

서로 다른 형태의 엘니뇨에 따른 한강유역의 여름철 강우량과 극치강우의 변동특성 분석

Different Impacts of the Two Phases of El Niño on Variability of Warm Season Rainfall and Frequency of Extreme Events over the Han River Basin

윤 선 권* / 김 종 석** / 권 현 한***

Yoon, Sun-Kwon / Kim, Jong-Suk / Kwon, Hyun-Han

Abstract

This study investigated impacts of the two different types of El Niño on summer rainfall (June–September) in the Han River and its sub-basins. The patterns of rainfall anomalies show a remarkable difference between conventional El Niño and El Niño Modoki years. During conventional El Niño years, it was found that the Han River basins show decreases in the seasonal rainfall totals with high variations (CV=0.4). In contrast, during El Niño Modoki years, distinct positive anomalies appear in the Han River basin with a relatively small variation (CV=0.23). In addition, 11 out of 30 sub-basins show significant above-normal rainfall in southern part of the Han River Basin. For El Niño Modoki years, the number of heavy rainy days exceeding 30 mm/day and 50 mm/day were 9.9-day and 5.4-day, respectively. Consequently, this diagnostic study confirmed that El Niño Modoki has significant impacts on the variability of summer rainfall over the Han River Basin. We expect the results presented here provide useful information for the stability of the regional water supply system, especially for basins like the Han River Basin showing relatively high variability in seasonal rainfall.

Keywords : El Niño, El Niño Modoki, summer rainfall, extreme rainfall, Han River Basin

요 지

본 연구에서는 전형적인 엘니뇨와 새로운 형태의 엘니뇨 Modoki에 따른 한강유역의 여름철(6~9월) 강우량의 특성 변화를 분석하였다. 전형적인 엘니뇨 시기에는 대체로 여름철 강우량이 감소하였으며, 강우의 변동성도 비교적 크게 나타났다(CV=0.40). 반면에 엘니뇨 Modoki 시기에는 한강 대부분 유역에서 평년보다 강우가 증가하는 경향을 보였으며, 여름철 강우의 변동성은 작은 것으로 분석되었다(CV=0.23). 엘니뇨 Modoki 시기에는 한강 남부의 11개 중권역에서 통계적으로 유의한 강우의 증가를 보였고, 30 mm/day와 50 mm/day를 초과하는 중호우의 강우발생일은 각각 9.9일과 5.4일로 나타났으며, 전형적인 엘니뇨 시기보다 백분위 편차가 각각 17.74%, 50.94% 큰 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 새로운 형태의 엘니뇨 Modoki가 전형적인 패턴의 엘니뇨 보다 한강유역의 여름철 수자원 변동에 민감하게 영향을 주고 있음을 확인하였으며, 향후 수자원의 계절적 변동과 불확실성이 큰 지역에서 안정적인 수자원 확보를 위한 기초자료로 활용이 가능하리라 사료된다.

* APEC 기후센터 연구본부 기후변화연구팀 선임연구원 (e-mail: skyoon@apcc21.org)

Research Fellow, Climate Change Research Team, Climate Research Department, APEC Climate Center, Busan 612-020, Korea

** 교신저자, 서울시립대학교 토목공학과 연구교수 (e-mail: jong suk@uos.ac.kr, Tel: 02-2210-2958)

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

*** 전북대학교 공과대학 토목공학과 조교수 (e-mail: hkwon@jbnu.ac.kr)

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

1. 서론

수문자료(hydrological data)의 계절적 변동 특성은 전 지구적 기상현상 및 기후특성 변화와 밀접한 관련이 있으며, 수자원의 효율적인 예측 및 관리를 위해서 기상인자와 수문자료간의 관계를 규명하는 일은 매우 중요하다(Horel and Wallace, 1981; Pizarro and Lall, 2002; and Kim et al., 2012). 특히, ENSO (El Niño-Southern Oscillation)는 대기 순환 및 수문환경(hydrological environment) 변화에 영향을 미치는 주요인자이며, 기존의 여러 연구에서 강우량의 계절적 변동과 밀접한 상관성이 있음이 보고되고 있다(Schonher and Nicholson, 1989; Gershunov et al. 1999; and McPhaden et al., 2006). ENSO는 태평양 동부 적도 해역(4°S~4°N, 150°W~90°W)에서 해수면온도(SST: sea surface temperature)의 관측을 통하여 산정되며, SOI (Southern Oscillation Index)와 밀접한 연관이 있다(Bjerknes, 1969). Kiladis and Diaz (1989)의 경우 ENSO와 SOI는 대체로 음의 상관관계를 가지며, SOI의 값이 3개월 이상 -1.0 이하일 때를 엘니뇨현상으로 구분하였다. 또한, Nicholls and Wong (1990)은 전 세계 974개 지점의 강우량 분석을 통하여 엘니뇨해의 연강우량이 평년보다 적고 저위도 지역의 강우변동이 커진다고 분석하였으며, Chu (1995)는 하와이의 27개 기상관측소의 강우량과 엘니뇨와의 상관관계 분석을 통해 엘니뇨 발생 해에 연속하는 겨울철과 봄철의 강우량이 평년보다 적음을 밝혔다. 또한, Monteverdi and Null (1997)은 미국의 서태평양 근해의 캘리포니아 지역 기상관측 자료를 바탕으로 엘니뇨 해에는 일반적으로 평년보다 높은 강우증가패턴을 보이고 있음을 밝혔다.

그러나 최근 기후변화와 지구온난화에 의해 엘니뇨의 특성이 변하고 있으며, 이는 일반 엘니뇨와 유사하면서도 약간 다르다는 의미로 '엘니뇨 Modoki'라는 용어로 사용되고 있다. 일반적인 엘니뇨의 진화 패턴은 동태평양(Eastern Pacific) 지역에 중심이 있어 가을과 겨울 사이에 비정상적인 해수면 온도 상승을 보이거나, 새로운 형태의 엘니뇨는 중앙태평양(Central Pacific)에서 강한 진폭을 나타내는 형태를 띄게 된다. 이러한 새로운 형태의 엘니뇨 Modoki에 대한 연구는 최근 들어 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다(Weng et al., 2007; Kug et al., 2009; Kao and Yu, 2009; Ashok and Yamagata, 2009; Feng et

al., 2010; Na et al., 2011; and Ren and Jin, 2011). Kim et al. (2009)의 연구에 의하면 엘니뇨 Modoki라고 알려진 새로운 형태의 엘니뇨는 폭풍우의 발생 빈도를 높이고, 중앙아메리카 해안과 걸프 해안(Gulf coastal)을 따라 허리케인이 육지로 상륙할 가능성이 증가함을 밝힌바 있다. 중앙태평양의 해수면온도가 이상적으로 상승하는 엘니뇨 Modoki 사상은 최근에 올수록 그 발생빈도가 증가하였으며, 지구온난화가 계속되는 미래 기후상태에서 엘니뇨 Modoki 사상이 보다 빈번히 발생하여 그 영향이 더욱 커지고 강해질 것이라 전망하고 있다(Ashok et al., 2007; Pradhan et al., 2011). 특히, Yeh et al. (2009)의 연구에 의하면 최근 엘니뇨 Modoki의 특성이 기후변화에 의한 영향과 관련이 있으며 향후 발생빈도와 강도가 더욱 커질 수 있음을 밝혔고 엘니뇨 Modoki의 예측을 위한 새로운 기후모델을 제시한 바 있다. 국내 연구의 경우, Shin et al. (1999)은 남방진동지수(SOI)와 우리나라 22개 기상관측소의 월 강우량과의 교차상관계수를 구함으로써 엘니뇨와 우리나라 강우량의 시·공간적 상관관계를 분석하였으며, Kwon and Moon (2005)은 주성분분석과 독립성분분석을 통하여 추출한 시계열자료를 바탕으로 Niño3.4지역의 해수면온도와 우리나라 여름강수량과의 상관성을 분석하였다. 또한, Yoon and Yeh (2009)은 1950~2007년 동안의 Niño3와 Niño4 해수면온도 지수를 이용하여 최대 표준 수온 편차가 열대 동태평양에서 나타나는 경우를 Eastern Pacific (EP) 엘니뇨로, 중앙태평양에서 나타나는 경우를 Central Pacific (CP) 엘니뇨로 정의하였으며 1990년 이후에 CP-엘니뇨의 발생 빈도가 증가하는 특징을 보이며 여름철 열대 동태평양 지역의 높은 표준수온의 선형 경향성과 밀접한 상관성이 있음을 밝혔다.

현재 새로운 형태의 엘니뇨에 대한 연구는 전 세계적으로 활발히 진행되고 있으나, 우리나라를 포함한 동북아시아 지역의 수문변량과 엘니뇨 Modoki와의 관계 규명에 대한 연구는 그리 많지 않은 실정이다. 특히 우리나라의 여름철 강우량은 수자원 확보와 안정적인 용수공급 차원에서 ENSO와 관련한 대기순환 패턴 변화예측이 중요한 요소로 작용하고 있으므로 향후 더욱 활발한 연구가 필요할 것으로 사료된다. 본 연구에서는 서로 다른 두 가지 형태의 엘니뇨가 한강유역의 여름철(6~9월) 강우량의 변동 특성에 미치는 영향을 분석하였으며, 기존의 일반적인 엘니뇨 사상과 새로운 형태의 엘니뇨 Modoki 사상으로 구

분하여 한강유역의 중권역별 여름강우량을 대상으로 엘니뇨 패턴 변화에 따른 강우량의 변동 특성을 분석하였다. 이를 위하여 먼저 엘니뇨 사상과 엘니뇨 Modoki 사상을 구분하였으며, 각각의 기간에 해당하는 한강유역의 여름철 강우의 공간 분포 특성과 중호우사상(heavy rainy days)의 발생특성, 중권역별 강우의 변동계수(CV; coefficient of variation)를 분석하였다. 또한 서로 다른 두 유형의 엘니뇨 기간의 강우량과 중호우사상의 30년 평년값과의 편차분석과 Monte Carlo Resampling Technique를 통한 유의성검정을 실시하였으며, 대규모 기상패턴 변화와 관련한 강우특성변화의 수문학적 연관관계를 분석하였다.

