

PJ 대기패턴과 태풍에 의한 낙동강 유역의 수문학적 극치 사상의 지역적 특성 변화 분석

Atmospheric Circulation of Pacific-Japan (PJ) and Typhoon-induced Extremes in the Nakdong River Basin

김 종 석* / 윤 선 권** / 문 영 일*** / 이 주 현****

Kim, Jong-Suk / Yoon, Sun-Kwon / Moon, Young-Il / Lee, Joo-Heon

Abstract

The East Asia (EA) region including China, Taiwan, Japan, and Korea are especially vulnerable to hydro-meteorological extremes during the boreal summer (June-September). Therefore, this study pursued an exploratory analysis to improve better understanding of the potential impacts of the PJ pattern on WNP Tropical cyclone (TC) activity and TC-affected extremes based on the Korean Nakdong River Basin. The results show that during the positive PJ years, the large-scale atmospheric environments tend more favorable for the TC activity than those in the negative PJ years. KP-influenced TCs during the positive (negative) PJ years are likely to occur more southwestward (northeastward), recurve at more northwestward (northeastward) locations, and indicate increase (decrease) in frequency over Korea and Japan. Consequently, TCs making landfall are more exhibited over the southeastern portions of South Korea during the positive PJ years.

Keywords : Tropical cyclone, PJ pattern, summer precipitation, Nakdong River basin

요 지

한반도를 포함한 동아시아 지역은 여름철에 수문기상학적 극치사상에 취약한 지역이다. 따라서 본 연구에서는 대표적인 동아시아 지역의 대기순환 패턴인 Pacific-Japan (PJ) 패턴을 중심으로 북서태평양 지역의 태풍 활동 특성을 분석하였다. 특히, 한반도에 영향을 미치는 태풍을 중심으로 낙동강 유역의 태풍에 의해 유발된 여름철(June-September) 강수의 지역적 특성 변화를 진단하였다. 분석 결과, 양(+)의 PJ 기간에 발생하는 대기순환패턴의 변화는 태풍의 활동에 보다 유리한 작용을 하는 것으로 나타났다. 한반도에 영향을 미치는 태풍에 대한 진로 분석 결과, 양(+) PJ 기간동안 태풍이 주로 남서쪽으로 향하는 경향이 있으며, 음(-)의 PJ 기간에는 북동쪽으로 향하는 경향이 있는 것으로 나타났다. 태풍 진로의 전향점(recurving location)은 양(+)의 PJ 기간에는 보다 북서쪽에 위치하며, 음(-)의 PJ 기간에는 보다 북동쪽에 치우쳐 있음이 분석되었다. 따라서, 음(-)의 PJ기간 보다 양(+)의 PJ 기간에 태풍의 활동이 활발하며, 낙동강유역에서 태풍에 의한 강수가 통계적으로 유의한 증가패턴이 뚜렷하게 발생하고 있는 것으로 확인되었다.

핵심용어 : 태풍, PJ 패턴, 여름철 강수, 낙동강 유역

* 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 연구교수

Department of Civil Engineering, The University of Seoul, Seoul 130-743, Korea.

** 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 미래도시연구소 박사후연구원

Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea.

*** 교신저자, 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 교수 (e-mail: ymoon@uos.ac.kr, Tel: 02-2210-2764)

Corresponding Author, Department of Civil Engineering, The University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

**** 중부대학교 공과대학 토목공학과 교수

Department of Civil Engineering, Joongbu University, Chung-nam 312-702, Korea.

1. 서론

한반도 지역은 동아시아 몬순(monsoon)의 영향을 받고 있으며, 특히 여름철 열대성 태풍(TC; tropical cyclone)에 의한 극치강우 사상의 발생으로 홍수범람, 산사태 등과 같은 자연재해가 해마다 발생하여 수많은 인명피해와 더불어 사회·경제적으로 손실을 가져오고 있다. 자연재해 뿐 아니라 유역 차원의 안정적인 용수공급과 원활한 수자원 확보를 위하여 기상인자와 대기패턴 변화에 따른 집중호우와 태풍 등 극치사상의 발생에 관한 연구는 매우 중요하다(Yuan et al., 2008; Chan and Xu, 2009; Kim and Jain, 2011). 특히 PJ (Pacific-Japan) 패턴은 동아시아의 여름철 대표적인 대기 패턴으로 대류활동과 관련이 있으며 원격상관(teleconnection)에 의한 대규모 대기순환 패턴의 변화가 기상 및 기후변화에 상당한 영향을 미치고 있다고 보고되고 있다(Nitta, 1987; Nitta and Hu, 1996; Wakabayashi and Kawamura, 2004; Kawamura and Ogasawara, 2006; Choi et al., 2010; Kosaka et al., 2010). 동아시아 지역의 여름철 몬순과 PJ 패턴과의 관계규명을 위한 연구는 현재 활발히 진행 중에 있으나(Huang and Li, 1987; Tsuyuki and Kurihara, 1989; Kawamura et al., 1996 and 1998; and Kosaka and Nakamura, 2006), PJ 패턴에 따른 열대성 태풍의 활동에 관한 연구는 상대적으로 미비한 실정이다. Kawamura and Ogasawara (2006)는 열대성 태풍은 북서태평양(WNP) 지역의 대기 순환의 원인이 되어 PJ 패턴의 수직구조를 바꿀 수 있음을 시사하고 있으며, 열대성 태풍과 중심이 변형된 역선풍(anti-cyclone) 사이의 동-서 방향 압력 기울기가 낮은 층에서 일본의 동태평양 해안을 따라 중호우를 유발하는 원인으로 작용하고 있다고 밝히고 있다. 그러나 그들의 연구는 대기 패턴 형태의 분석을 8월에 국한하여 적용하였다. Yamada and Kawamura (2007)는 열대성 태풍과 PJ 패턴 사이의 동적 연결(dynamic link)이 초여름과 가을에 발생하는 장마전선 활동에 영향을 주어 일본 전역에 폭우를 유발할 수 있음을 밝혔다. 기존의 대부분의 선행 연구들은 북서태평양의 열대성 태풍의 활동에 의한 PJ패턴의 변화와 그로 인한 여름철 중호우사상과의 잠재적 관계규명에 초점을 맞추고 있다. 그러나 PJ 패턴으로 인한 계절별 열대성 태풍의 활동 변화에 대한 영향은 명확하게 규명되지 못하고 있는 실정이다. 최근, Choi et al. (2010)의 연구에 의하면, PJ 패턴이 북서태평양지역 태풍의 발생지점(genesis), 변향점(recurvature), 그리고 태풍의 강도(intensity)에 있어 상당한 영향을 주고 있음을 밝히고 있으나, 모든 온대

저기압(ETs; extratropical cyclones)을 포함한 북서태평양지역의 여름철(July~September)기간의 태풍의 활동에 초점을 맞추고 있어 한반도와 관련된 태풍에 의한 지역적 특성변화를 파악하기에는 한계가 있다.

