국내 강수 자료에 대한 시공간적 변동 특성 평가: EOF와 CSEOF 분석을 중심으로

Analysis of the Spatiotemporal Behavior of Precipitation in South Korea Based on EOF and CSEOF Analyses

조은샘* · 유철상**

Cho, Eunsam*, and Yoo, Chulsang**

Abstract

In this study, EOF analysis and CSEOF analysis were applied to major ASOS precipitation data in Korea to evaluate the spatiotemporal variability of precipitation in Korea. It was concluded that both EOF and CSEOF analyses are appropriate for identifying the spatiotemporal characteristics of precipitation in Korea. In particular, the CSEOF analysis method was able to interpret the temporal, cyclic behavior of precipitation data in detail. Both EOF and CSEOF showed that the first component explained the variance of most of the raw data. From the first EOF to the third EOF, the authors identified the average precipitation characteristics in Korea, precipitation characteristics according to latitude, and the phenomenon estimated by the mountain effect. The first CSEOF was characterized by precipitation in summer and winter in Korea, the second CSEOF was characterized by latitude and local precipitation, and the third CSEOF was characterized by varied and complex variation in precipitation.

Key words : Precipitation, EOF Analysis, CSEOF Analysis

요 지

본 연구에서는 국내 강수의 시공간적 변동성을 평가하기 위해 EOF 분석과 CSEOF 분석 방법을 국내 주요 ASOS 강수 자료에 적용하였다. EOF 분석과 CSEOF 분석 모두 국내 강수의 시공간적 주요 특성을 파악하는데 적절하다는 결론을 얻을 수 있었다. 특히, CSEOF 분석 방법을 통해 국내 강수 자료의 계절적 순환 특성을 자세하게 파악할 수 있었다. 먼저, EOF와 CSEOF 모두 첫 번째 성분이 대부분의 원자료의 분산을 설명하고 있는 것으로 나타났다. 첫 번째 EOF부터 세 번째 EOF까지 그림을 그려본 결과, 우리나라의 평균적인 강수 특성, 위도 차이에 따른 강수 특성, 산지 효과로 추측되는 현상을 확인할 수 있었다. 첫 번째 CSEOF는 우리나라 여름철 및 겨울철의 강수 특성, 두 번째 CSEOF는 위도별 강수 특성 및 국부적으로 혼재되어 있는 강수 특성, 세 번째 CSEOF에서는 두 번째 CSEOF 보다 더 다양하고 복잡한 강수의 변동 특성을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 국내 강수, EOF 분석, CSEOF 분석

1. 서 론

전 세계적으로 지구온난화로 인한 기후변화의 심각성이 고조되면서, 해외 언론에서는 ‘기후변화(Climatic Change)’라는 중립적인 용어 대신 ‘기후위기(Climatic Crisis)’라는 표현이 쓰이기 시작했다(Carrington, 2019). 우리나라의 기후 또한

지구온난화의 영향을 받고 있으며, 최근 국지성 집중호우와 홍수 및 가뭄의 발생빈도가 함께 높아지고 있는 것으로 밝혀졌다(Ahn et al., 2011; MPSS, 2014; Kim et al., 2016; Kim and Kwon, 2016; Lee et al., 2019). 이는 우리나라 강수의 시공간적 변동 특성이 기후변화로 인해 과거 특성과 달라지고 있다는 것을 의미하기도 한다(Kwon and Lee, 2010). 국지

*정회원, 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 박사과정(E-mail: saemrnt@gmail.com)

Member, Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University

**교신저자, 정회원, 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 교수(Tel: +82-2-3290-3912, Fax: +82-2-3290-3912, E-mail: envchul@korea.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University

성 집중 호우와 홍수 및 가뭄에 대한 선제적인 대응책을 마련하기 위해서는 우리나라 강수의 시공간적 변동 특성을 파악하는 일이 정교하게 이루어져야 한다.

강수는 시공간적으로 변동성이 매우 큰 기상 현상이다. 강수는 시간적으로 짧은 기간에 집중적으로 내리는 소나기부터 일주일 이상의 기간 동안 연속적으로 지속되는 장마까지 다양하게 발생한다. 공간적으로는 좁은 지역에 내리는 국지성 강수도 있으며, 넓은 공간에 정제되어 발생하는 전선성 강수도 있다. 특히, 강수는 기상학적인 요인뿐만 아니라 지형적인 요인의 영향 또한 받기 때문에 강수의 시공간적 발생 특성을 파악하는 일은 간단하지 않다(Kim et al., 2011; Lee, 2015; Kim, 2018).

국내 연구 사례를 살펴보면 우리나라 강수의 시공간적 특성을 파악하기 위해 다양한 통계기법이 적용됐음을 알 수 있다. Park et al. (2003)은 기상청 산하 60개의 강우지점을 선정하고 각 지점에서 추출한 32개의 강우자료를 분석하여 전국을 공간적으로 수문학적 동질성을 가진 5개의 권역과 2개의 기타지역으로 구분하였다. Oh and Moon (2009)은 우리나라 14개 지점의 일 강우자료에 대한 변동성 분석과 경향성 분석을 수행하여 1998년부터 2007년까지 강우량이 증가하고 강우 일수가 감소하는 추세를 확인하였다. Lee et al. (2011)은 국내 기상관측소 65개의 강수 자료를 이용하여 위경도별 강수의 시공간적 특성이 어떤 경향을 보이는지 분석하였다. 대부분의 국내 연구 사례에서는 평균, 분산, 상관계수 등의 기본 통계치를 이용하여 강수의 시공간적인 변동 특성을 파악하고자 하였다. 하지만, 기본적인 통계치를 이용하여 변동 특성을 분석하는 방법으로는 비선형적인 변동성을 내포하고 있는 강수자료를 분석하는데 한계가 있다.

