

2003년 5월 러시아지역에서 발생한 산불로 인한 스모크 에어로졸 플룸의 영향

Impact of the Smoke Aerosol from Russian Forest Fires on the Atmospheric Environment over Korea during May 2003

이권호 · 김정은 · 김영준* · 김 준¹⁾

광주과학기술원 환경공학과, 환경 모니터링 신기술 연구센터

¹⁾연세대학교 대기과학과

(2003년 12월 18일 접수, 2004년 9월 23일 채택)

Kwon Ho Lee, Jeong Eun Kim, Young Joon Kim* and Jhoon Kim¹⁾

Advanced Environmental Monitoring Research Center,

Department of Environmental Science & Engineering,

Kwangju Institute of Science & Technology

¹⁾*Department of Atmospheric Science, Yonsei University*

(Received 18 December 2003, accepted 23 September 2004)

Abstract

Extensive forest fires occurred across the border in Russia, particularly east of Lake Baikal between the Amur and Lena rivers in May 2003. These forest fires released large amounts of particulates and gases into the atmosphere, resulting in adverse effects on regional air quality and the global radiation budget. Smoke pollution from the Russian fires near Lake Baikal was sometimes transported to Korea through Mongolia and eastern China. In this study ground based radiation (visible and UV-B) data measured during May 2003 at Seoul and Kwangju were analyzed to estimate smoke aerosol impacts on solar radiation. Surface criteria air pollutants (PM_{10} , CO, O_3) data were also obtained from National Institute of Environmental Research (NIER) during smoke aerosol event period (19 May ~ 24 May 2003). Large Aerosol Optical Depth (AOD) 1.0 ~ 3.0 was observed during this period due to the influence of the long range transport of smoke aerosol plume from the Russian fires, resulting in short-wavelength direct aerosol radiative forcing of $-90 \sim -200 W/m^2$. These smoke aerosol plume caused decrease in surface UV-B radiation up to 80% and increase in PM_{10} concentration up to $200 \mu g/m^3$ exceeding the 24 hour ambient air quality standard.

Key words : Forest fire, Smoke, AOD, UV-B, Criteria pollutants

1. 서 론

* Corresponding author

Tel : +82-(0)62-970-3405, E-mail : yjkim@kjist.ac.kr

대기 중 에어로졸은 기후예측모델링에 있어 중요

한 불확실 인자로서 복사평형에 영향을 미치며 인체와 식물에 해로운 영향을 끼치기도 한다. 이러한 에어로졸은 중위도에 인구 밀집 지역에서 발생하는 인위적 에어로졸과 자연적으로 발생하는 에어로졸(먼지, 생체연소 등)로 구분될 수 있다. 인위적인 원인에 의하여 발생하는 에어로졸은 관련 법령의 기준과 배출원의 관리로 인하여 그 영향을 줄일 수 있으나 자연적인 원인에 의하여 발생하는 에어로졸은 발생에 측이 어렵고 때때로 국경을 넘어 국가간의 문제가 되기도 하므로 문제가 되고 있다. 특히 황사와 같은 자연현상은 그 동안의 많은 연구로 인하여 발생 메커니즘 및 이동경로가 알려져 있고 동북아시아 국가들이 협력하여 그 영향을 줄이기 위한 노력을 하고 있다. 그러나 우리나라에서 산불이나 추수 후 소각으로 인한 스모크(Smoke) 에어로졸에 대한 연구는 아직 미비한 편이다.

특히 생체연소(Biomass Burning)은 주로 탄소성분으로 이루어진 미세 입자와 미량기체를 발생함으로써 인하여 대기오염 및 지구복사수지에 영향을 미친다. Kaufman *et al.* (1997)은 Smoke Cloud and Radiation-Brazil (SCAR-B) 동안 항공관측을 통해 생체연소로 인한 스모크를 관측하였으며 Ross *et al.* (1998)은 생체연소가 심한 지역에서 약 -2 to -3 Wm^{-2} 의 복사강제효과를 계산하였고, Penner *et al.* (1998)은 전지구적 복사강제효과는 약 -0.3 Wm^{-2} 로 평가하였다. 이러한 생체연소의 주요한 원인중 하나인 산불은 캐나다(Wotawa and Trainer, 2000), 그리고 중국 북동부와 시베리아 남동부 지역(Cahoon *et al.*, 1994)에서 매년 발생하고 있는 것으로 보고되고 있다. 특히 우리나라와 가까운 러시아의 시베리아 지역은 바이칼 호수 인근지역에서 산불이 거의 매년 일어나고 있으며 2003년에 발생한 화재는 9,571건 이상이며 448,356 헥타르의 산림이 영향을 받았다[http://www.fire.uni-freiburg.de/GFMCnew/2003/0520/20030520_ru.htm]. 이러한 대규모 산불로 인해 발생한 대기오염물질은 기상조건에 따라 이동을 하게 되는데 북동아시아지역에 영향을 미치게 된다. Kajii *et al.* (2002)은 1998년 4월부터 10월까지의 시베리아 지역에서 발생한 산불영역을 인공위성 자료를 통하여 구분하였고 편서풍의 영향으로 산불 지역이 동쪽으로 이동하는 것을 밝혔으며 Kato *et al.* (2002)는 일본의 Happono (36.7° N, 137.8° N)에서 관측된 CO농도의 증가가

시베리아 지역에서 일어난 생체연소(biomass-burning)의 영향이라고 하였다. 이권호와 김영준(2004)은 2003년 5월에 러시아의 바이칼 호수와 극동지방에서 발생한 대규모 산불에 의한 스모크 에어로졸이 한반도로 이동하였음을 인공위성자료를 토대로 규명하였다.