국내의 경우, Shin et al. (1999)은 남방진동지수(SOI)와 우리나라 22개 기상관측소의 월강수량과의 교차상관 계수를 구함으로써 El Niño와 우리나라 강수량의 시·공간적 상관관계를 분석하였으며, Kwon and Moon (2005)은 주성분분석과 독립성분분석을 통하여 추출한 시계열 자료를 바탕으로 Niño3.4지역의 해수면온도와 우리나라 여름강수량과의 상관성을 분석하였다. Chu et al. (2007)은 ENSO (El Niño-Southern Oscillation)를 정량적으로 표현해 주는 지수로 SOI자료를 사용하여 월강수량, 월평균 기온, 댐 월유입량 자료를 바탕으로 한국의 계절별 수문 특성변화를 분석하였으며 warm ENSO에는 강수량 증가와 기온상승, cold ENSO에는 강수량 감소와 기온하강과 관계가 있음을 밝혔다. 또한 Kim et al. (2008)은 기후시스템을 구성하는 지수의 다양한 변동과 상호작용의 시공간적 분석을 통한 한반도의 기온 및 강수량 변동에 영향을 미치는 광역규모 기후지수들을 분석하였으며, Kwon and Lee (2011)는 낙동강유역에 대하여 Bayesian 통계기법을 이용하여 기상인자와 비정상성 빈도해석 모형을 이용한 계절강수량을 전망한 바 있다.

본 연구에서는 한반도에서 태풍의 영향이 가장 큰 낙동강 유역을 대상으로 PJ 대기패턴에 의한 태풍의 활동 분석과 관련하여 다음의 두 가지 사항을 중심으로 분석하였다. (1) 한반도에 영향을 주고 있는 태풍의 효과에 초점을 맞추어 PJ 대기 패턴에 따른 북서태평양 태풍의 활동 패턴을 진단한다. (2) 태풍에 의한 극치사상의 계절적/지역적 변동 특성을 분석한다. 본 논문의 구성은 2장에서는 대상 자료와 방법론을 설명하였으며, 3장에서는 PJ 패턴에 의한 태풍 활동의 특성을 분석하였다. 마지막으로, 4장에서는 양(+)의 PJ와 음(-)의 PJ기간별 PJ 패턴에 따른 태풍에 의한 낙동강 유역의 강수패턴과 변동 특성을 분석하였다.

2. 대상자료 및 분석방법

본 연구에서 사용한 기상자료는 위도 2.5°와 경도 2.5° 격자크기의 공간 자료를 가공하여 분석한 NCEP-NCAR 자료를 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)로부터 제공받아 사용하였다(Kistler et al., 2001). 1966년부터 2007년까지의 42개년 동안의 북서태평양에서 발생한 태풍의 진로에 대한 자료는 우리나라의 태풍연구

센터(TRC, 2012)와 일본의 기상청(JMA, 2012)의 관측 자료를 적용하였다. 또한, 낙동강유역의 여름철(June~September) 일강수량 자료는 유역 평균된 국가수자원관리정보시스템(WAMIS, 2012)의 자료를 사용하였다.

국지적인 대기순환에 의한 북서태평양 지역의 태풍활동에 대한 이해를 위하여 Wakabayashi and Kawamura (2004)는 PJ패턴을 북반구의 여름철(boreal summer) 기간 동안에 대만의 동쪽 지점(125°E, 22.5°N)과 일본의 동쪽 지점(155°E, 35°N) 사이에 해당하는 두 격자지점의 850-hPa 지위고도(geopotential height)의 Anomalies 자료를 통하여 다음 Eq. (1)과 같이 정의하였다.

$$PJ = \frac{[Z_{850hPa}(155^{\circ}E, 35^{\circ}N) - Z_{850hPa}(125^{\circ}E, 22.5^{\circ}N)]}{2} \quad (1)$$

여기서, Z는 850-hPa 지위고도의 아노말리(Anomalies) 자료를 의미한다. 본 연구에서는 상기 Wakabayashi and Kawamura (2004)의 방법론을 적용하여 강한 양(+)의 PJ와 음(-)의 PJ기간에 대하여 북서태평양 지역에서 발생하였던 태풍의 사상을 분류하였다. 다음 Fig. 1은 1966~2007년 동안의 표준화된 여름철(JJAS: June to September) PJ패턴을 나타내고 있으며, 여름철 기간 동안의 강한 PJ사상의 선정은 양(+)의 PJ와 음(-)의 PJ사상이 +1σ와 -1σ를 초과하는 기준에 의하여 구분하였다. 표준화된 지수(Normalized PJ Index)로 42개년 동안의 PJ사상을 구분

하여 분석한 결과 8개(1972, 1975, 1978, 1979, 1989, 1999, 2000, 2004)의 강한 양(+)의 PJ사상과 7개(1967, 1971, 1983, 1991, 1993, 1995, 1996)의 강한 음(-)의 PJ사상을 추출하였다. 낙동강유역의 태풍사상(episodic TCs)에 의한 계절강수량을 정량화하기 위한 방법으로, Kim et al. (2011, 2012)과 Kim and Jain (2011)이 제시하였던 한반도도메인(120~138°E, 32~40°N) 크기의 격자 공간을 지나 는 태풍에 대하여 체류시간(residence time)과 유역의 강우 및 유출의 반응을 고려한 탐색적 분석기법(exploratory analysis)을 적용하였다. 분석결과, 1966~2007년의 42년 동안 한반도 도메인에는 208개의 태풍이 영향을 주었음을 확인하였다. 태풍에 의한 낙동강 유역의 지역적 특성 분석은 Composite analysis를 적용하였으며, 분석결과에 대한 유의성 테스트는 Monte Carlo resampling 기법을 통하여 평가하였다.

3. PJ 패턴에 의한 태풍활동의 특성 분석

북서태평양(WNP)에서 발생한 태풍은 한반도의 여름철 강수패턴변화에 영향을 주는 수문기상학적(hydrometeorological) 요인으로 작용하고 있다. 최근, 고해상도(high-resolution) 동역학적 모형에 기반한 기후변화 연구(Emanuel et al., 2008; Knutson et al., 2010)는 북서태평양에서 발생하는 열대성 태풍의 발생빈도(Frequency)와 강도(intensity)

