

APEC기후센터

원격상관 기반 극한기후패턴변화에 따른 한반도 지역수문변동영향 분석

윤선권 기후변화연구팀

APEC기후센터
연구보고서

원격상관 기반 극한기후패턴변화에 따른 한반도 지역수문변동영향 분석

Extreme Climate Patterns and their Hydrologic Impacts over the Korean
Peninsula: Links with Atmospheric Teleconnections

윤선권 기후변화연구팀

연구보고서 2015-12

발간사

엘니뇨/라니냐 등 주요 기후현상에 대한 메커니즘이 분명하게 밝혀지지 않은 상황에서 전 지구적 기후 및 기상현상을 물리적으로 완벽하게 모의한다는 것은 불가능한 일입니다. 또한 현존하는 물리모형을 가지고 제한적인 영역에서 기후현상을 분석하고 예측한다는 것은 상당한 어려움이 따릅니다. 특히 대규모 기후현상을 우리나라와 같은 국지규모 지역에서 물리모델에 의존한 결과만을 수문순환시스템에 적용한다면, 과학적 신뢰와 이해에 문제가 따를 수 있습니다.

따라서 ENSO (El Niño–Southern Oscillation)와 IOD (Indian Ocean Dipole) 등 열대지역의 주요 해양관련 기후지수의 비선형적 거동특성에 따른 한반도 유역별 강수량과 유출량의 원격상관 분석 등의 통계적 접근방법을 고려해 볼 수 있습니다. 이는 시계열 분석에 의한 간접적인 접근방법으로 관측자료 수의 제한으로 유의할 만한 수준의 결과를 기대하기 힘들다는 단점이 있지만, 물리모델의 예측결과를 보완하고 활용할 수 있는 주요 대안으로서의 방법입니다.

본 연구는 전형적인 엘니뇨와 중앙태평양 엘니뇨, 라니냐, 그리고 양(+)과 음(-)의 IOD 해를 분리해 내었고, 이러한 현상이 한반도 수문변량과 어느 정도의 상관성을 가지는지 분석하였습니다. 또한 시계열자료의 저빈도해석에 주로 사용되는 단변량스펙트럼 분석과 주성분분석을 실시하였고, Mutual Information (MI)과 Kernel 결합확률밀도함수 분석을 통한 기후지수와 한반도 수문변량간의 지체시간별 선형 및 비선형 원격상관관계를 분석하였습니다. 이는 열대해양지역의 주요 기후현상인 ENSO와 IOD가 한반도 수자원과 어느 정도의 상관성을 가지는지 통계적으로 규명한 점과 그 예측가능성을 진단하였다는 점에 학술적 의미가 있습니다.

모쪼록, 본 연구가 열대 해양 기후지수의 원격상관을 이용한 통계적 방법의 적용으로 우리나라 수자원 장기예측의 불확실성 문제를 일정 부분 해결해 주어 유역별 물공급 전망 및 수자원의 중.장기 계획 수립 등 실제적인 물관련 국가정책지원에 활용되기를 기대해 봅니다.

끝으로 연구결과가 나오기까지 본 연구를 수행한 윤선권 박사와 외부 연구원으로 참여해 주신 경상대학교 이태삼 교수, 동신대학교 주진걸 교수의 노고에 감사드립니다. 또한 바쁘신 중에도 자문과 조언을 주신 서울시립대학교 문영일 교수, 김종석 연구교수, 황성환 연구교수, 전북대학교 권현한 교수께 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 아울러 본 센터의 수자원 분야 조재필 박사, 정일원 박사의 제안과 자문에도 감사드립니다.

2015. 3월
APEC 기후센터 소장
정진승

ABSTRACT

The mechanism of major climate phenomena such as El Niño and La Niña has not yet been revealed, also it is impossible to completely simulate using the physical climate model, where the global environment of the large scale climate phenomenon, and its weather conditions. Furthermore, analyzing the climatic phenomena through the physical model to exist in limited areas, predicting involves considerable difficulties. Based on the results of the physical model, when applied to hydrologic circulation system in a small region such as Korean Peninsula, it is possible to follow a problem in scientific credibility and understanding. Therefore, this study analyzed non-linear behavior links with atmospheric teleconnections between hydrologic variable and climate index using statistical model over the Korean Peninsula with the ocean-related major climate factors such as ENSO (El Niño-Southern Oscillation) and IOD (Indian Ocean Dipole) in the tropical regions. The statistical approach has the disadvantage that it is difficult to expect the results of significance level due to the limited number of observations, it is one of the important way that can be utilized to complement to the prediction result of the physical model.

This study is used to the SSTA (Sea Surface Temperature Anomaly) data provided by the NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). And then we divided different conditions of SST of the traditional CT (Cold-Tongue) El Niño phase and a new type of WP (Warm-Pool) El Niño phase in the Tropical Pacific Ocean (TPO), and also positive (+) and negative (-) IOD phases in the Tropical Indian Ocean (TIO). The analysis of the lag time correlation with climate indices (e.g. ENSO and IOD) and hydrologic variables (e.g. precipitation and runoff) in the 5-Major River Basin was performed by principle component analysis (PCA) using a singular spectrum analysis (SSA), which is widely used in low frequency analysis for time series data. Using this result has estimated to the joint probability density function by kernel density estimation. As well, the SSA results are used to analysis with the atmospheric teleconnections derived from linear and non-

linear correlations by Mutual Information (MI) techniques.

The composite anomalies of JJAS (June to September) precipitation CT/WP El Niño decaying years and La Niña decaying years based on global observed data from the NCEP (National Centers for Environmental Prediction) / NCAR (National Center for Atmospheric Research) reanalysis 2 over the East Asia and the Korean Peninsula have expected to clearly decreasing tendency during CT El Niño year compared to the normal years. Particularly, during WP El Niño year has expected to increasing tendency then normal years. In addition to La Niña year shows tended to slightly increasing tendency. Warm season anomaly precipitation of positive (+) IOD and negative (-) IOD years, it shows slightly decreasing tendency and normal state, respectively.

The singular spectrum analysis (SSA) of the eigenvalue analysis of precipitation and runoff over the Korean Peninsula have explained 54.8%, and 63.4% by empirical orthogonal function (EOF) 1-12 mode. And also the climate indices (such as, N_{CT} , N_{WP} , and IOD) have explained 65.4%, 71.4%, and 61.0% by empirical orthogonal function (EOF) 1-6 mode, respectively. Therefore, we used the reconstructed component time series data from the SSA techniques by selecting the RC 1-12 and the RC 1-6 corresponding to a relatively short period. Results of correlation analysis between hydrological variable and climate index has come out high correlation with non-linear correlation analysis using the MI technique more than linear correlation analysis. In case of N_{CT} index and N_{WP} index shows that there are lag correlations of several month. But for the case of IOD index shows direct correlation. As a result from this study, extreme climate pattern changes and their hydrologic local impacts over the Korean Peninsula, it shows significant increasing tendency during the WP El Niño decaying year, the CT El Niño years are significant decreasing tendency, and during the La Niña years have analyzed as to maintain the average state compared to the normal years. In addition, during the positive IOD years have clearly appeared decreasing

tendency of precipitation and runoff to compare with the normal years. But for the negative IOD years are analyzed that keeping with the normal year state and slightly decreasing tendency.

Finally, to carry out utilizing of research results and policy support, we analysed that the relevant provisions, guidelines, and the business work for the government affiliated ministry and agencies. As a result of this study, it is believed that can be utilized to provide long-range river flood forecasting, reservoir operation, and water resources management during rainy season by development of the long-range flood forecasting system. The results of this study, it is also possible to take advantage of support premium determination of flood insurance, and as a material for notification of flood risk zone, and also it may be utilized to support the flood risk policy and to obtain the publicity effect for the public. The "Guidelines of district, city, and country group management plan" is to run the disaster vulnerability analysis of climate change every five years, since it should be reflected in the plan, if to perform every year the climate change disaster vulnerability analysis, it is possible to take advantage of the research results of long-range flood forecasting. In the future, extends of this study, it is necessary to clarify a mechanism over the Korean Peninsula between climate factors and hydrologic variables links with possible teleconnections in the large scale environments, and also it is possible to take advantage for the long-range flood forecasting during warm season to build a statistic-dynamic time series model using the APCC (APEC Climate Center) MME (Multi Model Ensemble) data.

Keywords: ENSO (El Niño-Southern Oscillation), IOD (Indian Ocean Dipole), SSA (Singular Spectrum Analysis), MI (Mutual Information), Teleconnection, Hydrologic Variability, Korean Peninsula, 5-Major River Basin

목차

원격상관 기반 극한기후패턴변화에 따른 한반도 지역수문변동영향 분석

발간사	iii
ABSTRACT	v
1. 서론	1
1.1 연구 배경 및 필요성	1
1.2 연구 동향	2
1.3 연구의 목적 및 범위	5
2. 이론적 배경 및 사례	7
2.1 엘니뇨/라니냐	7
2.2 새로운 형태의 엘니뇨	9
2.3 인도양 쌍극자 모드	12
2.4 엘니뇨의 예측	14
2.5 호주 기상청의 엘니뇨/IOD 예측	16
2.6 APEC 기후센터의 엘니뇨/IOD 예측	18
3. 극한 기후 패턴 분석	20
3.1 대상 구역	20
3.2 대상 자료	22
3.2.1 해수면 온도 자료	22
3.2.2 한반도 수문자료	23
3.3 연구 방법	24
3.3.1 서로 다른 ENSO 패턴 분류	24
3.3.2 태평양 지역 SSTA 분석 결과	27
3.3.3 IOD 사상 분류	28
3.3.4 인도양 지역 SSTA 분석 결과	31
3.4 대규모 기후환경 분석결과	32

3.4.1 ENSO 패턴 변화에 따른 GPCP 강수량 분석 결과	32
3.4.2 ENSO 패턴 변화에 따른 GPCC 강수량 분석 결과	35
3.4.3 양(+)/음(-)의 IOD해의 GPCP 강수량 패턴 분석 결과	37
3.4.4 양(+)/음(-)의 IOD해의 GPCC 강수량 패턴 분석 결과	39
3.4.5 IOD 진화 패턴 분석결과	41
4. 기후인자와 수문변량간의 원격상관 분석	48
4.1 원격상관 분석 방법	48
4.2 SSA를 이용한 주성분 분석	50
4.2.1 SSA를 이용한 주성분분석 방법	50
4.2.2 수문자료와 기후지수의 EOF분석	53
4.2.3 SSA를 이용한 수문자료와 기후지수의 주성분분석 결과	56
4.3 Mutual Information (MI)을 이용한 상관분석	64
4.3.1 Mutual Information (MI) 기법	64
4.4 Kernel 함수를 이용한 결합확률밀도함수 추정	70
4.4.1 결합 확률밀도함수의 추정방법	70
4.4.2 핵함수의 종류	72
4.4.3 광역폭 h의 선택	73
4.4.4 MI를 이용한 확률밀도함수 추정절차	74
4.5 MI를 이용한 결합확률밀도함수 분석 결과	75
4.5.1 기후지수(N_{CT})와 수문변량과의 결합확률밀도함수 분석결과	76
4.5.2 기후지수(N_{WP})와 수문변량과의 결합확률밀도함수 분석결과	79
4.5.3 기후지수(IOD)와 수문변량과의 결합확률밀도함수 분석결과	81
4.6 MI 기법을 이용한 지체시간별 선형/비선형 상관 분석결과	83
5. 극한기후 패턴 변화에 따른 한반도 수문변동영향	93
5.1 ENSO 패턴 변화에 따른 한반도 수문변동영향	93
5.1.1 ENSO 변동에 따른 강수량 패턴 분석 결과	93
5.1.2 ENSO 변동에 따른 유출량 패턴 분석 결과	96
5.1.3 ENSO 변동에 따른 한반도 수문 패턴 분석	99
5.2 IOD 패턴 변화에 따른 한반도 수문변동 영향	102
5.2.1 양(+)/음(-)의 IOD에 의한 한반도 강수량 영향 분석 결과	102
5.2.2 양(+)/음(-)의 IOD에 의한 한반도 유출영향 분석 결과	105
5.2.3 IOD 진화 패턴에 따른 한반도 수문 변동영향 분석 결과	107
5.2.4 IOD해의 한반도 강수량/유출량 패턴 분석	114

6. 활용방안 및 정책제언	117
6.1 법제도 검토(관련 법규 및 지침)	117
6.2 국내외 물관리 체계 및 현황	121
6.2.1 국외의 물관리 체계 및 현황	121
6.2.2 국내의 물관리 체계 및 현황	122
6.3 부처별 활용방안	124
6.3.1 국토교통부, K-water, 홍수통제소, 지자체 활용방안	124
6.3.2 국가안전처(소방방재청), 풍수해 보험사 활용방안	127
6.3.3 기타활용 방안	128
7. 결론 및 토론	129
REFERENCES	132
APPENDIX(I)	139
APPENDIX (II)	162
APPENDIX (III)	178

1. 서론

1.1 연구 배경 및 필요성

전 지구적 기후특성 변화는 극한기후사상 유발의 원인이 되며, 수자원의 지역적 변동 특성과 밀접한 관련이 있다(Horel and Wallace, 1981; Wang *et al.* 2000; Pizarro and Lall, 2002; Yoon *et al.* 2013). 많은 기후학자들은 지구기온의 증가와 더불어 극한기후특성이 변화하고 있으며, 그 발생 빈도와 강도가 점차 증가할 것으로 예상하고 있다(IPCC, 2007; 기상청, 2012). 특히 수문기상인자(hydrometeorological variability)의 계절적 변동은 전 지구적 기후특성 변화와 관련이 있으며, 수자원의 효율적인 예측 및 관리를 위해서는 기후인자와 수문자료간의 관계를 규명하는 일이 매우중요하다(Pizarro and Lall, 2002; Kim *et al.*, 2012; and Yoon *et al.*, 2013). 이러한 지역적 수문 변동영향은 독립적으로 발생하기보다 수문순환과정에서 나타나는 상관성에 기초하며, 유역의 수문특성 변화를 야기 시키는 가능한 원인으로는 열대 태평양 지역의 El Niño–Southern Oscillation(ENSO)현상과 열대 인도양 지역의 Indian Ocean Dipole(IOD) 현상 등 비정상적인 해수면온도(SST; Sea Surface Temperature) 변화에 따른 기후시스템의 비선형적 거동을 들 수 있다(Piechota and Dracup, 1996; Piechota *et al.* 1998; and Saji *et al.*, 1999). 여러 연구에 의하면 대기 순환패턴 및 수문 환경변화에 영향을 미치는 주요 인자인 ENSO와 IOD는 강수량과 유출량의 계절적 변동과 밀접한 상관성이 있는 것으로 알려 진바 있다(Saji *et al.*, 1999; Ashok *et al.*, 2003; McPhaden *et al.*, 2006; Weng *et al.*, 2007; Pradan *et al.*, 2011; and Yoon *et al.*2013). 주요 연구로, Weng *et al.*(2007)과 Feng *et al.*(2010)은 엘니뇨 현상이 전 세계 많은 지역에 걸쳐 대규모 기후패턴 및 수문순환 변화에 유의할 만한 영향을 미치고 있음을 밝힌바 있으며, Saji *et al.*(1999)은 양(+)의 IOD 해에는 인도양에 인접한 지역, 예를 들어, 동아프리카에서는 집중호우와 인도네시아에서는 가뭄 등 직접적인 영향을 줌을 밝힌바 있다.

열대지역의 새로운 형태의 엘니뇨와 인도양 쌍극자 모드에 대한 연구, 대표적인 해수면온도지수(Niño3, Niño4, Niño3.4, IOD 등)를 이용한 우리나라와 동아시아 인근 해역 해수면온도와의 상관성 및 기후변동성분석에 대한 연구는 태평양과 인도양 인근 국가

연구자들에 의해 전 세계적으로 활발히 진행되고 있으나, 새로운 형태의 ENSO와 양(+)과 음(-)의 IOD 현상이 극동아시아에 위치하고 있는 한반도의 지역적 수문변동특성 변화에 미치는 영향에 대한 연구는 거의 드물다. 그러나 우리나라와 같은 지리적 위치 특성과 여름철 몬순기후 발생은 중위도 지역에서의 여름철 강수집중과 집중호우 패턴 변화, 지역적 극치강수량 발생으로 인한 빈번한 홍수유발 등 안정적인 용수공급과 유역차원의 치수계획 수립의 교란요인으로 작용하게 된다. 더불어 한반도 지역의 유역별 장기적인 치수방재와 증장기 수방계획 수립 차원에서 대기순환 패턴 분석과 변화예측에 대한 부분이 중요한 요소로 작용하고 있음은 명백한 사실이다. 따라서, 기후지수와 수문변동량간의 관계규명과 변동분석에 관한 연구를 통한 원격상관기반 선형 및 비선형 상관분석과 극치수문예측에 관한 연구에 대한 노력이 더욱 활발히 진행될 필요성이 있다.

1.2 연구 동향

최근 연구들에 의하면 지구온난화 및 기후변화의 영향으로 대규모 해수면온도 상승과 하강의 전형적인 패턴이 변화하고 있음을 시사하고 있으며, 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Weng *et al.* 2007; Kao and Yu 2009; Yeh *et al.* 2009; and Na *et al.* 2011). 1970년대 후반을 전후로 엘니뇨의 주기(frequency)와 강도(intensity)의 변화뿐 아니라 엘니뇨의 발생 위치(location)가 변화되고 있으며, 최근 인간 활동과 대기 중의 CO₂ 농도의 증가로 인한 지구온난화는 엘니뇨현상의 변화를 가중시키는 요인으로 작용하고 있다는 연구결과가 발표되었다(Ashok and Yamagata, 2009). 특히 중앙태평양의 해수면온도가 이상적으로 상승하는 엘니뇨 Modoki 사상은 최근에 올수록 그 발생빈도가 더 증가하였으며(Ashok *et al.* 2007; Pradhan *et al.* 2011) 지구온난화가 계속되는 미래 기후상태에서 엘니뇨 Modoki 사상이 보다 빈번히 발생하여 그 영향이 더욱 커지고 강해질 것이라 전망하고 있다. 특히, Yeh *et al.*(2009)의 연구에 의하면 기존 엘니뇨와 다른 형태의 새로운 엘니뇨가 지구온난화와 연관성이 있으며 미래 기후변화 시나리오 자료를 바탕으로 분석한 결과, 향후 기후변화에 따라 새로운 형태의 엘니뇨의 발생 빈도가 증가할 수 있음을 밝힌바 있다. 아직 새로운 형태의 엘니뇨 발생에 대한 정확한 메커니즘 분석은 이루어지지 않았으나 동북아시아를 비롯한 한반도 영역에 영향을 미치고 있음은 명백한 사실일 가능성이 크다. 대표적으로 새로운 형태의 엘니뇨

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 엘니뇨를 구분한바 있다. 또한 Feng *et al.*(2010)은 Niño3와 엘니뇨 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 엘니뇨와 Warm-Pool(WP) 형태의 엘니뇨로 구분하여 지체상관(lagged-correlations) 분석을 통한 기존의 Niño3, Niño4의 ENSO자료와 상관성을 분석하였다. 한반도를 대상으로 한 수문기상인자와 엘니뇨 관련 연구는, 강인식(1998)은 엘니뇨가 발생한 겨울에 우리나라 겨울철 기온이 평년 이상의 분포를 보이고 그 다음해 여름철 강수량이 증가함을 제시하였으며, 차은정 등(1999)은 엘니뇨/라니냐 해의 우리나라 기후 특성에 관한 연구를 통하여 엘니뇨가 발생한 여름에는 북태평양 고기압의 발달이 늦어지고 위치도 남하하기 때문에 우리나라에는 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) 엘니뇨로, 중앙태평양에서 나타나는 경우를 the central Pacific(CP) 엘니뇨로 정의하여 1990년 이후에 CP-엘니뇨의 발생 빈도가 증가하는 특징을 보이며 여름철 열대 중태평양 지역의 높은 표층수온의 선형 경향성과 밀접한 상관성이 있음을 밝혔다. Kug *et al.*(2010)은 두 가지 형태의 엘니뇨 사상과 한반도의 기후변동에 관한 통계적 분석결과 엘니뇨 발달기(developing year)에 CT 엘니뇨 해에는 한반도 대부분 지역에서 차가운 기후특성이 있으며, WP 엘니뇨해에는 따뜻한 기후특성이 있음을 제시한바 있다. Kim *et al.*(2012)은 엘니뇨 Modoki일 때 한반도 겨울철 강수량의 증가경향과 동아시아지역의 원격상관(tele-connection)을 규명한바 있으며, 윤선권 등(2013)은 전형적인 엘니뇨와 엘니뇨 Modoki를 구분하여 서로 다른 형태의 엘니뇨에 따른 한강유역의 여름철 강수량과 극치강수의 변동특성을 분석하여 엘니뇨 Modoki일 때 한강유역의 여름철 강수량과 극치강수의 증가 특성이 있음을 밝힌바 있다.

IOD 역시 ENSO 현상처럼 전 지구 기후시스템에 영향을 주는 것으로 알려져 있다. Saji *et al.*(1999)은 IOD 현상을 처음 발견하였으며, 양(+)의 IOD 해에 동아프리카에서는 집중호우와 인도네시아에서는 가뭄 등 직접적인 영향이 있음을 밝힌바 있다. 또한

Ashok *et al.*(2003)은 IOD가 인도의 여름철 몬순 특성 변화와 영향이 있음을 밝힌바 있으며, Guan *et al.*(2003)은 IOD가 동아시아 기후특성 변화에 영향을 주고 있음을 밝힌바 있다. 특히 Saji and Yamagata(2003)는 인도양 동쪽과 서쪽지역의 해수면온도차와 적도지역의 바람조건에 따라 양(+)의 IOD해와 음(-)의 IOD해를 구분하였으며, 인도양의 서쪽에 위치한 국가에서는 평년보다 이상(anomalous) 고온다우, 동쪽에 위치한 국가에서는 저온소우 현상이 뚜렷하게 나타나며, 파키스탄에서 남중국에 이르는 아시아 몬순 골 지역에서는 평년보다 강한 몬순 강수량이 발생함을 밝힌바 있다. 또한 지리적으로 원거리에 위치해 있는 유럽과 동북 아시아지역, 북남미지역, 그리고 남아프리카 등지에서도 인도양에서 발생하는 IOD 현상과 상관관계를 보여주는데 이들 지역에서는 양(+)의 IOD 해에는 고온소우 경향이 뚜렷함을 밝힌바 있다. 중위도에 위치한 우리나라 기후시스템은 엘니뇨나 IOD 현상 등 열대로부터의 영향도 받지만 동시에 북대서양 진동(North Atlantic Oscillation, NAO), 북극진동(Arctic Oscillation, AO) 또는 북반구 환상모드(Northern Annular Mode, NAM) 등 중고위도지역에서 나타나는 기후현상의 영향을 받으므로 복잡한 메카니즘 해석과 원격상관 분석에 대한 이해가 필요할 것이다. IOD에 의한 한반도 기후영향 분석연구로는 차은정(2007)은 엘니뇨-남방진동, 인도양쌍극자 모드 두 현상의 관련성과 한반도 기후특성에 대한 연구를 수행한 바 있으며, 엘니뇨현상과 IOD현상은 봄과 가을에는 동시 상관성이 존재하고 인도양에서 해수면온도 분포는 엘니뇨 해에는 남북진동이 IOD해에는 동서진동 형태가 뚜렷함을 밝힌바 있다.

연구동향 분석 결과, 현재 한반도를 포함한 극동아시아 지역을 대상으로 ENSO와 IOD에 의한 기후특성 변화와 수문영향에 대한 연구는 활발히 진행되고 있지 않은 실정이다. 더불어 전형적인 엘니뇨와 새로운 형태의 엘니뇨 발생해, 라니냐 발생해, 그리고 양(+)의 IOD와 음(-)의 IOD 발생해의 샘플 수의 제한으로 인해서 통계적인 의미 부여가 어려운 상황이다. 본 연구와 더불어 향후 열대지방에서 나타나는 ENSO와 IOD 현상이 어떠한 과정으로 우리나라와 전 지구 기후시스템에 영향을 미치는지에 대한 과학적인 근거마련에 대한 연구 수행이 필요하며, 나아가 수문순환과정에서 나타날 수 있는 지역적 극치수문발생 특성 변화 분석 및 유출특성 변화에 대한 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

1.3 연구의 목적 및 범위

본 연구에서는 상기 연구동향조사에서 기술한 Ren and Jin(2011)의 연구결과를 바탕으로 전형적인 엘니뇨인 CT 엘니뇨 해와 새로운 형태의 WP 엘니뇨 해를 구분하였으며, 전형적인 라니냐 해를 또한 구분하여, 엘니뇨와 라니냐 현상이 동아시아와 우리나라의 여름철(June to September, JJAS) 수문변동에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 Saji and Yamagata(2003)의 연구결과를 바탕으로 양(+)의 IOD와 음(-)의 IOD 발생 해를 구분하였으며, IOD의 진화(evolution) 패턴에 따른 동아시아와 한반도의 여름철 수문변동 영향을 분석하였다. 또한 전통적인 엘니뇨인 CT 엘니뇨와 새로운 형태의 WP 엘니뇨, 그리고 양(+)과 음(-)의 IOD 현상이 한반도 수문변량과 어느 정도의 상관성을 가지면서, 지체시간별 수문변동에 영향을 주는지 파악하기 위하여 시계열자료의 저빈도 해석에 사용되는 SSA(Singular Spectrum Analysis) 기법을 이용한 주성분분석(Principle Component Analysis, PCA)을 실시하였으며, Mutual Information(MI) 기법과 Kernel 함수를 이용한 결합확률 밀도함수의 추정으로 기후지수와 한반도 수문변량간의 지체시간별 선형 및 비선형 원격상관분석을 실시하였다. 다음으로, 한반도 5대강 유역별 113개 중권역에 대하여, 서로 다른 두 유형의 엘니뇨 해와 라니냐 해, 그리고 IOD 해로 구분한 기간에 대하여 강수량과 유출량의 30년 평년값과의 편차분석(composite analysis, CA)을 실시하였으며, Student's *t*-test에 의한 유의성검정을 실시하여 대규모 기후패턴 변화와 관련한 한반도 중권역별 강수특성변화와 유출특성변화의 수문학적 연관관계를 분석하였다.

본 연구의 세부 연구방법 및 범위를 살펴보면 다음과 같다. 한반도 수자원에 미치는 원격상관관계 규명과 수문변동성 평가를 통한 해양관련 기후지수에 의한 한반도 지역 수문변동의 가능한 극한기후유발의 원인을 진단하였으며, 이는 극한기후특성을 반영한 원격상관기반 홍수장기예측으로 수방정책 지원 및 치수방재 정책 지원 자료로 활용될 것이다. 본 연구를 통하여 관심 있게 살펴보고자 하는 내용을 정리하면 다음과 같다. (1) 대규모 해양관련 기후현상인 엘니뇨와 라니냐, IOD 패턴 변화에 따른 한반도 수문 환경변화에 미치는 주목할 만한 영향과 장기적인 변동특성을 분석하고 (2) 기후인자와 한반도 5대강 유역의 수문변량간의 통계적 상관분석을 통한 수문기상학적 원격상관 관

계를 규명하여 (3) 기후인자 예측을 통한 극치 수문사상의 장기예측 가능성을 진단하고, 향후 추계예측모형 구축과 APCC MME 자료활용을 통한 통계-역학 모형 기반 홍수 장기 예측 시스템 구축을 실시하여 수자원 관리, 방재활용, 수방계획 수립 등 실무에 활용할 계획이다. 본 연구의 결과는 우리나라와 같이 여름 홍수, 겨울 가뭄과 같이 뚜렷한 계절 특성을 보이는 지역에서의 장기적인 수자원 관리·예측 및 유역차원의 안정적인 용수공급과 치수계획이 필요한 지역에서, 수자원 정책결정을 위한 자료로 활용이 가능하다. 다음은 본 연구의 세부 연구 목표를 나타내었다.

< Scope of this study >

1. 극한기후 패턴 변화에 따른 동북아시아 수문변동영향
1.1 열대 태평양 해수면온도 변화에 따른 동북아시아 수문 특성 분석
1.2 인도양 쌍극자 모드(IOD)에 따른 동북아시아 수문 특성 분석
2. 기후지수와 수문변량간의 원격상관 분석
2.1 SSA를 이용한 기후지수와 한반도 수문변량의 주성분 분석
2.2 Mutual Information을 이용한 지체시간별 비선형 상관분석
2.3 해양관련 기후지수와 한반도 수문 변량간의 원격상관관계 분석
3. 극한기후 패턴 변화에 따른 한반도 지역수문변동영향
3.1 한반도 5대강 유역별 기후패턴 변화에 따른 수문 변동 영향 평가
4. 연구결과의 활용 및 정책 반영 방안
4.1 홍수 장기예측관련 연구결과 활용 및 정책수립방안

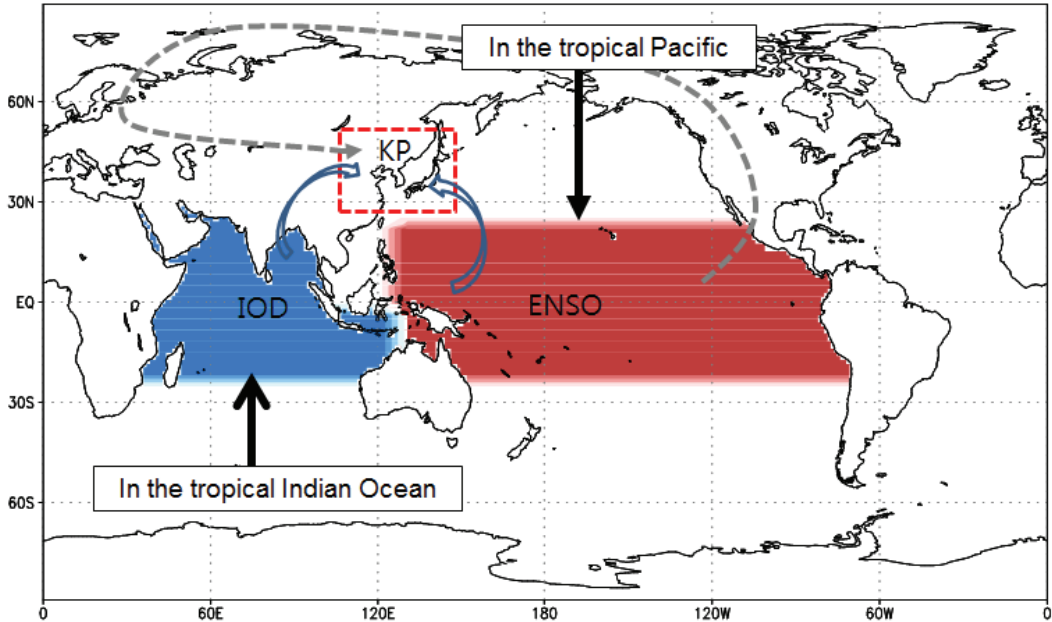


Figure 1. Schematic view of ENSO, IOD and their interaction over the Korean Peninsula
(Base map source: <http://www.jamstec.go.jp/>)

2. 이론적 배경 및 사례

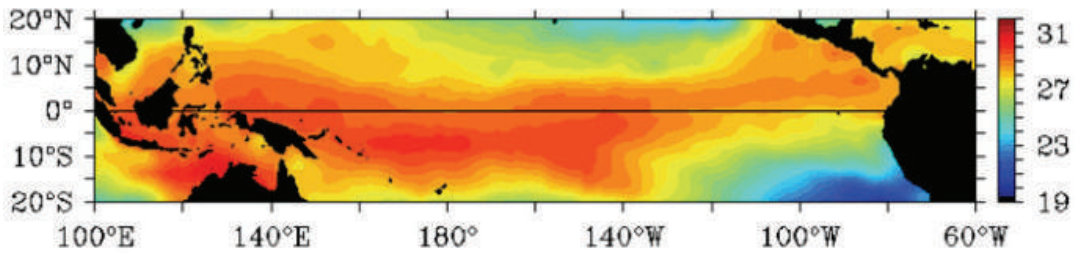
2.1 엘니뇨/라니냐

엘니뇨란 남아메리카 대륙 서쪽 해안으로부터 중앙 태평양에 이르는 동태평양 적도 지역의 넓은 범위에서 해수면 온도가 지속적으로 높아지는 현상을 말하며, 엘니뇨-남방진동(El Niño and Southern Oscillation, ENSO)으로 정의되어 질 수 있다. ENSO는 열대 해양-대기 결합시스템(coupled system)으로서 적도태평양의 해수면온도 변동으로 인하여 야기되는 전 지구적 대류활동이나 대기대순환패턴 변동에 영향을 미치며, 열대지방뿐만 아니라 대규모의 지구환경 기후시스템에 중요한 영향을 미치는 현상이다. 엘니뇨(El Niño)는 스페인어로 '남자아이'를 뜻하며, 특히 이 현상이 크리스마스 경에 자주 나타나므로 『아기예수』를 의미하게 되었다. 엘니뇨 현상으로 인해 페루에서는 어획

량 감소와 함께 홍수 등이 발생하여 사회.경제적 타격을 입고 있고, 전지구적인 대기 순환에도 영향을 미쳐 열대지역에서 중.고위도 지역까지 세계 각지의 기후에 영향을 주고 있다.

라니냐는 엘니뇨 시기와는 반대로 동태평양 지역의 이상 저수온 현상이 발생하는 것을 의미하며, 이에 대해서 미국의 해양학자 Philander가 『라니냐(La Niña)』라 부를 것을 제안하였다(Philander, 1985). 라니냐는 스페인어로 ‘여자아이’를 의미한다. 라니냐 시기에는 열대 태평양 지역의 무역풍이 평년보다 강해지면서, 서태평양 지역에서 해수면 온도와 수위가 평년보다 상승하게 되고, 적도 동태평양 지역에서는 강한 무역풍의 영향으로 차가운 해수의 용승 현상이 강해져 평년보다 해수면 온도가 낮은 저수온 현상이 나타나게 된다.

(a) 엘니뇨 시기 해수면 온도 분포



(b) 라니냐 시기 해수면 온도 분포

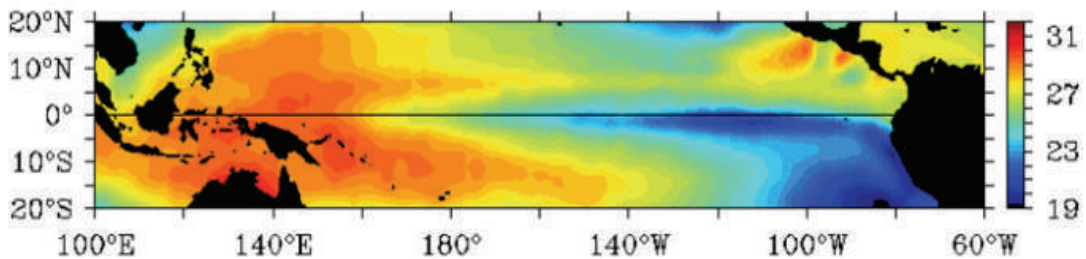


Figure 2. Distribution of Sea Surface Temperature(SST) in the tropical region during El Niño and La Niña types (Source: <http://www.climate.go.kr/>)

우리나라 기상청에서는 엘니뇨 감시구역(열대태평양 Niño 3.4 지역: 5° S~5° N, 170° W~120° W)에서 5개월 이동 평균한 해수면온도의 편차가 0.4°C 이상(-0.4°C 이하) 나타나는 달이 6개월 이상 지속될 때 그 첫 달을 엘니뇨(라니냐) 발달의 시작으로 보고 있으며, 미국의 경우 엘니뇨 감시구역(열대태평양 Niño 3.4 지역: 5° S~5° N, 170° W~120° W)에서 3개월 이동 평균한 해수면온도의 편차가 0.5°C 이상(-0.5°C 이하) 나타나는 달이 5개월 이상 지속될 때 그 첫 달을 엘니뇨(라니냐) 발달의 시작으로 판단하고 있다. 또한, 일본의 경우 엘니뇨 감시 구역(열대태평양 Niño 3 지역: 5° S~5° N, 150° W~90° W)에서 5개월 이동 평균한 해수면온도의 편차가 0.5°C 이상(-0.5°C 이하) 나타나는 달이 5개월 이상 지속될 때 그 첫 달을 엘니뇨(라니냐) 발달의 시작으로 본다. 다음 Figure 3은 열대 태평양 지역의 해수면 온도 감시구역을 나타내고 있다.

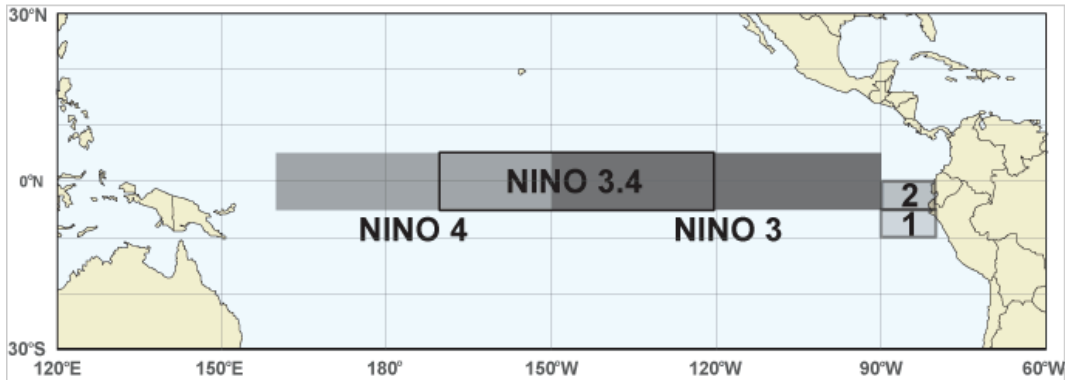


Figure 3. Map of NINO Regions (Source: <http://www.bom.gov.au/>)

2.2 새로운 형태의 엘니뇨

최근 기후변화와 지구온난화의 영향으로 인하여 엘니뇨의 특성이 변하고 있으며, 이러한 현상은 전형적인 엘니뇨와 유사하면서 약간 다르다는 의미로 ‘엘니뇨 Modoki’, Central Pacific(CP) 엘니뇨, Warm Pool(WP) 엘니뇨 등의 용어로 사용되고 있다. 일반적인 엘니뇨의 진화 패턴은 동태평양(Eastern Pacific) 지역에 중심이 있어 가을과 겨울 사이

에 비정상적인 해수면 온도 상승을 보이거나, 새로운 형태의 엘니뇨는 중앙태평양(Central Pacific)에서 강한 진폭을 나타내는 형태를 띄게 된다. 이러한 새로운 형태의 엘니뇨 Modoki에 대한 연구는 최근 들어 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다(Kug *et al.*, 2009; Kao and Yu 2009; Ashok and Yamagata, 2009; Feng *et al.*, 2010; Na *et al.*, 2011; and Ren and Jin 2011).

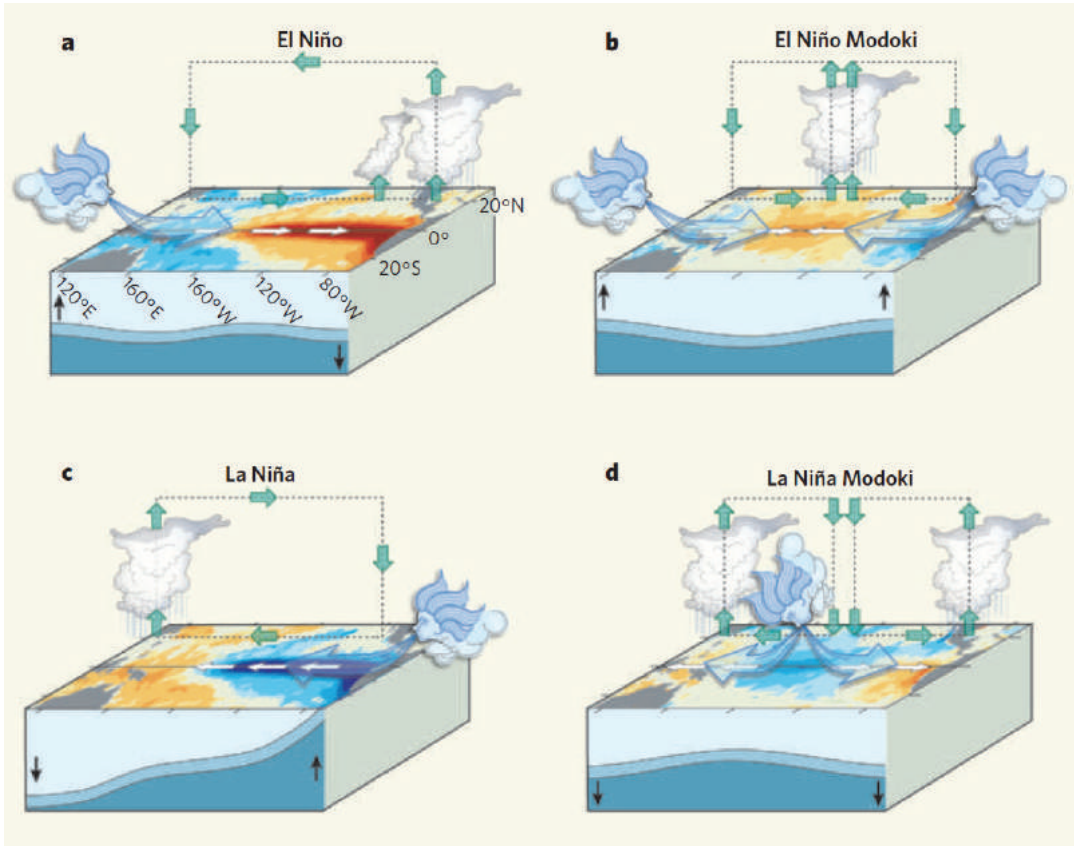


Figure 4. Anomalous conditions in the tropical Pacific (Source: Ashok and Yamagata, 2009. Nature)

Kim et al.(2009)의 연구에 의하면 엘니뇨 Modoki라고 알려진 새로운 형태의 엘니뇨는 폭풍우의 발생 빈도를 높이고, 중앙아메리카 해안과 걸프 해안(Gulf coastal)을 따라 허리케인이 육지로 상륙할 가능성이 증가함을 밝힌 바 있다. 중앙태평양의 해수면온도가 이상적으로 상승하는 새로운 형태의 엘니뇨 사상은 최근에 올수록 그 발생빈도가 증가하였으며, 지구온난화가 계속되는 미래 기후상태에서 새로운 형태의 엘니뇨 사상이 보다 빈번히 발생하여 그 영향이 더욱 커지고 북서태평양(WNP) 지역의 태풍 활동이 더욱 강해질 것이라 전망하고 있다(Ashok *et al.*, 2007; Pradhan *et al.*, 2011). 특히, Yeh *et al.*(2009)의 연구에 의하면 최근 새로운 형태의 엘니뇨 특성이 기후변화에 의한 영향과 관련이 있으며 향후 발생빈도와 강도가 더욱 커질 수 있음을 밝혔고 새로운 형태의 엘니뇨 예측을 위한 기후모델을 제시한 바 있다. 엘니뇨 Modoki는 Ashok *et al.* (2007)이 제시한 Eq.(1)의 EMI를 산정함으로써 그 변동 특성을 파악할 수 있다.

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

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

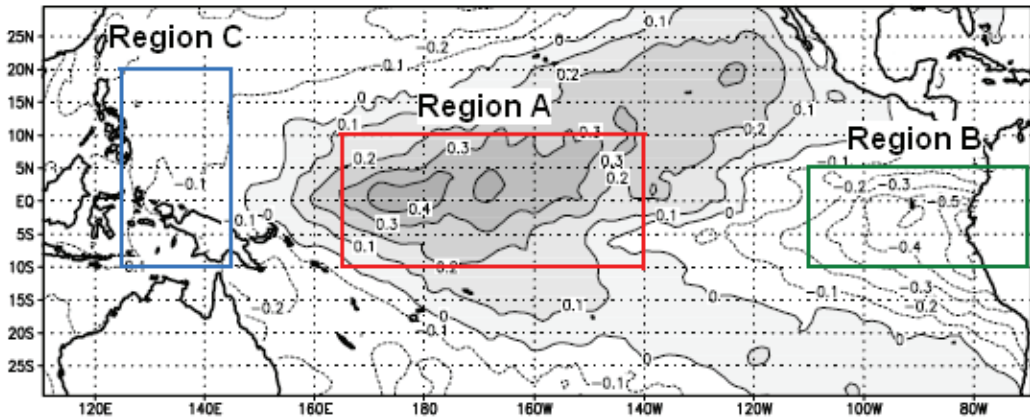


Figure 5. Illustrates those regions used in the El Niño Modoki Index.

2.3 인도양 쌍극자 모드

인도양 쌍극자(Indian Ocean Dipole, IOD) 모드는 인도양 열대 수역의 동쪽과 서쪽에서의 뚜렷한 해수면 온도 편차에 의해 발생하며, 인도양 동북쪽에서 수온이 낮아지고, 반대로 인도양의 중앙부와 서쪽의 수온이 상승하게 되는 현상을 의미한다(Saji *et al.*, 1999; Behera *et al.*, 1999; and Yamagata *et al.*, 2002). IOD현상은 열대 서인도양(50° E-70° E, 10° S-10° N)과 남동인도양(90° E-110° E, 10° S-0° N) 사이의 SST 편차로 정의된다.

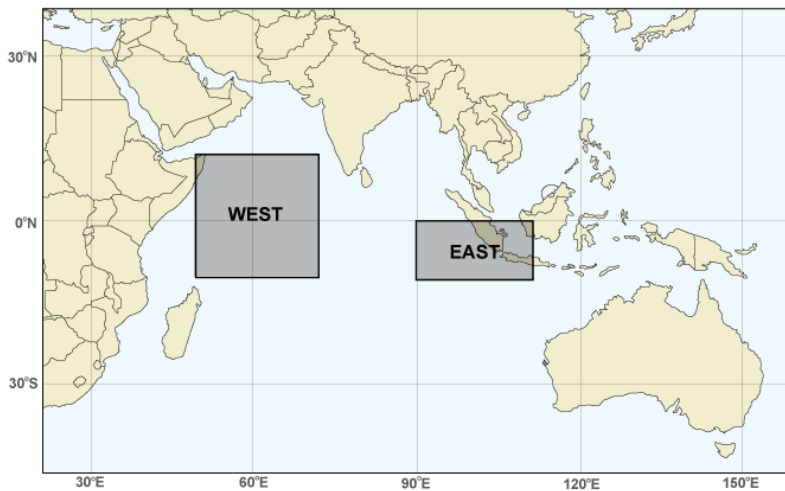
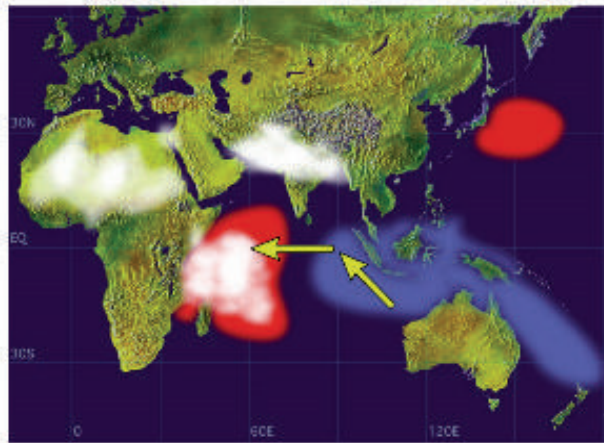


Figure 6. Illustrates those regions used in the Dipole Mode Index (DMI)
(Source: <http://www.bom.gov.au/>)

IOD 모드가 발생하게 되면, 인도양 지역에 동풍이 강하게 발생하게 되며, 동서의 해수면 온도차가 커지게 된다. 일반적으로 인도양 동부의 인도네시아나 호주 서부는 가뭄이 발생하고 인도양 서부의 동아프리카에서는 홍수가 발생하게 된다. 더 멀리 동북아시아나 유럽에도 영향을 미치는 것으로 밝혀졌으며, 다이폴모드가 발생하였을 경우 지중해

연안 유럽 지역은 평년보다 덥고 건조한 현상이 발생하며, 동북아시아와 지역에는 고온(무더위) 현상이 나타날 가능성이 높은 것으로 알려졌다. Figure 7은 양(+)
 음(-)의 IOD일 때의 전지구적 기후패턴 변화와 원격상관을 모식적으로 나타내고 있다 (Source: JAMSTEC).

(a) Positive IOD Mode



(b) Negative IOD Mode

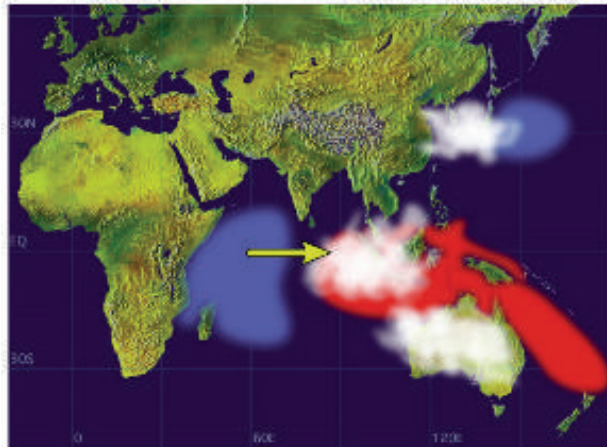


Figure 7. IOD teleconnections during positive IOD and negative IOD years
 (Source: <http://www.jamstec.go.jp/>)

2.4 엘니뇨의 예측

엘니뇨는 보통 4년에 1번 정도 발생한다고 알려져 있다. 그러나 주기가 일정하지 않고 2-7년 사이로 불규칙하게 발생한다. 특히, 최근 들어 엘니뇨의 주기가 더욱 불규칙하게 나타나고 있다. 평균적으로 엘니뇨의 지속기간은 18개월 정도로 알려져 있다. 엘니뇨의 예측 가능성은 자연 상관법을 이용하여 알 수 있다. 즉, 적도 해양의 해수 온도의 분포를 연직으로 자른 연직 단면 해수 온도와 엘니뇨 지수와의 상관성을 살펴보면, 엘니뇨 발생 전에 뚜렷한 상관성을 찾을 수 있다. 즉, 엘니뇨가 최대로 발달하기 18개월 전에 열대 서태평양 지역의 수온약층의 위치(수면으로부터 100~150m 아래)에 광범위하게 큰 값의 양의 상관 지역(난수역)이 나타난다. 이 양의 상관 지역이 점차로 동진하여 동태평양에 도착하면 엘니뇨를 유도하게 된다. 이러한 결과는 수온 약층 깊이의 해양 하층의 변동을 살펴보면 적어도 18개월 전에 엘니뇨를 예측할 수 있음을 의미한다. 현재 기상청에서는 엘니뇨 예측 모델에서 생산하는 열대 태평양 해수면 온도 편차를 이용하여 엘니뇨를 예측하고 있다.

한국의 기상청(KMA)은 홈페이지(<http://web.kma.go.kr/weather/forecast/el-la.jsp>)를 통하여 엘니뇨·라니냐 감시현황과 전망 결과를 매달 발표하고 있다. 열대 태평양 지역 엘니뇨·라니냐 감시 구역인 Niño 3.4(5° S~5° N, 170° W~120° W)지역과 페루연안해역(30° N~45° N, 120° E~135° E)의 해수면온도 평균이 평년에 비하여 높은 상태인지 낮은 상태인지의 정보를 제공하며, 엘니뇨 감시구역의 해수면온도 변화 전망은 세계 각국의 17개의 역학모델 평균과 9개의 통계모델평균 그리고 기상청 모델결과를 IRI(International Research Institute)와 NOAA/CPC(Climate Prediction Center)의 전망 결과와 비교하여 제공하고 있다. 이는 최근 해수면온도의 상태와 더불어 엘니뇨 발달 가능성을 진단하고 9개월 엘니뇨 전망 자료를 매달 update하여 제공한다. 다음 Figure 8은 매달 발표되는 KMA의 ENSO예보 결과이다.

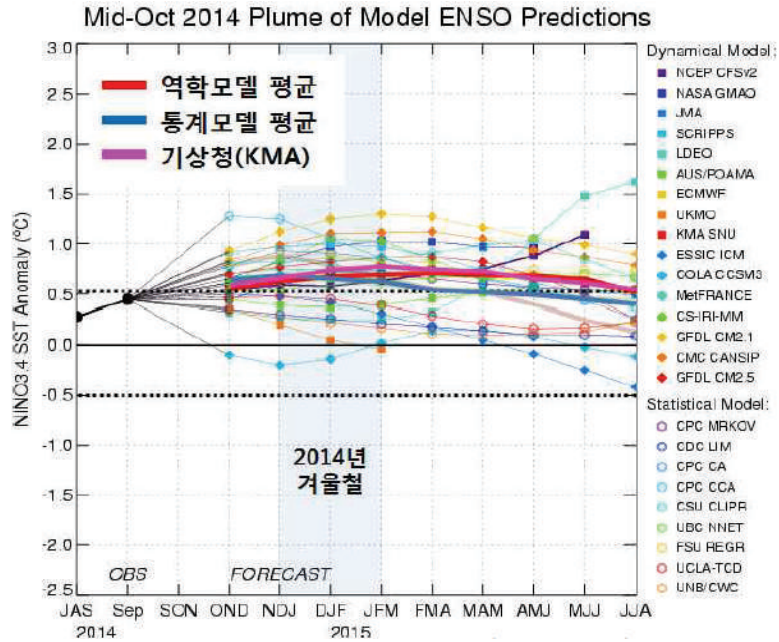


Figure 8. KMA ENSO forecast outlook (Source: <http://www.climate.go.kr/>)

더불어 IRI/CPC에서는 최근 2014년 9월 중순부터 Niño 3.4지역의 엘니뇨 예측 9개월 전망결과를 막대그래프(Plume) 형태의 확률예보로 전환하여 제공하고 있으며, 매월에 Niño 3.4지역의 해양조건이 엘니뇨와 라니냐, 그리고 평년(Neutral) 상태를 유지할 확률을 막대그래프를 통하여 쉽게 확인할 수 있다. 다음 Figure 9은 IRI/CPC의 ENSO Plume예보 결과이다.

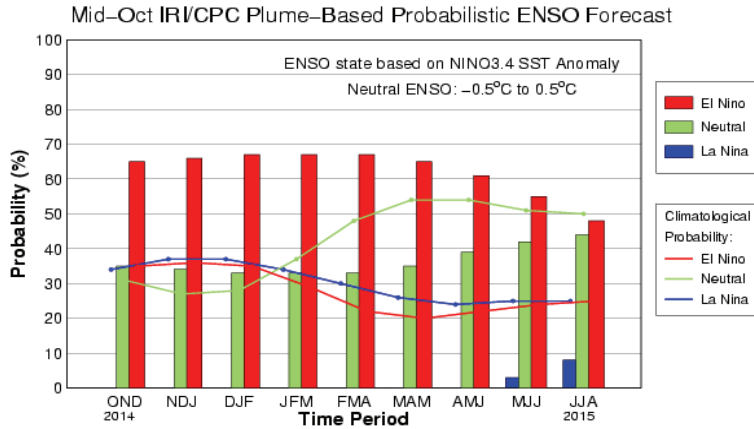


Figure 9. IRI/CPC ENSO forecast outlook (Source: <http://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/enso/>)

2.5 호주 기상청의 엘니뇨/IOD 예측

호주기상청(BOM)에서는 POAMA(Prediction Ocean Atmosphere Model for Australia) 모델을 이용하여 대표적 해양관련 기후지수인 ENSO(Niño3.4, Niño3, Niño4)와 IOD의 9개월 예측자료를 앙상블(Ensemble)과 함께 Ensemble Mean의 형태로 제공하고 있다. POAMA 모델에 의하여 예측된 결과는 POAMA outlook으로 매달 호주기상청 홈페이지(<http://www.bom.gov.au/>)를 통하여 제공되고 있다. 다음 Figure 10, 11은 매달 발표되는 BOM의 ENSO와 IOD예보 결과이다.

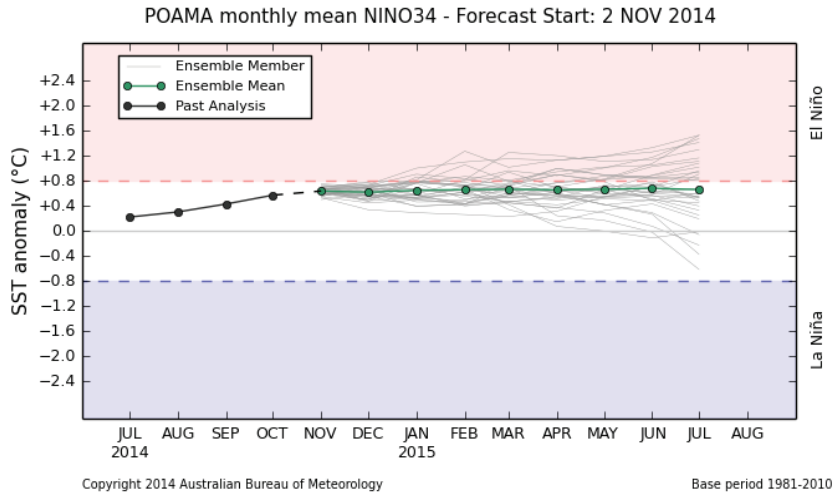


Figure 10. BOM ENSO forecast outlook (Source: <http://www.bom.gov.au/>)

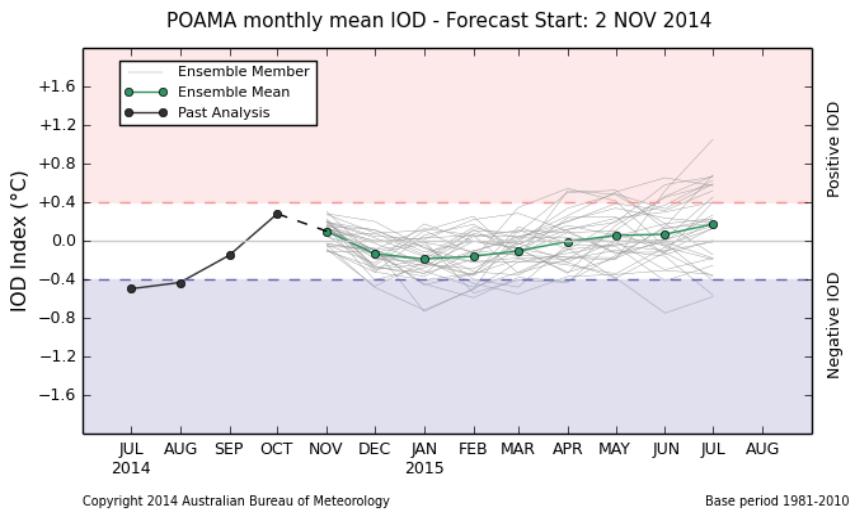


Figure 11. BOM IOD forecast outlook (Source: <http://www.bom.gov.au/>)

2.6 APEC 기후센터의 엘니뇨/IOD 예측

APEC 기후센터(APEC Climate Center, APCC)에서는 아시아 태평양지역 9개국 18개 기관으로부터 수집한 기후예측 모델자료를 모델간 앙상블 기법을 적용하여 매월 3개월과 6개월의 기후예측 정보를 생산하고 있으며, 21개 APEC 회원국 및 다양한 기관들에게 실시간으로 정보를 서비스하고 있다. APCC에서 생산되는 기후예측 자료는 4가지의 결정론적 MME(Deterministic MME) 예측 방법과 1가지의 확률론적 MME(Probabilistic MME) 예측 방법을 포함하여 총 5가지(CPM, SCM, MRG, SSE, PDF) 모델간 앙상블(MME) 기법을 적용하고 있으며, 강수량(Precipitation), 온도(2m Temperature), 해수면온도(Sea Surface Temperature), 그리고 지위고도(Geopotential height)를 포함한 총 8개의 변수에 대하여, 전 지구 규모에 대하여 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 격자화된 정보를 제공하고 있다. 또한 APCC MME자료를 바탕으로 대표적인 해양관련 지수인, ENSO와 IOD의 6개월 예측자료를 생산하여 홈페이지를 통하여 매달 예측결과를 제공하고 있다(<http://www.apcc21.org/eng/service/6mon/enso/japcc030701.jsp>). 본 연구는 향후 APCC MME 계절예측 자료를 활용한 원격상관기반 수자원의 장기 예측 기법개발로 확장을 염두에 두고 있다. 다음 Figure 12, 13은 매달 발표되는 APCC의 ENSO와 IOD예보 결과이다.

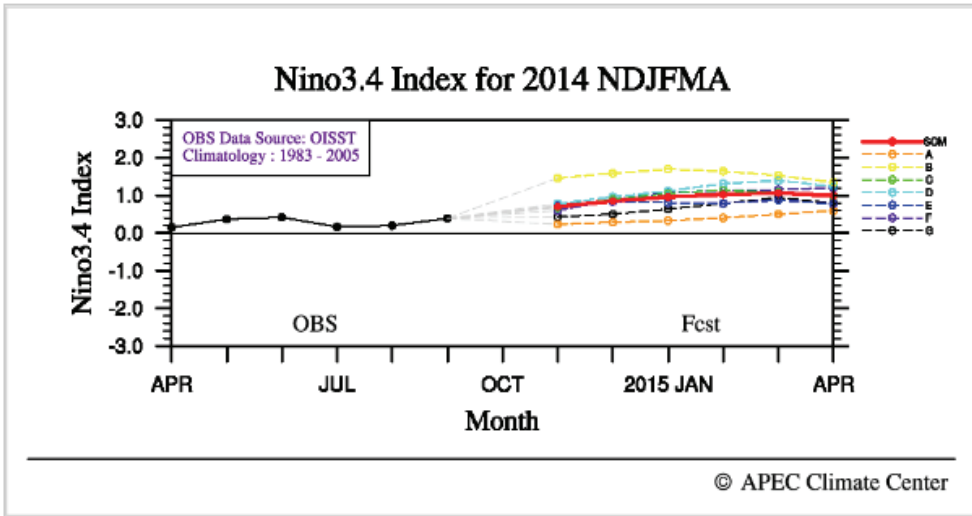


Figure 12. Predicted Niño 3.4 Index. The predictions from the individual models are marked A, B, C, D, E, F, and G, while that from the simple composite MME method is marked as SCM(Source: <http://www.apcc21.org/>).

