

통계적 방법을 이용한 동남아시아지역 위성 대기오염물질 분석과 검증

Analysis of Characteristics of Satellite-derived Air Pollutant over Southeast Asia and Evaluation of Tropospheric Ozone using Statistical Methods

백 강 현 · 김 재 환*

부산대학교 대기과학과

(2011년 4월 28일 접수, 2011년 7월 7일 수정, 2011년 10월 14일 채택)

K.H. Baek and Jae Hwan Kim*

Department of Atmospheric Science, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Received 28 April 2011, revised 7 July 2011, accepted 14 October 2011)

Abstract

The statistical tools such as empirical orthogonal function (EOF), and singular value decomposition (SVD) have been applied to analyze the characteristic of air pollutant over southeast Asia as well as to evaluate Zimeke's tropospheric column ozone (ZTO) determined by tropospheric residual method. In this study, we found that the EOF and SVD analyses are useful methods to extract the most significant temporal and spatial pattern from enormous amounts of satellite data. The EOF analyses with OMI NO₂ and OMI HCHO over southeast Asia revealed that the spatial pattern showed high correlation with fire count ($r=0.8$) and the EOF analysis of CO ($r=0.7$). This suggests that biomass burning influences a major seasonal variability on NO₂ and HCHO over this region. The EOF analysis of ZTO has indicated that the location of maximum ZTO was considerably shifted westward from the location of maximum of fire count and maximum month of ZTO occurred a month later than maximum month (March) of NO₂, HCHO and CO. For further analyses, we have performed the SVD analyses between ZTO and ozone precursor to examine their correlation and to check temporal and spatial consistency between two variables. The spatial pattern of ZTO showed latitudinal gradient that could result from latitudinal gradient of stratospheric ozone and temporal maximum of ZTO in March appears to be associated with stratospheric ozone variability that shows maximum in March. These results suggest that there are some sources of error in the tropospheric residual method associated with cloud height error, low efficiency of tropospheric ozone, and low accuracy in lower stratospheric ozone.

Key words : EOF, SVD, NO₂, HCHO, O₃

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)51-510-2172, E-mail : jaekim@pusan.ac.kr

1. 서 론

대기오염물질은 대기로 입사하는 태양광을 산란 또는 반사시켜 복사수지 변화와 관련된 기후 변화를 야기하며, 대기 질을 악화시켜 인간과 생태계의 환경 문제를 유발시킨다(Akimoto, 2003; Poisson and Kanakidou, 2000; Sillman, 1999; Crutzen *et al.*, 1979).

동남아시아는 20세기 이후 급속한 도시화와 산업화로 인해서 오염물질 배출량이 급격히 증가하고 있으며, 세계 최대 개발도상국인 중국, 인도와 인접하고 있기 때문에, 오염물질의 장거리 수송에 의해 크게 영향을 받고 있다(Chan *et al.*, 2006; Lelieveld *et al.*, 2001). 또한, 이곳은 큰 규모의 생태계 화재가 주기적으로 발생하며, 산림으로부터 많은 양의 비메탄 휘발성 유기화합물 배출되는 지역이다(Fu *et al.*, 2007; Shim *et al.*, 2006; Chan *et al.*, 2003; Duncan *et al.*, 2003). 따라서 동남아시아는 다양한 오염 배출원 및 오염물질의 수송 등에 의해서 복합적인 환경문제와 기후변화가 예상되기 때문에, 이 지역 오염물질에 관한 다양한 분석, 연구가 필요하다.

이 지역 대기오염물질에 관한 선행연구는 대규모 화재에 의해서 발생된 오염물질의 배출량 연구와 대륙적 수송에 관한 연구가 집중되어져 왔다(Chan *et al.*, 2003; Duncan *et al.*, 2003; Street *et al.*, 2003; Blake *et al.*, 1997). 생태계 화재뿐만 아니라 인간활동과 식물활동 등의 다양한 배출원에서 배출되는 오염물질을 높은 시 공간 해상도로서 관측하고, 장거리 수송의 모니터링을 위해 위성자료를 이용한 연구는 효과적이다.

위성을 이용한 대기오염물질 관측은 Nimbus 7에 탑재된 TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer)의 오존전량(Total Ozone Column, TOC) 관측으로부터 시작되었으며, ERS-2 위성에 탑재된 GOME (Global Ozone Monitoring Experiment)를 이용해 NO₂, HCHO, SO₂, 대류권 오존 등의 다양한 오염기체를 관측하기 시작하였다. 최근에는 2002년 3월에 발사된 ENVISAT 위성에 탑재된 SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption SpectroMeter)와 EOS 프로젝트의 일환으로 2004년 7월 Aura위성에 탑재된 미국의 OMI (Ozone Monitoring Instrument)를 이용한 TOC, NO₂, HCHO, SO₂, 대류권오존 등의 관측이 이루어지

고 있다(Boersma *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2008; Krotkov *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2008; Palmer *et al.*, 2006; Khokhar *et al.* 2005; Richter *et al.*, 2005; Boersma *et al.*, 2002; Martin *et al.*, 2002; Richter and Burrows, 2002; Hudson and Thompson, 1998).

하지만 이러한 위성관측 자료는 산출 알고리즘 상의 여러 해(solution)를 가지는 고유한 문제점(ill-posed system) 내포하고 있어, 자료의 객관성을 얻기 위한 자료 검증이 반드시 요구된다. 일반적으로 위성관측 값 검증은 지상관측과 비교·분석 또는 서로 다른 위성에서 측정된 동일한 위성산출물을 비교함으로써 검증되었다(Lee *et al.*, 2009; Boersma *et al.*, 2008; DeSmedt *et al.*, 2008; Schaub *et al.*, 2006; Wittrock *et al.*, 2006; Martin *et al.*, 2004; Petritoli *et al.*, 2004). 그러나 이러한 검증방법들은 지상관측자료가 가지는 시 공간적 한계와 그리고 각 센서 간 시간의 차이, 보정문제 시 공간적 분해능 차이 등의 문제 때문에 검증에 어려움을 가진다(Boersma *et al.*, 2008; Kurosu *et al.*, 2008). 따라서 위성자료의 검증을 위해 새로운 방법이 요구된다.

이에 Kim *et al.* (2008)은 처음으로 통계적 방법을 위성 관측값 자료 검증에 사용하였다. 이 방법의 이론적인 출발은 만약 위성관측 자료들이 정확하다면, 각 자료 간 대기화학적, 물리학적, 기상학적 이론에 서로 일치되는 시 공간분포를 보여야 한다는 데 있다. 통계적 분석방법인 EOF와 SVD 분석방법은 원시 자료로부터 시 공간적으로 가장 뚜렷한 현상을 찾아내기 때문에 만약 자료의 신뢰도가 높다고 한다면, 통계적 분석방법을 적용한 자료의 결과는 대기 화학적, 물리적 배출원 등에 의한 일관되는 시 공간분포를 가진다.

Kim *et al.* (2008)은 Empirical Orthogonal Function (EOF)와 Singular value decomposition (SVD) 분석을 적용하여, 아프리카지역의 Convective Cloud Differential (CCD) 방법에서 도출한 대류권오존 자료를 검증함으로써, 통계적 기법을 사용한 위성자료 검증의 유용성을 입증하였다. Barkely *et al.* (2009)는 이와 유사하게 GOME와 SCIAMACHY 센서로 관측된 HCHO의 시공간변동을 분석에 EOF 분석을 적용하여 일반적으로 식물활동과 HCHO가 높은 상관성을 가지는 것을 보였다.

본 연구에서는 Kim *et al.* (2008)이 제시한 연구방

법을 동남아시아 대기오염물질의 특성분석 및 검증에 적용하였다. 이 연구에 사용된 자료는 한 위성에서 직접적으로 도출되는(Direct method) OMI NO₂와 HCHO 그리고 MOPITT (Measurements Of Pollution In The Troposphere) CO 자료와 간접적으로 측정된 대류권 오존자료를 사용하였다.

