화산폭발 빈도와 한반도 중부지방 강수량 변동의 상관성

The Correlation of Cycles in Volcanic Eruptions and Rainfall of Korea

황석환*

Hwang, Seok Hwan*

Abstract

This study shows that the variations between the annual rainfall of Korea (KOR) and the frequencies of volcanic eruptions (VOL) have strong correlations through the statistical analysis. Results suggest that there are very closed dynamical relationships in decadal variations of KOR and VOL. The variations of KOR, SST (sea surface temperature), and VOL have the short-term cycle of 3-5 years, mid-term cycle of 7-10 years, and long-term cycle of 16-23 years using the wavelet power spectrum and running mean analyses, although the cycles are not exactly clear. It is clear that SST has strongly influenced the decadal variation of KOR. Although it is clear that the steady and continuous increasing trend of SST strongly affected the increasing trend of KOR, the possibility that the variation of SST caused the decadal variation of KOR is low as there are several inconsistent periods between SST and KOR. The variations of VOL are very well synchronized with those of KOR. An especially steep decreasing trend that started from the 2010 AD is perfectly synchronized in slope as well as in time. In conclusion, it is likely that the main factor that causes the decadal variation of KOR is VOL rather than SST. In this study, we describe the recent decline of the rainfall of Korea through the potential effects of global internal forces.

Key words : Rainfall Variation, Volcanic Eruption, Sea Surface Temperature (SST)

요 지

본 연구에서는 강수량과 화산폭발 횟수 간의 중장기 변화 사이의 상관성을 통계적 측면에서 검토하여 상관성이 매우 높다는 것을 밝혔고 이러한 통계적 유의성을 통해 강수량 변동과 지구내부 운동과의 밀접한 역학적 관계가 존재할 수 있다는 가능성을 제시하였다. 웨이블릿 방법에 의한 스펙트럼 및 이동평균 분석결과, 자료계열 간에 주기가 명확히 일치하지는 않지만, KOR, SST와 VOL은 단주기는 대략 3-5년, 중간주기는 단주기의 약 2배수에 해당하는 약 7-10년, 그리고 장주기는 중간주기의 약 2배수에 해당하는 약 16-23년 정도를 가지는 것을 알 수 있었다. 그리고, 전체적인 추세를 볼 때 장기적인 측면에서 SST가 KOR과 같은 강수량의 변화에 큰 영향을 미친다는 것은 명확하다고 보이나, 시기에 따라 나타나는 간헐적 불일치를 볼 때 1980년대 이후의 지속적인 SST 증가 추세가 KOR의 평균적인 증가에 영향을 주기는 하였지만, SST의 변화가 KOR이 가지는 고유의 주기성을 유발한다고 보기는 어려워 보인다. 그에 반해 VOL은 변동의 추세가 KOR과 시기적으로 큰 역전 없이 잘 일치하는 것으로 나타났고, 특히 2010년 이후 최근까지의 급격한 감소 추세는 시기는 물론 정도에 있어서도 잘 일치하는 것으로 나타나 KOR의 변동 주기를 유발하는 주요 인자는 SST보다는 VOL일 가능성이 높아 보인다.

핵심용어 : 강수량 변동, 화산폭발, 해수면온도

1. 서 론

한반도(남한)의 중부지역 가뭄을 유발하는 강수량의 부족

현상이 대략 5-10년 주기 내에서 반복된다(Yoon and Hwang, 2009; Lee et al., 2012). 따라서 본 연구에서는 이러한 주기적 가뭄을 야기하는 강수량 변동의 원인을 추론해 보고자 한다.

*교신저자, 정회원, 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 수석연구원(Tel: +82-31-910-0241, Fax: +82-31-910-0251, E-mail: sukany@kict.re.kr)
Corresponding Author, Member, Senior Researcher, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

강수과정은 지구의 물순환 운동에 의해 야기된다고 알려져 있다. 그러나 태양복사에너지에 의한 영향에 비해 행성 간 역학적 운동 및 지구 내부 운동 에너지에 대한 영향은 명확히 설명되지 못하고 있다. 본 연구에서는, 첫 번째로, 지구물리 과정의 일부로 강수과정을 유발하는 인자로 알려진 해수온도(해수표면온도: Sea Surface Temperature, SST)와의 10년 변동 주기의 상관성을 검토하였다. 그러나 대기의 기후요소 중 하나인 강수량의 10년 내외 변동은 단순히 SST만으로 설명하기에는 예외적인 조건이 많은 것이 사실이다. 왜냐하면 전 지구적인 지구내부(해양 심층이나 육상 심층)의 변화를 적절히 반영하여 설명하지 못하기 때문이다. 그러나 맨틀운동과 같은 지구 내부 심층의 운동이나 변화를 관측한 자료는 존재하지 않는다. 특히, 과거에 비해, 최근에 이러한 예외성이 강하게 나타나고 있기 때문에, 강수량의 10년 변동을 야기하는 원인은 지구 내부에 있을 수 있다는 추론을 하게 되었고 이의 검증을 위한 지구내부 운동(또는 운동에너지)의 대리지표(proxy)로서 범지구적인 화산 운동의 경향(화산폭발 횟수의 변화)을 검토해 보았다.

지금까지 화산폭발과 기후변화와의 관계를 규명하기 위한 주요 연구는 다음과 같다. Lough and Fritts (1987)는, 나이테 자료를 이용하여 1602년에서 1900년 사이의 24개년의 대규모 화산폭발 시점(volcanic years)을 선택하여 조사한 결과, 대규모 폭발이 일어난 후 평균 0.2년 동안 서부 북아메리카의 겨울철은 온난했음을 발견하였다. 그러나 대규모 화산활동의 영향이 일시적으로 기후에 영향을 미칠 수 있는 가능성은 제시하였으나 화산활동 메커니즘과 기후변화 메커니즘과의 연관성은 명확히 제시하지 못하였다. 그리고 Robock et al. (2009)은 약 71,000년 전(Bekki et al., 1996), Toba 화산의 사례와 같이 지극히 거대한 폭발의 예외적인 가능성을 제외하면, 화산 에어로졸(volcanic aerosols)은 일반적으로 성층권(stratosphere)에 2 또는 3년 이상 잔존하지 못하기 때문에, 화산으로부터의 복사강제력(radiative forcing)은 규모에서 10년 주기(interdecadal)보다는 격년 주기(interannual)에 해당한다고 해석하였다. 단, 연속된 화산폭발은 좀 더 긴 기간에 대해 평균 광학적 깊이(optical depth)를 증가시킬 수 있기 때문에 명확한 10년 단위의 냉각기(cooling)를 유발할 수 있다고, 역학적 연계 가능성은 인정 하였다. 결과적으로, 좀 더 긴 시간간격에서 나타나는, 빙하와 해양과 연관된 피드백은, 단기간(short-term) 화산 강제력을 장기간(longer-term) 효과로 변환시킬 수 있다. 그러나 십년 단위 기후변화에 있어 화산의 역할은 여전히 불명확하다고 결론 내렸다.

