지상 라이다를 이용한 대기중 꽃가루 분포 실시간 모니터링

노영민* · Detlef Mueller* · 이권호** · 최영진*** ·

김규랑*** · 이한림****† · 최태진*****

*광주과학기술원 환경공학과, **경일대학교 위성정보공학과, ***응용기상연구과 국립기상연구소,

****연세대학교 대기과학과, *****극지연구소

Instantaneous Monitoring of Pollen Distribution in the Atmosphere by Surface-based Lidar

Young Min Noh*, Kwonho Lee**, Detlef Mueller*, Young Jean Choi***,

Kyu Rang Kim***, Hanlim Lee ****† and Tae Jin Choi*****

*Department of Environmental Science & Engineering, Gwangju Institute of Science & Technology

**Department of Satellite Geoinformatics Engineering, Kyungil University

***Applied Meteorology Research Lab. National Institute of Meteorological Research

****Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, *****Korea Polar Research Institute

Abstract : The diurnal variation in pollen vertical distributions in the atmosphere was observed by a surface-based lidar remote sensing technique. Aerosol extinction coefficient and depolarization ratio at 532 nm were obtained from lidar measurements in spring (4th May - 2nd June) 2009 at Gwangju Institute of Science & Technology (GIST) located in Gwangju, Korea (35.15° E, 126.53° N). Unusual variations of depolarization ratio were observed for six days from 4th to 9th May. Depolarization ratios varied from 0.08 to 0.14 were detected at the low altitude in the morning. The altitude with those high depolarization ratios was increased up to 1.5 - 2.0 km at the time interval between 12:00 and 14:00 LT and then decreased. The temporal variations in high values of depolarization ratios from lidar measurements show good agreement in patterns with the sampled pollen concentrations measured using the Burkard trap sampler. This study demonstrates that the pollen distribution data obtained by lidar measurements can be a useful tool for investigating spatial and temporal characteristic of pollen particles.

Key Words : Pollen, Lidar, Depolarization ratio

요약 : 대기중의 꽃가루를 원격 탐사 기술을 이용하여 실시간 연속적으로 수행한 연구는 현재까지 전무하다. 본 연구는 지상 라이다 원격 탐사 기술을 이용하여 꽃가루 대기 분포의 일변화를 실시간 연속적으로 모니터링 하였다. 지상 라이다를 이용한 관측은 5월 4일부터 6월 2일까지 광주과학기술원에서 지속적으로 수행되었다. 라이다 데이터의 소산계수 분석을 통하여 대기 에어로솔의 분포를 확인하고 편광소멸도를 이용하여 입자의 비구형성을 확인하였다. 관측 기간 중 5월 4일부터 9일까지 일출 이후 09시경부터 편광소멸도

접수일(2011년 11월 1일), 수정일(1차 : 2011년 12월 12일, 2차 : 12월 22일), 게재확정일(2011년 12월 23일).

† 교신저자: 이한림(hanlimlee@yonsei.ac.kr)

값이 0.08에서 0.14로 높은 값이 지표면 가까이부터 관측되기 시작하여 정오경에 1.5 - 2.0 km까지 고도가 증가하다 이후 감소하기 시작하여 일출시간(18시 이후)에 사라지는 현상이 관측되었다. 이 때 일별 꽃가루 농도는 $1,000 \text{ m}^{-3}$ 이상의 높은 농도를 보여 편광소멸도의 증가가 꽃가루로부터 유발된 것임을 알 수 있었다. 라이다 편광소멸도 관측과 기상 자료와의 비교분석을 통하여 수목류가 방출한 꽃가루는 지표면 기온이 상승하고 대기 중 상대습도가 낮아지는 낮 시간 동안 대기경계층 고도까지 상승하지만 시간이 지남에 따라 기온의 하강과 상대습도의 증가, 그리고 풍속이 감소하면서 꽃가루의 관측 고도는 낮아져 늦은 오후 시간대부터는 꽃가루가 대기 중에서 사라지는 일변화 형태를 보임을 파악할 수 있었다.