간접적인 방법을 이용한 대류권 오존 관측은 대류권 오존의 민감도 문제와 구름문제 등에 의해서 직접적 관측이 어렵기 때문에 제시된 방법이다. 이 방법은 Fishman and Larsen (1987)의 Tropospheric Ozone Residual (TOR) 방법에서 시작되었으며, 그 이후로 구름을 이용하는 CCD 방법, 잔차(Residual) 방법을 수정한 Modified residual 등 다양한 방법들이 개발되었다(Ziemke and Chandra, 1998; Hudson and Thompson, 1998). 본 연구에서는 OMI센서에서 관측된 오존전량 자료와 MLS (Microwave Limb Sounder) 센서에서 관측된 성층권 오존자료의 차를 이용해서 간접적으로 도출되는 대류권 오존(Zimeke's Trosphere Ozone; ZTO)을 사용하였다. 이러한 방법들은 위성간의 궤도 문제 및 샘플링 문제 등 부가적인 자료의 객관성 문제를 야기할 수 있기 때문에, 직접적과 간접적 관측 방법에 따라 구분하여 분석 검증을 실시하였다.

2. 연구방법

2.1 자료

OMI NO₂자료는 NASA (<http://mirador.gsfc.nasa.gov/>)에서 제공하는 2004년 10월부터 2009년 12월 기간의 NO₂ 일별 Level 2 자료이며, 자료의 관측 오차는 약 40~50%이다(Boersma *et al.*, 2002). 구름은 관측된 복사량으로부터 미량기체 산출시 알고리즘에 영향을 끼치기 때문에 자료의 객관성에 문제점을 야기한다(Boersma *et al.*, 2002). 따라서 구름의 영향을 제거하기 위해서 Stavrou *et al.* (2009)이 제시한 구름운량(effective cloud fraction)이 0.4 이하인 자료만을 사용하여 위·경도 1×1° 격자의 일별 자료를 생성하였다. 각 격자에서의 월평균 NO₂값은 자료의 대표성을 확보하기 위해 10개 이상인 경우에만 계산되었다. OMI HCHO 자료는 NASA에서 제공하는 OMI HCHO 자료의 경우 HCHO 관측 값(vertical column)의 오차가 40~105% (Kurosu *et al.*, 2008; Palmer *et al.*, 2006)

이며, 현재 UV 채널의 퇴화에 의하여 OMI HCHO 배경 값이 꾸준히 증가하는 경향이 나타난다(Kim *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2009; Jaross *et al.*, 2009). 특히 2009년 이후 이런 경향은 뚜렷해졌다(Kuroso, 2010). 따라서 본 연구에서는 T. Kuroso (personal communication, 2010)에 의하여 보정된 2004년 10월부터 2008년 12월 기간의 OMI HCHO (Bg OMI HCHO) 자료를 사용하였다. MOPITT CO 자료는 2003년 1월부터 2008년 12월 기간의 월별 CO 자료(<http://www.acd.ucar.edu/mopitt/products.shtml>) 중, 신뢰성이 떨어지는 야간자료를 제외한 주간자료만으로 계산된 월별 격자 자료를 사용하였다(Deeter *et al.*, 2004). 대류권 오존 자료는 Zimeke *et al.* (2006)에 의해서 제공되는 2004년 10월부터 2009년 12월 기간의 월별 자료를 이용하였다(http://acdb-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/cloud_slice/new_data.html). 이 방법은 기존의 대류권 오존 산출방법과는 달리 적도 지역에 한정되지 않고 고위도 지역의 일별 대류권 오존을 산출할 수 있다는 장점이 있으며, 한 위성에 탑재되어 있기 때문에 위성간의 궤도 문제 및 샘플링 문제를 해결할 수 있다고 주장하고 있다(Zimeke *et al.*, 2006). 하지만 MLS 센서를 이용한 관측에서 성층권 하부의 오존측정의 신뢰성이 떨어진다는 문제점을 가지고 있어(Froidevaux *et al.*, 2006), 대류권오존 자료의 신뢰성을 얻기 위해서는 보다 철저한 검증이 필요하다.

부가적으로 동남아시아지역의 대기오염물질 배출원을 규명하기 위해서 인간활동은 인구밀도분포(<http://sedac.ciesin.columbia.edu/gpw>)를 생체소각은 ATSR (Along Track Scanning Radiometer) 센서로서 측정된 fire count (<http://dup.esrin.esa.in/ionia/wfa/index.asp>), 식물활동(biogenic effect)을 식생지수(Enhanced vegetation index, <http://gdata2.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3>)를 주요 배출원을 나타내기 위한 지표(indicator)로서 사용하였다. 동남아시아는 열대 우림지역이기 때문에, EVI 값이 대부분의 지역에서 높고, 계절에 따른 변화가 뚜렷하지 않기 때문에, 본 연구에서는 EVI 지수를 2004년부터 2008년 기간의 평균 값만 나타내었다. ATSR센서로 측정된 fire count는 3월에 높고 7월에 낮은 뚜렷한 계절 변동성이 관측된다. 그림 3은 특정한(3, 7, 10, 12) 달의 fire count의 분포를 나타내는 데 특히 건기인 3~4월에 높은 산불화재가 관측되고 6~7월에는 나타나지 않기 때문에 특정한 계절을 뽑

아서 각 계절의 특성을 나타내기 위해 선택되었다.

2.2 분석 방법

본 연구에서 사용된 통계적 분석 기법은 EOF

(Empirical Orthogonal Function)와 SVD (Singular Value Decomposition)이다. EOF는 한 가지 변수의 독립된 공간분포와 시간분포 (EOF time series or expansion coefficients)을 추출하는 주성분 분석이며