Schneider and Mass (1975)는 화산이 기후와 약간의 관계를 가지고 있는 반면, 태양과 기후 간의 효과는 증명되지 않았다고 결론 내렸다. Robock (1979)과 Mitchell (1970)은 화산과 태양 강제력으로 위도상에서 결정되는 에너지-밸런스 모델을 사용하였고, 그 결과 화산 강제력은, 태양 계열보다, 1620년 이래 기온 변화의 보다 많은 부분을 설명하고 있음을

알아냈다. Handler (1986)는 대륙에 걸친 냉각에 대한 기후학적 응답은 몬순과 같은 순환(El Niños를 유발하는)을 야기한다고 주장하였다. 그러나 그는 물리적 메커니즘을 명확히 설명하지 못하였고 모델이 이러한 결과를 도출할 수 있음을 보여주지 못하였다. 화산폭발의 발생과 El Niño 사이의 통계적 연관을 찾기 위한 그의 주장은 몇 가지 결함이 있다. 지난 수 세기 동안 많은 화산 폭발이 있었고 El Niño가 47년마다 일어났기 때문에, 각각의 El Niño 시기와 근접한 폭발을 찾을 수 있어야 한다. 그러나 인과관계를 수립하기 위해서는, 폭발은 적당한 형태로 적당한 시간에 존재해야 한다. Handler (1986)의 연구는 성층권 황산염 부하량의 적당한 지표를 사용하지 않았다. 그는 기후 효과가 나타날 수 없는 매우 소수의 폭발을 선택하여 특정 ENSO 사상의 원인이라고 주장하는 이후 또는 한참 전에 발생한 폭발의 시간 선정에 신중하지 못하였다.

Robock and Free (1995)는 최고로 유용한 El Niño 지표인, 남방진동지수(Ropelewski and Jones, 1987)와 각각의 가용한 얼음 코어 기록(ice core record) 뿐만 아니라 화산지수(volcanic index) 사이의 상관을 계산하였으나 어떠한 경우에도 유의한 상관을 찾지 못하였다. Self et al. (1997)은 과거 150년 동안의 대규모 폭발을 조사하였고 어떠한 경우에서도 화산폭발과 결부되는 El Niño는 찾을 수 없었다. 따라서 Robock and Free (1995)는 El Chichón 폭발의 시간과 위치, 그리고 잇따른 대규모 ENSO 사상은 우연의 일치이고 대규모 화산폭발이 El Niño를 유발한다는 증거는 없다고 결론지었다.

주요 연구결과들을 검토한 결과, 현재까지의 화산폭발과 기후변화와의 연구결과는, 대규모 화산폭발과 ENSO와 같이 기후변화를 유발하는 인자 간의 상관을 연구한 사례가 대부분이다. 기록적인 대규모 화산폭발로 인한 1-2년 정도의 짧은 영향력 있는 기후변화 영향을 찾고자 하였고 기록적인 화산폭발로 인해 기후가 일시적으로 변동하였다는 주장은 상당부분 타당성이 있는 것으로 나타났다. 그러나 어떠한 연구에서도 이러한 기록적인 화산폭발과 주기적인 기후요소와의 상관성은 규명하지 못하였다. 다만, 다소 긴 시간간격에서 보면 화산의 효과는 소빙하기의 10년 주기 기후변화에 커다란 역할을 하였다(Robock, 2000)고 추정하는 정도이다.

이러한 요인은 일반적인 화산활동이 아닌 기록적일 만큼 규모가 큰 화산활동만을 분석(과거 화산활동 기록은 기록적인 경우 외에 기록되지 않은 경우가 많음)한 결과로 샘플링의 한계로 인한 원인도 하나로 작용한 것으로 판단된다. 즉, 지금까지 화산폭발과 기후변화에 대한 연구 성과의 주류는 기록적인 화산폭발로 인해 단기간에 직접적으로 야기된 잇따른 기후변동에 초점이 맞추어져 있다.

약 10년 단위 ENSO나 강수량 변동과 같이 중장기적으로 주기성을 가지는 기후요소의 경우, 단순히 개별 화산활동 자체에 의한 직접적인 영향만을 분석하는 것은 전반적인 역학체계에서 불규칙한 일부 예외 사상만을 다루는 실수를

범하는 경우가 될 수 있다. 지구물리나 기후 동역학적 관점에서 주기적인 기후 변화 요소는 지구 전체적인 힘의 연속적인 변화나 흐름에 의해 좌우되고 이러한 연속성에 의해 주기성이 나타난다고 보는 것이 보다 합리적일 것이며, 이러한 차원에서 개별 화산활동 영향이 아닌 전체적인 화산활동의 규모나 빈도를 보는 것이 보다 객관적인 추론이 될 수 있다. 이는 화산활동도 결국은 지구내부의 대규모 운동에 의해 유발되는 부차적인 현상일 것이기 때문이다. 따라서 지구 내부의 운동이 활발한 시기에는 화산활동도 전지구적으로 활발할 것이고 이러한 지구 내부의 운동은 지표 및 대기 강제력의 주기적인 강약을 야기할 수 있다고 가정하였다. 이러한 가정을 증명하기 위해 본 연구에서는 규모가 기록적인 특정 화산에 대한 영향 분석이 아닌, 연도별 전체 화산활동 빈도를 조사하였다. 요약하면, 본 연구는 주기적 가뭄을 유발하는 원인을 지구내부의 운동에 있다고 가정하고, 지구 내부의 운동은 넓은 영역의 화산활동 빈도와 상관이 있을 것으로 가정하였다. 이를 위해 우선 강수량과 화산활동 빈도 및 SST에 대한 중간주기(약 5-20년) 변동성을 분석하였고, 이 중간주기 변동간의 시간적 상관성도 비교하였다.

2. 연구 방법 및 자료

일반적으로 화산은 화산대라고 불리는 대륙판간의 경계에서 주로 형성된다. 이는 지구 내부(맨틀)의 운동에 의해 대륙판이 지속적으로 움직이고 있기 때문인 것으로 알려져 있다. 그리고 화산폭발은 지각 아래의 맨틀이 이러한 경계면의 약한 부분에서 분출되는 현상으로 알려져 있으므로 지구 전반적으로 화산폭발이 잦은 시기는 지구 내부 맨틀의 운동이 활발한 시기로 추론할 수 있다. 역으로 드문 시기는 지구 내부 맨틀의 운동이 상대적으로 안정화된 시기로 추론할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 연도별 화산활동 빈도(횟수)를 산정하여 10년 내외의 경향성을 분석하였고 이를 환태평

양 조산대에 인접한 한반도 중부 지방의 강수량 10년 변동 경향과 비교하였다. 이를 위해 본 연구에서는 세 가지 경우를 분석하였다. 첫 번째는 한반도 중부지역 강수량(이하 KOR로 표기)과 SST의 관계이고, 두 번째는 KOR과 화산폭발 횟수(이하 VOL로 표기)와의 관계이다. 그리고 세 번째는 SST와 VOL과의 관계이다. 이 중 본 연구에서 가장 관심을 가지는 부분은 KOR과 VOL의 관계이다. 본 연구에서 분석을 위해 수집한 기초 자료는 Table 1과 같다. SST는 미국해양 대기국(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서 제공하는 2.0도 공간해상도의 월단위 재분석자료를 이용하였다. 한반도 중부 지역 강수량 자료는 전지구강수기후센터(Global Precipitation Climatology Centre, GPCC)에서 제공하는 관측소 자료에 기반한 1.0도 공간해상도의 월단위 격자자료를 이용하였다. KOR은 동절기 강수관측의 불확실성 등을 고려해 주 호우기인 4월에서 10월까지의 강수량 자료만을 사용하였고, KOR과 SST의 관계를 공간적으로 분석하기 위해 SST는 경위도 20도 간격으로 나누어 평균 분석하였다. 그리고 VOL 산정을 위한 자료는 전지구화산프로그램(스미소니언 연구소)에서 제공하는 자료를 이용하였다.

