

서울지점 강우자료와 기후지표자료에 나타난 동아시아 기후의 종관적 변화특성

Synoptic Change Characteristics of the East Asia Climate Appeared in Seoul Rainfall and Climatic Index Data

황석환* · 김중훈** · 유철상*** · 정건희****

Hwang, Seok Hwan · Kim, Joong Hoon · Yoo, Chulsang · Chung, Gunhui

Abstract

In this study it was assessed the accuracy of the Chukwooki rainfall data in Seoul by comparing with tree-ring width index data, sunspot numbers, southern oscillation index (SOI) and global temperature anomaly. And it was investigated the correlations of climatic change and change characteristics in past north-east asia by comparisons of tree-ring width index data in near Korea. The results of this study shows that Chukwooki rainfall data has the strong reliance since the trends and depths of change are very well matched with other comparative data. And with the results by compared with tree-ring width index data in six sites of near Korea, climates of north-east asia are changed with strong correlations as being temporal and spatial and long-term periodic possibility of reproducing are exist on those changes. However characteristics of climate change post 1960 A.D. are investigated as represented differently to past although statistical moving characteristics or changing criterion are within the limitations of reproducing phase in the past since they represent the different trends and irregularity and their frequencies are increase. The results of this study are widely used on long-term forecasting for climate change in north-east asia.

Keywords : tree-ring, climate change, Chukwooki

요 지

본 논문에서는 tree-ring width 지표자료, 태양흑점수, 남방진동지수(SOI) 및 지구온도 아노말리 자료와의 비교를 통하여 서울지점 측우기 강우량 자료의 정확도를 기능해 보았다. 그리고 한반도 인근지역의 tree-ring width 지표자료와의 비교를 통하여 과거 동북아시아 기후변화 상관성과 변화특성을 파악해 보았다. 분석 결과 측우기 강우량 자료는 다른 비교분석 대상 자료들과 경향성과 변화심도가 매우 잘 일치하고 있어 상당한 신뢰성을 가지고 있음이 확인되었다. 그리고 한반도 주변 6개 지점의 tree-ring width 지표자료와의 비교분석결과, 장기적으로 동북아시아 기후는 시공간적으로 밀접한 상관을 가지고 변화하고 있으며 그 변화에는 장주기적인 재현성이 존재한다는 점을 알 수 있었다. 그러나 1960년 이후의 기후변화 특성은 통계적인 거동특성이나 변화폭이 과거의 재현사상의 한계를 넘지는 않으나 과거와는 다른 경향성과 불규칙성을 보여주고 있으며 재현주기도 짧아지고 있어 과거와는 다르게 나타나는 것으로 분석되었다. 과거자료에 근거한 본 연구의 결과는 동북아시아 기후변화 장기 예측에 있어 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심어 : Tree-ring, 기후변화, 측우기

1. 서 론

측우기 자료는 세계 최장의 기록을 가진 강우량 관측 자료로서 그 의미가 매우 크다. 그러나 최근까지도 측우기 자료에 대한 신뢰성에는 많은 의문이 제기되고 있는 상태였고, 특히 1900년을 전후로 한 장기간의 건조기에 대해서는 그 사실에 대한 큰 논란이 있었던 것이 사실이다(유철상, 2000). 이러한 논란은 그 정확도를 객관적으로 증명해 줄 비

교지표가 없어 측우기 강우량 자료의 신뢰도를 과학적으로 증명할 수 없었던데 그 원인이 있다고 볼 수 있다. 그 동안 기상학 및 수문학 분야에서 측우기 자료에 대한 연구가 지속적으로 수행되어 왔으나 측우기 자료와 근대 강수량 자료는 경향성을 나타내고 있고, 시간적 차이가 있기 때문에 단순히 평균이나 표준편차와 같은 기본통계특성의 정량적 비교만으로 동질성을 판단하거나 측우기 자료의 정확도에 대한 판단 지표로서 사용하는 것은 다소 부적합하다. 즉, 측우

*정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구실 연구원 (E-mail : sukany@kict.re.kr)

**정회원 · 교신저자 · 고려대학교 공과대학 건축 · 사회환경공학부 교수 (E-mail : jaykim@korea.ac.kr)

***정회원 · 고려대학교 공과대학 건축 · 사회환경공학부 교수 (E-mail : envchul@korea.ac.kr)

****정회원 · 고려대학교 방재과학기술연구소 연구교수 (E-mail : gunhui@korea.ac.kr)

기 자료와 연관이 있는 동시대 대응 지표자료와의 비교만이 측우기 자료의 신뢰도를 보다 명확히 추정할 수 있다고 판단되며, 이러한 이유로 본 논문에서는 측우기 강우량 자료와 동시대 자료의 확보가 가능한 tree-ring 지표자료를 이용하여 측우기 강우량 자료의 정확도를 기능해 보고자 한다. 더불어 한반도 인근 동아시아 지역의 tree-ring 지표자료와의 비교를 통하여 과거 동아시아 기후변화 특성을 파악해 보고자 한다. Tree-ring 지표자료는 일반적으로 연륜분석을 통하여 얻어지며, 수중에 따라 500년이 넘는 장기간의 자료 추출이 가능하고 성장 특성상 해당시기의 기온, 홍수 등과 같은 기후 특성을 잘 반영하고 있어 장기간 기후변화 연구에 많이 응용되어왔다. 그러나 tree-ring 지표자료는 나무의 성장특성상 다소 작은 기상변화에는 차이가 둔하고 여러 가지 복합적인 요인에 의해 생장이 변화하기 때문에 그 변화에 영향을 주는 요소를 명확히 추출하기가 어려운 경우가 많다는 단점이 있다. 또한, 나무수종에 따라 성장에 영향을 주는 조건이 상이한 경우가 있어 수치만으로 일반화하여 해석하기가 어렵다는 점도 있다. 박원규 등(1998)은 속리산에 자라고 있는 소나무 27본의 연륜폭(tree-ring width)을 측정하여 265년(1731-1995)간의 연대기를 작성하였고, 이의 분석을 통해 5월 강수량(1908-1995년의 현대 관측치)과 가장 높은 상관성을 가짐을 보인바 있다. 또 연대기와 현대 강수량 관측치 간에 얻어진 회귀식을 이용하여 1731년까지의 5월 강수량을 복원하였고 복원된 강수량 시계열로부터 한국 중서부의 5월 기후는 19세기에는 습윤한 기간이 많았으며 20세기에는 상대적으로 건조하였다고 언급하였다. 그리고 1800년대 후반에서 1900년대 초까지(1890-1930)가 건조기였음을 소나무 연륜분석을 통하여 확인하였다. 단, 나무의 성장과 강수량은 밀접한 관계가 있지만 강수량이 나무의 성장에 절대적인 지배인자가 아니라는 점에서 복원된 강수량을 이해해야 할 것으로 판단된다.

