

GIST 다파장 Raman Lidar를 이용한 2005년 10월에
관측된 연무 현상의 광학적·미세물리적 특성 관측
Measurement of Optical and Microphysical
Parameters of Haze Event Observed in October
2005 Using GIST Multi-wavelength Raman Lidar

노영민, 김영준, ¹⁾Detlef Müller
Young M. Noh, Young J. Kim, and ¹⁾Detlef Müller
광주과학기술원 환경모니터링 신기술 연구센터
¹⁾Institute for Tropospheric Research, Germany

1. 서 론

동북아시아 지역은 높은 인구 밀도와 더불어 산업화로 인하여 인위적인 대기 에어로졸이 많이 발생하는 지역이다. 특히, 근래 중국의 급격한 산업화로 인위적 대기 에어로졸의 발생은 증가추세에 있다(Luo et al., 2001). 또한 시베리아 지역에서는 산불로 인하여 많은 Biomass burning 에어로졸이 발생하고 있다. 동북아시아 지역에서 편서풍의 풍상측에 위치한 한국의 대기환경은 지형학적 위치로 인하여 국내에서 발생하는 대기 에어로졸 외에도 중국 및 시베리아 지역으로부터 장거리 이동되어진 다양한 대기 에어로졸의 영향을 받는다. 이러한 다양

한 대기 에어로졸의 이동특성, 광학적 및 미세물리적 특성과 발생기원을 파악하는 것은 국내 대기환경 변화의 파악과 예측, 그리고 기후 변화 예측을 위하여 반드시 필요하다.

본 연구는 광주과학기술원의 다파장 라만 라이다 시스템을 이용하여 2005년 10월 17일부터 27일까지의 기간에 발생한 짙은 연무현상의 이동특성 및 광학적 특성을 관측하였다. 또한, 다파장 라만 라이다로 관측된 결과에 역행렬 알고리즘을 적용하여 effective radius, refractive index, single scattering albedo 등의 미세물리학적 (Microphysical parameter) 특성을 파악하였다.

2. 연구방법

본 연구는 2005년 10월 15일부터 28일까지 광주과학기술원의 다파장 라만 라이더 시스템을 이용하여 355, 532nm의 두 파장에서의 소산계수(Extinction coefficient)와 355, 532, 1064 nm의 3파장의 후방산란계수(Backscattering coefficient)를 고도별로 관측하였다. 라이더 관측은 일몰 후부터 일출 전까지 이루어졌으며(노영민 등, 2006a), 에어로졸의 광학적 두께(Aerosol Optical Depth; AOD)는 라만 라이더로 관측된 소산계수의 적분을 통하여 도출하였다. 이 때 라이더 시스템의 overlap effect를 제거하기 위하여 지상에서 측정된 소산계수와 비교를 통하여 보정된 값을 계산하였다(노영민 등, 2006b). 낮 시간동안 에어로졸 광학적 두께(AOD)의

변화는 sunphotometer를 이용하여 관측하였다. 지상에서의 에어로졸의 농도변화 관측을 위하여 PM10을 관측기간 중에 1시간 간격으로 연속적으로 측정하였다. AOD와 파장역지수(Ångström exponent) 등의 에어로졸 광학적 특성은 라만 라이더와 sunphotometer, 두 장비에서 동일하게 얻어졌으나, 라이더 관측 결과를 활용한 역행렬 알고리즘으로 도출되는 Single scattering albedo, Effective radius 등의 미세물리적 특성은 라이더 관측이 실시된 밤 시간에만 구하여졌다. 미세물리적 특성은 라만 라이더로 관측된 에어로졸의 소산계수와 후방산란계수를 대기 경계층 내에서의 평균값을 구하고 이 값을 Müller et al.(1999)에 의해 제안된 역행렬 알고리즘을 이용하여 effective radius, single scattering albedo 등의

