한반도 성층권 에어로졸 관측을 위한 성층권 라이다 개발

신동호* · 노영민*† · 이권호** · 장은숙*** · 신성균* · 김영준*

*광주과학기술원 환경공학부, **경일대학교 공간정보공학과, ***한중대학교 공학부

Development of stratospheric Lidar for observation of volcano aerosols in the stratosphere over Korea

Dong Ho Shin*, Young Min Noh*†, Kwon H. Lee**, Eun Suk Jang***,
Sung Kyun Shin* and Young J. Kim*

*School of Environmental Science & Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology (GIST)

Department of Geoinformatics Engineering, Kyungil University, *Faculty of Engineering, Hanzhong University

Abstract : We developed the three channel lidar system to measure stratospheric aerosols at the Gwangju Institute for Science and Technology (GIST), a suburban site in Republic of Korea. The system provides backscatter coefficient (β) at 532 and 1064 nm as well as depolarization ratios (δ) at 532 nm ($2\beta + 1\delta$) using the doubled Nd:YAG laser wavelength at 532 and 1064 nm. The lidar system is optimized to measure stratospheric aerosols such as volcanic ashes. This paper describes the details of the optical setup, data acquisition system, and analysis method. This study shows an example of measuring stratospheric aerosols emitted by the volcanic eruption which occurred in Mt. Nabro (13.37° N, 41.70° E).

Key Words : Lidar, Volcano ash, Stratospheric aerosols, Vertical profile

요약 : 본 연구는 성층권 에어로졸의 분포와 광학적 특성을 분석하기 위하여 새로이 개발된 광주과학기술원의 라이다 시스템에 대하여 설명하고자 한다. 성층권 에어로졸의 후방산란비 산출을 위해 Nd:YAG 레이저를 광원으로 1064 nm와 532 nm 두 파장의 탄성산란 채널을 개발하였고, 편광소멸도 분석을 위해 532 nm 파장에 두 개의 편광 채널을 설치하였다. 광자계수방식과 아날로그 디지털 변환 두가지 방식을 동시에 채택하여 후방산란신호 수신 효율과 최대 관측 고도를 향상시켰다. 개발된 라이다 시스템을 이용하여 2011년 9월 22일에 한반도 상공 성층권 에어로졸관측 분석하여 예시하였다. 라이다 관측 자료 분석을 통해 532 nm 파장에서 성층권 에어로졸의 후방산란비를 산출을 통해 에어로졸의 시공간적 분포를 확인하고, 체적편광소멸도와 입자편광소멸도 산출을 통해 하고 입자의 비구형성을 판단하였다.

접수일(2013년 8월 25일), 수정일(1차 : 2013년 10월 27일), 게재확정일(2013년 10월 28일).

