동북아시아 지역의 바이오매스 연소 활동이 지역 대기 환경에 미치는 영향

이권호^{1*}

Impact of Northeast Asian Biomass Burning Activities on Regional Atmospheric Environment

Kwon-Ho LEE^{1*}

요 약

바이오매스 연소 활동은 인위적 또는 자연적인 원인에 의하여 발생하며 연소과정에서 다량의 대기오염물질을 배출한다. 이 과정에서 발생한 온실가스와 대기 에어러솔은 대기환경 저해와 기후변화의 원인으로 알려져 있으나 바이오매스 연소 활동에 대한 감시와 대기환경에 미치는 영향을 파악하기가 쉽지 않다. 본 연구는 동북아 지역의 바이오매스 연소 활동의 현황과 대기환경에 미치는 영향을 평가하고자, 지구관측 위성인 Terra/MODIS 관측 자료를 이용하였다. 바이오매스 연소의 발생 원인은 매우 다양하지만, 주 연료가 공급되는 토지피복과 계절별 변화에 의존하므로, 본 연구에서는 지역별 토지피복과의 관련성과 시간에 따른 현황과 변화 패턴을 분석하였다. 그 결과, 가장 넓은 영역을 차지하고 있는 녹지대 또는 상록수림 지역에서의 발생수가 많았으며, 경작지에도 많은 발생횟수를 나타내었다. 그리고 대기 오염물질 중 하나인 대기 에어러솔의 상대적인 양을 나타내는 에어러솔 광학두께자료와 연소 자료와 비교결과는 두 산출물간 뚜렷한 연중 변화와 관련성이 있는 것으로 나타났다. 즉, 바이오매스 연소 활동이 지역 대기환경에 미치는 영향을 증명하였으며, 중국대륙에서 발생빈도가 증가하고 있어 지역 대기환경 및 기후변화에 영향을 줄 것으로 예상된다.

주요어 : 바이오매스 연소, 인공위성, 에어러솔, 대기환경, 기후변화

ABSTRACT

Biomass burning activities(BBA) are caused by both natural and anthropogenic origins. Due to emissions of greenhouse gases and atmospheric aerosols during the burning process, BBA has been known to be one of important sources of atmospheric

---

2012년 1월 31일 접수 Received on January 31, 2012 / 2012년 3월 14일 수정 Revised on March 14, 2012 /
2012년 3월 17일 심사완료 Accepted on March 17, 2012

1 경일대학교 위성정보공학과 Dept. of Satellite Geoinformatic Engineering, Kyungil University

* 연락처 E-mail : khlee@kiu.ac.kr

pollution and the climate change. However, the monitoring of BBA and its effects on atmospheric environment are not simple. This study evaluates the trends of BBA and its impact on atmospheric environment by using earth observing satellite. The results show that the most BBA were found over ever green, green vegetation types, and irrigated land cover types in study region. The trends of BBA and aerosol optical thickness which represents relative aerosol loading in the atmosphere, show similar pattern. Aerosol increases caused by BBA highlight the effectiveness of these mechanisms and would affect the regional atmospheric environment and climate change.

KEYWORDS : *Biomass Burning, Satellite, Aerosols, Atmospheric Environment, Climate Change*

서론

바이오매스 연소(Biomass burning)는 탄소성분이 포함된 유기물이 연소하는 과정으로서 자연적 발화와 인위적인 발화에 의하여 발생한다. 이것은 주로 산불, 토지 정리, 농경지에서 추수 후 소각과 같은 원인으로 발생하므로 연소 후 토지피복 변화를 일으킨다. 그리고 바이오매스 연소의 결과로 배출되는 물질에는 대기 에어러솔, CO₂, N₂O, CH₄, CO, NO, NO₂ 등 다양한 성분이 포함되어 있어 직간접적으로 기후변화의 원인이 되고 있다(Jacob *et al.*, 1996; Hobbs *et al.*, 1997). 예를 들어, 남미 아마존 지역에서의 산림 제거 및 토지정리로 인한 바이오매스 연소 활동이 기후변화에 미치는 영향은 많은 연구에서 보고되었다(Koren *et al.*, 2004; Malhi *et al.*, 2008). Kaufman *et al.*(1997)은 브라질에서 항공관측을 통해 바이오매스 연소로 인한 스모크를 관측하였으며 Ross *et al.*(1998)은 바이오매스 연소 활동이 활발한 지역에서 약 $-2 \text{ Wm}^{-2} \sim -3 \text{ W/m}^{-2}$ 의 복사강제효과를 계산하였고, Penner *et al.*(1998)은 바이오매스 연소 활동으로 인한 전지구적 복사강제효과는 약 -0.3 Wm^{-2} 로 평가하였다. 이러한 바이오매스 연소의 주요한 원인중 하나인 산불은 캐나다(Wotawa and Trainer, 2000), 중국 북동부(Lee *et*

