

여름철 일 최고기온과 일사량의 최근 변동에 관하여

최미희 · 윤진일*

경희대학교 생태시스템공학과

(2009년 11월 26일 접수; 2009년 12월 17일 수정; 2009년 12월 18일 수락)

On Recent Variations in Solar Radiation and Daily Maximum Temperature in Summer

Mi-Hee Choi and Jin I. Yun*

Department of Ecosystem Engineering, Kyung Hee University, Yongin 446-701, Korea

(Received November 26, 2009; Revised December 17, 2009; Accepted December 18, 2009)

ABSTRACT

Few studies have attempted to analyze variations of daily maximum temperature in the summer whereas many studies have analyzed warming trends in other seasons with respect to greenhouse gases or urban heat islands. We analyzed daily maximum temperature data for the summer season (June to August) at 18 locations in South Korea from 1983 to 2007. Compared to the climatic normal (from 1971 to 2000), an average increase of 0.1°C was found for the summer daily maximum temperature along with an increase of 0.61MJ m⁻² in daily solar radiation. Approximately 65% of the annual variations of the summer daily maximum temperature could be explained by the solar radiance alone. Higher atmospheric transmittance due to lower aerosol concentration (especially of sulfur dioxide) is believed to have caused the recent increase in solar irradiance. Daily maximum temperature of the summer is expected to keep rising if the clean air activities are maintained in the future.

Key words : Aerosol, Atmospheric transmittance, Daily maximum temperature, Global brightening, Solar radiation

I. 서 론

농작물이나 수목의 생장공간인 접지층의 기온은 지표와 대기 사이의 복사에너지 교환의 결과로 나타나며 최근 100년간 관측된 접지층 기온상승은 온실기체 농도 증가에 기인한 장파복사수지의 변화 때문인 것으로 보고되었다(IPCC, 2007). 그러나 기온상승 폭과 온실기체의 기여도는 계절과 주야간 시간대에 따라 다르다(Yun, 2002). 실제로 겨울철 기온상승은 온실기체에 의해 80~90% 정도 설명할 수 있지만 여름철에는 온실기체 강제력으로는 10~50% 밖에 설명되지 않는다

(Hulme *et al.*, 1994).

일 시간대의 접지층 기온은 일 최고기온으로 대표되고 밤 시간대의 접지층 기온은 일 최저기온에 의해 대표할 수 있다고 가정하면 일 최저기온은 하향장파복사에너지에 의해서 일 최고기온은 하향단파복사에너지에 의해 좌우될 것이다. 도시열섬효과와 온실효과는 주로 일 최저기온에 영향을 주게 되지만(Kalnay and Cai, 2003; Wild *et al.*, 2007), 일 최고기온은 하향단파복사에너지에 의해 좌우되며 태양활동의 변화, 화산활동과 같은 자연적인 강제력과 에어로졸 같은 인공적인 강제력에 의한 영향을 크게 받는다(Karl *et al.*,

* Corresponding Author : Jin I. Yun (jiyun@khu.ac.kr)

1993; Wild *et al.*, 2007). 계절이나 주야간에 기온상승 정도가 달라지는 것은 이러한 다양한 복사강제력들이 복합적으로 작용하기 때문으로 믿어진다(Stone and Weaver, 2003).

따라서 낮 시간 대의 온도를 대표하는 일 최고기온의 상승을 설명하는 데는 온실효과 이론만으로는 미흡하다. 이에 대한 보완기설로서 하향단파복사 즉 일사량의 증가추세를 들 수 있는데, Wild *et al.*(2007)에 의하면 1980대 후반 이후 감소했던 하향복사에너지가 최근 증가하는 이른바 'global brightening' 현상이 나타나면서 지면에 도달하는 복사에너지가 0.26 W m^{-2} 증가함에 따라 일 최고기온이 0.37°C 상승하였다고 한다. 이러한 일사량 증가현상의 원인 가운데 하나로써 대기투과율(atmospheric transmittance)의 변화가 주목 받고 있다. 대기외일사량이 대기층을 통과하면서 감쇄되는 정도가 줄어들면, 즉 대기투과율이 높아지면 지표면에 도달하는 지면일사량이 증가하게 된다. 대기투과율에 따라 직달일사와 산란일사의 비율이 달라지는데, 대기투과율이 낮으면 직달일사는 줄어들고 산란일사가 많아진다. 하지만 산란일사 증가보다 직달일사 감소의 영향이 커서 지면에 도달하는 복사에너지는 줄어들게 된다(Power, 2003). 1992년부터 2002년까지 10년간 Baseline Surface Radiation Network (BSRN) 사업에 의해 전지구적인 대표 지점 8개에서 수집된 복사에너지자료를 분석한 결과 지구 표면에 도달하는 복사에너지가 이 기간 중 평균 6.6 W m^{-2} 증가하였는데(Wild *et al.*, 2005), 그 이유는 연평균 0.27% 씩 감소한 에어로졸 광학심도(aerosol optical depth, AOD) 때문이었다(Streets *et al.*, 2006).