구경아 등(2001)은 한라산 구상나무의 연륜연대학적 연구를 통해 구상나무의 성장과 강수량은 전반적으로 양의 상관관계를 나타내고, 엘니뇨-남방진동과 상관계수를 분석한 결과 전년도 1월, 2월, 3월 및 11월 남방진동지수(SOI)와 양의 상관관계를 가진다고 하였다. 이 논문은 나무의 성장과 관련하여 강수량외에도 엘니뇨와 같은 전지구적 기상변동 특성과 연계 분석한 점이 주목된다. 마지막으로 본 논문에서는 한반도뿐만 아니라 전지구 기후시스템을 변동시키는 가장 강력한 원인으로 알려져 있는 엘니뇨(강인식, 1998) 및 지구온도 어노말리 등과도 상호 비교·분석하여 기후변동 혹은 변화의 경향과 원인을 파악해 보고자 하였다. Kang and Jeong (1996)은 서울의 강수량이 엘니뇨 해에 다소 증가하는 경향이 있음을 보인바 있다. 그러나 엘니뇨, 태평양 해수면온도가 한반도 기후 변화의 주요 변수임을 고려하더라도 한반도 기온은 태평양 해수면 온도 변화 뿐만 아니라 중위도 대기운동의 불안정한 비선형성 등 여러 가지 역학에 의하여 변동하고 있다. 그리고, 중위도 대기 자체의 장기 변동의 많은 부분은 카오스(Chaos)가 지배하고 있으며 이의 예측성은 매우 낮다는 특징을 보이고 있다(강인식, 1998, 재인용). 이러한 관점에서 본 연구는 기후 변화의 주요 변수와 함께 강우량, tree-ring 지표자료를 종합적으로 비교 분석함

으로써 동아시아 여러 지점간의 과거에서 현재까지의 장기적인 변화 추세와 자료간의 상관성을 규명할 수 있다면 이러한 예측성을 한층 높일 수 있을 것으로 판단된다. 더불어 연단위 자료의 주기분석 실험과 같은 단기변동 추세분석만으로는 장기 추세변화량에 비해 연단위 단기변동량이 크기 때문에 장기적인 변화특성을 명확히 분석해내기 어렵다. 본 논문에서는 기존의 기후와 관련된 자료의 양적인 단기변동 특성의 분석에서 벗어나 단기변동 분석에서는 보이지 않았던 장기변동 추세를 비교분석함으로써 한반도 주변 기후 변동의 역학적 변화 특성은 물론 향후 기후변화 잠재포텐셜(지속성) 및 방향을 예측할 수 있을 것으로 생각된다.

2. 자료의 특성

본 연구에서 사용된 자료는 서울지점의 측우기 강우량 자료, 서울지점의 근대 우량계 강수량 및 설악산 화채봉의 tree-ring 지표자료이다. Tree-ring 지표자료는 NCDC(National Climatic Data Center)에서 획득하였으며 본 연구에서는 tree-ring width index 자료를 이용하였다. 측우기의 관측 단위는 관측최소 단위가 1분(1분=2 mm)이므로 0.1 mm단위로 측정하는 근대 우량계 관측과 비교하면 소량의 강수는 측정되지 않았을 가능성이 크다(정현숙, 1994). 그러나 이것이 겨울철을 제외한 4월에서 10월까지의 강우량에 미치는 영향은 상대적으로 크지 않을 것으로 본다. 따라서, 본 연구에서는 강설 등의 영향을 고려하지 못한 측우기 자료와 이를 고려한 근대 우량계의 차이를 고려하여 4월에서 10월까지의 자료만을 이용하였다. 과거 동아시아 기후 변화 특성 및 양상을 분석하기 위해 측우기 강우자료와 tree-ring 지표 자료의 상관성을 비교하였고, 더불어 기후에 변화를 주는 것으로 알려진 태양흑점수, 남방진동지수(Southern Oscillation Index, SOI), 평균기온대비 편차를 나타내는 온도 어노말리(Global temperature anomaly) 등도 함께 비교하였다. 이러한 분석을 위해 표 1과 같이 자료를 구성하였고 이중 tree-ring 지표자료의 추출 지점은 그림 1과 같다. 본 연구에서는 엘니뇨 특성을 나타내는 지표로 남방진동지수(SOI)를 사용하였다. 남방진동지수는 Tahiti 해면기압에서 호주 Darwin의 해면기압을 뺀 값으로 정의되고(Horel and Wallace, 1981) 많은 연구들에서 엘니뇨의 대규모 대기상태를 나타내는 지수로 사용되어 왔다. 본 연구에서는 장기간의 기후 변화특성에 초점을 두고 있으므로 엘니뇨의 해양상태 지수로 사용되는 NINO3 SST(150W-90W와 5S-5N의 영역에서 평균한 해수면 온도)보다는 장기간의 자료가 존재하는 남방진동지수를 사용하였다. NINO3 SST와 SOI는 서로 음의 상관관계를 갖고 변동하고 있다(Horel and Wallace, 1981).

$$SOI = SLP_{TAHITI} - SLP_{DARWIN}, SLP: sea-level pressure \quad (1)$$

1920년경 Gibert Walker경은 아시아 몬순을 예측하기 위해서 세계 각처의 기상 기록을 검토하던 중 태평양의 동쪽과 서쪽의 해면기압들 간에는 상당한 연계성이 있음을 발견했다. 남방진동지수는 평상시에는 양의 값을 가지나, 엘니뇨 기간에는 음의 값을 갖는데 이는 인도네시아 부근 서태평양의 저압부가 태평양 중앙으로 이동해 가는 것을 의미한다.

Table 1. Descriptions of data sets

Yearly data types	Index name	Data descriptions and Site locations	Period
Rainfall (Summations of the monthly rainfall data from April to October)	(Rainfall)	Seoul, Republic of Korea (N37.56, E126.99) Chukwooki data and modern rain gage data	1777-2006
Numbers of sunspots (Summations of the monthly sunspot numbers)	(SSN)	National Aeronautics and Space Administration http://solarscience.msfc.nasa.gov/	1749-2006
South oscillation index (Averages of monthly SOIs)	(SOI)	Monthly Southern Oscillation Index National Climate Centre, Bureau of Meteorology	1876-2006
Global annual average near-surface temperature anomalies (Averages of monthly temperatures)	(GTA)	Combined land-surface air temperature and sea-surface temperature http://www.metoffice.gov.uk/hadobs	1850-2006
Tree-ring width index (TRWI)	(KOR)	Whachae Peak-Sorak Mountain, Korea ⁽¹⁾ PIKO KOREAN PINE ⁽²⁾ (N38.08, E128.28, 1500 m) ⁽³⁾	1657-1998
	(JAP1)	Ashiu Locality 2, Kyoto, Japan CMJA JAPANESE CEDAR (N35.20, E135.43, 650 m)	1767-1983
	(JAP2)	Mountain Asahidake, Hokkaido, Japan PCGN SAKHALIN SPRUCE (N43.46, E142.33, 1350 m)	1532-1997
	(CHA)	Qilan Mountains, Qinghai, China JUSP JUNIPER (N38.10, E100.20, 3400 m)	1414-1986
	(MON)	Undur Ulaan, Mongolia LASI SIBERIAN LARCH (N48.59, E103.14, 1400 m)	1511-2002
	(RUS)	Esso Village, Kamchatka, Russia LAGM LARIX KURULENSIS (N55.54, E158.48, 900 m)	1690-1984

Note:

(1) Site name and location

(2) Species information

(3) Position(longitude, latitude, elevation)

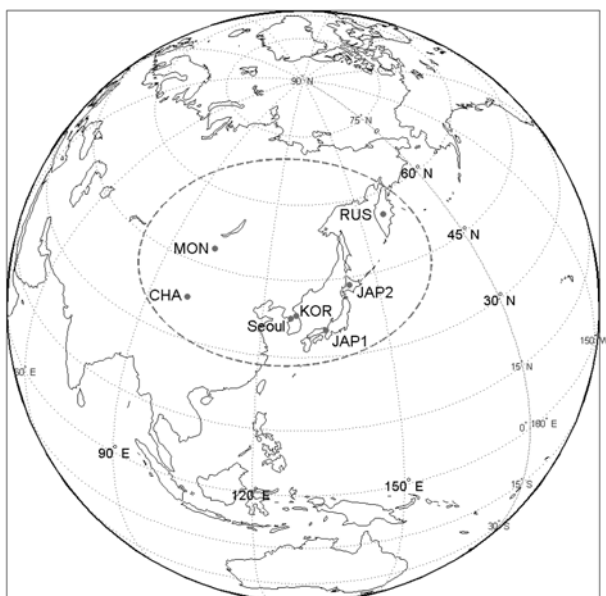


Fig. 1 Locations of tree-ring index sites (TRWI) and Seoul rainfall site (Rainfall)

