한국대기환경학회지 제 22 권 제 6 호
J. KOSAE Vol. 22, No. 6 (2006) pp. 940~953
Journal of Korean Society for Atmospheric Environment

기술자료

인공위성 센서 MOPITT를 이용한 일산화탄소 모니터링: 자료처리 및 응용

Monitoring of Carbon Monoxide using MOPITT: Data Processing and Applications

최 성 득[1),2)] · 장 윤 석[2),*]
[1)]토론토대학교 물리 · 환경과학과, [2)]포항공과대학교 환경공학부

(2006년 5월 25일 접수, 2006년 7월 27일 채택)

Sung-Deuk Choi[1),2)] and Yoon-Seok Chang[2),*]
[1)]*Department of Physical and Environmental Sciences, University of Toronto at Scarborough*
[2)]*School of Environmental Science and Engineering, POSTECH*

(Received 25 May 2006, accepted 27 July 2006)

Abstract

The major source of carbon monoxide (CO) at the Earth's surface is the incomplete combustion of biomass and fossil fuels. Because the global lifetime of CO is about two months, it can be used as a tracer for pollution from anthropogenic activities and biomass burning. In this paper, we introduced the principle and algorithm of the Measurement of Pollution in the Troposphere (MOPITT) instrument for global CO monitoring. The MOPITT instrument, which was launched on the Satellite Terra in 1999, measures CO column and mixing ratio based on gas correlation radiometry. CO levels can be determined by a retrieval algorithm based on the maximum likelihood method minimizing the difference between observed and modeled radiances. MOPITT level 2 data (HDF format) can be downloaded through the Earth Observing System (EOS) data gateway of NASA. ASCII files of CO parameters can be extracted from HDF files, and then temporal and spatial distributions can be obtained. Finally, we showed an example of CO monitoring in April 2000. The locations of forest fires and distribution of MOPITT CO clearly indicated that not only anthropogenic emissions but also forest fires play an important role in CO levels and global CO distribution. Our introduction to MOPITT and the example of MOPITT data interpretation would be helpful for scientists who want to use the EOS data.

Key words : MOPITT, Carbon monoxide (CO), Forest fire

1. 서 론

기후변화로 인한 환경변화는 일상생활은 물론 더 나아가 인류의 생존과 직결되어 있기 때문에 과학적

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)54-279-2281, E-mail : yschang@postech.ac.kr

으로나 사회적으로 많은 관심을 받고 있다. 과거의 환경문제들이 특정 지역에 국한되었던 것과는 달리, 엘니뇨, 오존층 파괴, 지구 온난화 등의 환경문제는 전 지구 규모로 발생하고 있다. 이러한 환경변화를 감시하고 예측하기 위해서는 전 지구적 모니터링 시스템이 구축되어야 한다. 기존에는 전 세계의 지상 관측소를 운영하는 방법이 최선이었으나, 이러한 관측 자료들은 대부분 시공간적인 해상도가 낮다는 단점이 있다. 따라서 최근에는 인공위성에 탑재된 원격센서들을 이용하여 지구 규모의 환경변화를 모니터링 하는 연구들이 시도되고 있다.

NASA에서는 Earth Observing System (EOS) 프로젝트(http://eos.nasa.gov)를 통해 다양한 인공위성 모니터링 자료를 축적하고 있으며, 인터넷을 통해 24개 관측항목에 대한 자료를 무료로 제공하고 있다. 현재 EOS의 관측대상 기체는 오존(O_3), 일산화탄소(CO), 메탄(CH_4) 등의 일부 중요한 기체들에 한정되어 있지만, 향후 이들 이외의 기체들에 대한 센서도 개발되어 인공위성에 탑재될 것으로 예상된다.

CO는 대기 중 OH 농도에 직접적인 영향을 미치므로 대류권 화학에서 매우 중요한 미량 기체이다(Logan *et al.*, 1981). 뿐만 아니라 화석연료의 불완전 연소나 산불로 인해 상당량이 배출되며(Bates *et al.*, 1995; Andreae, 1991; Khalil and Rasmussen, 1984), 대기 중의 lifetime이 약 2개월이므로(Brasseur *et al.*, 1999) 대기오염 배출원과 대기 중 이동경로를 파악할 수 있는 추적자로 사용될 수 있다. 현재, 많은 연구진에 의해 지상관측과 항공장치를 이용한 CO의 관측이 이루어지고 있다. 특히, NOAA/ESRL의 Global Monitoring Division (GMD)에서는 지상 CO 모니터링 네트워크를 구축하여, 주기적인 시료채취와 분석을 통해 신뢰성 있는 자료를 제공하고 있다(http://www.cmdl.noaa.gov). 이 네트워크는 4개의 NOAA/ESRL 관측소와 40개의 협력 관측소 등으로 구성되어 있다. 이들 관측소 시료에서는 CO 뿐만 아니라 CO_2, CH_4, N_2O, SF_6 등이 측정된다(Wang *et al.*, 1999). 그러나 대류권의 CO 프로필(연직 구조)은 전 세계적으로 미국과 호주의 각각 한 지점에서 측정되고 있으므로 시공간적인 해상도 문제는 여전히 남아 있다. 따라서 고감도 센서를 이용한 인공위성 원격탐사가 절실히 필요하다. 이러한 연구의 일환으로 토론토대학교 물리학과에서는 CO와 CH_4를 측정하는 Measurement of Pollution in The Troposphere (MOPITT) 기기를 개발하였으며, 1999년에 NASA와 공동으로 인공위성 테라(Terra)에 탑재하였다(http://www.atmosp.physics.utoronto.ca/MOPITT/home.html).

MOPITT 자료는 지난 2000년부터 무료로 제공되고 있으나, 아직까지 국내에서는 일부 연구만이 수행되고 있다(Lee *et al.*, 2004). 따라서 본 연구에서는 MOPITT 기기원리 및 알고리즘에 대해서 소개하고, 자료의 다운로드 방법과 처리과정을 설명하고자 한다. 마지막으로는 우리나라에서 가장 큰 산불이 났던 지난 2000년 4월의 전 지구 CO 분포와, 우리나라 중심의 동북아시아 CO 모니터링 예를 보여주고자 한다. 그동안 국내에서는 원격탐사를 전문으로 하는 일부 연구소나 학계를 중심으로 EOS 자료들을 사용해 왔다(이권호와 김영준, 2004). 그러나 일반 대기환경 연구자들은 자료 입수 및 처리의 곤란으로 인해 다양한 연구를 수행하는데 어려움이 있었다. 특히, 원격탐사 관련 소프트웨어 등에 능숙하지 않을 경우에는 접근 자체가 어려운 실정이다. 따라서 본 기술자료를 통해 국내 대기환경 연구자들이 보다 쉽게 MOPITT를 비롯한 EOS 자료를 활용함으로써, 원격탐사와 관련된 다양한 연구를 수행하는데 도움이 되고자 한다.

2. MOPITT 기기 원리

MOPITT 센서의 특성과 CO 농도환산 알고리즘을 이해하는 것은 MOPITT 자료를 사용하는데 직접적으로 관련은 없으나, 자료의 특성과 불확도(uncertainty) 등을 파악하는데 있어서 매우 중요하다. 본 장의 내용은 Society of Photo-optical Instrumentation Engineers에서 발표된 두 논문의 주요 내용을 요약·정리한 것임을 밝힌다(Drummond *et al.*, 1999; Wang *et al.*, 1999).

