

TECHNICAL NOTE

드론을 활용한 IoT기반의 소형센서 관측시스템 개발 가능성에 대한 소고

안요섭 · 문종섭^{1)*} · 김백조²⁾ · 이우균³⁾ · 차성은³⁾

고려대학교 환경 GIS/RS센터, ¹⁾고려대학교 전자정보공학과, ²⁾국립기상과학원 응용기상연구과,
³⁾고려대학교 환경생태공학과

A Study on Development of Small Sensor Observation System Based on IoT Using Drone

Yoseop Ahn, Jongsub Moon^{1)*}, Baek-Jo Kim²⁾, Woo-Kyun Lee³⁾, Sungeun Cha³⁾

Environmental GIS/RS center, Korea University, Seoul 02841, Korea

¹⁾*Department of Electronics & Information Engineering, Korea University, Sejong 30019, Korea*

²⁾*Applied Meteorology Research Laboratory, National Institute of Meteorological Research, Jeju 63568, Korea*

³⁾*Division of Environmental Science & Ecological Engineering, Seoul 02841, Korea*

Abstract

We developed a small sensor observation system (SSOS) at a relatively low cost to observe the atmospheric boundary layer. The accuracy of the SSOS sensor was compared with that of the automatic weather system (AWS) and meteorological tower at the Korea Meteorological Administration (KMA). Comparisons between SSOS sensors and KMA sensors were carried out by dividing into ground and lower atmosphere. As a result of comparing the raw data of the SSOS sensor with the raw data of AWS and the observation tower by applying the root-mean-square-error to the error, the corresponding values were within the error tolerance range (KMA meteorological reference point: humidity $\pm 5\%$, atmospheric pressure ± 0.5 hPa, temperature $\pm 0.5^\circ\text{C}$). In the case of humidity, even if the altitude changed, it tends to be underestimated. In the case of temperature, when the altitude rose to 40 m above the ground, the value changed from underestimation to overestimation. However, it can be confirmed that the errors are within the KMA's permissible range after correction.

Key words : SSOS system, Drone, Method of least squares

1. 서론

기상관측(氣象觀測)이란 대기 중의 기온, 기압 등의 기상 요소를 측정하고 강수, 구름 등 기상 현상을 관측하는 것을 말한다. 대기는 고도에 따라서 다양한 상태를

나타내는데, 그 중에서 대기경계층은 특별히 인간의 활동에 많은 영향을 미친다. 대기경계층(Atmospheric Boundary Layer)이란 지면을 둘러싸고 있는 대기층에서 지면의 영향을 직접 받는 층으로 지면으로부터 약 1km 이내를 의미한다. 이러한 대기경계층 고도는 시간,

Received 26 April, 2018; Revised 13 September, 2018;

Accepted 13 September, 2018

*Corresponding author: Jongsub Moon, Department of Electronics & Information Engineering, Korea University, Sejong 30019, Korea
Phone: +82-44-860-1423
E-mail: jsmoon@korea.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© 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.

계절, 기상 상태, 지형, 그리고 지면 거칠기 등에 따라 다르게 나타나지만(Stull, R. B., 1988) 일반적으로 50~2500 m 사이에서 형성되며(Eresmaa et al., 2006) 최대 고도는 10시에서 14시 사이에 나타난다(Dreck and Ian, 2010).

대기경계층을 포함한 대기관측에 라디오존데, 기상타워, 또는 원격관측 장비 등이 이용되고 있다. 자동기상관측장비와 같은 경우에는 특정 지점의 정확한 기온, 습도, 기압 등을 관측할 수 있는 고정형 기상관측장비이다. 이는 특정 지점의 대기상태 변화를 관찰하는데 유용하지만 이외 지점의 대기상태는 관측이 불가능하다. 그리고 라디오존데와 드롭존데 같은 경우 정확한 기온, 바람의 연직 분포 관측을 통해 대기경계층 분석에 유용하다. 하지만 라디오존데, 드롭존데의 사용이 보통 1회성으로 제한된다는 점을 생각해봤을 때, 추가적인 관측 비용이 들어가게 된다. 또한 대기의 연직분포 관측이라는 점에서 볼 때 여러 지점의 대기관측을 위해서는 각 지점마다 관측을 추가로 실시하여야 한다. 따라서 기상 관측값의 신뢰성 향상을 위해서는 미세규모적인 부분까지 관측범위를 늘릴 수 있어야 한다. 이와 관련해서 최근에는 비교적 저렴한 유지비용으로 장기간 지속적인 관측이 가능 할 뿐만 아니라, 국지적 기상변화 속에서도 관측수행이 가능한 드론을 활용한 관측 및 연구가 활발히 진행되고 있다.

