

## 열대 태평양 SSTA 패턴 변화에 따른 우리나라 여름철 수문 변동 분석

윤선권\* · 김종석\*\* · 이태삼\*\*\* · 문영일\*\*\*\*

Yoon, Sun-kwon\*, Kim, Jong-Suk\*\*, Lee, Tae-Sam\*\*\*, Moon, Young-IL\*\*\*\*

## Warm Season Hydro-Meteorological Variability in South Korea Due to SSTA Pattern Changes in the Tropical Pacific Ocean Region

### ABSTRACT

In this study, we analyzed the effects of regional hydrologic variability during warm season (June-September) in South Korea due to ENSO (El Niño-Southern Oscillation) pattern changes over the Tropical Pacific Ocean (TPO). We performed composite analysis (CA) and statistical significance test by Student's *t*-test using observed hydrologic data (such as, precipitation and streamflow) in the 113 sub-watershed areas over the 5-Major River basin, in South Korea. As a result of this study, during the warm-pool (WP) El Niño year shows a significant increasing tendency than normal years. Particularly, during the cold-tongue (CT) El Niño decaying years clearly decreasing tendency compared to the normal years was appeared. In addition, the La Niña years tended to show a slightly increasing tendency and maintain the average year state. In addition, from the result of scatter plot of the percentage anomaly of hydrologic variables during warm season, it is possible to identify the linear increasing tendency. Also the center of the scatter plot shows during the WP El Niño year (+17.93%, +26.99%), the CT El Niño year (-8.20%, -15.73%), and the La Niña year (+8.89%, +15.85%), respectively. This result shows a methodology of the tele-connection based long-range water resources prediction for reducing climate forecasting uncertainty, when occurs the abnormal SSTA (such as, El Niño and La Niña) phenomenon in the TPO region. Furthermore, it can be a useful data for water managers and end-users to support long-range water-related policy making.

**Key words :** Tropical pacific ocean (TPO), Sea surface temperature anomaly (SSTA), El niño-southern oscillation (ENSO), Hydrologic variability

### 초록

본 연구는 열대 태평양지역 ENSO (El Niño-Southern Oscillation) 패턴 변화에 따른 우리나라 여름철(June-September, JJAS) 지역 수문변동 영향 분석을 위하여, 우리나라 5대강 113개 중권역의 강수량과 유출량 자료를 대상으로 합성편차 분석(Composit Analysis, CA)과 Student's *t*-test에 의한 유의성 검정을 실시하였다. 분석 결과, 유역별로 다소 차이는 있으나 전반적으로 WP (Warm-Pool) El Niño 해에는 평년에 비하여 강수량과 유출량의 증가 특성이 뚜렷이 나타났으며, CT (Cold-Tongue) El Niño 해에는 주로 감소하는 경향이, La Niña 해에는 다소 증가 또는 평년 상태를 유지하는 것을 분석되었다. 또한 백분위 기후값 편차의 산포도분석 결과 여름철 강수량의 증가/감소에 따른 유출량 증감의 선형적 분포특성을 확인할 수 있었으며, 산포도의 중심은 WP El Niño 해에는 +17.93%, +26.99%, CT El Niño 해에는 -8.20%, -15.73%, 그리고 La Niña 해에는 +8.89%, +15.85%로 분석되었다. 본 연구의 결과는 El Niño La Niña 등 열대 태평양 지역 기후현상이 뚜렷한 시기의 우리나라 수 자원 장기예측의 불확실성을 줄여 주어 유역차원의 안정적인 중장기 물공급 전망 등 수방정책지원을 위한 참고자료로 활용이 가능할 것이다.

**검색어 :** 열대 태평양, 해수면 온도, El Niño-Southern Oscillation (ENSO), 수문변동

\* 중신회원 · 교신저자 · APEC 기후센터 연구본부 기후변화연구팀 선임연구원

(Corresponding Author · Climate Research Department, APEC Climate Center · skyoon@apcc21.org)

\*\* 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 연구교수 (Department of Civil Engineering, The University of Seoul · jongsuk@uos.ac.kr)

\*\*\* 경상대학교 공과대학 토목공학과 부교수 (Department of Civil Engineering, Gyeongsang National University · tae3lee@gnu.ac.kr)

\*\*\*\* 중신회원 · 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 교수, 도시홍수연구소 소장 (Department of Civil Engineering, The University of Seoul · ymoon@uos.ac.kr)

Received March 11, 2015/ revised September 4, 2015/ accepted September 8, 2015

## 1. 서론

전 지구적 기후특성 변화는 수자원의 지역적 변동특성과 밀접한 관련이 있으며, 극한기후사상 유발의 원인이 된다(Horel and Wallace, 1981; Wang et al., 2000; Pizarro and Lall, 2002; Yoon et al., 2013a). 최근 인간 활동에 따른 이산화탄소 증가는 지구기온의 증가와 더불어 기후 시스템 불균형으로 극한기후특성 변화를 유발하고 있으며, 그 발생 빈도와 강도가 점차 증가할 것으로 예상하고 있다(IPCC, 2007; KMA, 2012; Yoon et al., 2014; Lee and Jeong, 2014). 또한 수자원의 효율적인 예측 및 관리를 위해서 기후인자와 수문자료간의 관계를 규명하는 일이 매우 중요하다(Pizarro and Lall, 2002; Kim et al., 2012a; Yoon et al., 2013b). 이러한 지역적 수문 변동영향은 독립적으로 발생하기보다 수문순환과정에서 나타나는 상관성에 기초하며, 유역의 수문특성 변화를 야기 시키는 원인으로는 열대 태평양 지역의 El Niño, La Niña 현상 등 비정상적인 해수면 온도(Sea Surface Temperature, SST) 변화를 들 수 있다(Piechota and Dracup, 1996; Piechota et al., 1998; Yoon, 2013).

최근 연구에 의하면 지구온난화 및 기후변화의 영향으로 열대 태평양 지역의 해수면 온도편차(Sea Surface Temperature Anomaly, SSTA)의 상승과 하강의 전형적인 패턴이 변화하고 있으며, 이러한 대규모 해양환경의 변화는 전 지구적 수문순환 시스템에 영향을 미칠 수 있어 이에 대한 연구가 지속적으로 수행될 필요성이 있음을 시사하고 있다(Weng et al., 2007; Kao and Yu, 2009; Yeh et al., 2009; Na et al., 2011). 1970년대 후반을 전후로 El Niño의 주기와 강도의 변화뿐 아니라 El Niño의 발생 위치가 변화되고 있으며, 지구온난화는 El Niño 현상의 변화를 가속시키는 요인으로 작용하고 있다(Ashok and Yamagata, 2009). 특히 중앙태평양(Central Pacific, CP)의 해수면 온도가 이상적으로 상승하는 El Niño Modoki 사상은 최근에 올수록 그 발생빈도가 더 증가하였으며(Ashok et al., 2007; Pradhan et al., 2011), 지구온난화가 계속되는 미래 기후조건에서 중앙태평양 El Niño 사상이 보다 빈번히 발생하여 그 영향이 더욱 커지고 강해질 것이라 전망하고 있다(Yeh et al., 2009). 아직 CP El Niño 발생에 대한 정확한 메커니즘 분석은 이루어지지 않았으나 동북아시아를 비롯한 우리나라에 영향을 미치고 있을 가능성이 크다. 대표적으로 새로운 형태의 El Niño 구분에 대한 분석은 Kug et al. (2009)의 연구를 들 수 있으며, Niño3와 Niño4 지역의 해수면 온도 관측자료의 전이 메커니즘(transition mechanism)를 바탕으로 서로 다른 형태의 El Niño를 구분한 바 있다. 또한 Feng et al. (2010)은 Niño3와 El Niño Modoki Index (EMI)를 이용하여 중국의 봄철과 여름철 강수량 변화 특성을 분석하였으며, Ren and Jin (2011)은 Kug

et al. (2009)의 해수면 온도 관측자료의 구분 방법을 바탕으로 Cold-Tongue (CT) 형태의 El Niño와 Warm-Pool (WP) 형태의 El Niño로 구분하였으며, 지체상관(lagged-correlations) 분석을 이용하여 기존의 Niño3, Niño4의 ENSO자료와의 상관성을 분석하였다.

우리나라 대상 ENSO와 수문기상인자의 원격상관 연구는 다음과 같다. Kang (1998)은 El Niño가 발생한 겨울에 우리나라 겨울철 기온이 평년 이상의 분포를 보이고 그 다음해 여름철 강수량이 증가함을 제시하였으며, Cha et al. (1999)은 El Niño/La Niña 해의 우리나라 기후 특성에 관한 연구를 통하여 El Niño가 발생한 여름에는 북태평양 고기압의 발달이 늦어지고 위치도 남하하기 때문에 우리나라에는 저온이 나타나고 장마 역시 늦게 시작됨을 밝혔다. 또한, Moon et al. (2005)은 Wavelet 분석과 독립성분 분석을 통한 저빈도 분석으로 필리핀과 호주 연안의 3개월 SST를 이용한 우리나라의 계절 강우량 예측 가능성을 진단하였으며, Yoon and Yeh (2009)는 1950~2007년 동안의 Niño3와 Niño4 해수면 온도 지수를 이용하여 최대 표층 수온 편차가 열대 동태평양에서 나타나는 경우를 the eastern Pacific (EP) El Niño로, 중앙태평양에서 나타나는 경우를 the central Pacific (CP) El Niño로 정의하였으며, 1990년 이후에 CP-El Niño의 발생 빈도가 증가하였고 여름철 열대 동태평양 지역의 높은 표층수온의 선형 경향성과 밀접한 상관성이 있음을 밝혔다. 또한, Oh and Moon (2010)은 우리나라의 61개 기상관측지점의 강수량 자료와 해수면 온도 자료를 통하여 군집분석과 주성분 분석을 통한 상관성 분석을 실시하였으며, 지역기중 다항식을 이용한 해수면 온도 관측에 따른 우리나라의 3개월 정량적 강우량 예측 가능성을 분석하였다. Kug et al. (2010)은 두 가지 형태의 El Niño 사상과 우리나라의 기후변동에 관한 통계적 분석결과 El Niño 발달기에 CT El Niño해에는 우리나라 대부분 지역에서 차가운 기후특성이 있으며, WP El Niño해에는 따뜻한 기후특성이 있음을 제시한 바 있다. Kim et al. (2012b)은 El Niño Modoki일 때 우리나라 여름철 계절 강수량과 최대 강수량 그리고 중호우사상의 뚜렷한 증가경향을 밝힌 바 있으며, Yoon et al. (2013a)은 전형적인 El Niño와 El Niño Modoki를 구분하여 서로 다른 형태의 El Niño에 따른 한강유역의 여름철 강수량과 극치강수의 변동특성을 분석하여 El Niño Modoki일 때 한강유역의 여름철 강수량과 극치강수의 증가 특성이 있음을 밝혔고, Son et al. (2014)은 3가지 중앙태평양 El Niño의 진화패턴에 따른 우리나라 영향 태풍에 의한 강수량의 지역적 변동특성을 분석하였다.

