ISSN 1738-8716(Print)
ISSN 2287-8130(Online)
Particle and Aerosol Research
Part. Aerosol Res. Vol. 14, No. 2: July 2018 pp. 35-40
http://dx.doi.org/10.11629/jpaar.2018.14.2.035

드론을 이용한 안면도 상공 대기경계층내의 미세먼지 연직분포 및 Flux 측정

김 희 상 · 박 용 희 · 김 우 영 · 은 희 람 · 안 강 호[1)]
[1)]한양대학교 기계공학과

(2018년 6월 20일 투고, 2018년 6월 25일 수정, 2018년 6월 27일 게재확정)

Vertical Aerosol Distribution and Flux Measurement in the Planetary Boundary Layer Using Drone

Heesang Kim · Yonghe Park · Wooyoung Kim · Heeram Eun · Kang-Ho Ahn[1)]
[1)]*Department of Mechanical Engineering, Hanyang University*

(Received 20 June 2018; Revised 25 June 2018; Accepted 27 June 2018)

Abstract

Vertical particle size distribution, total particle concentration, wind velocity, temperature and humidity measurement was performed with a drone. The drone was equipped with a wind sensor, house-made optical particle count(Hy-OPC), condensation particle counter(Hy-CPC), GPS, Temperature, Relative Humidity, Pressure and communication system. Base on the wind velocity and the particle size vertical distribution measurement with drone, the particle mass flux was calculated. The vertical particle distribution showed that the particle number concentration was very strongly correlated with the relative humidity.

Keywords: Vertical wind distribution measurement, Drone, Particle Mass Flux, Condensation Particle Counter (CPC), Optical Particle Counter (OPC), Total Particle Count, Relative humidity

* Corresponding author.
Tel : +82-31-400-5284
E-mail : khahn@hanyang.ac.kr

1. 서론

(초)미세먼지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 대부분의 연구는 지상에서 이루어지고 있으며, 인간활동의 영향을 가장 많이 받고 있는 대기경계층 내부에서의 연구는 상대적으로 미미한 상태이다. 지금까지 대기경계층 내의 연구는 주로 유인비행기를 이용하여 연구를 하고 있다. (Jayne et al., 2000; Allan et al., 2003a; Allan et al., 2003b; Jimenez et al., 2003; Arshinov and Belan, 2004; Arshinov et al., 2007) 유인 비행기를 이용하여 (초)미세먼지의 공간분포를 연구할 경우 막대한 비용 상의 문제뿐만 아니라 비행제한 구역 및 기상 상황 등에 따른 제약이 따르게 된다. 특히, 지상에 근접한 고도 수백미터내의 (초)미세먼지 분포 연구를 위해 유인비행기를 이용하는 것은 안전상의 문제로 수행하기가 어렵다.

이와 같이 유인기를 이용한 지상에 근접한 영역의 미세먼지 연구 한계를 극복하기 위해 존데나 풍선 등에 미세먼지 측정기를 탑재하여 고도 1000 m 내외의 공간내 (초)미세먼지의 연직분포를 측정한 연구도 진행되었다. (Kim et. al., 2003; Eun et. al., 2011; Hayashi et al. 1998 ; Minguillon, et. al., 2015; Querol et. al., 2017; Carnerero, et. al., 2018 ; Querol et. al., 2018) 특히 tethered 풍선을 이용할 경우 시간경과에 따른 미세먼지의 연직분포 변화 등을 관측하기가 매우 용이하며, 또한 일정한 고도에 측정장비를 위치시켜 연속적인 모니터링을 할 수 있는 장점이 있다. 그러나 tethered 풍선의 운영 시 바람이 강하면 원하는 고도까지 상승하기가 어렵고 시스템 작동에 많은 인력이 필요한 문제점이 있다.

이에 본 연구에서는 최근에 급속한 속도로 발전하고 있는 멀티콥터 (드론)을 이용하여 미세먼지의 연직분포를 측정할 수 있는 시스템을 개발하였다. 이 시스템에는 풍향-풍속을 측정하는 센서와 온도, 습도, 기압, GPS(Global Positioning System), 광학입자계수기 (Optical Particle Counter, Hy-OPC)와 응축핵계수기 (Water-based Condensation Particle Counter, Hy-CPC)를 장착하여 고도 1000 m 까지 측정할 수 있는 시스템을 개발하였다. 특히, 드론을 조정하기 위해서는 숙련된 조정자가 필요한 관계로 일반적인 연구자가 드론을 조정하기에는 드론에 대한 많은 숙련도를 요구한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 드론은 완전 자동으로 이륙과 착륙을 할 수 있도록 제작되었고, 모든 측정 데이터 및 드론의 상태에 대한 정보를 지상에서 모니터링 할 수 있도록 시스템을 개발하였다. 본 시스템의 착륙거리 오차는 이륙위치에서 임무수행 후 착륙 지점까지의 거리 오차가 1 m 이내가 되어 좁은 공간에서 운영할 수 있는 장점이 있다. 또한 본 드론은 초속 20 m/s의 강풍에서도 임무 수행을 할 수 있다.