남방 진동지수가 음의 큰 값을 갖을 때가 엘니뇨 기간이며, 이와는 반대로 양의 큰 값을 갖을 때가 라니냐 기간이다. 대략 3~7년 주기를 보이나 최근에는 엘니뇨 기간이 연속적으로 나타나는 경향을 보이고 있다. 남방진동지수가 높으면

태평양 서쪽의 강수가 많았고 동쪽의 태평양의 군도에서는 강수가 적었다. 이와는 반대로 남방진동지수가 낮으면 서쪽에서 강수는 줄어드는 반면에 동쪽 태평양의 군도에서 강수가 증가되었다. 즉 태평양 서쪽과 동쪽은 마치 시소(seesaw)와 같은 양상을 보이고 있는데 1960년대 미국 캘리포니아 대학교의 Jacob Bjerknes 교수는 이 엘니뇨의 해수면 온도의 변동과 기압의 변동, 또 이에 따른 적도 편동풍사이의 관계를 설명하였고 이를 엘니뇨-남방진동(El-Nino Southern Oscillation, ENSO)라고 부른다. 한국에서의 변화는 대략적으로 엘니뇨가 발생한 해에는 여름철 기온이 평년보다 다소 낮게 나타나기도 하며, 비가 다소 많이 오는 통계적인 경향은 있으나 아주 뚜렷하지는 않다. 엘니뇨가 발생한 해의 여름철 기온이 어떤 해에는 낮게 나타나기도 하고 또 다른 해에는 높게 나타나기도 한다. 우리나라는 중위도 지방에 위치하는 까닭에 적도 태평양 뿐만 아니라 북서쪽 고위도 지방에서 흘러들어 오는 공기의 흐름에도 영향을 받기 때문에 엘니뇨의 영향과 함께 겹쳐서 우리 나라에서는 열대나 아열대 지방처럼 엘니뇨의 영향이 아주 뚜렷하게 나타나지는 않는다.

3. 기본이론

본 연구에서는 자료계열의 장기 지속성(long-term persistency)

을 표출하기 위해 시계열 자료의 평균변화율(선형추세선의 기울기)을 이용하였다. 원자료계열을 사용할 경우 각 자료계열의 연간 변동성이 상대적으로 커서 동일시점 비교만으로는 자료계열의 지속적인 변화양상이나 특성을 파악하기 매우 힘들다. 따라서 이런 경우에 단기간의 변동성을 제거하고 장기간의 주기나 증감추세를 파악하기 위해 일반적으로 많이 사용하는 방법이 이동평균법이다. 그러나 이동평균법의 경우 일정 기간 내 변동의 경향성을 잘 나타내 주고 있긴 하나 각 기간 내 자료의 변동 폭에 민감하게 반응하여 장기 지속성을 명료하게 나타내 주지는 못하고 있다. 이는 이동평균이 값의 양적 평균을 사용하기 때문에 전체적인 지속추세 보다는 양적 변화에 민감하게 반응하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 전체 연자료계열의 누가계열을 작성하고, 이 누가계열에 대하여 각 연도별로 이전 20년 동안의 평균변화율을 산정하여 이를 변동지표로 사용하였다. 이는 이동평균을 사용했을 때보다 자료의 변화 추세에 대한 의미를 강하게 나타내 주어 시계열의 지속적인 변화특성 및 변동방향성을 잘 보여줄 수 있다.

본 연구에서 시계열자료의 평균변화율을 구하기 위한 기간은 20년으로 고정하였고 연별로 지체시켜 평균변화율 시계열 자료를 작성하였다. 그 결과는 그림 2와 같다. 가뭄이나 기후변화와 관련한 연구들에서 보통 10년에서 20년 통계치를 많이 적용하고 있다. 본 연구에서 자료기간을 20년으로 선택한 이유는 일반적으로 단기변동이 아닌 기후변화로 보기 위해서는 최소 20년 이상의 지속성이 필요하다고 판단했기 때문이다. 그리고 국립기상연구소(2004)에 의하면 관측자료에 의한 20세기 동안 10년 평균 강수량의 변화는 장기적으로 증가하는 경향이지만 강수량의 변동폭이 매우커서 증가추세가 뚜렷하지 않음을 지적한 바 있다. 따라서 10년 평균 통계치는 강수량 장기변동 추세를 명확하게 나타내지 못함을 알 수 있다.

본 논문에서 20년 평균변화율 자료계열(S)을 산정하기 위해 적용한 식은 다음과 같다.

$$S = \{S_{n+1}, S_{n+2}, \dots, S_N\}$$

$$여기서, S_{k+n} = \frac{n \sum_{i=k}^{k+n-1} x_i y_i - \left(\sum_{i=k}^{k+n-1} x_i \right) \left(\sum_{i=k}^{k+n-1} y_i \right)}{n \sum_{i=k}^{k+n-1} x_i^2 - \left(\sum_{i=k}^{k+n-1} x_i \right)^2} \quad (2)$$

여기서, x_n 는 연도를 나타내는 연단위 연속시계열, y_n 는 누가수문량, n 은 분석 단위자료기간으로 20년, N 은 전체자료기간, k 는 20년 기간 평균변화율 집합의 자료기간, S_{k+n} 는 자료기간 내 연도별 누가수문량의 n 년 평균변화율이다.

4. 분석결과

4.1 분석기간의 정의

다음 그림 2는 본 연구에서 적용한 10개 누가자료계열의 20년 평균변화율(SL20)을 나타내고 있다. 그림에서 임의 연도의 수치는 이전 20년 누가자료계열의 평균변화율을 나타내고 있어 해당연도의 수치로서는 큰 의미를 갖지는 않는다. 그림 2에서 보듯이 각 자료계열의 자료관측기간이 다르기 때문에 전체 자료가 동일한 기간에 대해 표현되지 못하고 있다. 그러나 본 논문은 측우기 강우량자료에 초점이 맞추어져 있기 때문에 측우기 강우량 기준으로 다른 자료계열의 양상을 비교해 보았다. 비교결과 그림 2의 1844년에서 1925년 사이에(이전 20년 평균변화율)이므로 연단위 자료의 실제 전체 포함기간은 1824년에서 1924년까지) 측우기 강우량 자료(Rainfall(A))와 tree-ring width 지표자료(KOR(A), MON(A), JAP2(A))의 평균변화율이 급격히 작아지는 두 기간이 존재한다. 이후 본 논문에서 이 기간을 편의상 축소기로 표현하고 이 두 기간은 1820년에서 1870년에 이르는 기간 (축소기1)과 1800년대 후반에서 1900년대 초반에 이르는 기간(축소기2)이다.