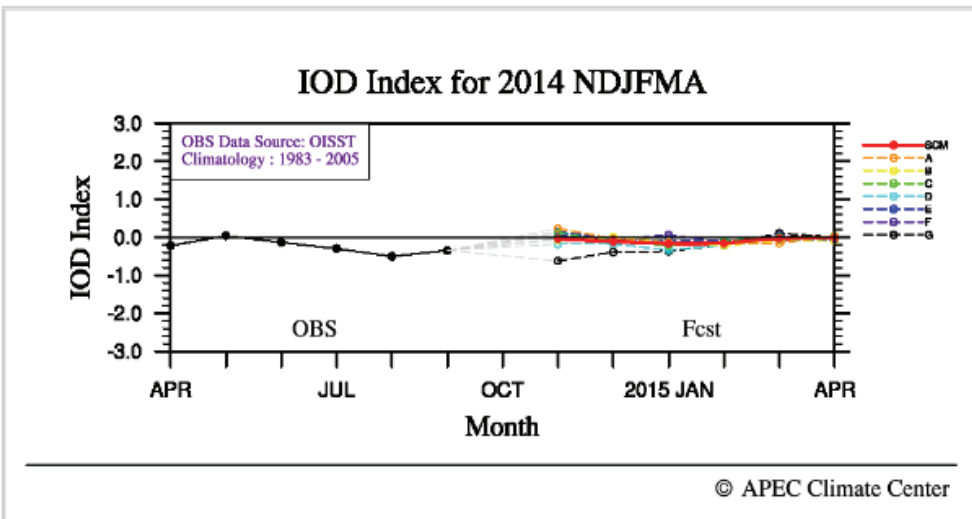


Figure 13. Same as Fig. 1 but for the Indian Ocean Dipole mode index(IODMI) (Source: <http://www.apcc21.org/>)

3. 극한 기후 패턴 분석

3.1 대상 유역

본 연구는 서로 다른 엘니뇨 패턴(CT/WP 엘니뇨) 변화와 IOD영향에 따른, 한반도 지역의 극치수문변동 영향을 분석하고, 기후인자와 수문변량간의 원격상관 분석을 통한 통계예측 가능성을 진단하고자 연구를 수행하였다. 한반도 5대강(한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강)을 연구대상으로 하였다.

Figure 14는 한반도의 위치도 및 5대강 유역을 구분하여 나타내었으며, 연평균 강수량 대비 여름철(June to September) 강수량을 구분하여 나타내었다. 과거 1966-2011까지 국가 수자원관리 종합정보시스템(www.wamis.go.kr) 통계자료에 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.

또한, 5대강 유역별 수문특성(유역면적, 강수량 등)을 살펴보면 다음과 같다. 한강유역의 경우, 총 30개의 중권역으로 구성되어 있으며, 유역면적은 $38,421.8km^2$, 연평균 강수량은 1,259.4mm이고, 이중 여름철 강수량은 894.2mm(71.0%)에 해당하는 것으로 분석되었다. 또한 낙동강유역은 총 33개의 중권역으로 구성되어 있으며, 유역면적은 $31,712.0km^2$, 연평균 강수량은 1,238.6mm이고, 이중 여름철 강수량은 808.8mm(65.3%)에 해당하는 것으로 분석되었다. 다음으로 금강유역은 총 21개의 중권역으로 구성되어 있으며, 유역면적은 $17,537km^2$ 이고, 연평균 강수량은 1,224.6mm로 5대강 유역 중 가장 적으며, 이중 여름철 강수량은 815.6mm(66.6%)에 해당하는 것으로 분석되었다. 또한 섬진강유역은 총 15개의 중권역으로 구성되어 있으며, 유역면적은 $8,299.1km^2$ 이고, 연평균 강수량은 1,437.3mm로 5대강 유역 중 가장 많은 강수가 내리는 것으로 분석되었으며, 이중 여름철 강수량은 929.9mm(64.7%)에 해당하는 것으로 분석되었다. 마치

막으로 영산강유역은 총 14개의 중권역으로 구성되어 있으며, 유역면적은 $7,598.7\text{km}^2$ 로 5대강 유역 중 가장 작은 유역에 해당하며, 연평균 강수량은 $1,296.7\text{mm}$ 이며, 이 중 여름철 강수량은 820.8mm (63.3%)에 해당하는 것으로 분석되었다.

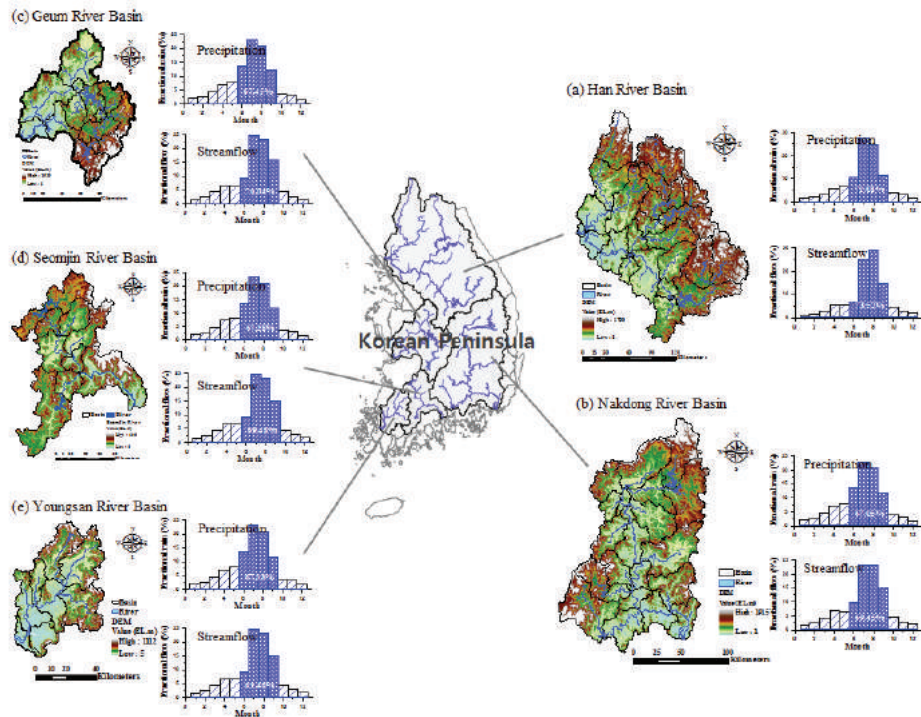


Figure 14. The location of study areas and monthly fractional rains and flows during JJAS(June to September) in the Korean Peninsula. (a) to (e) are the Han River Basin, the Nakdong River Basin, the Geum River Basin, the Seomjin River Basin, and the Youngsan River Basin, and for the sub-watersheds, respectively.

3.2 대상 자료

3.2.1 해수면 온도 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 태평양, 인도양의 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 엘니뇨 현상과 비교적 강한 상관성을 보이는 곳으로 알려진 바 있다(Trenberth, 1997). 유역단위 수문변량의 다양성과 대규모 대기순환 패턴과의 관계규명을 위하여 Hadley Centre's의 해수면 온도 관측자료를 이용하였으며, HadISST 자료는 1°×1°의 공간해상도를 갖고 매월 갱신이 되고 있으며 다음의 홈페이지(URL, <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices>)에서 다운로드가 가능하다.

DMI(Dipole Mode Index)는 열대 서인도양(the western equatorial Indian Ocean) 지역에 해당하는 (50°E-70°E and 10°S-10°N)지역과 열대 동인도양 남쪽(the south eastern equatorial Indian Ocean)지역에 해당하는 (90°E-110°E and 10°S-0°N)의 해수면온도 관측자료의 차로 구할 수 있으며, 일본의 JAMSTEC(Japan Agency for Marine-earth Science and TECnology)에서 제공하는 자료를 사용하였다. JAMSTEC에서는 전 세계 각 기관으로부터 생산된 인도양지역의 해수면온도 관측 자료로 부터 10개의 SST DMI dataset과 OLR DMI와 SLP DMI 등도 함께 을 제공하고 있으며, 본 연구에서는 HadISST자료로부터 산정한 1958년부터 2010년까지 월별 SST DMI자료를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 SST DMI 자료는 다음의 홈페이지(URL: <http://www.jamstec.go.jp/frcgc/research/d1/iod/HTML/Dipole%20Mode%20Index.html>)에서 다운로드가 가능하다. 다음 Table 1은 본 연구에서 사용한 대표적인 해양관련 기후지수인 ENSO와 IOD의 SST 관측지점과 정의를 나타내었다.

Table 1. Definitions of different Regions/SSTA(Sea Surface Temperature Anomaly) data

Index Name	Definition
Niño 3 and Niño 4 Indices	Among the data collection sites, observation data from Niño3 (5°N-5°S, 150°W-90°W) and Niño4(5°N-5°S,160°E-150°W) sites are known to have strong correlation with El Niño(<i>Trenberth, 1997</i>). The area-averaged sea surface temperature anomaly over this region is a well-known ENSO index.
Indian Ocean Dipole Mode Index	The Indian Ocean Dipole Mode Index(IODMI) is defined as the SSTA difference between the western(50°E-70°E, 10°S-10°N) and southeastern(90°E-110°E, 10°S-equator) regions of the tropical Indian Ocean [<i>Saji et al., 1999</i>]

3.2.2 한반도 수문자료

본 연구에서 사용된 유역평균 강수량 자료와 유출량 자료는 1966-2011년의 48개년 자료를 국가 수자원관리 종합정보시스템(WAMIS, <http://wamis.go.kr/>)에서 다운로드하여 사용하였다. 또한 유역 평균 강수량 자료는 한강유역 총 125개 관측지점을 대상으로 Thiessen polygon방법에 의하여 산출된 값이다. 유출량자료의 경우 Precipitation Runoff Modelling System(PRMS)에 의하여 계산된 값이며, 이는 인위적인 댐운영 등에 의한 영향이 제거된 자연 유량이다. 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 중장기 수자원 계획을 세우는데 효과적으로 사용될 수 있다.

3.3 연구 방법

3.3.1 서로 다른 ENSO 패턴 분류

서로 다른 형태의 엘니뇨의 구분 정의와 물리적 메카니즘 규명을 위한 연구는 태평양 연안 지역 과학자들에 의하여 현재에도 활발히 진행되고 있다. Kug *et al.*(2009)의 경우, Niño3와 Niño4 관측자료를 이용하여 정의한 해수면온도 지수를 바탕으로 중앙태평양(Central Pacific) 지역의 해수면 온도가 이상적으로 넓게 분포하는 엘니뇨 Modoki와의 상관성을 분석한바 있다. 또한 Ren and Jin(2011)은 서로 다른 형태의 엘니뇨를 Niño3와 Niño4 지역 관측자료를 이용하여 CT 엘니뇨와 WP 엘니뇨로 구분하였다. 본 연구에서는 한반도의 5대강 유역별 113개 중권역을 대상으로 서로 다른 형태의 ENSO가 여름철 강수량과 유출량 변화특성에 어떠한 영향을 미치는지 분석하기 위하여 Niño3와 Niño4 지역의 1950-2013년까지의 64년 동안의 월별 SST anomalies 자료를 바탕으로 CT 엘니뇨와 WP 엘니뇨를 구분하여 분석하였다. CT 엘니뇨와 WP 엘니뇨의 구분 방법은 다음 Eq.(2)와 같다.

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

여기서, N_3 와 N_4 는 각각 Niño3와 Niño4 지수를 의미하며, N_{CT} 는 Cold Tongue 엘니뇨를 N_{WP} 는 Warm Pool 엘니뇨를 의미한다. 또한 α 는 서로 다른 ENSO의 구분을 위한 보정상수이다. Figure 3a는 1950-2013년까지의 N_3 와 N_{CT} 의 시계열자료를 비교하여 나타낸 결과이며, N_3 와 N_{CT} 의 상관계수는 0.978로, 표준편차는 ± 0.871 로 나타났다. 또한 Figure 15b는 N_4 와 N_{WP} 의 지수 산정결과를 비교하여 나타내었으며, N_4 와 N_{WP} 의 경우 상관계수가 0.865로, 표준편차는 ± 0.397 로 나타났다.

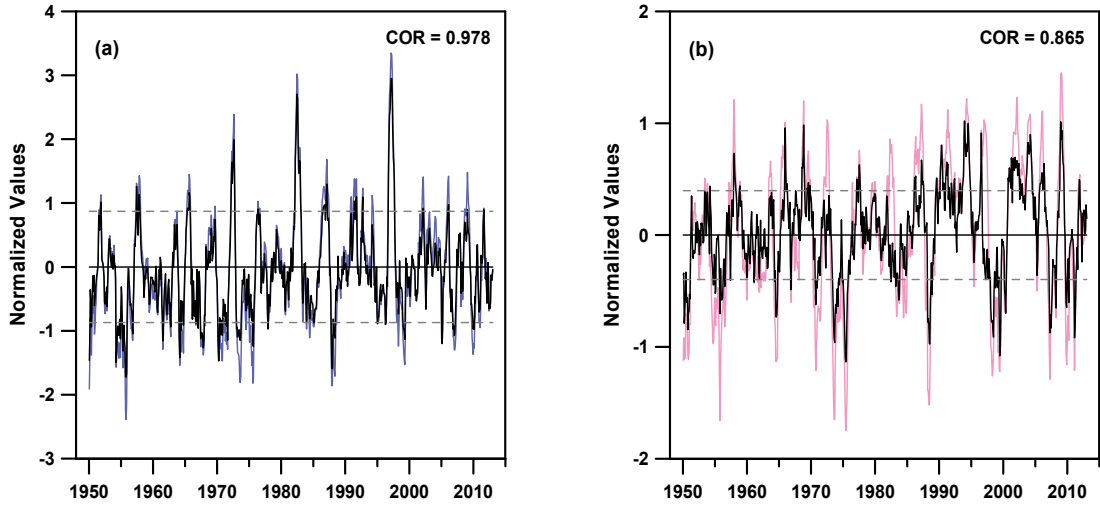


Figure 15. Normalized time series for (a) N_3 (blue) and N_{CT} (black) indices, and (b) those of N_4 (pink) and N_{WP} (black) indices. Dotted grey lines indicate one standard deviation for the N_{CT} and N_{WP} indices. The term COR denotes the correlations between the two curves in each panel.

본 연구에서는 Ren and Jin(2011)이 제안한 방법으로 새롭게 산출해 낸 N_{CT} 지수 (CT 엘니뇨)와 N_{WP} 지수(WP 엘니뇨)가 상호 범주변수 안에서 독립적인가를 분석하기 위하여 Scatter plot을 실시하여 상관계수와 R^2 를 평가하였다. Figure 16a에서 보는바와 같이 Niño3와 Niño4의 anomalies를 비교한 결과 0.770의 상관계수와 $R^2=0.593$ 로 분석되어 밀접한 상관관계가 있음을 확인하였으며, 반면에 Figure 16b에서 보는바와 같이 CT 엘니뇨와 WP 엘니뇨의 anomalies를 비교한 결과 0.185의 상관계수와 $R^2=0.034$ 로 분석되어 두 개의 지수가 서로 독립적임을 확인할 수 있다. 따라서 서로 다른 수문기상 자료의 독립성 범주변수 내에서 수문자료의 특성을 평가하기 위한 자료의 선택은 상관계수가 작게 나타난 CT 엘니뇨와 WP 엘니뇨로 구분하여 가공한 N_{CT} 와 N_{WP} 지수를 활용하여도 무방함을 확인하였다.

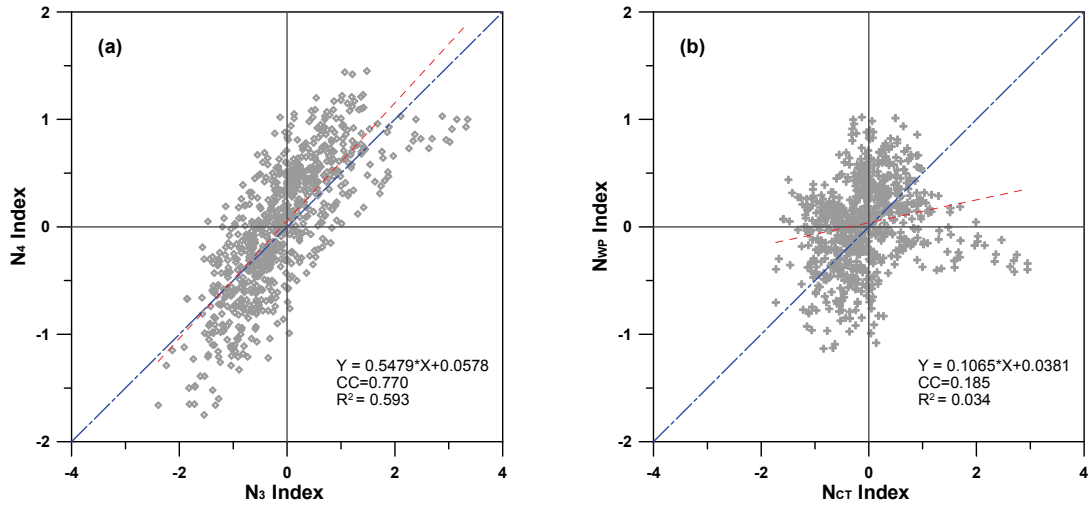


Figure 16. Scatter plots for (a) N_3 and N_4 indices, and (b) N_{CT} and N_{WP} indices. The term CC denotes the correlations between the two indices in each panel.

열대 태평양(Tropical Pacific)지역의 해수면온도 상승으로 인하여 발생하는 전형적인 엘니뇨해(CT 엘니뇨)와 중앙태평양(Central Pacific)지역의 이상적인 해수면온도 상승(SST warm anomalies)이 발생하는 서로 다른 형태의 엘니뇨해(WP 엘니뇨)의 구분을 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 방법을 사용하였다. 전형적인 엘니뇨 사상의 구분은 N_{CT} 지수에 대하여 표준화된 3개월 이동평균(moving window)값을 산정하고 상위분위(upper quartile) 0.45 이상을 기준으로 하여, 엘니뇨가 발달하기 시작하는 해(developing year)의 7월에서 그 다음해 즉, 쇠퇴하기 시작하는 해(decaying year)의 2월까지 8개월 동안 anomaly가 0.87 이상 지속되는 기간을 기준으로 선정하였다. 위의 기준에 따라 선택된 6개의 전형적인 엘니뇨 사상은 1965/1966, 1972/1973, 1982/1983, 1987/1988, 1991/1992, 1997/1998이다. 또한, 중앙태평양 지역의 이상적인 해수면온도 상승에 의해 발생하는 WP 엘니뇨 사상의 구분은 N_{WP} 지수에 대하여 표준화된 3개월 이동평균값을 산정하고 상위분위 0.40이상인 값을 기준으로 하여, 엘니뇨가 발달하기 시작하는 해의 9월에서 그 다음해 즉, 쇠퇴하기 시작하는 해의 2월까지 6개월 동안 anomaly가 0.40이상 지속되는 기간을 기준으로 선정하였다. 위의 기준에 따라 선택된 6개의 WP 엘니뇨 사상은 1968/1969, 1990/1991, 1994/1995, 2002/2003, 2004/2005, 2009/2010이다.

다음으로, 라니냐해의 구분은 미국의 NOAA CPC(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>)에서 제공하는 분류 기준을 적용하였으며, 강한 라니냐 사상으로 선택된 해는 1973/1974, 1975/1976, 1988/1989, 1999/2000, 2010/2011이다. 특이사항으로는 SST관측 자료를 바탕으로 ENSO발생 형태에 따른 엘니뇨사상의 구분결과, 열대 태평양지역의 중앙태평양의 해수면온도가 넓게 분포하는 WP 엘니뇨형태의 사상이 전형적인 CT 엘니뇨사상에 비하여, 그 발생 횟수가 최근에 올수록 빈번해 지고 있음을 확인하였다. 열대 태평양 지역의 SST 조건에 따라 강한 CT 엘니뇨 해와 WP 엘니뇨 해, 라니냐 해를 구분하여 정리하면 다음 Table 2와 같다. 본 연구에서는 ENSO/La Niña decaying해를 기준으로 한반도와 5대강 유역의 수문변동성 분석을 실시하였다.

Table 2. Classification of strong ENSO(CT/WP El Niño) and La Niña years

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

3.3.2 태평양 지역 SSTA 분석 결과

Figure 17은 엘니뇨가 시작되는 해의 12월(DEC)에서 그 다음해 2월(FEB)까지의 3개월 동안 열대태평양(tropical pacific) 지역에서의 해수면온도(sea surface temperature, SST) 관측 자료에 대한 1981-2010년 climatology의 합성편차(composit anomaly, CA)를 분석한 결과를 나타내고 있다. 해수면온도의 합성편차 분석은 NCEP/NCAR Reanalysis(URL: <http://www.esrl.noaa.gov>) 자료를 사용하였다. 전형적인 엘니뇨 해(CT 엘니뇨)의 경우 평년에 비하여 비정상적으로 높은 해수면 온도가 남아메리카 페루연안의 동태평양에서 부터 시작하여 중앙태평양까지 길게 늘어서 분포하고 있음을 확인할 수 있으며, 같은 해에 평년보다 낮은 해수면 온도는 북태평양지역과 서태평양지역, 그리고 남태평양 지역 전체에 걸쳐 발생하고 있음을 확인할 수 있다(Figure 17a). 또한, WP 엘니뇨 해의 경우 평년에 비하여 비정상적으로 높은 해수면 온도가 중앙태평양(central pacific)지역에서 넓게

분포하고 있으며, 같은 해에 동태평양과 서태평양 지역에서 평년보다 낮은 해수면 온도가 분포하고 있으나 전형적인 엘니뇨 해에 비하여 편차가 작음을 확인할 수 있다(Figure 17b). 반면에, 라니냐 해의 경우 남아메리카 페루연안의 동태평양에서 부터 시작한 SST cold anomaly가 중앙태평양까지 길게 늘어서 분포하고 있음을 확인할 수 있으며, 같은 해에 평년보다 높은 해수면 온도는 북태평양지역 일부와 남태평양 지역 전체에 걸쳐 발생하고 있음을 확인할 수 있다(Figure 17c). 서로 다른 형태의 엘니뇨 해의 SSTA(sea surface temperature anomaly)의 변화 패턴과 역학적 메커니즘에 대한 자세한 설명은 Kug et al.,(2009), Feng et al.,(2010)과 Ren and Jin(2011)의 연구를 참고하기 바라며, 본 연구에서는 엘니뇨와 라니냐의 물리적 현상 진단을 다루기보다 대규모 해양 패턴 변화에 따른 한반도와 5대강유역의 중권역별 수문인자(강수량, 유출량)의 원격상관(tele-connection) 및 지역적 수문변동특성 분석으로 연구의 범위를 한정하고자 한다.

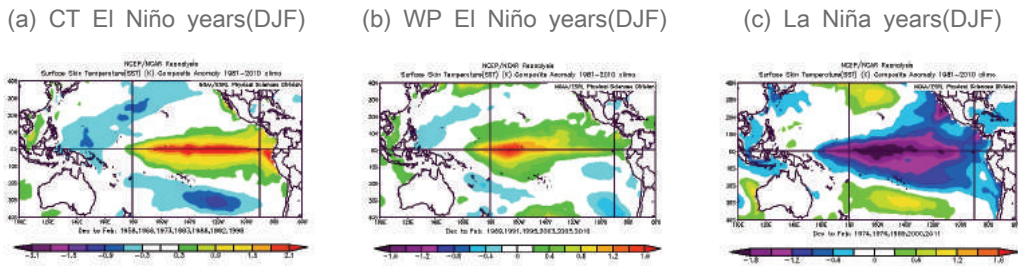


Figure 17. Composite sea surface temperature anomalies (SSTA) in the developing phases of two types of El Niño during December-January. (a) to (c) indicate SSTA during CT/WP El Niño and La Niña years, respectively.

3.3.3 IOD 사상 분류

IOD현상은 열대 서인도양(50° E-70° E, 10° S-10° N)과 남동인도양(90° E-110° E, 10° S-0° N) 사이의 SST 편차로 정의된다. Saji *et al.*(1999)이 정의한 양의 IOD 해(1961, 1967, 1972, 1982, 1994, 1997)를 제시하였으나, 1972, 1982, 1994, 1997년 등 IOD와 ENSO가 중복되는 해가 포함되어 IOD는 ENSO에 동반되는 현상으로 지

적하는 연구결과도 있다(Allan *et al.*, 2001). 또한 IOD는 ENSO와 지연상관으로 엘니뇨현상이 최고로 발달한 뒤 3-6개월 뒤에 인도양의 수온상승이 나타난다는 연구결과도 있다(Klein *et al.*, 1999; Lau and Nath, 2000). 그러나 많은 연구(Saji *et al.*, 1999; Webster *et al.* 1999; Behera *et al.*, 1999; Yamagata *et al.*, 2002; and Saji and Yamagata 2003)에 의하면, Niño 3 지역의 SST 편차와 IOD지수 사이의 상관분석 등을 통하여 IOD는 ENSO와는 독립적으로 발생하는 현상이며 인도양 내에 존재하는 내부 모드(internal mode)임을 증명하였다(차은정 2007). 다음 Figure 18은 Saji *et al.*, 1999이 제안한 방법(SST자료: 1958년 3월~1999년 8월)과 HadISST 자료(1958년 1월~2010년 7월)를 바탕으로 DMI(Dipole Mode Index)를 산정한 결과이다.

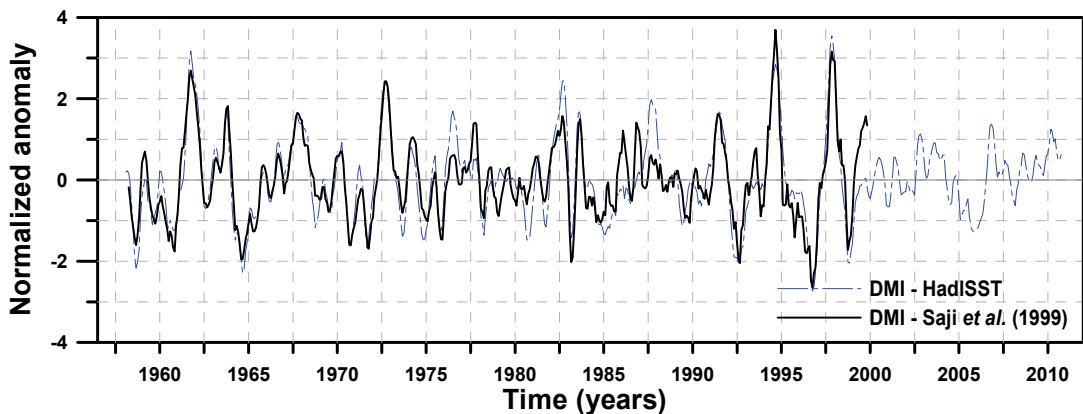


Figure 18. Normalized anomaly time series for the dipole mode index(DIM). Dotted blue line indicate by HadISST and solid black line indicate by Saji *et al.*(1999).

Figure 19는 Saji and Yamagata(2003)가 제안한 양(+)의 IOD 해와 음(-)의 IOD 해의 구분 방법이다. 양(+)의 IOD 해와 음(-)의 IOD 해의 구분 절차는 다음과 같다.

- ① *Preprocessing of data:* Western Indian Ocean(WIN, 10° S-10° N, 60° -80° E)과 Eastern Indian Ocean(EIN, 10° S-0°, 90° -110° E)의 SST자료와 Zonal wind anomaly over the equator(U_{eq} , area-averaged wind anomaly over

5° S–5° N, 70° –90° E) 자료를 수집하고, 원자료에 3개월 이동평균(3-month moving average)을 취하여 자료의 분산과 계절 내 변동특성을 줄여주며, 7년 이상의 장주기 성분은 제외한다.

② *Identifying criteria*: 다음으로 DMI와 U_{eq} 의 진동이 적어도 3개월 동안 0.5σ 를 초과 하는 경우를 선택하면 된다. 추가적으로 WIN과 EIN에서의 SSTA는 반대의 결과가 나타나야 하며, 이는 적어도 3개월 동안 0.5σ 를 초과하는 조건을 만족해야 한다(Saji and Yamagata, 2003).

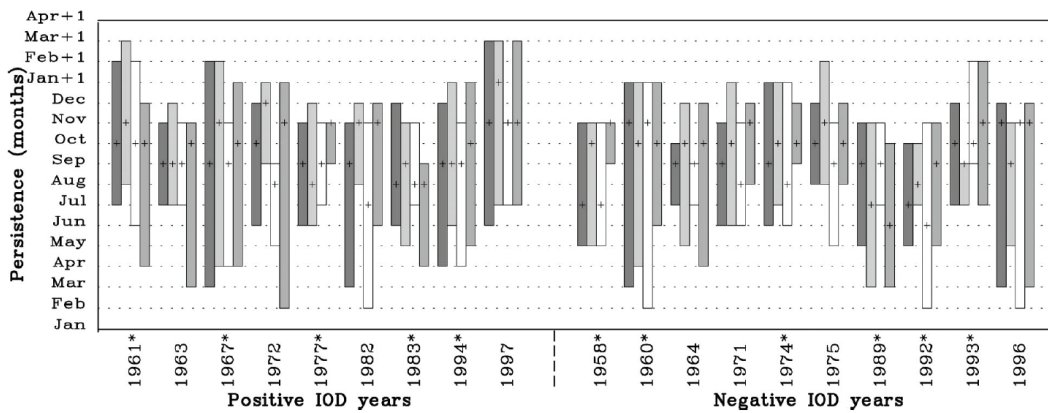


Figure 19. The bars indicate the beginning, end, and duration of DMI(intermediate shade), WIN (outlined bar), EIN(lightest shade), and U_{eq} (darkest shade) during each positive and negative IOD years. - by Saji and Yamagata(2003)

Table 3은 Saji and Yamagata(2003)가 분류하였던 기준을 적용하여 1956–2011년까지의 HadISST자료를 바탕으로 11개의 강한 양(+)의 IOD해(1961, 1963, 1967, 1972, 1977, 1982, 1983, 1994, 1997, 2006, 2007)와 10개의 강한 음(-)의 IOD해(1958, 1960, 1964, 1971, 1974, 1975, 1989, 1992, 1993, 1996)를 구분하여 나타낸 결과이다. 본 연구에서는 양(+)과 음(-)의 IOD가 발달하여 소멸하는 시기에 해당하는 4월부터 11월까지의 기간을 중심으로 한반도와 5대강 유역의 수문변동성 분석을 실시하였다.

Table 3. Classification of strong Positive IOD and Negative IOD years

IOD Types	The Strong years during 1956-2011
Positive IOD	1961, 1963, 1967, 1972, 1977, 1982, 1983, 1994, 1997, 2006, 2007
Negative IOD	1958, 1960, 1964, 1971, 1974, 1975, 1989, 1992, 1993, 1996

3.3.4 인도양 지역 SSTA 분석 결과

Figure 20는 양(+의 IOD events와 음(-)의 IOD events가 강하게 나타나는 해의 9월(SEP)에서 11월(NOV)까지의 3개월 동안 열대인도양(Tropical Indian Ocean) 지역에서 관측된 해수면온도(sea surface temperature, SST)에 대한 1981-2010년 기후값(climatology)의 합성편차(composite anomaly, CA)를 분석한 결과이다. 해수면온도의 합성편차 분석은 NCEP/NCAR Reanalysis(URL: <http://www.esrl.noaa.gov>) 자료를 사용하였다. 양(+의 IOD 해의 경우, 평년에 비하여 비교적 높은 해수면 온도가 아프리카대륙 근해의 열대 인도양 서쪽과 남쪽으로 길게 늘어서 분포하고 있음을 확인할 수 있으며, 같은 해에 평년보다 비정상적으로 낮은 해수면 온도가 열대인도양 동남쪽으로 길게 늘어서 분포하고 있음을 확인할 수 있다(Figure 20a). 또한, 음(-)의 IOD 해의 경우, 양(+의 IOD 해와는 반대로, 평년에 비하여 높은 해수면 온도가 인도네시아 근처의 열대 인도양 동남부 지역에서 넓게 분포하고 있으며, 같은 해에 평년보다 비정상적으로 높은 해수면 온도가 열대인도양 중앙과 서쪽과 남북쪽으로 넓게 늘어서 분포하고 있음을 확인할 수 있다(Figure 20b). 그러나 아직, 인도양 다이폴 모드 발생과 소멸에 대한 물리적·역학적 메커니즘은 명확히 밝혀지지 않았으며, 진단연구 차원의 양(+의 IOD 해와 음(-)의 IOD 해의 SSTA(sea surface temperature anomaly)의 변화 패턴과 메커니즘에 대한 설명은 Saji *et al.*, 1999, Webster *et al.*, 1999, Behera *et al.*, 1999, Yamagata *et al.*, 2002, 과 Saji *et al.*, 2003 등의 연구를 참고하기 바란다. 본 연구에서는 IOD의 물리적 현상 규명을 다루기보다 서로 다른 IOD 패턴 변화에 따른 한반도와 5대강유역의 증권역별 수문인자(강수량, 유출량)의 원격상관분석 및 지역적 수문 변동특성 분석으로 연구의 범위를 한정하고자 한다.

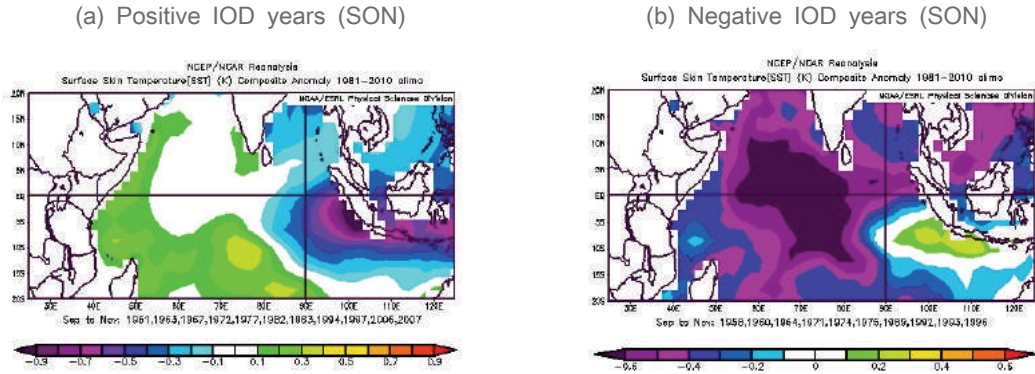


Figure 20. Composite sea surface temperature anomalies(SSTA) in the developing phases of two types of IOD during September-November. (a) shows SSTA in positive IOD years. (b) shows SSTA in negative IOD years.

3.4 대규모 기후환경 분석결과

3.4.1 ENSO 패턴 변화에 따른 GPCP 강수량 분석 결과

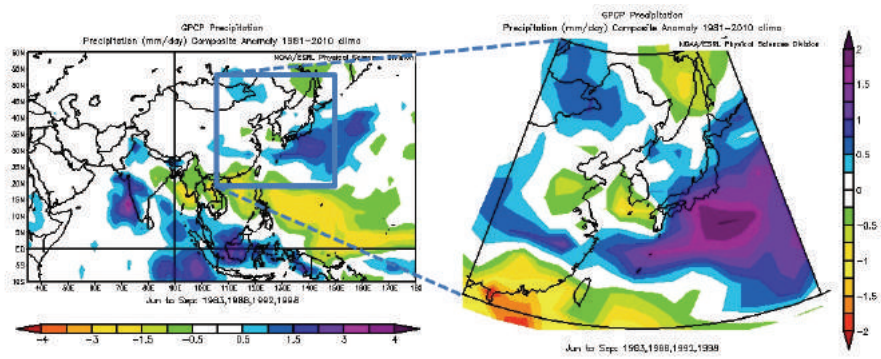
Figure 21은 한반도를 포함하는 아시아와 동북아시아 영역에 대하여 CT/WP 엘니뇨 decaying해와 라니냐해로 구분하여 여름철(June to September, JJAS) Global 강수량 변화 패턴을 Composite Analysis(CA)를 통하여 분석한 결과이다(Data: NOAA GPCP, <http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/composites/printpage.pl>). GPCP 자료가 1979년부터 현재까지의 값이 존재하므로 CT 엘니뇨 decaying해는 1983, 1988, 1992, 1998년의 4개 값만을 적용하여 분석하였으며, WP 엘니뇨 decaying해는 1991, 1995, 2003, 2005, 2010년의 5개 값만을 적용하여 분석하였다. 또한 라니냐 decaying해는 1989, 2000, 2011년의 3개 값만을 적용하여 분석하였다. 따라서 전체기간의 특성을 반영한 결과라기보다 최근 자료의 특성을 반영한 결과로 해석이 될 것이다.

기후값(climatology, 1981-2010년)에 대한 GPCP 강수량의 증감 패턴을 분석한 결과, Figure 21(a)에서 보는바와 같이 CT 엘니뇨 decaying해의 경우 북서태평양(western north pacific, WNP) 지역의 강수량은 감소하며 한반도 남쪽해상의 강수량

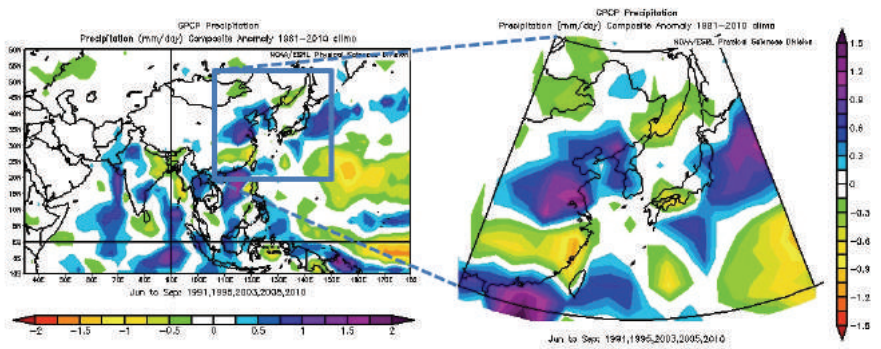
은 증가 패턴이 있음을 확인할 수 있다. 또한 한반도 지역에서의 강수량 편차는 여름철에 평년값을 유지하는 것으로 보이나 한반도의 남서부 일부 지역에서는 평년에 비하여 0~0.5mm/day 정도의 감소 패턴이 있는 것으로 나타나 6월~9월의 4개월 동안의 강수가 평년에 비하여 약 0~60mm정도 감소하는 것으로 분석되었다. 반면에, Figure 21(b)를 살펴보면, WP 엘니뇨 decaying해에는 북서태평양 지역의 강수량은 여름철에 평년값을 유지하는 것으로 보이나 약간의 감소패턴이 존재하는 것으로 나타나며, 중국 중서부 지역을 포함한 한반도 지역에서의 강수량 편차는 평년에 비하여 증가하는 것으로 나타났다. 한반도 대부분 지역에서는 여름철 강수량은 평년에 비하여 0.3~0.5mm/day 이상의 증가 패턴이 있는 것으로 나타나 6월~9월의 4개월 동안의 강수가 평년에 비하여 약 36~60mm정도 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, Figure 21(c)를 살펴보면, 라니냐 decaying해에는 북서태평양 지역의 강수량은 엘니뇨해와는 반대로 여름철에 평년에 비하여 증가하는 경향이 있는 것으로 나타나며, 한반도 지역에서의 강수량 편차는 한반도 중서부 지역에서 평년에 비하여 0~0.5mm/day 정도의 증가 경향이 있는 것으로 나타나 6월~9월 사이 4개월 동안의 강수가 평년에 비하여 약 0~60mm정도 증가하는 것으로 분석되었다.

종합해보면, GPCP 강수량 관측에 의한 CT/WP 엘니뇨 decaying해와 라니냐 decaying해의 강수량 합성편차 분석 결과, CT 엘니뇨가 발생할 것으로 예상되는 엘니뇨 decaying해의 한반도 여름철 강수량은 평년과 비슷하거나 평년에 비하여 약간의 감소가 예상되며, 특히 WP 엘니뇨가 발생할 것으로 예상되는 엘니뇨 decaying해에는 평년에 비하여 한반도 여름철 강수량의 증가 패턴이 나타날 가능성이 클 것으로 분석된다. 또한 라니냐 decaying해의 한반도 여름철 강수량은 평년과 비슷하거나 다소 증가하는 경향이 있을 것으로 분석된다.

(a) CT El Niño years(JJAS)



(b) WP El Niño years(JJAS)



(c) La Niña years(JJAS)

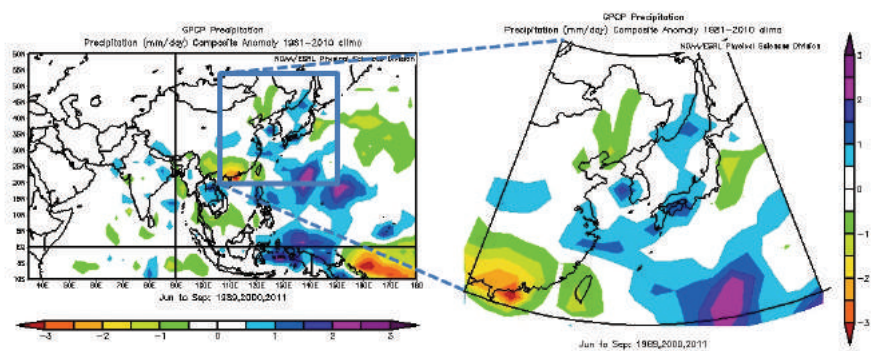


Figure 21. Composite anomalies(1981-2010 climatology) of GPCP precipitation(JJAS: June to September) during CT/WP El Niño and La Niña years over the Asia and North East Asia domain.

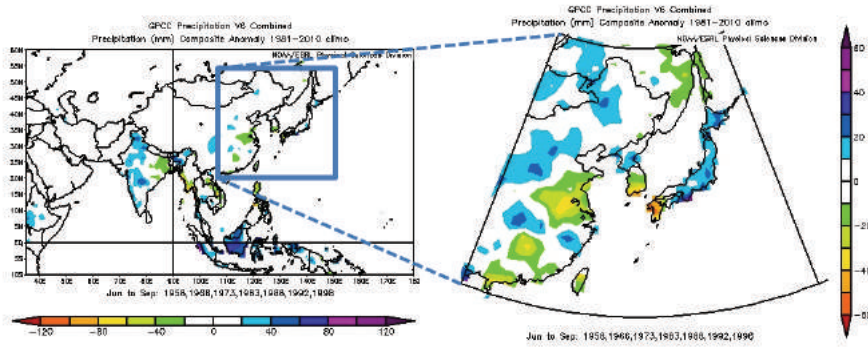
3.4.2 ENSO 패턴 변화에 따른 GPCC 강수량 분석 결과

Figure 22는 GPCC(Global Precipitation Climatology Center) Precipitation Full V6(전 세계 67,200개 관측지점의 Quality-Control된 월강수량) 자료 합성(composite analysis, CA)을 통하여, 한반도를 포함하는 아시아와 동북아시아 영역에 대하여 CT/WP 엘니뇨 decaying해와 라니냐해로 구분하여 여름철(June to September, JJAS) Global 강수량 변화 패턴을 분석한 결과이다(Data: NOAA GPCC, <http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/composites/printpage.pl>).

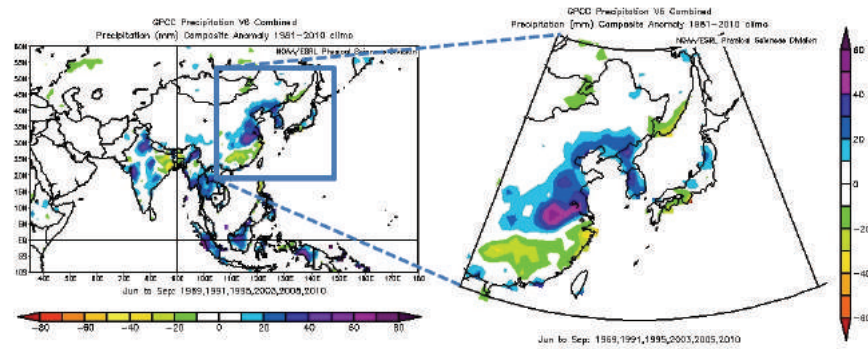
기후값(climatology, 1981-2010년)에 대한 GPCC 강수량의 증감 패턴을 분석한 결과, Figure 22(a)에서 보는바와 같이, CT 엘니뇨 decaying해에는 6월~9월 여름철 4개월 동안에 한반도 북한 지역은 평년에 비하여 다소 증가하는 경향이 있는 것으로 나타나, 남한지역은 평년에 비하여 4개월 평균 10~50mm정도 감소하는 경향이 있는 것으로 분석되었다. 반면에, Figure 22(b)를 살펴보면, WP 엘니뇨 decaying해에는 한반도 전체와 중국 산둥반도 중서부 지역에 강수량이 증가하는 anomaly패턴이 뚜렷하게 나타나며, 6월~9월 4개월 평균 약20~50mm의 강수량 증가가 있는 것으로 분석되었다. 또한, Figure 22(c)를 살펴보면, 라니냐 decaying해에는 한반도 북한 지역은 다소 감소하는 패턴이 보이고, 남한 지역의 강수량 anomaly는 다소 증가하는 경향이 보이기는 하나 대부분 지역에서 평년과 비슷한 anomaly패턴을 보이는 것으로 분석된다. 하지만 한반도 남서부 일부지역에서 평년에 비하여 0~10mm 정도의 증가 경향이 있는 것으로 분석된다.

따라서, GPCC 강수량 관측에 의한 CT/WP 엘니뇨 decaying해와 라니냐 decaying해의 강수량 합성편차 분석 결과, CT 엘니뇨가 발생할 것으로 예상되는 엘니뇨 decaying해의 한반도 여름철 강수량은 평년에 비하여 다소 감소가 예상되며, 특히 WP 엘니뇨가 발생할 것으로 예상되는 엘니뇨 decaying해에는 평년에 비하여 한반도 여름철 강수량의 증가 패턴이 나타날 가능성이 클 것으로 분석된다. 또한 라니냐 decaying해의 한반도 여름철 강수량은 평년과 비슷하거나 다소 증가하는 경향이 있을 것으로 분석된다.

(a) CT El Niño years(JJAS)



(b) WP El Niño years(JJAS)



(c) La Niña years(JJAS)

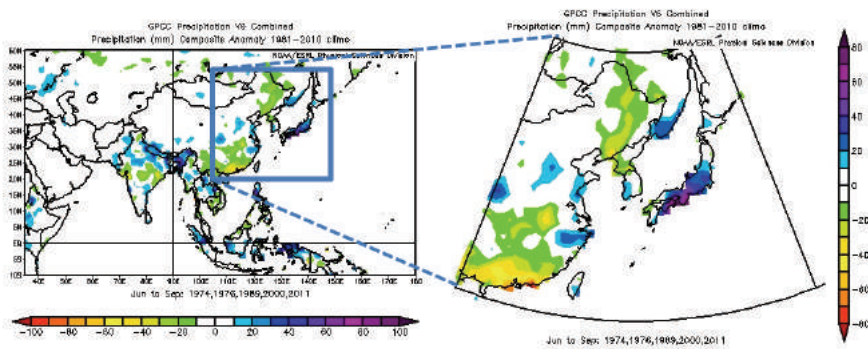


Figure 22. Composite anomalies(1981-2010 climatology) of GPCP precipitation and V6 combined precipitation(JJAS: June to September) during CT/WP El Niño and La Niña years over the Asia and North East Asia domain.

3.4.3 양(+)/음(-)의 IOD해의 GPCP 강수량 패턴 분석 결과

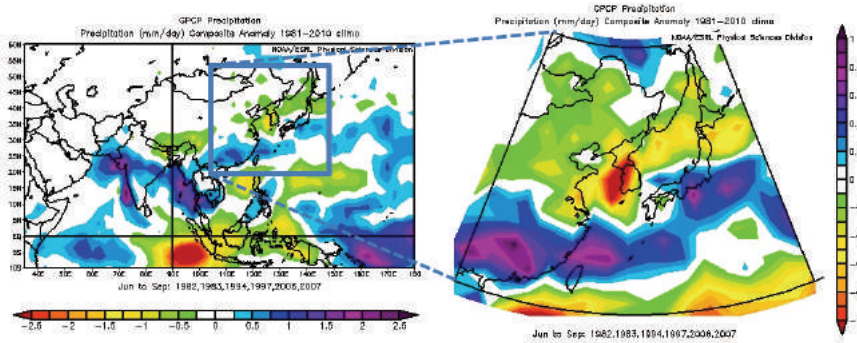
Figure 23은 한반도를 포함하는 아시아와 동북아시아 영역에 대하여 양(+의 IOD 해와 음(-)의 IOD해로 구분하여 여름철(June to September, JJAS) Global 강수량 변화 패턴을 Composite Analysis(CA)를 통하여 분석한 결과이다(Data: NOAA GPCP, <http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/composites/printpage.pl>). GPCP 자료가 1979년부터 현재까지의 값이 존재하므로 양(+의 IOD해는 1982, 1983, 1994, 1997, 2006, 2007년의 6개 값을 적용하여 분석한 결과이며, 음(-)의 IOD해는 1989, 1992, 1993, 1996년의 4개 값을 적용하여 분석한 결과이다. 따라서 전체기간의 특성을 반영한 결과라기보다 최근 자료의 특성을 반영한 결과로 해석이 될 것이다.

기후값(climatology, 1981-2010년)에 대한 GPCP 강수량의 증감 패턴을 분석한 결과, Figure 23(a)의 양(+의 IOD해의 인도양 지역의 여름철 강수량패턴을 살펴보면, 동인도양(Eastern Indian Ocean) 지역 남쪽 해상에는 강한 강수량 감소 anomaly 패턴이 발생하는 것으로 분석되며, 말레이시아, 인도네시아, 그리고 필리핀해 지역의 강수량은 감소패턴이 있는 것으로 나타났다. 반면에, 인도차이나 반도 서쪽 해안 지역과 인도 북부 및 인도서부해안과 인도서북부 지역에서는 강한 강수량 증가 anomaly 패턴이 발생하는 것으로 분석되며, 아프리카 동부 서인도양(Western Indian Ocean) 지역에서도 강수량 증가 anomaly패턴이 발생하는 것으로 분석된다. 다음으로 양(+의 IOD해의 한반도가 위치한 동북아시아 지역의 여름철 기후패턴을 살펴보면, 중국의 남부 지역과 동중국해, 일본남부 지역의 강수량 증가 패턴이 나타나며, 한반도 지역의 경우 서해와 남부, 중부지역과 동북부 지역에 걸쳐 강수량 감소 anomaly 패턴 뚜렷하게 나타났다. 여름철 강수량은 평년에 비하여 0.4~1.0mm/day 이상의 감소 패턴이 있는 것으로 나타나 6월~9월의 4개월 동안의 강수가 평년에 비하여 약 40~120mm정도 증가하는 것으로 분석되었다. 다음으로, Figure 23(b)의 음(-)의 IOD해를 살펴보면, 여름철(JJAS) 인도양지역의 뚜렷한 강수량 증감 패턴은 나타나지 않는 것으로 분석되며, 동인도양지역 남쪽에 해당하는 인도네시아 서부해안 지역의 강한 강수량 증가 anomaly 패턴이 발생하는 것으로 나타났다. 또한 음(-)의 IOD해의 동북아시아와 한반도 지역 여름철 강수량 패턴변화를 살펴보면, 남중국해의 강수량은 감소하는 경향이 있는 것으로 나타나며,

한반도 남쪽 동중국해 부근에서는 강한 강수량 증가 anomaly 패턴이 발생하는 것으로 나타났다. 반면 한반도 남동부 지역에서는 강수량이 평년과 비슷한 수준을 유지하는 것으로 나타났으며, 한반도 중서부 지역에서는 평년에 비하여 0~0.5mm/day 정도 강수량 감소 경향이 있는 것으로 나타나 6월~9월 사이 4개월 동안의 강수가 평년에 비하여 약 0~60mm정도 증가하는 것으로 분석되었다.

종합해 보면, GPCP 강수량 관측에 의한 양(+)의 IOD해와 음(-)의 IOD해의 강수량 합성편차 분석 결과, 양(+)의 IOD가 발생할 것으로 예상되는 해의 한반도 여름철 강수량은 평년에 비하여 감소 경향이 클 것으로 예상되며, 음(-)의 IOD가 발생할 것으로 예상되는 해에는 한반도 여름철 강수량이 평년과 비슷하거나 다소 감소하는 패턴이 나타날 가능성이 있는 것으로 분석된다.

(a) Positive IOD years(JJAS)



(b) Negative IOD years(JJAS)

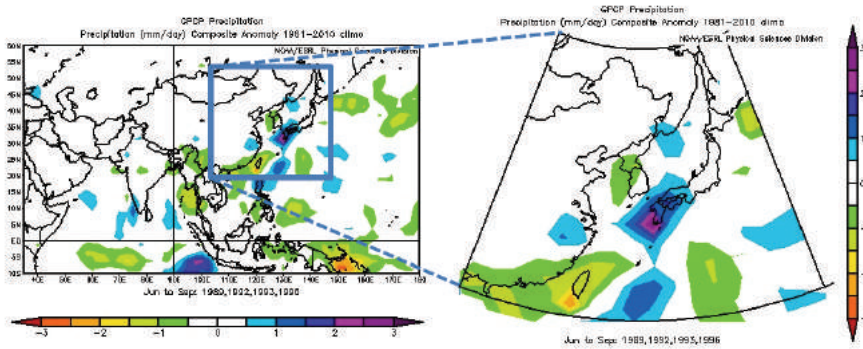


Figure 23. Composite anomalies(1981-2010 climatology) of GPCP precipitation(JJAS: June to September) during positive IOD and negative IOD years over the Asia and North East Asia domain.

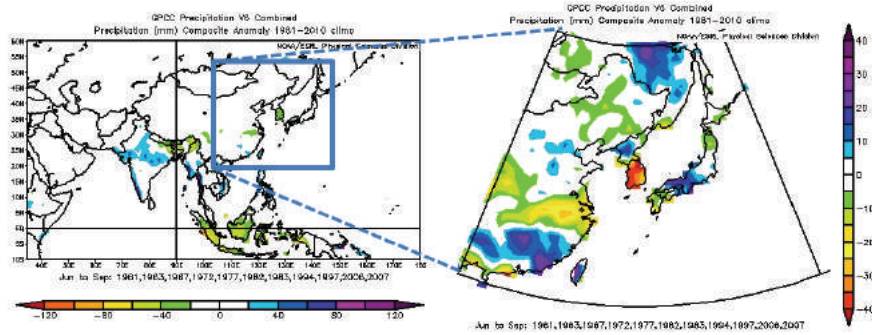
3.4.4 양(+)/음(-)의 IOD해의 GPCC 강수량 패턴 분석 결과

Figure 24는 GPCC(Global Precipitation Climatology Center)Precipitation Full V6(전 세계 67,200개 관측지점의 Quality-Control된 월강수량) 자료 합성(composit analysis, CA)을 통하여, 한반도를 포함하는 아시아와 동북아시아 영역에 대하여 양(+)의 IOD해와 음(-)의 IOD해로 구분하여 여름철(June to September, JJAS) Global 강수량 변화 패턴을 분석한 결과이다(Data: NOAA GPCC, <http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/composites/printpage.pl>).

기후값(climatology, 1981-2010년)에 대한 GPCC 강수량의 증감 패턴을 분석한 결과, Figure 24(a)에서 보는바와 같이, 양(+)¹⁾의 IOD해의 여름철(6월~9월) 4개월 동안에 한반도 북한 지역은 평년에 비하여 강수량의 증가패턴이 발생하나, 남한지역은 평년에 비하여 여름철 4개월 평균 25~45mm 이상의 뚜렷한 감소 경향이 있는 것으로 분석되었다. 반면, Figure 24(b)를 살펴보면, 음(-)²⁾의 IOD해의 여름철(6월~9월)에는 한반도 북한 일부 지역과 중국 산둥반도지역, 일본 중남부 지역에서는 강수량의 증가 anomaly패턴이 뚜렷하게 발생하였으며, 한반도 남한지역은 평년에 비하여 여름철 4개월 평균 15~30mm의 강수량 감소 anomaly패턴이 나타나는 것으로 분석되었다.

따라서, GPCC 강수량 관측에 의한 양(+)¹⁾의 IOD해와 음(-)²⁾의 IOD해의 강수량 합성편차 분석 결과, 양(+)¹⁾의 IOD가 발생할 것으로 예상되는 해의 한반도 여름철 강수량은 평년과 비슷하거나 다소 감소하는 경향이 있을 것으로 분석된다.

(a) Positive IOD years(JJAS)



(b) Negative IOD years(JJAS)

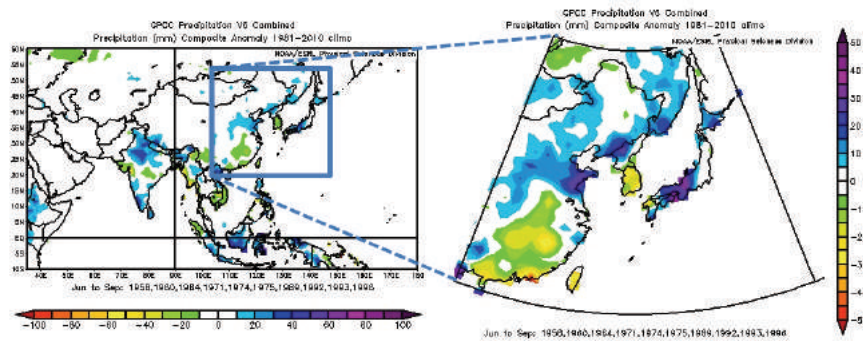


Figure 24. Composite anomalies(1981-2010 climatology) of GPCP precipitation and V6 combined precipitation(JJAS: June to September) during positive IOD and negative IOD years over the Asia and North East Asia domain.

3.4.5 IOD 진화 패턴 분석결과

열대 인도양 지역에서 발생하는 IOD는 열대 태평양 지역에서 발생하는 ENSO현상과 마찬가지로 전 지구적 기후시스템에 영향을 미치는 주요요인으로 작용한다(Saji *et al.*, 1999; Ashok *et al.*, 2003; Saji and Yamagata 2003). 양(+)¹⁾의 IOD가 발달하는 해의 동아프리카 지역에서는 고온다우 현상이 발생하여 집중호우 발생빈도가 높아지며, 인도양 반대편에 위치한 인도네시아 지역에서는 저온소우 현상이 발생하여 가뭄 발생 빈도가 높아지는 등 직접적인 기후패턴 변화의 영향을 받으며, 반면에 음(-)²⁾의 IOD해에

는 그 반대되는 현상이 발생할 가능성이 커진다(Saji *et al.*, 1999). 본 연구에서는 양(+)
 (+)의 IOD와 음(-)의 IOD가 발달하기 시작하는 4월부터 최고조에 이르는 9월, 그리
 고 소멸하기 시작하는 그해 12월까지 3개월의 Time Window를 가지고 1개월씩 지체를
 두어 이동하면서 인도양 지역의 SST와 Wind의 진화 패턴을 분석하였다(Figure 25).
 본 절에서는 IOD 현상의 대기 역학적 물리과정과 가능한 메카니즘 분석을 깊이 있게 다
 루기보다는, IOD의 발달과 소멸에 영향을 줄 수 있는 기본적인 두 가지 변수(SST,
 Wind)의 변화 양상을 파악하여, 지리적으로는 멀리 떨어져 있지만 한반도의 수문변동영
 향 분석에 적용하기 위한 기초자료로 활용하고자 한다. 양(+)
 (+)의 IOD와 음(-)의 IOD해의 IOD 진화 패턴에 따른 한반도 수문변동영향 분석에 대한 내용은 본 연구보고서의 후
 반부에 자세히 설명하였다.

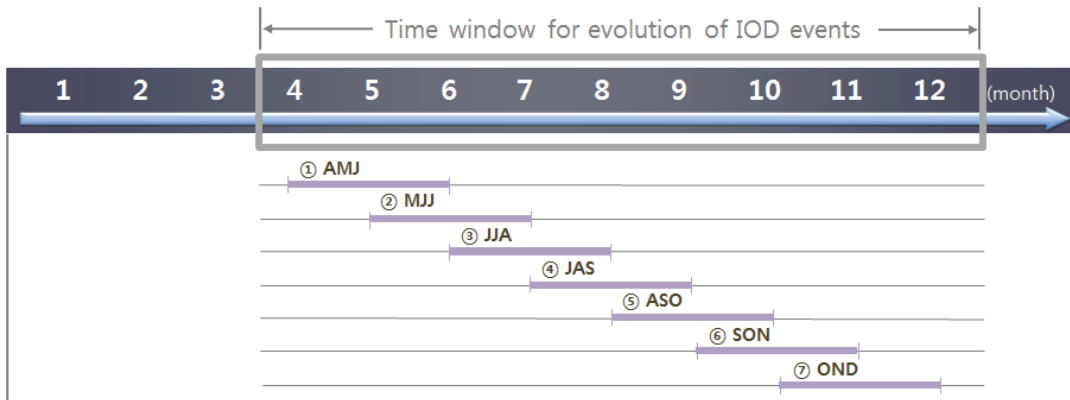


Figure 25. Three-month moving time window for evolution of IOD events.

3.4.5.1 양(+) (+)의 IOD해의 SST 진화 패턴 분석결과

Figure 26은 양(+)
 (+)의 IOD가 강하게 나타나는 11개해의 4월(APR)에서 그해 12월
 (DEC)까지의 3개월간 7번의 지체를 가지고 열대인도양지역에서 관측된 해수면온도(sea
 surface temperature, SST)에 대한 1981-2010년 기후값의 합성편차(composit anomaly,
 CA)를 분석한 결과이다. 해수면온도의 합성편차 분석은 NCEP/NCAR Reanalysis II(URL:
 http://www.esrl.noaa.gov) 자료를 사용하였다. 양(+)
 (+)의 IOD 해의 4월부터 그해 12월

까지 1개월씩 지체를 두며 인도양 해수면온도를 분석한 결과, 평년에 비하여 비교적 높은 해수면 온도 anomaly가 아프리카대륙 동쪽 근해에서 봄철(4-6월)부터 발달하기 시작하여 열대 서인도양 북쪽과 남쪽으로 길게 늘어서 분포해 가기 시작하는 것을 확인할 수 있으며, 가을철(9-11월)로 갈수록 SST warm anomaly가 최고조에 이르며 그해 12월에 이르기까지 점점 동진해 가는 것을 확인할 수 있다. 반면에 양(+의 IOD)해의 4월부터 최고조로 발달한 SST cold anomaly는 동인도양과 중앙지역에 넓게 분포하며, 그해 12월로 갈수록 점점 쇠퇴해 감을 확인할 수 있다.