1. 서론

주로 봄철에 높은 농도로 대기 중에서 관측이 되는 꽃가루는 시정을 악화시키는 등 대기 환경을 저해하는 작용을 하기도 하고 천식이나 알레르기비염과 같은 호흡기 알레르기 뿐만 아니라 아토피피부염을 악화시키는 등 건강문제에 악영향을 미치는 원인 물질로 작용한다 (Lewis *et al.*, 1983; Esch and Bush, 2003). 식물은 수정방법에 따라 충매화와 풍매화로 나눌 수 있는데, 충매화는 향기나 꽃으로 곤충을 유혹하여 꽃가루를 전파시키므로 발생량이 적고 크고 무거운 공기 중에 잘 부유하지 않아 대기 환경 및 건강상 문제를 유발할 가능성이 적다. 이에 반하여 풍매화는 작고 가벼운 꽃가루를 다량 생성하여 바람에 의하여 전파되게 함으로써 대기 환경 및 건강상 문제를 유발한다(오재원, 2009).

1819년 John Bostock에 의해 꽃가루가 인체에 질병을 일으킬 수 있다고 발표된 이후 1960년대 말부터 미국과 유럽을 중심으로 꽃가루에 대한 많은 연구가 이루어졌으나 주로 꽃가루의 발생 기작(Niklas, 1985), 꽃가루와 알레르기 질환과의 연관성(Potter and Cadman, 1996), 꽃가루의 지역적 분포와 계절적 분포 확인(Vázquez *et al.*, 2003; Damialis *et al.*, 2005; Stach *et al.*, 2007) 등이 중점적으로 연구되었다.

국내에서는 박기준 등 (2008)이 전국 7개 지역에서 관측된 꽃가루 농도 자료를 이용하여 지역별, 기상별, 알레르기 발현성별로 꽃가루 농도 분포 특성을 조사 분석하였다. 이를 통하여 꽃가루 농도는 전국적으로 유사한 분포를 보이며, 수목류는 3월~5월, 잡초류는 8월~10월에 주로 발생하는 것을 밝혔다. 오재원 (2009)은 꽃가루 농도를 예측하기 위한 예보 지수를 개발하여 실제 관측 결과와 비교하였다.

꽃가루의 확산 및 장·단거리 이동에 대한 연구들(Raynor *et al.*, 1975; Mandrioli *et al.*, 1984; Hjelmroos, 1991; Sofiev *et al.*, 2006)이 수행되었으나 주로 모델을 이용한 시뮬레이션 연구에 그쳤고, 관측을 통한 고도별 농도와 분포에 대한 연구는 매우 제한적으로 수행되었다. Raynor 등(1974)이 항공기를 이용하여 꽃가루의 수직농도분포를 관측하였다. Sassen (2008)은 최초로 라이다(LIDAR : Light Detection And Range)를 이용한 원격 탐사 기술로서 꽃가루의 분포를 파악할 수 있다는 가능성을 제시하였다.

현재 진행중인 기후변화는 대기 중 꽃가루 농도의 증가를 야기할 것으로 예측되고 있어(WMO, 2001) 꽃가루 발생이 대기환경에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 단순히 지표면에서 꽃가루의 농도를 관측하는 연구를 뛰어 넘어 꽃가루의 대기 중 분포 및 확산에 대한 연구가 필요하다.

본 연구는 2009년 봄에 지속적으로 수행된 라이다 관측을 통하여 얻어진 고도별 대기 에어로졸 분포와 편광소멸도(Depolarization ratio) 자료와 지상에서 측정된 AERONET (AErosol RObotic NETwork)의 sunphotometer 자료, 일별 꽃가루 농도, 기상자료 및 미세먼지 농도(PM_{10})를 종합적 분석하여 국내 최초로 라이다 관측으로부터 대기중 꽃가루의 고도별 분포를 확인하고자 하였다.

2. 관측

라이다를 이용한 연속적인 대기 에어로솔 관측은 극지연구소의 Dual-lidar를 이용하여 광주과학기술원(35.10° E, 126.53° N)에서 2009년 3월부터 5월 사이의

봄 기간에 강수가 내리지 않는 맑은 날에 지속적으로 수행되었다. 본 연구에서는 연중 꽃가루의 농도가 가장 높게 나타나는 5월에 관측된 라이다 자료를 분석하였다.