본 분석에서 사용한 각 자료계열의 관측자료 보유 기간 및 품질 수준을 고려하여 분석 대상기간은 1954년에서 2015년까지 62년으로 설정하였다. 1950년 이전 관측자료는 관측 기기 성능이나 관측지점수 부족 등의 영향으로 공간 정확도 면에서 최근에 비해 상대적으로 정확도가 낮다. 그리고 1950년에서 1953년까지는 한국전쟁으로 한반도 지역의 강수량이 결측된 기간이다. 따라서, 십년 내외의 진동의 분석에는 무리가 없으나 수십 년 진동에 해당하는 주기를 분석하기에는 자료기간이 충분하지는 않다. 분석 대상 자료의 시공간적 범위는 Table 1과 Figs. 1과 2에 기술되어 있다. 또한 SST의 20도 간격 구분과 KOR의 범위 및 분석에 사용된 화산의 분포는 Fig. 1과 같다.

Table 1. Descriptions of Data set and Temporal-Spatial Coverage Used this Study

Data Description	Temporal Coverage	Spatial Coverage	Index Name
<ul style="list-style-type: none"> • NOAA Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (SST) V3b • A global monthly SST analysis from 1854 to the present derived from ICOADS data with missing data filled in by statistics methods 	<ul style="list-style-type: none"> • Monthly values • 1854/01-present 	<ul style="list-style-type: none"> • 2.0 degree latitude × 2.0 degree longitude global grid (89×180) • 88.0N-88.0S, 0.0E-358.0E 	SST
<ul style="list-style-type: none"> • GPCC Global Precipitation Climatology Centre monthly precipitation dataset • 1901-present is calculated from global station data 	<ul style="list-style-type: none"> • Monthly values • Precipitation (combined with monitoring), Full V6 1.0×1.0 to 2010 and V4 monitoring from 2011 (1901/01-2015/9) • Precipitation (V4), First Guess (1.0×1.0) (2012/01-2015/11) 	<ul style="list-style-type: none"> • 1.0 degree latitude × 1.0 degree longitude global grid (360×180) • 90.0N-90.0S, 0.0E-360.0E 	KOR
<ul style="list-style-type: none"> • Volcanic eruptions dataset • Global Volcanism Program, National Museum of Natural History, Smithsonian Institution • volcano.edu 	<ul style="list-style-type: none"> • Annual values • 1901-2015 • Total 1794 events 	<ul style="list-style-type: none"> • Australia, China-North Korea, China, Fiji, Indonesia, Japan, Japan-Russia, Mongolia, North Korea, Philippines, Russia, South Korea, Taiwan 	VOL

Fig. 1. Target Area of KOR (A) and volcano locations (colored circles) used in this study. Total 1030 eruption events of 138 volcanos were used for 1954-2015. Detailed spatial coverages are listed in Table 1. The size of circles are proportional to the number of volcanic eruptions

Fig. 2. (a) is the target area A of KOR (126-129°E, 36-38°N). and (b) shows the mean annual rainfall, which summarized monthly rainfall from April to October at each year, were calculated using GPCC with 1.0 degree latitude $\times$ 1.0 degree longitude for 1954-2015

3. 자료의 특성 분석

3.1 한반도 강수량의 변동성

Fig. 3은 한반도(남한) 중부 지역의 1954년에서 2015년까지 관측된 4월에서 10월까지 강수량의 연별 변동 시계열(KOR)을 나타낸 그림이다. 해당기간 4월에서 10월 강수량 평균은 1099 mm이다. 그리고 이 평균을 기준으로 연도별 과부족 현황(Fig. 3(a))과 연강우량의 통계적 분포(Fig. 3(b))를 도시한 결과이다. 그림에서 보듯이 2015년의 경우 1954년

이래 최저 강수량을 나타내고 있다. 특히 2013년부터 연강수량 감소가 시작하여 점차적으로 2015년까지 심화되는 추세를 보이고 있다. 분석결과에서 두드러진 점은, 연강수량 측면만을 보면, 심각한 강수량 부족을 보인 해는 1959-1960, 1967-1968, 1976-1977, 1982-1983, 1988-1989, 1994-1996, 2001, 2008-2009, 2014-2015로 대략 5-8년 정도의 간격으로 반복적으로 발생한 것을 볼 수 있다. 그러나 본 연구의 범위는 한반도 중부지역 전체의 평균적인 강수량 변동에 한정하고 가뭄을 유발할 수 있는 지역적 수문-기상 특성이나

Fig. 3. (a) Annual rainfall (Apr to Oct) of Korea during 1954-2015. Annual rainfall are the spatially averaged summation of monthly GPCC data set within area A. (b) boxplot of KOR

특성이나 편차는 고려하지 않았기 때문에, 실제 역사적 가뭄 기록(언론 등의 보도 기록)과는 다소 차이가 있을 수 있다.

3.2 한반도 중부 가뭄을 유발하는 강수량과 지구표면온도 및 화산폭발의 관계

3.2.1 분석 SST 영역의 선정

KOR과 SST간의 상관 분석을 위해 SST의 전지구 평균을 사용하는 것은 불확실성이 크다. 이는 SST는 동시간대에도

지역적으로 큰 편차를 나타내기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 KOR과 시간적으로 지속적인 상관을 가지는 영역(지역)을 선정해 KOR과 SST의 관계를 분석하고자 한다. Fig. 4는 1954-2015년의 KOR과 20도 간격으로 평균된 SST간의 10년 이동평균의 공간 상관관계를 분석한 결과이다. 그림에서 보듯이 KOR과 상관이 높은 지역은 동위도대인 N20-N60 구간에서는 전반적으로 상관이 높게 나타났다. 특히 지중해 인근에서 상관이 높게 나타났다. 이는 동위도대의 해당 영역이 동일한 편서풍 지대에 속해 있고 제트기류가 통과하는 경로이기 때문인 것으로 추정된다. 더불어 태평양 지역의

Fig. 4. Numeric Values are Correlation Coefficients of 10-year Running Means Between KOR and SST for 1954-2015. SST were spatially averaged by 20 degree latitude $\times$ 20 degree longitude. White solid contour lines show the equal correlation coefficients. correlation coefficients of land area have NaN values because the SST was not calculated in land area

북반구에서는 E180의 서쪽이 남반구에서는 동쪽이 상관이 높게 나타나고 있다. N0-N60 영역에서는 E180-W160 선을 기준으로 동서(태평양의 동서쪽)쪽의 상관이 매우 차이를 보이는 것을 볼 수 있다. 이는 태평양 주변 대륙 해안선 둘레를 따라 등(等) 상관선이 나타난다는 점에서 해류의 영향이 큰 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 KOR과의 대표 상관영역으로 상관이 높은 SST 영역(영역 B; [N0,E160] - [N20,E180])을 분석 대상 영역으로 선택하여 KOR-SST 관계 분석을 실시하였다. 일반적으로 높은 상관을 보이는 것으로 알려진 엘니뇨, 라니냐 판단지역인 NINO 3.4 영역과는 일치하지 않는다는 점에 주목할 필요가 있다. 특히, 한국의 수도인 서울(경위도)시 만을 보았을 때는 고(高) 상관지역이 보다 북쪽(N20-40)에 위치하고 상관계수도 증가하는 것으로 나타났다.