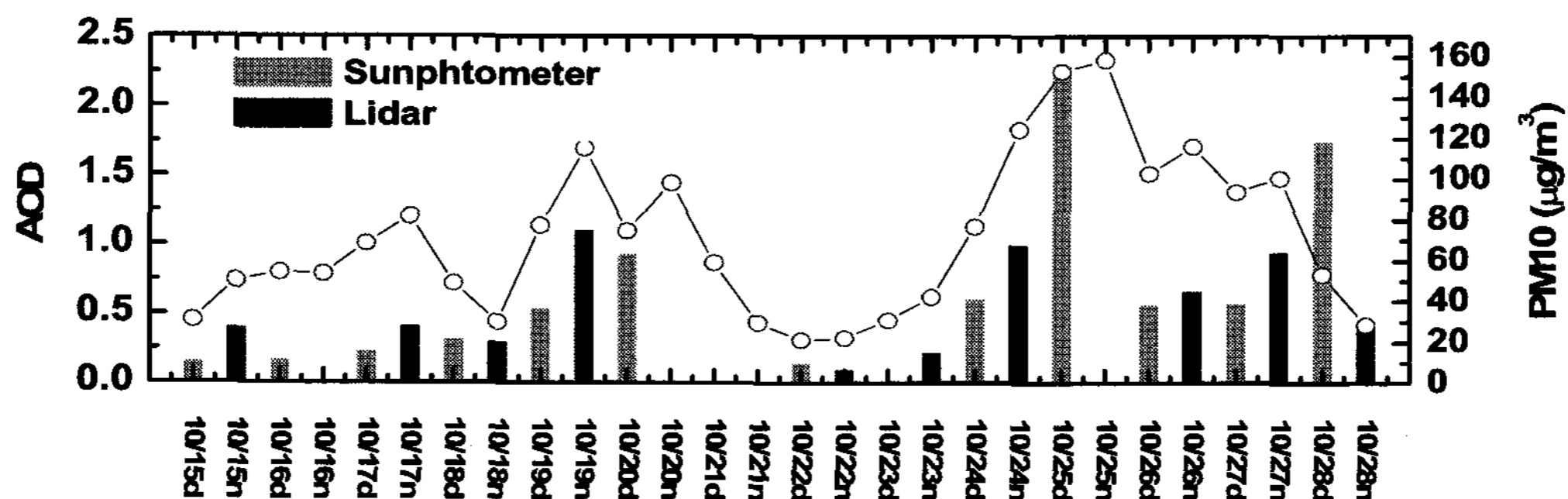


Figure 1. Aerosol optical depth at 440 nm calculated by Raman lidar extinction coefficient and surface measured extinction coefficient and Sunphotometer. Averaged PM10 concentration was denoted as red circle.

Table 1. Optical Parameters measured by Raman Lidar * Ångström Exponent

	October 2005	Lidar ratio		AOD		α^*
	height(km)	532nm	355nm	532nm	355nm	
15th	0.84-1.80	55.9	49.0	0.200	0.267	0.72
17th	0.60-1.68	53.4	52.1	0.162	0.254	1.11
18th	0.84-1.56	62.7	58.8	0.135	0.200	0.98
19th	0.84-2.04	61.1	52.7	0.551	0.773	0.84
22th	0.6-0.84	50.2	52.5	0.014	0.019	0.76
23th	0.72-2.04	69.9	53.5	0.122	0.151	0.52
24th	0.48-1.20	70.0	59.3	0.370	0.554	1.00
26th	0.48-1.92	63.5	52.6	0.294	0.391	0.71
27th	0.60-2.04	62.8	57.3	0.474	0.730	1.07
28th	0.60-1.68	54.0	47.2	0.269	0.372	0.80
Average		60.4	53.5			0.85

microphysical parameter를 계산하였다(노영민 등, 2007). 에어로졸의 이동특성 및 기원을 파악하기 위하여 NOAA Hysplit을 이용하여 5일의 역궤적분석(Backtrajectory)를 실시하였다.

3. 관측결과 및 결론

2005년 10월 15일부터 28일까지의 관측 기간 중 17~19일과 24~27일에 걸쳐 짙은 연무현상이 관측되었으며 이 기간에 PM10 농도와 AOD도 증가하였다. 그림 1은 라만 라이다와 Sunphotometer로서 얻어진 에어로졸 광학적 두께(AOD) 및 PM10 농도의 날짜별 변화를 보여준다. Sunphotometer 관측은 낮에만 이루어지고 라만 라이다 관측은 밤에만 이

