology*, 520, 387-396.

교신: 최광용, 63243, 제주특별자치도 제주시 제주대학로 102 제주대학교 지리교육전공(이메일: tribute@hanmail.net)

Correspondence: Gwangyong Choi, Major of Geography Education, Jeju National University, 102 Jejudachak-ro, Jeju-si, Jeju Special Self-Governing Province 63243 Republic of Korea (e-mail: tribute@hanmail.net)

최초투고일 2016. 1. 31

수정일 2016. 2. 19

최종접수일 2016. 2. 26