4.2 서울지점 강우량 자료와 tree-ring width 지표자료의 관계

그림 2에서 상대적으로 서울지점 강우량 자료의 평균변화

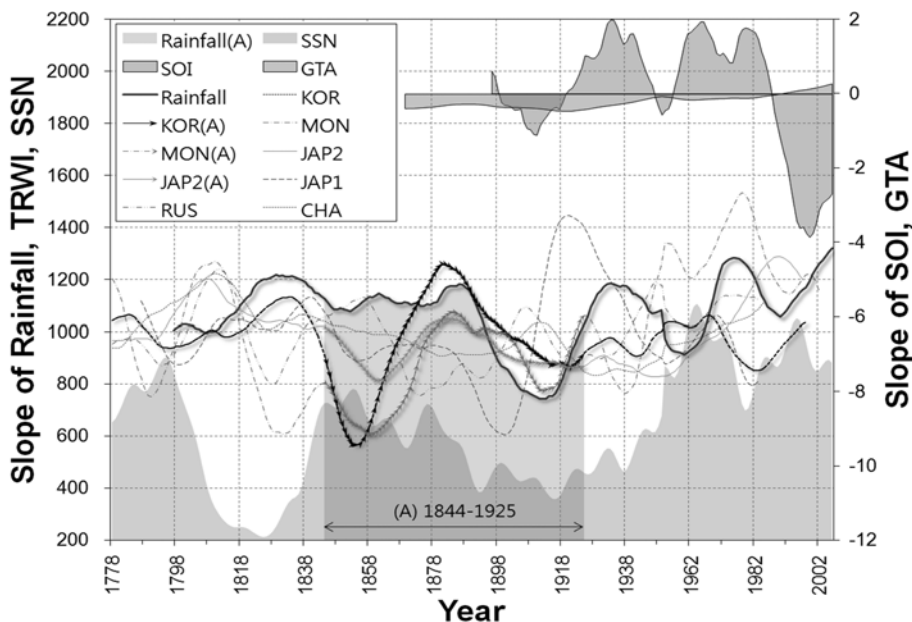


Fig. 2 Plot of SL20s for each data sets

을 추세와 시간적으로 변동 경향이 유사한 tree-ring width 지표자료의 평균변화율은 한국(KOR), 몽골(MON) 그리고 일본(JAP2) 자료임을 알 수 있다. 더불어 일본 JAP1의 자료는 시간적으로 경향이 일치하고 있지는 않으나 변화폭이나 양상이 유사함을 볼 수 있고 주목해야 할 부분중 하나로 4.4절에서 분석결과를 서술하도록 한다.

두 축소기에 대한 분석을 해보면, 첫번째로 축소기2인 1800년대 후반에서 1900년대 초반에 이르는 기간은 서울의 강우량자료(Rainfall) 20년 평균변화율과 tree-ring width 지표자료 20년 평균변화율 중 KOR, MON, JAP2가 모두 매우 작은 값을 보이고 있어 몽골에서 한국을 거쳐 일본 북부에 이르는 동북아시아 전역에 장기간의 건조기가 있었음을 확인할 수 있다. 이 시기는 기존의 많은 연구들에서도 건조기가 있었음이 언급된 바 있다. 두번째로는, 축소기1인 1820년대에서 1870년대까지의 기간으로(그림 2상에서는 1840년대~1870년대) 서울의 강우량자료 20년 평균변화율은 이전기간에 비하면 약간의 감소추세를 보인후 일정한 추세를 유지하고 있으나 KOR의 경우 매우 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다. 강우자료(Rainfall) 20년 평균변화율 추세를 기준으로 판단하면 평균적인 수준에서 다른기간에 비해 증감추세의 양상은 다르나 양적인 면에서는 건조기로 보기는 어렵다. 더불어 KOR 뿐만 아니라 MON과 JAP2도 약간의 시차는 있으나 20년 평균변화율이 급격히 감소하는 추세를 보이고 있음을 알 수 있다. 특히 MON의 경우는 두 축소기 모두 20년 평균변화율이 KOR의 20년 평균변화율과 매우 유사한 거동을 보이고 있다. 이를 토대로 해석해 볼 때 해당기간에 몽골과 한국의 기후사이에 매우 밀접한 관계가 있었음을 알 수 있다. 이러한 결과를 종합하면 축소기1의 tree-ring width 지표자료의 20년 평균변화율이 급격히 감소하는 원인은 축소기2와 같이 장기적인 가뭄이 원인은 아닌 것으로 판단된다. 이러한 해석에 대한 근거로 최중남 등(1992)의 연구에 의하면, '증보문헌비고' 기록을 통해 1830년에서 1850년대 많은 강수와 이에 따른 기온하강을 확인하였고, 냉우(冷雨)와 저온으로 인해 일본 역사상 가장 큰 기근으로 기록되는 天保飢饉(1833년-1839년)과도 유사한 시기임을 언급한 바 있다. 그리고 '조선고대관측기록조사보고' 기록을 통해 1830년에서 1840년대의 저온기는 7월에서 8월의 강수가 비교적 많았던 기간임을 밝힌바 있다. 따라서 이시기의 KOR이 급격히 감소하는 추세를 보이는 이유는 가뭄보다는 저온에 의한 영향으로 해석하는 것이 타당할 것으로 보인다. 추가적으로 축소기1의 태양흑점수 자료를 동시에 비교해보면, 축소기1 이전에 급격히 감소하였던 태양흑점수가 축소기1에 급격히 증가하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 단, 분석 전기간을 보면 태양 흑점수 20년 평균변화율과 tree-ring width 지표자료의 20년 평균변화율이 일정하게 강한 상관관계를 보이는 것은 아니다. 그러나 태양흑점수는 지구 기후변동(특히 기온변동)의 원인으로 알려져 있어 명확한 원인을 규명하기 위해 필요한 축소기1의 해수면 온도 자료나 남방진동지수(SOI)와 같은 비교자료는 없지만 강우보다는 기온변화가 원인이었을 가능성이 크다고 추정된다.

4.3 서울의 강우량과 남방진동지수(SOI)와의 관계

서울의 강우량과 tree-ring width 지표자료의 관계와 더불어

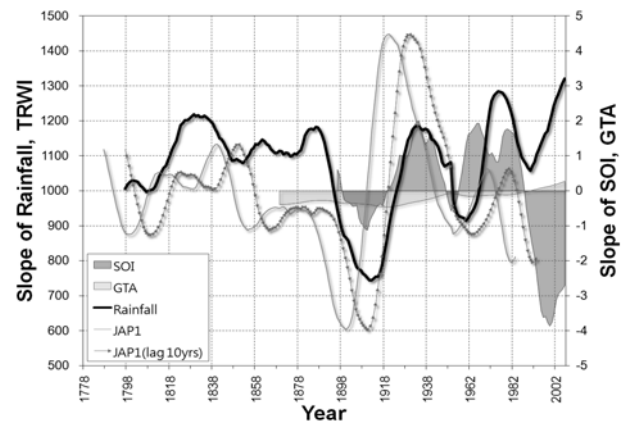


Fig. 3 Comparison between SL20 of JAP1 and SL20 of Rainfall

어 또 한가지 주목할 점은 그림 2와 그림 3에서 남방진동지수(SOI)의 20년 평균변화율과 서울의 강우량 20년 평균변화율의 증감양상이 매우 유사하다는 점이다. Lau(1992)는 엘니뇨 해에 양자강 유역에서는 강수가 증가 하지만, 황하 북부와 만주에서는 감소하는 경향을 보이고 있다고 하였다(강인식, 1998, 재인용). 그러나, 엘니뇨와 한반도 기후의 관련성에 관한 연구는 현재까지 충분히 이루어지지 못하였다. Kang and Jeong(1996)은 서울의 강수량이 엘니뇨 해에 다소 증가하는 경향이 있음을 보인바 있다. 그러나 본 논문의 20년 평균변화율에 근거한 장기추세분석 결과에 따르면 강수량의 변동은 남방진동지수의 부호에 따른 연별 엘니뇨의 발생 여부-남방진동지수의 부호에 의한 판단-보다는 남방진동지수의 장기변동추세와 더 밀접한 관련이 있다고 보여진다. 즉, 남방진동지수의 연별 변동과 강우량이 일정한 상관관계를 보이는 않지만 장기간 변동추세를 보면 남방진동지수의 변동추세에 따라 강우량도 지속적으로 변화하는 추세를 보이고 있다.

