



드론을 활용한 대기 중 블랙카본 농도 측정

Black Carbon Measurement using a Drone

이 정 훈*

한국기술교육대학교 기계공학부

(2018년 6월 8일 접수, 2018년 6월 12일 수정, 2018년 6월 12일 채택)

Jeonghoon Lee*

School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education

(Received 8 June 2018, revised 12 June 2018, accepted 12 June 2018)

Abstract

Black carbon concentrations were measured along the altitude at various locations using a drone coupled with a small black carbon detector. The measurement locations are Eunseok Mountain, downtown, four places in KOREATECH campus, Byeongcheon, Cheonan, Chungcheongnam-do, and Chungbu Expressway in Ochang-eup, Cheongju, Chungcheongbuk-do. The average concentration of black carbon measured in Eunseok Mountain was $1.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and the average concentration near the Chungbu Expressway was measured to be $3.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$. The average concentrations of four places inside campus ranged from 1.37 to $2.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$. The concentration of black carbon at all places tended to be slightly decreased according to the altitude, but the influence of pollution source, geometry, wind speed, and wind direction are thought to be larger than the effect of altitude. Effect of air flow caused by drone flight on the measurement of black carbon were investigated and it resulted in that the measurement of BC concentration was affected by less than 5%.

Key words : Black carbon, Drone, Aethalometer

1. 서 론

다양한 발생원에서 배출된 미세먼지들이 인체 혹은 환경에 미치는 영향이 사회적으로 대두되면서 관련된 계측 모니터링의 중요성이 각광을 받고 있다. 대기 중 미세먼지에는 블랙카본이 포함되어 있다. 블랙카본의 대부분은 $1 \mu\text{m}$ 이하이기 때문에 블랙카본이 농후한 대기에서 숨을 들이켰을 경우 염증반응이 생기고 이는

호흡기 질병, 천식, 심혈관 질환, 폐 기능 저하, 지능지수 감소 등을 초래한다고 알려져 있다(Jansen *et al.*, 2005). 그리고, 블랙카본은 지구복사강제력에 영향을 주어 기후변화를 유발시킬 수도 있다. 1990년대부터 사람이 직접 측정을 할 수 없는 지역을 로봇이나 무인항공기를 통해서 오염물질 또는 악취를 측정하는 방법에 대한 연구가 진행되고 있다(Ishida *et al.*, 1997). 이러한 방식은 측정 시 위험을 최소화하며, 일반적인 방식으로 측정하기 힘든 위치에서의 특성을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 드론을 이용하여 해당 위치에서의

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)41-560-1151, E-mail : jlee@koreatech.ac.kr

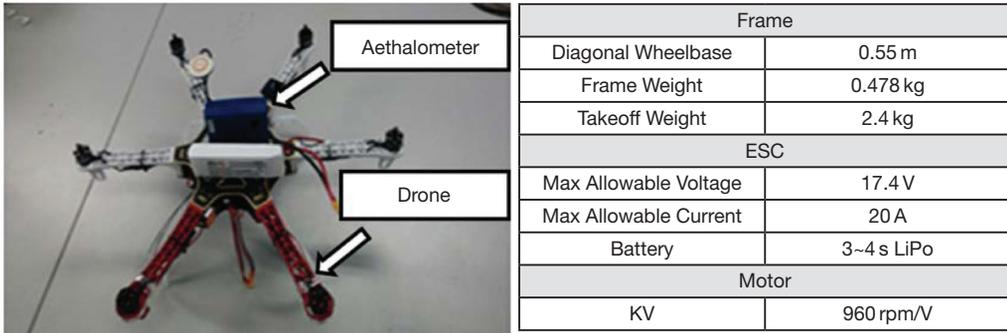


Fig. 1. Photo and specification of drone used in this study.

블랙카본 농도를 고도별로 측정하였고, 이에 따른 측정값을 선형화하여 분석하였다. 무인항공기를 통해 측정을 진행할 경우, 측정값에 영향을 주어 낮은 수치를 나타내는 경우가 보고된 바 있으며, 이를 보정해 줄 필요가 있다(Neumann *et al.*, 2013). 그러므로 같은 조건에서 측정 장치를 드론에 장착했을 경우와 그렇지 않은 경우의 블랙카본 측정값의 차이를 고찰하려고 한다.