낮 시간대의 기온은 식물의 광합성률을 결정함으로써 순일차생산력, 나아가 농업생산력의 상한값을 결정짓는 중요한 변수이다. 따라서 농업분야 기후변화 적응전략의 수립을 위해서는 일 평균기온의 상승 뿐 아니라 일 최고기온의 변동성에 대해서도 관심을 가져야 한다. 본 연구에서는 표준기상관측소의 실측자료 분석을 통해 우리나라의 여름철 일 최고기온 변동성을 조사하고 일사량과 대기투과율의 영향을 평가하고자 하였다.

II. 자료 및 방법

2.1. 자료수집

우리나라에는 일사량을 관측하는 기상대가 22개소

Table 1. Elevation and latitude of 18 solar radiation stations in South Korea with 25-years observation data

Station ID	Station Name	Elevation (m)	Latitude (dd)
100	TAEGWALLYONG	842.5	37.68
101	CHUNCHON	76.8	37.90
105	KANGNUNG	25.9	37.75
108	SEOUL	88.5	37.57
112	INCHON	68.9	37.47
119	SUWON	33.6	37.27
129	SOSAN	25.9	36.77
131	CHONGJU	57.4	36.64
135	CHUPUNGNYONG	242.5	36.22
136	ANDONG	140.7	36.57
138	POHANG	1.9	36.03
143	TAEGU	57.6	35.88
146	CHONJU	53.5	35.82
156	KWANGJU	70.5	35.17
159	PUSAN	69.2	35.10
165	MOKPO	37.9	34.81
184	CHEJU	20.0	33.51
192	CHINJU	21.3	35.21

있지만 기상대마다 관측기간이 다르고 1970년대 자료에 명백한 문제점이 발견되었으므로 18개 기상대의 최근 25년(1983년부터 2007년) 자료만을 분석대상으로 하였다(Table 1 and Fig. 1). 이들 기상대의 일사량, 일조시수, 일 최고기온자료를 수집하여 기상청에서 제공하는 1971년부터 2000년까지의 누년 평균값(기후학적 평년값)으로부터 편차를 계산하여 분석에 사용하였다(http://www.kma.go.kr/sfc/sfc_03_05.jsp).

2.2. 대기투과율 결정

대기투과율을 나타내는 방법 가운데 직달일사량이 대기 중 에어로졸에 의해 감쇄되는 정도인 AOD가 널리 쓰인다. AOD가 증가하면 대기투과율이 낮아지기 때문에 직달일사량이 감소하고 산란일사량이 증가한다. 우리나라의 경우 서울(station ID=108)과 광주(station ID=156)에서만 Brewer 분광광도계(model MK-IV 148, SCI-TEC Inc., Canada)와 파장별 일사계를 이용하여 AOD를 계산할 수 있을 뿐, 나머지 일사관측 기상대에서는 AOD 추정이 쉽지 않으므로 본 연구에서는 대기투과율을 Angstrom-Preseott 일사 · 일조 경험식에 의해 구했다(Cho *et al.*, 1987).