2. 대상자료 및 분석방법

2.1 연구대상 유역

한강유역은 한반도의 중앙에 위치하고 있으며 위도 36°30′~38°55′, 경도 126°24′~129°02′에 해당된다. 한강유역의 유역면적은 26,356 km², 유로연장 482 km이며, 이는 남한 면적의 약 23%에 달한다. 유역의 평균경사는 18.81%, 유역평균고도 405.95 El.m로 유역의 동쪽 대부분은 경사가 급한 산지와 계곡으로 이루어져 있다(Chang 2008; and Kim et al., 2012). 한강권역의 수자원특성을 살펴보면 연평균 강우량은 1,259 mm이며, 이 중 여름철 강우량은 894 mm (71.0%)이다. 또한 중권역별 강우량 관측소의 평균 개수는 7.8개이며, 한 개의 관측소당 지배면적

은 174.1 km²에 해당된다. 특히, 한강유역은 수도권과 서울 등 대부분의 주요 도시들을 포함하고 있으며 총인구와 산업밀도가 급속도로 증가하고 있다. 2007년 유역조사 결과에 따르면, 총 홍수면적은 260,330 ha, 홍수피해액은 7,809 억원에 달하고 최근에 올수록 그 피해규모와 피해액이 점차 증가하고 있는 추세이다. 또한 한강권역의 인구는 약 2,600만명으로 남한 총 인구의 53.0%에 해당하며 유역특성상 안정적인 수자원 확보와 지속적인 용수공급이 절실히 필요한 유역이라 할 수 있다. 다음 Fig. 1은 한강유역의 위치도와 유역을 중권역별로 구분하여 나타내고 있으며, Table 1은 한강권역의 30개 중권역의 코드와 이름, 유역면적, 연평균 강우량과 여름철 부분강우량, 강우관측소와 지배면적을 산정한 결과를 보여주고 있다.

2.2 분석대상 자료 및 방법

2.2.1 강우량자료 및 ENSO 자료

본 연구에서 사용된 유역평균 강우량 자료와 유출량 자료는 1966~2007년의 42개년 기간치 자료를 국가 수자원 관리 종합정보시스템(WAMIS, 2012; <http://wamis.go.kr/>)에서 제공받아 사용하였으며, 유역 평균 강우량 자료는 한강유역 총 43개 관측지점을 대상으로 Thiessen polygon 방법에 의하여 산출된 값이다. 이러한 유역평균 수문자료는 유역단위 수문량의 변화특성 분석과 중·장기 수자원 계획을 세우는데 효과적이다. 또한, ENSO 자료는 Niño3

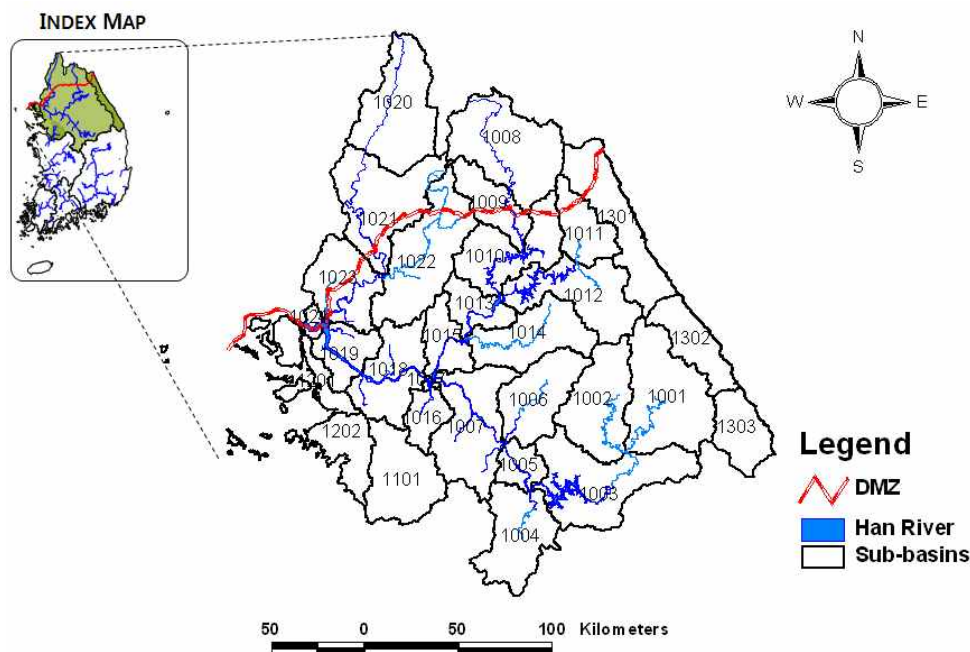


Fig. 1. The location of Study Area. The Han River Basin is Located in the Center of the Korean Peninsula

Table 1. Catchment Area, Warm Season Precipitation and Number of Rainfall Gages in each Sub-basin over the Han River, South Korea

Han River Basin		Catchment Area	Ann./JJAS Rainfall	No. of Rainfall Gage/Density
ID	30 Sub-basins Name	(km ²)	(mm)	(No./ρ)
1001	Upstream of Namhan River	2,447.9	843.9/1,240.2	20/122.4
1002	Pyeongchang River	1,773.4	900.6/1,294.4	19/93.3
1003	Chungju Dam	2,483.8	837.0/1,210.3	14/177.4
1004	Dal Stream	1,614.4	810.6/1,173.8	21/76.9
1005	Downstream of Chungju Dam	524.4	852.2/1,210.5	3/174.8
1006	Seom River	1,491.0	939.2/1,298.4	11/135.5
1007	Downstream of Namhan River	2,072.7	927.9/1,297.0	14/148.1
1008	Kumgangsan Dam	2,983.0	N/A	N/A
1009	Pyeongwha Dam	351.3	799.8/1,093.9	1/351.3
1010	Chuncheon Dam	1,587.4	870.8/1,187.0	15/105.8
1011	Inbook Stream	931.3	813.9/1,150.1	4/232.8
1012	Soyang River	1,852.0	884.4/1,252.0	13/142.5
1013	Euiam Dam	721.7	964.8/1,310.9	5/144.3
1014	Hongcheon River	1,566.0	945.0/1,302.6	11/142.4
1015	Cheongpyeong Dam	760.6	991.2/1,337.4	4/190.2
1016	Kyeonggan Stream	561.1	903.8/1,266.6	7/80.2
1017	Paldang Dam	43.9	883.1/1,191.0	1/43.9
1018	Han River in Seoul	1,537.2	935.1/1,283.1	23/66.8
1019	Han River in Goyang	826.3	904.0/1,259.7	1/826.3
1020	Gomitan Stream	2,195.2	941.2/1,287.6	2/1097.6
1021	Upstream of Imjin River	2,072.7	944.6/1,290.5	2/1036.4
1022	Hantan River	2,452.2	944.5/1,293.0	10/245.2
1023	Downstream of Imjin River	1,419.2	957.2/1,301.6	4/354.8
1024	Downstream of Hantan River	146.4	927.5/1,294.2	N/A
1101	Anseong Stream	1,658.7	840.8/1,206.3	12/138.2
1201	West of Han River	1,992.9	886.0/1,240.3	2/996.5
1202	Shiwha lake	961.3	861.3/1,227.0	2/480.7
1301	YangYang Namdai Stream	1,300.9	882.4/1,340.0	2/650.5
1302	Kangnung Namdai Stream	1,050.1	910.6/1,444.7	1/1050.1
1303	Samcheok Ohship Stream	986.6	830.1/1,229.9	1/986.6
Average		1,358.0	894.3/1,259.1	7.8/174.1

* ρ is the density of observatory; ρ=Catchment area/Number of rainfall gage

** N/A represents data not available

(5°S-5°N, 150°E-90°W)지역에서 1966~2007년까지 42개년 동안 관측된 해수면온도의 anomaly 자료를 사용하였다. 현재 세계의 대기·해양 지수들은 미국의 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)를 중심으로 호주의 Bureau of Meteorology Research Centre, 영국의 The Royal Meteorological Society 등이 대서양과

태평양의 해수면 온도(Sea Surface Temperature: SST), 해수면 압력(Sea Level Pressure: SLP), 해수면 풍향(Sea Surface Wind: SLW) 등 대기와 해양의 많은 수문인자들을 월별 기준으로 점검하고 있다. 유역단위 수문변량의 다양성과 대규모 대기순환패턴과의 관계규명을 위하여 Hadley Centre's의 해수면 온도 관측자료를 이용하였으며,

HadISST 자료는 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 의 공간해상도를 갖고 매월 갱신이 되며 다음의 Website (URL: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices>)에서 내려 받아 사용하였다(Rayner et al., 2003). NOAA (2012)에서 제공하는 월별 자료들은 Niño1+2, Niño3, Niño3.4, Niño4, Ship track1, 그리고 Ship track6의 6개 지역에서 관측되고 있다. 이 지역 중에서 Niño3와 Niño4 지역의 관측 자료가 엘니뇨 현상과 비교적 강한 상관성을 보이는 것으로 알려진 바 있다(Trenberth, 1997).