본 연구에서는 2003년 5월에 발생한 러시아 지역의 대규모 산불로 인하여 발생한 스모크가 한반도에서 대기환경에 미치는 영향을 조사하였다. 그리고 러시아 산불로 인한 스모크 에어로졸이 한반도에서 지표면에 도달하는 태양복사 및 대기질에 미치는 영향을 정량화 하기 위하여 서울과 광주에서의 복사관측자료와 대기환경 기준물질 자료를 이용하여 분석하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 자료

2003년 봄부터 러시아에서 발생한 산불은 3월초부터 7월말까지 계속되었으며 5월은 이러한 산불로 인하여 발생한 대규모의 스모크 에어로졸 플룸(plume)이 한반도에 영향을 미치기도 하였다(이권호와 김영준, 2004). 본 연구에서는 그 영향이 가장 심했던 2003년 5월에 발생한 산불로 인한 에어로졸이 한반도에서 대기질 및 대기 복사에 미치는 영향을 분석하기 위하여 지상복사관측자료 및 대기오염 관측망 자료를 사용하였다. 우선 가시영역대의 태양 복사량 및 에어로졸 광학두께를 구하기 위하여 2003년 5월 한달간 서울(연세대학교 과학관 옥상)과 광주(광주과학기술원 신소재 공학과 옥상)에서 회전 차폐판 복사계(RSR: Rotating Shadowband Radiometer; Quantum센서, LI-190SA; LI-COR, 1986)로 관측된 광합성 유효 복사량(PAR: Photosynthesis Affective Radiation, 유효파장 : 400-700 nm)을 구하였으며 전천(Global) 및 산란(Diffuse)일사량을 측정하였으며 직달(Direct)일사량은 전천일사량으로부터 산란일사량을 뺀 값을 사용하였다.

그리고 스모크 에어로졸이 자외선영역의 복사량에 미치는 영향을 알아보기 위하여 마찬가지로 서울과 광주에서의 5월 한달 동안의 UV-B관측자료를 사용하였다. 서울에서 사용된 UV-B 관측자료는 UV-B Biometer(미국 Solar Light Model 501)로 매 5분마다

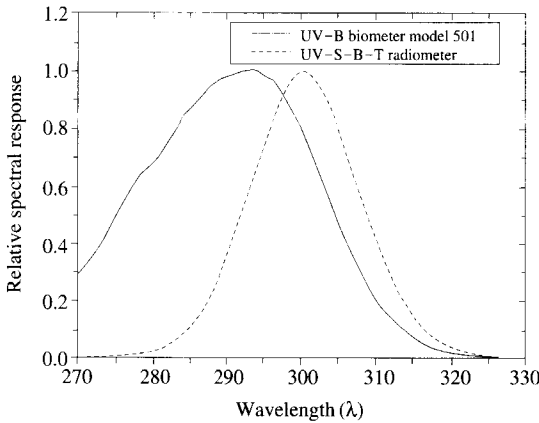


Fig. 1. Spectral response function compared between UV-B Biometer and UV-S-B Radiometer.

측정되었으며 광주에서는 UV-S-B-T radiometer (독일, Kipp & Zonen)로 측정된 자료이다. 두 기기의 상대 반응 함수(Relative Response Function)는 그림 1과 같으며 UV-S-B radiometer의 상대 반응함수가 약간 가시광선영역으로 치우쳐 있으므로 절대적인 관측량은 UV-B Biometer 보다 많게 된다. 그리고 상대반응함수가 가중된 복사량은 다음식에 의하여 계산할 수 있다.

$$UVB = \int_{280}^{315, 320} R(\lambda) \cdot I(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

여기서 $R(\lambda)$, $I(\lambda)$ 는 각각 파장 λ 에서의 상대반응함수와 UV-B 관측 값을 나타내며 UV-B Biometer는 320 nm, UV-S-B-T Radiometer는 315 nm 까지의 범위내에서 계산을 하게 된다. 이러한 상대반응함수의 차이로 인하여 두기기가 관측하는 태양 복사량은 약 2배 정도의 차이로 UV-S-B-T Radiometer가 높게 나타난다.

마지막으로 서울과 광주의 대기질 비교를 위하여 국립 환경연구원에서 제공받은 대기오염 관측망 자료를 이용하였다. 대기오염 관측망 자료는 5가지 기준물질중 생체연소와 관련이 있는 PM₁₀, CO, O₃를 분석하였으며 서울과 광주에서 시정이 현저하게 저하하였던 2003년 5월 18일부터 23일까지의 1시간 평균 관측 자료를 획득하였다. 스모크 에어로졸의 영향을 파악하기 위하여 비교적 도심지에서 떨어진 서

울의 관악산과 광주의 무등산 근처에 위치한 두암동에서 관측된 자료를 사용하였다.

2.2 방법

회전 차폐판 복사계로 관측된 자료를 이용하여 에어로졸광학깊이를 구하기 위하여 다음의 Beer-Bouguer-Lambert 법칙을 사용하였다.

$$I_{\lambda} = I_0 \exp[-\tau_{tot} \cdot m] \quad (2)$$

여기서 I_{λ} 는 회전 차폐판 복사계에 의해 관측된 직달 일사량이고, I_0 는 대기권 밖의 직달 일사량, I_{tot} 는 전 대기광학깊이(total atmospheric optical depth, TOD), m 은 상대 광경로(relative optical airmass)이다. 여기에서 I_0 를 구하기 위하여 랭리 회귀법(Langley Regression Method)을 사용하였으며 에어로졸 광학깊이(τ_a)는 다음의 식을 사용하여 계산된다.

$$\tau_a = \tau_{tot} - \tau_{ozone} - \tau_{ray} - \tau_w \quad (3)$$

여기서 $\tau_{ozone} \cdot \tau_{ray} \cdot \tau_w$ 는 각각 오존, Rayleigh 산란, 수증기에 의한 광학깊이를 나타낸다. 가시영역에서는 수증기에 의한 영향이 매우 적으므로 τ_w 는 무시할 수 있으며 τ_{ozone} 은 TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) 오존관측자료와 WMO 관측자료를 이용하여 다음식을 이용하여 계산하였다.

$$\tau_{ozone} = K_o \times O_3 \quad (4)$$

여기서 K_o 는 오존 체적 흡수계수이고 O_3 오존 전량이다. τ_{ray} 는 기상청에서 제공하는 대기압자료를 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$\tau_{ray} = 0.008569^{-4} \cdot (1 + 0.0113\lambda^{-2} + 0.00013\lambda^{-4}) P/P_o \quad (5)$$

여기서 λ 는 파장, P 는 대기압, P_o 는 표준대기압으로서 1013.25 mb이다.