극지연구소의 Duel-lidar는 ND:YAG⁽¹⁾ 레이저에서 생산된 350 mJ에 30 Hz의 출력 1064 nm 파장을 Second harmonic generator를 거쳐 532 nm의 가시 영역대의 파장으로 변환하여 관측을 수행한다. 레이저에서 발진된 빔은 먼 거리에서의 빔 퍼짐도를 줄여 관측 효율 향상을 위해 빔 확대기(beam expander)를 사용하여 직경을 10배로 확대하였다. 확대된 레이저 빔은 망원경의 중심에서 쏘아 올리는 Co-axial type으로 설계되어 중첩고도의 영향을 최소화 하였다.

에어로졸에 의해 산란된 빛은 8 inch 망원경으로 수집되어 편광과 시준기(Collimator)를 거쳐 평행광으로 만들어진다. 생산된 평행광은 편광빔 분리기(Polarization beam splitter)를 거쳐 빔의 편광도를 구분한 후 532 nm 파장의 간섭필터를 설치하여 532 nm 파장에서의 신호를 구분하게 된다. 이후 광증배관(PMT: photomultiplier tube)으로 산란 신호를 검출하고 AD(Analog-to-Digital) convertor를 통하여 PMT로부터 수신된 광신호를 전기적 신호로 전환하여 수치화 하게 된다. 라이다 본체는 항온항습을 유지할 수 있는 트레일러 안에 설치하였고 관측은 15분에 2분간격으로 진행하였다. 중첩고도의 영향으로 최저 관측 고도는 200 m로서 그 이하의 고도에서는 분석 가능한 신호의 수신이 어려웠다.

극지연구소의 Duel-lidar는 현재 쇄빙선인 아라온호에 2009년 10월부터 설치되어 있으나, 쇄빙선 설치전 2008년 9월부터 2009년 7월까지 광주과학기술원에 설치되어 시험 관측을 수행하였다.

대기 에어로졸의 고도별 분포를 파악할 수 있는 소산 계수(extinction coefficient)는 식 (1)의 라이다 방정식을 해석하여 산출하였다.

$$P_0(z) = C_0 O_0(z) z^{-2} [\beta_P(z) + \beta_M(z)] T_P^2(z) \cdot T_M^2(z) \quad (1)$$

여기서, T , $P(z)$, T_0 , $M(z)$ 은

$$T_P(z) = \exp \left[- \int \alpha_P(z) dz \right] = \exp \left[- S \int \beta_P(z) dz \right] \quad (2-1)$$

$$T_M(z) = \exp \left[- \int \alpha_M(z) dz \right] = \exp \left[- \left(\frac{8\pi}{3} \right) \int \beta_M(z) dz \right] \quad (2-2)$$

으로 P 는 수신된 에너지; C_0 는 시스템 상수; $O(z)$ 는 중첩함수; β_P 와 β_M 는 에어로졸과 공기분자에 의한 탄

성 후방 산란계수(Elastic backscatter coefficient); T 는 파장 λ 에서 라이다 시스템과 후방산란이 일어난 지점 사이의 대기 투과율; α_P 과 α_M 은 에어로졸과 공기분자에 의한 소산계수를 나타낸다. 여기서 S 는 에어로졸에 의한 소산과 후방산란계수의 비로 라이다 비(Lidar ratio)로 지칭하며 에어로졸의 종류와 크기, 성분 등에 따라 다양한 값을 나타낸다. 본 연구에서는 Klett (1985)이 제안한 역방향 적분법은 원거리에서 대기 에어로졸이 존재하지 않는 구간을 기준고도로 설정하고 이 기준고도에서부터 아래방향으로 순차적인 해석을 수행하였고 $50 \text{ sr}^{(2)}$ 의 라이다 비를 사용하였다.