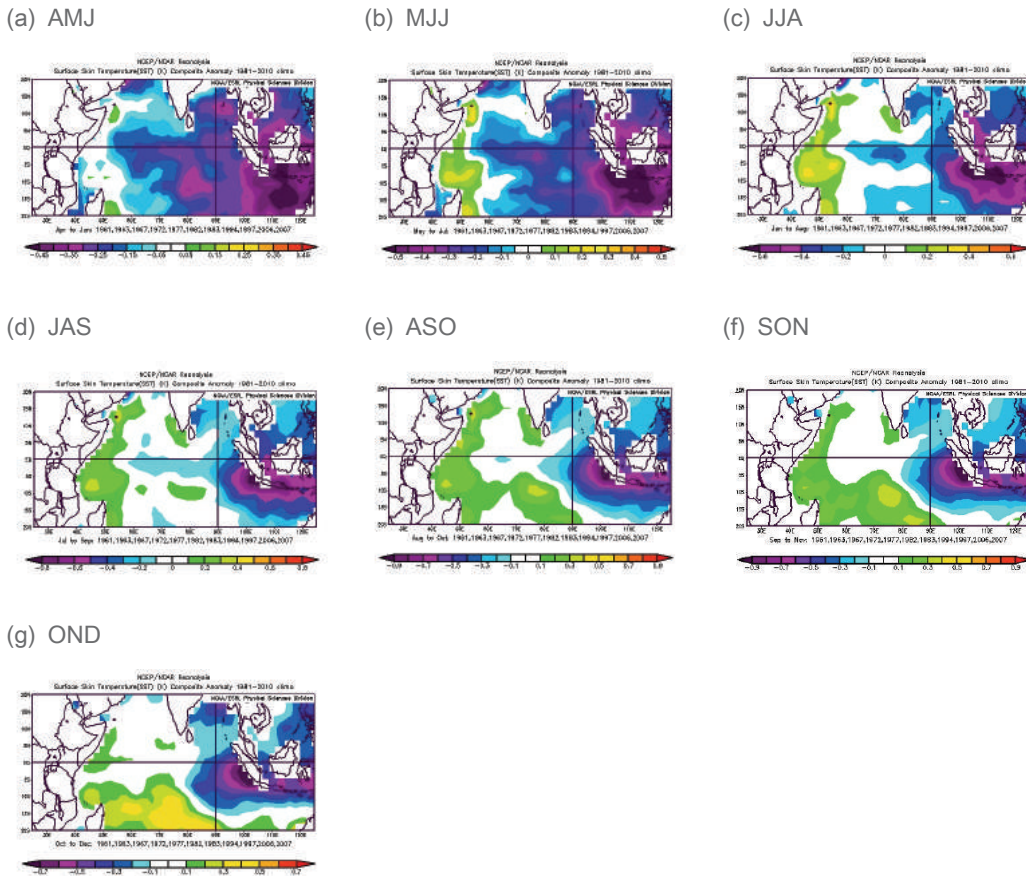


Figure 26. The evolution of three-month SST composite anomalies over the eleven positive IOD events.

Figure 27은 양(+의 IOD가 강하게 나타나는 해의 1000mb Vector Wind(m/s)에 대한 1981-2010년 기후값의 합성편차(composit anomaly, CA)를 분석한 결과이다. 1000mb Vector Wind의 합성편차 분석은 NCEP/NCAR Reanalysis(URL: <http://www.esrl.noaa.gov>) 자료를 사용하였다. 양(+의 IOD해의 봄철(4-6월)부터는 열대 동인도양 지역에서 평년에 비하여 동풍 anomaly가 강하게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 현상은 IOD가 발달하는 시기인 가을철(9-11월)로 갈수록 점점 강해지기 시작했다 그해 12월로 갈수록 점점 쇠퇴해 감을 확인할 수 있다. 이는 양(+의 IOD해 발생한 동풍 anomaly는 열대 인도양지역의 주풍인 동풍의 강도를 강화시키는 역할을 하며, 동인도양 지역의 해수면 표면 풍속증가로 인하여 용승(upwelling) 효과를 가져옴으로 동인도양 해수면온도의 cold anomaly를 강화 또는 유지시켜주는 현상이 발생함을 확인할 수 있다. 더불어 양(+의 IOD해의 동풍강도의 증가는 서인도양 지역의 따뜻한 해수면 온도와 만나 고온다습한 현상이 발생하게 되며, 서아프리카지역과 파키스탄 지역의 습한 기후조건을 유발시키는 원인이 될 수 있음을 확인하였다.

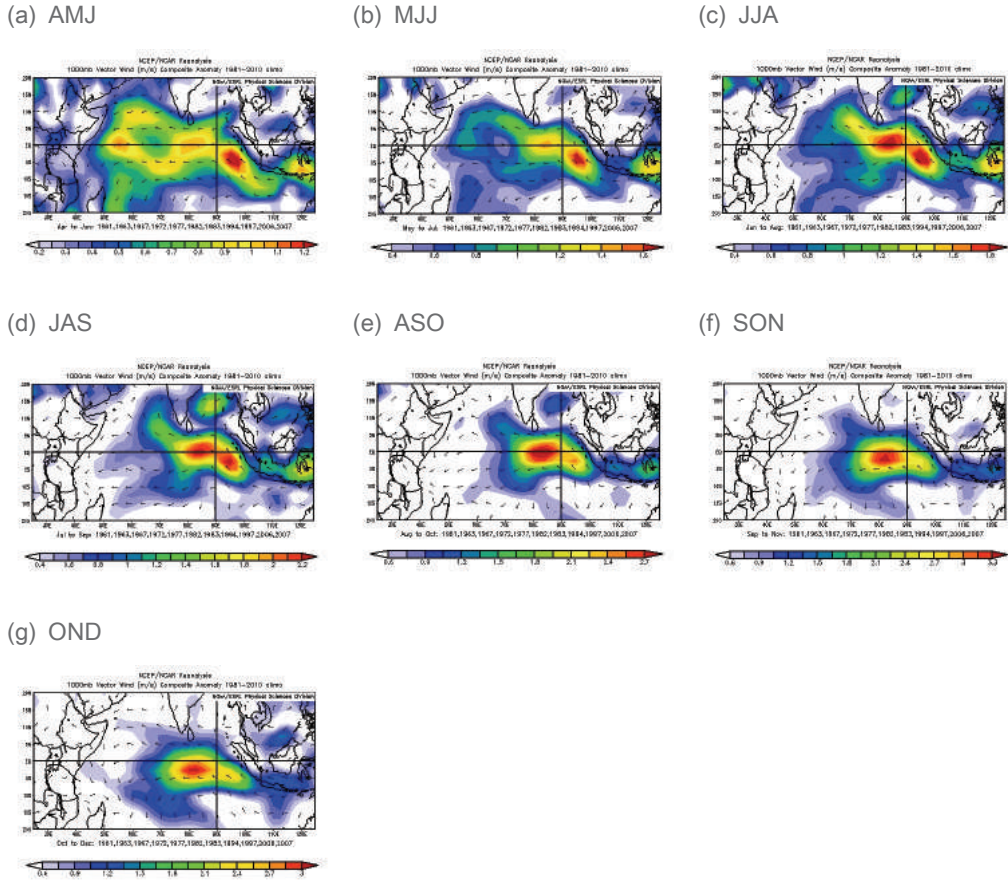


Figure 27. The evolution of three-month Wind composit anomalies over the eleven positive IOD events.

3.4.5.2 음(-)의 IOD해의 SST 진화 패턴 분석결과

Figure 28은 음(-)의 IOD가 강하게 나타나는 10개해의 4월(APR)에서 그해 12월(DEC)까지의 3개월간 7번의 지체를 가지고 열대인도양지역에서 관측된 해수면온도(sea surface temperature, SST)에 대한 1981-2010년 기후값의 합성편차(composit anomaly, CA)를 분석한 결과이다. 음(-)의 IOD 해의 경우, 양(+의 IOD 해와는 반대로, 평년에 비하여 낮은 해수면 온도가 아프리카대륙 동쪽 근해에서 봄철(4-6월)부터 발달하기 시작하여 열대 서인도양 북쪽과 남쪽으로 넓게 늘어서 분포하고 있으며 인도

네시아 동쪽에 해당하는 동인도양 부근에 약한 양의 IOD가 발달해 감음을 확인할 수 있다. 가을철(9-11월)로 갈수록 동인도양의 따뜻한 해수면온도 anomaly가 발달함을 확인할 수 있으며, 그해 12월로 갈수록 동인도양의 따뜻한 해수면온도 anomaly가 쇠퇴해 감을 확인할 수 있다.

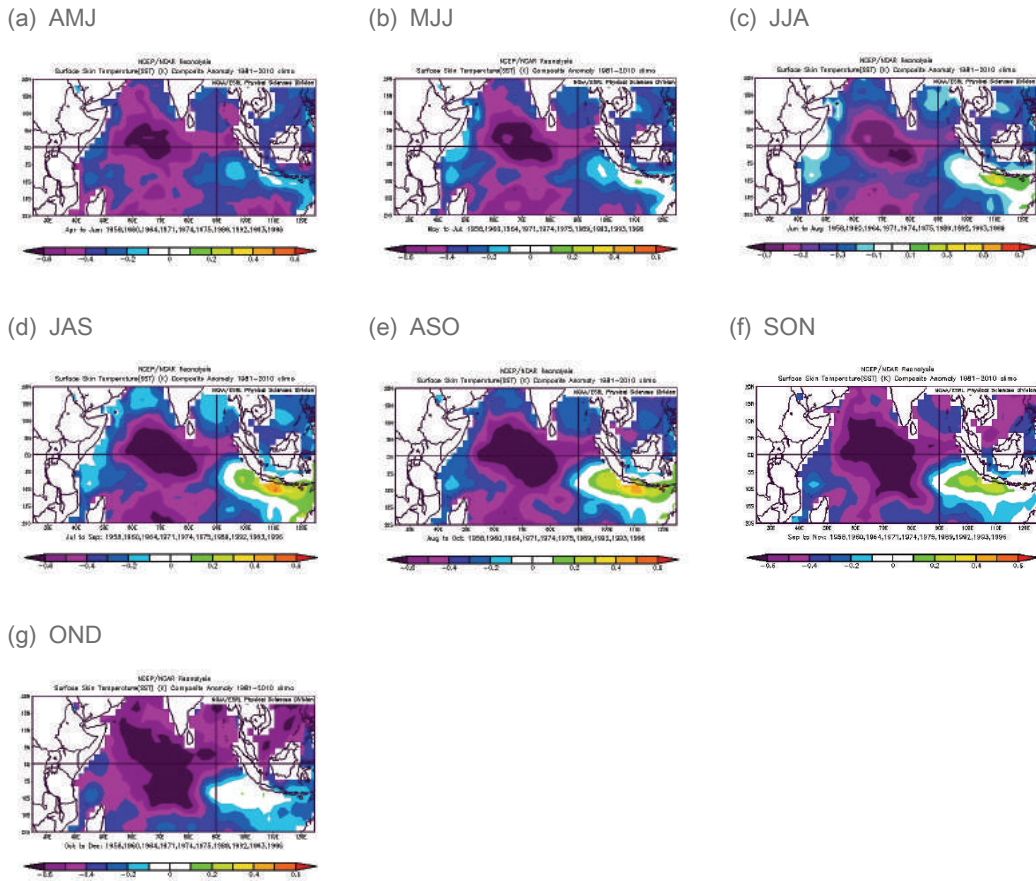


Figure 28. The evolution of three-month SST composite anomalies over the ten negative IOD events.

Figure 29는 음(-)의 IOD가 강하게 나타나는 해의 1000mb Vector Wind(m/s)에 대한 1981-2010년 기후값의 합성편차(composit anomaly, CA)를 분석한 결과이다. 음(-)의 IOD해의 봄철(4-6월)에는 열대 서인도양 지역에서 평년에 비하여 강한 서풍

anomaly가 존재하며, 시간이 지날수록 점점 동진해 가고 있음을 확인할 수 있다. 또한 음(-)의 IOD가 강해지는 시기인 가을철(9-11월)로 갈수록 서풍 anomaly 점점 강해지기 시작했다 그해 12월로 갈수록 점점 쇠퇴해 감을 확인할 수 있다. 이는 음(-)의 IOD해 발생한 서풍 anomaly는 열대 인도양지역의 주풍인 동풍의 강도를 약화시키는 역할을 하여, 서인도양 해수면온도의 cold anomaly를 강화 또는 유지시켜주는 현상이 발생함을 확인할 수 있다. 더불어 음(-)의 IOD해에는 열대 인도양 지역의 동풍의 강도를 감소시켜 동인도양 지역의 따뜻한 해수면 온도와 만나 인도네시아지역의 고온다습 현상이 발생하게 되며, 호주서부와 중부지역, 그리고 동중국해 지역에 습한 기후조건을 유발시키는 원인이 될 수 있음을 확인하였다.

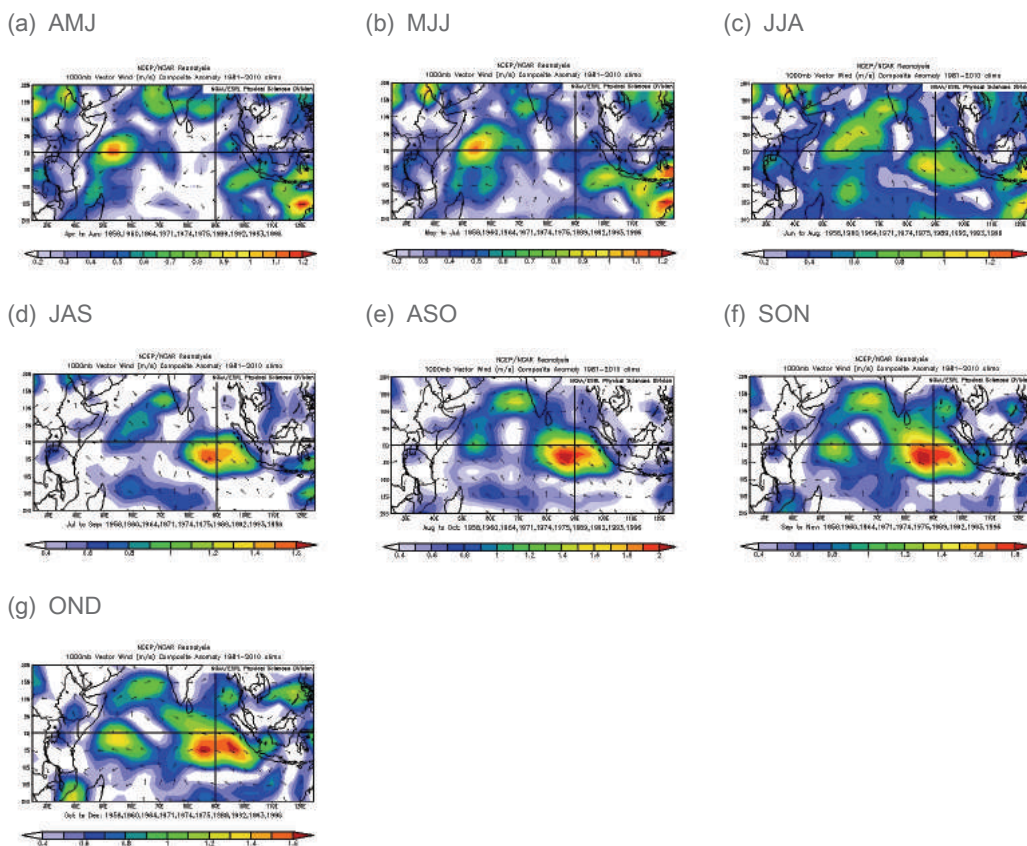


Figure 29. The evolution of three-month Wind composite anomalies over the ten negative IOD events.

4. 기후인자와 수문변량간의 원격상관 분석

4.1 원격상관 분석 방법

열대 태평양(Tropical Pacific Ocean) 지역과 열대 인도양(Tropical Indian Ocean) 지역의 해수면온도 변화에 따라 발생하는 ENSO현상과 IOD현상이 대규모 기후패턴 변화를 유발하고 이것이 동북아시아에 위치한 한반도의 수문환경에 어느 정도 영향을 미치는지를 파악하기 위해서는 기후지수와 수문변량간의 상관관계 분석이 필요하다. 또한 대규모 기후조건 변화의 발생으로 인한 기후패턴 변화가 전 지구적 수문환경에 영향을 미치기 위해서는 일정 시간의 지체가 필요할 것이다. 일반적으로 엘니뇨의 발생 시기에는 동태평양지역에서는 해수면온도의 상승이 발생하게 되며, 평년에 비하여 높아진 해수면온도의 영향이 열대 태평양 지역과 인도양 지역 대륙권내의 기온상승을 초래하며, 이러한 현상의 영향으로 인하여 아열대와 Jet stream을 변화시키고 고위도로의 원격상관 (teleconnection) 영향에 이르게 된다. 따라서 이러한 열대 태평양 지역에서 발생하는 엘니뇨, 라니냐, 그리고 최근에 발견한 새로운 형태의 WP 엘니뇨현상과 인도양 지역의 IOD 현상이 발생의 최대점 이후 수개월 이상의 지체시간(lag time)을 가지고 원격상관의 영향의 분석이 필요함을 예상할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 전통적인 엘니뇨인 CT 엘니뇨와 새로운 형태의 엘니뇨인 WP 엘니뇨, 그리고 양(+)과 음(-)의 IOD 현상이 한반도 수문변량과 어느 정도의 상관성을 가지면서, 지체시간별 한반도 수문 변동에 영향을 주는지 파악하기 위하여 시계열자료의 저빈도해석에 주로 사용되는 SSA (Singular Spectrum Analysis) 기법을 이용한 주성분분석(Principle Component Analysis)을 실시하였으며, Mutual Information(MI) 기법과 Kernel 함수를 이용한 결합확률 밀도함수의 추정으로 기후지수와 한반도 수문변량간의 지체시간별 선형 및 비선형 원격상관분석을 실시하였다.

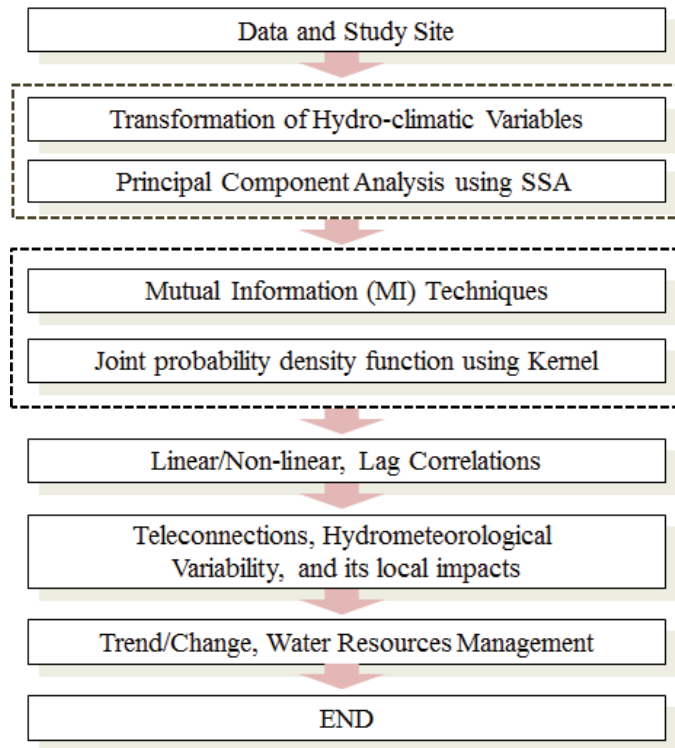


Figure 30. Flow chart of teleconnection based study

한반도 5대강(한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강)유역 113개 중권역에 해당하는 강수량자료와 유출량자료를 바탕으로 서로 다른 ENSO 패턴 변화와 IOD 영향을 분석하기 위하여 여름철(JJAS) 한반도 지역 수문 변량을 추출해내었다. 추출한 시계열자료의 주기성과 경향성 제거를 위하여 1차 정규화 과정으로 정규화(normalized)를 실시하였으며, 2차 정규화 과정으로 표준화된 수문변량 시계열자료(강수량, 유출량)와 기후인자(ENSO, IOD)의 스무딩(smoothing)을 취하기 위하여 5개월 이동평균(5-month moving average)을 하였다. 다음으로 Singular Spectrum Analysis(SSA)를 통한 시계열 자료의 주성분분석(Principle Component Analysis)을 실시하였으며, 경험적 직교함수(Empirical Orthogonal Function; EOF) 분석을 통한 RC(reconstructed component) 시계열 자료를 생성해 내었다. 또한 기후지수와 수문변량 RC간의 선형 및 비선형 상관관계 분석을 위하여 Mutual Information(MI) 기법을 적용하였으며, Kernel 함수를 이용한 결합확률

밀도함수(Joint Probability Density Function)를 추정하였다. Figure 31은 원자료 시계열로부터 SSA와 MI를 이용한 기후인자와 수문변량간의 원격상관분석 절차이다.

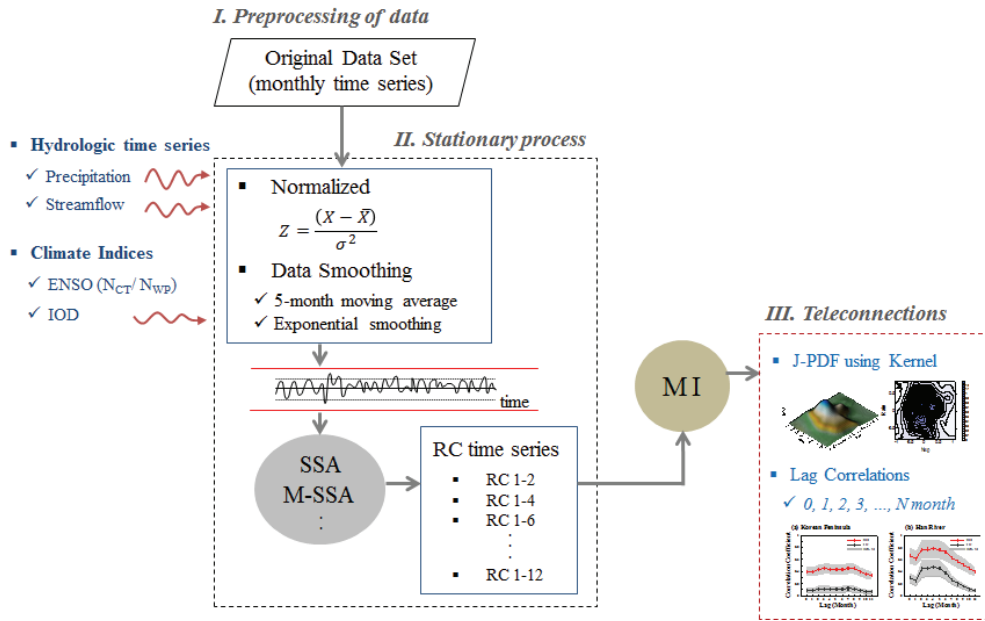


Figure 31. Conceptual frame work between climate indices and hydrologic variables using Singular Spectrum Analysis(SSA) and Mutual Information(MI)

4.2 SSA를 이용한 주성분 분석

4.2.1 SSA를 이용한 주성분분석 방법

단변량 스펙트럼 기법인 SSA(Singular Spectrum Analysis)는 주요성분분석(Principal Component Analysis: PCA)에서 파생된 기법으로 시계열의 좌표를 변화시켜 분산을 줄이는 방법이다. 이 방법은 시계열 자료 또는 공간적으로 떨어져 있는 지점간의 시간과 공간 영역에서 좌표를 변환시킴으로써 목적이 되는 변량들 사이의 공통된 주기성과 경향성을 추정하는 스펙트럼 분석 기법이다. 이때, 공간적 성분은 서로 연관된 다른 시계열이 되며, 부여된 차원(embedding dimension, M)에 의해 시간에 따른 공간적 변화

양상에 대한 정보를 제공해 준다. 따라서 SSA방법은 시간과 공간 영역에서 상호 시계열 간의, 또는 상호 지점간의 좌표를 변환시킨 주요성분분석(PCA)의 한 방법이며, 경험적 직교함수와 유사한 방법이다. 이런 스펙트럼분석에 대한 연구는 기후변동성과 수문학적 시스템에 잠재된 동역학적 관계를 이해하기 위해 여러 대기 순환지수를 이용한 저빈도 관계분석 등 다양한 분야에서 적용되어지고 있다.

SSA의 기본적인 개념은 원자료에서 비조화성분(Non-harmonics)을 제거함으로써 원자료에서 얻지 못하는 주기성과 경향성(trend)을 쉽게 파악할 수 있는 방법이다(Moon and Lall, 1996; 황성환, 2001). SSA는 경험적 직교함수(Empirical Orthogonal Function; EOF) 방법을 응용한 것으로, 시계열 자료 X_i ($1 < i < M$)에 대하여 자료의 경향과 주기를 쉽게 표현할 수 있게 축을 경험적 직교함수를 이용하여 구성한 후, 원자료를 직교함수 EOF 1과 EOF 2에 정투영(Orthogonal) 시키는 방법이다(Figure 32).

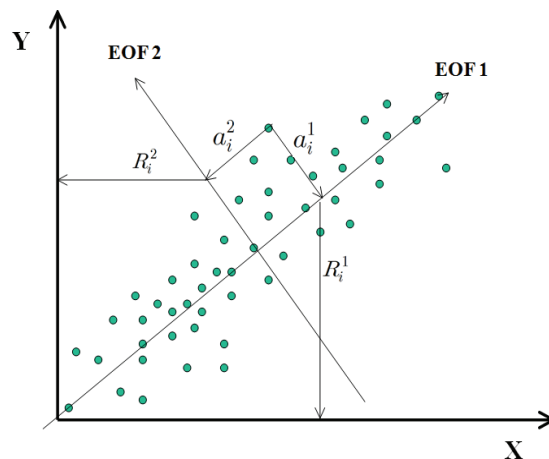


Figure 32. Conceptual view of Singular Spectrum Analysis(SSA) techniques by Empirical Orthogonal Function(EOF)

EOF 1과 EOF 2를 새로운 좌표축으로 사용하면, 자료가 가지고 있는 전체 분산 성향을 더욱 잘 표현할 수 있으며, 정투영 과정에서 고유치(eigenvalue)의 크기에 따라

자료의 비조화성분을 분리하고 조화성분에 해당하는 성분인 a_i^k 과 a_i^2 만 직교함수에 정투영한 후, 원좌표축인 X 와 Y 에 대응시켜 재구성요소(reconstructed component, RC)인 R_1^k 과 R_2^k 로 전환하여 원자료가 가지고 있는 고유특성(주기성과 경향성)을 반영한 추계 예측 모형을 구성할 수 있다. 이를 Eq.(3)으로 다시 재구성하여 원자료를 대체할 수 있으며, 이렇게 구성된 자료는 잡음이 제거된 일정한 주기와 경향을 가진 시계열 자료로 구성되어진다.

$$\begin{aligned}
 (R_A X)_i &= \frac{1}{i} \sum_{j=1}^i \sum_{k \in A} a_{i-j}^k E_j^k, & 1 \leq i \leq M-1 \\
 (R_A X)_i &= \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \sum_{k \in A} a_{i-j}^k E_j^k, & M \leq i \leq N-M+1 \\
 (R_A X)_i &= \frac{1}{N-i+1} \sum_{j=1-N+M}^i \sum_{k \in A} a_{i-j}^k E_j^k, & N-M+2 \leq i \leq N
 \end{aligned} \tag{3}$$

a_i^k : 투영계수, E_j^k : 경험적 직각함수($1 \leq k \leq M$), M : M 차의 공간(smoothing window의 역할), τ : 추출비(sampling rate)

SSA는 Karhunen-Loeve(K-L) expansion이라고도 알려진 SSA기법은 PCA기법에서 단변량을 적용시켜 사용하는데, Colebrook(1978)에 의해 해양생물학에 처음으로 사용되었으며, Broomhead and King(1986)과 Vautard *et al.*(1992) 등의 연구자에 의해 ENSO 현상을 파악하기 위해 SSA를 사용하기 시작하면서 특히 기상학 분야의 연구에 많이 사용되는 기법이 되었다. 이 기법은 EOF에 기초를 두고 이를 단변량의 시계열에 적용시킨 것이며, 시간적 분포가 길고 표본율(sampling rate)이 높을 때 특히 사용이 용이하다(Ghil, 1992; Vautard *et al.* 1992).

시공간적 EOF에 대해 간단히 살펴보면, 지수 i 와 j 가 $-1 \leq i \leq M$ 이고, $1 \leq j \leq N$ 이며, 각각 공간과 시간에 대한 방향을 나타낼 때, history of discrete field $X_{i,j}$ 를 그것의 고유벡터(EOF)와 PC(Principle Component)의 집합들에 대입하게 된다. 이때 SSA는 공간적 방향인 i 가 시간지체로 대체, 즉 $X_{i,j} = X_{i+j}$ 로 대체되고, M 이 지체 수가 된다. 그러므로 수식상으로는 똑같은 형식을 취하게 되지만 시간적 주요성분(Temporal Principal Component: T-PC)은 $M-1$ 만큼 원시계열 보다 적게 된다. 이때 M (embedding

dimension)을 선택하는 것은 얻고자 하는 정보의 양과 필요로 하는 통계학적 신뢰도의 정도에 따라 좌우된다.

4.2.2 수문자료와 기후지수의 EOF분석

본 연구에서는 수문자료(강수량, 유출량)와 3가지 해양관련 기후지수(N_{CT} , N_{WP} , IOD)의 주기적 성향 및 주성분 분석을 위하여 1966년 1월부터 2009년 12월까지의 528개의 월별 시계열 자료에 대한 정규화 작업 및 5-Month Moving Average를 취한 후 SSA를 이용하여 추출공간(embedding dimension) 값($M=120$), 추출비($\tau=1$)을 사용하여 주성분 분석을 실시하였다. 한반도를 포함한 5대강(한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강) 유역 수문자료에 대하여 단변량 스펙트럼 분석을 통해 발생된 경험적 직교함수(EOF)에 대응하는 120개의 고유치(Eigen value)를 총 분산에 대한 백분율로 표시한 값은 다음 Table 4, 5, 6과 같다.

Table 4와 5는 한반도와 5대강유역 표준화된 강수량과 유출량 시계열자료를 바탕으로 EOF분석을 실시하여 산출해 낸 총 분산에 대한 고유치의 백분율 값을 나타내고 있다. 강수량 자료의 경우, 평균적으로 EOF 1-2와 EOF 3-4에서 각각 총 분산의 12.2%, 10.9%를 설명하고 있으며, EOF 5-6와 EOF 7-8에서는 각각 총 분산의 8.8%, 8.2%를, 그리고 EOF 9-10과 EOF 11-12는 각각 7.8%, 7.0%를 설명하고, 나머지 EOF 13-120에서 45.1%를 설명하고 있음을 확인할 수 있다. 즉 1부터 12까지의 EOF를 사용하여 자료가 가지고 있는 총 분산의 55.9%를 설명할 수 있음을 알 수 있다.

또한, 유출량 자료의 경우, 평균적으로 EOF 1-2와 EOF 3-4에서 각각 총 분산의 16.8%, 14.7%를 설명하고 있으며, EOF 5-6와 EOF 7-8에서는 각각 총 분산의 11.5%, 7.7%를, 그리고 EOF 9-10과 EOF 11-12는 각각 6.6%, 6.0%를 설명하고, 나머지 EOF 13-120에서 36.9%를 설명하고 있음을 확인할 수 있다. 즉 1부터 12까지의 EOF를 사용하여 자료가 가지고 있는 총 분산의 63.1%를 설명할 수 있음을 알 수 있다. 한반도 수문자료에 대한 EOF분석 결과, 대체로 강수량 자료 보다 유출량 자료의 총 분산에 대한 백분율 설명력이 크게 나타났으며, 12개의 EOF 조화성분을 통하여 총

분산에 대한 55%이상의 만족할 만한 신뢰도를 얻을 수 있음을 확인하였다. 따라서 한반도 수문량 시계열자료의 경우 EOF 13부터 EOF 120까지는 각각의 EOF가 나타내는 분산의 비율은 EOF 1-12에 비하여 경미하다고 할 수 있어 비조화성분으로 간주하였다.

Table 4. Eigenvalues displayed as a percentage of the total variance (Precipitation)

Eigen value		1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	13-120
(%)	KP	12.2	11.4	8.1	8.0	7.9	7.2	45.2
	Han	10.6	9.2	8.8	8.0	7.5	7.0	48.9
	Nak	14.1	10.8	9.4	8.1	7.9	6.5	43.2
	Geum	12.6	11.2	9.0	8.5	7.8	7.0	43.9
	Seom	12.1	11.2	8.7	8.4	7.7	7.1	44.8
	Young	12.2	11.4	8.6	8.4	7.9	7.0	44.5

* Note: The KP means the Korean Peninsula. The Han, Nak, Geum, Seom, and Young indicate the Han River basin, Nakdong River basin, Geum River basin, Seomjin River basin, and Youngsan River basin, respectively.

Table 5. Eigenvalues displayed as a percentage of the total variance (Streamflow)

Eigen value		1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	13-120
(%)	KP	17.3	15.3	11.7	7.3	6.1	5.7	36.6
	Han	13.3	11.9	10.6	9.2	8.2	7.6	39.2
	Nak	18.6	16.2	11.2	7.7	5.8	5.5	35.0
	Geum	18.0	15.5	11.8	7.4	6.0	5.4	35.9
	Seom	16.7	14.7	11.7	7.2	6.7	5.9	37.1
	Young	16.6	14.7	11.7	7.2	6.7	5.9	37.2

Table 6은 N_{CT} , N_{WP} , IOD의 3가지 기후지수에 대한 총 분산에 대한 고유치의 백분율을 나타내었다. 고유치의 분석 결과, N_{CT} 기후지수의 경우 EOF 1과 EOF 2에서 각

각 총 분산의 15.2%, 15.1%를 설명하고 있으며, EOF 3과 EOF 4는 총 분산의 11.3%와 10.1%씩, 그리고 EOF 5와 EOF 6은 각각 6.5%와 6.2%를 설명하고 있다. 즉 1부터 6까지의 EOF만으로 자료가 갖는 총 분산의 64.4%를 설명할 수 있음을 알 수 있다. NWP 기후지수의 경우 EOF 1과 EOF 2에서 각각 총 분산의 22.2%, 19.5%를 설명하고 있으며, EOF 3과 EOF 4는 총 분산의 10.1%와 7.1%씩, 그리고 EOF 5와 EOF 6은 각각 6.6%와 5.9%를 설명하고 있다. 즉 1부터 6까지의 EOF만으로 자료가 갖는 총 분산의 71.4%를 설명할 수 있음을 알 수 있다. IOD 기후지수의 경우 EOF 1과 EOF 2에서 모두 총 분산의 15.6%를 설명하고 있으며, EOF 3과 EOF 4는 각각 총 분산의 10.2%와 9.4%, 그리고 EOF 5와 EOF 6은 각각 5.2%와 5.0%를 설명하고 있다. 즉 1부터 6까지의 EOF만으로 자료가 갖는 총 분산의 61.0%를 설명할 수 있음을 알 수 있다. 여러 가지 해양관련 기후지수(NCT, NWP, IOD)에 대한 EOF분석 결과, 대체로 NWP 기후자료의 총 분산에 대한 백분율 설명력이 크게 나타났으며, 총 6개의 EOF 조화성분만을 가지고도 총 분산에 대한 61.0~71.4%의 만족할 만한 신뢰도를 얻을 수 있음을 확인하였다. 그러므로, EOF 7부터 EOF 120까지는 각각의 EOF가 나타내는 분산의 비율은 EOF 1-6에 비하여 경미하다고 할 수 있다.

Table 6. Eigenvalues displayed as a percentage of the total variance (Climate Indices)

Eigen value		1	2	3	4	5	6	7-120
(%)	NCT Index	15.2	15.1	11.3	10.1	6.5	6.2	35.6
	NWP Index	22.2	19.5	10.1	7.1	6.6	5.9	28.6
	IOD Index	15.6	15.6	10.2	9.4	5.2	5.0	39.0

결과적으로, SSA 분석을 통하여 선택된 수문자료의 EOF 1-12와 기후지수의 EOF 1-6는 Preisendorfer's rule(1988)의 신뢰도를 대체적으로 만족하는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 수문자료와 기후지수 자료의 총 분산의 60%에 해당하는 상위 12개와 6개의 고유치에 대응하는 경험적 직교함수 EOF 1-12, EOF 1-6를 주성분 벡터로 선택하고, 나머지 고유치에 해당하는 벡터는 비조화성분으로 간주하여 처리하였다. 선택된 고유치를 비슷한 값에 따라 조합하여(parting) 재구성 요소(Reconstructed

Component, RC)로 만들어 수문자료와 기후지수(ENSO/IOD)의 주기적 성분을 추출하여 원격상관 분석에 활용하였다.

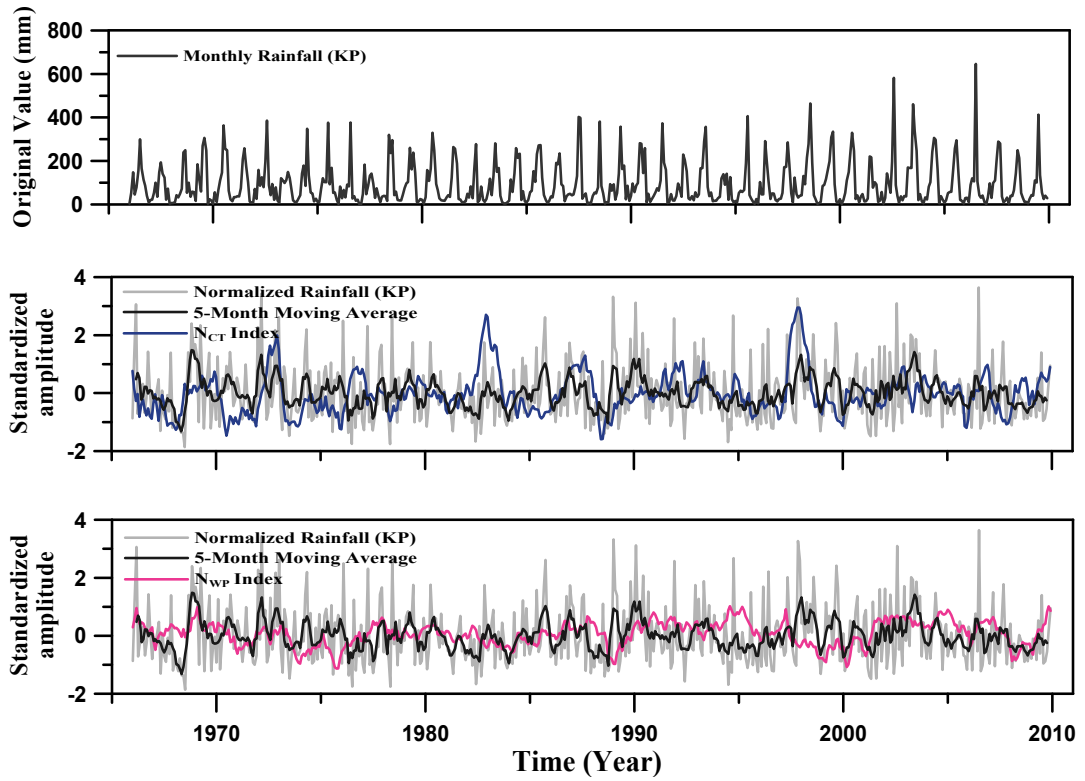
4.2.3 SSA를 이용한 수문자료와 기후지수의 주성분분석 결과

수문학적인 물의 순환은 여러 기상·기후학적 인자들과 영향을 주고받으며 복합적으로 발생하는 자연현상이다. 이러한 물의 순환에 따른 수문학적 재해 중에서 홍수는 전 세계적으로 단기간 내에 극심한 피해를 유발시킬 수 있는 주요 재해유발 요인 중 하나이다. 본 연구에서는 SSA를 통한 기후인자와 수문변량 시계열자료의 EOF분석을 바탕으로 각각의 성분요소의 조합을 통한 여러 재구성 요소 시계열자료를 만들어 주기적 성분을 추출하였으며, 원격상관 분석을 위한 주성분자료로 활용하였다. 이는 기후인자와 수문변량의 선형 및 비선형 상관관계 분석을 위한 자료가 되며, 여름철 장기 홍수예측 가능성을 진단하고 중장기 시계열예측자료로 활용될 수 있다.

Figure 33은 1966년부터 2011년까지의 46년간의 한반도의 월평균 강수량자료와 유출량자료를 바탕으로 SSA분석을 위한 자료변환(transformation)을 거친 결과를 나타내고 있다. Figure 33a, 33b의 맨 위의 그림에서 보는바와 같이 월평균 강수량자료는 강한 연주기성과 경향성을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 시계열자료는 정규화 과정(Stationary Process)을 거칠 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 월평균 강수량자료와 유출량자료에 1차적으로 30년 기후값(1971년~2000년) 평균에 대한 자료의 표준화(standardized)를 실시하였으며, 2차적으로 미국 National Meteorological Center에서 추천하는 5개월이동평균(5-month moving average)을 취하여 자료를 안정화 시켜 주었다. 본 절에서는 한반도에 대하여 수문자료의 표준화 과정을 거쳐 년 주기 성분을 제거한 5개월 이동평균(5-month moving average) 자료만을 기재하였으며, 5대강 유역(한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강)에 대한 결과는 부록에 첨부하였다. Figure 34는 ENSO(N_{CT} , N_{WP})지수와 IOD지수에 대한 원자료에 5개월 이동평균을 취한 결과이다. Figure 35는 시계열자료의 재구성요소(reconstructed components, RC)를 나타내고 있으며, 한반도 영역에 대한 강수량과, 유출량 자료 그리고 기후지수(N_{CT} , N_{WP} , and IOD)를 통하여 추출한 재구성요소 주요성분(RC1-4, RC1-8, RC-12, RC-16)에 해당하는 시계열자료이다. SSA를 이용한 수문자료와 기후지수와의 주성분분석 관련 5대

강유역에 대하여 분석한 결과는 부록에 첨부된 결과를 확인 바란다.

(a) Precipitation (Korean Peninsula)



(b) Streamflow (Korean Peninsula)

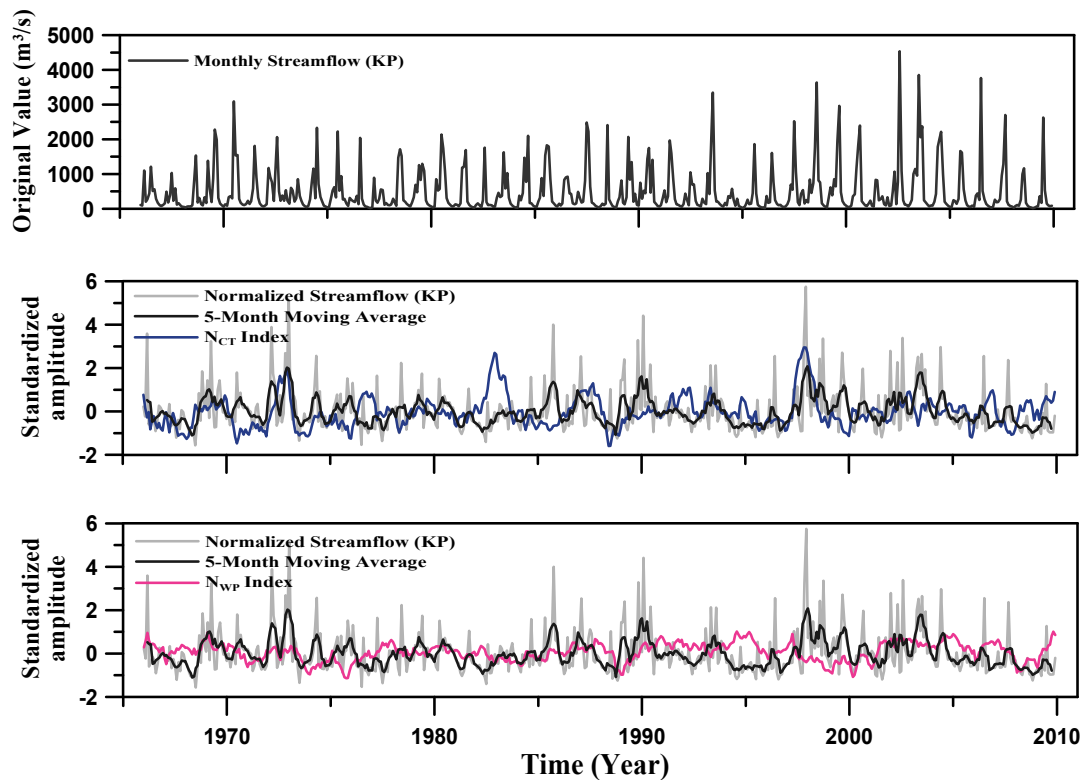
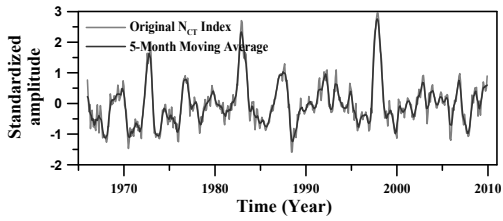
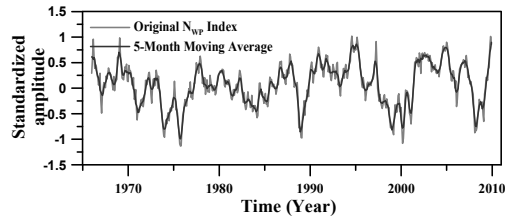


Figure 33. Time series of original value and standardized amplitudes for precipitation and streamflow in the Korean Peninsula.

(a) N_{CT} Index



(b) N_{WP} Index



(c) IOD Index

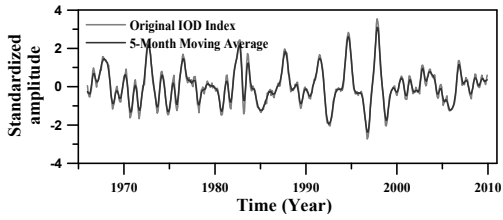
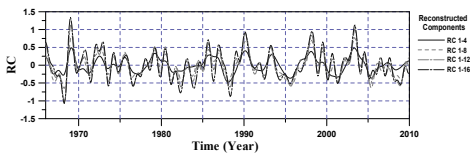
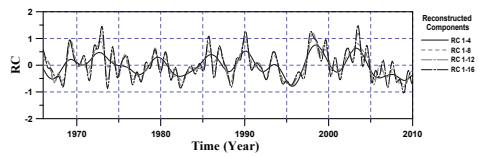


Figure 34. Time series of original rainfall and standardized amplitudes for climate indices. (a) to (c) N_{CT}/N_{WP} , and IOD Indices, respectively.

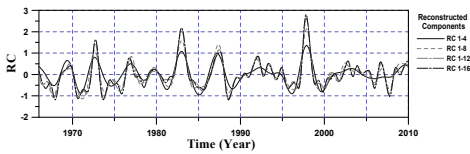
(a) Precipitation (Korean Peninsula)



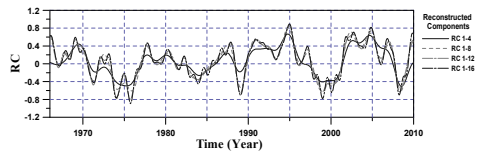
(b) Streamflow (Korean Peninsula)



(c) N_{CT} Index



(d) N_{WP} Index



(e) IOD Index

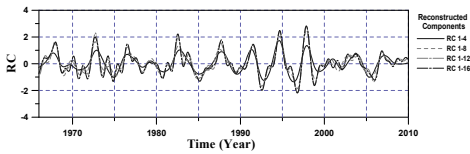
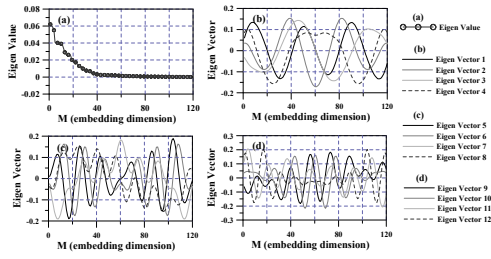


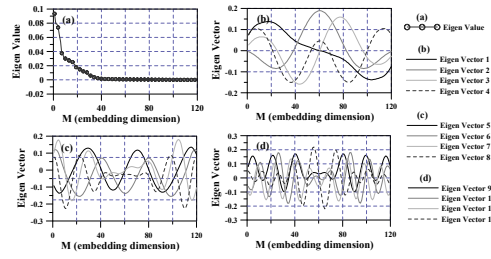
Figure 35. Reconstructed components (RC) time series for the hydrologic indices (precipitation and streamflow in the Korean Peninsula) and for the climate indices (N_{CT} , N_{WP} , and IOD).

수문변량과 기후지수의 저빈도 주기성분 분석을 위하여 SSA 기법을 이용하여 한반도와 5대강 유역별 강수량과 유출량 자료, 그리고 기후지수(N_{CT} , N_{WP} , IOD)의 주기성향 분석을 수행하였다. 이들 조화성분 중에서 원자료와 연관성이 가장 큰 12개 및 6개의 조화성분을 선택하고, 비조화성분으로 판단되는 나머지 성분을 제거하는 방법을 사용하였다. 다음으로 이 열두 개의 조화성분을 조합하여 재구성된 성분(Reconstructed Component; RC)을 산정하여 시계열을 작성하고, 한반도와 5대강유역 분석 지점의 주기성분과 기후지수 원자료 5개월 이동평균 자료의 주성분 추출 결과를 비교하였다. 본 연구에서는 SSA방법을 사용하여 추출공간(embedding dimension)값을 120으로 하고, 추출비(τ)=1를 사용하여 두 자료간의 공통성분을 추출하였으며, 재구성성분은 RC1-12까지로 하여 나머지 성분들은 잡음처리 하였다. Figure 36은 본 연구에서 산정한 한반도의 강수량과 유출량 그리고 기후지수(N_{CT} , N_{WP} , IOD)의 고유치(Eigen value)와 고유벡터(Eigen vector)를 나타내고 있다. 분석결과 한반도의 강수량과 유출량 시계열자료의 추출공간별 고유치를 산정할 수 있었으며, 장주기에 해당하는 고유치 1에 대한 고유벡터 1, 그리고 단주기에 해당하는 고유치 12에 대한 고유벡터 12 등 각각의 고유벡터(1~12)에 대한 저빈도 주기성분 추출 결과를 Figure 36에서 확인할 수 있다. 본 절에서는 한반도 분석결과만을 기재하였으며, 5대강 유역(한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강)에 대한 결과는 부록에 첨부하였다.

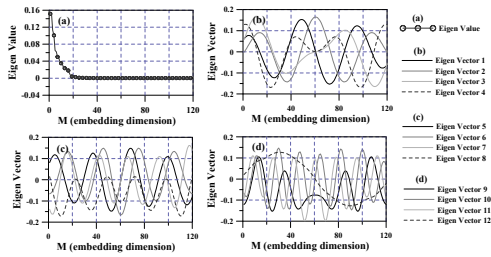
(a) Precipitation (Korean Peninsula)



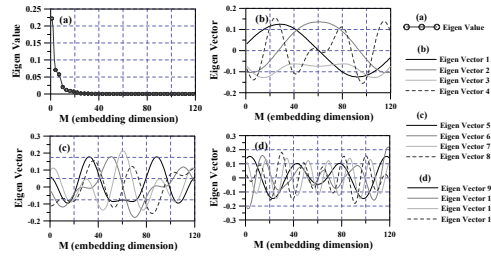
(b) Streamflow (Korean Peninsula)



(c) N_{CT} Index



(d) N_{WP} Index



(e) IOD Index

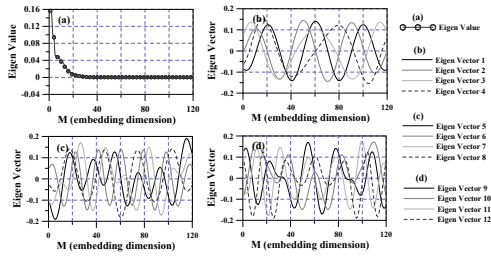
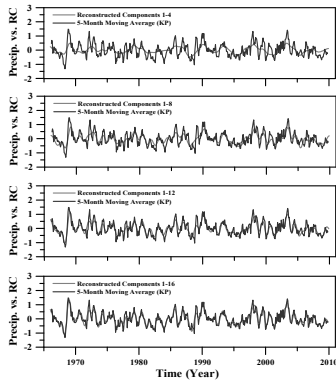


Figure 36. Eigen vector and eigen values in 120 embedding dimension for normalized hydrologic indices (precipitation and streamflow in the Korean Peninsula) and the climate indices (N_{CT}, N_{WP}, and IOD).

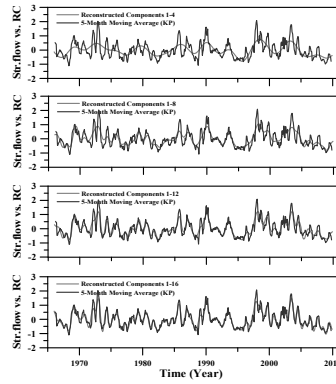
SSA는 다른 Signal에 비하여 특수한 빈도의 band signal을 선택하거나, 지배적인 변동성을 파악할 때 주로 이용할 수 있다. 재구성성분인 RC는 주성분(PC)의 최적의 선형조합이며, SSA를 이용하여 비조화 성분을 제거함으로써 원자료에서 얻지 못하는 주기 모드와 경향(trend)을 쉽게 파악할 수 있는 장점이 있다. 각각의 RC 성분들은 고유의

주기성분을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. Figure 37은 한반도의 강수량과 유출량자료 그리고 기후지수(N_{CT} , N_{WP} , IOD)에 대한 RC1-4, RC1-8, RC1-12, RC1-16을 조합하여 재구성한 성분과 원자료에 대한 표준화 및 5개월 이동평균을 취한 결과를 비교하여 나타내었다. Figure 37에서 보는 바와 같이 조합성분이 작을수록(RC1-4) 원자료의 장주기를 표현해 주며, 조합성분이 클수록(RC1-16) 원자료의 단주기를 표현하고 있음을 확인할 수 있다. 분석결과 한반도의 강수량 자료 재구성성분과 RC1-4, RC1-8, RC1-12, RC1-16과의 상관계수는 각각 0.61, 0.74, 0.84, 0.88로 분석되었으며, 한반도 유출량 자료의 경우 상관계수는 각각 0.66, 0.80, 0.87, 0.92로 분석되었다. 또한 기후지수 자료의 재구성성분과 원자료와의 상관계수 분석결과, N_{CT} 의 경우 0.79, 0.92, 0.98, 0.99로, N_{WP} 의 경우 0.86, 0.95, 0.97, 0.99로, IOD의 경우 0.79, 0.91, 0.97, 0.99로 비교적 높게 나타났다. SSA에 의한 재구성성분 시계열자료 구축의 결과는 사용자가 분석하고자 하는 목적(계절, 년, 10년 또는 그이상의 기간 예측)에 따라 재구성성분의 조합결과를 선택할 수 있다. 본 연구에서는 여름철에 해당하는 계절예측 단주기 성분에 대한 활용을 목적으로 하기 때문에 RC1-12의 값을 선택하여 사용하였다. 본 절에서는 한반도 분석결과만을 기재하였으며, 5대강 유역(한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강)에 대한 결과는 부록에 첨부하였다.

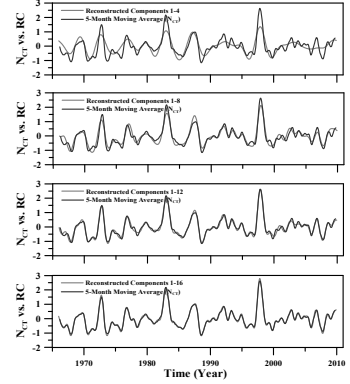
(a) Precipitation (KP)



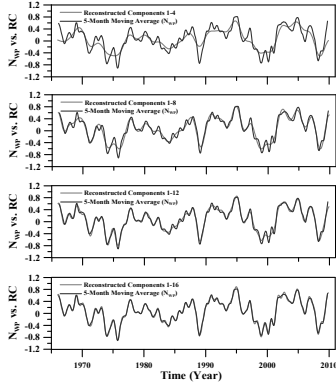
(b) Streamflow (KP)



(c) N_{CT} Index



(d) N_{WP} Index



(e) IOD Index

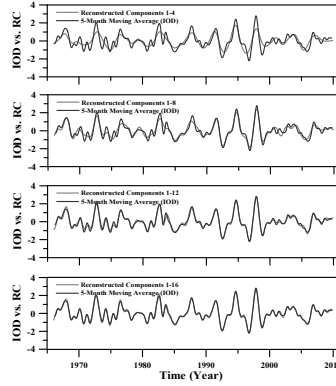


Figure 37. Five-month moving average time series and reconstructed components for standardized amplitude (precipitation and streamflow in the Korean Peninsula) and climate indices (N_{CT} , N_{WP} , and IOD).

4.3 Mutual Information(MI)을 이용한 상관분석

4.3.1 Mutual Information(MI) 기법

평균상호정보량(average mutual information)은 상호 정보량의 평균값을 의미하며, 이는 2개의 사상(events) X , Y 에서 한 쪽 사상 Y 가 나타남을 알았을 때 다른 사상 X 에 대하여 얻을 수 있는 평균 정보량을 말하며 두 자료간의 비선형적인 상관성을 유용하게 표현해 준다. 본 연구에서는 한반도 5대강 유역별 수문자료(강수량, 유출량)와 해양관련 기후지수(ENSO/IOD)에 SSA를 통하여 추출된 주성분 시계열에 대하여 MI기법을 이용하여 지체시간(lag time)별 평균상호정보량을 산정하여 수문변량과 기후지수간의 선형/비선형 원격상관관계를 분석하였다.

4.3.1.1 Mutual Information의 정의

MI 기법에 대해서는 히스토그램으로 간단하게 설명될 수 있다. 다음 Figure 38과 같이 두 개의 변수에 대하여 구간을 나누어 구간에 찍힌 점의 개수만큼 막대그래프를 높인다. Figure 38에서 가장 작은 막대는 1개의 좌표점, 중간은 2개, 그리고 가장 큰 막대그래프는 4개의 자료가 구간에 해당됨을 나타낸다. 이에 따른 각 구간의 조건부 확률을 구하고 log를 취하면 히스토그램 아래에 구간별로 나타낸 것과 같은 MI 값이 나오게 되고 이에 따른 평균 Mutual Information($I_{s,q}$)은 그 아래 표시된 값과 같다. 일반적으로 모든 MI 값의 합을 일반적으로 상관관계를 정량적으로 표현하는 MI 값으로 사용하게 된다. 이 값으로 비선형적인 상관성이 높고 낮음을 판단하게 된다. 일반적으로 MI 기법은 구간별 MI 값에 대한 조건부발생확률이 되므로 첫 번째와 마지막 경우와 같이 두 자료 간에 비선형적인 상관성이 강하면 값이 크게 나타나게 된다. 이러한 특성을 이용하여 MI 기법은 비선형적인 자료의 특성을 표현하여 주며 다음 Eq.(4), (5)에 자세히 설명하였다.

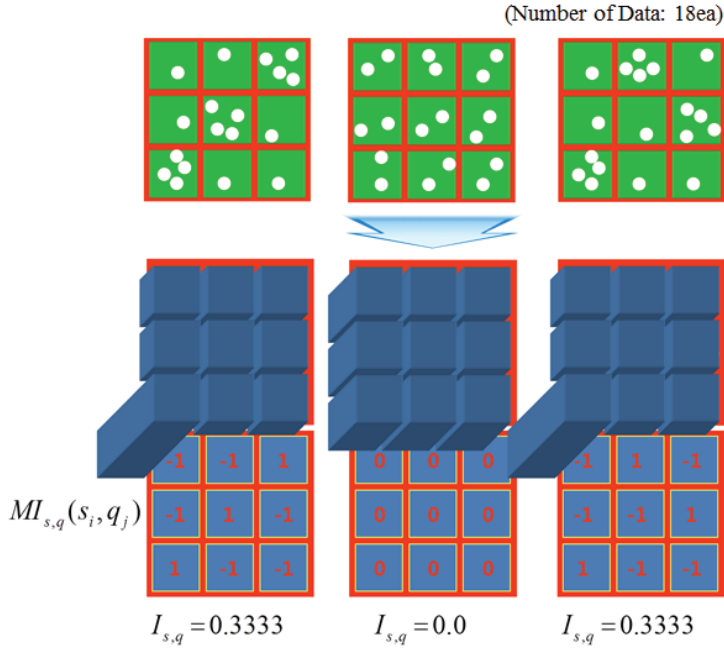


Figure 38. Schematic view of MI calculation with histograms

$s_1, s_2, s_3, \dots, s_n, q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ 로 표현되어지는 두 변수의 시계열이 있다고 하자. 여기서 n 은 관측 기간이고, 관측치 s_i 와 q_i 간의 MI 값은 다음 Eq.(4)와 같은 조건하에 정의된다(Moon *et al.*, 1995).

$$MI_{s,q}(s_i, q_j) = \log_2 \left(\frac{P_{s,q}(s_i, q_j)}{P_s(s_i) P_q(q_j)} \right) \quad (4)$$

여기서, $P_{s,q}(s_i, q_j)$ 는 (s_i, q_j) 에서 계산된 s 와 q 의 결합(joint) 확률밀도이고, $P_s(s_i)$ 와 $P_q(q_j)$ 는 각각의 s_i 와 q_j 에서 계산된 주변(marginal) 확률밀도이다.

두 계열 자료간의 전반적인 상관성에 대한 부분이 관심사항이며, 이는 평균 Mutual Information($I_{s,q}$)을 다음 Eq.(5)와 같이 정의하여 산정할 수 있다.

$$I_{s,q} = \sum_{i,j} P_{s,q}(s_i, q_j) \log_2 \left(\frac{P_{s,q}(s_i, q_j)}{P_s(s_i) P_q(q_j)} \right) \quad (5)$$

이 식은 종속과 독립여부를 떠나 다변량 sampling에서 구성요소를 구해내는데 유용하다. 특별히, Martinerie *et al.*, 1992; Gao and Zheng, 1994 등에 의해서 경험적 시계열로부터 상태(state) 공간을 구성할 때 적절한 지체의 선택을 위하여 사용되었다.

4.3.1.2 Mutual Information system을 이용한 상관분석

가) Mutual Information의 특성

Mutual Information은 두 변량간의 일반적인 상관성을 규명하는 능력이 뛰어나, 본 연구에서 수행하려고 하는 수문자료 원격상관해석 뿐만 아니라 대기과학, 컴퓨터 사이언스, 전자통신 등 다양한 분야에서 그 활용성이 높다. 만약 두 변량이 독립이라면 이들 간의 MI 값은 0이고, 반대로 두 변량이 강한 상관성을 가지고 있다면, MI 값은 커진다. 상관함수가 잔차를 최소화하는 선형상관을 규명하는 반면에 MI는 두 변량간의 종속성에 근거한 결합확률밀도를 이용한 일반적인 자료의 비선형 상관성을 규명한다. 예를 들어, Figure 39와 같은 자료의 경우, 선형 상관의 정도는 거의 0이지만($r^2 = 0.002$), MI 값을 구해보면, 두 변량간의 강한 상관성을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 MI는 상관함수보다 변수들 간의 비선형적인 상관성규명에 대한 더욱 적절한 기준을 제시해 줄 수 있다.

