

두 가지 El Niño 형태에 따른 한강 유역의 연최대홍수량 및 저유량의 변화 분석

Impacts of Two Types of El Niño on Hydrologic Variability in Annual Maximum Flow and Low Flow in the Han River Basin

김 종 석* / 윤 선 권** / 이 주 현***

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

Abstract

In this study, we analysed hydrologic variability in quantity and onset of annual maximum flow and low flow by impacts of the different phases of ENSO (El Niño Southern Oscillation) over the Han River Basin. The results show that annual maximum flow has increased statistically significant about 48.3% of all over the watershed. The onset of annual maximum flow was delayed in the west of the Han River basins and in the east of the basins was likely to be rapid onset. Also, this study shows that 7-day low flow was decreased statistically significant about 26.0% of the total area in the Han River Basin, and onset of 7-day low flow tends to be faster in the upper-middle basins of the Han River. The onset of annual maximum flow shows similar pattern during the CT (Cold tongue)/WP (Warm-pool) El Niño years, but annual maximum flow appeared less in 89.0% of all basins during the CT El Niño years. In addition, the onset of 7-day low flow tended to be faster about 17 days on average during the WP El Niño years, and 72.7% of the basins show significant increase during the CT El Niño years. Consequently, it was found that the different phases of CT/WP El Niño have effects on sensitivity to variability in quantity and onset of water resources over the Han River Basin. We expect that the present diagnostic study on hydrological variability during different phases of ENSO will provide useful information for long-term prediction and water resources management.

Keywords : CT El Niño, WP El Niño, annual maximum flow, 7-day low flow, Han River Basin

요 지

본 연구에서는 서로 다른 ENSO (El Niño Southern Oscillation) 형태에 따른 한강유역의 연최대홍수량과 저유량의 정량적 변화 및 발생시점의 변화를 분석하였다. 경향성 분석결과, 연최대유출의 경우 한강 전체 유역면적의 48.3%가 통계적으로 유의한 증가패턴을 보였으며, 연최대 유출의 발생시기는 한강 서부유역에서 늦어지고, 동부유역에서는 빨라지는 경향이 있음을 확인하였다. 또한 7일 저유량의 경우, 24개 중권역중 6개 유역(전체 면적의 26.0%)에서 통계적으로 유의한 감소경향을 보였으며, 저유량의 발생시기는 한강중상류 유역에서 빨라지는 경향이 있음을 확인하였다. CT(Cold tongue)/WP (Warm-pool) El Niño 시기에 연최대유출의 발생시점의 차이는 크지 않으나, CT El Niño 시기에는 전체유역의 89.0%에서 연최대유출량이 평년보다 작게 나타났다. 또한, 7일 저유량의 발생시점은 WP El Niño 시기에 평균적으로 약 17일 정도

* 서울시립대학교 토목공학과 연구교수 (e-mail: jongsuk@uos.ac.kr)

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

** 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 미래도시연구소 박사후과정 (e-mail: skyoon79@kaist.ac.kr)

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

*** 교신저자, 중부대학교 공과대학 토목공학과 교수 (e-mail: leejh@jbm.ac.kr, Tel: 041-750-6744)

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

빠르며, CT El Niño (WP El Niño) 시기에는 전체 유역의 72.7% (20.0%)에서 통계적으로 유의한 증가(감소)패턴을 보이는 것으로 분석되었다. 본 연구는 서로 다른 형태의 CT/WP El Niño가 한강 유역 수자원의 양과 발생시점의 변화에 민감하게 영향을 미치고 있음을 확인하였으며, 향후 다양한 형태의 ENSO에 따른 수문변량의 변화에 대한 진단연구를 통하여 장기적인 수자원관리 및 예측을 위한 기초 자료로 활용이 가능하리라 사료된다.

핵심용어 : CT El Niño, WP El Niño, 연최대홍수량, 7-day 저유량, 한강유역

1. 서론

유역의 수문학적 거동 특성을 파악하는 일은 가뭄 및 홍수 등의 자연 재해를 포함하여 수자원의 효율적인 예측과 관리, 안정적인 용수공급 등 이수과 치수를 위해 반드시 필요한 일이며, 특히 극치유량과 저유량의 변화는 하천 생태계의 생태학적 구조와 기능의 조절에 중요한 구성요소이기 때문에 주의 깊게 살펴볼 필요가 있다(Poff and Ward, 1989, 1990; Richter et al., 1996; Mathews and Richter, 2007). 시공간적 강우 및 유출의 변화는 독립적으로 발생하기 보다는 수문 순환과정에서 나타나는 상관성에 기초하고 있으며, 유역의 수문의 변화를 일으키는 주요 요인으로 엘니뇨/라니냐 등의 비정상적인 해수면 온도의 분포나 기후시스템의 비선형적 거동을 들 수 있다(Piechota and Dracup, 1996; Piechota et al., 1998; McPhaden et al., 2006).

기존의 여러 연구에 의하면, El Niño 현상이 전 세계 많은 지역에 걸쳐 수문기상학적 순환패턴의 변화에 통계적으로 유의할 만한 영향을 미치고 있음을 밝히고 있다(Schonher and Nicholson, 1989; Gershunov et al., 1999; Weng et al., 2007; Feng et al., 2011). 또한, 최근 연구에 의하면 지구온난화 및 기후변화의 영향으로 대규모 해수면 온도 상승과 하강의 전형적인 패턴이 변화하고 있음을 시사하고 있으며, 태평양 연안 국가들을 중심으로 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Weng et al., 2007; Kao and Yu, 2009; Yeh et al., 2009; Na et al., 2011). 특히 1970년대 후반을 전후로 하여 엘니뇨의 주기 및 강도의 변화뿐 아니라 발생 위치가 변화하는 등 기존 엘니뇨와 다른 새로운 형태의 엘니뇨가 발생하고 있다고 보고되고 있다(Ashok et al., 2007; Kao and Yu, 2009; Pradhan et al., 2011).

이러한 새로운 형태의 엘니뇨는 다양한 이름으로 불려지고 있으며(El Niño Modoki, Pseudo El Niño, central Pacific (CP) El Niño, 그리고 warm-pool (WP) El Niño), 열대태평양(tropical Pacific)의 서부와 동부에 평년보다 낮은 해수면 온도가 존재하고 중앙태평양(central Pacific) 부근에 비정상적인 해수면 온도의 상승을 보이는 특징이

있다. 또한, 전통적인 엘니뇨 형태는 canonical El Niño, conventional El Niño, eastern Pacific (EP) El Niño, 그리고 cold tongue (CT) El Niño 등 다양한 용어로 불리어지고 있다. 따라서 본 연구에서는 새로운 형태의 엘니뇨를 WP El Niño라 언급하고, 전통적인 엘니뇨 형태를 CT El Niño라고 언급하고자 한다.

Ashok and Yamagata (2009)는 인간 활동에 의한 지구 온난화가 최근의 엘니뇨현상의 변화와 연관성이 있다고 제안하였으며, 지구온난화가 지속되는 미래 기후상태에서는 WP El Niño 사상이 빈번히 발생되고 그 영향 또한 더욱 강해질 수 있음을 미래 기후변화 시나리오 자료 분석을 통해서 전망하였다(Yeh et al., 2009; Lee and McPhaden, 2010; Na et al., 2011). 그러나 현재까지의 관측 연구는 가용할 수 있는 표본의 크기에 제한을 받고 있기 때문에, 최근의 WP El Niño 경향이 기후변화의 대표적인 징후인지에 대한 의문점은 아직도 명확히 밝혀지지 않고 있다(Newman et al., 2011).