† 교신저자: 노영민(nym@gist.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

1. 서론

성층권 내에 존재하는 에어로졸은 화산 폭발로 인해 생성된 많은 양의 에어로졸과 이산화황(SO_2)와 같은 가스상 물질들이 성층권으로 한꺼번에 유입됨으로 인해 생성된다. 지난 1991년 6월 15일에 분화한 필리핀의 피나투보 화산(Mt. Pinatubo, 위치: 15.14°N , 120.35°E)의 경우 막대한 양의 에어로졸과 함께 이산화황을 성층권까지 유입시키는 역할을 했는데, 성층권으로 유입된 이산화황의 양은 약 20 Tg에 이른다(Bluth *et al.*, 1992). 화산 폭발로 인하여 생성된 석영유리(Silica glass) 또는 장석 결정체(Feldspar crystals)와 같이 $20\text{ }\mu\text{m}$ 이상의 초대 입자의 경우 대부분 이동 과정에서 중력 침강으로 제거된다. 하지만 이산화황의 산화반응으로 생성되는 황산입자와 같은 미세입자는 성층권까지 도달하여 에어로졸 형태로 존재하게 되고, 안정적인 성층권에 머물면서 수천 킬로미터 떨어진 지역까지 이동한다(Andres and Kasgnoc, 1998; Halmer *et al.*, 2002). 성층권 에어로졸은 10 km 이상의 고도에 비균질적으로 분포하여 대륙범위 또는 그 이상의 전 지구적 범위의 대기질과 지구 복사강제력에 영향을 미쳐 기후변화에 높은 영향을 미친다(Chin and Jacob, 1996; Graf *et al.*, 1997; Haywood and Boucher, 2000; Longhurst *et al.*, 1993; Ramaswamy *et al.*, 2001; Robock, 2000; Zhang *et al.*, 2007). 성층권 에어로졸의 이동 특성 파악을 위해 전 세계적으로 다양한 분야에서 연구가 수행되고 있다. 전 지구적 확산 분포 연구를 위해 주로 모델이 이용되고(Witham *et al.*, 2007), 이러한 자료를 검증 위해 지상과 위성에 기반을 둔 원격 탐사 장비가 이용되고 있다(Eckhardt *et al.*, 2008; Yu *et al.*, 2002). 이중 라이다(Light Detection And Ranging, LIDAR)는 대류권에서부터 성층권까지 존재하는 에어로졸의 연속적으로 실시간 관측이 가능할 뿐만 아니라 정확한 고도분포를 알 수 있다. 이에 성층권 에어로졸의 미세 물리적 특성과 그리고 광학적 특성을 실시간 연속적으로 관측할 수 있는 유용한 장비이다(Hofmann *et al.*, 2009; Sassen *et al.*, 2007; Uchino *et al.*, 2012; Winker and Osborn, 1992). 국내의 라이다를 활용한 연구는 대류권내 에어로졸 중심으로 연구가 이루어져 왔으며(노영민 외, 2013) 한반도 상공의 성층권 에어로졸을 관측한 연구 결과는 제한적이고, 라이다를 통한 관측은 전무하여 성층권 에

어로졸 연구에 필요한 장비 및 자료는 매우 미흡한 실정이다.

본 연구는 국내 최초로 성층권 에어로졸의 고도별 분포에 따른 후방산란비(Backscatter ratio)와 편광소멸도(Depolarization ratio)를 측정할 수 있는 라이다 시스템을 개발하고 관측을 수행하였다. 2011년 9월 21일 성층권 고도에서 관측된 화산재 에어로졸의 분석을 통하여 개발된 라이다 시스템의 유효성을 확인하였다.

2. 성층권 라이다 시스템 구성 및 분석방법

1) 성층권 라이다 시스템

본 연구는 연속적인 성층권 에어로졸 수직 분포 관측을 목적으로 광주과학기술원의 다파장 라만 라이다 시스템에 새로운 검출 시스템을 개발하였다. 기존 라이다 시스템의 경우 대류권 내 존재하는 에어로졸 관측을 위해 질소, 석영, 수증기 라만 채널과 레이저 파장과 같은 탄성산란 채널을 기본으로 장착하여 관측을 실시해 왔다(Muller *et al.*, 2010; Noh *et al.*, 2007; Noh *et al.*, 2008; Noh *et al.*, 2011; Tatarov *et al.*, 2011). 하지만 본 연구는 20 km 이상의 상층 대기를 관측해야 하는 매우 제한적인 관측 조건으로 인해 기존 라이다 시스템의 기본 원리만을 이용하고 광학설계 프로그램인 Zemax를 통해 기계적 광학적 공차를 계산하여 효율적이고 안정적인 라이다 시스템을 설계 구성하였다(Fig. 1(a)). 송신단의 광원으로 쓰는 Nd: YAG 레이저를 기반으로 생성된 광원은 1064 nm 에서 640 mJ 그리고 532 nm에서 154 mJ로 최대 에너지를 사용하였다(Table 1). 본래의 라이다 시스템에서 355 nm 파장에서의 탄성산란을 관측 하였으나 레이저 출력과 레일리 산란(Rayleigh scattering)으로 인한 신호 감쇠효과가 많아 본 연구에서는 사용하지 않았다. Fig. 1(b)에서 알 수 있듯이 1064 nm 와 532 nm 광원을 동시에 빔 확대기로 주사하여 빔의 크기를 5배로 확대하여 빔 퍼짐도(Beam divergence)를 최소화 하였다. 망원경과 발진된 광원 수신 효율을 증대시키기 위해 망원경 중앙에 반사경을 설치하는 Co-axial 형태의 발진 구조를 채택 하였다. 수신단 중심에 14 inch Schmidt Cassegrain 방식의 대형 망원경을 사용함으로써 후방산

Fig. 1. (a) Zemax ray tracing simulation at 532nm channel and (b) optical setup of the GIST stratospheric lidar system.