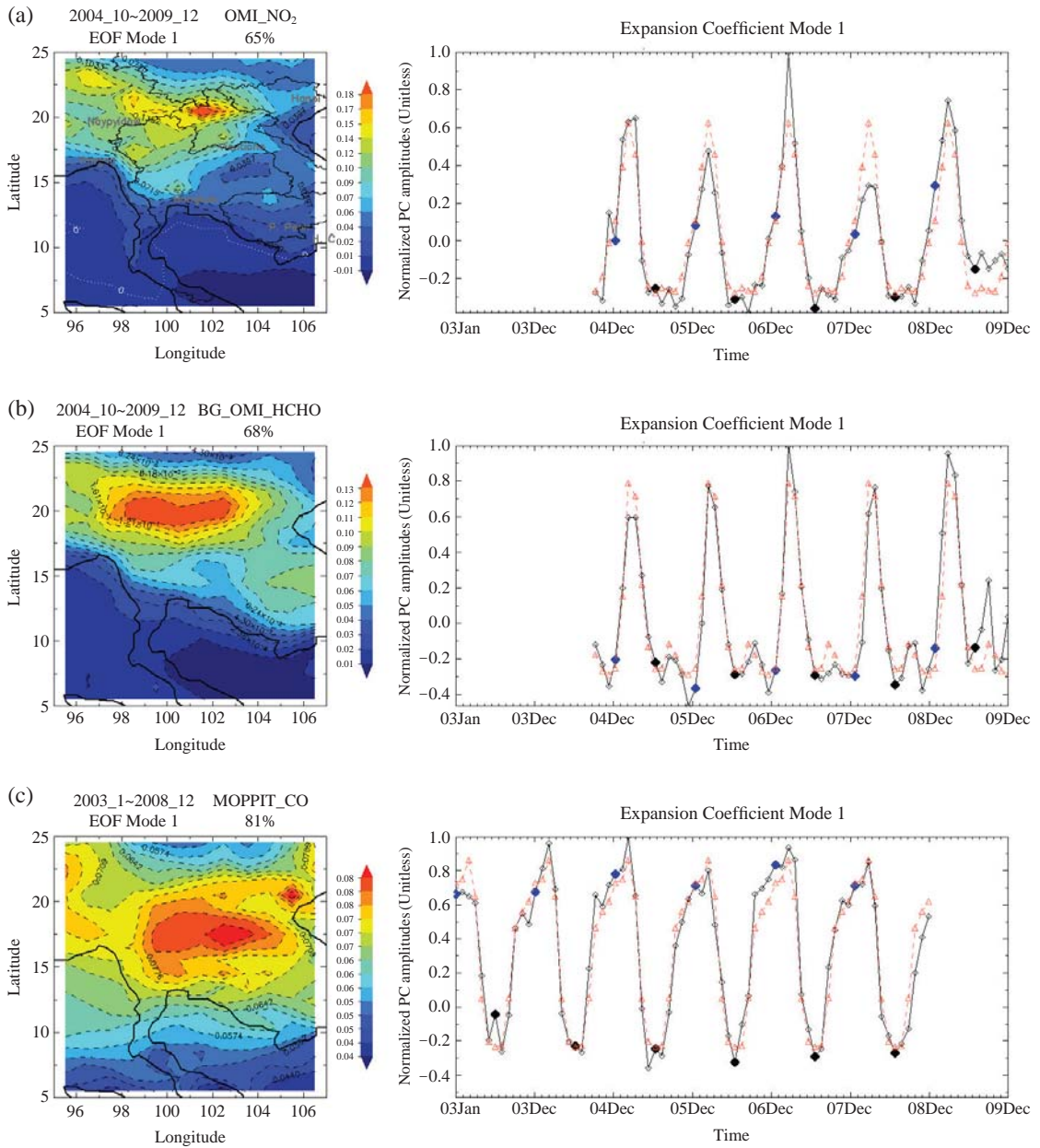


Fig. 1. The first mode of the EOF analyses of OMI NO₂ and HCHO and MOPITT CO over South East Asia. The red line represents the monthly average over entire measurement period, which is repeated. The blue dots represent the January and the dark dots represent the July.

(Lorenz, 1956), SVD는 두 변수에 관해서 서로 결합된 시·공간 패턴을 분석하는 방법으로써 공간적으로 직교하는 두 개의 특이벡터(singular vector) 쌍과 각 벡터 쌍과 관련된 한 개의 특이값(singular value) 그리고 시간분포(expansion coefficient)를 산출한다(Bretherton *et al.*, 1992; Wallace *et al.*, 1992). 이 분석 방법들은 복잡한 역학계의 자유도를 최소화하여, 원시 자료가 포함하는 현상을 간단하게 묘사함으로써, 자료의 특징을 분석하는 데 용이한 장점을 가진다. 그러나 이러한 분석으로부터 얻은 결과는 통계적인 수치 값이기 때문에 실제 대기현상과 결합된 정성적인 분석이 요구된다.

본 연구에서는 통계적 방법을 이용하여 다양한 위성센서로부터 관측된 대기오염물질들과 대류권 오존의 시·공간분포를 산출하여, 이 결과를 동남아시아 지역의 배출원과 대기에서 각 오염물질들의 물리적·화학적 관계를 고려함으로써 대기오염물질을 분석하였고 또한 자료검증의 지표로 사용하였다.

3. 결 과

그림 1은 동남아시아지역(95°E~110°E, 5°N~25°N)

에서 OMI NO₂와 HCHO, MOPITT CO를 분석한 EOF 결과를 나타낸다. EOF 분석한 결과, 각 모드 1의 결과가 세 자료 모두에서 전체 변동성의 60% 이상의 분산 값을 나타내었다. 따라서 이 결과로서 자료의 대부분을 설명할 수 있다고 사료되어 본 연구에서는 모드 1의 결과만을 분석하였다. 그림 1의 왼쪽은 공간분포를, 오른쪽은 시간분포(expansion coefficients)를 나타낸다. 시간분포에서 붉은 점은 전체 주기에서 각 달의 평균값을 나타내며, 파란 점은 각 해의 1월을, 검은 점은 7월을 각각 나타낸다.

그림 1a, 1b, 1c는 각각 OMI NO₂, OMI HCHO 그리고 MOPITT CO를 EOF 분석한 결과이며, 각각 전체 변동성의 65%, 68%, 81%를 설명한다. 먼저 그림 1a의 NO₂ EOF 공간분포를 살펴보면 방콕, 양강 등의 도시 지역(그림 1a에 표시)에서 다소 높은 분포를 보 이긴 하지만 대부분 인도차이나반도 서북부지역(미얀마 동부와 라오스 북부지역)에서 높은 공간분포를 나타낸다. 시계열은 이 지역 건기인 3~4월에 최대 값을, 우기인 6~7월에 최소 값을 가지는 뚜렷한 연주기를 가진다. HCHO의 EOF 시·공간분포(그림 1b)는 인도차이나반도 서북부지역에서 3~4월 가장 높은 값과 뚜렷한 연간주기를 나타내는데 이는 그림 1a의 NO₂의 시·공간적 변동성과 r=0.8 이상으로 매우

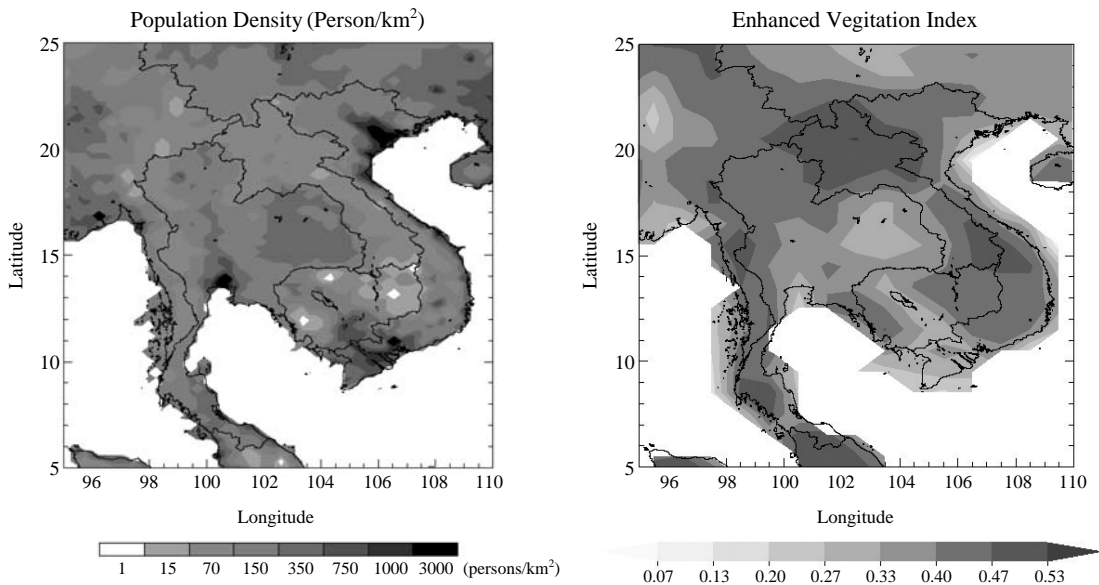


Fig. 2. Left represents Population Density and right represents EVI distribution over South East Asia for 2004.10~2009.12.