관측된 대기 에어로졸의 비구형성을 파악할 수 있는 편광소멸도는 아래의 식 (3)으로부터 총 선형 편광소멸도(Total linear depolarization ratio)를 산출하였다.

$$\delta(z) = \frac{P_S(z)}{P_S(z) + P_P(z)} \quad (3)$$

여기서, $\delta(z)$ 는 고도 z 에서의 편광소멸도, $P_P(z)$ 는 수평 편광신호(레이저 편광)를 $P_S(z)$ 는 수직 편광신호를 나타낸다.

라이다 관측 지점에 위치한 AERONET sunphotometer로부터 Level 2.0의 440 nm의 에어로졸 광학적 두께(Aerosol optical depth, AOD)와 440 - 870 nm에서의 파장역지수(Angstrom exponent)값을 비교 분석에 활용하였다.

꽃가루 농도 자료는 광주보훈병원 옥상 1.5 m 높이에 설치된 Burkard trap (seven-day recording volumetric spore trap)을 이용하여 관측한 m^3 당 꽃가루 수를 기상청으로부터 제공받아 사용하였다. 자세한 꽃가루 관측 방법은 박기준 등(2008)에 소개되어 있다.

지상에서 관측된 풍속, 상대습도, 온도의 기상자료와 미세먼지(PM_{10}) 농도는 광주지방기상청에서 관측된 1시간 평균 자료를 기상청으로부터 제공받아 사용하였다. 고도별 기온과 상대습도 자료는 라이다 관측 지점에서 10 km 떨어진 광주공항에서 측정된 라디오존데 자료를 활용하였다.

3. 결 과

Fig. 1은 2009년 5월 4일부터 6월 2일까지 라이다로

Fig. 1. Time-altitude plot of the extinction coefficient (a) and depolarization ratio (b) at 532 nm measured from May 4 to June 2, 2009.

Fig. 2. Hourly averaged PM₁₀ concentration from May 4 to June 2, 2009.

연속적으로 관측된 소산계수와 편광소멸도를 보여준다. Fig. 1(a)의 소산계수로부터 관측기간 동안 대기 에어러솔이 대부분 1.5에서 2.0 km 고도 이내에 분포하였고 2.0 km 이상의 고도에서는 낮은 빈도로 대기 에어러솔이 관측되었음을 알 수 있다. Fig. 1(b)의 편광소멸도는 입자의 비구형성을 나타내는 지표로서 일반적인 대기 에어러솔이 0.05 이하의 낮은 값을 보이는데 반하여, 황사와 같은 비구형 입자는 입자의 비구형성에 따라 0.10 - 0.30의 높은 값을 보여 대기 중 비구형 입자의 분포를 확인하는데 유용한 지표이다(Sakai *et al.*, 2003; Noh *et al.*, 2007; 2008). Fig. 2는 라이다 관측 기간 동안

광주지방기상청에서 관측된 1시간 평균 PM₁₀ 농도변화를 보여주며 Fig. 3은 같은 기간에 Sunphotometer로 측정된 440 nm에서의 에어러솔 광학적 두께(AOD)와 440 nm와 870 nm의 파장대에서 측정된 파장역지수(Angstrom exponent)를 보여준다.

일반적으로 라이다를 이용하여 대기 관측 중 비구형 입자가 존재하지 않는 청명일은 24일부터 30일에서 보여주듯이 편광소멸도 값이 0.05 이하로 낮은 값을 보인다. 황사가 발생한 경우에는 Fig. 1(b)의 5월 18일부터 21일의 3일의 기간 동안과 같이 0.13 이상의 높은 편광소멸도가 지속적으로 관측되어 청명일과는 확연히 구분

Fig. 3. Aerosol optical depth (closed square) at 440 nm and Angstrom exponent (open circle, 440 - 870 nm) determined using a sunphotometer.

Fig. 4. Daily distribution of pollen counts at Gwangju, Korea.