2.2.2 EMI 산정 및 분석방법

서로 다른 유형의 엘니뇨가 한강유역의 여름철 강우특성에 어떠한 영향을 미치는지 분석하기 위하여 먼저 ENSO 관련 지수를 산정하여야 한다. 본 연구에서는 전형적인 엘니뇨(Conventional El Niño) 사상의 구분을 위하여 HadISST의 Niño3 Index를 사용하였으며, 엘니뇨 Modoki 사상의 구분을 위하여 EMI를 산정하였다. EMI는 Ashok et al. (2007)이 사용한 다음의 Eq. (1)을 적용하여 산정하였다.

$$EMI = [SSTA]_A - 0.5[SSTA]_B - 0.5[SSTA]_C \quad (1)$$

여기서, SSTA는 지역-평균화된(area-averaged) 해수면 온도를 의미하며, A는($165^{\circ}\text{E}-140^{\circ}\text{W}$, $10^{\circ}\text{S}-10^{\circ}\text{N}$) 지역을, B는($110^{\circ}\text{E}-70^{\circ}\text{W}$, $15^{\circ}\text{S}-5^{\circ}\text{N}$) 지역을 그리고 C는($125^{\circ}\text{E}-144^{\circ}\text{W}$, $10^{\circ}\text{S}-20^{\circ}\text{N}$) 지역을 의미한다.

다음으로, 전형적인 엘니뇨 사상의 구분은 Niño3 지수에 대하여 표준화된 3개월 이동평균(moving window)값을 산정하고 상위분위(upper quartile) 0.45 이상을 기준으로 하여, 엘니뇨가 발달하기 시작하는 해(developing year)의 7월에서 그 다음해 즉, 쇠퇴하기 시작하는 해(decaying year)의 2월까지 8개월 동안 Anomaly가 0.45 이상 지속되는 기간을 기준으로 선정하였다. 위의 기준에 따라 선택된 6개의 전형적인 엘니뇨 사상은 1969/1970, 1972/1973, 1976/1977, 1982/1983, 1987/1988, 1997/1998이다. 또한, 엘니뇨 Modoki 사상의 구분은 EMI (El Niño Modoki index)에 대해서 표준화된 3개월 이동평균값을 산정하고 상위분위 0.66 이상인 값을 기준으로 하여, 엘니뇨가 발달하기 시작하는 해의 9월에서 그 다음해 즉, 쇠퇴하기 시작하는 해의 2월까지 6개월 동안 Anomaly가 0.66 이상 지속되는 기간을 기준으로 선정하였다. 위의 기준에 따라 선택된 8개의 엘니뇨 Modoki 사상은 1967/1968, 1977/1978, 1986/1987, 1990/1991, 1991/1992, 1994/1995, 2002/2003, 2004/2005이다. 특이사항으로는 2002~2003년의 경우 모두 엘니뇨 사상과 엘니뇨 Modoki 사상으로 선택되지만 해수면온도패턴을 분석해본 결과 열대 태평양(Tropical Pacific)지역에서 중앙 태

평양(Central Pacific)의 해수면온도가 넓게 분포하는 형태에 더 가까워 엘니뇨 Modoki 해로 분류하였다. 다음 Fig. 2는 1966~2007년까지 42개년 동안 관측된 Niño3와 EMI 자료로부터 전형적인 엘니뇨 해와 엘니뇨 Modoki 해를 구분하여 나타낸 시계열자료를 도시하였다.

3. 분석 결과

3.1 대규모 기상패턴 변화 분석

3.1.1 SSTA 분석결과

다음 Fig. 3은 엘니뇨가 시작되는 해의 12월에서 그 다음해 2월까지의 3개월 동안의 해수면 온도에 대한 CA (composite anomaly)를 나타내고 있다(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/composites/printpage.pl>). 전형적인 엘니뇨 해의 경우 평년에 비하여 비정상적으로 높은 해수면 온도가 남아메리카 페루연안의 동태평양에서부터 중앙태평양까지 길게 늘어서 분포하고 있음을 확인할 수 있으며, 같은 시기에 평년보다 낮은 해수면 온도는 서태평양지역 전체에 걸쳐 발생하고 있음을 확인할 수 있다

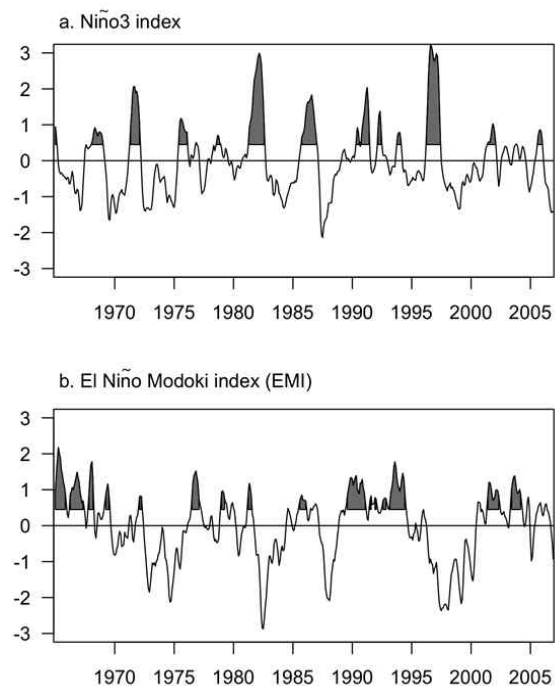


Fig. 2. Normalized Time Series of Niño3 and EMI during the Period from 1966 to 2007. The Solid Line Represents a 3-month Running Mean of Niño3 and EMI. The Grey Shading in each Fig. Indicates Niño3 Index Greater than upper Quartile (0.45), and EMI Greater than upper Quartile (0.66).

(Fig. 3(a)). 엘니뇨 Modoki 해의 경우 평년에 비하여 비정상적으로 높은 해수면 온도가 중앙태평양지역에서 넓게 분포하고 있음을 확인할 수 있으며, 같은 시기에 동태평양과 서태평양 지역에서 평년보다 낮은 해수면 온도가 분포하고 있음을 확인할 수 있다(Fig. 3(b)). 서로 다른 형태의 엘니뇨 해의 SSTA (sea surface temperature anomaly)의 변화 패턴에 대한 자세한 설명은 Kug et al. (2009), Feng et al. (2010)과 Ren and Jin (2011)의 연구를 참고할

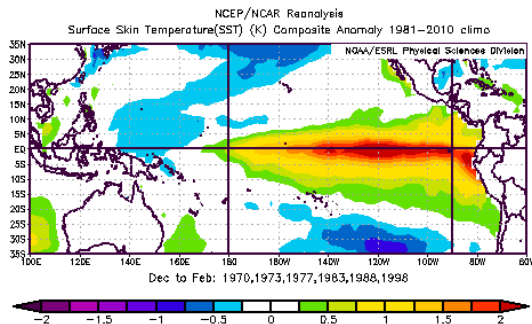
수 있으며, 본 연구에서는 엘니뇨의 물리적 현상을 다루기보다 서로 다른 ENSO 패턴 변화에 따른 한강유역의 강우량과의 연관관계에 대한 분석으로 한정하고자 한다.

3.1.2 GPCP 강수 분석결과

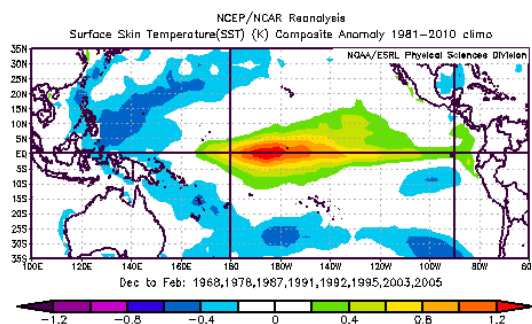
다음 Fig. 4는 NOAA의 GPCP (global precipitation climatology project, 2012; <http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/composites/printpage.pl>)에 대해서 한반도를 포함한

Table 2. Classification of the Conventional El Niño Events and the El Niño Modoki Events Based on Niño3 Index during the Period of 1966~2007. See the Text for the Definition of the Conventional El Niño and the El Niño Modoki Years

Classification	Selected El Niño years
El Niño years (Conventional El Niño)	1969/1970, 1972/1973, 1976/1977 1982/1983, 1987/1988, 1997/1998
EMI years (El Niño Modoki)	1967/1968, 1977/1978, 1986/1987, 1990/1991 1991/1992, 1994/1995, 2002/2003, 2004/2005