국내의 경우 엘니뇨현상과 같은 기상인자와 유역의 수문변량과의 관계분석에 대한 연구로 강인식(1998)은 엘니뇨가 발생한 겨울에는 우리나라 겨울철 기온이 평년 이상의 분포를 보이며 그 다음해 여름철 강수량이 증가함을 제시하였으며, 차은정 등(1999)은 엘니뇨/라니냐 해의 우리나라 기후 특성에 관한 연구를 통하여 엘니뇨가 발생한 여름에는 북태평양 고기압의 발달이 늦어지고 위치도 남하하기 때문에 우리나라에는 저온 현상이 나타나고 장마역시 늦게 시작됨을 밝혔다. 또한 신현석 등(1999)은 남방진동지수(SOI: Southern Oscillation Index)와 우리나라 22개 기상관측소의 월강수량과의 교차상관계수를 구함으로서 엘니뇨와 우리나라 강수량의 시·공간적 상관관계를 분석하였으며, 권현한과 문영일(2005)은 주성분분석과 독립성분분석을 통하여 추출한 시계열자료를 바탕으로 Niño3.4지역의 해수면온도와 우리나라 여름강수량과의 상관성을 분석하였다.

추현재 등(2007)은 ENSO (El Niño Southern Oscillation)를 정량적으로 표현해 주는 지수로 SOI자료를 사용하여

월강수량, 월평균기온, 댐 월유입량 자료를 바탕으로 우리나라의 계절별 수문특성변화를 연구하여 warm ENSO에는 강수량 증가와 기온상승, cold ENSO에는 강수량 감소와 기온하강과 관계가 있음을 밝혔다. 또한, 윤진희와 이상욱(2009)은 1950~2007년 동안의 Niño3와 Niño4 해수면온도 지수를 이용하여 최대 표층 수온 편차가 열대 동태평양에서 나타나는 경우를 Eastern Pacific (EP) El Niño로, 중앙태평양에서 나타나는 경우를 Central Pacific (CP) El Niño로 정의하여 1990년 이후에 CP-El Niño의 발생 빈도가 증가하는 특징을 보이며 여름철 열대 중태평양 지역의 높은 표층수온의 선형 경향성과 밀접한 상관이 있음을 밝혔다.

최근까지, 기상 인자와 수문변량간의 관계규명에 대한 국·내외 여러 연구에도 불구하고, 열대태평양의 해수면 온도 변화에 대한 이해가 중요한 것은 현재 및 미래의 수문학적 유출이 지역에 따라 어떻게 다른 양상으로 일어나며, 그것이 국지적으로 어떠한 자연 재해를 야기하는가를 예측하여 대비하는 일에 중요한 정보를 제공할 수 있기 때문이다. 그러나 아직까지 동아시아 지역에서는 변화하는 해수면 패턴에 대한 수문 변량과의 정량적인 관계 규명이 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 한강유역을 중심으로 두 가지 CT/WP El Niño 형태에 따른 극치유량과 저유량의 정량적 변화와 발생시점의 변화를 진단하여 기후변화에 대한 장기적인 수자원 예측과 관리, 유역차원의 안정적인 용수공급과 현실적인 적응 전략 수립을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 분석자료 및 방법

본 연구에서 사용한 수문기상학적 자료는 1966년부터 2007년까지의 유역평균 강수량과 유출량 자료이며 국가 수자원관리 종합정보시스템(WAMIS, 2012; <http://wamis.go.kr/>)에서 제공받아 이용하였다. 유역 평균 강수량 자료는 한강유역 총 43개 관측지점을 대상으로 Thiessen polygon방법에 의하여 산출된 값이며, 유출량자료는 Precipitation Runoff Modelling System (PRMS)에 의하여 모의된 결과이다. PRMS모형은 전 세계적으로 널리 사용되고 있는 강우-유출모형이며, 미국의 US Geological Survey (USGS)에서 개발된 분포형 장기유출 모형이다(Leavesley et al., 1983; Dressler et al., 2006). 이러한 유역평균 수문자료는 모의 결과의 불확실성에도 불구하고, 관측 자료가 부족한 국내 현실에서 유역단위 수문량의 특성 분석과 중·장기 수자원 계획을 수립하는데 효과적이다.

ENSO 자료는 미국의 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2012)에서 월별로 제공되는 자료를 사용하였으며, Niño1+2, Niño3, Niño3.4, Niño4 지역에서 관측되고 있다. 이 지역 중에서 Niño3 (5°S-5°N, 150°-90°W), Niño4 (5°S-5°N, 160°E-150°W) 지역의 관측 자료가 El Niño 현상과 비교적 강한 상관성을 보이는 것으로 알려진 바 있다 (Trenberth, 1997). 유역단위 수문변량의 다양성과 대규모 대기순환패턴과의 관계규명을 위하여 Hadley Center의 해수면 온도 관측자료를 이용하였으며, HadISST1 자료는 1°×1°의 공간해상도를 갖고 매월 갱신이 되며 다음의 Website (http://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/)에서 내려 받아 사용하였다(Rayner et al. 2003).

Kug et al. (2009)과 Yeh et al. (2009)은 서로 다른 형태의 El Niño 사상을 Niño3와 Niño4 관측자료를 이용하여 분류하였으며, 중앙태평양의 해수면 온도가 이상적으로 넓게 분포하는 새로운 형태의 El Niño Modoki와의 상관성을 분석한바 있다. 또한 Ren and Jin (2011)의 연구에 의하면 서로 다른 형태의 El Niño 사상을 Niño3와 Niño4의 관측자료를 이용하여 CT El Niño와 WP El Niño를 구분하였다. 본 연구에서 적용한 CT El Niño와 WP El Niño의 구분 방법은 다음 Eq. (1)과 같다.

$$\begin{aligned} N_{CT} &= N_3 - \alpha N_4 \\ N_{WP} &= N_4 - \alpha N_3 \end{aligned} \quad \alpha = \begin{cases} 2/5, & N_3 N_4 > 0 \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

여기서, N_3 와 N_4 는 각각 Niño3와 Niño4 지수를 의미하며, N_{CT} 는 CT El Niño를 N_{WP} 는 WP El Niño를 의미한다. 또한 α 는 서로 다른 ENSO의 구분을 위한 보정상수이다. 수많은 양적 자료는 두 개 이상의 범주변수(categorical variable) 또는 분류기준에 따라 분류할 수 있는데 이때 변수들이 서로 독립적인가 판단하는 것은 아주 중요한 사항이다. 본 연구에서는 Ren and Jin (2011)이 분류하였던 기준을 적용하였고, 1966~2007년까지의 42년 동안의 월별 Niño3와 Niño4 anomalies를 바탕으로 독립적인 N_{CT} 와 N_{WP} 지수를 구분하여 분석하였다. 1966~2007년까지 N_3 와 N_{CT} 지수의 시계열자료를 바탕으로 상관성 분석을 실시한 결과, 상관계수는 0.98, 표준편차는 ± 0.7356 으로 산정되었으며, N_4 와 N_{WP} 상관계수는 0.85, 표준편차는 ± 0.4104 로 산정되었다. 또한, N_{CT} 와 N_{WP} 의 상관성 분석결과는 0.13으로 분석되었으며, 기존의 N_3 와 N_4 의 상관계수 0.75보다 작게 나타나 상대적으로 두 자료 간의 독립성을 유지하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 N_{CT} 와 N_{WP}

Table 1. Selected Major Events for CT/WP El Niño

El Niño Type	Major Events
CT El Niño years	1972/1973, 1982/1983, 1986/1987, 1991/1992, 1997/1998
WP El Niño years	1968/1969, 1990/1991, 1994/1995, 2002/2003, 2004/2005

지수를 적용하여 5개의 강한 CT El Niño와 5개의 강한 WP El Niño를 구분하였으며 그에 따른 한강유역 24개 중권역별 극치유량과 저유량의 변화를 분석하였다. 다음 Table 1은 본 연구에서 적용된 주요 CT El Niño 기간과 WP El Niño 기간의 선택 결과를 보여주고 있다.