드론을 활용한 기상관측시스템에 관한 선행연구로는 미국 항공우주국(NASA)에서 소형 무인기인 GlobalHawk

를 사용하여 허리케인 관측을 하였으며, 해안 감시 연구 또한 이루어졌다(Brouwer et al., 2015). 또한 2000년 중반 Scripps Oceanography의 연구원이 무인항공기를 사용하여 인도양의 대기 오염을 연구하고 지구온난화의 원인에 대하여 2007년 Nature지에 발표한 사례가 있다(Veerabhadran et al., 2007). 그리고 기상관측에 드론을 사용하게 되면 대기하층, 안개, 해안, 산악 등 기존에 관측이 어려웠던 부분을 더욱 경제적으로 관측할 수 있다. 특히, 우리나라는 산악지역이 많아 상대적으로 기상관측 사각지역이 발생할 수밖에 없는데 드론을 사용하게 되면 이러한 관측 사각지역 해소에 많은 영향을 주게 된다. 아울러 대기환경 측정망의 분포도를 살펴봤을 때, 서울 및 수도권지역은 기상관측 측정망 분포도가 높지만 교외지역일수록 낮아진다(Korea Environment Corporation, 2017). 따라서 드론을 활용하여 관측밀도가 낮은 지역이 발생하는 부분을 해결하고 대기측정 정확도를 높일 수 있다.

본 연구에서는 소형센서를 활용한 대기관측시스템을 제안하고 해당 시스템을 드론에 장착하여 대기 관측시 대기측정값들의 신뢰도에 대하여 조사하였다. 기상청의 AWS와 기상 타워에서 측정한 관측값과 비교하여 대기 관측시스템의 측정값이 기상청의 측기 검정 기준 이내에 들어가는지를 확인하였다. 그리고 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error; RMSE)를 활용하여 기상청 센서와 드론 센서간의 측정값의 오차를 줄였다.

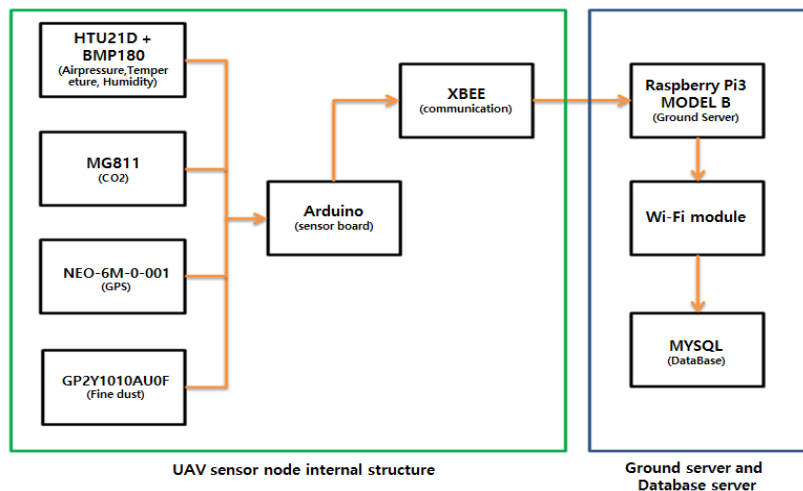


Fig. 1. Chart for data flow.

Table 1. Name and usage of Equipment

Equipment name	Usage
HTU21D + BMP180	Temperature, humidity, air pressure
MG811	CO2
NEO-6M-0-001	GPS
GP2Y1010AU0F	Particulate Matter
XBee	Communications
Arduino Nano	Sensor Node

2. 관측시스템 개발 및 검증

2.1. 시스템 설계 및 구축

Fig. 1은 데이터의 전체 흐름도를 나타낸 것이다.

2.2. 센서노드

Table 1은 SSOS (Small Sensor Observation System)를 구성하는 센서들을 나타내고 있다. 이러한 센서들을 활용하여 SSOS (Small Sensor Observation System)를 구성하였고 센서노드로 활용한다.

기상측정시 CO₂ 센서는 데이터의 변동폭이 심하고, 미세먼지센서는 PM₁₀(0.1 mg/m³ 이하)의 농도를 측정하기에는 박스내부의 먼지량과 외부와의 차이를 판별하기 어려워 본 연구에서는 습도, 기압, 온도의 정확도에 대하여만 판별하였다. Fig. 2는 제작된 SSOS 구성 센서노드를 나타내며, 센서노드에 나와있는 습도, 기압, 온도 측정 센서를 통하여 대기의 상태를 판별하였다. 환기팬은 따로 부착하지 않았으며 미세먼지 센서 아래에 만들어 놓은 공기 통로를 통하여 외부의 공기가 센서노드 안으로 유입된다.