2. 방 법

2.1 블랙카본 측정

블랙카본 측정기기로는 Aethalometer (AE51, Aeth-Labs, U.S.A)를 사용하였다. 측정시간이 길어짐에 따라 블랙카본의 필터 상으로의 축적에 따른 농도 감소 현상이 보고된 바가 있어, 측정 후 새로운 여과지로 교체하며 측정을 하였다(Jung *et al.*, 2011). 또한 드론을 사용하여 100 m 이상의 고도에서의 블랙카본 농도를 측정할 수 있도록 하였다. 그림 1은 측정에 사용된 드론의 사진과 사양이다. AE51과 배터리 등을 탑재한 드론의 전체 무게는 약 2 kg이며 해당 배터리 1개로 약 15분간 비행이 가능하다.

2.2 블랙카본 측정 위치

충청남도 천안에 위치한 은석산, 준 도심인 병천, 중부고속도로 주변, 한국기술교육대학교(KOREATECH) 교내 4개 장소에서 고도에 따른 블랙카본 농도를 측정하였다. 교내 4개의 장소는 기숙사 주변, 정문, 중앙공원, 서측경계로 하였다. 지면에서의 고도 및 측정 간격 등은 동일한 조건 하에서 수행하였다. 그림 2는 측정

위치를 보여준다. 드론을 각각의 위치에서 지면으로 부터 10 m를 기점으로 하여 수직방향 10 m 간격으로 상승시키며 블랙카본 농도를 측정하였다. 고속도로 주변, 준 도심은 고도 100 m까지 측정하였고 그 외 지역은 고도 120 m까지 측정하였다. 각 고도마다 6분씩 측정하였고 각각의 위치에서 고속도로 주변은 2일, 한국기술교육대학교캠퍼스 4 및 준 도심은 3일, 그 외 지역은 4일 동안 측정하였다. 고속도로 주변과 준 도심의 측정 시작시간은 17시로 하였고, 그 외 지역의 측정 시작시간은 21시로 하였다. 그리고 해당 지역의 풍향과 풍속은 기상청 자료를 이용하였다(<http://www.kma.go.kr>).

2.3 블랙카본 측정에 대한 드론의 영향

드론은 하방으로 기류를 생성시킴으로써 자체중량 이상의 양력을 획득한다. 그래서 드론 하면에는 강한 난류가 형성되어 공기의 혼합이 활발히 진행된다. 이로 인한 블랙카본 측정의 영향을 파악하기 위해 다음과 같은 측정을 수행하였다. 드론의 상부에 장착되어 있는 AE51을 이용하여 블랙카본의 농도를 측정할 경우와 드론을 작동시키지 않고 측정된 블랙카본의 농도 차이를 비교하였다.

본 측정은 높이 2.5 m, 가로 3 m, 세로 4 m인 실내 공간에서 수행되었다. 드론 작동 유무에 따른 블랙카본의 측정값 차이를 명확하게 관찰하기 위하여 공간 내에 양초 5개를 설치하여 블랙카본을 발생시켰다. 드론으로 인해 생기는 기류에 의해 양초가 꺼지지 않도록 드론과 비슷한 높이에 양초를 설치하였다. 측정 시간은 15분으로 동일하게 하였고 두 측정 모두 지면에서 0.5 m 떨어진 곳에 드론을 위치시켰다.

