



PREFACE

It is our pleasure to present this report on the APEC Climate Center (APCC)'s research activities in 2013, which has been a very productive year for our Center.

APCC has expanded its research scope, in response to regional societal and scientific needs. While building expertise in climate prediction remains a priority, we are extending our reach to include policy-relevant climate applications and value-added climate information products.

APCC has accelerated efforts to better our service to the region. As one of the main services provided by APCC, the MME 3-month prediction information has been productively applied by scientists in developing countries that are unable to produce their own prediction information. Furthermore, in order to better prepare for climate-related hazards in a timely manner, APCC launched its 6-month MME prediction service in September 2013. We also began to release forecasts of the Boreal Summer Intraseasonal Oscillation (BSISO), starting from July 2013, as the world's first operational BSISO forecast service. Our researchers also achieved great success in publishing their papers in noted academic journals. Dr. Ok-Yeon Kim, for example, published a paper in *Climate Dynamics* and her research was later selected as one of the Research Highlights by another distinguished journal, *Nature Climate Change*. The following research report provides more information about our research outcomes from 2013.

We will continue to promote the best use of our research outcomes in various scientific and application areas. Our successes and achievements would not have been possible without the support of our valued partners. In this regard, I extend my thanks to you and I hope you enjoy this 2013 Research Report.

Chin-Seung Chung
Director, APEC Climate Center

CONTENTS

ENSO 패턴 변화와 태풍활동에 따른 한반도 수문변동 영향 및 통합 홍수위험 평가

■ 윤선권 | 기후변화연구팀

CHAPTER I : ENSO 패턴 변화에 따른 한반도 수문 변동 영향분석: 한강유역을 대상으로

| | |
|------------------------------|----|
| 1. 서론 | 9 |
| 2. 대상유역 및 자료 | 12 |
| 2.1 대상유역 | 12 |
| 2.2 대상 자료 | 15 |
| 3. 분석 결과 | 16 |
| 3.1 서로 다른 ENSO 분석 | 16 |
| 3.2 대규모 기후패턴 분석 | 19 |
| 3.3 계절 수문특성 분석 | 22 |
| 3.4 ENSO 패턴변화에 따른 수문 변동분석 | 28 |
| 3.5 ENSO 패턴변화에 따른 수문 변동분석 종합 | 36 |
| 4. 결론 및 요약 | 39 |

CHAPTER II : ENSO 패턴 변화에 따른 WNP지역 태풍활동과 한반도 수문변동 영향

| | |
|-------------------|----|
| 1. 서론 | 43 |
| 2. 대상유역 자료 및 연구방법 | 46 |
| 2.1 대상유역 | 46 |
| 2.2 대상자료 | 48 |

| | |
|---|----|
| 2.3 연구방법 | 50 |
| 3. 분석 결과 | 51 |
| 3.1 태풍 발생빈도 및 강도분석 | 51 |
| 3.2 태풍의 발생위치 및 경로분석 | 53 |
| 3.3 Empirical PDF 분석 | 54 |
| 3.4 Possible mechanism 분석 | 55 |
| 4. ENSO 패턴 변화에 따른 한반도 영향 태풍강수 특성 분석 | 58 |
| 4.1 CT/WP El Niño 해의 태풍강수 특성 | 58 |
| 4.2 CT/WP El Niño 해의 태풍에 의한 중호우사상 발생 특성 | 60 |
| 5. 요약 및 결론 | 62 |

CHAPTER III : Development of an Integrated Flood Risk Index in a Changing Climate: An Assessment for the Han River Basin, Korea

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUCTION | 67 |
| 2. DATA AND METHODOLOGY | 70 |
| 2.1 Study area and data | 70 |
| 2.2 Methodology | 73 |
| 3. ANALYSIS AND RESULTS | 77 |
| 3.1 Classification of research periods, and urban and rural areas | 77 |
| 3.2 Flooded area and flood damage | 78 |
| 3.3 Ternary diagram for different periods | 79 |
| 3.4 Spatial distribution of flood hazard and vulnerability | 80 |
| 3.5 Integrated flood risk in different periods | 84 |
| 3.6 Integrated flood risk in different SST conditions | 86 |
| 4. SUMMARY AND CONCLUSION | 90 |



ENSO 패턴 변화와 태풍활동에 따른 한반도 수문변동 영향 및 통합 홍수위험 평가

윤선권 | 기후변화연구팀

Extended Abstracts

Research work I : Hydrological variability by different ENSO types

ABSTRACT

The understanding and predicting of the seasonal to interannual variations of hydrometeorological data and hydrological data are viewed as a critical consideration for a sustainable future planning. This study investigated the characteristic changes in seasonal precipitation and runoff associated with the conventional cold-tongue (CT) and warm-pool (WP) El Niño phases during spring (MAM; March to May) and summer (JJA; June to September) season for the Korean Han River Basin and its sub-watersheds. During WP El Niño years, rainfall in MAM and its coefficient of variation (CV) were higher than in normal years. Moreover, during conventional CT El Niño years, JJA season tended to be drier than in climatologically normal years, although variability in precipitation during JJA was relatively lower. Data for runoff showed wetter MAM season during both types of El Niño events as compared to long-term normal years and significant changes in runoff during summer under CT El Niño conditions. During WP El Niño years, increased runoff was seen for 95.8% of all basins and this increase was statistically significant for 58.3% of these basins, but variability in runoff was small. Overall, the findings confirm that water resources in the Han River Basin during the MAM and JJA seasons are sensitive to CT/WP El Niño events. Thus, for basins such as these, where seasonal variability and the uncertainty of hydrometeorological data are high, it is necessary to investigate the relationship between climate parameters and hydrologic factors to maintain the stability of the fresh water supply system and allow prediction of water resources management.

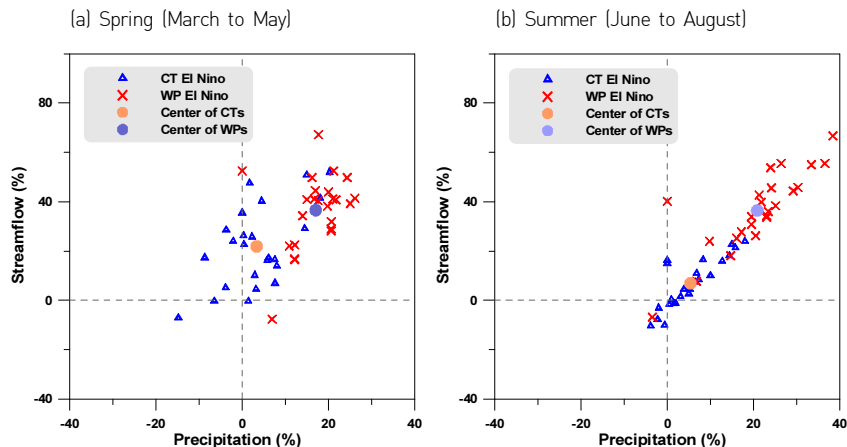


Figure 1 Percentage anomalies (departures from 1971-2000 normals) showing changes between precipitation and streamflow during the (a) Spring (MAM) and (b) Summer (JJA) seasons under different ENSO types (e.g., CT/WP El Niño) in the Korean Han River basin and its sub-watersheds.



Table 1 Summary statistics for seasonal variability associated with different ENSO types for the Han River basin.

| ENSO | Statistics | Spring (MAM) | | Summer (JJA) | |
|------------|---------------------------------|---------------|------------|---------------|------------|
| | | Precipitation | Streamflow | Precipitation | Streamflow |
| CT El Niño | Average Change (%) | 3.47 | 5.59 | 21.83 | 6.85 |
| | Significant ($\alpha=0.10$) | NA | NA | 4/23 | NA |
| | CV | 0.20 | 0.44 | 0.30 | 0.69 |
| WP El Niño | Average Change (%) | 17.80 | 21.75 | 36.51 | 36.39 |
| | Significant ($\alpha = 0.10$) | 2/23 | 10/23 | 8/23 | 14/23 |
| | CV | 0.54 | 0.24 | 0.89 | 0.30 |

* NA indicates that data were not available.

** CV is the ratio of the standard deviation to the mean.

Keywords: Hydroclimate, ENSO, CT El Niño, WP El Niño, Han River basin

Research work II : Changes of tropical cyclone activities during cold-tongue and warm-pool El Niño phases and local impacts on the Korean Peninsula

ABSTRACT

Tropical cyclones (TC), also known as typhoons, in the Western North Pacific (WNP) are an important hydrometeorological factor that drives changes in summer rainfall patterns over East Asia (EA). Tropical cyclones in the WNP can affect EA regions either directly or indirectly, and damage from associated extreme rainfall events is gradually increasing. Extreme rainfall can have adverse effects on the structure and function of river ecosystems; therefore, these types of impacts need to be examined more closely. Subsequently, this study examined the characteristics of cyclone activity during cold-tongue (CT) and warm-pool (WP) El Niño events, and analyzed the local characteristics of the corresponding rainfall over the Korean Peninsula (KP) during the summer. The results obtained through comparisons with all typhoons (1966–2007) affecting the KP region indicate that typhoons occurring during CT El Niño years were located in southern areas (14.3°N, 140.6°E), and typhoons occurring during WP El Niño years were located in southeastern areas (14.3°N, 143.2°E). The TC-induced summer rainfall in five major river basins of Korea decreased by -3.94% from normal levels (1966–2007) during CT El Niño years, and increased by 33.92% during WP El Niño years. While the results of this study were based on relatively short-term observations and small sample sizes, the data do suggest that TC activities affect the KP and differences in TC-induced rainfall occur during CT and WP El Niño phases. Such findings may be useful for making mid- to long-term water resources forecasts, preparing flood control and disaster prevention plans, helping communities to adjust to a changing climate, and reducing typhoon-related damages.

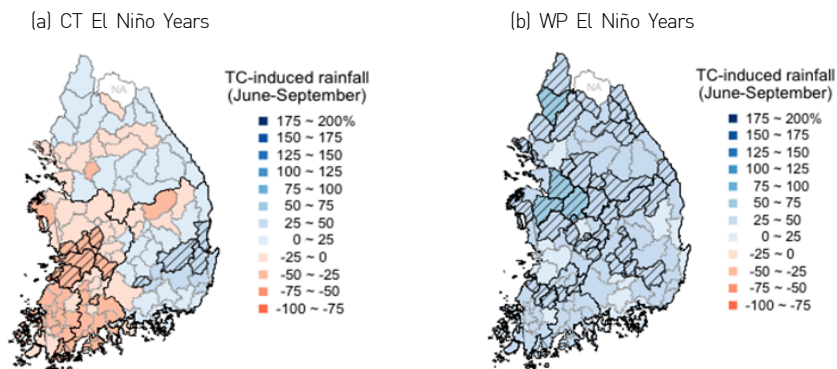


Figure 2 Composite anomalies of TC-induced rainfall during CT/WP El Niño years. The hatched polygons indicate statistically significant changes in TC rainfall based on the 10% significance level. The term NA in the map means that data were not available for this location.



Table 2 Summary statistics for seasonal variability of TC-induced rainfall during the months of JJAS and TC-induced heavy rainfall (>50mm/day) during CT/WP

| El Niño Type | Statistics | TC Induced Rainfall | | | | | Heavy Rainfall | | | | |
|--------------|---|---------------------|-------|-------|------|--------|----------------|-------|-------|------|--------|
| | | Han. | Nak. | Geum. | Sum. | Yeong. | Han. | Nak. | Geum. | Sum. | Yeong. |
| CT | Significant Change (%) ($P < 0.10$) | 0.0 | 11.6 | 4.1 | 7.6 | 22.4 | 8.8 | 25.3 | 37.8 | 17.2 | 46.2 |
| | Significant Stations (#) ($P < 0.10$) | 0/27 | 6/33 | 2/21 | 2/15 | 3/14 | 3/29 | 10/33 | 6/21 | 4/15 | 5/14 |
| | <i>CV</i> | 0.40 | 0.45 | 0.42 | 0.47 | 0.49 | - | - | - | - | - |
| WP | Significant Change (%) ($P < 0.10$) | 58.7 | 38.1 | 38.2 | 17.3 | 6.7 | 37.0 | 16.5 | 37.4 | 24.1 | 48.4 |
| | Significant Stations (#) ($P < 0.10$) | 15/29 | 13/33 | 8/21 | 2/15 | 1/14 | 29/9 | 33/7 | 21/7 | 4/15 | 5/14 |
| | <i>CV</i> | 0.23 | 0.33 | 0.28 | 0.34 | 0.38 | - | - | - | - | - |

* *CV* is the ratio of the standard deviation to the mean.

Keywords: CT/WP El Niño, Tropical Cyclone, Western North Pacific, Summer Rainfall

Research work III : Integrated flood risk index in a changing climate

ABSTRACT

In this study, an integrated flood risk index (IFRI) was developed using information on hydrological, socio-economic, and ecological components to assess watershed-based flood hazards and vulnerability in the Korean Han River basin, which is a region where flood disasters frequently occur. In total, this study used 15 indicators to create an IFRI map for the region, and 5 categories of flood risk were distinguished: “very high,” “high,” “medium,” “low,” and “very low.” The results, which were presented in ternary diagrams to illustrate the relative importance of the three different components, show that urban areas in the Korean Han River basin have experienced a decrease of 1.0% in terms of the hydrologic component. However, the socio-economic and ecological components have increased by 3.2% and 4.4%, respectively. In rural areas, an increase of 4.8% was found in the hydrologic component alongside decreases in the socio-economic (1.6%) and ecological (2.2%) factors. In addition, the IFRI map shows that 20.02% of the total area of the Han River Basin was classified as having “very high” or “high” flood risk; the size of this high-risk zone has increased significantly by since 1990. This study also evaluated flood risks according to the different phases of conditions, and the results from the analysis indicate that flood risks were worse during strong cold-tongue (CT) and warm-pool (WP) El Niño years. Further analyses of possible factors that affect the vulnerability and resilience of communities to flood hazards in the Han River basin should be conducted on the basis of this research. Accordingly, the results from this study may provide useful data for reducing flood risks in developing areas that are experiencing.

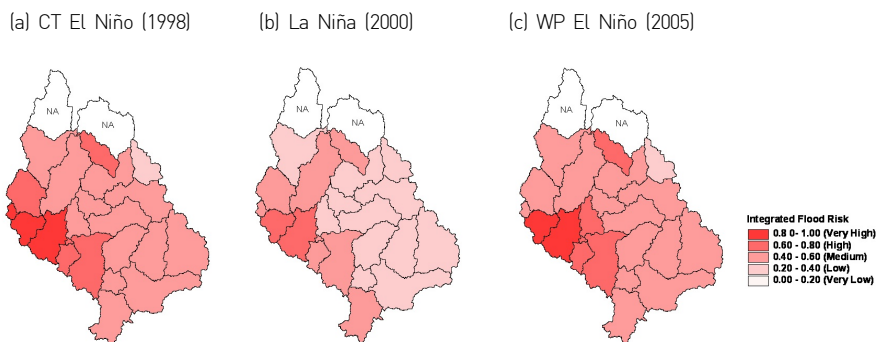


Figure 3 Assessment of the integrated flood risk index (IFRI) over the Han River basin, Korea. (a) shows the strongest CT El Niño phase in 1998. (b) shows the strongest La Niña phase in 2000, and (c) shows the strongest WP El Niño phase in 2005.



Table 3 Classifications for the integrated flood risk index and coverage during the different phases of El Niño and La Niña.

| Integrated Flood Risk Index Ranges | Classification | Coverage [%] | | |
|------------------------------------|----------------|--------------|---------|------------|
| | | CT El Niño | La Niña | WP El Niño |
| 1.00 - 0.80 | Very High | 8.6 | 0.0 | 8.1 |
| 0.80 - 0.60 | High | 15.2 | 8.1 | 13.0 |
| 0.60 - 0.40 | Medium | 73.0 | 29.6 | 75.8 |
| 0.40 - 0.20 | Low | 3.2 | 62.3 | 3.2 |
| 0.20 - 0.00 | Very Low | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

Keywords: Integrated flood risk index, hazard, risk, vulnerability, Han River basin

CHAPTER I : ENSO 패턴 변화에 따른 한반도 수문 변동 영향분석: 한강유역을 대상으로

ABSTRACT

수자원의 효율적인 예측 및 관리와 안정적인 용수공급을 위하여 수문기상인자와 수문자료간의 관계를 규명하는 일은 매우 중요하다. 본 연구에서는 대기 순환패턴 및 수문 환경변화에 영향을 미치는 주요인자인 El Niño-Southern Oscillation (ENSO)의 서로 다른 형태인 Warm-pool El Niño, Cold-tongue El Niño에 따른 ENSO decaying해의 한강유역의 봄철(MAM: March to May)과 여름철(JJA: June to August) 수문변량의 변화특성을 분석하였다. 분석결과 봄철 강수량의 경우 WP El Niño 해에 증가추세를 보이고 있으며, 강수의 변동특성이 크게 나타났다. 또한 여름철 강수량의 경우 CT El Niño 해에는 대체로 건조한 경향을 보이거나 WP El Niño 해에는 대부분 유역에서 습한 경향을 보였으며 여름철 강수의 변동성은 매우 작은 것으로 분석되었다. 봄철 유출량의 경우 CT El Niño 해와 WP El Niño 해에 모두 습한 경향을 보이고 있으며, WP El Niño 해에 한강 남부 대부분 유역에서 유출량의 변화가 통계적으로 유의한 결과를 보였다. 여름철 유출량의 경우 CT El Niño 해에는 대부분 유역에서 감소추세를 보이고 있으나 변동특성은 큰 것으로 분석되었으며, WP El Niño 해에는 거의 모든 유역에서 증가추세를 보이며 13개 중권역에서 통계적으로 유의한 결과가 나타났으나 유출의 변동특성은 작은 것으로 분석되었다. 따라서 새로운 형태의 CT El Niño와 WP El Niño는 각각 한반도 한강유역의 봄철과 여름철 수자원 변동성에 민감하게 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 본 연구의 결과는 우리나라와 같이 수자원의 계절적 변동과 불확실성이 큰 지역에서의 안정적인 수자원 확보 및 용수공급을 위한 기초자료로 활용이 가능할 것이다. 또한 추후 수문기상인자와 수문변량간의 대규모 기후패턴변화를 고려한 추계예측모형 개발과, 지역규모 수자원 계절예측시스템과 연계하여 본 연구의 결과를 활용한다면 수자원 정책 결정자들의 의사결정지원을 위한 도구로 활용이 가능할 것이다.

핵심용어 : 수문기상, ENSO, CT El Niño, WP El Niño, 한강유역

1. 서론

수문기상인자(hydrometeorological variables)의 계절적 변동특성은 전지구적 기상 현상 및 기후특성 변화와 밀접한 관련이 있으며, 수자원의 효율적인 예측 및 관리를 위해서는 기상인자와 수문자료(강수량, 유출량 등)간의 관계를 규명하는 일이 매우중요하다 (Horel and Wallace 1981; Pizarro and Lall 2002; Kim et al. 2012a; Yoon et al. 2013). 이러한 지역적 수문 변동은 독립적으로 발생하기보다 수문순환과정에서 나타나는 상관성에 기초하며, 유역의 수문특성 변화를 발생시키는 몇 가지 가능한 원인으로는 El

Niño–Southern Oscillation(ENSO)현상으로 알려진 비정상적인 해수면온도(SST; sea surface temperature)의 분포나 기후시스템의 비선형적 거동을 들 수 있다(Piechota and Dracup 1996; Piechota et al. 1998). 여러 연구에 의하면 대기 순환패턴 및 수문 환경변화에 영향을 미치는 주요인자인 ENSO는 강수량과 유출량의 계절적 변동과 밀접한 상관성이 있는 것으로 알려 진바 있다(Schonher and Nicholson 1989; Gershunov et al. 1999; McPhaden et al. 2006; Weng et al. 2007; Yoon et al. 2013). 특히 Weng et al.(2007)과 Feng et al.(2010)의 연구에 의하면 El Niño 현상이 전 세계 많은 지역에 걸쳐 대규모 기후패턴 및 수문순환 변화에 유의할 만한 영향을 미치고 있음을 밝힌바 있다.

그러나 최근의 연구는 지구온난화 및 기후변화의 영향으로 대규모 해수면온도 상승과 하강의 전형적인 패턴이 변화하고 있음을 시사하고 있으며, 태평양 연안 국가의 연구자들을 중심으로 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Weng et al. 2007; Kao and Yu 2009; Yeh et al. 2009; Na et al. 2011). 1970년대 후반을 전후로 El Niño의 주기(frequency)와 강도(intensity)의 변화뿐 아니라 El Niño의 발생 위치(location)가 변화되고 있으며, 최근 인간 활동과 대기 중의 CO₂ 농도의 증가로 인한 지구온난화는 El Niño 현상의 변화를 가중시키는 요인으로 작용하고 있다는 연구결과가 발표되었다(Ashok and Yamagata 2009). 특히 중앙태평양의 해수면온도가 이상적으로 상승하는 El Niño Modoki 사상은 최근에 올수록 그 발생빈도가 더 증가하였으며(Ashok et al. 2007; Ashok and Yamagata 2009; Pradhan et al. 2011) 지구온난화가 계속되는 미래 기후상태에서 El Niño Modoki 사상이 보다 빈번히 발생하여 그 영향이 더욱 커지고 강해질 것이라 전망하고 있다. 특히, Yeh et al.(2009)의 연구에 의하면 기존 El Niño와 다른 형태의 새로운 El Niño가 지구온난화와 연관성이 있으며 미래 기후변화 시나리오 자료를 바탕으로 분석한 결과, 향후 기후변화에 따라 새로운 형태의 El Niño의 발생 빈도가 증가할 수 있음을 밝힌바 있다. 아직 새로운 형태의 El Niño 발생에 대한 정확한 메카니즘 분석은 이루어지지 않았으나 동북아시아를 비롯한 한반도 영역에 영향을 미치고 있음은 명백한 사실일 가능성이 크다. 대표적으로 새로운 형태의 El Niño 구분에 대한 분석은 Kug et al.(2009)의 연구를 들 수 있으며, Niño3와 Niño4 지역의 해수면온도 관측자료의 변천관계(transition mechanism)를 바탕으로 서로 다른 형태의 El Niño를 구분한바 있다. 또한

Feng et al.(2010)은 Niño3와 El Niño Modoki Index(EMI)를 이용하여 중국의 봄철과 여름철 강수량변화 특성을 분석하였으며, Ren and Jin(2011)은 Kug et al.(2009)의 해수면온도 관측자료의 구분 방법을 바탕으로 Cold-Tongue(CT) 형태의 El Niño와 Warm-Pool(WP) 형태의 El Niño로 구분하여 지체상관(lagged-correlations) 분석을 통한 기존의 Niño3, Niño4의 ENSO자료와 상관성을 분석하였다.

한반도를 대상으로 한 국내 수문기상인자와 El Niño 관련 대표적 연구로는, 강인식(1998)은 El Niño가 발생한 겨울에 우리나라 겨울철 기온이 평년 이상의 분포를 보이며 그 다음해 여름철 강수량이 증가함을 제시하였으며, 차은정 등(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 장마역시 늦게 시작됨을 밝혔다. 또한, 윤진희와 예상욱(2009)은 1950-2007년 동안의 Niño3와 Niño4 해수면온도 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 정의하여 1990년 이후에 CP-El Niño의 발생 빈도가 증가하는 특징을 보이며 여름철 열대 중태평양 지역의 높은 표층수온의 선형 경향성과 밀접한 상관성이 있음을 밝혔으며, Kug et al.(2010)은 두 가지 형태의 El Niño 사상과 한반도의 기후변동에 관한 통계적 분석결과 El Niño 발달기(developing year)에 CT El Niño해에는 한반도 대부분 지역에서 차가운 기후특성이 있으며, WP El Niño해에는 따뜻한 기후특성이 있음을 제시한바 있다. Kim et al.(2012b)은 El Niño Modoki일 때 한반도 겨울철 강수량의 증가경향과 동아시아지역의 원격상관(tele-connection)을 규명한바 있으며, 윤선권 등(2013)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 밝힌바 있다.

현재까지 전통적인 El Niño 자료인 Niño3와 Niño4의 해수면온도지수를 이용하여 우리나라 주변 및 동아시아 인근 해역의 온도와의 상관성 및 기후변동성 연구는 활발히 이루어져왔으나, El Niño의 새로운 유형 및 서로 다른 형태의 ENSO가 고려되어 우리나라의

수문변량(hydrological variable)에 미치는 영향에 대한 연구는 많지 않다. 따라서, 본 연구에서는 상기 연구동향조사에서 기술한 Ren and Jin(2011)의 연구결과를 바탕으로 서로 다른 형태의 ENSO인 CT El Niño와 WP El Niño를 구분하고, 이 새로운 형태의 해수면 온도지수가 우리나라의 봄철(March to May, MAM)과 여름철(June to August, JJA) 수문변동에 미치는 영향을 분석하여 기후특성을 고려한 수자원 정책 반영의 기초자료로 활용하고자 한다. 본 연구를 통하여 관심 있게 살펴보고자하는 내용을 정리하면 다음과 같다. (1) 대규모 ENSO 패턴 변화에 따른 한반도 지역수문 특성변화와 수문기상학적 원격상관 관계 규명 (2) 서로 다른 형태의 El Niño가 한반도 수환경변화에 미치는 주목할 만한 영향과 장기적인 변동특성분석, 그리고 (3) 새로운 형태의 기후인자와 한반도 수자원간의 관계 규명을 통한 추계예측모형(Stochastic Forecasting Model) 구축 기반기술개발 및 계절예측 가능성 평가를 통한 효과적인 수자원 관리, 지속적인 용수공급방안 수립을 위한 실무활용 방안 수립에 관한 부분이다. 본 연구의 결과는 우리나라와 같이 봄철 가뭄과 여름철 홍수 등 뚜렷한 계절 특성을 보이는 지역과 용수확보의 어려움으로 인한 장기적인 수자원 관리·예측과 유역차원의 안정적인 용수공급이 요망되는 지역에서, 수자원 정책결정을 위한 기초자료로 활용이 가능할 것이다.

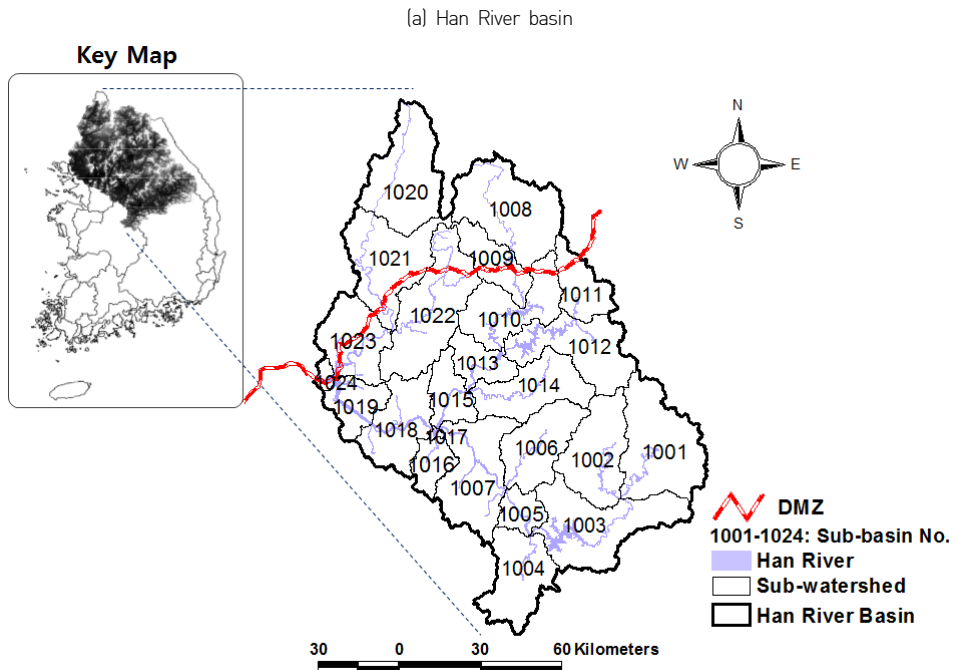
2. 대상유역 및 자료

2.1 대상유역

한강유역은 한반도의 중앙에 위치하고 있으며 위도 $36^{\circ}30'N - 38^{\circ}55'N$, 경도 $126^{\circ}24'E - 129^{\circ}02'E$ 에 해당된다. 한강유역의 유역면적은 $26,356\text{km}^2$, 유로연장 481.7 km이며, 이는 남한 면적의 약 23%에 달한다. 유역의 평균경사는 18.81%, 유역평균고도 405.95m로 유역의 동쪽 대부분은 경사가 급한 산지와 계곡으로 이루어져 있으며, 서쪽은 경사가 완만한 평지로 이루어져 있다. 한강유역의 수자원특성을 살펴보면 연평균 강수량은 1,253mm로 한국의 연평균 강수량 1,274mm 보다 약 1.6% 작으며 연평균 강수량의 증가경향은 3.5%로 분석되었다. 또한 한강유역은 수도권과 서울 등 대부분의 주요 도시들을 포함하고 있으며 총인구와 산업밀도의 합 또한 급속도로 증가하고 있으며, 2007년 유역

조사 결과에 따르면 총 홍수면적은 260,329.8ha, 홍수피해액은 7,808.5억원에 달하고 최근에 올수록 그 피해규모와 피해액이 점차 증가하고 있는 추세이다. 한강유역의 인구는 약 1,700만명으로 남한 총 인구의 34.0%에 해당하여 유역특성상 안정적인 수자원 확보와 지속적인 용수공급이 절실히 필요한 유역이라 할 수 있다.

다음 Figure 1a는 한강유역의 위치도와 유역을 중권역별로 구분하여 나타낸 결과이며, Figure 1b, 1c는 한강유역의 총 강수량과 유출량에 대한 월별 부분강수량 및 유출량을 나타내었다. Table 1은 24개 중권역 이름과 유역면적, 연평균 강수량과 봄철과 여름철 부분강수량(fractional flow) 산정 결과를 나타내었다. 한강유역의 여름철 강수의 경우 연평균강수량의 60.2%를 차지하여 우리나라 여름철 평균값 55.3%에 비하여 4.9% 크며, 봄철 강수의 경우 한강유역 14.4%, 우리나라 평균 18.1%로 우리나라 평균에 비하여 약 3.7% 작다, 따라서 집중호우에 의한 여름철 한강유역 강수집중과 봄철 가뭄이 다소 크게 발생할 수 있음을 확인할 수 있다.