본 연구에서는 Fig. 2의 센서노드를 드론에 장착한 뒤 이를 활용한 기상측정방법과 데이터의 송수신, 그리고 Database로 저장하는 과정을 제시하였다. 또한 드론의 추력풍으로부터 센서가 영향을 받지 않기 위하여 센서를 드론에서 일정거리만큼 이격시켜 달아 센서노드로부터 나오는 정보들을 지상수신서버로 전송시켰다.



Fig. 2. SSOS sensor node.

Table 2는 한국기상산업기술원의 센서의 정확도와 SSOS센서의 정확도를 비교한 것을 나타낸 것이다. 본

Table 2. Sensor verification from Korea Meteorological Institute

Temperature		Humidity		Air Pressure	
Criteria(°C)	Measure(°C)	Criteria(%)	Measure(%)	Criteria(hPa)	Measure(hPa)
60	60.2	30	30	800	800.2
30	30.0			850	850.1
0	0.1	60	58	900	900.0
-20	-19.9			950	950.0
-40	-40.0			980	980.0
		90	85	1010	1009.9
				1040	1039.9

Table 3. Sensor accuracy of Korea Meteorological Institute and SSOS sensor system

Weather sensor	Korea Meteorological Institute		SSOS sensor	
	Company / Sensor name	Accuracy	Company / Sensor name	Accuracy
Temperature sensor	ASL/ PRECISION THERMOMETER	± 0.005 °C	CJMCU/ HTU21D	± 0.3 °C
Humidity sensor	EDGE TECH/ HYGROMETER	$\pm 0.5\%$ RH	CJMCU/ HTU21D	$\pm 2\%$ RH
Air pressure sensor	WIKA/ DIGITAL PRESSURE GAUGE	$\pm 0.05\%$ FS	CJMCU/ BMP180	± 0.12 hPa

연구에 사용된 습도, 기압, 온도 센서의 변화를 한국기상산업기술원의 센서검정실에서 판단하였다.

한국기상산업기술원에서 측정시 습도는 3%, 기온은 0.3 °C, 기압은 0.5 hPa를 넘어서면 불합격판정이 난다. 검정결과 기온, 기압은 통과하였으나, 아래의 Fig. 3과 같이 습도센서는 허용오차를 초과하는 경우가 있었다. 습도센서는 상대습도가 20 - 80%에서는 오차가 일정하지만 80%이상일 경우 그 오차가 증가하였다. 따라서 기상센서 검정에서 90%이상의 측정오차를 제외한다면, 20 - 80%의 습도 이내에서는 센서의 오차율이 검정기준 이내이므로 해당 범위 내에서 센서를 신뢰할 수 있는 것으로 판단된다.

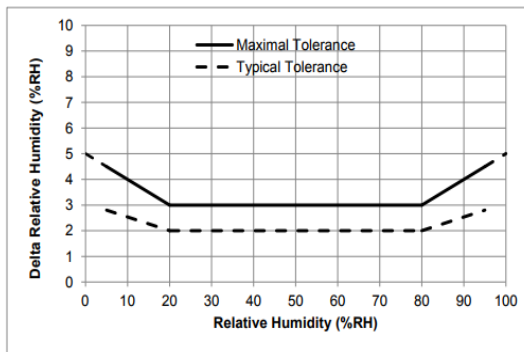
**Fig. 3.** Relative humidity tolerance of HTU21D.

Table 3은 SSOS 센서와 기상청 센서의 정확도를 나타내었다.

2.3. 지상수신서버

지상수신서버로는 라즈베리파이(Raspberry Pi)를 선택했으며, 내부 Micro SD카드를 저장공간으로 이용하

였다. 또한 해당 지상수신서버로부터 받은 데이터들을 MySQL (My Structured Query Language)서버로 연동하여 실시간으로 확인이 가능하도록 하였다. 센서노드와 지상수신서버와의 데이터의 교환은 XBee통신을 통하여 이루어진다. 센서노드측 데이터의 마스크 처리를 통해 데이터가 어떤 센서노드로부터 왔는지 알 수 있게 하여 데이터의 혼선을 방지하였다. 받은 데이터들은 일정 단위시간 간격으로 지상수신서버의 내부에 파일 형태로 저장된다.

2.4. Database

Database는 오픈소스형 관계형 데이터베이스 관리 시스템인 MYSQL을 사용하였다. 지상수신서버에서 Database로의 데이터를 전송할 때, 먼저 Database 내부 항목을 센서노드 개수만큼 만들었으며, 해당 항목의 내부내용들은 센서노드에서 들어오는 온도, 습도, 기압 등을 저장할 수 있도록 2차 구성되었다. 센서노드에서 들어오는 이러한 대기정보들은 들어온 날짜와 함께 단위 시간(분)에 따라 저장된다.