$$\frac{Q}{Q_0} = a + b \frac{S}{S_0} \quad (1)$$

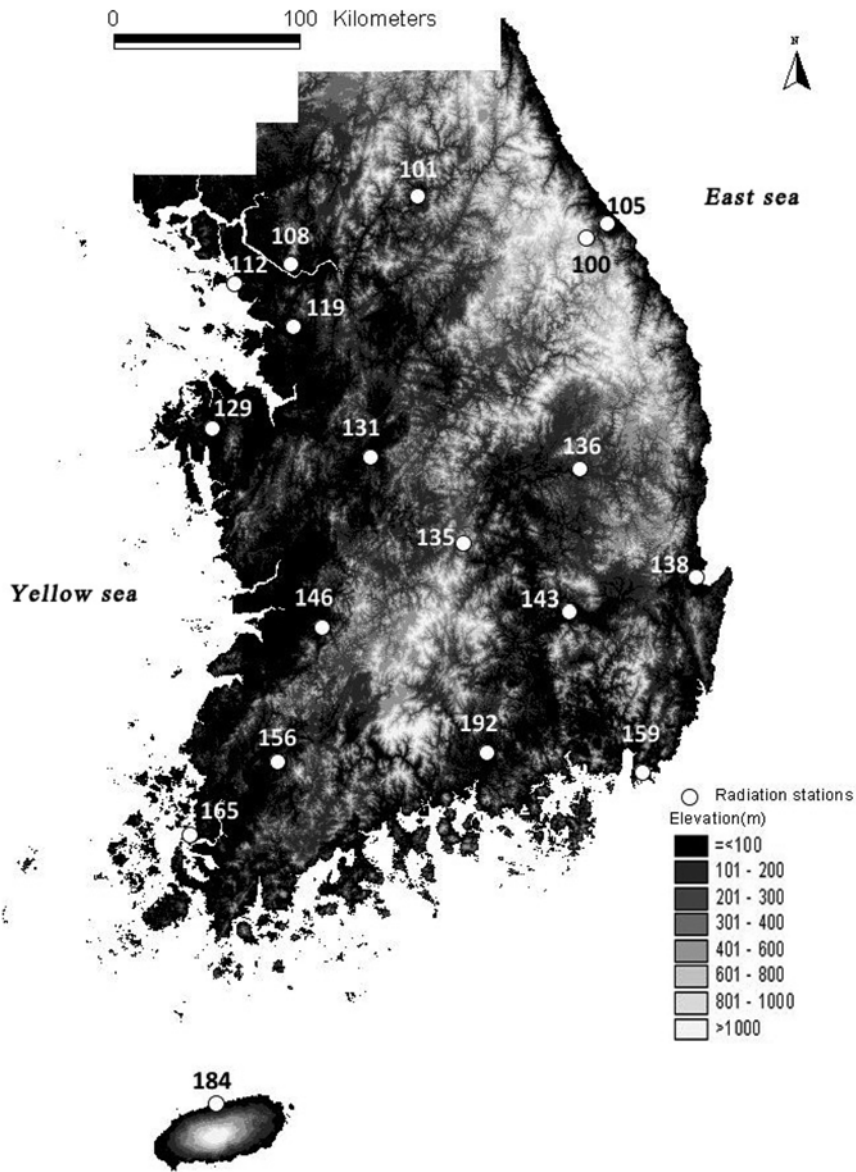


Fig. 1. Location of the 18 solar radiation stations operated by the Korea Meteorological Administration (KMA). Background shade level indicates the elevation contour.

이 식에서 Q 는 일사량, Q_0 는 대기외일사량, S 는 일조시수로서 하루 중 햇빛이 구름이나 안개에 의해 가려지지 않고 지면에 직접 도달하는 시간을 나타낸 것이다. S_0 는 가조시수로서 산이나 언덕 등의 장애물이 없다고 가정하고 어느 지점에 햇빛이 비칠 수 있는 최장시간이다. 일조시수를 가조시수로 나눈 것을 일조율, 일사량을 대기외일사량으로 나눈 것을 일사율이라고 한다. 여기서 a , b 는 경험적으로 유도되는 회

귀계수이다. 대기외일사는 대기를 통과할 때 구름, 오염입자, 물방울들과 같은 장애물들에 의해 산란 또는 흡수 되어 감쇄된다. 이 식에서 $a+b=1$ 인 경우는 대기 중 일사진행에 장애가 전혀 없는 상태에서 대기외일사가 감쇄되지 않고 지표면에 도달하는 것을 의미한다. 하지만 현실대기는 항상 1보다 작기 때문에 $a+b$ 는 태양복사의 대기투과율을 의미하게 된다. 대기의 일사량은 다음 식으로 계산하였다(Allen *et al.*, 1998).