본 시스템은 (초)미세먼지가 바람에 의해 유입-유출되는 정도를 파악할 수 있도록 고도 및 풍향-풍속을 측정할 수 있는 센서를 탑재하였다. 따라서 이러한 측정데이터를 이용하면 고도별 (초)미세먼지의 flux를 계산할 수 있다.

2. 실험

Fig. 1 은 본 연구에 사용된 드론 보여주고 있다. 본 드론은 ATO-I(쓰리에스테크, 부산)를 사용하였다. 추진 회전날개는 6개로 풍향-풍속 센서가 가운데 위치하여 프로펠러에 의한 풍향-풍속의 영향을 받지 않도록 설계되었다. (초)미세먼지 유입구는 가운데 위치한 지지대의 풍속센서 바로 아래 부분에 설치되어 내부를 통해 샘플링 하도록 하여 드론의 프로펠러에 의한 외란효과를 최소화 하도록 설계하였다. 본 드론에 설치된 풍향-풍속계는 한국기상산업기술원의 검정을 획득하였고, 온도-습도 센서는 KOLAS(Korea Laboratory Accreditation Scheme)인증기관에서 검교정한 것을 장착하였다. 드론에 장착한 각종 센서가 프로펠러에 의한 영향을 받는지 확인하기 위하여 전남 보성에 위치한 300 m 기상타워에 장착된 각종센서 (고도별로 장착되어 있음)와 본 드론의 고도별 측정값과 비교하였고, 풍향 ±5°, 풍속 ± 0.5 m/s 범위로 라디오 존데로 사용되는 RS92-SGP (VAISALA, 핀란드)사양에 만족하는 것을 확인하였다.

(초)미세먼지 측정용 Hy-OPC와 Hy-CPC (water based)는 기존 연구에 사용된 것을 장착하였다. (Lee et al., 2014; Minguillon et. al., 2015; Querol et. al., 2017; Hwang and Ahn, 2017; Querol et. al., 2018; Carnerero, et. al., 2018)

Fig. 1. Photograph of ATO-I (3S Tech) equiped with wind sensor.

3. 실험결과 및 고찰

위에 언급한 드론을 이용하여 시험은 충청남도 안면도에 위치한 안면도 기후변화감시센터 (동경 126.33도, 북위 36.538도)에서 진행되었다. Fig. 2에는 본 시험이 실시된 위치를 나타내고 있고, 최고 고도 1,030 m 까지 비행한 궤적을 보여주고 있다. 기체의 상승속도는 약 2.5 m/s이고, Hy-OPC, Hy-CPC의 측정 주기는 매 1초마다 상승하면서 기록되었다.

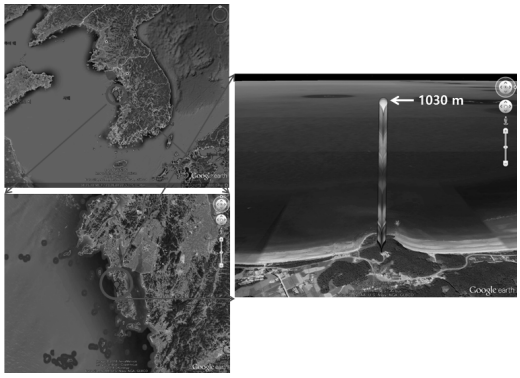

Fig. 2. Drone test site and the flight path up to 1030 m.

