

## 태양활동 긴 주기와 기후변화의 연관성 분석

조일현, 장현영<sup>†</sup>  
경북대학교 천문대기과학과

### Long Term Variability of the Sun and Climate Change

Il-Hyun Cho and Heon-Young Chang<sup>†</sup>

Dept. of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea  
E-mail: ihcho@knu.ac.kr, hyc@knu.ac.kr

(Received September 2, 2008; Accepted October 14, 2008)

#### 요 약

태양활동프록시(proxies)와 지구연평균 기온아노말리 시계열을 이용하여 기후변화에서 태양활동신호를 찾아보았다. 이를 위해 Lomb & Scargle의 피어리드그램(Periodgram)을 이용하여 태양활동프록시와 기온아노말리 시계열을 주기분석하였다. 또한 EMD(Empirical Mode Decomposition)과 MODWR MRA(Maxial Overlap Discrete Wavelet Transform Multi Resolution Analysis)를 적용하여 두 시계열을 성분분해하고 이들 중 비슷한 주기의 특성을 보이는 성분을 비교하였다. 태양활동프록시는 짧은 주기의 파워가 긴 주기의 파워에 비해서 큰 반면 기온아노말리는 긴 주기에서 더 큰 파워를 보였다. EMD에 의한 성분분해 결과는 약 40년보다 긴 주기성을 갖는 성분을 분해해 낼 수 없었지만 잔차 성분은 비교할 수 있었다. MRA에 의한 성분분해를 통해 지구연평균 기온아노말리 시계열에서 태양활동의 변화에 의한 신호를 찾아 내었다. 1960년부터 2007년까지 기온상승에 대한 태양의 기여도는 39%로 계산되었다. 기후민감성은 출력신호의 진폭에만 관계하여 기후시스템이 간단한 2계미분방정식으로 근사될 수 있는 가능성에 대해 토의하였다.

#### Abstract

We explore the linkage between the long term variability of the Sun and earth's climate change by analysing periodicities of time series of solar proxies and global temperature anomalies. We apply the power spectral estimation method named as the periodgram to solar proxies and global temperature anomalies. We also decompose global temperature anomalies and reconstructed total solar irradiance into each local variability components by applying the EMD (Empirical Mode Decomposition) and MODWT MRA (Maximal Overlap Discrete Wavelet Multi Resolution Analysis). Powers for solar proxies at low frequencies are lower than those of high frequencies. On the other hand, powers for temperature anomalies show the other way. We fail to decompose components which having lager than 40 year variabilities from EMD, but both residuals are well decomposed respectively. We determine solar induced components from the time series of temperature anomalies and obtain 39% solar

---

<sup>†</sup>corresponding author

contribution on the recent global warming. We discuss the climate system can be approximated with the second order differential equation since the climate sensitivity can only determine the output amplitude of the signal.

*Keywords:* periodicity, climate change, solar activity

## 1. 서 론

최근 온난화는 인간활동에 의해 증가된 온실 기체와 이에 따른 온실 효과의 강화로 인해 진행되고 있다고 한다(IPCC 2007). 반면에 태양활동이 지구의 기후변화를 주도할 뿐만 아니라 최근의 기온상승에도 기여했을 것이라는 연구사례도 있다(Friis-Christensen & Lassen 1991, Lean et al. 1995). Friis-Christensen & Lassen(1991)은 1861년부터 1989년까지의 북반구 연평균기온 변화가 태양 주기의 길이와 매우 높은 상관 계수를 가진다고 보고하였으나 Laut(2003)은 같은 자료를 이용하여 이러한 높은 상관 계수는 의도된 것이라고 하였다. Hoyt & Schatten(1993)은 여러 태양활동프록시를 이용하여 1700년부터 1992년까지의 기온변화에 태양이 50% 이상 기여했다고 하였다. 태양활동프록시란 태양활동 정도를 지시하는 흑점 수, 태양표면 자기장 세기, 지자기 지수 등을 의미하며 이들에 대해 일관성 있는 시계열 또는 이를 이용해 만든 시계열을 포함한다. Solanki & Krivova(2003)는 태양의 기여도를 30% 이하로 계산하였다. Damon & Peristykh(2005)는 선형회귀방법을 적용하여 1980년부터 2000년 사이 기온상승의 약 18%는 태양이 기여했을 것이라고 계산하였고 Scafetta & West(2006)는 진동수에 의존하는 기후민감성을 가정하여 25 ~ 35%를 태양이 기여했을 것이라 계산하였다. Moon(2007)은 aa지수에 대한 수학적모델을 이용하여 최근온난화를 태양활동에 의한 영향으로 보기는 어렵다고 하였다. 이들 연구는 태양이 최근의 기후변화에 참여하고 있다는 것을 함축하지만 온실기체의 증가에 의해 지구온난화가 진행되고 있음을 의미하기도 한다.