$$Q_0 = 37d_r(\sin \phi \cdot \sin \delta \cdot W_S + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin W_S) \quad (2)$$

여기서 d_r 는 태양과 지구상의 상대적 거리, δ 는 태양 적위, ϕ 는 위도, W_S 는 시간각이다. 가조시간은 다음 식으로 추정할 수 있다(Allen *et al.*, 1998).

$$S_0 = \frac{24}{\pi} [\arccos(-\tan \phi \tan \delta)] \quad (3)$$

계산과정에서 일사량이나 일조시간 중 하나 혹은 둘 다 누락된 날, 일조율이나 일사율이 1보다 큰 날은 제거하였고 10일 이상 실측자료가 누락된 달도 제거하였다. 각 지점별로 연도별 일조율을 독립변수로 일사율을 종속변수로 두어 도출한 최적 1차회귀식의 계수로부터 매년 (a+b) 값을 얻었다. 같은 방법으로 봄(3월, 4월, 5월), 여름(6월, 7월, 8월), 가을(9월, 10월, 11월), 겨울(12월, 1월, 2월)의 일조율과 일사율을 각각 계산하여 최적회귀식을 유도하고 계절별 (a+b) 값을 얻었다. 대기투과율의 변동성 분석을 위한 기준값으로는 1983년부터 2002년까지 20년간 일사율과 일조율의 평균값으로부터 도출한 대기투과율을 사용하였고 계절별 분석기준으로는 봄, 여름, 가을, 겨울자료로부터 각각 계산된 일사율과 일조율 평균값 4개를 토대로 계산된 대기투과율을 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 여름철 최고기온과 일사량 변동

지난 25년간 18개 지점에서 관찰된 6월부터 8월까지 3개월 평균 일 최고기온(이후 여름 최고기온)을 같은 기간 관측된 일사량과 비교해보면 양자 간 그 변동양상이 흡사함을 알 수 있다. 일사량이 13.06 MJ m^{-2} 으로 최소였던 1993년에는 여름 최고기온도 25.9°C 로 최저를 기록하였다. 또한 1994년도에는 일사량이 17.26 MJ m^{-2} 으로 최대였는데 그 해 여름 최고기온은 30.5°C 로 최고를 기록하였다. 1983년부터 2007년까지 25년간 평균값을 1971-2000 평년값과 비교해 보면 여름철 최고기온은 0.1°C 상승하였고 일사량은 0.61 MJ m^{-2} 증가하였다(Fig. 2).

일사량의 증가와 여름 최고기온 상승 간 관계를 정량화 하기 위하여 1983년부터 2007년까지 매년 여름철 일사량과 최고기온을 1차 회귀식으로 나타낸 결과 0.65의 비교적 높은 결정계수를 얻었다(Fig. 3). 즉 일사관측자료가 확보된 25년간 일사량의 연차변이는 이

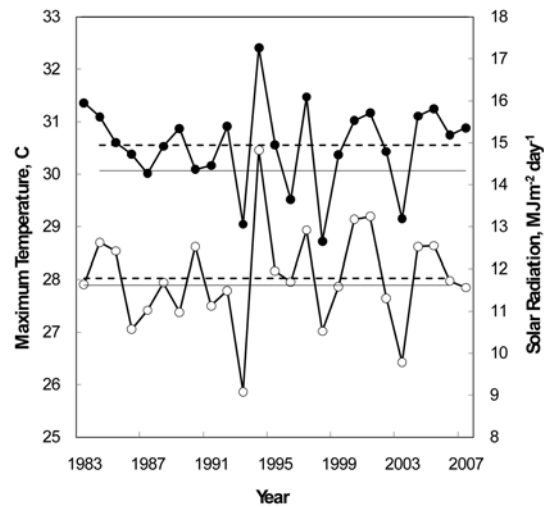


Fig. 2. Variation in daily mean solar irradiance (solid circle) across 18 locations for the summer season (June-July-August) during the recent 25 years (1983-2007) in South Korea. Daily maximum temperature observed during the same period is represented by empty circle. The straight lines indicate the climatological normal (1971-2000 average) values for solar irradiance (14.33 MJ m^{-2}) and temperature (27.9°C), respectively. The dotted lines indicate 25-year mean values for the solar irradiance (14.94 MJ m^{-2}) and the temperature (28.0°C), respectively.