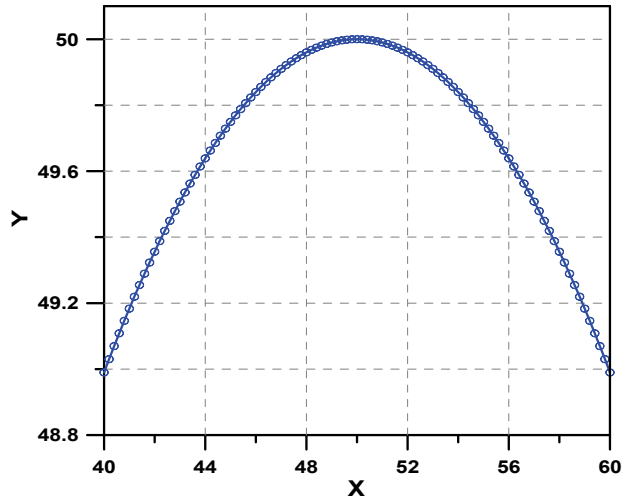


Figure 39. Random sample data set for comparison with the linear correlation coefficient

Mutual Information 해석의 또 다른 목적은 $x(t+\tau)$ 의 변수가 지체시간 τ 의 $x(t)$ 에 대해서 어느 정도 상관관계를 가지는가를 규명하는 일이다. 수문학에서 다양한 시계열자료로부터 추출되는 회귀분석에 의한 재구성요소에 대한 관심이 많아지고 있는데 만약, MI의 값이 거의 0인 곳에서 적절한 지체시간 τ 를 구할 수만 있다면 단일시계열의 측정치로부터 다차원 회귀분석식이 구성되어 질 수 있다.

τ 의 선택의 기준으로서 Fraser and Swinney(1986)가 MI를 제안하기까지 τ 의 선택을 위한 어떤 기준을 제시한 연구문헌도 없었으며, 이것이 모든 system에 τ 를 선택하기 위한 합리적인 기준을 제공한다는 것에 대해서는 논란이 되어왔다. τ 값은 MI값이 최소일 때, 선택하는 것으로 제안되었고, 이러한 선택은 자기상관함수(autocorrelation function, ACF)가 최초로 0에 접근하는 지체(lag)로서 τ 를 선택하는 것보다 나은 결과를 내었다. 여기서, ACF는 선형상관만을 규명하는 반면에, MI는 두 변수의 일반적인 상관성을 규명하며, 따라서 τ 의 선택에 대한 좀 더 나은 기준을 제시하게 된다(Graf and Elbert, 1990).

Fraser and Swinney(1986)는 MI의 추정과 τ 의 선택을 위해 다변량 히스토그램의 사용을 제안하였으나, Moon *et al.*(1995)은 Kernel 밀도함수 개념을 사용하여 Fraser and Swinney(1986)의 결과와 비교분석하여 Kernel 밀도함수의 우수성을 제시하였다. 따라서 본 연구에선 MI의 추정을 위하여 Moon *et al.*(1995)에 의해 제시된 비매개변수적 Kernel 밀도함수를 사용하였다.

나) 선형상관분석과의 비교

기존의 선형상관계수와 MI를 사용하여 주어진 자료에 대해 얼마나 민감하게 반응하는지에 대한 시험으로 Figure 3과 같은 임의의 시계열자료를 구성하여 지체를 두었을 때 선형상관계수와 MI값의 변화를 비교분석하였다. Figure 40의 굵은 실선으로 표시된 그래프는 Table 7과 같이 진폭을 달리하는 4개의 sin곡선의 결합으로 이루어진 그래프이며, 회색 실선으로 표시된 그래프는 각각의 sin곡선에 진폭의 10%정도인 $N(0,6)$, $N(0,12)$, $N(0,6)$, $N(0,9)$ 의 잡음을 추가한 후, 지체 10을 두어 구성한 그래프이다.

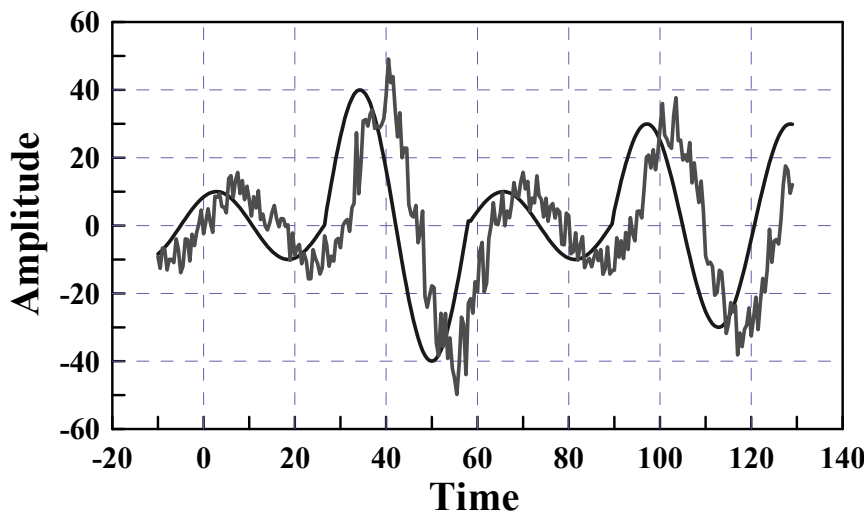


Figure 40. Two amplitude graph of four sin curve having a lag-10

Table 7. Configuration of sin function in each section

Sections	Applying functions	Added noise
$-10 \leq x < 32$	$10\sin\left(\frac{x}{5}\right)$	$N(0,6)$
$32 \leq x < 63.5$	$40\sin\left(\frac{x}{5}\right)$	$N(0,12)$
$63.5 \leq x < 95$	$10\sin\left(\frac{x}{5}\right)$	$N(0,6)$
$95 \leq x < 134$	$30\sin\left(\frac{x}{5}\right)$	$N(0,9)$

이렇게 구성되어진 자료구간 $[-10 < x < 134]$ 을 각각 0.5, 0.2, 0.1 간격으로 세 분하여 이에 따른 자료수를 279, 712, 1431개의 세 가지 경우로 나누어 각각 지체시간 별 상관계수와 MI 값을 계산하였다. 자료간격이 좁아지면 근접한 자료간의 변화율이 현저하게 작아지는데 이에 따라 선형상관계수와 MI값이 지체된 값을 얼마나 적절히 추적해 가는지 다음 Figure 41에서 확인할 수 있다.

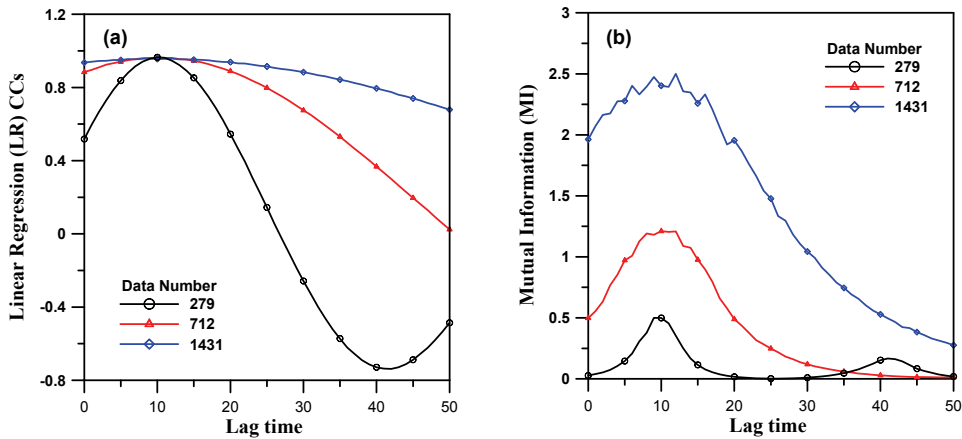


Figure 41. Lag time correlation coefficients between linear regression and mutual information(MI) in each data set

Figure 41은 각 자료구간에 대한 지체시간별 선형상관계수 및 각 자료구간에 대한 지체별 MI값을 구한 결과이다. 검은 실선으로 표시된 것은 279개의 비교적 적은 숫자의 자료를 대상으로 수행한 결과이며, 붉은색 실선은 712개의 자료, 파란색 실선은 1,431개의 자료를 통하여 지체 시간별 선형상관계수와 MI를 산정한 결과이다. 선형상관계수 값의 경우, 비교적 자료수가 적고 자료의 간격이 클 경우에도 지체가 10인 경우를 잘 표현하고 있지만, 지체시간이 길어질수록 선형상관계수 값은 점차 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 반면에, MI값을 통한 지체분석은 자료간의 선형적인 증감에 의해서가 아니라 확률적인 값에 의해 산정되므로 대체로 지체 10에 대해서 자료 개수에 따라 어느 정도 차별 있는 값을 제시하고 있음을 확인할 수 있다. 통계적인 수문분석에 사용되지 않는 자료가 대부분 매우 불규칙(random)하고, 또한 통계적인 유의성을 감안하여 많은 수의 데이터를 대상으로 처리해야 하며, 일(daily) 단위나 시간(hourly)단위의 수문변량 자료를 사용하고 있는 것을 감안한다면 단순한 선형 상관계수 방법을 사용하기 보다는 자료발생의 확률적인 빈도를 가지고 비선형 상관계수를 추정해가는 MI값이 좀 더 합리적이고 나은 결과를 제시할 수 있을 것이다.

4.4 Kernel 함수를 이용한 결합확률밀도함수 추정

4.4.1 결합 확률밀도함수의 추정방법

MI 기법을 이용하여 적절한 지체시간이 선택되어지면 Kernel 함수를 사용하여 비매개변수적 방법으로 확률밀도함수를 추정할 수 있다(김진영, 2002; 김동권, 2006).

Silverman(1986)과 Scott(1992)에 의하면 Kernel 함수의 사용이 가정한 확률밀도 함수를 추정하는데 수렴하는 속도가 평균제곱오차(Mean Square Error, MSE)의 측면에서 히스토그램(histogram) 방법보다 우수하고, 원점의 선택에 구애를 받지 않으며, 자료를 계급구간으로 분류(bin)하거나 빈도계산(frequency analysis)을 함에 있어 사각형모양보다는 좀 더 복잡한 다양한 모양을 구현할 수 있는 장점이 있다고 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 MI기법을 이용한 비선형 지체상관 분석을 위하여 Kernel 함수를 이용한 결합확률 밀도함수를 추정하는 방법을 사용하였다. 벡터 y 의 Kernel 밀도 함수는 다음 Eq.(6)과 같이 주어진다(Silverman, 1986).

$$(y) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n K(t) \quad (6)$$

여기서, $t = (y - y_i)^T S^{-1} (y - y_i) / h^2$ 이며, $K(t)$ 는 다변량 Kernel 함수이고, $y = [y_1, y_2, \dots, y_d]^T$ 는 가정된 밀도함수를 가지는 d차원의 random 벡터이다. i 를 1에서 n 까지 가지는 $y = [y_1, y_2, \dots, y_d]^T$ 는 n sample 벡터이고, h 는 Kernel의 광역폭, 그리고 S 는 y_i 의 공분산행렬이다.

Kernel 함수 $K(t)$ 는 유효확률밀도함수가 되기 위해 필요하다. 본 연구에서는 다음과 같이 주어진 다변량 Gaussian 확률밀도함수 $K(t)$ 를 사용하였다.

$$K(t) = \frac{1}{(2\pi)^{d/2} h^d \det(S)^{1/2}} \exp(-t/2) \quad (7)$$

$K(t)$ 의 값은 y 와 y_i 간의 거리에 근거한 관측치 y_i 에 주어지는 가중치를 표현한다. 여기에 사용된 거리는 co-ordinates에서 공분산을 이해하기 위해 제안된 Euclidean 거리이다. Eq.(6)으로부터 Kernel 함수는 추정지점의 인접부에서 관측치의 상대빈도에 대한 가중평균이다. Kernel 함수 $K(t)$ 는 상대적인 가중치를, h 는 계산된 평균값에 걸친 자료값의 범위를 규정짓는다. 공분산 행렬 S 의 역할은 좌표상에서 선형상관의 가능여부를 인식하게 한다. 이는 Kernel 함수의 결과를 적당히 가늠하게 할 수 있게 하고, 회전된 좌표에서 변동 Scale의 양에 있어서 Bin을 다양하게 한다.

Breiman *et al.*(1977)은 고정 핵밀도함수 추정법의 특성과 자료의 지역적인 밀도를 고려하는 k-th Nearest Neighbor방법을 결합한 변동핵밀도함수법을 제안하였다. 변동핵밀도함수법은 고정핵밀도함수법과 유사한 방식으로, 자료가 발생된 위치에 놓이는 핵함수의 광역폭이 자료의 밀도에 따라 변한다.

$K(t)$ 를 핵함수라 하고 k 를 양의 정수로 가정하면 $d_{j,k}$ 를 한 개의 자료 x_j 에서 그 나머지 자료($n-1$)개 중에서 k 번째로 가까운 지점에 있는 자료까지의 거리라고 하면, 핵밀도함수법은 다음 Eq.(8)과 같이 정의할 수 있다.

$$f(x) = \frac{1}{nh} \int \frac{1}{d_{j,k}} K\left(\frac{x - X_j}{hd_{j,k}}\right) dx \quad (8)$$

여기서, $hd_{j,k}$ 는 양의 광역폭(band width)이다. 자료의 분포가 적은 낮은 밀도지역에서 $d_{j,k}$ 의 값은 커지고 핵함수의 모양은 넓게 퍼지게 되며, 자료의 분포가 많은 높은 밀도지역에서는 그 반대현상이 일어나 핵함수는 좁게 밀착된 형태를 가지게 된다. 핵밀도함수 추정법의 일관성과 수렴성은 Devroye and Györfi(1985)에 의해 평가되었으며, Bowman(1985), Moon and Lall(1994)은 핵밀도함수 추정법이 밀도함수의 꼬리 부분과 같은 최빈값 추정이나 자료가 비대칭 분포일 때 장점이 많다는 것을 보여 주었다.

4.4.2 핵함수의 종류

일반적인 핵함수는 중앙에서 최대치를 가지며 연속적이고 대칭인 방정식의 형태를 갖는다(Figure 42). 일반적으로 임의의 핵함수를 사용하여도 최적의 핵함수와 비슷한 효율을 갖는다고 알려져 있다. 연속적이고 미분 가능한 밀도함수가 필요한 경우는 경계를 갖는 핵함수보다는 경계를 갖지 않는 핵함수를 사용하는 것이 적용상의 유리하다. 또한 빈도해석과 같이 외삽을 통하여 자료기간에 비해 긴 재현기간의 확률수문량을 추정하는 경우에는 두터운 꼬리(tail)를 가지고 있는 핵함수를 선택하는 것이 바람직하다.

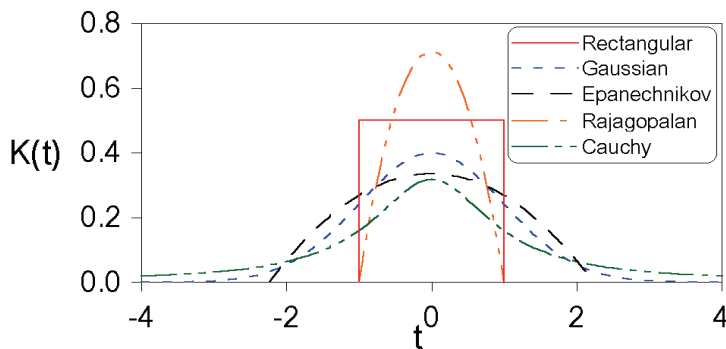


Figure 42. Shape of in each kernel function

Table 8. Kernel function type and equation

Kernel Function	K(t)
Rectangular	$\frac{1}{2}$ for $ t < 1$ 0 if otherwise
Gaussian	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right)$
Epanechnikov	$\frac{3}{4} \left(1 - \frac{1}{5}t^2\right) / \sqrt{5}$, for $ t < \sqrt{5}$
Rajagopalan	$\frac{3h}{(1-4h^2)}(1-t^2)$, for $ t \leq 1$
Cauchy	$\frac{1}{\pi(1+t^2)}$

4.4.3 광역폭 h 의 선택

광역폭 h 의 선택은 매우 중요한 문제로 다루어져 왔다. 지금까지의 광역폭을 선택하는 방법은 Maximum Likelihood, Least Squares Cross Validation 또는 Adamowski Criterion, Breiman 방법, Biased Cross-Validation(BCV) 등이 있다. 또한 최근에 개발된 방법으로 Plug-In과 Smoothed Bootstrap기법이 있으며, 이들 값으로부터 최적의 h 를 구할 수 있다. h 의 값은 핵함수 추정법에 있어서 매우 중요하지만 실제로는 정확하게 구하기가 쉽지 않다. 너무 큰 h 는 큰 편차(bias)와 너무 원만(oversmooth)한 밀도함수의 추정과 정보의 손실을 가져온다. 반면에, 너무 작은 h 는 큰 분산(variance)과 비정상적인 확률밀도함수 추정치를 나타낸다(Adamowski and Labatiuk, 1987).

본 연구에서는 Kernel 핵밀도 함수의 광역폭 h 의 결정을 위하여 Solve the Equation Plug In(SJPI) 방법을 사용하였다. 이 방법은 Woodroffe(1970) 이후로 plug in의 개념으로 행해진 많은 연구에 활용되어 왔으며, 미지의 $R(\hat{f}_h'')$ 을 추정치로 산정하는 것이다. 이

이론의 가장 난해한 점은 기준이 되는 추정 광역폭을 결정하는 것이며 이러한 문제를 해결하기 위한 방법을 Sheather(1986)가 제안하였고, 주어진 Kernel 함수의 선택에 상응하는 Optimal Gaussian 광역폭 h 는 다음 Eq.(9)에 의해 결정 될 수 있다 (Sheather and Jones, 1991).

$$h = \left[\frac{R(K)}{nR(\hat{f}_{g(h)}'') \left(\int x^2 K(t) du \right)^2} \right] \quad (9)$$

SJPI방법은 기존의 방법과 달리 기준 광역폭 $g(h)$ 가 사용되며, MISE(Mean Integrated Square Error)를 최소화하여 광역폭을 선택할 수 있는 편리한 방법이다.

4.4.4 MI를 이용한 확률밀도함수 추정절차

Kernel 핵함수를 이용하여 결합확률밀도함수(Joint Probability Density Function)를 추정하는 도해적인 절차는 다음과 같다(Figure 43). 수문변량(강수량, 유출량)과 ENSO/IOD 자료를 좌표로 하는 좌표공간에 자료가 발생했다고 할 때(Figure 43a; Step I), 자료가 발생된 위치에 Kernel 밀도함수를 위치시킨다(Figure 43b; Step II). 다음으로 Kernel 밀도함수를 위치시키면 자료 발생 위치 주변의 전영역에 대하여 일정량 이상의 가중치가 부가되므로 단순히 막대그래프를 위치시킬 때 보다 자료의 특성을 반영한 좀 더 유연하고 능률적인 Kernel 확률밀도함수를 얻을 수 있다(Figure 43c; Step III). 마지막으로 자료가 발생된 각각의 위치에서 계산된 Kernel 밀도함수를 중첩시키면 전반적인 자료발생 특성을 반영한 비정형 3차원 결합확률밀도함수를 얻을 수 있다(Figure 43d; Step IV).

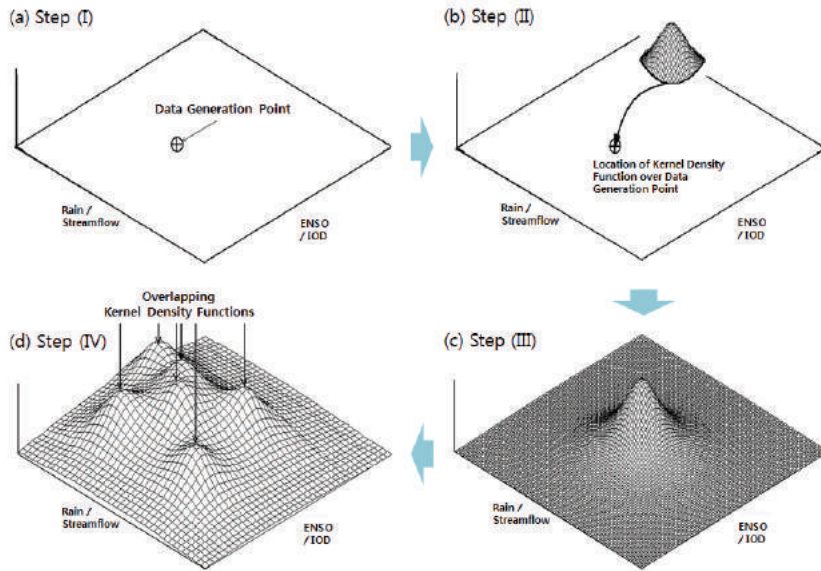


Figure 43. Schematic view of analysis procedures for joint probability density function using kernel.

4.5 MI를 이용한 결합확률밀도함수 분석 결과

대규모 해양관련 지수(ENSO/IOD)와 한반도 수문변량과의 지체시간에 따른 원격상관 분석을 위하여, 본 연구에서 사용된 자료는 국가 수자원 정보센터 WAMIS(<http://www.wamis.go.kr>)에서 제공하는 1966년부터 2011년까지의 한반도의 5대강 유역별 평균 월 강수량 자료와 유출량 자료이다. 대부분의 월별 수문자료(강수량, 유출량)는 강한 계절성분과 주기성(cycle), 경향성(trend)을 포함하고 있으며, 시계열 자료 해석을 위해서는 자료가 가지고 있는 계절과 연주기 성분을 제거해야하며, 또한 경향 성분의 제거도 필요하다. 본 연구에서 대상유역으로 선정한 유역의 수문자료 역시 계절적인 특성을 반복하는 매우 강한 연주기를 보이는 특성이 있음을 확인하였다. 반면에 ENSO(Nct, Nwp)와 IOD자료의 경우, 특정한 패턴이 없이 불규칙한 발생 특성을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 Mutual Information을 이용한 두 변량간의 원격상관성을 찾기 위하여 자료의 특성은 변하지 않는 범위 내에서 두 자료를 여러 방법을 통해 변환하여 사용하였으며, 변환에 사용된 방법은 다음과 같다.

- ① 연주기 제거 : 자료의 평균과 표준편차를 이용하여 표준화작업을 실시하여 월별 상대적인 값을 사용함으로써, 주기성과 극심한 변화 패턴을 보이는 자료에서 연주기 제거와 안정화를 취해 주었다.
- ② 5개월 이동평균 : 연주기가 제거된 강수량 자료와 유출량 자료, 그리고 기후지수 (Nct, Nwp, IOD) 자료는 미국 National Meteorological Center에서 추천하는 5개월 이동평균(5-month moving average)을 취하여 자료를 안정화 시켜주었다.
- ③ SSA를 통한 주성분 추출 : 강수량과 유출량, ENSO(Nct, Nwp), IOD자료들이 가지는 잡음을 제거하고, 두 자료간의 공통적인 성분만을 추출하여 비교함으로써, 좀 더 자료의 본질적인 성향을 쉽게 찾을 수 있다.

표준화(normalized) 과정을 거쳐 년 주기 성분을 제거한 한반도 5대강 유역의 수문 인자(강수량, 유출량)의 5개월 이동평균(5-month moving average) 자료와 ENSO (Nct, Nwp), IOD 원자료의 5개월 이동평균자료를 대상으로, SSA방법을 사용하여 추출 공간(embedding dimension)값을 120으로 하고, 추출비(τ)=1를 사용하여 두 자료간의 공통성분을 추출하였다. 여기서, 재구성성분은 RC 1-12까지로 하여 나머지 성분들은 잡음처리 하였다.

상관계수를 이용한 상관분석은 선형적인 관계만을 고려하기 때문에 비선형적 관련성을 기대할 수 없다는 단점이 있다. 이러한 부분을 보완하기 위하여 비선형적인 상관관계를 고려해줄 수 있는 Mutual Information(MI) 기법을 본 연구에서는 사용하였다. 또한 기후지수와 한반도 수문변량간의 상관성 및 지체 정도를 나타내는 정량적인 측면과 더불어 MI기법을 통해 얻어진 확률밀도함수를 사용하여 Kernel을 이용한 결합확률밀도함수를 구함으로써 엘니뇨/라니냐, IOD 현상의 발생에 따른 한반도의 수문변량의 비선형적 거동특성을 분석하였다.

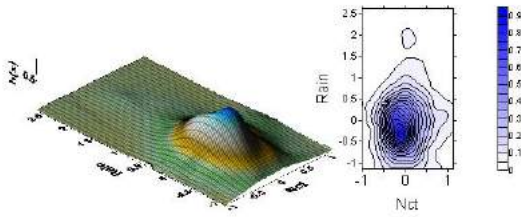
4.5.1 기후지수(N_{CT})와 수문변량과의 결합확률밀도함수 분석결과

Figure 44는 MI기법을 이용하여 산정한 기후지수(N_{CT})와 한반도 강수량과의 지체 시간(lag 0, 1, 3, 6)별 3D와 2D 결합확률밀도함수이다. 한반도 강수량의 경우 결합 확

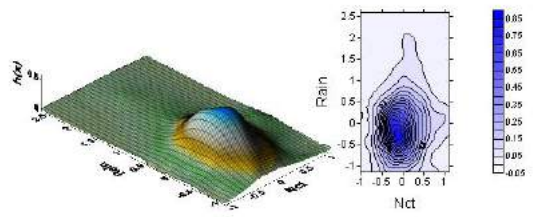
를밀도함수의 꼭지점에 해당하는 최빈점의 값($h(x)$)은 지체시간 0, 1, 3, 6일 때, 각각 0.881, 0.837, 0.800, 0.761로 나타났으며, 지체시간별 최빈점의 꼭지점 값이 감소하는 경향이 있음을 확인하였다. 또한 중앙동심원의 최빈점의 위치에 해당하는 N_{CT} 와 강수량의 지점이 각각 (lag 0: -0.114, -0.324), (lag 1: -0.121, -0.258), (lag 3: -0.162, -0.203), (lag 6: -0.134, -0.281)로 나타나, 지체시간별 N_{CT} 가 감소할 때 강수량도 감소하는 빈도가 높아 두 자료는 양의 상관성이 있음을 확인할 수 있으며, 그리고 이러한 양의 상관의 경향은 지체시간이 길어질수록 다소 감소함을 확인할 수 있다.

Figure 45는 MI기법을 이용하여 산정한 기후지수(N_{CT})와 한반도 유출량과의 지체시간(lag 0, 1, 3, 6)별 3D와 2D 결합확률밀도함수이다. 한반도 유출량의 경우 결합 확률밀도함수의 꼭지점에 해당하는 최빈점의 값($h(x)$)은 지체시간 0, 1, 3, 6일 때, 각각 0.671, 0.649, 0.622, 0.596으로 나타났으며, 지체시간별 최빈점의 꼭지점 값이 감소하는 경향이 있음을 확인하였다. 또한 중앙동심원의 최빈점의 위치에 해당하는 N_{CT} 와 유출량의 지점이 각각 (lag 0: -0.155, -0.255), (lag 1: -0.148, -0.326), (lag 3: -0.153, -0.316), (lag 6: -0.152, -0.248)로 나타나, 지체시간별 N_{CT} 가 감소할 때 유출량도 감소하는 빈도가 높아 두 자료는 양의 상관성이 있음을 확인할 수 있으며, 그리고 이러한 양의 상관의 경향은 지체시간이 길어질수록 다소 증가하였다 감소함을 확인할 수 있다.

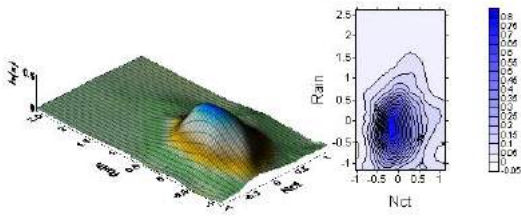
(a) lag 0



(b) lag 1



(c) lag 3



(d) lag 6

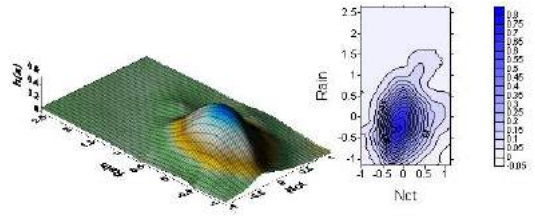
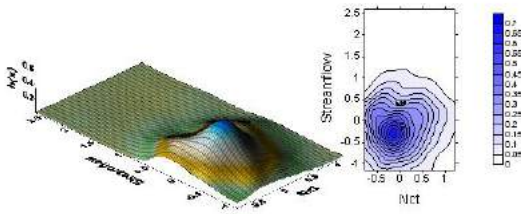
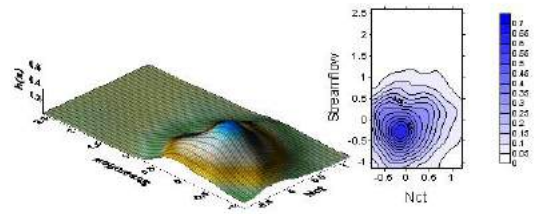


Figure 44. 3D and 2D joint probability kernel density functions both normalized 5-month moving average precipitation and ENSO(N_{CT}) index in the Korean Peninsula. (a) to (d) indicates lag 0, 1, 3, and 6, respectively.

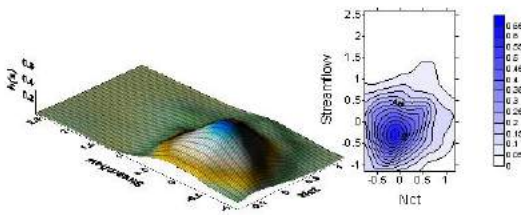
(a) lag 0



(b) lag 1



(c) lag 3



(d) lag 6

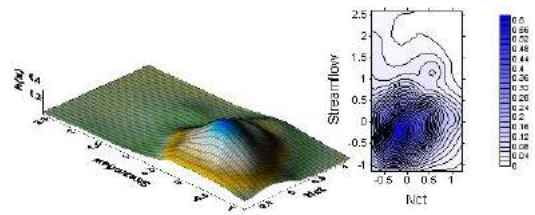


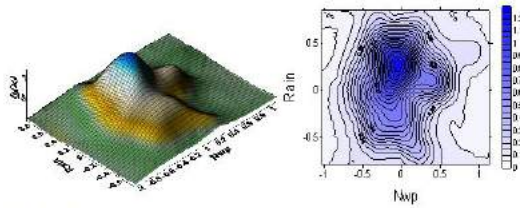
Figure 45. Same as Figure 44. but for streamflow.

4.5.2 기후지수(N_{WP})와 수문변량과의 결합확률밀도함수 분석결과

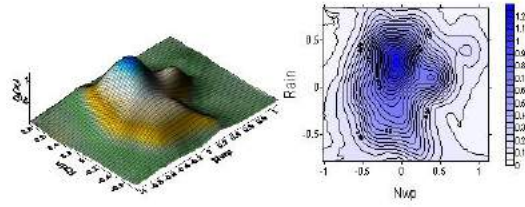
Figure 46은 MI기법을 이용하여 산정한 기후지수(N_{WP})와 한반도 강수량과의 지체시간(lag 0, 1, 3, 6)별 3D와 2D 결합확률밀도함수이다. 한반도 강수량의 경우 결합확률밀도함수의 꼭지점에 해당하는 최빈점의 값($h(x)$)은 지체시간 0, 1, 3, 6일 때, 각각 1.229, 1.218, 1.194, 1.255로 나타났으며, 지체시간별 최빈점의 꼭지점 값이 감소하였다 증가하는 경향이 있음을 확인하였다. 또한 중앙동심원의 최빈점의 위치에 해당하는 N_{WP} 와 강수량의 지점이 각각 (lag 0: -0.031, 0.258), (lag 1: -0.066, 0.275), (lag 3: -0.138, 0.280), (lag 6: -0.143, 0.256)으로 나타나, 지체시간별 N_{WP} 가 감소할 때 강수량이 증가하는 빈도가 높은 것으로 분석되었다. 그러나 두 자료는 음의 상관관계가 있는 것으로 보이나, 전반적으로 확률밀도함수의 분포가 동심원을 중심으로 사방으로 넓게 분포하고 있고 N_{WP} 의 음의 값이 매우 작아 이러한 음의 상관관계의 경향은 MI결과의 선형 및 비선형 상관분석 식에 의해서 판단할 수 있을 것으로 확인된다.

Figure 47은 MI기법을 이용하여 산정한 기후지수(N_{WP})와 한반도 유출량과의 지체시간(lag 0, 1, 3, 6)별 3D와 2D 결합확률밀도함수이다. 한반도 유출량의 경우 결합확률밀도함수의 꼭지점에 해당하는 최빈점의 값($h(x)$)은 지체시간 0, 1, 3, 6일 때, 각각 0.832, 0.830, 0.846, 0.881로 나타났으며, 지체시간별 최빈점의 꼭지점 값이 증가하는 경향이 있음을 확인하였다. 또한 중앙동심원의 최빈점의 위치에 해당하는 N_{WP} 와 유출량의 지점이 각각 (lag 0: -0.220, 0.238), (lag 1: -0.279, 0.238), (lag 3: -0.262, 0.207), (lag 6: -0.284, 0.176)으로 나타나, 지체시간별 N_{WP} 가 감소할 때 유출량은 증가하는 빈도가 높은 것으로 분석되었다. 그러나 두 자료는 음의 상관관계가 있는 것으로 보이나, 전반적으로 확률밀도함수의 분포가 동심원을 중심으로 사방으로 넓게 분포하고 있고 N_{WP} 의 음의 값이 매우 작아 이러한 음의 상관관계의 경향은 MI결과의 선형 및 비선형 상관분석 식에 의해서 판단할 수 있을 것으로 확인된다.

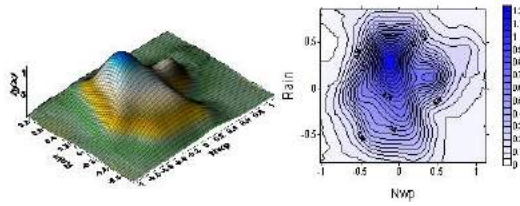
(a) lag 0



(b) lag 1



(c) lag 3



(d) lag 6

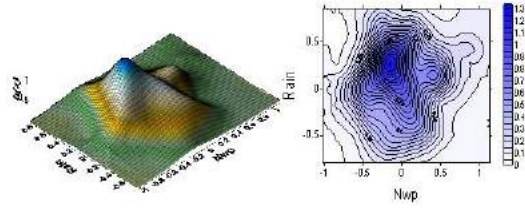
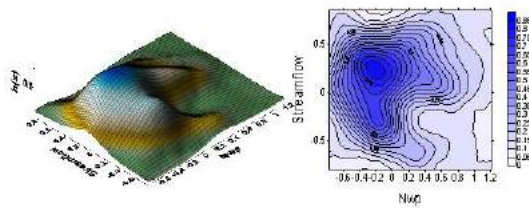
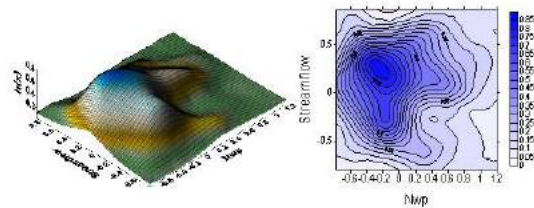


Figure 46. 3D and 2D joint probability kernel density functions both normalized 5-month moving average precipitation and ENSO(N_{WP}) index in the Korean Peninsula. (a) to (d) indicates lag 0, 1, 3, and 6, respectively.

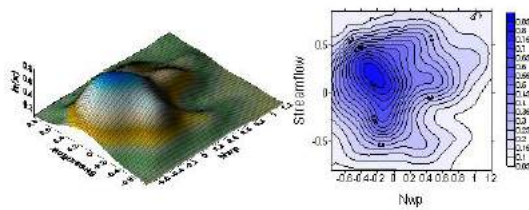
(a) lag 0



(b) lag 1



(c) lag 3



(d) lag 6

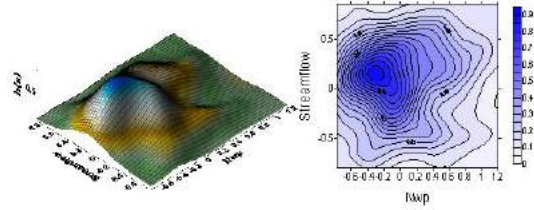


Figure 47. Same as Figure 46. but for streamflow.

4.5.3 기후지수(IOD)와 수문변량과의 결합확률밀도함수 분석결과

Figure 48은 MI기법을 이용하여 산정한 기후지수(IOD)와 한반도 강수량과의 지체 시간(lag 0, 1, 3, 6)별 3D와 2D 결합확률밀도함수이다. 한반도 강수량의 경우 결합확률밀도함수의 꼭지점에 해당하는 최빈점의 값($h(x)$)은 지체시간 0, 1, 3, 6일 때, 각각 0.668, 0.632, 0.601, 0.603으로 나타났으며, 지체시간별 최빈점의 꼭지점 값이 감소하는 경향이 있음을 확인하였다. 또한 중앙동심원의 최빈점의 위치에 해당하는 IOD와 강수량의 지점이 각각 (lag 0: 0.028, -0.033), (lag 1: -0.009, -0.073), (lag 3: -0.052, -0.066), (lag 6: -0.123, -0.144)로 나타나, 지체시간별 IOD가 감소할 때 강수량도 감소하는 빈도가 높아 두 자료는 양의 상관성이 있음을 확인할 수 있으며, 그리고 이러한 양의 상관의 경향은 지체시간이 길어질수록 다소 감소함을 확인할 수 있다. 그러나 이러한 양의 상관의 경향은 MI결과의 선형 및 비선형 상관분석 식에 의해서 보다 면밀히 판단할 수 있을 것으로 분석된다.

Figure 49는 MI기법을 이용하여 산정한 기후지수(IOD)와 한반도 유출량과의 지체 시간(lag 0, 1, 3, 6)별 3D와 2D 결합확률밀도함수이다. 한반도 유출량의 경우 결합확률밀도함수의 꼭지점에 해당하는 최빈점의 값($h(x)$)은 지체시간 0, 1, 3, 6일 때, 각각 0.491, 0.472, 0.439, 0.431로 나타났으며, 지체시간별 최빈점의 꼭지점 값이 감소하는 경향이 있음을 확인하였다. 또한 중앙동심원의 최빈점의 위치에 해당하는 IOD와 유출량의 지점이 각각 (lag 0: -0.128, -0.004), (lag 1: -0.122, 0.019), (lag 3: -0.155, -0.036), (lag 6: -0.153, -0.078)로 나타나, 지체시간별 IOD가 감소할 때 유출량도 감소하는 빈도가 높아 두 자료는 양의 상관성이 있음을 확인할 수 있으며, 이러한 양의 상관의 경향은 MI결과의 선형 및 비선형 상관분석 식에 의해서 보다 면밀히 판단할 수 있을 것으로 분석된다.

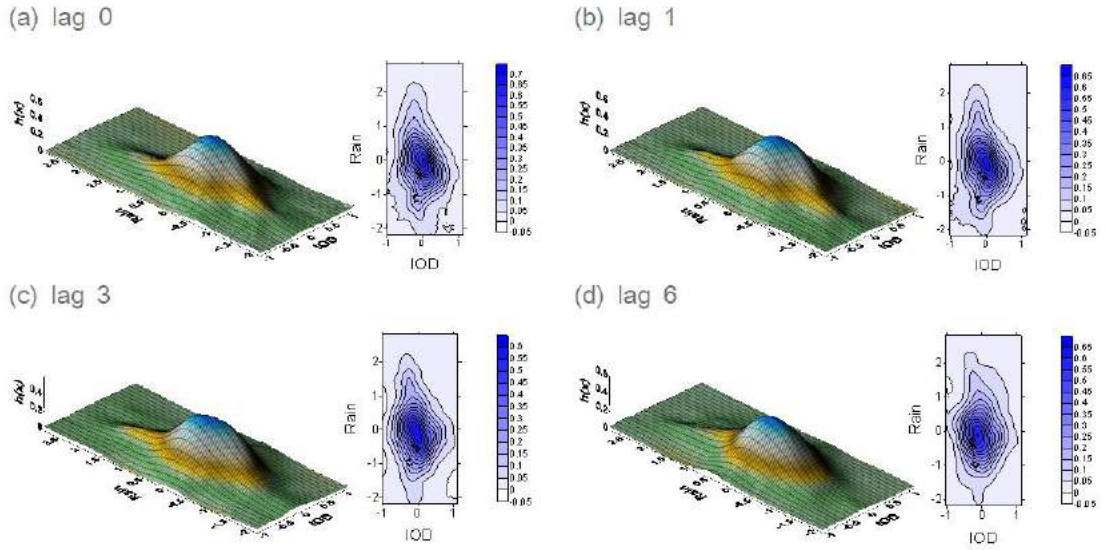


Figure 48. 3D and 2D joint probability kernel density functions both normalized 5-month moving average precipitation and IOD index in the Korean Peninsula. (a) to (d) indicates lag 0, 1, 3, and 6, respectively.

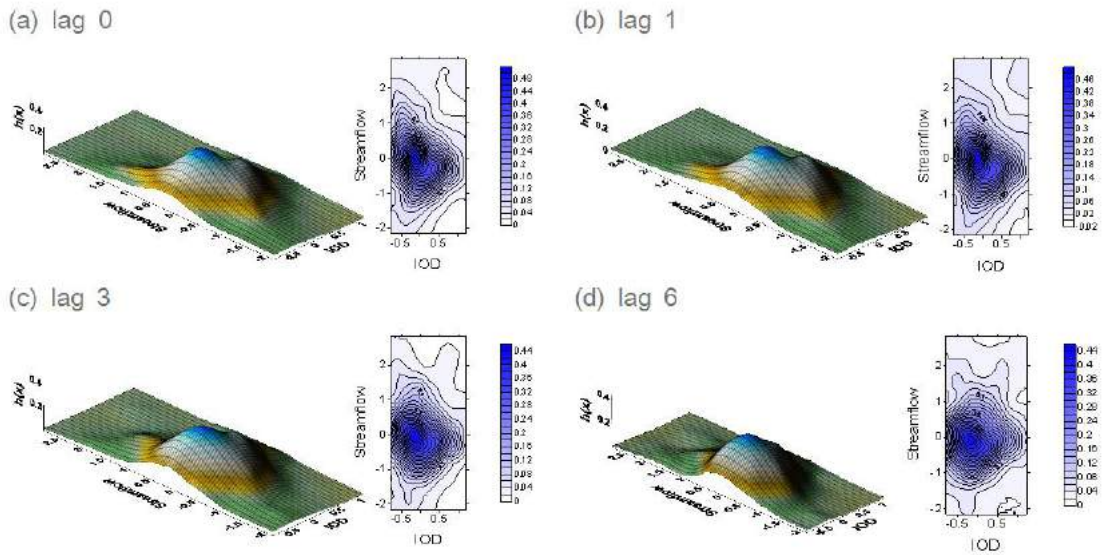


Figure 49. Same as Figure 48. but for streamflow.

4.6 MI 기법을 이용한 지체시간별 선형/비선형 상관 분석결과

우리나라는 여름철에 강수집중에 의한 유출량이 발생하며, 계절적 성분이 뚜렷한 연주기 특성을 갖는다. 그러나 해수면온도 변화에 의한 엘니뇨와 라니냐, 인도양쌍극자모드 현상의 경우 보통 2~8년의 주기 특성을 갖는 매우 불규칙한 자료이다. 이러한 두 자료간의 상관 분석을 하기에 앞서 자료가 가지는 고유의 특성을 잃지 않는 범위 내에서 여러 가지 방법을 사용하여 연주기와 경향성을 제거하고 상관분석을 실시하여야 한다. 본 연구에서는 이러한 불규칙한 두 자료간의 선형 및 비선형 상관분석을 위하여 Mutual Information을 사용하였으며, MI 값을 이용한 선형/비선형 상관분석 식은 다음과 같다.

기후인자와 수문변량간의 MI 분석 결과로부터, 표준정규분포를 따르는 두 변량 (X, Y) 의 선형상관관계 분석을 위하여 Joe (1989)가 제안한 다음 Eq.(10)을 사용하였다.

$$I(X; Y) = -0.5 \log[1 - \rho(X, Y)^2] \quad (10)$$

여기서, $I(X; Y)$ 는 MI 분석을 통하여 산정된 평균 MI값이며, $\rho(X, Y)$ 는 두 변량 (X, Y) 간의 선형상관관계를 의미한다.

또한, MI기반 비선형상관관계(MI-based Non-linear CC) 분석은 λ [$0 \leq \lambda \leq 1$]를 구함으로 산정할 수 있다. 표준정규분포를 따르는 두 변량 (X, Y) 로부터 추정된 평균 MI값을 통하여 λ 를 구하는 방법은 다음 Eq.(11)과 같다(Joe, 1989; Granger and Lin, 1994).

$$\hat{\lambda}(X, Y) = \sqrt{1 - \exp[-2\hat{I}(X; Y)]} \quad (11)$$

여기서, $\hat{I}(X; Y)$ 는 두 변수 X, Y 를 통하여 산정된 평균 MI값이며, $\hat{\lambda}(X, Y)$ 는 평균 MI값으로부터 추정된 두 변량 (X, Y) 간의 비선형 상관관계(Nonlinear CC)이다.

MI값으로부터 두 변수의 선형상관(Linear Regression, LR) 분석은 앞서 제시한 Joe(1989)가 제안한 Eq.(10)을 이용하였으며, 비선형상관 분석은 Kernel Density Estimation(KDE) 방법을 적용하여 산정한 MI값을 Eq.(11)에 적용하여 λ 를 구함으로

써 산정하였다. 또한 Bootstrap Resampling Technique을 적용하여 지체시간별 90% 신뢰구간을 산정하였다.

Figure 50은 MI 기법을 이용하여 한반도와 5대강유역의 강수량자료와 ENSO(N_{CT})지수와의 지체시간별 선형 및 비선형 상관분석을 실시한 결과이다. 선형상관분석 결과, N_{CT} 지수와 한반도 강수량과의 상관계수 값은 0.118로 분석되었으며, 7개월 지체 상관을 보이는 것으로 나타났다. 또한 5대강유역의 경우 한강(CC=0.476, lag=4), 낙동강(CC=0.125, lag=4), 금강(CC=0.111, lag=3), 섬진강(CC=0.117, lag=2), 영산강(CC=0.122, lag=2)로 분석되었다. 또한 비선형상관분석결과, N_{CT} 지수와 한반도 강수량의 상관계수 값은 0.459로 분석되었으며, 7개월 지체 상관을 보이는 것으로 나타났다. 또한 5대강유역의 경우 한강(CC=0.784, lag=4), 낙동강(CC=0.470, lag=4), 금강(CC=0.447, lag=3), 섬진강(CC=0.458, lag=2), 영산강(CC=0.466, lag=2)로 분석되었다.

다음으로 Figure 51는 MI 기법을 이용하여 한반도와 5대강유역의 유출량자료와 ENSO(N_{CT})지수와의 지체시간별 선형 및 비선형 상관분석을 실시한 결과이다. 선형 상관분석결과, N_{CT} 지수와 한반도 유출량은 지체 없는 상관을 보이는 것으로 나타났으며, 상관계수 값은 0.142로 분석되었다. 또한 5대강유역의 경우 한강(CC=0.303, lag=0), 낙동강(CC=0.207, lag=0), 금강(CC=0.274, lag=0), 섬진강(CC=0.151, lag=2), 영산강(CC=0.157, lag=2)로 분석되었다. 또한 비선형상관분석결과, N_{CT} 지수와 한반도 유출량과의 상관계수 값은 0.498로 분석되었으며, 지체 없는 상관을 보이는 것으로 나타났다. 또한 5대강유역의 경우 한강(CC=0.674, lag=0), 낙동강(CC=0.582, lag=0), 금강(CC=0.650, lag=0), 섬진강(CC=0.511, lag=2), 영산강(CC=0.519, lag=2)로 분석되었다. N_{CT} 지수와 수문변량간의 상관분석결과를 종합해 보면, 전반적으로 선형상관 분석 보다 비선형상관분석의 결과가 상관성이 높게 나타났으며, 강수량의 경우 유역별 2개월에서 7개월의 지체상관이 나타났고, 유출량의 경우 지체 없는 상관과 2개월의 지체상관이 있는 것으로 분석되었다.

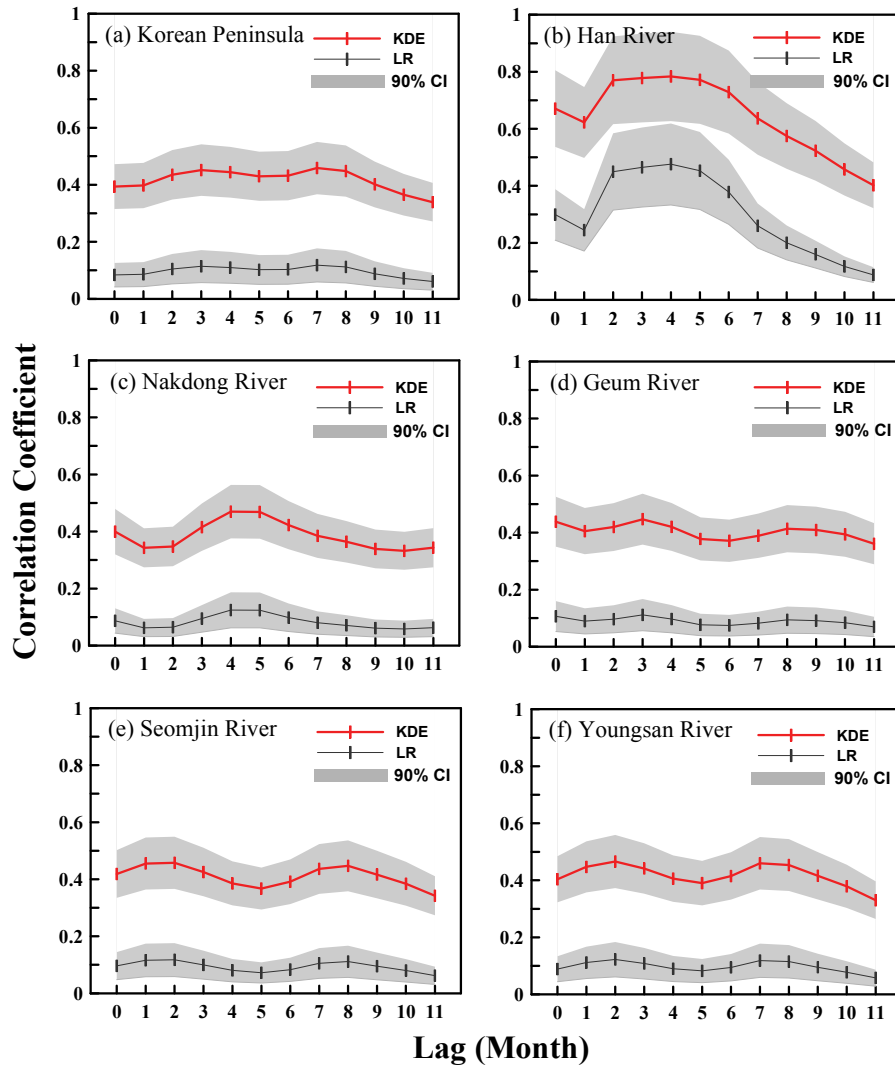


Figure 50. Nonlinear and linear CCs with their 90% confidence bounds between N_{CT} index and monthly precipitation of (a) Korean Peninsula, (b) Han River, (c) Nakdong River, (d) Geum River, (e) Seomjin River, and (f) Youngsan River using KDE and LR approaches, respectively. The confidence bounds are given by 5% and 95% quantiles of 1000 bootstrap replications.

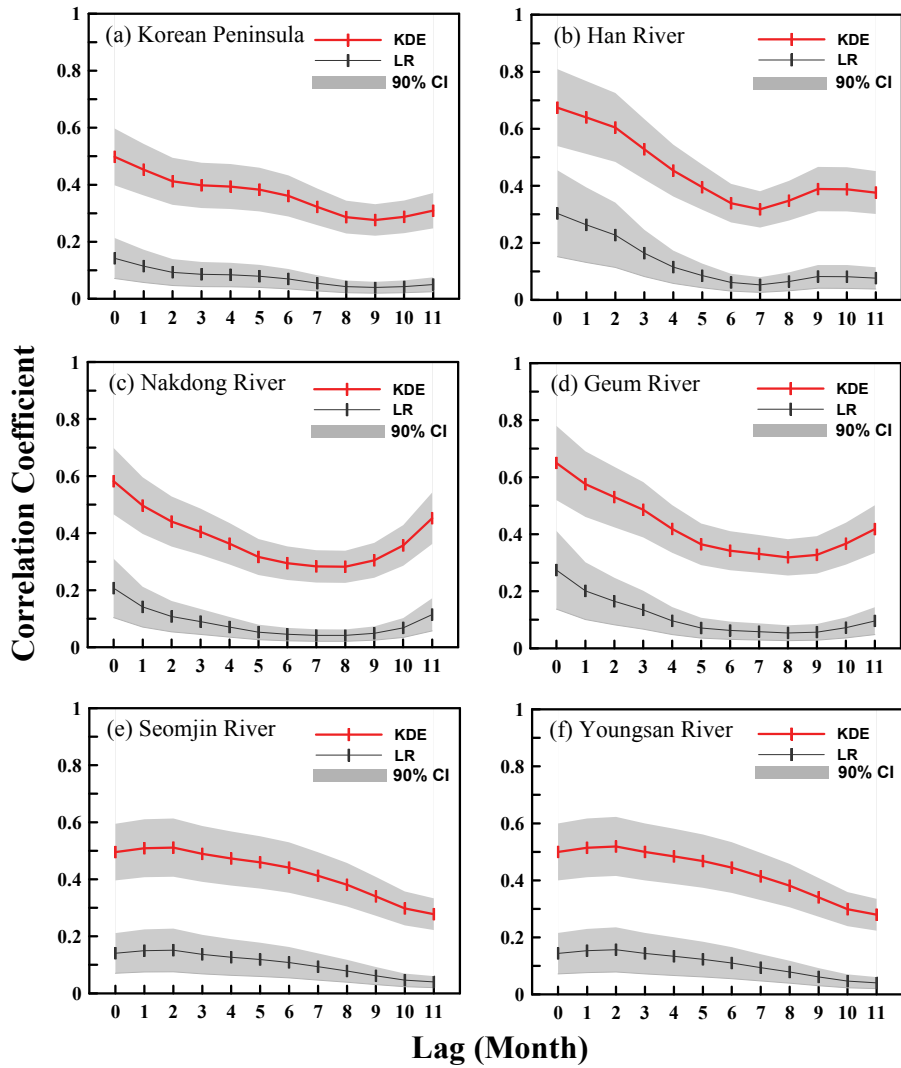


Figure 51. Same as Figure 50. but for streamflow.

Figure 52는 MI 기법을 이용하여 한반도와 5대강유역의 강수량자료와 ENSO (N_{WP})지수와의 지체시간별 선형 및 비선형 상관분석을 실시한 결과이다. 선형상관분석 결과, N_{WP} 지수와 한반도 강수량과의 상관계수 값은 0.182로 분석되었으며, 5개월 지체 상관을 보이는 것으로 나타났다. 또한 5대강유역의 경우 한강(CC=0.357, lag=11), 낙동강(CC=0.128, lag=6), 금강(CC=0.166, lag=4), 섬진강(CC=0.157, lag=2), 영산강(CC=0.178, lag=2)로 분석되었다. 또한 비선형상관분석결과, N_{WP} 지수와 한반도 강수량의 상관계수 값은 0.553으로 분석되었으며, 5개월 지체 상관을 보이는 것으로 나타났다. 또한 5대강유역의 경우 한강(CC=0.714, lag=11), 낙동강(CC=0.475, lag=6), 금강(CC=0.531, lag=4), 섬진강(CC=0.520, lag=2), 영산강(CC=0.547, lag=2)로 분석되었다.

다음으로, Figure 53은 MI 기법을 이용하여 한반도와 5대강유역의 유출량자료와 ENSO(N_{WP})지수와의 지체시간별 선형 및 비선형 상관분석을 실시한 결과이다. 선형 상관분석결과, N_{WP} 지수와 한반도 유출량은 지체 없는 상관을 보이는 것으로 나타났으며, 상관계수 값은 0.104로 분석되었다. 또한 5대강유역의 경우 한강(CC=0.233, lag=7), 낙동강(CC=0.206, lag=0), 금강(CC=0.132, lag=9), 섬진강(CC=0.160, lag=11), 영산강(CC=0.162, lag=11)로 분석되었다. 또한 비선형상관분석결과, N_{WP} 지수와 한반도 유출량과의 상관계수 값은 0.433으로 분석되었으며, 지체 없는 상관을 보이는 것으로 나타났다. 또한 5대강유역의 경우 한강(CC=0.610, lag=7), 낙동강(CC=0.581, lag=0), 금강(CC=0.482, lag=9), 섬진강(CC=0.524, lag=11), 영산강(CC=0.526, lag=11)로 분석되었다. N_{WP} 지수와 수문변량간의 상관분석결과를 종합해 보면, 전반적으로 선형상관분석 보다 비선형상관분석의 결과가 상관성이 높게 나타났으며, 강수량의 경우 유역별 1개월에서 11개월의 지체상관이 나타났고, 유출량의 경우 지체 없는 상관과 2개월에서 11개월의 지체상관이 있는 것으로 분석되었다.

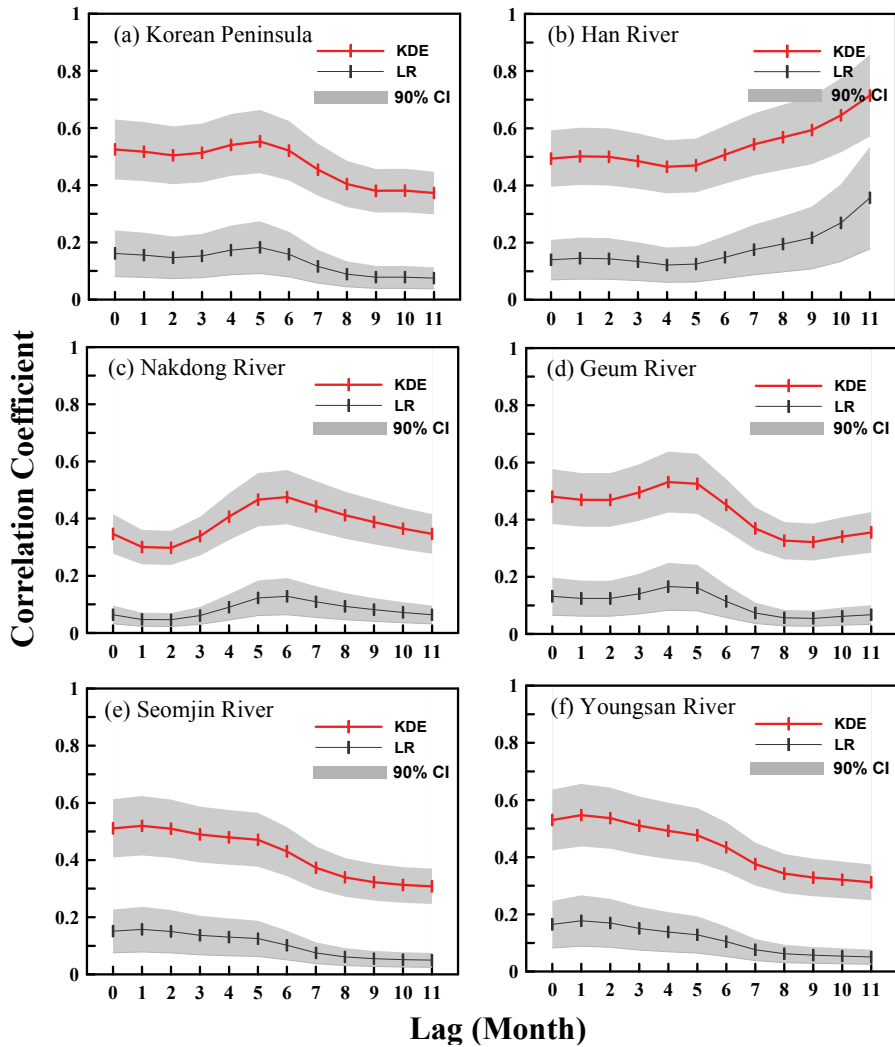


Figure 52. Nonlinear and linear CCs with their 90% confidence bounds between N_{WP} index and monthly precipitation of (a) Korean Peninsula, (b) Han River, (c) Nakdong River, (d) Geum River, (e) Seomjin River, and (f) Youngsan River using KDE and LR approaches, respectively. The confidence bounds are given by 5% and 95% quantiles of 1000 bootstrap replications.

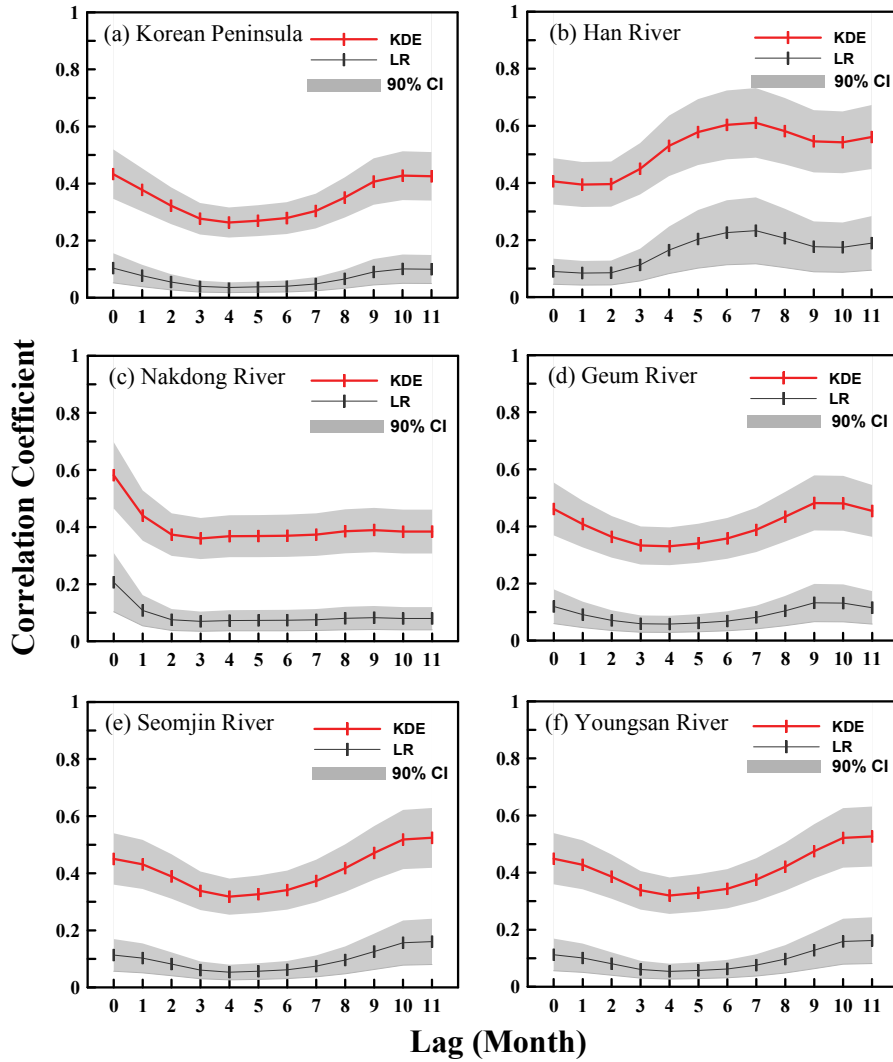


Figure 53. Same as Figure 52. but for streamflow.