본 연구에서는 Kug et al. (2009)과 Ren and Jin (2011)의 연구결과를 바탕으로 CT/WP El Niño 해, 그리고 La Niña 해를 구분하였으며, El Niño와 La Niña 현상이 동아시아지역에 위치한 우리나라의 여름철(June-September, JJAS) 수문변동에 미치는

영향을 분석하였다. 본 연구는 열대 태평양지역의 전 지구적 해수면 온도 패턴변화와 우리나라 수자원의 원격상관규명에 초점을 맞추었으며, 기후지수에 의한 우리나라 지역 수문변동의 장기예측 가능성 진단에 그 의미가 있다. 세부 연구방법 및 범위를 살펴보면, 먼저 Niño3와 Niño4 지수를 통한 강한 CT/WP El Niño해의 구분을 시도하였으며, 우리나라 5대강 유역별 113개 중권역에 대하여, 강수량과 유출량의 30년 평년값과의 합성편차(composite anomaly, CA) 분석을 실시하였다. 그리고 대규모 해수면 온도 패턴 변화와 관련한 우리나라 중권역별 강수특성 변화와 유출특성 변화의 수문학적 연관관계를 분석하였고 Student's *t*-test에 의한 유의성 검정을 실시하였다.

## 2. 대상유역 및 자료

### 2.1 대상유역

본 연구에서는 우리나라 5대강(한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강) 유역을 연구대상으로 하였다. Fig. 1은 우리나라의 5대강 유역을 구분하여 나타내었으며, 연평균 강수량 대비 여름철 강수량을 구분하여 함께 도시하였다. 과거 1966~2011년까지 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS, www.wamis.go.kr)의 통계자료에 의하면, 우리나라의 권역별 인구 분포는 한강유역에 51.3%가 집중하여 분포하며, 낙동강 유역 28.2%, 금강유역 12.5%, 섬진강유역 2.7%, 영산강유역 5.2%가 존재하는 것으로 나타났다. 또한 5대강 유역의 전체 홍수 피해액 대비 유역별 홍수피해 규모는 한강 유역의 경우 37.0%로 가장 많으며, 낙동강유역 34.6%, 금강유역 16.1%, 섬진강유역 6.3%, 그리고 영산강유역 5.9%에 해당하는 것으로

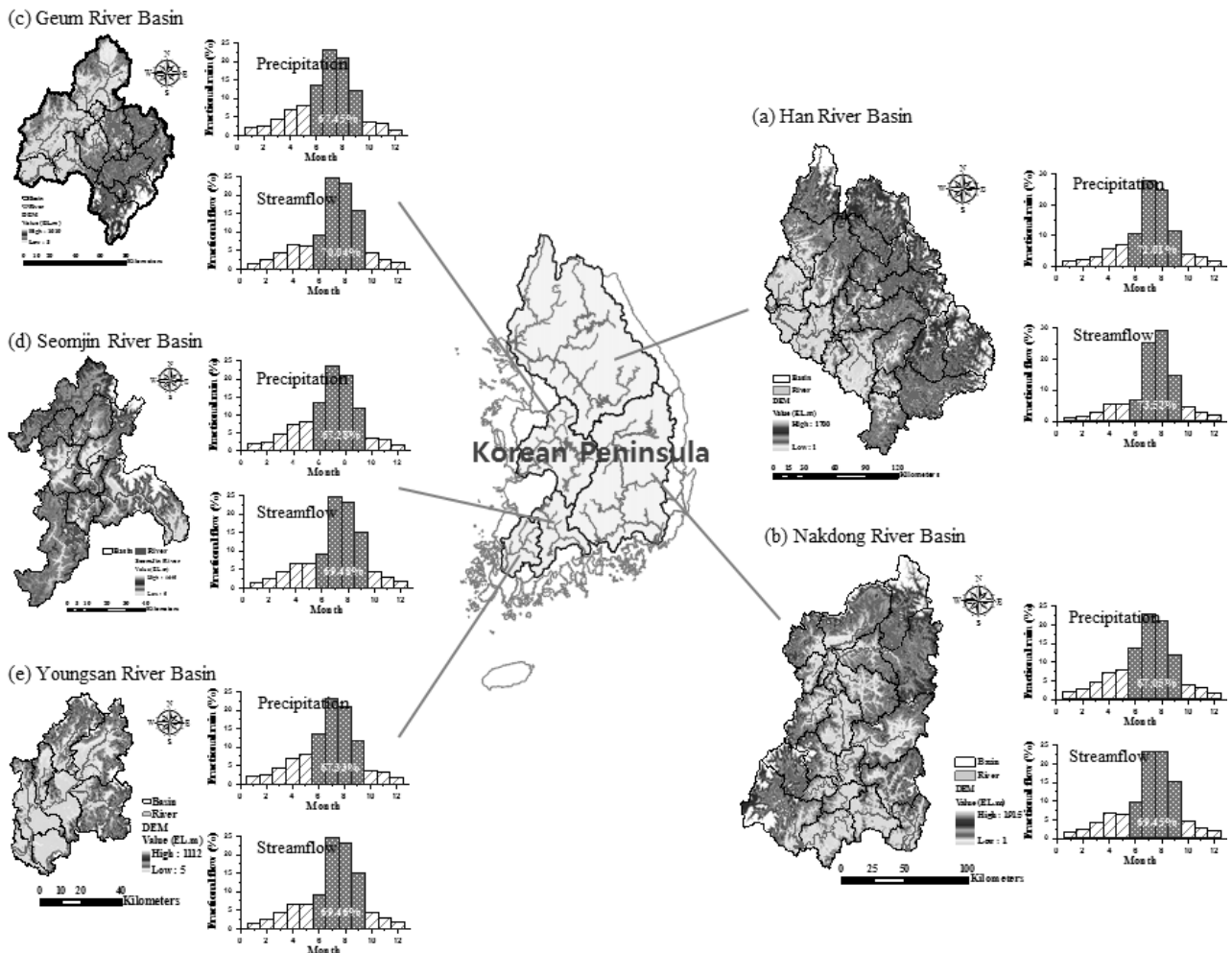


Fig. 1. The Location of Study Areas and Monthly Distribution of Rain and Streamflow During JJAS Season in South Korea. (a) to (e) are the Han River Basin, the Nakdong River Basin, the Geum River Basin, the Seomjin River Basin, and the Youngsan River Basin, and its Sub-Watersheds, Respectively

나타났다. 또한, 5대강 유역별 수문특성(유역면적, 강수량 등)을 살펴보면 다음과 같다. 한강유역은 총 30개의 중권역으로 구성되어 있으며, 유역면적은 38,421.8 km<sup>2</sup>, 연평균 강수량은 1,259.4 mm이고, 이중 여름철강수량은 894.2 mm (71.0%)에 해당하는 것으로 분석되었다. 또한 낙동강유역은 총 33개의 중권역으로 구성되어 있으며, 유역면적은 31,712.0 km<sup>2</sup>, 연평균 강수량은 1,238.6 mm이고, 이중 여름철 강수량은 808.8 mm (65.3%)이다. 다음으로 금강 유역은 총 21개의 중권역으로 구성되어 있으며, 유역면적은 17,537 km<sup>2</sup>이고, 연평균 강수량은 1,224.6 mm로 5대강 유역 중 가장 적으며, 이중 여름철 강수량은 815.6 mm (66.6%)에 해당한다. 또한 섬진강유역은 총 15개의 중권역으로 구성되어 있으며, 유역면적은 8,299.1 km<sup>2</sup>이고, 연평균 강수량은 1,437.3 mm로 5대강 유역 중 가장 많은 강수가 내리며, 이중 여름철 강수량은 929.9 mm (64.7%)이다. 영산강유역은 총 14개의 중권역으로 구성되어 있으며, 유역면적은 7,598.7 km<sup>2</sup>로 5대강 유역 중 가장 작은 유역에 해당하며, 연평균 강수량은 1,296.7 mm이며, 이중 여름철 강수량은 820.8 mm (63.3%) 이다.

## 2.2 대상 자료

### 2.2.1 열대 태평양 해수면 온도 자료

현재 세계의 대가해양 지수들은 미국의 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)을 중심으로 호주의 Bureau of Meteorology Research Centre, 영국의 The Royal Meteorological Society 등이 대서양과 태평양, 인도양의 해수면 온도, 해수면 압력(Sea Level Pressure, SLP), 해수면 풍향(Sea Surface Wind: SLW) 등 대기와 해양의 많은 수문인자들을 월별 기준으로 점검하고 있다. NOAA에서 제공하는 월별 자료들은 Niño1+2, Niño3, Niño3.4, Niño4, Ship track1, 그리고 Ship track6의 6개 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 곳으로 알려진 바 있다 (Trenberth, 1997). 본 연구에서는 유역단위 수문변량의 다양성과 대규모 대기순환패턴과의 관계를 규명하기 위하여 Hadley Centre's의 해수면 온도 관측자료를 이용하였으며, HadISST 자료

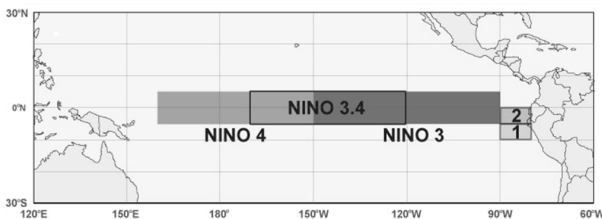


Fig. 2. Map of NINO Regions (Source: <http://www.bom.gov.au/>)

는 1° × 1°의 공간해상도를 갖고 매월 갱신이 되고 있으며 다음의 홈페이지(URL, <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>)에서 다운로드가 가능하다. Fig. 2는 열대 태평양 지역의 해수면 온도 감시구역을 나타내고 있다.

### 2.2.2 전 지구 강수량 관측자료

전 지구 강수량 관측 자료는 미국해양대기청(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 GPCP (Global Precipitation Climatology Project) 자료(URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/composites/printpage.pl>)를 사용하였다.

### 2.2.3 우리나라 수문자료

본 연구에서 사용된 유역평균 강수량 자료와 유출량 자료는 1966~2011년의 48개년 자료를 국가수자원관리종합정보시스템에서 다운로드하여 사용하였다. 또한 유역 평균 강수량 자료는 한강유역 총 125개 관측지점을 대상으로 Thiessen polygon 방법에 의하여 산출된 값이다. 유출량 자료의 경우 Precipitation Runoff Modelling System (PRMS)에 의하여 계산된 값이며, 이는 인위적인 댐운영 등에 의한 영향이 제거된 자연 유량이다. PRMS 모형은 전 세계적으로 널리 사용되고 있는 강우-유출모형이며, 미국의 US Geological Survey (USGS)에서 개발된 준분포형 장기유출 모형이다(Leavesley et al. 1983; Dressler et al. 2006). 이러한 유역평균 수문자료는 유역단위 수문량의 변화특성 분석과 중장기 수자원 계획을 세우는데 효과적으로 사용될 수 있다.