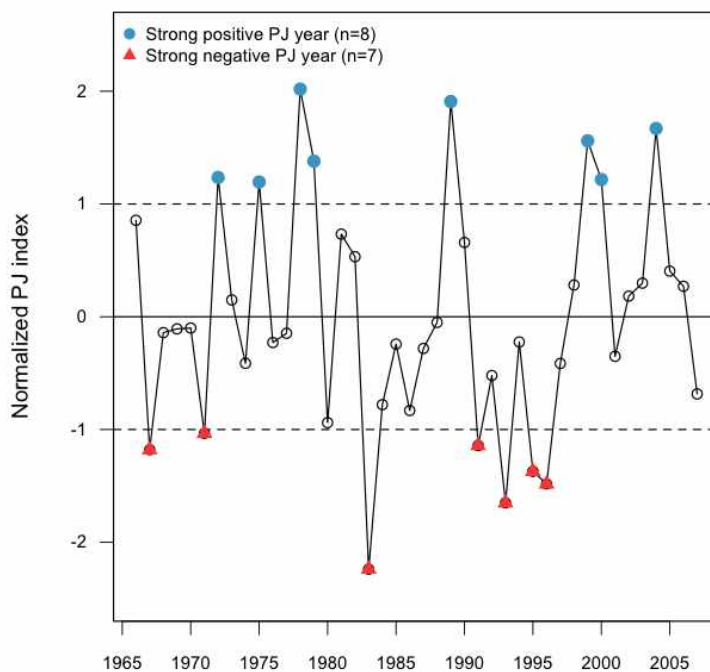


Fig. 1. Normalized PJ (Pacific-Japan) Index from 1966 to 2007

가 21세기 들어 점차 증가하는 추세를 보일 수 있음을 전망했다. 특히, 본 연구의 대상유역인 낙동강유역은 한반도에서 수문기상학적으로 여름철 태풍에 의한 영향을 가장 많이 받고 있는 지역에 속하며, 태풍에 매우 취약한 유역이다(Kim and Jain, 2011). 과거 태풍에 의한 피해와 재난 발생 자료들이 이에 대한 이해를 한층 높여주고 있으며, 최근 낙동강 유역의 태풍에 의한 재난 규모를 줄이고 피해를 완화하고자하는 시스템 개발 투자와 연구개발이 활발히 진행되고 있는 실정이다. 본 장에서는 한반도 낙동강유역에 수문기상학적으로 영향을 줄 수 있는 두 가지 형태의 PJ 패턴에 의한 태풍활동의 잠재적 영향을 분석하고자 하며, 특히 태풍의 발생위치(genesis position), 발생빈도(frequency), 이동경로(tracks), 강도(intensity) 및 지속기간(lifetime) 등을 포함하여 대규모 기상현상과 관련된 태풍의 활동을 분석하였다.

3.1. 태풍의 생성위치 및 발생빈도 분석

다음 Fig. 2는 북서태평양 지역에서 발생한 태풍의 양(+)의 PJ 기간과 음(-)의 PJ 기간 동안의 전체 태풍과 한반도에 영향을 주었던 태풍의 발생위치(genesis position)의 차이를 보여주고 있다. 본 연구에서는 태풍의 발생위치(genesis position)를 분석하기 위하여 이변량 경험적 분포함수(bivariate empirical distribution functions)를 사용하였으며, Lower quartile level과 Median level 그리고 Upper quartile level의 3가지 등고선 형태로 표현하였다. 다음 Fig. 2a는 북서태평양지역에서 발생한 전체 태풍에 대한 분석결과이며, 양(+)의 PJ와 음(-)의 PJ 기간에 따른

태풍의 발생위치의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 한반도 도메인을 통과하였던 태풍만을 대상으로 분석한 결과, 양(+)의 PJ 기간과 음(-)의 PJ 기간으로 분류하여 태풍의 발생위치가 확연한 차이를 보이고 있다(Fig. 2b). 한반도에 영향을 미치는 태풍들의 발생위치는 필리핀해(Philippine Sea)의 북동쪽에 중심부가 위치하며, 특히 음(-)의 PJ 시기에는 중심의 평균 위치가 142.5°E, 16.8°N이고 양(+)의 PJ 시기에는 중심의 평균 위치가 139.2°E, 16.0°N로 나타났다. 따라서 음(-)의 PJ 시기에는 양(+)의 PJ 시기 비하여 태풍의 발생이 보다 북동쪽으로 향하여 위치하고 있음을 확인할 수 있다.

다음 Fig. 3에서는 서로 다른 두 가지 PJ 패턴 사이의 태풍 발생빈도(frequency)의 차이를 보여 준다. 과거 1966~2007년까지 42년 동안의 관측 자료에 따르면, 706개의 태풍이 여름철(June-September) 기간 동안에 북서태평양 지역에서 발생하였다. 매년 16.8개의 태풍이 북서태평양 지역에서 발생하였으며, 북서태평양 지역에서 발생한 태풍 발생빈도에 대한 변동계수(CV; coefficient of variation)는 0.24로 크지 않는 것으로 나타났다. 이 중, 208개의 태풍이 42년 동안 한반도 도메인에 해당하는 120~138°E, 32~40°N 지역을 통과하여 우리나라에 영향을 미쳤다. 따라서 매년 5.0개의 태풍이 북서태평양지역에서 발생되어 한반도 지역에 영향을 미치고 있으며, 한반도 지역에 영향을 미치고 있는 태풍의 발생빈도에 대한 변동계수는 0.37로 전체 북서태평양 지역에서 발생한 태풍의 발생빈도보다 약간 크게 나타났다. 북서태평양지역에서 발생한 모든 태풍들 중, 양(+)의 PJ 기간 동안에 발생한 태풍의 발생회수는 전체 기

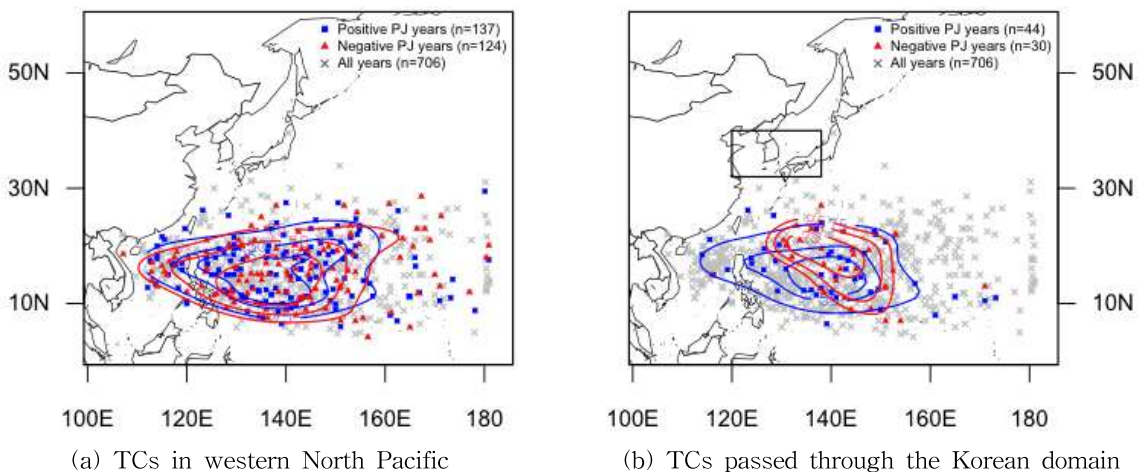


Fig. 2. Tropical Cyclone Genesis During the June-September Period. (a) TC Genesis Position in Western North Pacific. (b) TC Genesis Position Passed through the Restricted Domain (120°E-138°E, 32°N-40°N). The Joint Distribution of TC Genesis Position are Shown Corresponding to the Positive PJ Years (blue) and Negative PJ Years (red) in Observations, Respectively

간의 평균치(16.8 TCs/year)보다 많은 17.1 (TCs/year) 개로 분석되었으며, 이는 90% 신뢰수준에서 통계적으로 유의한 결과는 아니다. 그러나 음(-)의 PJ 기간 동안에 발생한 태풍의 숫자는 17.7 (TCs/year) 개로, 전 기간의 평균을 상회하는 통계적으로 유의한 결과를 나타내고 있다.