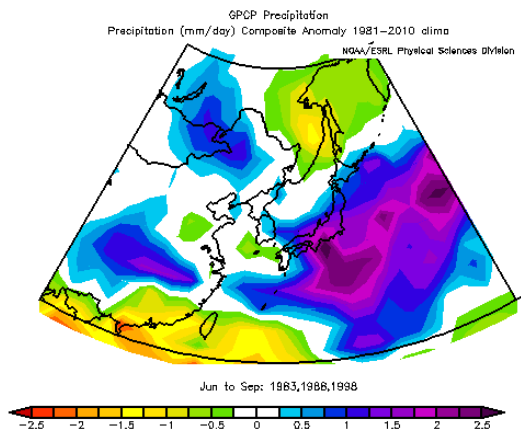


(a) El Niño years(DJF)

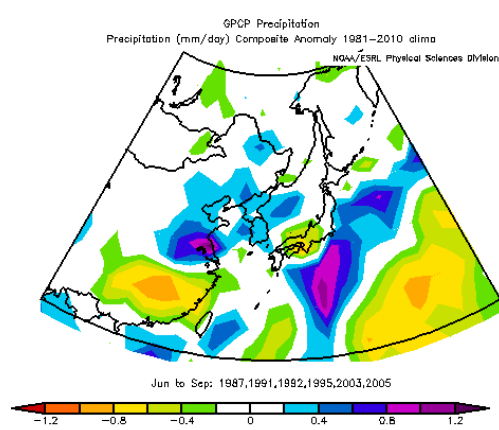


(b) El Niño Modoki years(DJF)

Fig. 3. Composite Sea Surface Temperature Anomalies (SSTA) in the Developing Phases of Two Types of El Niño during December–February. (a) SSTA in El Niño years. (b) SSTA in El Niño Modoki Years



(a) El Niño years (JJAS)



(b) El Niño Modoki years (JJAS)

Fig. 4. Composite Anomalies of GPCP Seasonal (June to September) Precipitation during the El Niño and El Niño Modoki Years

아시아 영역에서 엘니뇨가 쇠퇴하기 시작하는 해의 6~9 월까지 여름철 강우량의 변화를 엘니뇨 해와 엘니뇨 Modoki 해로 구분하여 나타내었다. 또한 GPCP 자료가 1979년부터 존재하므로 전형적인 엘니뇨 해는 1983, 1988 그리고 1998년의 값을 적용하였으며, 엘니뇨 Modoki 해는 1987, 1991, 1992, 1995, 2003 그리고 2005년의 값을 적용하였다. 따라서 전체기간의 특성을 반영한 결과라기 보다 최근 자료의 특성만을 반영한 결과로 해석이 될 것이다. 다음 Fig. 4(a)에서 보는바와 같이 전형적인 엘니뇨 해의 경우 일본의 동쪽해안에서 평년보다 높은 Anomaly 값을 보이나 한반도 지의 강우량의 편차는 0에 가까운 값을 보이고 있어 여름철 평년강우를 유지하는 것으로 나타났다. 또한 엘니뇨 Modoki 해에는 한강유역을 포함한 한반도 지역의 강우량의 편차가 0.4 mm/day 이상으로 6~9 월의 4개월 동안의 강우가 평년에 비하여 약 60 mm 정도 증가하는 것으로 분석되었다(Fig. 4(b)). 따라서 엘니뇨 Modoki가 발생할 것으로 예상되는 해에는 한반도를 포함한 한강유역의 여름철 강우량이 다소 증가하는 경향을 보일 것으로 분석된다.

3.2 한강유역의 여름철 강우 특성 분석

3.2.1 여름철 강우량 분석 결과

동북아시아지역에 위치한 우리나라는 아시아 몬순의 영향으로 여름철에 강우량이 집중되어 발생한다. 특히, 한강유역은 여름철 집중호우에 의한 영향을 많이 받고 있는 지역이며, 1966~2007년까지 한강유역에 위치한 30개 소유역을 대상으로 연평균 강우량과 여름철 평균 강우량을 분석한 결과, 연평균강우량(1,259 mm)의 약 71%에 해당

하는 894 mm의 강우가 여름철에 발생함을 확인하였다(Fig. 5). 여기서 주목할만한 점은 Fig. 5(a)에서도 확인할 수 있듯이 연평균강우량의 경우 30개 전체 소유역에서 고르게 분포하고 있으며, 지역의 강우의 변동폭 또한 크지 않은 것으로 분석되었다(CV=5.5%). 반면에 Fig. 5(b)에서 보는바와 같이 여름철 계절강우량의 경우 강우량의 지역적 변동특성이 다소 크게 나타났다(CV=5.7%). 또한, 여름철 계절강우량의 경우 서울을 비롯한 한강유역 중서부지역과 한강북부지역에서 강우가 편중되어 나타나 강우량의 지역적 편차가 크게 발생하는 것으로 분석되었다. 이러한 강우량의 계절적 편중 및 지역적 편차는 수자원을 효율적으로 관리하는데 어려움이 따르며, 최근의 기후변화 또한 수문기상 예측에 대한 불확실성을 더욱 가중시키는 요인으로 작용되고 있다.

3.2.2 여름철 중호우일 수 분석 결과

다음은 한강유역의 소유역별 중호우일 수(heavy rainy days)를 분석하기 위하여 1966년부터 2007년까지의 유역 평균 일강우량자료를 바탕으로 여름철(6~9월)에 해당하는 기간동안 30 mm/day와 50 mm/day를 초과한 강우일수를 분석하였다. 다음 Fig. 6은 중권역별로 발생한 중호우일 수를 여름철 기간에 해당하는 전체 일수(122일)로 나누어 소유역별 백분위 환산 값을 나타내고 있다. 여름철 기간 동안 30 mm/day 이상의 호우는 평균적으로 7.36%에 해당하는 9.0일 동안 발생하는 것으로 나타났으며, 50 mm/day 이상의 호우는 평균적으로 3.51%에 해당하는 4.3일 동안 발생하는 것으로 나타났다. 한강유역의 중부지역에 해당하는 청평댐(ID: 1015) 유역의 경우 30 mm/day 이상 중호우 사상이 8.55%에 해당하는 10.4일로 나타나 가장

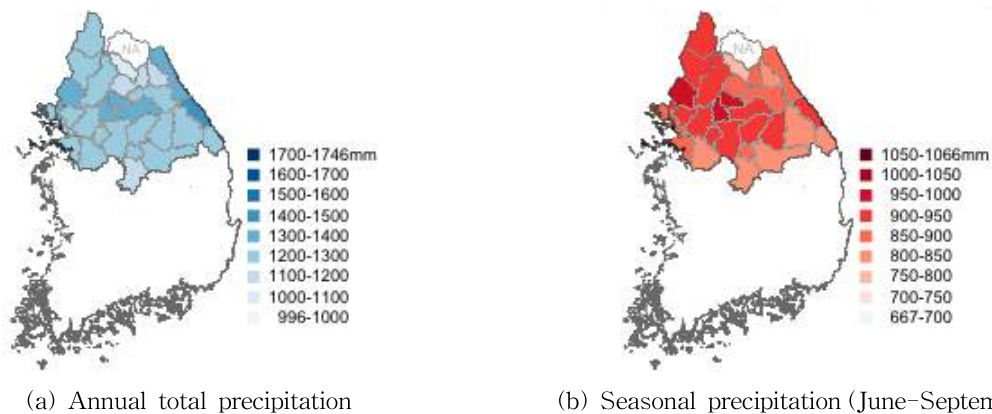
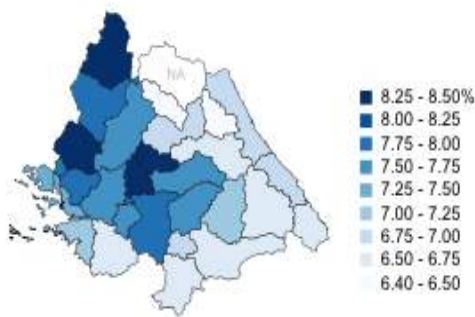
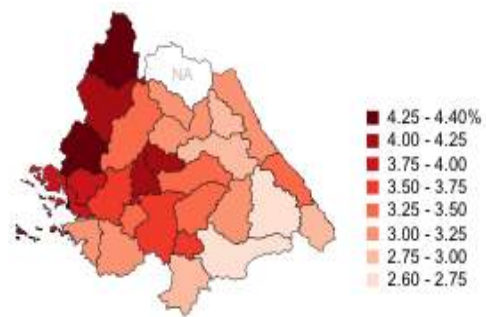


Fig. 5. Regional Characteristics of Annual Total and JJAS Seasonal Precipitation over the Han River Basin during 1966 to 2007. (a) Annual Total Precipitation in each Sub-basin. (b) Seasonal Precipitation during Rainy Season



(a) Heavy precipitation (>30 mm/day)



(b) Heavy precipitation (>50 mm/day)

Fig. 6. Percentage of Heavy Rainy Days (> 30 mm/day and > 50 mm/day) during JJAS Season. (a) Percentage of Days over the 30 mm/day during Rainy Season. (b) Percentage of Days over the 50 mm/day during Rainy Season

빈번하게 발생하는 것으로 분석되었으며(Fig. 6(a)), 50 mm/day 이상 중호우 사상은 고미단천(ID: 1020) 유역에서 4.43%에 해당하는 5.4일로 한강 전체유역에서 가장 발생빈도가 큰 것으로 나타났다(Fig. 6(b)). 전체적으로 황해와 근접해 있는 한강유역 북서부 지역과 한강유역 중부 지역에서 중호우사상의 발생횟수가 크게 나타났으며, 상대적으로 고지대에 해당하는 한강유역의 동남부 지역에서는 중호우사상의 발생횟수가 작게 나타나는 것으로 분석되었다.