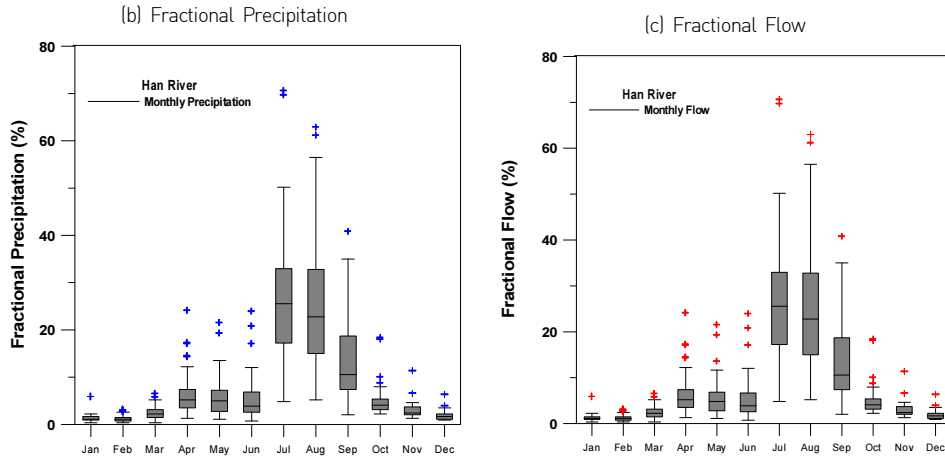


Figure 1 Location of the study area, monthly fractional precipitation, and flow. (a) Shows the Han River basin and its sub-watersheds, which are located in the center of the Korean Peninsula. (b) shows the monthly fractional precipitation, and (c) shows the monthly fractional flow.

Table 1 Hydrometeorological data for 24 sub-watershed areas over the Han River basin in South Korea.

| ID | Names of the 24 Sub-Watershed | Catchment Area | Annual Precipitation | Fractional Flow(MAM) | Fractional Flow(JJA) |
|------|-------------------------------|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | (km ²) | (mm) | (%) | (%) |
| 1001 | Namhan River Upstream | 2,447.9 | 1,240 | 17.3 | 47.2 |
| 1002 | Pyeongchang River | 1,773.4 | 1,294 | 15.5 | 56.2 |
| 1003 | Chungju Dam | 2,483.8 | 1,210 | 16.2 | 54.1 |
| 1004 | Dal Stream | 1,614.4 | 1,174 | 15.0 | 54.4 |
| 1005 | Chungju Dam Downstream | 524.4 | 1,202 | 15.8 | 59.0 |
| 1006 | Seom River | 1,491.0 | 1,298 | 11.5 | 60.7 |
| 1007 | Namhan River Downstream | 2,072.7 | 1,297 | 12.6 | 61.4 |
| 1008 | Kumgangsan Dam | NA | NA | 12.9 | 61.7 |
| 1009 | Pyeongwha Dam | 351.3 | 1,081 | 14.2 | 57.3 |
| 1010 | Chuncheon Dam | 1,587.4 | 1,186 | 16.4 | 62.5 |
| 1011 | Inbook Stream | 931.3 | 1,149 | 16.5 | 51.6 |
| 1012 | Soyang River | 1,852.0 | 1,251 | 17.7 | 55.1 |
| 1013 | Euiam Dam | 721.7 | 1,308 | 15.4 | 64.6 |
| 1014 | Hongcheon River | 1,566.0 | 1,302 | 16.3 | 63.0 |
| 1015 | Cheongpyeong Dam | 760.6 | 1,337 | 15.5 | 65.6 |
| 1016 | Kyeongang Stream | 561.1 | 1,266 | 16.1 | 62.5 |
| 1017 | Paldang Dam | 43.9 | 1,191 | 14.6 | 67.4 |
| 1018 | Han River in Seoul | 1,537.2 | 1,291 | 14.1 | 63.4 |
| 1019 | Han River in Goyang | 826.3 | 1,259 | 13.4 | 63.1 |

| ID | Names of the 24 Sub-Watershed | Catchment Area | Annual Precipitation | Fractional Flow(MAM) | Fractional Flow(JJA) |
|---------|-------------------------------|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | (km ²) | (mm) | (%) | (%) |
| 1020 | Gomitan Stream | 2,195.2 | 1,287 | 12.6 | 62.4 |
| 1021 | Upstream of Imjin River | 2,072.7 | 1,290 | 11.0 | 63.4 |
| 1022 | Hantan River | 2,452.2 | 1,292 | 11.4 | 62.9 |
| 1023 | Imjin River Downstream | 1,419.2 | 1,316 | 10.8 | 64.4 |
| 1024 | Hantan River Downstream | 146.4 | 1,306 | 11.5 | 60.7 |
| Average | | 1,358.0 | 1,253.4 | 14.4 | 60.2 |

* N/A represents that data is not available.

2.2 대상 자료

1) 수문 자료

본 연구에서 사용된 유역평균 강수량 자료와 유출량 자료는 1966-2007년의 42개년 기간 치 자료를 국가 수자원관리 종합정보시스템(WAMIS, <http://wamis.go.kr/>)에서 제공받아 사용하였다. 또한 유역 평균 강수량 자료는 한강유역 총 125개 관측지점을 대상으로 Thiessen polygon방법에 의하여 산출된 값이며, 유출량자료는 Precipitation Runoff Modelling System(PRMS)에 의하여 계산된 값이다. 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 유역단위 수문량의 변화특성 분석과 중·장기 수자원 계획을 세우는데 효과적이다.

2) ENSO 자료

현재 세계의 대기·해양 지수들은 미국의 National Oceanic and Atmospheric Administration(NOAA)을 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. 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). 유역단위 수문변량의 다양성과 대규모 대기순환패턴과의 관계규명을 위하여 Hadley Centre's의 해수면 온도 관측자료를 이용하였으며, HadISST 자료는 1° × 1°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).

3. 분석 결과

3.1 서로 다른 ENSO 분석

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 연구에서는 서로 다른 형태의 ENSO가 동북아시아지역의 봄철과 여름철 강수와 유출특성에 어떠한 영향을 미치는지 분석하기 위하여 한강유역을 대상으로 23개 중권역별 수문변량 자료를 바탕으로 Ren and Jin(2011)이 분류하였던 기준을 적용하여 1950-2011년까지의 62년 동안의 월별 Niño3와 Niño4 Anomalies를 바탕으로 CT El Niño와 WP El Niño를 구분하여 분석하였다. CT El Niño와 WP El Niño의 구분 방법은 다음 Eq. (1)과 같다.

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

여기서 N_3 와 N_4 는 각각 Niño3와 Niño4 지수를 의미하며, N_{CT} 는 Cold Tongue El Niño를 N_{WP} 는 Warm Pool El Niño를 의미한다. 또한 α 는 서로 다른 ENSO의 구분을 위한

보정상수 이다.

Ren and Jin(2011)이 분류하였던 기준을 적용하여 1950–2011년까지 CT El Niño 해와 WP El Niño 해로 구분하여, 5개의 강한 CT El Niño decaying해와 5개의 강한 WP El Niño decaying해를 구분한 결과는 다음 Table 2와 같다.

Table 2 Classification of strong CT and WP El Niño years

| El Niño Type | The Strong years during 1950-2011 |
|--------------|---|
| CT El Niño | 1972/1973, 1982/1983, 1986/1987, 1991/1992, 1997/1998 |
| WP El Niño | 1968/1969, 1990/1991, 1994/1995, 2002/2003, 2004/2005 |

수많은 양적 자료는 두 개 이상의 범주변수(categorical variable) 또는 분류기준에 따라 분류할 수 있는데 이때 우리는 이러한 변수들이 서로 독립적인가에 관심을 갖게 된다. CT El Niño와 WP El Niño의 구분을 위하여 Kug et al. (2009)은 Niño3, Niño4 Anomalies 관계를 이용하였다. 본 연구에서는 Scatter plot을 실시하여 Niño3와 Niño4의 Anomalies를 비교한 결과 0.77의 상관관계가 나타났으며, CT El Niño와 WP El Niño의 Anomalies를 비교한 결과 0.19의 상관관계가 나타났다. 따라서 서로 다른 수문기상자료의 독립성 범주변수 내에서 수문자료의 특성을 평가하기 위한 자료의 선택은 상관계수가 작게 나타난 CT El Niño와 WP El Niño로 구분하여 가공한 결과를 활용할 수 있다(Figure 2a, 2b).

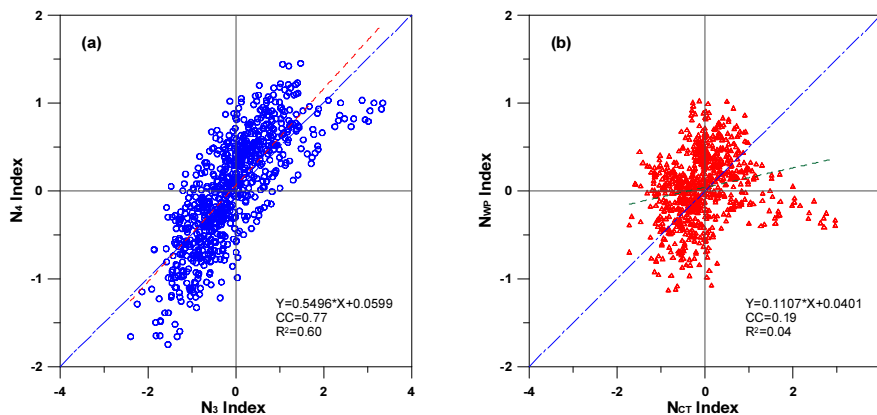


Figure 2 Scatter plots (a) for [a] N_3 and N_4 indices, and (b) N_{CT} and N_{WP} indices. The term CC denotes the correlations between the two indices in each panel.



다음 Figure 3a는 1950–2011년까지의 N_3 와 N_{CT} 의 시계열자료를 비교하여 나타낸 결과이며, N_3 와 N_{CT} 의 상관계수는 0.98로, 표준편차는 ± 0.6964 로 나타났다. 또한 Figure 3b는 N_4 와 N_{WP} 의 지수 산정결과를 비교하여 나타내었으며, N_4 와 N_{WP} 의 경우 상관계수가 0.86으로, 표준편차는 ± 0.3977 로 나타났다.

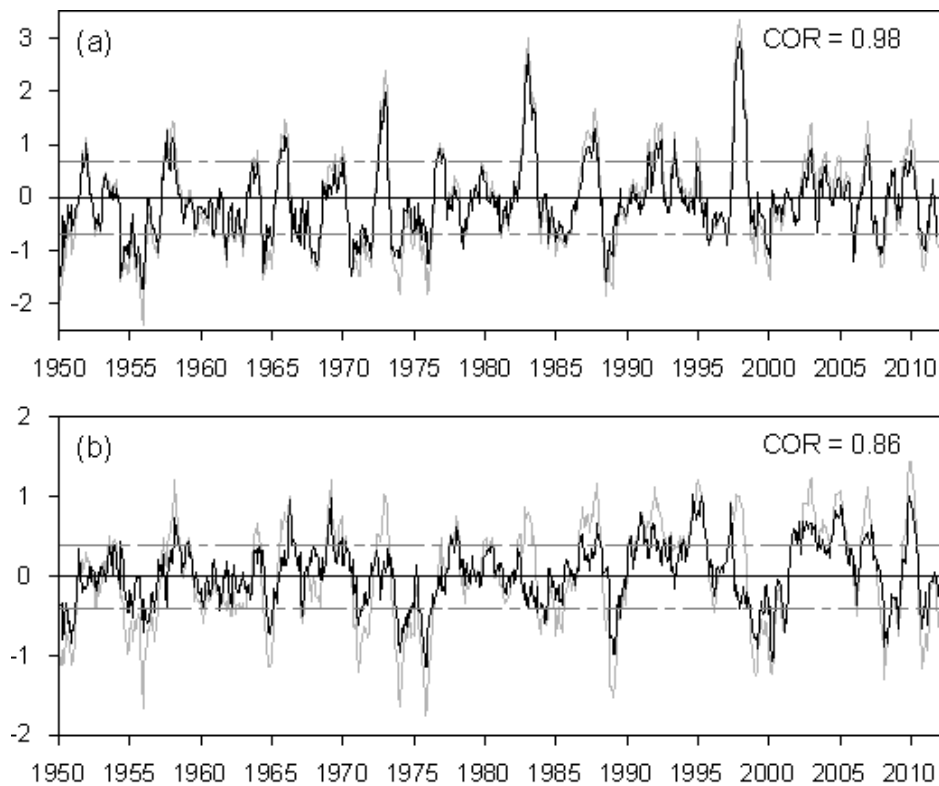


Figure 3 (a) Normalized time series of N_3 (grey) and N_{CT} (black) indices, and (b) those of N_4 (grey) and N_{WP} (black) indices. Dotted grey lines indicate one standard deviation for the N_{CT} and N_{WP} indices. The term COR denotes the correlations between the two curves in each panel.

3.2 대규모 기후패턴 분석

1) SSTA 분석 결과

다음 Figure 4는 El Niño가 시작되는 해의 12월(DEC)에서 그 다음해 2월(FEB)까지의 3개월 동안 Tropical Pacific 지역 해수면온도(sea surface temperature)의 1981-2010년 climatology에 대한 합성편차(composit anomaly, CA)를 나타내고 있다(data source: NCEP/NCAR Reanalysis, URL: <http://www.esrl.noaa.gov>). 전형적인 El Niño 해(CT El Niño)의 경우 평년에 비하여 비정상적으로 높은 해수면 온도가 남아메리카 페루연안의 동태평양에서부터 중앙태평양까지 길게 늘어서 분포하고 있음을 확인할 수 있으며, 같은 해에 평년보다 낮은 해수면 온도는 서태평양지역 전체에 걸쳐 발생하고 있음을 확인할 수 있다(Figure 4a).

반면 WP El Niño 해의 경우 평년에 비하여 비정상적으로 높은 해수면 온도가 중앙태평양(Central Pacific)지역에서 넓게 분포하고 있으며, 같은 해에 동태평양과 서태평양지역에서 평년보다 낮은 해수면 온도가 분포하고 있으나 전형적인 El Niño 해에 비하여 편차가 작음을 확인할 수 있다(Figure 4b). 서로 다른 형태의 El Niño 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 참고하기 바라며, 본 연구에서는 El Niño의 물리적 현상 진단을 다루기보다 서로 다른 ENSO 패턴 변화에 따른 한강유역의 강수량과 유출량과의 연관관계에 대한 분석으로 한정하고자 한다.

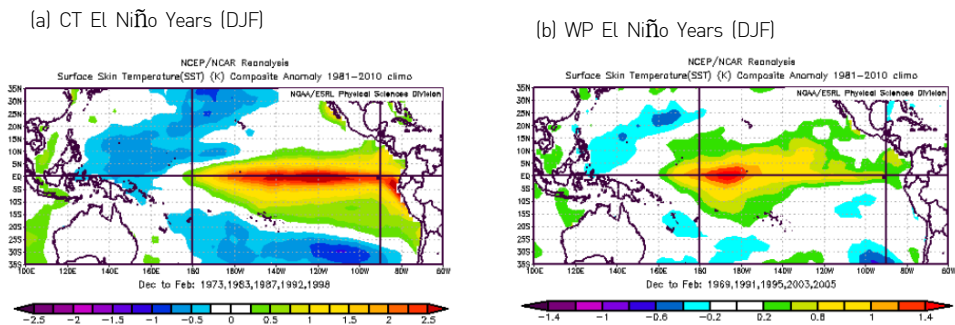


Figure 4 Composite sea surface temperature anomalies (SSTA) in the developing phases of (a) CT and (b) WP El Niño during December–January.



2) Global 강수패턴 분석 결과

다음 Figure 5는 NOAA의 GPCP(global precipitation climatology project, <http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/composites/printpage.pl>) 강수량에 대해서 한반도를 포함한 아시아 영역에서 El Niño가 쇠퇴하기 시작하는 해의 봄철(MAM)과 여름철(JJA) 강수량 변화의 CA를 CT El Niño 해와 WP El Niño 해로 구분하여 나타내었다. 또한 GPCP 자료가 1979년부터 현재까지의 값이 존재하므로 CT El Niño decaying해는 1983, 1987, 1992 그리고 1998년의 값만을 적용하였으며, WP El Niño decaying해는 1991, 1995, 2003 그리고 2005년의 값만을 적용하였다. 따라서 전체기간의 특성을 반영한 결과라기보다 최근 자료의 특성을 반영한 결과로 해석이 될 것이다.

Figure 5a, 5b에서 보는바와 같이 CT El Niño 해의 경우 북서태평양(WNP; Western North Pacific) 지역의 강수량은 감소하며 한반도 남쪽해상의 강수량은 증가 패턴이 있음을 확인할 수 있고, 한반도를 포함한 한강유역의 강수량 편차는 봄철의 경우 평년값을 유지하나 여름철의 경우 평년에 비하여 0.5mm/day 이상으로 6월-8월의 3개월 동안의 강수가 약 45mm정도 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, Figure 5c, 5d에서 보는바와 같이 WP El Niño 해에는 북서태평양 지역의 강수량은 봄철의 경우 증가패턴이 있으며, 여름철에는 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 한반도를 포함한 한강유역의 강수량 편차는 봄철의 경우 평년값을 유지하나 여름철의 경우 평년에 비하여 강수량 편차가 0.75mm/day 이상으로 6월-8월의 3개월 동안의 강수가 약 67.5mm정도 증가하는 것으로 분석되었다.

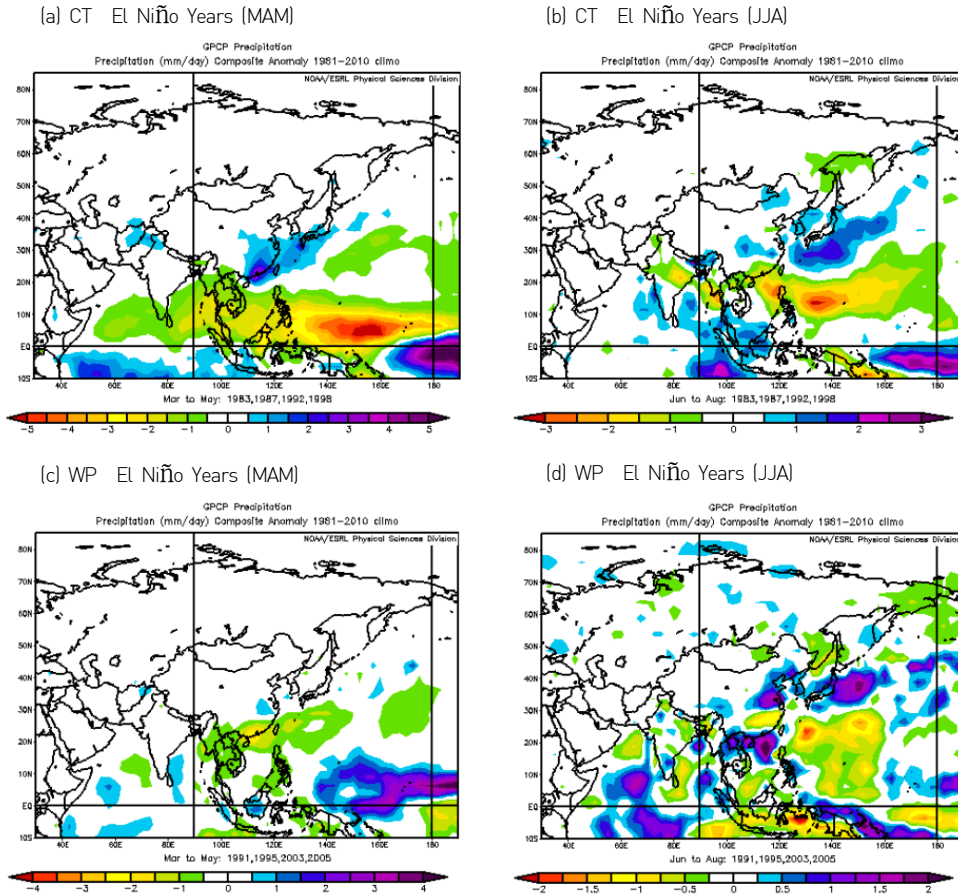


Figure 5 Composite anomalies of GPCP seasonal precipitation (MAM: March to May, JJA: June to August) during (a, c) CT and (b, d) WP El Niño years.

다음 Figure 6는 GPCC(Global Precipitation Climatology Center) Precipitation Full V6(전 세계 67,200 지점관측 자료의 Quality-Controlled 월강수량) 자료를 합성한 봄철(MAM)과 여름철(JJA) 강수량 변화의 CA를 CT El Niño decaying해와 WP El Niño decaying해로 구분하여 나타내었다. 분석결과 CT El Niño 해에는 봄철과 여름철 모두 평년상태를 유지하는 것으로 분석되었으며(Figure 6a, 6b), WP El Niño 해의 봄철에는 약 30-45mm, 여름철에는 약 60-90mm의 강수량 증가가 있는 것으로 분석되었다(Figure 6c, 6d). 따라서 GPCC Precipitation Full V6 강수 CA를 통한 대규모 기후환경을 분석한

결과, El Niño가 발생한 해의 여름철에는 한강유역의 강수량 증가 패턴이 나타날 것으로 분석되며, 특히 WP El Niño가 발생할 것으로 예상되는 해에는 평년에 비하여 한강유역의 봄철과 여름철 강수량의 증가 패턴이 나타날 가능성이 있을 것으로 진단된다.

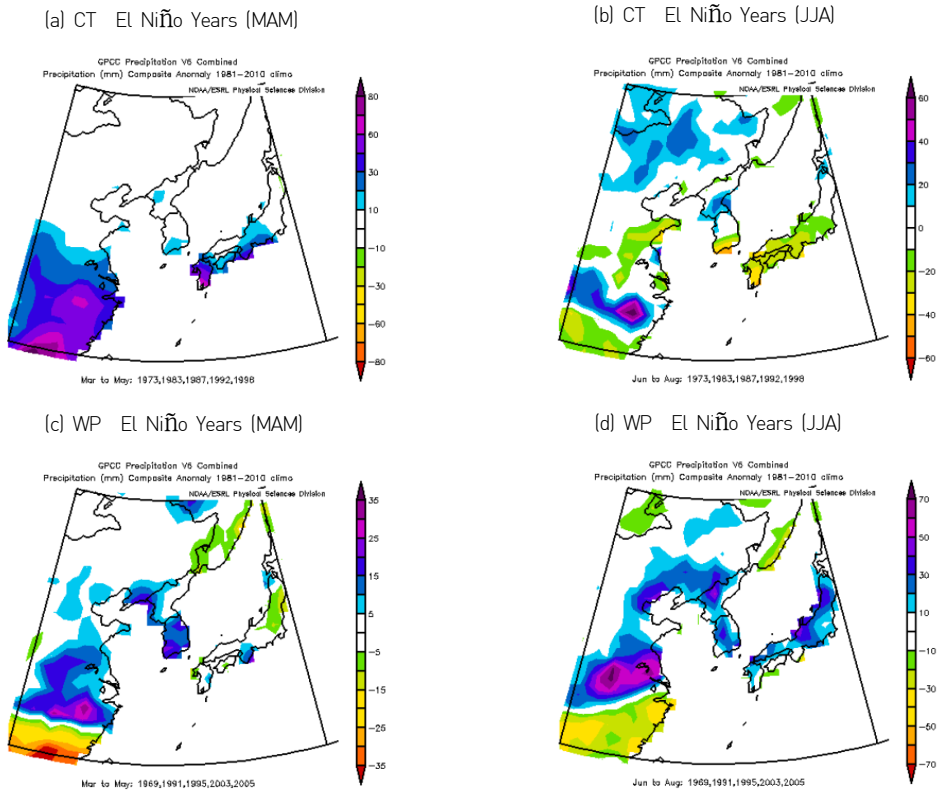


Figure 6 Composite anomalies of GPCP precipitation and V6 combined seasonal (MAM: March to May, JJA: June to August) precipitation data during the CT and WP El Niño years.

3.3 계절 수문특성 분석

1) 계절 강수 특성 분석

동북아시아 지역에 위치한 한반도는 아시아 몬순의 영향으로 여름철에 강수량이 집중되어 발생하며 봄철을 비롯한 나머지 계절에는 주로 가뭄이 빈번하게 발생한다. 실제 한강

유역 24개 중규모 유역을 대상으로 1966-2007년까지의 연평균 강수량과 봄철 강수량 평균, 여름철 강수량 평균을 산정하여 비교·분석한 결과, 한강유역의 연평균 강수량은 1,081-1,337mm의 값을 갖고 있으며 24개 중권역 평균 강수량은 1,253.3mm로 나타났으며, 이중 여름철(JJA) 강수량은 60.2%로 분석되었다.

다음 Figure 7은 한강유역의 중권역별 연평균 강수량과 봄철(MAM) 강수량, 여름철(JJA) 강수량을 구분하여 나타내었다. 한강유역의 연평균 강수량의 공간적 분포 특성은 비교적 고르게 분포하나 한강 중부 일부유역과 서부 유역에서 강수량이 크게 분포함을 확인할 수 있다(Figure 7a). 다음으로 한강유역의 봄철 강수 특성을 분석한 결과 봄철 강수량은 167-225mm의 값을 보이며, 24개 중권역 평균은 200.5mm로 나타나 한강전체 유역 강수량 평균의 16.0%를 차지하였다. 한강유역의 봄철 평균 강수량의 공간적 분포 특성 분석결과 24개 중권역에서 비교적 고르게 분포하나 한강유역 남부지역에 주로 집중되어 분포함을 확인할 수 있다(Figure 7b). 또한 한강유역의 여름철 강수 특성을 분석한 결과 여름철 강수량은 670-852mm의 값을 보이며, 24개 중권역 평균은 760.2mm로 한강유역 전체의 60.6%를 차지하여 여름철 강수집중을 확인하였다. 한강유역의 여름철 평균 강수량의 공간적 분포는 한강 북서부 지역과 서울을 비롯한 한강 중부지역에서 크게 나타남을 확인할 수 있다(Figure 7c).

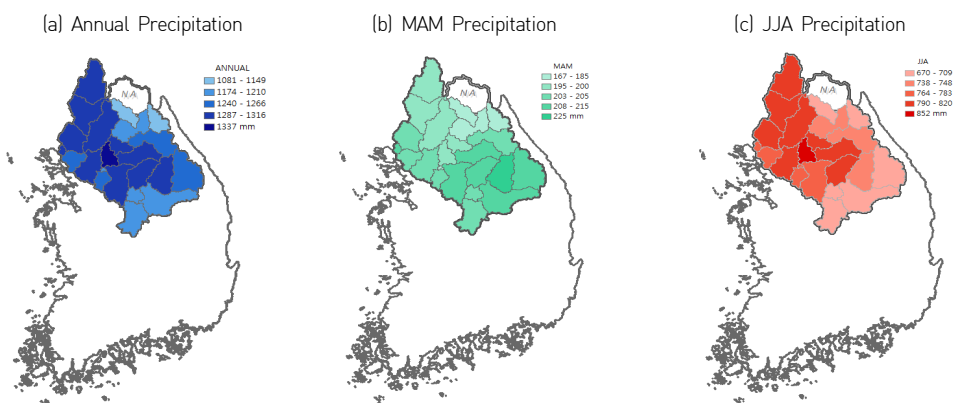


Figure 7 Annual total precipitation and seasonal mean precipitation over watersheds in the Han River basin. (a) Shows the annual total precipitation, while (b) and (c) show the seasonal precipitation during the spring (March, April, and May) and summer (June, July, and August) seasons, respectively. Note that NA indicates that data were not available.

2) 계절 유출 특성 분석

우리나라하천은 계절에 따른 유량변동이 심하며 하천의 유황이 매우 불안정하여 하상 계수(coefficient of river regime)가 크다. 한강의 경우 하상계수가 393에 달하며 약 60%의 유출량이 여름철에 집중되어 발생한다. 이는 동고서저형의 지형적인 영향과 더불어 여름에는 강수가 집중되고 봄철과 겨울철에는 강수량이 적은 영향 때문이기도 하다. 따라서 수력발전과 수운교통에 불리하고 여름철 홍수피해가 커서 수자원 확보와 효율적인 이용에 어려움이 따른다. 본 연구에서는 대표적인 해수면온도 기후인자인 ENSO패턴 변화에 따른 한강유역의 계절 유출량의 변화특성 분석을 통하여 봄철과 여름철의 백분위 변화인 부분유출량(fraction flow)과 유출량의 변동폭(CV: coefficient of variation)을 산정하였다.

다음 Figure 8은 한강 중권역의 봄철과 여름철의 계절부분유출량의 부분유출량과 변동폭을 나타내었다. 먼저 한강유역의 봄철유출량의 특성을 분석한 결과 봄철의 중권역별 부분유출량은 10.8-17.7%의 범위로 산정되었으며, 한강의 동부 유역과 중부 일부 유역에서 부분유출량이 크게 발생하였고, 24개 전체 유역평균 계절부분유출량은 14.4%로 분석되었다(Figure 8a). 또한 한강유역 30년(1971-2000년)평균 봄 유출량 대비 각각의 중권역별 봄철 유출량의 변동폭을 분석한 결과 최대 변동폭은 0.83, 최소 변동폭은 0.44, 평균은 0.64로 나타나 봄철의 경우 유출량의 변동이 비교적 큼을 확인할 수 있다. 봄철 유출량 변동폭의 공간적 분포특성은 한강전체 유역의 북서부 지역에서 크게 발생하는 것으로 분석되었다(Figure 8c).

다음으로 한강유역의 여름철 유출량의 경우 한강 북서부 유역에서 계절부분유출량이 크게 발생하였으며(Figure 8b), 중권역별 부분유출량은 47.2-67.4%의 범위로 산정되었고 유역평균 계절부분유출량은 60.2%로 산정되었다. 또한 한강유역 30년 평균 여름 유출량 대비 각각의 중권역별 여름철 유출량의 변동폭을 분석한 결과 최대 변동폭은 0.33, 최소 변동폭은 0.19, 평균값은 0.23으로 24개 전체 소유역에서 고르게 분포하여 한강의 중권역별 여름철 유출량의 변동은 그리 크지 않음을 확인할 수 있다. 또한 한강유역의 중권역별 여름유출량 변동폭의 공간적 분포 특성은 한강 남쪽유역에서 다소 큰 변동특성을 보이고 있음을 확인하였다(Figure 8d). 이러한 한강유역 유출량의 계절 편중과 지역적

편차는 종합적인 수자원 관리와 효율적 운용계획을 어렵게 하며, 최근의 기후변화와 기상 이변 등 수문기상 예측에 대한 불확실성은 이를 더욱 가중시키는 요인으로 작용할 수 있다.

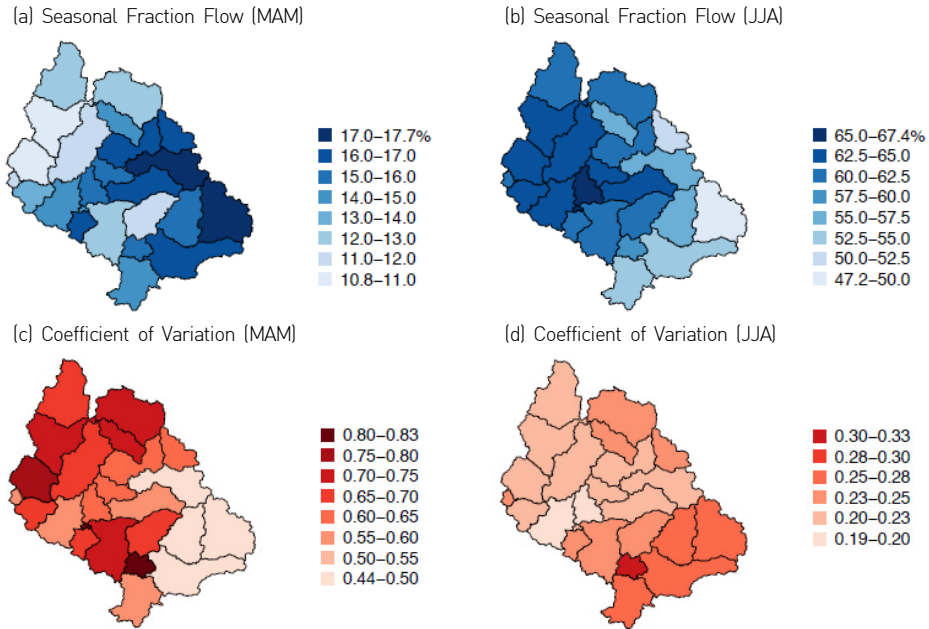


Figure 8 Percentage change of seasonal fractional flows and the coefficient of variation during the (a and c) spring (March to May) and (b and d) summer (June to August) seasons over the Han River basin, Korea. (a and b) Show the seasonal fractional flows, and (c and d) represent the coefficient of variations, where the $CV = \text{standard deviation} / \text{mean}$.

