이변량 웨이블릿 분석을 통한 한반도 장마 및 태풍에 대한 북극진동의 영향 분석

Evaluation of Arctic Oscillation Effect on Monsoons and Typhoons in Korea Using Bivariate Wavelet Analysis

이현욱* · 유철상**

Lee, Hyunwook*, and Yoo, Chulsang**

Abstract

This study performs cross-wavelet analysis between the arctic oscillation index (AOI) and four climate factors: the number of typhoons occurring in the North Pacific, the number of typhoons affecting the Korean Peninsula, the rainfall amount, and the number of rainy days during the monsoon season in Korea. The data period for this analysis was determined to be 1961-2016 by considering the data available, and the analysis was performed annually. The results of this study are summarized as follows. First, the winter AOI is found to have a greater influence on the climate of Korea than the other seasonal AOIs. The winter AOI and both monsoon characteristics—i.e., the total rainfall depth and the number of rainy days—show a strong correlation for their long-term period components in the 1970s, and for their short-term period components after the 1990s. On the other hand, in recent years, a somewhat different trend is observed: the total rainfall and winter AOI show a strong correlation for the long-term period components, but the number of rainy days and winter AOI show a strong correlation for the short-term period components. Second, this study confirms that the typhoon characteristics, rather than the monsoon characteristics, are weakly correlated with the winter AOI. The number of typhoons affecting the Korean peninsula showed an obvious correlation pattern, changing every ten years from the long-term period components to the short-term period components. However, as the change in correlation characteristics between the AOI and monsoon (or typhoon) is nonstationary without any obvious periodicity, it cannot be used for forecasting purposes.

Key words : Arctic Oscillation, Monsoon, Typhoon, Wavelet Analysis

요 지

본 연구에서는 북극진동지수(AOI)와 북태평양에서 발생한 태풍의 개수 및 한반도에 영향을 준 태풍의 개수, 또한 장마기간 중 총강수량 및 장마기간 중 강수일수 등 4개의 기후인자와의 교차 웨이블릿 분석을 시도하였다. AOI 및 태풍, 장마 자료의 가용성을 고려하여 1961년에서 2016년 사이의 자료를 이용하였고, 분석은 연단위로 수행하였다. 본 연구에서의 분석 결과를 정리해 보면 다음과 같다. 첫째, 겨울철 AOI가 다른 계절 AOI보다 한반도의 기후에 큰 영향력을 보임을 확인할 수 있었다. 겨울철 AOI와 장마특성(장마기간 중 총강수량 및 강수일수)은 1970년대 장주기에서 1990년대 이후에는 단주기에 강한 상관성을 보였으나, 최근에는 총강수량과는 장주기에서 강수일수와는 단주기에서 강한 상관성을 보이는 변화가 나타남을 확인하였다. 둘째, 겨울철 AOI와 태풍 발생특성은 장마특성보다는 약한 상관특성을 보임을 확인하였다. 그러나 한반도에 영향을 준 태풍의 개수는 약 10년 주기로 교차하는 장주기와 단주기와의 상관성이 명확히 존재함을 보여주고 있다. 그러나 전체적으로 보면 AOI와 장마 (또는 태풍) 특성과의 상관특성은 그 변화의 주기성이 비정상적이어서 예측에 활용하기에는 무리가 있는 것으로 확인되었다.

핵심용어 : 북극진동, 장마, 태풍, 웨이블릿 분석

*정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정(E-mail: simon941@korea.ac.kr)

Member, MS Student, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

**교신저자, 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 교수(Tel: +82-2-3290-3321, Fax: +82-2-3290-3321, E-mail: envchul@korea.ac.kr)

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

1. 서 론

기상현상을 대표하는 자료들 가운데 정상성(stationarity)을 만족하는 경우는 드물다. 특히 계절성을 제거한 자료, 연 단위의 자료들에서는 정량화하기 어려운 주기성, 경향성들이 많이 관찰된다(Kang et al., 1995). 즉, 주기성이 있는 듯 보이기는 하지만 가용한 주기성의 정량화 도구로는 특정하여 나타내기 어려운 것이다. 예를 들어, 극한 가뭄의 재현이 시계열 상에서 대략 30년마다 반복되는 것처럼 보이기에는 하나 스펙트럼 분석에서는 이 30년의 주기가 특정되어 나타나지 않는다. 대략 20년에서 40년의 주기를 갖고 반복된다는 식이다(Currie and Fairbridge, 1985).

어떤 특정 지역에서 나타나는 현상이 다른 기상현상에 영향을 미칠 것은 자명한 일이다. 그러나 그 관련성이 선형(linearity)일 가능성은 극히 드물다. 예를 들어 엘니뇨/라니냐가 한반도의 기상에 영향을 미친다는 연구들을 검토하면 공교롭게도 이들 연구에서는 매우 미미한 수준의 상관계수만을 제시하고 있을 뿐이다(Kang, 1998). 사실 중요한 문제 중의 하나는 그들 사이의 관련성이 선형성에 근거한 지표들로 정량화되는 데 있다. 즉, 상관계수는 단지 두 자료 사이의 선형적인 관계를 정량화하는 지표일 뿐이다(Lee, 1999; Ryu et al., 2002). 우리가 관찰하는 그럴듯한 관계가 선형적이지 않다면 이들 사이의 관계를 적절히 수치로 표현하는 것은 쉬운 일이 아니다.

이와 같은 문제들을 해결하고자 하는 시도들을 다양하게 찾아볼 수 있다. 예를 들어 인공신경망 분석을 이용하여 예측인자와 예측변수 사이의 복잡한 비선형성을 고려한다(Lee et al., 2013). 주성분 분석에 기반한 Empirical Orthogonal Function (EOF) 해석은 시계열을 서로 직교하는 구성요소로 분해하여 유용한 정보를 추출하는 방법이다(Vincent et al., 1976; North et al., 1982; Park et al., 2011). 최근에는 웨이블릿 분석이 시계열의 국부적(local) 변화를 분석하는 중요한 도구가 되었다(Kim and Valdes, 2003).