그러나, 1960년(그림 2와 그림 3에서는 20년 평균변화율)이후 1980년으로 도시되나 실제 영향기간의 시작은 1960년 이후 남방진동지수(SOI)의 20년 평균변화율은 감소하는데 반해 서울의 강우량 20년 평균변화율은 계속 증가하고 있다. 더불어 동일기간에 태양흑점수의 20년 평균변화율도 전기간 평균을 상회하고 있어 태양흑점수의 영향도 추론해 볼 수 있으나 거동특성에 일관성이 없고, 이시기가 지구온도 아노말리의 20년 평균변화율이 그리는 변곡점과 일치하는 것으로 보아 1960년대 이후에는 태양의 흑점수에 의한 영향 혹은 엘니뇨 등에 의한 영향보다는 온실효과 등에 의한 지구온도의 증가가 서울지점의 강우량 증가의 주요원인으로 작용하고 있다고 판단된다. 기상학적으로 좀 더 종합적이고 장기적인 추세분석이 이루어져야 명확한 원인규명이 될 수 있을 것으로 보인다.

4.4 서울의 강우량과 일본 교토의 tree-ring width 지표자료(JAP1)와의 관계

다음으로 그림 6에서 보듯이 일본 교토의 tree-ring width 지표자료(JAP1)의 20년 평균변화율과 한국 서울의 강우량자료(Rainfall)의 20년 평균변화율간의 관계를 상관그래프로 나타내 보면 시간순으로 정렬된 화살표가 타원에 가까운 형태를 그리며 반시계 방향으로 회전하고 있음을 볼 수 있다

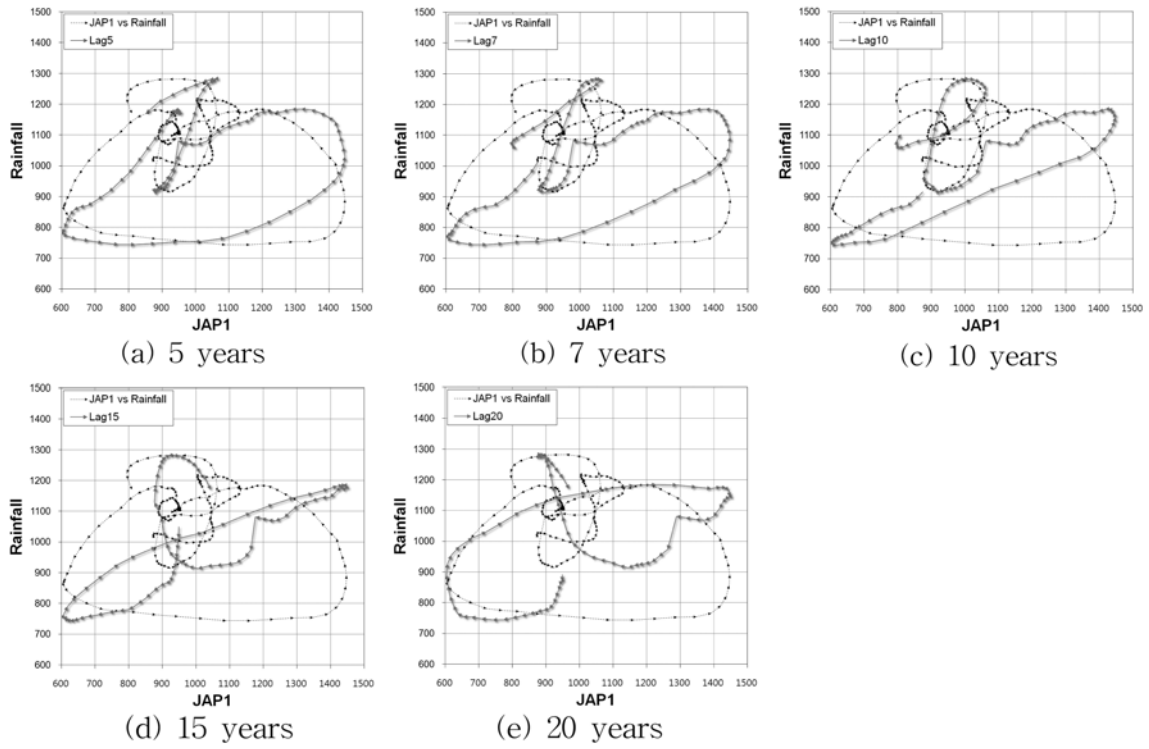


Fig. 4 Comparison of delay time between SL20 of JAP1 and SL20 of Rainfall

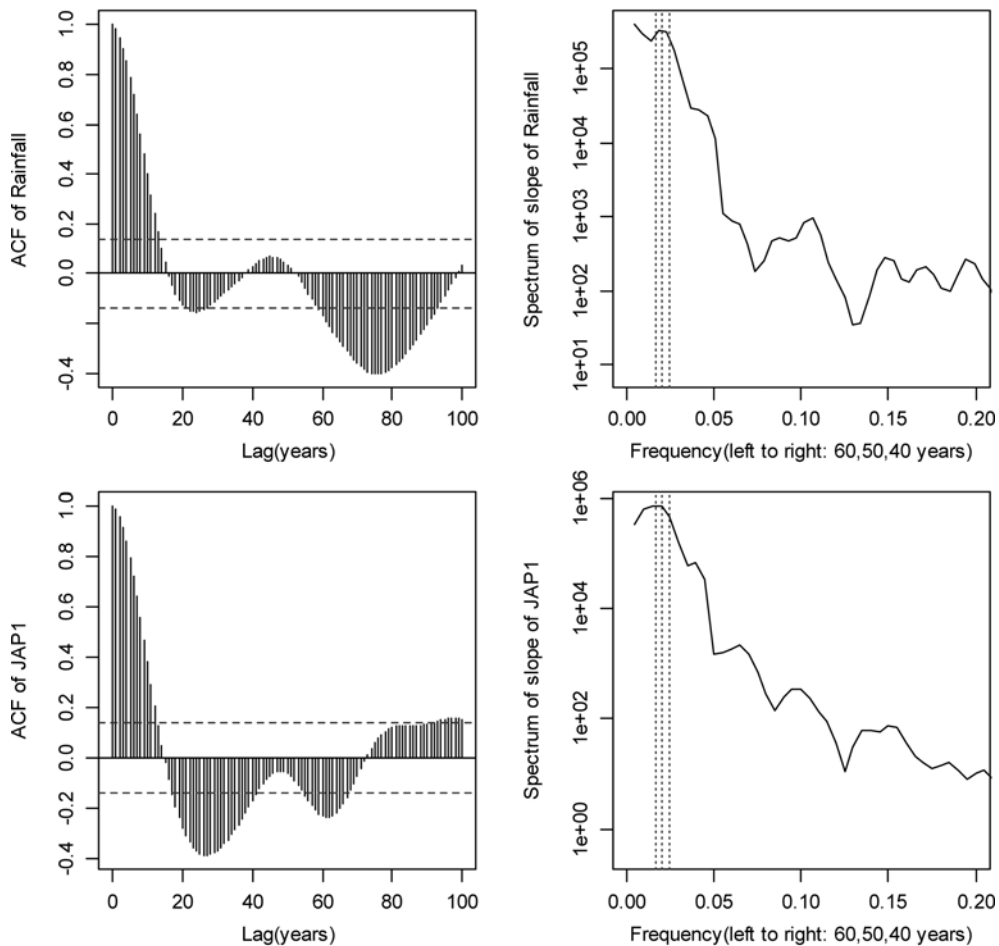


Fig. 5 Return period of SL20 of JAP1 and SL20 of Rainfall

(그림 6의 회색 실선). 이로부터 두 자료간에 밀접한 관계를 가지고 지속적으로 변화하고 있음을 추측할 수 있다. 특히, 그림 3, 그림 4, 그림 6와 그림 7을 종합해 보면 한국 서울의 강우량 20년 평균변화율의 시점을 기준으로 1888년 이