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 특성을 최대한 살리면서 상당부분 좋은 결과를 얻어낼 수 있다(Lall et al, 1993; Moon and Lall 1994). 일반적으로 핵밀도함수 추정식은 모든 실수 x 에 대하여 다음 Eqn. (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 실 관측치, 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.

핵밀도함수법에서 광역폭 h 의 선택은 매우 중요한 문제이며, h 의 값은 핵함수 추정법에 있어서 매우 중요하지만 실제로는 정확하게 구하기가 쉽지 않다. 본 연구에서 적용한 광역폭의 결정은 Solve the equation plug in(SJPI)방법을 사용하였으며, 이 방법은 기준이 되는 미지의 $R(\hat{f}_h'')$ 의 추정치를 산정하여 최적의 광역폭을 결정하는 방법으로 Sheather and Jones(1991)에 의해 다음과 같은 Eqn. (3)과 같이 제시되었다.

$$h = \left[\frac{R(K)}{nR(\hat{f}_{g(h)}'') \left(\int x^2 K(x) dx \right)^2} \right] \quad (3)$$

여기서, h 는 광역폭이며, n 은 자료의 개수, x 는 임의의 실수, $K(\bullet)$ 는 핵밀도함수, $R(\bullet)$ 는 최적의 광역폭 결정을 위한 미지의 추정치를 의미한다.

CT El Niño와 WP El Niño에 의한 한강 유역 강수량과 유출량의 민감도(sensitivity)와 변동성(variability)의 분석을 위하여, 5개의 강한 CT El Niño 해와 5개의 강한 WP El Niño 해로 구분하여 Kernel을 이용한 경험적 확률밀도함수(empirical PDF)를 산정하였다. 다음 Figure 9a와 9b에서 보는 바와 같이 CT El Niño 해와 WP El Niño 해에 봄철과 여름철 강수량 및 유출량의 분포특성이 확연히 다르게 나타남을 확인할 수 있다. 봄철의 경우 WP El Niño 해보다 CT El Niño 해에 강수량 및 유출량의 경험적 확률밀도함수의 첨두가 높고 분산이 작아 수문변량의 민감도와 변동성이 줄어들어 수자원 확보 및 관리에 이로울 것으로 예상된다.

반면, WP El Niño 해에는 강수량과 유출량의 경험적 확률밀도함수의 첨두가 낮고 분산이 큰 분포특성을 띠고 있어 수문변량의 민감도와 변동성이 커서 수자원 확보 및 관리가 어려울 것으로 예상된다(Figure 8a). 또한, 여름철의 경우는 봄철과는 대조적으로 WP El Niño 해의 강수량 및 유출량의 경험적 확률밀도함수의 첨두가 높고 분산이 작아 수문변량의 민감도와 변동특성이 줄어들어 수자원 확보 및 관리에 이로울 것으로 예상된다. 반면에 CT El Niño 해에는 강수량과 유출량의 경험적 확률밀도함수의 첨두가 낮고 분산이 커서 수문변량의 민감도와 변동특성이 커서 수자원 확보 및 관리가 어려울 것으로 예상된다(Figure 9b). CT El Niño와 WP El Niño해의 경험적 확률밀도함수에 의한 한강 유역 강수량과 유출량의 민감도와 변동성을 분석한 결과 봄철에는 WP El Niño에 의한 수문변량의 변동특성이 클 것으로 예상되며, 여름철에는 CT El Niño에 의한 수문변량의 변동특성이 클 것으로 예상되어 지속적인 수자원확보 및 관리를 위한 유역차원의 노력이 필요할 것으로 사료된다.

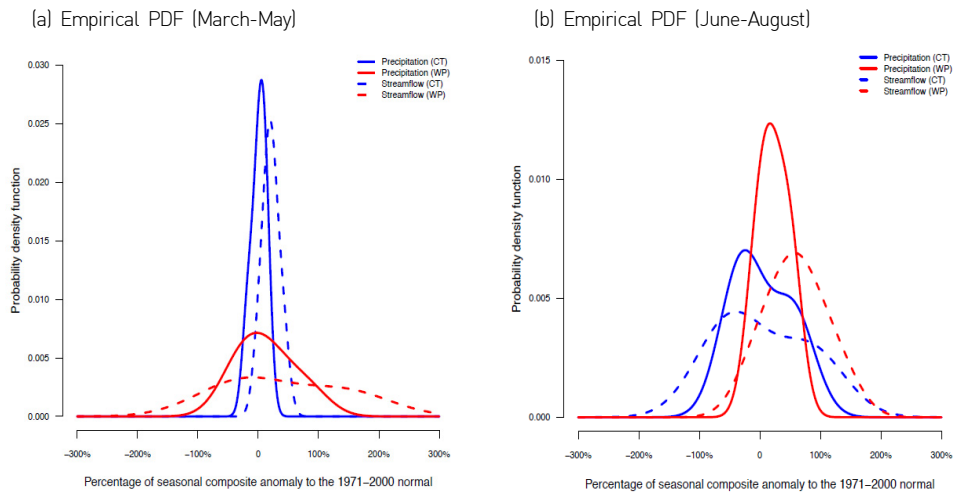


Figure 9 Empirical probability density functions for seasonal precipitation and streamflow during (a) spring and (b) summer periods influenced by CT and WP El Niño events in the Han River basin, Korea.



3.4 ENSO 패턴변화에 따른 수문 변동분석

1) 봄철 강수량의 계절편차

서로 다른 ENSO와 한강유역의 중권역별 수문변량과의 연관관계 분석을 위하여 CT El Niño 해와 WP El Niño 해로 구분하여 강수량의 계절편차(seasonal anomaly)에 따른 변화량과 변동폭을 분석하였다. 봄철 강수량의 계절편차는 각 해의 3월부터 5월까지의 일강수량에 1971-2000년까지의 30년 평년값과의 편차를 구함으로 산정하였다. 분석결과 봄철 강수량의 경우 CT El Niño 해에 일부 6개 중권역에서 감소하는 경향이 나타났으나 전체적으로 봄철 강수량 편차의 평균은 3.47%로 약한 증기특성을 보이는 것으로 분석되었다. 또한 상대적으로 적은 사상을 보완하고자 관측자료에 대한 Bootstrap random resampling 방법을 적용하여 수문자료의 모의발생을 실시하였으며, T-test에 의한 통계적 유의성 검정을 실시하였다. T-test에 의한 봄철 강수량 변화량의 증가경향을 분석한 결과 90% 신뢰구간(significant level: $\alpha=0.10$)에서 통계적으로 유의한 결과는 나타나지 않았다(Figure 10a).

WP El Niño 해에서는 23개 중권역 모두 강수량 편차는 양의 값을 나타내고 있어 평년에 비하여 높은 값을 보이고 있음을 확인할 수 있으며, 봄철 강수량의 편차는 6.9%~26.1%의 범위 값을 보이며 평균편차는 17.80%로 비교적 큰 양의 증가 특성을 확인하였다. 또한 강수 변화량의 증가경향 분석을 실시한 결과 2개의 중권역(1001: 남한강상류, 1005: 충주댐하류)에서 강수량의 변화량이 90% 신뢰구간($\alpha = 0.01$)에서 통계적으로 유의한 결과가 나타났다(Figure 9b). 다음으로 편차 강수량의 변동특성 분석결과 CT El Niño 해의 변동폭은 0.08-0.53의 범위로, 평균 변동폭은 0.20로 분석되었고 가장 큰 변동폭을 보인 유역은 인북천(ID: 1011)유역이다(Figure 9c)). 또한 WP El Niño 해의 변동폭은 0.30-0.78의 범위로, 평균 변동폭은 0.54로 분석되었으며 가장 큰 변동폭을 보인 유역은 임진강하류(ID: 1023)유역이다(Figure 9d). 봄철 강수량의 경우 WP El Niño 해에 한강유역의 전체적인 강수량의 증가를 예상할 수 있으나 변동특성 또한 크게 나타나 유역별 평균 강수량 증가에 반하여 반대 현상도 발생할 가능성이 있음을 확인하였다.

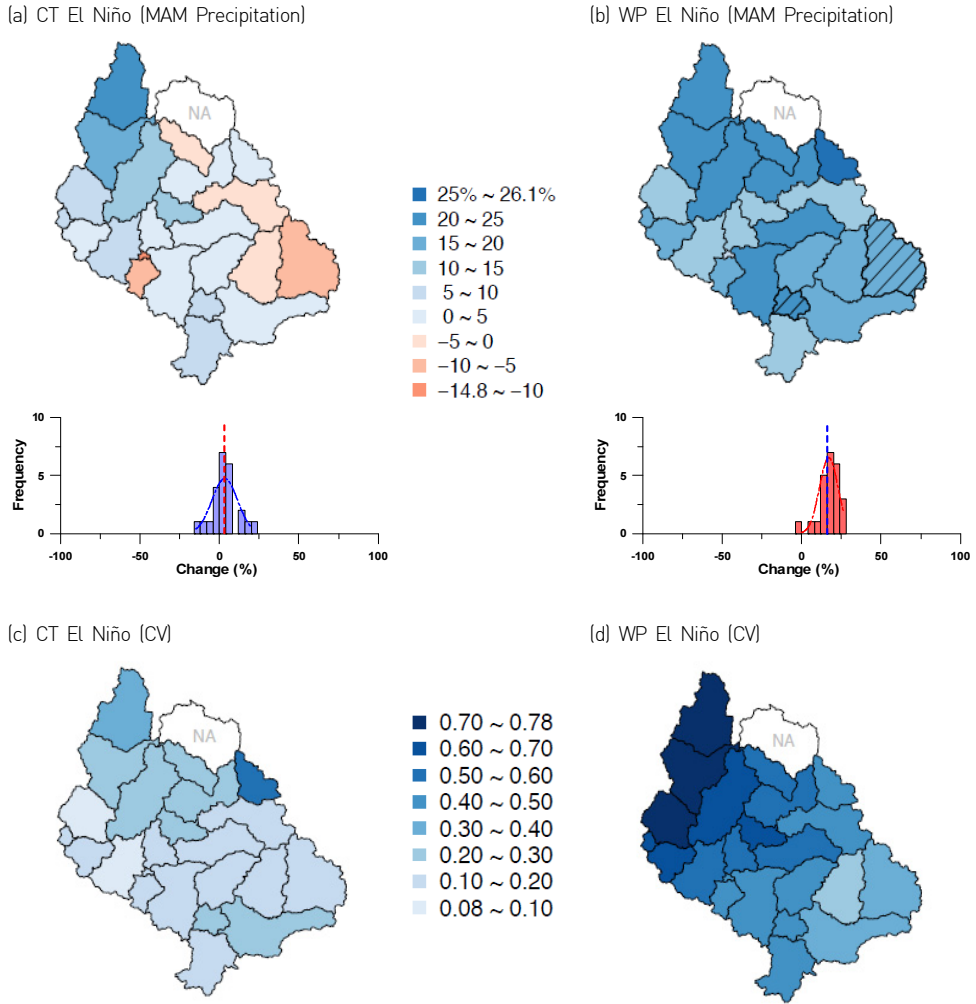


Figure 10 Percentage changes of spring (MAM) precipitation and coefficient of variations (CV) for composite anomalies (departures from the 1971–2000 normals) during (a and c) CT and (b and d) WP El Niño years over the Han River basin, Korea. The effects of both phases of ENSO are shown with different color schemes (increases in blues and decreases in reds). The hatched polygons show statistically significant changes in spring precipitation (March to May) based on a 90% confidence level. Note that the term NA indicates that data were not available.

2) 여름철 강수량의 계절편차

여름철 강수량과 서로 다른 ENSO의 계절편차를 분석하기 위하여 각 해의 6월부터 8월까지의 여름철 일강수량에 1971-2000년까지의 30년 평년값과의 편차를 구함으로 산정하였다. 여름철 강수량의 편차 분석결과 CT El Niño decaying해에는 일부 5개 중권역(1001: 남한강상류, 1003: 충주댐, 1009: 평화의댐, 1020: 고미탄천, 1021: 임진강 상류)에서 여름철 강수량 편차가 감소하는 경향을 보였다. 또한 여름철 강수량의 편차는 -3.8%-18.0%의 범위, 평균편차는 5.59%로 약한 증가특성이 나타나는 것으로 분석되었고 강수량 변화량이 통계적으로 유의한 결과를 보이는 유역은 나타나지 않았다(Figure 11a).

WP El Niño decaying해에는 1개의 중권역(1024: 한강하류)을 제외한 22개 중권역 모두 강수량의 편차가 증가하는 추세를 보이고 있으며, 전체적으로 여름 강수량의 계절편차는 -3.5-38.4%의 범위, 평균편차는 21.8%로 비교적 강한 증가특성을 보이는 것으로 분석되었다. 또한 T-test에 의한 여름철 강수량 변화량의 증가경향을 분석한 결과 90% 신뢰구간(significant level: $\alpha = 0.01$)에서 한강 중·남부 대부분의 유역(1002: 평창강, 1004: 달천, 1005: 충주댐하류, 1006: 섬강, 1007: 남한강하류, 1010: 춘천댐, 1011: 인북천, 1014: 홍천강, 1016: 경안천, 1017: 팔당댐)에서 여름철강수량 편차의 변화량이 통계적으로 유의한 결과가 나타났다(Figure 11b).

다음으로 여름철 강수량 편차의 변동특성 분석결과 CT El Niño 해의 변동폭은 0.28-0.59의 범위로 분석되었으며, 평균 변동폭은 0.44로 분석되었다. 또한 WP El Niño 해의 변동폭은 0.12-0.31의 범위로 분석되었으며, 평균 변동폭은 0.24로 분석되었다(Figure 11c, 11d). 따라서 여름철에는 WP El Niño 해의 강수량 편차의 양의 증가가 통계적으로 유의한 유역이 다수 나타나고 변동특성이 작아 뚜렷한 강수 증가가 예상되며, CT El Niño 해에는 강수량 편차가 작고 큰 변동특성을 보이는 유역이 많아 여름철 강수량 변동에 따른 수자원관리 및 확보를 위한 노력이 필요할 것으로 사료된다.

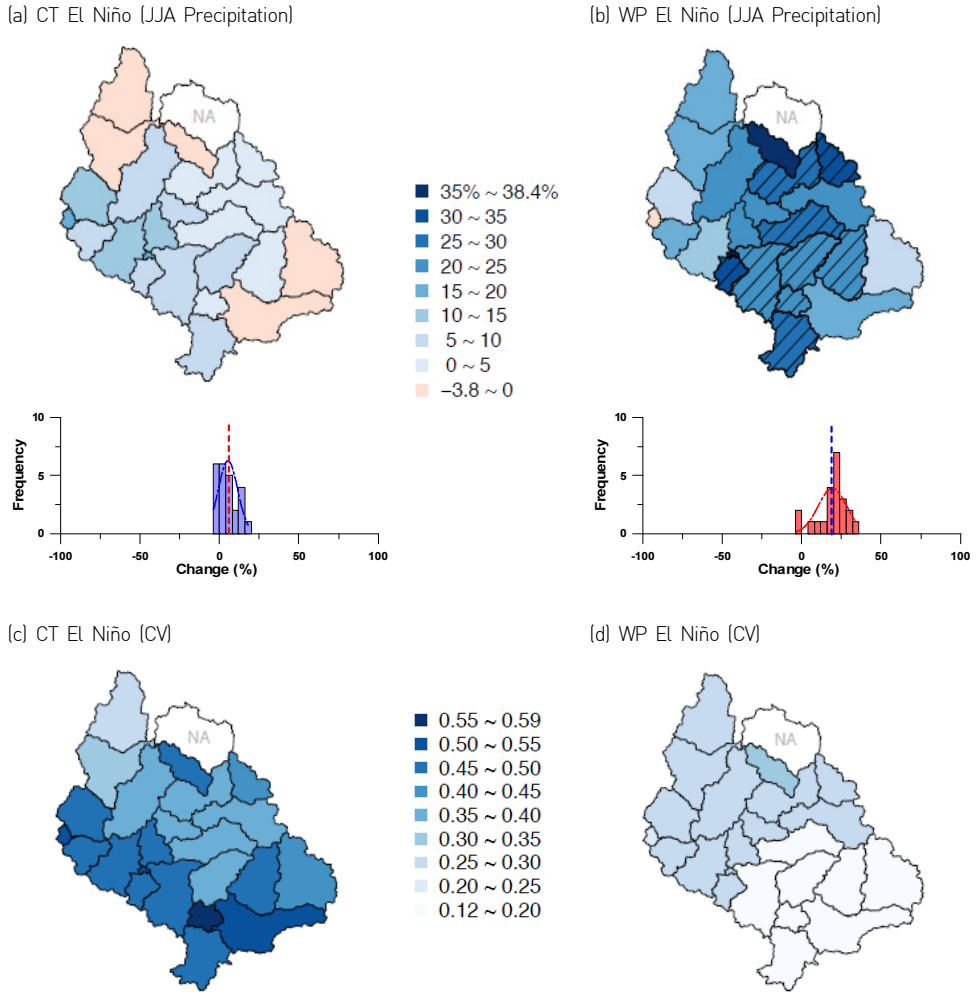


Figure 11 Percentage changes of summer (JJA) precipitation and coefficient of variations (CV) for composite anomalies (departures from the 1971–2000 normals) during (a and c) CT El Niño and (b and d) WP El Niño years over the Han River basin, Korea. The effects of both phases of ENSO are shown with different color schemes (increases in blues and decreases in reds). The hatched polygons show statistically significant changes in summer precipitation (June to August) based on a 90% confidence level. Note that NA indicates that data were not available.



3) 봄철 유출량의 계절편차

다음 Figure 12는 서로 다른 ENSO 패턴에 따른 봄철 유출량의 변동특성을 분석한 결과이다. 봄철 유출량의 편차의 경우 강수량 분석 시와 동일하게 각 해의 3월부터 5월까지의 봄철 일유출량에 1971-2000년까지의 30년 평년값과의 편차를 구함으로 산정하였다. 봄철 유출량의 편차경우 CT El Niño decaying해에는 일부 3개 중권역(1006: 섬강, 1016: 경안천, 1017: 팔당댐)에서 감소하는 경향이 나타났으나 전체적으로 21.83 % 증가하는 것으로 분석되었고 4개의 중권역(1010: 춘천댐, 1011: 인북천, 1013: 의암댐, 1020: 고미탄천)에서 90% 신뢰구간(significant level: $\alpha = 0.10$) 유의수준에서 유출량 변화량이 통계적으로 유의한 증가패턴이 분석되었다(Figure 12a).

WP El Niño decaying해에는 1개 중권역(1017: 팔당댐)을 제외한 23개 중권역에서 유출량이 증가하는 추세를 보이고 있으며 전체적으로 계절편차가 36.51% 증가하였다. 또한 8개 유역(1001: 남한강상류, 1002: 평창강, 1003: 충주댐, 1006: 섬강, 1007: 남한강하류, 1011: 인북천, 1014: 홍천강, 1016: 경안천)에서 유출량 변화량이 통계적으로 유의한 결과가 나타났다(Figure 12b). 유출량 편차의 변동특성 분석결과, CT El Niño 해에는 평균 변동폭은 0.30으로 비교적 작게 나타났으나, WP El Niño 해에는 평균 변동폭은 0.89로 크게 나타났고, 특별히 한강북서부 유역에서 변동특성이 크게 발생하였다(Figure 12c, 12d). 따라서 봄철의 경우 WP El Niño해에 한강유역의 전체적인 유출량 증가를 예상할 수 있으나 변동특성 또한 크게 나타나 유역별 평균 유출량 증가에 반하여 반대되는 현상도 발생할 가능성이 있음을 확인하였다.

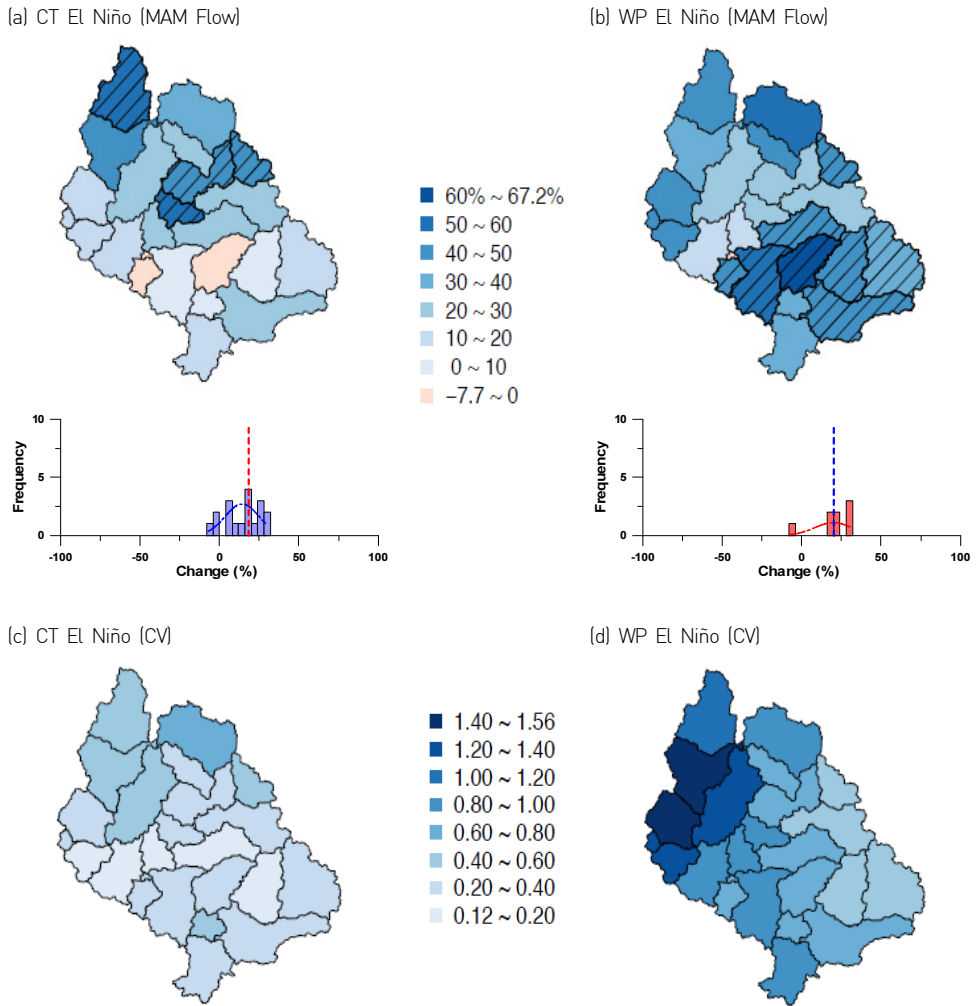


Figure 12 Percentage changes and coefficient of variations (CV) for composite anomalies in MAM streamflow (departures from the 1971-2000 normals).



4) 여름철 유출량의 계절편차

다음 Figure 13은 서로 다른 ENSO 패턴에 따른 여름철 유출량의 변동특성을 분석한 결과이다. 여름철 유출량 편차의 경우 강수량 분석 시와 동일하게 각 해의 6월부터 8월까지의 여름철 일유출량에 1971-2000년까지의 30년 평년값과의 편차를 구함으로 산정하였다. 여름철 유출량 편차의 경우 CT El Niño decaying해에는 일부 7개 중권역(1001: 남한강상류, 1009: 평화의댐, 1010: 춘천댐, 1012: 소양강, 1014: 홍천강, 1020: 고미탄천, 1021: 임진강상류)에서 감소하는 경향이 나타났으나 전체적으로 6.85% 증가하는 것으로 분석되었고, 유출량 변화량이 통계적으로 유의한 결과는 나타나지 않았다(Figure 13a).

WP El Niño decaying해에는 1개 중권역(1024: 한탄강하류)을 제외한 22개 유역에서 유출량이 증가하는 추세를 보이고 있으며 전체적으로 계절편차가 36.39% 증가하였다. 또한 14개 유역(1002: 평창강, 1004: 달천, 1005: 충주댐하류, 1006: 섬강, 1007: 남한강하류, 1010: 춘천댐, 1011: 인북천, 1012: 소양강, 1014: 홍천강, 1015: 청평댐, 1016: 경안천, 1017: 팔당댐, 1020: 고미탄천, 1022: 한탄강)에서 90% 신뢰구간(significant level: $\alpha = 0.10$)에서 유출량 변화량이 통계적으로 유의한 결과가 나타났다(Figure 12b). 유출량 편차의 변동특성 분석결과 CT El Niño 해에는 평균 변동폭이 0.69로 비교적 크게 나타났으며, 특별히 남한강 일부 유역에서 변동특성이 크게 발생하였다(Figure 13c). 또한 WP El Niño 해에는 평균 변동폭은 0.30으로 작게 산정되어 전체 유역의 유출량 변동특성이 작음을 알 수 있다(Figure 13d). 따라서 여름철의 경우 WP El Niño 해에 한강유역의 전체적인 유출량 증가를 예상할 수 있다. 또한 CT El Niño 해에는 평년보다 유역 유출량의 감소를 예상할 수 있으나, 변동특성 또한 크게 나타나 유역별 평균 유출량 감소에 반하여 반대되는 현상도 발생할 가능성이 있음을 확인하였다.

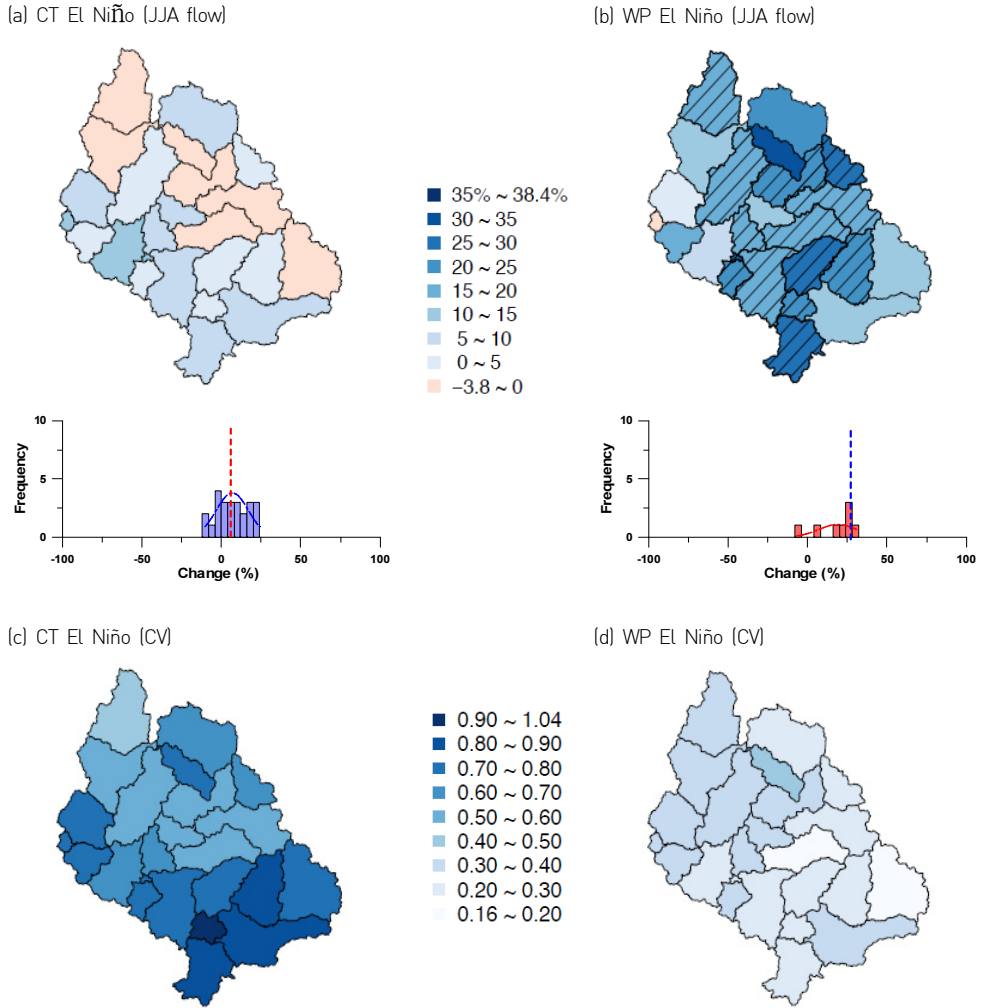


Figure 13 Percentage changes and coefficient of variations (CV) for composite anomalies of summer (JJA) streamflow (departures from the 1971–2000 normals).

3.5 ENSO 패턴변화에 따른 수문 변동분석 종합

서로 다른 형태의 ENSO 패턴(CT/WP El Niño) 변화에 따른 한반도 한강유역의 계절 강수량과 계절유출량 등의 수문변동 특성변화 분석결과를 종합하여 정리하면 다음 Table 3, Figure 14, Table 4와 같다.

다음 Table 3은 CT El Niño decaying해와 WP El Niño decaying해의 한강유역의 24개 중권역에 대한 봄철과 여름철의 강수량과 유출량의 편차값을 분석한 결과이다. 아래 Table 3의 결과로 부터 3.4절의 분석결과의 구체적인 수치를 확인할 수 있다.