## 2.3 연구 방법

서로 다른 형태의 El Niño의 구분 정의와 물리적 메커니즘 규명을 위한 연구는 태평양연안 지역 과학자들에 의하여 현재에도 활발히 진행되고 있다. Kug et al. (2009)의 경우, Niño3와 Niño4 관측자료를 이용하여 정의한 해수면 온도 지수를 바탕으로 중앙태평양 지역의 해수면 온도가 이상적으로 넓게 분포하는 El Niño Modoki와의 상관성을 분석한 바 있다. 또한 Ren and Jin (2011)은 서로 다른 형태의 El Niño를 Niño3와 Niño4 지역 관측자료를 이용하여 CT El Niño와 WP El Niño로 구분하였다. 본 연구에서는 우리나라의 5대강 유역별 113개 중권역을 대상으로 서로 다른 형태의 ENSO가 여름철 강수량과 유출량 변화특성에 어떠한 영향을 미치는지 분석하기 위하여 Niño3와 Niño4 지역의 1950-2013년까지의 64년 동안의 월별 해수면온도 편차 자료를 바탕으로 CT El Niño와 WP El Niño를 구분하여 분석하였다.

CT El Niño와 WP El Niño의 구분은 Ren and Jin (2011)의 방법을 따랐으며, 계산방법은  $N_{CT} = N_3 - \alpha N_4$ , 그리고  $N_{WP} = N_4 - \alpha N_3$

이다. 여기서,  $N_3$ 와  $N_4$ 는 각각 Niño3와 Niño4 지수를 의미하며,  $N_{CT}$ 는 Cold Tongue El Niño를  $N_{WP}$ 는 Warm Pool El Niño를 의미한다. 또한  $\alpha$ 는 ENSO 구분을 위한 보정상수이며,  $N_3 \times N_4 > 0$  일 경우  $\alpha$ 는 2/5, 그렇지 않은 경우  $\alpha$ 는 0이다. Figure 3a는 1950-2013년까지의  $N_3$ 와  $N_{CT}$ 의 시계열 자료를 비교하여 나타낸 결과이며,  $N_3$ 와  $N_{CT}$ 의 상관계수는 0.978로, 표준편차는  $\pm 0.871$ 로 나타났다. 또한 Fig. 3(b)는  $N_4$ 와  $N_{WP}$ 의 지수 산정결과를 비교하여 나타내었으며,  $N_4$ 와  $N_{WP}$ 의 경우 상관계수가 0.865로, 표준편차는  $\pm 0.397$ 로 나타났다.

본 연구에서는 Ren and Jin (2011)이 제안한 방법으로 새롭게 산출해 낸  $N_{CT}$  지수(CT El Niño)와  $N_{WP}$  지수(WP El Niño)가 상호 독립적인가를 분석하기 위하여 산점도를 작성하고 상관계수

와  $R^2$ 를 평가하였다. Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 Niño3와 Niño4의 Anomalies를 비교한 결과 0.770의 상관계수와  $R^2 = 0.593$ 로 분석되어 밀접한 상관관계가 있음을 확인하였으며, 반면에 Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 CT El Niño와 WP El Niño의 Anomalies를 비교한 결과 0.185의 상관계수와  $R^2 = 0.034$ 로 분석되어 두 개의 지수가 서로 독립적임을 확인할 수 있다. 따라서 서로 다른 수문기상자료의 독립성 내에서 수문자료의 특성을 평가하기 위한 자료의 선택은 상관계수가 작게 나타난 CT El Niño와 WP El Niño로 구분하여 가공한  $N_{CT}$ 와  $N_{WP}$  지수를 활용하여도 무방함을 확인하였다.

열대 태평양 지역의 해수면 온도 상승으로 인하여 발생하는 전형적인 El Niño해(CT El Niño)와 중앙태평양 지역의 이상적인 해수면 온도 상승이 발생하는 또 다른 형태의 El Niño해(WP

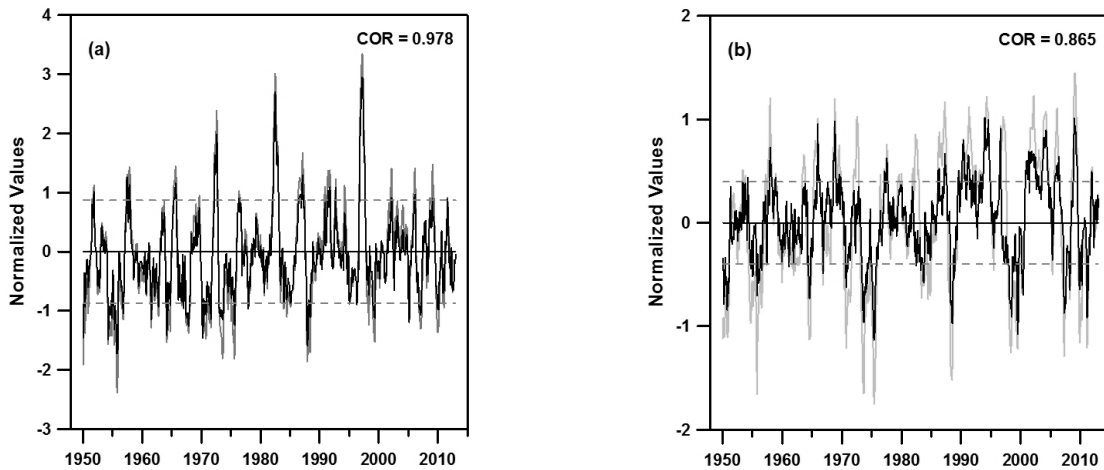


Fig. 3. Normalized Time Series for (a)  $N_3$  (Blue) and  $N_{CT}$  (Black) Indices, and (b) Those of  $N_4$  (Pink) and  $N_{WP}$  (Black) Indices. Dotted Grey Lines Indicate one Standard Deviation for the  $N_{CT}$  and  $N_{WP}$  Indices. The Term COR Denotes the Correlations between the two Lines in Each Panel

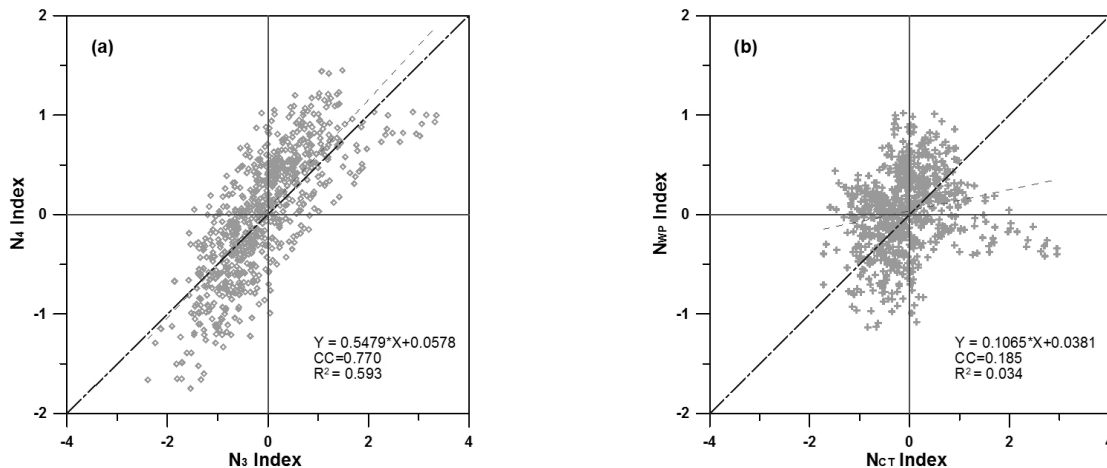


Fig. 4. Scatter Plots for (a)  $N_3$  and  $N_4$  Indices, and (b)  $N_{CT}$  and  $N_{WP}$  Indices. The Term CC Denotes the Correlations between the Two Indices in Each Panel

El Niño)의 구분을 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 방법을 사용하였다. 전형적인 El Niño 사상의 구분은  $N_{CT}$  지수에 대하여 표준화된 3개월 이동평균값을 산정하고 상위분위 0.45 이상을 기준으로 하여, El Niño가 발달하기 시작하는 해의 7월에서 그 다음해 즉, 쇠퇴하기 시작하는 해의 2월까지 8개월 동안 지수 값이 0.87 이상 지속되는 기간을 기준으로 선정하였다. 위의 기준에 따라 선택된 6개의 전형적인 CT El Niño 사상은 1965/1966, 1972/1973, 1982/1983, 1987/1988, 1991/1992, 1997/1998이다. 또한, 중앙태평양 지역의 이상적인 해수면 온도 상승에 의해 발생하는 WP El Niño 사상의 구분은  $N_{WP}$  지수에 대하여 표준화된 3개월 이동평균값을 산정하고 상위분위 0.40 이상인 값을 기준으로 하여, El Niño가 발달하기 시작하는 해의 9월에서 그 다음해 즉, 쇠퇴하기 시작하는 해의 2월까지 6개월 동안 기후값이 0.40 이상 지속되는 기간을 기준으로 선정하였다. 위의 기준에 따라 선택된 6개의 WP El Niño 사상은 1968/1969, 1990/1991, 1994/1995, 2002/2003, 2004/2005, 2009/2010이다. 다음으로, La Niña해의 구분은 미국의 NOAA CPC (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>)에서 제공하는 분류 기준을 적용하였으며, 강한 La Niña 사상으로 선택된 해는 1973/1974, 1975/1976, 1988/1989, 1999/2000, 2010/2011이다. 특이사항으로는 SST 관측 자료를 바탕으로 ENSO 발생 형태에 따른 El Niño 사상의 구분 결과, 열대 태평양 지역의 중앙 태평양의 해수면 온도가 넓게 분포하는 WP El Niño 형태의 사상이 전형적인 CT El Niño 사상에 비하여, 그 발생 횟수가 최근에 올수록 빈번해 지고 있음을 확인하였다. 열대 태평양 지역의 SST 조건에 따라 강한 CT El Niño 해와 WP El Niño 해, La Niña 해를 구분하여 정리하면 다음 Table 1과 같다. 본

연구에서는 ENSO/La Niña 발생 이듬해를 기준으로 우리나라와 5대강 유역의 수문변동성 분석을 실시하였다.

### 3. 분석 결과

#### 3.1 대규모 기후환경 분석 결과

##### 3.1.1 열대 태평양 지역 SSTA 분석 결과

Fig. 5는 El Niño가 시작되는 해의 12월(DEC)에서 그 다음해 2월(FEB)까지의 3개월 동안 열대 태평양지역에서의 해수면 온도 관측자료(1981~2010년) 기간에 대한 합성편차분석을 실시한 결과이다. 해수면 온도의 합성편차 분석은 NCEP/NCAR Reanalysis (URL: <http://www.esrl.noaa.gov/>) 자료를 사용하였다. 전형적인 El Niño 해(CT El Niño)의 경우 평년에 비하여 비정상적으로 높은 해수면 온도가 남미 페루연안의 동태평양에서부터 시작하여 중앙태평양까지 길게 늘어서 분포하고 있음을 확인할 수 있으며, 같은 해에 평년보다 낮은 해수면 온도는 북태평양 지역과 서태평양 지역, 그리고 남태평양 지역 전체에 걸쳐 발생하고 있음을 확인할 수 있다(Fig. 5(a)). 또한, WP El Niño 해의 경우 평년에 비하여 비정상적으로 높은 해수면 온도가 중앙태평양 지역에서 넓게 분포하고 있으며, 같은 해에 동태평양과 서태평양 지역에서 평년보다 낮은 해수면 온도가 분포하고 있으나 전형적인 El Niño 해에 비하여 편차가 작음을 확인할 수 있다(Fig. 5(b)). 반면에, La Niña 해의 경우 남미 페루연안의 동태평양에서부터 시작한 SST cold anomaly가 중앙태평양까지 길게 늘어서 분포하고 있음을 확인할 수 있으며, 같은 해에 평년보다 높은 해수면 온도는 북태평양 지역 일부와 남태평양 지역 전체에 걸쳐 발생하고 있음을 확인할 수 있다(Fig.