2.1 인공위성 및 센서 특성

1999년 NASA에서는 MOPITT 등이 탑재된 인공위성 테라(Terra)를 발사하였다. 테라는 MOPITT 이외에도 MODIS, ASTER, CERES, MISR 등의 센서를 탑재하고 있으므로(그림 1), EOS 위성 중에서도 응용범위가 넓다. 이 위성은 지구의 705 km 상공에서

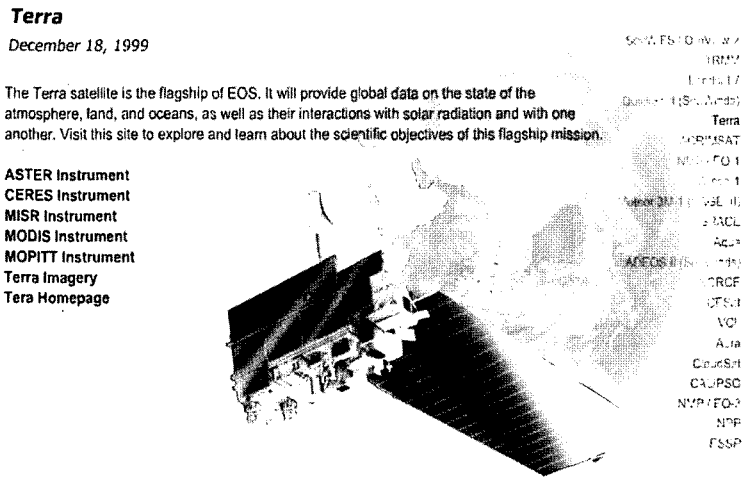


Fig. 1. Satellite Terra launched by NASA (http://www.eos.nasa).

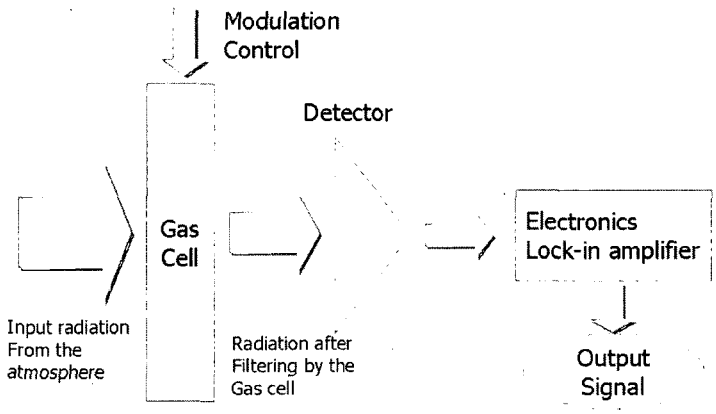


Fig. 2. Diagram of a gas correlation radiometer (Modified from Wang *et al.*, 1999).

하루에 약 15회(orbital period=98.88 min) 극궤도 운항을 하고 있다.

MOPITT는 8개 채널을 가진 적외선 가스상관 복사계(IR gas correlation radiometer)로서 기본적인 측정원리는 비분산 적외선법과 동일하며, 분석하고자 하는 가스와 동일한 가스를 필터로 사용하는 상관분광계(correlation spectroscopy)에 의해 CO와 CH_4를 측정한다. 즉, 기기 내의 표준가스 스펙트럼과 대기 중의 CO와 CH_4의 복사 스펙트럼의 일치를 확인함으로써, 대기 중 미량으로 존재하는 CO와 CH_4를 검출할 수 있다(그림 2). CO 프로필의 측정은 4.7 μm 밴드의 열복사를, CO 컬럼의 측정은 2.3 μm의 반사 태양복사를 이용한다(Wang *et al.*, 1999). 센서의 수평 · 수직 해상도와 정밀도 등을 포함한 측정 인자들이 표 1에 요약되어 있다. 이 중에서 주목할 항목은 수평해상도(horizontal resolution)와 정밀도(precision)이다. MOPITT의 해상도는 22×22 km로서 그리 높은 편이 아니다. 따라서 국지적인 오염현상 보다는 전 지구, 대륙, 동북아시아 등의 광역에서 발생하는 오염원 파악에 유용하게 사용될 수 있다. 또한 CO 분석 정밀도는 10%이므로 미세한 농도변화를 비교하기에는 부적절하지만 배경농도 지역과 오염지역을

구분하기에는 충분하며, CH_4의 분석 정밀도는 1%이다.

MOPITT는 가스셀에서의 투과도를 조절하기 위해서 셀의 압력을 조절하거나 길이를 변화시키는 방법을 사용한다. 두 개의 PMR (pressure modulated radiometer)과 네 개의 LMR (length modulated radiometer)이 사용되며 전체 8개의 채널을 가지고 있다. PMR 채널은 저압셀을 이용하여 대류권 상층에서 높은 민감도를 갖고 있으며, LMR 채널은 고압셀을 이용하여 중간 이하의 고도에서 높은 민감도를 가지고 있다. 각각의 채널은 average signal (S_A)과 difference signal (S_D)을 출력하는데, S_A는 가스셀의 두 상태에서의 평균값이고 S_D는 그 차이를 나타낸다. 예를 들어, LMR 채널의 경우에는 셀의 길이가 2 mm일 때와 10 mm일 때의 두 값의 평균과 차이를 신호로 출력하며, PMR 채널의 경우에는 고압과 저압일 때의 값들을 출력한다. S_A는 지표면과 구름의 특성에 민감하며, S_D는 대기 중 CO와 CH_4의 변화에 민감하다. MOPITT 채널의 특성을 표 2에 정리하였다(Wang *et al.*, 1999).

그림 3은 4개의 MOPITT 입력부위를 나타내는 광학채널의 모식도이며, 그림 4는 기기의 레이아웃이다. 입력 부위의 앞쪽에는 calibration source, space view, input scan mirror와 chopper가 있다. 각각의 빔은 8개의 출력 채널로 나뉜다. 두 개의 입력부에는 dichroic beam splitter 앞에 조절셀이 있으며, 나머지 두 개의 입력부에는 beam splitter 뒤에 조절셀이 장착되어 있다. 전, 중, 후방의 광학장치(optics)는 조절셀과 냉각 검출기를 사용하여 input scan mirror로부터 빔을 전달한다(Drummond *et al.*, 1999).

Table 1. Summary of science requirements of MOPITT (Drummond *et al.*, 1999).

Parameter	CO profiles	CO column	CH_4 column
Wavelength (μm)	4.617	2.334	2.258
Mid wave number (cm^{-1})	2166	4285	4430
Wave number range (cm^{-1})	52	40	139
Modulator type	LMC/PMC	LMC	LMC
Vertical Resolution (km)	3	-	-
Horizontal resolution (km)	22×22	22×22	22×22
Temporal resolution (sec)	0.4	0.4	0.4
Precision (%)	10	10	1

2.2 MOPITT 알고리즘

복사나 투과로부터 지구물리학적인 인자들을 도출하는 여러 방법들 중에서, 통계적 관점에서 접근하는 방식인 최대 근사법(maximum likelihood method)이 많이 사용된다. 이때 관측 노이즈나 이미 알고 있는 불확도는 공분산 행렬 형태의 가중치로 이용된다. MOPITT 알고리즘도 최대 근사법을 사용한다. 즉, 다양한 지역에서의 CO 실측값과 대기환경 변수를 초기값으로 설정하고, 특정 시간과 공간에서의 복사나 투과 파장으로부터 CO 농도를 구하는 알고리즘이다(Wang *et al.*, 1999).

MOPITT 전체 채널 8개 중에서 6개의 CO 채널은 6개의 average signal (S_A)과 6개의 difference signal (S_D)을 발생시킨다. 이 신호들은 대류권의 CO 프로필과 컬럼을 계산하는 프로세스에 사용된다. CO thermal 채널 신호(channel 1, 3, 5, 7)는 다음 식(1), (2)에 의해 계산되며 solar 채널 신호는 식(3), (4)에

Table 2. Characteristics of MOPITT CO and CH_4 channels (Wang *et al.*, 1999).