Table 3 Summary of anomalies data for different ENSO years over the Han River basin.

| Basin ID | Anomalies Data for CT El Niño Years | | | | Anomalies Data for WP El Niño Years | | | |
|----------|-------------------------------------|-------|--------------|-------|-------------------------------------|-------|--------------|-------|
| | Spring (MAM) | | Summer (JJA) | | Spring (MAM) | | Summer (JJA) | |
| | Pre. | Stre. | Pre. | Stre. | Pre. | Stre. | Pre. | Stre. |
| 1001 | -8.70 | 19.80 | -2.00 | 9.80 | 17.31 | 38.14 | -3.12 | 23.93 |
| 1002 | -3.80 | 17.00 | 3.10 | 21.30 | 5.17 | 44.49 | 1.49 | 42.72 |
| 1003 | 2.30 | 16.20 | 0.00 | 16.10 | 25.72 | 49.72 | 16.31 | 25.15 |
| 1004 | 7.50 | 14.00 | 8.30 | 26.40 | 16.63 | 34.15 | 16.36 | 55.49 |
| 1005 | 7.60 | 25.00 | 3.90 | 24.10 | 6.94 | 39.21 | 4.54 | 45.53 |
| 1006 | 1.40 | 17.70 | 5.20 | 23.90 | -0.46 | 67.17 | 4.51 | 53.79 |
| 1007 | 3.20 | 21.20 | 6.80 | 21.80 | 4.60 | 52.53 | 11.03 | 39.84 |
| 1008 | NA | NA | NA | NA | 35.48 | 52.50 | 15.02 | 40.23 |
| 1009 | -3.70 | 24.30 | -0.60 | 38.40 | 28.63 | 49.78 | -10.12 | 66.64 |
| 1010 | 4.50 | 20.60 | 2.00 | 29.20 | 40.33 | 28.18 | -1.28 | 44.41 |
| 1011 | 1.70 | 26.10 | 1.00 | 33.40 | 47.50 | 41.40 | 0.38 | 54.90 |
| 1012 | -2.10 | 12.20 | 1.60 | 23.40 | 24.04 | 22.44 | -1.42 | 35.96 |
| 1013 | 14.90 | 10.90 | 10.00 | 20.50 | 50.77 | 22.00 | 10.06 | 26.14 |
| 1014 | 0.40 | 21.00 | 0.50 | 25.10 | 22.59 | 41.17 | -1.60 | 38.33 |
| 1015 | 0.30 | 12.20 | 14.40 | 23.00 | 26.14 | 16.50 | 18.21 | 33.61 |
| 1016 | -6.50 | 17.60 | 6.50 | 30.30 | -0.24 | 40.34 | 7.50 | 45.78 |
| 1017 | -14.80 | 6.90 | 18.00 | 36.50 | -7.19 | -7.70 | 23.94 | 55.51 |
| 1018 | 5.80 | 12.10 | 15.00 | 14.70 | 16.06 | 16.78 | 22.61 | 18.01 |
| 1019 | 2.90 | 20.00 | 7.30 | 19.50 | 10.16 | 43.89 | 8.39 | 30.74 |

| Basin ID | Anomalies Data for CT El Niño Years | | | | Anomalies Data for WP El Niño Years | | | |
|----------|-------------------------------------|-------|--------------|-------|-------------------------------------|-------|--------------|-------|
| | Spring (MAM) | | Summer (JJA) | | Spring (MAM) | | Summer (JJA) | |
| | Pre. | Stre. | Pre. | Stre. | Pre. | Stre. | Pre. | Stre. |
| 1020 | 20.20 | 21.70 | -3.80 | 19.50 | 51.97 | 40.79 | -10.40 | 33.82 |
| 1021 | 18.10 | 20.70 | -2.20 | 17.20 | 41.46 | 31.84 | -7.86 | 27.66 |
| 1022 | 14.50 | 20.60 | 5.00 | 23.00 | 29.07 | 28.94 | 2.73 | 34.21 |
| 1023 | 8.00 | 15.00 | 12.70 | 6.70 | 14.02 | 40.90 | 15.96 | 7.76 |
| 1024 | 6.10 | 16.70 | 15.80 | -3.50 | 17.28 | 41.05 | 21.21 | -6.87 |

* NA indicates that data were not available.

** Anomalies represent deviations from averages during a 30-year period from 1971-2000 in each season.

다음 Figure 14는 CT El Niño decaying해와 WP El Niño decaying해의 한강유역의 24개 중권역에 대한 봄철(MAM)과 여름철(JJA)의 강수량(Precipitation)과 유출량(Streamflow)의 백분위 anomaly(1971-2000년 평년값) 편차의 2차원 분포특성을 산포도를 통하여 나타낸 결과이다. 봄철(MAM)의 경우 CT El Niño 해에는 강수량과 유출량의 산포도 중심이(Precipitation: 3.3%, Streamflow: 21.8%)로 WP El Niño 해에는(Precipitation: 17.1%, Streamflow: 36.5%)로 분석되었다. CT/WP El Niño 해 모두 양의 값을 가지므로 평년에 비하여 강수량과 유출량의 증가가 예상되나, 특히 WP El Niño 해에는 대부분의 중권역에서 강수량과 유출량의 증가특성이 뚜렷이 나타날 것으로 분석된다(Figure 14a). 또한 여름철(JJA)의 경우 CT El Niño 해에는 강수량과 유출량의 산포도 중심이(Precipitation: 5.4%, Streamflow: 6.9%)로 WP El Niño 해에는(Precipitation: 20.8%, Streamflow: 36.4%)로 분석되었다. CT/WP El Niño 해 모두 양의 값을 가지므로 평년에 비하여 강수량과 유출량의 증가가 예상되나, 특히 WP El Niño 해에는 봄철과 마찬가지로 대부분의 중권역에서 강수량과 유출량의 증가특성이 뚜렷이 나타날 것으로 분석된다(Figure 14b).

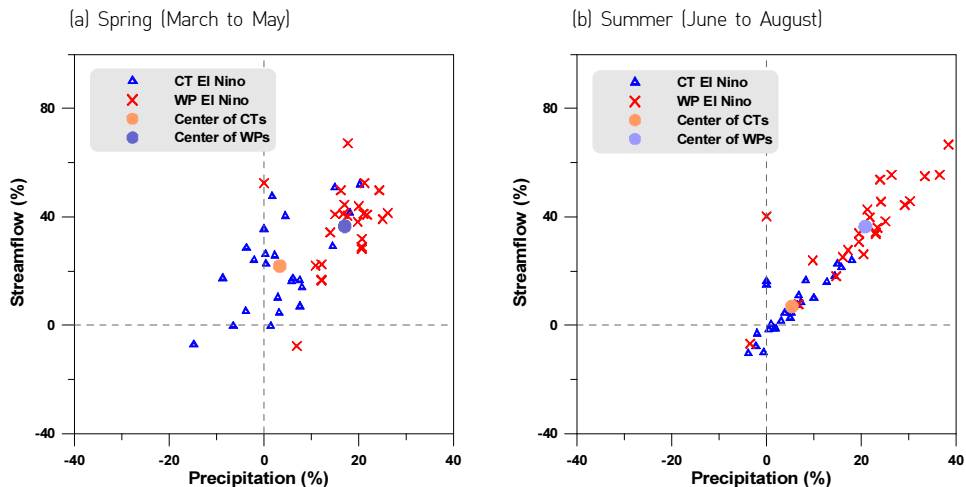


Figure 14 Percentage anomalies (departures from the 1971-2000 normals) showing changes between precipitation and streamflow for the spring (MAM) and summer (JJA) seasons during different ENSO types over the Han River basin and its sub-watersheds.

다음 Table 4는 서로 다른 ENSO인 CT El Niño 해와 WP El Niño 해의 봄철과 여름철 강수량과 유출량의 백분위 평균 변화량과 평균 변동폭을 나타내었으며, 전체 증권역에 대한 90% 신뢰수준(significant level: $\alpha = 0.10$)에서 유의한 결과가 나타난 유역의 개수를 분석한 결과이다. 아래 Table 4의 결과로부터 3.4절의 분석결과를 확인할 수 있다.

Table 4 Summary statistics for seasonal variability associated with different ENSO types for the Han River basin.

| ENSO | Statistics | Spring (MAM) | | Summer (JJA) | |
|------------|---------------------------------|---------------|------------|---------------|------------|
| | | Precipitation | Streamflow | Precipitation | Streamflow |
| CT El Niño | Average Change (%) | 3.47 | 5.59 | 21.83 | 6.85 |
| | Significant ($\alpha=0.10$) | NA | NA | 4/23 | NA |
| | CV | 0.20 | 0.44 | 0.30 | 0.69 |
| WP El Niño | Average Change (%) | 17.80 | 21.75 | 36.51 | 36.39 |
| | Significant ($\alpha = 0.10$) | 2/23 | 10/23 | 8/23 | 14/23 |
| | CV | 0.54 | 0.24 | 0.89 | 0.30 |

* NA indicates that data were not available.

** CV is the ratio of the standard deviation to the mean.

4. 결론 및 요약

전 지구적 기후체계의 상호작용과 변화의 결과는 다양한 형태로 수자원의 변동을 야기시키는 요인으로 작용되고 있으며, 단기적인 측면에서는 기상(weather) 현상과 장기적인 측면에서는 기후(climate) 현상과 밀접한 상관성이 있다. 본 연구에서는 대기 순환패턴 및 수문 환경변화에 영향을 미치는 주요인자인 ENSO의 서로 다른 패턴 변화에 따른 한강 유역의 봄철과 여름철 수문변량 변화특성을 분석하였다. 서로 다른 형태의 El Niño인 WP El Niño와 CT El Niño가 한강의 수자원에 미치는 영향을 분석한 결과는 다음과 같다.

- i) 봄철의 경우 CT El Niño decaying 해의 강수량 및 유출량의 Empirical PDF의 첨두가 높고 계절합성편차의 분산이 작아 수문변량의 민감도와 변동특성이 줄어들어 수자원 확보 및 관리에 이로울 것으로 예상된다. 반면에 WP El Niño decaying 해에는 강수량과 유출량의 Empirical PDF의 첨두가 낮고 계절합성편차의 분산이 크고 수문변량의 민감도와 변동특성이 커서 수자원 확보 및 관리가 어려울 것으로 예상된다. 반면에 여름철(JJA)의 경우는 CT El Niño 해에는 강수량과 유출량의 Empirical PDF의 첨두가 낮고 계절합성편차의 분산이 커서 수문변량의 민감도와 변동특성이 커서 수자원 확보 및 관리가 어려울 것으로 예상된다.
- ii) 봄철 강수량의 경우 WP El Niño decaying 해에 전체적으로 증가추세를 보이고 있으며, 강수의 변동특성이 크게 나타났다. 또한 여름철 강수량의 경우 CT El Niño decaying 해에는 WP El Niño decaying 해에 비하여 대체로 Dry한 특성을 보이나 WP El Niño 해에는 대부분 유역에서 Wet한 경향을 보였으며 여름철 강수의 변동성은 작은 것으로 분석되었다.
- iii) 봄철 유출량의 경우 CT El Niño decaying 해와 WP El Niño decaying 해에 모두 Wet한 특성을 보이고 있고 WP El Niño decaying 해에 한강 남부 대부분 유역에서 유출량의 변화가 통계적으로 유의한 결과를 보였다. 여름철 유출량의 경우 CT El Niño decaying 해에는 대부분 유역에서 감소추세를 보이고 있으나 변동특성은 큰것으로 분석되었으며, WP El Niño decaying 해에는 거의 모든 유역에서 증가추세를 보이며 13개 중권역에서 통계적으로 유의한 결과가 나타났으나 유출의 변



동특성은 작은 것으로 분석되었다.

- iv) CT/WP El Niño decaying 해의 한강유역의 24개 중권역에 대한 봄철과 여름철 강수량과 유출량의 백분위 anomaly 편차의 2차원 산포도를 분석한 결과, 봄철과 여름철 모두 CT/WP El Niño decaying 해에 양의 값을 가지나 WP El Niño decaying 해에는 대부분의 중권역에서 강수량과 유출량의 증가특성이 뚜렷이 나타나는 것으로 분석되었다.

새로운 형태의 CT El Niño와 WP El Niño는 각각 한반도 한강유역의 봄철과 여름철 수자원 변동성에 민감하게 영향을 미치고 있음을 확인하였으며, 향후 우리나라와 같이 수자원의 계절적 변동특성과 불확실성이 큰 나라에서는 안정적인 용수공급을 위한 수문기상인자와 수문변량들간의 관계규명을 통한 수자원계획 수립에 활용할 필요성이 있을 것으로 사료된다. 추후 대규모 기후인자와 한반도 수자원간의 추계예측모형 구축 기반기술을 개발하고, 계절예측 가능성 평가를 통한 시스템 구축은 효과적인 수자원 관리 및 지속적인 용수공급방안 수립을 위한 실무활용도를 높일 수 있는 정책 자료로 활용이 가능할 것이며, 봄철 가뭄, 여름철 홍수 등 뚜렷한 계절 특성을 보이는 지역에서의 장기적인 수자원 관리·예측 및 정책 지원을 위한 도구로 활용이 가능할 것이다.

REFERENCES

- 강인식, 1998: 엘니뇨와 한반도 기후변동의 관련성. 한국기상학회, **한국기상학회논문집**, 34(3), pp. 390-396.
- 윤선권, 김종석, 권현한, 2013: 서로 다른 형태의 엘니뇨에 따른 한강유역의 여름철 강우량과 극치강우의 변동특성 분석, 한국수자원학회, **한국수자원학회논문집**, 46(2), pp. 123-137.
- 윤진희, 예상욱, 2009: 서로 다른 두 유형의 엘니뇨와 동아시아 인근 해역 표층 온도 상관성 연구, *Ocean and Polar Research*, 31(1), pp. 1-61.
- 차은정, 전종갑, 정효상, 1999: 엘니뇨/라니냐 해의 우리나라 기후특성에 관한연구. 한국기상학회, 한국기상학회논문집, 35(2), pp. 272-282.
- Ashok, K., S. K. Behera, S. A. Rao, H. Weng, and T. Yamagata, 2007: El Niño Modoki and its possible teleconnection. *J. Geophys. Res.*, 112, C11007, doi:10.1029/2006JC003798.
- Ashok, K., and T. Yamagata, 2009: Climate change: The El Niño with a difference. *Nature*, 461, 481-484, doi:10.1038/461481a.
- Chang, C.-W. J., H. H. Hsu, C. R. Wu, and W. J. Sheu, 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.
- Dressler, K. A., G. H. Leavesley, R. C. Bales, and S. R. Fassnacht, 2006: Evaluation of girded snow water equivalent and satellite snow cover products for mountain basins in a hydrologic model. *Hydrol. Processes*, 20, 673-688.
- Feng, J., W. Chen, C. Y. Tam, and W. Zhou, 2010: Different impacts of El Niño and El Niño Modoki on China rainfall in the decaying phases. *Int. J. Climatol.*, 31, 2091-2101, doi:10.1002/joc.2217.
- Gershunov, A., T. B. Barnett, and D. R. Cayan, 1999: North Pacific interdecadal oscillations seen as factor in ENSO-related North American climate anomalies. *Eos Trans. Amer. Geophys. Union*, 80, 25-30, doi:10.1029/99EO00019.
- Horel, J. D., and J. M. Wallace, 1981: Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation. *Mon. Weather Rev.*, 109, 813-829.
- Kao, H. Y. and J. Y. Yu, 2009: Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of ENSO. *J. Climate*, 22, 615-632, doi:10.1175/2008JCLI2309.1.
- Kim, D. W., K. S. Choi, and H. R. Byun 2012a: Effects of El Niño Modoki on winter precipitation in Korea. *Climate Dyn.*, 38, 1313-1324.
- Kim, J. S., S. Jain, and S. K. Yoon, 2012b: Warm season streamflow variability in the Korean Han River Basin: Links with atmospheric teleconnections. *Int. J. Climatol.*, 32, 635-640, doi:10.1002/joc.2290.
- Kug, J. S., F.-F. Jin, and S.-I. An, 2009: Two types of El Niño events: Cold tongue El Niño and warm pool El Niño. *J. Climate*, 22, 1499-1515, doi:10.1175/2008JCLI2624.1.
- Kug, J. S., M. S. Ahn, M. K. Sung, S. W. Yeh, H. S. Min, and Y. H. Kim, 2010: Statistical relationship between two types of El Niño events and climate variation over the Korean Peninsula. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 46, 467-474.
- Lall, U., Y.-I. Moon, and K. Bosworth, 1993 Kernel flood frequency estimators: bandwidth selection



- and kernel choice. *Water Resour. Res.*, **29**, 1003-1015.
- Leavesley, G. H., R. W. Lichty, B. M. Troutman, and L. G. Saindon, 1983: Precipitation-Runoff Modeling System: User's Manual. *Water Resources Investigations: 83-4238*, U.S. Geological Survey, Denver, Colorado.
- McPhaden, M. J., S.E. Zebiak, and M. H. Glantz, 2006: ENSO as an integrating concept in Earth Science. *Science*, **314**, 1740-1745.
- Moon, Y. I., and U. Lall, 1994: Kernel quantile function estimator for flood frequency analysis. *Water Resour. Res.*, **30**, 3095-3103.
- Na, H., B. G. Jang, W. M. Choi, and K. Y. Kim, 2011: Statistical simulations of the future 50-year statistics of cold-tongue El Niño and warm-pool El Niño. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, **47**, 223-233.
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), National Weather Service Climate Prediction Center, 2012: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>. Accessed January 2012.
- Piechota, T. C., and J. A. Dracup, 1996: Drought and regional hydrologic variation in the United States: Associations with the El Niño-Southern Oscillation. *Water Resour. Res.*, **32**, 1359-1373.
- Piechota, T. C., H. S. Chiew Francis, J. A. Dracup, and T. A. McMachon 1998: Seasonal streamflow forecasting in eastern Australia and the El Niño-Southern Oscillation. *Water Resour. Res.*, **34**, 3035-3044.
- Pizarro, G., and U. Lall, 2002: El Niño-induced flooding in the U.S. West: What can we expect? *Eos Trans. Amer. Geophys. Union*, **83**, 349-352.
- Pradhan, P. K., B. Preethi, K. Ashok, R. Krishna, and A. K. Sahai A, 2011: Modoki, Indian Ocean Dipole, and western North Pacific typhoons: Possible implications for extreme events. *J. Geophys. Res.*, **116**, D18108, doi:10.1029/2011JD015666.
- Rayner, N. A., D. E. Parker, E. B. Horton, C. K. Folland, L. V. Alexander, D. P. Rowell, E. C. Kent, and A. Kaplan, 2003: Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res.*, **108**, 4407, doi:10.1029/2002JD002670.
- Ren, H. L., and F. F. Jin, 2011: Niño indices for two types of ENSO. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L04704, doi:10.1029/2010GL046031.
- Schonher, T., and S. E. Nicholson, 1989: The relationship between California rainfall and ENSO Events. *J. Climate*, **2**, 1258-1269.
- Sheather, S. F., and M. C. Jones, 1991: A reliable data-based band width selection method for kernel density estimation. *J. Roy. Statist. Soc. B.*, **53**, 683-690.
- Trenberth K. E. 1997: The Definition of El Niño. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 2771-2777.
- WAMIS (Water Management Information System), 2012: <http://wamis.go.kr/eng/>. Accessed January 2012.
- Weng, H., K. Ashok, S. Behera, S. Rao, and T. Yamagata, 2007: Impacts of recent El Niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific rim during boreal summer. *Climate Dyn.*, **29**, 113-129.
- Yeh, S. W., J. S. Kug, B. Dewitte, M. H. Kwon, B. P. Kirtman, and F.-F. Jin, 2009: El Niño in a changing climate. *Nature*, **461**, 511-514, doi:10.1038/nature08316.
- Yoon, S. K., J. S. Kim, J. H. Lee, and Y. I. Moon, 2013: Hydrometeorological variability in the Korean Han River Basin and its sub-watersheds during different El Niño phases. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, **27**, 1465-1477.

CHAPTER II : ENSO 패턴 변화에 따른 WNP지역 태풍활동과 한반도 수문변동 영향

ABSTRACT

본 연구에서는 서로 다른 형태의 두 가지 ENSO (CT/WP El Niño) 패턴에 따른 WNP 지역의 태풍활동 특성과 한반도 영향 태풍을 중심으로 태풍으로 인한 5대강 유역의 여름철 강수량 및 중호우사상의 변동 특성을 분석하였다. 태풍 발생 빈도는, CT El Niño decaying 해에 총21개(4.2개/year), WP El Niño decaying 해에 총20개(4.0개/year)의 태풍이 한반도에 영향을 미쳤으며, 태풍 발생 강도는 WP El Niño 해가 CT El Niño 해에 비하여 중심기압(Percentile 50th = 947.5 hPa)이 낮고 최대풍속(Percentile 50th = 80 kt)이 높은 강한 태풍이 발생할 가능성이 있는 것으로 분석된다. 또한 두 가지 형태의 El Niño에 따른 태풍 발생위치(CT El Niño: 14.3°N, 140.6°E, WP El Niño: 15.3°N, 143.2°E)의 차이는 거의 나타나지 않았으나, 태풍의 이동경로는 CT El Niño 해의 경우 대체로 지그제그 형태의 진로특성을 보이며, WP El Niño 해에는 주로 쿠로시오해를 따라 한반도 도메인의 우측으로 치우쳐 북상하는 경향이 있음을 확인하였다. 다음으로 대규모 기후환경조건 분석을 위하여 Composit Anomaly에 의한 SST, Vertical Wind Shear (VWS), 500 hPa Vertical Velocity (Omega), 850 hPa divergence를 분석한 결과, 전반적으로 WP El Niño 해의 대규모 기후환경조건이 CT El Niño 해보다 한반도 상륙 태풍의 발달 및 강도유지에 좋은 조건을 제공한 것으로 나타났다. 또한 태풍에 의한 한반도 여름철 강수량은 CT El Niño 해에는 -0.39% 감소, WP El Niño 해에는 13.60% 증가패턴이 있는 것으로 분석되었으며, 50mm/day 이상 중호우 사상의 발생 빈도는 한반도 중서부 지역에서 감소패턴이 있으며, WP El Niño 해의 백분위 anomaly 평균이 33.4%로 한반도 전체유역에서 증가 패턴이 있는 것으로 분석되었다. 마지막으로 본 연구의 결과, CT/WP El Niño 따라 한반도 영향 태풍의 활동 및 태풍강수량의 변화가 민감하게 발생하는 것을 확인하였으며, 대규모 기후패턴 변화에 따른 태풍활동 변화와 극한 기후특성을 반영한 수자원 관련 의사결정자들의 대응책 수립과 기후변화에 대비한 유역 맞춤형 적응정책 수립에 활용이 가능할 것으로 사료된다.

핵심용어 : CT/WP El Niño, 태풍, WNP, 여름철 강수량

1. 서론

북서태평양(WNP, Western North Pacific)에서 발생한 태풍(Tropical Cyclone)은 동아시아 지역 여름철 강수패턴변화에 영향을 주는 수문기상학적(Hydrometeorological) 주요 요인으로 작용하고 있다(Weng et al. 2007; Tu et al. 2011; Pradhan et al. 2011; Choi and Moon 2012; Kim et al 2012a). 최근 고해상도(high-resolution) 위성과 동역학적 모형에 기반한 기후변화 연구결과(Emanuel et al. 2008; Knutson et al. 2010)에

의하면 북서태평양에서 발생하는 열대성 태풍의 발생빈도(Frequency)와 강도(Intensity)가 21세기 들어 점차 증가하는 추세를 보일 수 있음을 전망하고 있다. 또한 한국의 국가재난정보센터(NDIC, 2013, <http://www.safekorea.go.kr>) 제공 자료에 의하면 WNP지역에서 발생한 태풍은 한반도에 직간접적인 영향을 미치고 있으며, 이로 인한 피해는 과거 22년(1990-2011)동안 약 11조원의 재산피해와 약 530명의 사망자가 발생하였으며 한반도 전역에서 태풍에 의한 피해는 점차 증가하고 있는 추세가 있음이 보고되고 있다. 또한 최근 발전하는 우리나라의 사회구조와 더불어 생활복지를 추구하고자 하는 사회적 이슈와 재해로부터 안전한 삶을 누리하고자 하는 국민적 기대와 함께 여름철 태풍재해에 대한 관심이 어느 때보다 커지고 있는 상황이다. 더불어, 이러한 태풍에 의한 영향은 재해영향 및 예측 측면에서 뿐만 아니라 최근 변화하는 기후특성을 반영한 수자원 관리 측면에서도 바라볼 필요성이 있으며, 특히 여름철 태풍발생에 의한 일시적 강수사상의 지역적 특성변화를 파악하는 일은 장기적인 수자원 확보측면에서 중요한 관심사 중 하나이다.

변화하는 기후와 지구온난화 등의 요인으로 인해 최근 상대적으로 따뜻해진 WNP(Western North Pacific)지역 해수면온도는 태풍활동 특성의 변화와, 그 발생빈도 및 강도의 증가 추세 영향을 반영한다는 연구들이 최근 이슈화 되고 있다(Emanuel 2007; Elsner et al. 2008; Pradhan et al. 2011; Choi and Moon 2012). 더불어 극심한 태풍발생의 증가 원인은 비정상적으로 상승되어 있는 해수로부터 공급되는 수증기와 관련이 있으며, 평년보다 높은 해수면 온도의 변화와 대기상태 등이 태풍 발생에 유리한 조건으로 작용되고 있다고 보고되고 있다(Webster et al. 2005; Elsner et al. 2008; Knutson et al. 2010).

또한 최근 해수면온도 관련 연구결과에 의하면 남아메리카 페루 및 에콰도르의 서부 열대 해상에서 수온이 평년보다 높아지는 특징을 보이는 기존 Cold Tongue(CT) El Niño와는 다르게, 엘니뇨의 주기(Frequency), 강도(Intensity), 그리고 발생위치(Genesis Position)가 변화되고 있으며, 새로운 형태의 El Niño의 출현가능성이 커질 수 있음을 시사하고 있다(Ashok et al. 2007; Kao and Yu 2009; Pradhan et al. 2011; Yoon et al. 2013). 이러한 새로운 형태의 엘니뇨는 Warm-Pool(WP) El Niño라고도 불리며, 태평양 서부와 동부지역에 평년보다 낮은 해수면 온도가 존재하고 중앙 태평양지역에서 비정상적

으로 평년보다 높은 해수면 온도 특성을 가지고 있는 것이 특징이다. 그러나, 아직까지 이러한 New Type El Niño의 발생원인과 물리적인 메카니즘은 정확하게 밝혀진 바가 없는 실정이며(Newman et al. 2011), 추후 이에 대한 연구가 기후과학 분야의 주요해결 과제로 대두될 가능성이 있다.

지금까지 수많은 대기과학, 해양환경, 수문기상 분야 등의 연구자들에 의해서 El Niño-Southern Oscillation(ENSO) 조건에 따른 기후특성 변화와 태풍활동특성 변화에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으나(Ho et al. 2004; Chen et al. 2006; Feng et al. 2011; Choi and Moon 2012), 상대적으로 ENSO조건과 패턴 변화에 따른 태풍활동 및 그로인한 유역규모에서의 강수량, 유출량 발생 등 수문기상인자와의 연관관계 및 변동특성 분석에 대한 연구는 많지 않음을 연구동향 분석을 통하여 확인할 수 있다. 그럼에도 불구하고 ENSO와 수문변량과 관련된 연구는 중요하며, 우리나라와 관련하여 여름철 WNP지역 SST(sea surface temperature)와 태풍활동과 관련한 연구 또한 중요한 분야 중 하나이다. 이와 관련한 주요 연구동향을 살펴보면, Huang and Wu(1989)은 El Niño의 발달과 쇠퇴단계에서 중국의 여름철 강수패턴의 변화가 있음을 밝혔으며, Camargo and Sobel(2005)은 ENSO Warm episodes 동안에 태풍이 주로 WNP지역의 동남쪽에 발생하고 지속시간이 평년과 비교해서 보다 더 오래 지속되는 경향이 있다고 분석하였다. Chen et al.(2006)은 ENSO 패턴에 따른 태풍을 분류하였으며, ENSO 패턴에 따른 태풍발생 빈도의 차이는 찾지 못하였으나 태풍발생지점, 태풍진행경로, 태풍의전향점(recurving point)에 대한 차이가 있음을 밝힌 바 있다. 또한 Wang and Wang(2012)은 El Niño를 El Niño Modoki I과 El Niño Modoki II로 분류하여 태풍의 경로와 중국남부지역의 강수특성을 분석하였으며, Wang et al.(2013)은 전형적인 El Niño와 새로운 형태의 El Niño 해를 구분하고 이에 따른 WNP지역에서의 태풍활동변화에 각 계절별, 지역별로 구분하여 지체시간에 따른 태풍활동의 변화를 분석하였다.

태풍과 같은 일시적인 사상(episodic event)에 의한 극치 강수발생은 하천 생태계의 구조를 교란시키는 요인이 되며, 그 기능의 평형유지에 상당한 영향을 미칠 수 있으므로 주의 깊게 살펴볼 필요가 있다(Poff and Ward, 1990; Mathews and Richter, 2007). 특히 많은 연구에서 시사하고 있는 바와 같이 최근 WNP 지역에서 태풍의 빈도와 강도가



증가하고 있는 추세임에도 불구하고, 이를 반영한 한반도 지역의 태풍영향과 그로인한 유발 강수와 유출량의 시공간적 분포특성 등 기후인자를 고려한 정량적 수문기상분야 연구가 상대적으로 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 한반도 지역을 대상으로 새로운 형태의 해수면온도 조건인 CT/WP El Niño 패턴 변화에 따른 WNP 지역 태풍 활동특성 변화와, 이로 인한 여름철 강수와 극치 강수 사상의 지역적 특성 분석을 수행하고자 한다. 본 연구의 결과는 우리나라의 여름철 태풍에 대한 치수 및 이수계획의 수립, 방재 대책 마련, 중·장기 수자원 예측과 관리, 그리고 의사결정자의 태풍관련 실무적용을 위한 현실적 적응책 수립의 기초자료로 활용이 가능할 것이다.

2. 대상유역 자료 및 연구방법

2.1 대상유역

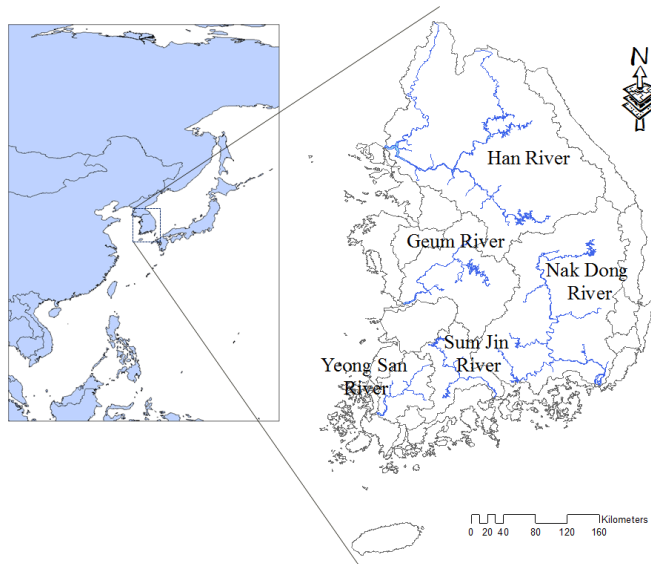
본 연구에서는 서로 다른 El Niño 패턴(CT/WP El Niño) 변화에 따른, 북서태평양(WNP) 지역 태풍발생특성 및 한반도 영향 태풍에 의한 지역별 강수량의 변동특성을 분석하기 위하여 5대강(한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강)을 연구대상유역으로 선정하였다.

다음 Figure 1은 한반도의 위치도 및 5대강 유역을 구분하여 나타내었으며, 연평균 강수량 대비 여름철(June to September) 강수량과 태풍에 의한 강수량을 구분하여 나타내었다. 과거 1971-2007까지 국가 수자원관리 종합정보시스템(www.wamis.go.kr) 통계 자료에 의하면, 한반도의 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 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 나타났다.