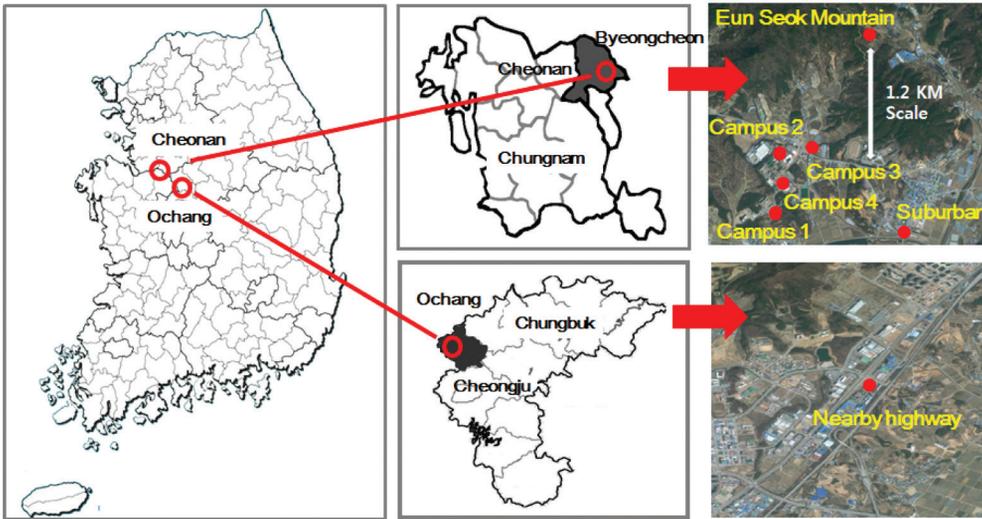


Fig. 2. Measurement locations including mountain, suburban, highway and campus.

3. 결과 및 고찰

3.1 산

충청남도 천안시 동남구 북면에 위치한 은석산의 해발 200m 지점에서 드론을 이용하여 고도에 따른 블랙카본을 측정하였다. 측정은 21시를 기점으로 시작하였다. 그림 3은 고도에 따른 블랙카본 농도 측정값을 보여준다. 블랙카본 측정값의 1차 함수 선형식은 $BC = 2.27 - 0.0115 \cdot \text{Altitude}$ 이고 평균 농도는 $1.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 측정을 실시한 2015년 11월 3일부터 6일까지의 천안시 동남구의 풍향은 각각 $180^\circ, 0^\circ, 180^\circ$ 그리고 110° 로 나타났으며 풍속은 각각 $1.1 \text{ m/s}, 0.3 \text{ m/s}, 1.3 \text{ m/s}$ 그리고 4.8 m/s 로 나타났다 (<http://www.kma.go.kr>). 광흡수계수를 이용해 블랙카본 농도를 측정하는 방법으로 유럽의 4개 지역에서 측정된 평균값은 $0.2 \sim 0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도였다 (USEPA, 2012). 이에 비해서 비교적 높은 측정값이지만 그림 2에서 보는 바와 같이 은석산은 자동차 도로로부터 1.2km 밖에 떨어져 있지 않은 것에 따른 결과로 보인다. 하지만 이 측정값은 본 연구에서 실시한 다른 지역에서 측정된 블랙카본 농도에 비해 낮은데, 이는 기온역전 현상에 따른 결과로 판단된다. 측정을 실시한 지역은 비도심지로 간주되고 비도심지에서는 기온역전 현상이 대략 일몰 한 시간 전부터 시작 된다 (DeMarrais, 1961). 기온역전 현상은

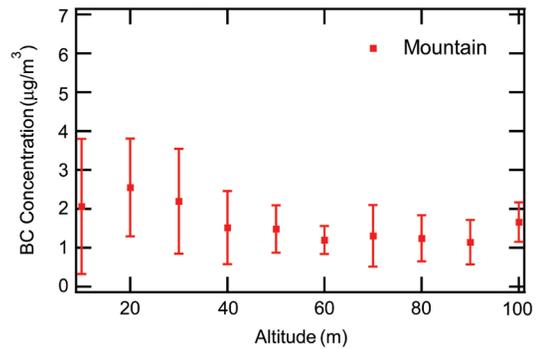


Fig. 3. BC concentration vs. altitude measured from mountain.

주로 춥고 안정한 상태의 저녁과 밤에 자주 발생한다 (Godowitch *et al.*, 1985). 또한 야간의 지표냉각으로 인해 형성되는 대기역전층은 약 200m로 낮게 형성 될 것으로 추측된다. 측정은 2015년 11월 3일부터 2015년 11월 6일까지 21시를 시작으로 23시까지 실시하였으며, 이때 천안시 동남구의 일몰 시간은 17시 33분이고 4일 동안 21시의 평균 기온은 10.4°C 로 해당 조건에서 기온역전 현상이 일어났을 가능성이 있다. 그러므로 기온역전 현상으로 인해 산 아래의 블랙카본이 정체되어 측정 위치인 산 중턱까지 이동하지 못한 것으로 판단된다.