Ch #	Primary purpose	Modulator type	Cell pressure (mb)	Cell temperature (K)	Cell length (mm)	Center wavenumber* (cm^{-1})
1	CO	LMC1	200	300	2~10	2166 (52)
2	CO	LMC1	200	300	2~10	4285 (40)
3	CO	PMC1	50~100	300	10	2166 (52)
4	CH_4	LMC2	800	300	2~10	4430 (140)
5	CO	LMC3	800	300	2~10	2166 (52)
6	CO	LMC3	800	300	2~10	4285 (40)
7	CO	PMC2	25~50	300	10	2166 (52)
8	CH_4	LMC4	800	300	2~10	4430 (140)

*Numbers in parenthesis are band filters full width at half maximum (FWHM).

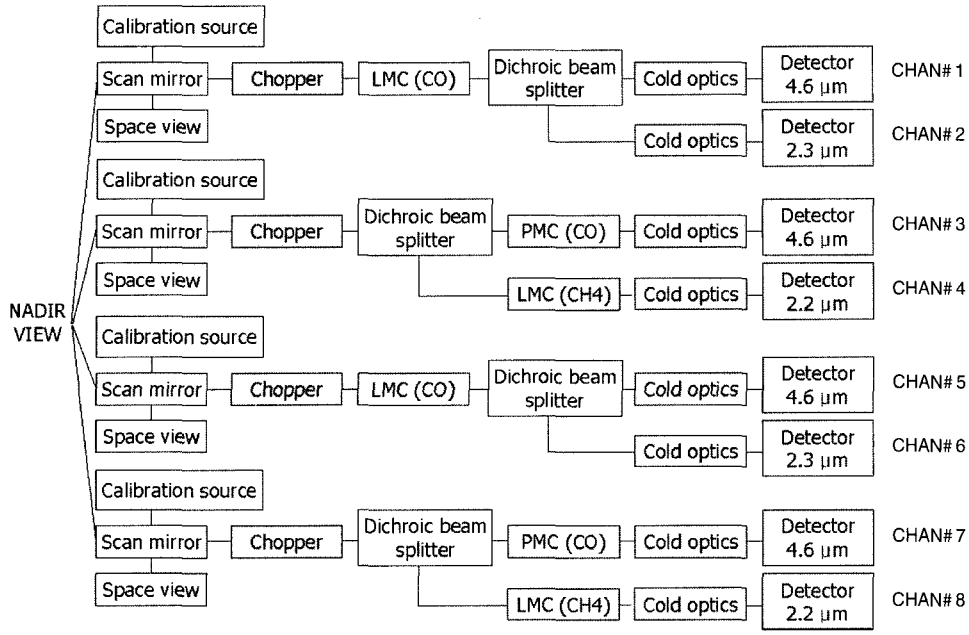


Fig. 3. Schematic diagram of MOPITT optics (Modified from Drummond *et al.*, 1999).

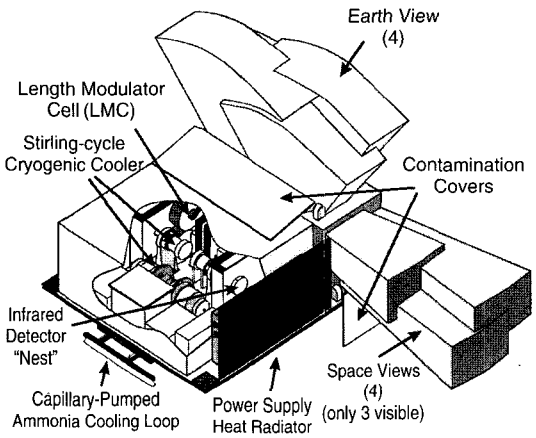


Fig. 4. MOPITT instrument layout (Drummond *et al.*, 1999).

의해 계산된다.

$$S_a^{thm} = \int_v \left\{ I_s(V) + \int_0^{\infty} \left[[B(v, T(z)) - I_s(v)] \frac{d\tau(v, z, \infty)}{dz} \right] dz \right\} \tau_f(v) \left[\frac{\tau_c(p_l) + \tau_c(p_h)}{2} \right] dv \quad (1)$$

$$S_d^{thm} = \int_v \left\{ I_s(V) + \int_0^{\infty} \left[[B(v, T(z)) - I_s(v)] \frac{d\tau(v, z, \infty)}{dz} \right] dz \right\} \tau_f(v) [\tau_c(p_l) - \tau_c(p_h)] dv \quad (2)$$

$$S_a^{sol} = \int_v R_s(V) I_\theta(v) \exp\left[- \int_0^{\infty} k(z) \rho_{CO}(z) (\sec(\theta_{sat}) + \sec(\theta_{sun})) dz \right] \tau_f(v) \left[\frac{\tau_c(p_l) + \tau_c(p_h)}{2} \right] dv \quad (3)$$

$$S_d^{sol} = \int_v R_s(V) I_\theta(v) \exp\left[- \int_0^{\infty} k(z) \rho_{CO}(z) (\sec(\theta_{sat}) + \sec(\theta_{sun})) dz \right] \tau_f(v) \left[\frac{\tau_c(p_l) - \tau_c(p_h)}{2} \right] dv \quad (4)$$

S_a^{thm} : CO thermal channel average signal

S_d^{thm} : CO thermal channel differential signal

S_a^{sol} : CO solar channel average signal

S_d^{sol} : CO solar channel differential signal

$I_s(v)$: the top of the atmosphere (TOA) radiance

$B(v, T(z))$: the Plank function

$\tau(v, z, \infty)$: the atmospheric transmittance from altitude z to TOA

$\tau_f(v)$: the MOPITT instrument transfer function

$\tau_c(p_l)$: the CO cell transmission function at low cell pressure p_l

$\tau_c(p_h)$: the CO cell transmission function at high cell pressure p_h

$R_s(v)$: the surface reflectivity in MOPITT CO solar channel

$I_\theta(v)$: the solar irradiance at TOA

$K(z)$: the CO absorption coefficient in CO solar channel

$\rho_{CO}(z)$: CO number density at altitude z

$\theta_{\sigma\alpha\tau}$: the MOPITT observation zenith angle

$\theta_{\sigma\alpha\lambda}$: the solar zenith angle

이러한 MOPITT 신호들은 MOPFAS (MOPITT fast radiative transfer model)로 불리는 모델에 의해 계산되며, 위의 4개의 식은 다음 식으로 일반화될 수 있다.

$$Y=F(X,b)+N_{inst} \tag{5}$$

Y : the measurement vector consisting of 8 MOPITT CO thermal channel signals and 2 difference to average signal ratios of MOPITT CO solar channels

X : the state vector consisting of CO mixing ratio

b : the vector of unknown parameters

위 식의 해를 직접적으로 구하는 것은 불가능하므로, 관측값(Y)과 계산값(F(X, b))의 차이를 최소화하는 X를 찾아야 한다. 최대 근사법에서는 cost function J(X)를 최소화하는 X를 구해야 한다.

$$J(X)=(Y-F(X,b))^tS_\varepsilon^{-1}(Y-F(X,b)) +(X-X_a)^tS_X^{-1}(X-X_a) \tag{6}$$

X_a : a priori about the state vector

S_ε : the measurement noise and forward model error covariance matrix

S_X : the expected variance and covariance of X with regard to X_a

식(6)을 풀기 위한 최소화 방법은 많이 있지만, F(X, b)가 비선형 함수인 경우에도 짧은 구간에서는 선형 함수로 생각할 수 있기 때문에 테일러 급수(Taylor series)로 전개가 가능하다.