다음은 한반도에 영향을 미치고 있는 태풍을 중심으로 양(+의 PJ 기간과 음(-)의 PJ 기간으로 구분하여 태풍의 발생빈도와 변동성을 분석한 결과이다. 양(+의 PJ 기간에는 한반도지역에 영향을 미친 태풍의 숫자가 평균적으로 5.5 (TCs/year)개가 발생하여 평년 태풍 발생평균치(5.0 TCs/year) 보다 다소 높은 수치를 보이고 있으며, 그 차이는 신뢰수준 90%에서 통계적으로 유의한 결과로 나

타났다. 반면에 음(-)의 PJ 기간에는, 한반도 영향 태풍의 발생빈도가 평균적으로 4.3(TCs/year)개로 분석되었으며, 이는 평년 태풍 발생평균치(5.0 TCs/year)보다 다소 낮은 수치로 통계적으로 유의한 변화를 나타내고 있다.

3.2. 태풍의 진로(TCs Tracks)와 전향지점(Recurving location) 분석

여름철 북서태평양 저위도 지역에서 발생한 태풍은 서서히 서진한 후 북위 20~30°N 부근에서 진로를 북동쪽으로 전향한 다음 빠른 속도로 진행하는 형태가 대부분이다. 최근 연구에 의하면, 태풍의 전향점(recurving location)은 점차 북서쪽방향(northwestward)에서 북동쪽방향

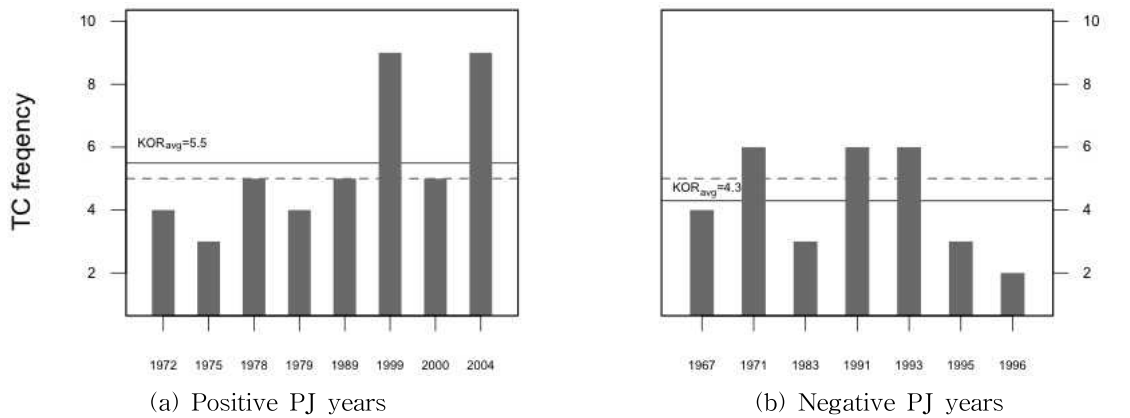


Fig. 3. TC Frequency for Two PJ Phases. (a) TC Frequency in the Positive PJ Years. (b) TC Frequency in the Negative PJ Years. Dotted Line is a Climatological Mean of TC Frequency in Each Region (Korean domain: 5.0/year)

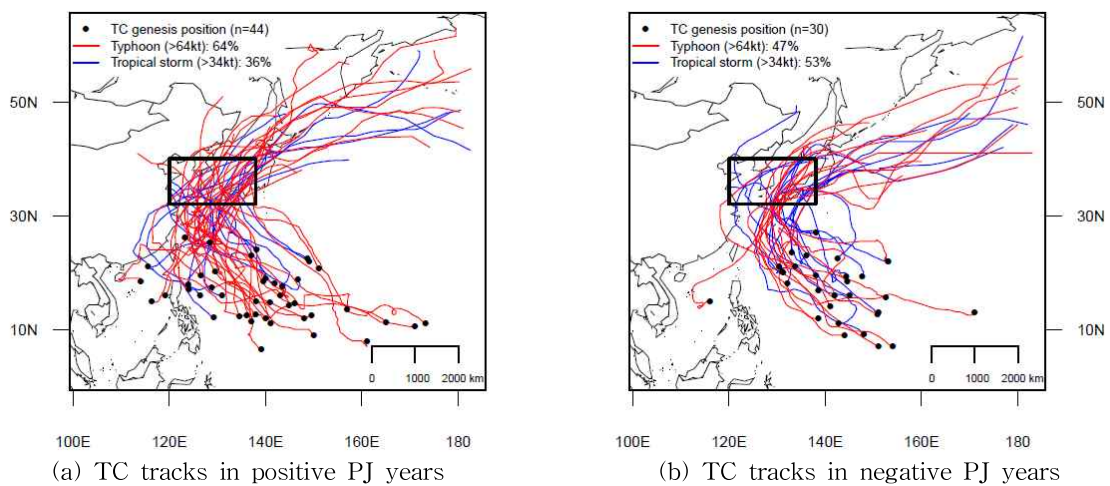


Fig. 4. Map of TC Tracks for the PJ Years. (a) TC Tracks in Positive PJ Years. (b) TC Tracks in Negative PJ Years. For Each Case, TC Intensity Based on Maximum Wind Speed (MWS) is Shown as Colored Lines: Red (MWS \geq 64kt), Blue (34kt \leq MWS < 64kt). The Black Circles Indicate Locations of TC Genesis. All TC Tracks Shown Here Pass through the Restricted Korean Domain (120°E–138°E, 32°N–40°N)