란 신호 포집 면적을 극대화 하였다. 높은 고도까지의 관측을 위해 핀홀(Pinhole)을 사용하여 시야각(Field of view)를 최소한의 범위인 0.4 mrad으로 설정함으로써 주변 산란광들의 수신을 차단하였다. 빔 분리기(Beam Splitter)로 인한 신호 감쇠 효과를 최소화하기 위해 광학 기기 배열에 있어서 장파장을 통과하고 단파장 반사가 용이한 빔 분리기(Beam Splitter)의 특성을 고려하여 1064 nm 채널을 우선 배치하고 이후 532 nm 파장

의 채널을 배치하였다. 편광 채널의 경우 편광분리기(polarizing beam splitter cube) 전단에 간섭필터(Interference filter)를 배치하지만, 본 연구에서는 주변 산란광 차단을 위해 후단에 각각 설치하는 체계를 채택하였다. 532 nm 파장에서의 편광채널의 정확도를 위해 독일의 Mattis *et al.*(2009)와 공동 연구를 통해 각 채널의 투과도를 계측하였다. 532 nm의 수평편광채널과 수직편광 채널의 투과비는 140.49 대 0.06로 편광소멸도 산출에 상수로 활

Table 1. Characteristics of the GIST stratospheric lidar system

Transmitter		
Laser	Nd:YAG Continuum Surelite III-10	
Wavelength	1064 nm	532 nm
Pulse Energy	640 mJ	154 mJ
Repetition Rate	10 Hz	
Beam Divergence	0.2 mrad	
Receiver		
Telescope	14 inch Schmidt Cassegrain	
Field of view	0.5-4.0 mrad (changeable)	
Vertical Resolution	7.5 m	
Detector	Hamamatsu R7400-20	Hamamatsu R3236 (PMT Cooler)
Data Acquisition	Analog and Photon counting	

용하였다. 그리고 편광성분의 에러 분석은 Freudenthaler *et al.* (2009)의 MULIS의 방법을 사용하여 분석에 사용하였다. 탄성 산란의 경우 에어로졸과 공기 분자의 농도가 높은 대류권에서의 후방산란 신호가 매우 강하여 Photomultiplier(PMT)가 포화 현상이 일어날 수 있기 때문에 각각의 채널 전단에 감쇠 필터(Neutral density Filter)를 사용하여 각 채널의 PMT 수신 효율에 최적화하였다. 이후 신호 처리에 있어서 아날로그 디지털 변환(analog-to-digital)과 광자계수방식(Photon counting)을 동시에 적용하였다(Whiteman, 2003). 이를 통해 PMT에서 생산되는 신호의 수신에서 아날로그 디지털 변환 방식으로 인해 발생하는 높은 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise ratio) 영역을 광자계수방식으로 대체함으로써 신호의 왜곡 없이 먼 거리의 신호를 보다 효과적으로 처리할 수 있도록 하였다(Schätzle, 1986; Sharma and Walker, 1992). 신호 분석을 위해 최대 분해능은 7.5 m, 자료 생산 주기는 1200 laser shot(2분주기)로 설정하여 관측하였다.