$$Y=Y_0+\left.\frac{\partial F}{\partial X}\right|_{X_0}(X-X_0)=Y_0+K(X)\Big|_{X_0}(X-X_0) \tag{7}$$

만약 첫 번째 추정값 X_0가 실제값과 큰 차이가 없다고 가정하면 고차항을 무시할 수 있다. 또한 $\partial F/\partial X=K(x)$로 바꾸어 표시하고 식(6)의 Y를 식(7)로 치환하고 $\partial J(X)/\partial X=0$이라고 하면 식(8)을 얻는다.

$$X=X_a+S_XK_{X_0}^T(K_{X_0}S_XK_{X_0}^T+S_\varepsilon)^{-1} [Y-Y_0-K_{X_0}(X_a-X_0)] \tag{8}$$

T는 대각행렬을 의미한다. 일반적으로 한 번의 iteration으로 최적값을 구하기는 어려우므로 classical Newton iteration을 사용하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$X_{n+1}=X_a+S_XK_{X_n}^T(K_{X_n}S_XK_{X_n}^T+S_\varepsilon)^{-1} [Y-Y_n-K_{X_n}(X_a-X_n)] \tag{9}$$

Iteration은 미리 정한 수렴 범위$(X_{n+1}-X_n)$가 충분히 작아질 때까지 계속된다. QA (Quality Assurance)로서 $Y_{n+1}-Y_n$은 기기 노이즈보다 작아야 한다. 식(9)와 같은 최대 근사법의 장점은 에러 분석이 가능하다는 것이다. 에러 공분산 행렬은 다음과 같이 주어진다.

$$S=(S_X^{-1}+K_X^TS_\varepsilon^{-1}K_X)^{-1} \tag{10}$$

그림 5는 MOPITT 알고리즘의 전반적인 프로세스를 나타낸다. MOPFAS 모듈은 특정 MOPITT 픽셀에 대한 예상 신호를 계산하며, MOPFAS 모듈의 입력자료로서 보조자료(ancillary data), 초기추정 벡터 X_0가 포함된다. 보조자료에는 기온, 습도, 표면 압력, 온도, 복사율(emissivity), 위성 및 태양의 천정각(zenith) 등이 포함된다. Maximun likelihood inversion 모듈은 상태 벡터 X_1을 업데이트 한다. Retrieval 모듈의 입력자료로는 계산된 신호인 Y^{cal}, MOPITT에서 측정된 벡터 Y^m, 벡터 공분산 행렬 S_X, 그리고 초기 추정값 X_0의 형태인 초기값(*a priori*)이 있다. 업데이트 된 X_1은 MOPFAS 모듈로 재입력되어 업데이트 된 MOPITT 신호 계산결과인 Y_1을 출력한다. Y_1과 MOPITT에서 측정된 신호 Y^m과 *a priori*가 다시 maximum likelihood inversion 모듈로 들어가 다시 새로운 상태 벡터 X_2를 생성하게 되고 이 과정은 수렴할 때까지 반복된다.

한편, 지표면과 대류권 하층 사이의 열적 대비

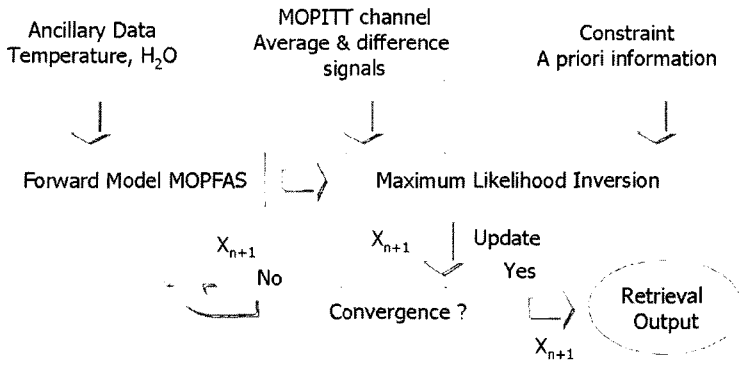


Fig. 5. Schematic diagram of the MOPITT CO retrieval algorithm (Modified from Wang *et al.*, 1999).

(thermal contrast)가 약하기 때문에, 지표근처(surface, 700, 850 mb)에서는 CO에 대한 감도가 상대적으로 작다(Deeter *et al.*, 2004). 따라서 MOPITT surface CO 자료는 불확도가 크므로 이점을 감안해서 자료를 해석해야 한다.

3. MOPITT 자료처리

NASA에서는 EOS 홈페이지를 통해 MOPITT를 포함한 다양한 센서 자료(HDF format)를 제공하고 있다. 또한 MOPITT HDF 파일에서 원하는 자료를 추출할 수 있는 소스 파일을 제공하고 있다. 그러므로 MOPITT 자료의 수집 및 가공은 완전히 개방되어 있으며, 누구라도 MOPITT 자료를 이용하여 CO 및 CH_4와 관련된 연구를 수행할 수 있다.

3.1 HDF 파일 다운로드

MOPITT를 포함한 EOS 자료를 다운로드하기 위해서는 NASA에서 운영하는 EOS data gateway (http://redhook.gsfc.nasa.gov/~imswww/pub/imswelcome)에 사용자 등록을 해야 한다. 등록 후, 간단한 로그인 절차를 마치면 검색창에서 원하는 인공위성 자료를 검색하거나, 각 위성의 센서 목록 중에서 원하는 자료를 찾을 수 있다(그림 6). MOPITT의 경우, MOPITT Derived CO and CH_4 V003를 택해야 한다. 위도/경도 범위를 지정하면 원하는 지역만의 자료를 얻을 수 있으므로 굳이 전 지구 자료가 필요 없는 경우에는 위도/경도 범위를 지정할 수 있다. 이후, 원하는 기간을 선택하여 자료의 유무를 검색한다. MOPITT 자료는 2000년 3월부터 현재까지 일별로 제공되고 있다. 검색이 완료되면 자료제공 옵션을 선택해야 하는데 FtpPull을 선택하면 신청자의 이메일로 HDF 파일을 다운로드 받을 수 있는 FTP 정보가 전달된다. 이 이메일에는 FTP에 접속하여 자료를 다운로드 받는 법이 자세히 설명되어 있다. 자료가 많을 경우, 가장 손쉬운 방법으로 윈도우 환경에서 DOS 창(명령 프롬프트)을 실행한 후, FTP에 접속하여 mget *.* 명령을 통해 한꺼번에 다운로드 받을 수 있다(그림 7). 또한 FTP 사이트 링크를 클릭하여 웹 사이트 상에서 바로 복사할 수도 있다. 하루 동안의 자료는 MOP02-20030202-L2V5.7.2.val.hdf와 같이 표기되는 HDF 파일과, 확장자가 met나 xml로 나타나는 메타 파일 두 가지로 구성된다. 보통 하루 자료의 경우, 60~70 MB 정도의 용량이므로 전체 자료의 용량과 다운로드 시간을 고려해야 한다.

