

## 전지구 온도지표를 이용한 한강유역의 여름철 강우특성 변화 분석

정민수\* · 김종석\*\* · 문영일\*\*\* · 황성환\*\*\*\*

Jeong, Min-Su\*, Kim, Jong-Suk\*\*, Moon, Young-Il\*\*\*, Hwang, Sung-Hwan\*\*\*\*

### Summer Precipitation Variability in the Han River Basin within the Context of Global Temperature Gradients

#### ABSTRACT

In this study, two global simple indices are used to investigate climate variability and change in observations. Land-Ocean Contrast (LOC) is an index of area-averaged surface temperature contrast between land and ocean. Meridional Temperature Gradient (MTG) is defined as the mean meridional temperature gradient in the Northern Hemisphere from mid to high latitude and sub-tropical zonal bands. These indices have direct or indirect effects on changing in atmospheric circulations and atmospheric moisture transport from north-south or east-west into East Asia (EA). In addition, warm season hydrometeorology in EA is highly associated with water supplies for coupled human and natural systems including drinking water, irrigation, hydropower generation as well as fisheries. Therefore, in this study, we developed an empirical separation approach for summer rainfall from typhoon and monsoon. An exploratory analysis was also conducted to identify the regional patterns of summer monsoon precipitation over the Korean peninsula within the context of changes in different types of temperature gradients. The results show significant and consistent changes in summer monsoon rainfall during the summer season (June-September) in South Korea.

**Key words** : LOC, MTG, Summer precipitation, Han river

#### 초 록

본 연구에서는 대표적인 전지구 온도지표인 LOC/MTG 온도인자를 이용하여 기후변동성(Climatic Variability)을 파악하고 관측수량의 상대적 변화분석을 위한 특성자료로 활용하였다. 여기서, LOC (Land-Ocean Contrast)는 중위도 지역에서 대륙과 해양의 온도의 차이를 나타내는 지수이며, 고위도 및 아열대 지역의 남북간 기온의 차이는 MTG (Meridional Temperature Gradient)로 정의된다. LOC/MTG 두 패턴의 남북 또는 동서 지점의 변화는 동아시아 지역에서의 대기순환패턴의 변화와 그와 관련된 대기수분이송에 직간접적인 영향인자로서 작용될 수 있다. 또한, 여름철 동아시아의 수문기상의 변화는 식수, 관개용수, 수력발전 및 수산산업과 연관성이 매우 크며, 인간과 자연의 상호관계를 유지하기 위한 지속가능한 수자원의 공급에 중요한 결정요소이다. 따라서 본 연구에서는 한강유역을 대상으로 6월에서 9월 사이에 발생한 여름철 강우 중에서 태풍에 의해 유발된 강우를 제외하고 몬순기후에 의한 한반도 유역의 지역적 강우 특성을 분석하였다. 한강 몬순강우와의 통계적 상관성 분석을 실시한 결과, 여름철 몬순강우의 변화에 민감하게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

**검색어** : LOC, MTG, 여름철 강우량, 한강유역

\* 서울시립대학교 토목공학과 박사과정 (University of Seoul · jminsoo05@uos.ac.kr)

\*\* 정회원 · 서울시립대학교 토목공학과 연구교수 (University of Seoul · jongsuk@uos.ac.kr)

\*\*\* 정회원 · 교신저자 · 서울시립대학교 토목공학과 교수, 도시홍수연구소 소장 (Corresponding Author · University of Seoul · ymoon@uos.ac.kr)

\*\*\*\* 서울시립대학교 도시홍수연구소 연구교수 (University of Seoul · shhwang1972@uos.ac.kr)

Received February 10, 2014/ revised March 25, 2014/ accepted May 30, 2014

## 1. 서론

한반도를 포함한 아시아 지역은 인구밀도가 높고, 가뭄과 홍수 등의 자연재해에 빈번하게 노출되어 있어 기후변화에 대한 대응과 수자원 확보를 위한 많은 연구들이 수행되고 있으며, 특히 장기적인 수자원 정책 수립을 위한 계절 강우와 아시아 몬순에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다(An et al., 2000; Trenberth et al., 2000; Wang et al., 2008).

아시아 몬순은 발생 특성에 따라 티베트 고원에 의한 남부아시아 지역 몬순, 인디안 몬순 그리고 동아시아 몬순으로 구분되고 있다(Tao and Chen, 1987). 이 중 동아시아 몬순은 동해와 인접한 한반도를 비롯한 일본과 중국 일부지역에 영향을 미치며, 몬순지역에서의 계절적 순환변동성에 의해 강우의 발생특성이 달라지는 것으로 보고되고 있다(Trenberth et al., 2000). 특히, 겨울에서 여름으로의 계절적 이동 시기에는 북반구 일사량 증가와 더워지는 대륙과 차가워지는 북태평양 지역에서의 비열차이에 기인하여 북쪽으로 이동하는 북태평양 고기압 기단과 오호츠크해 기단의 찬공기가 만나면서 강우가 발생하게 된다(An et al., 2000). 이러한 강우는 일사량과 연관된 수문순환 관계의 변화에 따라 돌발적인 발생특성을 갖는 것으로 알려져 있다(Gao et al., 1962; Lau et al., 1988).

기후변화에 대한 연구에서는 대륙-해양 온도차에 따른 수문순환의 변동성과의 상관성을 고려한 전지구 온도지표가 선택되어 사용되고 있다(Jones et al., 1986a,b; Hasen and Lebedeff, 1987). Mitchell et al. (2001)은 태양방사선과 온실효과에 관한 연구에서 Signal-to-Noise 개선의 목적으로 전역평균온도의 평균값을 사용한 바 있다. Braganza et al. (2004)은 대규모 유역평균 지표들을 정의하여 기후변화의 탐지가능성을 증대시켰다. 공간적 특징을 반영하는 기후변동의 지표로 수문순환의 관점에서 동서방향 순환과 관련된 대륙과 해양의 온도차를 나타내는 LOC (Land Ocean Contrast) 인자를 추출하였으며, 남북방향 순환의 대표적 지표로 MTG (Meridional Temperature Gradient)를 적용하였다. LOC 자료는 대륙과 해양간의 표면 온도 차이로 정의되며 해양보다도 대륙에서 더 크고 빠른 온난화가 이루어지는 양상을 확인할 수 있는 지수로 알려져 있다(Meehl et al., 1993; Jain et al., 1999). Fasullo (2010)는 대륙과 해양의 온도차를 이용한 에너지 수지에 따른 온난화를 연구한 바 있으며, 이를 통해 대륙에서의 제한된 수분이용 및 상승기류와 구름 등이 대륙과 해양의 온도차와 관련된 피할 수 없는 제약조건임을 제시하였다. 이와 달리 MTG는 적도와 극지방 간의 태양에너지 차이에 의한 온도불균형과 대기 열이송 문제로 온대(열대 위도)와 냉대(고위도) 사이 온도차이에 따른 열이송에 대한 균형 및 해양기류와 남북순환에 관한 지표로 사용되

고 있다(Gitelman et al., 1997).