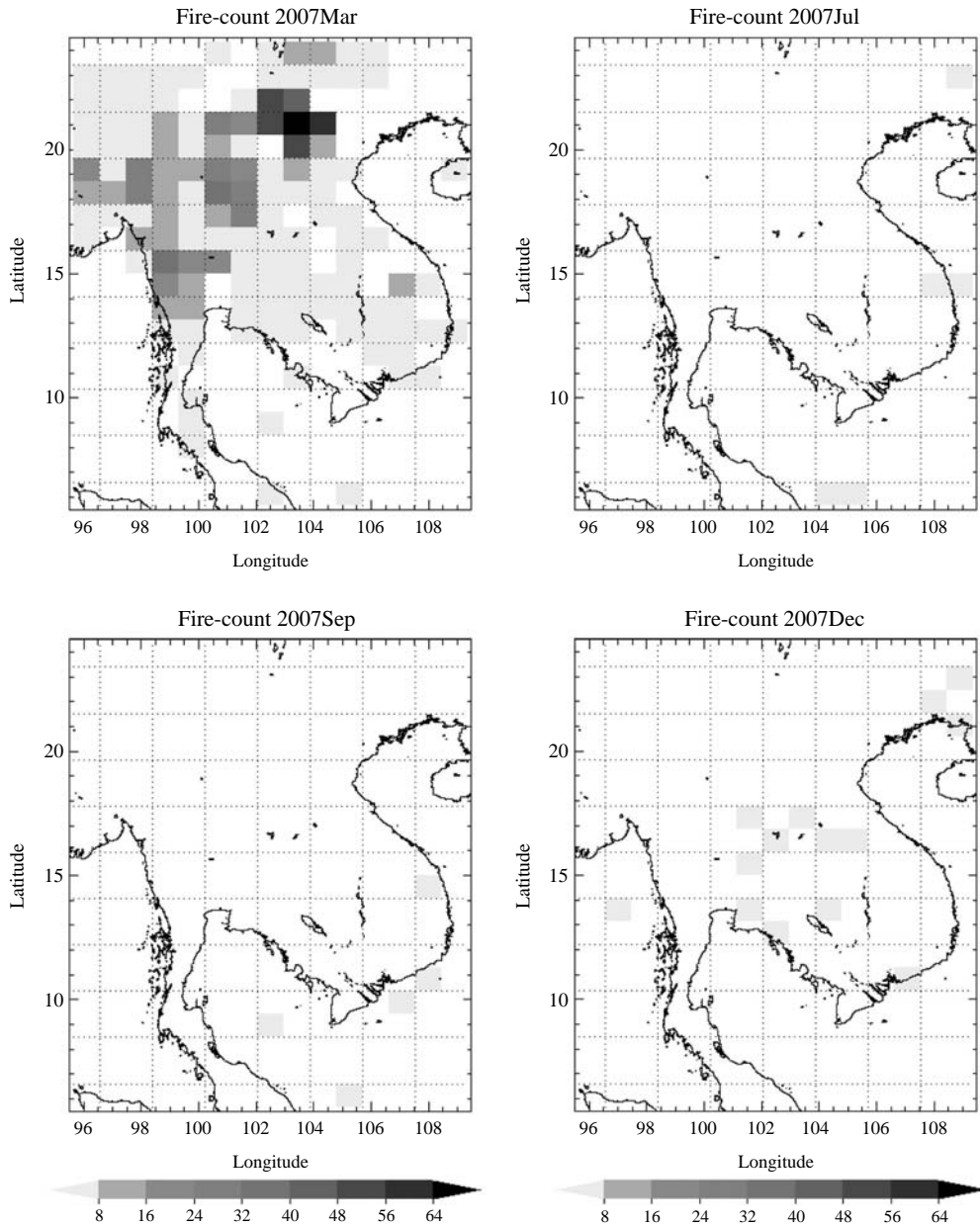


Fig. 3. ATSR fire count over South East Asia for 2007.

높은 상관관계를 나타낸다.

NO₂와 HCHO는 인간활동, 식물활동 그리고 생체 소각 등 다양한 배출원에 의해서 방출되는데, 생명주기(life-time)가 다소 짧기 때문에 지역 배출원에 의해서 시·공간분포가 결정된다. 그림 2(인구밀도분포와

EVI 분포)에서 NO₂와 HCHO의 최대 공간분포가 나타나는 지역이 인간활동이 적은 산림지역이기 때문에 이 지역 NO₂와 HCHO의 배출원이 인간의 산업화나 공업화 활동에서 연유된 것과 상관성이 낮다는 것을 의미한다. 좀더 세밀한 분석을 위해 ATSR 위성에서

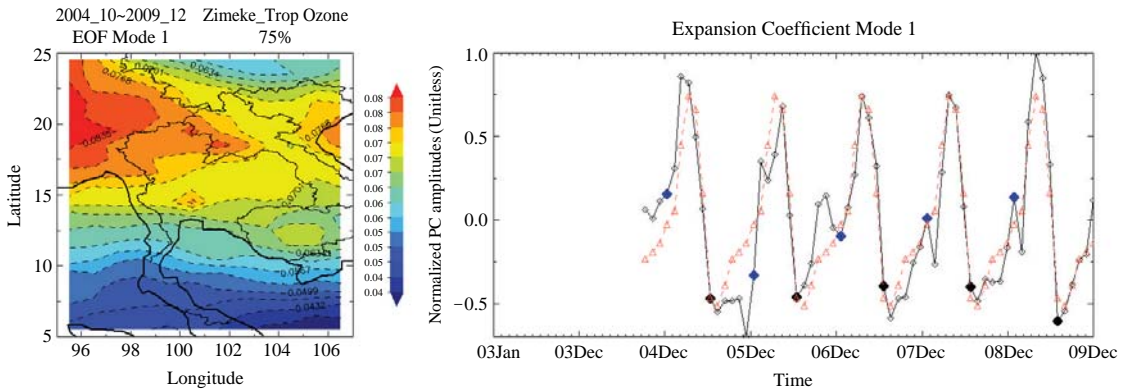


Fig. 4. The first mode of the EOF analyses of Zimeke's Tropospheric Ozone.

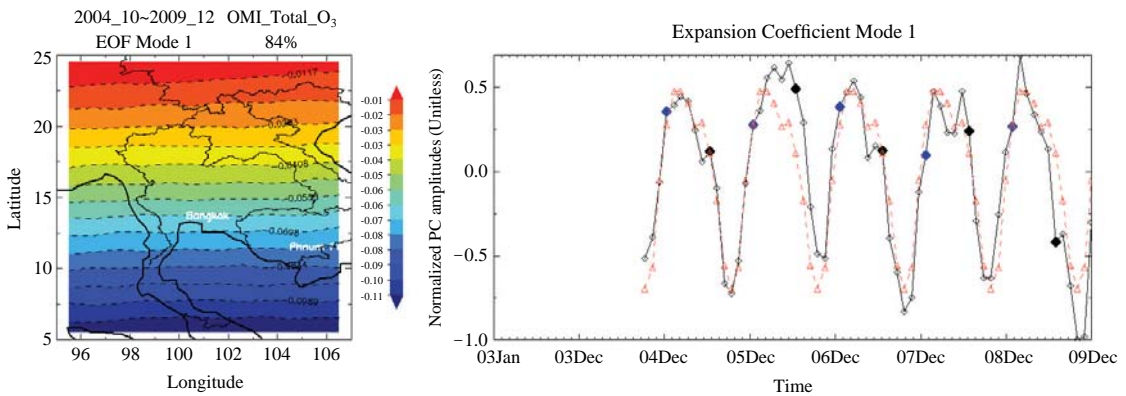


Fig. 5. The first mode of the EOF analyses of total ozone.

관측된 fire count 자료를 이용하였다. 그림 3은 ATSR 센서로 측정된 특정 달(3, 7, 9, 12월)의 fire count 공간분포를 나타낸 것이다. Fire count는 인도차이나 서북부지역에서 3월에 강하게 나타나며 이 지역 우기인 6월에는 나타나지 않는다. 이러한 분포는 NO₂와 HCHO의 시·공간분포와 매우 높은 상관($r=0.7$)을 나타내며 이는 이 지역 대기오염물질 배출량이 생체소각에 의해서 크게 영향을 받는 것이라고 사료된다.