al., 2006)와 시베리아 남동부 지역에서 발생하는 것으로 알려져 있다. 그리고 주요 바이오매스 연소 지역인 러시아 툰드라 삼림지역에서 발생한 대기오염물질이 17일 동안 북반구를 이동한 결과(Damoah *et al.*, 2004)와 한반도의 지역대기에 영향을 미쳤던 것이 보고되기도 하였다(Lee *et al.*, 2005). 그리고 국내에서 산불과 관련된 피해지역을 분석하기 위하여 지리정보시스템을 활용하기도 하였다(이시영 등, 2002).

바이오매스 연소 활동의 강도와 계절별 변화를 분석하기 위하여 인공위성의 열적외 영상자료로부터 추출된 화재 픽셀수와 함께 자외선-가시광선 영역의 영상자료로부터는 배출된 대기오염물질인 대기 에어러솔 광학두께(Aerosol Optical Thickness; AOT) 자료가 흔히 이용된다(Lee *et al.*, 2005; Torres *et al.*, 2010). 대표적인 지구관측 위성인 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer(MODIS)나 Total Ozone Mapping Spectrometer(TOMS) 같은 인공위성 센서 자료는 이미 장기간에 걸친 지구관측 자료가 축적되어 있어 바이오매스 연소 활동을 평가하는데 적합하다. 예를 들어, Koren *et al.*(2007)은 아마존 지역에서 장기간 MODIS AOT 자료와 AVHRR 화재자료로부터 바이오매스 연소 활동에 대한 경년주기를 연구하였으며, Edward *et al.*(2004)은 시

베리아 지역의 바이오매스 연소 활동에 기인한 대기오염물질의 추이를 분석 하였다.

우리나라는 동북아시아 대륙에서 발생하는 바이오매스 연소 활동으로 발생한 대기 오염 물질이 이동하는 경로 상에 위치하고 있어 바이오매스 연소 활동의 강도와 기상조건에 따라 지역 대기환경의 영향을 받을 수 있다(이권호 등, 2002; 이권호, 2011). 특히 연소 활동으로 인한 스모크 에어러솔은 탄소성 화합물이 주성분으로서 인체 건강에 유해하므로 보건학적 중요성이 크며, 특히 대기 중에서의 복사강제(Radiative Forcing) 효과가 크게 나타남으로 인하여 지역 기후 변화에 영향을 줄 것이다. 그러나 이러한 현상은 국내에서 아직까지 현상 해석 및 정량적인 분석에 관한 연구가 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 한반도를 포함하는 동아시아 지역을 대상으로 장기간에 걸친 인공위성자료에 기반한 바이오

매스 연소 활동의 현황과 추세 분석, 그리고 지역 대기질에 미치는 영향을 정량화 하였다.

자료 및 방법

본 연구는 북위 $20^{\circ} - 55^{\circ}$, 동경 $100^{\circ} - 150^{\circ}$ 에 해당하는 동아시아 지역을 대상으로 2000–2010년 기간을 조사기간으로 하였다. 사용된 인공위성자료는 NASA에서 제공하는 Terra/MODIS 위성 분석 자료로서 바이오매스 연소 활동을 확인할 수 있는 일별 MOD14 Fire and Thermal Anomaly 자료(Justice *et al.*, 2002)와 대기 에어러솔 광학두께를 포함하는 월별 MOD08 대기분석 자료(Remer *et al.*, 2005)를 이용하였다. 그림 1은 본 연구에서 사용된 위성자료의 자료 처리 흐름도이다. 일별 MOD14자료는 월별 누적자료로 변환하였고, MOD08 자료에서는 대기 중 에어러솔 농도와 관련 있는 에어러솔

FIGURE 1. Schematic diagram of data processing in this study.