웨이블릿 분석은 어떤 현상이 가진 전체적인 특성을 정량화하기보다는 시시때때로 변하는 모습을 파악하기 위해 사용된다. 푸리에 변환에 기초한 시간-주파수분석(time-frequency analysis)을 한 차원 더 발전시킨 방법이라 할 수 있다. 웨이블릿 분석이 발표된 이후 많은 연구 분야에서 다양한 적용 사례들이 보고되었으며 기상학 분야에서도 강수량 자료 분석, 기온자료 분석, 태풍자료 분석, 엘니뇨/라니냐 지수 분석 등 많은 사례들이 보고되었다(Baliunas et al., 1997). 수문학 분야에서도 유출자료 분석 등 많은 연구사례를 확인할 수 있다(Labat et al., 2000; Jin et al., 2005). 예를 들어 가뭄과 관련한 연구를 살펴보면, 한반도에서의 가뭄은 과거 8년에서 23년에 한 번씩 발생하는 경향을 보였으나 최근에는 그 주기가 당겨져 4년에서 6년에 한 번씩 발생하고 있다(Yoo and Ryoo, 2003; Jang et al., 2017).

웨이블릿 분석은 이변량 시계열의 해석에도 많이 적용되고 있다. 예를 들어, Grinsted et al. (2004)은 Arctic Oscillation (AO)과 Maximum annual ice extent in the Baltic Sea (BMI)를 이변량 웨이블릿 분석하여 2~20년의 주기성분 사이의 상관성을 결론한 바 있으며, Labat (2010)은 North Atlantic oscillation (NAO)와 Pacific Decadal oscillation (PDO)의 이변량 웨이블릿 분석을 통해 10~30년 주기성분 사이의 상관성을 확인하기도 하였다. 이변량 웨이블릿 분석에서는 두 단변량 웨이블릿 사이의 공통 진폭(common amplitude)과 상대 위상(relative phase)을 구분하여 파악할 수 있으며, 공통 진폭을 상대적인 척도로 변환한 coherence도 많이 사용된다(Grinsted et al., 2004).

본 연구에서는 북극진동이 한반도의 장마 및 가뭄에 미치는 영향을 파악해 보고자 한다. 사전 연구로 수행한 Lee et al. (2018)의 연구를 살펴보면 특히 장마와의 상관성이 미미하지만 유의한 것을 확인할 수 있었다. 그러나 더욱 중요한 결과는 10년 단위로 분석한 경우의 결과가 기간별로 크게 다르게 나타나고 있다는 점이다. 어떤 구간에서는 전혀 유의하지 못한 상관관계를 보여주고 있으나 어떤 구간에서는 상관계수 0.8 이상의 강한 관련성을 보여주고 있다. 특히 최근에 그런 강한 경향성이 두드러지게 나타나고 있다. 본 연구에서는 이런 현상을 설명하는데 이변량 웨이블릿 분석이 중요한 역할을 할 것으로 기대하고 있다.

2. 웨이블릿(Wavelet) 분석

웨이블릿 변환(wavelet transforms)은 신호, 시스템, 프로세스 모형 등을 특수한 함수의 집합으로 구성한 것이다. 이 특수한 함수는 국부적으로 존재하는 작은 파(wavelet)를 기저 함수(base function)로 하여 천이, 확대, 축소 과정을 통하여 임의의 파형으로 변환한 것이다. 웨이블릿 변환은 하나의 신호를 사인파와 코사인파를 중첩하여 표현하는 수 있는 푸리에 변환에서 그 근원을 찾을 수 있다.

푸리에 변환의 기저 함수인 $\exp(-j\omega t)$ 는 국소적인 변화를 추출하기보다는 전반적인 주기성을 분석할 때 유용하다. 푸리에 변환을 통해 변환된 신호에는 주어진 시간 동안 얻은 전체신호에 어떤 주파수 성분이 들어있는지에 대한 정보가 들어있다. 푸리에 변환의 단점은 신호의 세부적인 특징을 관찰할 수 없다는 것이다. 푸리에 변환된 신호 안에는 시간 영역의 정보가 담겨 있지 않으므로 어떤 시점에서 어떤 특징을 가지는지를 알기가 어렵다.

웨이블릿 분석도 신호를 기저 신호들의 선형결합으로 나타내는 분석이기는 하다. 그러나 푸리에 분석에서 주파수의 역할과 유사하게 웨이블릿 분석에서는 규모(scale)가 중요한 역할을 한다. 예를 들어, 규모가 큰 창을 이용하면 신호의 전반적인 특징을 관찰할 수 있으며 반대로 작은 창을 이용하면 신호의 세부적인 특징을 관찰할 수 있다. 즉, 푸리에 분석은 신호의 불연속성, 단절 등을 잘 식별할

수 없는 반면에 웨이블릿 분석은 신호의 비정상적인 성질들을 나타내는 데 유용하다. 이는 웨이블릿이 단순히 신호의 자세한 부분을 반영하기 때문이 아니라 신호가 변화하는 부분을 잘 나타내기 때문이다(Fig. 1 참조).

웨이블릿 분석에서는 모 웨이블릿(mother wavelet)이라는 기저함수를 두 가지 연산, 즉 규모변환(scaling)과 전이(transition)를 수행하여 가며 신호를 분석한다. Eq. (1)은 웨이블릿 함수의 기본적인 공식이다.

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

이 식에서 a 는 규모 매개변수(scale parameter)로 웨이블릿 기저함수의 크기를 조정하며, b 는 위치 매개변수(location parameter)로 시간축상에서의 위치를 지정하여 웨이블릿의 기저함수를 원하는 곳으로 이동시킨다. $W(a, b)$ 는 변환된 연속 웨이블릿 함수이며, $x(t)$ 는 시간-주파수 상에서의 입력 신호이다. 마지막으로 ψ 는 모 웨이블릿 함수이다.

모 웨이블릿은 그 속성에 따라 여러 가지 종류로 나눌 수 있다. 일반적으로 대칭성, 직교성 등이 중요한 속성으로 고려된다. 웨이블릿 분석은 크게 이산 웨이블릿 분석과 연속 웨이블릿 분석으로 나누며, 그 차이는 규모 매개변수가 이산적이냐 연속적이냐는 것에 따른다. 먼저, 이산 웨이블릿 변환은 웨이블릿의 규모 매개변수를 덜 조밀하게 이산화하여 나타나는 것을 의미한다. 이산 웨이블릿 변환에 사용되는 모 웨이블릿의 종류는 Haar 웨이블릿, Symlet 웨이블릿, Daubechies 웨이블릿 등이 있다. 이 중 Haar 웨이블릿은 웨이블릿 변환 중에 간단하며 대표적인 형태이다. Haar 웨이블릿은 계산 속도가 빠르고 쉽게 구현 가능하다는 장점도 있다. 그러나 매끄러운 신호나 영상처리에는 효과적이지 못하다는 단점도 가지고 있다.