3.2 자료처리

MOPITT HDF 파일을 다운로드 후, CO 자료를 추출하기 위해서는 HDF 형식의 자료를 다룰 수 있는 자료처리 프로그램이 필요하다. 주로 사용되는 프로그램은 IDL (Interactive Data Language: Research System, Inc.)이다. 이 프로그램은 일반 자료의 처리 및 분석뿐만 아니라 의료, 인공위성 등의 영상도 처리할 수 있기 때문에 지구과학, 환경과학, 의학 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. IDL 프로그램으로 MOPITT

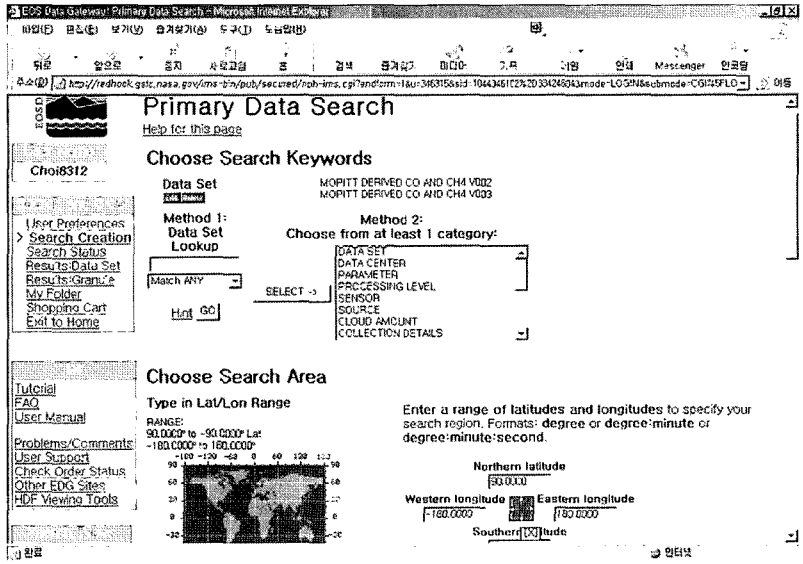


Fig. 6. Selection of MOPITT data through EOS gateway (http://redhook.gsfc.nasa.gov/~imswww/pub/imswelcome).

Fig. 7. Download of MOPITT-HDF files by FTP.

자료를 처리하기 위해서는 특정한 코드(code)가 필요하다. 이 코드는 사용자가 작성할 수도 있으나, 이미 NASA의 Atmospheric Science Data Center (ASDC)에서 웹사이트를 통해서 제공하고 있다 (http://eosweb.larc.nasa.gov/PRODOCS/mopitt/table_mopitt.html). 이 코드를 다운로드 후, IDL 상에서 파일을 열면 그림 8과 같은 창이 나타난다. 이 소스를 컴파일 후, 실행시키면 HDF 파일 선택창이 열리고 특정 날짜의 HDF 파일을 선택하면, 그림 9와 같은 창이 열려 특정 자료(CO 컬럼, 각 기압별 CO 농도 등)를 텍

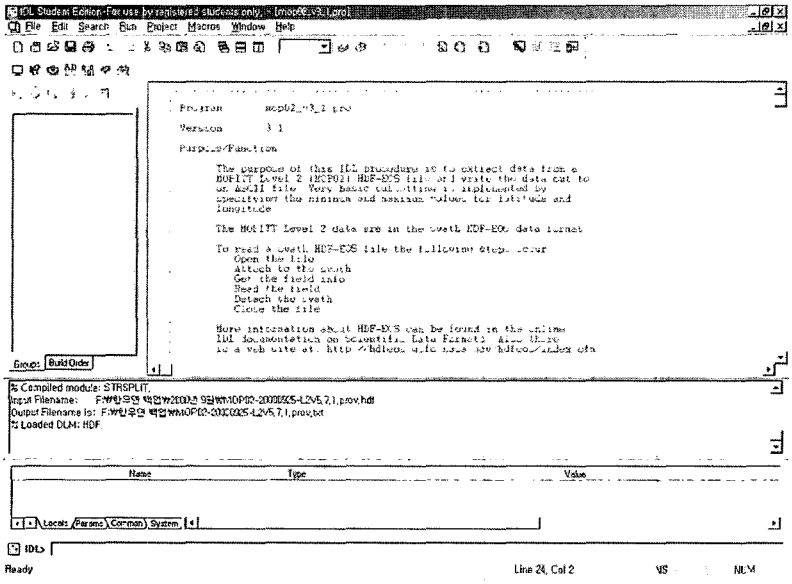


Fig. 8. Source code of IDL for MOPITT data extraction.

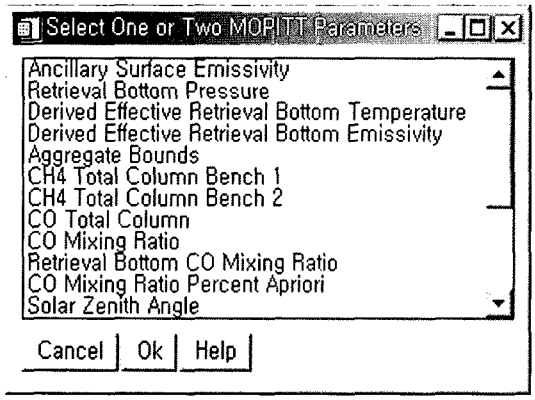


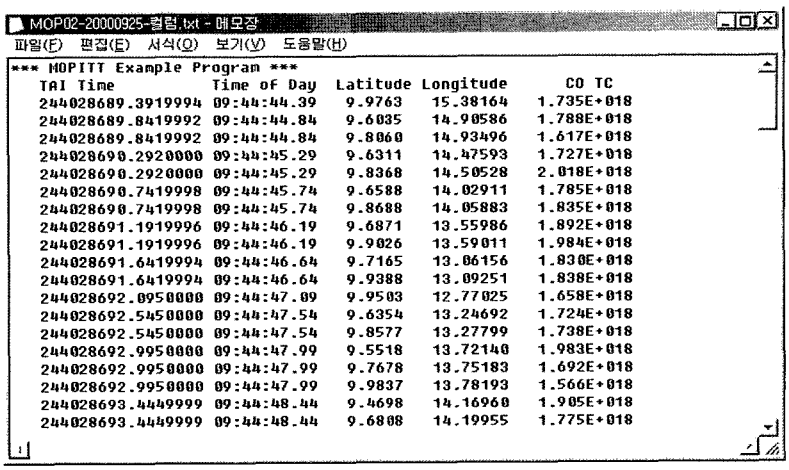
Fig. 9. Selection of CO parameters from the MOPITT-HDF file on IDL.

스트 파일로 추출할 수 있다(그림 10).

텍스트 파일에는 시간과 위도, 경도, 그리고 CO 자료가 저장된다. 따라서 원하는 지역의 시간평균 CO 컬럼과 농도를 계산할 수 있다. 장기간의 자료를 이용하여 특정 지역에서 지속적으로 평균을 계산하면, CO 농도의 변화를 모니터링 할 수 있다. 그러나 인공위성 테라가 지구를 극궤도로 회전하여 전 지역을 모니터링하기 위해서는 3일 정도의 시간이 걸리므로, 3일 평균자료를 사용하는 것이 자료처리 측면에서 바람직하다.

특정 지역에서 단기간 평균 농도를 계산하는 등 간단한 자료처리를 위해서는, 마이크로소프트 엑셀을 사용하는 것으로도 충분하다. 그러나 장기간의 자료처리를 위해서는 IDL이나 FORTRAN 등의 프로그램 언어를 이용하는 것이 효율적이다. 자료처리에 있어서의 문제점은 인공위성의 위치가 지속적으로 바뀌므로 좌표가 항상 변한다는 것이다. 즉, 여러 날짜의 자료를 비교하거나 평균값을 구하기 위해서는 좌표가 같아야 하는데, 실제로는 같지 않으므로 직접적인 계산에 어려움이 있다. 이런 경우에는 적절한 해상도의 격자(grid)를 설정하여 격자 교차점의 값을 구하면 쉽게 해결할 수 있다. 이와 같이 좌표를 통일하여 자료를 처리하게 되면 CO 컬럼과 농도의 주간평균, 월평균, 계절평균, 연평균값 등을 계산할 수 있다.