따라서 서울과 광주에서 회전 차폐판 복사계로 관측된 자료를 이용하여 계산된 에어로졸 광학깊이와 가시광선영역대의 복사관측자료를 사용하여 일변화, 지역별 특징 및 에어로졸 광학 깊이에 따른 변화의 특징을 밝혔다.

한편 연세대학교에서 UV-B Biometer로 매 5분마다 관측된 UV-B 자료는 최소홍반점(minimum erythema dose; MED)의 단위를 가지고 있으므로

1MED = 210 J/m²의 에너지 단위로 환산한 다음 W/m²의 값으로 환산하여 사용하였다(WMO, 1994; Solar Light, 1993). 그리고 지상에서 관측된 UV-B 복사량은 대기중에 존재하는 오존의 영향을 많이 받으므로 이에 대한 영향을 보정하기 위하여 Madronich's (1993)모델을 사용하여 오존에 의한 영향을 제거하였다.

3. 결 과

3. 1 러시아 산불현황 및 이동궤적 분석

2003년 봄은 황사발생현황이 이례적으로 매우 적었으나 러시아 지역에서는 수많은 산불로 인하여 대규모의 오염물질이 대기중으로 방출되었다. 산불에 의해 발생한 스모크는 위성영상에서 쉽게 관측이 되며 산불이 발생한 인근지역의 적외선 영역의 온도차이를 이용한 화재위치도 인공위성자료로 확인할 수 있다. 그림 2의 미국 NASA인공위성인 TERRA와 AQUA로 2003년 5월 19일 12:45에 관측된 자료를 이용하여 산불분석자료와 칼라 합성영상을 보면 러시아 국경인근지역에 붉은 점으로 표시되는 매우 많은 산불 지역이 산재해 있고 각각의 산불 지역에서 내뿜는 스모크의 양이 대규모로 이동하고 있는 모습을 보여주고 있다(<http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/gallery/?2003140-0520/Russia.A2003140.0430.2km.jpg>). 산불로 인하여 발생한 스모크 에어로졸은 만주지역을 대부분 뒤덮고 있으며 북한의 일부지역도 그 영향 하에 위치하고 있다. 한편 2003년 5월 20일 13:30에 관측된 영상에서는 스모크 에어로졸 영역이 남하하여 한반도 중부 지역까지도 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다. 또한 러시아 지역 산불로 인한 스모크 에어로졸은 지역규모의 움직임을 보이고 있고 산불 발생원에서부터 편서풍 기류를 타고 한반도를 통과하면서 태평양을 지나 아메리카 대륙에도 영향을 미치고 있는 것이 인공위성 영상을 통하여 보여지고 있다.

또한, 한반도에 도착하는 기단의 성질과 이동경로를 파악하기 위하여 미국의 NOAA/ARL에서 개발한 HYSPLIT-4 (HYbrid Single-Particle Lagrangian Intergrated Trajectory) 모델을 이용하여 유적선 분석을 하였으며(Draxler, 1999), 기상입력자료로서는 미

국 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)의 GDAS (Global Data Assimilation System) 자료(Kanamitsu, 1989)를 북반구에 대해 극평사도법을 이용하여 129×129 격자 간격으로 변환한 FNL (Final Run) 자료를 사용하였다. 모델 수행 조건은 2003년 5월 18일부터 5월 24일 13시에 서울과 광주에 도착하는 10일전까지의 등온위(Isentropic) 조건과 지표면에서 가까운 500m와 상층의 4,000m의

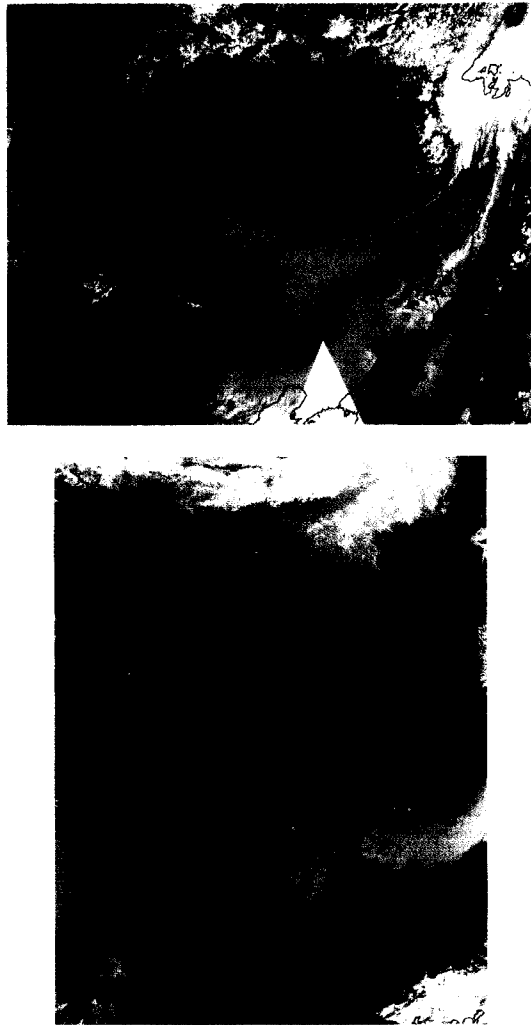


Fig. 2. Fires and smoke in Russia and China on (up) 19 May 2003 and (down) 20 May 2003 from Terra and Aqua combination image (Image source: NASA Rapid Response System).