연속 웨이블릿 변환(Countinous Wavelet Transform)은 규모 매개변수를 더욱 미세하게 이산화하여 모 웨이블릿을

적용하는 방법이다. 연속 웨이블릿 변환에서는 기저함수의 값이 실수 값 혹은 복소수 값이냐에 따라 다른 모 웨이블릿 함수를 사용한다. 실수 값일 경우에는 Mexican hat 웨이블릿이 주로 고려되고, 복소수 값일 경우에는 Morlet 웨이블릿이 주로 고려된다(Fig. 2 참조). 연속 웨이블릿 분석에서는 척도 변수를 2^j 로(j 는 정수 값) 더욱 조밀한 분석이 가능하다.

3. 자 료

3.1 북극진동지수(AOI)

북극진동(Arctic Oscillation)은 북극의 찬 공기단의 소용돌이가 수십 일에서 수십 년을 주기로 강약을 되풀이하는 현상을 의미한다(Lee et al., 2011). 북극진동은 극관(polar cap) 지역과 중위도 지역 사이에 상반되는 형태의 지표기압 변동이 특징이다. 즉, 극 지역에서 해면기압이 높게 형성되면 중위도에서는 낮아지고, 반대로 극지방에서 해면기압이 낮게 형성되면 중위도에서는 기압이 높게 형성되는 현상이다. 따라서 극지방과 중위도 지역의 해면기압은 서로 반대의 위상을 가지고 진동하고 있다.

북극진동지수(Arctic Oscillation Index, AOI)는 북극 상공에 위치한 반영구적인 저기압 중심의 상대적인 강도를 나타낸다. AOI가 양수인 경우, 즉 소용돌이의 세력이 강화되는 시기에 제트기류는 북극 주변 상공에서 올라와 같은 역할을 하며 북극의 냉기류를 극지방 주변에 가두어 둔다. 반대로 AOI가 음의 수치를 보이면 북극의 냉기류를 잡아두는 소용돌이의 세력이 약해지며 북극의 냉기류가 북반구 전반에 남하하게 된다.

AOI는 북반구 60도 이상 고위도의 해면기압과 중위도의 해면기압의 차이를 이용하여 계산한다(Thompson and Wallace, 1998). 통상 NCEP/NCAR의 재해석 자료가 이용되며, 월평균을 이용하여 계절주기가 제거된 자료가 이용된다. EOF 분석의 적용을 위한 공분산 행렬을 구하는 과정에서는 동일한 면적가 중치를 적용하기 위하여 격자화된 자료에 위도의 코사인

Fig. 1. Conceptual Difference between Wavelet Transform and Fourier Transform

Fig. 2. Shapes of Various Mother Wavelets

제공근을 곱해준다. EOF 분석을 통해 대기순환의 주요 원격 패턴을 구분하여 확인할 수 있으며, 첫 번째 EOF의 분산 설명력을 가지고 AOI를 정의한다. 북극진동은 겨울철 동안에 가장 큰 분산을 가지기 때문에 AOI는 주로 겨울철의 특성에 영향을 받는다. 최종적으로 구축된 시계열을 지표기간(1979~2000년 기간) 시계열의 분산으로 나누어 표준화된다.

본 연구에서는 Thompson and Wallace (1998)의 정의를 기초로 AOI를 분석하여 관리하고 있는 National Center for Environmental Prediction (NCEP, <http://www.cpc.ncep.noaa.gov>)의 자료 중 1961년부터 2016년까지의 월별 AOI를 수집하여 이용하였다. 이 자료기간은 가용한 태풍 및 장마 관련 자료를 고려하여 결정한 것이다. Fig 3은 본 연구에서 사용한 월별 AOI의 시계열 그림을 나타낸다. 이 그림에서 확인할 수 있는 것처럼 AOI는 1970년 중반부터 10여년간 음(-)의 값을 꾸준히 가졌으며, 이후 급격히 상승하여 1990년대에 기록적으로 큰 값을 기록하기도 하였다. 그러나 2000년대에 들어서면서 다시 기록적으로 작은 값을 기록하는 등 불규칙적인 변동특성을 보여주고 있다. 2009년에는 연평균으로 -1.043의 역대 최소값을 기록하기도 하였다.

본 연구에서 사용한 AOI의 기본적인 특성을 정리하면 Table 1과 같다. 전체기간에 대한 평균은 -0.068 표준편차는

1.030으로 나타난다. AOI는 '0'을 중심으로 움직이는 지수가 아니며, 음의 편차를 보이는 냉각모드(cold mode, cool phase)가 본래 북극진동의 일반적인 패턴이다. 따라서 겨울철의 AOI 값은 대체로 (-)의 큰 값을 가진다. 추가로 AOI의 평균값에 비해 표준편차가 매우 큼에도 유의할 필요가 있다.

참고로, 겨울철 북극진동이 여름철 장마에 영향을 줄 가능성은 Gong and Ho (2003)의 연구에서 자세히 살펴볼 수 있다. 이들의 연구에서는 북극진동지수(AOI)가 봄철에 양의 위상으로 나타날 경우 동아시아 영역에서는 여름철 상층 제트기류가 북쪽으로 이동하게 되고, 이 때문에 양쯔강 유역으로부터 일본까지의 하강류가 강화되고 결과적으로 이 지역에 좀 더 건조한 대기상태가 발생하게 된다는 것을 증명하였다. 이는 결과적으로 장마전선이 북쪽으로 이동하는 것을 막는 역할을 하게 된다. 즉, 북극진동이 장마전선에 미치는 영향을 역학적으로 보여주고 있는 것이다. 또한, Choi and Kim (2011)의 연구는 북극진동과 태풍과의 관련성을 역학적으로 증명하고 있다. 즉, 북극진동의 위상변화로 기압의 분포가 기존과 달라져 고기압성 아노말리의 중심이 우리나라의 북서쪽에 위치하게 되면 서해안과 남중국해까지 북동류의 성분이 강화된다. 이로 인해 태풍은 필리핀 동쪽해상으로부터 중국 동해안 쪽으로 서편하는 경향을

Fig. 3. Time Series Plot of Monthly Arctic Oscillation Index [AOI(1)] and its 12 Month Moving Average [AOI(12)]

Table 1. Monthly Means and Standard Deviations of AOI Data Used in This Study (1961-2016)

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
Mean	-0.357	-0.352	-0.039	0.148	0.094	0.043	-0.131	-0.102	0.017	-0.053	0.036	-0.117	-0.068
STDV	1.544	1.477	1.327	0.831	0.664	0.588	0.451	0.549	0.576	0.828	0.931	1.375	1.030

보인다. 반면에 고기압성 아노말리의 중심이 일본 동쪽 해상에 위치하게 되면 우리나라 및 일본에서 유도된 남서풍이 더 많은 태풍을 우리나라로 접근시키게 된다. 사실 이러한 해석이 보편적으로 적용될 수 있는 것인지는 명확하지 않다. 그러나 북극진동과 태풍, 장마와의 역학적 인과관계를 파악하는 데에는 분명 도움이 된다.