최근 이러한 한계점을 극복하기 위해 분석 자료를 적절한 방법으로 가공하여 자료에 내재되어 있는 변동 특성을 분석하는 연구들이 활발하게 수행되고 있다. 기상 분야에서는 특히 자료에 내재된 변동 특성을 분석하기 위해 주로 Empirical Orthogonal Function (EOF) 분석을 이용하고 있다(Kutzbach, 1967; Wallace and Dickinson, 1972; Singh and Kripalani, 1986; Wagner et al., 1990; Kim and North, 1993; Kim, 1996; Yoo and Kim, 2004; Jawson and Niemann, 2007; Deser et al., 2010). 특히 EOF 분석 방법의 적용성을 확장하여 이용하는 연구도 진행되고 있으며, 자료의 순환적인 특성을 분석하는데 초점이 맞춰진 Cyclostationary Empirical Orthogonal Functions (CSEOF) 분석 방법이 관심을 받고 있다(Kim and North, 1997; Kim, 2002; Trenberth et al., 2005; Lim and Kim, 2007; Na et al., 2011; Roh et al., 2012; Kim et al., 2015).

본 연구에서는 기상 분야에서 주로 쓰이는 EOF 분석 기법과 CSEOF 분석 기법을 이용하여 강수의 시공간적 변동 특성을 평가하고자 하였다. 국내 주요 Automated Synoptic

Observing System (ASOS)의 강수 자료에 CSEOF 분석을 적용하여 주요 성분을 추출한 후 이를 분석하여 국내 강수의 계절적 순환성을 평가하고, 이를 EOF 분석 결과와 비교할 예정이다. 본 연구의 2장에서는 먼저 EOF 및 CSEOF 기법의 이론적 배경을 정리하였으며, 3장에서는 분석한 국내 ASOS 자료를 설명하였고, 4장에는 EOF 및 CSEOF 분석의 적용 결과를 정리하고 5장에 본 연구의 주요 결과들을 요약하여 기술하였다.

2. 분석 방법

2.1 EOF 분석 방법

기상학 분야에 적용되는 EOF 분석은 일반적으로 통계학 분야에서 널리 적용되는 주성분 분석(Principal Component Analysis, PCA)과 같은 개념이다. 주성분 분석은 1901년 Karl Pearson에 의해 정리된 역학의 주축정리와 유사한 개념으로, 1930년 Harold Hotelling에 의해 본격적으로 분석 방법이 정리되었다.

EOF 분석의 목적은 고차원적인 자료를 독립적인 여러 개의 EOF로 분해하여 자료를 요약하는 것이다. 이때 분해되는 EOF들의 분산을 모두 더하면 원래 자료의 총 분산과 동일하다. 일반적으로 EOF를 모두 이용하기보다는 원자료가 가지는 분산의 대부분을 설명하는 일부의 EOF만 이용하여 원 자료의 특성을 이해한다. EOF 분석은 신호처리, 기계 공학, 생명 공학, 구조 동역학 등의 분야에서 활발하게 적용되고 있다(Helena et al., 2000; Monahan, 2000; Loska and Wiechula, 2003; Du et al., 2006; Zhang et al., 2010; Ndiaye and Gabriel, 2011; Metsalu and Vilo, 2015; Granato et al., 2018). EOF 분석은 기후, 수문 분야에도 널리 적용되어 왔으며, 특히 가뭄의 특성을 평가하는 연구에 주로 적용되었다(Bengraïne and Marhaba, 2003; Keyantash and Dracup, 2004; Bai et al., 2008; Noori et al., 2010; Lorenzo-Lacruz et al., 2013).

EOF 분석을 수학적으로 간단하게 나타내면 N-차원의 크기를 가진 자료를 N보다 작은 K-차원으로 자료를 압축적으로 요약하는 방법이라 할 수 있다. EOF 분석의 결과는 각 성분의 분산 설명력을 나타내는 고유값과 이에 대응되는 EOF, 그리고 EOF의 시간적 전개를 나타내는 EOF 시계열로 구분된다. EOF 분석을 수행하는 대표적인 방법으로 특이값 분해(Singular Value Decomposition, SVD) 방법이 있다. 특이값 분해 방법에서는 행렬로 표현된 원 자료를 아래 식과 같이 세 가지 행렬로 분해한다.

$$A = U \times S \times V^T \quad (1)$$

식에서 A는 원 자료이고, 행렬 U의 열들이 바로 EOF이며, S의 대각 요소가 고유값이다. 그리고 EOF 시계열은 행렬

V의 열로 주어진다. SVD 방법은 상당히 많이 쓰이는 방법이며 많은 언어 소프트웨어에서 Subroutine으로 제공된다.

2.2 CSEOF 분석 방법

EOF 분석을 기후 자료에 적용하는 경우에는 자료의 시간적인 정상성(Stationarity)을 기본적으로 가정한다(Kim et al., 2015). 즉, 기후 자료의 공분산 행렬 또는 상관 행렬이 시간적으로 변하지 않는다는 것이다. 하지만, 이러한 가정은 전지구적 기후 자료 및 수문 자료의 분석에서 오차의 원인이 된다. 지구의 기후는 시간적으로 계절적 순환특성을 가지고 있기 때문이다(Hardy, 2003; Franks and Wagener, 2005; Gardner et al., 2006; Rohli and Vega, 2013; Hipel and Fang, 2013). 지구가 구형이기 때문에 공간적으로도 순환특성을 가진다. 따라서 전지구적 기후 자료 및 수문 자료는 시간(계절)에 종속적이며 또한 시간 또는 공간적으로 순환적인 변동 특성을 가진다. 전지구적 기후 자료 및 수문 자료가 가지는 이러한 순환적인 변동 특성을 순환적 정상성(Cyclostationary)이라 한다.