여름철 동아시아의 수문기상의 변화는 식수, 관개용수, 수력발전 및 수산산업과 연관성이 매우 크며, 인간과 자연의 상호관계를 유지하기 위한 지속가능한 수자원의 공급에 중요한 결정요소이다. 그러나, 이제까지 기후변화와 관련하여 몬순과 태풍 등 서로 다른 수분의 유입경로에 따른 지역강수량의 계절적 변화에 대한 정량적인 분석에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 한강유역을 대상으로 6월에서 9월 사이에 발생한 여름철 강우중에서 몬순에 의한 강우를 대상으로 지역적 특성 변화를 분석하였다. 여름철(6월~9월) 강우에 대해 태풍의 경로 및 지속기간 등의 태풍활동 특성을 고려한 탐색적 강우추출 기법을 적용하여 태풍에 의해 발생한 강우를 배제한 계절강우만을 추출하여 대표적인 전지구 온도지표인 대륙-해양과의 온도변화(LOC)와 저위도와 고위도의 남북순환 지표(MTG)와의 변동특성을 분석하였다.

기후시스템 측면에서 볼 때 대륙과 해양의 온도차에 따른 바람, 압력, 수분이송 및 증발산 등 복잡한 수문순환이 고려되어야 하지만 기후변화의 광범위한 스케일에 비해 규모가 작은 한반도 공간스케일을 고려하여, 기후 인자와 강우량의 보다 직접적인 연계를 통해 대륙-해양과 남북순환간의 피드백 관계를 통계적 방법으로 해석하고자 하였다. 본 연구의 성과는 온도인자들과 지역강우와의 중요 해석 자료로 활용될 수 있으며, 정밀한 기후모델 연구에 대한 기초자료로 유용하게 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 분석자료 및 방법

### 2.1 분석대상 자료 및 방법

본 연구에 사용된 유역평균강수량 자료는 국가수자원종합시스템(WAMIS)에서 제공되는 자료로 한강유역 24개 중권역에 대하여 1966~2007년까지 42개년 기간치 자료로 구성되어 있다. 유역평균강수량 자료는 유역의 총 43개 관측지점을 대상으로 Thiessen polygon방법에 의하여 각 소유역별로 산출된 결과이며, 유역단위 수문량의 특성변화 및 중장기 수자원 관리계획을 세우는데 효과적으로 이용될 수 있다(Kim and Jain, 2011; Kim et al., 2012).

몬순기후에 의한 계절 강우량과 LOC/MTG의 통계적 분석을 실시하기 위하여 적용시기를 한반도의 우기기간인 6월~9월까지 4개월을 채택하고, 각각의 시계열 기간치 자료의 평균값을 적용하였다. 본 연구는 지구온난화에 따른 대륙과 해양사이 온도변화와 수분이동에 따른 강우 변동성에 초점을 두어 동서방향 온도변화를 고려한 LOC와 남북방향에 대한 MTG 인자를 채택하여 지역 강우와의 통계적 특성을 분석하였다. 사용된 온도자료는 1966년부터 2007년 사이의 월별 지수로서 지표면과 해수면 온도를 나타내는  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$  격자 기반의 자료이다(Jain et al., 1999).

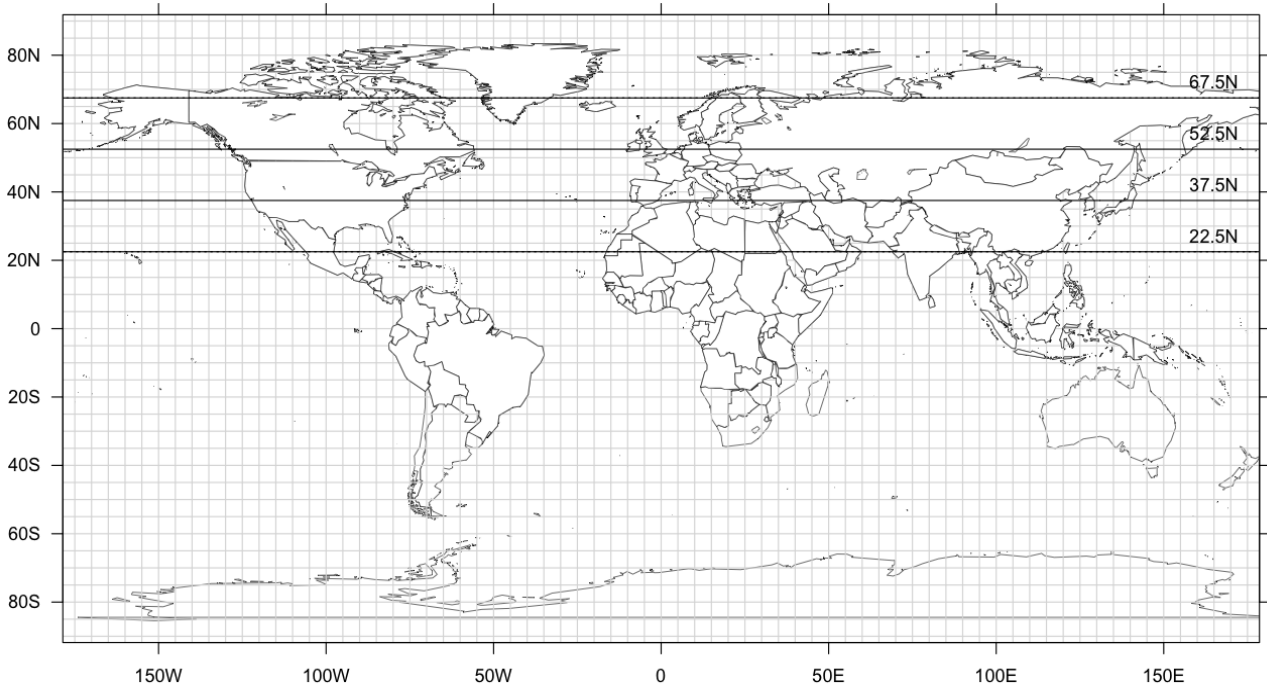


Fig. 1. Map Showing the Grid of Northern Hemisphere Temperature Data

LOC는 대륙의 평균 표면온도(mean Surface Air Temperature, SAT)와 해양의 평균 표면 온도(mean Sea Surface Temperature, SST)의 차이를 나타내는 지표로서 Eq. (1)과 같이 표현될 수 있으며, MTG는 52.5°~67.5°N와 22.5°-37.5°N의 지역의 평균적인 온도차이를 나타내며 Eq. (2)와 같이 정의된다.