2) 분석방법

라이다 관측 신호로부터 후방산란계수(β , Backscatter coefficient)는 아래 라이다 방정식을 해석하여 산출(Klett, 1981) 하였다.

$$P(z) = P_0 \frac{K \cdot S_{area}}{z^2} \cdot \{\beta_m(z) + \beta_a(z)\} \cdot \exp\left[-2 \int_0^z \{\alpha_m(z) + \alpha_a(z)\} dz\right] \quad (1)$$

여기서, P 는 후방산란 신호세기, P_0 는 대기 중으로 조사된 에너지, K 는 기기보정상수, S_{area} 는 망원경의 면적이다. β , α 는 후방산란 계수와 소산계수(Extinction coefficient)이며, 아래첨자 m 은 대기 분자, 그리고 a 는 에어로졸 산란을 의미한다. 532 nm 파장에서의 소산계수에 대한 후방산란 비의 값을 나타내는 라이다 비(Lidar ratio) 가정 값은 Jäger and Deshler(2002, 2003)의 값을 활용하여 50 sr로 계산 하였다. 대기 분자의 밀도는 본 연구의 관측지역에서 약 10 km 떨어진 광주공항의 라디오존데 값 활용하여 대기 분자의 밀도를 산출하였다. 또한 기준고도에 있어 에어로졸이 존재 가능성이 매우 희박하고, 관측 신호의 신호 대 잡음비가 높은 성층권 영역을 기준으로 하여 계산하였다.

여기서 성층권 에어로졸의 고도별 분포를 파악할 수 있는 거리 z 에 따른 후방산란비(R , Backscatter ratio)은 다

음 식으로부터 산출 하였다..

$$R(z) = \frac{\beta_m(z) + \beta_a(z)}{\beta_m(z)} \quad (2)$$

입자의 비구형성을 나타내는 편광소멸도(Depolarization ratio)의 경우 체적 편광소멸도(δ , Volume depolarization ratio)와 입자 편광소멸도(δ_p , Particle depolarization ratio)를 각각 나타내었다. 체적 편광소멸도는 532 nm 파장에서 수신된 단순한 신호 세기의 비율로 다음과 같이 정의되고,

$$\delta(z) = \frac{P_s(z) + P_p(z)}{P_p(z)} \quad (3)$$

여기서, P 와 S 는 각각 후방산란 신호의 수평편광과 수직 편광을 나타낸다. 그리고 입자 편광소멸도는 다음 식과 같이 정의된다.

$$\delta_p(z) = \frac{\delta(z)R(z) + \delta_m(z)}{R(z) - 1} \quad (4)$$

여기서, 대기 분자에 의한 편광소멸도 값으로 본 연구에서는 Behrendt and Nakamura(2002)의 값을 근거로 산출하였다.

3. 결 과

Fig. 2는 2011년 9월 22일 국제표준시 10시 15분부터 15시 45분까지 라이다를 이용하여 5 km에서 24 km까지 성층권 영역을 연속적으로 관측하여 산출된 1064 nm 파장에서의 후방산란강도를 보여준다. 같은 날 12시 라디오존데를 통한 기상 자료는 그림 왼쪽에 표시되어 있다. 그림은 7 km에서 9 km 고도구간에서 강한 후방산란신호가 관측되었는데 이는 구름으로 인해 후방산란된 신호이며, 약 14 km에서 18 km 고도구간에서 또 하나의 에어로졸 층이 존재하고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 3은 식 (2)~(4)로부터 산출된 성층권 에어로졸의 후방산란비와 체적 편광소멸도 그리고 입자 편광소멸도를 보여준다. Fig 3 (a)의 후방산란비를 보면 12 km 상공부터 약 20 km 상공까지 약 8 km의 두꺼운 에어로졸 층이 존재하고 있음을 보여주고 있다. 최대 후방산란비 값은 17.4 km 부근에서 1.27을 나타내었다.

성층권 에어로졸이 존재하는 구간의 후방산란계수

Fig. 2. Logarithm of range-corrected signal (in arbitrary units) of GIST Lidar at 1064 nm; About 5 km thick stratospheric aerosol layer observed over Gwangju on 22 September 2011, 1015-1545 UTC. Left-hand panel shows radiosonde profiles (launch at 1200 UTC) of relative humidity RH, dew point T_d , temperature T and virtual potential temperature θ_v .