3.3 경험적 확률밀도함수 분석

짧은 기록의 자료와 왜곡된 자료에 대한 매개변수의 신뢰성 결여와 그 외에 여러 가지 원인으로 인해서 복합분포(mixed distribution)의 밀도함수를 가진 자료를 표현하고자 할 때 기존의 확률분포 추정 방법으로는 어려움이 따른다. 따라서 이런 경우 핵밀도함수(kernel density function)방법을 적용하면 원자료의 구조적 특성을 제대로 반영할 수 있다(Lall et al., 1993; Moon and Lall, 1994). 일반적으로 핵밀도함수 추정식은 모든 실수 X 에 대하여 다음 Eq. (2)와 같이 정의할 수 있다.

$$\hat{f}_h(x) = n^{-1} \sum_{i=1}^n h^{-1} K\{h^{-1}(x - X_i)\} \quad (2)$$

여기서, $K(\bullet)$ 는 핵함수이며, n 은 자료의 개수, x 는 임의의 실수, $X_i = X_1, X_2, \dots, X_n$ 은 독립적으로 분포된 실관측치, h 는 n 이 무한대로 갈 때 영(zero)으로 접근하는 값($n \rightarrow \infty, h = h(n) \rightarrow 0$)을 갖는 양의 광역폭(bandwidth)이다. 핵밀도함수에 의한 결과는 자료의 Sample Size가 작은 대표적인 엘니뇨와 엘니뇨 Modoki 해의 한강유역의 여름철 강수특성변화에 대한 민감도와 불확실성 분석을

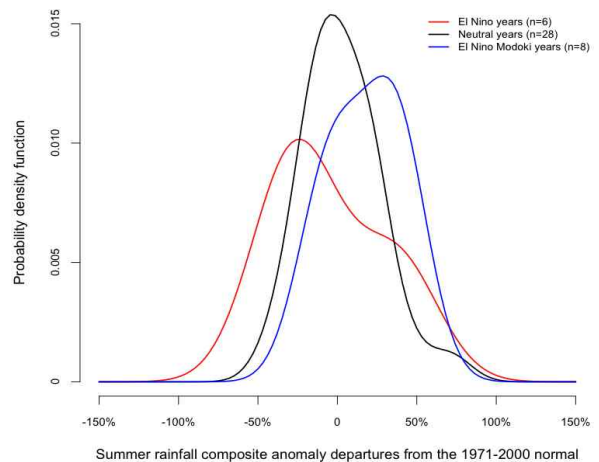


Fig. 7. Empirical Probability Density Functions. The Lines Indicate Distribution for Seasonal Volume Flows Determined for the El Niño Years and EMI years. The Dark Black Line is Neutral Years, the Red Line is El Niño Years, and the Blue Line is El Niño Modoki Years

위하여 사용하였다. 또한 광역폭(h)는 normal optimal smoothing parameter를 선택하여 사용하였으며, Bowman and Azzalini (1997)의 논문을 참고하였다.

엘니뇨와 엘니뇨 Modoki에 의한 한강유역 여름철 강우량의 민감도평가(sensitivity assesment)와 불확실성 분석(uncertainty analysis)을 위하여, 6개의 엘니뇨 해와 8개의 엘니뇨 Modoki 해, 그리고 나머지 28개의 Neutral 해로 구분하여 핵밀도함수를 적용한 경험적 확률밀도함수(Empirical Probability Density Function)를 산정하였다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 전형적인 엘니뇨 해와 엘니뇨 Modoki 해의 여름철 강우량의 분포특성이 Neutral 해에 비하여 달라지는 것을 확인할 수 있다. 전형적인 엘니

노 해에는 Neutral 해에 비하여 여름철 평년값과의 합성 편차(composite anomaly)에 대한 확률밀도함수의 첨두가 음의 값(negative skew)을 갖는 것으로 나타났으며, 엘니뇨 Modoki 해에는 Neutral 해에 비하여 확률밀도함수의 첨두가 양의 값(positive skew)을 갖는 것을 확인할 수 있다. 전형적인 엘니뇨 해에는 Neutral 해와 엘니뇨 Modoki 해에 비하여 확률밀도함수의 첨두가 낮고 왼쪽으로 치우쳐져 있으며, 오른쪽 tail이 두껍게 나타나 자료의 평균은 작으나 극치수문사상의 발생 확률이 클 것으로 분석되었다. 또한 엘니뇨 Modoki 해의 경우 Neutral 해와 엘니뇨 해에 비하여 확률밀도함수의 첨두가 오른쪽으로 치우쳐져 있어 평년에 비하여 한강유역의 여름철 평균강우량이 크게 발생할 확률이 클 것으로 분석되었다.

3.4 서로 다른 ENSO에 따른 여름철 강우 특성분석 결과

서로 다른 ENSO에 따른 여름철 강우 특성 분석을 위하여 한강유역의 엘니뇨 해와 엘니뇨 Modoki 해의 여름철 강우량의 백분위 편차와 CV를 분석하였다. 다음 Fig. 8은 한강유역의 엘니뇨 해와 엘니뇨 Modoki 해로 구분하여 여름철 계절강우의 백분위 편차의 변화량과 변동특성을 분석하여 통계적으로 유의한 경향이 있는 유역을 사선으로 나타낸 결과이며, 유의성 검증에는 Bootstrap Resampling 방법을 적용하였다. Table 3은 서로 다른 두 유형의 ENSO에 대한 여름철 강우량과 백분위 편차의 변화량 그리고 변동계수 값을 산정한 결과이다. 한강유역의 서로 다른 ENSO에 따른 여름철 강우 특성에 대한 자세한 분석결과는 다음과 같다.

로 나타낸 결과이며, 유의성 검증에는 Bootstrap Resampling 방법을 적용하였다. Table 3은 서로 다른 두 유형의 ENSO에 대한 여름철 강우량과 백분위 편차의 변화량 그리고 변동계수 값을 산정한 결과이다. 한강유역의 서로 다른 ENSO에 따른 여름철 강우 특성에 대한 자세한 분석결과는 다음과 같다.

3.4.1 엘니뇨해의 여름철 강우특성 분석결과

전형적인 엘니뇨 해의 경우, 여름철 유역평균 강우량은 833.5mm이며, 엘니뇨 Modoki 해에 비하여 여름철 강우량이 149.9mm (15.2%)작게 산정되었다. 또한 1966년부터 2007년까지 42년의 여름철 강우량 자료에 대하여 평년값과의 편차를 산정한 결과, 엘니뇨 해에 유역평균 값이 -2.23%, 엘니뇨 Modoki 해에는 15.71%로 평년보다 크게 나타났다. 다음 Fig. 8(a)에서 보는 바와 같이, 전형적인 엘니뇨 해에는 남한강유역에서 여름철 강우가 감소하는 경향이 있으며, 황해와 한강 중상류 유역에서는 다소 증가하는 특성을 보임을 확인할 수 있다. 또한, Monte Carlo resampling technique를 적용하여 여름철 강우의 변동성을 분석한 결과 평창강(ID: 1002)과 인북천(ID: 1011) 유역에서 신뢰구간 90%에서 통계적 유의한 증가 패턴이 나타나는 것으로 분석되었다. 다음으로, 전형적인 엘니뇨 해

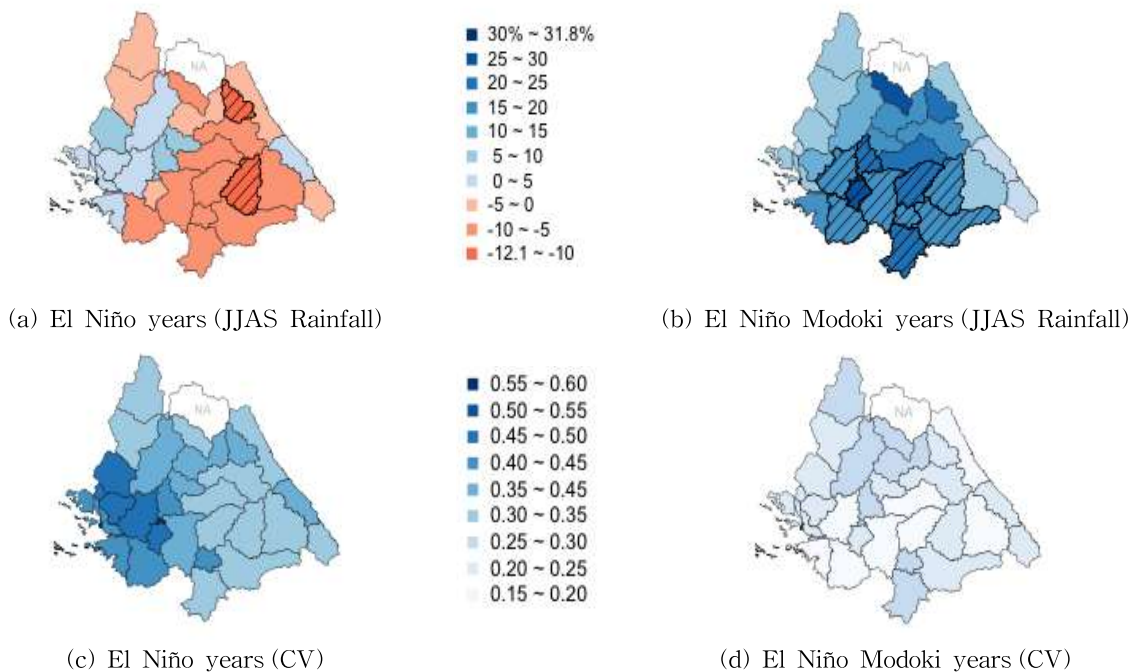


Fig. 8. Warm Season Anomaly Rainfall and Coefficient of Variation during Different Phases of ENSO. (a) and (b) Show Variation of Warm Season Anomaly Rainfall for El Niño Years (average of 6 years) and El Niño Modoki Years (average of 8 years). (c) and (d) Show the Coefficient of variability: $CV = \text{standard deviation} / \text{abs}(\text{mean})$