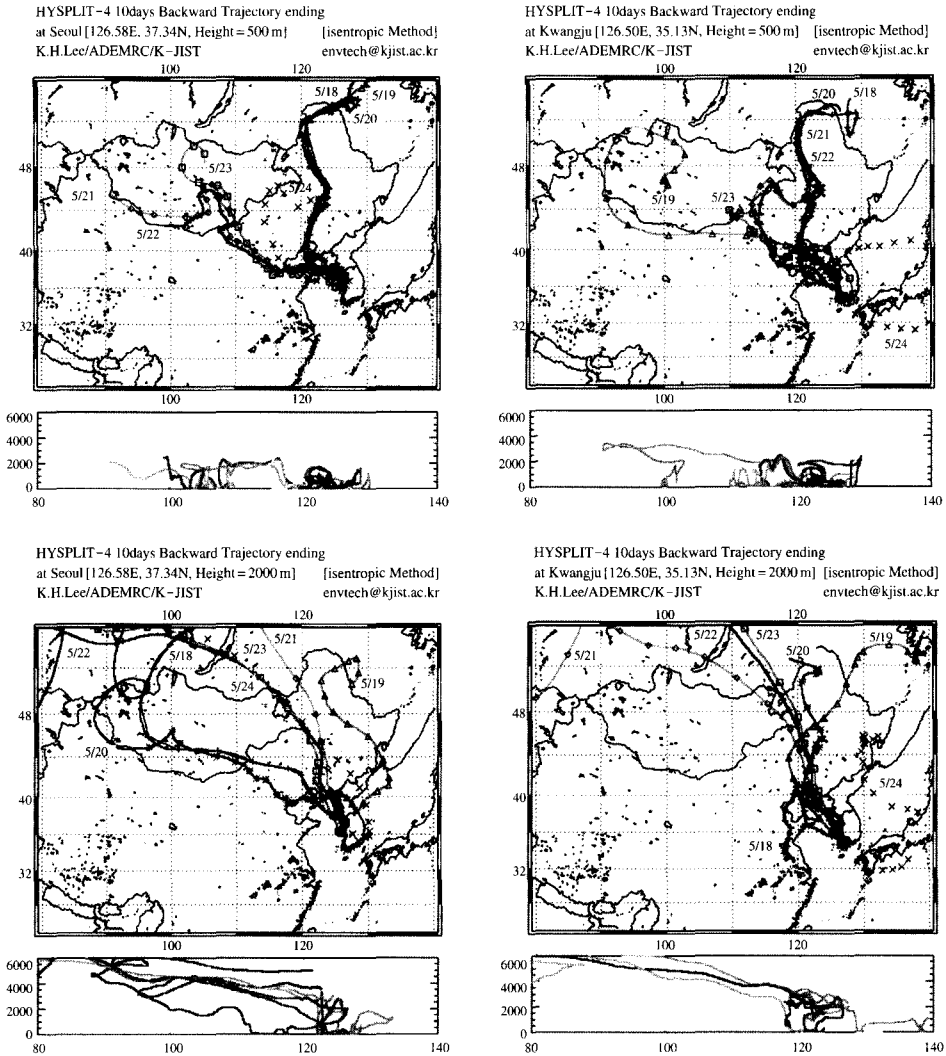


Fig. 3. HYSPLIT-4 backward trajectory result for 20 May and 23 May 2003.

기단에 대하여 각각 역 궤적분석을 수행하였다. 그림 3은 등온위면에서의 역 궤적분석결과를 나타낸 것으로 5월 24일을 제외한 대부분의 유적선들이 산불발생지역을 통과하고 있는 것으로 나타났으며, 화재발생지역에서 계속해서 배출되고 있는 스모크가 한반도에 영향을 유발할 가능성이 있음을 보여준다.

3.2 스모크 에어로졸의 광학특성

그림 4는 2003년 5월 한 달간 서울과 광주의 RSR로 관측된 에어로졸 광학깊이를 나타낸 시계열 그래

프이다. 전체적으로 서울이 광주보다 높은 값을 보이며 서울은 5월 20일에 최대 2.73, 광주는 5월 12일에 최대 1.91의 값을 나타냈으나 20일에 또 한번 높은 값(1.44)을 나타내면서 점차 줄어들고 있는 양상을 나타내고 있다. 그리고 전국적으로 강수가 있었던 5월 7일, 25일, 그리고 30일의 다음날엔 거의 최소값으로 배경농도의 에어로졸에 의한 결과를 나타내고 있다.

그림 5는 구름에 의한 영향이 제거된 상태에서 광경로에 의한 복사감소효과를 제거하기 위하여 태양 천정각으로 정규화된 550 nm의 에어로졸 광학깊이

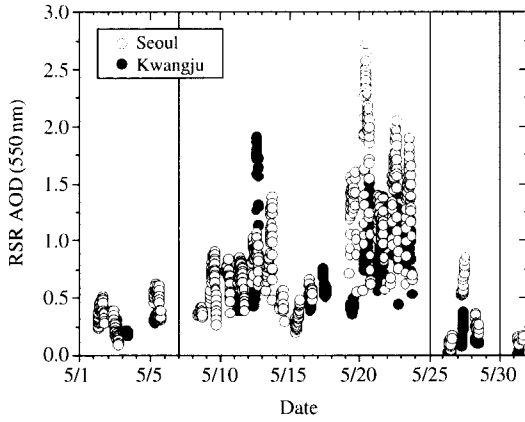


Fig. 4. RSR measured AOD at Seoul (circle) and Kwangju (triangle) during May 2003.

와 광합성 유효 복사량과의 관계를 나타낸 그래프이다. 여기서 각 선형회귀 곡선의 기울기는 에어로졸 광학깊이에 따라 지표면에 도달하는 복사량의 변화량을 의미하므로 단위는 지표면에서 단위 에어로졸 광학깊이 당 직접적인 에어로졸 복사 강제(Direct Aerosol Radiative Forcing)로 표현될 수 있다. 서울과 광주에서 2003년 5월 한달간 에어로졸에 의해 나타나는 복사강제 효과는 각각 $-87.28 \text{ W/m}^2/\tau_{550}$ 과 $-92.07 \text{ W/m}^2/\tau_{550}$ 로 나타났다. 앞서 그림 4에서 나타난 바와 같이 스모크 에어로졸에 의해 증가하는 에어로졸 광학깊이의 값이 대개 1.0 이상의 값들을 보이는 것을 감안해 보면 스모크 에어로졸에 의하여 약 $-90 \sim -200 \text{ W/m}^2$ 정도의 광합성 유효 복사량이 에어로졸에 의하여 지표면에 도달하지 못하는 것이다.