Fig. 3. Profiles of backscatter ratio (a), volume depolarization ratio (black line of b) and particle depolarization ratio (blue line of b) on 22 September 2011 from 1015-1545 UTC (330 profiles), smoothed with a vertical window length of 600 m.

로 나타낼 경우 $2.46 \times 10^{-4} \text{ sr}^{-1}$, 라이다비 50 sr로 계산한 에어로졸 광학적 두께는 0.0123을 보인다. 편광소멸도 값은 앞선 후방산란비와는 다른 양상을 보여 주고 있다. 체적편광소멸도는 전 구간에 걸쳐 0.015의 값을 보였다. 입자편광소멸도 경우 17 km 이상의 고도에서는 체적편광소멸도와 같은 0.015의 값이 관측되었고 17 km부터 14 km 고도 구간에서는 0.02에서 0.038로 체적편광소멸도보다 상대적으로 높은 값을 보였으나 이는 일반적인 구형 대기 에어로졸 관측시 확인되는 값으로 본 연구에서 관측된 성층권 에어로졸이 비구형의 화산재나 광학적 두께가 매우 작은 빙정운이 아님을 확인하여 준다. (Chen *et al.*, 2002; Uchino *et al.*, 2012).

Fig. 4는 시간에 따른 에어로졸 농도변화 정도 파악을 위해 시간별 성층권 에어로졸의 후방산란비를 나타낸

Fig. 4. Time series of Vertical profiles of aerosol backscatter ratio.

그래프이다. 시간에 따른 에어로졸의 높이 변화는 나타나지 않고 일정한 형태를 나타내고 있다. 후방산란비 값은 17.4 km 에서 11:30분은 1.267을 시작으로 15:30분은 1.335로 시간이 지남에 따라 소폭 증가하는 경향을 보이는데 이는 앞선 Uchino *et al.*(2012)연구의 Tsukuba 지역과 비슷한 경향을 보였지만 본 연구의 5시간 동안의 관측시간만으로는 측정된 성층권 에어로졸의 시간에 따른 농도변화 추세를 가늠하기에는 무리가 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구를 통하여 외국의 일부 선진 라이다 기술로만 제한적으로 관측되던 성층권 에어로졸을 실시간 연속적으로 관측할 수 있는 성층권 에어로졸 라이다 시스템을 국내 최초로 개발하였다. 성층권 에어로졸 라이다는 성층권 영역까지의 원거리 관측을 위해 ND: YAG 레이저 파장의 1064 nm 와 532 nm 탄성산란채널을 중심으로 입자의 비구형성 관측을 위해 532 nm에 편광 채널을 확장하였다. 또한 효율적인 원거리 신호 처리를 위해 아날로그 디지털 변환(analog-to-digital)과 광자계수방식(Photon counting)의 검출기를 동시 적용하여 관측의 정확성을 높였다.

개발된 라이다 시스템을 이용하여 2011년 9월 21일 고도 12 - 20 km 사이에 존재하는 성층권 에어로졸의 고도 및 두께 그리고 후방산란비와 편광소멸도 등의 광학적 수치를 산출 하였으며, 관측된 성층권 에어로졸 층은 대류권내에 존재하는 에어로졸과 달리 매우 안정적인 이동현상을 보임을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 성층권 에어로졸 라이다 개발과 관측을 통해 한반도 상공의 성층권 에어로졸을 실시간으로 정확한 시공간적 분포뿐 및 광학적 수치를 산출함으로써 라이다 성능검증을 확인 하였다. 앞으로 지속적인 성층권 에어로졸 라이다 관측 모니터링을 통해 한반도 성층권 에어로졸 자료를 지속적이고 안정적으로 제공함으로써, 에어로졸의 복사강제력 산출 및 기후변화 연구에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 소방방재청의 백두산화산대응기술개발사업인 화산재 피해예측 기술개발 [NEMA-백두산-2012-1-1]과제의 지원으로 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