광학두께와 입자의 크기와 관련 있는 Ångström 지수만 추출하였다. 부가적으로 토지 피복자료인 GlobCover2009를 이용하여 토지 피복별 바이오매스 연소 활동을 분석하였다. 그리고 대기 에어로솔과 바이오매스 연소 활동과의 관련성을 찾기 위하여 시계열 분석과 공간상관분석을 수행하였다. 본 연구에서 사용된 위성자료 분석방법은 다음과 같다.

MOD14는 일별 자료로서 Terra/MODIS 센서의 열 적외 영상 관측 자료를 이용하여 주간과 야간을 구분하여 화재 발생 픽셀의 좌표 값과 화재로 인한 에너지량을 기록하며 공간해상도는 1km이다. MOD14 알고리즘은 MODIS 이전의 기상위성인 AVHRR과 TRMM VIRS에서 사용되었던 알고리즘(Kaufman *et al.*, 1990)의 후속 버전으로서 절대 감지법과 상대 감지법으로 구성되어 있다. 우선 절대 감지법은 MODIS의 4 μ m과 11 μ m 채널의 밝기온도(brightness temperature)를 사용하며 다음의 식 (1)과 (2) 중 한 가지 조건 이상을 만족하면 화재 픽셀로 분류한다.

$$T4 > 360^\circ \text{ K (야간 } 330^\circ \text{ K)} \quad (1)$$

$$T4 > 330^\circ \text{ K (야간 } 315^\circ \text{ K) 와} \\ T4 - T11 > 25^\circ \text{ K (야간 } 10^\circ \text{ K)} \quad (2)$$

여기서 T4, T11은 4 μ m과 11 μ m의 파장영역에서 밝기온도이다. 그리고 위의 조건을 만족하지 않는 경우엔 상대 감지법을 사용하며 화재가 없는 배경 픽셀값과 비교를 통하여 화재 픽셀을 찾아내는 방법이다. 여기에서는 배경픽셀은 다음의 식 (3)을 만족하는 픽셀을 선택하게 된다.

$$T4 < 325^\circ \text{ K (야간 } 315^\circ \text{ K),} \\ T4 - T11 < 20^\circ \text{ K (야간 } 10^\circ \text{ K)} \quad (3)$$

상대 감지를 위하여 다음과 같이 T4와 T4 - T11의 3 시그마 테스트를 수행한다.

$$T4 > \text{mean}(T4) + 3\sigma(T4) \quad (4)$$

$$T4 - T11 > \text{median}(T4 - T11) \\ + 3\sigma(T4 - T11) \quad (5)$$

그리고 위의 테스트에서 주간동안 태양반사도가 최고가 되는 sunglint 영역으로 인한 탐지 오류를 방지하기 위하여 근적외 채널의 반사도 값이 30%보다 큰 경우와 반사각이 40도보다 작은 경우를 제외한다.

MOD08 자료는 대기 에어로솔과 구름에 대한 정보를 포함한 월평균 자료로서 에어로솔의 경우, 해양 및 육지에서의 에어로솔 광학두께(파장 = 550nm)와 Ångström 지수, 그리고 에어로솔의 미세 분율(aerosol fine mode fraction) 등이 1도의 해상도로 포함되어 있다. MODIS는 36개의 채널에서 250m, 500m, 1km의 공간해상도를 가지는 다목적 지구관측 센서로서 에어로솔 산출물의 정확도는 육지 $\pm 0.05 \pm 0.20 \text{ AOT}$, 해양에서 $\pm 0.03 \pm 0.05 \text{ AOT}$ 를 가지는 것으로 보고되었으며(Remer *et al.*, 2005), 이러한 범위의 정확도는 기존의 인공위성 산출물보다 진보된 결과이다. MODIS 에어로솔 알고리즘은 육지와 해양으로 분리되어 서로 다른 과정을 거치게 되는데, 본 연구에서 다루어지는 바이오매스 연소는 주로 육지에서 발생하는 현상이므로 육지에 대한 알고리즘을 설명하고자 한다.