3.2.2 KOR-SST의 관계

Fig. 5(a)는 한반도 중부지방 강수량(KOR) 이동평균(running mean; RM, Eq. (1))과 해수표면온도(SST, 영역 B) 이동평균 간의 상관도이다. 1에서 20의 숫자는 두 자료계열 각각의 이동평균의 평균길이(running length; Binwidth)이다. 균일한 주기를 갖는 자료계열은 주기와 일치하는 이동평균을 취하는 경우 평활해지는 경향을 나타내게 된다. 본 연구에서는 이러한 특성을 이용하여 두 자료계열간의 시간상관성을 최대화 하는 주기성분을 찾고 주기성분간 경향성을 분석 하였다.

$$RM = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} P_{M-i} \quad (1)$$

Eq. (1)에서 M 은 전체 분석대상 연수(year), n 은 이동평균의 평균길이(year), 그리고 i 는 연단위 구분자이다. 본 연구에서는 온도와 강수량의 대략 10년 진동(Decadal oscillation) 성분에 대해 초점을 맞추어 분석하였다. 일반적으로, 유사한 주기를 갖는(상관이 높은) 시계열은 이동평균의 평균길이가 길어질수록 평활화되어 두 이동평균 계열간의 상관계수는 커지게 된다. 본 연구는 대략 10년 주기의 가뭄을 유발하는 강수패턴에 초점을 맞추고 있으므로 본 분석에서는 해당 주기 내에서 최적 상관 평균길이를 선택하고자 한다. 그림에서 KOR과 SST는 평균길이가 20에 가까워질수록 두 계열의 이동평균 상관은 지속적으로 높아지는 경향을 나타내고 있다. 이는 증감경향이 유사하다는 것을 의미한다. KOR-SST는 그림에서 중심 등치선 영역(붉은 영역)이 평균길이 5년 이상에서는 폭넓게 나타나고 있어 상관성이 상호 평균길이에 민감하지 않게 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉, KOR과 SST는 시간적으로 강한 상관관계(trend)를 가지고 있으나 동일한 특정 주기에 대하여 두드러진 상관관계(cycle)를 나타내지는 않는 것으로 추정된다. KOR과 SST의 10년 이동평균

간의 상관계수는 0.81로 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 특히 SST 10년에서는 KOR 13년이 상관계수가 0.89로 가장 높게 나타났고, SST 10년 주변에서도 동일한 추세를 보이고 있다.

3.2.3 KOR-VOL의 관계

Fig. 5(b)는 한반도 중부지방 강수량(KOR)과 서태평양 및 아시아 지역 화산대의 연간 화산폭발 횟수 간(VOL)의 상관관계이다. 앞서 KOR과 SST와의 경우와 같이 이동평균의 평균길이 별 상관계수를 나타낸다. KOR은 상관길이가 20년에 가까울 때까지 지속적으로 상관계수가 증가하는 경향을 보이나 VOL은 16년에 수렴하는 양상을 보이고 있다. VOL의 경우에는 뚜렷한 16년 주기가 나타나기 때문에 평균길이가 길어질수록 16년 주기에서 상관 최대값을 보이는 것으로 나타난다. KOR-SST와는 다르게 KOR-VOL은 중심 등치선 영역(붉은 영역)이 평균길이 약 8년 이상에서 상대적으로 좁고 선형적으로 나타나고 있어 두자료 계열 간의 상관성이 상호 평균길이에 비례하여 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 KOR과 VOL의 변동성분은 증감추세(trend) 뿐만 아니라 두 계열의 변동을 구성하는 단장 주기성분(cycle) 모두에서 매우 밀접하게 연관되어 있음을 의미한다. KOR과 VOL도 평균길이 10년에서 상관계수가 0.76으로 비교적 높게 나타났다. 특히, VOL 10년에서는 KOR 8년이 상관계수가 0.82로 가장 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. VOL 10년 주변에서도 동일한 추세를 보이고 있다.

3.2.4 SST와 VOL의 관계

Fig. 5(c)는 SST (영역 B)와 서태평양 및 아시아 지역 화산대의 연간 VOL의 상관관계이다. SST도 상관길이가 20년까지 지속적으로 상관계수가 증가하는 경향을 보이나 VOL은 16년에 수렴하는 양상을 보이고 있다. VOL의 경우에는 뚜렷한 16년 주기가 나타나기 때문에 평균길이가 길어질수록 16년 주기에서 상관 최대값을 보이는 것으로 나타난다. SST-VOL은 중심 등치선 영역(붉은 영역)이 SST의 경우 평균길이 약 7-8년부터, VOL은 평균길이 약 11-12년 이상에서 수평적으로 평행하게 나타나고 있다. 특히 SST에 비해 VOL의 중심 등치선 폭이 좁고 길게 VOL 16년을 기준으로 대칭형상으로 나타나고 있어 10년 이상의 장주기에서는 두 자료계열 간에 높은 상관성이 존재하나, VOL의 주기성에 비해 SST의 주기성은 뚜렷하지 않음을 알 수 있다. 즉, 두 자료계열은 KOR-SST나 KOR-VOL에 비해 10년 이하의 단주기 계열의 상관성은 높지 않고 10년 이상의 주기계열은 상대적으로 높은 상관이 존재한다고 해석할 수 있다. 그리고 VOL 16년 주기성분은 SST의 5년 이상 주기성분에 전반적으로 강한 영향을 미치고 있다고 볼 수 있다. SST의 변동에도 VOL의 영향이 존재함을 추정할 수 있다. SST와 VOL도 평균길이 10년에서 상관계수가 0.65로 나타났다.

Fig. 5. Running Means by Lag Times. CC represents the Pearson correlation coefficients between two running mean data and numeric values on each cells designate the CCs at each run lengths

3.2.5 자료계열 별 주기(스펙트럼) 분석

자료계열별로 시계열의 대표 주기성분을 검출하기 위해, 앞서 분석한 이동평균 분석과 동시에, 웨이블릿 스펙트럼 분석도 실시하였다. 분석 결과 Fig. 6과 같이 KOR (Fig. 6(a))의 경우는 약 3년, 7년, 20년에서 주기 성분이 보였고 이중 7년 성분이 매우 강하게 나타났다. 이는 앞서 분석했던, 연강수량이 5-8년 주기로 나타났던 실측결과 및 이동평균 상관분석 결과와도 잘 일치한다. SST (Fig. 6(b))의 경우는 약 5년, 10년, 23년에서 주기 성분이 보였고 이중 10년 성분이 매우 강하게 나타났다. 이는 앞서 분석했던, 이동평균 상관분석 결과와도 잘 일치한다. VOL (Fig. 6(c))의 경우는 약 3년, 4년, 8년, 16년(16.5년)에서 주기 성분이 보였고, 이중 16년 성분이 매우 강하게 나타났다. 특이한 점은, 세 자료 계열 모두 1990년대 중반 이전과 이후 강한 스펙트럼의 주기에 변화를 보인다는 것이다. KOR의 경우 2-4년 주기가 약화되고 4-8년 주기가 강해진 것을 볼 수 있다. 그리고 SST의 경우는 4-8년 주기가 약해지고 8-16년 주기가 강해진 것을 볼 수 있다. 그리고 VOL의 경우도 2-4년 주기가 약해지고 4-8년 주기가 강해진 것을 볼 수 있다. VOL의 뚜렷한 장주기

(약 16년)도 이전에 비해 지속적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 즉, 세 자료계열 모두 1990년대 중반 이후 장주기 성분이 강해진 것으로 나타났다. 이는 본 논문 4.3절의 이동평균 시계열의 기간별 상관분석에서 보이는 1990년대 중반에 증감 추세가 역전을 보이는 시기가 나타나고 있다는 점과 연관이 있어 보인다. 다만, 본 논문에서는 이러한 상대적 장주기의 강화 현상의 원인이 자연적인 현상인지 인위적인 여지가 있는지에 대한 명확한 설명을 할 수는 없다.