Reference

- Andres, R., and A. Kasgnoc, 1998. A time-averaged inventory of subaerial volcanic sulfur emissions, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 103(D19): 25251-25261.
- Behrendt, A., and T. Nakamura, 2002. Calculation of the calibration constant of polarization lidar and its dependency on atmospheric temperature, *Optics Express*, 10(16): 805-817.
- Bluth, G.J., S.D. Doiron, C. C. Schnetzler, A.J. Krueger, and L.S. Walter, 1992. Global tracking of the SO₂ clouds from the June, 1991 Mount Pinatubo eruptions, *Geophysical Research Letters*, 19(2): 151-154.
- Chen, W.-N., C.-W. Chiang, and J.-B. Nee, 2002. Lidar ratio and depolarization ratio for cirrus clouds, *Applied Optics*, 41(30): 6470-6476.
- Chin, M., and D.J. Jacob, 1996. Anthropogenic and natural contributions to tropospheric sulfate: A global model analysis, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 101(D13): 18691-18699.
- Eckhardt, S., A. Prata, P. Seibert, K. Stebel, and A. Stohl, 2008. Estimation of the vertical profile of sulfur dioxide injection into the atmosphere by a volcanic eruption using satellite column measurements and inverse transport modeling, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(14): 3881-3897.
- Freudenthaler, V., M. Esselborn, M. Wiegner, B. Heese, M. Tesche, A. Ansmann, D. Muller, D.

- Althausen, M. Wirth, and A. Fix, 2009. Depolarization ratio profiling at several wavelengths in pure Saharan dust during SAMUM 2006, *Tellus B*, 61(1): 165-179.
- Graf, H.F., J. Feichter, and B. Langmann, 1997. Volcanic sulfur emissions: Estimates of source strength and its contribution to the global sulfate distribution, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 102(D9): 10727-10738.
- Halmer, M., H.-U. Schmincke, and H.-F. Graf, 2002. The annual volcanic gas input into the atmosphere, in particular into the stratosphere: a global data set for the past 100 years, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 115(3): 511-528.
- Haywood, J., and O. Boucher, 2000. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review, *Reviews of Geophysics*, 38(4): 513-543.
- Hofmann, D., J. Barnes, M. O'Neill, M. Trudeau, and R. Neely, 2009. Increase in background stratospheric aerosol observed with lidar at Mauna Loa Observatory and Boulder, Colorado, *Geophysical Research Letters*, 36(15): L15808, doi: 10.1029/2009GL039008.
- Jager, H., and T. Deshler, 2002. Lidar backscatter to extinction, mass and area conversions for stratospheric aerosols based on midlatitude balloonborne size distribution measurements, *Geophysical Research Letters*, 29(19): 1929, doi: 10.1029/2002GL015609.
- Jager, H., and T. Deshler, 2003. Correction to "Lidar backscatter to extinction, mass and area conversions for stratospheric aerosols based on midlatitude balloonborne size distribution measurements", *Geophysical Research Letters*, 30(7): 1382, doi:10.1029/2003GL017189.
- Klett, J.D., 1981. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns, *Applied Optics*, 20(2): 211-220.
- Longhurst, J.W., D.W. Raper, D.S. Lee, B.A. Heath, B. Conlan, and H.J. King, 1993. Acid deposition: a select review 1852-1990: 1. Emissions, transport, deposition, effects on freshwater systems and forests, *Fuel*, 72(9): 1261-1280.
- Mattis, I., M. Tesche, M. Grein, V. Freudenthaler, and D. Müller, 2009. Systematic error of lidar profiles caused by a polarization-dependent receiver transmission: Quantification and error correction scheme, *Applied Optics*, 48(14): 2742-2751.
- Muller, D., I. Mattis, B. Tatarov, Y. Noh, D. Shin, S. Shin, K. Lee, Y. Kim, N. Sugimoto, 2010. Mineral quartz concentration measurements of mixed mineral dust/urban haze pollution plumes over Korea with multiwavelength aerosol Raman-quartz lidar, *Geophysical Research Letters*, 37(20): L20810, doi: 10.1029/2010GL044633.
- Noh, Y.M., Y.J. Kim, B.C. Choi, and T. Murayama, 2007. Aerosol lidar ratio characteristics measured by a multi-wavelength Raman lidar system at Anmyeon Island, Korea, *Atmospheric Research*, 86(1): 76-87.
- Noh, Y.M., Y.J. Kim, and D. Muller, 2008. Seasonal characteristics of lidar ratios measured with a Raman lidar at Gwangju, Korea in spring and autumn, *Atmospheric Environment*, 42(9): 2208-2224.
- Noh, Y.M., D. Muller, I. Mattis, H. Lee, and Y.J. Kim, 2011. Vertically resolved light-absorption characteristics and the influence of relative humidity on particle properties: Multiwavelength Raman lidar observations of East Asian aerosol types over Korea, *Journal of geophysical research*, 116(D6): D06206, doi: 10.1029/2010JD014873.
- No, Y.M., C.K. Lee, K.C. Kim, S.K. Shin, D.H. Shin, and S.C. Choi, 2013. Retrieval of Vertical Single-scattering albedo of Asian dust using Multi-wavelength Raman Lidar System, Korean