CO는 생체소각에 의해서 대량으로 발생하는 기체이기 때문에, 산불화재의 지수로서 위 결과의 검증에 사용하였다. 그림 1c는 CO의 EOF 결과를 나타낸 것이다. 공간분포는 인도차이나반도 북부지역에서 높게 나타내며, 시계열은 3~4월의 높은 값을 나타낸다. 이러한 동남아시아 생체소각의 변동성에 따른 보여주는 각 기체의 일관된 시·공간 변동성은 NO₂, HCHO,

CO의 자료의 객관성이 높다는 것을 의미한다. 결국 이 지역의 건기 기간에 발생하는 생태계 화재에 의해서, 주요 오염물질인 NO₂, HCHO, CO의 방출량이 급격히 증가하며, 뚜렷한 계절적 변동성을 가지는 것이라고 사료된다. 한편 HCHO는 매우 다양한 배출원 으로부터 방출되지만, 대부분 식물활동에 의해 배출되는 아이소프렌 방출양에 크게 영향을 받는다(Fu *et al.*, 2007; Palmer *et al.*, 2006; Chance *et al.*, 2000). 특히 동남아시아는 연중 기온이 높고 아이소프렌을 많이 방출하는 활엽수림(broad leaf evergreen forest)이 넓게 존재하기 때문에(Marbach *et al.*, 2008), 식물활동에 의한 HCHO 배출량이 많아 높은 배경 경계 값을 예상할 수 있다. 하지만 연중 기온과 EVI의 변동성이 낮아, 식물활동에 의한 계절 HCHO 변동성은 낮게 나타난다. 그러므로 동남아시아에서 주요 배출원

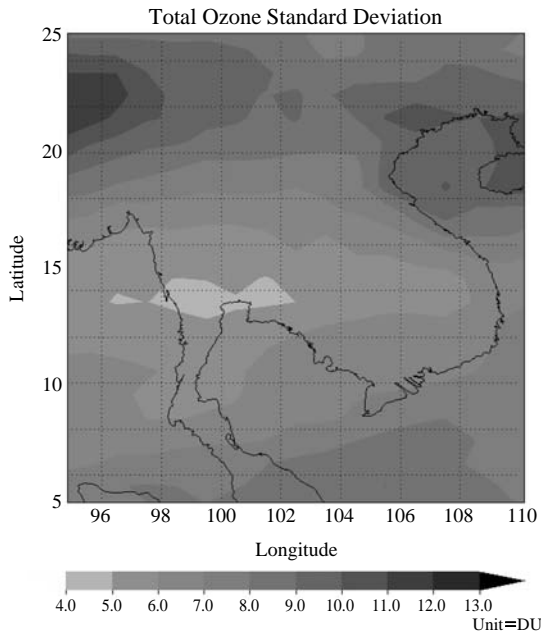


Fig. 6. Standard deviation of daily total ozone for March 2005 to March 2006.

인 생태계화재와 식물활동에 의한 HCHO 배출량의 정량적인 비교는 차후 모델을 이용한 연구를 더 수행하여야겠지만, 계절적인 HCHO의 변동성은 생체 소각에 의한 영향임을 알 수 있다

한편 간접적인 방법으로 관측된 대류권 오존의 검증은 앞서 자료 값의 객관성 검증이 된 오존의 주요 전구물질인 NO₂와 HCHO 그리고 CO 자료와 시·공간분포의 일관성을 비교함으로써 대류권 오존 자료(Zimeke's Tropospheric ozone; ZTO)의 객관성을 평가해 보았다.

그림 4는 ZTO를 EOF분석한 모드 1의 결과를 나타내며, 전체 변동성의 75%를 설명한다. 이것은 앞선 결과로부터 이 지역 오염 배출원이 건기시즌의 발생하는 생태계 화재이며, 오존보다 더 긴 생명주기를 가지는 CO의 공간분포가 배출원으로부터 멀지 않은 지역에서, 3월에 높은 값을 나타내는 것을 고려했을 때, 대류권오존 역시 CO의 시·공간분포보다는 배출원에 가까이 분포할 것이라고 예상할 수 있다. 하지만 ZTO의 공간분포가 인도차이나반도 서북부지역으로 매우 편향되며, 시계열 최대 값이 전구물질들에 비해서 한 달 정도의 차이를 가져 4~5월에 나타나

는 것은 ZTO 자료에 문제가 있음을 나타낸다. 또한 공간분포에서 남북으로 위도별 경도가 분명하게 보이는데, 이것은 오존전량 자료의 위도별로 증가하는 분포 특징과 매우 높은 상관성을 보여주고 있다. MLS에서 측정된 성층권 자료의 경우 하부 성층권 측정에 상대적으로 큰 오차를 보여주고 있기 때문에 이러한 오차가 대류권오존 측정오차로 전이되었을 것으로 평가된다. 만약 성층권의 영향이 적절히 제거되지 않았을 경우 ZTO 분포가 성층권 오존의 분포와 비슷할 수 있다는 데 착안하여 더 자세한 분석을 실시하였다.

MLS 센서는 하부 성층권 오존 측정에 있어 낮은 정확도를 가지며, 이는 성층권 하부 오존의 변동성이 커질수록 증가한다(Froidevaux *et al.*, 2006; Newchurch *et al.*, 2001). 오존전량(total ozone column, TOC) 자료의 EOF 분석 결과(그림 5)는 3월에 높은 변동성을 나타낸다. TOC에서 대류권 오존의 양은 전체 오존의 10%이며 성층권 상부 오존의 양의 변동성은 매우 적기 때문에, TOC의 변동성은 하부 성층권 오존의 물리적 변동성(dynamics)에 의존한다(Newchurch *et al.*, 2001). 하부 성층권의 측정 변동성을 확인하기 위하여, 본 연구가 수행된 기간(2004년 10월~2009년 12월) 중 가장 큰 변동성이 나타나는 3월의 TOC 일별 자료를 이용하여, 동남아시아지역 각 화소의 표준편차(그림 6)를 구하였다. 여기서 표준편차가 크다는 것은 하부 성층권의 변동성이 큰 것을 의미한다. 이는 곧 ZTO가 두 자료의 차이를 이용해서 산출되기 때문에 이 변동성이 크다는 것은 계산된 결과의 정확도가 떨어진다는 것을 의미한다. 그림 6의 공간분포는 인도차이나 북부지역에서 서쪽으로 미얀마 지역과, 동쪽의 하노이 지역에서 높은 값을 가진다. 이러한 분포는 ZTO의 EOF 공간분포(그림 4)와 높은 상관성을 보인다. 즉 이러한 결과는 큰 하부 성층권의 변동성에 의해서 MLS 센서의 낮은 하부 성층권 오존의 측정오차가 증가하였고, 대류권 오존 산출시 완벽하게 하부 성층권 오존이 완벽하게 제거되지 않은 것을 나타낸다.

좀 더 세밀한 검증을 위해 동남아시아지역의 전구물질 간 또는 대류권 오존과 전구물질의 사이의 SVD 분석을 시행하였다. 그림 7은 대류권 오존자료와 오존 전구물질 자료를 SVD분석한 모드 1의 결과를 나타낸 것이다.