되는 편광소멸도가 관측된다. 하지만 Fig. 1(b)에서 5월 4일부터 9일의 6일의 관측 기간 동안의 편광소멸도 분포는 황사 발생 시 보여지는 것과 다른 분포를 보였다. 이 기간 동안의 소산계수는 연속적인 대기 에어로솔의 분포를 보여주는데 반하여, 편광소멸도는 일출 이후 09 시에서 10시경 사이에서 0.08 - 0.14 사이의 편광소멸도가 지표면 가까이의 낮은 고도에서부터 관측되기 시작하여 12시에서 14시 사이에 1.5 - 2.0 km 고도까지 분포하다 그 이후 관측고도가 감소하여 17에서 18시경에서 소멸되는 현상이 6일 동안 측정되었다. Fig. 2에서

의 PM_{10} 농도도 낮 시간 동안만 높은 값을 보이는 편광소멸도와의 연관성을 보이지 않았으며, Fig. 3의 파장역치수 값도 5월 9일 오후 시간대를 제외하고는 1.20에서 1.43 사이의 분포를 보여 편광소멸도 증가가 황사 입자의 영향이 아닌 것으로 판단된다. 해염 입자(Sea-salt)도 편광소멸도를 증가시킬 수 있으나, 라이다 관측 지점이 해안에서 50 km 이상 떨어진 내륙지역이고 관측기간 동안 바람이 북서풍의 방향을 지속적으로 유지한 것을 고려할 때 낮 시간 동안만 편광소멸도를 증가시킨 것과는 연관성은 없을 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 편광소멸도를 증가시킬 수 있는 또 다른 입자

인 꽃가루와의 연관성을 분석하였다.

Fig. 4는 라이다 관측 기간 동안의 일별 꽃가루 농도를 보여준다. 4일부터 7일까지는 꽃가루 농도가 1000 m^{-3} 이상으로 높은 농도가 관측되었으나 8일부터는 500 m^{-3} 이하로 농도가 감소하였다. 하지만, 13일의 70 m^{-3} 을 제외하고는 15일까지 100 m^{-3} 이상으로 높은 농도의 꽃가루가 발생하는 것이 관측되었다. 높은 농도의 꽃가루가 관측된 기간에 낮 시간 동안 편광소멸도가 증가하는 현상이 측정되었으나 100 m^{-3} 이하의 미약한 꽃가루 농도가 측정된 16일 이후에는 이러한 현상이 관측되지 않은 것을 고려할 때 편광소멸도 증가는 꽃가루 농도의 증가와 관련된 것으로 판단된다.

4. 고 찰

낮 시간 동안 편광소멸도 값의 증가는 꽃가루 농도의 증가와 관련된 것으로 고려되어 이를 확인하기 위한 기상 자료 분석을 수행하였다. 선행 연구로부터 수목류는 대부분 온도가 높고 상대습도가 낮은 날 정오부터 늦은 오후 (10:00 ~ 18:00 hr)에 꽃가루를 방출한다고 알려져 있다(Pande *et al.*, 1972; Curtis and Lersten, 1995). Fig. 5는 5월 4일부터 9일까지 라이다 편광소멸도 변화 (a)와 한 시간 평균의 상대습도 (b), 풍속 (c), 그리고 온도 (d) 변화를 보여준다. 편광소멸도가 0.08 ~ 0.14의 값을 보이기 시작하는 09시에서 10시경에 80 ~ 60 % 이상이던 상대습도는 감소하기 시작하여 정오경에 20 % 이하까지 감소하고 온도는 25°C 이상까지 증가하였다. 이후 편광소멸도가 0.05 이하의 값을 보이는 16시 이후부터 다음날 09시까지의 시간대에서 상대습도는 증가하여 새벽 시간대에 최대값을 보이고 온도는 감소하는 경향이 관측되었다. 풍속 또한 4일과 8일에는 낮 최고 풍속이 각각 3.1과 2.8 m/s로 다른 날에 비하여 낮았지만 편광소멸도가 증가하는 시간대에 풍속도 증가하는 경향은 공통적으로 관측되었다. 기상자료의 분석으로부터 온도와 습도 등의 기상조건이 충족될 때 꽃가루가 대기중으로 방출되게 되고 방출된 꽃가루가 라이다 편광소멸도 관측 시 비편광 산란을 일으켜 낮 시간 동안 편광소멸도 값의 증가를 가져온 것으로 판단된다. Sassen (2008)은 알래스카 지역에서 라이다의 편광소

멸도를 이용하여 꽃가루 분포를 관측하였다.