Table 1. Classification of Strong ENSO (CT/WP El Niño) and La Niña Years

Different types of SST	The strong years during 1960-2013
CT El Niño	1965/66, 1972/73, 1982/83, 1987/88, 1991/92, 1997/98
WP El Niño	1968/69, 1990/91, 1994/95, 2002/03, 2004/05, 2009/10
La Niña	1973/74, 1975/76, 1988/89, 1999/00, 2010/11

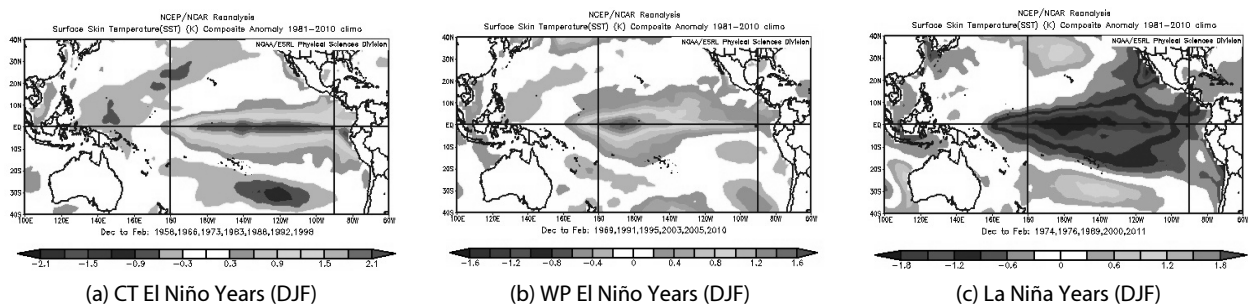


Fig. 5. Composite Sea Surface Temperature Anomalies (SSTA) in the Developing Phases of Two Types of El Niño During December-January. (a) to (c) Indicate SSTA During CT, WP El Niño and La Niña Years, Respectively

5(c)). 서로 다른 형태의 El Niño 해의 SSTa의 변화 패턴과 역학적 메커니즘에 대한 자세한 설명은 Kug et al. (2009), Feng et al. (2010) 그리고 Ren and Jin (2011)의 연구를 참고하기 바라며, 본 연구에서는 El Niño와 La Niña의 물리적 현상 진단을 다루기보다 대규모 해양 패턴 변화에 따른 우리나라와 5대강 유역의 중권역별 수문인자(강수량, 유출량)의 원격상관 및 지역적 수문변동특성 분석으로 연구의 범위를 한정하고자 한다.

### 3.1.2 GPCP 강수량 분석 결과

Fig. 6는 우리나라를 포함하는 아시아와 동북아시아 영역에 대하여 CT/WP El Niño, La Niña 발생 이듬해의 여름철 Global 강수량 변화 패턴을 합성편차분석을 통하여 나타내었다. GPCP 자료가 1979년부터 현재까지의 값이 존재하므로 CT El Niño는 1983, 1988, 1992, 1998년의 4개 값만을 적용하여 분석하였으며, WP El Niño는 1991, 1995, 2003, 2005, 2010년의 5개 값만을

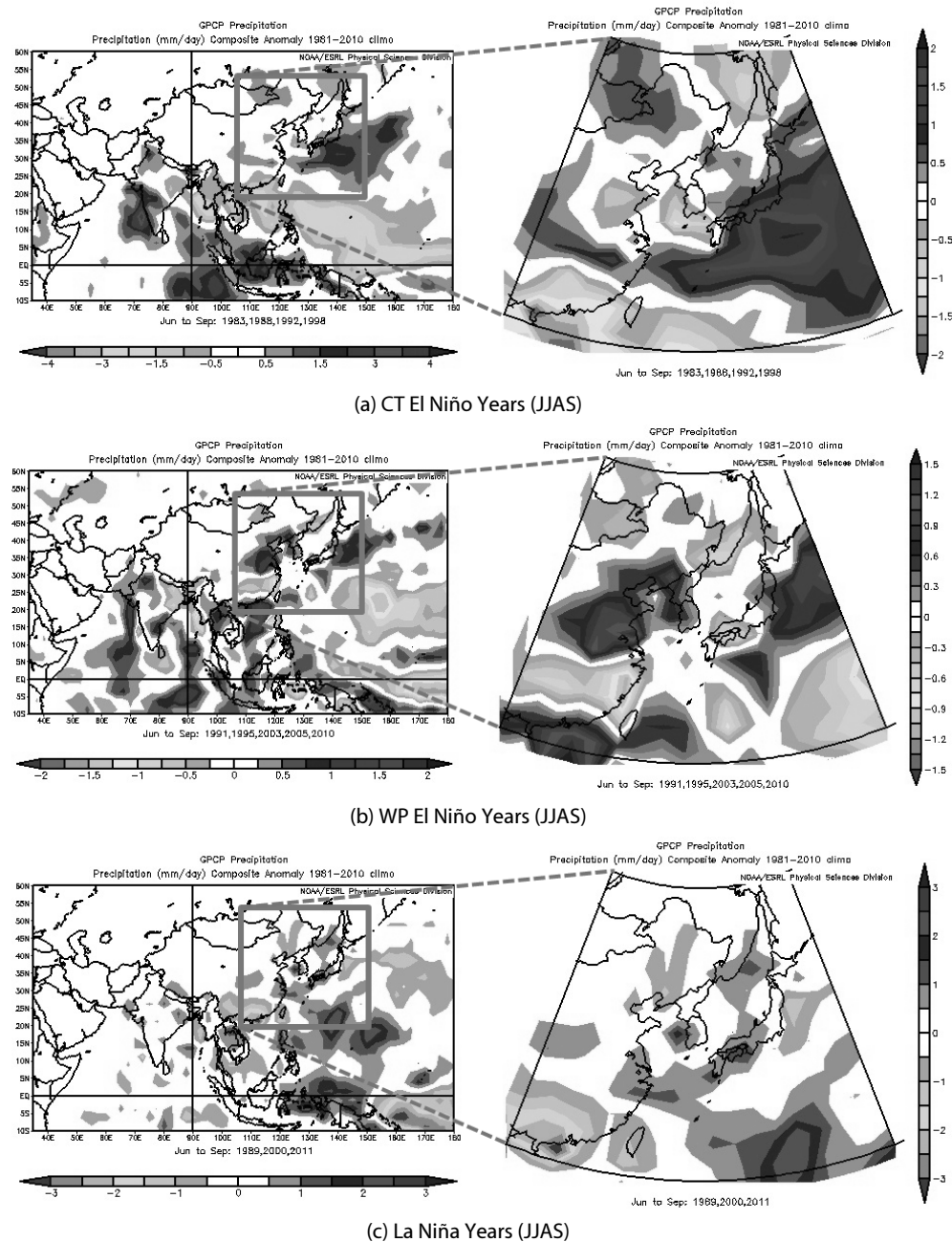


Fig. 6. Composite Anomalies (1981-2010 Climatology) of GPCP Precipitation (JJAS: June to September) During CT/WP El Niño and La Niña Years Over the Asia and North East Asia Domain

적용하여 분석하였다. 또한 La Niña는 1989, 2000, 2011년의 3개 값만을 적용하여 분석하였다. 따라서 전체기간의 특성을 반영한 결과라기보다 최근 자료의 특성을 반영한 결과로 해석이 될 것이다.

기후 값(1981~2010년)에 대한 GPCP 강수량의 증감 패턴을 분석한 결과, Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이 CT El Niño의 경우 북서태평양 지역의 강수량은 감소하며 우리나라 남쪽해상의 강수량은 증가 패턴이 있음을 확인할 수 있다. 또한 우리나라의 강수량 편차는 여름철에 평년값을 유지하는 것으로 보이나 우리나라의 남서부 일부 지역에서는 평년에 비하여 0~0.5 mm/day 정도의 감소 패턴이 있는 것으로 나타나 6월~9월의 4개월 동안의 강수가 평년에 비하여 약 0~60 mm 정도 감소하는 것으로 분석되었다. 반면에, Fig. 6(b)를 살펴보면, WP El Niño에는 북서태평양 지역의 강수량은 여름철에 평년값을 유지하는 것으로 보이나 약간의 감소 패턴이 존재하는 것으로 나타나며, 중국 중서부 지역을 포함한 우리나라의 강수량 편차는 평년에 비하여 증가하는 것으로 나타났다. 우리나라 대부분 지역에서는 여름철 강수량은 평년에 비하여 0.3~0.5 mm/day 이상의 증가 패턴이 있는 것으로 나타나 6월~9월의 4개월 동안의 강수가 평년에 비하여 약 36~60 mm 정도 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, Fig. 6(c)를 살펴보면, La Niña에는 북서태평양 지역의 강수량은 El Niño해와는 반대로 여름철에 평년에 비하여 증가하는 경향이 있는 것으로 나타나며, 우리나라의 강수량 편차는 우리나라 중서부 지역에서 평년에 비하여 0~0.5 mm/day 정도의 증가 경향이 있는 것으로 나타나 6~9월 사이 4개월 동안의 강수가 평년에 비하여 약 0~60 mm 정도 증가하는

것으로 분석되었다.

종합해 보면, GPCP 강수량 관측에 의한 CT/WP El Niño와 La Niña 강수량 합성편차 분석 결과, CT El Niño가 발생하는 이듬해의 우리나라 여름철 강수량은 평년과 비슷하거나 평년에 비하여 약간의 감소 패턴이 나타나며, 특히 WP El Niño가 발생하는 이듬해의 여름철 강수량은 증가 패턴이 나타나는 것으로 분석된다. 또한 La Niña 발생 이듬해 여름철 강수량은 평년과 비슷하거나 다소 증가 경향이 있는 것으로 분석된다.

### 3.2 우리나라 수문변동영향 분석

CT/WP El Niño와 La Niña가 우리나라 5대강 유역 여름철 강수량과 유출량의 패턴변화에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 우리나라 총 113개 중권역별 1966년부터 2011년까지의 일강수량과 일유출량 자료를 대상으로 6개의 강한 CT El Niño 해(CASE I)와 6개의 강한 WP El Niño 해(CASE II), 그리고 5개의 강한 La Niña해(CASE III)로 구분하여 여름철 계절강수량의 백분위 편차의 변화량과 변동특성을 분석하였다. 통계적으로 유의한 경향이 있는 유역을 사선으로 나타내었으며, 강수량과 유출량의 30년 평년값과의 합성편차분석을 실시하였으며, Student's *t*-test의 90% 신뢰수준에서 유의성 검정을 실시하였다.