3.2 고속도로 주변

청주시 오창읍에 위치한 중부고속도로 주변에서 드론을 이용해 고도에 따른 블랙카본을 측정하였다. 측정은 17시를 기점으로 시작하였다. 그림 4는 고도에 따른 블랙카본 농도 측정값을 나타낸다. 블랙카본 측정값의 1차 함수 선형식은 $BC = 4.56 - 0.0130 * \text{Altitude}$ 이고 평균 농도는 $3.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 측정을 실시한 2015년 10월 11일과 13일의 청주시 오창읍의 풍향은 각각 250° 그리고 290° 로 나타났으며 풍속은 각각 0.9 m/s 그리고 2.3 m/s 로 나타났다(<http://www.kma.go.kr>). 블랙카본은 주로 디젤차량 엔진에서 연료의 불완전연소에 의해 생성되는데 측정 장소는 다수의 공장이 위치한 지역이고 인근에 고속도로가 있기 때문에 유동차량이 많다. 따라서 다른 장소에 비해 높은 블랙카본 농도를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 하지만 중부고속도로와 측정 위치와의 거리가 20m 떨어져 있다는 점과 풍향이 측정 위치에서 중부고속도로 방향으로 불었다는 점을 고려해 볼 때 고속도로 중심에서는 더 높은 블랙카본 농도 값이 측정될 것이라고 판단된다. 즉, 평균농도 $3.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 은 해당 고속도로상의 블랙카본 농도의 하한값으로 간주할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 준 도심

준 도심인 충청남도 천안시 병천면에서 드론을 이용하여 고도에 따른 블랙카본을 측정하였다. 측정은 17시를 기점으로 시작하였다. 그림 5는 고도에 따른 블랙카본 농도 측정값을 보여준다. 블랙카본 측정값의 1차 함수 선형식은 $BC = 2.83 - 0.0139 * \text{Altitude}$ 이고 평균 농도는 $3.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 상대적으로 높은 농도로 측정되었다. 측정을 실시한 2015년 8월 4일부터 6일까지의 천안시 동남구의 풍향은 각각 180° , 270° 그리고 270° 로 나타났으며 풍속은 각각 1.4 m/s , 1.6 m/s 그리고 1.4 m/s 로 나타났다(<http://www.kma.go.kr>). 측정 위치와 21번 국도가 190m 밖에 떨어져 있지 않아 많은 유동차량에 의해 높은 블랙카본 농도가 측정된 것으로 보인다. 후술하겠지만, 정문(한국기술교육대학교캠퍼스 3)에서 비가오지 않은 날과 비교했을 때 준 도심에서의 차량유동이 더욱 많음에도 불구하고 블랙카본 농도 측정값은 낮게 나타났다. 준 도심에서 측정을 실시하였을 때의 평균기온이 26.5°C 이고, 정문(교내 3)의 비가오지 않은 날의 평균기온은 13.4°C 이었다. 여름철

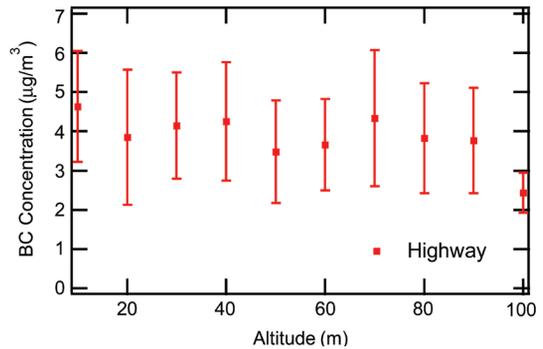


Fig. 4. BC concentration vs. altitude measured near highway.