3.2 장마

여름철 우리나라를 포함하는 동아시아 지역은 남쪽의 온난습윤한 열대성 기단과 북쪽의 한랭습윤한 한대성 기단이 만나서 형성되는 정체전선의 영향을 받는다. 전선이 걸쳐 있는 지역에는 강한 남서풍에 따른 습윤한 공기의 유입량이 증가하고 장기간 동안 많은 양의 비가 내린다. 이러한 현상을 기상학적으로 장마라고 부른다. 장마는 지역마다 시점이 다른데 한반도에서의 장마의 시점은 장마전선이 만들어지고 제주지방에 비가 오는 시점으로, 중점은 중부지방에 비가 그치는 시점으로 정의된다. 본 연구에서도 이 기간을 장마 기간으로 정의하였다. 본 연구에서 사용한 장마기간 중 총강수량과 장마기간 중 강수일수 자료는 기상청의 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr/>)에서 수집하였다. 이 자료는 모두 기상청의 종관기상관측장비(ASOS)를 이용하여 만드는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 기록이 가용한 1961년부터 2016년간 총 56년간 수집한 기상청 자료를 분석하였다. 강수일수의 평균은 17.2일 표준편차는 4.9일로, 변동계수는 0.28 정도로 크지 않게 나타난다. 가용 기록 중 최저 강수일수는 4.5일, 최대

강수일수는 27.9일로 나타난다. 반면에, 총강수량의 평균은 345.5 mm이며 표준편차는 135.6 mm로, 변동계수는 0.39로 강수일수의 변동계수보다 크게 나타난다. 가용 기록 중 최대 강수량은 699.1 mm, 최저 강수량은 71.9 mm로 나타난다. 이들 자료의 시계열 그림은 다음 Fig. 4와 같다. 전체적으로 보면 장마기간 중 총강수량과 장마기간 중 강수일수 시계열을 그 경향이 거의 일치하는 것으로 보이며, 실제 상관계수도 0.85 정도로 크게 나타난다.

3.3 태풍

저위도 지방의 따뜻한 공기가 바다로부터 수증기를 공급받으면서 강한 바람과 많은 비를 동반하며 고위도로 이동하는 열대성 저기압 현상을 태풍이라 한다. 태풍은 지구 자전에 의한 전향력에 의해 수증기가 한데 뭉치면서 형성된다. 이때 필요한 전향력을 얻기 위해 적도가 아닌 위도 $\pm 5^\circ$ 이상의 바다 위에서 발생하는 것이 일반적이다. 태풍은 저위도 지역과 고위도 지역사이의 열에너지 불균형을 해소하는 중요한 역할을 한다.

국가태풍센터(National Typhoon Center, <http://typ.kma.go.kr/>)에서는 연도별로 발생한 태풍의 개수와 한반도에 영향을 준 태풍에 대한 정보를 분류하여 제공하고 있다. 본 연구에서는 1961년부터 2016년까지의 태풍 정보를 이용하였다. 전체적으로 보면 북태평양에서 발생한 태풍의 평균 개수는 26.4개이고, 표준편차는 4.9이다. 태풍 발생이 최대로 많았던 경우는 1967년의 39개이다. 가장 적었던 해는 2010년의 14개이다. 한반도에 영향을 준 태풍의 개수는 평균적으로

Fig. 4. Time Series Plots of Rainfall Amount and Rainy Days during the Monsoon in South Korea

Fig. 5. Time Series Plots of the Number of Typhoons Occurred in the North Pacific and the Number of Typhoons Affecting the Korean Peninsula

3.2개이고, 표준편차는 1.4로 나타난다. 태풍 발생이 최대로 많았던 경우는 1984년의 6개이다. 1988년과 2009년에는 한반도에 영향을 준 태풍이 없었다. 북태평양에서 발생한 태풍의 개수 및 한반도에 영향을 준 태풍의 개수를 시계열 그림으로 그린 것이 Fig 5이다. 장마의 경우와는 달리 북태평양에서 발생한 태풍의 개수와 한반도에 영향을 준 태풍의 개수 사이에는 상관계수가 0.17 정도로 매우 낮은 것으로 나타난다.

4. 단변량 웨이블릿 분석

4.1 북극진동지수(AOI)

4.1.1 평균 및 계절 AOI 자료의 구축

장마기간 중 총강수량과 강수일수에 미치는 북극진동의 영향은 월 단위 정도로 나타날 수도 있고 또는 보다 장기간동안 축적된 결과로 나타날 수도 있다. 이에 본 연구에서는

먼저 총 4가지의 평균(3, 5, 7, 9개월) AOI 자료를 구축하였다. 이들 평균 자료는 모두 1월을 중심으로 양쪽의 자료를 동수로 고려하여 만든 자료이다. 1월을 중심으로 고려한 이유는 1월의 AOI 값이 가장 작으며 또한 북반구에 미치는 북극진동의 영향도 겨울철이 주도하고 있기 때문이다(Dickson et al., 2000). 평균의 길이를 9개월까지로 한 이유는 본 연구가 장마 발생 이전에 장마의 거동을 예측할 수 있는지, 아울러 태풍발생 이전에 태풍의 발생을 예측할 수 있는지를 파악하는 것을 목표로 하고 있어 장마 기간 및 태풍 발생 기간을 배제했기 때문이다. Fig 6은 3, 5, 7, 9개월의 평균 AOI 자료를 시계열로 비교한 것이다.