#### 3.2.1 ENSO 변동에 따른 강수량 패턴 분석 결과

CT El Niño 이듬해의 전체 강수량은 평년에 비하여 -7.06% 감소하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 전체 강수량은 한강 유역 0.35% 증가, 낙동강유역 -6.19% 감소, 금강유역 -6.57%

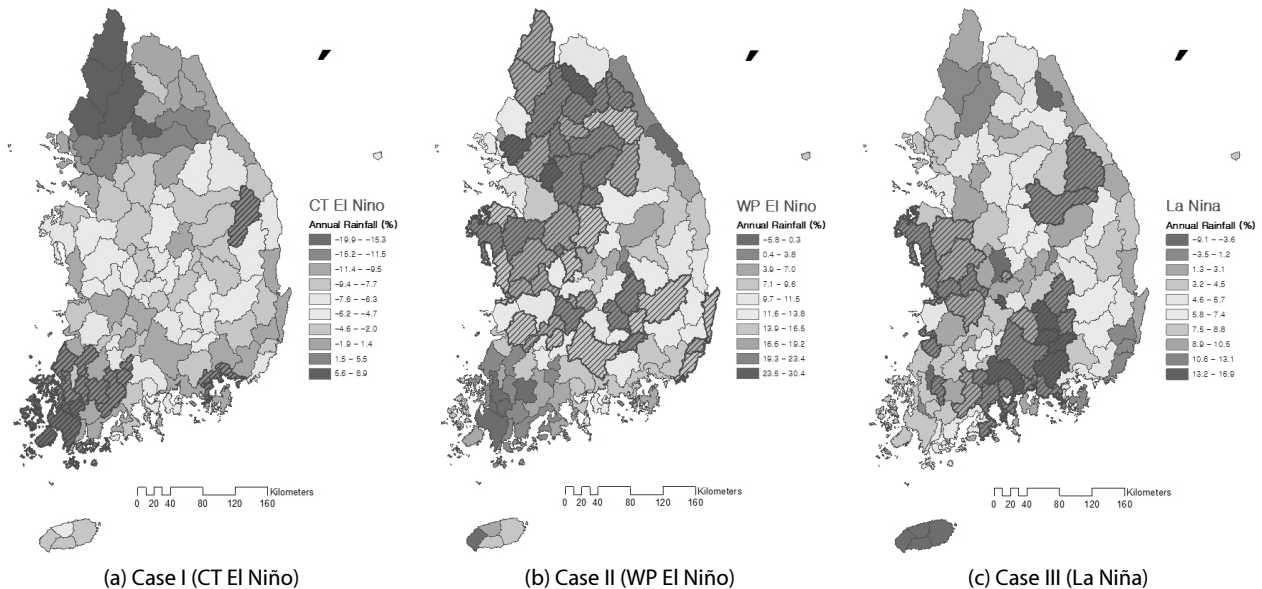


Fig. 7. Composite Anomalies of Annual Rainfall During CT/WP El Niño and La Niña Years. The Hatched Polygons Indicate Statistically Significant Changes in Annual Rainfall Based on the 10% Significance Level



감소, 섬진강유역 -9.41% 감소, 그리고 영산강유역 -13.50% 감소하는 것으로 분석되었다. 또한, *t*-test에 의한 전체 강수량 변화량의 감소경향을 분석한 결과 90% 신뢰구간(significant level:  $\alpha=0.10$ )에서 우리나라 남서부 일부 16개(한강: 0개, 낙동강: 2개, 금강: 0개, 섬진강: 4개, 영산강: 10개) 중권역을 중심으로 전체 강수량 편차의 유의할만한 감소패턴이 분석되었다(Fig. 7(a)). CT El Niño 이듬해의 여름철 부분 강수량은 평년에 비하여 -11.18% 감소하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 부분 계절강수량은 한강유역 1.05 % 증가, 낙동강유역 -8.53% 감소, 금강유역 -12.16% 감소, 섬진강유역 -14.18% 감소, 그리고 영산강유역 -22.06% 감소하는 것으로 분석되었다. 또한, *t*-test에 의한 여름철 강수량 변화량의 감소경향을 분석한 결과 우리나라 남서부 일부 13개(한강: 0개, 낙동강: 2개, 금강: 0개, 섬진강: 1개, 영산강: 10개) 중권역을 중심으로 여름철 강수량 편차의 유의할만한 감소패턴이 분석되었다(Fig. 8(a)).

WP El Niño 이듬해의 전체 강수량은 평년에 비하여 10.94% 증가하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 전체 강수량은 한강유역 16.68% 증가, 낙동강유역 11.73% 증가, 금강유역 15.57% 증가, 섬진강유역 8.02 % 증가, 그리고 영산강유역 2.69% 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, *t*-test에 의한 전체 강수량 변화량의 증가 경향을 분석한 결과 한강의 중서부 대부분 유역과 금강유역을 포함한 낙동강 중남부 일부 유역 44개(한강: 19개, 낙동강: 9개, 금강: 14개, 섬진강: 2개, 영산강: 0개) 중권역을 중심으로 전체 강수량 편차의 유의할만한 증가패턴이 분석되었다(Fig. 7(b)). WP

El Niño 이듬해의 여름철 부분 강수량은 평년에 비하여 20.09% 증가하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 부분 계절강수량은 한강유역 27.05% 증가, 낙동강유역 20.64% 증가, 금강유역 31.22% 증가, 섬진강유역 14.72% 증가, 그리고 영산강유역의 경우 6.38% 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, *t*-test에 의한 여름철 강수량 변화량의 증가경향을 분석한 결과 한강 중남부 유역과 금강 대부분 유역을 포함한 낙동강 일부 유역 26개(한강: 12개, 낙동강: 3개, 금강: 10개, 섬진강: 1개, 영산강: 0개) 중권역을 중심으로 여름철 강수량 편차의 유의할만한 증가패턴이 분석되었다(Fig. 8(b)).

La Niña 이듬해의 전체 강수량은 평년에 비하여 6.99% 증가하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 전체 강수량은 한강유역 5.59% 증가, 낙동강유역 6.71% 증가, 금강유역 8.59% 증가, 섬진강유역 7.40% 증가, 그리고 영산강유역 6.69% 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, *t*-test에 의한 전체 강수량 변화량의 증가경향을 분석한 결과 한강의 남부 일부 유역과 낙동강 남서부 유역, 금강 중서부 유역을 포함한 섬진강과 영산강 일부 유역 27개(한강: 2개, 낙동강: 9개, 금강: 9개, 섬진강: 5개, 영산강: 2개) 중권역을 중심으로 전체 강수량 편차의 유의할만한 증가패턴이 분석되었다(Fig. 7(c)). La Niña 이듬해의 여름철 부분 강수량은 평년에 비하여 12.74% 증가하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 부분 계절강수량은 한강유역 9.78% 증가, 낙동강유역 9.93% 증가, 금강유역 17.70% 증가, 섬진강유역 10.40% 증가, 그리고 영산강유역의 경우 15.87% 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, *t*-test에 의한

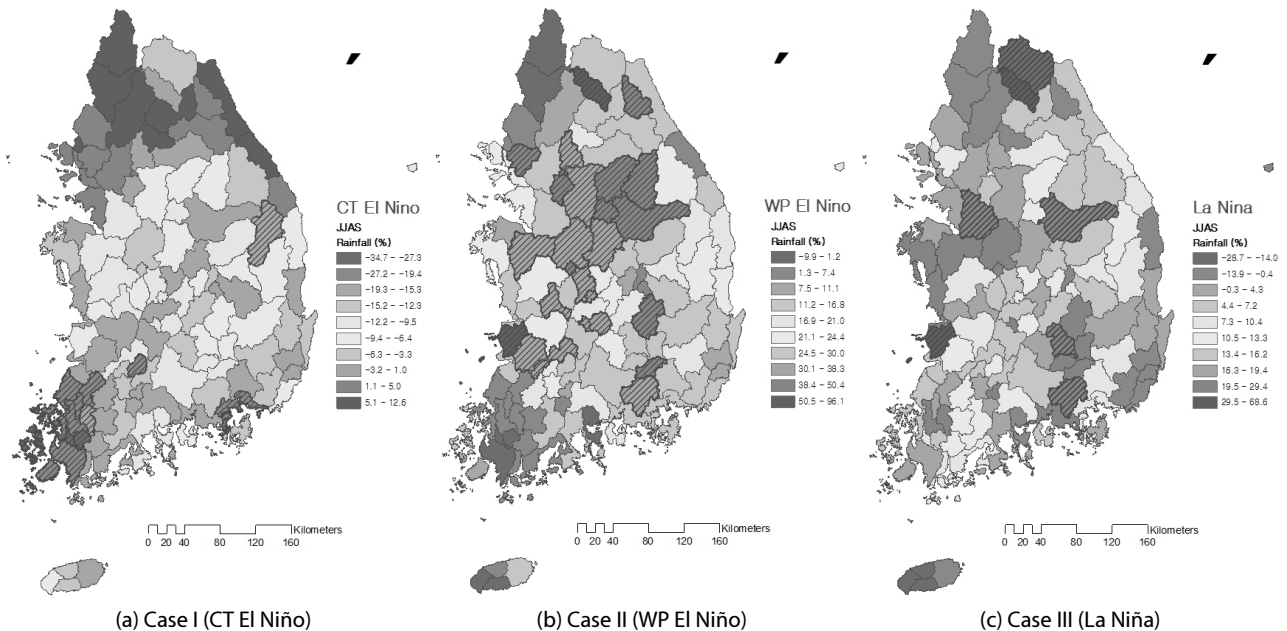


Fig. 8. Same as Fig. 7. but for the JJAS Rainfall

여름철 강수량 변화량의 증가경향을 분석한 결과 한강유역 금강산 댐(ID: 1008)에서는 유의할만한 감소패턴이 나타났으나, 한강일부 유역과 낙동강, 금강 일부 유역 6개(한강: 3개, 낙동강: 2개, 금강: 1개, 섬진강: 0개, 영산강: 0개) 중권역을 중심으로 여름철 강수량 편차의 유의할만한 증가패턴이 분석되었다(Fig. 8(c)).