그림 7a는 OMI NO₂와 OMI HCHO의 SVD 분석한

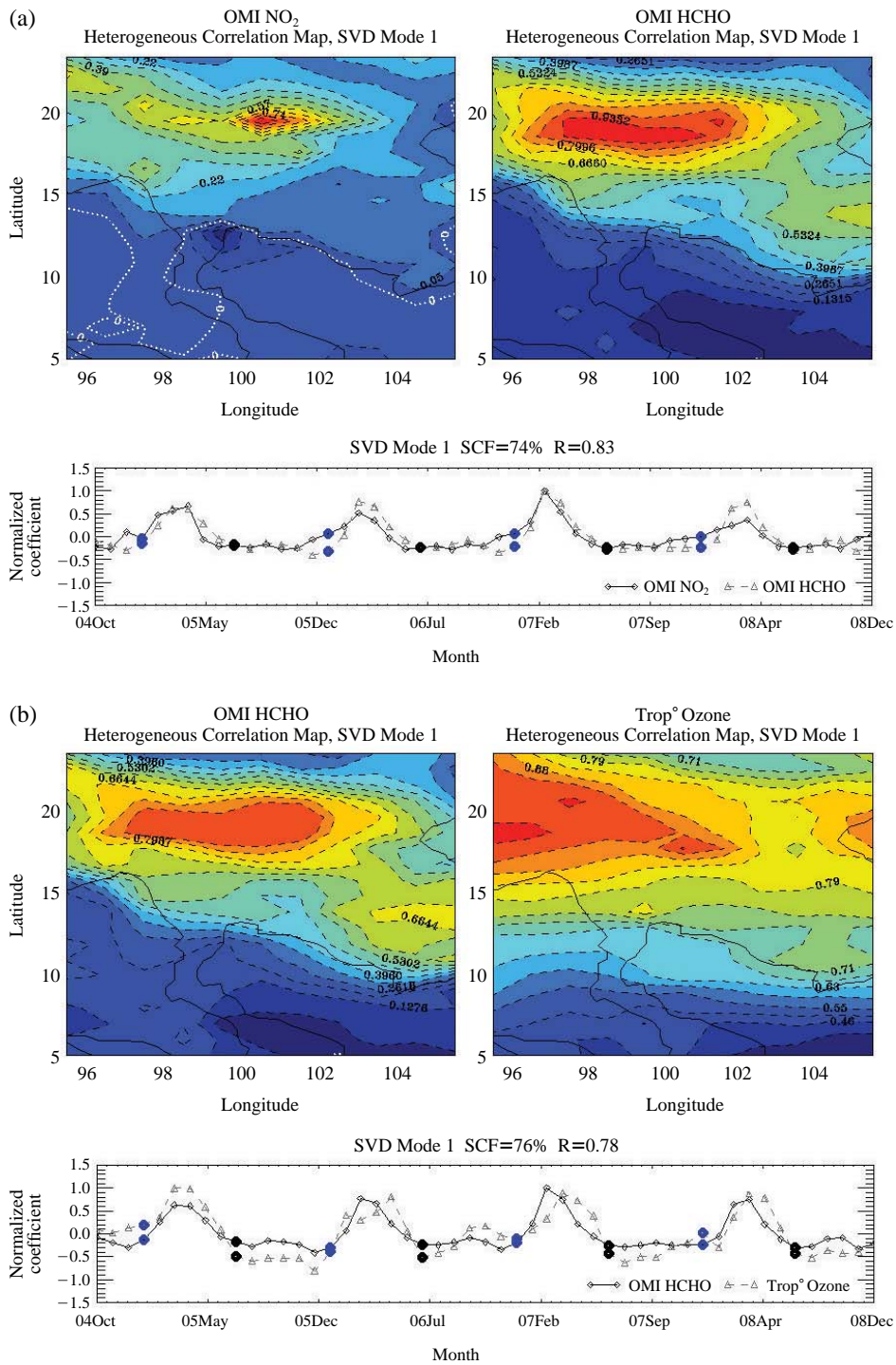


Fig. 7. The first mode of SVD for OMI NO₂, OMI HCHO. The top panels show the spatial pattern (heterogeneous correlation map) of (a) OMI NO₂ and OMI HCHO. (b) OMI NO₂ and ZTO. (c) OMI HCHO and ZTO. The bottom panel show expansion coefficient of two variables.

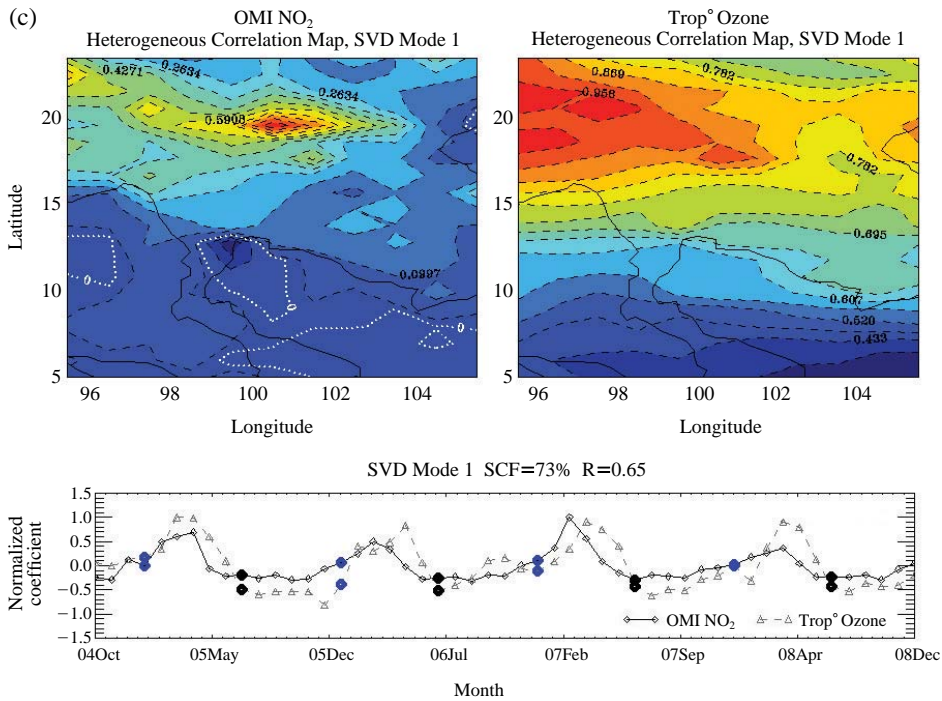


Fig. 7. Continued.

모드 1의 결과이며, 전체 변동성 중 74%를 설명한다. 먼저 NO₂와 HCHO의 공간분포는 높은 fire count를 가지는 인도차이나 서북부지역에서 높은 분포 보인다. 시간분포 NO₂와 HCHO는 각각 검은 선과 회색 선으로 나타내었으며, 두 시간분포는 0.83으로 매우 높은 상관을 나타낸다. 시간분포는 건기인 3~4월 시기에 최대 값을 나타내는데 이러한 SVD의 결과는 동남아시아지역에서의 NO₂와 HCHO이 생체소각에 크게 영향을 받는 것을 의미한다. 그림 7b와 그림 7c는 각각 OMI HCHO와 ZTO 자료를 그리고 OMI NO₂와 ZTO 자료를 SVD 분석한 모드 1의 결과를 나타내며, 각 공간패턴은 전체 변동성의 76%, 73%를 설명한다. 그림 5b의 공간분포에서 HCHO의 공간분포는 산불화재가 크게 발생하는 인도차이나 서북부지역에서 높은 공간분포를 나타내는 반면, ZTO는 하노이 지역 또는 미얀마지역으로 매우 서쪽으로 편향되어 나타난다. 그리고 그림 7c의 공간분포 역시 비슷한 공간패턴을 나타낸다. 또한 두 SVD 공간분포 결과에서 ZTO 공간분포는 뚜렷한 위도별 경도를 나타내는데, 이러한 결과는 성층권 오존의 변동성에 의해서 나

타나는 특성이며, 앞선 표준편차 분포도와 매우 높은 상관을 보인다. 즉 이러한 결과는 MLS 센서의 낮은 하부 성층권 하부 오존 민감도 때문에 대류권 오존 산출시 완벽하게 하부 성층권 오존이 완벽하게 제거되지 않은 것을 나타내며 결국 ZTO 자료의 객관성의 문제가 있음을 나타낸다.

4. 결 론

대기오염물질은 환경오염문제 뿐만 아니라 복사수지 변화시키고 오존을 형성하여 기후변화에 크게 영향을 끼친다. 특히 동남아시아지역은 다양한 배출원이 복잡하게 얽혀 있는 지역이기 때문에, 대기오염물질에 의한 크고 다양한 영향이 예상되는 지역이다. 따라서 이 지역 대기오염물질이 환경 및 기후변화에 끼치는 영향을 이해하기 위해서 높은 시·공간 해상도를 가지는 위성자료를 이용한 대기오염물질 특성에 관한 연구가 필요하다. 하지만 위성자료는 ill-posed system에 의해서 자료 내 오차를 내포하고 있기 때