CSEOF 분석 방법은 순환적 정상성을 가진 자료를 분석하기에 적절한 방법이다(Kim and North, 1993; Kim et al., 1996). CSEOF 분석에서 추출되는 CSEOF는 시간에 따라 변하는 함수로 주어지며, 이는 원자료에 푸리에 급수의 개념을 적용하여 얻어진다. 현재까지 CSEOF 분석은 뚜렷한 순환적인 특성을 가지는 기상 자료, 엘니뇨 및 라니냐와 관련된 자료 등의 특성을 분석하는데 이용되어 왔다(Kim, 2002; Trenberth et al., 2005; Lim and Kim, 2007; Kim and Roh, 2010; Oh et al., 2012; Na et al., 2011; Hamlington et al., 2014).

시공간적 주기성을 가지는 원자료를 $T(x, t)$ 는 CSEOF 분석에서 다음과 같은 식으로 표현된다(Kim and North, 1997; Kim, 1997).

$$T(x, t) = \sum_n S_n(t) B_n(x, t) \quad (2)$$

Eq. (2)에서 $S_n(t)$ 는 n 번째 CSEOF의 주성분 시계열이며, $B_n(x, t)$ 는 n 번째 CSEOF의 시간 t 와 공간 x 에 따른 성분을 의미한다. n 개의 CSEOF들은 서로 독립인 특성을 가지고 있으며, 주기 d 를 가지고 반복되는 특성을 가지고 있다. 이러한 특성을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$B_n(x, t) = B_n(x, t + d) \quad (3)$$

CSEOF를 나타내는 $B_n(x, t)$ 은 원자료의 시공간적인 공분산 함수 $C(x, t; x', t')$ 와 관련된 다음 식을 풀어 유도할 수 있다(Kim et al., 2015).

$$\int_D \int_T C(x, t; x', t') B_n(x', t') dt' dx' = \lambda_n B_n(x, t) \quad (4)$$

Eq. (4)에서 λ_n 은 n 번째 CSEOF에 대응하는 고유값이며, 이 값을 이용하여 각 CSEOF가 설명하는 원자료의 분산 비율을 계산할 수 있다. 총 CSEOF의 개수를 m 이라 할 때 n 번째 CSEOF에 의해 설명되는 원자료의 분산 비율은 $\lambda_n / \sum_{i=1}^m \lambda_i$ 이다.

2.3 Pattern Correlation 산정 방법

본 연구에서는 월 강수량 자료와 CSEOF 분석 결과의 상관관계를 파악하기 위해 두 자료 간 pattern correlation을 계산하여 분석하였다. Pattern correlation은 행렬 또는 벡터 형태를 가진 자료의 상관관계를 해석할 때 이용된다. Pattern correlation은 아래 식과 같이 두 자료에 대한 상관계수의 절대값을 계산하여 구할 수 있다(Kim and North, 1993).

$$R_{pat} = \left| \frac{\sum_{i=1}^N (X_{obs,i} - \bar{X}_{obs})(X_{cseof,i} - \bar{X}_{cseof})}{\sigma_{obs} \sigma_{cseof}} \right| \quad (5)$$

위 식에서 R_{pat} 은 pattern correlation, N 은 자료의 총 개수, $X_{obs,i}$ 는 관측 자료, $\bar{X}_{obs}$ 는 관측 자료의 평균, $X_{cseof,i}$ 는 CSEOF, $\bar{X}_{cseof}$ 는 CSEOF의 평균, σ_{obs} 는 관측 자료의 표준편차, σ_{cseof} 은 CSEOF의 표준편차이다. Pattern correlation의 범위는 0부터 1까지로 정해져 있다. 두 자료의 상관관계가 강할수록 1에 가까운 값이 나타나고, 상관관계가 약할수록 0에 가까운 값이 계산된다.

3. 분석 자료

우리나라의 월 강수량 자료의 경우 12개월 주기를 가지고 변동하는 특성을 가지고 있다. 이에 본 연구에서는 국내 주요 ASOS의 월 강수량 자료를 수집하여 이용하였다. 본 연구에서는 전국에 위치한 131개 ASOS 중에서 결측값 문제가 없으며 40년 이상 관측이 수행된 47개 ASOS를 선정하였다. 이에 해당하는 ASOS는 강릉, 서울, 인천, 울릉도, 추풍령, 전주, 광주, 목포, 제주, 서귀포, 대구, 수원, 춘천, 청주, 서산, 군산, 속초, 대전, 울진, 강화, 홍천, 대관령, 양평, 이천, 원주, 인제, 충주, 정읍, 해남, 장흥, 거창, 성산, 임실, 남원, 천안, 부여, 금산, 제천, 보령, 부안, 영주, 문경, 보은, 산청, 구미, 영천, 의성이다. 본 연구에서는 해당 ASOS에서 2007년부터 2018년까지 관측된 월 강수량 자료를 분석에 이용하였다. Fig. 1은 본 연구에서 이용한 ASOS 중 서울, 해남, 속초의 월 강수량을 그래프로 나타낸 것이다.