4. 8년과 10년 이동평균 시계열의 변동성 분석

4.1 이동평균과 스펙트럼 분석에 나타난 주기성분

이동평균에 의한 주기분석 결과를 요약하면 Table 2 및 Fig. 7과 같다. SST 10년에서는 KOR 13년이 상관계수가 0.89로 가장 높게 나타났고 SST와 KOR의 10년 이동평균 간의 상관계수는 0.81로 나타났다. VOL 10년에서는 KOR 8년이 상관계수가 0.82로 가장 높게 나타났고 VOL과 KOR의 10년 이동평균 간의 상관계수는 0.76으로 나타났다. SST와 VOL의 상관관계는 VOL 16년을 기준으로 SST의 상관관

Fig. 6. Continuous Wavelet Power Spectrum. In left figures (Wavelet Power Spectrum), the deeper green shows weak spectrum and deeper yellow shows strong spectrum. The thick red contour designates the 95% confidence level against red noise and the con of influence (COI) where edge effects might distort the picture is shown as a dotted lines. The solid line with circle marks shows the time series of each data sets. Right figures (Global Wavelet Spectrum) show the power spectrum of each data set and numeric values designates the periods

Table 2. Correlation Coefficients Between Lagged Running Means of Data Set According to Lag Time 0-5 Year for Run Lengths (binwidths) of 8- and 10-year

Run Length (year)	Data	Lag time of running mean series (year)					
		0	1	2	3	4	5
8	KOR-VOL	0.750	0.776	0.756	0.678	0.568	0.448
	KOR-SST	0.749	0.768	0.764	0.724	0.651	0.582
	SST-VOL	0.567	0.576	0.559	0.545	0.524	0.485
10	KOR-VOL	0.760	0.770	0.763	0.716	0.640	0.534
	KOR-SST	0.815	0.836	0.830	0.794	0.736	0.668
	SST-VOL	0.648	0.675	0.675	0.655	0.622	0.576

Fig. 7. Correlation Coefficients Between Lagged Running Means of Data Set According to Lag Time 0-5 Year for Run Lengths (binwidths) of 8 and 10 Years. (a) is the case of run length is 8-year and (b) is the case of run length is 10-year

Fig. 8. Standardized Global Wavelet Spectrum of Data Sets

이가 20년까지 지속적으로 증가하는 경향을 보였고, SST와 VOL의 10년 이동평균 간의 상관계수가 0.65로 나타났다. 웨이블릿 방법에 의한 스펙트럼 분석결과를 요약하면 Fig. 8과 같다. 각 자료계열의 스펙트럼의 크기(power)를 0-1 사이로 표준화시켜 극좌표계에 표현한 결과이다. KOR의 경우는 약 3년, 7년, 20년에서 주기 성분이 보였고 이중 7년 성분이 매우 강하게 나타났다. SST의 경우는 약 5년, 10년, 23년에서 주기 성분이 보였고 이중 10년 성분이 매우 강하게 나타났다. VOL의 경우는 약 4년, 8년, 16년 주기 성분이 나타났고 16년 성분이 특히 강하게 나타났다. 이상의 결과를 종합해 보면, 자료계열 간에 주기가 명확히 일치하지는 않지만, 단주기는 대략 3-5년(기간 평균 4년), 중간주기는

단주기의 약 2배수에 해당하는 약 7-10년(기간 평균 8.5년), 그리고 장주기는 중간주기의 약 2배수에 해당하는 약 16-23년(기간 평균 19.5년) 정도를 가지는 것을 알 수 있다. 본 연구의 계열간의 추세분석에서는 7-10년 주기의 변동성에 초점을 맞추었고 8년과 10년을 기준으로 비교하여 보았다. 여기서 명확히 해야 할 점은, 본 이동평균 상관분석 및 스펙트럼 분석에 의해 도출된 주기는 전반적인 연강수량의 변동성이 나타내는 주기 성분으로 가뭄을 유발하는 극소 강우량에 대한 주기와는 차이가 있을 수 있다.

4.2 자체시공간을 고려한 이동평균 시계열의 상관분석

Table 2의, 8년과 10년 이동평균 분석에서 계열 간 시차를 고려하지 않는 경우(Lag time=0) 8년 이동평균에서는 KOR과 VOL의 상관계수(Pearson correlation coefficient)가 0.750으로 가장 높게 나타났다. VOL은 16년에서 가장 강한 주기 성분을 나타냈고 그에 반주기에 해당하는 8년에서 KOR과 상관이 높게 나타난 것으로 보아 8년 주기 성분이 KOR과 밀접한 관련이 있는 것으로 추정된다. 그리고 10년 이동평균에서는 KOR과 SST의 상관계수가 0.815로 가장 높게 나타났다. 즉, SST는 10년 주기성분이 가장 강하게 나타난다고 볼 수 있다. 그리고 Lag time 1-5는 3가지 상관 자료계열의 이동평균 시계열에 대하여, 한 계열은 고정시키고 다른 한 계열은 1-5년까지 자체(Lag)시켜 상관을 산정한 결과이다. KOR-VOL 경우로 예를 들면, KOR-VOL 계열의 자체시간(Lag time)이 1일 때 두자료 계열의 8년 이동평균의 상관계수가 0.776이라는 것은, KOR의 임의의 시간 T+1 (year)에서의 8년 이동평균과 VOL의 임의의 시간 T (year)에서의 8년 이동평균의 상관계수가 0.776이라는 의미로, KOR과 VOL의 영향관계가 명확하다면, VOL의 변동에 비해 KOR의 변동은 1년 정도 늦게 나타난다고 해석할 수 있다. 분석결과

3가지 경우 모두 1년 지체 이동평균 계열에서 가장 상관관계가 높게 나타났다. 그리고 지체가 없는(Lag time=0) 원자료 계열에 비해 지체 1-2년 계열이 상관관계가 높게 나타났고 더 긴 지체 계열에서는 상관관계가 점차 감소하는 것으로 나타났다. 단, 이러한 결과가 의미하는 바는 자료계열 간에 명확히 1-2년의 지체시간이 존재한다고 해석하는 것 보다는 KOR, VOL, SST 연자료 계열 간의 상관관계는 단기간 영향에 의해 즉각적으로 변동에 영향을 주는(받는) 것이 아니고 1-2년 이상 영향이 지속되어야 상대 자료계열의 변동에 유의한

영향을 줄 수 있다고 해석하는 것이 보다 합리적으로 사료된다. 즉, 가뭄 등을 유발하는 강수량의 변동 메커니즘이 매우 복잡하고 우리가 인지할 수 있는 기상이나 기후 현상으로 나타나기 위한 임계기간이 필요하기 때문에 정확히 시기가 일치하지는 않는다고 해석할 수 있다.

4.3 이동평균 시계열의 기간별 상관분석

Figs. 9-10은 상관관계가 높게 나타난 지체시간(Lag time)이 0과 1(year)인 이동평균 시계열을 지체시간 만큼 이동(lag)

Fig. 9. Time Series Plot of Running Mean with Run Length 8-year (left panel) and 10-year (right panel). The lag time (year) of running mean series are 0-year for all of two running mean series. (a) and (d) show the figures of KOR(t)-VOL(t), (b) and (e) KOR(t)-SST(t), and (c) and (f) SST(t)-VOL(t) where t=sequential time(year) of running mean

Fig. 10. Time Series Plot of Running Mean with Run Length 8-year (left panel) and 10-year (right panel). The lag time (year) of running mean series are 0-year and 1-year for two running mean series respectively. (a) and (d) show the figures of $KOR(t)-VOL(t \rightarrow t+1)$, (b) and (e) $KOR(t)-SST(t \rightarrow t+1)$, and (c) and (f) $SST(t)-VOL(t \rightarrow t+1)$ where t =sequential time(year) of running mean and ' $\rightarrow$ ' designates the time shift

시켜 기간별로 비교한 그림이다. 이동평균 8년과 10년 모두에서 KOR-VOL의 시간에 따른 증감 변동의 추세가 과거에서 현재까지 매우 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 KOR-SST와 SST-VOL는 시간에 따른 전반적인 증감 경향(trend)은 일치하나, 1990년대 중반과 같이 증감 추세가 역전을 보이는 시기가 나타나고 있다. 이 시기는 Fig 6의 자료계열 별 주기(스펙트럼) 분석에서 장주기 강화가 나타나는 시기와 일치하고 있어 인과관계에 대한 설명을 할 수 없으나 매우 흥미로운 점이다. 특히 KOR-SST의 경우 전체적인 증가 추세는 일치한다고 보이나 2000년대 중반 이후(대략