LOC=

$$Temp_{s_1}(22.5^\circ - 67.5^\circ N) - Temp_{s_2}(22.5^\circ - 67.5^\circ N) \quad (1)$$

MTG=

$$Temp_{s_3}(52.5^\circ - 67.5^\circ N) - Temp_{s_4}(22.5^\circ - 37.5^\circ N) \quad (2)$$

여기서,  $Temp$ 는 온도지표를 의미하며, 아래 첨자로 사용된 s1은 22.5°N부터 67.5°N사이의 지표면 온도를 표시하며, s2는 22.5°N-67.5°N 사이의 해수면 온도를 나타내고 있다. s3는 중고위도(52.5°N-67.5°N) 지역의 온도를 나타내며, s4는 22.5°N과 37.5°N 지역의 온도를 표시하고 있다. LOC는 해양보다도 대륙에서 더 크고 빠른 온난화가 이루어지는 양상을 확인할 수 있는 지수(Meehl et al., 1993; Jain et al., 1999)이며, MTG는 증가되는 온실가스에 따른 온난화에 대해 예상되는 고위도 지역으로의 전파를 나타내는 대표 지수로서 MTG 값이 0에 가까울수록 적도와 극지방의 온도차가 감소되고 있음을 의미한다(Baganza et al., 2004).

본 연구에서는 LOC/MTG 시계열 값에서 상하위 5개년씩 4set를 각각 채택하여 적용하였다(LOC 최대치해: 1983, 1987, 1988, 1998, 1998년; LOC 최소치해: 1967, 1968, 1972, 1992, 2004; MTG 최대치해: 1989, 1997, 1998, 2003, 2006년; MTG 최소치해: 1968, 1969, 1971, 1972, 1992). LOC/MTG 자료 및 한강유역 강우량 자료의 42개년(1966~2007년) 관측 시계열 자료에 대한 경향성분석을 실시하였으며, LOC/MTG 조건에 따른 지역 강우의 변동성에 대한 유의성 검증을 위해 Bootstrap Resampling 방법을 적용하였다. 또한 Tree-based model을 이용하여 LOC와 MTG 조건에 따른 계절강우량의 변화를 3가지 그룹에 따라 경험적 확률밀도함수(Moon and Lall, 1994)를 적용하여 여름철 몬순강우의 변화를 비교 분석하였다.

## 2.2 연구대상 유역

한강유역은 한반도 중심부에 위치하고 있으며(위도 36°30'~38°55'N, 경도 126°24'~129°02'E), 유역면적은 26,356km<sup>2</sup>로 남한 전체의 23%에 해당된다. 유로연장은 482km, 평균경사와 평균 고도는 각각 18.81%, 405.95 El.m이다(Kim and Jain, 2011). Fig. 2는 한강유역을 24개 중권역으로 구분하여 수치고도지도(DEM)와 같이 나타내고 있다. 한강유역의 동쪽은 경사가 급한 산지와 계곡으로 구성되어 있으며, 서쪽으로 점차 고도가 낮아져 전체적으로 동고서저의 형태를 보이고 있다. 한강유역의 연평균

강우량은 1,253mm이며 이 중 2/3 이상의 강우(894mm, 연평균강우량의 71%)가 여름철(6월~9월)에 집중된다(Kim et al., 2012). 이는 한반도 전체 평균강우량(55.3%) 보다 16.1%가 높아 뚜렷한 여름철 강우집중 현상이 발생하는 특징을 보이고 있다. 한강을 따라 도시가 발달되어 왔으며, 대한민국의 수도인 서울 및 그 주변 수도권 도시들이 포함되어 있어 남한 총 인구의 53%(2600만명)가

거주하고 있는 등 인구 및 산업의 밀집도가 상대적으로 큰 유역이다. 특히 서울은 한강유역 하류부에 위치하고 있어 강우 집중시 홍수대비에 취약한 구조를 갖고 있다. 이러한 사회지리적 특성과 최근 이상기후에 따른 강우의 증가로 인해 홍수피해 및 규모 등 그에 따른 경제적 손실액(유역조사, 2007년; 7,809억원)이 점차 커지고 있는 실정이며, 태풍 및 집중호우 등 강우특성에 따른 정확한 예측분석을 통한 종합적인 방재시스템 구축과 운영이 요구되고 있다.

Fig. 3은 한강유역 24개 소유역별 평균강우량으로 도시하고 있으며, 강우자료가 제공되지 않는 북한지역의 금강산(1008) 유역은 분석에서 제외되었다. Fig. 3(a)는 한강유역 24개 소유역에 대한 평균강우량을 도시하고 있으며, Fig. 3(b)는 소유역별 강우에 대한 몬순강우의 비를 백분율(%)로 나타내고 있다. 24개 소유역에 대한 강우의 상대적 변화를 비교하기 위해 변동계수(Coeff. of variation, CV)를 산정하였다. 연평균 강우에 대한 CV는 0.51이고 몬순강우에 대한 CV는 0.62로 나타났으며, 몬순강우에 대한 변동특성이 연평균 강우의 변동특성보다 크게 나타남을 확인하였다. 또한 한강권역 24개 소유역에 대한 강우를 살펴본 결과, 한강유역의 중앙부 및 중서부에 위치한 서울을 비롯한 그 주변과 한강북부지역에서 연강우량 및 몬순에 따른 강우량 모두 상대적으로 높게 나타났고, 강우의 지역적 편차가 상대적으로 큰 것으로 분석되었다. Fig. 4에도 나타났듯이, 시계열에 따른 1966~2007년의 강우의 경향성 분석결과, 몬순기후에 따른 평균강우량이 통계적으로 유의한 증가추세를 보이는 것으로 나타났다.