연최대치 유출량(AMF: Annual Maximum Flow)과 7일 저유량(7-day Low Flow)에 대한 경향성 분석결과는 일반적으로 널리 사용되고 있는 비매개변수적 방법인 Mann-Kendall (M-K test) 검정으로 실시하였다(Mann, 1945; Kendall, 1975; Helsel and Hirsch, 1992). 서로 다른 형태의 El Niño와 한강유역의 유출 특성을 분석하기 위하여, Composite Anomaly (CA)를 적용하였으며, CA분석을 위한 선택된 사상(event)이 적기 때문에 관측 자료가 있는 42개년(1966~2007)에 대해 Bootstrap random resampling (Ripley, 1987; Becker et al., 1988) 방법을 적용하여 두 가지 El Niño 패턴에 대한 CA 결과의 통계적 유의성을 평가하였다.

3. 분석 및 결과

3.1 대상유역의 유출특성 분석

본 연구의 대상유역인 한강유역은 위도 36°30′~38°55′, 경도 126°24′~129°02′에 위치하고 있으며 유역면적 26,356 km², 유로연장 481.7km로 남한 전체 면적의 약 23%를 차지하고 있다(Kim et al., 2011, 2012). 1966~2007년까지의 강수의 특성을 분석해본 결과, 계절적 특성이 강하게 나타나는 것으로 분석되었으며, 7월 평균강수량은 307mm로 가장 많으며 12월 평균강수량은 21mm로 가장 적게 나타났다. 다음 Fig. 1은 한강유역과 24개 중권역을 나타내고 있으며, Table 2는 24개 중권역 이름과 유역면적을 보여주고 있다.

한강 유역의 여름철 강수의 경우, 연평균강수량의 60.2%를 차지하여 한국의 여름철 평균 강수량(55.3%)에 비하여 4.9% 크며, 한강유역의 봄철 강수량(연평균 강수량의 14.4%)의 경우, 한국평균 봄철강수량(18.1%)에 비하여 약 3.7% 작다. 다시 말하자면, 한강 유역은 집중호우에 의한 여름철 강수집중 현상과 봄철 가뭄이 다소 심하게 발생하는 특징을 보이고 있다는 것이다. 2007년 한국 정

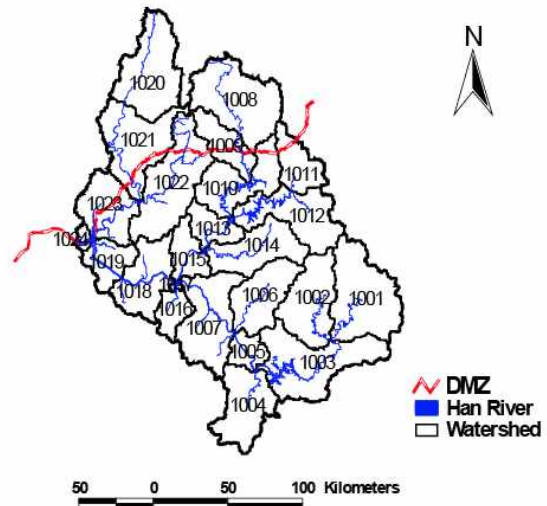


Fig. 1. Han River Basin and its 24 sub-watersheds

부의 유역조사 결과에 따르면, 한강 유역의 총 홍수면적은 260,330 ha, 홍수피해액은 7,809억원에 달하고 최근으로 올수록 그 피해규모와 피해액이 점차 증가하고 있는 추세이다(http://wamis.go.kr). 또한 한강 유역의 인구는 약 1,700만명으로 이는 남한 총 인구의 34.0%에 해당하며 1966년과 2005년 사이에 거의 3배 이상 증가한 것으로 보고되고 있다(UNESCO, 2011). 따라서 한강유역은 유역특성상 안정적인 수자원 확보와 지속적인 용수공급이 절실히 필요한 곳이라 할 수 있다.

CT와 WP El Niño에 대한 유역의 유출특성을 분석하기 전에, 본 연구에서는 강우와 유출의 관계를 살펴보았으며 그에 대한 결과는 Fig. 2에 도시하였다. 1966년부터 2007년까지 42개년의 일강우 및 일유출량 자료를 대상으로 전체 한강유역 24개 중권역중 금강산댐 유역을 제외한 23개의 소유역에 대하여 Pearson 상관분석을 실시하였다. 그림에서 보는바와 같이, 한강중서부 지역이 상대적으로 상관성이 높게 나타났다. 한강북부 유역인 임진강과 한탄강 유역은 비교적 낮게 나타나는 특성을 보였으나 23개 중권역 유역 전체에서 유의수준 99%에 대하여 강우와 유출의 관계가 통계적으로 유의한, 양의 상관관계를 보이는

Table 2. Station Information of 24 Sub-basins in the Han River Basin.

ID	Sub-basin Name	Catchment Area (km ²)	ID	Sub-basin Name	Catchment Area (km ²)
1001	Upstream of Namhan River	2,447.9	1013	Euiam Dam	721.7
1002	Pyeongchang River	1,773.4	1014	Hongcheon River	1,566.0
1003	Chungju Dam	2,483.8	1015	Cheongpyeong Dam	760.6
1004	Dal Stream	1,614.4	1016	Kyeongan Stream	561.1
1005	Downstream of Chungju Dam	524.4	1017	Paldang Dam	43.9
1006	Seom River	1,491.0	1018	Han River in Seoul	1,537.2
1007	Downstream of Namhan River	2,072.7	1019	Han River in Goyang	826.3
1008	Kumgangsan Dam	2983.0	1020	Gomitan Stream	2,195.2
1009	Pyeongwha Dam	351.3	1021	Upstream of Imjin River	2,072.7
1010	Chuncheon Dam	1,587.4	1022	Hantan River	2,452.2
1011	Inbook Stream	931.3	1023	Downstream of Imjin River	1,419.2
1012	Soyang River	1,852.0	1024	Downstream of Hantan River	146.4

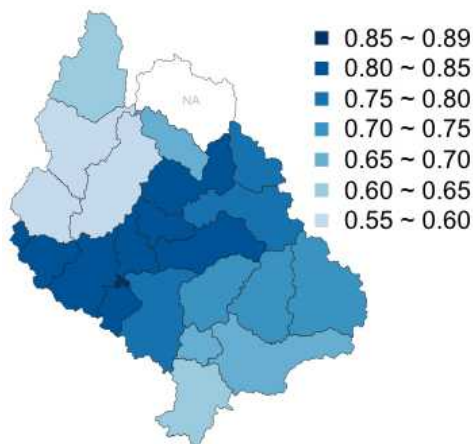


Fig. 2. Correlation Analysis between Time Series of Daily Areal Precipitation and Simulated Streamflow over the Period 1966–2007. NA Indicates Data not Available