일반적으로 육지에서는 가시광 영역에서 지표반사도가 해양 또는 대기보다 높게 나타나므로 지표반사도가 비교적 적은 픽셀을 찾아 근적외 채널(2.13 μ m)과 두 개의 가시 채널(0.47 μ m, 0.66 μ m)의 비율을 이용하여 지표 반사도를 정하는 방법이 사용된다. 하지만 근적외 채널에서도 비교적 입자의 크기가 큰 에어로솔의 영향을 무시할 수 없고, 근적외/가시광 비율은 식생의 특성변화에 따라 지역적 또는 계절별로 다양한 값을 가지므로 에어로솔 분석에 있어 주요 오차의 원인이 되었다(Lee *et al.*, 2007). 따라서 이 문제점을 해결하고자 개선된 알고리즘에서는 식생지수와 산란각이

고려된 근적외/가시광 비율을 적용하여 지표 반사도 산정을 하고 있다(Levy *et al.*, 2007).

$$\rho_{0.66} = S_{0.66/2.12} \cdot \rho_{2.12} + Y_{0.66/2.12} \quad (6)$$

$$\rho_{0.47} = 0.49 \cdot \rho_{0.66} + 0.005 \quad (7)$$

여기서 $S_{0.66/2.12}$ 와 $Y_{0.66/2.12}$ 는 식생 지수 별로 정한 상수값($NDVI_{SW}$)과 산란각(θ)의 함수로 결정되는 상수이며 다음과 같은 식 (8)과 (9)에 의하여 결정된다.

$$S_{0.66/2.12} = NDVI_{SW} + 0.0002\theta - 0.27 \quad (8)$$

$$Y_{0.66/2.12} = 0.00025\theta + 0.033 \quad (9)$$

이와 같이 결정된 지표 반사도를 위성영상에서 제거한다. 그리고 미리 가정된 에어러솔

광학 특성값을 이용하여(위성반사도-AOT)와의 관계를 나타낸 테이블 값을 사용하여 최종적으로 에어러솔 광학두께값을 결정한다.

본 연구에서 사용된 에어러솔 광학두께값은 대기 중의 에어러솔 입자가 가지는 광 소산계수(light extinction)의 총 합으로 표현된다. 이것을 수치적으로 표현하면 대기권 전체에 대하여 각 고도별로 광 소산계수를 적분한 값이 되므로 식 (10)과 같다.

$$\tau = \int_0^{\infty} \sigma_{ext}(z) dz \quad (10)$$

여기서 광 소산계수(σ_{ext})는 빛 에너지가 입자에 의하여 산란(scattering) 또는 흡수(absorption)되는 양을 상대적인 값으로 표현한 상수이다. 소산계수는 입자의 성분과 크기에 따라 결정되어 지는데, 이는 입자의 성분에 따른 굴절률(m)과 크기(r)에 따른 산란

FIGURE 2. 연구 대상 지역(N20-55, E100-150)의 토지 피복도.

(NV: non vegetation, GL: grassland, VG: Vegetation, EG: Evergreen, MC: Mixed Crop, RC: Rainfed croplands, IC: Irrigated croplands).

효율이 달라지기 때문이다. 그리고 에어러솔 광학두께는 빛의 파장별로 다른 값을 가지게 되는데 이것은 입자의 산란계수가 파장별로 다른 값을 가지기 때문이며 주로 입자의 굴절률과 입자의 크기에 영향을 받기 때문이다. 이러한 성질을 이용하여 파장별 에어러솔 광학두께 값으로부터 입자의 크기분포에 대한 간접적인 정보를 획득할 수 있으며, 식 (11)과 같이 Ångström 지수를 정의하여 이 값이 커질수록 미세입자가 많아지는 것으로 알려져 있다.

$$\alpha = - \frac{\log \frac{\tau_1}{\tau_2}}{\log \frac{\lambda_1}{\lambda_2}} \quad (11)$$

MODIS 자료의 분석에 있어 부가적으로 토지피복별 바이오매스 활동을 분석하기 위하여 유럽 항공우주국(the European Space Agency; ESA)에서 제공하고 있는 전구적 토지피복 분류자료인 GlobCover2009 (Sophie *et al.*, 2010)를 사용하였다. GlobCover2009는 EnviSAT의 Medium Resolution Imaging Spectrometer(MERIS) 센서로 관측된 전 지구의 지표면을 대상으로 약 300m의 공간해상도를 가지며 22개의 서로 다른 토지 피복으로 세분류되어 있다. 본 연구에서는 22가지의 토지 피복 중 수계나 도심지역을 제외한 세분류 피복분류를 7종으로 단순화 하였다. 그림 2는 연구대상 지역에서의 토지피복 분류를 나타내며 본 연구에서 사용된 토지 피복은 총 7가지로서 서로 다른 색으로 표현되어 있다.