CSEOF 분석에서는 자료의 순환적인 특성을 고려하여 자료를 분석하기 때문에 순환적인 특성이 나타나는 변수가 자료에 정확하게 지정되어 있어야 한다. CSEOF 분석은 자료의 공간적 순환성을 고려한 경우와 계절적 순환성을

Fig. 1. Monthly Precipitation Time Series from Seoul, Haenam, Sokcho ASOS

고려한 경우로 나뉜다. 공간적 순환성을 고려한 CSEOF 분석에서는 경도에 따라 반복되는 자료의 특성을 분석할 수 있으며, 이는 전지구 격자형 자료에 적합한 분석 방법이다. 계절적 순환성을 고려한 CSEOF 분석에서는 시간에 따라 반복되는 자료의 특성을 분석한다. 본 연구에서는 우리나라에 해당하는 월 강수량만을 분석하였으며 시간적 특성이 뚜렷한 월 강수량을 이용하였기 때문에 시간적 순환성을 고려한 CSEOF 분석을 수행하였다.

4. 분석 결과

4.1 EOF와 CSEOF가 설명하는 원 자료의 분산 비율

본 연구에서는 David Stepaniak 등이 개발한 Fortran 90

subroutine CYCLOSTATIONARY_WD 프로그램을 이용하여 CSEOF 분석을 수행하였다. 이 프로그램은 Open Software로 National Center for Atmospheric Research 홈페이지 (http://www.cgd.ucar.edu/cas/software/SUBR_CYCLOSTATIONARY_WD.f90.html)에서 다운받을 수 있다. CSEOF 분석 프로그램에 월 강수량 자료를 입력하고, 분석 주기를 12로 설정하면 월 강수량 자료의 월별 순환 특성을 파악할 수 있다. 이때 주기를 1로 하고 분석을 수행하면 기존 EOF 분석 결과를 얻을 수 있다. 먼저, Table 1은 분석 결과로 얻어지는 각각의 CSEOF와 EOF들이 원 자료의 분산을 설명하는 비율을 정리한 것이다.

Table 1을 자세히 살펴보면, EOF와 CSEOF 모두 첫 번째 주성분이 대부분의 원자료의 분산을 설명하고 있는 것을

Table 1. Variance Explained by EOF and CSEOF Derived

Order	CSEOF		EOF	
	Explained Variance (%)	Cumulative Variance	Explained Variance (%)	Cumulative Variance
1	78.0	78.0	84.9	84.9
2	6.5	84.5	6.5	91.4
3	4.2	88.7	2.1	93.5
4	2.8	91.5	1.3	94.8
5	2.5	94.0	1.0	95.8
6	1.8	95.8	0.6	96.4
7	1.4	97.2	0.5	96.9
8	1.2	98.4	0.4	97.3
9	0.9	99.3	0.4	97.7
10	0.4	99.7	0.3	98.0

알 수 있다. 이는 첫 번째 EOF와 CSEOF가 월 강수량의 평균적인 특성을 보여주기 때문이다. 첫 번째 EOF와 CSEOF의 비중은 CSEOF (78%)보다 EOF (84.9%)가 더 큰 것을 볼 수 있다. 첫 번째 CSEOF의 비율이 EOF 보다 작다는 것은 CSEOF 분석을 통해 자료의 평균적인 특성 외에 다양한 강수의 시공간적 특성을 더 세부적으로 파악할 수 있음을 의미한다.

4.2 국내 강수 자료에 대한 EOF와 CSEOF 분석 결과

다음으로 EOF와 CSEOF 분석 결과를 그림으로 나타내어 비교해 보고자 한다. 본 연구에서는 열 개의 EOF와 CSEOF 중에 원자료의 분산을 90% 가까이 설명하는 첫 번째부터 세 번째까지의 EOF와 CSEOF를 그림으로 그려 자세히 살펴 보았다. 먼저, EOF 분석 결과는 월별로 구분되어 나타나지 않고, EOF별로 그림을 한 개씩 나타낼 수 있다(Fig. 2). 그림을 자세히 살펴보면 첫 번째 EOF가 우리나라 강수의 평년값과 유사한 공간 분포를 가지고 있는 것을 알 수 있다. 두 번째 EOF는 위도 차이에 따른 강수 특성이 달라지는 현상을 보여주는 것으로 판단된다. 마지막으로, 세 번째 EOF는 태백산맥을 기준으로 값의 부호가 달라지는 것을 볼 수 있는데, 이는 산지 효과에 의한 강수 특성을 보여주는 것으로 추측된다.

CSEOF 분석 결과도 월별로 상세히 그림으로 나타낼 수 있다. Fig. 3은 첫 번째 CSEOF의 월별 주요 변동을 지도상에 나타낸 것이다. 첫 번째 CSEOF 또한 EOF와 마찬가지로 월 강수량의 평균적인 특성을 보여준다. 7월에 대한 첫 번째 CSEOF를 보면 수도권 부근과 대관령 부근, 남부 지방에 비가 많이 내리는 우리나라의 여름철 강수 특성을 잘 보여주고 있다. 아울러, 2월의 첫 번째 CSEOF를 살펴보면, 경상북도 부근 눈이 내리지 않는 지역이 뚜렷히 나타나고 있으며, 눈이 많이 내리는 제주도의 강수 분포가 적절히 나타나 있어 우리나라의 겨울철 강수 특성 또한 잘 반영되어 있음을

알 수 있다. 반면, 2월의 첫 번째 CSEOF를 자세히 보면 눈이 내리지 않는 경남 도서 및 부산 지역에도 양의 값이 분포되어 있음을 알 수 있다. 이는 눈이 아닌 겨울철에 내리는 강수에 의한 결과인 것으로 확인되었다.