Mandrioli *et al.* (1984)은 대기에서 입자의 수직 수송은 다음의 두 가지 메커니즘에 의해 이루어진다고 설명하였다. 첫째는 대기 오염물질의 확산에 관련된 난류 수송(turbulent transport)이다. 난류 수송은 대기 경계층 내에서 발생하는 것으로 일출과 함께 지표면이 가열되게 되고 이로 인한 대기 상승으로부터 난류가 형성되어 입자의 수직적 혼합이 이루어지는 것이다. 다른 메커니즘은 강한 대류 폭풍(convective storm)에 의하여 대기경계층 상층으로 높은 고도까지 입자가 상승하는 것이다. Fig. 1(b)에서 보여주듯이 9시경에 관측되기 시작하는 높은 편광소멸도는 그 관측고도가 시간의 흐름과 함께 증가하여 12시에서 2시경에 최고 관측 고도를 보이고 그 이후 고도가 감소하여 사라진다. 이러한 현상은 일출 이후 9시경 기상조건이 충족되어 수목류로부터 꽃가루가 방출되고 방출된 꽃가루가 온도 상승, 풍속 증가와 맞물려 난류수송이 이루어져 대기경계층 고도까지

Fig. 5. Depolarization ratio and hourly averaged meteorological data observed from 00:00 May 4 to 24:00 May 9, 2009. (a) depolarization ratio with the same color scale in Fig. 1 (b), (b) relative humidity, (c) wind speed, and (d) temperature.

Fig. 6. Radiosonde data on May 4 (a), May 5 (b), May 6 (c), May 7 (d), May 8 (e), and May 9 (f). Temperature observed on 09:00 (closed square), 15:00 (closed circle) and 21:00 (closed triangle). Relative humidity observed on 09:00 (open square), 15:00 (open circle) and 21:00 (open triangle)

확산되었다 이후 온도 하강 및 풍속의 감소와 함께 꽃가루도 다시 하강하게 되는 것으로 파악된다. Fig. 1(b)에서 8일의 편광소멸도가 다른 날에 비하여 낮은 값을 보이는 것은 8일의 꽃가루 농도가 346 m-3으로 전날에 비하여 대기 중 농도가 낮아지고, 풍속이 약하여 꽃가루의 확산이 다른 날에 비하여 적었던 것으로 판단된다. 9일의 경우 꽃가루 농도는 8일보다 낮으나 편광소멸도는 높게 나타났다. 9일의 풍속이 정오에 5.7 m/s로 8일보다 2배정도 높은 것을 고려하면 꽃가루의 확산에는 풍속이 높은 영향을 미치는 것으로 사료된다. Durham (1944)는 상대습도가 증가함에 따라 각종 꽃가루의 비중이 증가하는 현상을 관찰하였다. 이는 본 연구에서 낮 시간 동안 상대습도의 감소는 꽃가루의 비중을 감소시켜 꽃가루가 기류를 타고 높은 고도까지의 상승이 용이하도록 작용하는 것으로 고려된다. Fig. 6은 존데 자료로부터 산출된 4일부터 9일까지 고도별 온도와 상대습도를 보여준다. 매일 09시, 15시, 21시에 관측된 자료로서 시간별 변화를 보여주지는 못하지만 09시에는 지표면 가까이 역전층이 형성되어 있고 상대습도도 높지만 낮 시간대인 15시경에는 기온 감율이 단열조건을 형성하여 대기가 불안정한 상태를 보여준다. Raynor *et*

al. (1974)는 항공기를 이용한 꽃가루의 수직분포 관측으로부터 대기가 단열상태인 경우 꽃가루의 수직적 혼합이 발생하였으며 단열감율이 안정적인 경우 고도에 따라 꽃가루 농도가 감소하는 경향을 확인하였다. 하지만, 난류가 발생할 경우 상층에서의 꽃가루 농도가 하층보다 높은 경우도 관측하였다. 또한, 낮 시간 동안의 상대습도의 감소는 꽃가루의 비중을 감소시켜 꽃가루의 확산이 더욱 용이하게 하는 것으로 판단된다 (Durham, 1944).