그림에서 확인할 수 있는 것처럼 평균 길이의 증가로 좀 더 변동성이 작은 자료가 만들어지고 있기는 하다. 그러나 그 영향이 아주 뚜렷하게 나타나는 것은 아닌 것으로 판단된다. 특히, 평균 길이가 길어짐에 따라 봄, 가을 및 여름까지의 영향이 반영되게 되는데, 그림에도 불구하고 전체적인 모양이 크게 변하지 않는 것은 겨울철 북극진동의 영향이 우월하

Fig. 6. Comparison of 3-, 5-, 7- and 9-Month Average AOI Time Series

다는 것을 의미하는 것이기도 하다. 결과적으로 3개월 평균 (즉, 겨울철만을 대변하는 평균)이 북극진동의 영향을 고려하는데 유리할 것이라는 추측을 해 볼 수 있다. 평균 AOI에서 살펴볼 수 있는 가장 큰 특징은 1970년대에서 1990년대까지는 좀 더 장주기적인 경향을 보이고 있으나 이후에 변동성이 급격히 증가하여 전혀 다른 모습을 보인다는 것이다.

본 연구에서는 추가로 봄, 여름, 가을, 겨울을 대표하는 계절 AOI 자료를 구축하였다. 이들 계절 AOI 자료는 3개월 평균을 적용한 것과 같으며, 따라서 겨울을 대표하는 AOI 자료는 위에서 구축한 1월을 중심으로 한 3개월 평균 AOI 자료와 동일하다. Fig. 7은 봄, 여름, 가을, 겨울 총 4가지의 계절 AOI 자료를 시계열로 비교한 것이다. 이들 4개의 시계열을 비교하면 단연 겨울 AOI 시계열이 다른 계절에 비해 두드러지게 나타남을 확인할 수 있다. 봄, 여름, 가을 AOI 시계열 모두 어떤 경향이나 추세 없이 마치 백색잡음처럼 거동하는 모습을 보인다. 아주 크거나 작은 값들도 나타나지 않아 태풍

이나 장마와의 관계분석에서 큰 영향을 미칠 것으로 판단되지는 않는다. 겨울 AOI 시계열은 앞서 살펴본 것과 같다. 참고로, 위에서 구축한 1월을 중심으로 한 4가지 평균 자료와 계절 AOI 자료의 기본 특성은 다음 Table 2에 정리하였다.

4.1.2 단변량 웨이블릿 분석결과

본 연구에서는 Morlet 웨이블릿을 기저함수로 이용하였다. Morlet 웨이블릿과 같은 복소 웨이블릿 함수는 진폭과 위상에 대한 더 많은 정보를 제공하여 시계열의 특성을 정교하게 파악하는데 유리하다. 먼저, 평균 AOI 자료에 대한 웨이블릿 분석결과는 Fig. 8과 같다. 이 그림에서 y-축은 주기(period)를 나타내며 x-축은 연도를 나타낸다. 고려한 주기는 1년부터 30까지이나 자료 기간을 고려하면 20년 이상의 주기성은 크게 유의하지 않는 것으로 판단된다. 이 그림에서 빨간색은 강한 주기성을, 반대로 파란색은 약한 주기성을 의미한다.

Fig. 7. Comparison of Seasonal AOI Time Series

Table 2. Means and Standard Deviations of Average and Seasonal AOI Data

	AOI (3)	AOI (5)	AOI (7)	AOI (9)	AOI (DJF)	AOI (MAM)	AOI (JJA)	AOI (SON)
Mean	-0.2879	-0.1733	-0.1083	-0.0742	-0.2879	0.0678	-0.0631	-0.0004
STDV	1.2555	0.7452	0.4394	0.2928	1.2555	0.4140	0.1177	0.2531

Fig. 8. Results of Univariate Wavelet Analysis with Average AOI data

4가지 평균 AOI 자료에 대한 웨이블릿 분석결과는 전체적으로 유사한 주기특성을 보여주고 있다. 전체적으로 보면 대략 17년 정도(또는 15~20년 정도)의 장주기가 AOI의 거동을 지배하고 있는 모습이다. 이 주기는 특히 80년대 강하게 나타났으나 최근에는 약해지는 모습을 보인다. 3개월과 5개월 자료에서는 8년의 주기도 나타나고, 반면에 3개월 자료는 8년 주기가 강하나 20년 주기는 상대적으로 약하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 본 연구에서는 이들 4가지 평균 AOI 중 5개월 평균 AOI가 이러한 전체적인 경향을 가장 잘 보여주고 있다고 판단하였다. 이에 따라 본 연구에서는 5개월 평균

AOI를 이변량 웨이블릿 분석에 이용하였다. 이는 물론 북극 진동이 장마 및 태풍에 미치는 영향을 좀 더 부각하여 도출하고자 하는 의도이다.

계절 AOI 자료에 대한 웨이블릿 분석결과는 Fig. 9와 같다. 총 4가지의 계절 AOI 자료에 대한 웨이블릿 분석결과는 모두 다르게 나타난다. 물론 겨울(DJF) AOI에 대한 결과는 앞의 3개월 평균 AOI의 분석결과와 같다. 그러나 봄, 여름, 가을 AOI의 경우 어떤 강한 주기성을 보여주고 있지 않다. 3~5년의 주기가 보이기는 하지만 겨울 AOI가 보여주는 10년 전후의 강한 주기와는 다른 모습이다.

Fig. 9. Same as Fig. 8, but with Seasonal AOI Data

4.2 장마 및 태풍자료의 분석

본 연구에서 고려하고 있는 장마 및 태풍 특성자료에 대한 웨이블릿 분석결과는 Fig. 10과 같다. 가장 눈에 띄는 결과는 물론 장마기간 중 총강수량과 한반도에 영향을 준 태풍의 개수 자료가 대략 17년 주기를 강하게 보이고 있다는 점이다. 이는 평균 AOI 자료 분석에서 확인한 결과이기도 하다. 그러나 좀 더 자세히 비교해 보면 다음과 같은 다른 특성도 살펴볼 수 있다. 먼저, 평균 AOI 자료는 1970~2000년 사이에 아주 강한 17년 주기를 보인다. 그러나 장마기간 중 총강수량은 전체 자료기간 중 큰 변동없이 17년 주기가 강하게 나타나고 있다. 한반도에 영향을 준 태풍의 개수는 오히려 1970~2000년 사이에 17년 주기가 오히려 약화 되는 모습을 보이며, 최근 들어 다시 강해지는 모습이다. 결과적으로 17년 주기가 전체적으로 강하게 나타나고 있기는 하지만 그 거동은 자료별로 또한 기간별로 다르게 나타나고 있음을 살펴볼 수 있다.