것으로 나타났다. 기존의 많은 연구에서 유출량 자료보다는 가용자료의 편의성과 상대적으로 불확실성이 적은 강우량 자료를 적용하여 기상 인자와의 관계규명을 시도하고 있다. 그러나 유역의 유출반응은 강우이외에도 다른 변수(지형, 토지피복도, 증발산 등)에 의해 영향을 받기 때문에 유출에 있어 강우가 지배적인 인자이지만, 강우의 특성변화만으로는 기후변화에 대한 유역단위의 현실적인 대응 및 적응 전략을 수립하기에는 한계가 있다. 유역의 수문과정을 평가하는데 있어서 유량이 최적의 변량이지

만 관측 자료가 부족한 국내 현실에서 강우-유출모형에 의해 산정된 결과를 적용하는 것은 불가피한 실정이다. 유출모형의 검증과 결과의 불확실성에도 불구하고, 유역 단위의 수문특성 분석은 수자원의 효율적인 예측과 관리, 안정적인 용수공급과 하천 생태계의 생태학적 구조와 기능 조절과 관련한 유출특성을 이해하는데 중요한 자료로 활용될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 유출분석 자료의 신뢰성과 연속성, 그리고 대상유역의 확장성을 고려하여 국가수자원관리종합시스템(WAMIS) 자료를 적용하였으며, 한반도의 대표 유역인 한강유역을 대상으로 변화하는 해수면 패턴(CT/WP El Niño)에 대한 유역의 유출특성을 진단하고자 한다.

다음 Fig. 3a는 한강유역의 일평균 유출(1966~2007)의 결과를 보여주고 있으며, 6월에서 9월 기간동안 연평균유출량의 71%가 발생하며 계절적 변동성(COV: 0.42)도 큰 것으로 분석되었다. Fig. 3b는 연최대치 유출량(AMF)과 7일 저유량의 발생시기를 Violin plot으로 나타내고 있다. Violin plot은 데이터의 범위 내에서 분석된 결과를 box plot과 Empirical PDF로 도시할 수 있어 데이터의 구조적 특성을 보다 잘 반영할 수 있다(Hintze and Nelson, 1998). 한강 전체유역에 대한 AMF의 발생시기는 6월 26일에서 10월 12일 사이이며, 42년간의 AMF의 발생시기에 대한 중앙치는 7월 31일로 분석되었다. 그러나 발생시기에 대한 변동성(COV)은 0.11로 크지 않은 것으로 분석되었다. 저유량의 경우, 1월에서 3월에 많이 발생하고 중앙치 발

생시점은 2월 27일이며 상대적으로 변동성이 큰 것으로 분석되었다(COV: 1.09).

3.2 경향성 분석

다음 Fig. 4 and Fig. 5는 AMF와 7일 저유량에 대해 M-K검정을 통한 경향성 분석의 결과를 도시하고 있다.

Fig. 4a에서 보는 바와 같이, 한강 전체 유역에서 AMF의 증가경향이 나타나고 있다. 특히, 전체 24개 중권역 중 11개 유역(달천: 1004, 충주댐하류: 1005, 금강산댐: 1008, 평화의댐: 1009, 홍천: 1014, 청평댐: 1015, 경안천: 1016, 한강서울: 1018, 고미탄천: 1020, 임진강상류: 1021, 한탄강: 1022)에서 유의수준 10%에서 통계적으로 유의한 증가패턴이

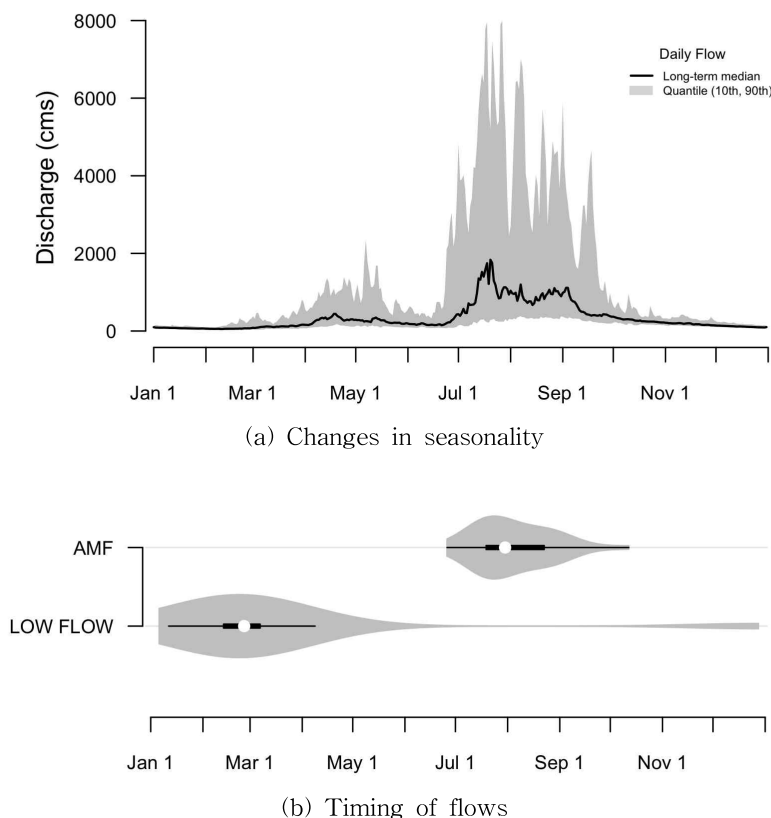


Fig. 3. Seasonal Cycle of Streamflow in the Han River Basin. (a) Change in Seasonality. The Long-term Median Daily Flow and Associated Variability Band (corresponding to the 10th and 90th percentile of discharge data) are Shown for 42-year Historical Record. (b) Empirical PDF of Occurrence Dates of Annual Maximum Flow (AMF) and 7-day Low Flow

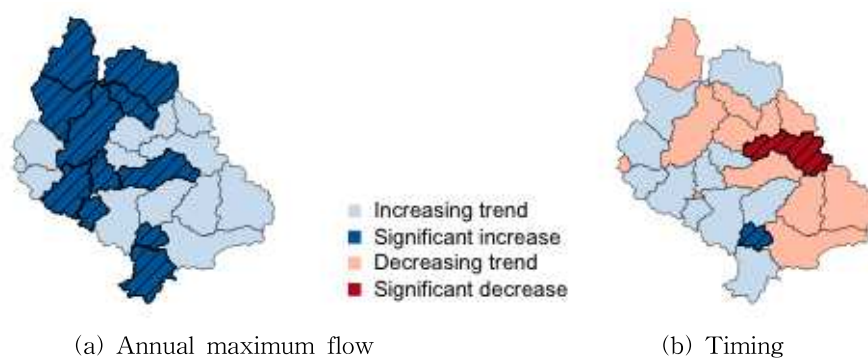


Fig. 4. Trend in Annual Maximum Flow (AMF) Based on the Mann-Kendall Test (M-K test) for the Han River Basin During the Period 1966~2007. (a) Trend in AMF. (b) Trend in Occurrence Date of AMF. For Each Case, Trends with $p < 0.10$ were Considered as Statistically Significant Shown with the Hatched Polygons