다음으로, 5대강 유역별 수문특성(유역면적, 강수량 등)을 살펴보면 다음과 같다. 한강유역의 경우, 총 30개의 중권역으로 구성되어 있으며, 유역면적은 $38,421.8\text{km}^2$, 연평균 강수량은 1259.4mm이고, 이중 여름철강수량은 894.2mm(71.0%), 태풍에 의한 강수량

은 196.5mm(15.6%)에 해당하는 것으로 분석되었다. 또한 낙동강유역은 총 33개의 중권역으로 구성되어 있으며, 유역면적은 31,712.0km², 연평균 강수량은 1238.6mm이고, 이중 여름철 강수량은 808.8mm(65.3%), 태풍에 의한 강수량은 214.3mm(17.3%)에 해당하는 것으로 분석되었다. 다음으로 금강유역은 총 21개의 중권역으로 구성되어 있으며, 유역면적은 17,537km²이고, 연평균 강수량은 1224.6mm로 5대강 유역 중 가장 적으며, 이중 여름철 강수량은 815.6mm(66.6%), 태풍에 의한 강수량은 178.8mm(14.6%)에 해당하는 것으로 분석되었다. 또한 섬진강유역은 총 15개의 중권역으로 구성되어 있으며, 유역면적은 8,299.1km²이고, 연평균 강수량은 1437.3mm로 5대강 유역 중 가장 많은 강수가 내리는 것으로 분석되었으며, 이중 여름철 강수량은 929.9mm(64.7%), 태풍에 의한 강수량은 232.8mm(16.2%)에 해당하는 것으로 분석되었다. 마지막으로 영산강유역은 총 14개의 중권역으로 구성되어 있으며, 유역면적은 7,598.7km²로 5대강 유역 중 가장 작은 유역에 해당하며, 연평균 강수량은 1296.7mm이며, 이중 여름철 강수량은 820.8mm(63.3%), 태풍에 의한 강수량은 198.4mm(15.3%)에 해당하는 것으로 분석되었다(Figure 1b).

(a) Five Major River Basins in Korea





(b) Distribution of Seasonal Precipitation

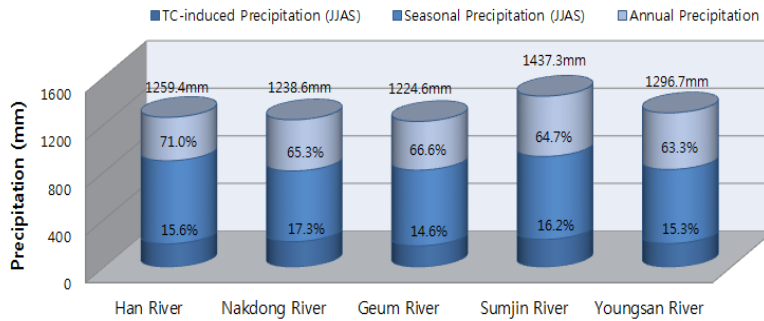


Figure 1 Distribution of seasonal precipitation (June to September) in Korea during 1966–2007. (a) Shows the location of five major river basins in Korea and (b) shows the distribution of seasonal precipitation. The annual long-term average precipitation amount is noted with a number above the cylinders for each river. The fraction of seasonal precipitation and TC-induced precipitation are expressed as percentages.

2.2 대상자료

본 연구에서 사용된 자료는 한반도 중권역별 강수량자료와 해수면온도 자료 그리고 북서태평양 지역에서 발생한 태풍정보이다. 첫 번째로 한반도지역의 중권역별 강수량 자료는 1966~2007년의 42개년 기간치 자료를 국가 수자원관리 종합정보시스템(WAMIS 2013, URL: <http://wamis.go.kr/>)에서 제공받아 사용하였으며, 유역 평균 강수량 자료는 Thiessen polygon방법에 의하여 산출된 값이다. 다음으로 해수면온도 자료는 National Oceanic and Atmospheric Administration(NOAA)에서 제공하는 Hadley Centre의 관측 자료를 이용하였으며, HadISST 자료는 1°×1°의 공간해상도를 갖고 매월 갱신이 되며 다음의 Website(NOAA 2013, URL: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices>)에서 내려 받을 수 있다(Rayner et al. 2003). 또한 북서태평양지역에서 발생한 태풍자료는 위도 2.5°와 경도 2.5° 격자크기의 공간 자료를 가공하여 분석한 NCEP-NCAR 자료를 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)로부터 제공받아 사용하였으며 (Kistler et al., 2001), 1966년부터 2007년까지의 42개년 동안의 북서태평양에서 발생한 태풍의 진로 자료는 우리나라의 태풍연구센터(TRC: Typhoon Research Center, 2013, URL: <http://www.typhoon.or.kr/>)와 일본의 기상청(JMA: Japan Meteorological Agency, 2013, URL: <http://www.jma.go.jp/>)의 관측 자료를 사용하였다. 다음 Table 1은

우리나라 제주도의 태풍연구센터에서 제공하는 북서태평양지역에서 발생한 과거 태풍관측 자료 중 1971년-2012년까지의 월별자료 및 한반도 영향 태풍을 정리하여 나타내었다.

Table 1 Historical data for typhoon frequency over the Western North Pacific region and number of landings on the Korean Peninsula.

| Year | JAN | FEB | MAR | APR | MAY | JUN | JUL | AUG | SEP | OCT | NOV | DEC | Total |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-------|------|------|-----|-----|-------|
| 1966 | | | | 1 | 2 | 1 | 4 | 10(2) | 9(1) | 4 | 3 | 1 | 36(3) |
| 1967 | | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 7(1) | 9 | 9 | 4 | 3 | 1 | 31(4) |
| 1968 | | | | 1 | 1 | 1 | 3(1) | 8(1) | 3(1) | 5 | 5 | | 21(3) |
| 1969 | 1 | | 1 | 1 | | | 3 | 4 | 3(1) | 3 | 2 | 1 | 32(4) |
| 1970 | | 1 | | | | 2 | 3(2) | 6(2) | 5 | 5 | 4 | | 21(2) |
| 1971 | 1 | | 1 | 3 | 4 | 2 | 8 | 5(2) | 6(1) | 4 | 2 | | 36(3) |
| 1972 | 1 | | | | 1 | 3 | 6(2) | 5(1) | 5(1) | 5 | 3 | 2 | 31(4) |
| 1973 | | | | | | | 7(2) | 5(1) | 2 | 4 | 3 | | 21(3) |
| 1974 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 4 | 4(2) | 5(1) | 5(1) | 4 | 4 | 2 | 32(4) |
| 1975 | 1 | | | | | | 2(1) | 4(1) | 5 | 5 | 3 | 1 | 21(2) |
| 1976 | 1 | 1 | | 2 | 2 | 2 | 4(3) | 4(2) | 5(1) | 1 | 1 | 2 | 25(6) |
| 1977 | | | 1 | | | 1 | 3 | 3(1) | 5(1) | 5 | 1 | 2 | 21(2) |
| 1978 | 1 | | | 1 | | 3(1) | 4 | 8(2) | 5(1) | 4 | 4 | | 30(4) |
| 1979 | 1 | | 1 | 1 | 2 | | 4 | 2(2) | 6 | 3 | 2 | 2 | 24(2) |
| 1980 | | | | 1 | 4 | 1 | 4(1) | 2(1) | 6(1) | 4 | 1 | 1 | 24(3) |
| 1981 | | | 1 | 2 | | 3(2) | 4(1) | 8 | 4(2) | 2 | 3 | 2 | 29(5) |
| 1982 | | | 3 | | 1 | 3 | 3 | 5(3) | 5(1) | 3 | 1 | 1 | 25(4) |
| 1983 | | | | | | 1 | 3 | 5 | 2(1) | 5 | 5 | 2 | 23(1) |
| 1984 | | | | | | 2 | 5(1) | 5(1) | 4(1) | 7 | 3 | 1 | 27(3) |
| 1985 | 2 | | | | 1 | 3(1) | 1 | 8(3) | 5 | 4(1) | 1 | 2 | 27(5) |
| 1986 | | 1 | | 1 | 2 | 2(1) | 3 | 5(1) | 3(1) | 5 | 4 | 3 | 29(3) |
| 1987 | 1 | | | 1 | | 2 | 4(2) | 4(1) | 6 | 2 | 2 | 1 | 23(3) |
| 1988 | 1 | | | | 1 | 3 | 2 | 8 | 8 | 5 | 2 | 1 | 31(0) |
| 1989 | 1 | | | 1 | 2 | 2(1) | 7(1) | 5 | 6 | 4 | 3 | 1 | 32(2) |
| 1990 | 1 | | | 1 | 1 | 3(1) | 4(1) | 6 | 4(2) | 4 | 4 | 1 | 29(4) |
| 1991 | | | 2 | 1 | 1 | 1 | 4(1) | 5(2) | 6(2) | 3 | 6 | | 29(5) |
| 1992 | 1 | 1 | | | | 2 | 4 | 8(1) | 5(1) | 7 | 3 | | 31(2) |
| 1993 | | | 1 | | | 1 | 4(2) | 7(1) | 5(1) | 5 | 2 | 3 | 28(4) |



| Year | JAN | FEB | MAR | APR | MAY | JUN | JUL | AUG | SEP | OCT | NOV | DEC | Total |
|------|-----|-----|-----|-----|-------|--------|---------|---------|---------|--------|-----|-----|-----------|
| 1994 | | | | 1 | 1 | 2 | 7(2) | 9(2) | 8 | 6(1) | | 2 | 36(5) |
| 1995 | | | | 1 | | 1 | 2(1) | 6(1) | 5(1) | 6 | 1 | 1 | 23(3) |
| 1996 | | 1 | | 1 | 2 | | 5(1) | 6(1) | 6 | 2 | 2 | 1 | 26(2) |
| 1997 | | | | 2 | 3 | 3(1) | 4(1) | 6(2) | 4(1) | 3 | 2 | 1 | 28(5) |
| 1998 | | | | | | | 1 | 3 | 5(1) | 2(1) | 3 | 2 | 16(2) |
| 1999 | | | | 2 | | 1 | 4(1) | 6(2) | 6(2) | 2 | 1 | | 22(5) |
| 2000 | | | | | 2 | | 5(2) | 6(2) | 5(1) | 2 | 2 | 1 | 23(5) |
| 2001 | | | | | 1 | 2 | 5 | 6(1) | 5 | 3 | 1 | 3 | 26(1) |
| 2002 | 1 | 1 | | | 1 | 3 | 5(3) | 6(1) | 4 | 2 | 2 | 1 | 26(4) |
| 2003 | 1 | | | 1 | 2(1) | 2(1) | 2 | 5(1) | 3(1) | 3 | 2 | | 21(4) |
| 2004 | | | | 1 | 2 | 5 | 2(1) | 8(3) | 3(1) | 3 | 3 | 2 | 29(5) |
| 2005 | 1 | | 1 | 1 | | 1 | 5 | 5(1) | 5 | 2 | 2 | | 23(1) |
| 2006 | | | | | 1 | 1 | 3(1) | 7(1) | 3(1) | 4 | 2 | 2 | 23(3) |
| 2007 | | | | 1 | 1 | | 3(2) | 4 | 5(1) | 6 | 4 | | 24(3) |
| Σ | 18 | 7 | 15 | 31 | 43(1) | 70(10) | 167(37) | 242(49) | 209(30) | 162(3) | 107 | 49 | 1078(134) |

* Source : 태풍연구센터, <http://www.typhoon.or.kr/>

2.3 연구방법

Kug et al.(2009)과 Yeh et al.(2009)은 중앙태평양의 해수면 온도가 이상적으로 넓게 분포하는 새로운 형태의 El Niño Modoki와 Niño3, Niño4의 해수면온도 관측자료와의 상관성을 분석하였으며, Ren and Jin(2011)은 서로 다른 형태의 El Niño 사상을 Niño3와 Niño4의 관측자료를 이용하여 CT El Niño와 WP El Niño를 구분하였다. 본 연구에서는 서로 다른 형태의 ENSO와 태풍에 의한 강수발생 특성 변화의 상관관계를 규명하기 위하여 한반도 지역을 대상으로 Ren and Jin(2011)이 분류하였던 기준을 적용하여 1950~2011년까지의 62년 동안의 월별 Niño3와 Niño4 Anomalies를 바탕으로 CT El Niño와 WP El Niño를 구분하였다. CT El Niño와 WP El Niño의 구분 식은 Chapter (I)의 Eq. (1)을 참고하기 바란다. 본 연구에서는 Yoon et al.(2013)이 적용하였던 CT El Niño 시기와 WP El Niño 시기의 5개의 강한 CT El Niño 해(1972/1973, 1982/1983, 1986/1987, 1991/1992, 1997/1998)와 5개의 강한 WP El Niño 해(1968/1969, 1990/1991, 1994/1995,

2002/2003, 2004/2005) 시기로 구분하여 태풍에 의한 수문 변동 특성 분석을 적용하였으며, 동일한 시기에 북서태평양 지역에서 발생한 태풍을 대상으로 CT El Niño와 WP El Niño 시기로 구분하여 한반도 도메인을 통과하여 영향을 미친 태풍을 분류해 내었다.

한반도 도메인을 통과하여 영향을 미친 태풍사상(episodic TCs)에 의한 계절강수량의 분류는, Kim et al. (2012)이 제시한 한반도 영향 도메인(120°E-138°E, 32°N-40°N)을 지나는 태풍의 체류시간(residence time)과 유역의 강우 및 유출 반응을 고려한 탐색적 분석기법(exploratory analysis)을 적용하였다. 또한 전통적인 CT El Niño와 최근 발생하고 있는 WP El Niño가 한반도에 지역적으로 미치는 영향을 분석하기 위하여, El Niño가 강한 해의 수문관측사상의 합성편차(CA)를 적용하였고, 상대적으로 적은 사상을 보완하고자 42개년(1966-2007년) 관측자료에 대한 Bootstrap random resampling 방법을 적용하여 CT/WP El Niño 패턴에 대한 한반도 중권역 유역별 수문자료특성의 통계적 유의성 테스트를 수행하였다.

3. 분석 결과

3.1 태풍 발생빈도 및 강도분석

다음 Figure 2는 북서태평양(WNP) 지역에서 발생한 태풍의 5개의 강한 CT El Niño 해와 5개의 강한 WP El Niño 해의 한반도에 영향을 주었던 태풍의 발생빈도(TC frequency)를 보여주고 있다. 북서태평양 지역에서 발생한 태풍관측은 1951년-현재까지 이루어지고 있으며, 우리나라의 태풍연구센터의 기록에 의하면 1951-2012년 현재 발생한 태풍은 총 1619개, 이중 한반도에 영향은 미친 태풍은 198개로 기록하고 있다.

본 연구에서는 한반도 도메인을 통과한 북서태평양지역에서 발생한 태풍을 분류하였으며, 우리나라의 태풍영향이 비교적 큰 계절인 여름철(June to September)을 대상으로 CT/WP El Niño 해로 구분하여 분석하였다. 태풍의 발생빈도와 강도를 분석한 결과 북서태평양 지역에서 여름철에 발생한 태풍은 평균 16.13개/년으로 분석되었으며, 이중 한반

도에 영향을 미친 태풍은 5개/year으로 분석되었다. 또한 CT El Niño 기간에는 북서태평양 지역에 총 69개의 태풍이 발생하였으며, 이중 21개(4.2개/year)의 태풍이 한반도에 영향을 미쳤다(Figure 2a). 그리고 WP El Niño 기간에는 북서태평양 지역에서 총 68개의 태풍이 발생하였으며, 이중 20개(4.0개/year)의 태풍이 한반도에 영향을 미친 것으로 분석되었다(Figure 2b).

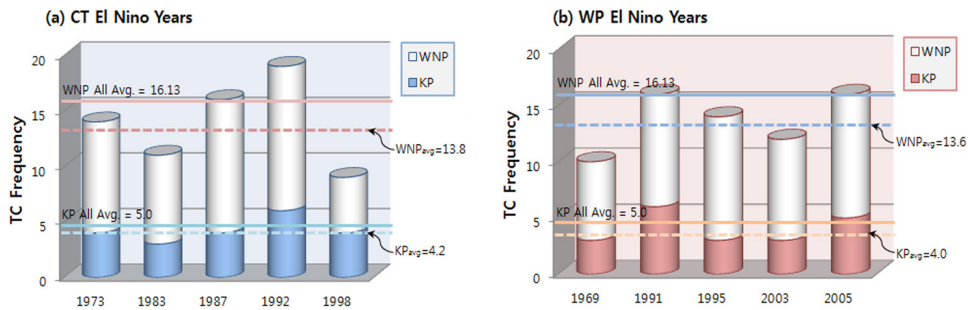


Figure 2 Tropical cyclone (TC) frequency for (a) CT and (b) WP El Niño years in the Western North Pacific region.

다음 Figure 3는 북서태평양(WNP) 지역에서 발생한 태풍의 5개의 강한 CT El Niño 해와 5개의 강한 WP El Niño 해의 한반도 영향 태풍의 발생강도(TC intensity)를 보여주고 있다. 태풍의 강도 분석을 위하여 태풍의 최소 중심기압(central pressure, hPa)과 최대 풍속(wind speed, kt)을 Box-whisker plots을 통하여 분석하였다. 분석결과 태풍의 최소 중심기압은 CT El Niño 해에 평균 948.3hPa(Percentile 50th = 960.0 hPa), 최소 885hPa로 분석되었으며, WP El Niño 해의 경우 평균 949.6hPa(Percentile 50th = 947.5 hPa), 최소 895hPa로 분석되었다(Figure 3a). 또한 태풍의 최대풍속은 CT El Niño 해에 평균 78.5kt(Percentile 50th = 75.0 kt), 최대 120kn로 분석되었으며, WP El Niño 해의 경우 평균 75.3kt(Percentile 50th = 80 kt), 최대 105kt로 분석되었다(Figure 3b). 따라서 Box-whisker plot에 의한 Percentile 50th 값만을 가지고 비교하였을 경우, 한반도 영향 태풍이 WP El Niño 해에는 CT El Niño 해에 비하여 태풍의 중심기압이 비교적 낮고 태풍의 최대속도가 높은 강한 태풍이 발생할 가능성이 있는 것으로 분석된다.

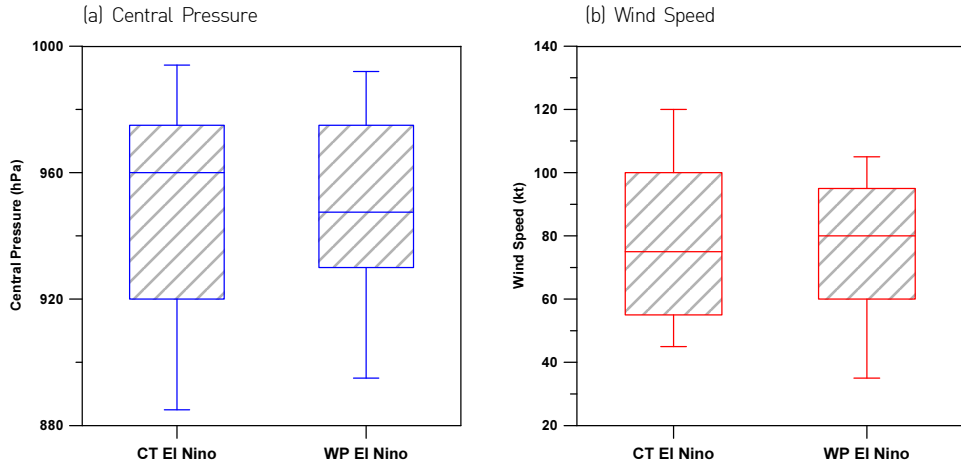


Figure 3 Tropical cyclone intensity for the CT and WP El Niño years as determined by the (a) central pressure and (b) wind speed.

3.2 태풍의 발생위치 및 경로분석

다음 Figure 4는 강한 CT/WP El Niño로 기록되었던 각각의 5개해 중 북서태평양 (WNP) 지역에서 발생한 태풍의 한반도 영향 태풍의 발생위치(TC genesis position)와 진행경로(TC Tracks)의 차이를 보여주고 있다. 태풍의 발생위치(genesis position)의 공간분포 특성 분석을 위하여 이변량 경험적 분포함수(bivariate empirical distribution functions)를 사용하였으며, Lower quartile level($0% < LQL < 25%$)과 Median quartile level($25% < MQL < 75%$) 그리고 Upper quartile level($75% < UQL < 100%$)의 3가지 등고선 형태로 표현하였다. 분석 결과, CT El Niño 해에는 이변량 경험적 분포함수 중심의 위치가 $14.3^{\circ}N, 140.6^{\circ}E$ 로 분석되었으며, WP El Niño 해에는 중심의 위치가 $15.3^{\circ}N, 143.2^{\circ}E$ 로 분석되어 태풍의 발생위치의 차이가 거의 없는 것으로 나타났으나, CT El Niño 해에 필리핀 해(Philippine sea) 동쪽에 치우쳐서 발생하고 있음을 확인할 수 있다(Figure 4a). 또한 한반도 도메인을 통과한 CT/WP El Niño 해의 태풍 이동경로를 분석한 결과 뚜렷한 패턴 변화의 차이는 발생하지 않았으나, CT El Niño 해의 경우 대체로 지그제그 형태의 진로특성을 보이고 있으며(Figure 4a), WP El Niño 해의 경우 주로 쿠로시오 해(Kuroshio sea)

를 따라서 한반도 도메인의 우측으로 치우쳐 부상하는 경향이 있음을 확인하였다(Figure 4b).

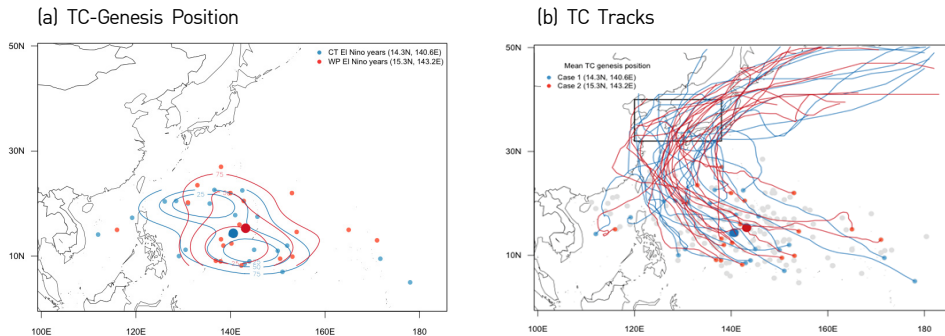


Figure 4 (a) Tropical cyclone (TC)-genesis position and (b) TC tracks of cyclones affecting the Korean Peninsula during CT (case 1 shown in blue) and WP (case 2 shown in red) El Niño years.

3.3 Empirical PDF 분석

CT/WP El Niño 패턴에 따른 북서태평양 지역에서 발생한 태풍의 한반도 영향을 분석하기 위하여, 5개의 강한 CT El Niño 해와 5개의 강한 WP El Niño 해에 발생한 태풍이 한반도 도메인에 들어오는 시기(entering date)와 태풍의 중심기압(central pressure)에 대한 백분위 합성편차를 핵밀도함수(kernel density function)를 이용하여 경험적 확률밀도함수(empirical probability density function)를 구하여 비교하였다.

다음 Figure 5는 북서태평양 지역에서 발생한 CT/WP El Niño 해의 태풍이 한반도 도메인으로 들어오는 시기와 태풍의 중심기압자료의 경험적확률밀도함수를 나타내고 있다. Figure 5a에서 보느냐와 같이 CT El Niño 해에는 북서태평양에서 발생한 태풍이 한반도 도메인에 들어오는 시기에 대한 합성편차의 경험적 확률밀도함수의 첨두가 낮고 음의 값(positive skew)을 갖는 것으로 나타나 자료의 평균이 평년에 비하여 작으므로 한반도 영향 태풍의 발생 시기가 평년에 비하여 다소 빨라질 확률이 클 것으로 분석된다. 반면에, WP El Niño 해에는 확률밀도함수의 첨두가 높고 양의 값(Negative skew)을 갖는 것으로

나타나 자료의 평균이 평년에 비하여 높으므로 한반도 영향 태풍의 발생 시기가 평년에 비하여 다소 늦어질 확률이 있을 것으로 분석된다.

또한, Figure 5b에서 보는바와 같이 CT El Niño 해에는 북서태평양에서 발생한 태풍의 중심기압(entering date)에 대한 합성편차의 경험적 확률밀도함수의 첨두가 높고 다소 음의(Positive skew)방향으로 치우쳐져 있는 것으로 나타났으며, 합성편차의 분산이 작아 대체로 평년에 발생하는 태풍의 강도를 갖을 확률이 클 것으로 분석된다. 반면에, WP El Niño 해에는 확률밀도함수의 첨두가 낮고 다소 양의 값(Negative skew)으로 치우쳐져 있어 자료의 평균은 평년값을 따르는 것으로 분석되나, 확률밀도함수의 왼쪽과 오른쪽 꼬리 분포가 모두 두껍게 나타나 극대치 및 극소치 중심기압의 크기를 갖는 태풍사상의 발생 확률이 클 것으로 분석되었다.

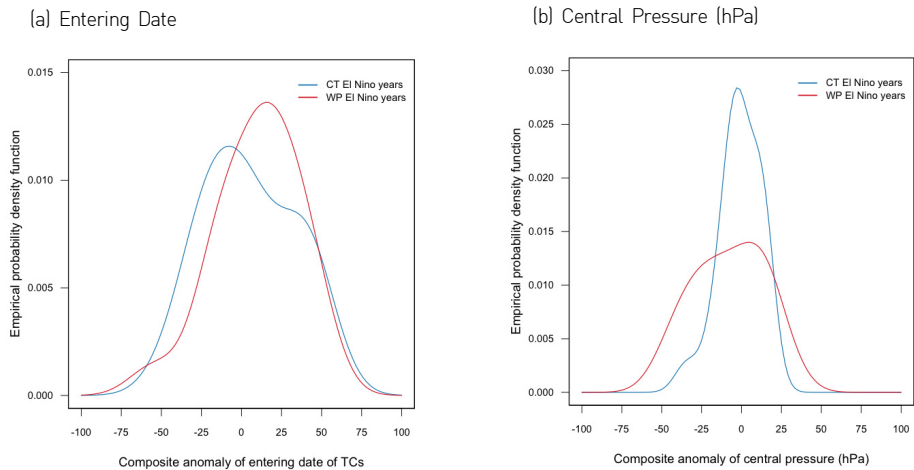


Figure 5 Composite anomalies and empirical probability density functions for (a) the entering date and (b) central pressure of tropical cyclones (TCs) during CT/WP El Niño years.

3.4 Possible mechanism 분석

CT decaying 해에는 필리핀, 남중국해, 동중국해 일부지역의 SSTA가 평년에 비해 높은 반면, WP decaying 해에는 일본 동부 쿠로시오 확장역과 한반도 근해를 제외한 북서



태평양 전체 지역에서 SSTA가 전체적으로 높은 것으로 나타나고 있다. 이처럼 북서태평양 전체 지역에서의 평년보다 높은 SSTA는 저위도에서 생성되어 한반도로 북상하는 태풍의 강도를 강화 혹은 유지시킬 수 있는 잠열을 지속적으로 공급할 수 있는 환경을 제공하고 있음을 확인할 수 있다(Figure 6). 다음으로 Vertical Wind Shear(VWS)는 Main Development Region(MDR)에서 태풍발생과 중위도로 북상하는 태풍의 강도 변화에 영향을 주며, 특히 위도 20-35도 사이의 VWS는 한반도 상륙 태풍의 강도 변화에 영향 준다. 분석결과 CT decaying 해에는 위도 20도 부근에서 음의 편차가 좁게 나타나고 위도 25도 이상에서는 양의 편차가 나타나는 반면, WP decaying 해에는 위도 20-35도 전반에 걸쳐 음의 편차가 나타나는데 이는 한반도로 북상하는 태풍의 강도를 유지 혹은 강화 시키는데 기여할 수 있는 것으로 분석된다(Figure 7).

또한 500 hPa Vertical Velocity(Omega) 역시 태풍의 강도 변화에 중요한 영향을 줄 수 있는 인자이다. 500 Omega의 음의 편차는 평년보다 상승기류를 나타내므로 태풍 강도유지에 유리한 조건이 되며 양의 편차는 평년보다 하강기류를 나타내므로 태풍 강도유지에 불리한 조건이 된다. 분석결과 한반도 도메인에 상륙하는 태풍의 길목에 해당하는 동중국해 부근에서 CT/WP decaying 해에는 전체적으로 음의 편차를 가지지만, 한반도 도메인 상공에서 CT decaying 해에는 양의 편차를 가지며 WP decaying 해에는 음의 편차를 보이는 것을 확인할 수 있다. 따라서 WP decaying 해에 한반도 상공 상승기류로 인한 태풍강도 유지에 유리한 조건을 갖는 것으로 분석되나 통계적으로 유의한 결과는 나타나지 않았다(Figure 8). 다음으로 850 hPa divergence의 경우 양의 편차는 하층에서 수렴을, 음의 편차는 하층에서 발산을 나타내었다. CT, WP decaying 해 모두 한반도로 상륙하는 태풍의 길인 동중국해에서 모두 음의 편차를 가지지만, 한반도 위에서는 CT 해에 양의 편차를 가지는 것으로 분석되었다(Figure 9).

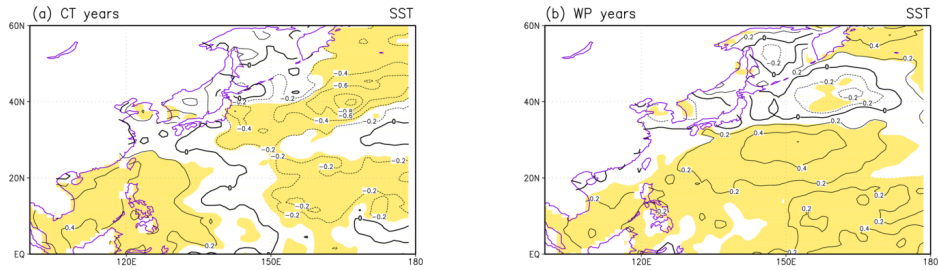


Figure 6 Sea surface temperature [SST] composites anomalies obtained from NOAA OISSTv2 in (a) CT years and (b) WP years. Shading indicates values over 90% confidence based on the Student's T-test.

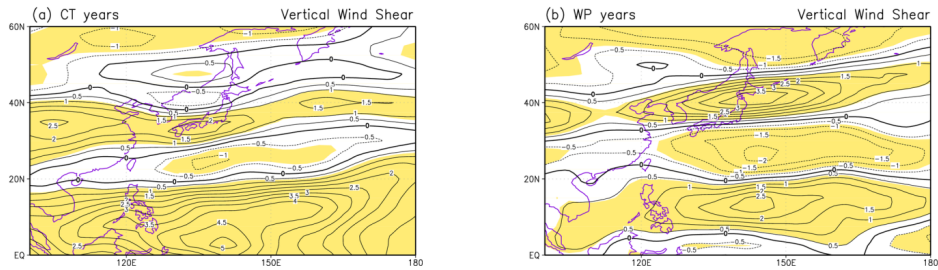


Figure 7 Same as Figure 6, except results show the vertical wind shear anomalies obtained from NCEP-NCAR reanalysis. $WWS = \sqrt{(u_{200} - u_{850})^2 + (v_{200} - v_{850})^2}$.