자연적인 되먹임(feedback) 과정에 의해서 기온상승이 가속화 될 수 있다. 예를들어 지구 반사율은 기온을 결정하는 지구내부적인 요인으로서 약 60%가 구름의 양에 의해 결정된다(IPCC 2007). 이와 관련하여 태양활동의 영향을 받는 우주선 플럭스가 구름생성에 관계한다는 보고가 있다(Marsh & Svensmark 2000, 2003). 태양활동이 강화되어 지구에 입사하는 우주선 플럭스가 감소하면 구름의 양도 감소하고 반사율도 감소한다. 이는 더 많은 태양복사가 지표에 도달함을 뜻하고 기온은 다시 상승하게 된다. 해수의 온도가 상승하면 해수의 이산화탄소 저장능력이 감소되어 더 많은 이산화탄소가 대기중에 머물 수 있게 된다(Cox et al. 2000). 이론적으로 이러한 양 되먹임은 온도에 관계하는 모든 변수에 적용된다.

되먹임효과를 고려하면 지구연평균 기온은 일정한 태양 입사에너지에 대해 동일한 정도로 변하지 않고 대기와 해수의 상태에 따라 그 정도를 달리하게 된다. 이 특성을 경험적으로 다루기 위하여 기후민감성이라는 값을 정의하는데 일반적으로 태양의 기여도는 기후민감성의 값을 가정해야만 구할 수 있는 양이다. IPCC 보고서 역시 이산화 탄소의 증가에 대한 기후민감성을 가정한다. IPCC가 제시하는 첫번째 근사모델은  $\Delta F = \alpha \ln(C/C_0)$ 로 주어진다(IPCC 2001).  $\Delta F$ 는  $Wm^{-2}$ 의 단위를 갖고 지표에 도달하는 태양복사와 대기에 의한 장파복사의 변화를 나타낸다.  $C$ 와  $C_0$ 는 각각 이산화탄소량을 나타낸다.  $\alpha$ 는 1990년, 2001년, 2007년 IPCC보고서에서 각각  $6.3Wm^{-2}$ ,  $5.35Wm^{-2}$ ,  $5.5Wm^{-2}$ 로

계산되었고 최근의 두 값은 첫번째 값에 대해 15-19%의 차이가 난다(Marsh 2007). 기후민감성은  $\Delta T/\Delta F$ 로 정의되며  $^{\circ}\text{C}/\text{Wm}^{-2}$ 의 단위를 갖는다. 예를 들어  $0.2^{\circ}\text{C}/\text{Wm}^{-2}$ 의 기후민감성은  $\Delta F = 1.0\text{Wm}^{-2}$ 에 대하여  $0.2^{\circ}\text{C}$ 의 기온이 증가했음을 의미한다.  $\alpha$ 는 IPCC가 제안하는 기후민감성의 값을 직접적으로 결정한다. 현재의 기후민감성을 정확하게 측정할 수 없으므로 현상학적인 접근으로 수행된 선행연구들은 기후민감성을 가정함으로써 비롯된 불확실성을 포함하고 있다.

한편, 임의의 물리적 원인을 가정한 기후변화의 주기적인 모습에 착안함으로써 기후변화의 원인을 분석해 이 연구가 있다(Hansen et al. 2001, Jones & Moberg 2003). Schlesinger & Ramankutty(1994)는 기온아노말리 시계열에서 65 ~ 70년 주기와 55 ~ 80년 주기를 찾아내었고 이러한 주기성이 지구의 대기 대순환 모델에서 예측된다고 하였다. Mahasanen et al.(1997)는 지구 여러 지역의 기온 시계열로부터 약 80년과 160년 정도의 주기성이 공통적으로 나타나고 이들의 진폭이 최근 기온상승폭에 비해 충분히 크다고 보고하였다. 이를 통해 최근 지구 온난화에 대한 새로운 가능성을 제시하였다. Abarca-Del-Rio & Mestre(2006)는 프랑스의 기온 시계열에 웨이블릿(wavelet) 분해방법을 적용하여 40 ~ 60년과 60 ~ 80년 정도의 주기성을 갖는 성분을 확인하였다.

Wigley(1988)는 기온 시계열의 긴 주기에서 대기와 해수의 댐핑(damping)효과가 짧은 주기에 비하여 작기 때문에 더 큰 진폭을 보인다고 하였다. White et al.(1997)과 Scafetta & West(2005)는 기후민감성이 주파수에 의존한다는 가정을 관측된 태양상수 시계열을 이용하여 보인 바 있다. Damon & Jirikovic(1992)은 태양 활동의 주기들을 기본 진동수의 하모닉(harmonic)으로 해석하였고 90년 주기의 코사인 커브를 이용하여 관측된 기온 아노말리를 재구성하였다. 이보다 앞서 Gleissberg(1939)는 태양 주기의 길이를 이용해 80 ~ 90년 흑점주기를 제안한 바 있고 Suess(1980)는 200년 이상의 흑점 주기를 제안하였다. 이 연구를 통해 이들 긴 주기의 신호가 연평균 기온아노말리에서 나타나는지 여부를 밝히고자 한다.