3. 결 과

3.1. 지상 AWS 관측검증

기압과 습도를 비교 검증하기 위하여 9월 26일 ‘부산광역시 중구 대청동 1가’의 AWS장비와 비교하였으며 약 4시간에 걸쳐 측정하였다. 기온은 11월 10일 ‘부산 금정구 두구동 스포원 파크’에 있는 AWS에서 온도 데이터만 측정하였으며 약 2시간에 걸쳐 측정하였다. 데이터는 기상청 관측장비(KMA)가 측정하는 방식인 1분 단위로 평균을 내어 비교하였다. 표본의 개수가 30개 이상의 규모가 큰 단순 무작위 표본을 사용한다면 중심극한정리에



Fig. 4. Ground AWS measurement and SSOS sensors measurement at the same height.

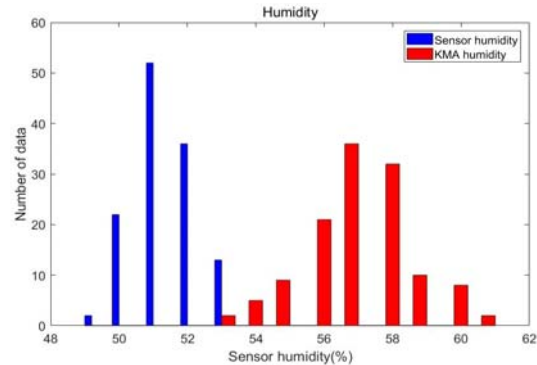


Fig. 5. Comparison of ground AWS and SSOS humidity sensor.

의해 표본평균의 분포는 정규분포에 근사하게 된다. AWS에서 측정된 데이터들은 1초 단위의 데이터들을 1분 단위로 평균을 낸 값들이다. AWS와 비교하기 위하여 SSOS센서 데이터를 약 2시간에 걸쳐 120개 이상의 데이터를 뽑아냈다. 따라서 해당 분포는 측정 표본이 30개 이상이므로 정규분포에 근사한다고 할 수 있다. 아래의 Fig. 4는 기상청의 온도와 습도를 측정하는 간이 백엽상과 SSOS센서를 동일한 높이에서 측정하는 모습을 나타내며, 해당 위치에서 습도, 기압, 온도를 측정한다. 센서는 CJMCU-HTU21D를 습도 및 온도 센서로, BMP180를 기압센서로 사용하였다. 수집한 온도, 습도, 기압데이터에 귀무가설을 세운 후 최소자승법(RMSE)을 통해 그래프의 오차를 수정하였다.

귀무가설(H_0)이란 관습적이고 ‘보수적인 주장’, ‘차이가 없다’, ‘0이다’ 등의 기존 주장을 의미한다. 그와 반대로 대립가설(H_1)이란 우리가 적극적으로 입증하려는 주장, 차이가 있음을 통계적 근거를 통해 입증하고자 하는 주장을 말한다. 유의수준이란 오류를 허용할 범위를 말하며, 유의확률(p-value)이란 대립가설일 틀릴 확률을 말한다. 유의확률이 유의수준보다 작으면 해당 귀무가설을 기각(타파)할 수 있으며 주장하고자 하는 대립가설을 채택할 수 있다. p-value가 0.05보다 작은 경우 두 집단의 통계량은 귀무가설(H_0)을 거절한다고 볼 수 있다.

최소자승법(Least Square Method)은 모델의 파라미터를 구하기 위한 대표적인 방법 중 하나로 모델과 데이터와의 (잔차)²의 합 또는 평균을 최소화하도록 파라미터를 결정하는 방법이다. 잔차 오차는 어떤 데이터가 추정

된 모델로부터 얼마나 떨어진 값인가를 나타내는 용어이다. 즉, 측정된 데이터가 (x_i, y_i) 라고 했을 때 잔차 오차는 $r_i = y_i - f(x_i)$ 가 된다. 여기서 y_i 는 관측된 값이고 $f(x_i)$ 는 추정된 모델에 따른 값이다. 아래에서는 습도, 기압, 온도에 대한 귀무가설과 그에 대한 판단을 하려고 한다.

첫번째로 기상청 습도 센서와 SSOS 습도 센서를 서로 비교하였다. μ 는 습도를 나타내며 한쪽 귀무가설을 나타낸다. H_0 는 $\mu < \mu_0$ 를 나타내며, H_1 는 H_0 이 아닌 부분을 나타내고 있다. 기상청 센서와 SSOS센서의 습도 측정값을 비교시 평균값은 각각 57.17%, 51.25%로 나왔고, 분산은 2.464, 0.789로 나왔다. 해당 귀무가설의 기각을 판단하는 p-value값은 단측으로 4.37E-90로 측정되었고, 분산에 대한 p-value는 3.03E-102로 측정되었다. 즉, 서로의 값이 다르다고 판단이 되므로 보정을 통해서 그 오차를 줄여야 한다.