본 실험은 2018년 6월 7일 오후에 실시하였으며, Fig. 3에 고도에 따른 온도, 습도, 풍향, 풍속에 대한 측정 자료를 보여주고 있다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 고도 약 320 m에서 첫 번째 온도 역전층이 존재하는 것을 볼 수 있고, 고도 약 700 m에서 2번째 역전층이 있는 것이 관측된 것을 볼 수 있다. 습도의 경우 첫 번째 기온 역전층까지는 60%에서 80%까지 계속 증가하는 것이 관측되었다. 그 이상의 고도에서는 습도가 계속 감소하다가 2번째 기온 역전층 부분에서 습도가 약간 증가하는 것이 관측되었고, 그 이상의 고도에서는 계속 감소하였다. 풍향은 첫 번째 역전층 (고도 320 m)에서 북서풍 또는 북풍에서 남동풍으로 매우 급격히 바뀌는 것을 볼 수 있다. 아울러 이 공기층은 2번째 역전층 (고도 700 m) 바로 아래에서 (고도 약 600 m)에서 풍향이 남동풍에서 남서풍으로 바뀐다. 풍속은 지상에서부터 고도 약 200 m까지는 6 ~ 7 m/s로 불다가 첫 번째 역전층에서 풍속이 1 ~ 2 m/s 까지 낮아지는 것을 볼 수 있다. 고도 300 m 이상에서는 풍속이 약 3 ~ 4 m/s로 증가되고 있는 것이 관측되었다.

Fig. 4는 첫 번째 비행 후 약 30분후에 2번째 비행하면서 관측한 결과를 그림으로 표시한 것이다. 기온 역전층이나 풍향, 풍속 등의 변화는 크게 없는 것을 볼 수 있다. 그러나 첫 번째와 두 번째 기온 역전층이 30분 만에 수십 m 하강한 것이 관측되었다.

해발 1030 m 까지 미세먼지의 연직분포를 측정한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 첫 번째 기온역전층 부분에서 초미세먼지의 농도가 가장 높게 관측되는 것이 보였다. 특히, Hy-CPC의 측정값이 매우 짧은 구간에서 상당히 크게 입자의 개수농도가 높이 증가하는 것이 관측되었다. 이 관측 자료에서 매우 특이한 것은 상대습도의 고도에 따른 측정 profile과 초미세먼지의 수 농도 profile이 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

이러한 고도별 풍향-풍속과 자료와 입자 크기별 PM 농도 자료를 바탕으로 particle mass flux를 계산한 결과를 Fig. 6에 표시하였다. Particle mass flux (PMF) 계산 시 입자의 밀도는 1 g/cm^{3}을 사용하였다. (Hinds, 1982)

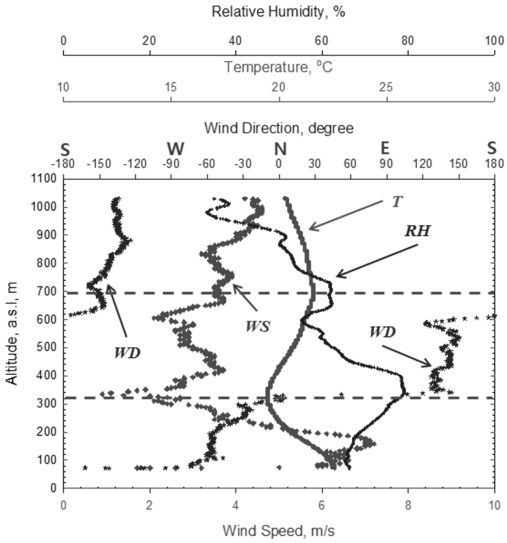

Fig. 3. Vertical profiles of Temperature, Relative humidity, Wind speed and Wind direction on June 7, 2:38 pm local time (UTC+9).

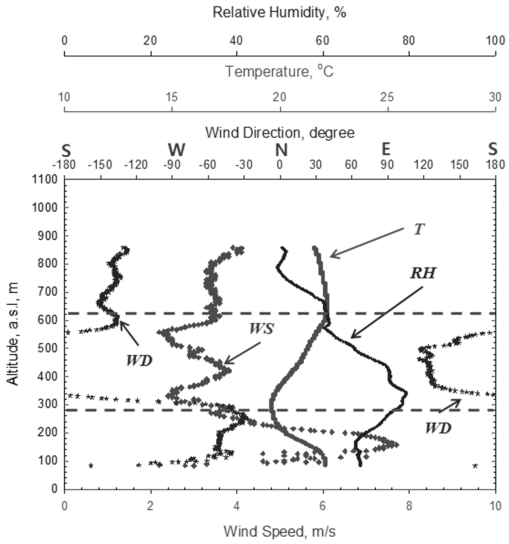

Fig. 4. Vertical profiles of Temperature, Relative humidity, Wind speed and Wind direction on June 7, 3:18 pm local time (UTC+9).