후(20년 평균변화율임을 고려하면 실제 영향구간의 시점은 1868년 이후) 한국 서울의 강우량 20년 평균변화율이 일본 교토 tree-ring width 지표자료(JAP1)의 20년 평균변화율과 약 10년 차이를 두고 경향이 비교적 정확히 일치하고 있음

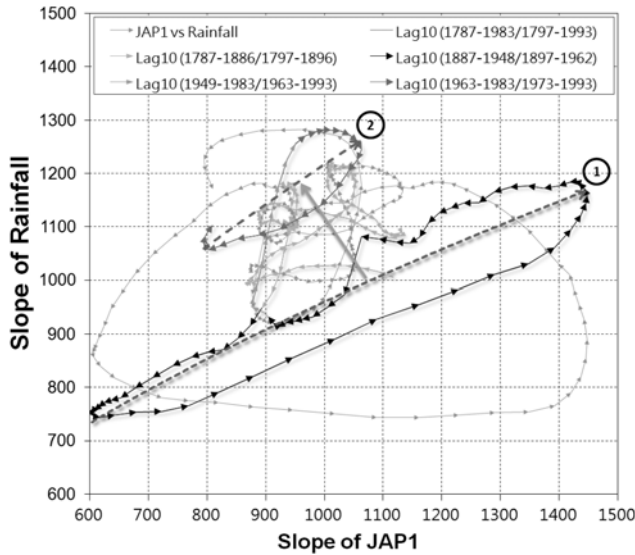


Fig. 6 Long-term trend of relations between SL20 of JAP1 SL20 of Rainfall; Steady period, Lag10 refers to the cases that SL20 of JAP1 were lagged ten years

을 볼 수 있다. 이것은 매우 흥미로운 사실로 본 논문에서 사용한 평균변화율 산정 기간이 20년이어서 10년 정도는 겹치는 기간이라는 점을 감안하더라도 이 시기에 일본 도쿄의 기후와 한반도의 기후의 장기 변화추세는 10년 정도의 차이를 두고 동일한 양상을 보인다고 판단할 수 있다. 이는 그림 4의 지체시간별(5년, 7년, 10년, 15년, 20년) 두 자료 계열의 상관그래프에서 지체시간 10년이 가장 상관성이 높게 나타나는 점에서도 확인가능하다. 그리고 그림 5의 스펙트럼 분석을 통한 서울 강수량(Rainfall)의 20년 평균변화율의 주기와 교토의 tree-ring width 지표자료(JAP1)의 20년 평균변화율의 주기는 해당기간 대략 40년에서 60년으로 유사하게 나타났다. 단, 본 논문에서 사용한 교토의 tree-ring width 지표자료가 1983년으로 제한된 관계로 명확히 단정 지을 순 없으나 1980년 이후(20년 평균변화율)이므로 실제 최초 영향 시점은 1960년) 감소세에서 증감세로 변하고 있음을, 비록 짧은 기간이지만 마지막 부분에서 확인할 수 있고 도쿄의 tree-ring width 지표자료(JAP1)의 20년 평균변화율의 추세도 앞서 언급한 서울 강수량 자료의 20년 평균변화율 추세와 같이 1960년대 이후에는 지구온도의 증가에 의한 영향을 지배적으로 받고 있다고 추정된다.

그림 6은 교토의 tree-ring width 지표자료(JAP1)의 20년 평균변화율을 10년 지체시킨 자료와 서울 강수량 20년 평균변화율의 상관정도를 보여주고 있다. 1867년에서(그림 6 상에서는 1887년이나 20년 평균변화율)이므로 처음시점부터 고려) 1948년의 교토 tree-ring width 지표자료(JAP1)의 평균변화율과 1877년에서 1962년(1950~1953년은 한국전쟁으로 자료가 일부 불확실하거나 결측되어 제외하였고, 그림 6에서는 1897년이나 20년 평균변화율)이므로 처음시점부터 고려)의 서울 강수량 평균변화율은 결정계수가 약 0.91 정도로 매우 높은 상관정도를 보여주고 있다. 그리고 앞서 언급하였듯이 교토의 tree-ring width 지표자료(JAP1)가 1983년으로 제한된 까닭으로 최근의 명확한 관계를 알 수는 없으나 1943년에서 1983년의 교토 tree-ring width 지표자료의 평균변화율과 서울의 1949년(1950~1953년은 한국전쟁으로 자료가 일부 불

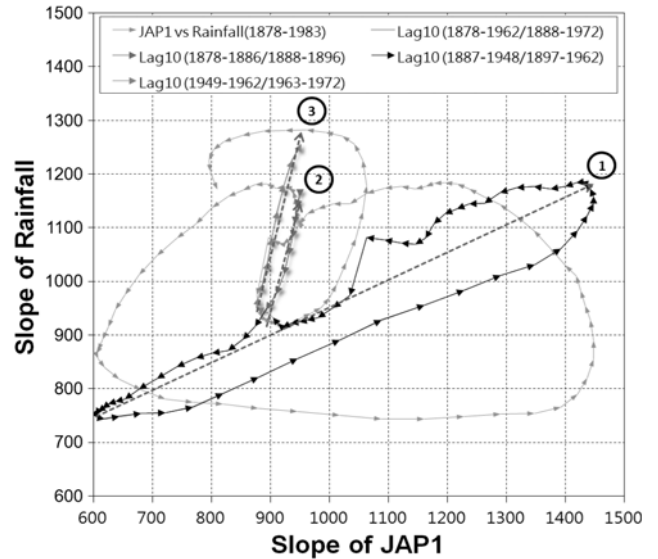


Fig. 7 Long-term trend of relations between SL20 of JAP1 SL20 of Rainfall; Transition period, Lag10 refers to the cases that SL20 of JAP1 were lagged ten years

확실거나 결측되어 제외)에서 1993년의 강수량 자료의 관계는 기존의 관계보다 그림 6에서 위쪽으로 이동했음을 알 수 있다. 즉, 그림 6에서 1940년대 이후, 20년 평균변화율의 기울기도 다소 기존에 비해 증가하고 서울 강수량의 20년 평균변화율의 절편(세로축 절편)도 증가한 것으로 보아 교토의 tree-ring width 지표자료(JAP1)의 평균변화율보다 서울 지방의 강수량자료의 20년 평균변화율이 시간적 변화율은 물론 양적으로도 현저하게 증가하는 추세를 알 수 있다. 이는 교토 tree-ring width 지표자료(JAP1)에 비해 강수량자료의 변동성이 기후에 보다 민감하다는 점을 감안하더라도 20년 평균 장기추세를 고려하면 상당한 변화를 의미하는데 그 원인은 최근 급속한 온난화 현상으로 인한 한반도 기상 변화와 밀접한 관계를 갖고 있는 것으로 추정되나 좀 더 장기적이고 면밀한 분석이 필요하다.