Fig. 5는 9월 26일 SSOS센서로 측정한 습도값과 기상청에서 측정한 습도값을 비교한 것을 나타낸 것이다. SSOS센서는 과소추정되었으며 잔차는 (+)가 되었다. SSOS 센서 평균값과 기상청 평균값의 차이인 편차(+5.92%)만큼 x축으로 이동시켜 RMSE (Root Mean Square Error)를 구하여 살펴본 결과 1.629%로 나타나 오차허용범위(기상청 기상측기 현지 검정기준: 습도 $\pm 5\%$, 기압 ± 0.5 hPa, 온도 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 이내) 내에 있었다.

Fig. 6은 SSOS센서의 데이터(독립변수)와 기상청 측정값(종속변수)의 상관관계를 나타낸 것이다. 해당값들을 (x, y) 로 그래프에 표시하고 최소자승법을 적용시켜

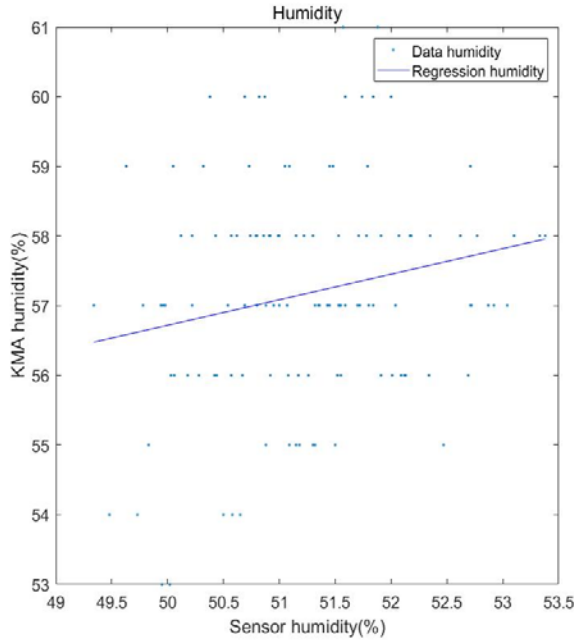


Fig. 6. Method of least squares of ground AWS and SSOS humidity sensor.

선형그래프로 표현한다. Fig. 5의 데이터들을 기반으로 x축은 SSOS에서 측정된 습도 데이터를 나타내고 있으며, y축은 기상청의 습도 센서 측정값을 나타내고 있다.

회귀 결과, $y = 0.3671 * x + 38.3600$ 이 도출되었다.

Fig. 7는 해당 그래프의 잔차 빈도 함수를 나타낸 것이다.

이 잔차들의 합에 대한 평균을 내어본 결과 잔차 평균이 0으로 귀결되었다. 즉, 보정된 데이터는 기상청 관측 자료와 잘 일치함을 보인다.

두 번째로 기상청 기압센서와 SSOS 기압 센서를 서로 비교하였다. 기상청 센서와 SSOS센서의 기압 측정값을 비교시 평균값은 각각 1013.33 hPa, 1007.13 hPa로 나왔고, 분산은 0.399, 0.424로 나왔다. 해당 귀무가설의 기각을 판단하는 p-value값은 단측으로 1.31E-174로 측정된다. 또한, 분산에 대한 p-value는 2.62E-174로 나타났다. 즉, 서로의 값이 다르다고 판단이 되므로 보정을 통해서 그 오차를 줄여야 한다.

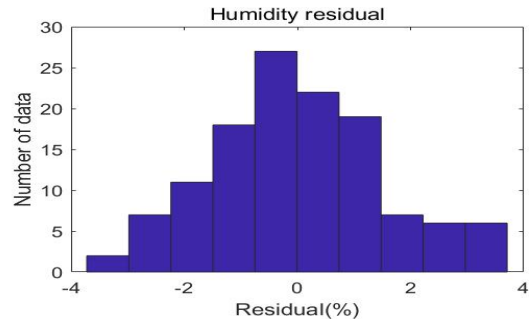


Fig. 7. Humidity residual frequency.

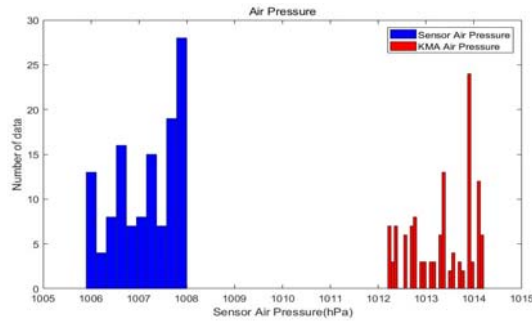


Fig. 8. Comparison of ground AWS and SSOS air pressure sensor.