2005년 이후) KOR-SST 간에 역전 추세를 보이고 특히 2010년 이후 최근까지 SST는 증가하는데 비해 KOR은 감소하는 추세를 나타내고 있다. 2010년 이후의 감소추세-2000년대 중반부터 지속적으로 감소추세-는 VOL에도 명확히 나타나고 있다. 본 연구의 분석기간 내, 전체적인 추세(trend)를 볼 때 장기적인 측면에서 SST가 KOR과 같은 강수량의 변화에 큰 영향을 미친다는 것은 명확하다고 본다. 그러나 시기에 따라 나타나는 간헐적 불일치-역전현상-는 SST가 강수량의 십년 단위 주기적 변동의 유일한 지배적인 인자는 아니라는 것을 의미한다. 즉, 본 연구의 결과에서 나타나는,

1980년대 이후의 지속적이고 평균적인 SST 증가 추세와 KOR의 평균적인 증가에 영향을 주기는 하였지만, SST의 변화가 KOR이 가지는 고유의 주기성을 유발한다고 보기는 어려워 보인다. 그에 반해 VOL은 변동-본 연구에서 분석한 8년과 10년 이동평균 시계열의 변동-의 추세가 KOR과 시기적으로 큰 역전 없이 잘 일치하는 것으로 나타나고 있다. 특히, 2000년대 중반부터 시작되는 감소 추세와 2010년 이후 최근까지의 급격한 감소 추세는 시기는 물론 정도에 있어서도 잘 일치하고 있다. 이러한 측면에서 KOR의 변동 주기를 유발하는 주요 인자는 SST보다는 VOL이 가능성이 높다고 추정된다. 이러한 결과로부터, 강수량 변동의 유발요소에서 화산활동과 관련된 지구 역학적 메커니즘이 깊게 관련되어 있을 가능성을 고려해 볼 수 있다. 즉, 10년 내외 KOR 변동 추세는 VOL의 변동 추세와 시간적으로 크게 역전기간 없이 잘 일치하고 있으므로, 가뭄을 유발하는 강수량 부족이 발생한 시기에는 대략 10년 이전부터 화산활동이 감소하는 경향을 보였다는 것을 알 수 있다. 이는 화산활동이 가뭄을 유발하는 강수량의 주기적 변동의 메커니즘과 물리적으로 관계가 있다는 증거이다. 이는 호우를 유발하는 다우기의 경우도 마찬가지로 잘 일치하고 있다는 점에서 보다 명백해 진다.

5. 화산활동과 강수량 변동의 역학적 상관성에 대한 토론 및 고찰

KOR과 VOL 사이의 높은 상관성은 통계적 분석결과이므로 우연일 수 있으나, 분석기간 내에서 패턴이 매우 정확히 일치(뚜렷한 climate singularity가 존재)하고 있어 우연일 확률은 매우 낮아 보인다. 지금까지 강수량 변동과 같은 기후변화 요소의 수십 년 단위 변동주기(10-20년)와 천체 역학적 주기성(10-20년)이 유사하다는 점에서 이러한 기상 현상을 유발하는 주요 외력인자로 태양, 지구, 달 등의 천체 간 주기적 위상 배열에 의해 발생하는 역학적 주기성이 간혹 지목되어 왔다(Currie, 1981, 1993a, 1993b, 1994a, 1994b, 1995; Mitra et al., 1991; Mitra and Dutta, 1992; Mitra, 1993). 그러나 천문학적 현상이 지구 기후 변동의 직접적 원인이라 하기엔 인과관계 간의 명확한 주기적 일치성을 규명하지 못하고 주기에 해당하는 시점 이외의 연속적인 기후 변동을 설명하기에는 역학적 설득력이 부족하다. 이보다는, 주기적인 천문학적 현상에 의해 발생하는 외력의 변화(행성 간 인력의 변화)가 맨틀의 운동과 같은 지구 내부 물질의 일정한 순환에 영향을 주거나 주기적으로 비정상적인 유동(流動)을 유발-순환을 교란(攪亂)-하고, 이때 축적된 내부 운동에너지가 지표와 대기에 영향을 미치는 열에너지로 변환되면서, 결국 이것이 수십 년 단위의 주기적 기후 변동을 유발한다고 추론하는 것이 역학적으로는 보다 설득력이 있어 보인다.

지극히 교과서적인 해석이지만, 화산활동과 연관된 강수량의 변동을 분석한 본 연구의 결과의 인과관계를 역학적으로 추론해 보면, 화산활동이 감소하는 시기는 지구 내부의 운동(맨틀)이 비교적 안정화된 시기로 해석할 수 있고, 만약 지구 내부 운동에너지나 열에너지가 지표나 대기의 운동에 유효한 영향을 미친다면, 이는 지표나 해수온도와 같은 지표나 해수, 대기의 운동을 야기하는 운동(열)에너지가 안정화되는 시기로 볼 수 있다. 따라서 이 시기에는 비교적 지구 표면의 상태가 비교적 안정(열에너지 감소→운동에너지 감소)되어 강수를 유발하는 대류운동이 약해진다고 해석할 수 있다. 역으로 화산활동이 지속적으로 증가하는 시기에서는 지구 내부의 운동이 불안정한 시기로 해석할 수 있고 이로 인해 지구 표면의 상태도 불안정(열에너지 증가→운동에너지 증가)해져 강수를 유발하는 대류운동이 활발해진다고 해석할 수 있다.

지금까지 연구 보고된 강수량 변동의 주기성은 일정하지 않다. 그리고 과거의 장기 강수량 관측 자료가 부재하므로 주로 가뭄에 대한 문헌기록이나 지표(proxy)를 근거로 도출된 연구결과가 대부분이다. 이중 우리나라 주변의 동아시아 지역을 대상으로 한 강우의 주기성에 관한 대표적인 연구결과는 다음과 같다. Yoo et al. (2002)은 문헌기록을 이용하여 복원된 약 200년(AD 1777-1996년)의 서울지점 강수량 자료와 관측자료를 이용하여 가뭄분석을 실시하였고 상대적으로 강한 가뭄은 대략 5-10년에 한번 꼴로 발생한 것으로 분석하였다. Min et al. (2003)은 CRU (Climatic Research Unit)로부터 산정된 SPI (Standardized Precipitation Index)를 이용하여 한국에 대하여 1951-1996년간의 가뭄분석을 실시하여 가뭄이 2-3년과 5-8년 주기로 발생한 것을 알아냈다. Tong et al. (2006)은 과거 홍수와 가뭄 기록에서 복원된 1470-2003년의 기후지표를 이용하여 양쯔강 유역의 홍수와 가뭄 스펙트럼 분석 주기는 강도순으로 16.69, 5.09, 10.47년으로 나타났다. Murata (1990)는 장마기간 일본의 강수량 변동을 분석하여 10, 8, 4, 2.2년의 주기가 있음을 보고하였고, 특히 4, 2.2년 주기의 경우 북태평양고기압(North Pacific High)과 오흐츠크해 고기압(Okhotsk High)과 매우 밀접하게 연관되어 있다고 주장하였다. Wang et al. (2007)은 227년(AD 1978-2004)간의 기록에서 복원된 자료를 포함하는 서울지점 강수량 자료를 이용하여 특이성(singularity) 분석을 통하여 서울지점의 가뭄은 4년 주기, 강우는 2-6년의 격년변동(interannual)과 50-60년의 십년변동(multidecadal)을 나타낸다고 하였다. Yoon and Hwang (2009)은 삼국사기 기록(BC 57-AD 935)을 조사하여, 신라가 지속된 992년 동안 심각한 가뭄은 대체로 고르게 발생하였고 평균 17년에 한번(총 59회) 발생한 것을 알아냈다. 이 외에 Ren et al. (2003)의 중국 Heihe River 유역의 240, 200, 4, 2-3년의 가뭄과 홍수 주기, 그리고 Byun et al. (2008)의 6(5.3)년, 12년, 38년, 124년 주기설이 있다. 다만, Yoon and Hwang (2009)은 최근

Byun et al. (2008)가 주장한 한반도 가뭄 주기 가운데 124년의 장주기는 삼국사기 자료에서 이러한 주기를 확인하는 것이 매우 어려웠다.