분석결과를 종합해 보면 CT El Niño 이듬해에는 전체 강수량과 여름철 강수량은 평년에 비하여 약하게 감소하는 패턴이 있는 것으로 분석되며, 여름철 강수량의 감소폭이 큰 것으로 나타나 전체 강수량 감소에 여름철 강수량 감소가 영향을 미쳤을 것으로 판단되며, 한강유역을 제외한 나머지 모든 유역에서 강수량의 약한 감소경향이 나타남을 확인할 수 있다. WP El Niño 이듬해의 전체 강수량과 여름철 강수량은 평년에 비하여 증가 패턴이 있는 것으로 분석되며, 여름철 강수량의 증가폭이 큰 것으로 보아 전체 강수량 증가에 여름철 강수량 증가가 영향을 미쳤으며, 5대강 유역 모두 평균강수량의 뚜렷한 증가패턴이 나타남을 확인하였다. La Niña 이듬해의 전체 강수량과 여름철 강수량은 평년에 비하여 약한 증가 패턴이 있는 것으로 분석되며, 전체 강수량 증가에 여름철 강수량 증가가 영향을 미친 것으로 분석되며, 5대강 유역 모두 강수량의 약한 증가경향이 나타남을 확인하였다.

### 3.2.2 ENSO 변동에 따른 유출량 패턴 분석 결과

CT El Niño 이듬해의 전체 유출량은 평년에 비하여 -10.04% 감소하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 전체 유출량은 한강

유역 3.03% 증가, 낙동강유역 -10.31% 감소, 금강유역 -8.67% 감소, 섬진강유역 -15.45% 감소, 그리고 영산강유역 -18.81% 감소하는 것으로 분석되었다. 또한, *t-test*에 의한 전체 유출량 변화량의 감소경향을 분석한 결과 우리나라 남부 일부 15개(한강: 0개, 낙동강: 6개, 금강: 0개, 섬진강: 3개, 영산강: 6개) 중권역을 중심으로 전체 유출량 편차의 유의할만한 감소패턴이 분석되었다(Figure 9a). CT El Niño 이듬해의 여름철 부분 유출량은 평년에 비하여 -18.28% 감소하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 부분 계절 유출량은 한강유역 1.41% 증가, 낙동강유역 -19.89% 감소, 금강유역 -16.83% 감소, 섬진강유역 -25.17% 감소, 그리고 영산강유역의 경우 -30.91% 감소하는 것으로 분석되었다. 또한, *t-test*에 의한 여름철 유출량 변화량의 감소경향을 분석한 결과 우리나라 남부 대부분 유역 25개(한강: 0개, 낙동강: 7개, 금강: 1개, 섬진강: 6개, 영산강: 11개) 중권역에서 여름철 유출량 편차의 유의할만한 감소패턴이 분석되었다(Fig. 10(a)). 분석결과 CT El Niño 이듬해의 전체 유출량과 여름철 유출량은 평년에 비하여 감소하는 패턴이 뚜렷한 것으로 분석되며, 전체 유출량 감소에 여름철 유출량 감소가 영향을 미쳤을 것으로 판단되며, 한강유역을 제외한 나머지 모든 유역에서 유출량의 약한 감소경향이 나타남을 확인할 수 있다.

WP El Niño 이듬해의 전체 유출량은 평년에 비하여 15.88% 증가하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 전체 유출량은 한강 유역 23.96% 증가, 낙동강유역 18.73% 증가, 금강유역 23.22% 증가, 섬진강유역 1.81% 증가, 그리고 영산강유역 1.66% 증가하는

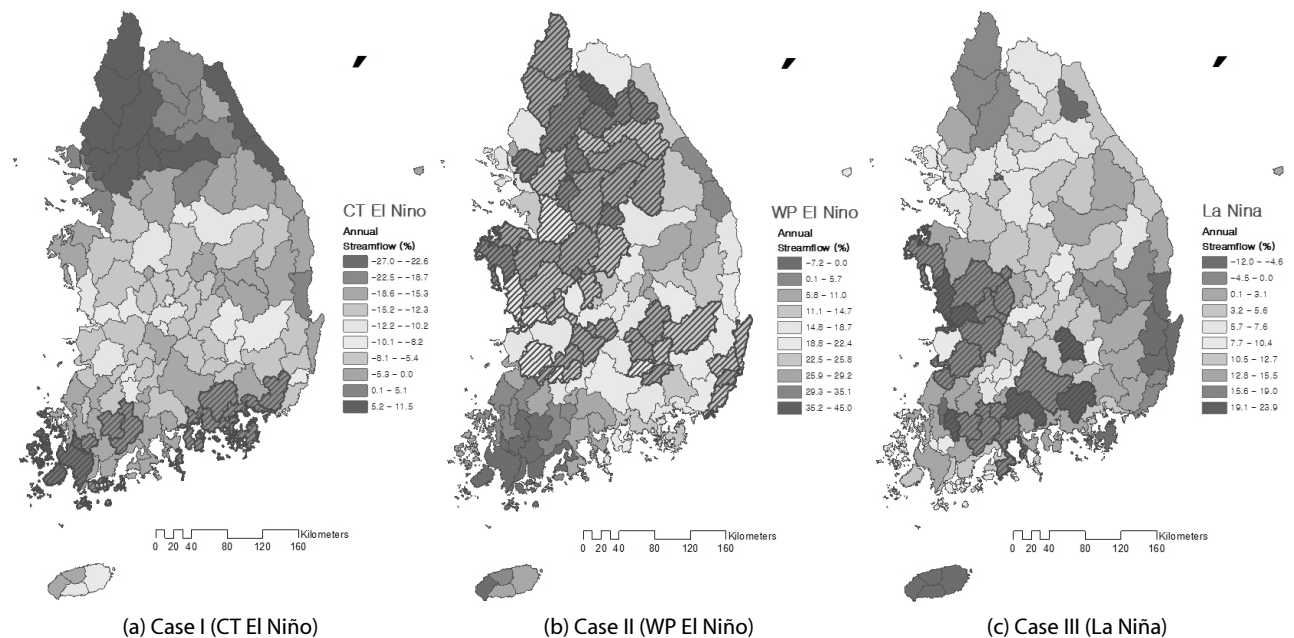


Fig. 9. Composite Anomalies of Annual Streamflow During CT/WP El Niño and La Niña Years. The Hatched Polygons Indicate Statistically Significant Changes in Annual Streamflow Based on the 10% Significance Level

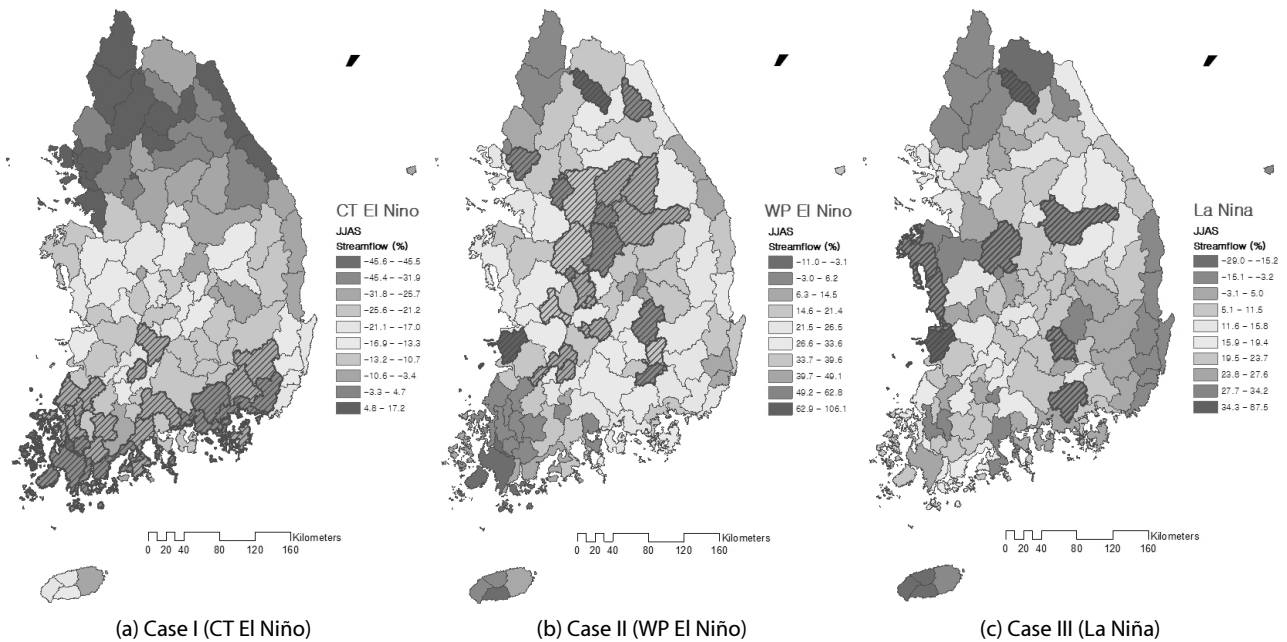


Fig. 10. Same as Fig. 9. But for the JJAS Streamflow

것으로 분석되었다. 또한, *t*-test에 의한 전체 유출량 변화량의 증가 경향을 분석한 결과 한강의 대부분 유역과 금강 대부분 유역, 그리고 낙동강 중남부 유역과 섬진강 일부 유역 47개(한강: 20개, 낙동강: 10개, 금강: 14개, 섬진강: 3개, 영산강: 0개) 중권역을 중심으로 전체 유출량 편차의 유의할만한 증가패턴이 분석되었다(Fig. 9(b)). WP El Niño 이듬해의 여름철 부분 유출량은 평년에 비하여 24.52% 증가하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 부분 계절유출량은 한강유역 33.16% 증가, 낙동강유역 26.83% 증가, 금강유역 39.10% 증가, 섬진강유역 19.63% 증가, 그리고 영산강유역의 경우 3.89% 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, *t*-test에 의한 여름철 유출량 변화량의 증가경향을 분석한 결과 한강 중남부 유역과 금강 일부 유역, 낙동강과 섬진강 일부 24개(한강: 11개, 낙동강: 3개, 금강: 8개, 섬진강: 2개, 영산강: 0개) 중권역을 중심으로 여름철 유출량 편차의 유의할만한 증가패턴이 분석되었다(Fig. 10(b)). 분석결과 WP El Niño 이듬해의 전체 유출량과 여름철 유출량은 평년에 비하여 증가 패턴이 있는 것으로 분석되며, 여름철 유출량의 증가폭이 전체 유출량 증가폭에 비하여 큰 것으로 보아 전체 유출량 증가에 여름철 유출량 증가가 영향을 미쳤으며, 5대강 유역 모두 평균유출량의 뚜렷한 증가패턴이 나타남을 확인하였다.

La Niña 이듬해의 전체 유출량은 평년에 비하여 9.92% 증가하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 전체 유출량은 한강유역 6.76% 증가, 낙동강유역 4.96% 증가, 금강유역 13.91% 증가, 섬진강유역 11.67% 증가, 그리고 영산강유역의 경우 12.28% 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, *t*-test에 의한 전체 유출량 변화량의

증가경향을 분석한 결과 낙동강 남서부 일부 유역, 금강 중서부 유역을 포함한 섬진강과 영산강 일부 유역에서 20개(한강: 1개, 낙동강: 3개, 금강: 9개, 섬진강: 4개, 영산강: 3개) 중권역을 중심으로 전체 유출량 편차의 유의할만한 증가패턴이 분석되었다(Fig. 9(c)). La Niña 이듬해의 여름철 부분 유출량은 평년에 비하여 17.35% 증가하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 부분 계절유출량은 한강유역 12.25% 증가, 낙동강유역 9.59% 증가, 금강유역 26.08% 증가, 섬진강유역 15.93% 증가, 그리고 영산강유역의 경우 22.88% 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, *t*-test에 의한 여름철 유출량 변화량의 증가경향을 분석한 결과 한강일부 유역과 낙동강, 금강 일부 유역 8개(한강: 2개, 낙동강: 2개, 금강: 4개, 섬진강: 0개, 영산강: 0개) 중권역을 중심으로 여름철 유출량 편차의 유의할만한 증가패턴이 분석되었다(Fig. 10(c)). 분석결과 La Niña 이듬해의 전체 유출량과 여름철 유출량은 평년에 비하여 약한 증가 패턴이 있는 것으로 분석되며, 이러한 경향은 5대강 유역 모두에서 나타남을 확인하였다.