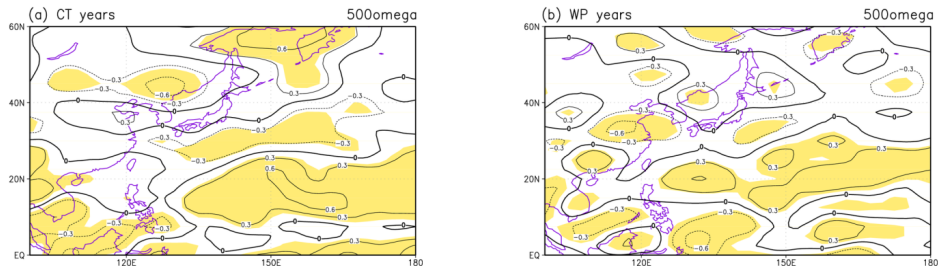


Figure 8 Same as Figure 6, except results show the 500 hPa vertical velocity anomalies.

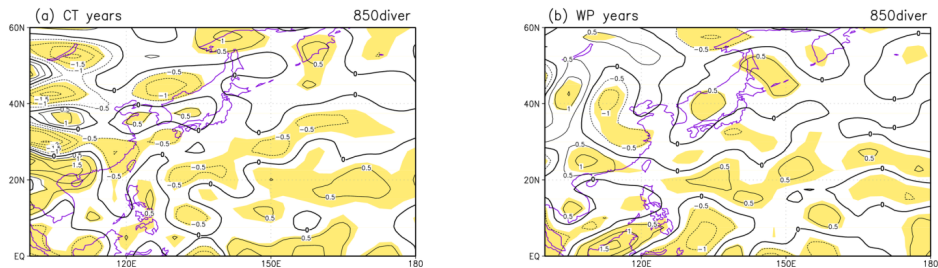


Figure 9 Same as Figure 6, except results show the 850 hPa divergence anomalies.

4. ENSO 패턴 변화에 따른 한반도 영향 태풍강수 특성 분석

CT/WP El Niño 해에 북서태평양 지역에서 발생한 태풍이 한반도에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 태풍에 의해 발생한 여름철(June to September) 강수와 50mm 이상의 중호우 사상의 발생 특성을 분석하였다(Figure 10, 11). 한반도 총 112개 중권역별 여름철 강수량을 CT El Niño 해와 WP El Niño 해로 구분하여 태풍에 의해 발생한 여름철 계절강수량과 일강수량이 50mm이상인 날 수의 백분위 편차의 변화량과 변동특성을 분석하여 통계적으로 유의한 경향이 있는 유역을 사선으로 나타내었으며, 유의성 검증에는 Bootstrap Resampling 방법을 적용하였다.

4.1 CT/WP El Niño 해의 태풍강수 특성

CT El Niño 해의 여름철 부분 강수량은 856.6 mm로 평년에 비하여 -0.39% 감소하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 부분 계절강수량은 한강유역 858.1mm(-2.82%), 낙동강유역 773.9mm(-2.19%), 금강유역 886.4mm(6.73%), 섬진강유역 915.9mm(-3.42%), 그리고 영산강유역 848.6mm(0.22%)로 분석되었다. 따라서, CT El Niño 해에는 금강과 영산강 유역에서 평년 여름철 계절강수량에 비하여 0.22% - 6.73% 소폭 증가하였으며, 한강, 낙동강, 섬진강 유역에서는 -0.39% to -2.82% 감소하는 것으로 분석되었다. 다음으로 WP El Niño 해의 여름철 강수량은 976.9mm로 평년에 비하여 13.60% 증가하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 부분 계절강수량은 한강유역 1053.7mm(19.33%), 낙동강유역 910.5mm(15.07%), 금강유역 6.73mm(22.51%), 섬진강유역 1039.4mm(9.61%), 그리고 영산강유역 863.4mm(1.97%)로 분석되었다. 따라서, WP El Niño 해에는 5대강 유역 모두 평년 여름철 계절강수량에 비하여 1.97% - 22.51%증가하는 것으로 분석되었다.

다음 Figure 10a는 CT El Niño(case 1) 해에 발생한 한반도 여름철(JJAS) 태풍 강수량의 중권역별 변동특성을 나타내고 있다. CT El Niño 해에는 평년대비 태풍에 의한 여름철 강수량의 백분위 anomaly 평균이 -6.3%(한강: -2.7%, 낙동강: -0.8%, 금강: -14.1%, 섬진강: 6.1%, 영산강: -29.0%)로 전체적으로 감소경향이 있는 것으로 분석되었으며, 주

로 한반도 서남부 지역에서는 감소, 동북부 지역에서는 증가 특성이 있음을 확인하였다. 중권역별 태풍에 의한 여름철 강수의 증감 패턴은, 신뢰구간 90%에서 병천천(ID: 2006), 감천(ID: 2010), 직소천(ID: 3303), 그리고 요천(ID: 4005) 유역에서 통계적 유의한 증가 패턴이 나타나는 것으로 분석되었으며, 낙동창녕(ID: 2017), 회야강(ID: 2301), 대중천(ID: 2403), 가화천(ID: 2501), 무주남대천(ID: 3003), 여수시(ID: 4106), 영산강상류(ID: 5001), 황룡강(ID: 5002), 그리고 영산강중류(ID: 5004) 유역에서 통계적으로 유의한 감소 패턴이 있는 것으로 나타났다. 전체적으로 신뢰구간 90%에서 태풍에 의한 여름철 강수의 유의한 증가패턴은 한반도의 중남부 일부 유역에서 나타났으며, 전체 유역면적 대비 6.5%를 차지하였다. 그리고 한반도 여름철 강수량의 변동계수(CV, Coefficient of Variation)를 분석한 결과, 전체 유역 평균 CV = 0.45(한강 CV = 0.40, 낙동강 CV = 0.45, 금강 CV = 0.42, 섬진강 CV = 0.47, 영산강 CV = 0.49)로, CT El Niño 해에는 태풍에 의한 여름철 강수량 변동이 비교적 큰 것으로 분석되었다(Table 2).

다음 Figure 10b는 WP El Niño(case 2) 해에 발생한 한반도 여름철(JJAS) 태풍 강수량의 중권역별 변동특성을 나타내고 있다. 평년대비 태풍에 의한 여름철 강수량의 백분위 anomaly 평균이 33.1%(한강: 34.9%, 낙동강: 32.9%, 금강: 34.0%, 섬진강: 29.5%, 영산강: 32.5%)로 전체적으로 증가경향이 뚜렷하게 나타나는 것으로 분석되었으며, 전체유역면적 대비 41.8%지역이 신뢰구간 90%에서 통계적으로 유의한 증가 패턴이 나타나는 것으로 분석되었다. 중권역별로는 신뢰구간 90%에서 한강권역은 충주댐(ID: 1003) 유역을 비롯한 총 15개 중권역에서, 낙동강권역은 안동댐하류(ID: 2003) 유역을 비롯한 총 13개 중권역에서, 금강권역은 용담댐(ID: 3001) 유역을 비롯한 총 8개 중권역에서, 섬진강권역은 완도(ID: 4102)와 이사천(ID: 4104) 유역에서, 영산강권역은 주진천(ID: 5301) 유역에서 통계적으로 유의한 증가 패턴이 있는 것으로 분석되었다. 또한 WP El Niño 해의 태풍에 의해 발생한 여름철 강수량의 변동계수(CV)를 분석한 결과, 한반도 전체 유역 평균 CV = 0.31(한강 CV = 0.23, 낙동강 CV = 0.33, 금강 CV = 0.28, 섬진강 CV = 0.34, 영산강 CV = 0.38)로, WP El Niño 해에는 CT El Niño 해에 비하여 태풍에 의한 여름철 강수량 변동이 작음을 확인하였다(Table 2).



(a) CT El Niño (Case I)

(b) WP El Niño (Case II)

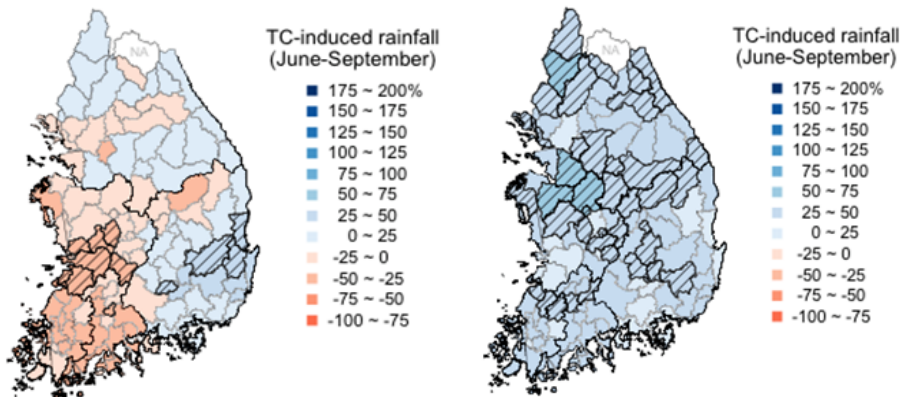


Figure 10 Composite anomalies of TC-induced rainfall during (a) CT and (b) WP El Niño years. The hatched polygons indicate statistically significant changes in TC rainfall based on the 10% significance level.

4.2 CT/WP El Niño 해의 태풍에 의한 중호우사상 발생 특성

CT/WP El Niño 해에 발생한 중호우사상 중 태풍에 의한 영향을 분석하기 위하여, 한반도 중권역별 태풍에 의해 발생한 50 mm/day를 초과하는 날의 발생빈도에 대한 백분위 편차를 분석하였다. 다음 Figure 11은 CT El Niño 해(case 1)와 WP El Niño 해(case 2)로 구분하여 중호우사상의 발생빈도에 대한 백분위 편차와 통계적으로 유의한 경향이 있는 유역을 사선으로 나타낸 결과이며, Table 2는 CT/WP El Niño 해의 태풍에 의한 계절강수량과 중호우 사상 발생 특성의 통계값 및 백분위 anomaly 면적 편차를 나타낸 결과이다.

다음 Figure 11(a)에서 보는바와 같이, CT El Niño 해(case 1)의 경우, 주로 한반도의 서남부 지역에서 중호우사상을 초과하는 강수의 발생빈도가 감소하는 경향이 있는 것으로 분석되었으며, 동북부 지역에서는 주로 증가하는 경향이 있는 것으로 분석되었다. 또한 총 112개 중권역중 8개 중권역에서 신뢰구간 90%에서 통계적으로 유의한 증가 패턴이 나타나는 것으로 분석되었으며, 20개 중권역에서는 통계적으로 유의한 감소 패턴이 나타나는 것으로 분석되었다. 다음으로, 50 mm/day를 초과하는 강수일수의 백분위 anomaly 를 분석한 결과 전체 유역 평균은 -4.8%로 나타났으며, 요천(ID: 4005) 유역에서 90.0%로

가장 크게 나타났고, 지석천(ID: 5003) 유역에서 -88.0%로 가장 작게 나타났다. 신뢰구간 90%에서 태풍에 의한 여름철 중호우 사상의 유의한 증감패턴은 낙동강과 금강유역을 포함한 한반도의 중남부 일부 유역에서 나타났으며, 전체 유역면적의 22.2%를 차지하였다. 따라서 CT El Niño 해에는 한반도 전반에 걸쳐 중호우사상의 발생빈도가 감소할 것으로 분석되며, 증·감 패턴은 주로 낙동강과 금강 유역에서 발생할 것으로 분석되었다.

다음 Figure 11(b)에서 보는바와 같이, WP El Niño 해(case 2)의 경우, 주로 한반도 전반에 걸쳐 중호우사상을 초과하는 강수의 발생빈도가 증가하는 경향이 있는 것으로 분석되었으며, 중남부 지역과 일부 중서부, 동북부 지역에서는 감소하는 경향이 있는 것으로 분석되었다. 또한 총 112개 중권역중 32개 중권역에서 신뢰구간 90%에서 통계적으로 유의한 증가 패턴이 나타나는 것으로 분석되었으며, 태풍에 의한 여름철 중호우 사상의 유의한 증가패턴은 전체 유역면적의 30.6%를 차지하였다. 다음으로, 50 mm/day를 초과하는 강수 일수의 백분위 anomaly를 분석한 결과 전체 유역 평균은 33.4%로 나타났으며, 삼교천(ID: 3101) 유역에서 104.0%로 가장 크게 나타났고, 주암댐(ID: 4007) 유역에서 -30.0%로 가장 작게 나타났다. 따라서 WP El Niño 해에는 한반도 전반에 걸쳐 중호우사상의 발생빈도가 증가할 것으로 분석되며, 증가 패턴은 한반도 유역 전반에 걸쳐 분포하는 것으로 분석된다.

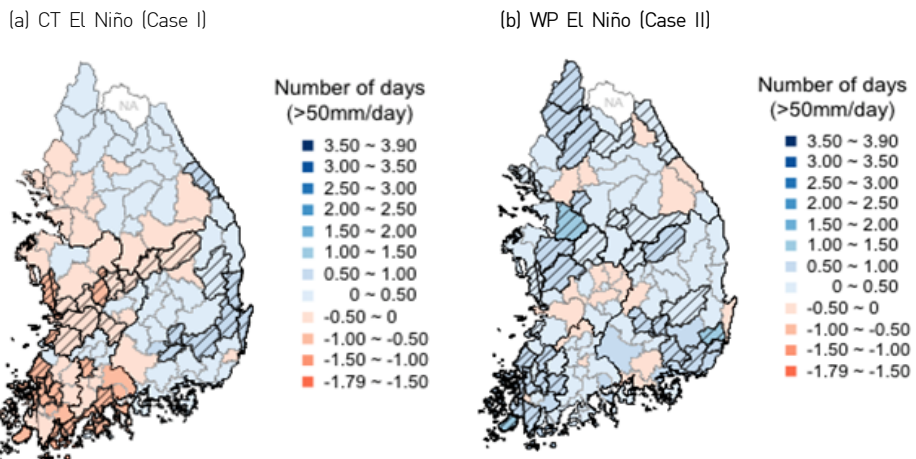


Figure 11 Composite anomalies of TC-related heavy rain days during (a) CT and (b) WP El Niño years. The hatched polygons indicate statistically significant changes in TC-induced rainy days based on the 10% significance level.



Table 2 Summary statistics showing the seasonal variability of TC-induced rainfall and heavy rainfall (> 50 mm/day) over the Korean Peninsula during the summer (JJAS) season for CT and WP El Niño years

| El Niño Type | Statistics | TC Induced Rainfall | | | | | Heavy Rainfall | | | | |
|--------------|---|---------------------|-------|-------|------|--------|----------------|-------|-------|------|--------|
| | | Han. | Nak. | Geum. | Sum. | Yeong. | Han. | Nak. | Geum. | Sum. | Yeong. |
| CT | Significant Change (%) [$p < 0.10$] | 0.0 | 11.6 | 4.1 | 7.6 | 22.4 | 8.8 | 25.3 | 37.8 | 17.2 | 46.2 |
| | Significant Stations (#) [$p < 0.10$] | 0/27 | 6/33 | 2/21 | 2/15 | 3/14 | 3/29 | 10/33 | 6/21 | 15/4 | 14/5 |
| | CV | 0.40 | 0.45 | 0.42 | 0.47 | 0.49 | - | - | - | - | - |
| WP | Significant Change (%) [$p < 0.10$] | 58.7 | 38.1 | 38.2 | 17.3 | 6.7 | 37.0 | 16.5 | 37.4 | 24.1 | 48.4 |
| | Significant Stations (#) [$p < 0.10$] | 15/29 | 13/33 | 8/21 | 2/15 | 1/14 | 29/9 | 33/7 | 21/7 | 15/4 | 14/5 |
| | CV | 0.23 | 0.33 | 0.28 | 0.34 | 0.38 | - | - | - | - | - |

* CV is the ratio of the standard deviation to the mean..

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 서로 다른 형태의 두 가지 ENSO(CT/WP El Niño) 패턴에 따른 한반도 영향 태풍을 중심으로 태풍활동 특성과 태풍으로 인한 5대강 유역의 여름철 강수량 및 중호우사상의 변동 특성을 분석하였으며, 주요 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

i) CT/WP El Niño 해의 태풍발생 빈도 및 강도 분석

태풍 발생 빈도는, CT El Niño 기간에는 북서태평양 지역에 총 69개의 태풍이 발생하였으며, 이중 21개(4.2개/year)의 태풍이 한반도에 영향을 미쳤고, WP El Niño 기간에는 북서태평양 지역에서 총 68개의 태풍이 발생하였으며, 이중 20개(4.0개/year)의 태풍이 한반도에 영향을 미친 것으로 분석되었다. 또한 태풍 발생 강도는 Box-whisker plot에 의한 Percentile 50th 값을 비교한 결과, WP El Niño 해의 한반도 영향 태풍이 CT El Niño 해에 비하여 중심기압(Percentile 50th = 947.5

hPa)이 낮고 최대풍속(Percentile 50th = 80 kt)이 높은 강한 태풍이 발생할 가능성이 있는 것으로 분석된다.

ii) CT/WP El Niño 해의 태풍발생 위치 및 경로 분석

두 가지 형태의 El Niño에 따른 태풍 발생위치가 CT El Niño 해에는 14.3°N, 140.6°E, WP El Niño 해에는 15.3°N, 143.2°E로 분석되었으며, 차이는 거의 없으나 WP El Niño해에 필리핀해 서쪽으로 다소 치우쳐 발생하는 것으로 분석되었다. 또한 한반도 도메인을 통과한 CT/WP El Niño 해의 태풍 이동경로는 뚜렷한 패턴 변화의 차이는 없으나, CT El Niño 해의 경우 대체로 지그제그 형태의 진로특성을 보이며, WP El Niño 해에는 주로 쿠로시오해를 따라 한반도 도메인의 우측으로 치우쳐 북상하는 경향이 있음을 확인하였다.

iii) 대규모 기후환경 조건 분석

CT/WP El Niño decaying 해의 대규모 기후환경조건을 분석한 결과, large-scale의 대기-해양 환경은 WP El Niño 해가 CT El Niño 해보다 태풍의 발달과 강도 유지에 유리한 조건을 제공하는 것으로 나타났다. 특히 태풍의 직접적인 heat source가 되는 SST는 대기 환경과 비교하였을 때 확연한 차이를 보였다. WP El Niño 해의 북서태평양의 해양 조건은 태풍의 발달과 더불어 한반도로 북상하는 태풍에 지속적인 latent heat을 제공해 줌으로써, 저위도에서 발생한 태풍이 중위도 한반도까지 북상하며 강도를 유지할 수 있도록 좋은 조건을 제공하였다. 그리고 WP El Niño 해의 25도 부근의 VWS는 한반도로 상륙하는 태풍의 발달기에 좋은 발달조건을 제공하여 태풍의 강도를 강하게 만들 수 있는 조건을 제공하였다. 한반도가 위치한 중위도에서의 Vertical Velocity와 Divergence는 태풍이 강도를 잃지 않고 유지하면서 한반도로 상륙할 수 있는 조건을 제공한 것으로 나타났다. 전반적으로 WP El Niño 해의 large-scale environment가 CT El Niño 해보다 한반도 상륙 태풍의 발달 및 강도유지에 좋은 조건을 제공한 것으로 나타났다.



iv) 한반도 지역의 태풍에 의한 여름철 강수특성 분석

태풍에 의한 한반도 여름철 강수량은 CT El Niño 해에는 평년에 비하여 -0.39% 감소하였으며, WP El Niño 해에는 13.60% 증가하는 것으로 분석되었다. 또한 CT El Niño 해에는 한반도 서남부 지역에서 감소, 동북부 지역에서는 증가 특성이 있음을 확인하였으며, WP El Niño 해에는 한반도 대부분 지역에서 태풍에 의한 여름철 강수가 증가하였다. 태풍에 의해 발생한 50mm/day 이상 중호우 사상의 발생 빈도는 한반도 중서부 지역에서 감소패턴이 있는 것으로 분석되며, WP El Niño 해에는 백분위 Anomaly 평균이 33.4% 로 한반도 전체유역에서 증가 패턴이 있는 것으로 분석되었다.

본 연구의 결과는 상대적으로 짧은 관측 사상과 샘플에 의존하고 있지만, CT/WP El Niño 따라 한반도 영향 태풍의 활동 및 태풍강수량의 변화가 민감하게 발생하는 것을 확인하였으며, 태풍에 의한 침수피해를 저감하고 극한 기후특성을 반영한 의사결정자들의 대응책 수립과 기후변화에 대비한 유역 맞춤형 적응정책 수립에 활용이 가능할 것이다. 추후 본 연구결과를 바탕으로 해양관련 기후인자와 태풍활동의 통계적 특성을 반영한 추계학적 예측모형 개발과 계절예측 시스템구축을 통하여 단기 및 중·장기 극한 기후특성을 반영한 수자원의 장기 종합계획 수립, 댐운영관리 실무, 물관리 예측, 지자체 기후변화 적응대책 수립 등 수자원 관련 주요 정책수립을 위한 기초자료로 활용이 가능할 것으로 사료된다.

REFERENCES

- Ashok, K., S. K. Behera, S. A. Rao, H. Weng, and T. Yamagata, 2007: El Niño Modoki and Its Possible Teleconnection. *J. Geophys. Res.*, **112**, C11007.
- Camargo, S. J., and A. H. Sobel, 2005: Western North Pacific tropical cyclone intensity and ENSO. *J. Climate*, **18**(15), 2996–3006.
- Chen T. C., S. Y. Wang, and M. C. Yen, 2006: Interannual variation of the tropical cyclone activity over the Western North Pacific. *J. Climate*, **19**, 5709–5720.
- Choi, K. S., and I. J. Moon. 2012: Influence of the Western Pacific teleconnection pattern on Western North Pacific tropical cyclone activity. *Dyn. Atmos. Oceans*, **57**, 1–16.
- Emanuel, K., 2007: Environmental factors affecting tropical cyclone power dissipation. *J. Climate*, **20**, 5497–5509.
- Emanuel, K., R. Sundararajan, and J. Williams, 2008: Hurricanes and global warming: Results from downscaling IPCC AR4 simulations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **89**, 347–367.
- Feng, J., W. Chen, C. Y. Tam, and W. Zhou, 2011: Different impacts of El Niño and El Niño Modoki on China rainfall in the decaying phases. *Int. J. Climatol.*, **31**, 2091–2101.
- Ho, C. H., J. J. Baik, J. H. Kim, D. Y. Gong, and C. H. Sui, : Interdecadal changes in summertime typhoon tracks. *J. Climate*, **17**, 1767–1776.
- JMA (Japan Meteorological Agency), 2013: <http://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>. Accessed January 2013.
- Kao, H. Y., and J. Y. Yu, 2009: Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of ENSO. *J. Climate*, **22**, 615–632.
- Kim, J. S., S. Jain, S. K., Yoon, 2012: Warm season streamflow variability in the Korean Han River Basin: links with atmospheric teleconnections. *Int. J. Climatol.*, **32**, 635–640.
- Kistler, R., E. Kalnay, W. Collins, S. Saha, G. White, J. Woollen, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, M. Kanamitsu, and V. Kousky, 2001: The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **82**, 247–268.
- Knutson, T. R., J. L. McBride, J. Chan, K. Emanuel, G. Holland, C. Landsea, I. Held, J. P. Kossin, A. K. Srivastava, and M. Sugi, 2010: Tropical cyclones and climate change. *Nat. Geosci.*, **3**, 157–163.
- Mathews, R., and B. D. Richter, 2007: Application of the indicators of hydrologic alteration software in environmental flow setting1. *J. Amer. Water Resour. Assoc.*, **43**, 1400–1413.
- NDIC (National Disaster Information Center), 2013: <http://www.safekorea.go.kr/>. Accessed 3 January 2013.
- Newman, A. V., G. Hayes, Y. Wei, and J. Convers, 2011: The 25 October 2010 Mentawai tsunami earthquake, from real-time discriminants, finite-fault rupture, and tsunami excitation. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L05302.
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), National Weather Service Climate Prediction Center, 2013: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>. Accessed January 2013.



- Poff, N. L. R., and J. V. Ward, 1990: Physical habitat template of lotic systems: Recovery in the context of historical pattern of spatiotemporal heterogeneity. *Environ. Manage.*, **14**, 629–645.
- Pradhan, P. K., B. Preethi, K. Ashok, R. Krishnan, and A. K. Sahai, 2011: Modoki, Indian Ocean Dipole, and western North Pacific typhoons: Possible implications for extreme events. *J. Geophys. Res.*, **116**, D18108.
- Rayner, N. A., D. E. Parker, E. B. Horton, C. K. Folland, L. V. Alexander, D. P. Rowell, E. C. Kent, and A. Kaplan, 2003: Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res.*, **108**, 4407, doi:10.1029/2002JD002670.
- Ren, H. L., and F. F. Jin, 2011: Niño indices for two types of ENSO. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L04704, doi:10.1029/2010GL046031.
- Tu, J. Y., C. Chou, P. Huang, and R. Huang, 2011: An abrupt increase of intense typhoons over the western North Pacific in early summer. *Environ. Res. Lett.*, **6**, 034013.
- WAMIS (Water Management Information System), 2013: <http://wamis.go.kr/>. Accessed 3 January 2013.
- Wang, C., and X. Wang, 2012: Classifying El Niño Modoki I and II by different impacts on rainfall in Southern China and typhoon tracks. *J. Climate*, **26**, 1322–1338.
- Wang, C., C. Li, M. Mu, and W. Duan, 2013: Seasonal modulations of different impacts of two types of ENSO events on tropical cyclone activity in the western North Pacific. *Climate Dyn.*, **40**, 2287–2902.
- Weng, H., K. Ashok, S. K. Behera, S. A. Rao, and T. Yamagata, 2007: Impacts of recent El Niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific rim during boreal summer. *Climate Dyn.*, **29**, 113–129.
- Yeh, S. W., J. S. Kug, B. Dewitee, M. H. Kwon, B. P. Kirtman, and F. F. Jin, 2009: El Niño in a changing climate. *Nature*, **461**, 511–514.
- Yoon, S. K., J. S. Kim, J. H. Lee., and Y. I. Moon, 2013: Hydrometeorological variability in the Korean Han River Basin and its sub-watersheds during different El Niño phases. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, **27**, 1465–1477.

CHAPTER III : Development of an Integrated Flood Risk Index in a Changing Climate: An Assessment for the Han River Basin, Korea

ABSTRACT

홍수는 가장 널리 알려진 자연재해 중 하나이며 전 지구적 기후시스템변화와 밀접한 연관이 있다. 최근 연구결과에 의하면 해수면온도의 상승과 이상 기후에 따른 홍수의 발생빈도와 강도가 점차 증가하고 있는 추세임을 시사하고 있다. 특히 자연계에 존재하는 수문기상학적 기후현상을 정확히 예측하기란 어려운 일이나, 잠재적 불확실성이 존재한다는 전제 하에 이를 포괄할 수 있는 종합적인 평가방안을 제시하는 일은 과학자가 해야 할 몫이다. 따라서 본 연구에서는 기후변화에 따른 수문학적 홍수위험에 대한 위험도 평가와 취약점을 특성화하기 위하여 수문학적 재해(Hydrological Hazard) 요인과 사회·경제적 취약성(Socio-economic Vulnerability) 요인, 생태학적 취약성(Ecological Vulnerability) 요인으로 구분하여 지역 규모 유역별 통합 홍수위험 지수(IFRI, Integrated Flood Risk Index)를 산정하였으며, 분석을 위한 Conceptual Framework을 제시하고 변화하는 기후특성과 다양한 기후조건에 따른 한강유역의 홍수위험을 평가하는 것에 연구의 초점이 맞추었다. 본 연구에서는 분석기간(Period I: 1971-1990, Period II: 1991-2007)과 대상유역(Urban, Rural)을 달리하여 홍수 위험 평가를 실시하였으며, 서로 다른 ENSO (CT/WP El Niño 패턴과 La Niña가 발생한 대표적인 decaying 해를 대상으로 통합 홍수위험분석을 실시하였다. 분석결과, 한강유역의 최근 홍수위험이 21.5% 증가하는 것으로 분석되었으며, 사회·경제·환경적 변화요인에 의하여 대도시를 포함하는 유역에서 홍수위험이 큰 것으로 분석되었다. 또한 CT El Niño 해에는 WP El Niño 해에 비하여 1.5% 홍수위험이 증가하였으며, La Niña에 비하여는 CT/WP El Niño 해 모두 22.0-24.0% 홍수 위험이 증가하는 것으로 분석되었다. 본 연구와 같이 통합 지수화에 의한 접근 방법은 기후변화로 인한 수문학적 위험성을 표준화하고 정량화된 값으로 제시하여 정책결정의 기초자료로 할 수 있다는 점에서 장점이 있다. 특히, 변화하는 기후에 적응하고 탄력적으로 반응하기 위한 지역 규모의 수문학적 위험도 평가를 위한 유용할 Tool로 활용이 가능할 것이다. 추후 본 연구의 방법론을 발전시켜 과학적이고 효율적인 수자원관리계획과 지역특성을 반영한 지자체 기후변화 적응 계획 수립을 위한 기초자료로 활용이 가능할 것이다.

핵심용어 : 통합 홍수위험 지수, 재해, 위험도, 취약성, 한강유역

1. INTRODUCTION

Floods are known to be some of the most devastating, yet common, natural disasters (Wang et al. 2003; Chang et al. 2009; Ni et al. 2010; Wang et al. 2011). Recent studies have shown an increase in the frequency of occurrence of hydrologic



extremes, which is influenced by urbanization and climate change (Chang and Kwon 2007; Fedeski and Gwilliam 2007; Nirupama and Simonovic 2007; Bae et al. 2008; Kim et al. 2012b). In recent decades, developed countries have concentrated on evaluating risk factors for flooding using a number of quantitative methodologies, and these studies have their results incorporated into flood control policy. Like other countries, South Korea has also undertaken significant flood risk research since the 1990s. However, cases that quantitatively analyze flood risks and the effects of floods in drainage areas in the region are rare because of the need for water resource assessments to be carried out from a long-term outflow perspective.

Several floods have occurred in the Han River basin, Korea during the last few decades of the 20th century. The total flooded area is 260,329.8ha, and the sum of flood damage totals 7,808.5 billion Korean won (KW) from 1971 to 2007. The total population affected by flooding in this area is approximately 1.07 million; these data are from the Korean Water Resources Management Information System (WAMIS 2012, <http://wamis.go.kr/>). Hence, the evaluation of flood hazards and the creation of a risk map for this region would very important for planning resilient land use activities and protecting infrastructure (Chang and Kwon 2007; Bae et al. 2008; Chang 2008; Kim et al. 2011; Kim et al. 2012b).