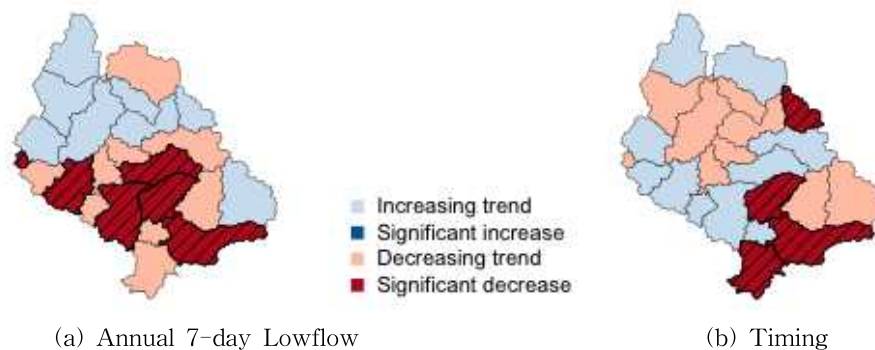


Fig. 5. Trend in Annual 7-day Low Flow Based on the Mann-Kendall Test (M-K test) for the Han River Basin during the Period 1966-2007. (a) Trend in Annual 7-day Low Flow. (b) Trend in Occurrence Date of Annual 7-day Low Flow

분석되었으며, 이는 한강 전체 유역면적의 48.3%를 차지한다.

AMF의 발생시점에 대한 경향성 분석의 경우(Fig. 4b), 한강 서부유역에는 증가경향(발생시기 늦어짐)이 나타나고 동부유역에는 감소경향(발생시기 빨라짐)이 나타나는 등 뚜렷한 패턴의 대비를 보이고 있으나 통계적으로 유의한 변화를 보이는 곳은 충주댐하류(1005)와 소양강유역(1012) 2개 유역으로만 나타났다.

Fig. 5a는 7일 저유량의 경향성 분석결과를 도시하고 있으며 한강 남부(감소경향)와 북부(증가경향)의 변화가 뚜렷하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 특히 한강 남서부지역의 경우 6개의 유역(충주댐: 1003, 섬강: 1006, 남한강하류: 1007, 홍천강: 1014, 한강서울: 1018, 한강하류: 1024)에서 10% 유의수준에서 통계적으로 유의한 감소패턴이 분석되었다(한강 전체면적의 26.0%). Fig. 5b는 저유량의 발생시기에 대한 경향성 분석결과를 나타내고 있으며 한강중상류에서는 감소경향(발생시기 빨라짐), 한강 남서부에서는 증가경향(발생시기 늦어짐)이 확인되었다. 특히 한강 남동부지역(충주댐: 1003, 달천: 1004, 충주댐하류: 1005)과 동부지역인 인북천유역(1011)에서 통계적으로 유의한 감소패턴이 분석되었다(한강 전체유역의 19.0%). Table 3은 Fig. 4와 Fig. 5에 나타난 Mann-Kendall 분석에 대한 상세한 통계적 결과를 보여주고 있다.

3.3 해수면 온도에 따른 엘니뇨 진화패턴의 변화

Fig. 6은 엘니뇨가 발달하는 12월에서 2월 사이 해수면의 온도에 대한 CA값을 나타내고 있다. CT El Niño해의 경우, 평년보다 높은 해수면 온도(positive anomaly)가 중앙태평양과 동태평양지역에 발생하며 평년보다 낮은 해수면 온도(negative anomaly)는 서태평양지역 전체에 걸

쳐 발생하고 있음을 확인할 수 있다(Fig. 6a).

CT El Niño가 진화함에 따라 양의 해수면온도패턴은 위도상으로, 음의 해수면온도패턴은 동쪽으로 확장한다. 비정상적인 해수면 온도의 상승(Warm SSTA: sea surface temperature anomalies) 패턴은 가을과 겨울에 최대의 진폭에 도달하게 되며, 여름철 쇠퇴기에 Warm SSTA 패턴은 사라지고 동태평양 지역에서 상대적으로 낮은 온도의 SSTA 패턴이 이를 대체하게 된다. 그러나 WP El Niño의 진화패턴은 CT El Niño와 확연한 차이를 보인다(Fig. 6b).

WP El Niño 해에는 봄에 서태평양지역에서 약한 양의 SSTA가 먼저 나타나며, 이들 패턴은 여름철에 중앙태평양 방향으로 이동한다. 또한 같은 시기에 동태평양과 서태평양지역에서 평년보다 낮은 해수면 온도가 관측된다. Warm SSTA 패턴은 중앙태평양의 중심에 위치하고 있으며 가을동안 Warm SSTA가 강해지면서 동쪽으로 확장한다. 겨울에는 양의 SSTA 패턴이 보다 강해지며 봄이 되면서 WP El Niño는 쇠퇴하여 사라지게 된다.

CT El Niño와 WP El Niño의 주요 특징을 정리하면 다음과 같다. 첫째, CT El Niño 해에는 Warm SSTA 패턴이 주로 동태평양지역에 위치하고 있으나 WP El Niño의 경우는 중앙태평양지역에 있다. 둘째, WP El Niño시기에는 SSTA 패턴이 CT El Niño해보다 급격하게 빨리 쇠퇴하는 경향이 있다. 셋째, SSTA 패턴은 WP El Niño보다 CT El Niño 시기에 더 높게 나타난다. 이상으로 CT/WP El Niño에 대한 진화패턴에 대해서 간단히 살펴보았으나, 본 연구에서는 두 패턴에 대한 물리적 메커니즘을 밝히기 보다는 CT/WP El Niño 변화에 따라 수문학적 유출이 지역적으로 어떤 다른 양상이 발생하는가를 분석하고자 하며, CT/WP El Niño 패턴에 대한 자세한 설명은 Kug et al. (2009)과 Feng et al. (2010)을 참고할 수 있다. 이러한

Table 3. Trend in Annual Maximum Flow (AMF) and 7-day Low Flow Based on the Mann-Kendall Test (M-K) for the Han River Basin during the Period 1966–2007

ID	AMF		7-day Lowflow		Significant level ($\alpha=0.10$)	
	M-K test		M-K test		AMF	7-day Lowflow
	Tau	<i>p</i> -value	Tau	<i>p</i> -value		
1001	0.10	0.35	0.01	0.96	△	△
1002	0.09	0.39	-0.14	0.20	△	▽
1003	0.15	0.16	-0.26	0.02	△	▼
1004	0.34	0.00	-0.04	0.73	▲	▼
1005	0.22	0.04	-0.03	0.80	▲	▽
1006	0.17	0.12	-0.31	0.00	△	▼
1007	0.17	0.11	-0.22	0.04	△	▼
1008	0.32	0.00	-0.16	0.15	▲	▽
1009	0.19	0.08	0.07	0.54	▲	△
1010	0.17	0.11	0.16	0.13	△	△
1011	0.15	0.17	0.12	0.26	△	△
1012	0.11	0.29	-0.16	0.13	△	▽
1013	0.14	0.20	-0.13	0.24	△	▽
1014	0.18	0.09	-0.21	0.06	▲	▼
1015	0.22	0.04	-0.06	0.57	▲	▽
1016	0.18	0.09	-0.15	0.17	▲	▽
1017	0.14	0.19	-0.07	0.55	△	▽
1018	0.18	0.10	-0.38	0.00	▲	▼
1019	0.14	0.20	-0.01	0.91	△	▽
1020	0.20	0.06	0.17	0.12	▲	△
1021	0.22	0.04	0.13	0.23	▲	△
1022	0.23	0.03	0.07	0.53	▲	△
1023	0.13	0.22	0.00	0.99	△	△
1024	0.02	0.87	-0.34	0.00	△	▼