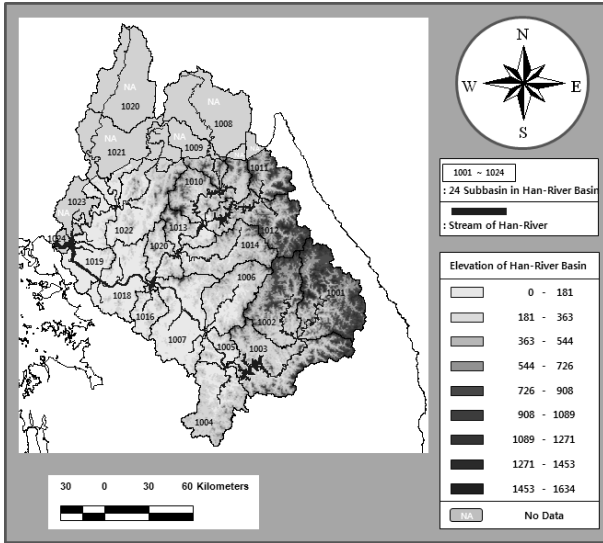
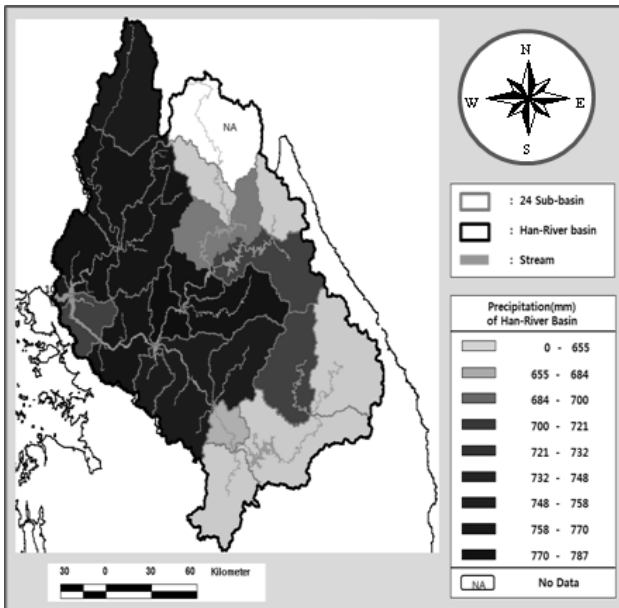
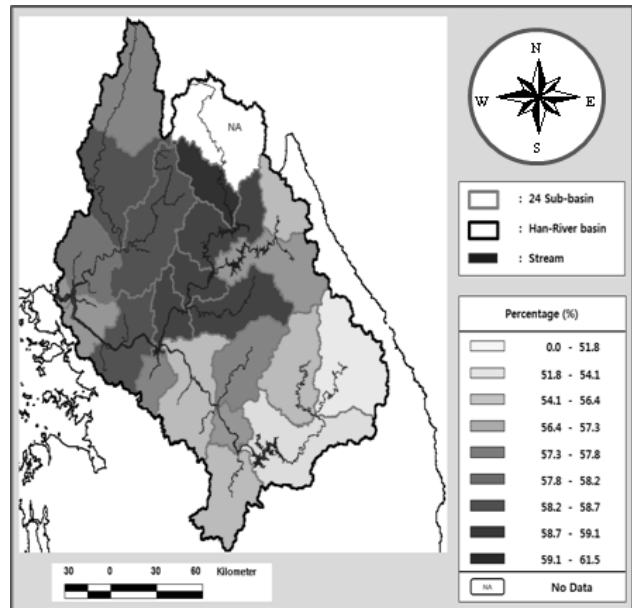


Fig. 2. Han-River Basin Located in the Center of the Korean Peninsula



(a) Annual Summer Total Precipitation (mm)



(b) Fractional Summer Monsoon Precipitation (%)

Fig. 3. Distribution Map of 24 Sub-Basin of Han River Basin Connected Precipitation: Regional Characteristics of Monsoon-Related Precipitation, Summer Season (1966-2007)

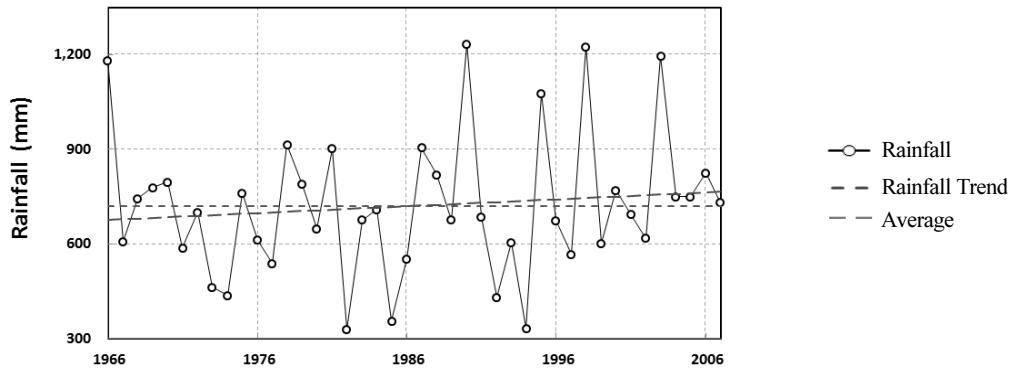


Fig. 4. Time Series of Precipitation Related Monsoon Regional Characteristics of Han-River, Summer Season (1966-2007)