장마기간 중 강수일수의 경우에는 사실 유의한 주기성이 없다는 것이 결론이다. 대략 25~30년 주기가 일관되게 나타나고 있으나 유의한 값은 아니다. 장마기간 중 총강수량과 강수일수는 큰 상관을 보이고 있다는 점에서 이 결과는 다소 의아한 측면이 있다. 이에 반해 북태평양에서 발생한 태풍의 개수는 25~30년의 주기를 일관되게 보여주고 있으나 통계적으로 유의한 수준은 아니다. 나머지 주기성 분도 상대적으로 강하지 않은 것으로 나타났다. 따라서 지난 50여년간 북극진동이 북태평양에서 발생한 태풍의 개수에는 큰 영향을 끼치지 못했음을 간접적으로 추측할 수 있다.

5. 이변량 웨이블릿 분석

5.1 AOI와 장마 특성

교차 웨이블릿 분석결과는 여러 가지 형태로 다양하게 나타낼 수 있다. 단변량 분석결과와 달리 이변량 분석결과는 복소함수의 형태로 나타나므로 이를 적절히 변형시켜가며 필요한 정보를 얻는 것이다. 가장 일반적으로는 진폭(amplitude)과 위상(phase)을 구분하여 나타낸다. 진폭은 두 자료의 주기성이 어느 정도 일치하는지를 보여주는 정보이고, 위상은 두 자료사이의 선후관계가 어떤 식으로 변하는지를 보여주는 정보이다. 만일 두 자료 사이의 선후관계가 사전에 파악되어 있다면 진폭이 주로 이용된다. 그러나 진폭은 정규화된 값은 아니며 각 변량의 주기특성에 영향을 받는다. 어떤 한 자료의 주기특성이 강하게 나타나면 이 특성이 교차 웨이블릿 분석 결과인 진폭에도 반영되어 나타나게 된다. 따라서 이러한 문제점을 배제하고자 교차 웨이블릿 분석의 진폭을 각 자료의 진폭으로 나누어 coherence를 계산하게 된다. 이 결과가 좀 더 객관적이며, 특히 다른 자료 쌍과의 결과를 비교하는 데에도 유리하다. Coherence가 크다는 것은 특정 주기성분이 두 자료에 동시에 강하게 나타난다는 것을 나타내고, 따라서 두 자료 사이의 선형적인 관계가 강하다는 것을 의미하게 된다. 즉, 둘 사이의 인과관계를 설명할 수 있다는 의미다. 그러나 이 결과에도 어떤 한 자료의 강한 주기성이 반영되어 나타날 수 있다는 점은 기억해야 한다. 만일 강한 coherence가 나타난다면 과연 이것이 어떤 한 자료의 강한 주기성으로 인한 것인지 아닌지를 꼭 확인해야 한다.

본 연구에서는 먼저 5개월 평균 AOI 자료와 장마특성과의 교차 웨이블릿 분석을 수행하였다(Fig. 11). 5개월 평균을 선택한 이유는 앞서 언급한 것과 같이 고려한 4가지의 평균

Fig. 10. Same as Fig. 8, but with Monsoon and Typhoon Data

Fig. 11. Results of Cross Wavelet Analysis with AOI(5) and Monsoon Data

AOI 중 주기성이 가장 강하게 나타났기 때문이다. 그 결과를 살펴보면, 먼저, 총강수량과 강수일수 사이의 높은 상관관계에도 불구하고 coherence가 보여주는 결과는 약간 다른 특성이 있음을 확인할 수 있다. 먼저 총 강수량은 1970년대 10~20년의 장주기 성분에서 강한 선형적 관계를 보여주었지만 1990년대 이후 10년 주기 이하의 단주기 성분에 강한 선형적 관계를 보여준다. 최근에는 이마저도 약화되는 경향이며 오히려 20~30년 정도의 장주기 성분에 대한 선형적 관계가 나타나고 있다(Fig. 11(b)). 장마기간 중 강수일수의 경우도 1970년대에는 총강수량과 비슷한 특성이라고 할 수 있으나, 1990년대 이후에는 10년 주기 이하의 단주기 성분에 아주

강한 선형적 관계를 보여주고 등 약간 다른 경향을 보여주고 있다(Fig. 11(d)). 이러한 경향은 최근에도 여전히 유지되고 있다. 전체적으로 보면 장마의 특성에 AOI의 영향이 일관되게 꾸준히 나타나고 있지 않는다는 것은 명확하다. 그러나 대략 10년을 주기로 그 영향이 반복되고 있는 것은 뚜렷하게 나타난다. 이러한 특성은 다른 연구에서도 이미 확인된바 있다(Yoo et al., 2002). 이렇게 확인된 이러한 특성은 5개월 평균 AOI나 장마특성 자료가 보여주는 특성과는 다른 것이므로 어느 한 자료의 영향으로 나타난 것은 아니다.

계절 AOI와 장마특성과의 교차 웨이블릿 분석에서는 어떤 뚜렷한 결과도 얻기 어려웠다. 참고로 Fig. 12는 여름

Fig. 12. Same as Fig. 11, but with AOI(JJA) and Monsoon Data

AOI와 장마특성과의 교차 웨이블릿 분석결과를 나타낸다. 이 그림에서 살펴볼 수 있는 것처럼 두 자료 사이의 어떤 유의한 관계도 확인하기 어렵다.

5.2 AOI와 태풍 자료

북태평양에서 발생한 태풍과 한반도에 영향을 준 태풍 사이의 낮은 상관관계에도 불구하고 coherence가 보여주는 결과는 비슷한 특성이 있다. 먼저 평균 AOI와 한반도에 영향을 준 태풍의 개수와의 웨이블릿 분석결과를 보면(Fig. 13(d)), 1960년대 20년의 장주기 성분에서 강한 선형적 관계를 보여주었지만 1990년대 이후에는 10년 주기 이하의 단주기 성분에 강한 관계를 보여준다. 특히 2000년에는 단주기 성분에 대한 강한 관계가 나타나고 있다. 북태평양에서 발생한 태풍의 개수도 1960년대에는 20년의 장주기 성분에 강한 상관성을 보여주었으며, 1990년대 이후에는 거의 5년 주기 이하의 초단주기 성분에 아주 강한 선형적 관계를 보여주는 다른 특성이 있다. 이러한 경향은 최근에도 여전히 유지되고 있다(Fig. 13(b)). 전체적으로 보면 태풍의 특성에 AOI의 영향이 일관되게(꾸준히) 나타나고 있지 않다는 것은 명확하다. 그러나 대략 10년을 주기로 그 영향이 반복되고 있는 것은 뚜렷하게 나타난다. 이러한 특성은 다른 연구에서도 이미 확인된 바 있다(Lee et al., 2018).