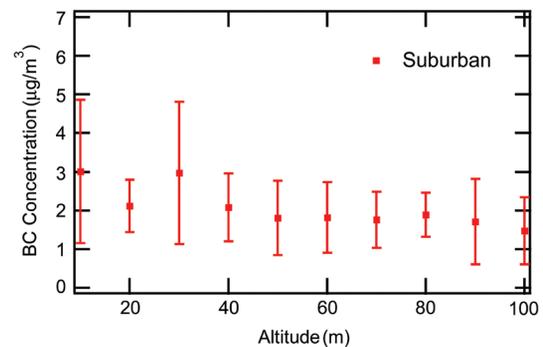


Fig. 5. BC concentration vs. altitude measured at suburban.

블랙카본의 농도는 겨울철 블랙카본의 농도보다 낮게 측정되는데 (Lee et al., 2010), 본 연구에서도 이러한 현상이 확인되었다.

3.4 한국기술교육대학교캠퍼스 내

그림 6(a)는 충청남도 천안시 병천면에 위치한 한국기술교육대학교 기숙사 인근(한국기술교육대학교캠퍼스 1)에서 드론을 이용하여 고도에 따른 블랙카본을 나타낸 것이다. 측정은 21시를 기점으로 시작하였다. 기숙사 인근(한국기술교육대학교캠퍼스 1)의 블랙카본 측정값의 1차 함수 선형식은 $BC = 3.54 - 0.0134 * \text{Altitude}$ 이고 평균 농도는 $2.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 측정을 실시한 2015년 9월 21일부터 24일까지의 천안시 동남구의 풍향은 각각 160° , 160° , 160° 그리고 180° 로 나타났으며 풍속은 각각 1.0 m/s , 1.3 m/s , 1.7 m/s 그리

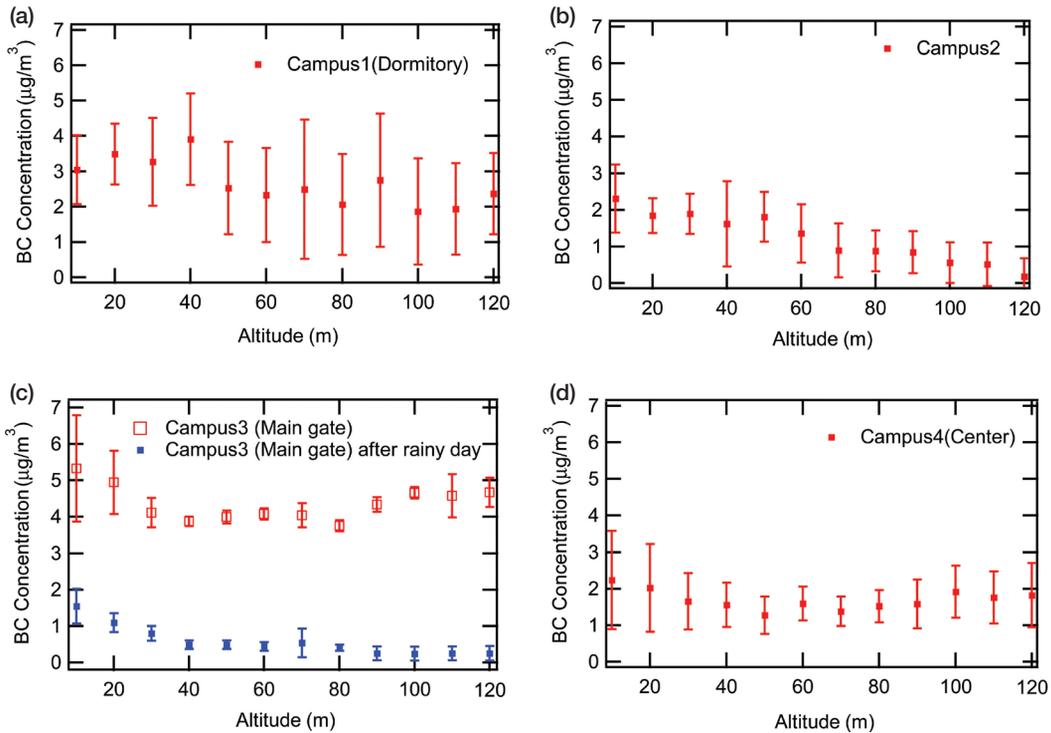


Fig. 6. BC concentration vs. altitude measured (a) near dormitory (b) on campus at west (c) near main gate (d) at the center of campus.