다음으로, Fig. 4는 두 번째 CSEOF를 월별로 나타낸 것이다. CSEOF 분석 결과는 월별로 주어지기 때문에 EOF 보다 다양한 강수의 공간적인 분포 특성을 살펴보기에 용이하다. 특히 두 번째 CSEOF부터는 양의 값과 음의 값이 혼합되어 나타나기 때문에, 양과 음으로 나뉘는 지역의 상반되는 강수 특성을 확인할 수 있다. 특히, 7월의 두 번째 CSEOF를 보면, 중부지방은 양의 값을 가지며 남부지방으로 갈수록 그 값이 음으로 바뀌고 있음을 볼 수 있다. 이 CSEOF를 통해 위도별로 달라지는 강수 특성이 재현될 수 있을 것이라 판단된다. 5월의 CSEOF 또한 국부적으로 양값과 음값이 혼재되어 있음을 확인할 수 있다. 반면 대부분의 두 번째 CSEOF는 전체적으로 동일한 부호의 값으로 분포되어 있어, 전체적으로 양의 값을 가지거나 음의 값을 가지는 것으로 나타났다. 각각의 두 번째 CSEOF가 정확히 어떤 기상 현상을 나타내고 있는지는 정의할 수는 없지만, 이들 CSEOF를 통해 시공간적으로 변동성이 큰 강수 현상이 일어나고 있음을 알 수 있다.

세 번째 CSEOF 또한 Fig. 5와 같이 월별로 나타낼 수 있다. 세 번째 CSEOF에서는 두 번째 CSEOF 보다 더 다양한 분포의 모양을 확인할 수 있다. 세 번째 CSEOF의 경우에는 대부분이 음의 값과 양의 값이 혼재되어 있는 분포 특성을 보였다. 7월의 세 번째 CSEOF는 대관령 부근, 충청남도과 인천 부근, 제주도, 남부 지방 부근만 양의 값을 가지고 나머지 지역에서는 음의 값으로 분포된 특성을 보였다. 8월의 세 번째 CSEOF를 보면, 중부 지방 일부분만 양의 값을 보이고 다른 모든 지역에서 음의 CSEOF가 나타났다. 세 번째 CSEOF의 경우 원 자료의 분산을 설명하는 비율이 4.2%로 크지는 않지만, 공간적으로 특성이 다른 지역의 강수 현상을 재현하는데 중요한 역할을 하고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 2. EOFs Derived from ASOS Precipitation from 2008 to 2017

Fig. 3. First CSEOFs of ASOS Precipitation from 2008 to 2017

Fig. 4. Second CSEOFs of ASOS Precipitation from 2008 to 2017

Fig. 5. Thrid CSEOFs of ASOS Precipitation from 2008 to 2017

본 연구에서는 시간적 순환성을 고려한 CSEOF 분석과 EOF 분석을 수행하고 그 결과를 비교하였다. 그 결과, EOF와 CSEOF 모두 첫 번째 결과가 대부분의 원자료의 분산을 설명하고 있는 것을 확인하였다. EOF 분석 결과는 월별로 구분되어 나타나지 않고, EOF별로 그림을 한 개씩 나타낼 수 있었으며, 첫 번째 EOF부터 세 번째 EOF까지 그림을 그려본 결과 우리나라의 평균적인 강수 특성, 위도 차이에 따른 강수 특성, 산지 효과로 추측되는 현상을 확인할 수 있었다. EOF 분석 결과와 달리, CSEOF 분석 결과는 월별로 상세히 그림으로 나타낼 수 있다. 첫 번째 CSEOF부터 세 번째 CSEOF까지 월별 결과를 살펴본 결과, 지역별로 다양하게 발생하는 강수의 공간적인 분포를 검토할 수 있었다.

4.3 국내 강수 자료와 CSEOF의 Pattern Correlation 분석

본 연구에서는 CSEOF가 관측 자료와 어떤 관계가 있는지 확인하기 위해 pattern correlation 분석을 수행해보았다. 이를 위해 먼저 2008년부터 2017년까지 관측된 국내 강수 자료를 평균하여 월 평균 강수량 자료를 구축하였다. 이후, 월 평균 강수량 자료는 CSEOF와의 pattern correlation을 계산하는데 이용되었다. 이 과정에서 CSEOF는 월별로 구분되어 나타나기 때문에 월 평균 강수량 자료와 일대일로 대응되게 분석할 수 있다. 반면, EOF의 경우에는 월별로 구분되지 않기 때문에 월 평균 강수량 자료와의 pattern correlation을 계산하는데 한계가 있다. Fig. 6은 월별 CSEOF에 따라 계산되는 월별 pattern correlation을 정리하여 나타낸 것이다.

Fig. 6. Pattern Correlation between CSEOF and Mean of Monthly Precipitation Data

Fig. 6에서 pattern correlation이 1에 가까울수록 CSEOF가 관측 강수 자료의 평균적인 특성과 유사하다고 해석할 수 있다. Fig. 6을 자세히 살펴보면 첫 번째 CSEOF의 pattern correlation이 상당히 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는

앞서 첫 번째 CSEOF가 국내 강수의 평균적인 특성을 나타내고 있다는 주장을 뒷받침해주는 결과라고 할 수 있다. 특히 CSEOF는 9월, 10월을 제외한 모든 결과에서 pattern correlation이 1에 가까운 값을 가지는 것으로 확인되었다. 9월과 10월 또한 0.7 이상의 pattern correlation이 계산되어, 전체적으로 월 평균 강수 자료와 첫 번째 CSEOF 사이 강한 상관관계가 있는 것으로 나타났다.