루어져 동시간대에 관측된 결과가 없는 관계로 두 값의 절대적 비교는 어렵지만, 12시간 평균의 PM10 농도 변화와 비교해 보면 PM10의 농도 변화와 에어로졸 광학적 두께 값의 변화가 일치함을 알 수 있다. 관측 기간 중 높은 농도를 보인 시기는 19일과 24~27일로 25일 22시에 $203\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 최고농도가 관측되었다. 표 1은 라만 라이다로 관측된 에어로졸의 광학적 특성 값을 보여준다. 평균 라이다비(lidar ratio)는 532 nm와 355 nm에서 각각 60.4 sr과 53.5 sr으로 전형적인 오염입자의 특성을 보였으며, 파장역지수(Ångström Exponent)는 평균값이 0.85로 낮은 값을 보였다. 이는 관측 기간동안의 대기 에어로졸이 대기경계층(Planetary Boundary

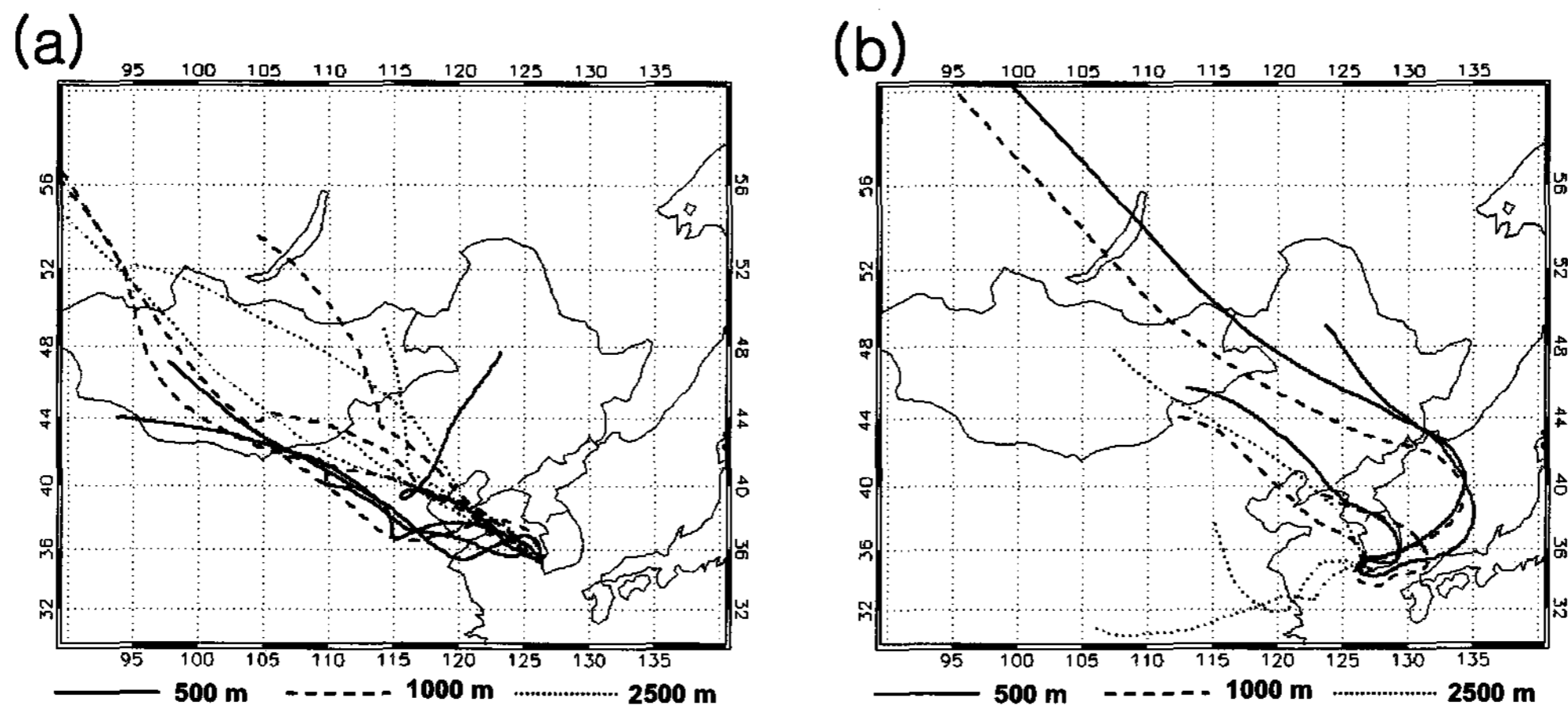


Figure 2. Five days backtrajectory results. Pattern (a) Air masses moved from northwestern China. Pattern (b) Air masses moved from northeastern direction.