CO 평균값을 계산한 후에는, 지도상에 등고선(contour mapping)으로 표현할 필요성이 있다. CO의 농도분포나 이동에 대해 보다 확실히 직관적으로 판단할 수 있기 때문이다. IDL이나 GMT (Generic Mapping Tools)를 포함한 다양한 소프트웨어를 이용하여 등고선 그림을 작성할 수 있다. 그러나 초보자의 경우, 이러한 소프트웨어의 사용이 어려울 수 있



MOP02-20000925-컬럼.txt - 메모장

파일(F) 편집(E) 서식(O) 보기(V) 도움말(H)

*** MOPITT Example Program ***

TAI Time	Time of Day	Latitude	Longitude	CO TC
244028689.3919994	09:44:44.39	9.9763	15.38164	1.735E+018
244028689.8419992	09:44:44.84	9.6035	14.90586	1.788E+018
244028689.8419992	09:44:44.84	9.8060	14.93496	1.617E+018
244028690.2920000	09:44:45.29	9.6311	14.47593	1.727E+018
244028690.2920000	09:44:45.29	9.8368	14.50528	2.018E+018
244028690.7419998	09:44:45.74	9.6588	14.02911	1.785E+018
244028690.7419998	09:44:45.74	9.8688	14.05883	1.835E+018
244028691.1919996	09:44:46.19	9.6871	13.55986	1.892E+018
244028691.1919996	09:44:46.19	9.9026	13.59011	1.984E+018
244028691.6419994	09:44:46.64	9.7165	13.06156	1.830E+018
244028691.6419994	09:44:46.64	9.9388	13.09251	1.838E+018
244028692.0950000	09:44:47.09	9.9503	12.77025	1.658E+018
244028692.5450000	09:44:47.54	9.6354	13.24692	1.724E+018
244028692.5450000	09:44:47.54	9.8577	13.27799	1.738E+018
244028692.9950000	09:44:47.99	9.5518	13.72140	1.983E+018
244028692.9950000	09:44:47.99	9.7678	13.75183	1.692E+018
244028692.9950000	09:44:47.99	9.9837	13.78193	1.566E+018
244028693.4449999	09:44:48.44	9.4698	14.16960	1.905E+018
244028693.4449999	09:44:48.44	9.6808	14.19955	1.775E+018

Fig. 10. ASCII file of total CO column extracted from the HDF file.

으므로, Surfer (Golden Software Inc.)를 사용하여 비교적 간단히 등고선 그림을 작성할 수 있다.

4. 사례 연구 (2000년 4월)

서론에서 언급했듯이 CO는 주로 산업 활동이나 산불 등으로 인한 불완전 연소에 의해 배출된다. 따라서 CO는 대기오염의 지표(indicator)가 될 수 있으므로, 연소와 관련한 다양한 오염물질의 배출과 장거리 이동을 파악하고 예측하는데 있어서 중요한 자료로 사용될 수 있다. 본 사례 연구에서는 우리나라에서 가장 심한 산불이 발생했던 2000년 4월을 연구기간으로 선택하였다.

그림 11은 2000년 4월(1~20일), CO 컬럼의 주간평균과 전체평균 분포도이다. 지도상의 붉은 점은 Along Track Scanning Radiometer (ATSR)로 측정한 그 당시의 fire spot 자료이다(GLOBSCAR: http://dup.esrin.esa.it/ionia/wfa/index.asp). 전반적으로 북반구의 CO 컬럼이 남반구보다 높음을 알 수 있다. 이는 북반구 육지가 CO의 주요 배출원임을 의미한다. 북태평양이나 북극해에서의 높은 CO 농도는 육상에서 대기의 흐름에 따라 이동한 것으로 판단되며, 육지에서의 높은 값들은 대부분 북반구 중위도 지역에 위치하고 있는데 이는 산업활동과 산불의 영향일 것으로 판단된다. 특히, 중부 아프리카, 인도, 인도차이나와 미얀마 지역에서 많은 산불이 발생하였으며, 동시에 높은 CO 컬럼값을 보인다. 따라서 이 지역은 산불에 의해 다량의 CO가 배출되었음을 의미한다. MOPITT를 비롯한 다양한 인공위성 센서들을 이용하여 대형산불에 의한 오염물질 배출 관련 연구들이 수행되고 있다(Liu *et al.*, 2005; Edwards *et al.*, 2003; Lamarque *et al.*, 2003). 한편, 4월 첫째, 둘째 주에는 산불이 많이 발생하지 않은 중국 산둥반도와 상해 방면에서 높은 CO 컬럼값이 관찰되며 태평양을 건너 북미까지 도달하는 것을 볼 수 있다. 이는 한국, 중국, 일본을 포함한 아시아의 산업활동에 의해, 다량의 CO가 배출되어 장거리 이동을 통해 북미지역까지도 영향을 미친다는 것을 의미한다(Heald *et al.*, 2003).

한편, MOPITT 자료와 산불자료, 역궤적 모델을 결합할 경우, 해당지역의 CO 농도에 미치는 산업활동과 산불의 영향을 통계분석을 통해 정량적으로 평가할 수 있다. 이전에는 일부 지역에서 지상관측 자료와 역궤적 모델을 결합하여, 산업활동이나 산불이 CO 농도에 미치는 영향을 파악하였으며(Kato *et al.*, 2004, 2002; Pochanart *et al.*, 2004, 2003, 1999; Narita *et al.*, 1999; Kajii *et al.*, 1998), 국내에서도 주요 도시에서의 일산화탄소 농도변화를 연구하였다(김영성 등, 2001). 그러나 MOPITT 자료를 사용할 경우에는 지상관측 자료가 없더라도 세계 어느 지역에서도 그 영향을 정량적으로 파악할 수 있는 장점이 있다. 예