* For each case, trend with $p < 0.10$ was considered as statistically significant (upward trend: ▲, downward trend: ▼)

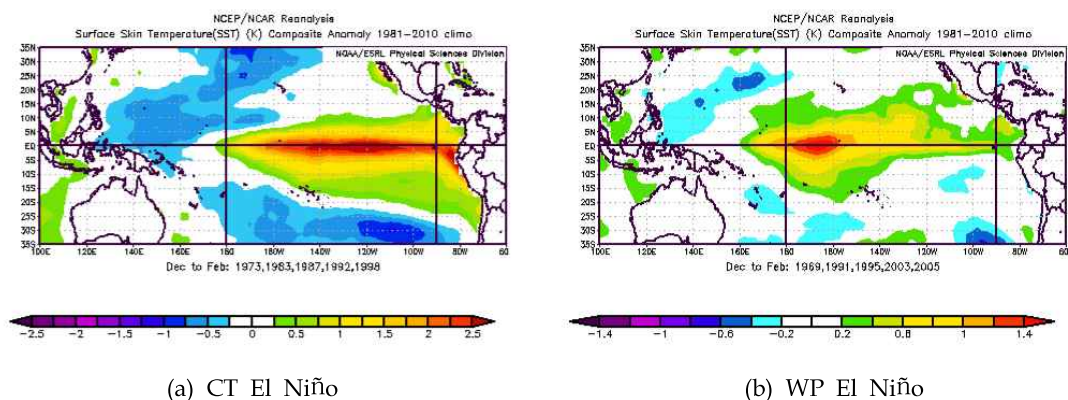


Fig. 6. Composite Sea Surface Temperature Anomalies (SSTA) in the Developing Phases of Two Types of El Niño during December-January. (a) SSTs in CT El Niño Years. (b) SSTs in WP El Niño Years

서로 다른 SSTA 패턴이 대기순환과정에 영향을 미칠 수 있으며 지역적으로 다양한 수문 특성 변화를 보일 것으로 예상된다.

3.4 CT/WP El Niño에 대한 연최대홍수량 및 저유량의 변동성 분석

기상학적 요인들과 극치기후 사상은 하천과 하천 주변에 토사의 유입이나 침전 부유물의 재분포 등 하천의 수문학적 특성을 바꾸어 놓는데 중요한 역할을 한다(Poff and Ward, 1990; Mathews and Richter, 2007). 한강 유역에서 대부분의 극치사상은 6월과 9월 중에 발생하며, 동아시아 몬순기후에 의한 장마전선(또는 Meiyu-Baiu front)과 태풍에 기인한다(Kim et al., 2011).

Fig. 7은 CT/WP El Niño해에 발생한 연최대홍수량의 지역적 분포를 각 중권역 유역별 42개년(1966~2007)의 평균 연최대홍수량과 비교하여 백분위 변화를 나타내고 있다. CT/WP El Niño 동안에 연최대홍수량은 -66.3%에

서 35.7%까지 지역적으로 다양한 변화를 보이고 있으며, 특히 CT El Niño 해(Fig. 7a)에는 한강서부의 일부지역(남한강하류: 1007, 팔당댐: 1017, 한강서울: 1018, 한강하류: 1024)을 제외하면 한강전체 유역의 89.0%가 평년치보다 작게 나타났다. 또한, 7개의 중권역 유역(남한강상류: 1001, 평화의댐: 1009, 인북천: 1011, 소양강: 1012, 고미탄천: 1020, 한탄강: 1022, 임진강하류: 1023)에서 유의수준 10%에서 통계적으로 유의한 감소패턴이 분석되었으며, 이는 한강 전체유역의 35.8%에 해당한다. 이와는 반대로, WP El Niño 해(Fig. 7b)에는 한강중상류에서 증가패턴이 많이 발생하고 있다. 그러나 청평댐(1015) 유역에서만 통계적으로 유의한 결과를 나타내고 있고 한강남부 지역에서는 평년보다 감소하는 특징을 보이고 있다.

Fig. 8은 Fig. 7과 동일하지만 연최대유출량 대신에 저유량의 변화를 나타내고 있다. CT El Niño (Fig. 8a) 기간의 저유량의 변화는 Fig. 7a에 나타난 연최대유출과 반대의 양상을 보이고 있다. 한강 24개 중권역 유역 전체에서

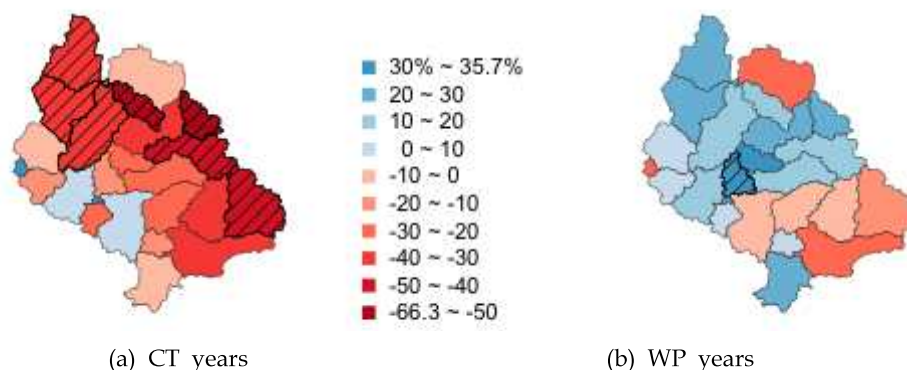


Fig. 7. Percentage Changes in Composite Anomalies (departure from the 1966~2007 normals) of Annual Maximum Flow (AMF) for the Han River Basin during, (a) CT El Niño and (b) WP El Niño Years. The Hatched Polygons Represent Statistically Significant at the 90% of Confidence Level

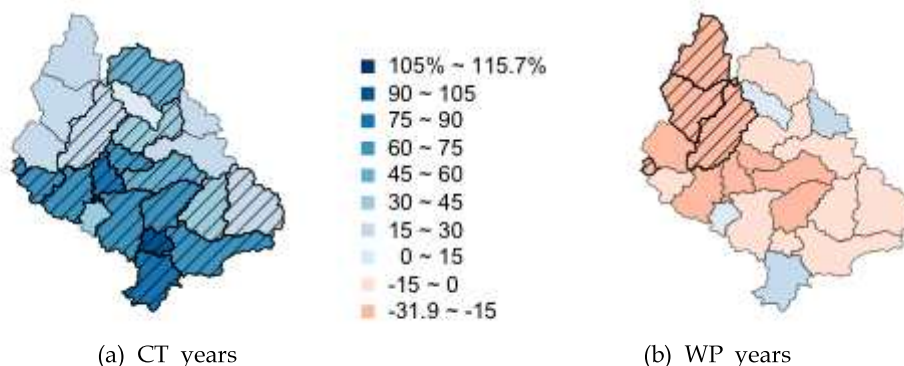


Fig. 8. Percentage Changes in Composite Anomalies (departure from the 1966~2007 normals) of Annual 7-day Low Flow (AMF) for the Han River Basin during (a) CT El Niño and (b) WP El Niño Years. The Hatched Polygons Represent Statistically Significant at the 90% of Confidence Level