이를 위해 태양활동프록시와 기온아노말리 시계열을 주기분석 하였다. 또한 성분 분해방법을 통해 비슷한 주기의 성분을 비교하여 지구연평균 기온아노말리 시계열에서 태양에 의한 신호를 결정 하였다. 마지막으로 두 시계열 성분이 비슷한 주기를 가질 때 이들이 간단한 2계미분방정식으로 근사될 수 있음에 대해 토의하였다. 2장에서는 사용된 자료에 대해 소개하고 3장에서 분석 방법과 그 결과에 대해 이야기 하겠다.

## 2. 자 료

지구 연평균 기온아노말리 시계열은 CRU(Climatic Research Unit)<sup>1</sup>에서 제공하고 있으며 지구 표면의  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$  크기 격자에 대한 월 평균값을 제공한다. 아노말리란 임의의 기준 값에 대한 차이를 의미하는데 여기서 기준 값은 1961년부터 1990년까지의 지구 평균 기온이 사용 되었다. 기온의 측정 은 1850년부터 이루어 졌고 해마다 관측소의 수가 늘어나 현재는 약 4300여 곳에서 측정되고 있다. 각 격자 내에 포함된 관측소의 수에 일관성이 없으므로 격자마다 각각 다른 분산을 가지게 되는데 이 연구에서는 이러한 차이가 조정된 시계열을 사용하였다(Jones et al. 2001).

이 연구에서 사용된 태양활동프록시는 지구 대기권 밖에서의 단위시간당 단위면적당 태양복사 플럭스이며 이는 태양상수를 나타낸다. 이 자료는 1978년부터 관측이 되고 있다. 30년 정도의 자

<sup>1</sup> <http://www.cru.uea.ac.uk>

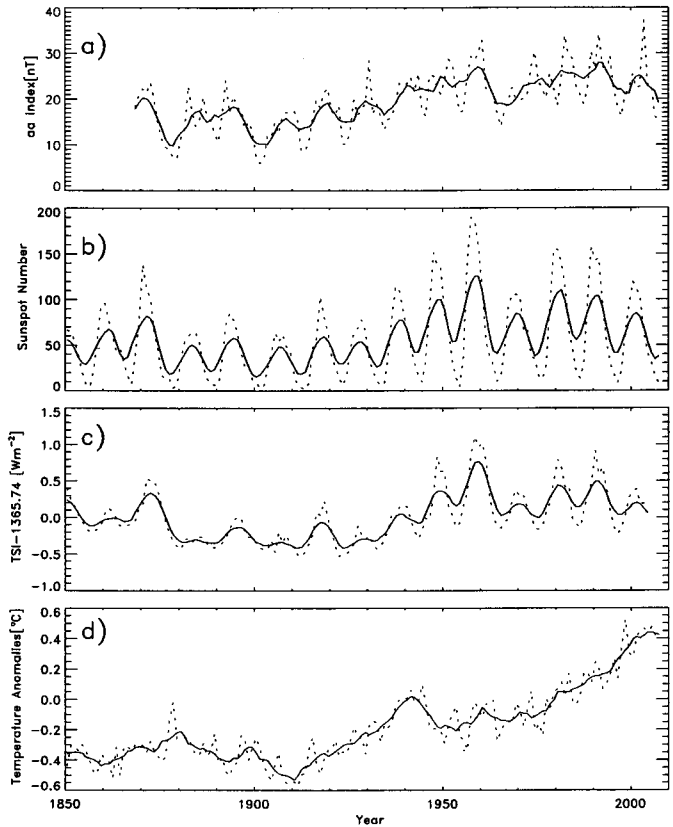


그림 1. 태양활동프록시와 기온아노말리 시계열. 그림 a는 aa지수, b는 흑점수, c는 태양상수, d는 기온아노말리를 나타낸다. 실선은 7년씩 평균한 값이다. 그림 a, b, c의 실선은 그림 d의 실선에 비해 짧은 시간척도에서 편차가 크다는 것을 짐작할 수 있고 최근의 변화모습도 다르다.

료를 158년간의 자료와 비교하기는 적절하지 않으므로 흑점을 이용하여 재구현한 TSI(Total Solar Irradiance) 시계열을 사용하였다(Krivova et al. 2007). 이 자료는 지구에 입사되는 에너지의 측면을 가지는 동시에 다른 태양 활동프록시의 특성을 반영한다. 이 시계열은 흑점과 비교하여 분산이 훨씬 작은 특징이 있다. 그 밖에 aa지수와 흑점 수 시계열 자료가 사용되었다. 지자기 aa지수는 영국과 오스트레일리아에서 측정된 자기장 값을 평균한 것으로서 두 지역은 서로 반대의 위도에 위치하고 모두 지자기 50° 이상의 지역에 위치한다. 이 자료의 측정은 1868년부터 3시간 간격으로 이루어 졌고 이 연구에서는 연평균 값을 이용했다. 흑점은 1610년부터 기록되고 있으나 일반적으로 1750년 이후 부터의 값에 대한 분산이 작다(Peristykh & Damon 2003). 그림 1에 태양활동프록시와 기온아노말리 시계열을 나타내었다.