Quantifying vulnerability is seen as a key step toward effective risk reduction and the promotion of a culture of disaster resilience (Kasperson et al. 2005; Birkmann 2006). To evaluate flood hazards and create a risk map, many qualitative and quantitative approaches can be utilized (Anselmo et al. 1996; Du et al. 2006; Meyer et al. 2009; Sinaga et al. 2011; Wang et al. 2011). Flood risks can increase as a result of rapid development in urban areas (Teng et al. 2006; Nirupama and Simonovic 2007; Lim and Lee 2009; Kim et al. 2012a). Nanshan et al. (2009) noted that large-scale vulnerability to regional flood hazards in the Huai River basin, China can be shown with the social vulnerability index (SoVI) using information based on geographic information systems (GIS). Hydrological models incorporating a normal distribution have focused on the line-type distribution of floods (Shi 2003). Shi et al. (2005) suggested an optimal approach through the adjustment of land use patterns to control and prevent urban flood disasters in China. Ni et al. (2010) assessed flooding impacts in terms

of sustainability for long-term disaster risk reduction by development of the insurance related flood risk index (IRFR), the long-term flood impact on sustainability index (LFIS), and the sustainable development index (SDI) in mainland China.

A GIS-based spatial multi-criterion approach to flood risk assessment was performed in the Dongting Lake region in Hunan, Central China (Wang et al. 2011). In a study of flood risks in the Korean Peninsula, Chung et al. (2004) showed that the number of rainy days with precipitation greater than 30 mm/day increased between 1961 and 2002; precipitation has been shown to increase recent flood risks in South Korea. Furthermore, Chang and Kwon (2007) showed that the 90th percentiles of daily summer precipitation, intensity, and heavy precipitation have upward trends in South Korea.

The increasing flood risk in South Korea led Bae et al. (2008) to analyze long-term trends in precipitation and runoff in five major South Korean river basins for the assessment of flood risk. Chang et al. (2009) studied flood risk in six representative cities in the Gangwon Province of South Korea in order to determine whether natural or anthropogenic causes were responsible for the increased flood risk. More recently, Kim and Jain (2011) analyzed changes in seasonal precipitation in South Korea's five major river basins over the last 40 years (1966–2007), highlighting “hot spots” where typhoons have had major impacts. Jung et al. (2013) analyzed national-scale relative flood risk for 139 sub-watersheds in South Korea using non-parametric methods to calculate relative flood risks based on sensitivity, exposure, and adaptive capacity indices for each sub-watershed.

The purpose of the present study is to enhance policy standards and to formulate new methods to reduce flood risks in developing areas in South Korea. Specifically, this research aims to quantitatively analyze several indicators of flood risk and their qualitative effects on flood management in the Han River basin. The obtained results can be expected to provide useful baseline data for stakeholders and decision-makers. In the following sections, the need for further study of the possible factors that can lead to an increase in flood risks in the Korean Han River basin will be discussed along with the results of this particular research project, which employed an integrated flood risk index (IFRI).



2. DATA AND METHODOLOGY

2.1 Study area and data

The Han River basin is located in the center of the Korean Peninsula at 36°30′–38°55′N and 126°24′–129°02′E (Fig. 1). The watershed accounts for 23% of the territory of South Korea and it is 26,356 km² in size; the stream length in the watershed is 481.7km (Chang2008; Kim et al. 2011; Kim et al. 2012b; Yoon et al. 2013). In this study, data were collected from 24 sub-watersheds in the Han River basin for assessment of flood hazard and vulnerability. Most of the eastern part of the Han River basin is mountainous, and plains are present in the western parts.

According to governmental statistics about South Korean in 2007, the total population of the Han River basin is approximately 17 million and 12.4 million people live in the Jung-Rang basin including Seoul, which is equivalent to 34.0% of the total population. According to WAMIS (2013), the annual mean precipitation is 1,244 mm, the slope of the annual mean precipitation has increased by 3.5%, the total flooded area of the basin is 260,330 ha, and the sum of flood damage is 7,809 billion won based on 2007 estimates. Hence, the Han River basin is an area very vulnerable to flooding, and flood risk assessment is required for flood disaster mitigation.

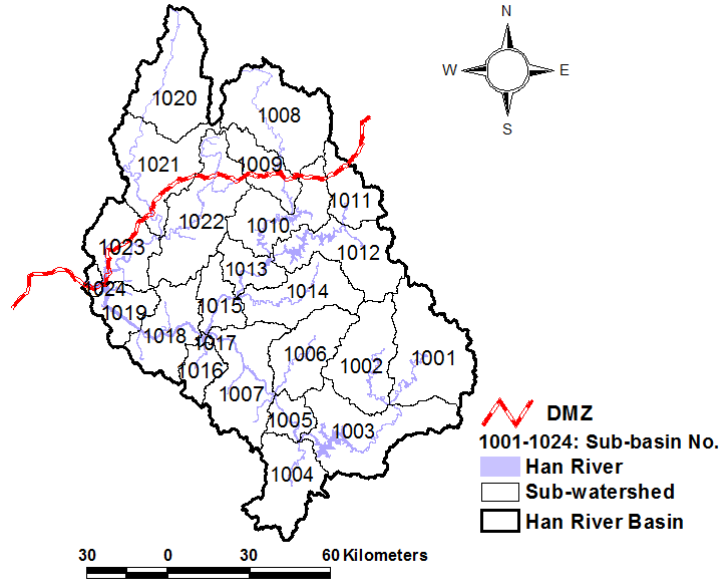
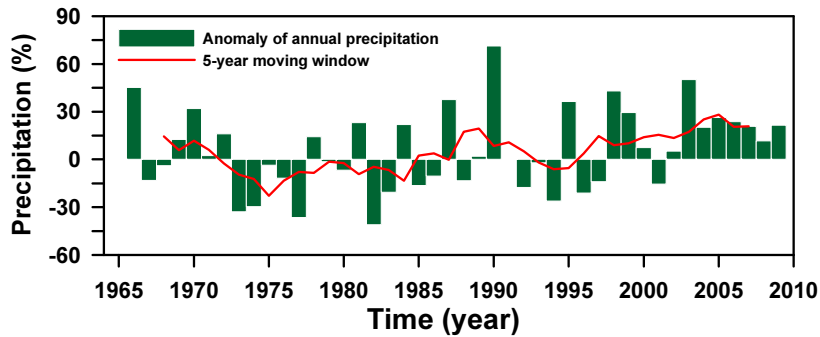


Figure 1 Han River basin located in the center of the Korean Peninsula.

Figure 2 illustrates the interannual variability of the anomalies for annual precipitation and discharge during the study period (1966–2009). The percentage anomalies of annual precipitation and discharge show significant upward trends during recent years when compared to the normal range of the annual time series. Furthermore, the 5-year moving windows of percentage anomaly data sets for long-term trends show increased tendencies in recent years over the Korean Han River basin.

(a) Anomaly of Annual Precipitation (1966-2009)



(b) Anomaly of Annual Discharge (1966-2009)

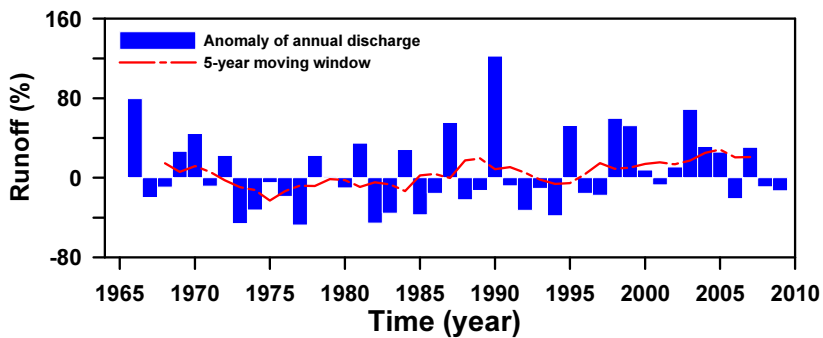


Figure 2 Anomaly of annual precipitation and discharge. The red line shows 5-year moving windows for each time series in the Korean Han River basin.

The IFRI analysis presented here is based on complete hydrologic hazard, socio-economic vulnerability, and ecological vulnerability data provided by the WAMIS for the period 1971–2007. Historical observed data were also acquired from WAMIS in order to assess changes in the basin during different periods. Daily precipitation data was provided by the Korean Meteorological Administration (KMA 2013, <http://kma.go.kr>), and a number of geographic information system (GIS) layers were generated in digital format by using Arc GIS 9.3 software to study flood risk and vulnerability in the Han River basin. The layers included watershed area, land cover, forest, and flooded area. Furthermore, the study area includes parts of North Korea, the northern part of the demilitarized zone (DMZ), for which this study used the only geographic information data available with the exception of the northern part

of the DMZ.

2.2 Methodology

Definitions of risk in research vary according to applications. The basis of risk lies in a commonsense understanding of the concept, such as the notion that risk associated with a particular hazard lies in the consequences of the hazard and increases with both the probability for exposure and the severity of the hazard. The assessment of flood risk and vulnerability in this study is based on district disaster system theory, which is based on the definition of risk expressed by Eq. (1) (Maskrey 1989):

$$Risk = Hazard + Vulnerability \quad (1)$$

where hazard is the premise, vulnerability is the base, and risk is the consequence.

Crichton (1999) has defined risk as the probability of a loss, and this depends on three elements: hazard, vulnerability, and exposure. If any of these elements shows increase or decrease, risk will be increased or decreased respectively. Furthermore, vulnerability can be defined with physical, social, economic, and environmental factors or processes, which can have significant impacts on communities (UNISDR 2013, <http://www.unisdr.org/>). Thus, this study derived an IFRI model that incorporated hazard and vulnerability as the following functions:

$$Integrated\ Flood\ Risk\ Index = function (H_i, S_j, E_k) \quad (2)$$

$$IFRI = \left\{ \sum_{i=1}^l (h_i \times H_i) \right\}_{Hazard} + \left\{ \sum_{j=1}^m (s_j \times S_j) + \sum_{k=1}^n (e_k \times E_k) \right\}_{Vulnerability} \quad (3)$$



where H_i , S_j , and E_k represents the hazardous hydrological index, the socio-economic index incorporating a vulnerability criteria, and the ecological index incorporating a vulnerability criteria, respectively; h_i , s_j , and e_k denote the weighting factors for the hazardous hydrological index, the socio-economic index, and the ecological index, respectively (see Table 1).

As shown in Table 1, a four-layer indicator system was established for the assessment of the IFRI. The following assessment indicators of IFRI were selected systematically with the approach outlined in previous studies (Rossi et al. 1994; Fedeski and Gwilliam 2007; Ni et al. 2010; Wang et al. 2011). In this study, the goals were to estimate the IFRI using two criteria of hazard and vulnerability. The criteria were divided into three components: hydrologic, socio-economic, and ecological. There were a number of indicators available for each component, but only the top five were selected for use in analyses. Table 1 summarizes the conceptual framework used for the flood risk assessment (Table 1).

Table 1 Conceptual framework and hierarchy of information flow for the flood risk index in the Han River basin, Korea.

| Goal | Criteria | Components | Indicators | | |
|-----------------------|---------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Integrated Flood Risk | Hazard | Hydrologic Hazard | Precipitation (H1) | | |
| | | | Discharge (H2) | | |
| | | | Flood Area Density (H3) | | |
| | | | Flood Damage (H4) | | |
| | | | Land Use (H5) | | |
| | Vulnerability | Socio-Economic Vulnerability | | Population Density (S1) | |
| | | | | Housing Density (S2) | |
| | | | | Education Density (S3) | |
| | | | | Road Density (S4) | |
| | | | | Production (S5) | |
| | | Ecological Vulnerability | | | Forest (E1) |
| | | | | | Sewer System (E2) |
| | | | | | BOD Pollution Load (E3) |
| | | | | | TN Pollution Load (E4) |
| | | | | | TP Pollution Load (E5) |

The analysis of the method used for creating the IFRI starts with the selection of indicators. First, the hydrological indicators H_1 to H_5 were set to reflect precipitation, discharge, flood area density, flood area damage, and landuse. Flood area density and flood damage were calculated from the flooded section over the area of each sub-watershed. Second, socio-economic indicators S_1 to S_5 were set to reflect population density, housing density, school density, road density and production. Population density and housing density were calculated for the area of each sub-watershed. Lastly, the ecological indicators E_1 to E_5 were set to reflect forest area, sewer system facilities, and occurrence of the biochemical oxygen demand (BOD), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) pollution loads in the sub-watersheds. Again, Table 1 shows the overall conceptual model for how this information was used to estimate the hydrologic hazard, socio-economic vulnerability, and ecological vulnerability indices in this study. Historical observed data were obtained from WAMIS in order to assess integrated risk in the study basin for different time periods in urban and rural areas.



Table 2 Hydrologic hazard, socio-economic vulnerability, and ecological vulnerability indices over the Korean Han River basin and its sub-watershed areas.

| ID | sub-watershed Name | Catchment Area (km ²) | Hydrologic hazard | | | | Socio-economic vulnerability | | | | | Ecological vulnerability | | | | | |
|------|----------------------------|-----------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|--|------------------------------------|------------------------------|---|---|-------------------------------|--|--------------------------|-----------------|------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | | | Annual Precipitation (mm) | Annual Discharge (m ³ /s) | Flood Area Density (ha/km ²) | Flood Damage (TW/km ²) | Land Use UrbanArea (%) | Population Density (#person/km ²) | Housing Density (#ofhouse/km ²) | Education Density (#ofschool) | Road Density (Totallength /km ²) | Production (MillionMon) | Forest Area (%) | Sewer System (%) | BOD Pollution Load (kg/day) | TN Pollution Load (kg/day) | TP Pollution Load (kg/day) |
| 1001 | Upstream of Namhan River | 2471.9 | 1,240 | 20,960 | 0.0425 | 362 | 0.5 | 27.5 | 12.6 | 99 | 457 | 328,429 | 84.0 | 53.0 | 35,914.6 | 14,293.4 | 1,851.2 |
| 1002 | Pyeongchang River | 1773.4 | 1,294 | 15,538 | 0.0274 | 294 | 0.6 | 33.6 | 14.0 | 76 | 441 | 544,207 | 82.9 | 49.0 | 35,334.4 | 12,953.9 | 2,078.6 |
| 1003 | Chungju Dam | 2483.8 | 1,210 | 17,504 | 0.0444 | 325 | 1.3 | 56.4 | 27.1 | 130 | 714 | 1,506,973 | 79.8 | 78.6 | 66,372.9 | 24,294.7 | 3,561.4 |
| 1004 | Dal Stream | 1614.4 | 1,174 | 11,410 | 0.1188 | 368 | 2.2 | 128.4 | 53.8 | 137 | 779 | 3,622,619 | 70.8 | 69.7 | 117,784.1 | 42,665.0 | 8,076.7 |
| 1005 | Downstream of Chungju Dam | 524.4 | 1,211 | 3,776 | 0.1028 | 702 | 0.6 | 47.5 | 18.1 | 13 | 1,101 | 239,657 | 64.8 | 75.0 | 11,216.3 | 4,507.1 | 663.9 |
| 1006 | Seom River | 1491.0 | 1,298 | 12,151 | 0.0441 | 299 | 3.6 | 211.0 | 71.1 | 179 | 780 | 3,512,228 | 75.8 | 59.6 | 100,118.0 | 34,146.1 | 6,458.3 |
| 1007 | Downstream of Namhan River | 2072.7 | 1,297 | 16,669 | 0.2279 | 288 | 2.2 | 190.4 | 65.6 | 283 | 768 | 13,693,164 | 49.1 | 58.4 | 389,116.2 | 123,839.8 | 27,217.4 |
| 1008 | Kungangsan Dam | 2973.8 | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| 1009 | Dam of Peace | 351.3 | 1,094 | 8,263 | 0.0211 | 169 | 0.6 | 0.6 | 0.1 | 1 | 390 | 175 | 91.0 | 0.0 | 1,467.1 | 806.9 | 75.9 |
| 1010 | Chuncheon Dam | 1587.4 | 1,187 | 14,740 | 0.0069 | 184 | 1.2 | 288 | 10.1 | 61 | 431 | 51,648 | 84.3 | 66.5 | 38,133.5 | 15,791.6 | 2,630.0 |
| 1011 | Inbook Stream | 931.3 | 1,150 | 8,336 | 0.0045 | 283 | 1.0 | 15.5 | 5.7 | 21 | 243 | 19,099 | 89.6 | 66.3 | 9,734.0 | 4,480.8 | 531.1 |
| 1012 | Soyang River | 1852.0 | 1,252 | 18,975 | 0.0082 | 238 | 0.8 | 25.0 | 8.2 | 37 | 440 | 91,659 | 91.7 | 69.2 | 25,795.9 | 11,264.8 | 1,414.9 |
| 1013 | Uiyam Dam | 721.7 | 1,311 | 7,651 | 0.0157 | 104 | 3.7 | 340.3 | 102.3 | 112 | 692 | 370,180 | 78.6 | 77.2 | 74,544.4 | 26,415.7 | 4,862.6 |
| 1014 | Hongcheon River | 1566.0 | 1,303 | 15,993 | 0.0112 | 111 | 1.3 | 43.3 | 15.6 | 71 | 434 | 585,959 | 86.8 | 50.3 | 52,664.3 | 16,741.8 | 2,822.4 |
| 1015 | Cheongpyeong Dam | 740.6 | 1,337 | 8,019 | 0.0424 | 146 | 1.9 | 129.5 | 49.0 | 61 | 518 | 439,297 | 83.0 | 54.4 | 63,126.5 | 18,520.3 | 2,885.8 |
| 1016 | Kyungan Stream | 561.1 | 1,267 | 5,116 | 0.0733 | 154 | 7.0 | 275.3 | 181.5 | 125 | 941 | 8,129,102 | 64.5 | 87.9 | 164,535.9 | 34,663.6 | 5,624.9 |
| 1017 | Paldang Dam | 43.9 | 1,191 | 395 | 0.0668 | 145 | 1.4 | 43.8 | 11.8 | 10 | 799 | 29,773 | 68.3 | 60.0 | 866.8 | 294.0 | 31.0 |
| 1018 | Han River in Seoul | 1537.2 | 1,283 | 14,681 | 0.1361 | 413 | 31.3 | 8,070.1 | 2,107.8 | 3168 | 6.42 | 71,185,977 | 47.1 | 93.3 | 1,256,552.2 | 288,598.8 | 31,173.3 |
| 1019 | Han River in Goyang | 826.3 | 1,260 | 7,341 | 0.7535 | 501 | 19.7 | 3,015.2 | 1,072.0 | 968 | 2,998 | 30,011,536 | 35.1 | 69.7 | 380,297.8 | 92,935.6 | 13,600.7 |
| 1020 | Gom-tan Stream | 2195.2 | 1,288 | 20,800 | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | 89.4 | NA | NA | NA | NA |
| 1021 | Upstream of Imjin River | 2072.7 | 1,291 | 19,228 | 0.0142 | 48 | 4.0 | 2.7 | 0.9 | 4 | 67 | 26,453 | 48.6 | 52.4 | 8,166.6 | 3,503.6 | 627.8 |
| 1022 | Hanhan River | 2452.2 | 1,293 | 22,919 | 0.0690 | 261 | 5.0 | 61.7 | 58.6 | 252 | 532 | 6,750,242 | 45.6 | 57.3 | 291,107.4 | 86,709.0 | 17,241.2 |
| 1023 | Downstream of Imjin River | 1419.2 | 1,302 | 12,797 | 0.2300 | 198 | 2.9 | 63.4 | 22.2 | 57 | 322 | 1,697,206 | 56.5 | 60.4 | 49,754.9 | 14,994.6 | 2,751.6 |
| 1024 | Downstream of Hantan River | 146.4 | 1,294 | 1,370 | 0.3314 | 85 | 2.1 | 31.0 | 10.0 | 2 | 285 | 188,310 | 22.3 | 67.4 | 1,460.4 | 486.8 | 84.3 |

* NA represents that data is not available.

3. ANALYSIS AND RESULTS

3.1 Classification of research periods, and urban and rural areas

As a result from an analyses using a modified T-test, the annual precipitation and runoff data appear to have changed significantly in 1990 over the Korean Han River basin (Fig. 3). Therefore, in this study, the data were divided into two periods: pre-1990 (Period I: 1966-1990) and post-1990 (Period II: 1991-2007). A trend analysis was also carried out trend analysis for the classified time series data set using a non-parametric Mann-Kendall test. As a result of the trend analysis, hydrologic data for Period I showed no statistically significant trends. In contrast, the time series for precipitation and runoff during Period II showed a significant upward trend at the 5% level of significance. These changes indicate that there is a ongoing increase in flood risk and vulnerability over the Korean Han River basin.

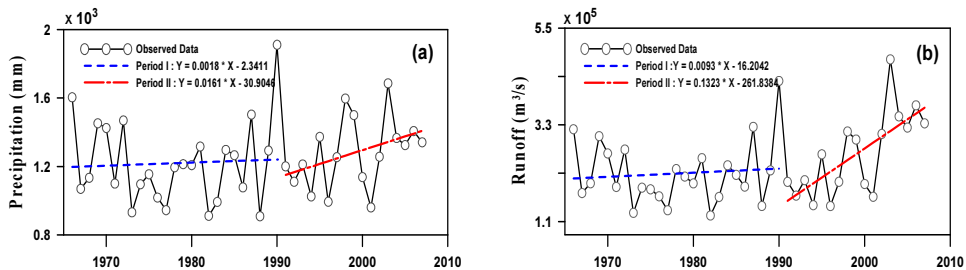


Figure 3 Trend analysis of precipitation and runoff during different period in the Han River basin. (Period I: 1966-1990, Period II: 1991-2007). (a) Shows the annual total precipitation. (b) shows the annual total runoff.

In addition, the study area was classified into urban and rural areas based on the percent of urbanization in the mid-watershed portions of the Han River basin. The urban areas were divided into the top five urbanized areas, and the bottom five basins were classified as rural areas from 24 sub-watershed areas in the Han River basin. The selected urban areas were located in the metropolitan areas of the western part of Han River basin, including Kyungan Stream (1016), Seoul Han River (1018), Goyang Han River (1019), Upstream of Imjin River (1021), and Hanthan



River (1022). However, the rural areas is mainly located in eastern part of the Han River Basin, including Upstream of Namhan River (1001), Phyeongchang River (1002), Chungju Dam Downstream (1005), Dam of Peace basin (1009), and Soyang River (1012), respectively.

3.2 Flooded area and flood damage

Figure 4 shows the results of analyzing the flooded area of Han River basin and flood damage by separating into urban area and rural area for Period I and Period II. Flooded area was found to be 107,876 ha (Period I: 67,740 ha, and Period II: 4,0136 ha) for period 1971–2007, and that in rural area, 22,919 ha, (Period I: 11,701 ha, and Period II: 11,219 ha). In addition, as a result of analyzing flood damage, flood damage in urban area was found to be 1,855,968 million won (Period I: 491,872 million won, and Period II: 1,364,096 million won) for whole study period, and flood damage in rural area was analyzed to be 756,939 million won (Period I: 331,505 million won, and Period II: 425,434 million won).

Flooded area was bigger in urban area than in rural area by about 78.8%. It was 82.7% bigger for Period I and 72.0% bigger for Period II. In addition, flood damage was found to be bigger in urban area than in rural area by about 59.2%. In addition, it was 32.6% bigger for Period I, and 68.8% bigger for Period II. Accordingly, urban area showed approximately two times bigger flood damage and flooded area than rural area, implying that flood vulnerability is high in urban area, while flood damages and flooded area were found to have increased recently both in the rural area and urban area of the Korean Han River Basin.

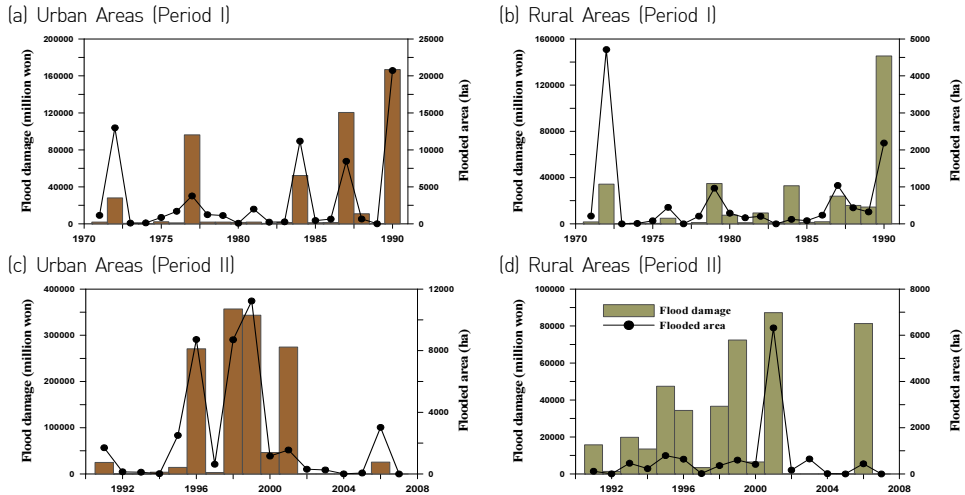


Figure 4 Flood damage and flooded area in urban and rural areas during different periods, (Period I: 1971-1990, Period II: 1991-2007)

3.3 Ternary diagram for different periods

Ternary diagrams can be a useful tool for assessing three components of the research indicators. In this study, we used ternary diagrams for assessment of the influence of flood risk components (hydrologic, socio-economic, and ecological). The form $h_1 + h_2 + h_3 = 1$ can be conveniently represented in ternary diagrams by means of Viviani's theorem (Weisstein, 2013), where h_i represents the height projected by any point inside an equilateral triangle of total unit height. In our case, the heights are identified as the fractional indices for flood risk and vulnerability: $(h_1, h_2, h_3) = (H_i, S_j, E_k)$. Equivalently, the IFRI is expressed as the following function:

$$H_i + S_j + E_k = 1 \tag{4}$$

where H_i represents the hydrologic hazard component, S_j the socio-economic vulnerability component, and E_k the ecological vulnerability component.



According to the ternary diagram, flood hazard and vulnerability have some degree of relationship with each component (Figure 5). The assessment of hazard and vulnerability of 24 sub-watersheds, based on the ternary diagrams, indicates that the three main components had similar effects in period I, but the effects of hydrologic and socio-economic components were greater in period II. This is thought to be due to the ongoing development of these areas as well as the impact of climate change. Thus, it can be inferred that the Han River basin requires more measures to address these hydrologic and socio-economic components.

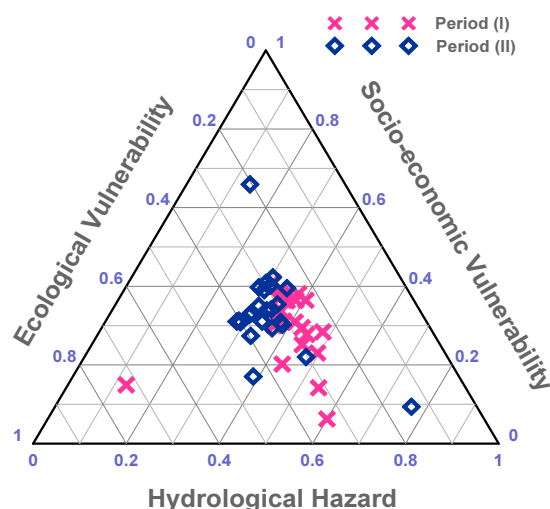


Figure 5 Ternary diagrams for flood risk in the Han River basin between Period I (1971-1990) and Period II (1991-2007). Each point corresponds to fractional indices of flood risk and vulnerability subject to the constraint $H_i + S_j + E_k = 1$. The equipartition points are marked by blue rectangular and red cross symbols.

3.4 Spatial distribution of flood hazard and vulnerability

The IFRI involves the process of normalization and the application of weighting factors to variable indicators in the 24 sub-watersheds. For our case study, we created common radar charts for flood risk assessment in urban and rural areas and for different research periods. The radar chart results show that the amount of flood risk and vulnerability in urban and rural areas and for each study period can be expressed as a result of the influence of five indicators simultaneously (Figure 6).

Results of IFRI analysis indicate that in comparison to the data for Period I, urban areas for Period II exhibited increases of 3.2% and 4.4% in the hydrologic and socio-economic components, respectively, and a decrease of 1.0% in the ecological component. Furthermore, in comparison to the data for Period I, rural areas for Period II exhibited an increase of 4.8% in the hydrologic components and decreases of 1.6% and 2.2% in the socio-economic and ecological vulnerability, respectively (Table 3).

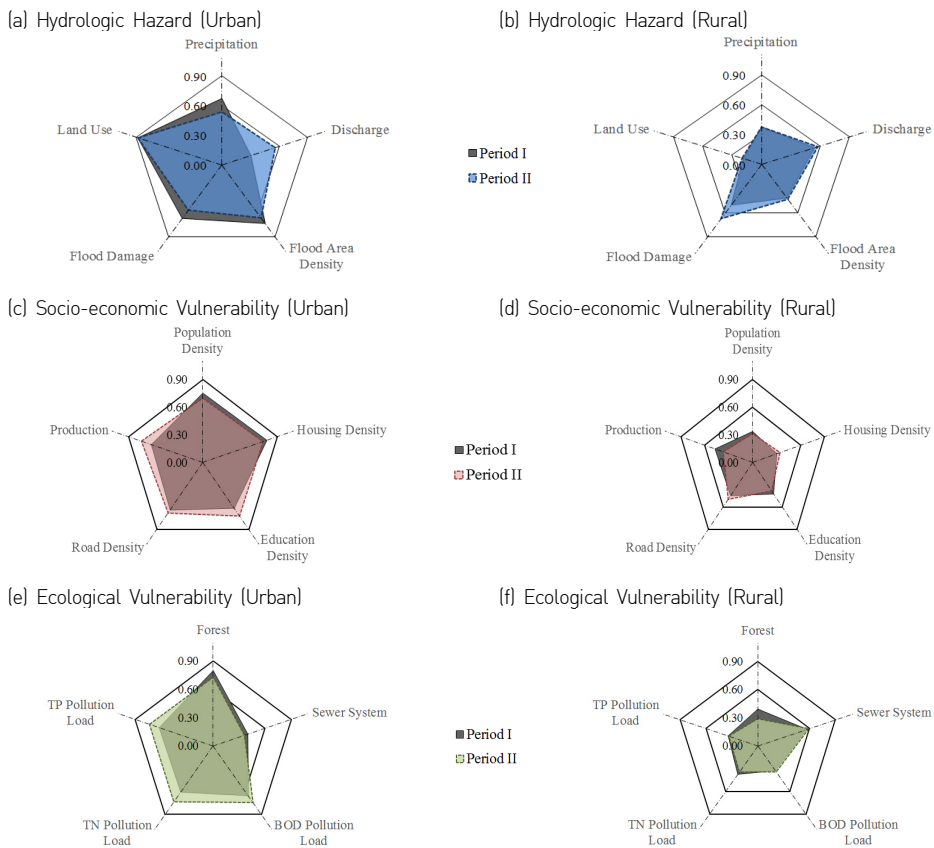


Figure 6 Radar chart for the flood risk index (FRI) between urban areas and rural areas during different research periods. (a), (b) Show estimated results for FRI on hydrological hazard, (c), (d) show estimated results for FRI on socio-economic vulnerability, and (e), (f) represent estimated results for FRI on ecological vulnerability in urban and rural areas, respectively. The solid lines indicate the FRI for Period I (1966-1990), and the dotted lines indicate the FRI for Period II (1991-2007).