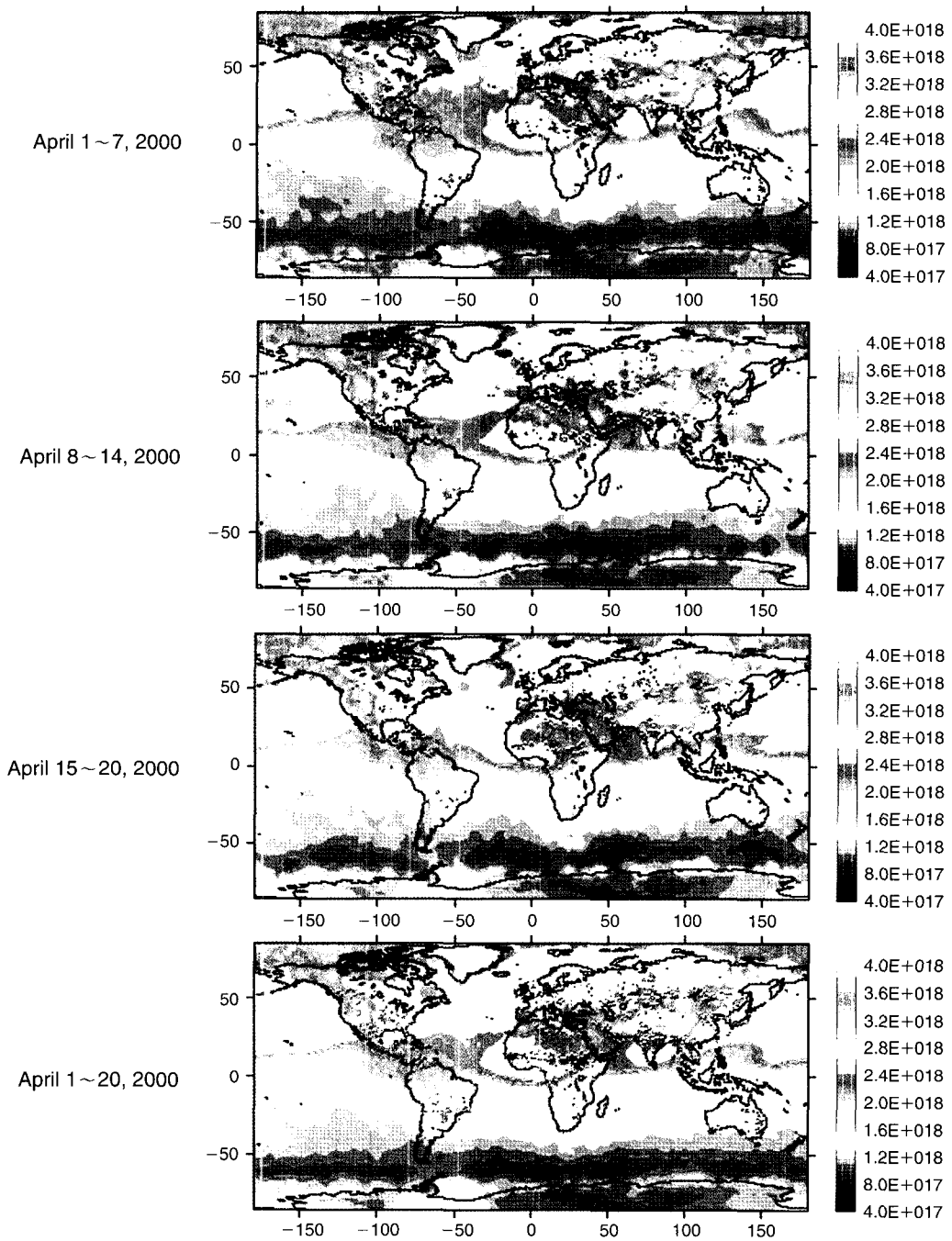


Fig. 11. Global distribution of total CO column (molecules cm^{-2}) with GLOBSCAR fire spots in April 2000.

를 들어, 본 연구진은 MOPITT 자료를 이용하여 시베리아 산불이 한반도 주변 CO 농도 수준에 미치는 영향을 평가하였다. 시베리아 산불이 발생한 후에 한반도 주변에서는 평균적으로 31 ppb 정도의 CO 농도

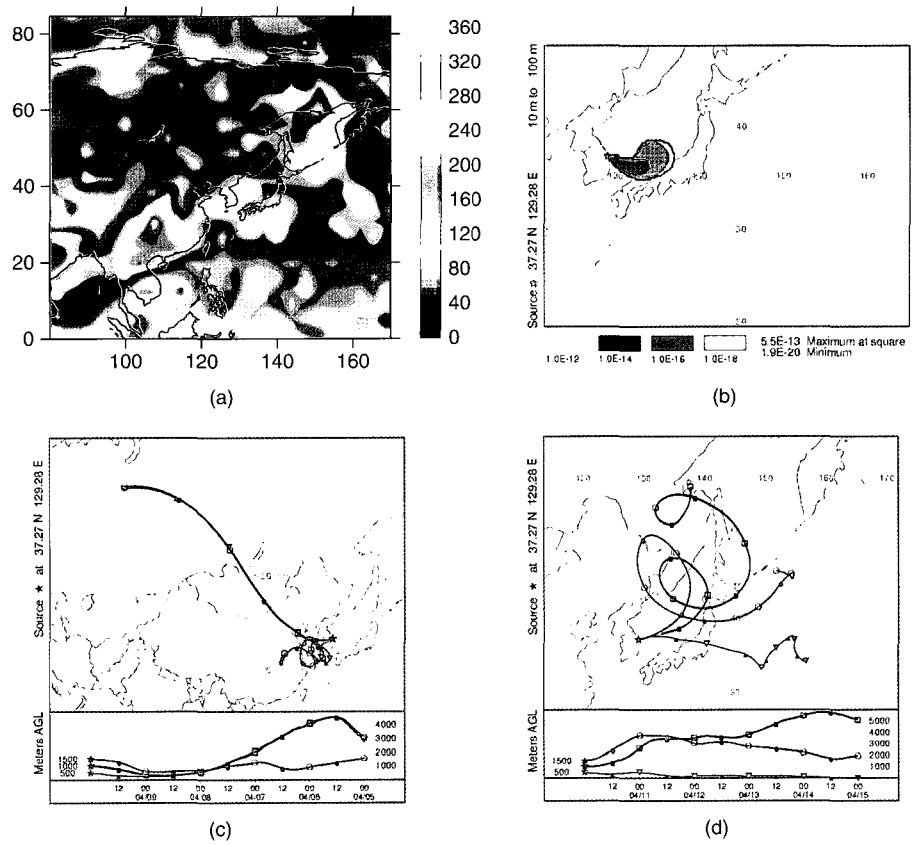


Fig. 12. Distribution of MOPITT surface CO (ppbv) in East Asia (a), and the results of HYSPLIT dispersion (b), backward (c), and forward trajectory analysis (d) at the east coast of Korea at 00 UTC April 10, 2000.

증가가 관측되었다(Choi and Chang, 2006).

그림 12는 2000년 4월 10일 강원도에서 대규모의 산불이 발생한 날의 MOPITT CO 농도분포와 HYSPLIT 모델링 결과이다. 보통 하루 동안의 MOPITT 자료를 사용할 경우에는 해당지역 상공을 테라가 지나가지 않는 경우도 많으므로 불확도가 크다. 그러나 2000년 4월 10일에는 동해상공을 지나갔으므로, 그림 12에서 보이는 동해 부근의 CO 분포는 비교적 신뢰도가 높다. 한반도와 동해 부근에서 200 ppb 이상의 CO 농도를 볼 수 있다. 한국과 중국에서의 4월 10일 전후의 CO 분포의 변화와 backward & forward trajectory를 살펴보았을 때, 중국 남부의 고농도 CO는 한반도와 동해의 CO 농도에 영향을 주지는 않았다. 따라서 동해상의 다소 높은 CO 농도는 강원도 동해안 산불의 영향일 가능성이 있다. 그러나 당시의 산불은 우리나라 역사상으로는 최대의 산불이었지만, 외국의 산불이나 산업활동에 의한 배출과 비교해서는 매우 미미한 수준이었다. 따라서 강원도 산불은 발생 당시에 동해상의 대기 중 CO 농도에 일부 영향만을 미친 것으로 판단된다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 전 지구적 CO 측정을 위해 개발된 인공위성 센서인 MOPITT의 기기원리와 알고리즘에 대하여 소개하였다. MOPITT는 비분산적외선법과 동일한 원리를 이용하며, CO 가스를 필터로 사용하는 상관 분광계이다. 기기 신호값을 CO 농도로 변환하기 위하여, CO 실측값과 대기환경 변수를 초기값으

로 설정하고, 복사나 투과 파장으로부터 CO 농도를 구하는 알고리즘을 사용한다.

MOPITT 자료(하루 단위)는 2000년 3월부터 사용이 가능하며 NASA에서 운영하는 EOS gateway를 통해 무료로 제공받을 수 있다. FTP를 이용하여 특정 지역과 기간에서의 자료를 다운로드 받을 수 있으며, 자료처리 소프트웨어인 IDL을 이용하여 HDF 형식의 파일로부터 원하는 자료만을 텍스트 파일로 추출해 낸다. 이후, 텍스트 파일은 간단한 자료처리를 거쳐 지역별 평균농도로 환산되어 농도 시계열 자료로 사용될 수 있으며, 등고선 지도를 작성할 경우, CO의 전 지구적 분포 현황을 파악할 수 있다.