고 1.6 m/로 나타났다(<http://www.kma.go.kr>). 기숙사 인근(한국기술교육대학교캠퍼스 1)의 블랙카본 농도는 차량 통행이 다소 적은 지역임에도 불구하고 비교적 높은 측정값을 나타내고 있다. 이는 인근공장과 도로에서 통행하는 차량으로부터 발생된 매연의 영향으로 판단된다. 기숙사를 기준으로 160°와 180°를 방향으로 1.5 km 이내에 자동차 브레이크 패드 생산 공장과, 21번 국도, 639번 지방도로의 교차지점이 있다. 교차지점과 공장으로부터 불어오는 바람이 기숙사 주변의 블랙카본 농도 측정값에 영향을 미친 것으로 판단된다.

그림 6(b)는 충청남도 천안시 병천면에 위치한 한국기술교육대학교 서측경계(한국기술교육대학교캠퍼스 2)에서 드론을 이용하여 고도에 따른 블랙카본을 나타낸 것이다. 측정은 21시를 기점으로 시작하였다. 서측경계(한국기술교육대학교캠퍼스 2)의 블랙카본 측정값의 1차 함수 선형식은 $BC = 2.37 - 0.0167 * \text{Altitude}$ 이고 평균 농도는 $1.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 측정을 실시

한 2015년 10월 5일부터 8일까지 천안시 동남구의 풍향은 각각 0°, 180°, 180° 그리고 250°로 나타났으며 풍속은 각각 0.1 m/s, 1.1 m/s, 1.5 m/s 그리고 1.2 m/s로 나타났다(<http://www.kma.go.kr>). 측정 위치를 기준으로 이들 풍향의 공통점은 모두 100 m 이상의 산을 거쳐 측정 위치로 불어온다는 것이다. 그러므로 측정 위치는 풍하측이 되고, 풍하측에는 바람이 경사지의 정상을 넘으면서 산을 거치기 전 풍속보다 빨라진다. 이러한 이유로 산을 넘어온 바람의 풍속이 빨라져 천안시의 평균 풍속보다 측정 위치의 풍속이 높을 것으로 예상된다. 이에 따라 공기의 혼합이 활발하여 블랙카본 농도 측정값이 낮게 나타났다고 판단된다.

그림 6(c)는 충청남도 천안시 병천면에 위치한 한국기술교육대학교 정문(한국기술교육대학교캠퍼스 3)에서 드론을 이용하여 고도에 따른 블랙카본을 나타낸 것이다. 측정은 21시를 기점으로 시작하였다. 정문(한국기술교육대학교캠퍼스 3)에서는 2015년 10월 28일, 29일, 11월 2일 그리고 11월 10일에 측정하였다. 2015

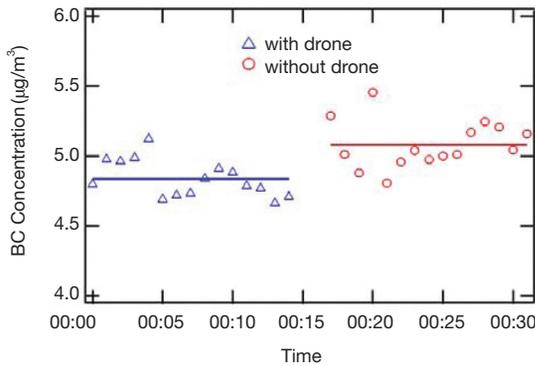


Fig. 7. Effect of drone operation on BC measurement.