Table 3 Estimation of the flood risk index (FRI) for urban and rural areas during different periods over the Han River basin, Korea.

| Period | | Urban areas | | | Rural areas | | | Difference (%) | | |
|--------------------------|-----------------|-------------|------|------|-------------|------|------|----------------|-------|-------|
| | | Hyd. | Soc. | Eco. | Hyd. | Soc. | Eco. | Hyd. | Soc. | Eco. |
| Period I (1966-1990) | 1 st | 0.67 | 0.75 | 0.80 | 0.38 | 0.34 | 0.39 | 78.7 | 123.8 | 104.1 |
| | 2 nd | 0.30 | 0.78 | 0.40 | 0.54 | 0.30 | 0.57 | 44.1 | 155.3 | 29.6 |
| | 3 rd | 0.74 | 0.62 | 0.66 | 0.42 | 0.42 | 0.33 | 76.9 | 45.3 | 100.0 |
| | 4 th | 0.67 | 0.64 | 0.61 | 0.50 | 0.45 | 0.38 | 33.3 | 42.9 | 61.7 |
| | 5 th | 0.88 | 0.62 | 0.62 | 0.18 | 0.47 | 0.34 | 378.3 | 32.2 | 81.4 |
| Period II (1991-2007) | 1 st | 0.54 | 0.70 | 0.73 | 0.38 | 0.31 | 0.29 | 42.6 | 123.1 | 152.8 |
| | 2 nd | 0.56 | 0.73 | 0.36 | 0.58 | 0.34 | 0.59 | 2.8 | 111.6 | 39.2 |
| | 3 rd | 0.66 | 0.72 | 0.74 | 0.43 | 0.38 | 0.34 | 53.7 | 87.5 | 116.3 |
| | 4 th | 0.57 | 0.68 | 0.74 | 0.67 | 0.50 | 0.34 | 15.5 | 37.1 | 114.0 |
| | 5 th | 0.88 | 0.74 | 0.74 | 0.20 | 0.37 | 0.34 | 340.0 | 102.2 | 119.0 |

* Hyd., Soc., and Eco. represent the hydrologic hazard, socio-economic vulnerability, and ecological vulnerability indices, respectively.

Figure 7 shows the spatial distributions of hydrological hazard, socio-economic vulnerability, and ecological vulnerability for period I (1966-1990) and period II (1991-2007) over the Han River Basin, Korea. A number of hydrologic hazard and vulnerability maps were generated in digital format by using Arc GIS 9.3 software to study flood risk in the Han River Basin. In this study, five categories of flood risk were distinguished: very high, high, medium, low, and very low. Results of hydrologic hazard analysis indicate that in comparison to the data for Period I and Period II exhibited increases of 19.9%, 7.2%, and 10.4 in the very-high, high, and low hazard zone, and a decrease of 28.8% and 8.6% in the medium and very-low hazard zone, respectively (Figure 7a). In addition, results of socio-economic vulnerability analysis indicate that in comparison to the data for Period I and Period II exhibited increases of 1.6%, 9.4%, and 9.7% in the very-high, high, and very-low vulnerability zone and decreases of 11.1% and 9.7% in the medium and low vulnerability zone, respectively (Figure 7b). Furthermore, results of ecological vulnerability analysis indicate that in comparison to the data for Period I and Period II exhibited increases of 8.5% and 11.0% in the high and medium vulnerability zone and decreases of 5.8%, 13.2% and 0.6% in the very-high, low, and very-low vulnerability zone, respectively (Figure 7c).

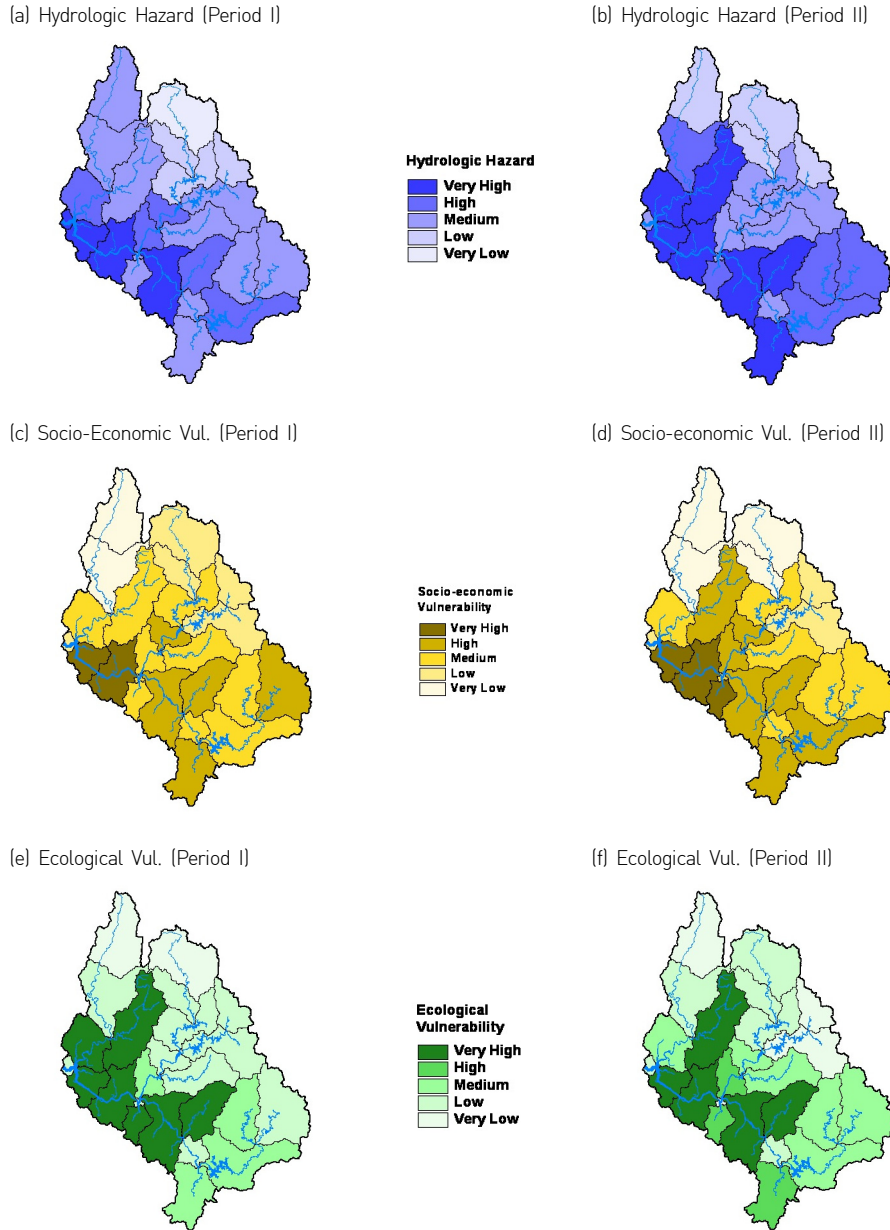


Figure 7 Spatial distribution of hydrological hazard, socio-economic vulnerability, and ecological vulnerability according to the 5 categories over the Han River basin, Korea for Period I (1971-1990) and Period II (1991-2007) in the 24 sub-watersheds. (a), (b) Illustrate the results for the hydrological hazard, (c), (d) represent the results for the socio-economic vulnerability, and (e), (f) show the results for the ecological vulnerability.



3.5 Integrated flood risk in different periods

Assessment of flood hazard and vulnerability was performed and included the selection of indicators, their standardization, weighting of indicators, and classification. Expression of hydrologic hazard and vulnerability was performed using GIS software in order to obtain IFRI maps during different research periods. The risk index values range from 0 to 1, where values close to 1 indicate flooding.

Figure 8 shows zonation map of the IFRI for combinations of flood hazard and vulnerability in each period (Period I and II) over the Han River Basin, Korea. According to the flood risk map, the study area was separated into the five zones (very high, high, medium, low, and very low) for flood risk. The high and very-high risk zones are mainly distributed in the western plains of the study area, which is contained rapidly developing areas in the center of the South Korea. The low and very-low risk zones are mainly located in the under-developed areas of northern and eastern part of the study area, including mountain areas of Gang-won Province in Korea.

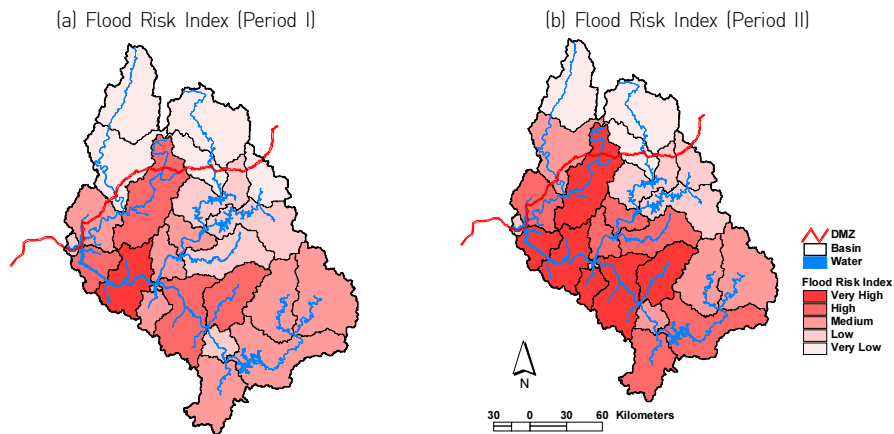


Figure 8 Zonation map for combinations of flood hazard and vulnerability from estimations of the integrated flood risk index (IFRI) in the Korean Han River basin. (a) Illustrates the results for the 24 sub-watersheds for Period I (1971-1990) and (b) illustrates the results for the 24 sub-watersheds for Period II (1991-2007).

As shown in Table 4, 50.89% of the study area was determined to be a very high or high flood risk zone, and medium, low, and very low zones made up 19.94%, 13.13%, and 16.04% for Period II, respectively. Furthermore, 24.36% of the study area was determined to be a very high or high flood risk zone, and medium, low, and very low zones made up 34.24%, 16.63%, and 24.78% for Period I, respectively. According to the above classification, the following changes in risk zones occurred between Period I and Period II: record of a 21.52% increase in the very-high-risk zone, a 5.01% increase in the high-risk zone, a 14.30% decrease in the medium-risk zone, a 3.50% decrease in the low-risk zone, and an 8.74% increase in the very-low-risk zone, respectively (see, Table 4).

Table 4 Classification of food risk index range and coverage in different research periods.

| Integrated Flood Risk Index Range | Classification | Coverage [%] | | Difference [%] |
|-----------------------------------|----------------|--------------|-----------|----------------|
| | | Period I | Period II | |
| 1.000 - 0.80 | Very High | 4.47 | 25.99 | 21.52 (↑) |
| 0.80 - 0.60 | High | 19.89 | 24.90 | 5.01 (↑) |
| 0.60 - 0.40 | Medium | 34.24 | 19.94 | -14.30 (↓) |
| 0.40 - 0.20 | Low | 16.63 | 13.13 | -3.50 (↓) |
| 0.20 - 0.00 | Very Low | 24.78 | 16.04 | -8.74 (↓) |

The development of flood risk index and flood risk mapping always has the problem and uncertainty for flood risk assessment, because it has contained complexity and difficulty. However, these framework and assessment, which provide a better understanding of the natural disasters and of characteristics of the local community's risk, can be a useful tool for flood risk management and decision making for stakeholders.



3.6 Integrated flood risk in different SST conditions

Estimation of integrated flood risk index (IFRI) involves the process of normalization and the application of weighting factors to variable indicators in the 24 sub-watersheds. Therefore, we divide the data into three of strongest year: the CT El Niño (1998), La Niña (2000) and WP El Niño years (2005). Assessment of flood hazard and vulnerability was performed and included the selection of indicators, their standardization, weighting of indicators, and classification. Expression of flood hazard was performed using Arc GIS 9.3 software to obtain integrated flood risk index maps during the different strongest ENSO years. In this study, five categories of flood risk were distinguished: very high, high, medium, low, and very low, using the standard deviation method. The risk index values range from 0 to 1. Values close to 1 indicate flooding.

1) Hydrological hazard and vulnerability assessment

Hydrological hazards analysis indicates that in comparison to the data for the strongest CT El Niño, the strongest La Niña and the strongest WP El Niño year. The average value of hydrologic risk results exhibited during CT El Niño (58.5%), La Niña (34.5%) and WP El Niño (56.5%) in the hydrological hazards, respectively, in comparison to the data for between CT and WP El Niño exhibited an small increase of 1.5% in the CT El Niño year, and large decreases of 22.0% to 24.0% in the La Niña year, respectively (see, Figure 9). Since many sub-watersheds showed increases in hydrologic hazards under CT and WP El Niño conditions. But, the very-high and high hydrologic hazard zone recoded the western part of the Han River basin during CT El Niño year and the middle of the Han River basin during WP El Niño year. On the other hands, many sub-watersheds show low hydrologic hazard zone during the La Niña year. Therefore, great efforts in water resource management are necessary during under CT and WP El Niño conditions.

Vulnerability assessment was performed by estimation of the socio-economic vulnerability index and the ecological vulnerability index in each 24 sub-watershed

over the Han River basin during the different phase of ENSO conditions. The average value of socio-economic risk results exhibited during CT El Niño (33.5%), La Niña (30.4%) and WP El Niño (31.2%) in the socio-economic vulnerability, respectively, in comparison to the data for between CT and WP El Niño exhibited an small increase of 2.3% in the CT El Niño year, and small decreases of 0.8% to 3.0% in the La Niña year (see, Figure 3a,b,c). Also, the average value of ecological risk results exhibited during CT El Niño (25.5%), La Niña (25.7%) and WP El Niño (29.8%) in the ecological vulnerability, respectively, in comparison to the data for between CT and WP El Niño exhibited an small decreases of 4.3% in the CT El Niño year (see, Figure 3d,e,f). Therefore, since many sub-watersheds showed small increases in the socio-economic vulnerability under CT and WP El Niño conditions can be expected. Also, the ecological vulnerability showed small decrease under CT El Niño condition, and small increase under WP El Niño condition. And the very-high and high socio-economic and ecological vulnerability zone recoded the western part of the Han River basin.

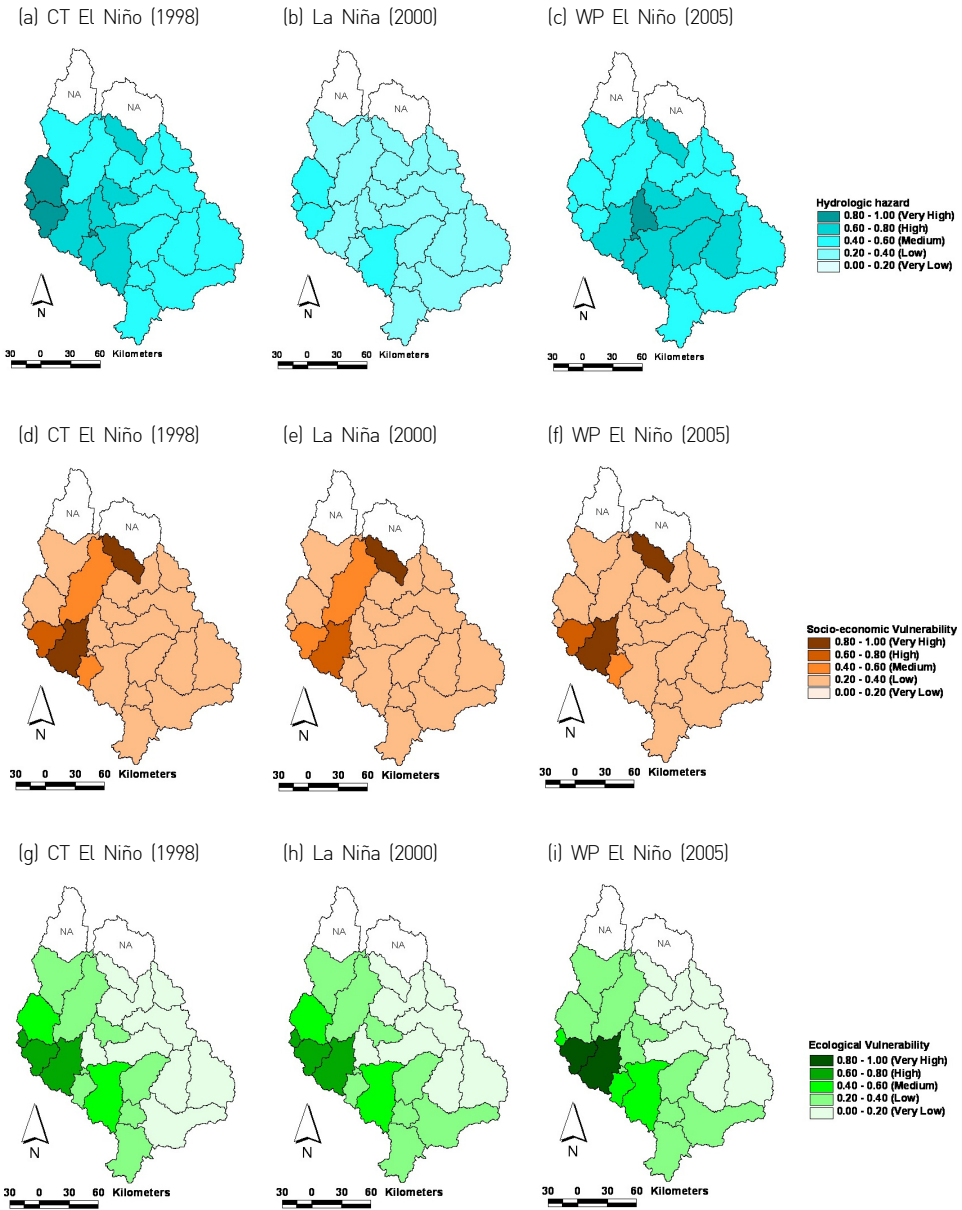


Figure 9 Hydrologic hazard, socio-economic and ecological vulnerability assessment during the different strongest SST conditions over the Han River basin, Korea. (a) to (c) Represent the hydrologic hazard, (d) to (f) represent socio-economic vulnerability, and (g) to (i) represent ecological vulnerability.

2) Integrated Flood Risk Assessment

Figure 10 shows assessment of the integrated flood risk during different phase of ENSO conditions. The average value of integrated flood risk results exhibited during CT El Niño (57.7%), La Niña (41.2%) and WP El Niño (57.0%). The very-high and high flood risk zone recoded the western part of the Han River basin and the CT/WP El Niño years recoded high risk more than La Niña year. As shown in Table 5, 23.8% of the study area was determined to be a very high (8.6%) and high (15.2%) flood risk zone. And also, 76.2% of the study area was determined to be a medium (73.0%), low (3.2%), and very low (0.0%) flood risk zone respectively in the strongest CT El Niño year (1998). Furthermore, in the strongest La Niña year was determined to be a high flood risk zone (8.1%), medium (29.6%), low (62.3%), and very low (0.0%) flood risk zones, respectively, in 2000. Lastly, in the strongest WP El Niño year was determined to be a very high (8.1%), high (13.0%), medium (75.8%), low (3.2%), and very low (0.0%) flood risk zones, respectively, in 2005. According to the classification, the following changes in risk zones occurred between the strongest CT El Niño, WP El Niño and La Niña: recorded of 8.1-8.6% increase in the very-high-risk zone, a 7.12 % increase in the high-risk zone, a 9.70% decrease in the medium-risk zone, a 0.15% decrease in the low-risk zone, and a 2.71% increase in the very-low-risk zone.

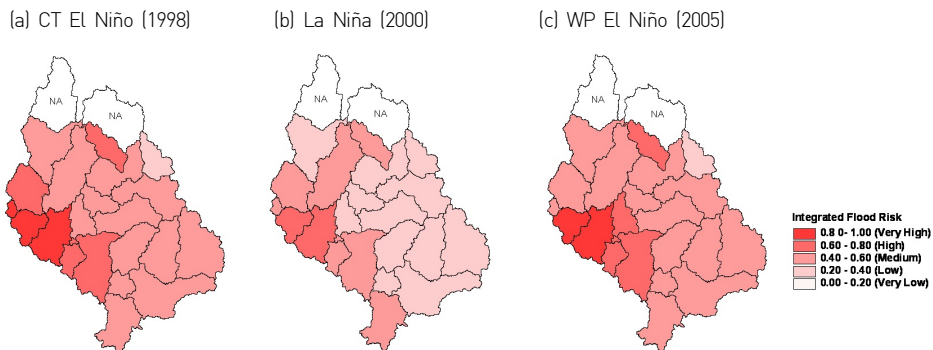


Figure 10 Assessment of integrated flood risk index (IFRI) over the Han River basin, Korea. (a) Represents the strongest CT El Niño phase in 1998, (b) is the strongest La Niña phase in 2000, and (c) is the strongest WP El Niño phase in 2005.

**Table 5** Classification of the integrated flood risk index range and coverage in different research periods.

| Integrated Flood Risk Index Range | Classification | Coverage (%) | | |
|-----------------------------------|----------------|--------------|---------|------------|
| | | CT El Niño | La Niña | WP El Niño |
| 1.00 - 0.80 | Very High | 8.6 | 0.0 | 8.1 |
| 0.80 - 0.60 | High | 15.2 | 8.1 | 13.0 |
| 0.60 - 0.40 | Medium | 73.0 | 29.6 | 75.8 |
| 0.40 - 0.20 | Low | 3.2 | 62.3 | 3.2 |
| 0.20 - 0.00 | Very Low | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

4. SUMMARY AND CONCLUSION

Floods are frequent natural disasters that can cause very serious losses in terms of human lives, agriculture, buildings, roads, and other infrastructure. As a consequence, assessment of flood risk is critical. In this study, we assessed the IFRI in the Han River Basin, in the center of the Korean Peninsula, an area where flood disasters frequently occur. The results can be summarized as follows:

- i) This study developed a hierarchy for IFRI incorporating several components; hydrologic, socio-economic, and ecological. Each indicator was subjected to standardization, weighting, and classification, after which they were combined to create a IFRI map. Five categories of flood risk were distinguished: “Very High”, “High”, “Medium”, “Low”, and “Very Low”, and also divided the study area into urban and rural areas. This study divided two research periods (Period I: 1971-1990, Period II: 1991-2007) for a contrasting assessment of levels of urbanization and in a changing climate.
- ii) The results from the ternary diagrams, which illustrate the effects of the three main components, indicate that all components had a similar effect for Period I but that the effects of the hydrologic hazard and socio-economic vulnerability had increased for Period II. In addition, radar chart results have shown that in urban areas, between Period I and Period II, the effects of

socio-economic and ecological components increased by 3.2% and 4.4%, respectively, and the effects of the hydrologic component decreased by 1.0%.

- iii) An assessment of flood hazard and vulnerability was performed, incorporating the selection, standardization, weighting, and classification of indicators. Changes in the classification of risk zones between Period I and Period II were noted: a 21.52% increase in the size of the very high-risk zone, a 5.01% increase in the size of the high-risk zone, a 14.30% decrease in the size of the medium-risk zone, a 3.50% decrease in the size of the low-risk zone, and a 8.74% decrease in the size of the very low-risk zone over the Han River Basin.
- iv) Finally, This study also divided the research periods into the strongest different SST conditions (CT/WP El Niño and La Niña). The results from the hydrological hazards analysis indicate that the CT El Niño year was increased 1.5% of IFR more than WP El Niño year. And also the La Niña year appear decreasing tendency than CT/WP El Niño years from 22.0% to 24.0%. Changes in the classification of risk zones between CT/WP El Niño and La Niña were noted: recorded of 8.1 - 8.6% increase in the very-high-risk zone, a 7.12 % increase in the high-risk zone, a 9.70% decrease in the medium-risk zone, a 0.15% decrease in the low-risk zone, and a 2.71% increase in the very-low-risk zone.

An analysis of possible factors leading to increases in flood hazard in the Han River basin should be conducted on the basis of this research. We expect more effective policy standards to reduce flood risk in developing areas. Therefore, great efforts in water resource management are necessary during under CT/WP El Niño conditions. Through this study, we learned several lessons regarding the enhancement of policy standards and the formulation of measures to reduce flood risk in developing areas; we expect our results to provide useful base data for stakeholders and decision-makers.

**REFERENCES**

- Anselmo, V., G. Galeati, S. Palmieri, U. Rossi, and E. Todini, 1996: Flood risk assessment using an integrated hydrological and hydraulic modelling approach: A case study. *J. Hydrol.*, **175**, 533–554.
- Bae, D. H., I. W. Jung, and H. Chang, 2008: Long-term trend of precipitation and runoff in Korean river basins. *Hydrol. Processes*, **22**, 2644–2656.
- Birkmann, J., 2006: *Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Towards Disaster Resilient Societies*. United Nations University.
- Chang, H. J., and W. T. Kwon, 2007: Spatial variations of summer precipitation trends in South Korea, 1973–2005. *Environ. Res. Lett.*, **2**, 045012.
- Chang, H.J., 2008: Spatial analysis of water quality trends in the Han River basin, South Korea. *Water Res.*, **42**, 3285–3304.
- Chang, H. J., J. Franczyk, and C. Kim, 2009: What is responsible for increasing flood risks? The case of Gangwon Province, Korea. *Nat. Hazards*, **48**, 339–354.
- Chung, Y. S., M. B. Yoon, and H. S. Kim, 2004: On climate variations and changes observed in South Korea. *Clim. Change*, **66**, 151–161.
- Crichton, D., 1999: The risk triangle. *Natural Disaster Management*, Tudor Rose, London, 102–103.
- Du, J., F. He, and P. J. Shi, 2006: Integrated flood risk assessment of Xiangjiang River basin in China. *Ziran Zaihai Xuebao/Journal of Natural Disasters*, **15(6)**, 38–44.
- Fedeski, M., and J. Gwilliam, 2007: Urban sustainability in the presence of flood and geological hazards: The development of a GIS-based vulnerability and risk assessment methodology. *Landsc. Urban Plan.*, **83**, 50–61.
- Jung, I. W., H. J. Chang, and D. H. Bae, 2013: Spatially-explicit assessment of flood risk caused by climate change in South Korea. *KSCE J. Civ. Eng.*, **17**, 233–243.
- Kasperson J., R. Kasperson, B. L. Turner, W. Hsieh, and A. Schiller, 2005: Vulnerability to global environmental change. *The Social Contours of Risk. Volume II: Risk Analysis, Corporations & the Globalization of Risk*, J. X. Kasperson, and R. E. Kasperson, Eds., Earthscan, 245–285.
- Kim, J. S., and S. Jain, 2011: Precipitation trends over the Korean Peninsula: Typhoon-induced changes and a typology for characterizing climate-related risk. *Environ. Res. Lett.*, **6**, 034033.
- Kim, J. S., S. Jain, and Y. I. Moon, 2011: Atmospheric teleconnection-based conditional streamflow distributions for the Han River and its sub-watersheds in Korea. *Int. J. Climatol.*, **32**, 1466–1474.
- Kim, H. J., J. W. Lee, K. S. Yoon, and Y. S. Cho, 2012a: Numerical analysis of flood risk change due to obstruction. *KSCE J. Civ. Eng.*, **16**, 207–214.
- Kim, J. S., S. Jain, and S. K. Yoon, 2012b: Warm season streamflow variability in the Korean Han River basin: Links with atmospheric teleconnections. *Int. J. Climatol.*, **32**, 635–640.
- KMA (Korean Meteorological Administration), 2013: <http://kma.go.kr>. Accessed July 2013.
- Lim, K. S., and D. R. Lee, 2009: The spatial MCDA approach for evaluating flood damage reduction alternatives. *KSCE J. Civ. Eng.*, **13**, 359–369.

- Maskrey, A. 1989: Disaster mitigation: a community based approach. *Development Guidelines*, Oxford, London.
- Meyer, V., S. Scheuer, and D. Haase, 2009: A multicriteria approach for flood risk mapping exemplified at the Mulde River, Germany. *Nat. Hazards*, **48**, 17-39.
- Ni, J., L. Sun, T. Li, Z. Huang, and A. G. L. Borthwick, 2010: Assessment of flooding impacts in terms of sustainability in mainland China. *J. Environ. Manage.*, **91**, 1930-1942.
- Nirupama, N., and S. P. Simonovic, 2007: Increase of flood risk due to urbanisation: A Canadian example. *Nat. Hazards*, **40**, 25-41.
- Rossi, G., N. Harmancioglu, and V. Yevjevich, 1994: *Coping with Floods*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London.
- Shi, P. J., 2003: *Natural Hazard Atlas of China*. Science, Beijing (in Chinese).
- Shi, P. J., Ge, Y., Yuan, Y., and Guo, W. P., 2005: Integrated risk management of flood disasters in metropolitan areas of China. *Int. J. Water Resour. Dev.*, **21**, 613-627.
- Sinaga, T. P. T., A. Nugroho, Y. W. Lee, and Y. Suh, 2011: GIS mapping of tsunami vulnerability: Case study of the Jembrana Regency in Bali, Indonesia. *KSCE J. Civ. Eng.*, **15**, 537-543.
- Teng, W. H., M. H. Hsu, C. H. Wu, and A. S. Chen, 2006: Impact of flood disasters on Taiwan in the last quarter century. *Nat. Hazards*, **37**, 191-207.
- UNISDR (UN International Strategy for Disaster Reduction), 2013: Glossary, <http://www.unisdr.org/eng/library/lib-terminology-eng%20home.htm>. Accessed July 2013.
- WAMIS (Water Management Information System), 2012: <http://wamis.go.kr/eng/>. Accessed September 2012.
- Wang, Y., Z. Li, Z. Tang, and G. Zeng, 2011: A GIS-based spatial multi-criteria approach for flood risk assessment in the Dongting Lake region, Hunan, Central China. *Water Resour. Manage.*, **25**, 3465-3484.
- Wang, Z., K. Wang, Y. Xiong, L. Xu, and X. Yang, 2003: Assessment of the vulnerability of flood-waterlogging disaster and countermeasures of disaster reduction in Hunan Province. *Resour. Environ. Yangtze Basin*, **12**, 586-592.
- Weisstein E. W., 2013: Viviani's theorem. MathWorld, Wolfram, Web Resource: URL: <http://mathworld.wolfram.com/VivianisTheorem.html>. accessed July 2013.
- Yoon, S. K., J. S. Kim, J. H. Lee., and Y. I. Moon, 2013: Hydrometeorological variability in the Korean Han River Basin and its sub-watersheds during different El Niño phases. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, **27**, 1465-1477.



APCC RESEARCH REPORT 2013-06

- Hydrometeorological Variability over the Korean Peninsula from ENSO Pattern Change and Tropical Cyclone Activities and Assessment of Integrated Flood Risk
- Variability and Mechanisms of Summer Heat Wave in Korea
- Future Changes and Selection of Best CMIP5 Models for the East Asian Summer Monsoon

APEC Climate Center

12, Centum 7-ro, Haeundae-gu, Busan 612-020,
Republic of Korea
Tel: +82-51-745-3900 Fax: +82-51-745-3949
www.apcc21.org

비매품



9 788973 333381
ISBN 978-89-97333-98-1
ISBN 978-89-97333-92-9 (세트)