(northeastward)으로 옮겨지고 있다고 보고되고 있다(Choi et al, 2010; Li and Chan, 1999). 다음 Fig. 4에서는 PJ 패턴에 의한 북서태평양 지역에서 발생한 태풍의 진로를 분석한 결과를 도시하고 있다. 양(+의 PJ 기간과 음(-)의 PJ 기간 동안에 북서태평양 지역에서 발생한 태풍활동의 차이는 $2.5 \times 2.5^\circ$ 의 격자크기 안에서 발생한 태풍을 계산함으로써 산정할 수 있다. PJ 패턴에 따른 태풍의 진로를 분석한 결과, 양(+의 PJ 기간 동안에는 태풍의 활동이 다소 감소하여 태풍의 발생위치 및 진로가 필리핀 해(Philippines Sea)의 서쪽으로 향하여 남중국 해(South China Sea)를 따라 이동하며, 한반도 도메인을 지나는 태풍의 숫자가 확연히 증가하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 4a). 음(-)의 PJ 기간 동안에는 태풍의 진로가 필리핀해의 동부해안을 따라 남중국해로 확장되어 분포하는 것을 확인할 수 있으며, 한반도 도메인에서는 다소 감소하며 태풍의 진로가 일본열도 쪽으로 치우쳐 있음을 확인할 수 있다(Fig. 4b). 또한, 태풍의 강도가 33 m/s (64 Knots)보다 큰 사상을 분석한 결과, 양(+의 PJ 기간 동안에는 전체 발생 태풍의 약 64%로 나타났으며, 음(-)의 PJ 기간 동안에는 약 47%가 발생하여, 양(+의 PJ 기간 동안에는 한반도에 영향을 미치는 태풍의 강도가 증가하는 경향이 있음을 확인할 수 있다. 태풍의 전향지점은 양(+의 PJ 기간에는 평균의 위치가 124.6°E, 27.6°N로 분석되었으며, 음(-)의 PJ 기간에는 평균의 위치가 127.3°E, 28.2°N로 분석되어, 음(-)의 PJ 기간에는 양(+의 PJ 기간에 비하여 태풍의 전향지점이 보다 북동쪽으로 치우쳐 있음을 확인할 수 있다.

또한, 열대성 태풍의 진로는 북태평양 고기압(WNP subtropical high)의 지역적 편향의 결과로 발생한다(Liu and Chan 2008; Choi et al., 2009). 다음 Fig. 5는 북태평양 고기압(WNP subtropical high)의 위치를 나타내고 있다. 양(+의 PJ 기간에는 북태평양 고기압이 북쪽과 동쪽 지역으로 치우쳐 있음을 확인할 수 있으며, 음(-)의 PJ 기간에는 대만의 동쪽까지 비정상적으로 가늘고 긴 형태를 띄고 있다. 따라서 음(-)의 PJ 기간에는 북태평양 고기압의 분포에 따라 태풍이 동쪽으로 향하는 것이 다소 제한되고 보다 많은 태풍이 중국 대륙쪽으로 이동하게(Choi et al., 2010) 되기 때문에 한반도 도메인에 들어오는 태풍의 숫자가 더 줄어들 수 있으며, 양(+의 PJ 기간에는 한반도 도메인에 들어오는 태풍의 발생횟수가 상대적으로 확연히 증가함을 확인하였다.

3.3. 태풍의 지속기간(Lifetime) 분석

우리나라의 태풍연구센터(TRC)와 일본기상청(JMA)에서는 발생한 태풍의 기록을 중심으로 지속기간을 정의하고 있다. 본 연구에서는 북서태평양 지역에서 발생한 전체 태풍에 대하여 양(+의 PJ 기간과 음(-)의 PJ 기간으로 구분하여 태풍의 지속기간을 분석하였다. 또한 한반도에 영향을 준 태풍만을 분리하여 PJ 패턴에 따른 태풍의 지속기간을 산정하였다. 본 연구에서는 한반도 이동경로에 해당하는 태풍의 지속기간은 태풍생성 날로부터 태풍이 한반도 도메인(120-138°E, 32-40°N)으로 명시된 곳을 지나는 때를 기준으로 정의하였다. Fig. 6은 태풍의 지

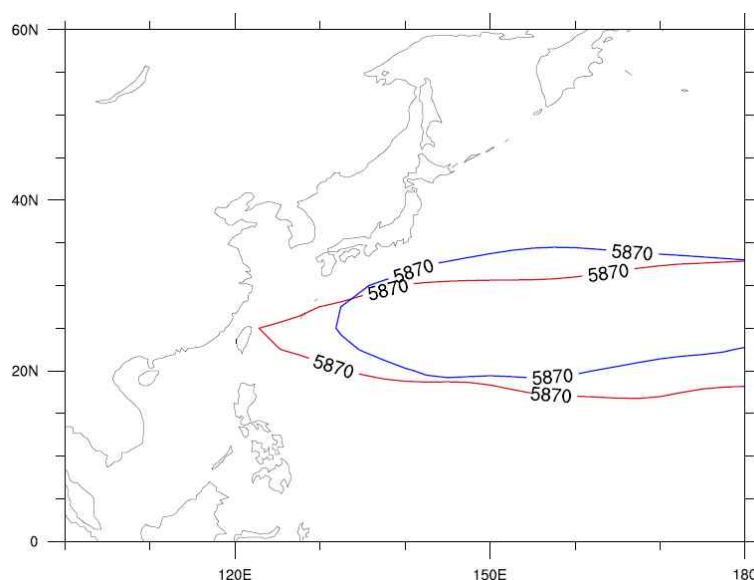


Fig. 5. Locations of the Subtropical High (denoted by 5870 geopotential height) in Positive (blue) and Negative (red) PJ Years

속기간을 전체 북서태평양 지역에서 발생한 태풍과 한반도에 영향을 준 기간으로 분류하여 각각의 PJ 패턴에 따라 경험적 확률밀도함수(Empirical probability function)로 나타내었다. 원자료의 구조적 특성을 제대로 반영할 수 있는 경험적 확률밀도함수에 대한 자세한 설명은 Moon and Lall (1994)과 Bowman and Azzalini (1997, 2007)의 논문을 참고할 수 있다. 양(+의 PJ 기간 동안 한반도 도메인을 통과하는 태풍의 지속기간은 11.4 days (273.6 hrs)로써 평년값인 11.5 days (276.0 hrs)보다 다소 짧은 것으로 나타났다. 음(-)의 PJ기간 동안에는, 태풍의 지속기간이 11.8 days (283.2 hrs)로 평년치보다 길게 나타났으나 그 차이는 통계적으로 유의하지 않은 결과이다. 다음으로, 한반도 도메인으로 태풍이 접근하는 시간을 분석한 결과,