반면, 두 번째와 세 번째 CSEOF의 pattern correlation은 상당히 불규칙적으로 계산되었다. 두 번째 CSEOF의 경우, 4월에는 0.88의 pattern correlation이 계산되었지만 1월과 9월에는 0.1 미만의 pattern correlation이 계산되었다. 세 번째 CSEOF 또한 3월에 0.8 이상의 pattern correlation이 계산되기도 하고, 5월, 8월, 11월의 pattern correlation은 0.1 미만으로 계산되었다. 아울러, 두 번째 CSEOF와 세 번째 CSEOF 사이 pattern correlation 결과의 차이가 존재하는 것을 알 수 있다. 두 결과 사이 pattern correlation이 유사하게 계산되는 경우를 찾기가 어렵기 때문이다. 예를 들어, 두 번째 CSEOF의 경우 4월 결과에 대한 pattern correlation이 가장 높은 반면 세 번째 CSEOF에서는 3월 결과에 대한 pattern correlation이 가장 높게 나타났다.

Pattern correlation 분석 결과를 종합적으로 봤을 때, 첫 번째 CSEOF가 우리나라의 평균적인 강수 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 두 번째 CSEOF와 세 번째 CSEOF는 관측 자료로는 파악하기 어려운 강수 특성을 나타내고 있으며, 본 연구에서는 이를 위도별 강수 특성과 산지 효과에 따른 강수 특성이라 추측하였다. 추후 두 번째 CSEOF와 세 번째 CSEOF의 특성을 분석하기 위해서는 위도별 강수 특성과 산지 효과를 검증할 관측 자료와 추가 분석이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 EOF 분석과 CSEOF 분석 방법을 이용하여 국내 강수 자료의 시공간적 변동성을 평가하였다. 그 결과, 두 방법 모두 국내 강수 자료의 시공간적 주요 특성을 분석하는데 적용될 수 있음을 확인하였다. 특히, CSEOF 분석 방법의 경우에는 강수 자료의 계절적 순환 특성을 보다 정밀하게 파악하는데 이용될 수 있음을 알게 되었다. 이와 더불어 본 연구의 주요 결과들을 정리하면 아래와 같다.

- (1) EOF와 CSEOF의 첫 번째 주성분이 설명하는 원자료의 분산 비율을 비교해본 결과, CSEOF 분석을 통해 자료의 평균적인 특성 외에 다양한 강수의 시공간적 특성을 더 세부적으로 파악할 수 있음을 확인하였다.
- (2) 첫 번째 EOF는 우리나라 강수의 평년값과 유사한 공간 분포, 두 번째 EOF는 위도 차이에 따른 강수 특성이 달라지는 현상, 세 번째 EOF는 산지 효과에 의한 강수

특성을 보여주는 것으로 나타났다.

- (3) CSEOF 분석을 통해서서는 주요 성분들의 월별 변동 특성을 파악할 수 있었다. 첫 번째 CSEOF는 우리나라 여름철 및 겨울철의 강수 특성, 두 번째 CSEOF는 위도별 강수 특성 및 국부적으로 혼재되어 있는 강수 특성, 세 번째 CSEOF에서는 두 번째 CSEOF 보다 더 다양하고 복잡한 강수의 변동 특성을 확인할 수 있었다.
- (4) Pattern correlation 분석 결과를 통해 첫 번째 CSEOF가 국내 평균적인 강수 특성을 나타내고 검증할 수 있었다. 반면, 두 번째 CSEOF와 세 번째 CSEOF는 관측 자료만으로 분석 결과의 특성을 파악하기 어려웠다. 이에 본 연구에서는 이를 위도별 강수 특성과 산지 효과에 따른 강수 특성이라 추측하였다.

본 연구의 결과는 향후 기후변화를 비롯한 다양한 변수를 고려하여 우리나라의 물순환 과정을 해석하는데 적용될 수 있을 것으로 기대된다. 특히, 기후변화에 따라 국내 강수의 평균적인 경향이 어떻게 바뀌는지 자세히 알 수 있다. EOF와 CSEOF 분석 기법을 적용함에 따라 분석 목적에 맞게 강수의 특성을 세분화하여 비교할 수 있다. 예를 들어, 위도별 강수 특성 및 산지효과에 따른 강수 특성을 배제하고 강수의 평균적인 특성만을 비교하기 위해 첫 번째 EOF와 CSEOF를 이용할 수 있다. 이러한 분석 방법은 정책적으로도 물수지를 분석하고 수자원을 관리하는 차원에서 강수를 더욱 정교하게 해석할 수 있게 해준다.

본 연구의 한계 및 추후 연구 방향은 다음과 같다. 먼저, EOF와 CSEOF가 위도별 강수 특성과 산지 효과에 의한 강수 특성을 나타내는지 검증할 필요가 있다. 아울러, 본 연구에서는 강수의 시공간적 변동 평가 결과를 물순환 해석 과정에 반영할 구체적인 방법에 대해서는 정확하게 제시하지는 않았다. 앞으로 강수의 시공간적 변동성을 평가하는 연구와 더불어 이러한 변동성이 유출 특성에 어떠한 영향을 미치는지 파악하는 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 물환경사업의 지원을 받아 연구되었습니다(127559).