년 10월 28일과 29일에 측정한 블랙카본 농도 측정값과, 2015년 11월 2일과 11월 10일에 측정한 값이 큰 차이를 보였다. 2015년 10월 28일과 29일에 측정된 평균농도는 0.56 µg/m³로 나타났고, 2015년 11월 2일과 11월 10일에 측정된 평균농도는 4.35 µg/m³로 나타났다. 측정값이 차이를 보인 이유를 분석해본 결과 측정 전날인 2015년 10월 27일에 평균 강수량 17.5 mm의 비가 내렸으며, 2015년 11월 2일과 11월 10일 전날에는 비가 오지 않았다. 비가 온 다음날에는 블랙카본의 농도 측정값이 낮은 것은 강수에 의한 씻김현상 때문인 것이라고 판단된다. 또한 비가 오지 않은 날의 블랙카본 측정값이 4.45 µg/m³로 상대적으로 다른 값에 비해 높은 것을 확인할 수 있다. 또한 측정의 최대 높이는 120 m 이고 야간의 지표냉각으로 인해 형성되는 대기역전층은 약 200 m로 형성 된다는 점을 고려하였을 때 측정 고도 내에서 기온역전 현상이 일어났다고 판단된다. 기온역전 현상이 일어나 대기의 안정으로 대류 작용이 약화되고 지표면에서 발생한 블랙카본이 정체되어 블랙카본의 농도가 높게 측정되고 표준편차도 작게 나타났다. 또한 비가 오지 않은 다음날 실시한 2015년 11월 2일과 11월 10일의 천안시 동남구의 풍향은 모두 0°이었고 풍속은 각각 0.2 m/s 그리고 0.4 m/s 이었다(http://www.kma.go.kr). 이와 같이 풍속은 매우 느린 것으로 나타나 바람의 영향은 적게 받은 것으로 판단된다.

그림 6(d)는 충청남도 천안시 병천면에 위치한 한국기술교육대학교 중앙공원(한국기술교육대학교캠퍼스 4)에서 드론을 이용하여 고도에 따른 블랙카본을 나타

낸 것이다. 측정은 21시를 기점으로 시작하였다. 블랙카본 측정값의 1차 함수 선형식은 $BC = 1.79 - 0.0015 * \text{Altitude}$ 이고 평균 농도는 1.67 µg/m³로 나타났다. 측정을 실시한 2015년 9월 19일, 30일 그리고 10월 3일 21시의 천안시 동남구의 풍향은 각각 270°, 140° 그리고 250°으로 나타났으며 풍속은 각각 0.7 m/s, 1.2 m/s 그리고 0.9 m/s로 나타났다(http://www.kma.go.kr). 모두 100 m 이상의 산을 거쳐 측정 위치로 공기가 이동한다. 그러므로 측정 위치가 풍하측이 되어 측정 위치의 풍속이 천안시의 평균풍속보다 빠를 것으로 예상된다. 이에 따라 공기의 혼합이 잘 이루어지고 결국 낮은 블랙카본 농도 측정값을 나타낸 것으로 추정된다.

3.5 드론에 의한 기류 및 측정값에 대한 영향

드론 작동 중 Aethalometer를 이용하여 측정한 블랙카본 농도와 드론을 작동하지 않고 측정한 농도를 관찰 하였다. 블랙카본 농도를 1분 단위로 측정하여 각각 15분간의 데이터를 수집하였다. 동일한 측정 조건을 위해 측정 기간 동안 측정기기의 높이는 모두 동일하게 유지하였다. 그림 7에 나타낸 바와 같이 드론을 작동하지 않은 경우 블랙카본 농도의 평균값은 5.1 µg/m³ 이고, 드론 작동 중에 측정된 블랙카본의 농도는 평균 4.9 µg/m³로 나타났다. 드론을 이용하여 CO₂의 농도를 측정한 사례에서는 드론을 사용하여 CO₂ 농도를 측정할 경우 약 0.2~0.5% 가량 낮게 측정된다고 하였다(Neumann et al., 2013). 하지만 본 측정의 블랙카본 농도 측정값은 드론을 사용하였을 경우 대략 4% 낮게 측정되었으므로, 기체상 오염물질 측정보다 입상 오염물질 측정이 더 큰 영향을 받는 것으로 판단된다. 드론 등 배터리로 구동되는 이동형 비행체에 측정센서 및 장치를 탑재하여 오염물질을 측정하는 실험의 경우 배터리 성능에 의해 측정 가능 시간이 지배를 받게 된다. 배터리 용량이 클수록 장시간 측정을 할 수 있을 것으로 생각할 수 있으나 배터리 용량이 커지면 하중이 증가하여 이동형 비행체의 비행시간이 짧아진다. 따라서 큰 배터리를 장착한다고 무작정 비행시간이 길어지는 것은 아니다. 따라서, 배터리 구동 이동형 비행체를 활용하여 대기 오염물질을 측정할 때에는 측정 시간이 매우 짧아 대기환경 연구에 활용하기에는 제한적일 수 있음을 고려해야 한다.