Layer, PBL) 내부에서 관측되었고 대기경계층 내부에서 80% 이상의 높은 상대습도로 인하여 입자의 크기가 증가된 것으로 사료된다. 라만 라이다로 관측된 광학적 특성값으로부터 관측된 대기 에어로졸이 조대입자로 구성된 오염입자들임을 알 수 있었지만, 관측 일별로 구분되는 뚜렷한 특징을 보여주지 않았다. 관측된 대기 에어로졸의 기원과 이동특성 파악을 위하여 NOAA Hysplit을 이용하여 5일 역궤적 분석을 실시하였다. 그림 2 (a)에서 보여주는 바와 같이 관측기간 동안 대부분의 경우에 공기괴(airmass)는 중국지역으로부터 이동하여 왔으나, 19, 26, 27일에는 그림 2 (b)와 같이 공기괴가 중국동북 지역을 통과하여 한반도의 동북방향으로부터 이동하는 두

가지의 이동특성이 관측되었다. 대기 에어로졸의 기원과 이동특성의 차이에 따른 특성 구분을 위하여 역궤적 알고리즘을 이용한 microphysical parameter의 분석이 수행되었다. 표 2는 역궤적 알고리즘 분석 수행 후 결과값을 역궤적 분석 결과를 바탕으로 이동특성별로 구분하여 정리한 것이다. Effective radius는 모두 0.3 이상의 높은 값을 보여 관측된 파장역지수 값과 좋은 상관관계를 보여주었다(노영민 등 2007). 단산란 알베도(Single scattering albedo) 값은 중국으로부터 이동되어진 에어로졸은 평균값이 0.903으로 낮았으나 동북지역으로부터 이동되어진 에어로졸은 0.956으로 상대적으로 높은 값이 관측되었다. 이러한 이동특성별 차이점은 굴절률에서도

Table 2. Microphysical parameters calculated by Müller inversion using Raman lidar data

	Date (월/일)	Effective e radius	Refractive index		single scattering
			real	image	aledo
Pattern (a)	10/15	0.357	1.433	0.008021	0.929
	10/17	0.354	1.451	0.008898	0.892
	10/23	0.337	1.447	0.01217	0.874
	10/24	0.332	1.428	0.009663	0.916
Average		0.345	1.440	0.009688	0.903
Pattern (b)	10/19	0.339	1.406	0.004772	0.967
	10/26	0.346	1.420	0.007046	0.935
	10/27	0.318	1.402	0.004921	0.967
Average		0.334	1.409	0.005579	0.956

뚜렷하게 구분되어 중국의 주요 산업 지역인 북동부지역으로부터 이동되어진 에어로졸이 높은 광흡수 특성을 보임을 알 수 있다. 이는 화석연료의 사용량이 증가하고 있는 중국의 산업발전과 연관되어 광흡수 특성이 높은 에어로졸의 지속적으로 한반도로 이동됨을 알 수 있다. 하지만, 19, 26, 27일에 관측된 연무현상은 낮은 광흡수 특성과 이동경로로부터 그림 3에서 보여주듯이 연해주지역에서 발생한 산불과 시기적으로 추수 후 부산물의 소각으로 국내에서 발생한 의한 biomass burning 에어로졸(Ryu et al., 2004)이 연무현상에 주요하게 영향을 미친 에어로졸로 판단된다.