다음으로는 앞서 언급한 두 기간사이의 변이기간에 대한 분석결과이다. 그림 7에서 보듯이 1858년(20년 평균변화율 기준 시점으로 보면 1878년)에서 1886년사이의 교토 tree-ring

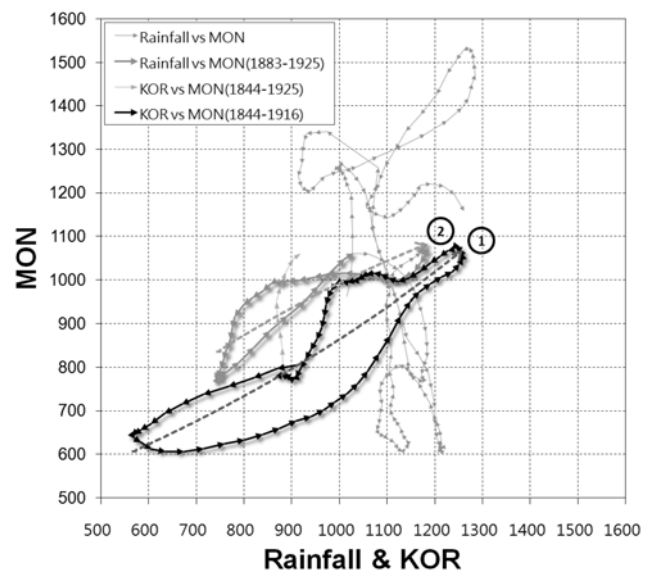


Fig. 8 Long-term trend of relations among SL20 of rainfall, SL20 of KOR and SL20 of MON

width 지표자료(JAP1)의 20년 평균변화율과 1868(20년 평균 변화율기준 시점으로 보면 1888년)에서 1896년 사이의 서울 강수량 자료 20년 평균변화율의 선형 추세선의 기울기는 4.1이고 결정계수는 0.93으로 매우 높다. 그리고 1929년(20년 평균변화율기준 시점으로 보면 1949년)에서 1962년 교토 tree-ring width 지표자료(JAP1) 20년 평균변화율과 1939년(20년 평균변화율기준 시점으로 보면 1963년, 1950~1953년은 제외)에서 1972년 사이의 선형 추세선의 기울기는 4.5이고 결정계수는 0.90으로 매우 높다. 여기서 주목할 점은 서로 진행방향은 시간적으로 반대이지만 두 전이기간의 추세선의 기울기가 거의 같다는 점으로 두 위상간의 주기적인 위치변이의 가능성이 예측되는 부분이다.

4.5 서울의 강우량과 몽골 tree-ring width 지표자료(MON) 간의 관계

마지막으로 그림 8에서와 같이 몽골지방과 한반도 지방의 기후 상관성을 비교해 보았다. 그림에서 보듯이 1824년(20년 평균변화율기준 시점으로 보면 1844년)에서 1916년 사이의 몽골의 tree-ring width 지표자료의 20년 평균변화율과 동시기 한국의 설악산 tree-ring width 지표자료의 20년 평균변화율 사이에 지수(약한 비선형)관계를 보이고 있으며 결정계수가 약 0.77로 매우 높게 나타나고 있다. 더불어 1863년(20년 평균변화율기준 시점으로 보면 1883년)에서 1925년 사이의 몽골의 tree-ring width 지표자료의 20년 평균변화율과 서울 강우량 20년 평균변화율 사이에도 지수관계를 보이고 있고 결정계수가 약 0.76으로 상관성이 매우 높다. 이 결과로부터 1820년에서 1920년대에 이르는 기간에 몽골지방의 기후와 한반도 기후 간에는 밀접한 관계가 있었음을 추측할 수 있다. 여기서 중요한 점은 화살표의 방향을 볼 때 두 지점 간에 선형적으로 비례하는 관계를 보이는 기간 외에도 시간 순으로 무작위로 변화하는 것이 아닌 일정한 노선을 따라 변화하고 있다는 점이고 이 또한 1800년대 초에서 1900 초까지 몽골지방의 기후와 한반도 기후간에 밀접한 관계가 있었음을 증명해 준다.

4.6 동북아시아 기후의 변화 특성

이러한 비교분석을 통해 동아시아 기후는 시공간적으로 밀접한 관계를 가지고 변화하고 있다는 점을 알 수 있다. 본 연구를 통하여 도출된 핵심은 상호간의 변화가 연별로 무작위로 변화하는 것으로 보일 수 있으나 실제 장기적인 변화를 추세를 토대로 분석해 보면 시공간적으로 장기적인 추세를 가지고 변화한다는 점이다. 즉, 장기적인 분석을 통해 볼 때 동아시아 기후 변화가 국지적인 특정 기상요소의 강약에 의해 단기적으로 변화한다기 보다는 전지구적인 변화 혹은 지구외적인 변화에 영향을 받고 있으며, 장기적인 변화에는 주기적인 재현성이 존재한다는 점이다.

대략 1960년 이후의 변화를 산업화로 인한 지구 온난화인지 아닌 자연적인 지구변화 사이클인지에 대한 논란이 대립되는 시점에서, 변화의 원인에는 일부 산업화의 원인도 있겠지만 과거기록을 이용한 장기변화추세 측면에서도 충분한 재현 근거가 있고, 이는 주기적인 지구변화 사이클일 가능성이 존재한다는 의미이다. 그러나 이러한 해석은 과거의 거동특

성이나 변동폭에 근거한 장기적인 재현가능성 측면에서 바라본 시각이다. 즉, 1960년 이후의 변동특성은 거동특성이거나 변동폭이 과거의 재현사상의 한계를 넘지 않았다 할지라도, 그 경향성이 불규칙하게 나타나고 있고 빈도 면에서도 재현 주기가 짧아지고 있으므로 과거와는 다른 변화특성을 가지고 있는 것은 명백하다. 이러한 본 연구결과는 장기 동아시아 기후변화 예측에 있어 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 서울지점의 측우기 강우량 자료와 동시대 자료 확보가 가능한 tree-ring width 지표자료를 이용하여 측우기 강우량 자료의 정확도를 기능해 보고, 한반도 인근 동아시아 지역의 tree-ring width 지표자료와의 비교를 통하여 과거 동아시아 기후변화 상관성과 변화특성을 파악해 보았다.