앞선 분석에서 살펴볼 수 있는 것처럼 coherence가 AOI가 미치는 영향을 판단하기에 더 유리한 측면이 있다. 이에 계절 AOI가 태풍의 발생에 미치는 영향은 coherence만을 이용하여 수행하였다. 계절 AOI가 북태평양에서 발생한 태풍의 개수에 미치는 영향은 Fig. 14와 같다. 전체적으로 보면 봄 AOI의 영향이 가장 큰 것으로 나타난다. 이에 반해 겨울 AOI의 영향은 1960년대에, 여름의 영향은 1980년대에,

가을의 영향은 2000년대 이후 가장 큰 것으로 나타난다. 특히 봄의 영향은 1960년대에는 20년 전후의 주기성분이, 1980년대에는 10~20년 정도의 주기성분이, 1990년대에는 다시 20년 전후의 주기성분이, 2010년 이후에는 10년 전후의 주기성분에 강한 상관특성을 나타내고 있다. 특정 주기에 대한 일관적인 상관특성은 보이지는 않으나 전체적으로 보면 약 10년 주기의 변동특성이 나타나는 것으로 확인된다(Fig. 14(b)).

계절 AOI와 한반도에 영향을 준 태풍과의 상관성은 더욱 제한적으로 나타난다(Fig. 15). 1960, 1970년대에는 가을 AOI의 영향이 큰 것으로 나타나고, 1980년대에는 겨울 AOI의 영향이, 1990년대 전후로는 봄 AOI의 영향이, 1990년대 중반 이후로는 여름 AOI의 영향이 주도적인 것으로 나타난다. 서로 상관있는 주기성분은 대략 10~20년 정도로 나타나, 10년 이하나(봄) 20년 이상(여름)의 주기성분도 강한 상관성을 보이기도 하였다. 한반도에 영향을 준 태풍의 개수는 AOI의 영향을 받고 있으나 다만 그 영향은 비정상성을 강하게 보여주고 있다. 사실 이러한 비정상성은 AOI를 이용한 예측의 문제를 어렵게 만드는 가장 큰 원인으로 작용한다.

6. 결 론

본 연구에서는 북극진동이 한반도의 장마 및 태풍에 미치는 영향을 파악해 보았다. 이를 위해 AOI와 북태평양에서 발생한 태풍의 개수 및 한반도에 영향을 준 태풍의 개수, 또한 장마기간 중 총강수량 및 장마기간 중 강수일수와의 이변량 웨이블릿 분석을 수행하였다. 본 연구에서는 자료가 모두 가용한 1961년에서 2016년을 분석 기간으로 설정하였다. AOI 자료는 월 단위 형태로 존재하나 1월을 중심으로

Fig. 13. Same as Fig. 11, but with AOI(5) and Typhoon Data

Fig. 14. Results of Cross Wavelet Analysis (coherence) with Seasonal AOI and the Number of Typhoons Occurred in the North Pacific

Fig. 15. Same as Fig. 14, but with Seasonal AOI and the Number of Typhoons Affecting the Korean Peninsula

3, 5, 7, 9개월의 평균 AOI와 봄, 여름, 가을, 겨울의 AOI 자료를 만들어 연 단위의 분석을 수행하였다. 본 연구의 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

첫 번째로, 겨울철의 AOI가 장마 및 태풍에 미치는 영향이 다른 계절에 비해 가장 큰 것으로 나타났다. 구체적으로는 1월을 중심으로 한 5개월 평균 AOI의 영향(상관계수)이 가장 큰 것으로 나타났다. 두 번째로, 겨울철의 AOI와 장마특성은 1970년대 10~20년의 장주기 성분에서 강한 선형적 관계를 보여주었지만 1990년대 이후 10년 주기 이하의 단주

기 성분에 강한 선형적 관계를 보여주었다. 최근에는 장마기간 중 총강수량은 점차 악화되는 경향이며 오히려 20~30년 정도의 장주기 성분에 대한 선형적 관계가 나타났다. 그에 반해 강수일수는 10년 주기 이하의 단주기 성분이 여전히 강하게 나타났다.

세 번째로, 겨울철 AOI와 한반도에 영향을 준 태풍의 개수와의 웨이블릿 분석결과를 보면 1960년대 20년의 장주기 성분에서 선형적 관계를, 1990년대, 2010년대에는 약 17년의 주기성분에서의 상관성을 보여주었다. 1970년대,

2000년대 그리고 최근에는 10년 주기 이하의 단주기 성분에 선형적 관계를 보여주었다. 북태평양에서 발생한 태풍의 개수도 1960년대에는 20년의 장주기 성분에 선형적 관계가 있음을 보여주었다. 그러나 1990년대 이후에는 5년 주기 이하의 초단주기 성분에 아주 강한 선형적 관계를 보여주고 있음을 확인하였다. 그러나 전체적으로 보면 단변량 웨이블릿 분석 및 이변량 웨이블릿 분석에서 얻을 수 있는 가장 큰 결과는 이들 과정이 강한 비정상성(nonstationarity)을 보인다는 것이다. AOI의 거동은 물론 장마 및 태풍의 특성도 모두 비정상적인 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있었다. 또한, AOI가 장마 및 태풍에 미치는 영향도 비정상적임을 확인할 수 있었다.

이러한 결과는 기본적으로 예측에 목적을 둔 분석에 있어 커다란 장애가 된다. 과거 엘니뇨/라니냐의 영향을 파악하고자 했던 많은 연구들에서처럼 유의하기는 하나 너무 작은 상관계수, 주기성이 보이기는 하나 모형화하기에는 너무 불규칙적인 패턴 등의 문제가 유사하게 존재함을 확인할 수 있었다(Chen, 2002; Zhang et al., 1996). 물론 이러한 결과는 사실 너무나 당연하기도 하다. 기본적으로 장마의 특성이 어느 특정인자의 영향으로 설명한다는 것은 무리이다. 그렇지만 본 연구를 통해 파악할 수 있었던 작은 결과들은 향후 장마의 특성이나 태풍의 발생 예측 문제에 새롭게 접근할 수 있는 실마리를 제공한다. 예를 들어 북태평양에서 발생한 태풍의 개수와 한반도에 영향을 준 태풍의 개수는 약한 음의 상관을 보이는 것으로 나타난다. 겨울철 AOI는 북태평양에서 발생한 태풍의 개수와 거의 무관한 것으로 나타나지만 반대로 한반도에 영향을 준 태풍의 개수에는 어느 정도 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 즉, AOI의 영향이 적도 부근까지는 거의 미치지 못함을 간접적으로 보여주는 것이다. 이는 태풍의 발생이 엘니뇨/라니냐와 밀접한 관련이 있다는 연구들(Glantz, 2001; Chan and Liu, 2004)을 고려하면 흥미로운 것이다. 한반도의 경우는 이들 두 영향이 서로 중첩되는 지역으로 판단할 수 있기 때문이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(19CTAP-C143641-02)에 의해 수행되었습니다.