Table 3. Warm Season Anomaly Rainfall and Coefficient of Variation during the Different Phase of El Niño in each Sub-basin

ID	El Niño years			El Niño Modoki years		
	JJAS Rainfall (mm)	Anomalies (%)	CV	JJAS Rainfall (mm)	Anomalies (%)	CV
1001	745.63	-6.94	0.34	869.24	0.34	0.19
1002	764.48	-10.25	0.33	1,021.98	0.33	0.21
1003	749.58	-7.82	0.34	939.66	0.34	0.24
1004	714.72	-8.59	0.32	946.71	0.32	0.26
1005	768.22	-7.67	0.42	994.67	0.42	0.27
1006	837.37	-6.14	0.31	1,094.78	0.31	0.18
1007	827.47	-7.24	0.38	1,065.86	0.38	0.18
1008	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1009	674.55	-7.09	0.33	911.92	0.33	0.30
1010	796.72	-1.60	0.36	937.61	0.36	0.27
1011	665.95	-12.05	0.38	927.20	0.38	0.21
1012	781.05	-5.27	0.35	958.67	0.35	0.23
1013	995.75	8.70	0.39	1,067.49	0.39	0.24
1014	834.00	-5.83	0.35	1,072.05	0.35	0.17
1015	983.08	6.47	0.45	1,131.85	0.45	0.26
1016	812.97	-3.97	0.46	1,085.95	0.46	0.21
1017	825.90	0.89	0.60	1,079.26	0.60	0.26
1018	911.08	2.71	0.48	1,059.84	0.48	0.20
1019	880.02	2.67	0.48	974.21	0.48	0.25
1020	873.30	-3.25	0.31	978.17	0.31	0.26
1021	891.68	-1.28	0.33	977.62	0.33	0.25
1022	918.20	3.11	0.40	1,017.52	0.40	0.26
1023	960.18	6.20	0.49	983.81	0.49	0.21
1024	957.05	3.77	0.48	926.23	0.48	0.25
1101	764.23	-7.12	0.41	958.76	0.41	0.18
1201	883.63	1.57	0.45	944.83	0.45	0.25
1202	859.02	2.71	0.45	973.89	0.45	0.15
1301	806.48	-4.08	0.35	916.20	0.35	0.20
1302	906.82	4.83	0.40	891.02	0.40	0.21
1303	782.83	-2.00	0.35	811.65	0.35	0.21
Average	833.52	-2.23	0.40	983.40	15.71	0.23
Max.	995.75	8.70	0.60	1,131.85	31.84	0.30
Min.	665.95	-12.05	0.31	811.65	0.43	0.15

*Anomalies represent deviation of average 30-year during 1971~2000 in each season.

**CV=standard deviation/abs(mean); the ratio of standard deviation to mean.

의 변동계수 평균을 분석한 결과, 서울인근 유역을 포함한 황해 근처 유역에서 변동계수(CV=0.40)가 비교적 값이 크게 나타남을 확인하였다(Fig. 8(c)). 이는 한강유역 전체의 평균값은 증가하지만 어떤 해에는 그 반대 현상도 나타날 가능성이 있음을 의미한다.

3.4.2 엘니뇨 Modoki 해의 여름철 강우특성 분석결과

다음으로 엘니뇨 Modoki 해의 경우, 여름철 유역평균 강우량은 983.4mm로 나타나 엘니뇨 Modoki 해에 전형

적인 엘니뇨 해에 비하여 여름철 강우량이 18.0% 이상 증가하는 것으로 분석되었다. Fig. 8(b)에서 보는바와 같이 유역 전반에 걸쳐 강우가 증가하고 있음을 확인할 수 있으며, 특히 한강유역의 남서부에 위치한 유역에서 강한 강우의 증가를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 특히, 남한강유역에 해당하는 평창강(ID: 1002), 충주댐(ID: 1003), 달천(ID: 1004), 충주댐 하류(ID: 1005), 섬강(ID: 1006), 남한강 하류(ID: 1007), 청평 댐(ID: 1015), 경안천(ID: 1016), 팔당댐(ID: 1017), 한강서울(ID: 1018) 그리고 안성천(ID: 1101)의 총11개 중권역에서 통계적으로 유의한 증가패턴이 나타나는 것으로 분석되었다. 다음으로, 엘니뇨 Modoki 해의 변동계수 평균을 분석한 결과, 한강이북지역에서 약간의 변동성이 나타나고 있지만 전형적 엘니뇨 해에 비해서 그 변화폭은 크지 않음을 확인할 수 있다(Fig. 8(d)). 또한 유역 전반에 걸쳐 평균 변동계수(CV=0.23) 값이 전형적인 엘니뇨 해에 비하여 42.9% 작게 산정되었다. 따라서 엘니뇨 Modoki 해에 예상되는 여름철 강우특성이 한강전체 중권역에 걸쳐 뚜렷하게 나타날 가능성이 있음을 확인하였다.

3.5 서로 다른 ENSO에 따른 중호우사상의 발생 특성변화

서로 다른 ENSO에 따른 중호우사상 발생 특성 분석을 위하여 한강유역의 엘니뇨 해와 엘니뇨 Modoki 해의 여름철에 발생한 중호우 사상의 발생 횟수를 분석하였으며, 30mm/day를 초과하는 날과 50mm/day를 초과하는 날의 발생빈도 대한 백분위 편차를 분석하였다. 다음 Fig. 9는 전형적인 엘니뇨 해와 엘니뇨 Modoki 해로 구분하여 중호우사상의 발생빈도에 대한 백분위 편차와 통계적으로 유의한 경향이 있는 유역을 사전으로 나타낸 결과이며, Table 4는 서로 다른 두 유형의 ENSO에 대한 여름철 강우의 중호우사상 발생 일 수에 대한 백분위 편차 값을 산정한 결과이다. 한강유역의 서로 다른 ENSO에 따른 중호우사상의 발생 특성 변화에 대한 분석결과는 다음과 같다.

3.5.1 엘니뇨 해의 중호우사상 발생특성 분석결과

전형적인 엘니뇨 해의 경우, 유역전반에 걸쳐 중호우사상을 초과하는 강우의 발생빈도가 감소하는 경향이 있는 것으로 분석되었으며, 30mm/day를 초과하는 강우는 섬강(ID: 1006) 유역에서 신뢰구간 90%에서 통계적 유의한 감소경향이 있는 것으로 분석되었고(Fig. 9(a)), 50mm/day를 초과하는 강우는 남한강상류(ID: 1001), 섬강(ID: 1006), 인북천(ID: 1011), 홍천강(ID: 1016), 안성천(ID: 1101), 양양

남대천(ID: 1301) 그리고 강릉남대천(ID: 1302)의 총7개 중권역에서 통계적으로 유의한 감소경향이 있는 것으로 분석되었다(Fig. 9(c)). 다음으로, 30mm/day를 초과하는 강우의 발생일 수는 의암댐(ID: 1013)과 한강하류(ID: 1024) 유역에서 평균 11일로 가장 크게 나타났고, 충주댐(ID: 1003) 유역에서 평균 6.33일로 가장 작게 나타났으며, 전체 유역 평균은 8.49일로 나타났다. 또한 50mm/day를 초과하는 강우의 발생일 수는 한강하류(ID: 1024) 유역에서 평균 5.67일로 가장 크며, 인북천(ID: 1011) 유역에서 평균 1.67일로 가장 작게 나타났으며, 전체 유역 평균은 3.48일로 나타났다. 30mm/day를 초과하는 강우는 한강하류(ID: 1024) 유역에서 17.86%로 가장 크게 나타났고, 충주댐(ID: 1003) 유역에서 -20.50%로 가장 작게 나타났으며, 전체유역 평균은 0.88%로 나타났다. 또한 50mm/day를 초과하는 강우는 평화의댐(ID: 1009) 유역에서 11.11%로 가장 크게 나타났고, 인북천(ID: 1011) 유역에서 -44.45%로 가장 작으며, 전체유역 평균은 -13.13%로 나타났다. 따라서 전형적인 엘니뇨 해에는 한강유역의 전반에 걸쳐 중호우사상의 발생빈도가 감소할 것으로 예상되며, 주로 한강유역의 중앙과 동쪽 중권역에서 통계적으로 유의한 감소패턴을 보이는 것으로 분석된다.