5. 결론

본 연구를 통하여 높은 농도의 꽃가루 발생 시 대기 에어러솔 관측용 라이다 시스템의 편광소멸도를 이용하여 대기 중 꽃가루의 수직 분포를 관측할 수 있음을 알 수 있었다. 대기 중으로 확산된 꽃가루는 라이다 관측에 있어 일반 대기 에어러솔 보다 높은 0.08-0.14 사이의 편광소멸도 값을 유발하여 편광소멸도 값으로부터 꽃가루의 분포를 확인할 수 있었다. 본 연구의 라이다 편광소멸도 관측으로부터 수목류가 방출한 꽃가루는 지표면

기온이 상승하고 대기 중 상대습도가 낮아지는 낮 시간 동안 대기경계층 고도까지 상승하지만 시간이 지남에 따라 기온의 하강과 상대습도의 증가, 그리고 풍속이 감소하면서 꽃가루의 관측 고도는 낮아져 늦은 오후 시간대부터는 꽃가루가 대기 중에서 사라지는 일정한 일변화 형태를 파악할 수 있었다.

본 연구는 항공 관측에만 의존하여 제한적으로 수행되던 대기 중 꽃가루의 확산과 분포에 관한 연구를 라이다 원격탐사 기술을 적용하여 실시간 연속적으로 수행할 수 있음을 최초로 증명하였다. 또한 본 연구에서 측정된 꽃가루의 일변화 형태는 CALIPSO와 같은 위성 라이다 데이터 분석시 황사와 꽃가루를 구분하는데 중요한 자료로 활용될 수 있을 것이다. 이러한 꽃가루 분포의 고도별 연속 관측 자료는 꽃가루의 확산 현상에 대한 중요한 정보로 활용될 것으로 기대되며, 현재 진행중인 꽃가루 농도 예보 연구를 위한 기초자료가 될 것으로 기대된다.

하지만, 약한 황사나 해염 입자도 꽃가루의 편광소멸도와 유사한 값을 보이며, 높은 농도의 꽃가루가 발생하는 봄철은 황사가 주요하게 발생하는 시기이므로 편광소멸도를 이용한 꽃가루 분포 연구에 높은 주의가 필요하며 기상조건, PM₁₀ 농도 분석 등을 통하여 분석 결과를 검증하는 절차가 반드시 필요할 것으로 판단된다.

향후에는 편광소멸도 값의 보정과 정밀 분석을 통하여 꽃가루 입자의 크기 및 형태에 따른 편광적 특성과 알레르기를 일으키는 꽃가루의 크기에 따른 형태 차이와의 상관관계를 분석하여 꽃가루의 독성에 대한 연구의 기초자료로 활용되게 할 계획이다.

사 사

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2010-0022171). 본 연구의 꽃가루 관측 자료는 국립기상연구소 “신생활산업기상기술개발연구”의 지원으로 제공되었습니다. 본 연구의 라이다 관측 자료는 한국해양연구원 부설 극지연구소에서 수행하는 “서남극 기후변화 원인 규명을 위한 남극진동(SAM) 구성 요소 재현 및 관측 연구(PE11010)” 사업의 지원으로 제공되었습니다.

주

- 1) Nd:YAG는 neodymium-doped yttrium aluminium garnet의 약어로서 레이저에서 광원을 발진하는 결정으로서 Nd:YAG 결정은 현재 전 세계적으로 고체 레이저 시스템에서 제일 많이 사용되는 레이저 결정이다.
- 2) Sr the SI unit of solid angle.