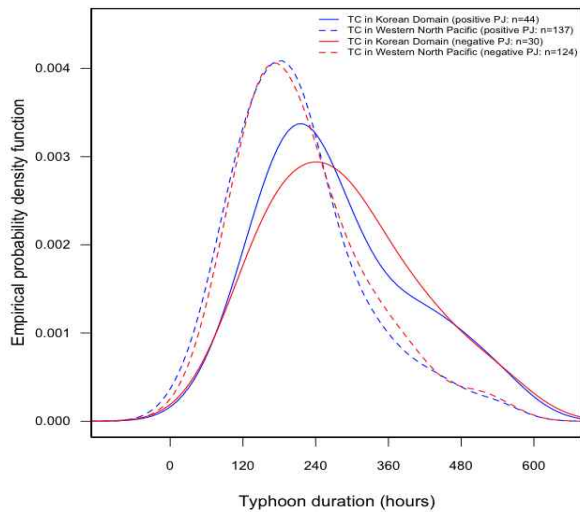


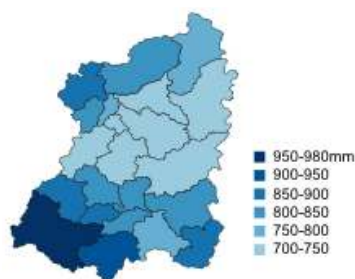
Fig. 6. Empirical Probability Density Functions of TC Duration during the June–September Period. Blue (red) Lines Indicate TC Duration during the Positive (negative) PJ Years. TC Duration for TCs in Western North Pacific (Korean domain) is Shown as Dotted (solid) Lines

양(+의 PJ 기간에는 8.3 days (199.2 hrs)로 음(-)의 PJ기간 7.4 days (177.6 hrs)보다 길게 나타났다. 이것은 양(+의 PJ 기간에는 음(-)의 PJ기간보다 태풍이 바다 위를 통과하는 시간이 오래 걸릴 수 있으며 태풍이 바다로부터 수분을 공급받아 더 강력해 질 수 있음을 의미한다.

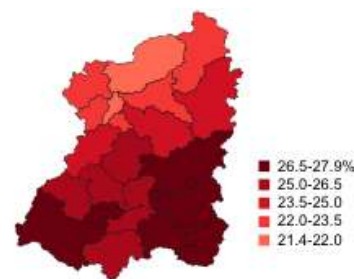
4. PJ 패턴에 의한 태풍 강수의 변화분석

본 연구에서는 낙동강유역의 22개 중권역 유역에 대하여 PJ 패턴과 태풍에 의한 여름철 강수량의 변화를 분석하였다. 다음 그림은 낙동강 유역의 여름철(June–September) 강수량(Fig. 7a)과 여름철 강수량 중 태풍에 의하여 발생한 강수량의 비율(Fig. 7b)을 도시하고 있다. 1966년부터 2007년까지의 자료를 기준으로 분석한 결과, 낙동강 유역의 연평균 강수량은 1,173.9 mm이며, 여름철 평균 강수량은 803.6 mm로 산정되었다. 여름철 강수량은 연평균강수량의 68.6%를 차지하고 있으며, 이중 태풍에 의해 발생한 강우사상은 평균적으로 24.8%에 해당하는 것으로 분석되었다. 또한 낙동강유역의 여름 강수량과 태풍에 의한 강수의 공간적 분포 특성을 분석한 결과, 여름강수량의 경우 낙동강 유역의 남서쪽 일부 유역에서 강수량이 크게 발생하는 것으로 분석되었으며, 태풍에 의한 강수는 낙동강 유역의 남서쪽 유역을 포함한 남동쪽 유역에서 태풍에 의한 강수가 크게 발생하는 것으로 나타났다.

두 가지 형태의 PJ 패턴과 태풍에 의한 여름철 강우의 Composite analysis (CA) 분석결과, 낙동강 유역에서 태풍에 의해 발생한 강수량의 지역적 패턴은 양(+의 PJ와 음(-)의 PJ 기간 동안에 현저한 차이를 보이는 것으로 나타났다(Fig. 8). 양(+의 PJ기간 동안 낙동강 유역의 79.0%에 해당되는 유역에서 태풍에 의한 강수가 증가하는 것으로 분석되었다. 낙동강 전체 22개 중권역 중 3개의 중권역 유역에 해당되는 17.2%의 유역이 신뢰구간 90%에서 통



(a) Seasonal precipitation (June–September)



(b) Typhoon-induced precipitation

Fig. 7. Seasonal Precipitation (June–September) in the Nakdong River Basin during the 1966~2007 Periods. (a) Seasonal Total Precipitation (mm). (b) Typhoon-induced Precipitation as a Fraction of the Total Seasonal Precipitation (expressed as percent)

계적으로 유의한 증가 패턴을 보이는 것으로 나타났다 (Fig. 8a). 이와는 대조적으로, 음(-)의 PJ 기간에는 낙동강 전체 유역에서 태풍에 의한 강우는 현저히 감소하는 것으로 분석되었으며, 낙동강 전체 22개 중권역 중 10개 유역에 해당되는 40.6%에서 신뢰구간 90%에서 통계적으로 유의한 감소 강수패턴을 보이는 것으로 나타났다(Fig. 8b). 따라서 양(+)의 PJ 기간에는 낙동강 유역 전체에서 태풍에 의한 강수발생 증가하며 주로 유역의 남동부 지역의 증가 특성이 두드러지는 것으로 분석되었으며, 음(-)의 PJ 기간에는 낙동강 유역 전체에서 태풍에 의한 강우가 감소하는 패턴을 보이고 주로 유역의 남쪽과 북쪽 그리고 서쪽 대부분 유역에서 통계적으로 유의할 만한 결과를 보이는 것으로 분석되었다. 이러한 강수의 패턴의 변화는 GPCP (Global Precipitation Climatology Project) 강

수량에서도 확인할 수 있다(Fig. 9). Fig. 9는 북서태평양 지역과 한반도를 포함하는 영역에서 두 가지 형태의 PJ 패턴에 따른 여름철 강우 패턴을 도시하고 있다. 그림에서 보는바와 같이, 양(+)의 PJ 기간에는 북서태평양지역과 우리나라의 남부해안에 걸쳐 평년보다 많은 강수가 발생하고 있으며, 음(-)의 PJ 기간에는 평년보다 적은 강수 패턴이 한반도에 나타나고 남해안과 일본 열도쪽으로 평년보다 많은 강우특성을 보이는 것으로 분석되었다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 서로 다른 두 가지 형태의 PJ 패턴에 따른 태풍의 발생위치(genesis position), 발생빈도(frequency), 이동경로(tracks), 강도(intensity) 및 지속기간(lifetime)

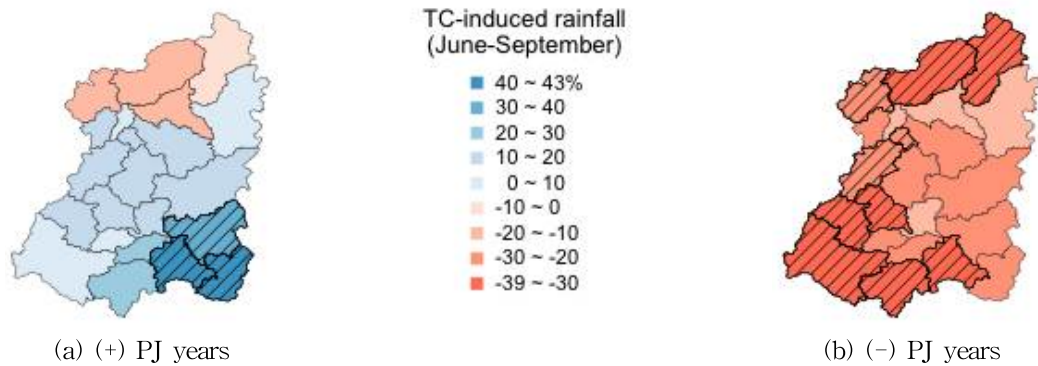


Fig. 8. Percentage Changes in Composite Anomalies for the Climatology (1966–2007) of the Typhoon-induced Seasonal Precipitation Totals During the June–September Period. (a) Typhoon-induced Precipitation in the Positive PJ Years. (b) Typhoon-induced precipitation in the negative PJ years. The Hatched Polygons Represent Statistically Significant Changes in TC-induced Rainfall Based on a 90% Confidence Level