Fig. 8은 9월 26일 SSOS 측정 기압값과 기상청 측정 기압값을 비교하였다. SSOS센서 측정값이 기상청 기준치보다 과소추정 되었으며 잔차는 (+)가 되었다. 습도와 마찬가지로 평균값에 대한 편차(+6.2 hPa)에 대해 RMSE를 살펴본 결과 0.056 hPa으로 나타나 오차허용범위 안에 있었다.

Fig. 9는 SSOS 측정 기압 데이터와 기상청 측정 기압 데이터의 상관관계를 나타낸 것이다. 해당값들을 (x,y)로 그래프에 표시하고 최소자승법을 적용하였다. Fig. 8의 데이터들을 기반으로 x축은 SSOS 기압 데이터를 나타내고 있으며, y축은 기상청 측정 기압 데이터를 나타내고 있다.

회귀 결과, $y = 0.9686 * x + 37.8354$ 이 도출되었다.

Fig. 10은 잔차의 빈도 함수를 나타낸 것이다.

이 잔차들의 합에 대한 평균을 내어본 결과 잔차 평균이 0으로 귀결되었다. 즉, 보정된 데이터는 기상청 자료와 잘 일치함을 보인다.

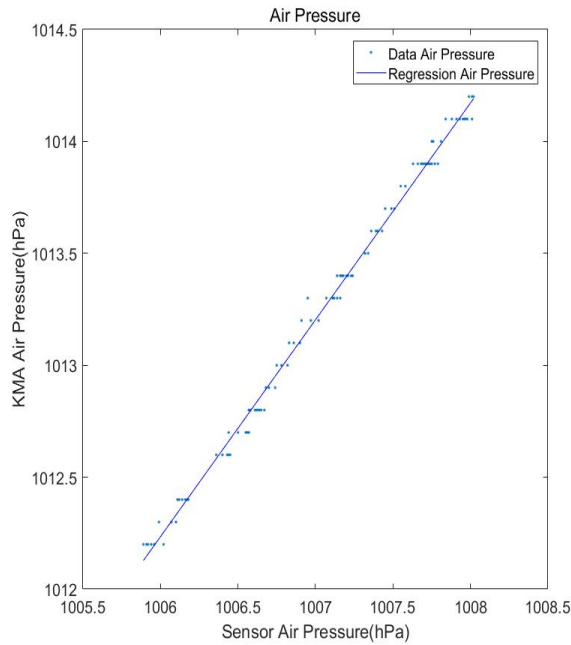


Fig. 9. Method of least squares of ground AWS and SSOS air pressure sensor.

마지막으로 기상청 온도 센서와 SSOS 온도 센서를 서로 비교하였다. 기상청 센서와 SSOS센서의 온도 측정값을 비교시 평균값은 각각 6.78℃, 5.46℃로 나왔고, 분산은 0.043, 0.046으로 나왔다. 해당 귀무가설의 기각을 판단하는 p-value값은 단측으로 5.21E-93로 측정되며, 분산에 대한 p-value는 1.04E-92으로 나타났다. 즉, 서로의 값이 다르다고 판단이 되므로 보정을 통해서 그 오차를 줄여야 한다.

Fig. 11는 11월 10일 SSOS 측정 온도값과 기상청 측정 온도값을 비교한 것을 나타낸 것이다. SSOS센서 측정값이 기상청 기준치보다 과소추정 되었으며 잔차는 (+)가 되었다. 기압과 마찬가지로 평균값에 대한 편차 (+1.37℃)에 대해 RMSE를 살펴본 결과 0.114℃로 나타나 오차허용범위 안에 있었다.

Fig. 12는 SSOS 측정 온도 데이터와 기상청 측정 온도 데이터의 상관관계를 나타낸 것이다. 해당 값들을

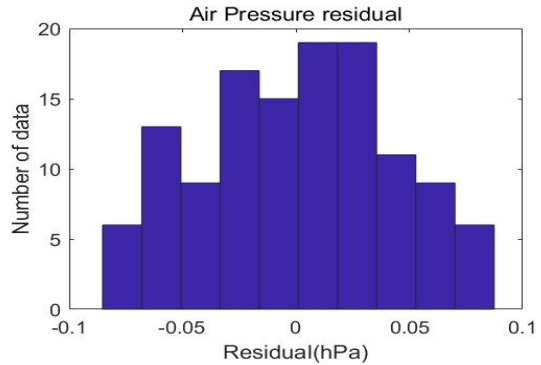


Fig. 10. Air pressure residual frequency.

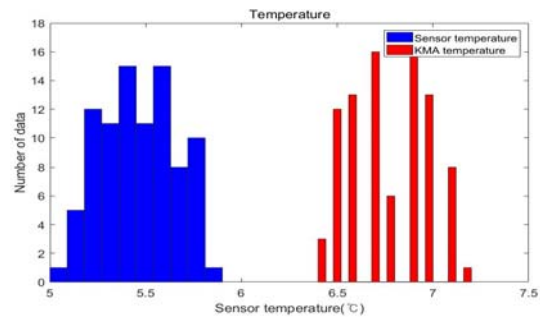


Fig. 11. Comparison of ground AWS and SSOS temperature sensor.