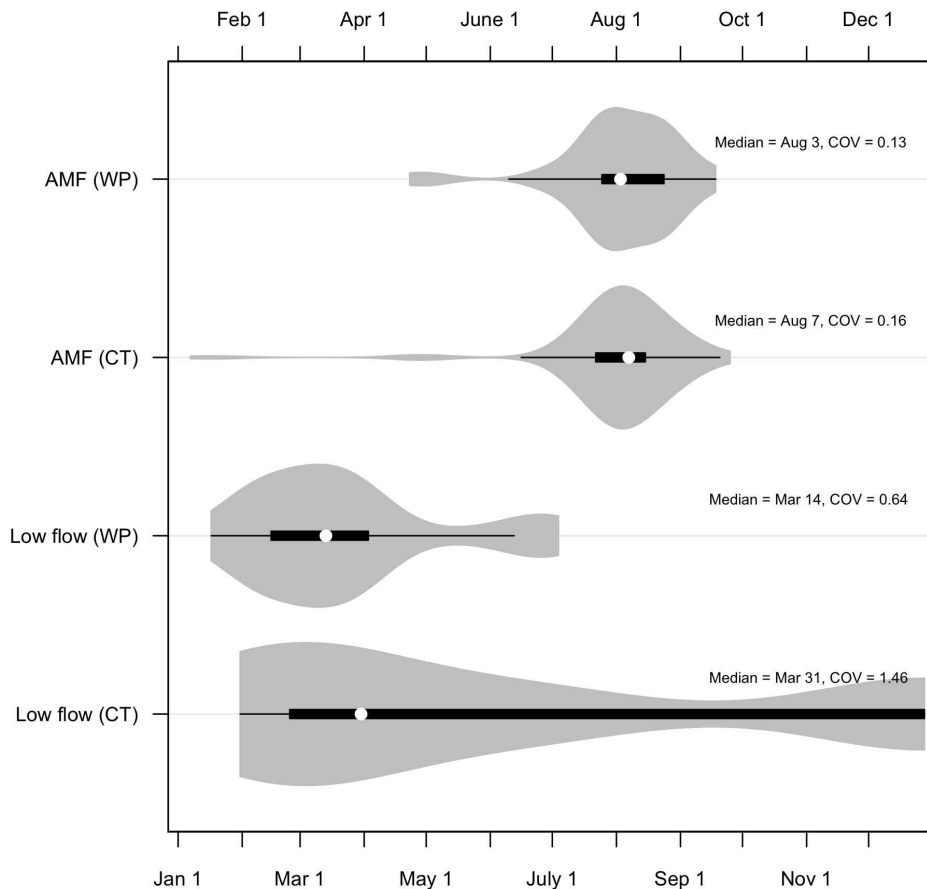


Fig. 9. Empirical Probability Distribution: Occurrence Dates of Annual Maximum Flow (AMF) and 7-day Low Flow for 24 Sub-watersheds in the Han River Basin during CT/WP El Niño Years. COV Represents the Coefficient of Variation (the ratio of standard deviation to mean)

양의 패턴이 확인되고 있으며, 전체 유역의 72.7%에서 통계적으로 유의한 증가값을 나타내고 있다. 그러나 WP El Niño (Fig. 8b) 기간에는 4개 유역(달천: 1004, 평화의담: 1009, 인북천: 1011, 경안천: 1016)을 제외하면 전체적으로 약한 감소 경향을 나타내고 있다. 한강 전체유역의 20.0% 유역에서(고미탄천: 1020, 임진강상류: 1021, 한탄강: 1022, 한강하류: 1024)에서 10% 유의수준에서 통계적으로 유의한 감소패턴이 발생하고 있다.

Fig. 9에서는 한강 24개 중권역 유역에 대한 CT/WP El Niño에 따른 연최대홍수량과 저유량의 발생시점의 변화를 Violin plot으로 나타내고 있다. 연최대유출의 발생시점의 변화는 CT/WP El Niño 두 기간과 큰 변화를 보이지 않고 있으나 WP El Niño (Median: 8월 3일, COV: 0.13) 기간이 CT El Niño 기간(Median: 8월 7일, COV: 0.16)보다 약간 빠르게 발생하는 것으로 분석되었다. 저유량의 발생시점은 WP El Niño (Median: 3월 14일, COV: 0.64)가 발생한 기간이 CT El Niño (Median: 3월 31일, COV: 1.46)가 발

생한 기간보다 평균적으로 약 17일 정도 빠른 것으로 분석되었으며, 두 가지 패턴 모두 연최대치유출의 발생시점의 변화보다 변동성이 큰 것으로 나타났다.

4. 요약 및 결론

전 지구적 기후체계의 상호작용과 변화의 결과는 다양한 형태로 수문현상의 변동을 야기시키는 요인으로 작용하고 있으며, 단기적인 측면에서는 기상(weather)과 장기적인 측면에서는 기후(climate) 현상과 밀접한 상관성이 있다. 본 연구에서는 대기 순환패턴 및 수문 환경변화에 영향을 미치는 주요인자인 ENSO의 서로 다른 패턴 변화에 따른 연최대홍수량과 저유량의 정량적 변화 및 발생시점의 변화 특성을 분석하였다. 서로 다른 형태의 CT/WP El Niño가 한강유역 수자원에 미치는 영향을 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 한강유역의 연최대유출의 발생시기는 6월 26일~10

월 12일 사이이며, 42년 관측기간의 연최대유출의 중앙치는 7월 31일로, 변동성(COV)은 0.11로 분석되었다. 또한 저유량의 경우 1~3월 사이에서 발생하고 중앙치의 발생시점은 2월 27일이며, 상대적으로 변동성(COV: 1.09)이 큰 것으로 분석되었다.

- 연최대유출의 경향분석결과, 유역면적의 48.3%가 통계적으로 유의한 증가패턴을 보였으며, 발생시기는 한강 서부유역에서 증가경향(늦어짐)이 있고 동부유역에서 감소경향(빨라짐)이 있음을 확인하였다. 또한 7월 저유량의 경우 한강 전체면적의 26.0%가 통계적으로 유의한 감소경향을 보였으며, 저유량의 발생시기는 한강중상류 유역에서 감소경향(빨라짐)이 있음을 확인하였다.
- WP El Niño 시기에는 CT El Niño 시기보다 연최대유출이 다소 빠르게 발생하고 변동성은 0.03정도 작게 분석되었으며, CT El Niño 시기에 한강전체 유역의 89.0%가 평년치보다 작게 나타났으며 35.8%가 통계적으로 유의한 감소 경향을 보였다. 또한 7월 저유량의 발생시점은 WP El Niño 시기가 CT El Niño 시기보다 평균적으로 약 17일 정도 빠르며, CT El Niño기간에 저유량은 전체 유역의 72.7%에서 통계적으로 유의한 증가값을 보이며 WP El Niño기간에는 전체 유역의 20.0%에서 통계적으로 유의한 감소패턴을 보이는 것으로 분석되었다.