- Journal of Remote Sensing*, 29(4): 415-421.
- Ramaswamy, V., M.L. Chanin, J. Angell, J. Barnett, D. Gaffen, M. Gelman, P. Keckhut, Y. Koshelkov, K. Labitzke, and J.J. Lin, 2001. Stratospheric temperature trends: Observations and model simulations, *Reviews of Geophysics*, 39(1): 71-122.
- Robock, A., 2000. Volcanic eruptions and climate, *Reviews of Geophysics*, 38(2): 191-219.
- Sassen, K., J. Zhu, P. Webley, K. Dean, and P. Cobb, 2007. Volcanic ash plume identification using polarization lidar: Augustine eruption, Alaska, *Geophysical Research Letters*, 34(8): L08803, doi: 10.1029/2006GL027237.
- Schätzel, K., 1986. Dead time correction of photon correlation functions, *Applied Physics B*, 41(2): 95-102.
- Sharma, A., and J. Walker, 1992. Paralyzable and nonparalyzable deadtime analysis in spatial photon counting, *Review of Scientific Instruments*, 63(12): 5784-5793.
- Tatarov, B., D. Muller, D.H. Shin, S.K. Shin, I. Mattis, P. Seifert, Y.M. Noh, Y. Kim, and N. Sugimoto, 2011. Lidar measurements of Raman scattering at ultraviolet wavelength from mineral dust over East Asia, *Optics Express*, 19(2): 1569-1581.
- Uchino, O., T. Sakai, T. Nagai, K. Nakamae, I. Morino, K. Arai, H. Okumura, S. Takubo, T. Kawasaki, and Y. Mano, 2012. On recent (2008-2012) stratospheric aerosols observed by lidar over Japan, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(24): 11975-11984.
- Whiteman, D.N., 2003. Examination of the traditional Raman lidar technique. I. Evaluating the temperature-dependent lidar equations, *Applied Optics*, 42(15): 2571-2592.
- Winker, D., and M. Osborn, 1992. Preliminary analysis of observations of the Pinatubo volcanic plume with a polarization-sensitive lidar. *Geophysical Research Letters*, 19(2): 171-174.
- Witham, C., M. Hort, R. Potts, R. Servranckx, P. Husson, and F. Bonnardot, 2007. Comparison of VAAC atmospheric dispersion models using the 1 November 2004 Grimsvötn eruption, *Meteorological Applications*, 14(1): 27-38.
- Yu, T., W.I. Rose, and A. Prata, 2002. Atmospheric correction for satellite-based volcanic ash mapping and retrievals using "split window" IR data from GOES and AVHRR, *Journal of geophysical research*, 107(D16): 4311, doi: 10.1029/2001JD000706.
- Zhang, Q., J. Jimenez, M. Canagaratna, J. Allan, H. Coe, I. Ulbrich, M. Alfarra, A. Takami, A. Middlebrook, and Y. Sun, 2007. Ubiquity and dominance of oxygenated species in organic aerosols in anthropogenically-influenced Northern Hemisphere midlatitudes, *Geophysical Research Letters*, 34(13): L13801, doi: 10.1029/2007GL029979.