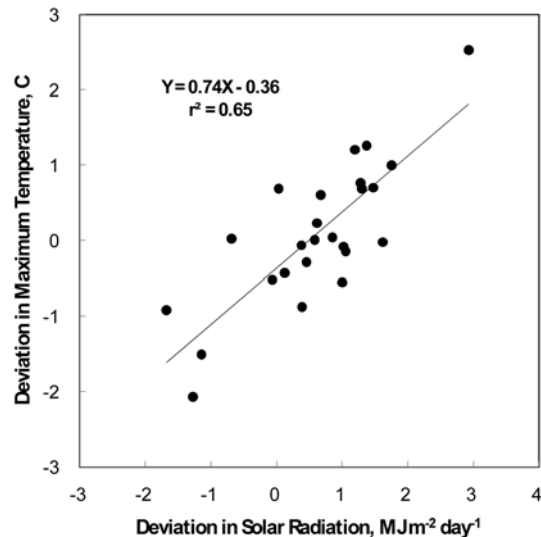


Fig. 3. Relationship between the solar irradiance and the daily maximum temperature observed during the summer season for the recent 25 years (1983-2007) in South Korea.

기간 중 여름 최고기온 연차변이의 65%를 설명할 수 있다. 이것으로부터 지면에 도달하는 일사에너지의 변화가 여름철 접지층 최고기온의 연차변이에 결정적인

영향을 미치는 것이 확인된다.

지면에 도달하는 복사에너지의 변화는 자연적인 복사강제력(태양활동의 변화, 화산활동)과 인공적인 복사강제력(에어로졸, 온실기체)에 의해서 나타난다. 소빙하기(Little Ice Age)라 불리는 서기 1740년부터 1830년 동안은 태양활동이 극히 저조했던 기간(Maunder Minimum)으로서 1990년대보다 1.0~1.5°C 정도 기온이 낮았다(Reid, 1997). 19세기 이전은 화산활동과 태양활동의 변화로 인한 자연적인 복사강제력이 기온결정에 75% 정도 기여했다고 알려져 있다(Lean, 1998; Scafetta and West, 2006). 그러나 19세기 이후, 태양활동의 변화로 인한 복사강제력은 더 이상 주요한 역할을 하지 못하고 기후시스템의 불균형을 설명하지 못하게 되었다(Frohlich, 1998). 이는 태양활동 측면에서는 감쇄기에 해당하는데 지구의 온도는 오히려 상승하였기 때문이다. 대신 인간의 활동으로 인한 대기 구성성분 변화가 주요한 복사강제력으로 작용한다는 것이 정설로 받아들여졌다(Scafetta and West, 2006). 그러나 기온자료를 계절별, 일중 주야간대로 나누어 분석해보면 온실효과 이론만으로 설명하기 어려운 부분이 나타나며 여름 최고기온은 그 가운데 하나의 사례라 할 수 있다.

우리나라의 경우에도 1971년부터 2000년까지 기온을 계절별로 분석한 결과 연중 0.3°C에서 0.5°C의 지속적인 온난화 효과를 보인 것은 일 최저기온에 국한되며, 일 최고기온의 상승에 미친 영향은 거의 없거나 매우 적었다(Yun, 2002). 본 연구에서도 25년간 18개 지점에서 관측된 자료를 분석해보면 역시 일 최고기온의 상승은 크지 않아 기후학적 평년(1971-2000)에 비해 0.1°C 상승하는 데 그쳤다. 하지만 중요한 것은 같은 기간에 일 적산일사량이 평년에 비하여 0.61MJ m⁻² 증가하였으며 이렇게 증가한 일사량이 여름철 최고기온의 상승에 중요한 역할을 했을 것이란 사실이다.