본 논문에서는 서울지점의 강우량자료, 우리나라 인근 동아시아 6개 지점의 tree-ring width 지표자료, 태양흑점수자료, 남방진동지수(SOI), 지구온도 아노말리의 총 10개 누가자료계열의 20년 평균변화율을 비교분석하여 과거 측우기 자료의 신뢰도를 평가해 보고, 두 축소기에 대한 원인을 분석하여 보았다. 더불어 서울지점 강우량과 그 외 자료와의 상관분석을 통하여 동아시아 기후변화의 장기적인 추세를 분석하였다. 연구결과,

1. 서울지점 강우량 자료의 20년 평균변화율과 tree-ring width 지표자료의 20년 평균변화율과의 비교를 통하여 1800년대 후반에서 1900년대 초반에 이르는 축소기2의 원인은 몽골에서 한국을 거쳐 일본 북부에 이르는 동북아시아 전역에 걸친 장기간의 건조기였음을 확인하였다. 더불어 1820년대에서 1870년대까지의 축소기1에는 몽골과 한국의 기후사이에 매우 밀접한 관계가 있었으나, 발생원인은 축소기2와는 달리 가뭄이 원인이 아닌 것으로 보이며 기온변화(저온)가 원인일 가능성이 높다고 판단되었다.
2. 서울의 강우량과 남방진동지수(SOI)와의 20년 평균변화율에 근거한 장기추세분석 결과에 따르면 서울지점의 강우량의 변동은 연별 엘니뇨의 발생여부보다는 남방진동지수의 장기변동추세와 더 밀접한 관련이 있다고 보인다. 그리고 1960년대 이후에는 엘니뇨 등에 의한 영향보다는 온실효과 등에 의한 지구온도의 증가가 서울지점의 강우량 증가의 주요원인일 가능성이 높았다.
3. 서울의 강우량과 일본 교토의 tree-ring width 지표자료(JAP1)와의 20년 평균변화율의 비교 결과에 의하면 일본 교토의 기후와 서울 기후의 변화추세는 10년 정도의 차이를 두고 동일한 양상을 보였다. 1867년에서 1948년의 교토 tree-ring width 지표자료(JAP1)의 평균변화율과 1877년에서 1962년의 서울 강수량의 평균변화율은 결정계수가 0.91로 상관정도가 매우 높았다. 그리고 1943년에서 1983년의 교토 tree-ring width 지표자료의 평균변화율과 서울의 1949년에서 1993년의 강우량 자료의 관계는 이전에 비해 시간적 변화율이나 양적 변화 면에서 현저하게 증가하였다. 이 또한 지구온난화의 영향으로 추정되나 좀 더

면밀한 분석이 요구된다. 또한 두 변이기간에 대한 분석에서는 두 변이기간이 진행방향이 시간적으로는 반대지만 추세선의 기울기가 거의 같다는 점에서 앞서 언급한 두 위상간의 주기적인 위상변화의 가능성이 예측되었다.

4. 한반도 기후와 몽골 tree-ring width 지표자료(MON)와의 관계 분석결과로는 1820년에서 1920년대에 이르는 기간에 몽골지방의 기후와 한반도 기후 간에는 밀접한 관계가 있었다. 1824년에서 1916년 사이의 몽골의 tree-ring width 지표자료(MON)의 20년 평균변화율과 동시기 한국의 설악산 tree-ring width 지표자료(KOR)의 20년 평균변화율은 지수관계를 보이며 결정계수가 0.77로 매우 높게 나타났다. 더불어 1863년에서 1925년 사이의 몽골의 tree-ring width 지표자료의 20년 평균변화율과 서울 강수량 20년 평균변화율 사이에도 지수관계가 있고 결정계수가 0.76으로 상관성이 매우 높았다.

본 연구를 통하여 도출된 핵심은 상호간의 변화가 연별로 무작위로 변화하는 것으로 보일 수 있으나 실제 장기적인 변화를 추세를 토대로 분석해 보면 동북아시아 기후 변화는 시공간적으로 밀접한 장기적인 추세를 가지고 변화하고 있으며 그 변화에는 주기적인 재현성이 존재한다는 점이다. 그러나 이러한 해석은 과거의 거동특성이나 변동폭에 근거한 장기적인 재현가능성 측면에서 바라본 시각이다. 즉, 1960년 이후의 변동특성은 거동특성이나 변동폭이 과거의 재현사상의 한계를 넘지 않았다 할지라도, 현재 그 경향성이 불규칙하게 나타나고 있고 빈도 면에서도 재현주기가 짧아지고 있으므로 과거와는 다른 변화특성을 가지고 있는 것은 명백하다. 과거자료에 근거한 이러한 본 연구의 확증적 결과는 장기 동북아시아 기후변화 예측에 있어 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

강인식(1998) 엘니뇨와 한반도 기후변동의 관련성, **한국기상학회지**, 한국기상학회, 제34권, 제3호, pp. 390-396.
 구경아, 박원규, 공우석(2001) 한라산 구상나무(*Abies koreana* W.)의 연륜연대학적 연구 - 기후변화에 따른 성장변동 분석 -. **한국생태학회지**, 한국생태학회, 제24권, 제5호, pp. 281-288.
 국립기상연구소(2004) 기후변화협약 대응 지역기후 시나리오 산출기술 개발(III), **국립기상연구소 보고서**, MR040C03, pp. 510.

김기욱, 유철상, 박민규, 김현준(2007) 강우빈도해석에서의 측우기 자료의 유용성 평가, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제11호, pp. 851-859.
 박원규, Yadav, R.R. (1998) 소나무 연륜을 이용한 한국 중서부의 5월 강수량(A.D. 1731-1995)복원, **한국기상학회지**, 한국기상학회, 제34권, 제3호, pp. 460-465.
 유철상, 김보윤, 노재경(2000) 서울지점 연강수량 자료에 나타난 다우해 및 과우해의 재현 특성에 관한 연구, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제3호, pp. 307-314.
 유철상(2000) 서울지점 연강수량 자료에 나타난 장기 건조기의 재현 가능성에 관한 고찰, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제5호, pp. 519-526.
 유철상, 류소라(2003) 서울지점 기름의 재현 및 지속특성 분석, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제4호, pp. 561-573.
 이병설(1970) 서울의 연강수량 및 하기강수량의 Normality에 관한 연구, **한국기상학회지**, 한국기상학회, 제5권, pp. 11-14.
 전종갑, 문병권(1997) 서울 지역 강수량과 강수일의 관계, 1770-1907, **한국기상학회지**, 한국기상학회, 제30권, 제4호, pp. 487-505.
 전종갑, 문병권(1997) 측우기 강수량 자료의 복원과 분석, **한국기상학회지**, 한국기상학회, 제33권, 제4호, pp. 691-707.
 정현숙(1999) 서울 지역 강수량 시계열에 나타난 시간 변동성 해석, 박사학위논문, 서울대학교, pp. 9-118.
 정현숙, 임규호, 오재호(1999) 서울 지역 강수량의 시계열에 나타난 시간 변동성 해석, **한국기상학회지**, 한국기상학회, 제35권, 제3호, pp. 354-371.
 최종남, 류근배, 박원규(1992) 아한대 침엽수류 연륜연대기를 이용한 중부산간지역의 고기후 복원, **한국제4기학회지**, 한국제4기학회, 제6권, 제1호, pp. 21-32.
 Arakawa, H. (1956) On the secular variation of annual total of rainfall at Seoul from 1770 to 1944. *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology*, Vol. 7, No. 2, pp. 205-211.
 Kim, J.W. and Ha, K.J. (1987) Climate changes and international fluctuations in the monthly amounts of precipitation at Seoul. *Journal of the Korean Meteorological Society*, Vol. 23, pp. 54-69.
 Kang, I.S. and Jeong, Y.K. (1996) Association of interannual variations of temperature and precipitation in Seoul with principal models of Pacific SST. *Journal of the Korean Meteorological Society*, Vol. 32, No. 3, pp. 339-345.
 Lim, G.H. and Jung, H.S. (1992) Interannual variation of the annual precipitations at Seoul, 1771-1990. *Journal of the Korean Meteorological Society*, Vol. 28, pp. 125-132.
 National Climatic Data Center, www.ncdc.noaa.gov/paleo/treering.html.

(접수일: 2009.4.1/심사일: 2009.5.26/심사완료일: 2009.7.23)