### 3.2.3 SSTA 패턴 변화에 따른 우리나라 수문변동 분석 결과

Figs. 11 and 12는 우리나라 113개 중권역과 5대강 유역(한강: 30개 중권역, 낙동강: 33개 중권역, 금강: 21개 중권역, 섬진강: 15개 중권역, 영산강: 14개 중권역)에 대하여 CT El Niño decaying 해, WP El Niño decaying 해, 그리고 La Niña해로 구분하여 전체 기간과 여름철에 대하여 강수량과 유출량의 백분위 기후값(1971~2000년) 편차의 산포도를 나타내었다.

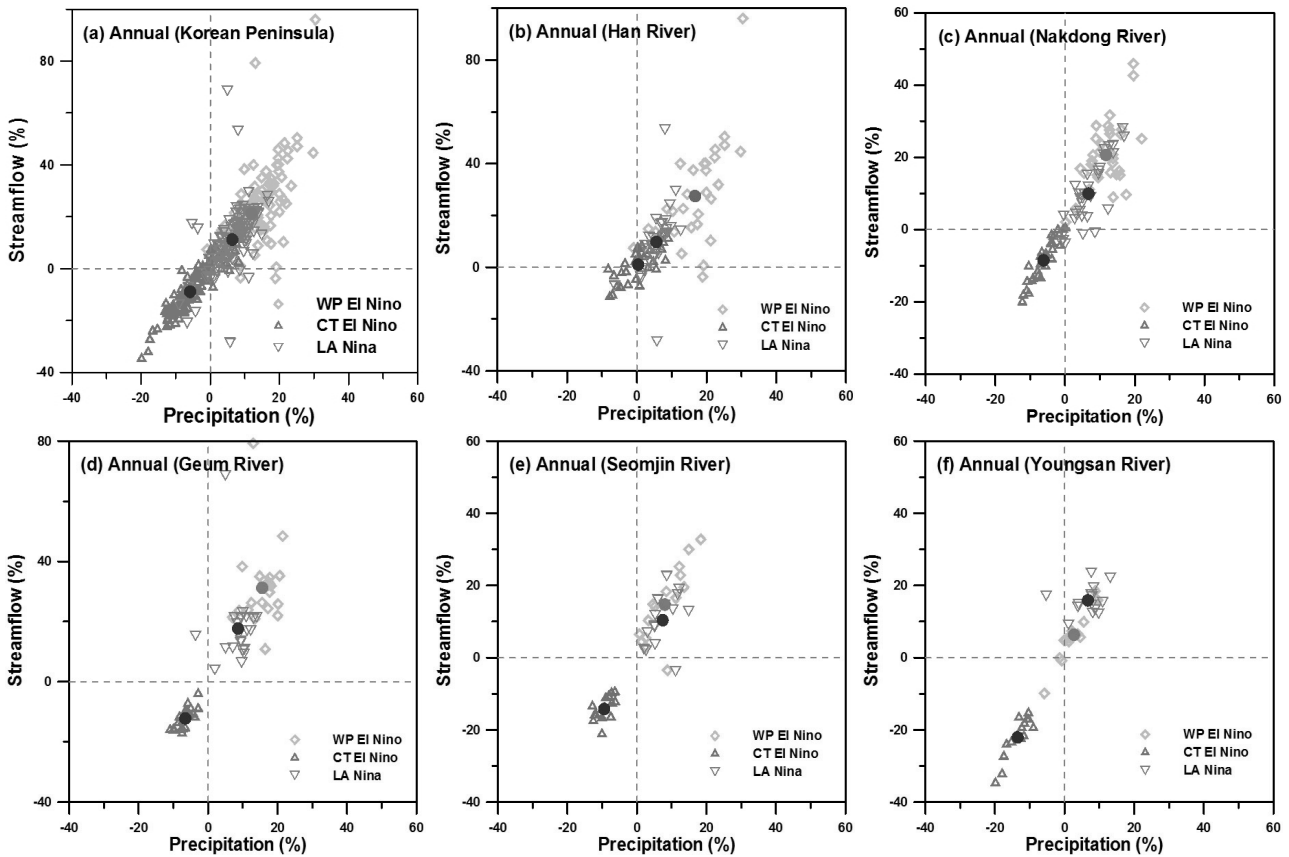


Fig. 11. Percentage Anomaly (Departures from the 1971-2000 Normals) Changes between Annual Precipitation and Annual Streamflow in Different ENSO Types in South Korea and Their Five Major River Basin

전체기간 강수량의 경우, 강수량과 유출량의 백분위 기후값 편차의 산포도 중심이 CT El Niño 해에는 (-5.85%, -9.09%)로, WP El Niño 해에는 (12.15%, 21.87%)로, La Niña 해에는 (6.85%, 12.13%)로 분석되었다. 5대강 유역별로 살펴보면, 한강유역의 경우, CT El Niño 해에는 (0.36%, 1.05%)로, WP El Niño 해에는 (16.69%, 27.49%)로, La Niña 해에는 (5.56%, 9.78%)로 분석되었고, 낙동강유역의 경우, CT El Niño 해에는 (-6.19%, -8.53%)로, WP El Niño 해에는 (11.73%, 20.64%)로, La Niña 해에는 (6.71%, 9.94%)로 분석되었다. 금강유역의 경우, CT El Niño 해에는 (-6.57%, -12.16%)로, WP El Niño 해에는 (15.58%, 31.21%)로, La Niña 해에는 (8.59%, 17.70%)로 분석되었고, 섬진강유역의 경우, CT El Niño 해에는 (-9.42%, -14.19%)로, WP El Niño 해에는 (8.02%, 14.72%)로, La Niña 해에는 (7.40%, 10.38%)로 분석되었다. 그리고 영산강 유역의 경우, CT El Niño 해에는 (-13.48%, -22.08%)로, WP El Niño 해에는 (2.69%, 6.39%)로, La Niña 해에는 (6.69%, 15.88%)로 분석되었다. 전체 기간 강수량과 유출량에 대하여 산포도 분석결과 전반적으로 강수량 증가에 따른 유출량 증가의 선형적인 분포특성을 보이는 것으로

나타났으며, 전반적으로 WP El Niño 해에는 평년에 비하여 유역의 강수량과 유출량의 증가 특성이 뚜렷이 나타나며, CT El Niño 해에는 주로 감소하는 경향이, La Niña 해에는 평년의 상태를 유지하는 것으로 분석되었다(Fig. 11(a)).

여름철 강수량의 경우, 강수량과 유출량의 백분위 기후값 편차의 산포도 중심이 CT El Niño 해에는 (-8.20%, -15.73%)로, WP El Niño 해에는 (17.93%, 26.99%)로, La Niña 해에는 (8.89%, 15.85%)로 분석되었다. 5대강 유역별로 살펴보면, 한강유역의 경우, CT El Niño 해에는 (3.04%, -19.88%)로, WP El Niño 해에는 (23.97%, 26.83%)로, La Niña 해에는 (6.76%, 9.59%)로 분석되었고, 낙동강유역의 경우, CT El Niño 해에는 (-10.31%, -19.88%)로, WP El Niño 해에는 (18.74%, 26.83%)로, La Niña 해에는 (4.96%, 9.59%)로 분석되었다. 금강유역의 경우, CT El Niño 해에는 (-8.66%, -16.84%)로, WP El Niño 해에는 (23.23%, 39.10%)로, La Niña 해에는 (13.90%, 26.08%)로 분석되었고, 섬진강유역의 경우, CT El Niño 해에는 (-15.46%, -25.17%)로, WP El Niño 해에는 (11.80%, 19.64%)로, La Niña 해에는 (11.66%, 15.94%)로 분석되었다. 그리고 영산강 유역의 경우, CT El Niño 해에는