3.2. 일사량의 증가와 대기투과율

우리나라 18개 기상대에서 관측된 일사량과 일조시수로부터 추정된 대기투과율은 1983년부터 2002년까지 20년간은 평균값 0.68로서 Lee *et al.*(1995)이 1983년부터 1993까지 수집한 자료로부터 도출한 0.69와 비슷하였다. 하지만 2003년부터 급격하게 높아져서 이후 0.74의 평균값을 보였다. 한편 일사량도 1990년대 이후 증가추세에 들어서 최근 10년의 하루 평균은

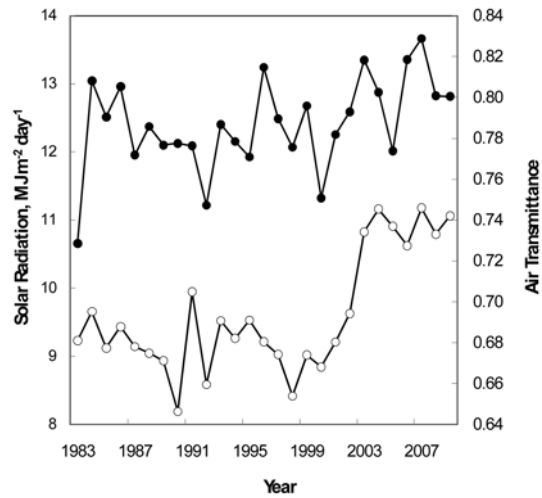


Fig. 4. Increasing trends in both annual average solar irradiance (solid circle) and the calculated atmospheric transmittance (empty circle) during the recent 25 years (1983-2007) in South Korea.

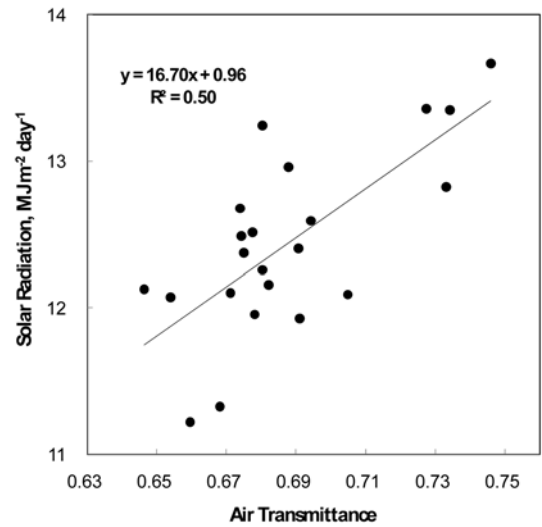


Fig. 5. Relationship between the annual variation in atmospheric transmittance and the observed solar irradiance across 18 locations in South Korea during the recent 25 years (1983-2007).

약 13MJ m⁻²로서 1990년대 이전의 약 12MJ m⁻²과 비교된다(Fig. 4).

대기투과율의 변화가 복사에너지 변화와 관련이 있는지 분석하기 위하여 연도별 대기투과율과 연평균 일사량 간 회귀식을 구해본 결과 양자간 정의 상관을 보였다(Fig. 5). 이 회귀식에 의하면 일 적산일사량이 평년에 비해 1.96MJ m⁻² 정도 증가한 것은 대기투과

율이 0.06 정도 높아진 데 기인한다(Fig. 5).

2000년대 들어와 대기투과율이 급격히 증가한 원인은 태양복사를 흡수하고 산란시키는 에어로졸의 농도가 줄어들었기 때문으로 짐작된다. 에어로졸은 복사에너지의 흡수와 산란에 관련된 직접적인 복사강제력과 구름생성과정에서 구름의 광학심도와 구름 유지기간을 증가시키는 간접적인 복사강제력을 행사한다(Houghton, 2005). 직접적인 강제력은 복사에너지를 흡수하거나 지구 밖으로 산란시켜 지표면에 도달하는 복사에너지를 감소시킨다. 간접적인 복사강제력은 에어로졸에 의해 많아진 구름입자수가 복사에너지 반사효과를 증대시키는 것이다.