더불어 미국을 대상으로 한 가뭄관련 연구 중, Cook and Jacoby (1983)의 15.7년, Stockton and Meko (1983)의 16-19, 17-23, 22, 60년, Meko et al. (1985)의 18.33 (17.60-20.95)년, Cook et al. (1997)의 2.5, 4.1, 7.8, 20-23년 주기설을 종합해 보면, 15-23년(특히, 16-18년과 20-23년)의 뚜렷한 주기는 동아시아 이외의 영역에서도 관찰됨을 알 수 있다.

연구결과를 종합하면 4.5년, 8-10년, 15-17년 등 특정 기간이 반복되긴 하지만 강수량 변동의 주기를 특정하여 단정하기는 어렵다. 첫 번째 원인은 지역적으로 분류가 안 되어 있어 주기 해석에 모호성이나 일부 작위성이 존재한다고 보인다. 주기가 지역적 특성을 가지고 있음은 Lee (2000)의 연구에서 보고된 바 있는데, 이 연구결과에 의하면 우리나라 강수량 분석 결과 지역간 상관계수가 0.67 정도로 기온이나 수온보다 낮고 지역편차가 커 국지성이 강한 특징을 보였다. 주기변화는 대체적으로 2-3년, 5-6년 주기가 우세한 편이나 지역별 편차가 크게 나타났으며, 울릉도에는 22년, 목포와 광주에서는 14년, 제주, 부산, 여수에서는 5-6년 주기가 다른 지역에 비해 우세하였다. 그리고 두 번째 원인은 강수량 변동을 유발하는 주요 영향인자의 종류가 다양하고 이러한 영향인자의 영향 정도가 시간은 물론 지역적으로도 표출 정도가 다르기 때문으로 추정된다. 즉, 단기, 장기 강우량의 변동을 유발하는 영향인자가 다르고 지구 내외부의 역학적 변화에 의해 좌우되는 장기 변동-대략 8년 이상 변동에 해당에 비해 단기 변동-약 5년 내외 혹은 이내의 변동으로 추정되며 Murata (1990)의 4, 2.2년 주기가 대표적인 예-은 지역적, 기상학으로 다양한 원인과 영향이 복합되어 발생하기 때문에 명확한 고정 주기가 나타나기 어려운 것으로 추정된다.

6. 결 론

본 연구에서는 강수량과 화산폭발 횟수 간의 중장기 변화 사이의 상관을 통계적 측면에서 검토하여 상관이 매우 높다는 것을 밝혔고 이러한 통계적 유의성을 통해 강수량 변동과 지구내부 운동과의 밀접한 역학적 관계가 존재할 수 있다는 가능성을 제시하였다. 본 연구의 결과를 간략히 요약하면 다음과 같다. 웨이블릿 방법에 의한 스펙트럼 분석결과, 자료계열 간에 주기가 명확히 일치하지는 않지만, KOR, SST와 VOL은 단주기는 대략 3-5년(기간 평균 4년), 중간주기는 단주기의 약 2배수에 해당하는 약 7-10년(기간 평균 8.5년), 그리고 장주기는 중간주기의 약 2배수에 해당하는 약 16-23년(기간 평균 19.5년) 정도를 가지는 것을 알 수 있다. 중간주기에 해당하는 8년과 10년 이동평균 분석결과, 계열 간 시차를 고려하지 않는 경우 8년 이동평균에서는 KOR와 VOL의 상관계수가 0.750으로 가장 높게 나타났다.

VOL은 16년에서 가장 강한 주기성분을 나타냈고 그에 반주기에 해당하는 8년 주기 성분도 KOR과 밀접한 관련이 있는 것으로 추정된다. 그리고 10년 이동평균에서는 KOR과 SST의 상관계수가 0.815로 가장 높게 나타나, SST는 10년 주기성분이 가장 강하게 나타난다고 볼 수 있다. 그리고 3가지 이동평균 시계열 모두 1년 지체 이동평균 계열에서 가장 상관이 높게 나타났다. 결론적으로, 본 연구의 분석기간 내, 전체적인 추세를 볼 때 장기적인 측면에서 SST가 KOR과 같은 강수량의 변화에 큰 영향을 미친다는 것은 명확하다고 본다. 그러나 시기에 따라 나타나는 간헐적 불일치는, 1980년대 이후의 지속적이고 평균적인 SST 증가 추세가 KOR의 평균적인 증가에 영향을 주기는 하였지만, SST의 변화가 KOR이 가지는 고유의 주기성을 유발한다고 보기는 어렵다. 그에 반해 VOL은 변동의 추세가 KOR과 시기적으로 큰 역전 없이 잘 일치하는 것으로 나타나고 있고, 특히 2000년대 중반부터 시작되는 감소 추세와 2010년 이후 최근까지의 급격한 감소 추세는 시기는 물론 정도에 있어서도 잘 일치하고 있다. 이러한 측면에서 KOR의 변동 주기-특히 중간규모 이상 주기를 유발하는 주요 인자는 SST보다는 VOL이 가능성이 높다.

본 연구의 목적은 강수량 변동 자체의 단순 주기성을 제시하고자 함이 아니다. 본 연구에서는 왜 강수량 변동이 주기적으로 발생하며 어떤 지표로 알 수 있는지, 무엇이 이러한 주기성을 유발하는 주요 인자인지를 제시하고자 하였다. 전자의 경우 정성적 예측이나 예견에 불과할 수 있지만 후자는 정량적 예측이 가능하기 때문이다. 본 연구의 결과는 최근 지속적으로 증가하는 해수면 온도-지구 온난화의 영향으로 추정-는 2012-2015년 한반도 중부지역의 강수량의 감소 추세를 설명하기에 불가능하였으나, 이에 대한 불일치를 지구 내부의 역학적인 영향의 가능성을 제시하여 다른 차원에서 해석 할 수 있게 하였다. 그리고 강수량 변동 및 가뭄에 주기성이 존재한다는 다양한 연구와 보고에서 제시하지 못한, 주기성을 유발하는 원인에 대한 보다 합리적인 실마리를 제공하였다는 점에서 큰 의의를 가진다. 비록 본 논문에서 전 지구적인 측면에서 강수량과 화산폭발 빈도 간의 변동의 상관성을 규명하지는 못하였다. 그러나 최소한, 본 연구의 결과를 통하여 강수량과 화산폭발 빈도는 각각 변동의 주기성을 가지고 있고 두 주기성분 간에는 통계적 유의성이 있다는 것은 새롭게 밝혀졌다. 그리고 사회적인 측면에서는, 중장기적인 강수의 변화-증가나 감소의 중장기적인 변동 과정-가 전적으로 지구 온난화에 비례하는 것이 아니고 주기적인 경향을 가지고 있다면, 지금까지 우리가 집중하고 경주해온 지구 온난화를 유발하는 것으로 알려진 불확실한 인위적 요소들의 제거를 위한 다양한 노력의 이행에 대한 압박과 실효성 논란을 어느 정도는 해소해 줄 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 18주요-대4-시드사업인 ‘커뮤니티 빅데이터 패턴 해석을 통한 수난(水難) 발생 및 규모 예측 기술 개발(2018-0369)’로 수행되었습니다.