본 연구의 결과는 상대적으로 짧은 관측 자료와 제한된 조건에 의존하고 있지만, 서로 다른 형태의 El Niño가 한강유역 수자원의 양적 변화와 발생시점의 변화에 민감하게 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 향후 한강유역과 같이 수자원의 계절적 변동과 불확실성이 큰 유역에서 가뭄 및 홍수 등의 자연 재해를 포함한 수자원의 효율적인 예측과 관리, 안정적인 용수공급을 위해 기상인자에 대한 이해와 수문변량간의 상관관계규명에 대한 연구가 절실히 필요할 것으로 사료되며, 댐연계운영 등을 고려하여 기후 및 환경의 변화에 따른 합리적인 수자원 적응전략시스템 구축이 요구된다.

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 지원

으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 강인식 (1998). “엘니뇨와 한반도 기후변동의 관련성.” **한국기상학회논문집**, 한국기상학회, 제34권, 제3호, pp. 390-396.
- 권현한, 문영일 (2005). “Niño3.4 지역 SST 및 여름강수량의 독립성분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제12호, pp. 985-994.
- 신현석, 안재현, 윤용남 (1999). “엘니뇨와 우리나라 강수량의 시·공간적 상관관계 분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제19권, 제2-1호, pp. 1-12.
- 윤진희, 예상욱 (2009). “서로 다른 두 유형의 엘니뇨와 동아시아 인근 해역 표층 온도 상관성 연구.” *Ocean and Polar Research*, 제31권, 제1호, pp. 1-61.
- 차은정, 전종갑, 정효상 (1999). “엘니뇨/라니냐 해의 우리나라 기후특성에 관한연구.” **한국기상학회논문집**, 한국기상학회, 제35권, 제2호, pp. 272-282.
- 추현재, 김태웅, 이정규, 이재홍 (2007). “ENSO와 한국의 수문변량들간의 계절적 관계 분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제4호, pp. 299-311.
- Ashok, K., and Yamagata, T. (2009). “Climate Change: The El Niño with a difference.” *Nature*, Vol. 461, pp. 481-484.
- Ashok, K., Behera, S.K., Rao, S.A., Weng, H., and Yamagata, T. (2007). “El Niño Modoki and its possible teleconnection.” *Journal of Geophysical Research* Vol. 112, C11007, doi:10.1029/2006 JC003798.
- Becker, R.A., Chambers, J.M., and Wilks, A.R. (1988). “The New S Language: a programming environment for data analysis and graphics.” Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software Monterey, CA, USA.
- Dressler, K.A., Leavesley, G.H., Bales, R.C., and Fassnacht, S.R. (2006). “Evaluation of girded snow water equivalent and satellite snow cover products for mountain basins in a hydrologic model.” *Hydrological Processes*, Vol. 20, pp. 673-688.
- Feng, J., Chen, W., Tam, C.Y., and Zhou, W. (2011). “Different impacts of El Niño and El Niño Modoki on China rainfall in the decaying phases.” *International Journal of Climatology*, Vol. 31, pp. 2091-2101.
- Gershunov, A., Barnett, T.B., and Cayan, D.R. (1999).

- “North Pacific Interdecadal Oscillation Seen as Factor in ENSO-related North American Climate Anomalies.” *Eos. Transactions. American Geophysical Union*, Vol. 80, No. 3, pp. 25.
- Helsel, D.R., and Hirsch, R.M. (1992). “Statistical Methods in Water Resources.” *Elsevier*, Amsterdam.
- Hintze, J.L., and Nelson, R.D. (1998). “Violin Plots: A Box Plot-Density Trace Synergism.” *The American Statistician*, Vol. 52 No. 2, pp. 181-184.
- 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.
- Kendall, K. (1975). “Thin-film peeling—the elastic term.” *J. Phys.*, Vol. 8, pp. 1449-1452.
- Kim, J.S., Jain, S., and Moon, Y.L. (2011). “Atmospheric teleconnection-based conditional streamflow distributions for the Han River and its sub-watersheds in Korea.” *International Journal of Climatology*, Vol. 32, pp. 1466-1474.
- 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*, Vol. 32, No. 4, pp. 635-640.
- 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.
- Leavesley, G.H., Lichty, R.W., Troutman, B.M., and Saindon, L.G. (1983). “Precipitation-Runoff Modelling System, User’s manual.” *Water Resources Investigations: 83-4238*. US Geological Survey: Reston, VA.
- Lee, T., and McPhaden, M.J. (2010). “Increasing intensity of El Niño in the central-equatorial Pacific.” *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 37, L14603, doi:10.1029/2010 GL044007.
- Mann, H.B. (1945). “Non-Parametric tests against trend.” *Econometrica*, Vol. 13, pp. 245-259.
- Mathews, R., and Richter, B.D. (2007). “Application of the indicators of hydrologic alteration software in environmental flow setting.” *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 43, pp. 1400-1413.
- 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.
- 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.
- Newman, A.V., Hayes, G., Wei, Y., and Convers, J. (2011). “The 5 October 2010 Mentawai tsunami earthquake, from real-time discriminants, finite fault rupture, and tsunami excitation.” *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 38, L05302, doi:10.1029/2010GL046498.
- NOAA (national weather service climate prediction center) (2012). URL: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/> accessed January 2012.
- Piechota, T.C., and Dracup, J.A. (1996). “Drought and regional hydrologic variation in the United States: Associations with the El Niño-Southern oscillation.” *Water Resources Research*, Vol. 32, No. 5, pp. 1359-1373.
- Piechota, T.C., Chiew Francis, H.S., Dracup, J.A., and McMachon, T.A. (1998). “Seasonal streamflow forecasting in eastern Australia and the El Niño-Southern Oscillation.” *Water Resources Research*, Vol. 34, No. 11, pp. 3035-3044.
- 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*, Vol. 116, D18108, doi:10.1029/2011JD015666.
- Poff, N.L., and Ward, J.V. (1989). “Implications of stream-flow variability and predictability for lotic community structure: a regional analysis of streamflow patterns.” *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 46, pp. 1805-1818.
- Poff, N.L., and Ward, J.V. (1990). “The physical habitat template of lotic systems: recovery in the context of historical pattern of spatio-temporal heterogeneity.” *Environmental Management*, Vol. 14, pp. 629-646.
- 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*, Vol. 108, 4407, 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.
- Richer, B.D., Baumgartner, J.V., Powell, J., and Braun, D.P. (1996). “A Method for assessing hydrologic alteration within ecosystems.” *Conservation Biology*, Vol. 10, No. 4, pp. 1163-1174.
- Ripley, B.D. (1987). “*Stochastic Simulation*.” John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA.
- Schonher, T., and Nicholson, S.E. (1989). “The Relationship between California Rainfall and ENSO Events.” *Journal of Climate*, Vol. 2, pp. 1258-1269.
- Trenberth K.E. (1997). “The Definition of El Niño.” *National Center for Atmospheric Research, Bulletin of the American Meteorological Society*, pp. 2771-2777.
- UNESCO (2011). URL: <http://www.unesco.org/water/news/newsletter/225.shtml>/accessed 28 March 2011.
- WAMIS (water management information system)(2012). URL: <http://wamis.go.kr/eng/>. accessed January 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.

논문번호: 12-028	접수: 2012.03.14
수정일자: 2012.06.14/07.05	심사완료: 2012.07.05