Figure 54는 MI 기법을 이용하여 한반도와 5대강유역의 강수량자료와 IOD지수와 지체시간별 선형 및 비선형 상관분석을 실시한 결과이다. 선형상관분석결과, IOD지수와 한반도 강수량과의 상관계수 값은 0.315로 분석되었으며, 지체 없는 상관을 보이는 것으로 나타났다. 또한 5대강유역의 경우 한강(CC=0.164, lag=0), 낙동강(CC=0.504, lag=0), 금강(CC=0.431, lag=0), 섬진강(CC=0.383, lag=0), 영산강(CC=0.367, lag=0)로 분석되었다. 또한 비선형상관분석결과, IOD지수와 한반도 강수량의 상관계수 값은 0.684로 분석되었으며, 지체 없는 상관을 보이는 것으로 나타났다. 또한 5대강유역의 경우 한강(CC=0.528, lag=0), 낙동강(CC=0.797, lag=0), 금강(CC=0.760, lag=0), 섬진강(CC=0.731, lag=0), 영산강(CC=0.721, lag=0)로 분석되었다.

다음으로, Figure 55는 MI 기법을 이용하여 한반도와 5대강유역의 유출량자료와 IOD지수와 지체시간별 선형 및 비선형 상관분석을 실시한 결과이다. 선형 상관분석결과, IOD지수와 한반도 유출량은 지체 없는 상관을 보이는 것으로 나타났으며, 상관계수 값은 0.390으로 분석되었다. 또한 5대강유역의 경우 한강(CC=0.205, lag=0), 낙동강(CC=0.568, lag=0), 금강(CC=0.532, lag=0), 섬진강(CC=0.299, lag=0), 영산강(CC=0.303, lag=0)로 분석되었다. 또한 비선형상관분석결과, IOD지수와 한반도 유출량과의 상관계수 값은 0.736으로 분석되었으며, 지체 없는 상관을 보이는 것으로 나타났다. 또한 5대강유역의 경우 한강(CC=0.580, lag=0), 낙동강(CC=0.824, lag=0), 금강(CC=0.809, lag=0), 섬진강(CC=0.671, lag=0), 영산강(CC=0.674, lag=0)로 분석되었다. IOD지수와 수문변량간의 상관분석결과를 종합해 보면, 전반적으로 선형상관분석 보다 비선형상관분석의 결과가 상관성이 높게 나타났으며, 비교적 높은 상관성을 보이고 있음을 확인하였다. 강수량과 유출량 모두 모든 유역에서 지체 없는 상관을 보였으며, IOD의 직접적인 한반도 수문변동 영향을 확인할 수 있었다.

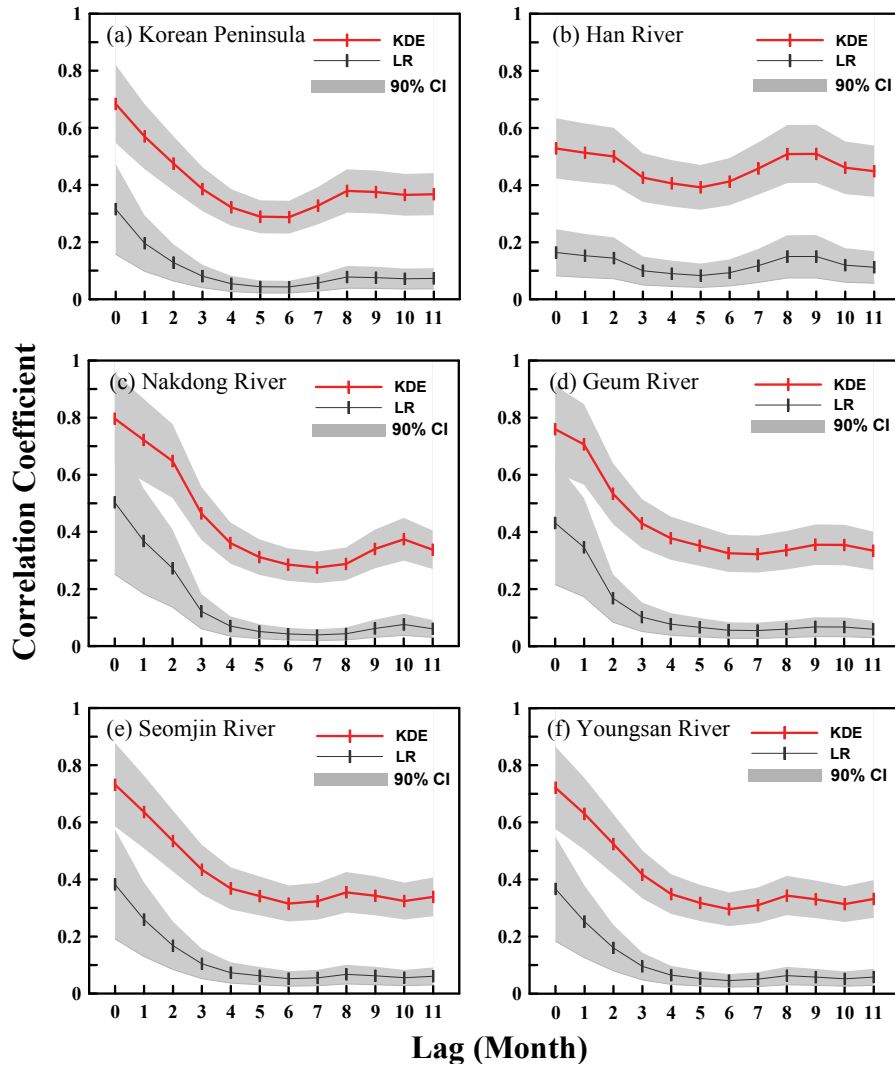


Figure 54. Nonlinear and linear CCs with their 90% confidence bounds between IOD index and monthly precipitation of (a) Korean Peninsula, (b) Han River, (c) Nakdong River, (d) Geum River, (e) Seomjin River, and (f) Youngsan River using KDE and LR approaches, respectively. The confidence bounds are given by 5% and 95% quantiles of 1000 bootstrap replications.

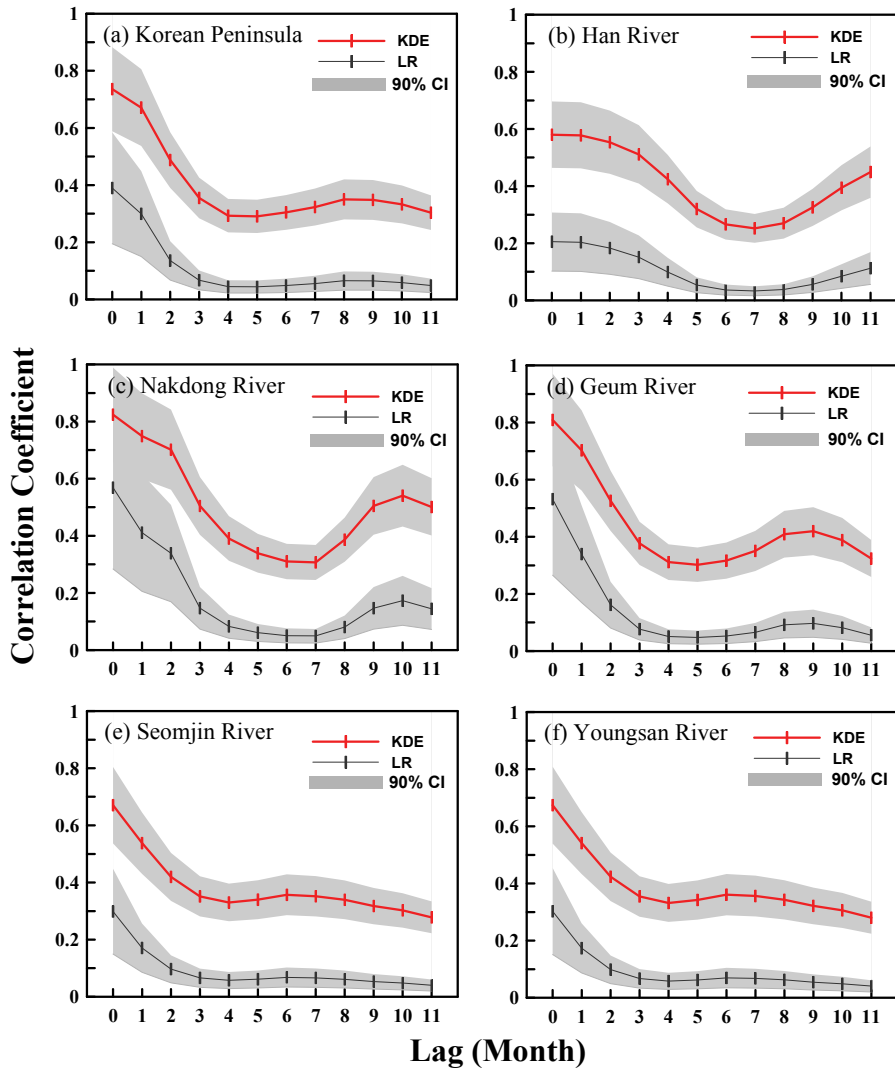


Figure 55. Same as Figure 54. but for streamflow.

5. 극한기후 패턴 변화에 따른 한반도 수문변동영향

5.1 ENSO 패턴 변화에 따른 한반도 수문변동영향

CT/WP 엘니뇨와 라니냐가 한반도 지역과 5대강 유역 여름철(June to September, JJAS) 강수량과 유출량의 패턴변화에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 한반도 총 113개 중권역별 1966년부터 2011년까지의 일강수량과 일유출량 자료를 대상으로 6개의 강한 CT 엘니뇨해와 6개의 강한 WP 엘니뇨해, 그리고 5개의 강한 라니냐해로 구분하여 여름철 계절강수량의 백분위 편차의 변화량과 변동특성을 분석하였다. 통계적으로 유의한 경향이 있는 유역을 사선으로 나타내었으며, 강수량과 유출량의 30년 평년값과의 합성편차분석(composite analysis, CA)을 실시하였으며, Student's *t*-test의 90% 신뢰수준에서 유의성검정을 실시하였다.

5.1.1 ENSO 변동에 따른 강수량 패턴 분석 결과

CT 엘니뇨 decaying해의 전체 강수량은 평년에 비하여 -7.06% 감소하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 전체 강수량은 한강유역 0.35% 증가, 낙동강유역 -6.19% 감소, 금강유역 -6.57% 감소, 섬진강유역 -9.41% 감소, 그리고 영산강유역 -13.50% 감소하는 것으로 분석되었다. 또한, T test에 의한 전체 강수량 변화량의 감소경향을 분석한 결과 90% 신뢰구간(significant level: $\alpha=0.10$)에서 한반도 남서부 일부 16개(한강: 0개, 낙동강: 2개, 금강: 0개, 섬진강: 4개, 영산강: 10개) 중권역을 중심으로 전체 강수량 편차의 유의할만한 감소패턴이 분석되었다(Figure 56a). CT 엘니뇨 decaying해의 여름철(JJAS) 부분 강수량은 평년에 비하여 -11.18% 감소하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 부분 계절강수량은 한강유역 1.05% 증가, 낙동강유역 -8.53% 감소, 금강유역 -12.16% 감소, 섬진강유역 -14.18% 감소, 그리고 영산강유역 -22.06% 감소하는 것으로 분석되었다. 또한, T test에 의한 여름철 강수량 변화량의 감소경향을 분석한 결과 90% 신뢰구간(significant level: $\alpha=0.10$)에서 한반도 남서부 일부 13개(한강: 0개, 낙동강: 2개, 금강: 0개, 섬진강: 1개, 영산강: 10개) 중권역을 중심으로 여름철 강수량 편차의 유의할만한 감소패턴이 분석되었다(Figure 57a). 분석결과 CT 엘니뇨 decaying해의 전체 강수량과 여름철 강수량은 평년에 비하여 약한 감소하는 패턴이 있

는 것으로 분석되며, 여름철 강수량의 감소폭이 큰 것으로 나타나 전체 강수량에 감소에 여름철 강수량 감소가 영향을 미쳤을 것으로 판단되며, 한강유역을 제외한 나머지 모든 유역에서 강수량의 약한 감소경향이 나타남을 확인할 수 있다.

WP 엘니뇨 decaying해의 전체 강수량은 평년에 비하여 10.94% 증가하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 전체 강수량은 한강유역 16.68% 증가, 낙동강유역 11.73% 증가, 금강유역 15.57% 증가, 섬진강유역 8.02% 증가, 그리고 영산강유역 2.69% 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, T test에 의한 전체 강수량 변화량의 증가경향을 분석한 결과 90% 신뢰구간(significant level: $\alpha=0.10$)에서 한강의 중서부 대부분 유역과 금강유역을 포함한 낙동강 중남부 일부 유역 44개(한강: 19개, 낙동강: 9개, 금강: 14개, 섬진강: 2개, 영산강: 0개) 중권역을 중심으로 전체 강수량 편차의 유의할만한 증가패턴이 분석되었다(Figure 56b). WP 엘니뇨 decaying해의 여름철(JJAS) 부분 강수량은 평년에 비하여 20.09% 증가하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 부분 계절강수량은 한강유역 27.05% 증가, 낙동강유역 20.64% 증가, 금강유역 31.22% 증가, 섬진강유역 14.72% 증가, 그리고 영산강유역의 경우 6.38% 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, T test에 의한 여름철 강수량 변화량의 증가경향을 분석한 결과 90% 신뢰구간(significant level: $\alpha=0.10$)에서 한강 중남부 유역과 금강 대부분 유역을 포함한 낙동강 일부 유역 26개(한강: 12개, 낙동강: 3개, 금강: 10개, 섬진강: 1개, 영산강: 0개) 중권역을 중심으로 여름철 강수량 편차의 유의할만한 증가패턴이 분석되었다(Figure 57b). 분석결과 WP 엘니뇨 decaying해의 전체 강수량과 여름철 강수량은 평년에 비하여 증가 패턴이 있는 것으로 분석되며, 여름철 강수량의 증가폭이 큰 것으로 보아 전체 강수량 증가에 여름철 강수량 증가가 영향을 미쳤으며, 5대강 유역 모두 평균강수량의 뚜렷한 증가패턴이 나타남을 확인하였다.

라니냐 decaying해의 전체 강수량은 평년에 비하여 6.99% 증가하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 전체 강수량은 한강유역 5.59% 증가, 낙동강유역 6.71% 증가, 금강유역 8.59% 증가, 섬진강유역 7.40% 증가, 그리고 영산강유역 6.69% 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, T test에 의한 전체 강수량 변화량의 증가경향을 분석한 결과 90% 신뢰구간(significant level: $\alpha=0.10$)에서 한강의 남부 일부 유역과 낙동강 남서

부 유역, 금강 중서부 유역을 포함한 섬진강과 영산강 일부 유역 27개(한강: 2개, 낙동강: 9개, 금강: 9개, 섬진강: 5개, 영산강: 2개) 중권역을 중심으로 전체 강수량 편차의 유의할만한 증가패턴이 분석되었다(Figure 56c). 라니냐 decaying해의 여름철(JJAS) 부분 강수량은 평년에 비하여 12.74% 증가하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 부분 계절강수량은 한강유역 9.78% 증가, 낙동강유역 9.93% 증가, 금강유역 17.70% 증가, 섬진강유역 10.40% 증가, 그리고 영산강유역의 경우 15.87% 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, T test에 의한 여름철 강수량 변화량의 증가경향을 분석한 결과 90% 신뢰구간(significant level: $\alpha=0.10$)에서 한강유역 금강산댐(ID: 1008)에서는 유의할만한 감소패턴이 나타났으나, 한강일부 유역과 낙동강, 금강 일부 유역 6개(한강: 3개, 낙동강: 2개, 금강: 1개, 섬진강: 0개, 영산강: 0개) 중권역을 중심으로 여름철 강수량 편차의 유의할만한 증가패턴이 분석되었다(Figure 57c). 분석결과 라니냐 decaying해의 전체 강수량과 여름철 강수량은 평년에 비하여 약한 증가 패턴이 있는 것으로 분석되며, 전체 강수량 증가에 여름철 강수량 증가가 영향을 미친 것으로 분석되며, 5대강 유역 모두 강수량의 약한 증가경향이 나타남을 확인하였다.

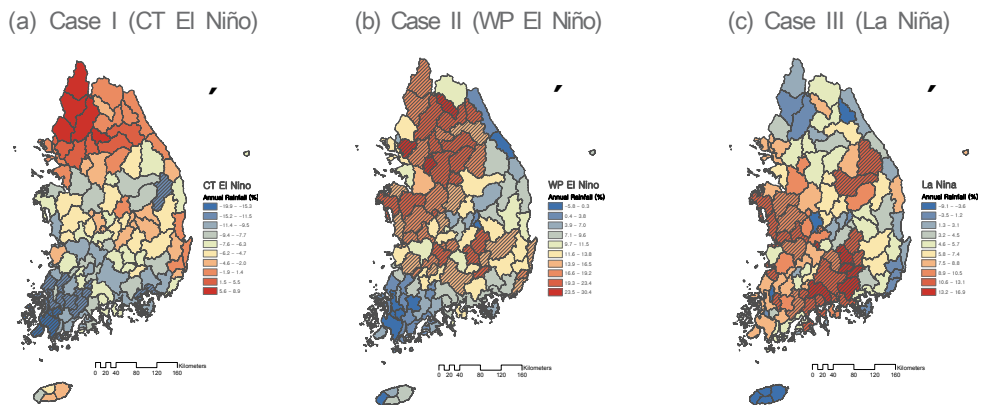


Figure 56. Composite anomalies of annual rainfall during CT/WP El Niño and La Niña years. The hatched polygons indicate statistically significant changes in annual rainfall based on the 10% significance level.

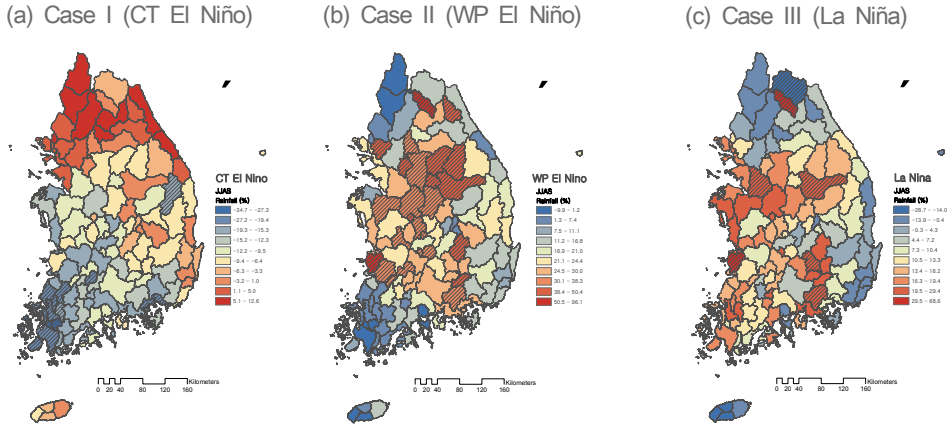


Figure 57. Same as Figure 56. but for JJAS rainfall.

5.1.2 ENSO 변동에 따른 유출량 패턴 분석 결과

CT 엘니뇨 decaying해의 전체 유출량은 평년에 비하여 -10.04% 감소하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 전체 유출량은 한강유역 3.03% 증가, 낙동강유역 -10.31% 감소, 금강유역 -8.67% 감소, 섬진강유역 -15.45% 감소, 그리고 영산강유역 -18.81% 감소하는 것으로 분석되었다. 또한, T test에 의한 전체 유출량 변화량의 감소경향을 분석한 결과 90% 신뢰구간(significant level: $\alpha=0.10$)에서 한반도 남부 일부 15개(한강: 0개, 낙동강: 6개, 금강: 0개, 섬진강: 3개, 영산강: 6개) 중권역을 중심으로 전체 유출량 편차의 유의할만한 감소패턴이 분석되었다(Figure 58a). CT 엘니뇨 decaying해의 여름철(JJAS) 부분 유출량은 평년에 비하여 -18.28% 감소하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 부분 계절유출량은 한강유역 1.41% 증가, 낙동강유역 -19.89% 감소, 금강유역 -16.83% 감소, 섬진강유역 -25.17% 감소, 그리고 영산강유역의 경우 -30.91% 감소하는 것으로 분석되었다. 또한, T test에 의한 여름철 유출량 변화량의 감소경향을 분석한 결과 90% 신뢰구간(significant level: $\alpha=0.10$)에서 한반도 남부 대부분 유역 25개(한강: 0개, 낙동강: 7개, 금강: 1개, 섬진강: 6개, 영산강: 11개) 중권역에서 여름철 유출량 편차의 유의할만한 감소패턴이 분석되었다(Figure 59a). 분석결과 CT 엘니

노 decaying해의 전체 유출량과 여름철 유출량은 평년에 비하여 감소하는 패턴이 뚜렷한 것으로 분석되며, 전체 유출량 감소에 여름철 유출량 감소가 영향을 미쳤을 것으로 판단되며, 한강유역을 제외한 나머지 모든 유역에서 유출량의 약한 감소경향이 나타남을 확인할 수 있다.

WP 엘니뇨 decaying해의 전체 유출량은 평년에 비하여 15.88% 증가하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 전체 유출량은 한강유역 23.96% 증가, 낙동강유역 18.73% 증가, 금강유역 23.22% 증가, 섬진강유역 1.81% 증가, 그리고 영산강유역 1.66% 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, T test에 의한 전체 유출량 변화량의 증가경향을 분석한 결과 90% 신뢰구간(significant level: $\alpha=0.10$)에서 한강의 대부분 유역과 금강 대부분 유역, 그리고 낙동강 중남부 유역과 섬진강 일부 유역 47개(한강: 20개, 낙동강: 10개, 금강: 14개, 섬진강: 3개, 영산강: 0개) 중권역을 중심으로 전체 유출량 편차의 유의할만한 증가패턴이 분석되었다(Figure 58b). WP 엘니뇨 decaying해의 여름철(JJAS) 부분 유출량은 평년에 비하여 24.52% 증가하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 부분 계절유출량은 한강유역 33.16% 증가, 낙동강유역 26.83% 증가, 금강유역 39.10% 증가, 섬진강유역 19.63% 증가, 그리고 영산강유역의 경우 3.89% 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, T test에 의한 여름철 유출량 변화량의 증가경향을 분석한 결과 90% 신뢰구간(significant level: $\alpha=0.10$)에서 한강 중남부 유역과 금강 일부 유역, 낙동강과 섬진강 일부 24개(한강: 11개, 낙동강: 3개, 금강: 8개, 섬진강: 2개, 영산강: 0개) 중권역을 중심으로 여름철 유출량 편차의 유의할만한 증가패턴이 분석되었다(Figure 59b). 분석결과 WP 엘니뇨 decaying해의 전체 유출량과 여름철 유출량은 평년에 비하여 증가 패턴이 있는 것으로 분석되며, 여름철 유출량의 증가폭이 전체 유출량 증가폭에 비하여 큰 것으로 보아 전체 유출량 증가에 여름철 유출량 증가가 영향을 미쳤으며, 5대강 유역 모두 평균유출량의 뚜렷한 증가패턴이 나타남을 확인하였다.

라니냐 decaying해의 전체 유출량은 평년에 비하여 9.92% 증가하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 전체 유출량은 한강유역 6.76% 증가, 낙동강유역 4.96% 증가, 금강유역 13.91% 증가, 섬진강유역 11.67% 증가, 그리고 영산강유역의 경우 12.28% 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, T test에 의한 전체 유출량 변화량의 증가경향을 분

석한 결과 90% 신뢰구간(significant level: $\alpha=0.10$)에서 낙동강 남서부 일부 유역, 금강 중서부 유역을 포함한 섬진강과 영산강 일부 유역에서 20개(한강: 1개, 낙동강: 3개, 금강: 9개, 섬진강: 4개, 영산강: 3개) 중권역을 중심으로 전체 유출량 편차의 유의할만한 증가패턴이 분석되었다(Figure 58c). 라니냐 decaying해의 여름철(JJAS) 부분 유출량은 평년에 비하여 17.35% 증가하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 부분 계절유출량은 한강유역 12.25% 증가, 낙동강유역 9.59% 증가, 금강유역 26.08% 증가, 섬진강유역 15.93% 증가, 그리고 영산강유역의 경우 22.88% 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, T test에 의한 여름철 유출량 변화량의 증가경향을 분석한 결과 90% 신뢰구간(significant level: $\alpha=0.10$)에서 한강일부 유역과 낙동강, 금강 일부 유역 8개(한강: 2개, 낙동강: 2개, 금강: 4개, 섬진강: 0개, 영산강: 0개) 중권역을 중심으로 여름철 유출량 편차의 유의할만한 증가패턴이 분석되었다(Figure 59c). 분석결과 라니냐 decaying해의 전체 유출량과 여름철 유출량은 평년에 비하여 약한 증가 패턴이 있는 것으로 분석되며, 이러한 경향은 5대강 유역 모두에서 나타남을 확인하였다.

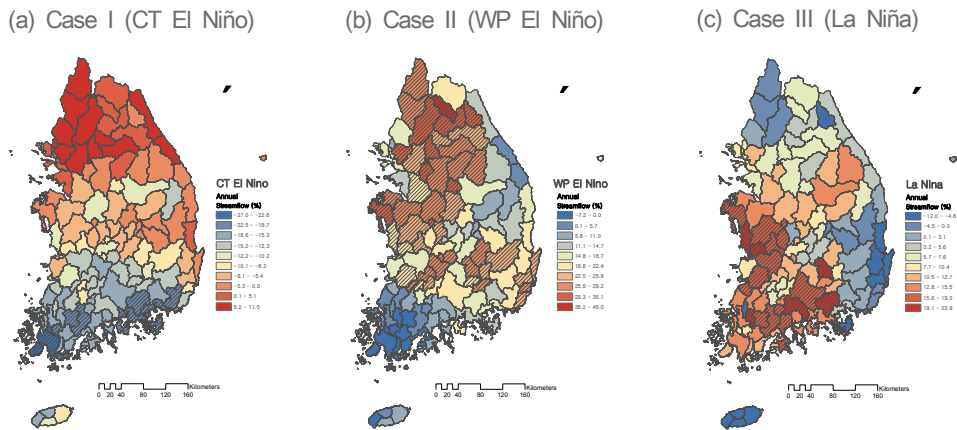


Figure 58. Composite anomalies of annual streamflow during CT/WP El Niño and La Niña years. The hatched polygons indicate statistically significant changes in annual streamflow based on the 10% significance level.

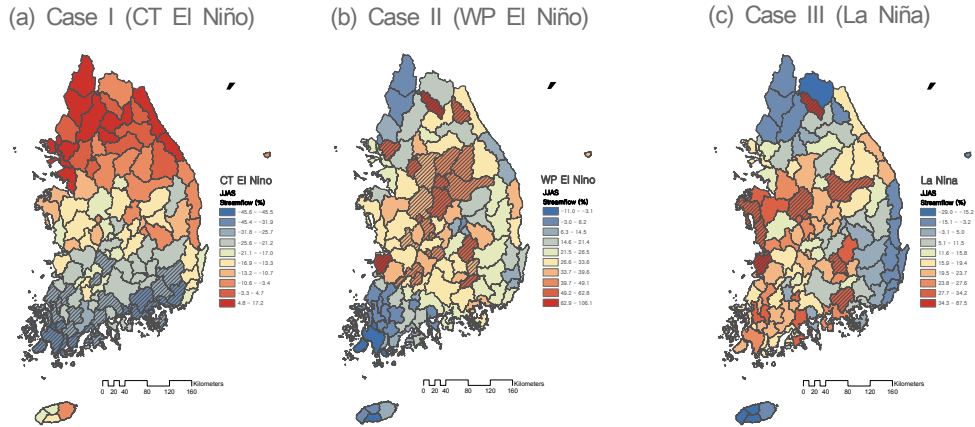


Figure 59. Same as Figure 58. but for JJAS streamflow.

5.1.3 ENSO 변동에 따른 한반도 수문 패턴 분석

Figure 60, 61은 한반도 113개 중권역과 5대강유역(한강: 30개 중권역, 낙동강: 33개 중권역, 금강: 21개 중권역, 섬진강: 15개 중권역, 영산강: 14개 중권역)에 대하여 CT 엘니뇨 decaying 해, WP 엘니뇨 decaying 해, 그리고 라니냐해로 구분하여 전체 기간과 여름철(JJAS)에 대하여 강수량과 유출량의 백분위 anomaly(1971~2000년) 편차의 산포도를 나타내었다.

전체기간 강수량의 경우, 강수량과 유출량의 백분위 anomaly 편차의 산포도 중심(Precipitation, Streamflow)이 CT 엘니뇨 해에는 (-5.85%, -9.09%)로, WP 엘니뇨 해에는 (12.15%, 21.87%)로, 라니냐 해에는 (6.85%, 12.13%)로 분석되었다. 5대강 유역별로 살펴보면, 한강유역의 경우, CT 엘니뇨에는 (0.36%, 1.05%)로, WP 엘니뇨 해에는 (16.69%, 27.49%)로, 라니냐 해에는 (5.56%, 9.78%)로 분석되었고, 낙동강유역의 경우, CT 엘니뇨 해에는 (-6.19%, -8.53%)로, WP 엘니뇨 해에는 (11.73%, 20.64%)로, 라니냐 해에는 (6.71%, 9.94%)로 분석되었다. 금강유역의 경우, CT 엘니뇨에는 (-6.57%, -12.16%)로, WP 엘니뇨 해에는 (15.58%, 31.21%)로, 라니냐 해

에는 (8.59%, 17.70%)로 분석되었고, 섬진강유역의 경우, CT 엘니뇨에는 (-9.42%, -14.19%)로, WP 엘니뇨 해에는 (8.02%, 14.72%)로, 라니냐 해에는 (7.40%, 10.38%)로 분석되었다. 그리고 영산강 유역의 경우, CT 엘니뇨에는 (-13.48%, -22.08%)로, WP 엘니뇨 해에는 (2.69%, 6.39%)로, 라니냐 해에는 (6.69%, 15.88%)로 분석되었다. 전체 기간 강수량과 유출량에 대하여 산포도 분석결과 전반적으로 강수량 증가에 따른 유출량 증가의 선형적인 분포특성을 보이는 것으로 나타났으며, 전반적으로 WP 엘니뇨 해에는 평년에 비하여 유역의 강수량과 유출량의 증가 특성이 뚜렷이 나타나며, CT 엘니뇨 해에는 주로 감소하는 경향이, 라니냐 해에는 평년의 상태를 유지하는 것으로 분석되었다(Figure 60a).

여름철(JJAS) 강수량의 경우, 강수량과 유출량의 백분위 anomaly 편차의 산포도 중심(Precipitation, Streamflow)이 CT 엘니뇨 해에는 (-8.20%, -15.73%)로, WP 엘니뇨 해에는 (17.93%, 26.99%)로, 라니냐 해에는 (8.89%, 15.85%)로 분석되었다. 5대강유역별로 살펴보면, 한강유역의 경우, CT 엘니뇨에는 (3.04%, -19.88%)로, WP 엘니뇨 해에는 (23.97%, 26.83%)로, 라니냐 해에는 (6.76%, 9.59%)로 분석되었고, 낙동강유역의 경우, CT 엘니뇨 해에는 (-10.31%, -19.88%)로, WP 엘니뇨 해에는 (18.74%, 26.83%)로, 라니냐 해에는 (4.96%, 9.59%)로 분석되었다. 금강유역의 경우, CT 엘니뇨에는 (-8.66%, -16.84%)로, WP 엘니뇨 해에는 (23.23%, 39.10%)로, 라니냐 해에는 (13.90%, 26.08%)로 분석되었고, 섬진강유역의 경우, CT 엘니뇨에는 (-15.46%, -25.17%)로, WP 엘니뇨 해에는 (11.80%, 19.64%)로, 라니냐 해에는 (11.66%, 15.94%)로 분석되었다. 그리고 영산강 유역의 경우, CT 엘니뇨에는 (-18.80%, -30.91%)로, WP 엘니뇨 해에는 (1.67%, 3.88%)로, 라니냐 해에는 (12.28%, 22.88%)로 분석되었다. 여름철 강수량과 유출량에 대하여 산포도 분석결과 전반적으로 강수량 증가에 따른 유출량 증가의 선형적인 분포특성을 보이는 것으로 나타났으며, 전반적으로 WP 엘니뇨 해에는 평년에 비하여 유역의 강수량과 유출량의 증가 특성이 뚜렷이 나타나며, CT 엘니뇨 해에는 주로 감소하는 경향이, 라니냐 해에는 평년의 상태를 유지하는 것으로 분석되었다(Figure 61a).

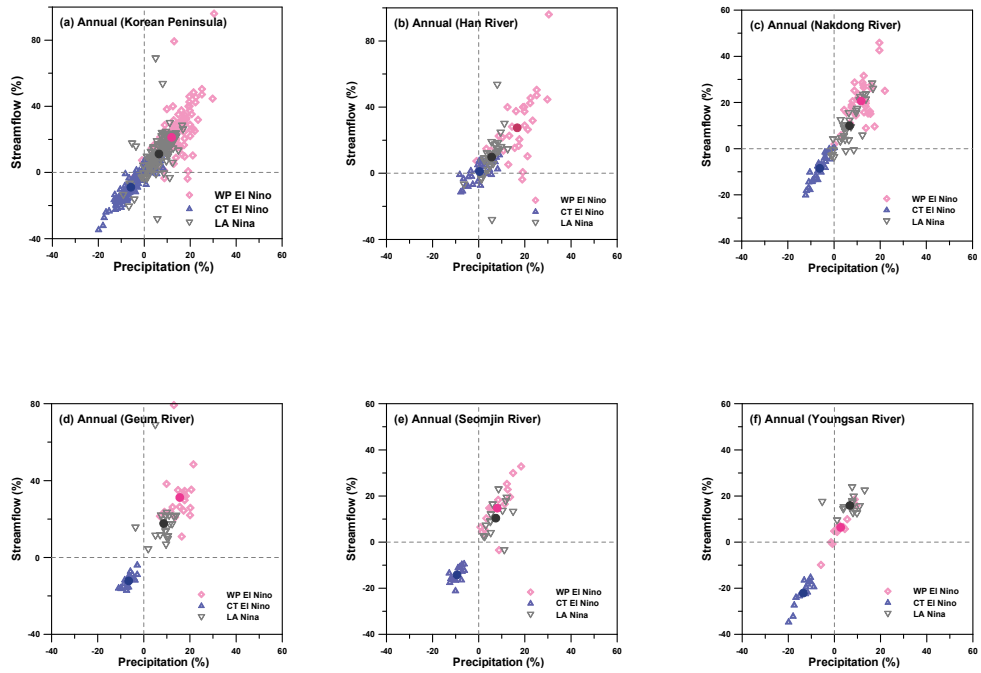


Figure 60. Percentage anomaly(departures from the 1971-2000 normals) changes between annual precipitation and annual streamflow in different ENSO types over the Korean Peninsula and their five major river basin.

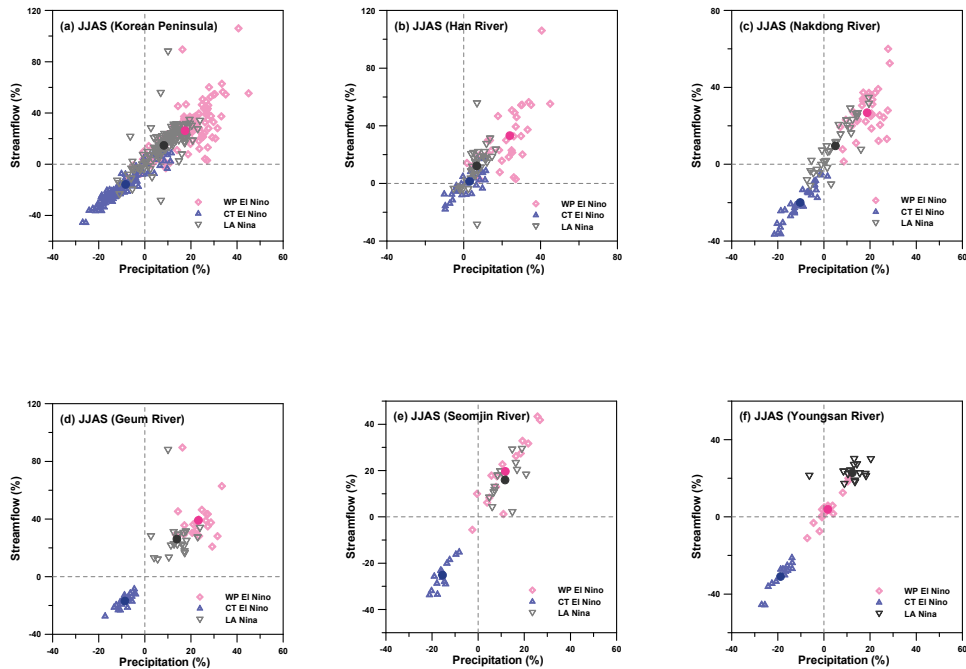


Figure 61. Same as Figure 60. but for JJAS season.

5.2 IOD 패턴 변화에 따른 한반도 수문변동 영향

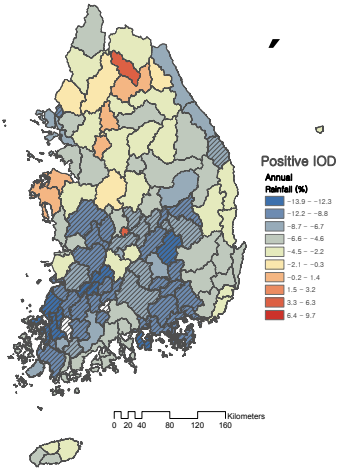
5.2.1 양(+)/음(-)의 IOD에 의한 한반도 강수량 영향 분석 결과

양(+)의 IOD 해의 전체 강수량은 평년에 비하여 -7.14% 감소하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 전체 강수량은 한강유역 -3.78% 감소, 낙동강유역 -7.46% 감소, 금강유역 -5.31% 감소, 섬진강유역 -8.62% 감소, 그리고 영산강유역의 경우 -10.54% 감소하는 것으로 분석되었다. 또한, T test에 의한 전체 강수량 변화량의 감소경향을 분석한 결과 90% 신뢰구간(significant level: $\alpha=0.10$)에서 한반도 중남부 대부분 46개(한강: 2개, 낙동강: 18개, 금강: 8개, 섬진강: 7개, 영산강: 11개) 중권역을 중심으로 전체

강수량 편차의 유의할만한 감소패턴이 분석되었다(Figure 62a). 양(+)의 IOD 해의 여름철(JJAS) 부분 강수량은 평년에 비하여 -14.74% 감소하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 부분 계절강수량은 한강유역 -9.82% 감소, 낙동강유역 -13.89% 감소, 금강유역 -11.96% 감소, 섬진강유역 -16.74% 감소, 그리고 영산강유역의 경우 -21.84% 감소하는 것으로 분석되었다. 또한, T test에 의한 여름철 강수량 변화량의 감소경향을 분석한 결과 90% 신뢰구간(significant level: $\alpha=0.10$)에서 한반도 중남부 대부분 유역 73개(한강: 8개, 낙동강: 23개, 금강: 14개, 섬진강: 14개, 영산강: 14개) 중권역에서 여름철 강수량 편차의 유의할만한 감소패턴이 분석되었다(Figure 63a). 분석결과 양(+)의 IOD 해의 전체 강수량과 여름철 강수량은 평년에 비하여 감소하는 패턴이 뚜렷한 것으로 분석되며, 여름철 강수량의 감소폭이 전체 강수량 감소폭에 비하여 큰 것으로 나타나 전체 강수량에 감소에 여름철 강수량 감소가 영향을 미쳤을 것으로 판단되며, 5대강 모든 유역에서 강수량의 강한 감소경향이 나타남을 확인할 수 있다.

음(-)의 IOD 해의 전체 강수량은 평년에 비하여 -1.07% 감소하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 전체 강수량은 한강유역 -5.93% 감소, 낙동강유역 0.38% 증가, 금강유역 -1.52% 감소, 섬진강유역 -1.12% 감소, 그리고 영산강유역의 경우 2.82% 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, T test에 의한 전체 강수량 변화량의 감소경향을 분석한 결과 90% 신뢰구간(significant level: $\alpha=0.10$)에서 한강일부와 금강일부 5개(한강: 4개, 낙동강: 0개, 금강: 1개, 섬진강: 0개, 영산강: 0개) 중권역을 중심으로 전체 강수량 편차의 유의할만한 감소패턴이 분석되었다(Figure 62b). 음(-)의 IOD 해의 여름철(JJAS) 부분 강수량은 평년에 비하여 -3.31% 감소하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 부분 계절강수량은 한강유역 -10.53% 감소, 낙동강유역 -3.15% 감소, 금강유역 -3.28% 감소, 섬진강유역 -2.77% 감소, 그리고 영산강유역의 경우 3.20% 감소하는 것으로 분석되었다. 또한, T test에 의한 여름철 강수량 변화량의 감소경향을 분석한 결과 90% 신뢰구간(significant level: $\alpha=0.10$)에서 한강과 금강 일부 7개(한강: 5개, 낙동강: 0개, 금강: 2개, 섬진강: 0개, 영산강: 0개) 중권역에서 여름철 강수량 편차의 유의할만한 감소패턴이 분석되었다(Figure 63b). 분석결과 음(-)의 IOD 해의 전체 강수량과 여름철 강수량은 평년에 비하여 다소 감소하는 패턴이 나타나는 것으로 분석되나 평년과 비슷한 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

(a) Case I (Positive IOD)



(b) Case II (Negative IOD)

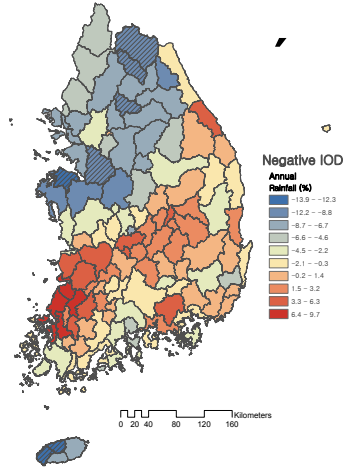
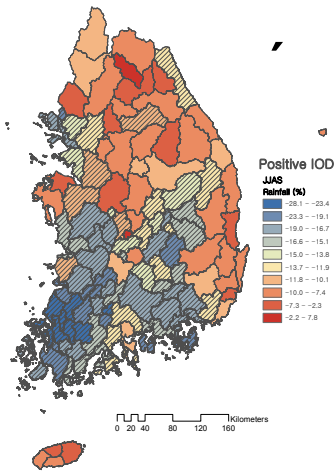


Figure 62. Composite anomalies of annual rainfall during positive and negative IOD years. The hatched polygons indicate statistically significant changes in annual rainfall based on the 10% significance level.

(a) Case I (Positive IOD)



(b) Case II (Negative IOD)

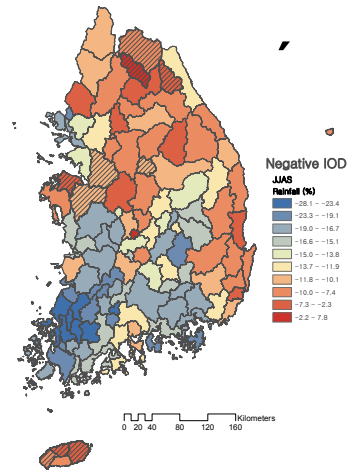


Figure 63. Same as Figure 62. but for JJAS rainfall.

5.2.2 양(+)/음(-)의 IOD에 의한 한반도 유출영향 분석 결과

양(+)의 IOD 해의 전체 유출량은 평년에 비하여 -11.61% 감소하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 전체 유출량은 한강유역 -5.78% 감소, 낙동강유역 -14.25% 감소, 금강유역 -10.28% 감소, 섬진강유역 -13.62% 감소, 그리고 영산강유역의 경우 -14.11% 감소하는 것으로 분석되었다. 또한, T test에 의한 전체 유출량 변화량의 감소 경향을 분석한 결과 90% 신뢰구간(significant level: $\alpha=0.10$)에서 한반도 중남부 32개(한강: 4개, 낙동강: 12개, 금강: 4개, 섬진강: 6개, 영산강: 6개) 중권역을 중심으로 전체 유출량 편차의 유의할만한 감소패턴이 분석되었다(Figure 64a). 양(+)의 IOD 해의 여름철(JJAS) 부분 유출량은 평년에 비하여 -16.69% 감소하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 부분 계절유출량은 한강유역 -10.75% 감소, 낙동강유역 -17.00% 감소, 금강유역 -15.35% 감소, 섬진강유역 -18.31% 감소, 그리고 영산강유역의 경우 -22.05% 감소하는 것으로 분석되었다. 또한, T test에 의한 여름철 유출량 변화량의 감소 경향을 분석한 결과 90% 신뢰구간(significant level: $\alpha=0.10$)에서 한반도 중남부 대부분의 52개(한강: 7개, 낙동강: 20개, 금강: 10개, 섬진강: 6개, 영산강: 9개) 중권역에서 여름철 유출량 편차의 유의할만한 감소패턴이 분석되었다(Figure 65a). 분석결과 양(+)의 IOD 해의 전체 유출량과 여름철 유출량은 평년에 비하여 감소하는 패턴이 뚜렷한 것으로 분석되며, 여름철 유출량의 감소폭이 전체 유출량 감소폭에 비하여 큰 것으로 나타나 전체 유출량에 감소에 여름철 유출량 감소가 영향을 미쳤을 것으로 판단되며, 5대강 모든 유역에서 유출량의 강한 감소경향이 나타남을 확인할 수 있다.

음(-)의 IOD 해의 전체 유출량은 평년에 비하여 -1.39% 감소하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 전체 유출량은 한강유역 -5.62% 감소, 낙동강유역 -0.05% 감소, 금강유역 -2.5% 감소, 섬진강유역 -2.81% 감소, 그리고 영산강유역의 경우 4.03% 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, T test에 의한 전체 유출량 변화량의 감소 경향을 분석한 결과 90% 신뢰구간(significant level: $\alpha=0.10$)에서 영산강 유역의 고막원천(ID: 5005)과 영산강하류(ID: 5006)유역에서는 유의할만한 증가경향이 나타났으며, 한강일부와 금강일부 5개(한강: 1개, 낙동강: 0개, 금강: 4개, 섬진강: 0개, 영산강: 0개) 중권역을 중심으로 전체 유출량 편차의 유의할만한 감소패턴이 분석되었다(Figure 64b). 음

(-)의 IOD 해의 여름철(JJAS) 부분 유출량은 평년에 비하여 -2.93% 감소하는 것으로 분석되었으며, 5대강 유역별 부분 계절유출량은 한강유역 -9.91% 감소, 낙동강유역 -3.13% 감소, 금강유역 -2.80% 감소, 섬진강유역 -4.51% 감소, 그리고 영산강유역의 경우 5.69% 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, T test에 의한 여름철 유출량 변화량의 감소경향을 분석한 결과 90% 신뢰구간(significant level: $\alpha=0.10$)에서 영산강유역 주진천(ID: 5301)에서는 유의할만한 증가패턴이 나타났으며, 한강과 금강 일부 6개(한강: 3개, 낙동강: 0개, 금강: 3개, 섬진강: 0개, 영산강: 0개) 중권역에서 여름철 유출량 편차의 유의할만한 감소패턴이 분석되었다(Figure 65b). 분석결과 음(-)의 IOD 해의 전체 유출량과 여름철 유출량은 평년에 비하여 다소 감소하는 패턴이 나타나는 것으로 분석되나 평년과 비슷한 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

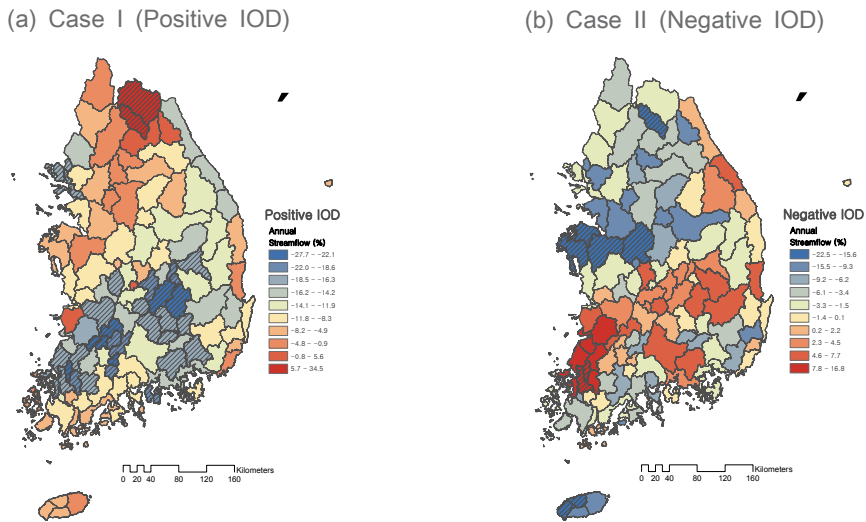


Figure 64. Composite anomalies of annual streamflow during positive and negative IOD years. The hatched polygons indicate statistically significant changes in annual streamflow based on the 10% significance level.

(a) Case I (Positive IOD)

(b) Case II (Negative IOD)

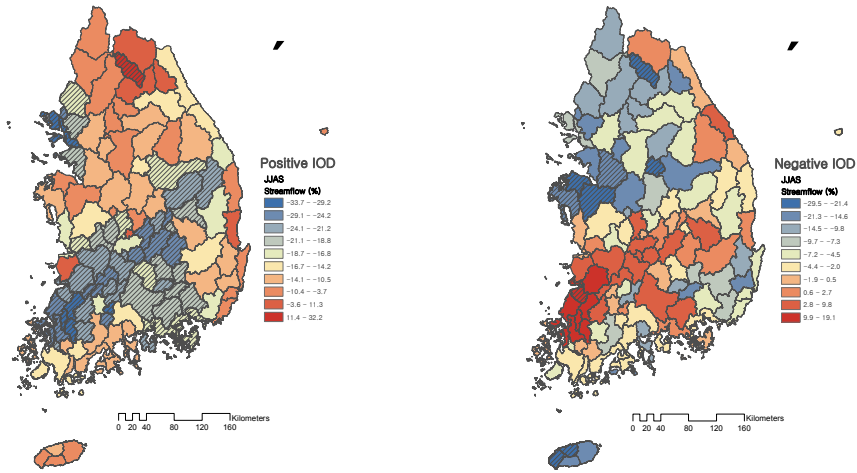


Figure 65. Same as Figure 64. but for JJAS streamflow.

5.2.3 IOD 진화 패턴에 따른 한반도 수문 변동영향 분석 결과

앞서 설명한 바와 같이, 양(+)¹⁾의 IOD와 음(-)²⁾의 IOD가 발달하기 시작하는 4월부터 최고조에 이르는 9월, 그리고 소멸하기 시작하는 그해 11월까지 3개월의 Time Window를 가지고 1개월씩 지체를 두어 이동하면서 IOD 진화 패턴에 따른 한반도 수문(강수량, 유출량) 변동영향 분석을 실시하였다.

5.2.3.1 IOD 진화 패턴에 따른 한반도 강수량 영향

Figure 66은 양(+)¹⁾의 IOD 해의 4월부터 11월까지의 진화패턴에 따른 한반도 영향 강수량의 변화를 분석한 결과이며, 평년에 비하여 한반도전체 강수량은 AMJ(April-June)일 때 -11.90% 감소, MJJ(May-July)일 때 -8.63 감소, JJA(June-August)일 때 -14.32% 감소, JAS(July-September)일 때 -9.92% 감소, ASO(August-October)일 때 -15.23% 감소, SON(September-November)일 때 -7.14%의 감소 패턴이 있는 것으로 분석되었다. 또한, T test에 의한 전체 강수량 변화량의 감소경향을 분석한 결과 90% 신뢰구간(significant level: $\alpha=0.10$)에서 한반도의 중남부 지역을 중심으로

AMJ: 44개, MJJ: 17개, JJA: 53개, JAS: 47개, ASO: 78개, SON: 8개의 중권역에서 유의할만한 감소 패턴이 있는 것으로 분석되었다. 종합해 보면, 양(+)¹⁾의 IOD 해의 경우 한반도 중남부 지역이 중북부 지역에 비하여 강수량 감소패턴이 유의한 수준에서 나타날 가능성이 높은 것으로 분석되며, 이러한 현상은 양(+)¹⁾의 IOD 해 4월에서 11월 사이 뚜렷하게 지속이 되며, ASO 기간(우리나라의 가을철)에는 평년에 비하여 뚜렷한 강수량 감소 패턴이 한반도의 중남부 지역을 중심으로 발생하게 됨을 확인할 수 있다.

Figure 67은 음(-)¹⁾의 IOD 해의 4월부터 11월까지의 진화패턴에 따른 한반도 영향 강수량의 변화를 분석한 결과이며, 평년에 비하여 한반도전체 강수량은 AMJ(April-June)일 때 -0.71% 감소, MJJ(May-July)일 때 7.91% 증가, JJA(June-August)일 때 -1.39% 감소, JAS(July-September)일 때 -4.05% 감소, ASO(August-October)일 때 -15.63% 감소, SON(September-November)일 때 -1.07%의 감소 패턴이 있는 것으로 분석되었다. 또한, T test에 의한 전체 강수량 변화량의 감소경향을 분석한 결과 90% 신뢰구간(significant level: $\alpha=0.10$)에서 MJJ기간에 한반도의 중남부 지역에서 14개 중권역의 강수량 증가 패턴이 발생하긴 하였으나, AMJ: 1개, MJJ: 1개, JJA: 1개, JAS: 10개, ASO: 57개, SON: 0개의 한반도 중북부 중권역에서 유의할만한 강수량 감소 패턴이 있는 것으로 분석되었다. 종합해 보면, 음(-)¹⁾의 IOD 해의 경우 양(+)¹⁾의 IOD 해와는 반대로 한반도 중북부 지역이 중남부 지역에 비하여 강수량 감소패턴이 유의한 수준에서 나타날 가능성이 높은 것으로 분석되며, 이러한 현상은 음(-)¹⁾의 IOD 해 4월에서 11월 사이 뚜렷하게 지속이 되며, ASO 기간(우리나라의 가을철)에는 평년에 비하여 뚜렷한 강수량 감소 패턴이 한반도의 중북부 지역을 중심으로 발생하게 됨을 확인할 수 있다.

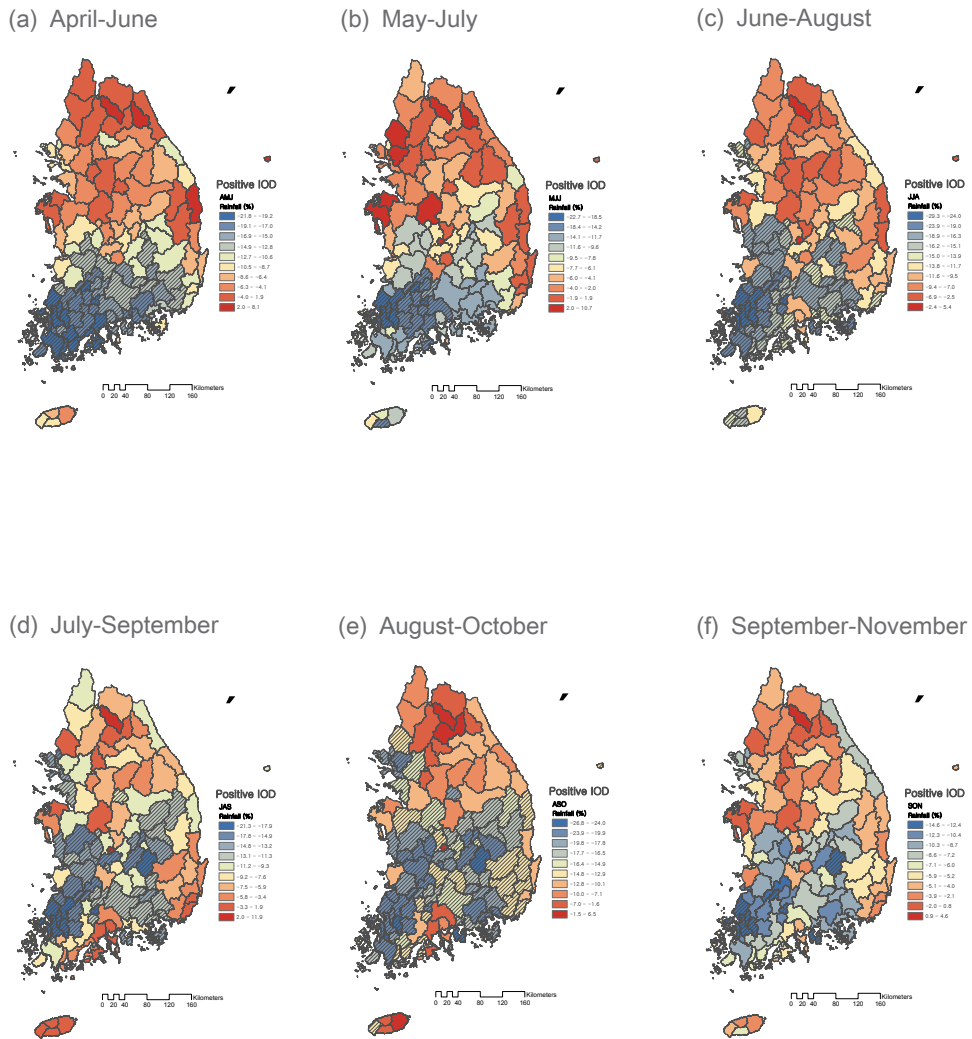
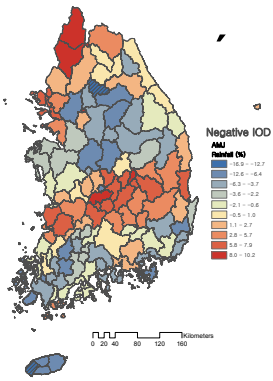
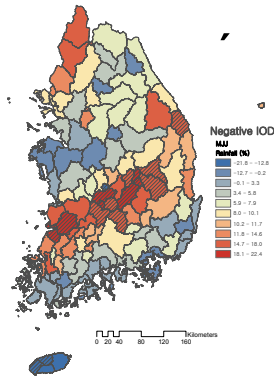


Figure 66. Three month rainfall patterns for Korean Peninsula averaged over all nine positive IOD events.

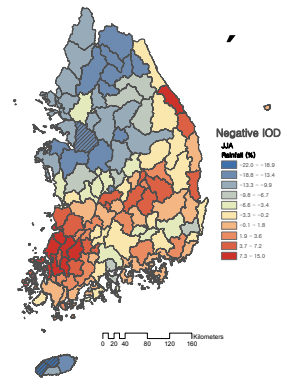
(a) April-June



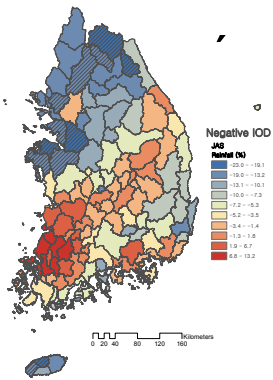
(b) May-July



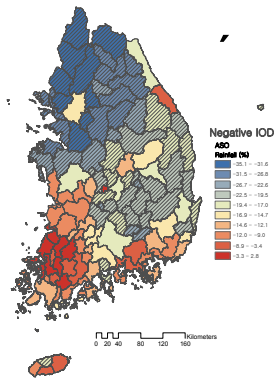
(c) June-August



(d) July-September



(e) August-October



(f) September-November

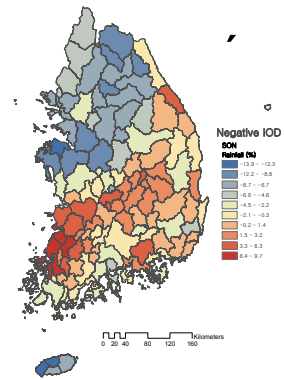


Figure 67. Same as Figure 66. but for streamflow.

5.2.3.2 IOD 진화 패턴에 따른 한반도 유출량 영향

Figure 68은 양(+)¹⁾의 IOD 해의 4월부터 11월까지의 진화패턴에 따른 한반도 영향 유출량의 변화를 분석한 결과이며, 평년에 비하여 한반도전체 유출량은 AMJ(April-June)일 때 -17.10% 감소, MJJ(May-July)일 때 -10.35% 감소, JJA(June-August)일 때 -16.52% 감소, JAS(July-September)일 때 -11.41% 감소, ASO(August-October)일 때 -19.66% 감소, SON(September-November)일 때 -13.35%의 감소 패턴이 있는 것으로 분석되었다. 또한, T test에 의한 전체 유출량 변화량의 감소경향을 분석한 결과 90% 신뢰구간(significant level: $\alpha=0.10$)에서 한반도의 중남부 지역을 중심으로 금강산댐(ID: 1008)과 평화의댐(ID: 1009), 인북천(ID: 1011)을 제외한 AMJ: 13개, MJJ: 3개, JJA: 13개, JAS: 22개, ASO: 58개, SON: 35개의 중권역에서 유의할만한 감소 패턴이 있는 것으로 분석되었다. 종합해 보면, 양(+)¹⁾의 IOD 해의 경우 한반도 중남부 지역이 중북부 지역에 비하여 유출량 감소패턴이 유의한 수준에서 나타날 가능성이 높은 것으로 분석되며, 이러한 현상은 양(+)¹⁾의 IOD 해 4월에서 11월 사이 뚜렷하게 지속이 되며, ASO 기간(우리나라의 가을철)에는 평년에 비하여 뚜렷한 유출량 감소 패턴이 한반도의 중남부 지역을 중심으로 발생하게 됨을 확인할 수 있다.

Figure 69는 음(-)²⁾의 IOD 해의 4월부터 11월까지의 진화패턴에 따른 한반도 영향 유출량의 변화를 분석한 결과이며, 평년에 비하여 한반도전체 유출량은 AMJ(April-June)일 때 0.08% 증가, MJJ(May-July)일 때 12.67% 증가, JJA(June-August)일 때 0.50% 증가, JAS(July-September)일 때 -2.68% 감소, ASO(August-October)일 때 -16.55% 감소, SON(September-November)일 때 -13.10%의 감소 패턴이 있는 것으로 분석되었다. 또한, T test에 의한 전체 유출량 변화량의 감소경향을 분석한 결과 90% 신뢰구간(significant level: $\alpha=0.10$)에서 MJJ기간의 경우 한반도의 중남부 지역 19개 중권역에서 유출량의 증가 패턴이 발생하였으며, 나머지 AMJ: 1개, MJJ: 0개, JJA: 0개, JAS: 6개, ASO: 42개, SON: 27개의 한반도 중북부 중권역에서 유의할만한 유출량 감소 패턴이 있는 것으로 분석되었다. 종합해 보면, 음(-)²⁾의 IOD 해의 경우 양(+)¹⁾의 IOD 해와는 반대로 한반도 중북부 지역이 중남부 지역에 비하여 유출량 감소패턴이 유의한 수준에서 나타날 가능성이 높은 것으로 분석되며, 이러한 현상은 음(-)²⁾의

IOD 해 4월에서 11월 사이에 뚜렷하게 지속이 되며, ASO 기간(우리나라의 가을철)에는 평년에 비하여 뚜렷한 유출량 감소 패턴이 한반도의 중북부 지역을 중심으로 발생하게 됨을 확인할 수 있다.