### 3. 분석 및 결과

Scargle(1982)의 주기분석 방법인 피어리드그램(periodgram)을 이용하여 기온아노말리, 지자기

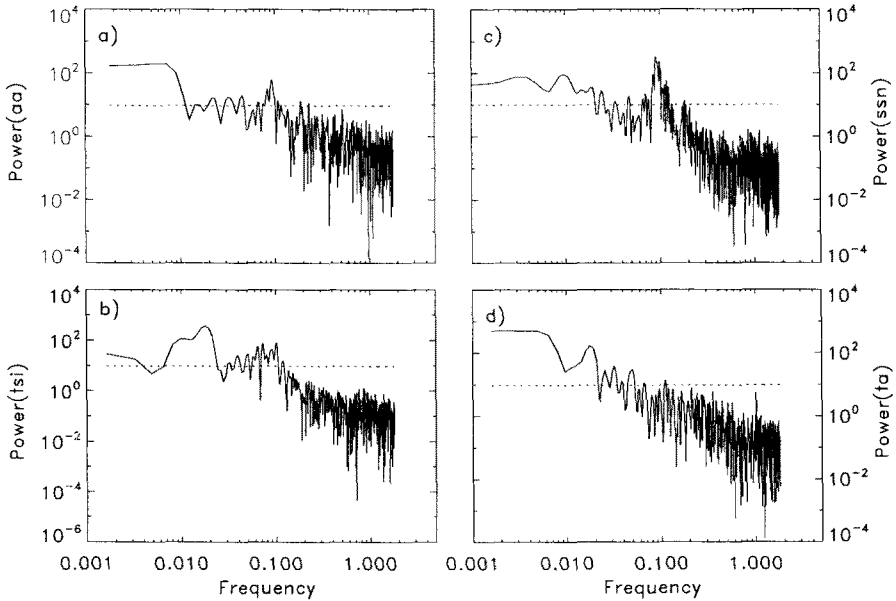


그림 2. 지자기 aa지수(a), 태양상수(b), 흑점 수(c), 기온아노말리(d)에 대한 파워스펙트럼분석. 태양상수프록시 시계열은 명확한 주기가 보여지는데 이는 흑점으로부터 계산된 값이기 때문이다. 점선은 99.9% 신뢰구간을 나타낸다. Frequency = 0.1은 10년을 의미한다.

aa지수, 흑점 수, 태양상수(TSI) 시계열을 주기분석 하였고 그 결과를 그림 2에 나타나 있다. 태양활동프록시는 약 11년 주기가 뚜렷이 나타나고 특히 흑점 수와 태양상수 시계열은 약 80년 주기도 잘 나타난다. 기온아노말리는 58년 주기가 잘 나타난다.

성분 분해란 임의의 시계열에 대한 주기성 혹은 변화의 시간척도에 따라 원래의 시계열을 여러 개의 성분으로 분해하여 각 성분을 개별적으로 분석하는 방법이다. 두 시계열을 비교할 때 비슷한 주기가 나타나면 이들의 물리적 관계를 연구하는데 도움이 되리라 생각한다. 이 연구에서는 최근에 소개되고 있는 EMD(Empirical Mode Decomposition)와 MODWT MRA(Maximal Overlap Discrete Wavelet Transform Multi Resolution Analysis)를 시도해 보았다.

EMD는 시계열의 극값들을 이용하여 고유한 시간척도를 갖는 성분을 계산해 낸다. 이 방법은 비정상/비선형적인 시계열 분석에 용이한 방법이다(Huang et al. 1998). EMD는 기본적인 연산의 반복을 이용하여 시계열을 고유한 시간척도를 가진 성분으로 분해한다. 이 방법은 시계열의 극대값을 지나는 곡선과 극소값을 지나는 곡선을 각각 스플라인(spline) 내삽하여 이들의 평균을 원래의 시계열에서 빼는 과정을 반복한다. 평균을 뺀 곡선의 분산을 조사하여 반복을 멈추고 그 곡선을 가장 짧은 주기를 가지는 시계열의 고유한 성분(IMF, Intrinsic Mode Function)으로 정의한다. 원래 시계열에서 첫번째 IMF를 뺀 시계열을 이용하여 앞의 과정을 반복하는데 이때 반복을 멈추는 조건은 자료의 분산에 따라 다르다. 푸리에 하모닉 분석처럼 서로 독립인 기저함수(basis functions)를 이용하지 않지만 각각의 분해된 성분이 서로 독립에 가깝다는 장점이 있다. 그림 3에 EMD를 기온 아노말리와 aa 지수, 흑점수, TSI 시계열에 적용한 결과를 나타내었고 그림 4에 가장 긴 시간척도를 가진 성분을