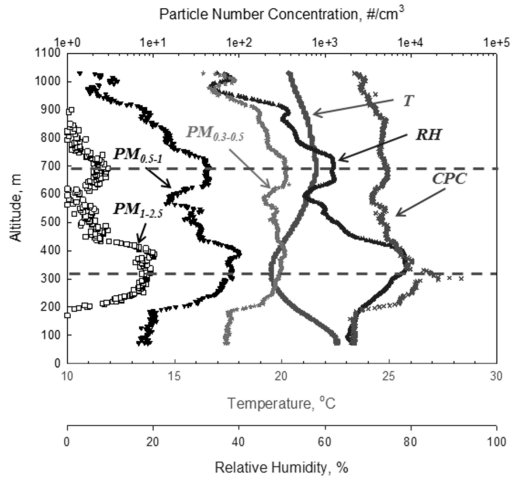

Fig. 5. Vertical profiles of Temperature, Relative humidity, and particle number concentration on June 7, 2:38 pm local time (UTC+9).

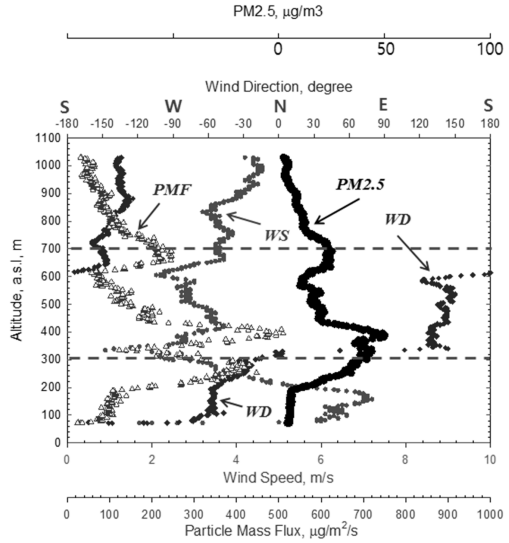

Fig. 6. Vertical profiles of wind speed, wind direction, and particle mass flux on June 7, 2:38 pm local time (UTC+9).

Fig. 6에서 보면 지상 근처에서는 초미세먼지(PM2.5)의 질량 유입량이 약 100 $\mu g/m^2/s$ 정도로 나타나고 있으나, 지상 400 m 부분에서는 약 500 $\mu g/m^2/s$까지 상승하는 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 5의 미세먼지 분포에서 보이는 큰 입자의 농도가 지상보다 한 order정도 높게 나타나고 있는 것에 기인한 것으로 볼 수 있다. 이번 관측에서 풍속이 2 ~ 4 m/s 정도로 높은 고도까지 균일하게 유지되었던 관계로 PMF는 주로 입자의 농도분포에 영향을 받은 것을 볼 수 있다. 이러한 이유로 2개의 기온 역전층 부분에서 초미세먼지의 농도가 높기 때문에 PMF 역시 높게 나왔다.

Fig. 5의 측정결과를 상대습도와 Hy-CPC 측정 입자 수 농도와의 상관관계를 보기 위해 Fig. 7로 재구성하였다. 지상에서부터 310 m까지 상승하면서 측정한 입자의 총 수 농도와 상대습도사이의 상관관계 R^2=0.964로 매우 높게 나타나 있고, 상대습도가 떨어지기 시작하는 약 350 m부터 1030 m 사이의 상대습도와 입자의 수 농도 상관관계는 R^2=0.812로 이 또한 상당히 높은 관계를 보여주고 있다.

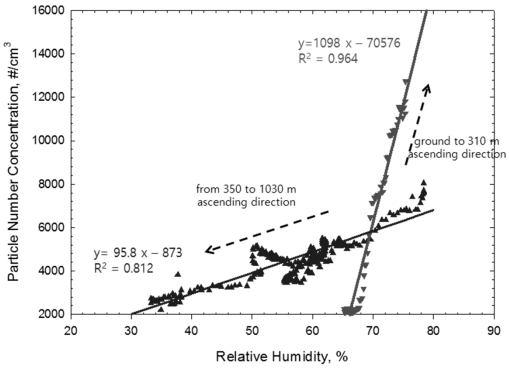

Fig. 7. The correlation between total particle number concentration (Hy-CPC count data) and the relative humidity during vertical profile measurement.

4. 결 론

본 연구에서는 드론에 풍향-풍속 및 미세먼지 측정 장치 (Hy-OPC, Hy-CPC)를 동시에 장착하고 고도 1000 m 까지 측정할 수 있는 시스템을 개발하였고, 이를 이용하여 안면도에서 성공적으로 초미세먼지의 연직분포를 관측하였다. 초미세먼지의 경우 지상보다 높은 고도 200 ~ 300 m 이상되는 곳에서 매우 높은 농도들이 관측되었으며, 이것은 북서풍과 남동풍을 타고 유입되었다. 초미세먼지 개수 농도의 연직분포와 상대습도의 연직분포가 매우 유사한 특징을 보이는 것이 관측되었으며, 향후 보다 많은 실험 및 관측을 통하여 미세먼지의 개수농도와 상대습도 사이의 유사성 원인을 밝힐 수 있으면 한다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “그린패트롤 사업단”으로 지원받은 과제임.