결과 및 고찰

1. 바이오매스 연소활동과 대기 에어러솔의 현황

본 연구에서 사용된 MODIS FC(Fire Count) 자료는 일단위의 픽셀자료로서 에어러솔 분석 자료와 시간해상도의 통일을 위해

주간 동안의 자료만 사용하였다. 그림 3은 연구대상 지역에서 MODIS FC의 연도별 누적량을 나타낸다. 여기에서는 MODIS FC는 매년 약 3만개 이상 발생하였으며, 각 연도별로 바이오매스 연소 활동은 주로 삼림지역인 시베리아와 경작지가 많은 중국 동부-남부 지역에서 발생하였음을 알 수 있다. 이 중 2003년의 경우 근래 11년 동안 최대 발생횟수인 총 112,847개의 FC 수를 기록하였으며, 이러한 결과는 시베리아 지역에서 최대로 발생한 화재로 인한 것이다. 또한 2000년대 후반 중국 지역의 FC값은 전반기 보다 많이 발생하였다.

또한 그림 2의 토지피복 분류 자료를 기반으로 하여 각 토지 피복 별로 산정된 총 누적 FC 값은 그림 4와 같다. 각각의 토지 피복별 FC 값은 상록수림(Evergreen)이 193,479개, 식생지(Vegetation) 144,429개, 혼합 경작지(Mixed Crop) 54,190개, 강우 경작지(Rain Crop) 24,830개, 관개 경작지(Irrigated Crop) 54,729개, 자연녹지(Grassland) 27,311개로서, 상록수림과 식생지가 다른 피복보다 월등히 많은 수의 바이오매스 연소 활동이 발생하였음을 나타낸다. 상록수림과 식생지의 경우 다른 토지 피복지 보다 면적이 넓고 연소의 연료가 되는 식물이 항상 존재하기 때문에 바이오매스 연소 활동이 활발하다. 반면에 경작지의 경우 인간의 활동이 토지정리나 추수 후 방화로 인하여 일반적인 자연녹지보다는 상대적으로 큰 분율을 가지고 있다.

한편, MOD08 에어러솔 자료는 가시광선 영역의 복사량 관측을 통하여 에어러솔 분석 알고리즘을 이용하여 산출한 결과물이다. 그림 5는 2000-2010년 동안 평균화된 MODIS 에어러솔 광학두께와 Ångström 지수 분포지도이다. 에어러솔 광학두께는 대기 중에 존재하는 상대적 에어러솔의 양을 나타내므로 분포지도에서 나타나는 결과를 보면 대기 에어러솔은 주로 동중국의 산업화된 지역과 사천성의 분지지역이 높은 것으로 나타나는데 이것은 바이오매스 연소 활동뿐만 아

FIGURE 3. 2000–2010년 기간 동안 연도별 누적 Fire Count

나라 인위적인 오염원에 의한 것으로 알려져 있다 (Li *et al.*, 2007). 특히 시베리아 지역의 에어러솔은 이 지역이 거주지와 비교적 산업화된 지역이 적은 것으로 미루어보아 자연적인 원인에 의한 것으로 판단할 수 있다. 그리고 대기 중 에어러솔의 입자 크기를 알 수 있는 Ångström 지수를 보면 사막지역은 0.5 이하의 매우 낮은 값을 보이며, 산업화된 동중국 지역은 사막지역보다 높지만 0.8~1.0

사이의 비교적 낮은 값을 나타내며, 그림 3에서 바이오매스 연소활동이 많은 것으로 나타나는 시베리아와 동남아시아 일부 지역은 1.5~2.0 사이의 비교적 높은 값을 나타낸다. 이것은 사막지역에서 발생하는 사막먼지는 입자의 크기가 매우 큰 입자에 의한 영향이고, 산업화된 지역은 여러 가지 혼합된 입자가 존재하며, 바이오매스 연소 활동이 잦은 지역의 입자크기가 매우 작은 것을 증명한다. 바이오

FIGURE 4. 토지 피복별 2000-2010년 총 누적 Fire Count

FIGURE 5. 2000-2010년 기간 동안 평균 에어러솔 광학두께(좌)와 Ångstrom 지수(우) 분포도

매스 연소활동과 대기 에어러솔의 관련성은 다음장에서 보다 자세히 다루기로 한다.