1980년대 이전에는 에어로졸 강제력으로 인하여 $-2 \sim -4 \text{ W m}^{-2}$ 정도의 지면 순복사 감소효과가 인정되었는데 이후 각국의 대기정화정책으로 인하여 에어로졸 농도를 줄여서 현재는 $-1 \pm 0.5 \text{ W m}^{-2}$ 의 강제력으로 작용한다고 분석되었다(Ramanathan *et al.*, 2001). 우리나라의 에어로졸은 인위적 에어로졸과 황사가 주요한 역할을 하며 서로 혼합되어 복사강제력을 나타낸다(Kim *et al.*, 2004). 실제로 산업활동에 의해 증가했던 에어로졸은 인위적 에어로졸 발생 규제로 인하여 1989년부터 이황산가스는 전년도 대비 평균 9% 감소한 반면 이산화질소와 미세먼지는 평균 0.02%, 0.9%로 감소폭이 적다. 이황산가스는 전체 에어로졸 강제력 중 1/3정도를 차지한다고 알려져 있는데(Ramanathan *et al.*, 2001), 1991년부터 1993년 사이 자료를 이용한 연구에 의해 국내에서도 이황산가스가 일사량 감소에 40% 정도 기여한다는 사실을 확인할 수 있다(Lee *et al.*, 1995).

연구대상인 18개 지점 가운데 대기오염관측소가 없는 대관령과 추풍령을 제외한 16개 지점에 대해 SO_4^{2-} , NO_2 평균값을 1989년부터 2007년까지 수집하고 미세먼지(PM10) 평균값은 1995년부터 2007년까지 수집하여 분석한 결과 인위적 에어로졸의 감소로 인한 대기투과율 증가 기여도는 이황산가스에서 가장 컸다($P < 0.0001$; $r^2 = 0.763$). 이는 아시아 태평양 지역에서 1980년부터 2000년까지 이황산가스가 에어로졸 광학심도(대기투과율)에 미치는 영향이 28~30% 이었다는 보고와 일치한다(Streets *et al.*, 2006). 또한 여름철의 에어로졸 분석을 위해 필요한 월별자료(1999-2007)를 수집하여 분석한 결과 이황산가스의 농도 증가에 따라 대기투과율이 낮아지는 부의 상관성이 뚜렷하다(Fig. 6).

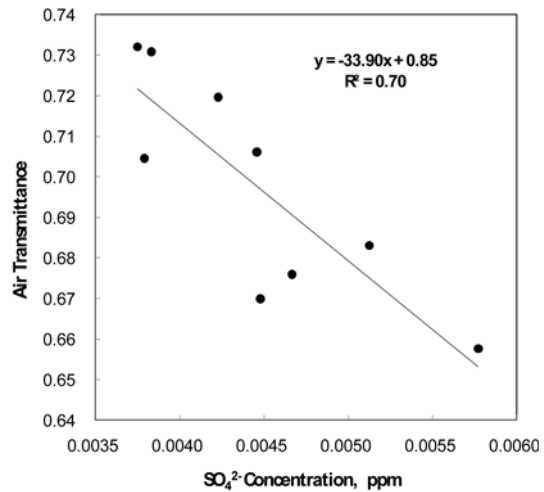


Fig. 6. Relationship between the sulfur dioxide concentration in the atmosphere and the atmospheric transmittance observed at 16 sites in South Korea during the recent 9 years (1999-2007).

여름철 이황산가스농도는 연 4.7%씩 감소하는 경향이 보이는데 대기투과율이 이황산가스에 의해서만 결정되는 것은 아니지만 기여도가 크기 때문에 앞으로 대기투과율 증가 추세는 계속될 것으로 예상된다. 대기투과율 증가에 따라 지표면에 도달하는 복사에너지의 양이 많아질 것이며 증가된 일사량은 지구시스템의 열관성(thermal inertia)에 의해 시차를 두고 여름철 최고기온의 상승으로 이어질 것이다.

적 요

여름을 제외한 다른 계절의 온난화 혹은 일 최저기온에 대한 온실효과와 도시열섬효과에 관한 연구가 활발히 수행되었던 것에 비하면 여름철의 기온상승, 특히 일 최고기온의 상승에 대한 연구는 미흡하다. 최근 25년간 전국 18개 지점에서 관측된 우리나라의 여름철(6-8월) 일 최고기온 변화를 조사하고 그 변화에 미친 일사량의 영향을 분석한 결과, 평년(1971-2000)에 비해 하루 평균 일사량은 0.61 MJ m^{-2} 증가하였으며 같은 기간 일 최고기온은 0.1°C 상승한 것으로 확인된다. 이 기간 중 일사량의 연차변이는 여름 최고기온 연차변이의 65%를 설명할 수 있었다. 일사량의 증가는 대기투과율의 증가에 기인하며 대기투과율의 증가는 에어로졸 농도 특히 이황산가스 농도 감소 때문인 것으로 판단된다. 1999년부터 2007년까지 여름철 아