참고문헌

Lee, H. K., Hwang, I. K., & Ahn, K. H. (2014). Development and evaluation of Hy-CPC, Particle and Aerosol Research, 10(3), 93-97.

Allan, J. D., Alfarra, M. R., Bower, K. N., Williams, P. I., Gallagher, M. W., Jimenez, J. L., & Coe, H. (2003a). Quantitative sampling using an Aerodyne aerosol mass spectrometer 2. Measurements of fine particulate chemical composition in two UK cities, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 108(D3), 4091.

Allan, J. D., Jimenez, J. L., Williams, P. I., Alfarra, M. R., Bower, K. N., Jayne, J. T., & Worsnop, D. R. (2003b). Quantitative sampling using an Aerodyne aerosol mass spectrometer 1. Techniques of data interpretation and error analysis, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 108(D3), 4090.

Arshinov, M. Y., Belan, B. D., Nedelec, P., Paris, J. D., & Machida, T. (2007). Spatial distribution of nanoparticles in the free troposphere over Siberia. In Nucleation and Atmospheric Aerosols (pp. 819-823), Springer, Dordrecht.

Arshinov, M. Yu., & Belan, B. D. (2004). Vertical distribution of nanoparticles in the continental troposphere. Atmospheric and Oceanic Optics, 17(7), 489-499.

Carnerero, C., Pérez, N., Reche, C., Ealo, M., Titos, G., Lee, H. K., ... & Kerminen, V. M. (2018). Vertical and horizontal distribution of regional new particle formation events in Madrid, Atmospheric Chemistry and Physics, 2018-173, in review.

Eun, H. R., Kim, W. K., Lee, H. K., Yoo, D. H., Yook, S. J., & Ahn, K. H. (2011). Vertical distributed aerosol sampling and analysis using tethered balloon sampler system in Ansan, Particle and Aerosol Research, 7(4), 139-149.

Hayashi, M., Iwasaka, Y., Watanabe, M., Shibata, T., Fujiwara, M., Adachi, H., ... & Tsuchiya, M. (1998). Size and Number Concentration of Liquid PSCs, Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 76(4), 549-560.

Hinds, W. C. (1982). Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles, A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons.

Hwang, I., and Ahn, K. H. (2017). Performance evaluation of conventional type conductive cooling continuous flow compact water-based CPC (Hy-WCPC), Journal of Aerosol Science, 113, 12-19.

Jayne, J. T., Leard, D. C., Zhang, X., Davidovits, P., Smith, K. A., Kolb, C. E., & Worsnop, D. R. (2000). Development of an aerosol mass spectrometer for size and composition analysis of submicron particles, Aerosol Science & Technology, 33(1-2), 49-70.

Jimenez, J. L., Jayne, J. T., Shi, Q., Kolb, C. E., Worsnop, D. R., Yourshaw, I., & Morris, J. W. (2003). Ambient aerosol sampling using the aerodyne aerosol mass spectrometer, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 108(D7), 8425.

Kim, Y. S., Iwasaka, Y., Shi, G. Y., Shen, Z., Trochkine, D., Matsuki, A., & Nakata, H. (2003). Features in number concentration-size distributions of aerosols in the free atmosphere over the desert areas in the Asian continent: Balloon-borne measurements at Dunhuang, China, Water, Air and Soil Pollution: Focus, 3(2), 147-159.

Minguillon, M. C., Brines, M., Perez, N., Reche, C., Pandolfi, M., Fonseca, A. S., Amato, F., Alastuey, A., Lyasota, A., Codina, B., Lee, H. K., Eun, H. R., Ahn, K. H., & Querol, X. (2015). New particle formation at ground level and in the vertical column over the Barcelona area, Atmospheric Research, 164-165, 118-130.

Querol, X., Gangoiti, G., Mantilla, E., Alastuey, A., Minguillon, M. C., Amato, F., ... & Ahn, K. H. (2017). Phenomenology of high-ozone episodes in NE Spain, Atmospheric Chemistry and Physics, 17(4), 2817-2838.

Querol, X., Alastuey, A., Gangoiti, G., Perez, N., Lee, H. K., Eun, H. R., ... & Ahn, K. H. (2018). Phenomenology of summer ozone episodes over the Madrid Metropolitan Area, central Spain, Atmospheric Chemistry and Physics, 18(9), 6511-6533.