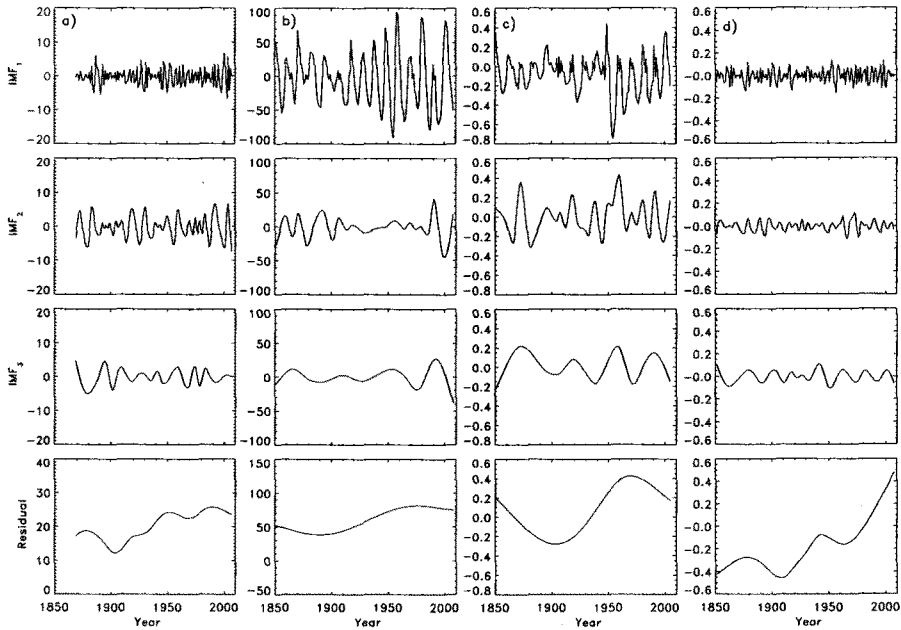


그림 3. EMD에 의한 태양활동프록시와 기온아노말리 시계열의 성분 분해. 그림 a, b, c, d의 각 행은 aa지수[nT], 흑점수, 태양상수[Wm<sup>-2</sup>], 기온아노말리[°C] 시계열을 나타낸다. y축의 IMF(Intrinsic Mode Functions)는 각각 분해된 성분을 나타내고 첨자가 클수록 긴 주기성을 가진다. 잔차(Residual)는 EMD에 의해 더 이상 분해되지 않는 성분이다.

비교해 보았다.

MODWT MRA는 임의의 시계열을 디테일(details) 성분과 스무스(smooths) 성분으로 분해해 준다. 다음 식은 이들의 관계를 나타낸다.

$$X(t) = \sum_{j=1}^J D_j(t) + S_J(t) \tag{1}$$

$$S_j(t) = \sum_{i=j+1}^J D_i + S_J \tag{2}$$

$X(t)$ 는 원래 시계열이고  $D_j$ 와  $S_J$ 는 각각 디테일과 스무스를 나타낸다. 첨자  $i, j$ 는 시간척도를 의미한다.  $D_j$ 는  $\Delta t \times 2^j \sim \Delta t \times 2^{j+1}$ 의 시간변화척도를 가진다.  $S_j$ 는  $\Delta t \times 2^{j+1}$ 보다 큰 시간변화척도를 가진다. 여기서  $\Delta t$ 는 샘플링 간격이다. MRA는 EMD와 비슷한 특징을 갖는 성분을 분해해 내지만 큰 시간척도를 갖는 성분을 자세히 볼 수 있는 장점이 있다. 바다 지역 시계열의 시-공간에 대한 균일성이 육지의 경우보다 고르므로 남반구 바다 지역의 기온 아노말리를 이용하였다(Brohan et al. 2006). 또한 각 성분이 포착하는 시간척도 범위의 중앙에 잘 알려진 태양활동 주기인 11년과 22년이 위치하도록 시계열을 0.92년 간격으로 내삽하였다(Scafetta & West 2005, 2006). EMD는 극값들의 스플라인 내삽을 이용하기 때문에 4개 이상의 극대 값이나 극소 값이 반드시 필요하므로 158년의 시계열에서 40년 이상의 시간척도를 갖는 성분을 분해할 수 없다. MRA에 의한 성분 분해는 시계열