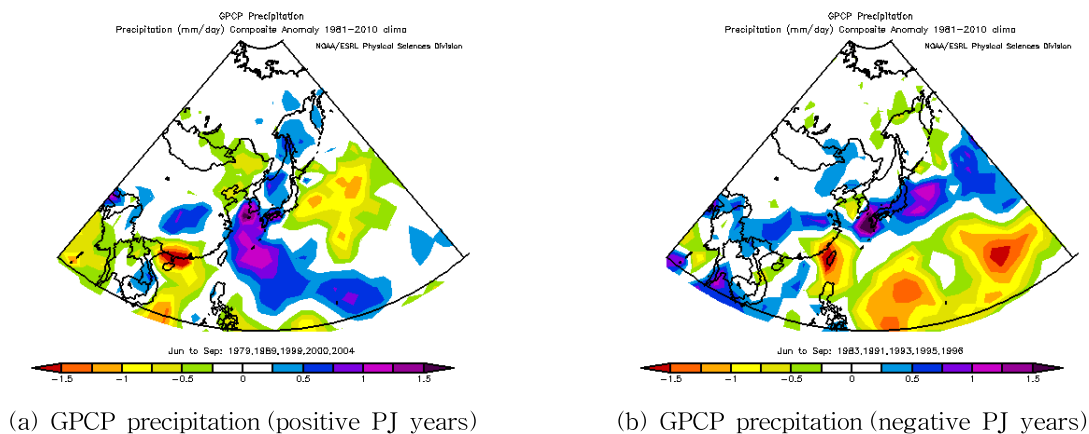


Fig. 9. GPCP Composite Anomalies Corresponding to the Pacific Japan (PJ) Pattern. (a) GPCP Precipitation in the Positive PJ years (1979, 1989, 1999, 2000, 2004). (b) GPCP Precipitation in the Negative PJ Years (1983, 1991, 1993, 1995, 1996). The Composite Analysis Presented Here Is Based on the Available Period of GPCP Precipitation Data (1979–2010) (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/composites/printpage.pl>)

등 태풍의 활동과 낙동강 유역을 중심으로 태풍에 의한 강수의 지역적 패턴의 변화를 분석하였다. 본 연구의 결과를 간단히 정리하면 다음과 같다.

- 1) 한반도에 영향을 주는 태풍의 발생위치는 양(+)의 PJ기간 보다 음(-)의 PJ 기간에 보다 북동쪽으로 치우쳐 있다(Fig. 2). 양(+)의 PJ 기간에는 5.5 TCs/year의 태풍이 관측되어 평년치(5.0 TCs/year) 보다 많은 태풍 발생빈도가 나타났다. 음(-)의 PJ 기간에는 평년치 보다 작은 4.3 TCs/year의 태풍이 발생하여 통계적으로 유의한 감소패턴을 보이는 것으로 분석되었다(Fig. 3).
- 2) 태풍의 진로를 분석한 결과(Fig. 4), 양(+)의 PJ 기간에 보다 많은 태풍이 한반도를 통과하는 것으로 나타났다으며, 음(-)의 PJ 기간에는 태풍의 진로가 일본 열도 쪽으로 치우쳐 있음을 확인하였다. 또한 33 m/s (64 Knots) 이상의 태풍의 발생은 양(+)의 PJ 기간에는 전체 발생 태풍의 약 64%를 차지하는 것으로 나타났으며, 음(-)의 PJ 기간에는 약 47%가 발생하여, 양(+)의 PJ 기간 동안 보다 강한 태풍이 많이 발생하는 것으로 분석되었다.
- 3) 또한, 음(-)의 PJ 기간 동안에는, 북태평양의 고기압(WNP subtropical high)의 분포가 상대적으로 가늘고 긴 형태를 띄고 있어 태풍의 진로가 동쪽으로 향하는 것을 제한하는 것으로 나타났다(Fig. 5). 한반도 도메인에 접근하는 태풍의 지속시간은 양의 PJ (음의 PJ) 기간에 8.3 days (7.4 days)로 나타났으며, 양(+)의 PJ 기간에 태풍의 지속시간이 상대적으로 길어 바다로부터 수분을 공급받아 더 강력해 질 수 있음을 확인하였다(Fig. 6).
- 4) 태풍에 의한 여름철 강우의 지역적 특성을 분석한 결과(Fig. 7), 양(+)의 PJ 기간에 낙동강 전체유역의 79.0%에서 강우가 증가하는 패턴을 보이는 것으로 나타났고 17.2%에 해당하는 3개의 중권역 유역에서 통계적으로 유의한 경향을 보였다. 이와는 반대로, 음(-)의 PJ 기간에는 유역 전체에서 강우의 감소 패턴을 확인하였으며, 그중 10개 중권역 유역(40.6%)에서 통계적으로 유의한 강우의 감소 경향을 보이는 것으로 분석되었다.

본 연구의 결과는 제한된 조건과 상대적으로 짧은 관측 자료에 의존하고 있지만, PJ 패턴에 따른 태풍활동의 시공간적 변동특성 예측의 기초자료로 활용될 것으로 기대되며, PJ 대기 순환 패턴에 의한 태풍과 관련된 수분의 이동과정을 통하여 계절 강수의 발생과 극치사상의 특성을

파악하는 등 우리나라의 유역별 수자원의 확보와 위험관리에 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2012년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 창의적 연구사업 연구임(2012R1A1A2005304). 또한, 기상청 기후변화 감시·예측 및 국가정책 지원 강화 사업의 [한반도/동아시아 가뭄전망·대응기술 개발(CATER 2012-3100)]과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Bowman, A.W., and Azzalini, A. (1997). Applied Smoothing Techniques for Data Analysis: The Kernel Approach with S-Plus Illustrations, Oxford University Press, Oxford (UK).
- Bowman, A.W., and Azzalini, A. (2007). R Package SM: Nonparametric smoothing Methods (Version 2.2), University of Glasgow, UK and Università di Padova, Italia.
- Chan, J.C.L., and Xu, M. (2009). "Inter-annual and inter-decadal variations of landfalling tropical cyclones in East Asia. Part I: time series analysis." *Int. J. Climatol.* Vol. 29, pp. 1285-1293.
- Choi, K.S., Kim, B.J., Kim, D.W., and Byun, H.R. (2009). "Interdecadal variation of tropical cyclone making landfall over the Korean Peninsula." *Int. J. Climatol.* Vol. 30, No. 10, pp. 1472-1483.
- Choi, K.S., Wu, C.C., and Cha, E.J. (2010). "Changes of tropical cyclone activity by Pacific-Japan teleconnection pattern in the western North Pacific." *J. Geophysical Research*, 115D19114.
- Chu, H.J., Kim, T.W., Lee, J.K., and Lee, J.H. (2007). "Seasonal relationship between EL Nino-Southern Oscillation and hydrologic variables in Korea." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 40, No. 4, pp. 299-311.
- Emanuel, K., Sundararajan, R., and Williams, J. (2008). "Hurricanes and global warming-Results from Downscaling IPCC AR4 Simulations." *American Meteorological Society*, pp. 347-367.