2. 바이오매스 연소활동과 대기 에어러솔의 관련성

그림 6은 연구대상 지역의 월평균 총 FC와 AOT의 시계열 분석결과로서 두 결과물은 모두 강한 계절별 변동특성을 가지고 있음을 알 수 있다. FC 값의 변동은 주로 늦봄과 가을철 높으며 에어러솔은 주로 늦봄부터 초여름까지 높은 값을 보인다. 특히 2003년에 최댓값인

53,685개의 FC값이 나타났으며 이것은 그 당시 바이오매스 연소 활동이 크게 증가했던 것으로 해석할 수 있으며, 그에 따라 다량의 에어러솔이 배출되어 대기 중의 에어러솔 농도가 증가함으로 인하여 AOT 값도 일반적인 계절적 변동과는 다르게 큰 값(0.65)으로 증가하였다. Ångström 지수값의 변동은 일반적으로, 여름철에 높으며 겨울과 봄에 감소하는 변동을 나타내고 있다. 이것은 입자의 크기가 비교적 큰 황사나 먼지입자들이 봄과 겨울철에 나타나는 것과 여름철 활발한 인위적 활동으로 인한 미세오염입자의 증가에 기인하기

FIGURE 6. 월별 누적 FC, 월평균 AOT, Ångstrom exponent의 시계열 분포도

FIGURE 7. 연누적 총 FC와 연평균 AOT의 산점도

때문이다.

월평균 자료의 시계열 변화 자료로부터 바이오매스 연소 활동과 대기 에어러솔이 계절 변 변동 특성이 비슷한 것으로 나타났으나 두

자료간의 정량적인 관련도를 찾기 어려우므로 경년변화자료로부터 상관관계를 분석하였다. 여기에서는 연도별 평균 에어러솔 광학두께 자료와 총 누적 FC자료를 통하여 해당 연도

FIGURE 8. 바이오매스 연소 활동에 따른 에어러솔 광학두께 증감량 (dAOT/dFC)

에 바이오매스 활동이 증가 또는 감소 한 경우 그에 따른 에어러솔의 증가 또는 감소와 관련이 있다는 가정 하에 전체 연구 기간 동안의 자료를 대상으로 하였다. 그림 7은 바이오매스 연소 활동과 대기 에어러솔과의 관련성을 찾기 위하여 연평균 에어러솔 광학두께와 연 누적 총 FC 자료의 상관분석 결과이다. 시계열 분포도에서 나타난 것처럼 두 자료 간에는 상관관계수 $R=0.89$ 의 높은 상관관계를 가지고 있으며 통계적으로도 유의한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 연구 대상 지역 내에서 발생한 바이오매스 연소 활동이 대기 에어러솔의 생성에 밀접하게 기여하고 있는 것을 증명한다.

그림 8은 연구 대상 지역에서 월별 FC 값의 변화에 따른 AOT 변화 추세 특성을 알아보기 위하여 각 픽셀에서의 월별 누적 FC 값과 월평균 AOT값의 선형회귀분석을 통하여 11년 동안의 월평균 AOT 변화율($\frac{\Delta\tau}{\Delta fc}$)을 다음과 같이 계산하였다(식 12).

$$\frac{\Delta\tau}{\Delta fc} = \frac{\sum(fc_i \times \tau_i) - \frac{\sum fc_i \times \sum \tau_i}{n}}{\sum(fc_i)^2 - \frac{(\sum fc_i)^2}{n}} \quad (12)$$

여기서 fc_i , τ_i 는 해당 월의 총 fc, 평균 AOT, n은 총 관측월수(132개월)를 의미한다. 그림 7에서 나타나는 지역별 특징으로는 바이오매스 연소로 인한 에어러솔의 증가가 지난 11년 동안 동중국과 러시아 극동지역에서 상대적으로 높은 상승률(>0.02)을 보였으며, 특히 북위 30° 에서 이상 지역은 시베리아의 상륙수립에서의 바이오매스 연소 활동의 증가에 따른 에어러솔의 증가가 강하게 나타났다. 베이징 인근과 산둥반도 지역은 급격한 중국 경제성장의 결과로써 많은 양의 화석연료 연소에 의한 대기 가스상 입자와 에어러솔을 비롯한 오염물질들의 생성 증가와 러시아 국경지역의 자연 발화에 의한 것으로 판단된다 (Streets *et al.*, 2003). 그리고 북한의 일부지역도 화전이나 삼림 개간에 따른 BBA 활동이 에어러솔 생성에 영향을 미치고 있는 것

을 알 수 있다. 또한 대만 해협과 가까운 중국 남부 해안지방의 한 픽셀값이 0.03의 최고값을 보이고 있는데, 이 지역의 특징은 평균 AOT값은 약 0.4이고 월별 누적 FC값은 약 10회 내외로 적게 발생하고 있으므로 소규모 BBA에 의하여 AOT의 증가가 상대적으로 크게 발생하고 있음을 알 수 있다.