3.5.2 엘니뇨 Modoki 해의 중호우사상 발생 특성 분석결과

다음으로 엘니뇨 Modoki 해의 경우, 유역전반에 걸쳐 중호우사상을 초과하는 강우의 발생빈도가 증가하는 경향이 있는 것으로 분석되었으며, 30mm/day를 초과하는 강우는 충주댐(ID: 1003), 충주댐하류(ID: 1005), 섬강(ID: 1006), 남한강하류(ID: 1007), 경안천(ID: 1016) 그리고 안성천(ID: 1101)의 총6개 중권역에서 신뢰구간 90%에서 통계적 유의한 증가경향이 있는 것으로 분석되었고(Fig. 9(b)), 50mm/day를 초과하는 강우는 남한강상류(ID: 1001), 평창강(ID: 1002), 충주댐(ID: 1003), 달천(ID: 1004), 충주댐하류(ID: 1005), 섬강(ID: 1006), 남한강하류(ID: 1007), 의암댐(ID: 1013), 홍천강(ID: 1014), 청평댐(ID: 1015), 경안천(ID: 1016), 팔당댐(ID: 1017), 한강서울(ID: 1018), 안성천(ID: 1101) 그리고 양양남대천(ID: 1301)의 총15개 중권역에서 통계적으로 유의한 증가경향이 있는 것으로 분석되었다(Fig. 9(d)). 다음으로 30mm/day를 초과하는 강우의 발생일 수는 남한강하류(ID: 1007)와 청평댐(ID: 1015) 유역에서 평균 11.5일로 가장 크게 나타났고, 삼척오십천(ID: 1303) 유역에서 평균 8.12일로 가장 작으며, 전체 유역 평균은 9.92일로 나타났다. 또한 50mm/day를 초과하

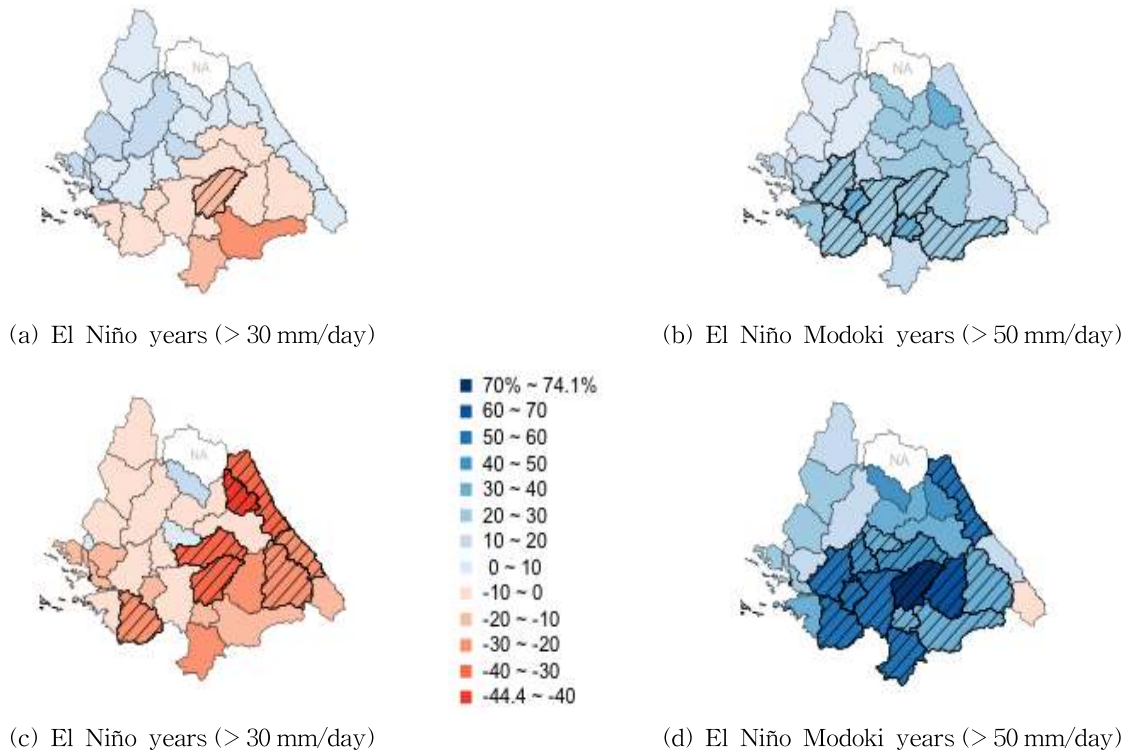


Fig. 9. Frequency of Heavy Rainfall and Percentage Anomalies in each Phases of El Niño and El Niño Modoki Years during the Warm Season (June to September) over the Han River Basin. (a) and (b) Distribution of Percentage of Seasonal Anomaly in each ENSO (> 30 mm/day). (c) and (d) Distribution of Percentage of Seasonal Anomaly in each ENSO (> 50 mm/day)

는 강우의 발생일 수는 청평댐(ID: 1015) 유역에서 평균 7.0일로 가장 크게 나타났고, 삼척오십천(ID: 1303) 유역에서 평균 3.38일로 가장 작게 나타났으며, 전체 유역 평균은 5.4일로 분석되었다. 그리고 중호우 사상의 백분위 편차가 30 mm/day를 초과하는 강우는 인북천(ID: 1011) 유역에서 35.0%로 가장 크게 나타났고, 고미탄천(ID: 1020) 유역에서 3.81%로 가장 작게 나타났으며, 전체유역 평균은 18.62%로 나타났다. 또한 중호우 사상의 백분위 편차가 50 mm/day를 초과하는 강우는 섬강(ID: 1006) 유역에서 74.11%로 가장 크며, 삼척오십천(ID: 1303) 유역에서 -4.48%로 가장 작게 나타났으며, 전체유역 평균은 37.81%로 분석되었다. 따라서 엘니뇨 Modoki 해에는 전형적인 엘니뇨 해에 비하여 강우량 증가와 더불어 중호우사상의 발생빈도가 증가할 것으로 예상되며, 주로 한강유역의 남쪽 중권역에서 통계적으로 유의한 증가패턴을 보이는 것으로 분석된다.

4. 요약 및 결론

해수면 온도의 패턴 변화에 따른 전 지구적 기후체계의

상호작용과 변화의 결과는 다양한 형태로 지역적 수자원의 변동을 야기시키는 요인으로 작용되고 있으며, 장기적인 측면에서 수자원의 정확한 예측 및 안정적인 용수공급을 위하여 기상인자와 수문자료간의 관계를 규명하는 일은 매우 중요하다. 본 연구에서는 서로 다른 형태의 ENSO가 한강유역의 수자원에 미치는 영향을 분석하였으며, 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 엘니뇨 Modoki 해에는 비정상적인 해수면 온도의 상승이 중앙태평양지역에 위치하며, SSTA패턴이 급격히 쇠퇴하는 경향이 있음을 확인하였다. 또한 엘니뇨 Modoki 해에는 한강유역 강우량의 편차가 0.5 mm/day 이상으로 나타나 6~9월의 4개월 동안 지속될 경우 평년에 비하여 약 60 mm 정도 증가할 것으로 분석되었다.
- 2) 전형적인 엘니뇨 해에는 강우량의 Empirical PDF의 첨두가 낮고 계절합성편차의 분산이 커서 수문변량의 민감도와 변동특성이 크게 발생하는 것으로 분석되었으며, PDF의 평균이 음의 구간으로 치우쳐 있어 평년에 비하여 여름철강우의 감소 경향이 있으나, 엘

Table 4. Frequency of Heavy Rainfall and Percentage of Anomalies over the 30 mm/day and 50 mm/day during the Different Phase of El Niño in each Sub-basin

ID	El Niño years				El Niño Modoki years			
	No. of days (day)		Anomalies (%)		No. of days (day)		Anomalies (%)	
	>30 mm/d	>50 mm/d	>30 mm/d	>50 mm/d	>30 mm/d	>50 mm/d	>30 mm/d	>50 mm/d
1001	6.83	2.17	-8.48	-26.96	8.50	4.12	13.84	39.05
1002	7.33	2.67	-9.47	-23.81	10.00	5.62	23.46	60.71
1003	6.33	2.67	-20.50	-17.52	10.00	4.38	25.52	35.31
1004	7.00	2.67	-13.22	-21.57	9.38	5.12	16.22	50.73
1005	7.83	4.17	-4.08	-10.07	10.88	6.12	33.16	32.20
1006	7.67	2.33	-13.53	-37.50	11.38	6.50	28.29	74.11
1007	8.33	4.00	-7.75	-1.64	11.50	6.25	27.30	53.69
1008	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1009	7.50	3.67	6.63	11.11	9.00	4.75	27.96	43.94
1010	7.50	3.33	0.90	-3.85	9.25	4.62	24.44	33.41
1011	6.83	1.67	2.50	-44.45	9.00	4.50	35.00	50.00
1012	6.83	2.83	-9.29	-7.61	9.25	4.25	22.79	38.59
1013	11.00	5.00	15.79	2.74	10.88	6.38	14.47	30.99
1014	8.00	2.50	-7.34	-35.35	10.88	5.75	25.97	48.70
1015	10.50	4.33	9.38	-9.09	11.50	7.00	19.79	46.85
1016	8.50	3.33	-1.54	-12.28	11.25	5.75	30.31	51.32
1017	8.67	4.17	-5.11	-2.34	9.88	6.75	8.12	58.20
1018	9.17	3.83	8.27	-4.96	10.75	6.38	26.97	58.06
1019	9.67	3.83	9.43	-14.81	10.25	5.38	16.04	19.45
1020	10.50	4.50	9.00	-8.79	10.00	5.88	3.81	19.09
1021	9.50	4.33	3.26	-6.48	9.62	5.62	4.62	21.40
1022	9.67	3.83	11.11	-1.71	9.50	4.38	9.20	12.18
1023	10.50	4.67	11.31	-2.78	10.00	6.00	6.01	25.00
1024	11.00	5.67	17.86	8.28	10.12	6.25	8.48	19.43
1101	7.17	2.50	-6.93	-24.24	9.50	5.25	23.38	59.09
1201	10.00	4.33	14.50	-10.96	10.00	5.88	14.50	20.72
1202	8.17	3.67	0.00	-3.51	10.00	5.12	22.45	34.87
1301	8.00	2.17	2.56	-32.99	8.88	4.88	13.78	50.77
1302	8.33	3.00	4.17	-22.41	8.50	4.38	6.25	13.15
1303	8.00	3.00	6.19	-15.09	8.12	3.38	7.86	-4.48
Average	8.49	3.48	0.88	-13.13	9.92	5.40	18.62	37.81
Max.	11.00	5.67	17.86	11.11	11.50	7.00	35.00	74.11
Min.	6.33	1.67	-20.50	-44.45	8.12	3.38	3.81	-4.48

니노 Modoki 해에는 PDF의 평균이 양의 구간에 치우쳐 있으며, 계절합성편차의 분산이 작게 나타나 수자원 확보 및 관리에 유리한 것으로 분석되었다.