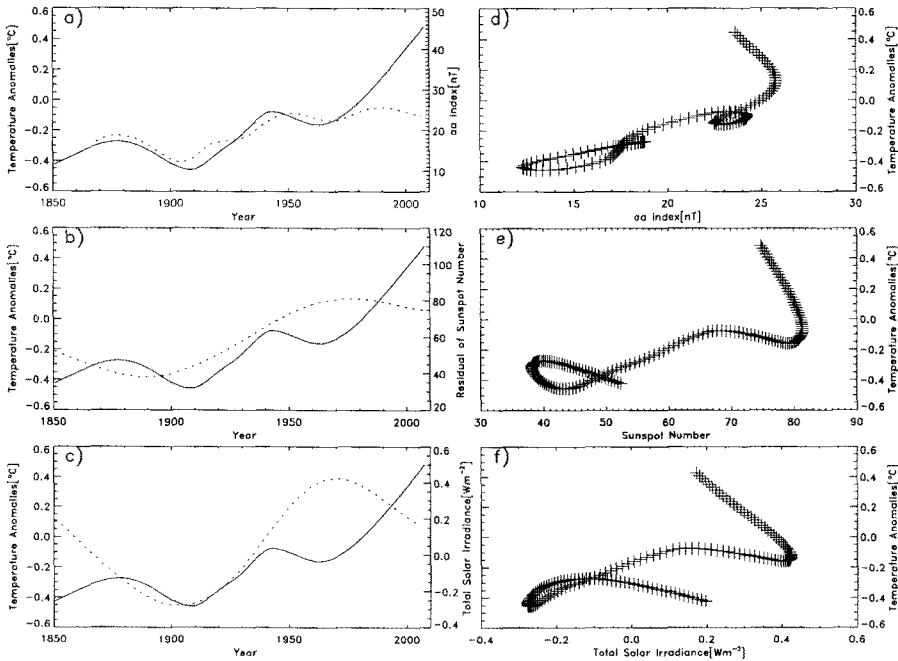


그림 4. 태양프록시와 기온아노말리 잔차의 비교. 그림 a, b, c의 점선(오른쪽 y축)은 각각 aa지수, 흑점수, 태양상수 시계열의 잔차를 나타내고 실선(왼쪽 y축)은 기온아노말리를 나타낸다. d, e, f는 각 태양활동프록시에 대한 기온아노말리의 스캐터플롯(scattered plot)이며 aa지수의 경우 1990년 이전의 기간이 기온아노말리 잔차와 잘 일치한다. 흑점과 태양상수의 경우 1개의 선형회귀모델로 근사하기 어렵다.

의 길이에 가까운 시간척도를 갖는 성분을 분해 해 낼 수 있다. 그림 5에 MRA를 적용한 결과를 나타내었다.

MRA에 의한 분석을 통해 기온 시계열에서 태양에 의해 변하는 신호를 동일한 주기에 근거하여 찾아내기는 어려웠다. 서로의 주기가 짧은 척도에서는 비슷하지만 긴 척도에서는 차이가 난다. 또한 진폭에 대한 일관성도 없어 보인다. 예를 들면 각 TSI 성분에 대한 진폭 변화가 클 때 기온 변화의 진폭이 큰 경우가 있는가 하면 작은 경우도 있다. 그림 6에 40년 보다 긴 변화척도를 가지는 성분을 나타내었다. 기온아노말리의  $D_5$ 는 서로 반대의 위상을 가진다. 기온아노말리의  $D_6$ 의 주기는  $D_6 + D_7$  주기에 대해 약  $\frac{1}{2}$ 배 차이가 난다. 비슷한 주기에 근거하여 기온아노말리의  $D_5$ 를 태양에 의한 신호로 결정하였다. 기온아노말리의  $D_6$ 은 태양신호의  $D_6 + D_7$ 에 의한 첫번째 배음신호로 간주하였다. 1960년 이후부터 단조롭게 증가하는  $D_7$ 을 인위적인 신호로 간주하였다. 그림 7의 실선은 태양활동에 의한 기온변화를 나타낸다.

두 시계열의 비슷한 주기는 임의의 태양활동신호에 대한 기후변화신호가 일정한 댐핑과 복원력을 가지는 기후시스템에 의해 생성된다는 가정을 통해 즉시 직접적인 의미를 가지게 된다. 이러한 시스템에서 출력신호의 진동수는 외부신호의 진동수와 같다. 서론에 언급한 기후민감성은 두 신호의 진폭에만 관계하게 된다(Scafetta & West 2005). 기온아노말리의 태양상수변화에 대한 1차함수모델