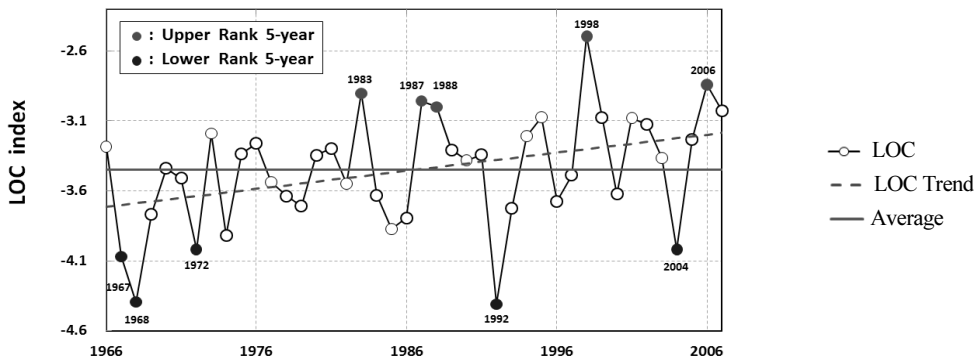


Fig. 5. Time Series of LOC Temperature Indices During the Period 1966-2007

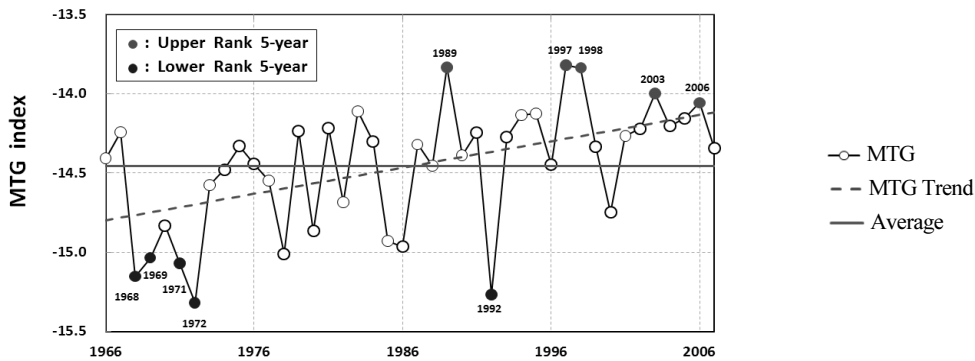


Fig. 6. Time Series of MTG Temperature Indices During the Period 1966-2007

### 3. 분석 결과

#### 3.1 LOC/MTG 및 강우량 경향성 분석결과

Figs. 5 and 6은 LOC/MTG 온도인자의 도시 및 경향성 분석결과를 나타내고 있다. 선형 경향성 분석 식인  $Y = b_0 + b_1X$ 에서 LOC는  $b_0$ 는 -29.11,  $b_1$ 은 0.0129이다. MTG 자료의 경우는  $b_0$ 는 -47.426,  $b_1$ 은 0.0166으로 분석되었으며, 두 자료 모두 양의 경향성을 보이는 것으로 분석되었다. 또한 도시된 결과를 통해 1987년

이후 21년 기간동안 LOC는 16개년, MTG는 19개년의 자료에서 전체 평균보다 상향된 값을 확인할 수 있다. Mann-Kendall test에서 LOC ( $\tau=0.258$ ,  $p=0.017$ )와 MTG ( $\tau=0.387$ ,  $p=0.0003$ ) 지표의 통계적으로 유의한 양의 경향성을 확인할 수 있다.

LOC/MTG 자료의 도시적 분석결과, LOC 상위 5개년 중에 1987, 1988, 1998, 2006년 등 4개년과 MTG 1998, 2003, 2006년 등 3개년에서 평년보다 많은 강우량이 발생하였으며, LOC 하위 5개년 중에 1967, 1992, 2004년 등 3개년과 MTG 1992년 등

1개년에서 평년 이하의 강우량이 발생하였다. 전기간 평균자료를 기준으로 동일한 해에 대한 강우와 LOC/MTG 자료에 대해 편차의 변화를 비교한 결과, 1983년 이전에는 대체적으로 불일치가 많이 발생한 반면에 1983년 이후부터 24개년 시계열 자료에서는 LOC는 1993년, 1999년, 2001년 등 3개년을 제외한 21개년에서 단순거동에 대한 일치를 보였고, MTG의 경우는 1985, 1986, 1987, 1988, 1992, 1995, 1998, 2003~2007년을 제외한 11개 년에서 일치를 보였다. 또한, 추세를 반영하여 비교 도시한 결과, MTG 자료가 1995년 이후 13개년 중에 1997년과 2000년을 제외한 11개년에서 일치되는 결과를 보이는 것으로 나타났다.

### 3.2 LOC/MTG 및 강우량 자료의 연 단위(10년 단위) 상 관분석결과

Figs. 7 and 8은 한강유역의 여름철 몬순강우량과 LOC와 MTG 자료에 대한 회귀분석을 결과를 도시하고 있다. LOC의 자료범위가 약 -2°C로 MTG 범위보다 다소 크게 나타났으며, LOC에 대한 강우량의 변화가 상대적으로 큰 것으로 분석되었다. 온도지수와 몬순강우량의 피어슨 상관분석(Pearson Regression Coeff., PRC) 결과, LOC와 MTG 모두 한강유역의 몬순 강우자료와 양(+)

상관관계를 갖는 것으로 나타났으나, 통계적으로 유의하지는 않는 것으로 분석되었다(LOC-PRC:  $\rho=0.370$ , MTG-PRC:  $\rho=0.291$ ). 그러나, Figs. 9 and 10에서 보는 바와 같이, LOC/MTG 자료와 몬순강우량 자료의 10년 주기 평균에 대한 상관분석을 실시한 결과, MTG-PRC ( $\rho=0.816$ )와 LOC-PRC ( $\rho=0.731$ ) 모두 통계적으로 유의한 양의 상관관계를 보이는 것으로 나타났으며, MTG 지표와 한강의 여름철 몬순강우가 상대적으로 상관성이 큰 것으로 분석되었다.

### 3.3 LOC/MTG에 따른 여름철 강우 특성분석 결과

대기 및 해수면 온도 변화에 따른 여름철 몬순강우의 변동특성을 분석하기 위하여 LOC/MTG 온도 지수를 이용하여 5개의 주요사상을 추출하였으며 이에 따른 지역 몬순 강우량의 백분위 변화를 분석하였다. 다음 Fig. 11은 한강유역의 LOC/MTG로 구분하여 여름철 계절강우의 백분위 편차의 변화량과 변동특성을 분석하고 통계적으로 유의한 경향이 있는 유역을 사선으로 표시하였다. 분석 결과, MTG 양의 해에서 전체 23개 소유역중 9개 유역에서 통계적으로 유의한 증가패턴이 나타났으며, LOC 음의 해의 경우, 14개 유역에서 통계적으로 유의한 감소패턴이 분석되었다. 그러나 LOC