그림 6은 직달 일사량과 산란 일사량의 비율을 나타낸 시계열 그래프로서 에어로졸에 의한 산란효과가 증가할수록 직달 일사량은 감소하는 대신에 산란 일사량이 증가하게 된다. 스모크 에어로졸에 의한 영향이 많았던 5월 19일~24일간은 다른 경우보다도 직달/산란 일사량 비율이 현저하게 감소하는 것으로 보아 직달 일사량은 크게 감소하고 산란일사량은 증가하여 에어로졸의 효과를 나타내고 있음을 증명하고 있다.

그림 7은 에어로졸의 영향이 비교적 적었던 5월 2일과 에어로졸의 영향이 컸던 21일의 RSR로 관측된 광주지역에서 단파장영역의 태양 복사량을 나타낸

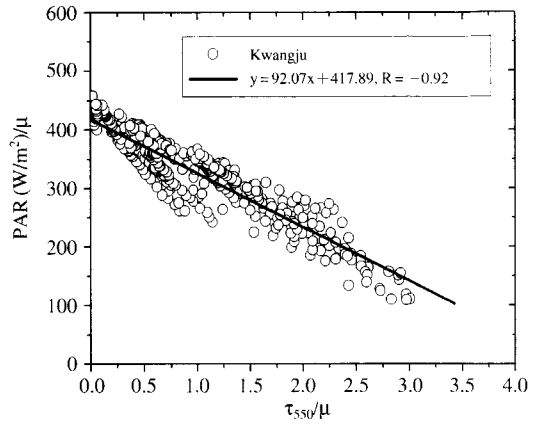
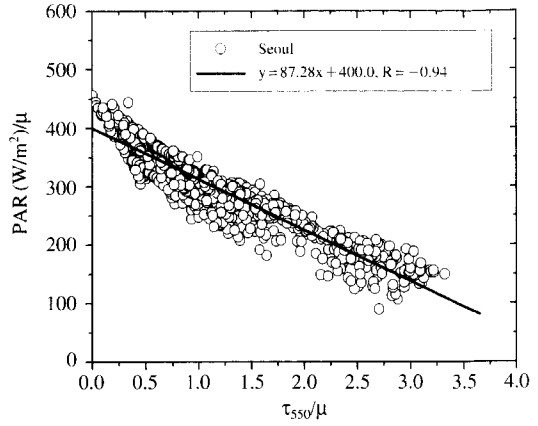


Fig. 5. Relationship between downwelling PAR and τ_{550} during cloud free conditions at Seoul (up) and Kwang-ju (down) during May 2003.

다. 대기중에 에어로졸이 존재함으로써 인하여 에어로졸에 의해 산란효과가 커져서 직달 일사량은 감소하는 대신에 산란일사량은 증가하는 것을 나타내고 있다. 감소된 직달 일사량은 약 -89.95 W/m^2 이며 증가된 산란일사량은 약 115.54 W/m^2 산란일사량이 직달 일사량에 비해 더 크게 나타난다. 그리고 광 경로에 따라 정규화된 직달 일사량은 약 -122.46 W/m^2 로서 에어로졸에 의해 크게 영향을 받고 있음을 보여준다. 따라서 정규화된 직달 일사량의 감소량과 증가된 산란일사량의 차이인 -6.92 W/m^2 는 에어로졸의 산란효과에 따른 지표면에서의 복사수지 감소현상을 증명하는 것이다.

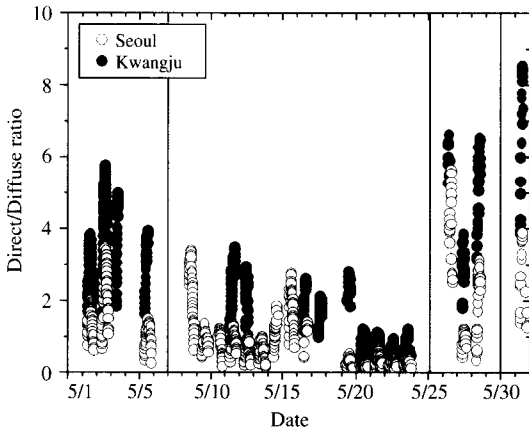


Fig. 6. Direct/diffuse ratio of solar irradiation at Seoul and Kwangju during May 2003.

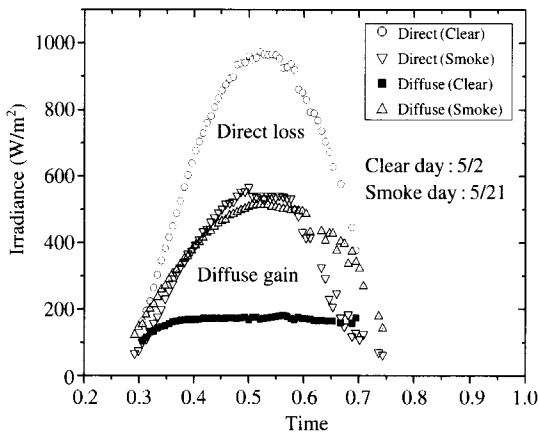


Fig. 7. Direct and diffuse short wavelength solar radiation data for Kwangju.