4. 결 론

드론을 사용하여 고도에 따른 블랙카본 농도 측정값의 추이를 관찰하였다. 고도와 블랙카본 농도 측정값의 상관관계를 도출하기 위해 다양한 위치에서 측정값을 이용해 1차 선형화하였다. 모든 측정 위치에서 해발 100m까지 고도에 따른 블랙카본 농도는 감소하는 경향을 보였지만 그 감소량은 10 m 고도상승 하는 동안 $0.12\sim 0.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타나 측정한계인 $\pm 0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 근접한 결과를 보였다. 오히려 공장 등과 같은 고정 오염원, 이동 차량과 같은 이동 오염원, 지형, 풍속 그리고 풍향 등에 따라 블랙카본 농도 측정값이 측정고도보다 더 많은 영향을 받는 것으로 판단된다. 향후 측정에서는 고도 차이를 더 크게 하고, 최대높이를 증가시켜 보다 뚜렷한 감소 경향을 관찰 할 필요가 있겠다. 동일한 조건의 측정에서 드론을 이용하여 측정한 경우 블랙카본의 농도는 $4.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 그렇지 않은 경우는 $5.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 라는 근소한 차이를 보였다. 즉, 입자상 오염물질 측정이 기체상 오염물질 측정보다는 드론의 영향을 더 많이 받는 것으로 판단된다.

감사의 글

데이터를 수집한 Mrs. Kim, KJ, Yun, JS, Cha, YB, Kyung, HH, Kim, JH, Park, SK 그리고 Ms. Lim, JK께 감사드립니다. 본 연구는 한국기술교육대학교 교육연구진흥비의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

References

DeMarrais, G. (1961) Vertical Temperature Difference Obs-

erved over an Urban Area, Bulletin of the American Meteorological Society, 42(8), 548-554.

Godowitch, J.M., Ching, J.K., Clarke, J.F. (1985) Evolution of the Nocturnal Inversion Layer at an Urban and Nonurban Location, Journal of Climate and Applied Meteorology, 24(8), 791-804.

Ishida, H., Nakamoto, T., Moriizumi, T. (1997) Remote sensing and localization of gas/odor source and distribution using mobile sensing system, in Proceedings of the International Conference on Solid state Sensors and Actuators, 1, 559-562.

Jansen, K.L., Larson, T.V., Koenig, J.Q., Mar, T.F., Fields, C., Stewart, J., Lippmann, M. (2005) Associations between Health Effects and Particulate Matter and Black Carbon in Subjects with Respiratory Disease, Environmental Health Perspectives, 113(12), 1741-1746.

Jung, J.H., Park, S.S., Yoon, K.H., Cho, S.Y., Kim, S.J. (2011) Inter-comparison of Two Aethalometers for Aerosol Black Carbon Measurements, Journal of Korea Society For Atmospheric Environment, 27(2), 201-208. (in Korean with English abstract)

Lee, K.W., Han, S.C., Lee, J. (2010) Measurement of Black Carbon Concentration in Rural Area, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, 38 (1), 17-24. (in Korean with English abstract)

Neumann, P.P., Asadi, S., Hernandez Bennets, V., Lilienthal, A.J., Barthilmai, M. (2013) Monitoring of CCS Areas using Micro Unmanned Aerial Vehicles (MUAVs), Energy Procedia, 63, 4937-4964.

United States Environmental Protection Agency (US EPA) Department of the Interior Environment, and Related Agencies Appropriations Act, 2010 (2012) Report to Congress on Black Carbon, Washington D.C., USA, 115-137.