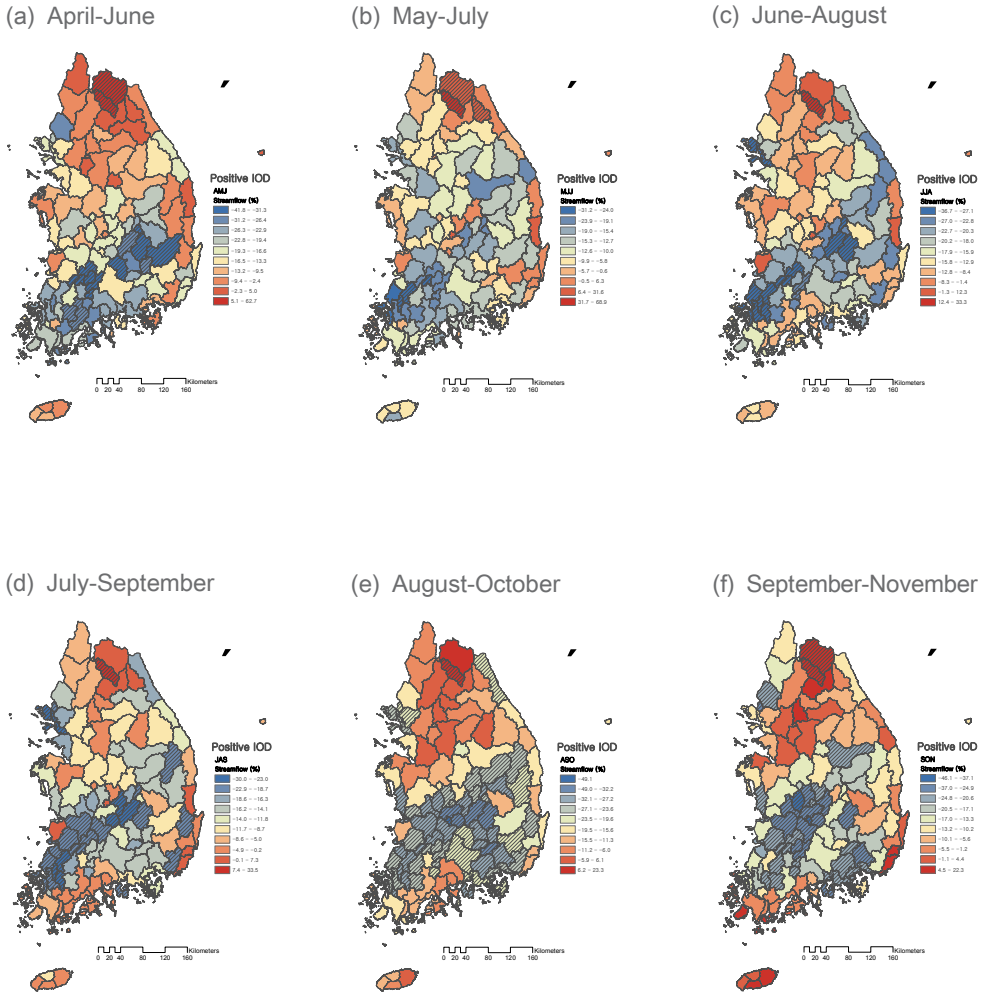
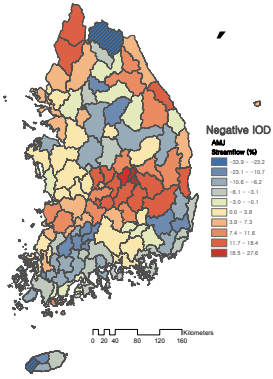
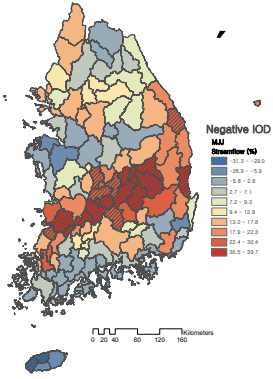


Figure 68. Three month streamflow patterns for Korean Peninsula averaged over all seven negative IOD events.

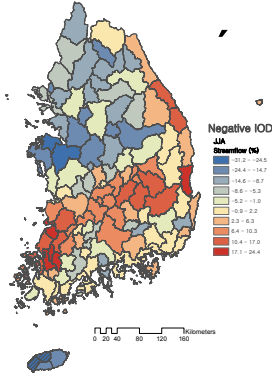
(a) April-June



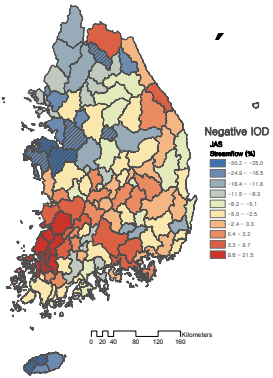
(b) May-July



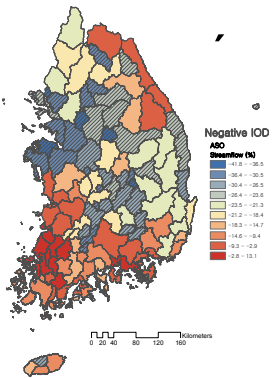
(c) June-August



(d) July-September



(e) August-October



(f) September-November

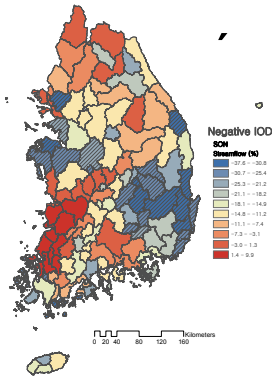


Figure 69. Same as Figure 68. but for streamflow.

5.2.4 IOD해의 한반도 강수량/유출량 패턴 분석

Figure 70, 71은 한반도 113개 중권역(한강: 30개 중권역, 낙동강: 33개 중권역, 금강: 21개 중권역, 섬진강: 15개 중권역, 영산강: 14개 중권역)과 5대강유역에 대하여 양(+)의 IOD 해와 음(-)의 IOD 해로 구분하여 전체 기간과 여름철(JJAS)에 대하여 강수량과 유출량의 백분위 anomaly(1971~2000년) 편차의 산포도를 나타내었다.

전체기간 강수량의 경우(Figure 70), 강수량과 유출량의 백분위 anomaly 편차의 산포도 중심(Precipitation, Streamflow)이 한반도는 양(+)의 IOD 해에는 (-6.62%, -11.16%)와, 음(-)의 IOD 해에는 (-1.54%, -1.85%)로 분석되었다. 5대강유역별로 살펴보면, 한강유역의 경우, 양(+)의 IOD 해에는 (-3.78%, -5.79%)로, 음(-)의 IOD 해에는 (-5.93%, -5.62%)로 분석되었고, 낙동강유역의 경우, 양(+)의 IOD 해에는 (-7.47%, -14.24%)로, 음(-)의 IOD 해에는 (0.38%, -0.05%)로 분석되었다. 금강유역의 경우, 양(+)의 IOD 해에는 (-5.32%, -10.28%)와, 음(-)의 IOD 해에는 (-1.52%, -2.50%)로 분석되었고, 섬진강유역의 경우, 양(+)의 IOD 해에는 (-8.61%, -13.63%)로, 음(-)의 IOD 해에는 (-1.12%, -2.82%)로 분석되었다. 그리고 영산강 유역의 경우, 양(+)의 IOD 해에는 (-10.55%, -14.11%)로, 음(-)의 IOD 해에는 (2.82%, 4.03%)로 분석되었다. 전체 기간 강수량과 유출량에 대하여 산포도 분석결과 전반적으로 강수량 감소에 따른 유출량 감소의 선형적인 분포특성을 보이는 것으로 나타났으며, 전반적으로 양(+)의 IOD 해에는 평년에 비하여 유역의 강수량과 감소 특성이 뚜렷이 나타나나 한강유역의 경우 평년과 비슷한 경향이 나타남을 확인하였고, 음(-)의 IOD 해에는 주로 강수량과 유출량이 감소하는 패턴이 보이거나 평년 상태를 유지하는 것으로 분석되었다(Figure 70a).

여름철(JJAS) 강수량의 경우(Figure 71), 강수량과 유출량의 백분위 anomaly 편차의 산포도 중심(Precipitation, Streamflow)이 한반도는 양(+)의 IOD 해에는 (-13.74%, -15.84%)로, 음(-)의 IOD 해에는 (-4.30%, -3.95%)로 분석되었다. 5대강유역별로 살펴보면, 한강유역의 경우, 양(+)의 IOD 해에는 (-9.82%, -10.75%)로, 음(-)의 IOD 해에는 (-10.53%, -3.13%)로 분석되었고, 낙동강유역의 경우, 양(+)의 IOD 해에는 (-13.89%, -17.01%)로, 음(-)의 IOD 해에는 (-3.15%, -3.13%)로 분석되었다. 금강유역의 경우, 양(+)의 IOD 해에는 (-11.96%, -15.36%)로, 음(-)의 IOD 해에는 (-3.27%, -2.79%)

로 분석되었고, 섬진강유역의 경우, 양(+)¹의 IOD 해에는 (-16.17%, -18.31%)로, 음(-)²의 IOD 해에는 (-2.77%, -4.51%)로 분석되었다. 그리고 영산강 유역의 경우, 양(+)¹의 IOD 해에는 (-21.84%, -22.05%)로, 음(-)²의 IOD 해에는 (3.19%, 5.69%)로 분석되었다. 여름철 강수량과 유출량에 대하여 산포도 분석결과 전반적으로 강수량 감소에 따른 유출량 감소의 선형적인 분포특성을 보이는 것으로 나타났으며, 전반적으로 양(+)¹의 IOD 해에는 평년에 비하여 유역의 강수량과 유출량의 감소 특성이 뚜렷이 나타나나 한강유역의 경우 평년과 비슷한 경향이 나타남을 확인하였고, 음(-)²의 IOD 해에는 주로 강수량과 유출량이 감소하는 패턴이 보이거나 평년 상태를 유지하는 것으로 분석되었다(Figure 71a).

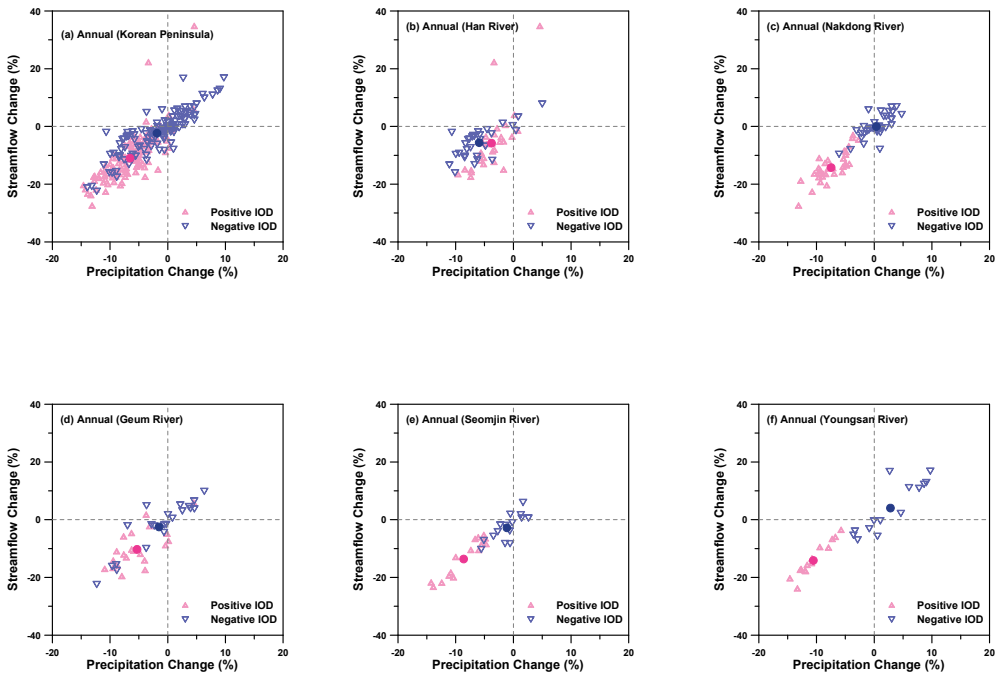


Figure 70. Percentage anomaly (departures from the 1971-2000 normals) changes between annual precipitation and annual streamflow in different IOD types (Positive and Negative) over the Korean Peninsula and their five major river basin.

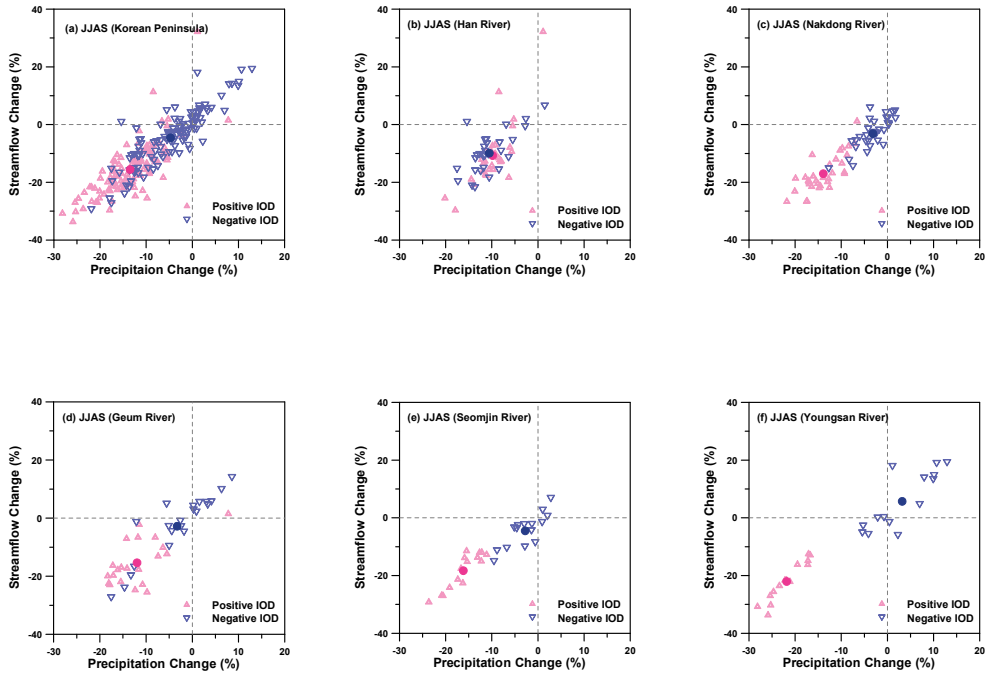


Figure 71. Same as Figure 70. but for JJAS season.

6. 활용방안 및 정책제언

원격상관 기반 극한기후패턴변화에 따른 한반도 지역수문변동영향 분석과 관련하여, 한반도 증장기 홍수 예측 결과의 예상 개별 수요처(국가안전처: 소방방재청, 국토교통부, 환경부, 기상청, 홍수통제소, 한국수자원공사, 지자체 등)의 실무 활용을 위한 방안 마련과 정책제언 연구를 위하여 관련 법제도 검토 및 국내외 물관리 체계 및 정책, 부처별 활용 방안 등을 검토하였다.

- 연구목표: 원격상관 기반 극한기후패턴변화에 따른 한반도 지역수문 변동 영향 분석
- 연구내용: 대표적 해양 관련 기후인자인 ENSO와 IDO 패턴 변화에 따른 한반도 수문변량과의 원격상관관계 분석
- 최종성과물 면적 해상도 : 한반도 5대강 대권역, 113개 중권역
- 최종성과물 시간 해상도 : 일강수량, 일유출량, 월강수량, 월유출량
- 예측 선행시간 : 홍수기 여름철(JJAS) 계절예측(3~6개월) 또는 1년

6.1 법제도 검토(관련 법규 및 지침)

본 절에서는 우리나라의 홍수(치수) 관련 법규 및 지침과 계획 등 법제 현황에 대해서 정리하였다.

- **기후기상학적인 요인**에 의한 홍수(치수) 관련 방재대책은 홍수 예·경보 시스템 및 대피체계와 관련이 높은 법규 및 지침으로 기상법, 민방위기본법, 자연재해대책법, 재난 및 안전관리 기본법, 저수지·댐의 안전관리 및 재해예방에 관한 법률, 하천법 등이 있는 것으로 분석된다.
- **공간적인 요인**에 의한 홍수(치수) 관련 방재대책은 재해위험 지역·지구 지정 및 정비, 공간계획과 관련이 높은 법규 및 지침으로 국토의 계획 및 이용에 관한 법률, 자연재해 대책법, 재난 및 안전관리기본법, 하천법, 광역도시계획 수립지침,

도시기본계획 수립지침, 도시관리계획 수립지침, 도(시·군) 풍수해 저감종합계획 세부 수립 지침, 자연재해 위험지구 관리지침, 지역별 방재성능 목표 설정운영 지침 등이 있는 것으로 분석된다.

- **시설물적 요인**에 의한 홍수(치수) 관련 방재대책은 자연재해대책법, 재난 및 안전관리 기본법, 재해구호법, 하천법, 도(시·군) 풍수해 저감종합계획 세부수립지침, 자연재해위험지구 관리지침, 지역별 방재성능 목표 설정운영 지침 등이 있는 것으로 분석된다.

기후기상학적 요인에 의한 재난재해 대책과 관련이 높은 방재계획은 재난 예·경보 체계구축 종합계획이 있으며, 공간적 요인인 방재대책과 관련이 높은 계획은 광역도시계획, 도시기본계획, 도시관리계획, 도(시·군) 풍수해저감종합계획 등이 있는 것으로 분석된다. 시설물적 요인인 방재대책과 관련이 높은 주요 방재계획은 도(시·군) 풍수해저감 종합계획, 자연재해위험 개선지구계획, 국가재정운용계획 등이 있는 것으로 분석된다. 홍수(치수) 관련 법규, 지침의 관리부서 및 주요 목적은 다음 Table 9에 정리하였다.

Table 9. 홍수(치수) 관련 법규 및 지침

법규 및 지침명	관리부서	주요 목적
국가재정운용계획	기획재정부	중기적 관점에서 재정운용전략을 제시하고 장단기의 재정전략을 연결하기 위해 수립하는 계획임
재난 예·경보 체계구축 종합계획	행정자치부	지구온난화 등의 최근 기상이변에 의한 집중호우 등으로 비정형적인 재난이 빈발함에 따라 지역적 피해를 최소화하기 위해 지역별 재난 예경보시스템을 구축하는 것을 목적으로 함
광역도시계획 수립지침	국토교통부	광역도시계획의 수립기준을 정함을 목적으로 함
국토의 계획 및 이용에 관한 법률	국토교통부	국토의 이용개발과 보전을 위한 계획의 수립 및 집행 등에 필요한 사항을 정하여 공공복리를 증진시키고 국민의 삶의 질을 향상시키는 것을 목적으로 함
도시관리계획 수립지침	국토교통부	도시관리계획의 수립기준 및 도시관리계획 도서와 이를 보조하는 계획실명서의 작성기준 및 방법을 정함을 목적으로 함
국가안전관리 기본계획	국토교통부	각종 재난 및 사고로부터 국민의 생명재산을 보호하기 위하여 국가의 재난 및 안전관리 기본방향을 설정하는 최상의 계획임
하천법	국토교통부	하천사용의 이익을 증진하고 하천을 자연친화적으로 정비, 보전하며 하천의 유수로 인한 피해를 예방하기 위하여 하천의 지정, 관리, 사용 및 보전 등에 관한 사항을 규정함으로써 하천을 적정하게 관리하고 공공복리의 증진에 이바지함을 목적으로 함
자연재해위험지구 관리지침	국가안전처 (소방방재청)	자연재해위험지구 지정 및 정비계획수립 등에 대한 세부운영 기준을 정하는데 목적이 있음
재난 및 안전관리 기본법	국가안전처 (소방방재청)	각종 재난으로부터 국토를 보존하고 국민의 생명신체 및 재산을 보호하기 위하여 국가와 지방자치단체의 재난 및 안전관리체제를 확립하고, 재난의 예방대바 대응 복구와 그 밖에 재난 및 안전관리에 필요한 사항을 규정함을 목적으로 함

Table 9. 홍수(치수) 관련 법규 및 지침 (계속)

법규 및 지침명	관리부서	주요 목적
도(시·군) 풍수해 저감종합계획 세부수립지침	국가안전처 (소방방재청)	시,도지사 및 시장군수구청장이 태풍, 홍수, 호우, 강풍, 풍랑, 해일, 조수, 대설과 같은 풍수해의 예방 및 저감을 위하여 지역특성을 고려한 피해발생원인, 재해위험도, 재해저감대책과 관련된 사항을 하천재해, 내수재해, 사면재해, 토사재해, 해안재해, 바람재해, 기타재해로 구분하고 종합적으로 조사분석하여 단위지구별·수계별, 전지역별로 풍수해를 저감시킬 목적으로 수립하는 중장기계획으로 방재분야 최상위 계획임
재해구호법	국가안전처 (소방방재청)	이재민의 구호와 의연금품의 모집절차 및 사용방법 등에 관하여 필요한 사항을 규정함으로써 이재민 보호와 그 생활안정에 이바지함을 목적으로 함
지역별 방재성능 목표 설정운영 지침	국가안전처 (소방방재청)	홍수, 호우 등 재해를 예방하기 위하여 특별시장 광역시장 및 시장(제주특별자치도의 행정시장을 포함한다.)군수가 지역별로 단기 및 중장기적인 강우량(시우량, 연속강우량) 설정 및 공표를 목적으로 함
저수지·댐의 안전관리 및 재해예방에 관한 법률	국가안전처 (소방방재청)	저수지·댐의 붕괴 등으로 인한 재해로부터 국민의 생명 신체 및 농경지 등 재산을 보호하기 위하여 저수지·댐의 안전관리와 재해예방을 위한 사전검·정비 및 해발생시 대응 등에 관하여 필요한 사항을 규정함으로써 저수지·댐의 효과적인 안전관리체계를 확립하고 공공의 안전에 이바지함을 목적으로 함
기상법	기상청	국가기상업무의 효율적 수행에 필요한 기본적인 사항을 정함으로써 기상업무의 건전한 발전에 힘쓰게 하여 기상재해로부터 국민의 생명과 재산을 보호하고 공공복리를 증진하는 데에 이바지함을 목적으로 함

6.2 국내외 물관리 체계 및 현황

6.2.1 국외의 물관리 체계 및 현황

주요 선진국의 물관리 체계를 비교·검토하여 Table 10과 같이 제시하였다. 미국과 일본은 수량·수질의 이원화 혹은 다원화를 택하고 있으나, 영국과 프랑스는 수량·수질의 일원화를 택하여 물관리 체계를 구성하고 있다. 댐운영 측면에서 살펴보면, 일본의 댐과리는 목적별로 다원화되어 있고, 홍수조절용댐은 국토교통성이, 다목적댐은수자원기구가 건설·관리하고 있으며, 홍수수력발전은 통상산업성, 관개용수는 농림수산성이 관리하고 있는 실정이다. 또한 미국의 댐관리는 수자원의 개발자에 따라 관리주체를 다원화하고 있으며 연방정부 및 주정부, 공병단(USACE), 개척국(USBR), 민간기업 등이 관련법규에 따라 사용용도별로 관리하고 있는 실정이다. 영국의 댐관리는 중앙정부의 환경청과 지자체에서 분담하고 있으며, 자문기구로는 환경오염위원회를 운영하고 있다. 마지막으로 프랑스의 댐관리는 민영회사인 프랑스 전력공사(EDF, Electricitu De France)에서 담당하고 있으며, 프랑스 전력공사는 세계에서 가장 큰 전력회사 중 하나로 프랑스 발전소의 건설, 운전과 보수 유지 그리고 송전과 배전 등의 업무를 담당하고 있는 것으로 확인되었다.

Table 10. 선진국의 물관리 체계 비교

구분	일본	미국	영국	프랑스
특징	수량-수질 다원화	수량-수질 이원화	수량-수질 부분적 일원화	수량-수질 일원화
수량 관리	-국토교통성 -후생성: 상수도 -통산성: 수력발전 -농림성: 관개용수 -지방 건설국, 지자체	-개척국(내무부) -공병단(국방부) -주 정부	-환경청 -환경식품농촌성 -지자체: 하수도	-환경부 -농업성: 관개, 배수 -내무성·지자체: 상수도
수질 관리	-환경청: 오염규제 -후생성: 음용수기준	-환경보호청: 수질 규제	-환경식품농촌성 -환경청	-환경부 -보건성: 음용수수질
댐·하천관리	국토교통성 수자원기구	연방정부, 주정부, 공병단, 개척국	환경청 지자체	환경부, 지자체, 연안소유자 조합
유역 관리	각 기관 업무조정 기구(협의체)를 통한 유역통합관리	주별 유역 통합 관리체계화	환경청을 중심으로 각 기관 유역 관리 업무조정	각 기관 업무조정을 통한 유역 통합관리

6.2.2 국내의 물관리 체계 및 현황

국내 물관리는 일본, 미국 등과 같이 수량과 수질을 이원화하여 관리하고 있으며 물 관리체계는 Table 11과 같다. 수량관리는 국토교통부에서 수자원의 장기계획 및 개발, 하천관리, 홍수통제 등과 같은 업무를 관장하고 있으며 환경부에서는 수질오염 규제, 상하수도 및 음용수의 수질관리 업무를 관장하고 있다. 특히 우리나라의 물관리는 주요 선진국의 경우와는 달리 관리대상 항목별 통합 운영되지 않고 있어 관련부처간의 유기적인 협조체계가 필요하다. 또한 2012년부터 4대강 사업의 준공에 따라 본격적인 댐·다기능 보 및 하천을 연계한 물관리가 진행되고 있다.

Table 11. 우리나라의 물관리 체계

물관리	관련부처	수자원관리	수자원개발
이수 -수량·하천관리 -생·공용수 -농업용수 -유지용수	국토교통부	-국가하천관리 -저수지관리 -광역상수도관리 -수문관측 -다목적댐 및 하구둑관리 -지하수관리	-다목적댐건설 -광역상수도건설 -내륙주운 및 운하건설
	산업통상자원부	-발전용댐관리 -소수력 -온천수개발	-발전용댐 건설 (양수발전포함)
	농림축산식품부	-관개용수(댐) 관리 -하구둑관리(농업용)	-농업용댐건설 -간척지 및 담수호개발 -농업용 지하수 개발
	행정자치부	-내수면어업 -수원지역관리 -상하수시설관리 -지방하수처리시설건설	-지방상수도건설
치수 -하천관리 -방재	국토교통부	-하천개수 및 정비사업 -주요하천의 홍수통제	-홍수예경보시설
	행정자치부	-소하천관리 -재해대책(풍수해관련)	-재해영향평가
환경 -수질	환경부 (기상청)	-기상관측 및 예보	
	환경부	-수질관측 및 규제 -하천정화 -음용수수질기준관리 -지방상하수도정비계획 하폐수처리시설관리 -도시하수처리시설건설 -공단폐수처리시설건설	-환경영향평가

6.3 부처별 활용방안

6.3.1 국토교통부, K-water, 홍수통제소, 지자체 활용방안

□ 극한홍수발생 장기예측 및 댐보, 저수지 운영체계 개선에 활용

기후변화 불확실성에 따른 홍수의 위험성은 날로 높아지고 있으나, 신규 댐 건설에는 상당한 기간과 예산이 소요되고, 환경문제로 댐 적지를 찾아 댐 건설을 추진하는 것도 쉽지 않은 일이 되었다. 따라서 기존의 댐을 보다 유효하게 활용하기 위해서는 갈수기에 많은 물을 모아두고, 큰 홍수가 예측되는 경우에 사전에 방류를 실시해 필요한 치수 용량을 확보하는 것이 중요하다. 현재 홍수발생시 발생하는 댐 운영상의 문제점은 다음과 같다.

- 극한 홍수 발생시 계획최대 방류량을 초과하는 방류가 필요하여 피해저감 효과가 낮아진다.
- 극한홍수 발생이 예상됨에도 불구하고 강우예측을 활용한 사전방류가 규정되어 있지 않아 사전방류가 이루어지기 어렵다.
- 중소규모 홍수로 끝날 것으로 예측되어 적정유량(무해방류) 이내로 방류하여 홍수조절이 가능하고 댐의 치수용량에도 여유가 있는 경우, 강우예측을 활용하지 않는 일정률, 일정량 방식을 대부분의 댐이 채택하고 있어, 적정용량(무해방류) 이상의 방류에 의하여 하류부에 피해가 발생할 우려가 있다.
- 이수용량을 홍수조절에 활용하지 못하기 때문에, 홍수조절 기능이 치수용량에만 한정되어 있다.
- 강우예측의 정확도가 명확하지 않아 강우예측을 활용한 조작법이 정립되어 있지 않으며, 강우예측 정보를 홍수조절에 활용하기에는 부족한 면이 있다.

※ 활용방안

- 원격상관기반 지자체별 중장기 수문변동 예측의 정확도 향상으로 홍수위험 예측 결과를 통한 지자체 물관련 자연재해 예측과 방재관련 실무지원에 활용
- ENSO, IOD 패턴 변화에 따른 수문변동 장기예측결과를 한국수자원공사에서 분석하고 있는 물공급전망 자료로 활용하여 여름철 홍수통제소 실무 지원
- 댐보 저수지 운영에 있어 원격상관기반 장기예측을 통한 사전방류를 위한 댐보 저수지 운영 매뉴얼 작성, 장기 홍수예측 정보를 이용한 댐보 저수지 운영 규칙의 명문화 및 규정화를 통한 책임 소재 명시 등의 과정 선행(법제화 추진)

□ 기후변화 취약성 평가에 장기홍수예측결과 활용(국토교통부 지침개정)

기후변화로 인하여 도심지에서 발생하는 피해를 저감하기 위하여 2012년 7월 우리나라 국토의 개발에 관한 최상위 법률인 ‘국토의 계획 및 이용에 관한 법률’이 개정되었다. 국토의 계획 및 이용에 관한 법률 제23조에서는 ‘특별시장·광역시장·특별자치시장·특별자치도지사·시장 또는 군수는 5년마다 관할 구역의 도시·군기본계획에 대하여 그 타당성 여부를 전반적으로 재검토하여 정비하여야 한다.’고 명시하였다. 그리고 도시 개발을 위한 장기계획인 ‘광역 도시계획 수립지침’, ‘도시군 기본계획 수립지침’과 ‘도시군 관리계획 수립지침’에 매 5년마다 기후변화로 인한 재해 취약성 분석을 수행하고, 계획 수립 시 반영토록 하고 있다.

Table 12. 기후변화에 따른 재해 취약성 평가 도시군 기본 및 관리계획 수립지침

관련지침	내 용
광역도시계획 수립지침	2-1-4. (4)기후변화에 따른 재해취약성 분석을 통해 광역계획권의 다양한 재해위험을 파악하고, 부문별 계획 수립시 반영하여 재해피해를 최소화하여야 한다.
도시·군기본 계획수립지침	3-2-3 (9)기후변화에 따른 재해취약성 분석을 통해 도시의 다양한 재해 위험을 파악하여 부문별 계획 수립시 반영하고, 재해취약성 저감방안을 제시하여야 한다. 6-1-6.도시군 기본계획은 당해 시·군의 자연적·사회적·경제적 조사와 5년 안에 시행이 예정되는 개발사업 등 계획 기술상 필요한 형태적·사실적 조사를 실시하고, 기후변화 재해취약성 분석을 수행한 후 수립한다.
도시·군 관리 계획수립지침	1-5-2-13. 도시·군 관리계획은 기후변화 재해 취약성 분석을 수행한 후 수립하고, 취약성 분석 결과를 토지이용, 기반시설 배치계획 등 부문별 계획에 반영한다. 1-6-1-1. 현황분석과 장래 전망, 기후변화 재해취약성 분석 및 계획내용에 대한 자세한 설명과 기존계획의 변경 또는 신규결정에 관한 조서를 포함한다. 8-1-1-3. 도시·군 관리계획안을 작성하기 전에 당해 시·군의 자연적·사회적·경제적 현황 조사와 계획상 필요한 현황조사를 실시하고 기후변화 재해취약성 분석을 수행하여 그 내용을 도시·군 관리계획서에 첨부한다.

※ 활용방안

- 도시군기본계획수립지침은 5년마다 기후변화에 따른 재해취약성 분석을 통하여 수립하게 되어 있으나, 원격상관기반 ENSO, IOD 패턴 변화에 따른 수문변동 영향 분석은 계절예측을 기본으로 하므로, 장기예측 결과를 6개월 또는 1년 단위로 확장하여 홍수위험평가를 통한 기후변화 취약성 분석에 활용가능
- 도시군관리계획수립지침에 기후변화 재해 취약성 분석을 매년 수행하도록 명시하고 장기 홍수예측 연구 결과를 도시군 관리에 반영하도록 하면, 본 연구의 결과 활용 가능

6.3.2 국가안전처(소방방재청), 풍수해 보험사 활용방안

□ 홍수보험 지원 및 수가 결정에 장기홍수예측 결과 활용

홍수재해를 보상하는 재정적 대책의 하나로 홍수피해의 경제적 보상, 구조적 홍수방어대책의 잔존위험 보충, 홍수위험에 대한 대국민 홍보효과 거양 및 홍수피해에 대한 재정부담 완화가 주요기능이다.

- **홍수보험의 시행 절차:** 홍수보험의 타당성을 조사 → 홍수터 관리법과 홍수보험법 제정 → 홍수보험 담당기구 설치와 임무수행 → 홍수위험도 작성 → 홍수 위험지구 고시 및 홍수보험 요율도 작성 → 홍수보험 실시와 홍수터 관리
- **장점:** 홍수손실 또는 피해복구 지원, 피해주민의 재정적 부담 경감, 구호금 절약, 사전투자 유도, 홍수위험지역에 거주하는 사람들에게 책임부여, 구조물적 대책으로 부족한 부분에 대한 적절한 보완기능 수행, 홍수위험에 대한 일반인들의 인식을 높임, 홍수위험에 대한 체계적인 조사와 홍수터관리를 선행함으로써 결과적으로 홍수피해 경감 가능, 재해 대비한 재정의 변동폭을 최소화함으로써 국가의 재정안정에 도움, 저소득층 거주 지역에 피해가 집중되므로 공공보험으로 시행 시 부의 재분배 효과
- **단점:** 민영보험회사의 참여가 어려움, 지속적인 홍수터 사용 조장, 국가홍수보험은 공공기금 이용 필요, 임의보험으로 시행 시 위험이 낮은 지역 주민들이 가입하지 않으므로 위험분산이 어려움, 홍수 피해자료와 각종 수문자료 등의 부족으로 홍수위험도 산정에 애로가 있음

※ 활용방안

- 해당년도 극한 기후(ENSO, IOD) 발생에 따른 유역 또는 지자체별 장기 홍수 위험예측으로 홍수위험지구 고시 및 홍수보험 요율도 재작성에 활용
- 해당년도 극한 기후(ENSO, IOD) 발생에 따른 장기 홍수위험 예측으로 해당 지역 홍수보험 가입 유도 및 홍수보험 가입률 향상 유도에 활용 가능
- 홍수위험에 대한 대국민 홍보효과 거양 및 홍수피해에 대한 재정부담 완화 효과

6.3.4 기타활용 방안

□ 기상청, 농림축산식품부에 활용

※ 활용방안

- 기상청의 중기(10일), 장기(1개월, 3개월) 예보, 장기 기후전망(약 6개월)과 더불어 중장기 홍수 위험예보에 활용
- 원격상관기반 ENSO, IOD 패턴 변화에 따른 수문변동의 장기예측으로 극한기후 발생에 따른 장기홍수 예측의 공간적, 시간적 해상도를 높여줄 수 있을 것으로 기대되며, 예보의 정확성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단됨
- 극한 기후패턴 발생에 따른 장기 홍수예측 연구 결과는 여름철 장기 강수량과 유출량을 예측할 수 있어, 농업 및 관개에 영향을 줄 수 있는 풍수해 예측과 유역별 수량 부족에 의한 가뭄 예측에도 활용될 수 있을 것으로 판단됨
- 여름철 수해 대비와 관련한 농작물의 선택, 장기적인 식량수급 대책 수립 등 농업 분야에 활용할 수 있을 것임

7. 결론 및 토론

본 연구에서는 (1)전형적인 엘니뇨인 CT 엘니뇨 해와 WP 엘니뇨 해, 그리고 라니냐 해를 구분하여, 엘니뇨와 라니냐 현상이 동아시아와 우리나라의 여름철(June to September, JJAS) 계절 수문변동에 미치는 영향을 분석하였으며, (2)양(+)의 IOD와 음(-)의 IOD 발생 해를 구분하여, IOD의 변천과정에 따른 동아시아와 한반도의 여름철 수문변동 영향을 분석하였다. 또한 (3)기후인자와 수문변량과의 원격상관 분석을 위하여 SSA(Singular Spectrum Analysis)와 (4)Mutual Information(MI)기법을 사용하여 지체시간별 선형 및 비선형 상관분석을 실시하였으며, 결합확률밀도함수의 추정에는 Kernel 핵함수를 사용하였다. 다음으로, (5)한반도 5대강 유역별 113개 중권역에 대하여, 서로 다른 두 유형의 엘니뇨와 라니냐, 그리고 IOD 영향에 의한 강수량과 유출량의 30년 평년값과의 편차분석(composite analysis, CA)을 실시하였으며, 한반도 중권역별 강수와 유출영향에 대한 유의성 검정은 Student's *t*-test에 의해 실시하였다. 마지막으로 (6)홍수 장기예측관련 연구결과의 활용 및 정책제언을 위한 방안을 분석하여 제시하였다. 본 연구의 분석결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) CT/WP 엘니뇨 decaying해와 라니냐 decaying해의 GPCP 강수량 합성편차 분석 결과, CT 엘니뇨가 발생할 것으로 예상되는 엘니뇨 decaying해의 한반도 여름철 강수량은 평년에 비하여 다소 감소가 예상되며, 특히 WP 엘니뇨가 발생할 것으로 예상되는 엘니뇨 decaying해에는 평년에 비하여 한반도 여름철 강수량의 증가 패턴이 나타날 가능성이 큰 것으로 분석된다. 또한 라니냐 decaying해의 한반도 여름철 강수량은 평년과 비슷하거나 다소 증가하는 경향이 있는 것으로 분석된다.
- 2) 양(+)의 IOD해와 음(-)의 IOD해의 GPCP 강수량 합성편차 분석 결과, 양(+)의 IOD가 발생할 것으로 예상되는 해의 한반도 여름철 강수량은 평년에 비하여 감소 경향이 클 것으로 예상되며, 음(-)의 IOD가 발생할 것으로 예상되는 해에는 한반도 여름철 강수량이 평년과 비슷하거나 다소 감소하는 패턴이 나타날 가능성이 있는 것으로 분석된다. 또한 GPCP 강수량 관측에 의한 양(+)의 IOD

해와 음(-)의 IOD해의 강수량 합성편차 분석 결과, 양(+)의 IOD가 발생할 것으로 예상되는 해의 한반도 여름철 강수량은 평년과 비슷하거나 다소 감소하는 경향이 있는 것으로 분석된다.

- 3) **SSA 분석에 의해 추출한 고유치분석결과**, 한반도 강수량의 경우 EOF 1-12 모드가 54.8%를 설명하였고, 유출량의 경우 EOF 1-12 모드가 63.4%를 설명하였다. 그리고 N_{CT} , N_{WP} , IOD의 경우 각각 EOF 1-6 모드가 65.4%, 71.4%, 61.0%를 설명하였다. 또한 주성분 추출을 통해 만들어진 재구성성분(RC) 시계열자료와의 상관계수 분석결과, 한반도 강수량의 경우 0.61~0.88, 유출량의 경우 0.66~0.92로 분석되었으며, 기후지수 자료 재구성성분과의 상관계수는 N_{CT} 의 경우 0.79~0.99로, N_{WP} 의 경우 0.86~0.99로, IOD의 경우 0.79~0.99로 비교적 높게 나타났다. SSA에 의한 재구성성분 시계열자료 구축의 결과는 사용자가 분석하고자 하는 목적(계절, 년, 10년 또는 그 이상의 기간 예측)에 따라 재구성성분의 조합결과를 선택하여 사용할 수 있으며, 본 연구에서는 여름철 계절예측을 위한 단주기 성분활용을 목적으로 RC1-12의 값을 선택하여 사용하였다
- 4) **MI기법을 이용한 비선형 원격상관분석결과**, Kernel을 이용한 결합확률밀도함수를 구함으로써 엘니뇨/라니냐, IOD 현상의 발생에 따른 한반도의 수문변량의 비선형적 거동특성을 분석할 수 있었으며, 전반적으로 선형상관분석 보다 비선형상관분석의 결과가 높게 나타났다. N_{CT} 지수와 한반도 강수량과의 상관계수 값은 (LR: 0.118, KDE: 0.459)로 분석되었고 7개월 지체 상관을 보이는 것으로 나타났으며, 한반도 유출량과는 지체 없는 상관을 보이는 것으로 나타났으며, 상관계수 값은 (LR: 0.182, KDE: 0.553)로 분석되었다. 또한, N_{WP} 지수와 한반도 강수량과의 상관계수 값은 (LR: 0.118, KDE: 0.459)로 분석되었고 지체 없는 상관을 보이는 것으로 나타났으며, 한반도 유출량과도 지체 없는 상관을 보이는 것으로 나타났으며, 상관계수 값은 (LR: 0.104, KDE: 0.433)으로 분석되었다. IOD 지수와 한반도 강수량과의 상관계수 값은 (LR: 0.315, KDE: 0.684)로 분석되었고 7개월 지체 상관을 보이는 것으로 나타났으며, 한반도 유

출량과는 지체 없는 상관을 보이는 것으로 나타났으며, 상관계수 값은 (LR: 0.390, KDE: 0.736)으로 분석되었다.

- 5) **극한기후패턴 변화에 따른 한반도 지역수문 영향 분석결과**, 전반적으로 WP 엘니뇨 해에는 평년에 비하여 유역의 강수량과 유출량의 증가 특성이 뚜렷이 나타나며, CT 엘니뇨 해에는 주로 감소하는 경향이, 라니냐 해에는 평년의 상태를 유지하는 것을 분석되었다. 또한 양(+)의 IOD 해에는 평년에 비하여 유역의 강수량과 유출량의 감소 특성이 뚜렷이 나타나나 한강유역의 경우 평년과 비슷한 경향이 나타남을 확인하였다. 그리고 음(-)의 IOD 해에는 주로 강수량과 유출량이 감소하는 패턴이 보이나 평년 상태를 유지하는 것으로 분석되었다.
- 6) **본 연구 결과의 활용 및 정책반영을 위한 법제도 검토**와 관련 규정 및 지침 분석, 활용(부)처별 관련 업무 분석 등을 실시한 결과, 장기 홍수 예측 정보 활용을 위한 법제도화 추진 및 관련 법규 마련으로 홍수기 댐, 저수지, 하천 홍수에 보 운영 규칙의 명문화 및 규정화에 활용될 수 있다. 그리고 홍수보험 지원과 수가 결정, 그리고 홍수 위험지구 고시를 위한 자료로 활용될 수 있으며, 대국민 홍수위험 홍보효과 거양 등의 정책지원에 본 연구의 결과가 활용될 수 있다. 또한 ‘도시군 관리계획 수립지침’에 매 5년마다 기후변화로 인한 재해 취약성 분석을 수행하고, 계획 수립 시 반영토록 하고 있으므로, 기후변화 재해 취약성 분석을 매년 수행하도록 명시하고 장기 홍수예측 연구 결과를 도시군 관리에 반영하도록 하면, 본 연구의 결과를 활용 가능할 것으로 판단된다.

우리나라는 여름철에 강수가 집중하여 발생하는 특성이 있어 홍수와 관련한 극한기후 분석은 수자원의 계절적 변동영향예측과 불확실성을 줄여 안정적인 용수공급과 수방방재 체계구축을 위한 정책지원 자료로 활용이 가능하다. 향후 대규모 기후패턴변화 영향을 줄 수 있는 대표적 해양관련 지수인 ENSO, IOD 뿐만 아니라 가능한 기후인자들을 분석하여 한반도 영향 메커니즘을 규명하고, 원격상관 기반 극치수문의 지역적 변동 특성 분석과 APCC MME 자료를 활용한 통계역학 모형 기반 추계예측 모형 구축으로 여름철 장기 홍수 예측자료로의 발전이 가능하다. 더불어 국내 각 기관 및 부처의 치수목적의 수방정책 수립 시 장기 홍수 예측 자료의 활용에 대한 법제도화 추진에 따른 실무 활용이 필요하다.

REFERENCES

- 국가안전처, 2014: <http://www.mpss.go.kr/>. Accessed December 2014.
- 국토교통부, 2014: <http://www.molit.go.kr/>. Accessed October 2014.
- 강인식, 1998: 엘니뇨와 한반도 기후변동의 관련성. 한국기상학회논문집, **34**(3), 390-396.
- 기상청, 2014: <http://www.kma.go.kr/>. Accessed October 2014.
- 기상청 국립기상연구소, 2012: 한반도 기후변화 전망보고서. 1-153.
- 기상청 기후변화정보센터, 2014: <https://www.climate.go.kr>. Accessed October 2014.
- 기획재정부, 2014: <http://www.mosf.go.kr/>. Accessed October 2014.
- 김동권, 2006: 저빈도 분석에 의한 해수면 온도와 우리나라 계절 강수량과의 원격상관분석. 서울시립대학교 공학박사학위논문, 1-140.
- 김진영, 2002: 남방진동지수와 우리나라 강수량간의 Mutual Information. 서울시립대학교 공학석사학위논문, 1-91.
- 농림축산식품부, 2014: <http://www.mafra.go.kr/>. Accessed October 2014.
- 산업통상자원부, 2014: <http://www.motie.go.kr/>. Accessed October 2014.
- 소방방재청, 2014: <http://www.nema.go.kr/>. Accessed October 2014.
- 윤선권, 김종석, 권현환, 2013: 서로 다른 형태의 엘니뇨에 따른 한강유역의 여름철 강우량과 극치강우의 변동특성 분석. 한국수자원학회논문집, **46**(2), 123-137.
- 윤진희, 예상욱, 2009: 서로 다른 두 유형의 엘니뇨와 동아시아 인근 해역 표층 온도 상관성 연구. *Ocean and Polar Research*, **31**(1), 1-61.
- 차은정, 전종갑, 정효상, 1999: 엘니뇨/라니냐 해의 우리나라 기후 특성에 관한 연구.

- 한국기상학회논문집, **35**(1), 98-117.
- 차은정, 2007: 엘니뇨-남방진동, 인도양 쌍극자 모드, 두 현상의 관련성, 그리고 한반도 기후에 대한 영향. 한국지구과학회지, **28**(1), 35-44.
- 한강홍수통제소, 2014: <http://www.hrfco.go.kr/>. Accessed October 2014.
- 한국수자원공사, 2014: <https://www.kwater.or.kr/>. Accessed October 2014.
- 환경부, 2014: <http://www.me.go.kr/>. Accessed October 2014.
- 황성환, 2001: 우리나라 강수량과 엘니뇨 현상과의 저빈도 상관성 연구. 서울시립대학교 공학석사학위논문, 1-63.
- 행정자치부, 2014: <http://www.mogaha.go.kr/>. Accessed October 2014.
- Adamowski, K., and C. Labatiuk, 1987: Estimation of flood frequencies by a nonparametric density procedure. *Hydrologic Frequency Modeling*, 97-106.
- APCC (APEC Climate Center), 2014: <http://www.apcc21.org/eng/service/6monenso/japcc030701.jsp>. Accessed November 2014.
- Ashok, K., Z. Guan and T. Yamagata, 2003: Influence of the Indian Ocean dipole on the Australian winter rainfall. *Geophys. Res. Lett.*, **30**(15), 1821, doi: 10.1029/2003GL017926.
- 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.
- BOM (Bureau of Meteorology), 2014: <http://www.bom.gov.au/>. Accessed November 2014.
- Bowman, A. W., 1985: A comparative study of some kernel-based nonparametric

- density estimators. *Journal of Statistical Computing and Simulation*, **21**, 313-327.
- Breiman, L., W. Meisel and Purcell, E., 1977: Variable kernel estimates of multivariate densities. *Technometrics*, **19**(2), 135-144.
- Broomhead, D. S., and G. P. King, 1986: Extracting qualitative dynamics from experimental data. *Physica D*, **20**, 217-236.
- Colebrook, J. M., 1978: Continuous plankton records: Zooplankton and environment, North-East Atlantic and North Sea, 1948-1975, *Oceanol. Acta*, **1**, 9-23.
- Devroye, L., and L. Györfi, 1985: Nonparametric Density Estimation: the L, View. *Wiley, New York*, 1-136.
- 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.
- Fraser, A. M., and H. L., Swinney, 1986: Independent coordinates for strange attractors from mutual information. *Phys. Rev. A* **33**, 1134.
- Fraedrich, K., 1986: Estimating dimensions of weather and climate attractors. *J. Atmos. Sci.* **43**, 419-432.
- Gao, J., and Z. Zheng, 1994: Direct dynamical test for deterministic chaos and optimal embedding of a chaotic time series. *Phys. Rev. E* **49**, 3807.
- Graf, K. E., and T. Elbert, 1990: Dimensional analysis of the Waking EEG. *Chaos in Brain Function*, 135-152.
- Granger, C., and J. Lin, 1994: Using the mutual information coefficients to identify lags in nonlinear models. *J. Time Series Anal.*, **15**(4), 371-384.

- Guan, Z., K. Ashok, and T. Yamagata, 2003: Summertime response of the tropical atmosphere to the Indian Ocean sea surface temperature anomalies. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **81**, 533-561.
- Horel, J. D., and J. M. Wallace, 1981: Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation. *Mon. Weather Rev.*, **109**, 813-829.
- IPCC, 2007: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX) - Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*, 1-594.
- IRI (International Research Institute for Climate and Society), 2014: <http://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/enso/>. Accessed November 2014.
- JAMSTEC (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology), 2014: <http://www.jamstec.go.jp/>. Accessed November 2014.
- Joe, H., 1989: Relative entropy measures of multivariate dependence. *J. Am. Stat. Assoc.*, **84**(405), 157-164.
- 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, 2012: Effects of El Niño Modoki on winger precipitation in Korea. *Clim. Dyn.*, **38**, 1313-1324, doi:10.1007/s00382-011-1114-1.
- Kim, H., P. J. Webster and J. A. Curry, 2009: "Impact of shifting patterns of Pacific Ocean warming on the frequency and tracks of North Atlantic tropical cyclones. *Science*, **325**, 77-80.
- Kim, J. S., S. Jain, and S. K. Yoon, 2012: 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.
- 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.
- Martinerie, J. M., A. M., Albano, A. I., Mees, and P. E., Rapp, 1992: Mutual Information, Strange Attractors, and the Optimal Estimation of Dimension. *Phys. Rev. A* **45**(10), 7058-7064.
- 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., and U. Lall, 1994: Kernel quantile function estimator for flood frequency analysis. *Water Resources Research*, **30**(11), 3095-3103.
- Moon, Y., B. Rajagopalan, and U. Lall, 1995: Estimation of mutual information using kernel density estimators. *Phys. Rev. E*, **52**(3), 2318-2321.
- Moon, Y. I., and U., Lall, 1996: Atmospheric flow indices and interannual Great Salt Lake variability. *Journal of Hydrologic Engineering*, 55-61.
- 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, 2014: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>. Accessed November 2014.
- 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.
- Philander, S. G. H., 1985: El Niño and La Niña, *Journal of the Atmospheric Sciences*, **42**(23), 2652-2662.
- 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.
- Preisendorfer, R. W., 1988: Principal Component Analysis in Meteorology and Oceanography. *Elsevier, New York*.
- Ren, H. L., and F. F. Jin, 2011: Niño indices for two types of ENSO. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L04704, doi:10.1029/2010GL046031.
- Scott, D. W., 1992: Multivariate Density Estimation, *Wiley, New York*, 1-40.
- Sheather, S. J., 1986: An Improved Data-Based Algorithm for Choosing the Window Width when Estimating the Density at a Point. *Computational Statistics and Data Analysis*, **4**, 61-65.
- Sheather, S. F., and M. C., Jones, 1991: A reliable data-based band-width selection method for kernel density estimation. *J. Roy. Statistical Soc.*, B **53**, 683-690.
- Silverman, B. W., 1992: Density estimation for statistics and data analysis. *Chapman and Hall, New York*, 1-22.

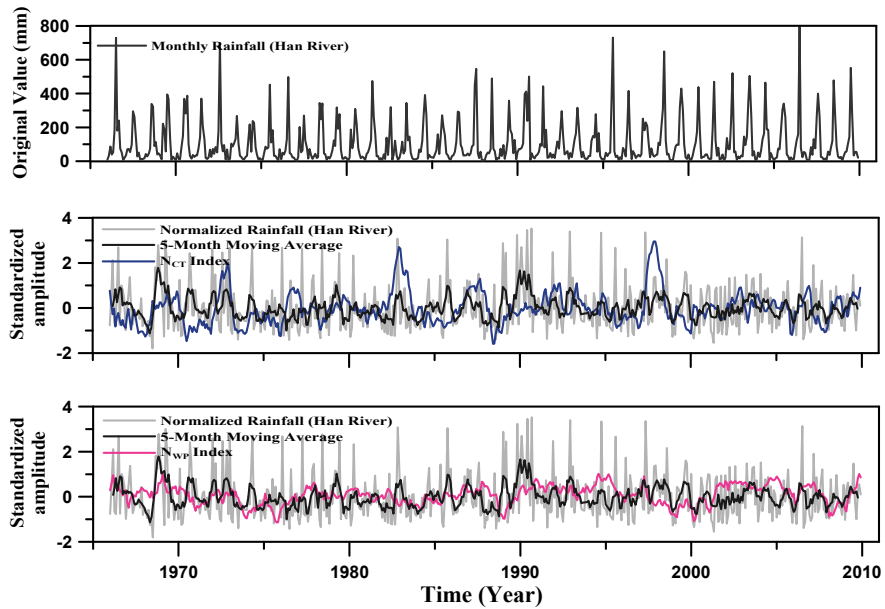
- Saji, N. H., B. N. Goswami, P. N. Vinayachandran, and T. Yamagata, 1999: A dipole mode in the tropical Indian Ocean, *Nature*, **401**, 360-363.
- Saji, N. H., and T. Yamagata, 2003: Structure of SST and Surface Wind Variability during Indian Ocean Dipole Mode Events: COADS Observations. *American Meteorological Society*, **16**, 2735-2751.
- Vautard, R., P. Yiou, and M. Ghil, 1992: Singular spectrum analysis: A toolkit for short, noisy chaotic signals, *Phys. D Amsterdam*, **58**, 95-126.
- WAMIS (Water Management Information System), 2014: <http://wamis.go.kr/eng/>. Accessed November 2014.
- Wang, B., R. Wu, and X. Fu, 2000: Pacific-East Asia Teleconnection: How Does ENSO Affect East Asian Climate?, *Journal of Climate*, **13**, 1517-1536.
- 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.
- Woodroffe, M., 1970: On choosing a delta-sequence. *Ann. Math. Statist.*, **41**, 1665-1671.
- 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.

APPENDIX(I)

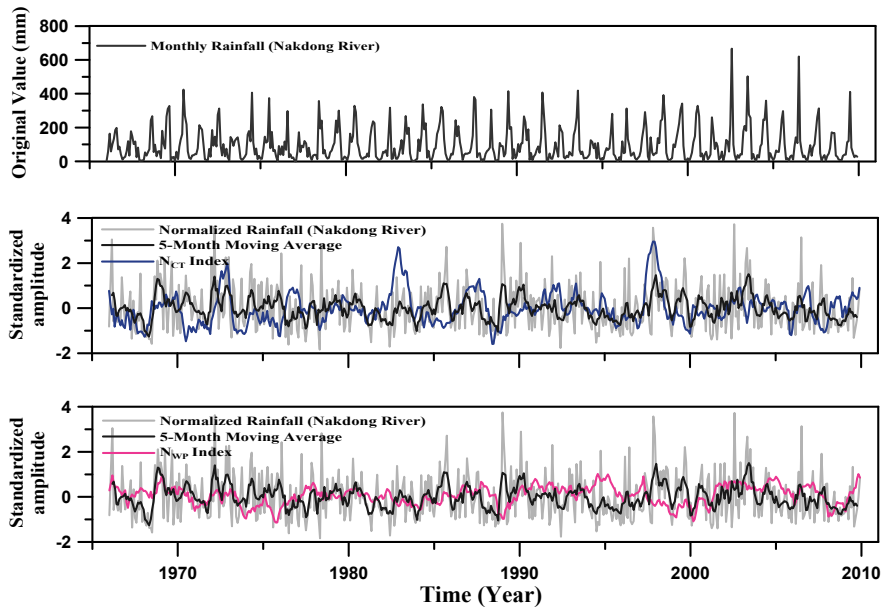
□ SSA 분석결과

Precipitation

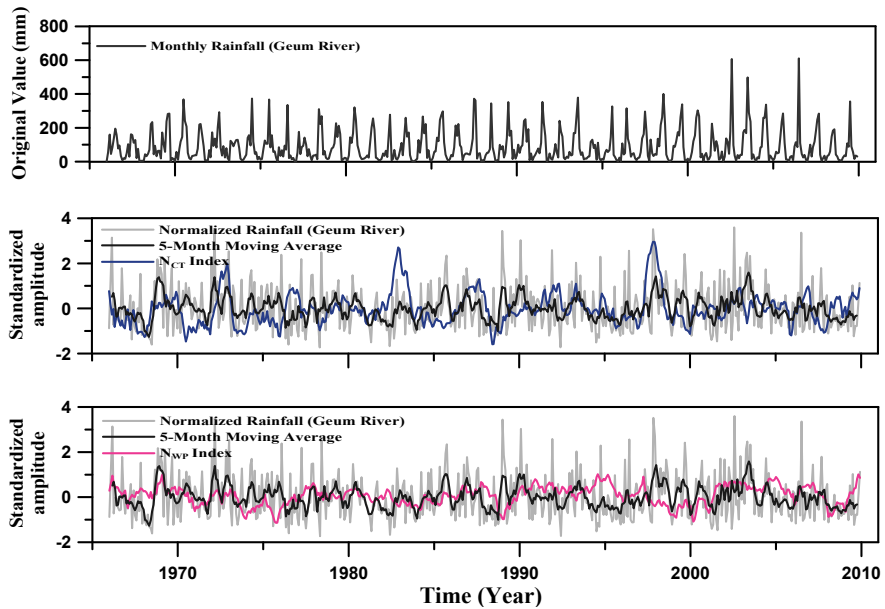
(a) Han River Basin



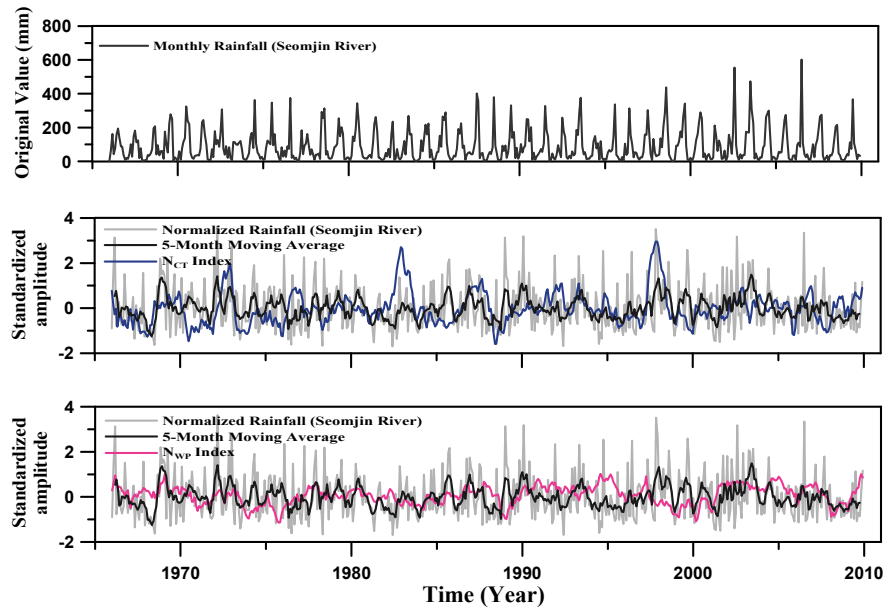
(b) Nakdong River Basin



(c) Geum River Basin



(d) Seomjin River Basin



(e) Youngsan River Basin

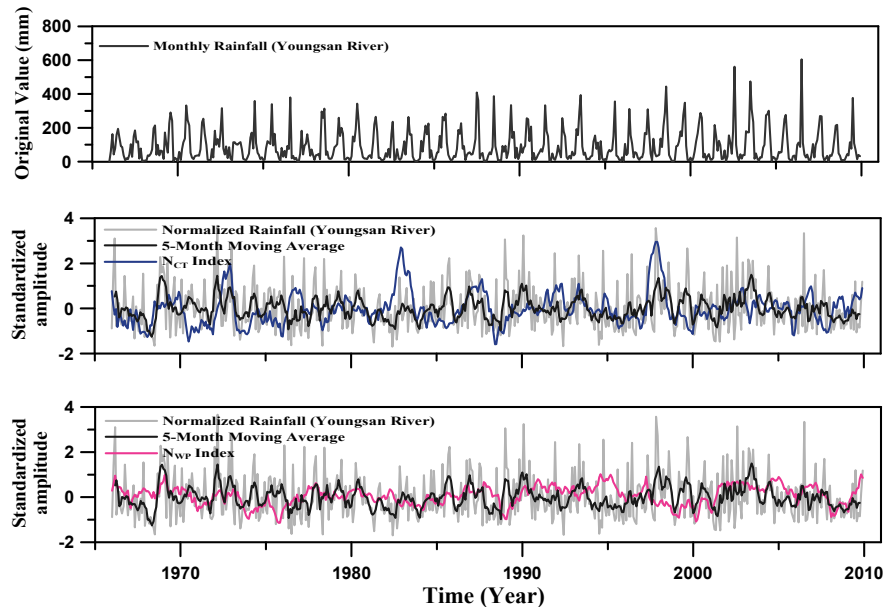
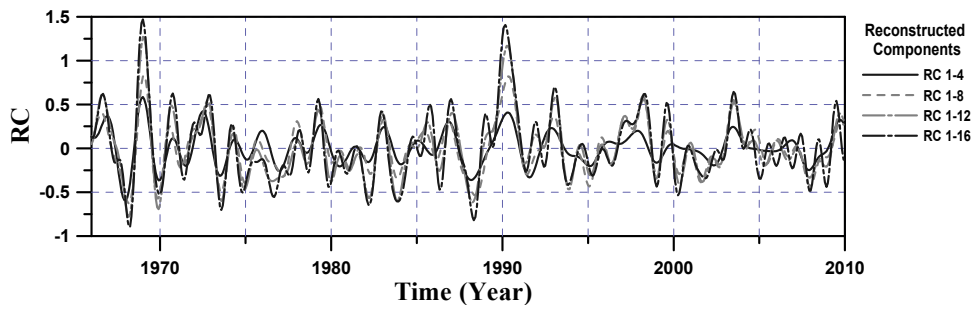
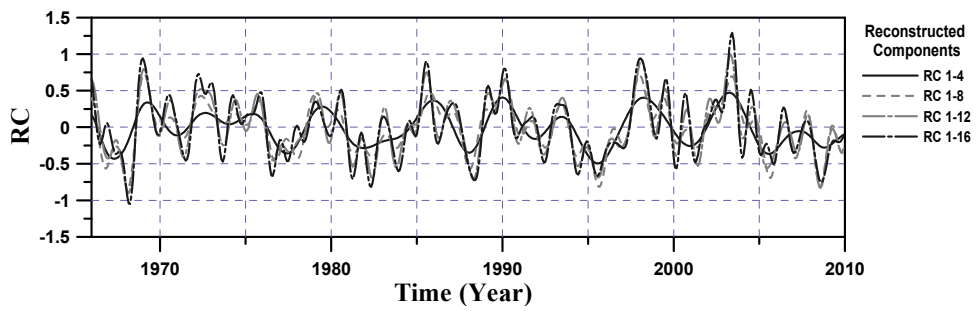


Figure 1. Time series of original rainfall and standardized amplitudes.