3. 3 지표 자외선(UV-B)

그림 8은 서울에서 5분 간격으로 관측된 UV-B와 광주에서 1분 간격으로 관측된 UV-B복사 자료로서 5월 한달간 지표 자외선 복사량이 가장 많았던 날(서울: 5월 28일, 광주: 5월 11일)과 스모크 에어로졸에 의한 영향이 심했던 5월 18일~24일까지의 지표 자외선 복사량의 일변화 특징을 나타내었다. 만약 관측 자료 중 구름에 의한 영향이 존재한다면 일변화가 상당히 불규칙적으로 분산되어 있는 모습을 나타내지만 그림의 일변화 양상은 부드러운 곡선

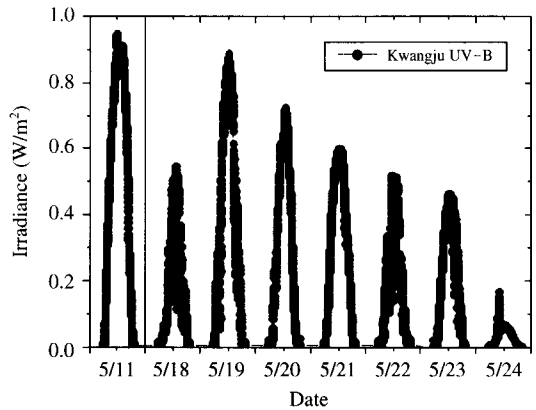
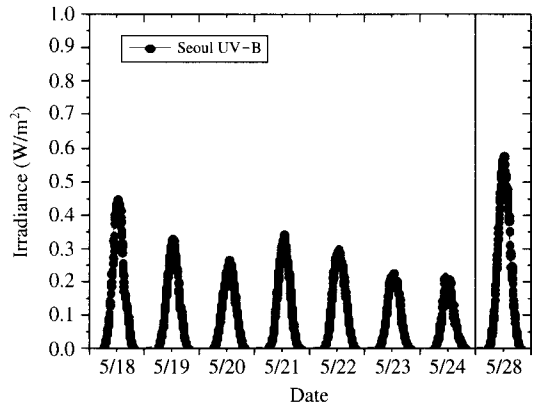


Fig. 8. Time series of surface measured UV-B radiation at Seoul and Kwangju during smoke aerosol period.

Table 1. Maximum, mean and standard deviation of daily UV-B irradiance (mW/m^2) during smoke aerosol period (19 May ~ 24 May 2003).

	Max	Mean	STD	Peak (day)
Seoul	177.6	126.7	32.1	447.7 (5/18)
Cho <i>et al.</i> (2001)	230.3	154.2	33.4	
Kwangju	399.0	235.7	119.7	889.3 (5/19)

형태를 취하고 있어 구름에 의한 영향은 적었던 것으로 파악된다. 그리고 비교적 에어로졸의 영향이 적었던 날을 배경농도로 가정한다면 스모크 에어로졸에 의해 지표 자외선 복사량이 감소함을 알 수 있다.

표 1에서는 5월 18일~24일의 일 평균 UV-B 복사량을 비교한 것으로 서울의 UV-B 관측 값은 조희

Table 2. Daily maximum UV-B irradiance(mW/m²) and relative differences during smoke aerosol period. Clear day for Seoul was 28 May and for Kwangju was 11 May 2003.

Date	Seoul		Kwangju	
	UV-B	RD (%)	UV-B	RD (%)
5/18	447.7	22.6	548.2	42.4
5/19	331	42.8	889.3	6.6
5/20	265.95	4.0	723.2	24.0
5/21	343.4	40.6	602.3	36.7
5/22	298.9	48.3	520.9	45.3
5/23	228.5	60.5	465.5	51.1
5/24	216.7	62.5	167.8	82.4
Clear Day	578.6		951.9	

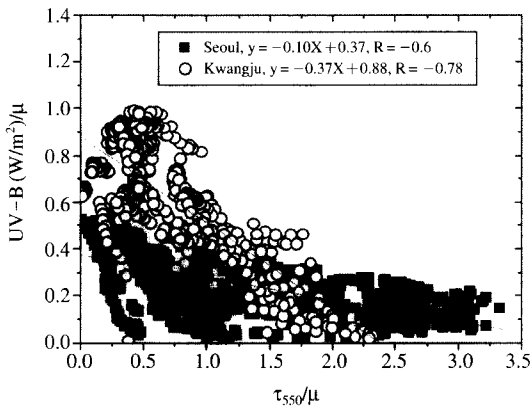


Fig. 9. Relationship between surface UV-B and τ_{550} during cloud free conditions at Seoul and Kwangju during May 2003.

구 등 (2001)이 1994년부터 2000까지 서울에서 관측한 5월 평균값보다 약 18% 낮게 나타나고 있어 스모크 에어로졸에 의한 영향이 있음을 알 수 있다. 한편 광주의 UV-B는 서울에서의 관측 값과는 상대 반응 함수특성차이로 절대적인 비교가 불가능 하지만 관측기간 중에 상대적으로 UV-B가 높았던 맑은 날의 관측 값으로 상대적인 비교를 한 결과를 표 2에 나타내었다. 여기서 UV-B 관측 값은 하루 중 복사량이 가장 많은 태양 남중시간대에 최고값을 선택한 것으로 두 지역 모두 맑은 날과의 차이가 시간이 지나면서 점차 증가하기 시작하고 있고 서울과 광주에서 24일에 최대 62.5%, 82.4%의 차이를 보이고 있다.

그림 9는 에어로졸에 의하여 지표면에 도달하는

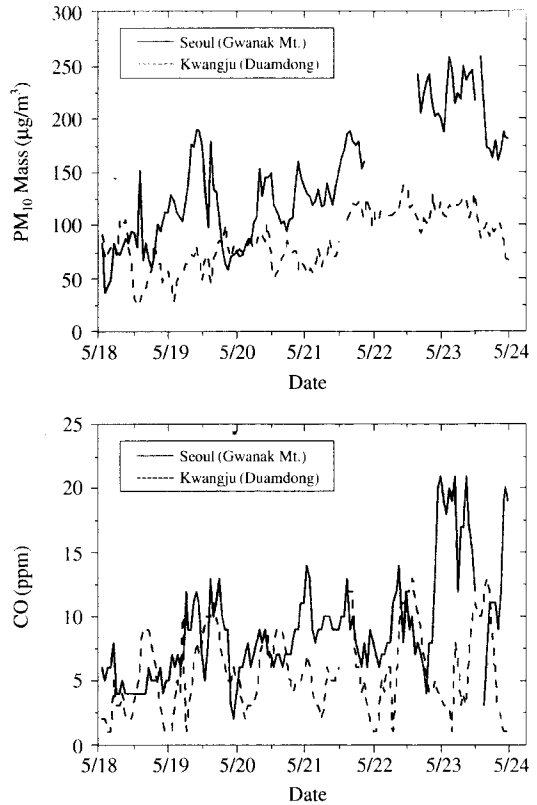


Fig. 10. Hourly PM₁₀ (up) and CO (down) concentration at Seoul and Kwangju.