References

- Bekki, S., J. A. Pyle, W. Zhong, R. Toumi, J. D. Haigh, and D. M. Pyle (1996) The role of microphysical and chemical processes in prolonging the climate forcing of the Toba eruption, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 23, pp. 2669-2672.
- Byun, H.R., Lee, S.J., Morid, S., Choi, K.S., Lee, S.M., and Kim, D.W. (2008). Study on the periodicities of droughts in Korea. *Asia Pac. J. Atmos. Sci.*, Vol. 44, No. 4, pp. 417-441.
- Cook, E.R., and Jacoby, G.C. (1983). Potomac River streamflow since 1730 as reconstructed by tree rings. *J. Climate Appl. Meteor.*, Vol. 22, No. 10, pp. 1659-1672.
- Cook, E.R., Meko, D.M., and Stockton, C.W. (1997). A new assessment of possible solar and lunar forcing of the bi-decadal drought rhythm in the western United States. *Journal of Climate*, Vol. 10, No. 6, pp. 1343-1356.
- Currie, R.G. (1981). Solar cycle signal in air temperature in North America: Amplitude, gradient, phase and distribution. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 38, No. 4, pp. 808-818.
- Currie, R.G. (1993a). Luni-solar 18.6- and solar cycle 10-11-year signals in USA air temperature records. *Int. J. Climatol.*, Vol. 13, No. 1, pp. 31-50.
- Currie, R.G. (1993b). Luni-solar 18.6- and 10-11-year solar cycle signals in South African rainfall. *Int. J. Climatol.*, Vol. 13, No. 3, pp. 237-256.
- Currie, R.G. (1994a). Luni-solar 18.6- and 10-11-year solar cycle signals in H. H. Lamb's dust veil index. *Int. J. Climatol.*, Vol. 14, No. 2, pp. 215-226.
- Currie, R.G. (1994b). Variance contribution of luni-solar and solar cycle signals in the St. Lawrence and Nile River records. *Int. J. Climatol.*, Vol. 14, No. 8, pp. 843-852.
- Currie, R.G. (1995). Luni-solar 18.6- and solar cycle 10-11-year signals in Chinese dryness-wetness indices. *Int. J. Climatol.*, Vol. 15, No. 5, pp. 497-515.
- Handler, P. (1986). Possible association between the climatic effects of stratospheric aerosols and sea surface temperatures in the Eastern tropical Pacific Ocean. *J. Climatol.*, Vol. 6, No. 1, pp. 31-41.
- Lee, C.G. (2000). *A study on periodical variability of temperature, precipitation and sea surface temperature of Korea*. Master's thesis, Jeju National University.
- Lee, J.H., Seo, J.W., and Kim, C.J. (2012). Analysis on trends, periodicities and frequencies of Korean drought using drought indices. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 1, pp. 75-89.
- Lough, J.M., and Fritts, H.C. (1987). An assessment of the possible effects of volcanic eruptions on North American climate using tree-ring data, 1602 to 1900 A.D.. *Clim. Change*, Vol. 10, No. 3, pp. 219-239.
- Meko, D.M., Stockton, C.W., and Blasing, T.J. (1985). Periodicity in tree rings from the corn belt. *Science*, Vol. 229, No. 4711, pp. 381-384.
- Min, S.K., Kwon, W.T., Park, E.H., and Choi, Y. (2003). Spatial and temporal comparisons of droughts over Korea with East Asia. *Int. J. Climatol.*, Vol. 23, No. 2, pp. 223-233.
- Mitchell, J.M. (1970). A preliminary evaluation of atmospheric pollution as a cause of the global temperature fluctuation of the past century. In S.F. Singer (Ed.), *Global Effects of Environmental Pollution* (pp. 139-155). Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Company.
- Mitra, K., Mukherji, S., and Dutta, S.N. (1991). Some indications of 18.6-year luni-solar and 10-11-year solar cycles in rainfall in North-West India, the plains of Uttar Pradesh and North-Central India. *Int. J. Climatol.*, Vol. 11, No. 6, pp. 645-652.
- Mitra, K., and Dutta, S.N. (1992). 18.6-year luni-solar nodal and 10-11-year solar signals in rainfall in India. *Int. J. Climatol.*, Vol. 12, No. 8, pp. 839-851.
- Mitra, K. (1993). *Studies on the effects of 18.6 year luni-solar and 1041 year solar cycles on rainfall in India*. Ph.D. dissertation, University of Calcutta, Calcutta, India.
- Murata, A. (1990). Regionality and periodicity observed in rainfall variations of the baiu season over Japan. *Int. J. Climatol.*, Vol. 10, No. 6, pp. 627-646.
- Robock, A. (1979) The "Little Ice Age": Northern Hemisphere average observations and model calculations. *Science*, Vol. 206, No. 4425, pp. 1402-1404.
- Robock, A. (2000). Volcanic eruptions and climate. *Reviews of Geophysics*, American Geophysical Union, Vol. 38, No. 2, pp. 191-219.

- Robock, A., Ammann, C.M., Oman, L., Shindell, D., Levis, S., and Stenchikov, G. (2009). Did the Toba volcanic eruption of ~74 ka B.P. produce widespread glaciation? *J. Geophys. Res.*, Vol. 114, D10107. doi:10.1029/2008JD011652
- Robock, A., and Free, M.P. (1995). Ice cores as an index of global volcanism from 1850 to the present. *J. Geophys. Res.*, Vol. 100, No. D6, pp. 11549-11567.
- Ropelewski, C.F., and Jones, P.D. (1987). An extension of the Tahiti-Darwin Southern Oscillation index. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 115, No. 9, pp. 2161-2165.
- Schneider, S.H., and Mass, C. (1975). Volcanic dust, sunspots and temperature trends. *Science*, Vol. 190, No. 4216, pp. 741-746.
- Self, S., Rampino, M.R., Zhao, J., and Katz, M.G. (1997). Volcanic aerosol perturbations and strong El Niño events: No general correlation. *Geophysical Research Letters*, Vol. 24, No. 10, pp. 1247-1250.
- Stockton, C.W., and Meko, D.M. (1983). Drought recurrence in the Great Plains as reconstructed from long-term tree-ring records. *Journal of Climate and Applied Climatology*, Vol. 22, No. 1, pp. 17-29.
- Tong, J., Qiang, Z., Deming, Z., and Yijin, W. (2006) Yangtze floods and droughts (China) and teleconnections with ENSO activities (1470-2003). *Quaternary International*, Vol. 144, No. 1, pp. 29-37.
- Wang, B., Jhun, J.G., and Moon, B.K. (2007). Variability and singularity of Seoul, South Korea, rainy season (1778-2004). *J. Climate*, Vol. 20, No. 11, pp. 2572-2580.
- Yoon, S.O., and Hwang, S.I. (2009). The natural hazards and drought periodicity in Korea during the ancient times based on Samguksaki. *Journal of the Korean Geographical Society*, Vol. 44, No. 4, pp. 497-509.
- Ren, Z., Yang, D., and Xie, Y. (2003). Droughts, flood disasters, and climate change during the last 2000 years in Heihe River basin. *XVI INQUA Congress, Shaping the Earth, A Quaternary Perspective*, International Union for Quaternary Research, Paper No. 59-16, p. 179.

Received	October 23, 2018
----------	------------------

Revised	October 25, 2018
---------	------------------

Accepted	November 5, 2018
----------	------------------