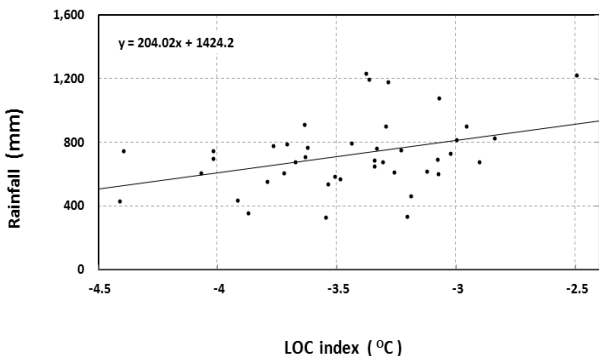


Fig. 7. The Regression Analysis of Monsoon Rainfall and LOC Index

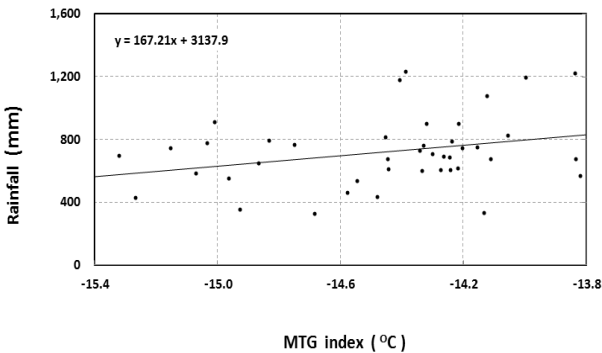


Fig. 8. The Regression Analysis of Monsoon Rainfall and MTG Index

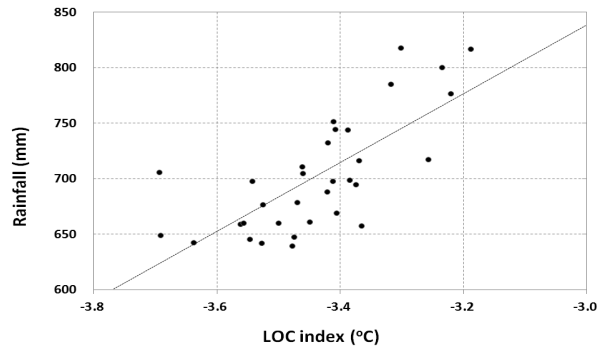


Fig. 9. The Regression Analysis of Monsoon Rainfall and 10yr-mean LOC Index

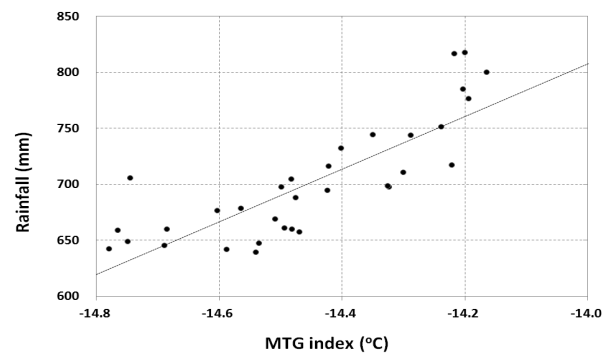


Fig. 10. The Regression Analysis of Monsoon Rainfall and 10yr-mean MTG Index

양의 해와 MTG 음의 해의 경우 남서부 일부지역을 제외한 전역에서 평년보다 적은 강우량이 발생하였으며, 이러한 변화는 통계적으로도 유의하지는 않는 것으로 분석되었다.

여름철 동아시아 강수를 지배하는 하나의 원인으로 저위도 공기의 대류에 의한 전파를 들 수 있다(Kosaka and Nakamura, 2006). LOC/MTG 모두 양의 해일 경우 음의 해에서 발생한 것보다 적도를

포함한 저위도에서 강한 대류에 의해 중위도로 전파되어 한반도를 포함한 동아시아 지역에 많은 강수 분포를 나타내는 것으로 판단된다. LOC/MTG 양의 해가 음의 해보다 저위도에서의 대류현상이 활발하게 나타난 원인으로 서태평양의 따뜻한 해수면 온도를 들 수 있다. 또한, MTG 양의 해와 음의 해의 차이는 LOC 차이의 경우보다 저위도에서 중위도로 전파되는 파는 작지만, 동중국해의 높은 해수면온도가 동아시아 지역의 강수에 2차적인 영향을 준 것으로 사료된다.

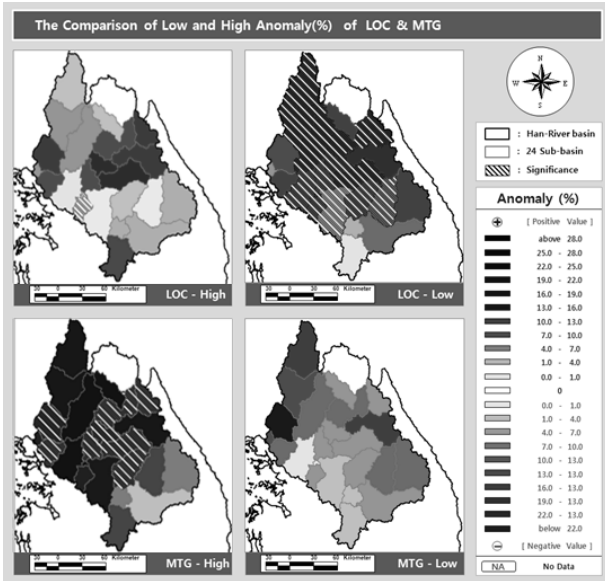
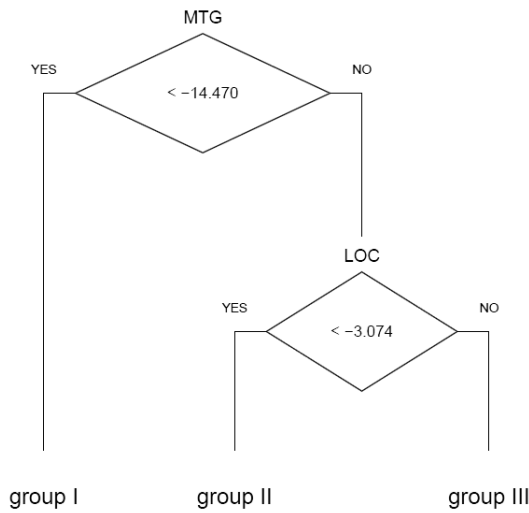