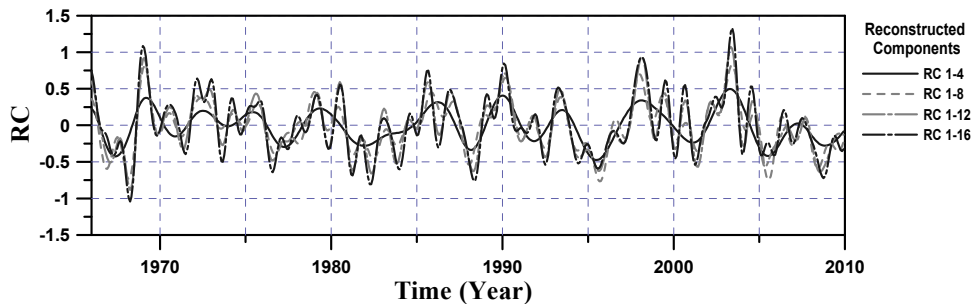
(a) Han River Basin



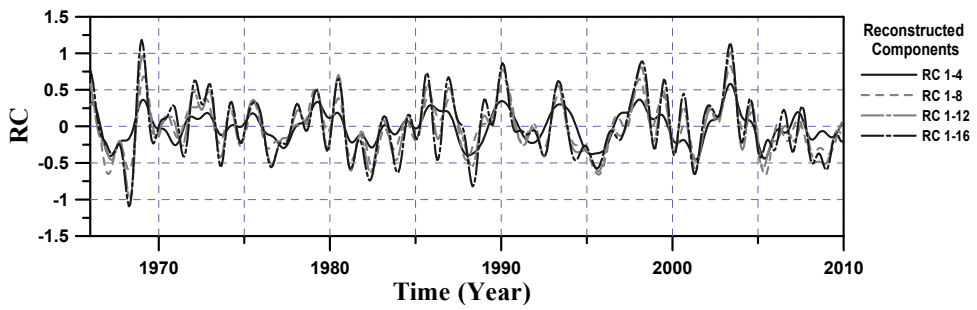
(b) Nakdong River Basin



(c) Geum River Basin



(d) Seomjin River Basin



(e) Youngsan River Basin

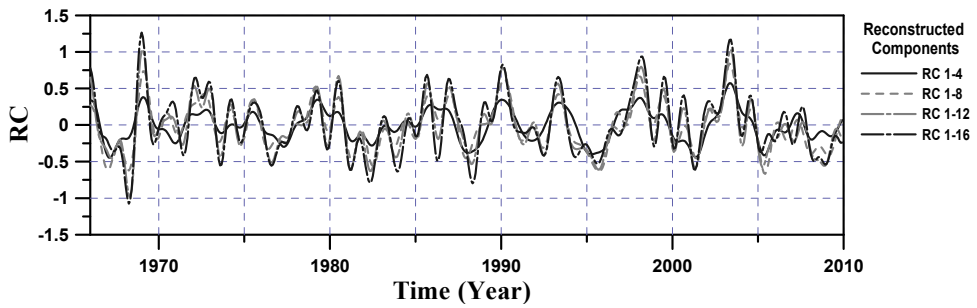
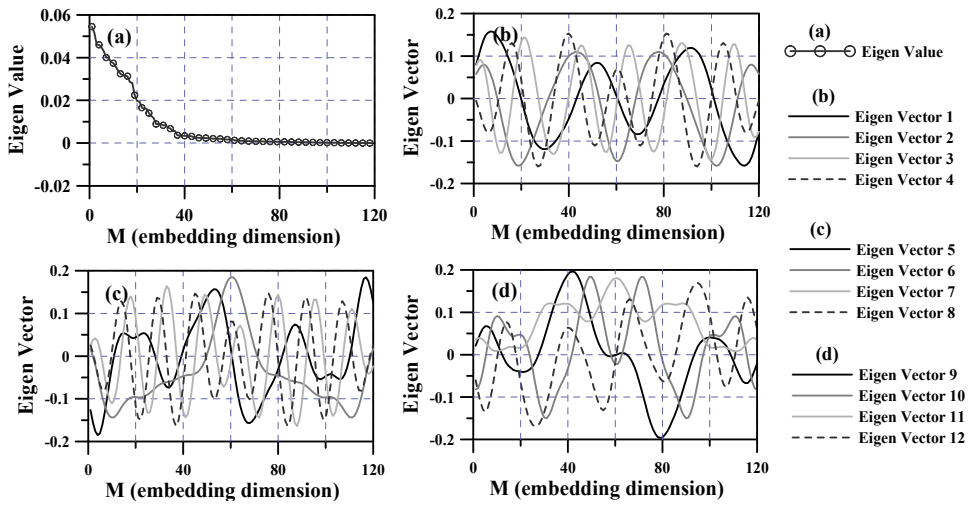
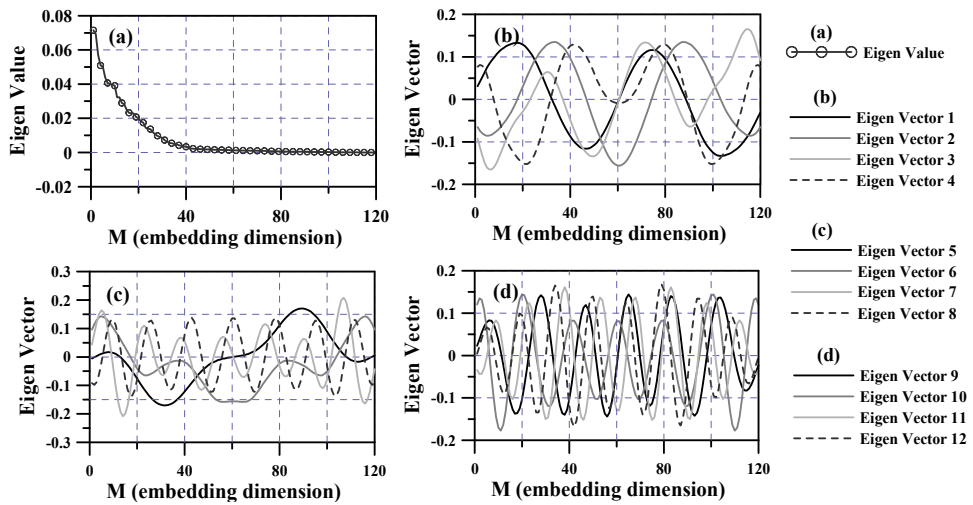


Figure 2. Reconstructed components (RC) time series over the five-major river basin in the Korean Peninsula.

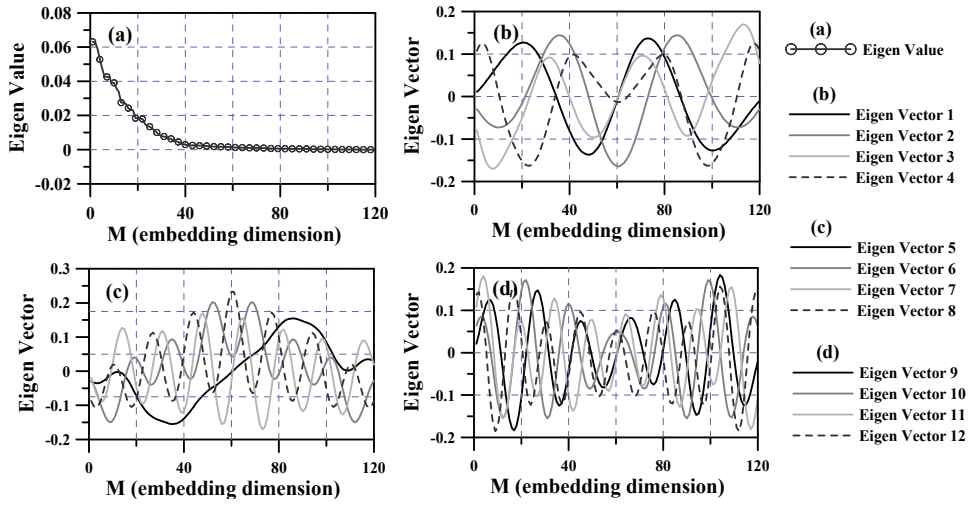
(a) Han River Basin



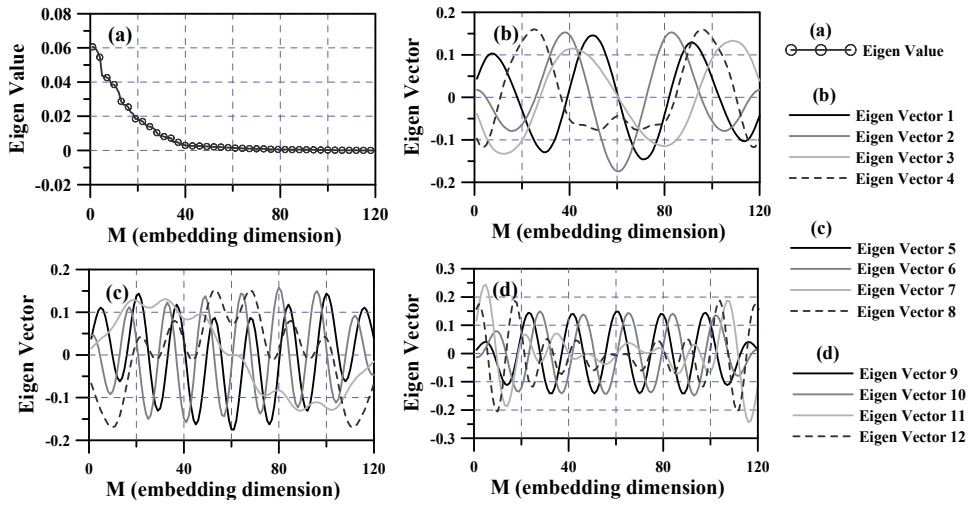
(b) Nakdong River Basin



(c) Geum River Basin



(d) Seomjin River Basin



(e) Youngsan River Basin

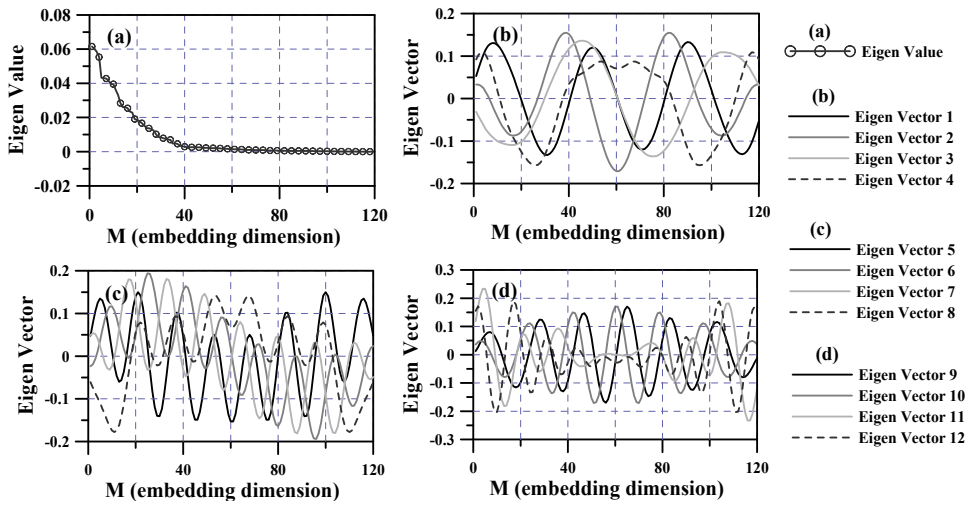
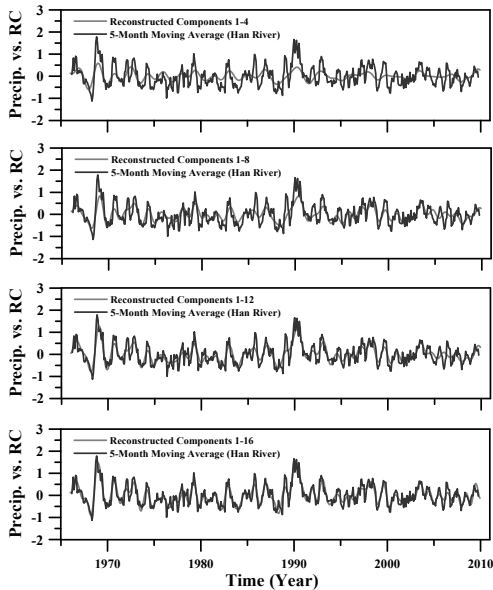
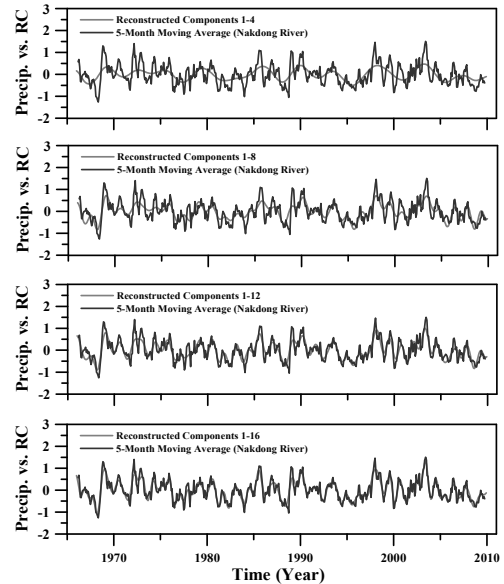


Figure 3. Eigen vector and eigen values for 120 embedding dimension over the five-major river basin in the Korean Peninsula.

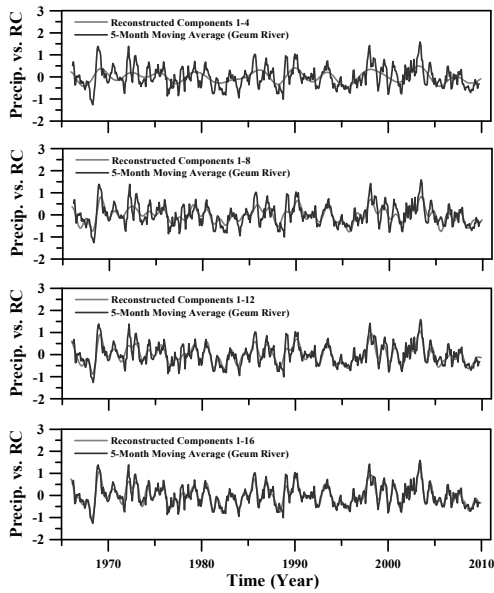
(a) Han River Basin



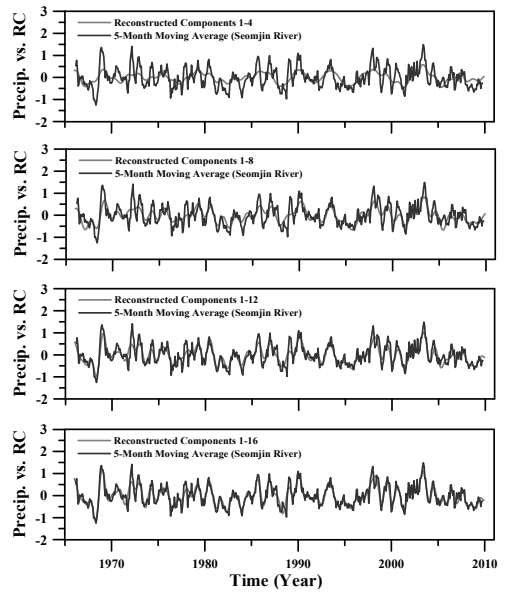
(b) Nakdong River Basin



(c) Geum River Basin



(d) Seomjin River Basin



(e) Youngsan River Basin

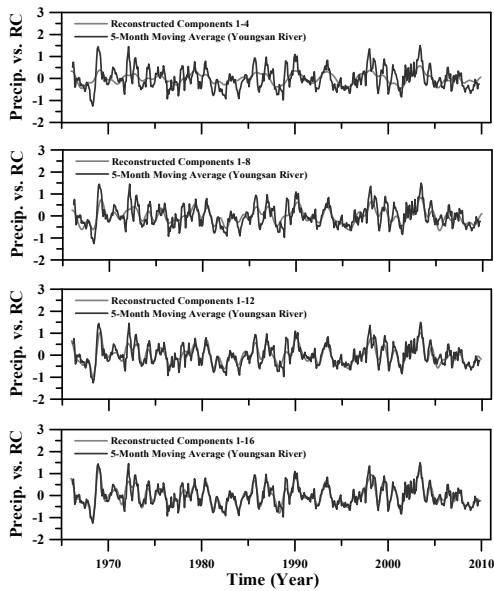
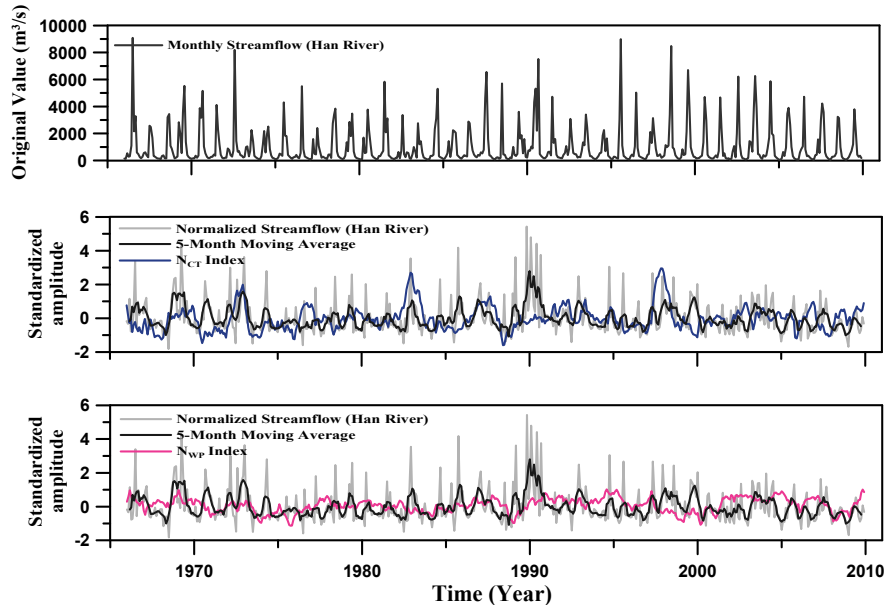


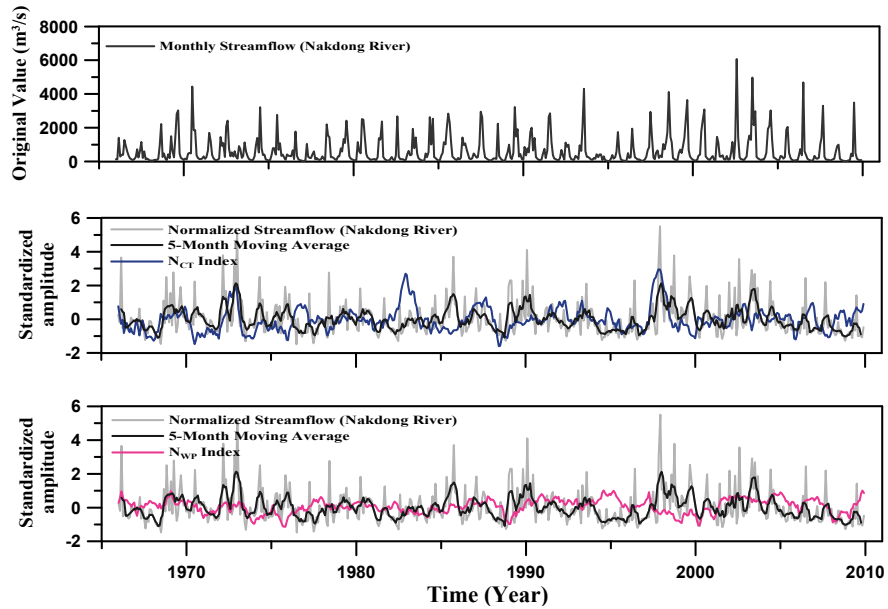
Figure 4. Five-month moving average time series of standardized precipitation and reconstructed components over the five-major river basin in the Korean Peninsula.

Streamflow

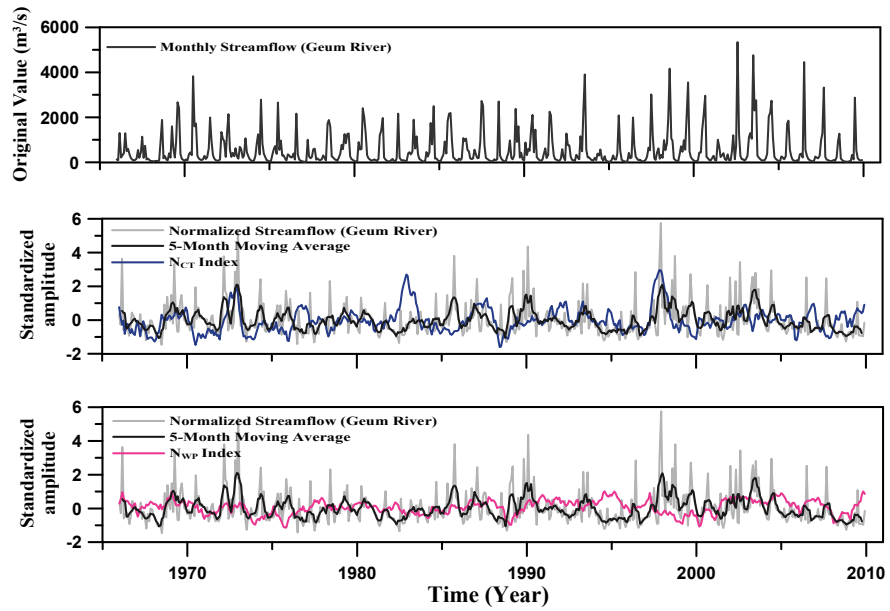
(a) Han River Basin



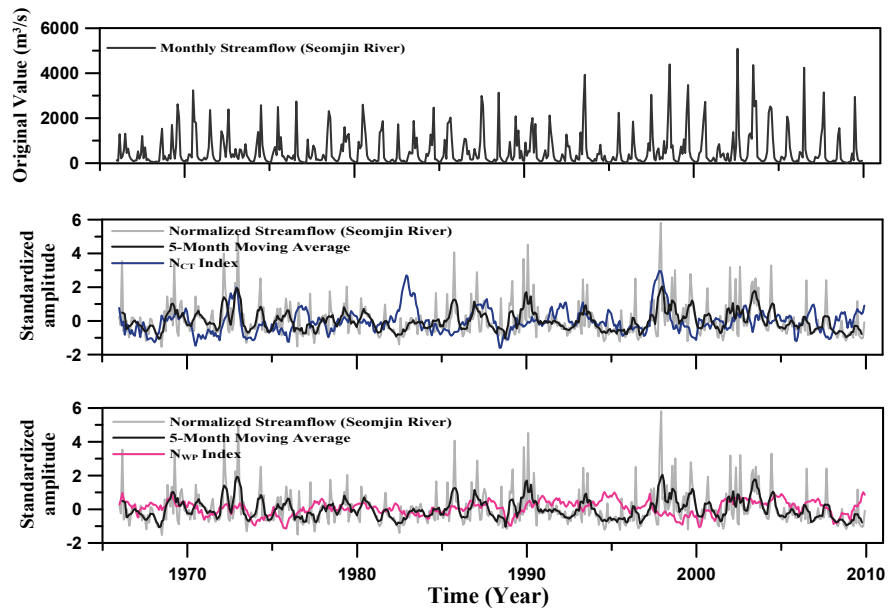
(b) Nakdong River Basin



(c) Geum River Basin



(d) Seomjin River Basin



(e) Youngsan River Basin

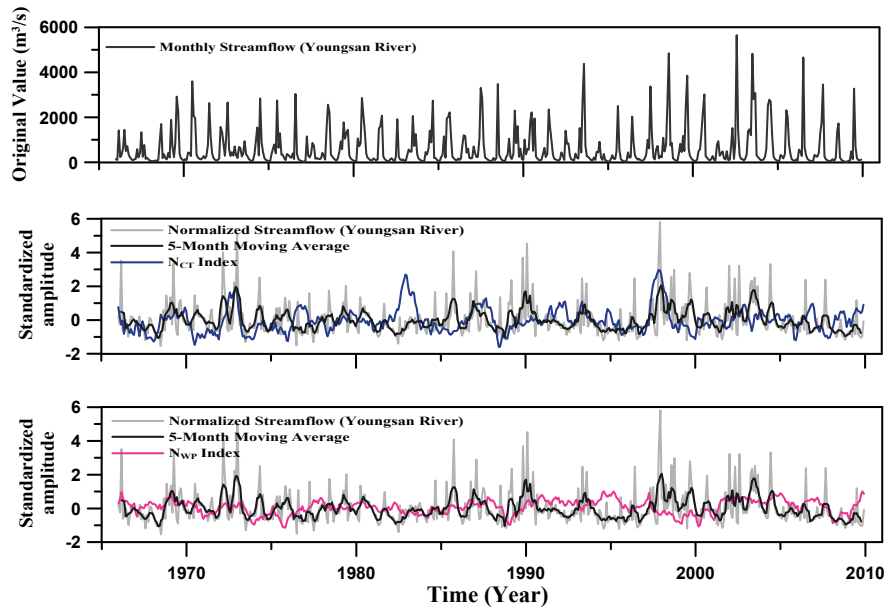
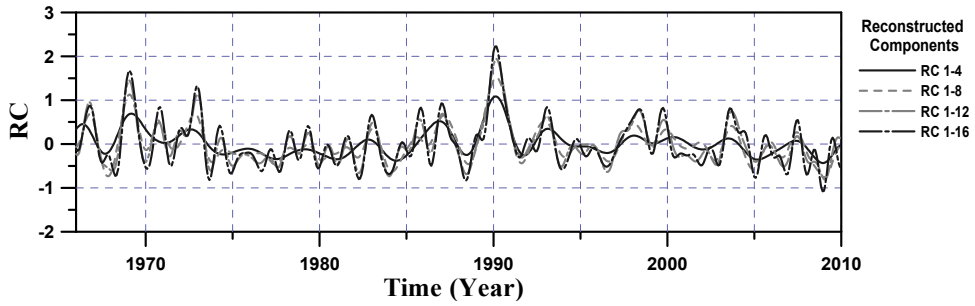
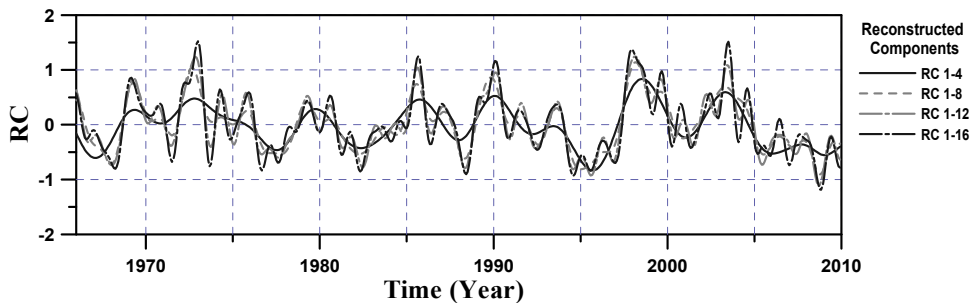


Figure 5. Time series of original streamflow and standardized amplitudes.

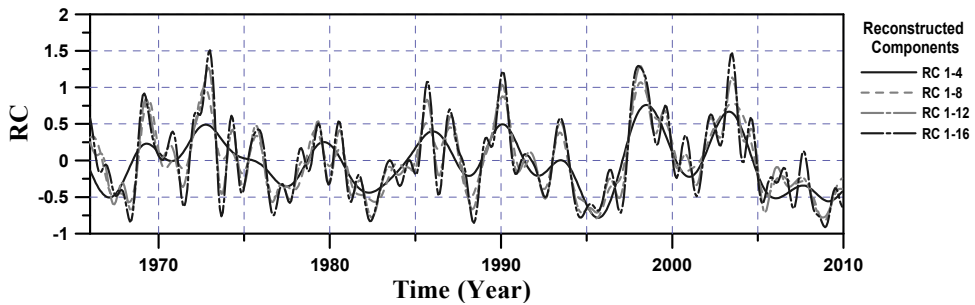
(a) Han River Basin



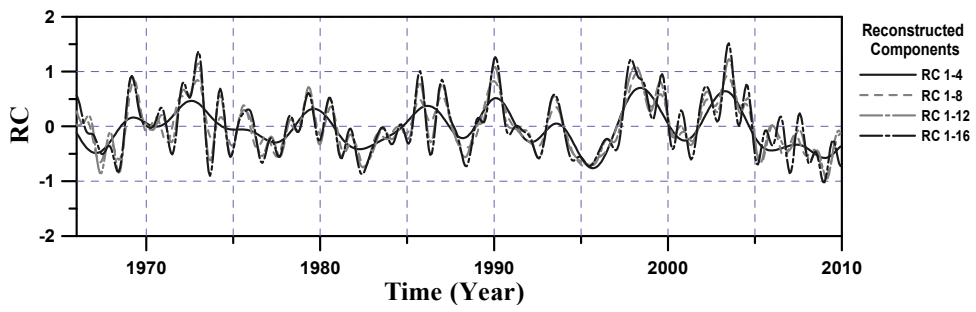
(b) Nakdong River Basin



(c) Geum River Basin



(d) Seomjin River Basin



(e) Youngsan River Basin

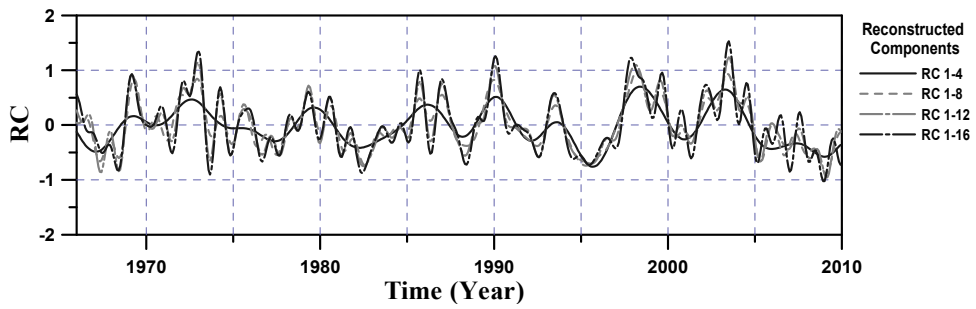
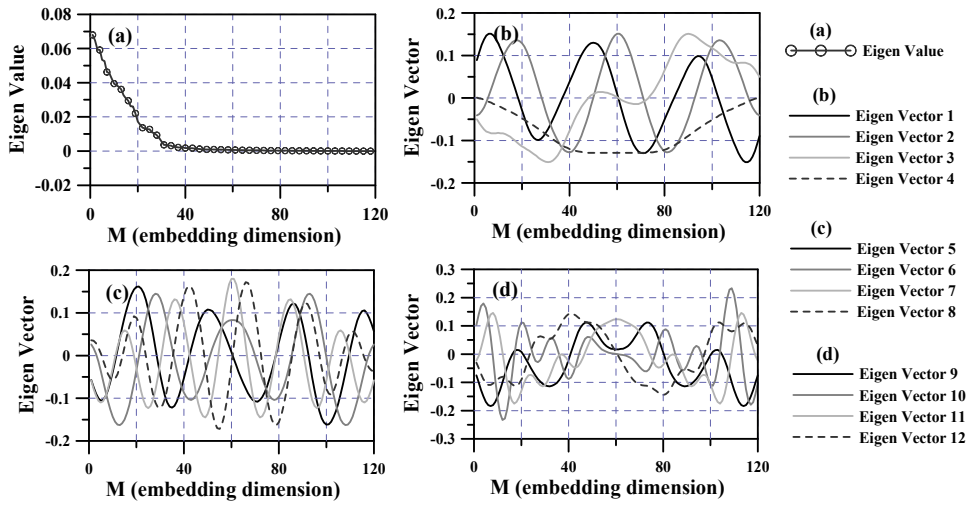
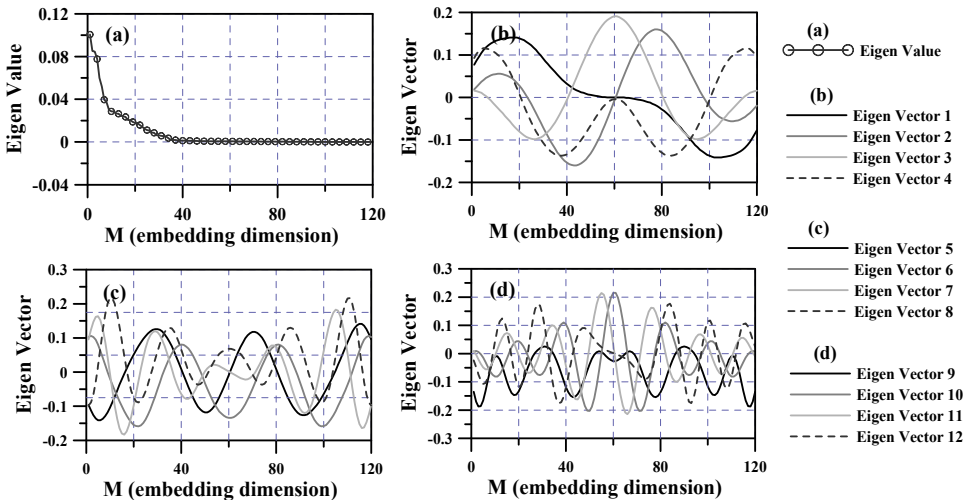


Figure 6. Reconstructed components (RC) time series over the five-major river basin in the Korean Peninsula.

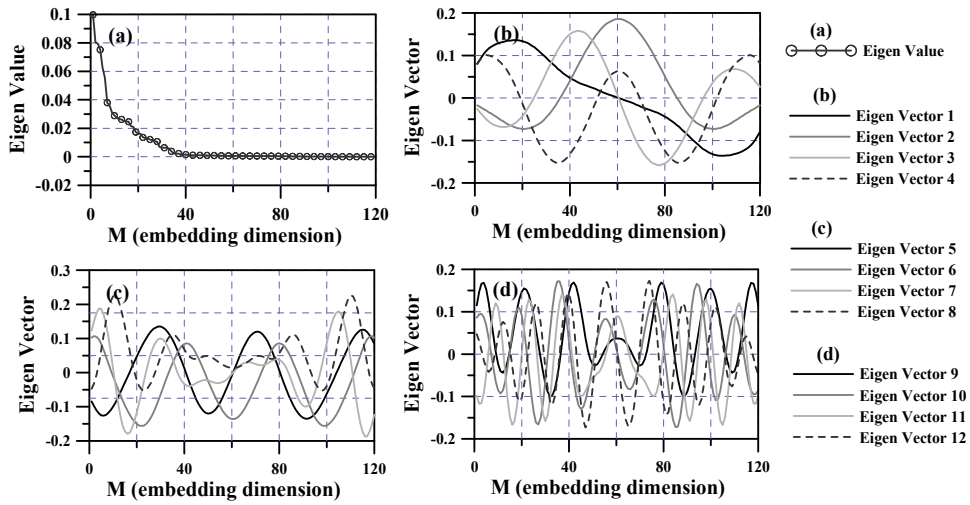
(a) Han River Basin



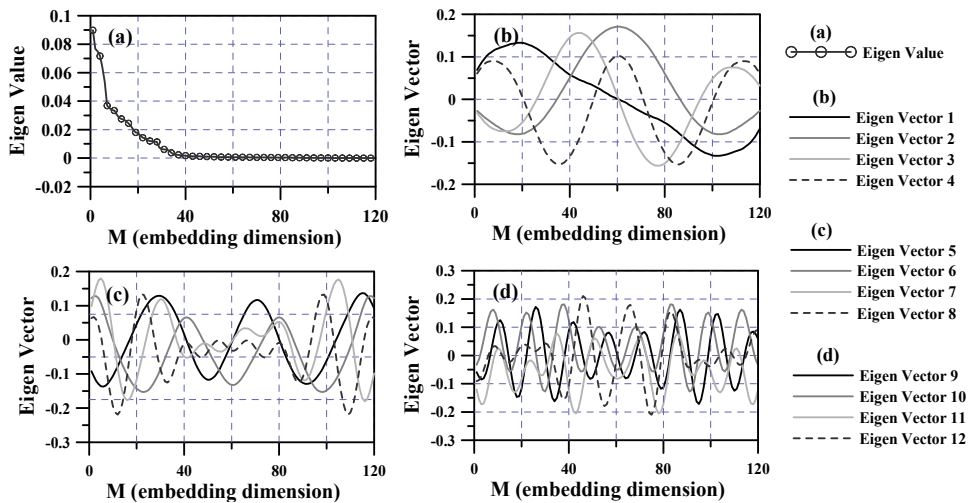
(b) Nakdong River Basin



(c) Geum River Basin



(d) Seomjin River Basin



(e) Youngsan River Basin

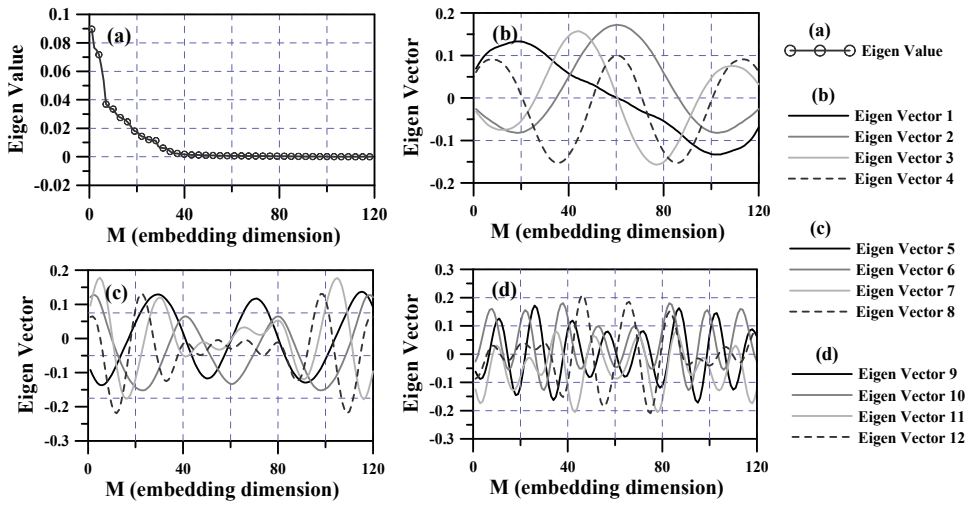
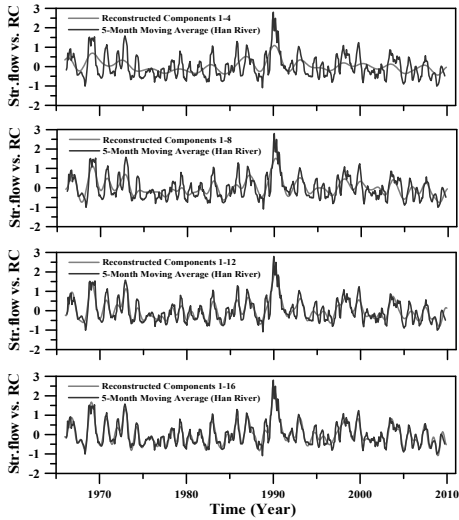
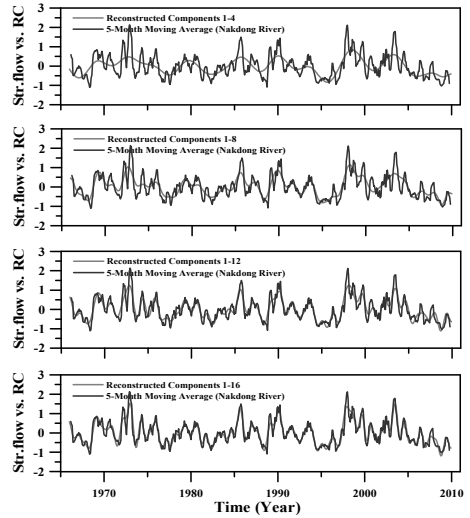


Figure 7. Eigen vector and eigen values for 120 embedding dimension over five-major river basin in Korean Peninsula.

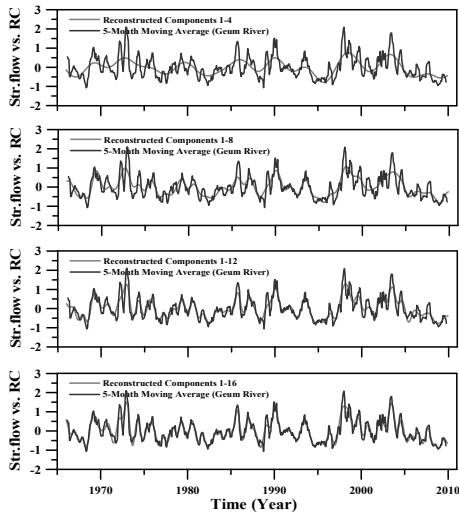
(a) Han River Basin



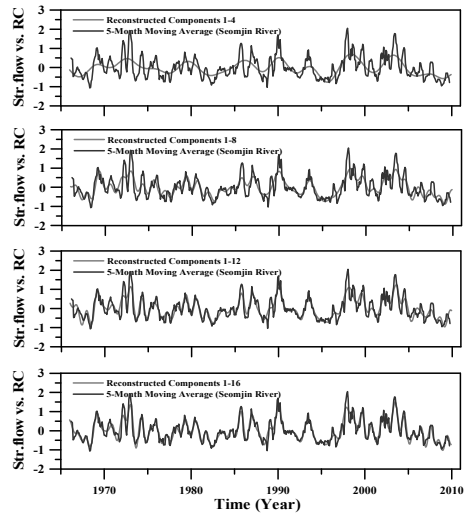
(b) Nakdong River Basin



(c) Geum River Basin



(d) Seomjin River Basin



(e) Youngsan River Basin

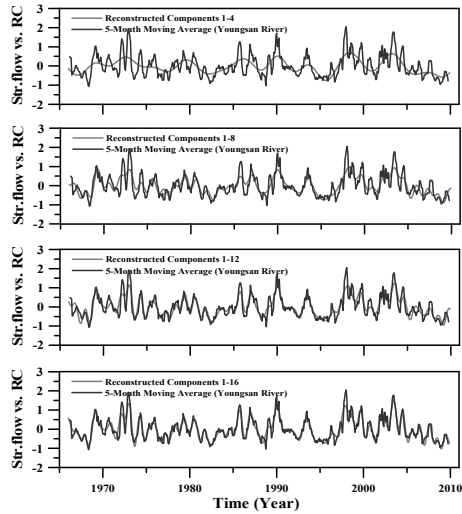
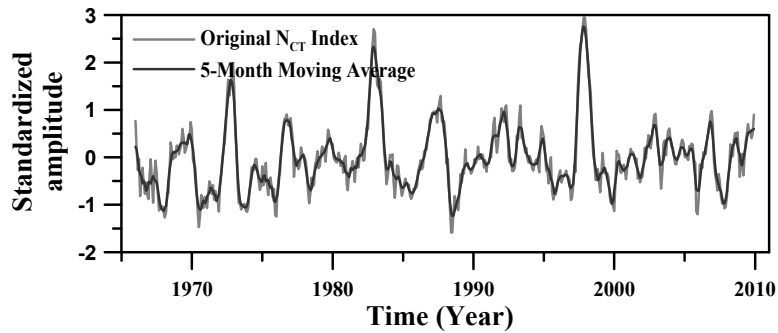


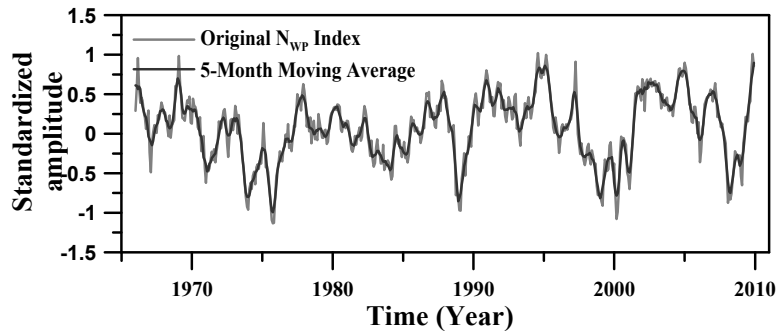
Figure 8. Five-month moving average time series of standardized streamflow and reconstructed components over the five-major river basin in the Korean Peninsula.

ENSO(N_{CT} and N_{WP}) / IOD

(a) CT El Niño



(b) WP El Niño



(c) IOD

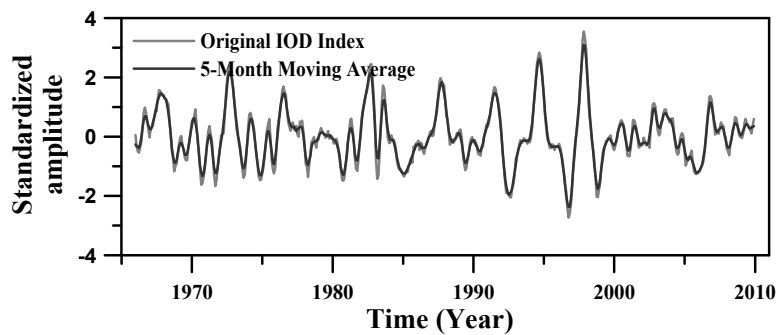
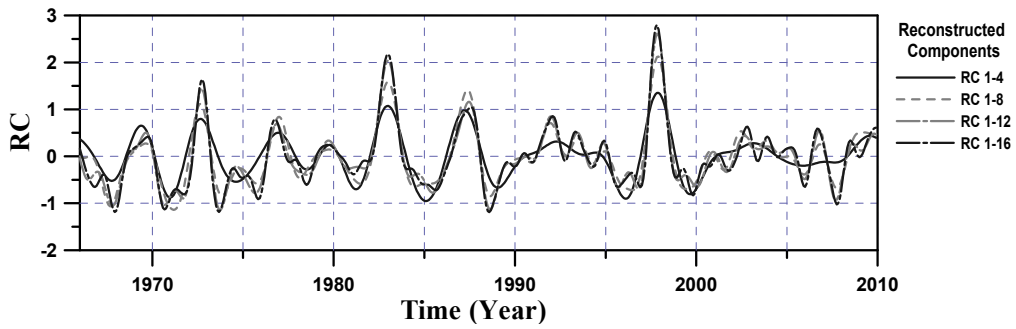
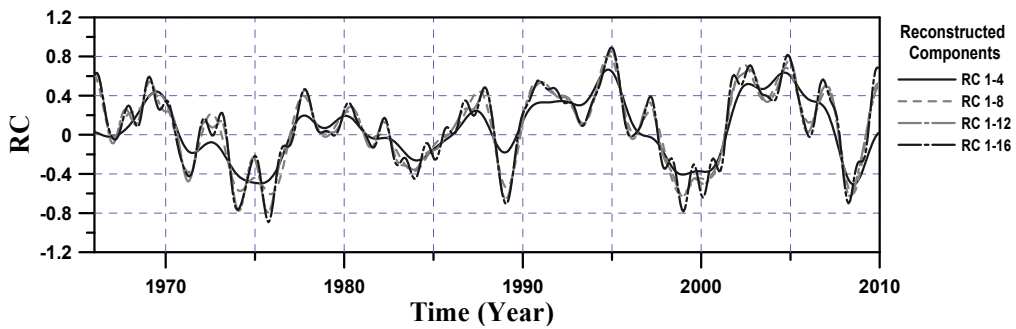


Figure 9. Time series of original rainfall and standardized amplitudes.

(a) CT El Niño



(b) WP El Niño



(c) IOD

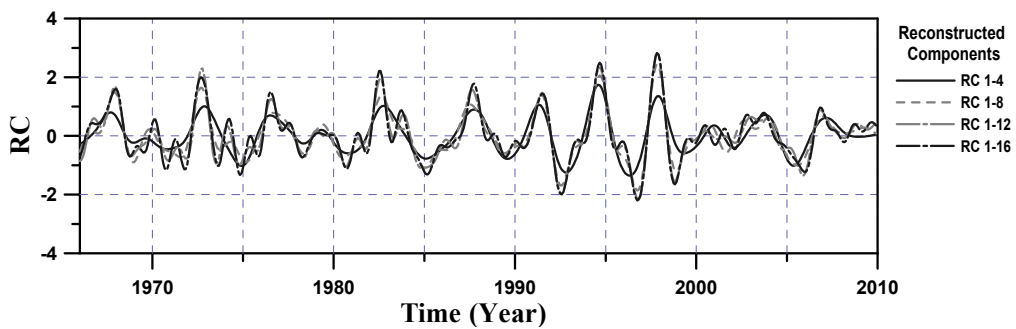
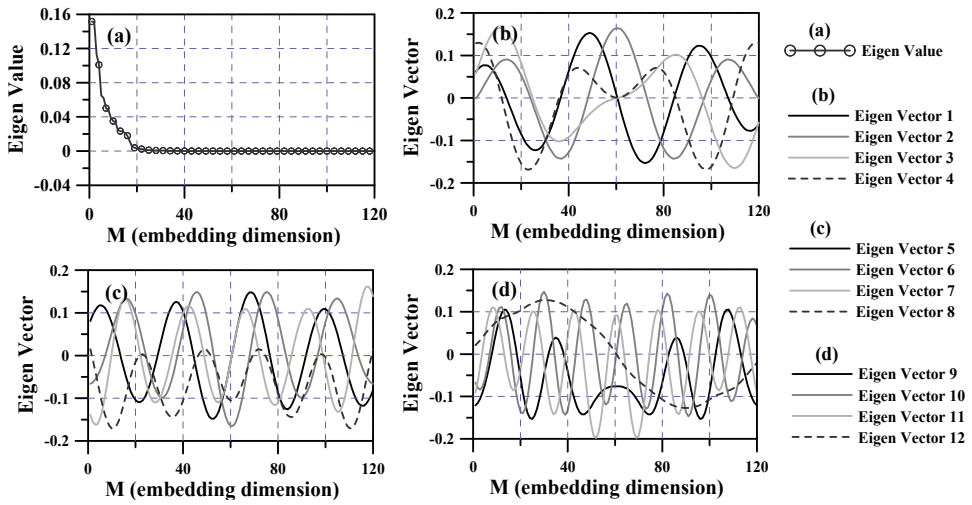
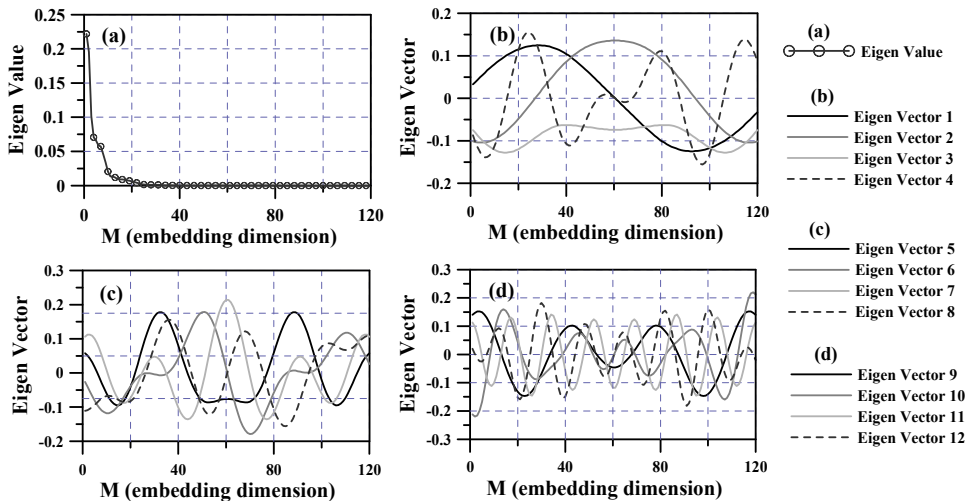


Figure 10. Reconstructed components (RC) time series in each climate indices (e.g. CT/WP El Niño and IOD).

(a) CT El Niño



(b) WP El Niño



(c) IOD

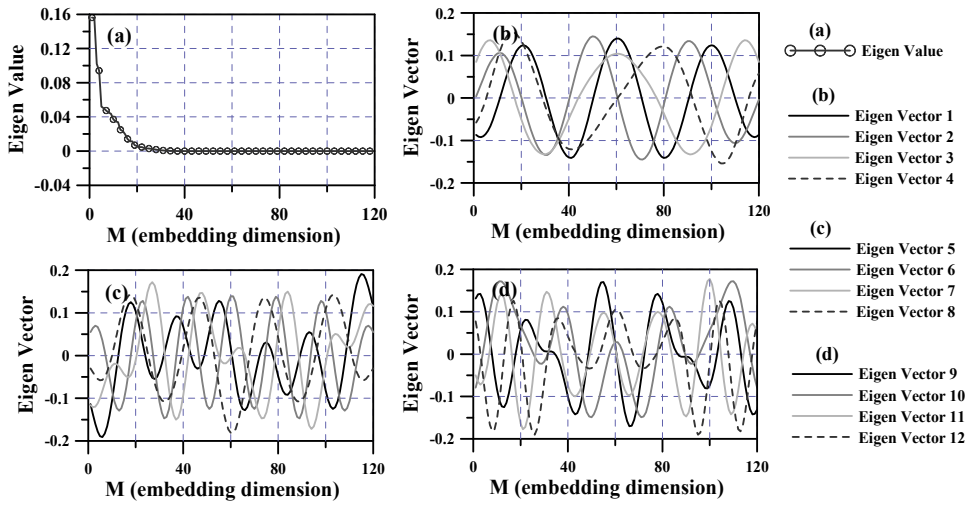
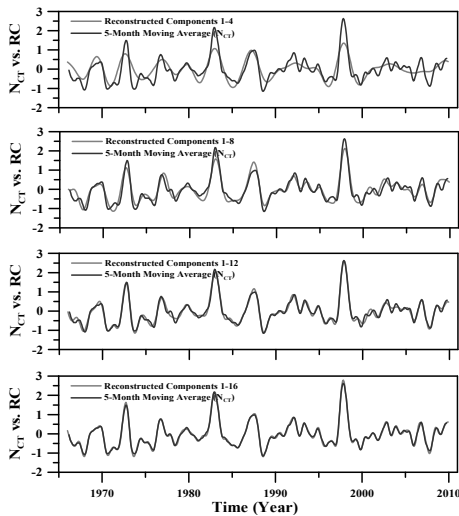
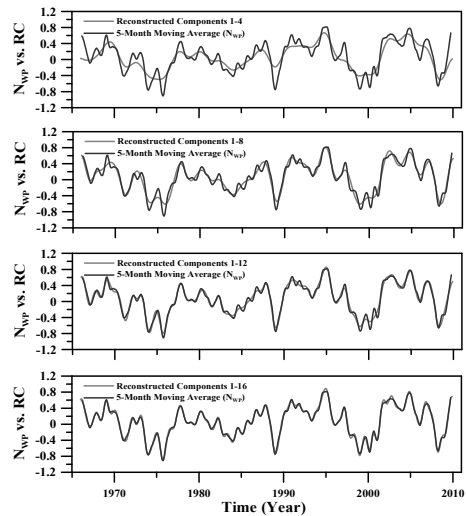


Figure 11. Eigen vector and eigen values for 120-embedding dimension in each climate indices (e.g. CT/WP El Niño and IOD).

(a) CT El Niño



(b) WP El Niño



(c) IOD

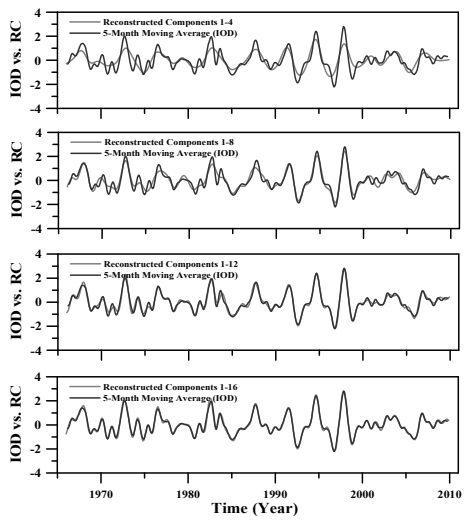


Figure 12. Five-month moving average time series of standardized climate indices (e.g. CT/WP, El Niño and IOD) and reconstructed components.

APPENDIX(II)

《Mutual Information을 이용한 수문인자와 기후지수와의 상관분석》

□ 수문인자와 ENSO(N_{CT})의 Joint Probability Kernel Density Function 분석결과

<Han River Basin: Precipitation>

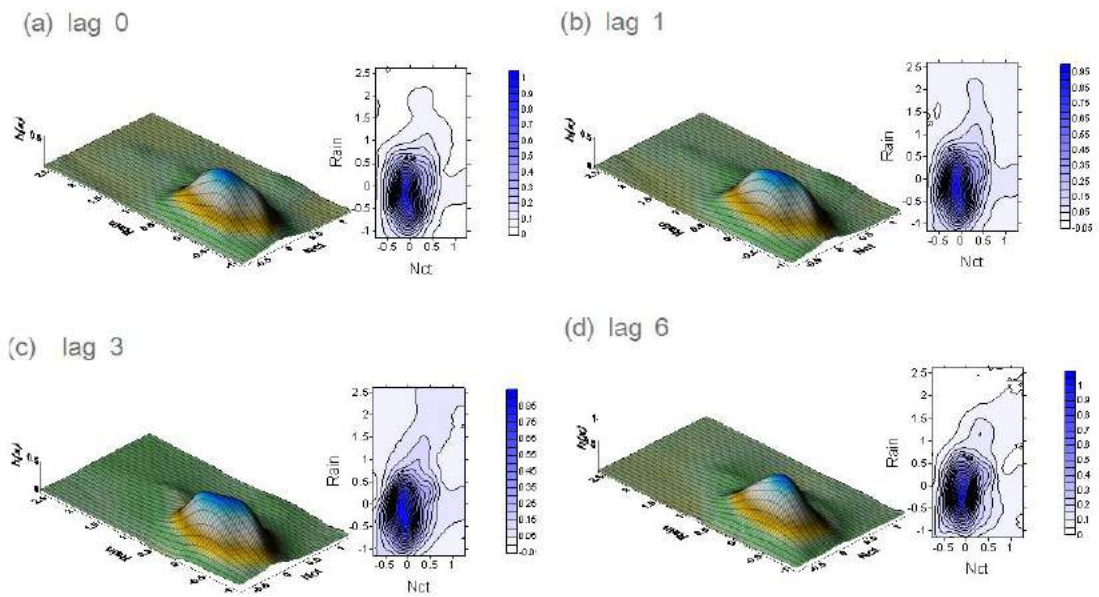
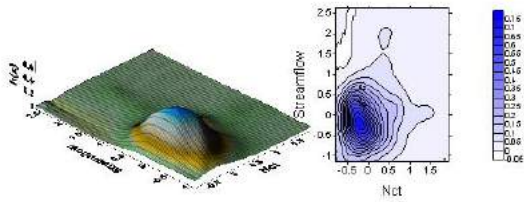


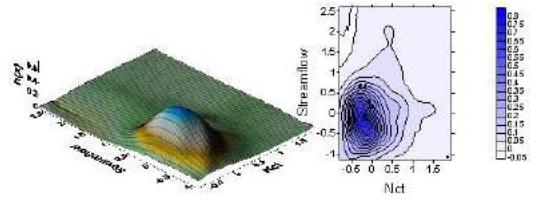
Figure 1. 3D and 2D joint probability kernel density functions both normalized 5-month moving average precipitation and ENSO(N_{CT}) index over the Han River Basin. (a) to (d) indicates lag 0, 1, 3, and 6, respectively.

<Han River Basin: Streamflow>

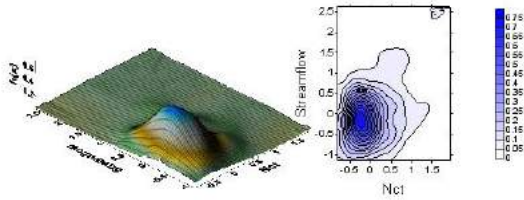
(a) lag 0



(b) lag 1



(c) lag 3



(d) lag 6

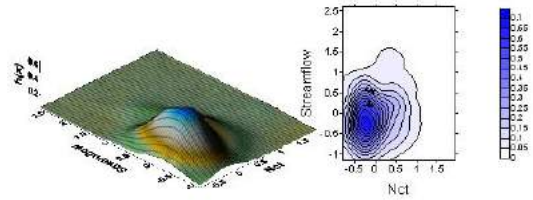
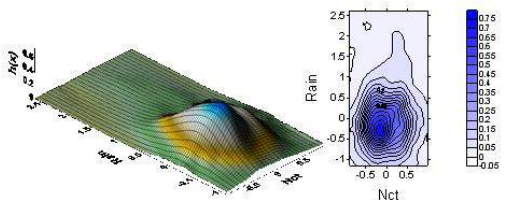


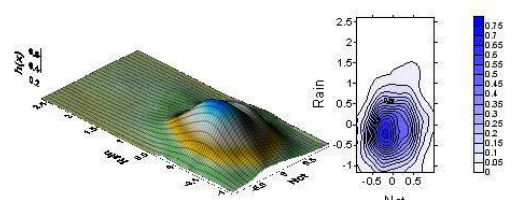
Figure 2. Same as Figure 1. except showing streamflow.