MOPITT 자료를 이용한 실질적인 대기 모니터링의 예로는 대형 산불이나 대규모 공업지역에서 발생하는 CO를 추적하고, 역궤적 모델이나 기타 인공위성 자료를 동시에 이용하여 특정 지역의 CO 농도에 미치는 오염원의 영향을 정성 · 정량적으로 파악하는 것이 대표적이다. 본 논문에서는 간단한 사례연구로서 2000년 4월의 CO 분포에 대해서 알아보았으며, 산불이나 산업활동이 CO의 주요 오염원이라는 것을 재확인할 수 있었다.

본 논문에서 언급된 여러 웹사이트와 인공위성 자료의 입수 및 처리과정을 토대로, 국내 대기환경 연구자들이 보다 쉽게 EOS 자료를 활용함으로써, 동북아시아 광역오염 연구를 비롯한 다양한 연구를 수행하는데 도움이 되기를 기대한다.

감사의 글

자료처리에 도움을 주신 한국항공우주연구원의 최기혁 박사님과 이상희 선생님께 감사드립니다. 본 연구는 한국해양연구원 극지연구소의 남극 세종기지 주변 인간 활동으로 인한 환경변화 모니터링 사업(PE05005)과 두뇌한국21(BK21) 사업 핵심분야의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

김영성, 김영주, 김진영(2001) 1999년 기류의 이동궤적에 따른 우리나라 주요도시의 일산화탄소 농도 변화, 한국대기환경학회지, 17(6), 451-461.

이권호, 김영준(2004) 인공위성 자료와 AERONET 관측자료를 이용한 러시아산불 시 발생한 에어로졸의 중장거리 모니터링, 한국대기환경학회지, 20(4), 437-450.

Andreae, M.O. (1991) Biomass burning: Its history, use, and distribution and its impact on environmental quality and global climate, In: J.S. Levine (Editor), Global biomass burning: atmospheric, climatic, and biospheric implications, The MIT Press, Massachusetts.

Bates, T.S., K.C. Kelly, J.E. Johnson, and R.H. Gammon (1995) Regional and seasonal variations in the flux of oceanic carbon monoxide to the atmosphere, Journal of Geophysical Research, 100, 23093-23101.

Brasseur, G.P., J.J. Orlando, and G.S. Tyndall (1999) Atmospheric chemistry and global change, Oxford University Press, New York.

Choi, S.-D. and Y.-S. Chang (2006) Carbon monoxide monitoring in Northeast Asia using MOPITT: Effect of biomass burning and regional pollution in April 2000, Atmospheric Environment, 40, 686-697.

Deeter, M.N., L.K. Emmons, D.P. Edwards, J.C. Gille, and J.R. Drummond (2004) Vertical resolution and information content of CO profiles retrieved by MOPITT, Geophysical Research Letters, 31, L15112, doi:10.1029/2004GL020235.

Drummond, J.R., P.L. Bailey, G. Brasseur, G.R. Davis, J.C. Gille, G.D. Peskett, H.K. Reichle, N. Roulet, G.S. Mand, and J.C. McConnell (1999) Early mission planning for the MOPITT instrument, Proceedings of the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 3756, 396-402.

Edwards, D.P., J.-F. Lamarque, J.-L. Attie, L.K. Emmons, A. Richter, J.-P. Cammas, J.C. Gille, G.L. Francis, M.N. Deeter, J. Warner, D.C. Ziskin, L.V. Lyjak, J.R. Drummond, and J.P. Burrows (2003) Tropospheric ozone over the tropical Atlantic: A satellite perspective, Journal of Geophysical Research, 108, 4237, doi:10.1029/2002JD002927.

Heald, C.L., D.J. Jacob, A.M. Fiore, L.K. Emmons, J.C. Gille, M.N. Deeter, J. Warner, D.P. Edwards, J.H. Crawford, A.J. Hamlin, G.W. Sachse, E.V. Browell, M.A. Avery, S.A. Vay, D.J. Westberg, D.R. Blake, H.B. Singh, S.T. Sandholm, R.W. Talbot, and H.E. Fuelberg (2003) Asian outflow and trans-Pacific transport of carbon monoxide and ozone pollution: An integrated satellite, aircraft, and model perspec-

tive, Journal of Geophysical Research, 108, 4804, doi:10.1029/2003JD003507.

Kajii, Y., K. Someno, H. Tanimoto, J. Hirokawa, H. Akimoto, T. Katsuno, and J. Kawara (1998) Evidence for the seasonal variation of photochemical activity of tropospheric ozone: continuous observation of ozone and CO at Happo, Japan, Geophysical Research Letters, 25, 3505-3508.

Kato, S., P. Pochanart, J. Hirokawa, Y. Kajii, H. Akimoto, Y. Ozaki, K. Obi, T. Katsuno, D.G. Streets, and N.P. Minko (2002) The influence of Siberian forest fires on carbon monoxide concentrations at Happo, Japan, Atmospheric Environment, 36, 385-390.

Kato, S., Y. Kajii, R. Itokazu, J. Hirokawa, S. Koda, and Y. Kinjo (2004) Transport of atmospheric carbon monoxide, ozone, and hydrocarbons from Chinese coast to Okinawa island in the Western Pacific during winter, Atmospheric Environment, 38, 2975-2981.

Khalil, M.A.K. and R.A. Rasmussen (1984) Carbon monoxide in the Earth's atmosphere: Increasing trend, Science, 224, 54-56.

Lamarque, J.-F., D.P. Edwards, L.K. Emmons, J.C. Gille, O. Wilhelmi, C. Gerbig, D. Prevedel, M.N. Deeter, J. Warner, D.C. Ziskin, B. Khattatov, G.L. Francis, V. Yudin, S. Ho, D. Mao, J. Chen, and J.R. Drummond (2003) Identification of CO plumes from MOPITT data: Application to the August 2000 Idaho-Montana forest fires, Geophysical Research Letters, 30, 1688, doi:10.1029/2003GL017503.

Lee, S., G.-H. Choi, H.-S. Lim, and J.-H. Lee (2004) Global and regional distribution of carbon monoxide from MOPITT: Seasonal distribution at 700 hPa, Environmental Monitoring and Assessment, 92, 35-42.

Liu, J., J.R. Drummond, Q. Li, J.C. Gille, and D.C. Ziskin (2005) Satellite mapping of CO emission from forest fires in Northwest America using MOPITT measurements, Remote Sensing of Environment, 95, 502-516.

Logan, J.A., M.J. Prather, S.C. Wolfsy, and M.B. McElroy (1981) Tropospheric chemistry: A global perspective, Journal of Geophysical Research, 86, 7210-7254.

Narita, D., P. Pochanart, J. Matsumoto, K. Someno, H. Tanimoto, J. Hirokawa, Y. Kajii, H. Akimoto, M. Nakao, T. Katsuno, and Y. Kinjo (1999) Seasonal variation of carbon monoxide at remote sites in Japan, Chemosphere, 1, 137-144.

Pochanart, P., J. Hirokawa, Y. Kajii, H. Akimoto, and M. Nakao (1999) Influence of regional-scale anthropogenic activity in northeast Asia on seasonal variations of surface ozone and carbon monoxide observed at Oki, Japan, Journal of Geophysical Research, 104, 3621-3631.

Pochanart, P., H. Akimoto, Y. Kajii, V.M. Potemkin, and T.V. Khodzher (2003) Regional background ozone and carbon monoxide variations in remote Siberia/East Asia, Journal of Geophysical Research, 108, 4028, doi:10.1029/2001JD001412.

Pochanart, P., S. Kato, T. Katsuno, and H. Akimoto (2004) Eurasian continental background and regionally polluted levels of ozone and CO observed in northeast Asia, Atmospheric Environment, 38, 1325-1336.

Wang, J., M.N. Deeter, J.C. Gille, and P.L. Bailey (1999) Retrieval of tropospheric carbon monxide profiles from MOPITT: algorithm description and retrieval simulation, Proceedings of the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 3756, 437-446.