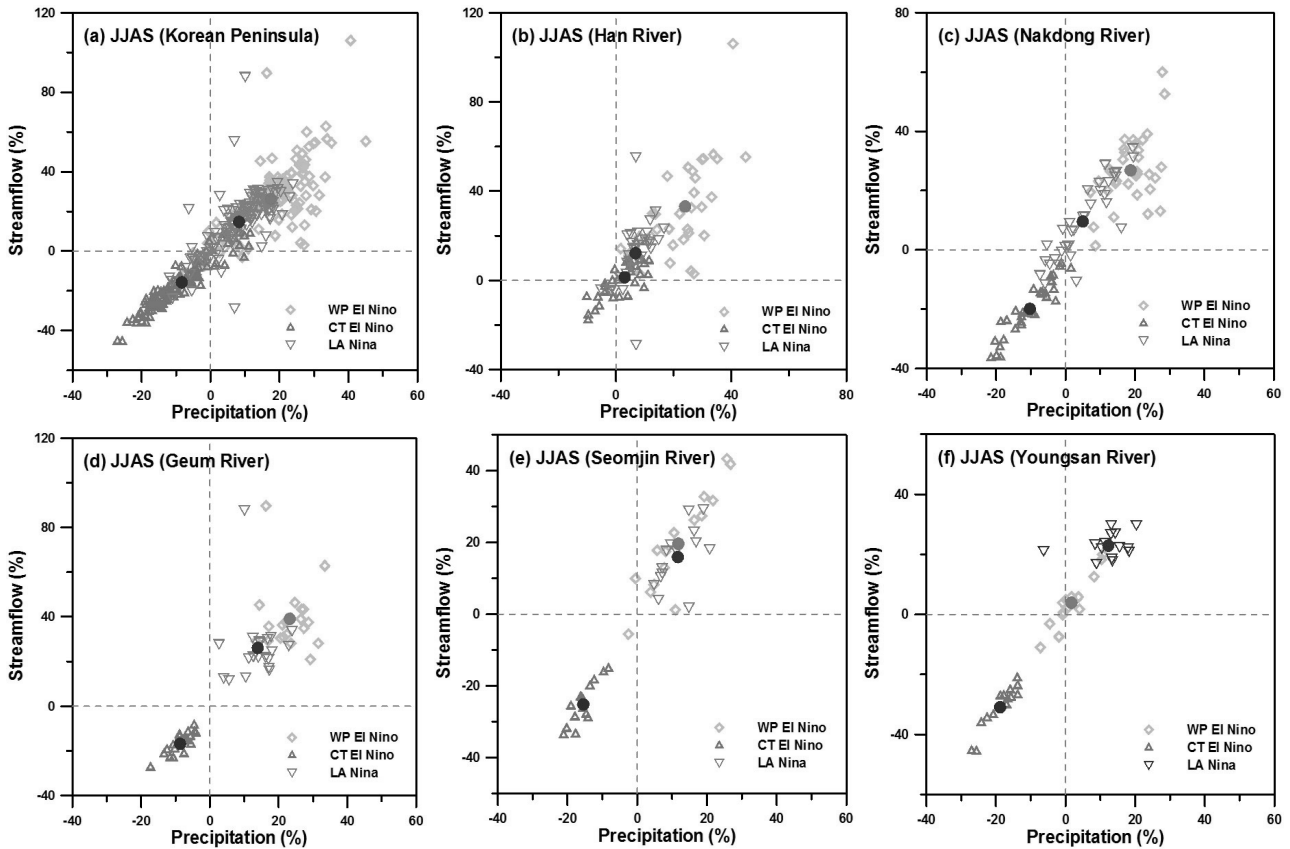


Fig. 12. Same as Fig. 11. But for the JJAS Season

(-18.80%, -30.91%)로, WP El Niño 해에는 (1.67%, 3.88%)로, La Niña 해에는 (12.28%, 22.88%)로 분석되었다. 여름철 강수량과 유출량에 대하여 산포도 분석결과 전반적으로 강수량 증가에 따른 유출량 증가의 선형적인 분포특성을 보이는 것으로 나타났으며, 전반적으로 WP El Niño 해에는 평년에 비하여 유역의 강수량과 유출량의 증가 특성이 뚜렷이 나타나며, CT El Niño 해에는 주로 감소하는 경향이, La Niña 해에는 평년의 상태를 유지하는 것으로 분석되었다(Fig. 12(a)).

#### 4. 결론 및 토의

본 연구에서는 열대 태평양 지역의 비정상적인 해수면 온도 변화에 따라 발생하는 CT/WP El Niño, 그리고 La Niña 현상이 우리나라의 여름철 계절 수문변동에 미치는 영향을 분석하였으며, 우리나라 5대강 유역별 113개 중권역에 대하여 강수량과 유출량의 30년 평년값과의 합성편차분석을 통한 유의성 검정을 실시하였다. 다만, 표본 개수의 제약으로 인하여 통계적 유의성 측면에서 조심스럽게 접근할 필요성이 있다. 또한 열대 해수면 온도 변화에 따른

우리나라 지역별 수문변동영향에 대한 일반적인 결론을 얻기 위해서는 기후메커니즘 분석 등 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다. 본 연구의 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 전 지구 관측 강수량(GPCP)의 합성편차분석 결과, CT El Niño가 발생할 것으로 예상되는 해의 우리나라 여름철 강수량은 평년에 비하여 다소 감소하는 것으로 분석되며, 특히 WP El Niño가 발생할 것으로 예상되는 해는 평년에 비하여 여름철 강수량의 증가 패턴이 뚜렷이 나타나는 것으로 분석되었다. 또한 La Niña 발생 이듬해의 우리나라 여름철 강수량은 평년과 비슷하거나 다소 증가하는 경향이 있는 것으로 분석되었다.
- (2) 우리나라 113개 중권역의 강수량과 유출량 자료에 대한 합성편차분석과 Student's *t*-test 유의성검정을 실시한 결과, CT El Niño 시기에는 한강유역을 제외한 나머지 모든 유역에서 강수량과 유출량의 약한 감소경향이 있는 것으로 분석되었으며, WP El Niño 시기에는 5대강 유역 모두 평균 강수량의 뚜렷한 증가패턴이 있음을 확인하였다. 또한 La Niña 시기에는 평년과 비슷하거나 약한 증가경향이 있는 것으로 분석되었다.

(3) 백분위 기후값 편차의 산포도 분석 결과, 여름철 강수량과 유출량의 산포도 중심이 CT El Niño 해에는 (-8.20%, -15.73%)로, WP El Niño 해에는 (17.93%, 26.99%)로, La Niña 해에는 (8.89%, 15.85%)로 분석되었고, 유역별 강수량 증가에 따른 유출량 증가의 선형적 분포특성을 확인할 수 있었다. 또한 전반적으로 WP El Niño 해에는 평년에 비하여 강수량과 유출량의 증가 특성이 뚜렷하였으며, CT El Niño 해에는 감소 경향이 있으며, La Niña 해에는 평년 상태를 유지하는 것으로 분석되었다.

본 연구의 결과는 우리나라와 같이 강수의 계절적 변동 특성이 뚜렷한 지역에서 El Niño, La Niña 현상 발생시 수자원 예측의 불확실성을 감소시키며, 안정적인 용수공급과 중장기적 수방계획 수립을 위한 정책지원 자료로 활용이 가능할 것이다. 향후 대규모 기후패턴변화 영향을 줄 수 있는 대표적 해양관련 지수인 ENSO 뿐만 아니라 가능한 기후인자들을 분석을 통한 원격상관 기반 극치수문의 지역적 변동 특성 예측의 기초자료로 활용이 가능할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 APEC기후센터(www.apcc21.org) 의 「아태 기후 정보 서비스 및 기술개발」 연구에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### References

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 Geophys. Res.*, Vol. 112, C11007, doi:10.1029/2006JC003798.

Bureau of Meteorology (BOM) (2014). Available at: <http://www.bom.gov.au/> (Accessed: November 2014).

Cha, E. J., Jhun, J. G. and Chung, H. S. (1999). "A study on characteristics of climate in south Korea for El Niño/La Niña Years." *Asia-Pacific Journal Atmos. Sci.* Vol. 35, No. 1, pp. 98-117 (in Korean).

Dressler, K. A., Leavesley, G. H., Bales, R. C. and Fassnacht, S. R. (2006). "Evaluation of girdded snow water equivalent and satellite snow cover products for mountain basins in a hydrologic model." *Hydrol. Processes*, Vol. 20, pp. 673-688.

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." *Int. Journal Climatol.*, Vol. 31, pp. 2091-2101.

Horel, J. D. and Wallace, J. M. (1981). "Planetary-scale atmospheric

phenomena associated with the Southern Oscillation." *Mon. Weather Rev.*, Vol. 109, pp. 813-829.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX)*, Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, pp. 1-594.

Kang, I. S. (1998). "Relationship between El-Niño and Korean Climate Variability." *Asia-Pacific Journal Atmos. Sci.*, Vol. 34, No. 3, pp. 390-396 (in Korean).

Kao, H. Y. and Yu, J. Y. (2009). "Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of ENSO." *Journal Climate*, Vol. 22, pp. 615-632.

Kim, J. S., Jain, S. and Yoon, S. K. (2012a). "Warm season stream flow variability in the Korean Han River Basin: Links with atmospheric teleconnections." *Int. Journal Climatol.*, Vol. 32, pp. 635-640.

Kim, J. S., Zhou, W., Wang, X. and Jain, S. (2012b). "El nino modoki and the summer precipitation variability over south Korea: A Diagnostic Study." *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 90, No. 5, pp. 673-684.

Korean Meteorological Administration (KMA) (2012). *Climate Change Prediction Report over the Korean Peninsula*, Report of National Institute of Meteorological Research, Publication Number: 11-1360000-000861-01, pp. 1-153.

Kug, J. S., Ahn, M. S., Sung, M. K., Yeh, S. W., Min, H. S. and Kim, Y. H. (2010). "Statistical relationship between two types of El Niño events and climate variation over the Korean Peninsula." *Asia-Pacific Journal Atmos. Sci.*, Vol. 46, pp. 467-474.

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 Climate*, Vol. 22, pp. 1499-1515.

Leavesley, G. H., Lichty, R. W., Troutman, B. M. and Saindon, L. G. (1983). *Precipitation-Runoff Modeling System: User's Manual*, Water Resources Investigations: 83-4238, U.S. Geological Survey, Denver, Colorado.

Lee, T. and Jeong, C. S. (2014) "Frequency analysis of nonidentically distributed hydrometeorological extremes associated with large-scale climate variability applied to south Korea." *Journal Appl. Meteor. Climatol.*, Vol. 53, No. 5, pp. 1193-1212.

Moon, Y. L., Kwon, H. H. and Kim, D. K. (2005). "A study of relationships between the sea surface temperatures and rainfall in Korea." *Journal Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 38, No. 12, pp. 995-1008 (in Korean).

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 Journal Atmos. Sci.*, Vol. 47, pp. 223-233.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Weather Service Climate Prediction Center. (2014). Available at: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/> (Accessed: November 2014).

Oh, T. S. and Moon, Y. I. (2010). "A study on the analysis of the relationship between sea surface temperature and monthly rainfall." *Journal Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 43, No. 5, pp. 471-482

- (in Korean).
- 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 Resour. Res.*, Vol. 32, 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 Resour. Res.*, Vol. 34, pp. 3035-3044.
- Pizarro, G. and Lall, U. (2002). "El Niño-induced flooding in the U.S. West: What can we expect?" *Eos Trans. Amer. Geophys. Union*, Vol. 83, pp. 349-352.
- 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 Geophys. Res.*, Vol. 116, D18108, doi:10.1029/2011JD015666.
- Ren, H. L. and Jin, F. F. (2011). "Niño indices for two types of ENSO." *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 38, L04704, doi:10.1029/2010GL046031.
- Son, C. Y., Kim, J. S., Moon, Y. I. and Lee, J. H. (2014). "Characteristics of TC-induced precipitation over Korean River Basins associated with three evolution patterns of Central-Pacific El Niño." *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, Vol. 28, No. 5, pp. 1147-1156.
- Trenberth, K. E. (1997). "The definition of El Niño." *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 78, No. 12, pp. 2771-2777.
- Wang, B., Wu, R. and Fu, X. (2000). "Pacific-East Asia Teleconnection: How Does ENSO Affect East Asian Climate?" *Journal Climate*, Vol. 13, pp. 1517-1536.
- Water Management Information System (WAMIS). (2014). Available at: <http://wamis.go.kr/eng/> (Accessed: November 2014).
- 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 Dyn.*, 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.
- 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. 51-61 (in Korean).
- Yoon, S. K. (2013). *Hydrometeorological Variability over the Korean Peninsula by ENSO Pattern Change and Typhoon Activities and its Assessment for Integrated Flood Risk.*, APEC Climate Center Technical Report, pp. 1-90 (in Korean).
- Yoon, S. K., Cho, J. P. and Moon, Y. I. (2014). "Non-Parametric low-flow frequency analysis using RCPs scenarios data: A Case Study of the Gwangdong Storage Reservoir, Korea." *Journal Korean Soci. Civil Engineers*, Vol. 34, No. 4, pp. 1125-1138 (in Korean).
- Yoon, S. K., Kim, J. S. and Kwon, H. H. (2013a). "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." *Journal Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 46, No. 2, pp. 123-137 (in Korean).
- Yoon, S. K., Kim, J. S., Lee, J. H. and Moon, Y. I. (2013b). "Hydrometeorological variability in the Korean Han River Basin and its sub-watersheds during different El Niño phases." *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, 27, pp. 1465-1477.