<Nakdong River Basin: Precipitation>

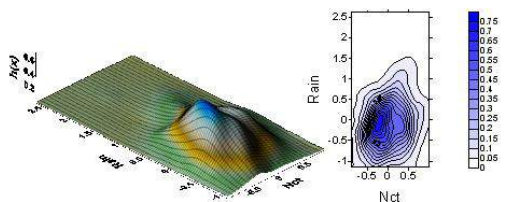
(a) lag 0



(b) lag 1



(c) lag 3



(d) lag 6

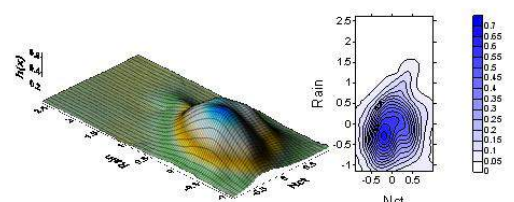
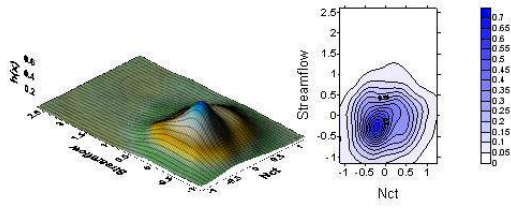


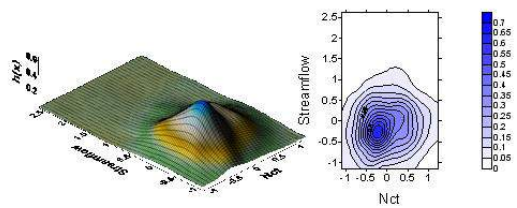
Figure 3. 3D and 2D joint probability kernel density functions both normalized 5-month moving average precipitation and ENSO(N_{CT}) index over the Nakdong River Basin. (a) to (d) indicates lag 0, 1, 3, and 6, respectively.

<Nakdong River Basin: Streamflow>

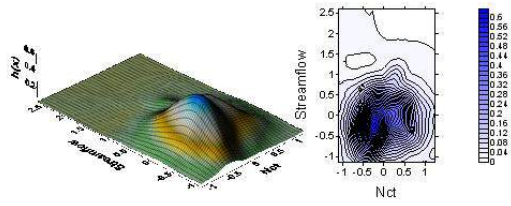
(a) lag 0



(b) lag 1



(c) lag 3



(d) lag 6

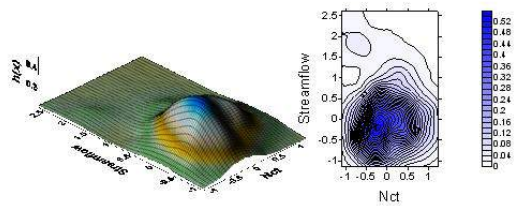
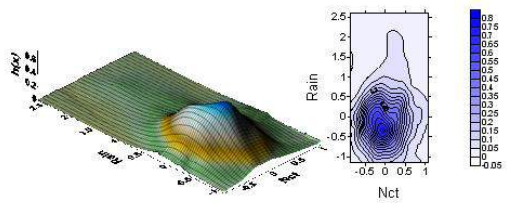


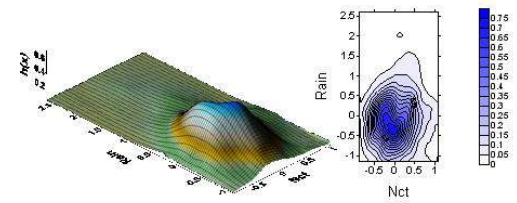
Figure 4. Same as Figure 3. except showing streamflow.

<Geum River Basin: Precipitation>

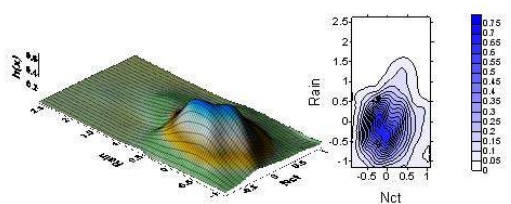
(a) lag 0



(b) lag 1



(c) lag 3



(d) lag 6

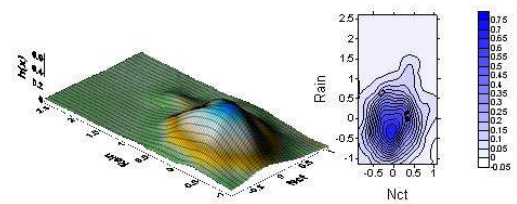
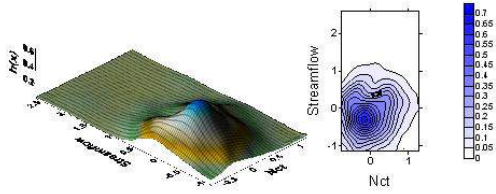


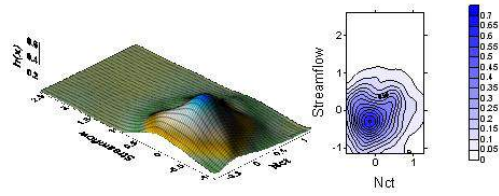
Figure 5. 3D and 2D joint probability kernel density functions both normalized 5-month moving average precipitation and ENSO(N_{CT}) index over the Geum River Basin. (a) to (d) indicates lag 0, 1, 3, and 6, respectively.

<Geum River Basin: Streamflow>

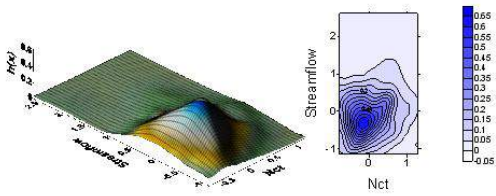
(a) lag 0



(b) lag 1



(c) lag 3



(d) lag 6

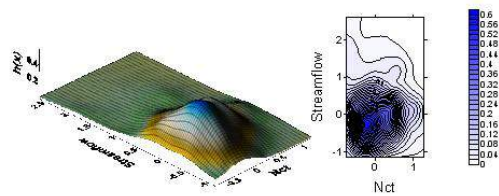
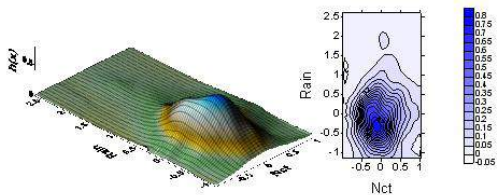


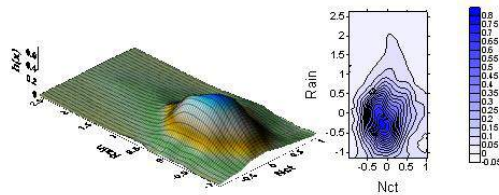
Figure 6. Same as Figure 5. except showing streamflow.

<Seomjin River Basin: Precipitation>

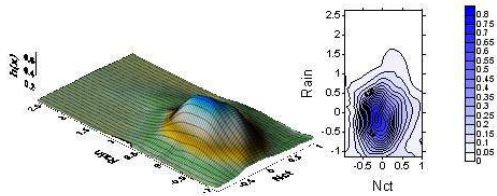
(a) lag 0



(b) lag 1



(c) lag 3



(d) lag 6

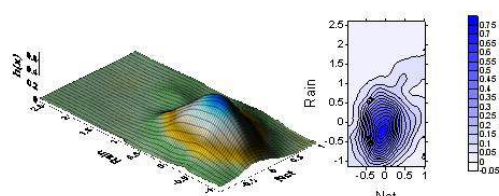


Figure 7. 3D and 2D joint probability kernel density functions both normalized 5-month moving average precipitation and ENSO(N_{CT}) index over the Seomjin River Basin. (a) to (d) indicates lag 0, 1, 3, and 6, respectively.

<Seomjin River Basin: Streamflow>

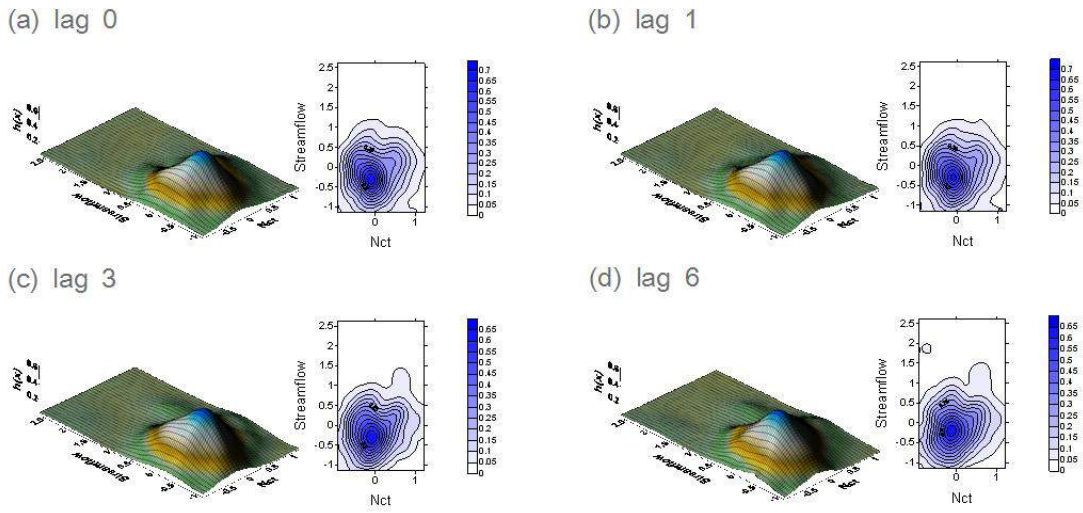


Figure 8. Same as Figure 7. except showing streamflow.

<Yongsan River Basin: Precipitation>

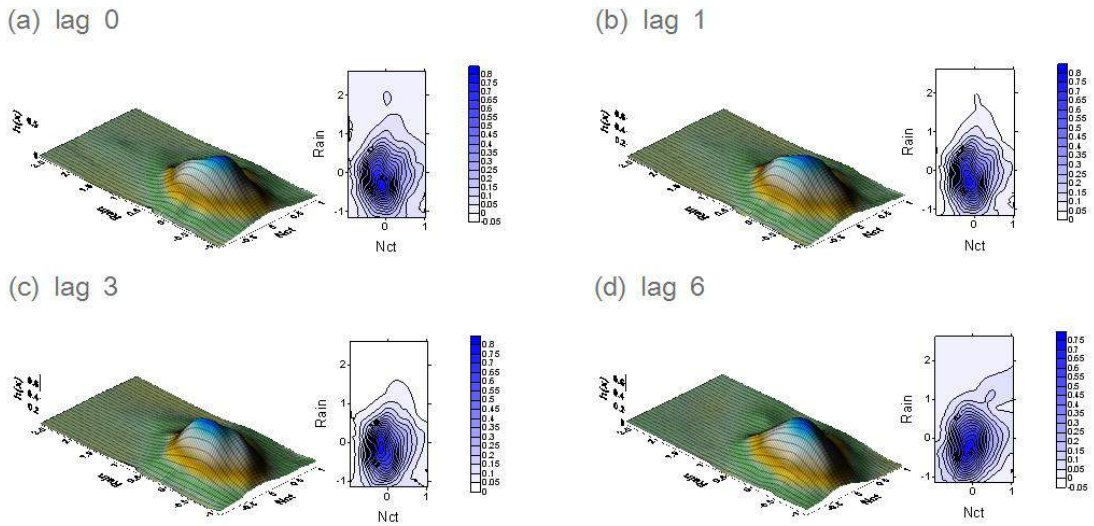
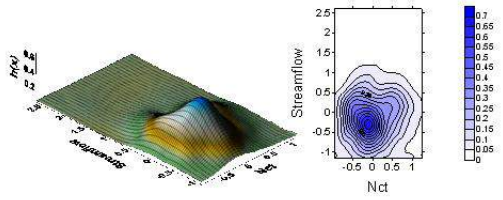


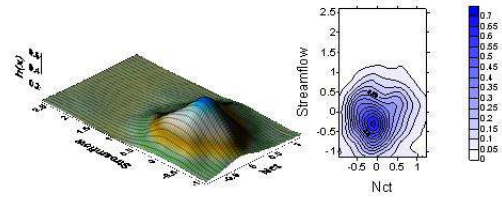
Figure 9. 3D and 2D joint probability kernel density functions both normalized 5-month moving average precipitation and ENSO(N_{CT}) index over the Yongsan River Basin. (a) to (d) indicates lag 0, 1, 3, and 6, respectively.

<Yongsan River Basin: Streamflow>

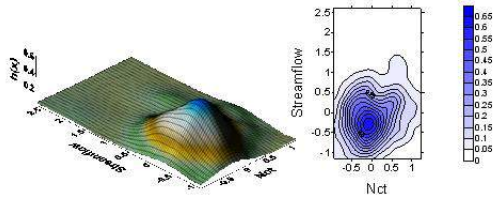
(a) lag 0



(b) lag 1



(c) lag 3



(d) lag 6

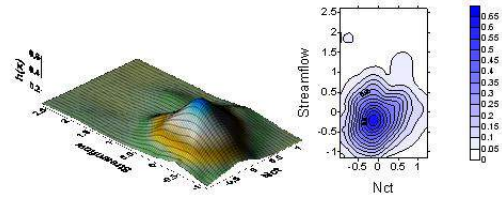


Figure 10. Same as Figure 9. except showing streamflow.

□ 수문인자와 ENSO(N_{WP})의 Joint Probability Kernel Density Function 분석결과

<Han River Basin: Precipitation>

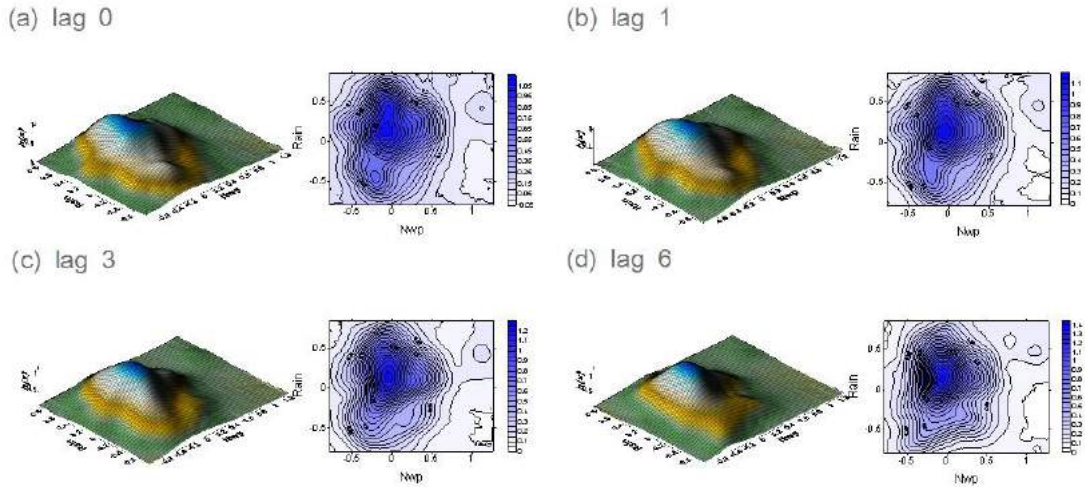


Figure 11. 3D and 2D joint probability kernel density functions both normalized 5-month moving average precipitation and the ENSO(N_{WP}) index over the Han River Basin. (a) to (d) indicates lag 0, 1, 3, and 6, respectively.

<Han River Basin: Streamflow>

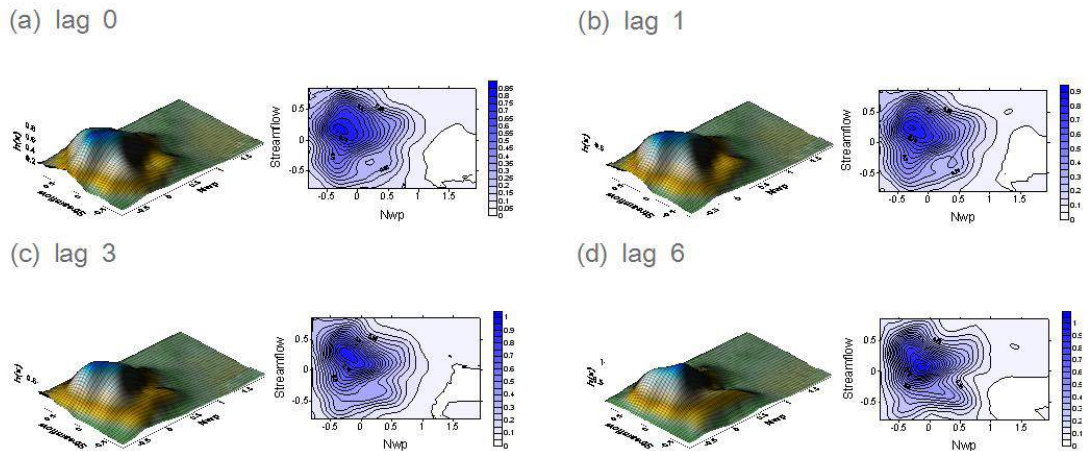
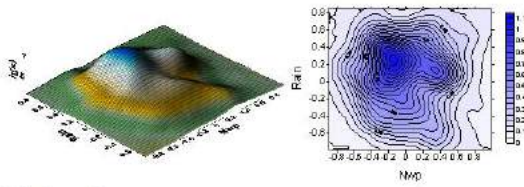


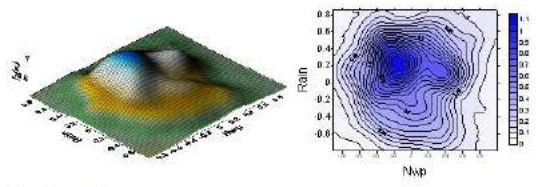
Figure 12. Same as Figure 11. except showing streamflow.

<Nakdong River Basin: Precipitation>

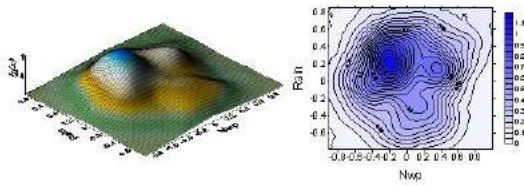
(a) lag 0



(b) lag 1



(c) lag 3



(d) lag 6

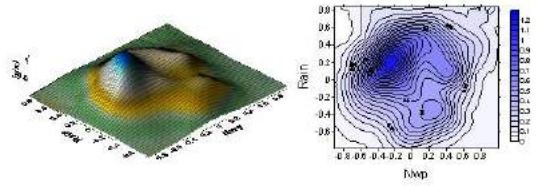
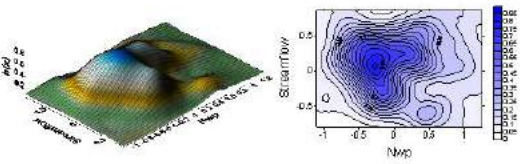


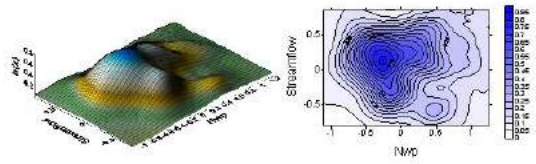
Figure 13. 3D and 2D joint probability kernel density functions both normalized 5-month moving average precipitation and ENSO(N_{WP}) index over the Nakdong River Basin. (a) to (d) indicates lag 0, 1, 3, and 6, respectively.

<Nakdong River Basin: Streamflow>

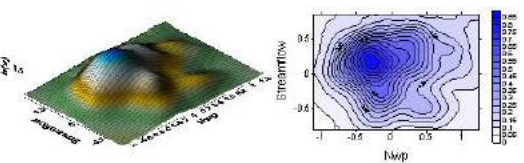
(a) lag 0



(b) lag 1



(c) lag 3



(d) lag 6

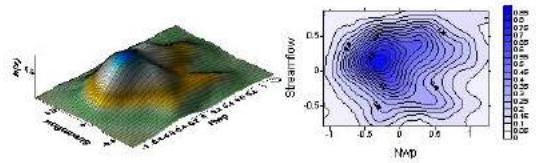
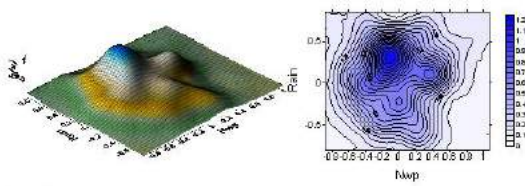


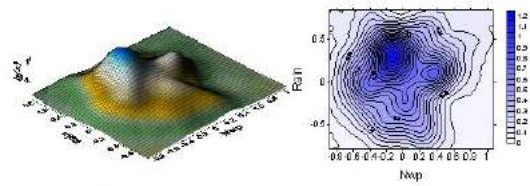
Figure 14. Same as Figure 13. except showing streamflow.

<Geum River Basin: Precipitation>

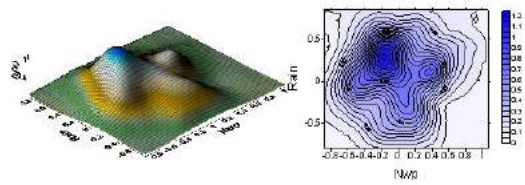
(a) lag 0



(b) lag 1



(c) lag 3



(d) lag 6

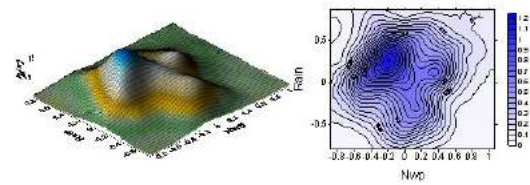
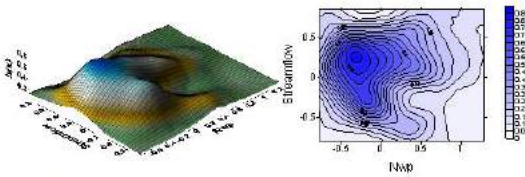


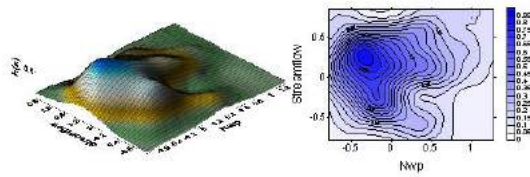
Figure 15. 3D and 2D joint probability kernel density functions both normalized 5-month moving average precipitation and ENSO(N_{WP}) index over the Geum River Basin. (a) to (d) indicates lag 0, 1, 3, and 6, respectively.

<Geum River Basin: Streamflow>

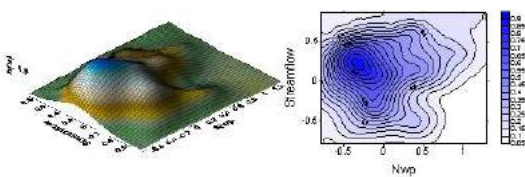
(a) lag 0



(b) lag 1



(c) lag 3



(d) lag 6

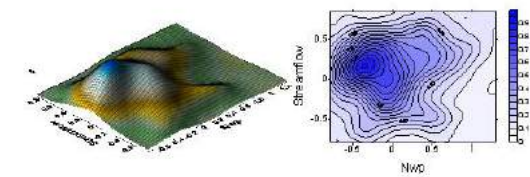
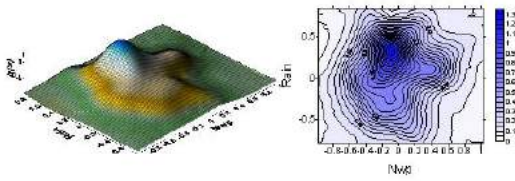


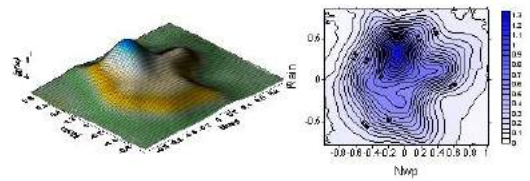
Figure 16. Same as Figure 15. except showing streamflow.

<Seomjin River Basin: Precipitation>

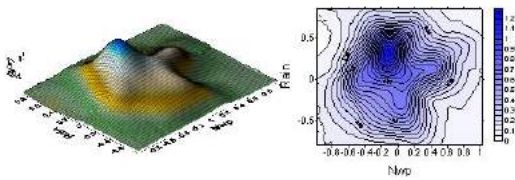
(a) lag 0



(b) lag 1



(c) lag 3



(d) lag 6

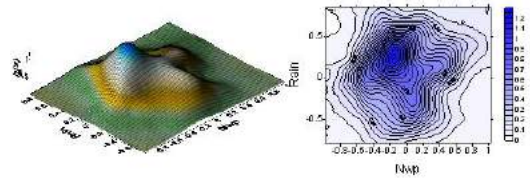
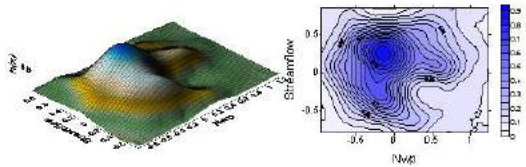


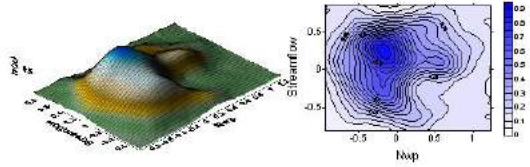
Figure 17. 3D and 2D joint probability kernel density functions both normalized 5-month moving average precipitation and ENSO(N_{wp}) index over the Seomjin River Basin. (a) to (d) indicates lag 0, 1, 3, and 6, respectively.

<Seomjin River Basin: Streamflow>

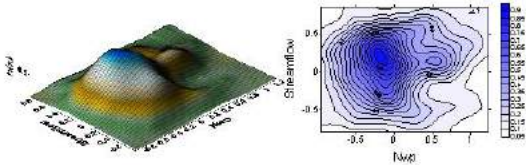
(a) lag 0



(b) lag 1



(c) lag 3



(d) lag 6

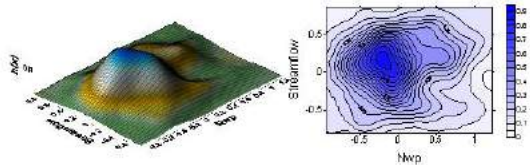
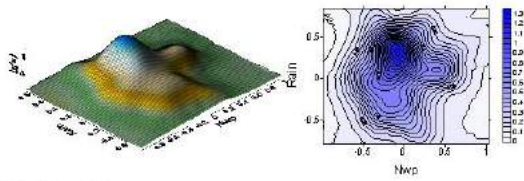


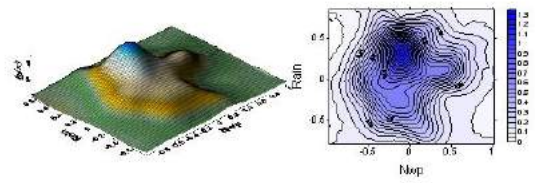
Figure 18. Same as Figure 17. except showing streamflow.

<Yongsan River Basin: Precipitation>

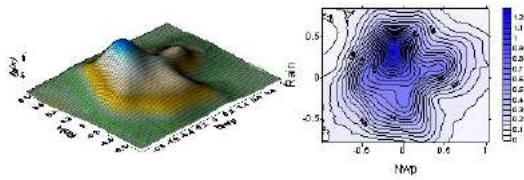
(a) lag 0



(b) lag 1



(c) lag 3



(d) lag 6

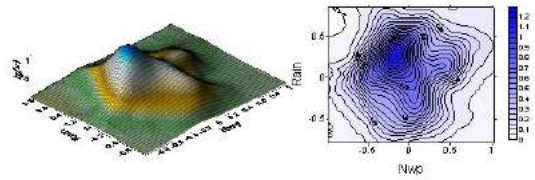
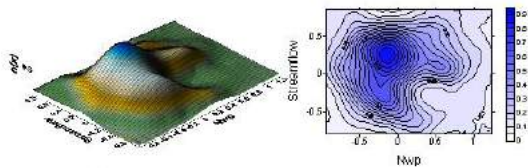


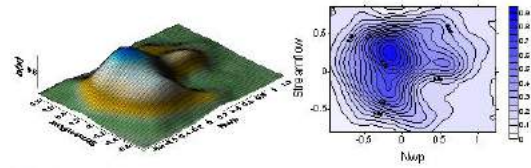
Figure 19. 3D and 2D joint probability kernel density functions both normalized 5-month moving average precipitation and ENSO(N_{WP}) index over the Yongsan River Basin. (a) to (d) indicates lag 0, 1, 3, and 6, respectively.

<Yongsan River Basin: Streamflow>

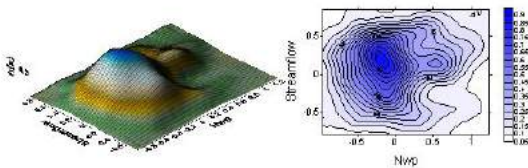
(a) lag 0



(b) lag 1



(c) lag 3



(d) lag 6

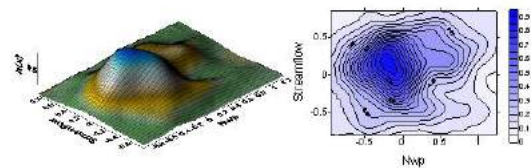


Figure 20. Same as Figure 19. except showing streamflow.

□ 수문인자와 IOD의 Joint Probability Kernel Density Function 분석 결과

<Han River Basin: Precipitation>

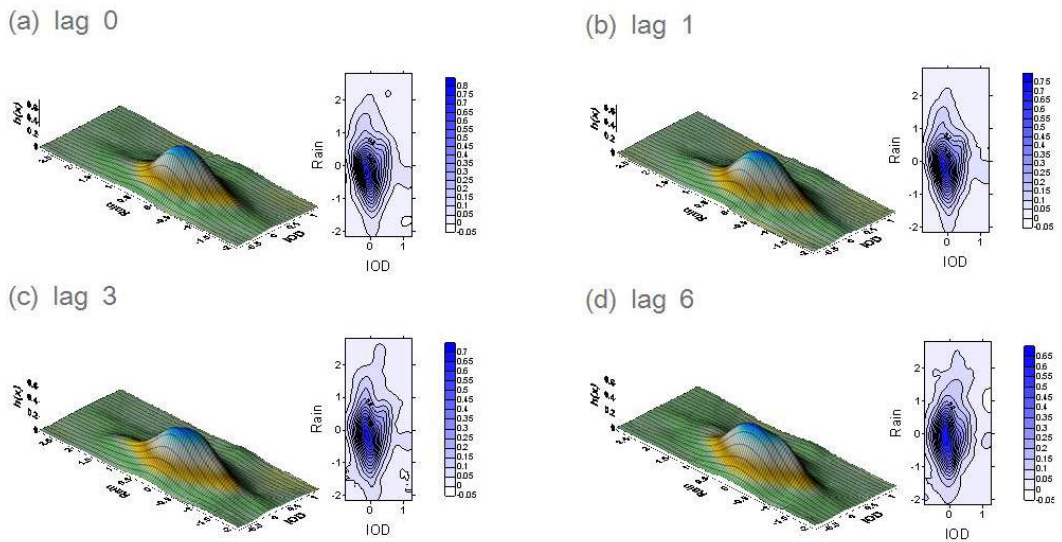


Figure 21. 3D and 2D joint probability kernel density functions both normalized 5-month moving average precipitation and IOD index over the Han River Basin. (a) to (d) indicates lag 0, 1, 3, and 6, respectively.

<Han River Basin: Streamflow>

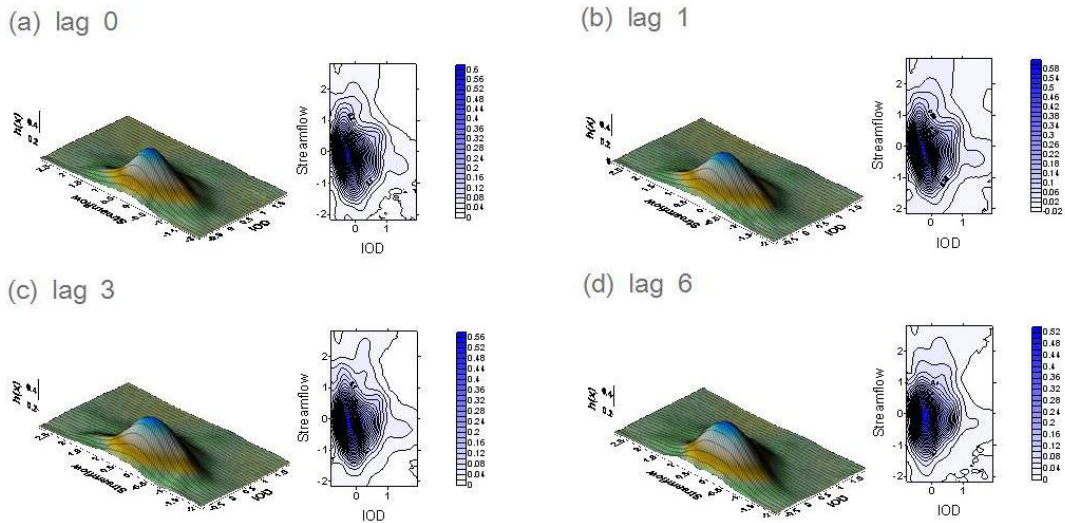
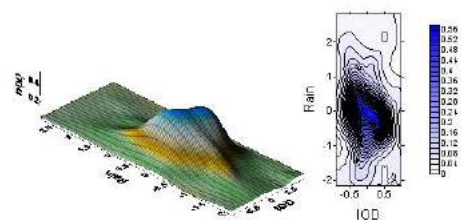


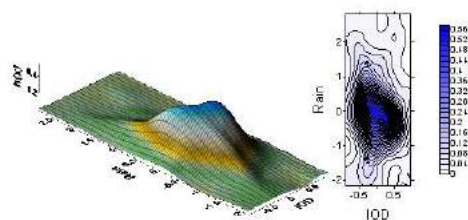
Figure 22. Same as Figure 21. except showing streamflow.

<Nakdong River Basin: Precipitation>

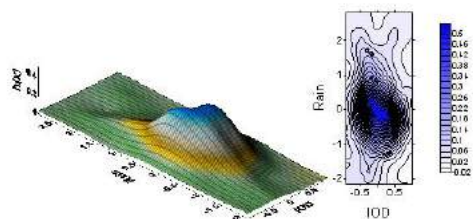
(a) lag 0



(b) lag 1



(c) lag 3



(d) lag 6

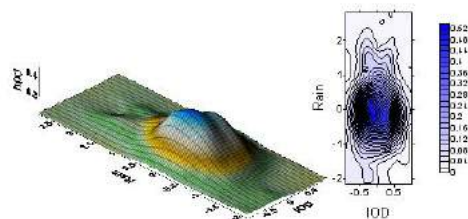
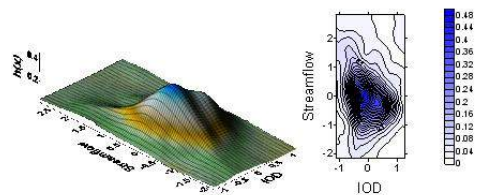


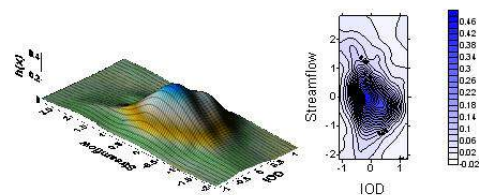
Figure 23. 3D and 2D joint probability kernel density functions both normalized 5-month moving average precipitation and IOD index over the Nakdong River Basin. (a) to (d) indicates lag 0, 1, 3, and 6, respectively.

<Nakdong River Basin: Streamflow>

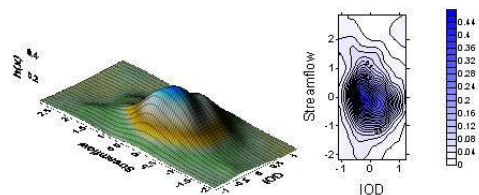
(a) lag 0



(b) lag 1



(c) lag 3



(d) lag 6

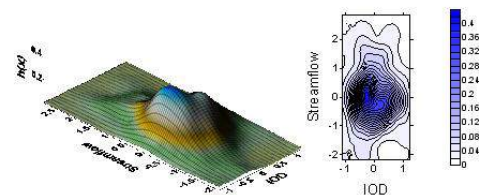


Figure 24. Same as Figure 23. except showing streamflow.

<Geum River Basin: Precipitation>

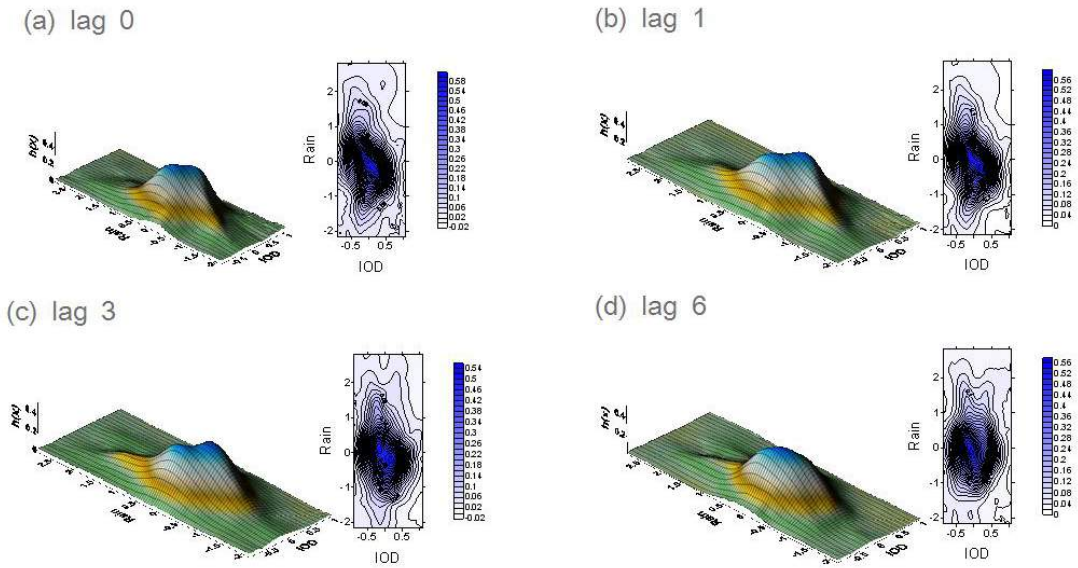


Figure 25. 3D and 2D joint probability kernel density functions both normalized 5-month moving average precipitation and IOD index over the Geum River Basin. (a) to (d) indicates lag 0, 1, 3, and 6, respectively.

<Geum River Basin: Streamflow>

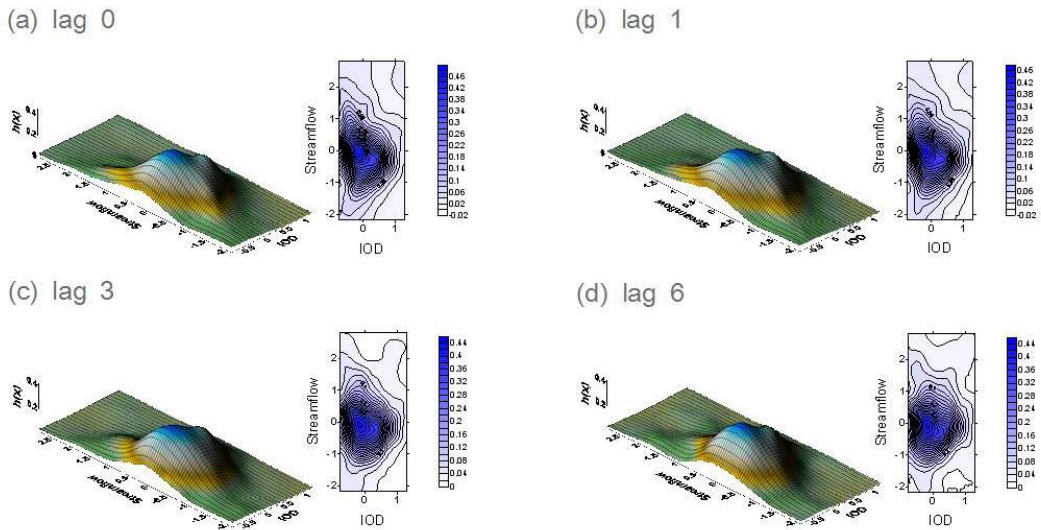
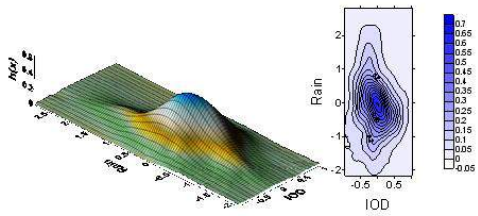


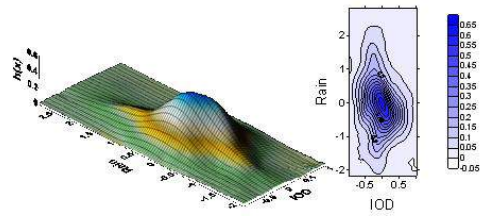
Figure 26. Same as Figure 25. except showing streamflow.

<Seomjin River Basin: Precipitation>

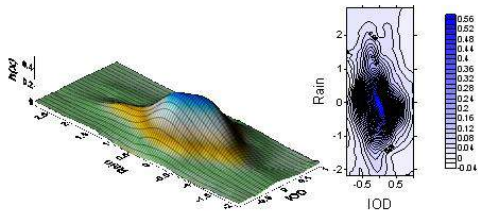
(a) lag 0



(b) lag 1



(c) lag 3



(d) lag 6

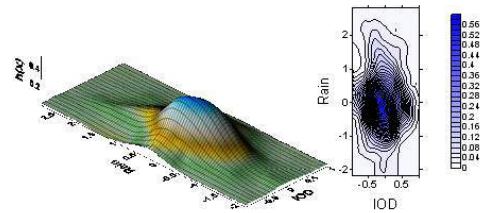
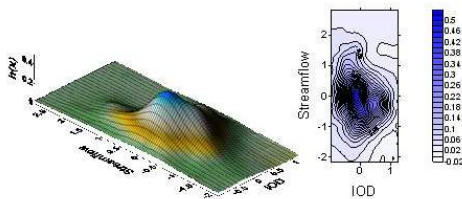


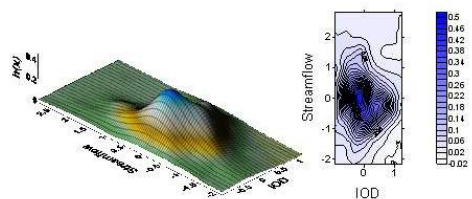
Figure 27. 3D and 2D joint probability kernel density functions both normalized 5-month moving average precipitation and IOD index over the Seomjin River Basin. (a) to (d) indicates lag 0, 1, 3, and 6, respectively.

<Seomjin River Basin: Streamflow>

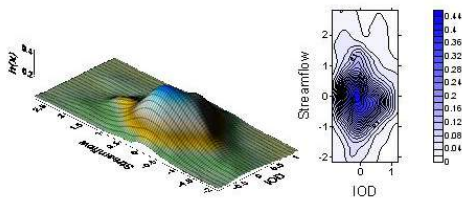
(a) lag 0



(b) lag 1



(c) lag 3



(d) lag 6

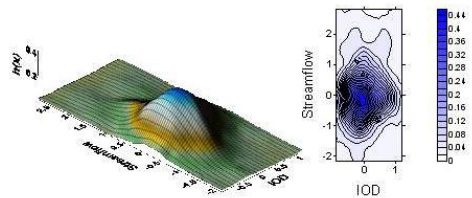
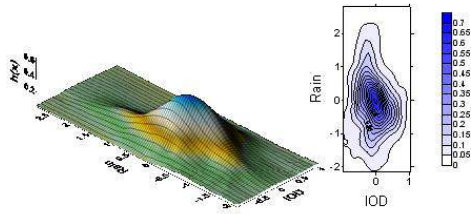


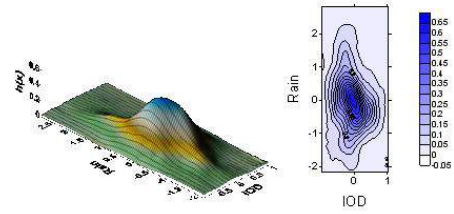
Figure 28. Same as Figure 27. except showing streamflow.

<Youngsan River Basin: Precipitation>

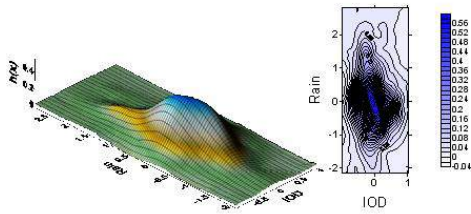
(a) lag 0



(b) lag 1



(c) lag 3



(d) lag 6

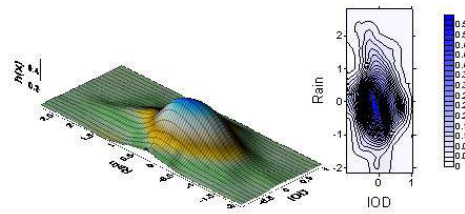
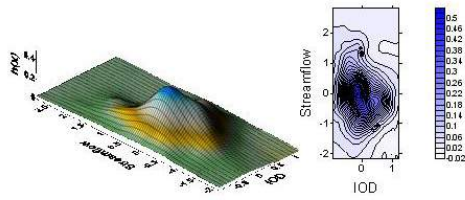


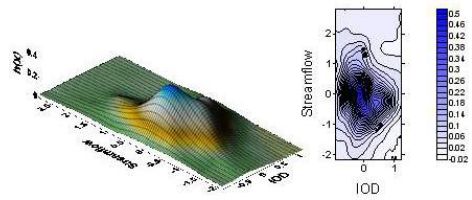
Figure 29. 3D and 2D joint probability kernel density functions both normalized 5-month moving average precipitation and IOD index over the Youngsan River Basin. (a) to (d) indicates lag 0, 1, 3, and 6, respectively.

<Youngsan River Basin: Streamflow>

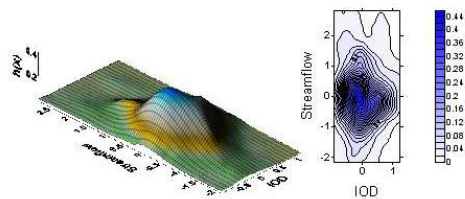
(a) lag 0



(b) lag 1



(c) lag 3



(d) lag 6

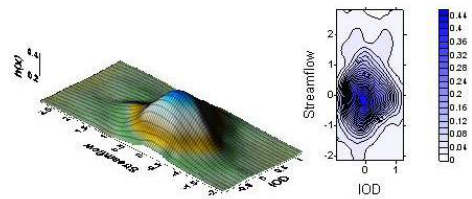


Figure 30. Same as Figure 29. except showing streamflow.

APPENDIX(III)

□ ENSO 변동에 따른 한반도 수문 패턴 분석

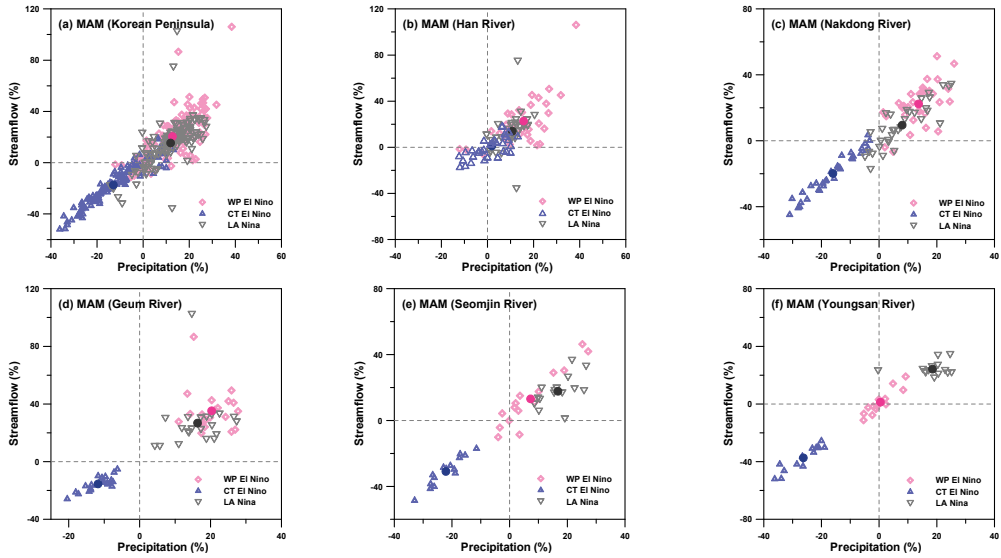


Figure 1. Percentage anomaly (departures from the 1971-2000 normals) changes between MAM precipitation and MAM streamflow in different ENSO types over the Korean Peninsula and their five major river basin.

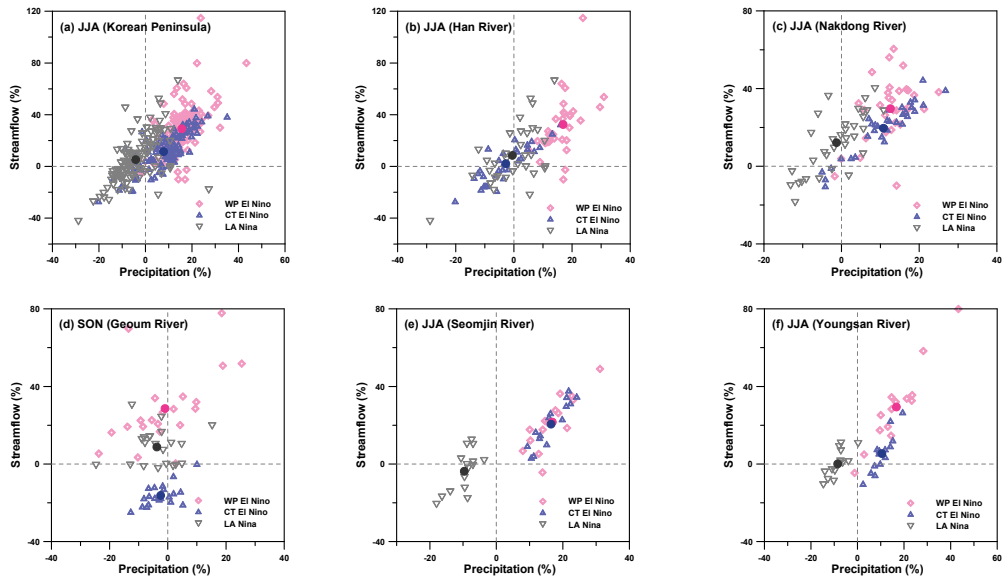


Figure 2. Same as Figure 1. except showing JJA season.

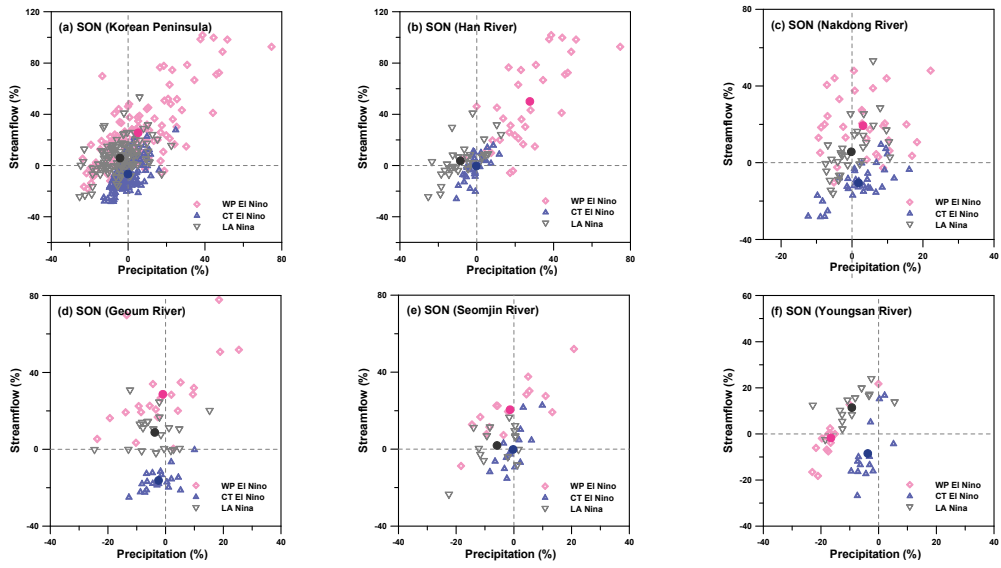


Figure 3. Same as Figure 1. except showing SON season.

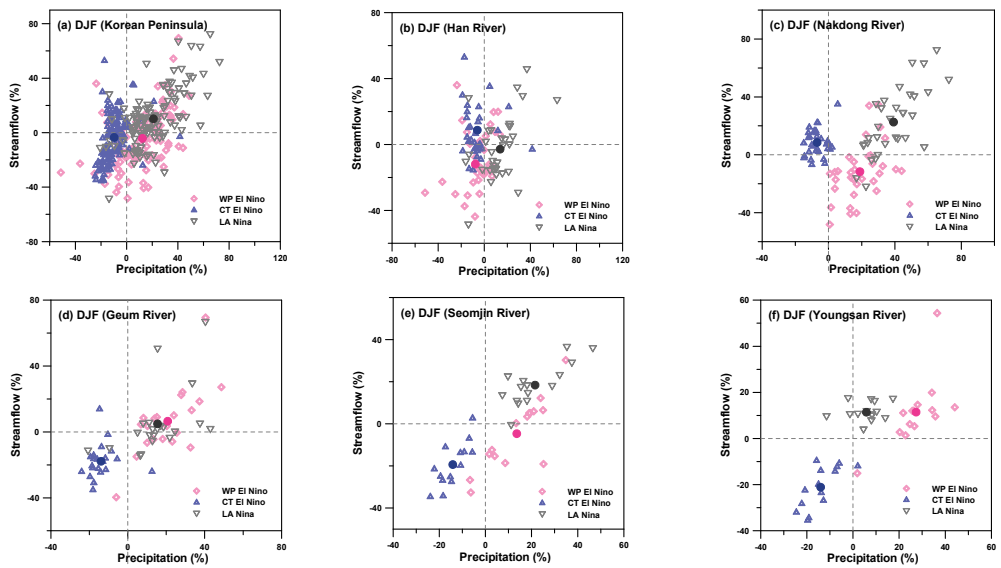


Figure 4. Same as Figure 1. except showing DJF season.

□ IOD 변동에 따른 한반도 수문 패턴 분석

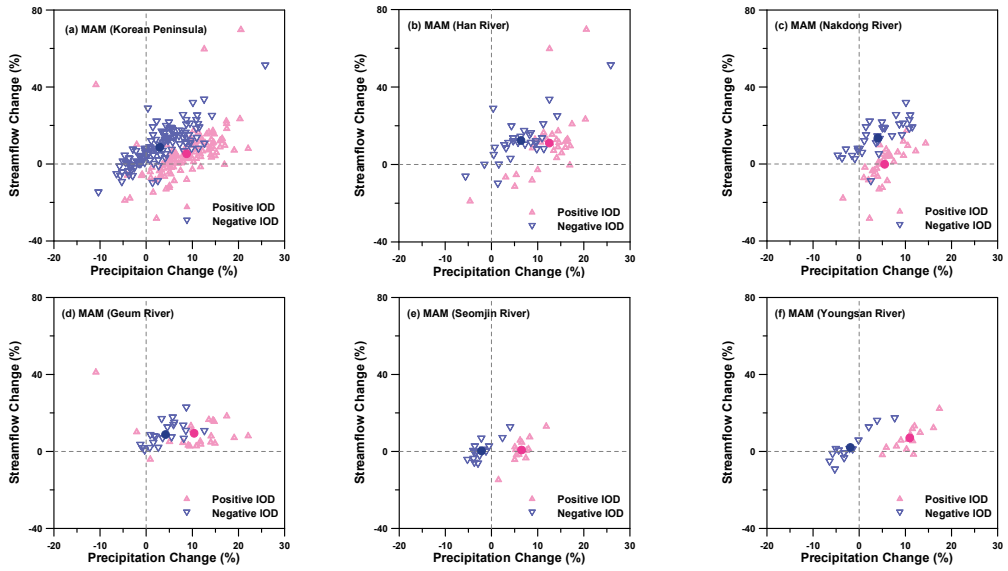


Figure 5. Percentage anomaly (departures from the 1971-2000 normals) changes between MAM precipitation and MAM streamflow in different IOD types (Positive and Negative) over the Korean Peninsula and their five major river basin.

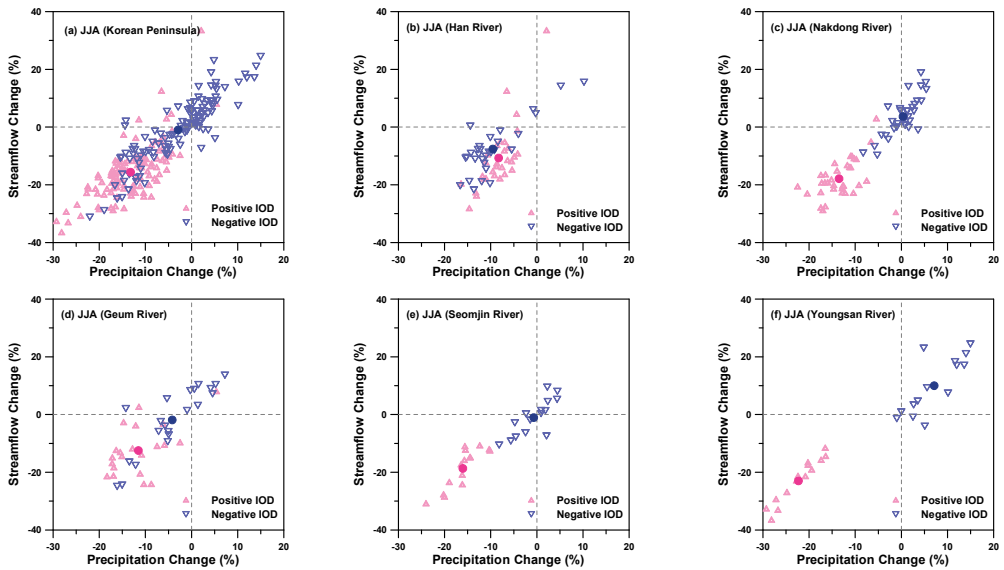


Figure 6. Same as Figure 5. except showing JJA season.

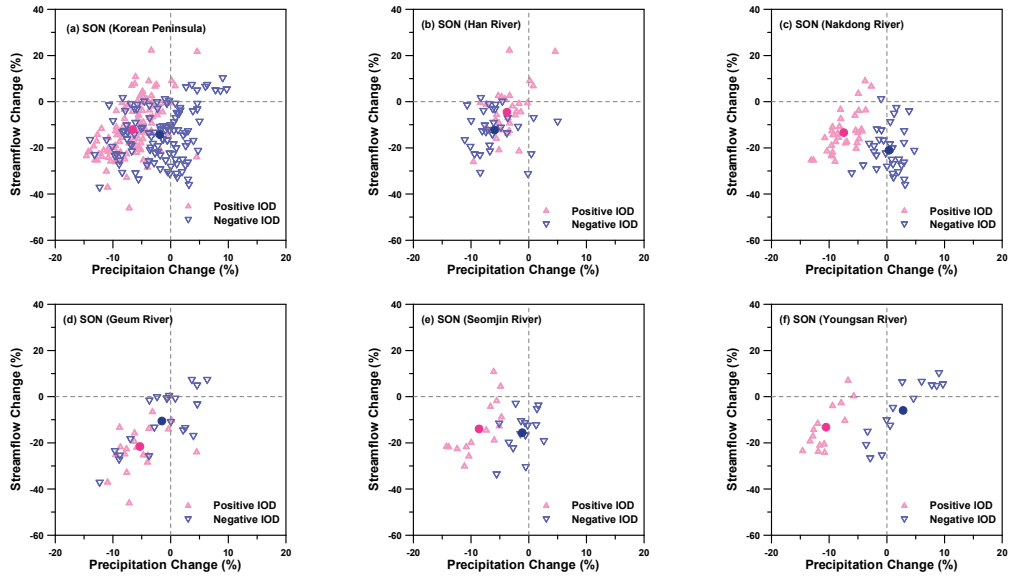


Figure 7. Same as Figure 5. except showing SON season.

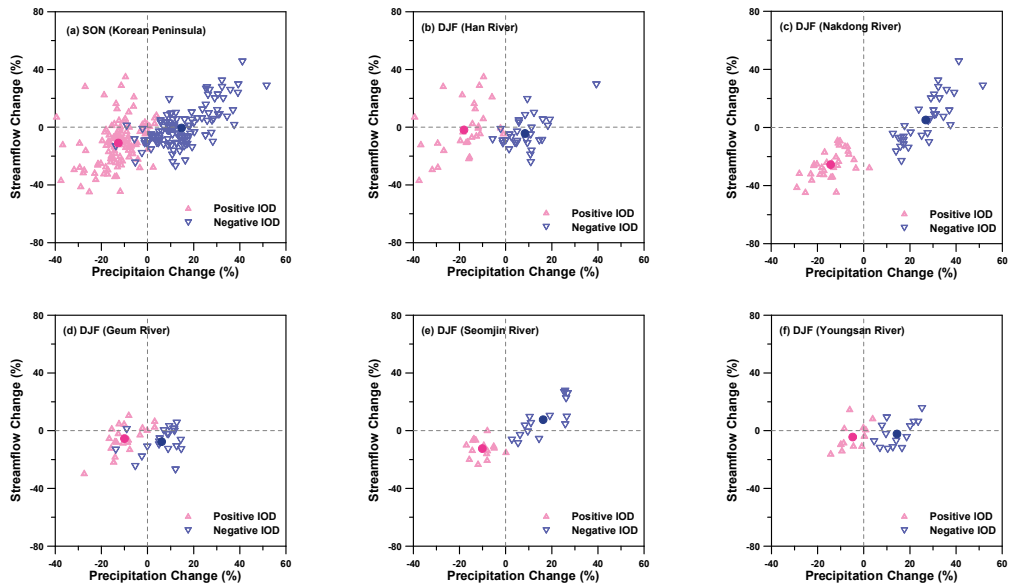


Figure 8. Same as Figure 5. except showing DJF season.

연구보고서 2015-12

원격상관 기반 극한기후패턴변화에 따른 한반도 지역수문변동영향 분석

Extreme Climate Patterns and their Hydrologic Impacts over the Korean Peninsula:

Links with Atmospheric Teleconnections

윤선권 기후변화연구팀



APEC Climate Center

612-020 부산광역시 해운대구 센텀7로 12

Tel: 051-745-3900 Fax: 051-745-3949

www.apcc21.org

 www.facebook.com/apcc21

 www.youtube.com/APECClimateCenter21

 www.twitter.com/apcc21

 www.plus.google.com/+APECClimateCenter21

 www.flickr.com/apcc21