UV-B의 감쇄정도를 알아보기 위하여 태양 천정각으로 정규화된 550 nm의 에어로졸 광학깊이와 UV-B 영역의 자외선 유효 복사량과의 관계를 나타낸 그래프이다. UV-B 영역에서의 서울과 광주에서 2003년 5월 한달간 에어로졸에 의해 나타나는 복사강제 효과는 각각 $-0.1 \text{ W/m}^2/\tau_{550}$ 과 $-0.37 \text{ W/m}^2/\tau_{550}$ 로 나타났다. 이러한 결과는 대기중의 에어로졸에 의하여 지표에 도달하는 UV-B 영역의 자외선이 감쇄되고 있음을 보이고 있다.

3. 4 대기환경기준물질

2003년 5월 한반도에서 스모크 에어로졸에 의한 사례일에 대하여 대기오염 측정망 자료를 국립환경연구원으로부터 제공받아 대기오염물질 중 PM₁₀과 CO의 시간평균농도를 시계열로 분석한 결과를 그림 10에 나타내었다. 2003년 5월 18~24일 사례에 대해

Table 3. Daily mean and maximum concentration of criteria pollutants during smoke aerosol period.

Date	PM ₁₀ (µg/m ³)		O ₃ (ppb)		CO (ppb)		AOD	
	Mean	Max	Mean	Max	Mean	Max	Mean	Max
Seoul								
5/18	82.08	151.00	28.46	61.00	488	800	-	-
5/19	122.04	189.00	14.96	49.00	838	1300	1.30	1.60
5/20	114.46	159.00	8.25	28.00	763	1100	1.90	2.73
5/21	147.00	188.00	17.79	45.00	929	1400	1.16	1.40
5/22	218.44	242.00	21.58	77.00	963	2100	1.54	2.05
5/23	208.22	258.00	21.78	84.00	1500	2100	1.40	1.91
Kwangju								
5/18	64.71	105.00	24.38	36.00	392	900	-	-
5/19	66.71	100.00	26.33	45.00	642	1100	0.42	0.51
5/20	74.96	101.00	26.29	41.00	579	900	1.01	1.51
5/21	89.14	125.00	25.50	45.00	536	1200	0.97	1.39
5/22	112.96	138.00	23.96	55.00	663	1300	1.11	1.42
5/23	103.46	129.00	27.71	58.00	592	1300	1.01	1.19

PM₁₀ 농도변화를 분석한 결과, 서울이 전반적으로 환경기준인 150 µg/m³ 이상의 값을 나타내는 경우가 많았으며 광주에 경우는 환경기준을 초과하지는 않으나 21일 이후에 100 µg/m³ 이상의 값을 나타내었다. 그리고 PM₁₀의 증가에 따른 변화양상이 CO의 변화양상과 비슷한 추세를 보이고 있어 서로 관련이 있는 것으로 보인다. 또한 서울에서는 PM₁₀의 증가와 함께 이온 성분중 K 양이온농도가 급격히 증가함으로써 에어로졸의 생성이 스모크 플룸의 영향과 관련이 있는 것으로 사료된다(이동수, Personal Communication).

표 3은 대기환경 기준물질과 에어로졸광학깊이의 일 평균값을 비교한 것으로 이것은 PM₁₀ 농도와 에어로졸 광학깊이는 서울이 광주보다 높은 값을 나타내고 있어 서울에서 더 큰 오염효과가 나타나고 있다. 그리고 서울에서는 19일부터 최고 관측 값이 151 µg/m³ 이상의 값을 나타내면서 증가하기 시작하지만 광주는 22일부터 최고 138 µg/m³ 이상의 값과 1 이상의 에어로졸 광학깊이 값을 나타내는 것으로 보아 북쪽에서 이동하는 스모크 에어로졸영역이 남쪽으로 이동하면서 광주에서는 이에 따른 시간차로 영향을 주는 것으로 사료된다.

한편 서울 및 광주에서의 오존농도는 일별로 그리 많은 변화가 나타나지 않고 있으며 월평균 농도(서울 : 24 ppb, 광주 : 26 ppb) 보다 오히려 낮은 농도를 보이고 있는 경우가 많았다. 한편 CO 농도는 두 지역 모두 적게는 2배에서 최고 4배 정도 농도 차이가

나고 있으며 에어로졸의 영향이 커지면 같이 증가하고 있으므로 생체 연소에 의한 영향을 받고 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

2003년 5월에 발생한 러시아 지역 산불로 인하여 발생한 스모크 에어로졸이 한반도에서 지표면 태양 복사 및 대기질에 미치는 영향을 분석하기 위하여 지상복사관측자료 및 대기오염 관측망 자료를 사용하였다. 인공위성 영상에 나타난 러시아 지역 산불 지역은 매우 넓은 영역에 걸쳐 있으며 그로 인하여 발생하는 스모크 에어로졸은 매우 심각한 것으로 나타났다. 이러한 스모크 에어로졸은 기류에 따라 이동을 하게 되며 역 궤적분석결과 한반도로 유입될 가능성을 가지고 있었다. 특히 2003년 봄에는 황사현상이 극히 적었던 경우이지만 이러한 스모크 에어로졸이 영향을 미친다면 대기질 관리측면에서 미세입자의 증가로 인하여 더욱 심각한 문제가 발생할 수 있다. 특히 5월 18일~24일에 이르는 기간은 상당한 규모의 스모크 플룸이 한반도를 뒤덮고 있는 모습이 인공위성자료로 관측 및 분석이 되었으며 20일~22일은 스모크 플룸이 남한지역을 뒤덮고 있는 모습이 인공위성 자료에서 뚜렷이 보인다. 또한 지상에서 관측된 에어로졸 광학두께분석 결과도 이 기간 동안에 상당히 높은값(>1.0)을 나타내어 이 기간이 스모크에 의한 golden event로 사료된다.