References

Ahn, J.H., Yi, J.E., and Choi, C.W. (2011). flood mitigation analysis for abnormal flood at the South Han River basin. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 11, No. 5, pp. 265-272.

Bai, Z.Y., Li, C.D., Sun, H.C., and Zhao, J.F. (2008). Principal component analysis and comprehensive evaluation on physiological indices of drought resistance in wheat substitution. *Scientia Agricultura Sinica*, Vol. 41, No. 12, pp. 4264-4272.

Bengraïne, K., and Marhaba, T.F. (2003). Using principal component analysis to monitor spatial and temporal changes in water quality. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 100, No. 1-3, pp. 179-195.

Carrington, D. (2019). Why the Guardian is changing the language it uses about the environment (May 17, 2019). *The Guardian*, Retrieved from <https://www.theguardian.com/environment/2019/may/17/why-the-guardian-is-changing-the-language-it-uses-about-the-environment>

Deser, C., Alexander, M.A., Xie, S.P., and Phillips, A.S. (2010). Sea surface temperature variability: Patterns and mechanisms. *Annual Review of Marine Science*, Vol. 2, pp. 115-143.

Du, Q.S., Jiang, Z.Q., He, W.Z., Li, D.P., and Chou, K.C. (2006). Amino acid principal component analysis (AAPCA) and its applications in protein structural class prediction. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, Vol. 23, No. 6, pp. 635-640.

Franks, S.W., and Wagener, T. (Eds.). (2005). *Regional hydrological impacts of climatic change: Hydroclimatic Variability*. Wallingford, UK: International Association of Hydrological Sciences (IAHS) Press.

Gardner, W.A., Napolitano, A., and Paura, L. (2006). Cyclostationarity: Half a century of research. *Signal Processing*, Vol. 86, No. 4, pp. 639-697.

Granato, D., Santos, J.S., Escher, G.B., Ferreira, B.L., and Maggio, R.M. (2018). Use of principal component analysis (PCA) and hierarchical cluster analysis (HCA) for multivariate association between bioactive compounds and functional properties in foods: A critical perspective. *Trends in Food Science and Technology*, Vol. 72, pp. 83-90.

Hamlington, B., Leben, R., Strassburg, M., and Kim, K.Y. (2014). Cyclostationary empirical orthogonal function sea-level reconstruction. *Geoscience Data Journal*, Vol. 1, No. 1, pp. 13-19.

Hardy, J.T. (2003). *Climate change: Causes, effects, and solutions*. Chichester, UK: John Wiley & Sons.

Helena, B., Pardo, R., Vega, M., Barrado, E., Fernandez, J.M., and Fernandez, L. (2000). Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer

- (Pisuerga River, Spain) by principal component analysis. *Water Research*, Vol. 34, No. 3, pp. 807-816.
- Hipel, K.W., and Fang, L. (Eds.). (2013). *Stochastic and statistical methods in hydrology and environmental engineering: Volume 4: Effective environmental management for sustainable development*. Berlin, Germany: Springer Science and Business Media.
- Jawson, S.D., and Niemann, J.D. (2007). Spatial patterns from EOF analysis of soil moisture at a large scale and their dependence on soil, land-use, and topographic properties. *Advances in Water Resources*, Vol. 30, No. 3, pp. 366-381.
- Keyantash, J.A., and Dracup, J.A. (2004). An aggregate drought index: Assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage. *Water Resources Research*, Vol. 40, No. 9, W09304. doi:10.1029/2003WR002610
- Kim, D., Hong, S.J., Han, D., Choi, C., and Kim, H.S. (2016). analysis of future meteorological drought index considering climate change in Han-River basin. *Journal of Wetlands Research*, Vol. 18, No. 4, pp. 432-447.
- Kim, D.Y. (2018). Effect of changes in land cover by urbanization on precipitation. *Journal of the Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol. 26, No. 4, pp. 13-19.
- Kim, K.Y. (1996). Sensitivity of a linear detection procedure to the accuracy of empirical orthogonal functions. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, No. D18, pp. 23423-23432.
- Kim, K.Y. (1997). Statistical interpolation using cyclostationary EOFs. *Journal of Climate*, Vol. 10, No. 11, pp. 2931-2942.
- Kim, K.Y. (2002). Investigation of ENSO variability using cyclostationary EOFs of observational data. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. 81, No. 3-4, pp. 149-168.
- Kim, K.Y., and North, G.R. (1993). EOF analysis of surface temperature field in a stochastic climate model. *Journal of Climate*, Vol. 6, No. 9, pp. 1681-1690.
- Kim, K.Y., and North, G.R. (1997). EOFs of harmonizable cyclostationary processes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 54, No. 19, pp. 2416-2427.
- Kim, K.Y., and Roh, J.W. (2010). Physical mechanisms of the wintertime surface air temperature variability in South Korea and the near-7-day oscillations. *Journal of Climate*, Vol. 23, No. 8, pp. 2197-2212.
- Kim, K.Y., Hamlington, B., and Na, H. (2015). Theoretical foundation of cyclostationary EOF analysis for geophysical and climatic variables: Concepts and examples. *Earth-Science Reviews*, Vol. 150, pp. 201-218.
- Kim, K.Y., North, G.R., and Huang, J. (1996). EOFs of one-dimensional cyclostationary time series: Computations, examples, and stochastic modeling. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 53, No. 7, pp. 1007-1017.
- Kim, T.J., and Kwon, H.H. (2016). Analysis of changes in rainfall frequency under different thresholds and its synoptic pattern. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 36, No. 5, pp. 791-803.
- Kim, Y., Choi, D., and Chang, D. (2011). Characteristics of urban meteorology in Seoul Metropolitan area of Korea. *Atmosphere*, Korean Meteorological Society, Vol. 21, No. 3, pp. 257-271.
- Kutzbach, J. (1967). empirical eigenvectors of sea level pressure, surface temperature, and precipitation complexes over North America. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 6, No. 5, pp. 791-802.
- Kwon, H.H., and Lee, J.J. (2010). Spatio-temporal variability analysis of precipitation data through circular statistics. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers B*, Vol. 30, No. 2B, pp. 191-198.
- Lee, G.R. (2015). Relationships between topographical conditions and climatic data at weather stations in South Korea. *Journal of Climate Research*, KU Climate Research Institute, Vol. 10, No. 3, pp. 247-262.
- Lee, J., Kim, D., Park, K.W., and Kim, T. (2019). Establishment of accuracy criteria of flood inundation map using quantitative evaluation indices. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 39, No. 3, pp. 381-389.
- Lee, W., Hong, S., Kim, Y., and Chung, E. (2011). Temporal and spatial variability of precipitation and daily average temperature in the South Korea. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 11, No. 4, pp. 73-86.
- Lim, Y.K., and Kim, K.Y. (2007). ENSO impact on the space-time evolution of the regional Asian summer monsoons. *Journal of Climate*, Vol. 20, No. 11, pp. 2397-2415.
- Lorenzo-Lacruz, J., Morán-Tejeda, E., Vicente-Serrano, S.M., and López-Moreno, J.I. (2013). Streamflow droughts in the Iberian Peninsula between 1945 and