참고문헌

- 박기준, 김현애, 김규량, 오재원, 이선영, 최영진, 2008. 한반도 지역에서 관측된 꽃가루 농도 특성에 관한 연구, *한국농림기상학회지*, 10(4): 167-176.
- 오재원, 2009. 대기 중 알레르기 화분(꽃가루) 농도 예보제 개발, *대한의사협회지*, 52(6): 579-591.
- Bostock, J., 1819. Case of a Periodical affection of the eyes and chest, *Medico-Chirurgical Transactions*, 10: 161-165.
- Curtis, J.D. and N.R. Lersten, 1995. Anatomical aspects of pollen release from staminate flowers of *Ambrosia trifida* (Asteraceae), *International Journal of Plant Sciences*, 156: 29-36.
- Damialis, A., D. Gioulekas, C. Lazopoulou, C. Balafoutis, and D. Vokou, 2005. Transport of airborne pollen into the city of Thessaloniki: the effects of wind direction, speed and persistence, *International Journal of Biometeorology*, 49: 139-145.
- Durham, O.C., 1944. The volumetric incidence of atmospheric allergens, *The Journal of allergy*, 455-461.
- Esch, R.E. and R.K. Bush, 2003. Aerobiology of outdoor allergens, In Adkinson NF Jr, Yunginger JW.
- Hjelmroos, M., 1991. Long-distance transport of Betula pollen grains and allergic symptoms, *Aerobiologia*, 8: 231-236.
- Klett, J.D., 1981. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns, *Applied Optics*, 20

- (2): 211-220.
- Lewis, W.H., P. Vinay, and V.E. Zenger, 1983. Airborne and allergenic pollen of North America, *The Johns Hopkins University Press*, Baltimore & London.
- Mandrioli, P., M.G. Negrini, G. Cesari, and G. Morgan, 1984. Evidence for long range transport of biological and anthropogenic aerosol particles in the atmosphere, *Grana* 23: 43-53.
- Niklas, J.K., 1985. The Aerodynamics of wind pollination, *The Botanical Review*, 51: 328-386.
- 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*, doi:10.1016/j.atmosres.2007.03.006.
- Noh, Y.M., Y.J. Kim, and D. Müller, 2008. Seasonal characteristics of lidar ratio measured with a Raman lidar at Gwangju, Korea in spring and autumn, *Atmospheric Environment*, 42: 2208-2224.
- Pande, G.K., P. Pakrash, and M.A. Hassam, 1972. Floral biology of barley (*Hordeum vulgare* L.), *The Indian Journal of Agricultural Sciences*, 48: 697-703.
- Potter, P.C. and A. Cadman, 1996, Pollen allergy in South Africa, *Clinical & Experimental Allergy*, 26: 1347-1354.
- Raynor, G.S., J.V. Hayes, and E.C. Ogden, 1974. Mesoscale transport and dispersion of airborne pollens, *Journal of applied meteorology*, 13: 87-95.
- Raynor, G.S., J.V. Hayes, and E.C. Ogden, 1975. Particulate dispersion from source within a forest, *Boundary-Layer meteorology*, 9: 257-277.
- Sakai, T., T. Nagai, M. Nakazato, Y. Mano, T. Murayama, 2003. Ice clouds and Asian dust studied with lidar measurements of particle extinction-to-backscatter ratio, particle depolarization, and watervapor mixing ratio over Tsukuba, *Applied Optics*, 42 (36): 7103-7116.
- Sassen, K., 2008. Boreal tree pollen sensed by polarization lidar: Depolarizing biogenic chaff, *Geophysical Research Letters*, 35, L18810, doi: 10.1029/2008GL035085.
- Sofiev, M., P. Siljamo, H. Ranta, and A. Rantio-Lehtimäki, 2006. Towards numerical forecasting of long-range air transport of birch pollen: theoretical considerations and a feasibility study, *International Journal of Biometeorology*. 50: 392-402.
- Stach, A., M. Smith, C.A. Skjøth, and J. Brandt, 2007. Examining Ambrosia pollen episodes at Poznań (Poland) using back-trajectory analysis, *International Journal of Biometeorology*, 51: 275-286.
- Vázquez, L.M., C. Galn, and E. Domnguez-Vilches, 2003. Influence of meteorological parameters on olea pollen concentrations in C_rdoba (South-western Spain), *International Journal of Biometeorology*, 48: 83-90.
- WMO, 2001. Climate Change 2001, *IPCC*, pp. 203.