이 기간 동안 지상에서 가시영역의 복사관측결과 스모크 에어로졸에 의하여 서울은 5월 20일에 최대 2.73, 광주에 20일에 1.44의 높은 값을 나타냈으며 이러한 에어로졸에 의한 영향으로 지표면에 도달하는 복사량은 현저히 감소되어 약 $-90 \sim -200 \text{ W/m}^2$ 정도의 복사량이 영향을 받는 것으로 나타났다. 이것은 스모크 에어로졸로 인하여 직달 일사량의 감소량이 산란 일사량의 증가량보다 더욱 많아지기 때문이다. 자외선 영역에서의 UV-B 관측결과 스모크 에어로졸은 자외선 복사에도 상당한 영향을 미치고 있으며 여기서 태양 남중시간대에 최고값을 선택한 것으로 두 지역 모두 맑은 날과의 차이가 시간이 지나면서 점차 증가하기 시작하고 있고 서울과 광주에서 24일에 최대 62.5%, 82.4%의 차이를 보이고 있다.

한편, 복사관측자료에 의하면 5월 20일에 에어로졸에 의한 영향이 큰 것으로 나타났으나 대기오염관측망 자료에 의하면 지표면에서의 PM_{10} 농도는 22~23일경에 최대치를 보이고 있어 에어로졸의 연직 구조 분포에 의한 영향으로 이러한 차이점이 생기는 것으로 판단할 수 있다. 그리고 생체연소의 대표적인 오염 인자인 CO 농도는 스모크 에어로졸 기간 동안에 서울과 광주에서 적게는 2배에서 최고 4배 정도 농도 차이가 나고 있으며 에어로졸의 영향이 커지면 같이 증가하고 있으므로 소각과 관련된 영향이 있음으로 판단된다.

결론적으로, 2003년 5월에 러시아 산불에서 발생한 스모크는 인공위성자료 및 역궤적분석을 통하여 한반도 지역으로 이동하는 것이 증명되었다. 따라서 한반도로 이동한 스모크 에어로졸 플룸에 의하여 서울과 광주에서 관측된 복사 및 대기환경 기준물질 관측 자료를 이용하여 스모크 에어로졸이 대기환경(지표 복사량과 대기질)에 미치는 영향을 분석하였으며 분석 결과 스모크로 인하여 상당한 복사 감쇄 효과가 나타났으며 지상에서도 스모크로 인한 에어로졸농도의 증가와 함께 소각과 관련된 기체상 물질도 증가함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 광주과학기술원 환경 모니터링 신기술

연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금 및 두뇌한국 21 사업의 일환으로 이루어진 것입니다.

참 고 문 헌

- 조희구, 이방용, 이준석, 박선욱(2001) 한국 전역의 지표 홍반 자외선 복사의 계절기후, 한국기상학회지, 37(5) 525-539.
- 이권호, 김영준(2004), 인공위성 자료와 AERONET 관측자료를 이용한 러시아산불 시 발생한 에어로졸의 중장거리 모니터링, 한국 대기환경학회지, 20(4) 437-450.
- Cahoon, D.R., Jr., B.J. Stocks, J.S. Levine, W.R. Cofer, III, and J.M. Pierson (1994) Satellite analysis of the severe 1987 forest fires in northern China and southeastern Siberia, *J. Geophys. Res.*, 99, 18627-18638.
- Draxler, R.R. and G.D. Hess (1998) An Overview of the Hysplit_4 Modeling System for Trajectories, Dispersion, and Deposition, *Aust. Met. Mag.*, 47, 295-308.
- Kajii, Y., S. Kato, D.G. Streets, N.Y. Tsai, A. Shvidenko, S. Nilsson, N.P. Minko, N. Abushenko, D. Altyntsev, and Tamara, V. Khodzer (2003) Boreal Forest Fires in Siberia in 1998: Estimation of Area and Emissions of Pollutants by AVHRR Satellite Data, *J. Geophys. Res.*, 108, doi:10.1029/2001JD001078.
- Kato, S. P. Pochanart, J. Hirokawa, Y. Kajii, H. Akimoto, Y. Ozakib, K. Obib, T. Katsuno, D. Streetsd N.P. Minko (2002) The influence of Siberian forest fires on carbon monoxide concentrations at Happo, Japan, *Atmos. Environ.*, 36, 385-390.
- Kaufman, Y.J., P.V. Hobbs, V.W.J.H. Kirchhoff, P. Artaxo, L.A. Remer, B.N. Holben, M.D. King, D.E. Ward, E.M. Prins, K.M. Longo, L.F. Mattos, C.A. Nobre, J.F. Spinhirne, Q. Ji, A.M. Thompson, J.F. Gleason, S.A. Christopher, and S.-C. Tsay. (1997) Smoke, Clouds and Radiation-Brazil (SCAR-B) Experiment. *J. Geophys. Res. (SCAR-B Special Issue)*, 103, 31783-31808.
- LI-COR (1986) LI-COR radiation sensors, Introduction Manual.
- Madronich, S. (1993) The atmosphere and UV-B radiation at ground level, in *Environmental UV Photobiology*, edited by A. R. Young, 00.1-39, Plenum Press,

- New York.
- Penner, J.E., C.C. Chuang, and K. Grant (1998) Climate forcing by carbonaceous and sulfate aerosols, *Clim. Dyn.*, 14, 839–851.
- Ross, J.L., P.V. Hobbs, and B. Holben (1998) Radiative characteristics of regional hazes dominated by smoke from biomass burning in Brazil: Closure tests and direct radiative forcing, *J. Geophys. Res.*, 103, 31925–31941.
- WHO (1994) *Environment Health Criteria 160. Ultraviolet Radiation*, WHO, Geneva, 352pp.
- Wotawa, G. and M. Trainer (2000) The influence of Canadian forest fires on pollutant concentrations in the United States. *Science*, 288, 324–328.