- 2005: Spatial and temporal patterns. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 17, No. 1, pp. 119-134.
- Loska, K., and Wiechula, D. (2003). Application of principal component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir. *Chemosphere*, Vol. 51, No. 8, pp. 723-733.
- Metsalu, T., and Vilo, J. (2015). ClustVis: A web tool for visualizing clustering of multivariate data using Principal Component Analysis and heatmap. *Nucleic Acids Research*, Vol. 43, No. W1, pp. W566-W570.
- Ministry of Public Safety and Security (MPSS). (2014). *Chronology of disasters*.
- Monahan, A.H. (2000). Nonlinear principal component analysis by neural networks: Theory and application to the Lorenz system. *Journal of Climate*, Vol. 13, No. 4, pp. 821-835.
- Na, H., Jang, B.G., Choi, W.M., and Kim, K.Y. (2011). Statistical simulations of the future 50-year statistics of cold-tongue El Niño and warm-pool El Niño. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 47, No. 3, pp. 223-233.
- Ndiaye, D., and Gabriel, K. (2011). Principal component analysis of the electricity consumption in residential dwellings. *Energy and Buildings*, Vol. 43, No. 2-3, pp. 446-453.
- Noori, R., Khakpour, A., Omidvar, B., and Farokhnia, A. (2010). Comparison of ANN and principal component analysis-multivariate linear regression models for predicting the river flow based on developed discrepancy ratio statistic. *Expert Systems with Applications*, Vol. 37, No. 8, pp. 5856-5862.
- Oh, J.H., Kim, K.Y., and Lim, G.H. (2012). Impact of MJO on the diurnal cycle of rainfall over the western maritime continent in the austral summer. *Climate Dynamics*, Vol. 38, No. 5, pp. 1167-1180.
- Oh, T.S., and Moon, Y.I. (2009). Characteristic change analysis of rainfall events using daily rainfall data. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 11, pp. 933-951.
- Park, S.W., Jun, B.H., and Jang, S.H. (2003). A study on the regionalization of point rainfall by multivariate analysis technique. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 36, No. 5, pp. 879-892.
- Roh, J.W., Kim, K.Y., and Jhun, J.G. (2012). Decadal changes in the physical mechanisms of the seasonal cycle of summertime precipitation variability in Korea. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 117, No. D7, D07115. doi:10.1029/2011JD017268
- Rohli, R.V., and Vega, A.J. (2013). *Climatology* (3rd ed.). Burlington, MA, USA: Jones and Bartlett Publishers.
- Singh, S.V., and Kripalani, R.H. (1986). Application of extended empirical orthogonal function analysis to interrelationships and sequential evolution of monsoon fields. *Monthly Weather Review*, Vol. 114, No. 8, pp. 1603-1610.
- Trenberth, K.E., Stepaniak, D.P., and Smith, L. (2005). Interannual variability of patterns of atmospheric mass distribution. *Journal of Climate*, Vol. 18, No. 15, pp. 2812-2825.
- Wagner, D., Ruprecht, E., and Simmer, C. (1990). A combination of microwave observations from satellites and an EOF analysis to retrieve vertical humidity profiles over the ocean. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 29, No. 11, pp. 1142-1157.
- Wallace, J.M., and Dickinson, R. (1972). Empirical orthogonal representation of time series in the frequency domain. Part I: Theoretical considerations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 11, No. 6, pp. 887-892.
- Yoo, C., and Kim, S. (2004). EOF analysis of surface soil moisture field variability. *Advances in Water Resources*, Vol. 27, No. 8, pp. 831-842.
- Zhang, L., Dong, W., Zhang, D., and Shi, G. (2010). Two-stage image denoising by principal component analysis with local pixel grouping. *Pattern Recognition*, Vol. 43, No. 4, pp. 1531-1549.

Received	January 24, 2020
Revised	February 4, 2020
Accepted	June 4, 2020