문에 본 연구에서는 통계적 기법을 이용하여 검증을 실시 한 후 분석하였다. 통계적 기법은 원시자료부터 시·공간적으로 가장 뚜렷한 현상을 찾아주기 때문에, 많은 양의 위성자료의 시·공간 패턴을 분석하는데 용이하다. 따라서 본 연구에서는 다양한 위성 관측 값을 경험적 직교함수(EOF)와 특이 값 분해(SVD)에 적용하여, 이 지역 대기오염물질의 특성을 분석하였다. 또한 간접적인 방법으로 산출된 Zimeke의 대류권 오존 값을 다양한 오염물질들의 시·공간 일치성을 비교함으로써 객관성을 평가해 보았다. EOF 분석의 결과는 NO₂와 HCHO 모두 인도차이나 반도 서북부지역에서 이 지역 건기인 3~4월에 높은 공간분포를 나타내며 이러한 결과는 산불화재의 배출지표인 CO와 Fire count의 시·공간 패턴과 매우 높은 일치성을 보인다. 결국 이 지역의 대기오염물질은 건기 시즌에 발생하는 생태계화재에 의해서 큰 영향을 받는 것을 나타낸다. 한편 Zimeke의 대류권 오존 EOF 분석결과는 공간적으로 미얀마지역으로 서쪽으로 편향되고 시계열 역시 전구물질에 비해 한 달 늦게 최대 값이 나타난다. 이러한 결과는 대류권 오존의 생명주기보다 긴 CO의 시·공간 패턴을 고려했을 때 자료에 문제가 있음을 암시한다. 부가적으로 더 자세하게 오염물질 관의 관계 및 대류권 오존의 자료를 검증하기 위하여 SVD분석을 실시하였다. SVD결과는 NO₂와 HCHO는 매우 높은 시·공간 일치성을 나타낸다. 반면 NO₂와 ZTO 그리고 HCHO와 ZTO는 ZTO의 공간분포가 서쪽으로 편향되어 있으며, 뚜렷한 위도별 경도가 나타난다. 이러한 위도별 경도는 성층권의 변동성의 영향을 받는 것을 암시하며, 이를 확인하기 위해서 2005~2006년의 3월 일별 오존전량 자료의 표준편차 분포도를 구해보았고, 이 공간분포와 ZTO의 공간분포와 매우 높은 상관을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 MLS의 하부성층권의 낮은 민감도 때문에, 성층권 오존의 제거가 완벽히 이루어지지 않았다는 것을 의미하며, 결국 대류권 오존자료의 객관성에 문제가 있음을 암시한다.

감사의 글

본 연구는 학술진흥재단 기초연구사업 지원에 의해 이루어졌습니다.(20080720000).

참고 문헌

- Akimoto, H. (2003) Global Air Quality and Pollution, Science, 302, 5651, 1716-1719.
- Barkley, M.P., P.I. Palmer, I.D. Smedt, T. Karl, A. Guenther, and M.V. Roozendaal (2009) Regulated large-scale annual shutdown of Amazonian isoprene emissions?, Geophys. Res. Lett., 36, L04803, doi:10.1029/2008GL036843.
- Blake, N.J., D.R. Blake, T.-Y. Chen, J.E. Collins Jr., G.W. Sachse, B.E. Anderson, and F.S. Rowland (1997) Distribution and seasonality of selected hydrocarbons and halocarbons over the western Pacific basin during PEM-West A and PEM-West B, J. Geophys. Res., 102, 28, 315-328, 331.
- Boersma, K.F., E.J. Bucsela, E.J. Brinksma, and J.F. Gleason (2002) NO₂, In: Chance, K. (Ed.), OMI Algorithm Theoretical Basis Document, OMI Trace Gas Algorithms, vol.4. ATBD OMI-04, Version 2.0, NASA Distributed Active Centers, Greenbelt, MD, August 2002, 13-36.
- Boersma, K.F., D.J. Jacob, E.J. Bucsela, A.E. Perring, R. Dirksen, R.J. van der A, R.M. Yantosca, R.J. Park, M.O. Wenig, T.H. Bertram, and R.C. Cohen (2008) Validation of OMI tropospheric NO₂ observations during INTEX-B and application to constrain NO_x emissions over the eastern United States and Mexico, Atmos. Environ., 42(2008), 4480-4497.
- Boersma, K.F., D.J. Jacob, H.J. Eskes, R.W. Pinder, J. Wang, and R.J. van der A (2008) Intercomparison of SCIAMACHY and OMI tropospheric NO₂ columns: Observing the diurnal evolution of chemistry and emissions from space, J. Geophys. Res., 113, D16S26, doi:10.1029/2007JD008816.
- Bretherton, C.S., C. Smith, and J.M. Wallace (1991) An Intercomparison of Methods for Finding Coupled Patterns in Climate Data, Journal of Climate, 5(6), 541-560.
- Chan, C.Y., L.Y. Chan, J.M. Harris, S.J. Oltmans, D.R. Blake, Y. Qin, Y.G. Zheng, and X.D. Zheng (2003) Characteristics of biomass burning emission sources, transport, and chemical speciation in enhanced spring-time tropospheric ozone profile over Hong Kong, J. Geophys. Res., 108, 4015, doi:10.1029/2001jd001555.
- Chan, C.Y., K.H. Wong, Y.S. Li, L.Y. Chan, and X.D. Zheng (2006) The effects of Southeast Asia fire activities on tropospheric ozone, trace gases and aerosols at a remote site over the Tibetan Plateau of Southwest

- China, *Tellus B*, 58, 310-318.
- Chance, K., P.I. Palmer, R.J.D. Spurr, R.V. Martin, T.P. Kurosu, and D.J. Jacob (2000) Satellite observations of formaldehyde over North America from GOME, *Geophys. Res. Lett.*, 27 (21), 3461-3464, doi:10.1029/2000GL011857.
- Crutzen, P.J. (1979) The role of NO and NO₂ in the chemistry of the troposphere and stratosphere, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 7, 443-472.
- Deeter, M.N., L.K. Emmons, D.P. Edwards, and J.C. Gille (2004) Vertical resolution and information content of CO profiles retrieved by MOPITT, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L15112, doi:10.1029/2004GL020235.
- De Smedt, I., M. Van Roozendael, T. Stavrou, J.F. Müller, R. Van der A, and H. Eskes (2007) Global Observation of Formaldehyde in the Troposphere by Satellites: GOME and SCIAMACHY Results Proc. Envisat Symposium, Montreux, Switzerland.
- Duncan, B.N., R.V. Martin, A.C. Staudt, R. Yevich, and J.A. Logan (2003) Interannual and seasonal variability of biomass burning emissions constrained by satellite observations, *J. Geophys. Res.*, 108(D2), 4100, doi: 10.1029/2002JD002378.
- Fishman, J. and J.C. Larsen (1987) Distribution of total ozone and stratospheric ozone in the tropics: Implications for the distribution of tropospheric ozone, *J. Geophys. Res.*, 92(D6), 6627-6634.
- Froidevaux, L., N.J. Livesey, W.G. Read, Y.B. Jiang, C. Jimenez, M.J. Filipiak, M.J. Schwartz, M.L. Santee, H.C. Pumphrey, J.H. Jiang, D.L. Wu, G.L. Manney, B.J. Drouin, J.W. Waters, E.J. Fetzer, P.F. Bernath, C.D. Boone, K.A. Walker, K.W. Jucks, G.C. Toon, J.J. Margitan, B. Sen, C.R. Webster, L.E. Christensen, J.W. Elkins, E. Atlas, R.A. Lueb, and R. Hendershot (2006) Early validation analyses of atmospheric profiles from EOS MLS on the Aura satellite, *IEEE Trans. Geophys. Remote Sens.*, 44(5), 1075-1092.
- Fu, T.M., D.J. Jacob, P.I. Palmer, K. Chance, Y.X. Wang, B. Barletta, D.R. Blake, J.C. Stanton, and M.J. Pilling (2007) Space-based formaldehyde measurements as constraints on volatileorganic compound emissions in east and south Asia and implications for ozone, *J. Geophys. Res.*, 112, D06312.
- Hudson, R.D. and A.M. Thompson (1998) Tropical tropospheric ozone from total ozone mapping spectrometer by a modified residual method, *J. Geophys. Res.*, 103 (D17), 22, 129-122, 145, doi:10.1029/98JD00729.
- Jaross, G. (2009) Temporal development of OMI detector dark current. personal communication.
- Khokhar, M.F., C. Frankenberg, M. Van Roozendael, S. Beirle, S. Kuhl, A. Richter, U. Platt, and T. Wagner (2005) Satellite observation of atmospheric SO₂ from volcanic eruptions during the time-period of 1996-2002, *Adv. Space Res.*, 36, 879-887.
- Kim, J.H., S. Na, R.V. Martin, K.H. Seo, and M.J. Newchurch (2008) Singular value decomposition analyses of tropical tropospheric ozone determined from TOMS, *J. Geophys. Res.*, 35, L15816.
- Kim, J.H., S.M. Kim, and M. Newchurch (2009) The analyses of satellite-derived HCHO measurements with statistical approaches, AGU fall meeting at San Francisco, December 14-18.
- Kim, J.H., S.M. Kim, K.H. Baek, M.J. Newchurch, T. Kurosu, I.D. Smedt, and L. Wang (2011) Evaluation of satellite-derived HCHO using statistical methods, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 11, 1-22.
- Krotkov, N.A., B. McClure, R.R. Dickerson, S. Carn, C. Li, P.K. Bhartia, K. Yang, A.J. Krueger, Z. Li, P.F. Levelt, H. Chen, P. Wang, and D. Lu (2008) Validation of SO₂ retrievals from the Ozone Monitoring Instrument over NE China, *J. Geophys. Res.*, 113, D16S40, doi:10.1029/2007JD008818.
- Kurosu, T.P., X. Liu, E.A. Celarier, and K. Chance (2008) Air Quality Observations from the Ozone Monitoring Instrument on EOS/Aura - HCHO and CHO-CHO, Proceedings of the American Geophysical Union Joint Assembly.
- Lee, C., A. Richter, J.P. Burrows, and Y.J. Kim (2008) Satellite (SCIAMACHY) Measurements of Tropospheric SO₂ and NO₂: Seasonal Trends of SO₂ and NO₂ Levels over northeast Asia in 2006, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 24(2), 176-188. (in Korean with English abstract)
- Lee, C., A. Richter, M. Weber, J.P. Burrows, and Y.J. Kim (2008) SO₂ retrieval from SCIAMACHY using the Weighting Function DOAS (WFDOAS) technique: comparison with Standard DOAS retrieval, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 6137-6145.
- Lelieveld, J., P.J. Crutzen, V. Ramanathan, M.O. Andreae, C.A.M. Brenninkmeijer, T. Campos, G.R. Cass, R.R. Dickerson, H. Fischer, J.A. de Gouw, A. Hansel, A. Jefferson, D. Kley, A.T.J. de Laat, S. Lal, M.G. Lawrence, J.M. Lobert, O.L. Mayol-Bracero, A.P. Mitra, T. Novakov, S.J. Oltmans, K.A. Prather, T. Reiner, H. Rodhe, H.A. Scheeren, D. Sikka, and J. Williams (2001) The Indian Ocean Experiment:

- Widespread Air Pollution from South and Southeast Asia. *Science*, 291, 1031-1036.
- Lorenz, E.N. (1956) Empirical orthogonal function and statistical weather prediction. Statistical Forecasting Project, Department of the Meteorology, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 49pp
- Marbach, T., S. Beirle, C. Liu, U. Platt, and T. Wagner (2008) Biomass burning emissions from satellite observations: synergistic use of formaldehyde (HCHO), fire counts and surface temperature, *Proc. of SPIE*, Vol. 7089, 70890J
- Martin, R.V., K. Chance, D.J. Jacob, T.P. Kurosu, R.J.D Spurr, E. Bucsele, J.F. Gleason, P.I. Palmer, I. Bey, A.M. Fiore, Q. Li, R.M. Yantosca, and R.B. A. Koelemeijer (2002) An improved retrieval of tropospheric nitrogen dioxide from GOME, *J. Geophys. Res.*, 107 (D20), 4437, doi:10.1029/2001JD001027
- Martin, R.V., D.D. Parrish, T.B. Ryerson, D.K. Nicks Jr., K. Chance, T.P. Kurosu, D.J. Jacob, E.D. Sturges, A. Fried, and B.P. Wert (2004) Evaluation of GOME satellite measurements of tropospheric NO₂ and HCHO using regional data from aircraft campaigns in the south eastern United States, *J. Geophys. Res.*, 109, D24307, doi:10.1029/2004JD004869.
- Newchurch, M.J., X. Liu, and J.H. Kim (2001) Lower-Tropospheric ozone (LTO) derived from TOMS near mountainous regions, *J. Geophys. Res.*, 106, D17, 403-412.
- Newchurch, M.J., D. Sun, and J.H. Kim (2001) Zonal wave-1 structure in TOMS tropical stratospheric ozone, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 16, 3151-3154.
- Palmer, P.I., D.S. Abbot, T.M. Fu, D.J. Jacob, K. Chance, T.P. Kurosu, A. Guenther, C. Wiedinmyer, J.C. Stanton, M.J. Pilling, N. Pressley, B. Lamb, and A.L. Sumner (2006) Quantifying the seasonal and interannual variability of North American isoprene emissions using satellite observations of the formaldehyde column, *J. Geophys. Res.*, 111, D12315.
- Petritoli, A., P. Bonasoni, G. Giovanelli, F. Ravagnani, I. Kostadinov, D. Bortoli, A. Weiss, D. Schaub, A. Richter, and F. Fortezza (2004) First comparison between ground-based and satellite-borne measurements of tropospheric nitrogen dioxide in the Po basin, *J. Geophys. Res.*, 109, D15307.
- Poisson, N. and M. Kanakidou (2000) Impact of non-methane hydrocarbons on tropospheric chemistry and the oxidizing power of the global troposphere: 3-dimensional modelling results, *J. Atmos. Chem.*, 36, 157-230.
- Richter, A. and J.P. Burrows (2002) Retrieval of tropospheric NO₂ from GOME measurements, *Advances in Space Research*, 29, 1673-1683.
- Richter, A., J.P. Burrows, H. Nüß, C. Granier, and U. Niemeier (2005) Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space, *Nature*, 437, 129-132.
- Schaub, D., K.F. Boersma, J.W. Kaiser, A.K. Weiss, D. Folini, H.J. Eskes, and B. Buchmann (2006) Comparison of GOME tropospheric NO₂ columns with NO₂ profiles deduced from ground-based in situ measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 3211-3229.
- Sillman, S. (1999) The relation between ozone, NO_x, and hydrocarbons in urban and polluted rural environments, *Atmos. Environ.*, 33, 1821-1845.
- Shim, C., Y. Wang, Y. Choi, P.I. Palmer, D.S. Abbot, and K. Chance (2005) Constraining global isoprene emissions with Global Ozone Monitoring Experiment (GOME) formaldehyde column measurements, *J. Geophys. Res.*, 110, D24301, doi:10.1029/2004JD005629.
- Stavrakou, T., J.F. Muller, M. Van Roozendael, G.R. van der Werf, L. Giglio, and A. Guenther (2009) Evaluating the performance of pyrogenic and biogenic emission inventories against one decade of space-based formaldehyde columns, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 1037-1060.
- Wallace, J.M., C. Smith, and C.S. Bretherton (1992) Singular Value Decomposition of Wintertime Sea Surface Temperature and 500-mb Height Anomalies, *J. Climate*, 5, 561-576.
- Wittrock, F., A. Richter, H. Oetjen, J.P. Burrows, M. Kanakidou, S. Myriokefalitakis, R. Volkamer, S. Beirle, U. Platt, and T. Wagner (2006) Simultaneous global observations of glyoxal and formaldehyde from space, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L16804, doi: 10.1029/2006GL026310.
- Ziemke, J.R. and S. Chandra (1998) Comment on Tropospheric ozone derived from TOMS/SBUV measurements during TRACE A by J. Fishman et al, *J. Geophys. Res.*, 103(D12), 13, 903-906.
- Zimeke, J.R., S. Chandra, B.N. Duncan, L. Froidevaux, P.K. Bhartia, P.F. Levelt, and J.W. Waters (2006) Tropospheric ozone determined from Aura OMI and MLS: Evaluation of measurements and comparison with the Global Modeling Initiative's Chemical Transport Model, *J. Geophys. Res.*, 111, D19305.