황산가스 농도가 계속 감소해왔는데 이와 같은 경향이 앞으로도 지속된다면 대기투과율 증가 및 이에 따른 일사량 증가와 증가된 일사량으로 인한 최고기온 상승을 예상할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 2009년도 기상청 기술역량기반 구축사업(기후시나리오 상세화기술 개발)의 지원으로 수행되었으며, 제 1 저자의 경희대학교 대학원 생태시스템공학과 석사학위논문 중 일부이다.

REFERENCES

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, 1998: *Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements – FAO irrigation and drainage paper 56*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 79-80.
- Cho, H. M., K. W. Chung, and C. H. Cho, 1987: The relationship between the amount of solar radiation at ground level and related meteorological parameters. *Journal of the Korean Meteorological Society* **23**, 26-34.
- Frohlich, C., 1998: The sun's total irradiance: cycle, trends and related climate change uncertainties since 1976. *Geophysical Research Letters* **23**, 4377-4380.
- Houghton, J., 2005: Global warming. *Reports on Progress in Physics*. **68**, 1343-1403.
- Hulme, M., Z. C. Zhao, and J. Tao, 1994: Recent and future climate change in East Asia. *International Journal of Climatology* **14**, 637-658.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007: *Climate Change 2007: The physical science basis*. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the IPCC. Cambridge University Press, UK.
- Kalnay, E., and M. Cai, 2003: Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature* **423**, 528-530.
- Kari, T. R., P. D. Jones, R. W. Knight, G. Kukla, N. Plummer, V. Razuvayev, K. P. Gallo, J. Lindsey, R. J. Charlson, and T. C. Peterson, 1993: Asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature. *Bulletin of the American Meteorological Society* **74**, 1008-1022.
- Kim, S. W., S. C. Yoon, A. Jefferson, J. A. Ogren, E. G. Dutoon, J. G. Won, Y. S. Ghim, B. I. Lee, and J. S. Han, 2004: Aerosol optical, chemical and physical properties at Gosan, Korea during Asian dust and pollution episodes in 2001. *Atmospheric Environment* **39**, 39-50.
- Lean, J., 1998: Climate forcing by changing solar radiation. *Journal of Climate* **11**, 3069-3094.
- Lee, H. H., Y. S. Kim, and Y. H. Han, 1995: Relationship between atmospheric transmissivity and air pollution in Korea. *Journal of the Korean Environmental Sciences Society* **4**, 437-446.
- Power, H. C., 2003: Trends in solar radiation over Germany and assessment of the role of aerosols and sunshine duration. *Theoretical and Applied Climatology* **76**, 47-63.
- Ramanathan, V., P. J. Crutzen, J. T. Kiehl, and D. Rosenfeld, 2001: Aerosols, climate, and the hydrological cycle. *Science* **294**, 2119-2124.
- Reid, G. C., 1997: Solar forcing of global climate change since the mid-17th century. *Climatic Change* **37**, 391-405.
- Scafetta, N., and B. J. West, 2006: Phenomenological solar contribution to the 1900-2000 global surface warming. *Geophysical Research Letters* **33**, L05708.
- Streets, D. G., Y. Wu, and M. Chin, 2006: Two decadal aerosol trends as a likely explanation of the global dimming/brightening transition. *Geophysical Research Letters* **33**, L15806.
- Stone D. A., and A. J. Weaver, 2003: Factors contributing to diurnal temperature range trends in twentieth and twenty-first century simulations of the CCCma coupled model. *Climate Dynamics* **20**, 435-445.
- Wild, M., H. Gilgen, A. Roesch, A. Ohmura, C. N. Long, E. G. Dutton, B. Forgan, A. Kallis, V. Russak, and A. Tsvetkov, 2005: From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at Earth's surface. *Science* **308**, 847-850.
- Wild, M., A. Ohmura, and K. Makowski, 2007: Impact of global dimming and brightening on global warming. *Geophysical Research Letters* **34**, L04702.
- Yun, J. I., 2002: Urbanization effect on the observed warming in Korea during the recent half century. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **4**, 58-63.