3) 여름철 강우량의 경우 전형적인 엘니노 해에는 평년보다 적게 나타나는 경향을 보였으며, 엘니노 Modoki

해에는 증가하는 특성을 보이고 있음을 확인하였다. 또한 엘니노 Modoki 해에는 한강 남부 대부분 유역(11개 중권역)에서 강우량의 증가 경향이 통계적으로 유의한 것으로 나타났으며, CV값의 평균이 0.23으로 강우의 변동특성이 작은 것으로 분석되었다.

4) 엘니뇨 Modoki 해의 경우 증후우사상을 초과하는 강우의 발생빈도가 전반적으로 증가하는 경향이 있으며 중남부지역의 대부분 유역에서 통계적으로 유의한 결과를 보였다. 반면 전형적인 엘니뇨해에는 전반적으로 강우가 감소하는 경향이 있는 것으로 분석되었다. 또한, 엘니뇨 Modoki 해의 30 mm/day초과 강우일 수는 9.92일, 50 mm/day초과 강우일 수는 5.4일로 분석되었으며, 백분위 편차는 전형적인 엘니뇨해보다 각각 17.74%와 50.94% 높게 나타났다.

결과적으로, 서로 다른 형태의 엘니뇨와 엘니뇨 Modoki는 각각 한반도 한강유역의 여름철 수자원 변동성에 민감하게 영향을 미치고 있음을 확인하였으며, 향후 우리나라와 같이 수자원의 계절적 변동과 불확실성이 큰 지역에서는 안정적인 용수공급을 위한 수문기상인자와 수문변량들 간의 추가적인 관계규명이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2010년 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(한국연구재단-2010-220-D00083). 본 논문의 수정에 세심하고 의미있는 코멘트를 해주신 익명의 심사자님께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

Ashok, K., Behera, S.K., Rao, S.A., Weng, H., and Yamagata, T. (2007). "El Niño Modoki and its possible teleconnection." *J. Geophys. Res.* 112, doi:10.1029/2006JC003798.

Ashok, K., and Yamagata, T. (2009). "Climate Change: The El Niño with a difference." *Nature*, doi:10.1038/461481a.

Bjerknes, J. (1969). Atmospheric teleconnections from the equatorial pacific. *Monthly Weather Review*, Vol. 97, No. 3, pp. 163-172.

Bowman, A.W., and Azzalini, A. (1997). "Applied smoothing techniques for data analysis." London: Oxford University Press.

Chang, C-W.J., Hsu, H.H., Wu, C.R., and Sheu, W.J. (2008). "Interannual mode of sea level in the South China Sea and the roles of El Niño and El Niño Modoki." *Geophys. Res. Lett.* 35:L03601. doi:10.1029/2007GL032562.

Chu, P.S. (1995). "Hawaii rainfall anomalies and El Niño." *J. Climate*, Vol. 8, pp. 1697-1703.

Feng, J., Chen, W., Tam, C.Y., and Zhou, W. (2010). "Different impacts of El Niño and El Niño Modoki on China rainfall in the decaying phases." *International Journal of Climatology*, doi:10.1002/joc.2217.

Gershunov, A., Barnett, T.B., and Cayan, D.R. (1999). "North Pacific Interdecadal Oscillations Seen as Factor in ENSO-related North American Climate Anomalies." *Eos. Transactions. American Geophysical Union*, doi:10.1029/99EO00019.

GPCP (Global Precipitation Climatology Project) (2012). URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/composites/printpage.pl>. accessed March 2012.

Horel, J.D., and Wallace, J.M. (1981). "Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation." *Monthly Weather Review*, Vol. 109, pp. 813-829.

Kao, H.Y., and Yu, J.Y. (2009). "Contrasting Eastern-Pacific and Central-Pacific Types of ENSO." *Journal of Climate*, Vol. 22, pp. 615-632 doi:10.1175/2008JCLI2309.1.

Kiladis, G.N., and Diaz, H.F. (1989). "Global climatic anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation." *J. Climate*, Vol. 2, pp. 1069-1090.

Kim, H., Webster, P.J., and Curry, J.A. (2009). "Impact of shifting patterns of Pacific Ocean warming on the frequency and tracks of North Atlantic tropical cyclones." *Science*, Vol. 325, pp. 77-80.

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.

Kug, J.S., Jin, F.F., and An, S.I. (2009). "Two types of El Niño events: Cold tongue El Niño and warm pool El Niño." *Journal of Climate*, Vol. 22, pp. 1499-1515, doi:10.1175/2008JCLI2624.1.

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*, Vol. 38, No. 12, pp. 985-994.

Lall, U., Moon, Y.I., and Bosworth, K. (1993). "Kernel

- flood frequency estimators: bandwidth selection and kernel choice." *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 4, pp. 1003-1015.
- McPhaden, M.J., Zebiak, S.E., and Glantz, M.H. (2006). "ENSO as an Integrating Concept in Earth Science." *Science*, Vol. 314, pp. 1740-1745.
- Monteverdi, J., and Null, J. (1997). El Niño and California Rainfall, National Oceanic and Atmospheric Administration, Western Region Technical Attachment No. 97-37. <http://tornado.sfsu.edu/geosciences/elniño/elniño.html>, accessed February, 2005.
- 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.
- Na, H., Jang, B.G., Choi, W.M., and Kim, K.Y. (2011). "Statistical Simulations of the Future 50-year Statistics of Cold-Tongue El Niño and Warm-Pool El Niño." *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, Vol. 47, No. 3, pp. 223-233.
- Nicholls, N., and Wong, K.K. (1990). "Dependence of rainfall variability on mean latitude and the Southern Oscillation." *J. Climate*, Vol. 3, pp. 163-170.
- NOAA (national weather service climate prediction center) (2012). URL:<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>, accessed March 2012.
- Pradhan, P.K., Preethi, B., Ashok, K., Krishna, R., and Sahai, A.K. (2011). "Modoki, Indian Ocean Dipole, and western North Pacific typhoons: Possible implications for extreme events." *Journal of Geophysical Research*, 116D18108, doi:10.1029/2011JD015666.
- Pizarro, G., and Lall, U. (2002). "El Niño-Induced Flooding in the US West: What Can We Expect?." *Eos. Transactions. American Geophysical Union*, Vol. 83, pp. 349-352.
- Rayner, N.A., Parker, D.E., Horton, E.B., Folland, C.K., Alexander, L.V., Rowell, D.P., Kent, E.C., and Kaplan, A. (2003). "Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century." *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1029/2002JD002670.
- Ren, H.L., and Jin, F.F. (2011). "Niño indices for two types of ENSO." *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, L04704, doi:10.1029/2010GL046031.
- Schonher, T., and Nicholson, S.E. (1989). "The Relationship between California Rainfall and ENSO Events." *Journal of Climate*, Vol. 2, pp. 1258-1269.
- Shin, H.S., Ahn, J.H., and Yoon, Y.N. (1999). "Analysis of spatial-temporal relationship between El Niño and South Korean precipitation." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 19, No. II-1, pp. 1-12.
- Trenberth, K.E. (1997). "The Definition of El Niño." *National Center for Atmospheric Research, Bulletin of the American Meteorological Society*, pp. 2771-2777.
- WAMIS (water management information system) (2012). URL: <http://wamis.go.kr/eng/>, accessed March 2012.
- Weng, H., Ashok, K., Behera, S., Rao, S., and Yamagata, T. (2007). "Impacts of recent El Niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific rim during boreal summer." *Climate Dynamics*, Vol. 29, pp. 113-129.
- Yeh, S.W., Kug, J.S., Dewitte, B., Kwon, M.H., Kirtman, B.P., and Jin, F.F. (2009). "El Niño in a changing climate." *Nature*, Vol. 461, pp. 511-514, doi:10.1038/nature08316.
- Yoon, J.H., and Yeh, S.W. (2009). "Study of the Relationship between the East Asian Marginal SST and the Two Different Types of El Niño." *Ocean and Polar Research*, Vol. 31, No. 1, pp. 1-61.

논문번호: 12-058	접수: 2012.06.07
수정일자: 2012.10.04	심사완료: 2012.10.04