요약 및 결론

본 연구는, 국내에서는 비교적 알려지지 않은 바이오매스 연소 활동의 현황과 영향을 정량화하기 위하여 2000년부터 2010년까지 장기간에 걸친 지구관측 인공위성 자료를 사용하여 동북아시아 지역의 바이오매스 연소 활동과 관련된 MODIS FC와 대기 에어로솔 자료를 분석하였다. 위성자료 분석결과에서 나타난 바이오매스 연소 활동은 지난 11년간 동아시아 대륙의 내륙과 중국을 중심으로 매우 많은 숫자가 발생하였으며, 추세분석을 통하여 계절적 변동 특징이 매우 강한 것으로 나타났다. 이와 같은 계절적 변동은 대기 에어로솔의 변동특성과 비슷한 양상을 보이고 있어 바이오매스 연소 활동이 대기 에어로솔의 증가와 관련이 있는 것을 보였다. 그리고 대기 환경에 영향을 미치는 대기 에어로솔과의 상관관계 분석을 통하여 바이오매스 연소 활동은 토지 피복이나 기상조건에 영향을 받지만, 그 결과로 발생한 에어로솔은 지역 대기 환경에 직접적인 영향을 미치고 있음을 밝혔다. 바이오매스 연소로 생성된 대기 에어로솔의 주 성분이 탄소성 입자임을 고려할 때, 이러한 입자들은 대기 중에서 강력한 복사강제 효과를 유발하는 것으로 알려져 있으므로 지역 기후환경에도 큰 영향을 미칠 수 있음을 반증한다. 따라서 지역 대기환경이나 기후변화 산정에 관한 예측 모델링에 있어서 바이오매스 연소에 대한 모의가 반영된다면 신뢰성을 높일 수 있고 향후 보다 정확한 예측이 가능할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 경일대학교 신입교원 정착연구비 지원에 의하여 수행된 것입니다.

KAGIS

참고문헌

- 이권호. 2011. 지구관측 위성자료를 이용한 주요 대기 에어로솔 성분의 공간분포 분석. 한국지리정보학회지 14(2):109-127.
- 이권호, 김정은, 김영준, 서애숙, 안명환. 2002. GMS-5 인공위성 원격탐사 자료를 이용한 대기 에어로솔 모니터링. 한국지리정보학회지 5(2):1-15.
- 이시영, 강용석, 안상현, 오정수. 2002. GIS를 이용한 산불피해지역 특성 분석. 한국지리정보학회지 5(1):20-26.
- Damoah, R., N. Spichtinger, C. Forster, P. James, I. Mattis, U. Wandinger, S. Beirle and A. Stohl. 2004. Around the world in 17 days-Hemispheric-scale transport of forest fire smoke from Russia in May 2005. Atmospheric Chemistry and Physics 4:1311-1321, doi:10.5194/acp-4-1311-2004.
- Edwards, D.P., L.K. Emmons, D.A. Hauglustaine, D.A. Chu, J.C. Gille, Y.J. Kaufman, G. Petron, L.N. Yurganov, L. Giglio, M.N. Deeter, V. Yudin, D.C. Ziskin, J. Warner, J.F. Lamarque, G.L. Francis, S.P. Ho, D. Mao, J. Chen, E.I. Grechko and J.R. Drummond. 2004. Observations of carbon monoxide and aerosols from the Terra satellite: Northern Hemisphere variability. Journal of Geophysical Research 109, D24202, doi:10.1029/2004JD004727.
- Hobbs, P.V., J.S. Reid, R.A.