(x,y)로 그래프에 표시하고 최소자승법을 적용하였다. Fig. 11의 데이터들을 기반으로 x축은 SSOS센서 측정 온도 데이터를 나타내고 있으며, y축은 기상청 측정 온도 데이터를 나타내고 있다.

회귀 결과, $y = 0.8347 \times x + 2.2209$ 이 도출되었다.

Fig. 13은 잔차의 빈도 함수를 나타낸 것이다.

이 잔차들의 합에 대한 평균을 내어본 결과 잔차 평균이 0으로 귀결되었다. 즉, 보정된 데이터는 기상청 관측 자료와 잘 일치함을 보인다.

3.2. 보성타워 관측검증

2017년 11월 1일 전라남도 보성에 위치한 보성글로벌표준기상관측소 40 m의 높이의 기상청 측정값과 SSOS센서 측정값을 비교하였다. 기상타워에서 기압을 측정하지 않아 온도와 습도만 비교하였다. 해당 타워의 40 m높이에서 9시 35분에서 11시 20분까지 데이터를 받아 SSOS센서 측정값과 기상타워 측정값을 비교하였

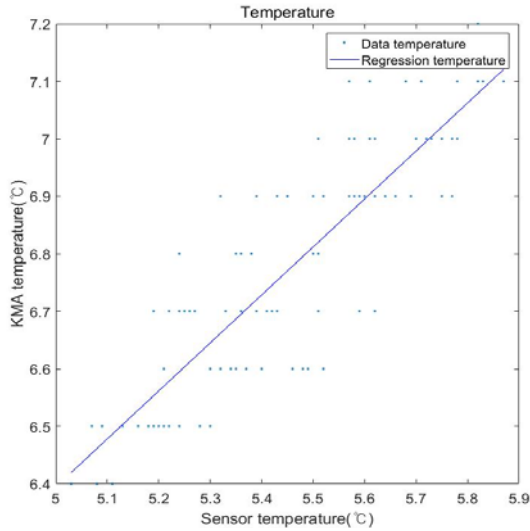


Fig. 12. Method of least squares of ground AWS and SSOS temperature sensor.

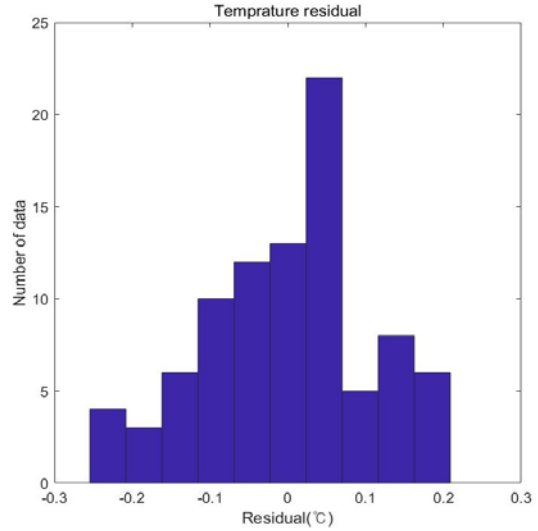


Fig. 13. Temperature residual frequency.

다. 40 m 높이에서 측정시 드론을 활용하지 않았으며, 기상청 타워의 기상측정기기의 근처에 SSOS 센서를 두어 해당 측정값과 기상청 측정값을 서로 비교하였다. Table 4는 보성글로벌표준기상관측소와 SSOS센서의 정확도를 나타내고 있다.

Fig. 14과 Fig. 15는 보성글로벌표준기상관측소에서 9시 35분부터 11시 20분까지 측정한 원시 데이터 값을 나타낸 것이며, Fig. 16과 Fig. 17은 해당 데이터들을 보정한 후의 그래프를 나타낸 것이다.

Fig. 16의 습도보정은 Fig. 6에서 최소자승법을 통해 구한 식을 적용시켰다. 좌우의 파란색 그래프는 습도 오차허용범위(습도 $\pm 5\%$)를 나타내고 있으며, 가운데 빨간색 그래프는 기상청 측정 습도 데이터와 SSOS 측정 습도 데이터가 동일할 때를 나타낸다. 센서가 과소추정 되었으며 편차(+6.95%)만큼을 x축으로 이동시켜 RMSE

(Root Mean Square Error)를 구하여 살펴본 결과 1.476%로 나타나 오차허용범위 안에 있었다. Fig. 6에서 측정된 식 자체는 데이터의 분산도가 컸지만 해당 식을 기상청 측정 습도 데이터와 SSOS 측정 습도 데이터 비교에 적용시켰을 시 오차허용범위 이내로 들어오는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 16의 잔차의 평균을 구해본 결과 0으로 귀결되었다.