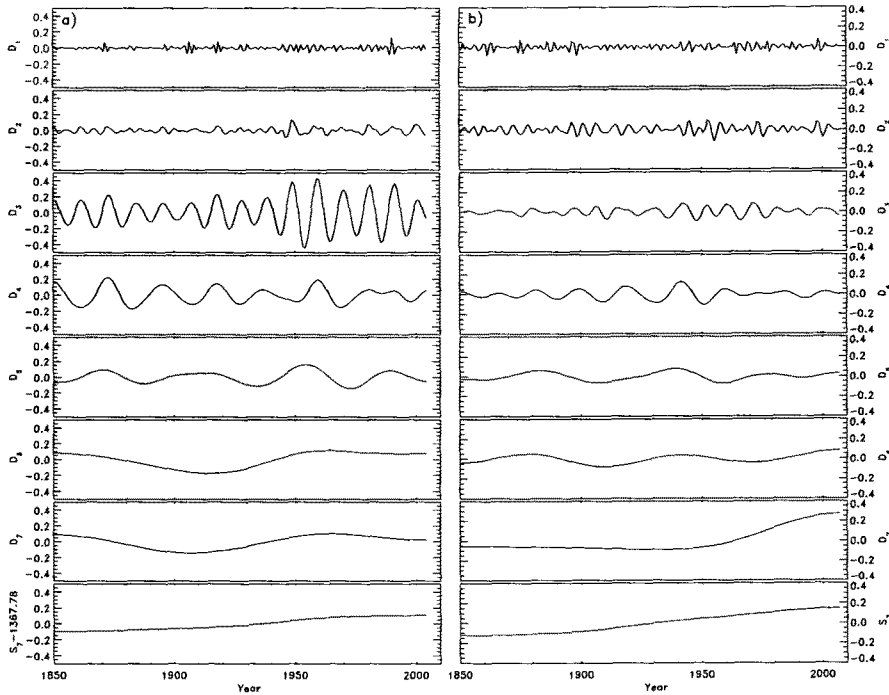


그림 5. MRA에 의한 태양상수(a)와 기온아노말리(b) 시계열의 성분 분해. a행의 y축 단위는  $[Wm^{-2}]$ 이고 b행은  $[^{\circ}C]$ 이다. 태양상수 시계열의  $D_6$ 과  $D_7$ 은 변화의 시간척도가 거의 같다. 기온아노말리의  $D_7$ 은 주기적인 특징이 나타나지 않고 1960년 이후에는 계속 상승하고 있다.  $D_1$ 과  $D_2$ 는 8년 이하의 변화척도를 가진다.  $D_3$ 과  $D_4$ 는 약 11년과 22년 주기성을 가진다.

에서 기후민감성은 단순히 1차항의 계수와 같기 때문이다.

#### 4. 요약 및 결론

태양활동프록시와 지구 평균기온은 아노말리 시계열을 성분 분해하여 그들의 연관성을 비교해 보았다. EMD에 의해 계산된 태양활동 프록시와 기온아노말리의 잔차를 통한 비교 결과는 선행 연구 결과와 마찬가지로 최근의 기온상승을 설명하기는 어려웠다. EMD를 통하여 40년 이상의 시간척도를 갖는 성분을 분해해 내지 못하였다. MRA에 의한 기온아노말리의  $D_3, D_4, D_5, D_6, S_7$  성분을 태양에 의한 신호로 결정하였으며 1960년부터 2007년까지의 기온상승에 대한 태양의 기여도는 39%로 계산되었다.

이 연구에서 사용한 방법은 수학적 분해이다. 따라서 성분 분해를 이용한 분석은 각각의 성분이 시계열이 지시하는 계의 물리적인 특성이라는 가정이 필요하다. Krivova et al.(2007)에 의해 계산된 태양상수는 그 자체가 지구에 입사되는 에너지로 해석된다. 반면에 태양상수의  $D_5$  성분은 약 40년 주기의 특징을 가진 태양활동으로 해석할 수도 있다. 이러한 해석은 가능성 있는 물리적 관계를 제시하지 않고 있어 매우 임의적이지만 이 연구에서 사용한 수학적 방법에 위배되지 않는다.



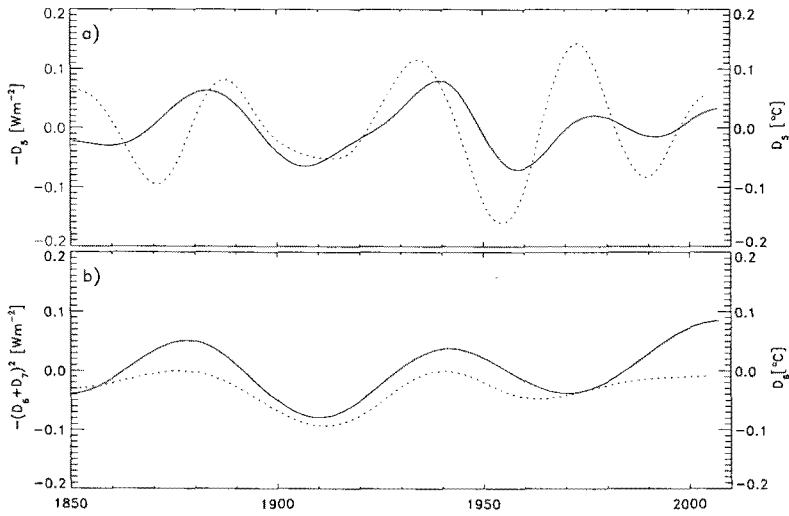


그림 6. 태양상수(점선)와 기온아노말 리시계열(실선)의 40년보다 긴 변화척도를 갖는 성분. 그림 a의  $D_5$ 는 서로 반대의 위상을 가지고 그림 b의 태양상수  $D_6 + D_7$ 은 기온아노말리  $D_6$ 에 대해 약 2배의 주기차이가 있다.