Fig. 11. Warm Season Anomaly Rainfall During Different Phases of LOC/MTG

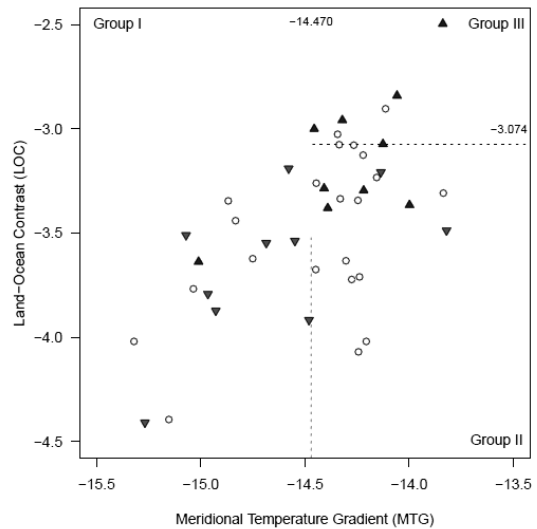
### 3.4 조건부 LOC/MTG에 따른 여름철 강우 특성분석

문순기후의 영향에 따른 강우의 발생은 대기순환 패턴의 변화에 따른 수분유입과 관련되어 있으며, 동서방향과 남북방향의 온도의 차이를 나타내는 LOC/MTG의 변화에 상당한 영향을 받는 것으로 나타나고 있다. 그러나 이러한 LOC/MTG패턴의 변화는 서로 독립적으로 작용한다기 보다는 복합적으로 작용하여 지역강수의 변화를 발생시킨다. 따라서 본 연구에서는 한강유역에서 발생한 여름철 문순강우를 LOC와 MTG 두 인자의 조건부적 변화를 분석하였다. 복합적인 온도지표의 변화를 분류하기 위하여 Tree-based model 기법을 적용하였으며, 다음과 같이 Group I, II, III로 분류하여 강수량의 변화 패턴을 분석하였다(Fig. 12).

Tree-based model을 적용하여 세 개의 그룹으로 분류한 결과는 Fig. 12(a)와 같다. Group I의 경우, MTG가 -14.470보다 작은 경우이고, Group II는 두 패턴의 복합적 변화를 고려한 MTG > -14.470, LOC < -3.074인 경우이며, Group III는 MTG가



(a) Tree-Based Model



(b) Joint Influence of LOC/MTG

Fig. 12. Changes in Summer Monsoon Precipitation Based on LOC/MTG Condition. (a) Tree-Based Model. (b) Joint Influence of LOC/MTG Patterns. Partitions of the Predictor Space are Determined by the Tree-Based Model Approach. Solid Triangles Represents the 10 Highest (Upward Pointing Triangles) and the 10 Lowest (Downward Pointing Triangles) Monsoon Precipitation in the Han River Basin (1966-2007)

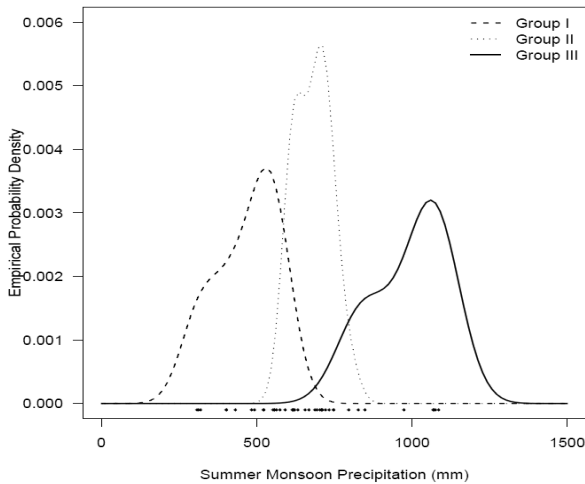


Fig. 13. Empirical Probability Density Functions. The Lines Indicate Distribution for Summer Monsoon Precipitation Determined by the Tree-Based Model Approach

-14.470 이상이며 LOC가 -3.074보다 큰 경우를 나타낸다. 세 개의 그룹에 따른 한강유역의 몬순강우량의 변화는 Fig. 12(b)에 도시하였다. 여기서, 삼각각(▲)은 전기간 강우 중 상위 10개년 연평균 강우량이고, 하삼각(▼)은 하위 10개년으로 나타내고 있으며, 상위 및 하위를 제외한 22개년 연평균 강우량을 원형(○)으로 표시하였다.

Tree-based model을 이용한 분석결과, 상위 10개년 자료 중 5개년 및 4개년 강우가 각각 Group III, Group II에서 발생한 반면에, 하위 10개 강우 중 8개년, 2개년 강우가 각각 Group I, Group II에서 발생하였다. LOC가 -3.074 이상인 경우에는 강우의 증가경향을 보였으며, MTG가 -14.470 이하인 경우는 감소되는 경향을 갖는 것으로 나타났다. 또한 원자료의 구조적 특성의 반영이 가능한 경험적 확률밀도함수를 도식한 결과(Fig. 13), Group I, II, III의 구분에 따른 여름철 몬순 강우량의 분포 특성이 확연히 달라짐을 확인할 수 있었다.

#### 4. 요약 및 결론

장기적인 측면에서 수자원의 정확한 예측 및 안정적인 용수공급을 예측하기 위하여 기후변화 인자들과 수문자료간의 관계를 규명하는 일은 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 기후변동과 관련된 대표적인 전지구 온도 지표인 LOC/MTG의 변화에 따른 한강유역의 몬순강우량과의 관계를 분석하였으며, 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) LOC 및 MTG 자료를 42년 전기간치 JJAS 기간 평균자료에 대한 변화 특성을 분석한 결과, 1987년 이후 21년 기간동안

LOC는 16개 MTG는 19개의 평균보다 상향된 값이 나타남을 확인했으며, 최근으로 가까울수록 증가 경향성이 뚜렷한 특징을 보였다. 그러나 여름철 몬순 강우량은 11개에서 평년보다 큰 강우가 발생하였으며, 특히 42개년 강우 상위 5개년 중 4개년에서 평년 이상의 강우가 나타났으며 변동성 또한 큰 것으로 분석되었다(CV 0.62). 또한, LOC와 MTG 시계열 자료 모두 통계적으로 유의한 증가 경향을 보이는 것으로 나타났다.

(2) LOC/MTG 자료와 계절 몬순 강우량과의 상관성 분석을 1년 단위 및 10년 주기 단위로 실시하였다. 1년 단위 LOC의 경우 MTG보다 계절몬순 강우량의 상관성이 다소 큰 것으로 분석되었으나 통계적인 유의성은 크게 나타나지 않았다. 반면에 LOC/MTG 자료와 계절 몬순강우량의 10년 주기 평균에 대한 상관분석 결과, LOC/MTG 모두 몬순강우량과 통계적으로 유의한 양의 상관성을 보이는 것으로 나타났다(MTG-Rain:  $\rho=0.816$ , LOC-Rain:  $\rho=0.731$ ).