References

Baliunas, S., Frick, P., Sokoloff, D., and Soon, W. (1997). Time scales and trends in the central England temperature data (1659-1990): A wavelet analysis. *Geophysical Research Letters*, Vol. 24, No. 11, pp. 1351-1354.

Chan, J.C., and Liu, K.S. (2004). Global warming and western

North Pacific typhoon activity from an observational perspective. *Journal of Climate*, Vol. 17, No. 23, pp. 4590-4602.

Chen, W. (2002). Impacts of El Niño and La Niña on the cycle of the East Asian winter and summer monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 26, No. 5, pp. 595-610.

Choi, K.S., and Kim, T.R. (2011). Development of a diagnostic index on the approach of typhoon affecting Korean Peninsula. *Journal of the Korean Earth Science Society*, Vol. 32, No. 4, pp. 347-359.

Currie, R.G., and Fairbridge, R.W. (1985). Periodic 18.6-year and cyclic 11-year induced drought and flood in northeastern China and some global implications. *Quaternary Science Reviews*, Vol. 4, No. 2, pp. 109-134.

Dickson, R.R., Osborn, T.J., Hurrell, J.W., Meincke, J., Blindheim, J., Adlandsvik, B., et al. (2000). The Arctic Ocean response to the North Atlantic oscillation. *Journal of Climate*, Vol. 13, No. 15, pp. 2671-2696.

Glantz, M.H. (2001). *Currents of change: Impacts of El Niño and La Niña on climate and society* (2nd ed.). Cambridge University Press.

Gong, D.Y., and Ho, C.H. (2003). Arctic oscillation signals in the East Asian summer monsoon. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 108, No. D2, Article No. 4066.

Grinsted, A., Moore, J.C., and Jevrejeva, S. (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, Vol. 11, No. 5/6, pp. 561-566.

Jang, H.W., Cho, H.W., Kim, T.W., and Lee, J.H. (2017). Developing extreme drought scenarios for Seoul based on the long term precipitation including paleoclimatic data. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 37, No. 4, pp. 659-668.

Jin, Y.H., Park, S.C., and Lee, Y.K. (2005). Application of wavelet transform for extraction of long-and short-term components in a hydrological time series. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 25, No. 6B, pp. 493-499.

Kang, I.S. (1998). Relationship between El-Nino and Korean climate variability. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 34, No. 3, pp. 390-396.

Kang, I.S., Lee, Y.M., and An, S.I. (1995). Interannual variability of typhoon activity over the Western Pacific and El Nino. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric*

- Sciences*, Vol. 31, No. 1, pp. 15-26.
- Kim, T.W., and Valdés, J.B. (2003). Nonlinear model for drought forecasting based on a conjunction of wavelet transforms and neural networks. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 8, No. 6, pp. 319-328.
- Labat, D., Ababou, R., and Mangin, A. (2000). Rainfall-runoff relations for karstic springs. Part II: Continuous wavelet and discrete orthogonal multiresolution analyses. *Journal of Hydrology*, Vol. 238, No. 3-4, pp. 149-178.
- Labat, D. (2010). Cross wavelet analyses of annual continental freshwater discharge and selected climate indices. *Journal of Hydrology*, Vol. 385, No. 1-4, pp. 269-278.
- Lee, H.W., Song, S.U., and Yoo, C.S. (2018). Evaluation of autocorrelation characteristics of arctic oscillation and its cross-correlation to the monsoon and typhoon. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. 12, pp. 1247-1260.
- Lee, J.H., Kim, J.S., Jang, H.W., and Lee, J.C. (2013). Drought forecasting using the multi layer perceptron (MLP) artificial neural network model. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 12, pp. 1249-1263.
- Lee, J.T., Choi, W.J., and Kim, T.H. (1999). Analysis of stationary time series using wavelet transform. *Proceedings of the KIEE Summer Annual Conference 1999*, pp. 969-971.
- Lee, Y.J., Song, Y.M., and Yoon, J.H. (2011). An exploratory research on the Jeju tourism adaptation strategies according to the climatic change: Focused on serious leisure, specialization theory and locus of control. *International Journal of Tourism and Hospitality Research*, Vol. 25, No. 4, pp. 313-328.
- North, G.R., Bell, T.L., Cahalan, R.F., and Moeng, F.J. (1982). Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. *Monthly Weather Review*, Vol. 110, No. 7, pp. 699-706.
- Park, M.J., Park, M.K., and Song, Y.S. (2011). Analysis of spatially distributed risk for regional disaster management: 1. Hazard and exposure. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 11, No. 4, pp. 189-199.
- Ryu, J.H., Lee, D.R., Ahn, J.H., and Yoon, Y.N. (2002). A comparative study on the drought indices for drought evaluation. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 35, No. 4, pp. 397-410.
- Thompson, D.W., and Wallace, J.M. (1998). The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical Research Letters*, Vol. 25, No. 9, pp. 1297-1300.
- Vincent, L., Dolan, R., Hayden, B., and Resio, D. (1976). Systematic variations in barrier island topography. *The Journal of Geology*, Vol. 84, No. 5, pp. 583-594.
- Yoo, C.S., and Ryoo, S.R. (2003). Analysis of drought return and duration characteristics at Seoul. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 36, No. 4, pp. 561-573.
- Yoo, C.S., Ryoo, S.R., and Kim, J.H. (2002). Long-term recurrence characteristics of droughts recorded in monthly rainfall data at Seoul. *Journal of the Korean Society of Civil Engineerings*, Vol. 22, No. 3B, pp. 281-289.
- Zhang, R., Sumi, A., and Kimoto, M. (1996). Impact of El Niño on the East Asian monsoon. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 74, No. 1, pp. 49-62.

Received	September 5, 2018
Revised	September 10, 2018
Accepted	October 31, 2018