본 연구의 관측 결과로부터 한국에서 자주 발생하는 짙은 연무 현상은 중국 등지로부터 장거리 이동된 에어

로졸이 원인이 되는 경우가 많으며, 이동된 에어로졸의 발생지역에 따라 연무의 광흡수 특성이 변화되는 것을 알

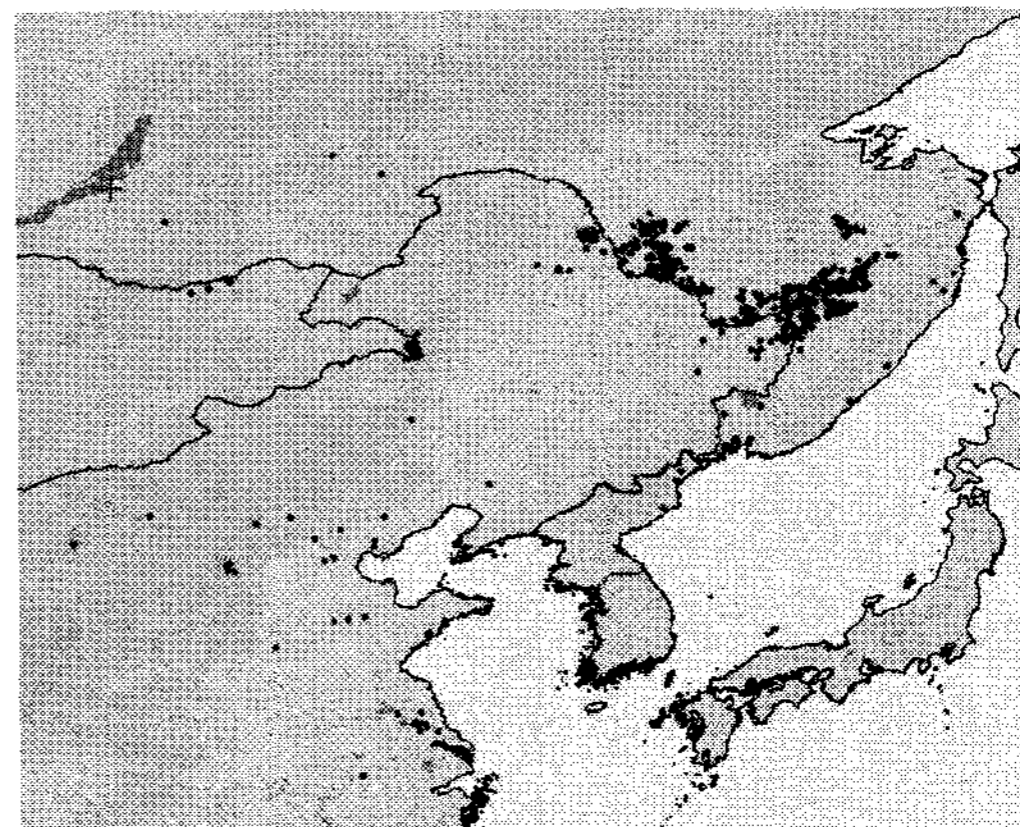


Figure 3. Burnt area due to forest fires detected by Moderate Resolution Imaging Spectrometer(MODIS) onboard the Terra satellite (<http://maps.geog.umd.edu/>) from 24 to 25 October 2005.

수 있었다. 장기적 관점에서 대기 에어로졸에 의한 국내 대기질의 변화를 파악하고 예측하기 위해서는 장거리 이동 에어로졸의 광학적 및 미세물리적 특성 관측이 지속적으로 필요할 것으로 사료된다.

4. 감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2007-4108)의 지원으로 수행되었습니다.

5. 참고문헌

노영민, 김영민, 김영준, 최병철 (2006a) GIST/ADEMRC 다파장 라만 라이다 시스템을 이용한 안면도 지역에서의 라이다 비 연구, 한국대기환경학회지 제 22권 제 1호, pp. 1~14.

노영민, 정진상, 김정은, 김영준 (2006b) Raman Lidar와 지상 측정 결과를 이용한 에어로졸 광학적 두께 측정, 가을 학술대회 논문집, 한국기상학회, 112~113.

노영민, 김영준, D. Muller (2007) 역행렬 알고리즘을 이용한 다파장 라만 라이다 데이터의 고도별 에어로졸 MICROPHYSICAL

PARAMETER 도출, 한국대기환경학회지 제 23권 제 1호, Accepted.

Luo Y., D. Lu, X. Zhou, and W. Li. (2001) Characteristics of the spatial distribution and yearly variation of aerosol optical depth over China in last 30 years. *J. Geophys. Res.*, 106, 14,501~14,513.

Muller, D., U. Wandinger, and A. Ansmann (1999) Microphysical particle parameters from extinction and backscatter lidar data by inversion with regularization: Theory, *Appl. Opt.* Vol. 32, No 12

Ryu, S. Y., J. E. Kim, H. Zhuanshi, and Y. J. Kim, (2004), Chemical Composition of Post-Harvest Biomass Burning Aerosols in Gwangju, Korea, *AWMA*, 1124-1137.