(3) LOC/MTG 시계열 자료에서 5개의 주요사상을 추출하여 여름철 몬순 강우량의 백분위 편차와 변동성을 분석한 결과, MTG-high에서 전체 23개 유역중 9개 유역에서 통계적 유의한 증가패턴이 나타났으며, LOC-low의 경우 14개 유역에서 평년보다 적은 몬순강우가 발생한 것으로 나타났다. 그러나 LOC-high와 MTG-low에 대해서는 전반적으로 평년보다 작은 강우량이 나타났지만 통계적으로 유의한 변화는 보이지 않는 것으로 분석되었다.

(4) Tree-based model을 적용하여 LOC와 MTG 두 인자의 복합적 변화에 따른 몬순 강우의 변화를 분석한 결과, Group I (MTG < -14.470)과 Group II (MTG > -14.470, LOC < -3.074)에서 평년보다 작은 강우가 발생하였으며, 상위 10개 사상 중 5개가 Group III (MTG > -14.470, LOC > -3.074)에서 나타났으며 평년보다 큰 몬순강우가 발생하였다.

한반도 여름 몬순기후의 영향에 따른 한강유역 강우와 LOC 및 MTG를 분석한 결과 LOC/MTG 인자들이 한강유역의 여름철 몬순 강우에 상당한 영향을 미치고 있음을 확인 할 수 있었으며, 특히 MTG변화에 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 최근 지구 온난화를 반영하듯이 LOC 및 MTG가 증가경향을 보이고 있으며 이와 관련되어 강우의 증가경향을 확인하였다. 본 연구의 결과는 상대적으로 짧은 관측자료에 의존하고 있지만, LOC/MTG와 기후변화에 따른 강우의 예측 및 수자원 정책 수립을 위한 소통정보로서 활용될 것으로 판단된다. 전지구 온도지표와 계절 강수량의 변화에 대한 명확한 메커니즘을 이해하기 위해서는 기후모델을 통한 검증이 필요하며 몬순과 관련된 바람, 수분이송 등과 연계된 수문순환 시스템의 면밀한 분석이 필요할 것으로 사료된다.



## 감사의 글

이 논문은 2012년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 창의적 연구사업 연구임(2012R1A1A2005304).

## References

- An, Z., Porter, S. C., Kutzbach, J. E., Wu, X. H., Wang, S. M., Liu, X. D., Li, X. Q. and Zhou, W. Z. (2000). "Asynchronous holocene optimum of the East Asian monsoon." *Quat. Sci. Rev.*, Vol. 19, pp. 743-762.
- Braganza, K., Karoly, D. J., Hirst, A. C., Stott, P., Stouffer, J. and Tett, S. F. B. (2004). "Simple indices of global climate variability and change Part II: Attribution of Climate Change during the Twentieth Century." *Climate Dynamics*, Vol. 22, pp. 823-838.
- Fasullo, J. T. (2010). "Robust land-ocean contrasts in energy and water cycle feedbacks." *J. Clim.*, Vol. 23, pp. 4677-4693.
- Gao, Y., Xu, S., Guo, Q. and Zhang, M. (1962) "Monsoon region and regional climate in China, in: Some Problems of East Asian monsoon." *Science Press*, Beijing, pp. 49-63.
- Gitelman, A. I., Risbey, J. R., Kass, R. E. and Rosen, R. D. (1997). "Trends in the surface meridional temperature gradient." *Geophys Res Lett*, Vol. 24, pp. 1243-1246.
- Hasen, J. E. and Lebedeff, S. (1987). "Global trends of measured surface air temperature." *J. Geophys. Res.*, Vol. 9, No. 13, pp. 345-372.
- Jain, S., Lall, U. and Mann, M. E. (1999). "Seasonality and interannual variations of northern hemisphere temperature: Equator to Pole Temperature Gradient and Land-Ocean Contrast." *J. Clim.*, Vol. 12, pp. 1086-1100.
- Jones, P. D., Raper, S. C. B. Bradley, R. S., Diaz, H. F., Kelly, P. M. and Wigley, T. M. L. (1986a). "Northern hemisphere surface air temperature variations: 1851-1984." *J. Clim. Appl. Meteorol.*, Vol. 25, pp. 161-179.
- Jones, P. D., Raper, S. C. B. and Wigley, T. M. L. (1986b). "Southern hemisphere surface air temperature variations: 1851-1984." *J. Clim. Appl. Meteorol.*, Vol. 25, pp. 1213-1230.
- Kim, J. S. and Jain, S. (2011). "Precipitation trends over the Korean peninsula: Typhoon-induced changes and a typology for characterizing climate-related risk." *Environmental Research Letters*, Vol. 6, p. 034033.
- Kim, J. S., Jain, S. and Yoon, S. K. (2012). "Warm season streamflow variability in the Korean Han river basin: Links with atmospheric teleconnections." *International Journal of Climatology*, doi:10.1002/joc.2290.
- Kosaka, Y. and Nakamura, H. (2006). "Structure and dynamics of the summertime Pacific-Japan teleconnection pattern." *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, Vol. 132, pp. 2009-2030.
- Lau, K. M., Yang, G. J. and Shen, S. (1988). "Seasonal and intraseasonal climatology of summer monsoon rainfall over East Asia." *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 116, pp. 18-37.
- Meehl, G. A., Washington, W. M. and Karl, T. M. (1993). "Low-frequency variability and CO<sub>2</sub> tanist climate change: Part 1. Time-Averaged Differences." *Clim Dyn*, Vol. 8, pp. 117-133.
- Mitchell, J. F. B., Karoly, D. J., Allen, M. R., Hegerl, G., Zwiers, F. and Marengo, J. (2001). "Detection of climate change and attribution of causes." In: Houghton, J. T. et al. (eds) "Climate change." 2001: the scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 695-738.
- Moon, Y. I. and Lall, U. (1994). "Kernel quantile function estimator for flood frequency analysis." *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 11, pp. 3095-3103.
- Tao, S. and Chen, L. (1987). "A review of recent research on the east asian summer monsoon in China." *Monsoon Meteorology*, Chang CPand Krishnamurti TN, Eds, Oxford University Press, pp. 60-92.
- Trenberth, K. E., Stepaniak, D. P. and Caron, J. M. (2000). "The global monsoon as seen through the divergent atmospheric circulation." *J. Clim.*, Vol. 13, pp. 3969-3993.
- Wang, B., Wu, Z., Li, J., Liu, J., Chang, C. P., Ding, Y. and Wu, G. (2008). "How to measure the strength of the East Asian summer monsoon?" *Journal of Climate*, Vol. 21, pp. 4449-4463.