- Kotchenruther, R.J. Ferek and R. Weiss. 1997. Direct radiative forcing by smoke from biomass burning. *Science* 272:1776-1778.
- Jacob, D.J., B.G. Heikes and S.M. Fan. 1996. Origin of ozone and NO_x in the tropical troposphere: A photochemical analysis of aircraft observations over the South Atlantic basin. *Journal of Geophysical Research* 101(D19):24235-24250.
- Justice, C.O., L. Giglio, S. Korontzi, J. Owens, J.T. Morisette, D.P. Roy, J. Descloitres, S. Alleaume, F. Petitcolin and Y. Kaufman. 2002. The MODIS fire products. *Remote Sensing of Environment* 83:244-262.
- Kaufman, Y.J., A.W. Setzer, C.O. Justice, C.J. Tucker, M.C. Pereira, I. Fung. 1990. Remote sensing of biomass burning in the tropics. In: J.G. Goldammer(Ed.). *Fire and the Tropical Biota : Ecosystem Processes and Global Challenges*. Springer-Verlag, Berlin, Germany, pp.371- 399.
- 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. Spinhrne, Q. Ji, A.M. Thompson, J.F. Gleason, S.A. Christopher and S.C. Tsay. 1997. Smoke, Clouds and Radiation-Brazil (SCAR-B) Experiment. *Journal of Geophysical Research* 103(31):783-808.
- Koren, I., L.A. Remer and K. Longo. 2007. Reversal of trend of biomass burning in the Amazon, *Geophysical Research Letters* 34, L20404, doi: 10.1029/2007GL031530.
- Koren, I., Y.J. Kaufman, L.A. Remer and J.V. Martins. 2004. Measurement of the effect of Amazon smoke on inhibition of cloud formation. *Science* 303:1342-1345.
- Lee, K.H., J.E. Kim, Y.J. Kim, J. Kim and W. von Hoyningen-Huene. 2005. Impact of the smoke aerosol from Russian forest fires on the atmospheric environment over Korea during may 2003. *Atmospheric Environment* 39(2): 85-99, doi:10.1016/j.atmosenv.2004.09.032.
- Lee, K.H., Y.J. Kim and M.J. Kim. 2006. Characteristics of Aerosol Observed during Two Severe Haze Events over Korea in June and October 2004. *Atmospheric Environment* 40:5146-5155. doi:10.1016/j.atmosenv.2006.03.050.
- Lee, K.H., Z. Li and Y.J. Kim, 2007. SWIR/VIS reflectance ratio over Korea for aerosol retrieval. *Korean Journal of Remote Sensing* 23(1):1-5.
- Levy, R.C., L.A. Remer, S. Mattoo, E.F. Vermote and Y.D. Kaufman, 2007. A second generation algorithm for retrieving aerosol properties over land from MODIS spectral reflectance. *Journal of Geophysical Research* 112: D13211.
- Li, Z., F. Niu, K.H. Lee, J. Xin, W.M. Hao, B. Nordgren, Y. Wang and P. Wang. 2007. Validation and understanding of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer aerosol products (C5) using ground-based measurements

- from the handheld Sun photometer network in China. *Journal of Geophysical Research* 11 2, D22S07, doi:10.1029/2007JD008479.
- Malhi, Y., J. Roberts, R. Betts, T. Killeen, W. Li and C. Nobre. 2008. Climate Change, Deforestation, and the Fate of the Amazon. *Science* 319(5860):169–172. doi:10.1126/science.1146961.
- Penner, J.E., C.C. Chuang and K. Grant. 1998. Climate forcing by carbonaceous and sulfate aerosols. *Climate Dynamics* 14(12):839–851.
- Remer, L.A., Y.J. Kaufman, D. Tanré, S. Mattoo, D.A. Chu, J.V. Martins, R.R. Li, C. Ichoku, R.C. Levy, R.G. Kleidman, T.F. Eck, E. Vermote and B.N. Holben. 2005. The MODIS Aerosol Algorithm, Products and Validation. *Journal of Atmospheric Science* 62:947–973.
- 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. *Journal of Geophysical Research* 103 (31):925–941.
- Sophie, B., D. Pierre and V.B. Eric. 2010. GLOBCOVER 2009 Products Description and Validation Report. ESA.
- Streets D.G., K.F. Yarber, J.H. Woo and G.R. Carmichael. 2003. Biomass burning in Asia: Annual and seasonal estimates and atmospheric emissions. *Global Biogeochemical Cycles* 17(4):1099, 2003GB002040.
- Torres, O., Z. Chen, H. Jethva, C. Ahn, S.R. Freitas and P.K. Bhartia. 2010. OMI and MODIS observations of the anomalous 2008–2009 southern hemisphere biomass burning seasons. *Atmospheric Chemistry and Physics* 10(8):3505–3513.
- Wotawa, G. and M. Trainer. 2000. The influence of Canadian forest fires on pollutant concentrations in the United States. *Science* 288:324–328.