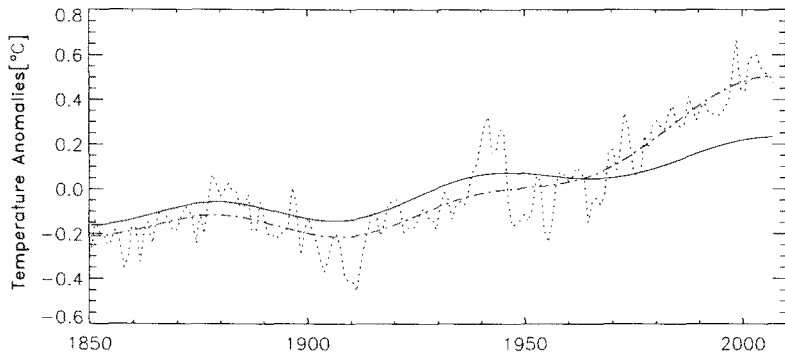


그림 7. 최근 온난화에 대한 태양기여도(실선). 주기적 특징이 보이지 않는 기온아노말리의  $D_7$ 을 태양외적 요인에 의한 기온상승으로 정의하였다. 점선은  $D_5 + D_6 + D_7 + S_7$ 이고 실선은  $D_5 + D_6 + S_7$ 이다.

되먹임 효과를 포함한 기후민감성의 값은 수십년 척도에서 변한다고 알려져 있다. 이러한 특징은 두 신호의 선형관계를 통해 출력신호를 제한하려 할 때 시간척도를 신중히 고려하도록 한다. 반면에 이 연구에서 얻은 각각의 기온아노말리 성분은 기후민감성을 고려하지 않아도 되는 장점이 있다. 기후민감성의 값은 신호의 진동수에는 관계하지 않기 때문이다. 기후변화를 외부신호에 대한 출력신호로 가정하고 출력신호를 제한하는 기후시스템의 특성이 시간에 대하여 변하는 경우, 이들은 출력신호의 진동수를 결정하는데 참여한다. 주기적 특징이 있는 각각의 성분은 시간에 대해 변하거나 특정 변수에 의존하는 댐핑효과와 복원력을 가정할 경우 더욱 유연한 출력신호를 생성할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글: 이 논문은 학술진흥재단(KRF-2006-521-C00072)의 지원에 의하여 연구되었습니다.

### 참고문헌

- Abarca-Del-Rio, R. & Mestre, O. 2006, *GRL*, 33, L13705
- Brohan, P., Kennedy, J. J., Harris, I., Tett, S. F. B., & Jones, P. D. 2006, *JGR*, 111, D12106
- Cox, P. M., Betts, R. A., Jones, C. D., Spall, S. A., & Totterdell, I. J. 2000, *Nature*, 408, 184
- Damon, P. E. & Jirikowic, J. L. 1992, *Radiocarbon*, 34, 199
- Damon, P. E. & Peristykh, A. N. 2005, *Climatic Change*, 68, 101
- Friis-Christensen, E. & Lassen, K. 1991, *Science*, 254, 689
- Gleissberg, W. 1939, *Obs.*, 62, 158G
- Haug, N. D., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., Yen, N.-C., Tung, C. C., & Liu, H. H. 1998, *Proc. R. Soc. Lond A*, 454, 903
- Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M., Imhoff, M., Easterling, D., Peterson, T., & Karl, T. 2001, *JGR*, 106, 947
- Hoyt, D. V. & Schatten, K. H. 1993, *JGR*, 98, 895
- IPCC 2001, *Climate Change 2001: The Scientific Basis* (Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press), p.358
- IPCC 2007, *Climate Change 2007: The Scientific Basis* (Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press), p.114
- Jones, P. D. & Moberg, A. 2003, *J. Clim.*, 16, 206
- Jones, P. D., Osborn, T. J., Briffa, K. R., Folland, C. K., Horton, E. B., Alexander, L. V., Parker, D. E., & Rayner, N., A. 2001, *JGR*, 106, 3371
- Krivova, N. A., Balmececa, L., & Solanki, S. K. 2007, *A&A*, 467, 335
- Laut, P. 2003, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 65, 801
- Lean, J., Beer, J., & Bradley, R. 1995, *GRL*, 22, 3195
- Marsh, G. E. 2007, eprint arXiv, 0706.3621
- Marsh, N., D. & Svensmark, H. 2000, *Phys. Rev. Lett.*, 85, 5004
- Marsh, N., D. & Svensmark, H. 2003, *JGR*, 108, 4195
- Mahasenan, N., Watts, R. G., & Dowlatabadi, H. 1997, *GRL*, 24, 563
- Moon, Y. J. 2007, *The Bulletin of The Korean Astronomical Society*, 32(2), 36.1
- Peristykh, A. N. & Damon, P. E. 2003, *JGR*, 108, 1003
- Scafetta, N. & West, B. J. 2005, *GLR*, 32, L18713
- Scafetta, N. & West, B. J. 2006, *GRL*, 33, L05708
- Scargle, J. D. 1982, *ApJ*, 263, 835
- Schlesinger, M. E. & Ramankutty, N. 1994, *Nature*, 367, 24
- Solanki, S. K. & Krivova, N. A. 2003, *JGR*, 108, 1200
- Suess, H. E. 1980, *Radiocarbon*, 22, 200
- White, W. B., Lean, J., Cayan, D. R., & Dettinger, M. D. 1997, *JGR*, 102, 3255
- Wigley, T. M. L. 1988, in *Secular Solar and Geomagnetic Variations in the Last 10,000 Years*, eds. F. R. Stephenson, A. W. Wolfendale (New York: Springer), pp.209-224