- Huang, R.H., and Li, W.J. (1987). "Influence of the heat source anomaly over the western tropical Pacific on the subtropical high over East Asia." Paper presented at International Conference on the General Circulation of East Asia, ICGCEA, Chengdu, China.
- JMA (Japan Meteorological Agency) (2012). www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/trackarchives.html, accessed 10 February 2012.
- Kawamura, R., and Ogasawara, T. (2006). "On the role of typhoons in generating PJ teleconnection patterns over the western North Pacific in late summer." *SOLA*, 2, 37–40, DOI:10.2151/sola.2006–010.
- Kawamura, R., Murakami, T., and Wang, B. (1996). "Tropical and midlatitude 45day perturbations over the western Pacific during the northern summer." *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, Vol. 74, pp. 867–890.
- Kawamura, R., Sugi, M., Kayahara, T., and Sato, N. (1998). "Recent extraordinary cool and hot summers in East Asia simulated by an ensemble climate experiment." *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, Vol. 76, pp. 597–617.
- Kim, J.S., Jain, S., and Yoon, S.K. (2012). "Warm season streamflow variability in the Korean Han River Basin: links with atmospheric teleconnections." *Int. J. Climatol.*, Vol. 32, No. 4, pp. 635–640. doi:10.1002/joc.2290.
- Kim, J.S., and Jain, S. (2011). "Precipitation trends over the Korean peninsula: typhoon-induced changes and a typology for characterizing climate-related risk." *Environ. Res. Lett.* 6, 034033, DOI:10.1088/1748-9326/6/3/034033.
- Kim, J.S., Jain, S., and Moon, Y.I. (2011). "Atmospheric teleconnection-based conditional streamflow distributions for the Han River and its sub-watersheds in Korea." *Int. J. Climatol.*, doi:10.1002/joc.2374.
- Kim, Y.H., Kim, M.K., and Lee, W.S. (2008). "An Investigation of Large-Scale Climate Indices with the influence on Temperature and Precipitation Variation in Korea." *Atmosphere Korean Meteorological Society*, KMS, Vol. 18, No. 2. pp. 83–95.
- Kistler, R., and Coauthors. (2001). "The NCEP–NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation Bull." *Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 82, pp. 247–267.
- KMA (Korea Meteorological Administration) (1996). Typhoon White Book (in Korean).
- Knuston, T.R., McBride, J.L., Chan, J., Emanuel, K., Holland, G., Landsea, C., Held, I., Kossin, J.P., Srivastava, A.K., and Sugi, M. (2010). "Tropical cyclones and climate change." *Nature Geoscience*, Vol. 3, pp. 157–163.
- Kosaka, Y., and Nakamura, H. (2006). "Structure and dynamics of the sum–mertime Pacific–Japan teleconnection pattern." *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 132, 2009–2030, DOI:10.1256/qj.05.204.
- Kosaka, Y., and Nakamura, H. (2010). "Mechanisms of Meridional Teleconnection Observation between a Summer Monsoon System and a Subtropical Anticyclone. Part I: The Pacific–Japan Pattern." *Journal of Climate*, Vol. 23, pp. 5085–5108.
- Kwon, H.H., and Lee, J.J. (2011). "Seasonal rainfall outlook of Nakdong River Basin using nonstationary frequency analysis model and climate information." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWAR, Vol. 44, No. 5, pp. 339–250.
- Kwon, H.H., and Moon, Y.L. (2005). "Independent component analysis of Nino3.4 sea surface temperature and summer seasonal rainfall." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWAR, Vol. 38, No. 12, pp. 985–994.
- Li, Y.S., and Chan, J.C.L. (1999). "Momentum Transports Associated with Tropical Cyclone Recurvature." *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 127, pp. 1021–1037.
- Liu, K.S., and Chan, J.C.L. (2008). "Interdecadal variability of western North Pacific tropical cyclone tracks." *Journal of Climate*, Vol. 21, pp. 4464–4476.
- Moon, Y.I., and Lall, U. (1994). "Kernel quantile function estimator for flood frequency analysis." *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 11, pp. 2095–3103.
- Nitta, T. (1987). "Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation." *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, Vol. 65, pp. 373–390.
- Nitta, T., and Hu, Z.Z. (1996). "Summer Climate Variability in China and Its Associated with 500 hPa Height and Tropical Convection." *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, Vol. 4, pp. 425–445.
- Shin, H.S., Ahn, J.H., and Yoon, Y.N. (1999). "Analysis of spatial–temporal relationship between El Nino and

- South Korean precipitation.” *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 19, No. II-1, pp. 1-12.
- TRC (Typhoon Research Center). (2012). <http://www.typhoon.or.kr/> accessed 10 February 2012.
- Tsuyuki, T., and Kurihara, K. (1989). “Impact of convective activity in the western tropical Pacific on the East Asian summer circulation.” *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, Vol. 67, pp. 231-247.
- Wakabayashi, S., and Kawamura, R. (2004). “Extraction of major teleconnection patterns possibly associated with the anomalous summer climate in Japan.” *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, Vol. 82, pp. 1577-1588. DOI:10.2151/jmsj.82.1577.
- WAMIS (Water management information system). (2012). <http://wamis.go.kr/eng/> accessed 10 February 2012.
- Yamada, K., and Kawamura, R. (2007). “Dynamical link between typhoon activity and the PJ teleconnection pattern from early summer to autumn as revealed by the JRA-25 Reanalysis.” *SOLA*, Vol. 3, pp. 65-68. DOI:10.2151/sola.2007-017.
- Yuan, Y., Yang, H., Zhou, W., and Li, C. (2008). “Influences of the Indian Ocean Dipole on the Asian summer monsoon in the following year.” *Int. J. Climatol.*, Vol. 28, pp. 1849-1859. DOI: 10.1002/JOC.167.

논문번호: 12-030	접수: 2012.03.16
수정일자: 2012.06.21/09.04	심사완료: 2012.09.04