Fig. 17의 온도보정 또한 Fig. 12에서 최소자승법을 통해 구한 식을 적용시켰다. 좌우의 파란색 그래프는 습도 오차허용범위(온도 $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$)를 나타내고 있으며, 가운데 빨간색 그래프는 기상청 측정 온도 데이터와 SSOS 측정 온도 데이터가 동일할 때를 나타낸다. 센서가 과대추정 되었으며 편차(-1.1 $^\circ\text{C}$)만큼을 x축으로 이동시켜 RMSE를 구하여 살펴본 결과 0.20 $^\circ\text{C}$ 로 나타나 오차허용범위 안에 있었다. Fig. 12에서 사용된 식 역시 분산도가

Table 4. Accuracy comparison of SSOS sensor with National Institute of Meteorological Science

Weather Sensor	National Institute of Meteorological Sciences		SSOS Sensor System	
	Company / Sensor name	Accuracy	Company / Sensor name	Accuracy
Temperature Sensor	Fluke/ 5628 PRT	$\pm 0.006\text{ }^\circ\text{C}$	CJMCU/ HTU21D	$\pm 0.3\text{ }^\circ\text{C}$
Humidity Sensor	Vaisala/ HMP150	$\pm 1\%RH$	CJMCU/ HTU21D	$\pm 2\%RH$

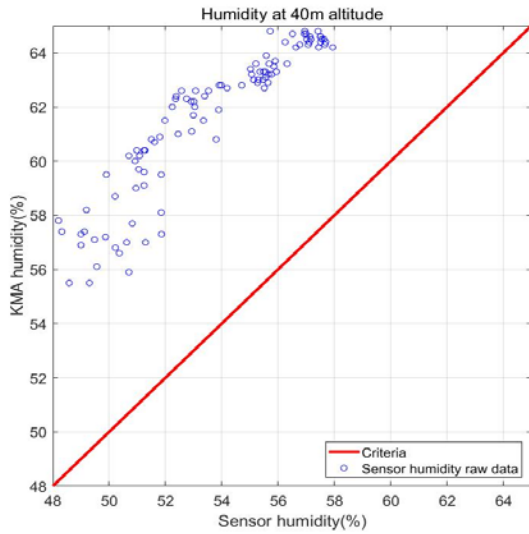


Fig. 14. Comparison of meteorological tower at Boseong and SSOS measurements: humidity sensor.

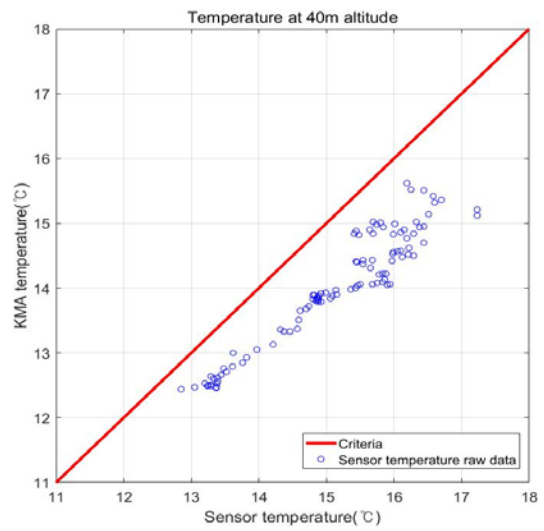


Fig. 15. Comparison of meteorological tower at Boseong and SSOS measurements: temperature sensor.

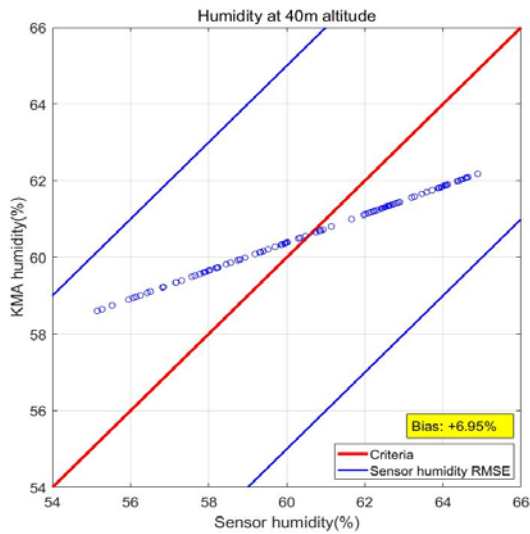


Fig. 16. Comparison of Bosung Tower and SSOS measurements after calibration: humidity sensor.

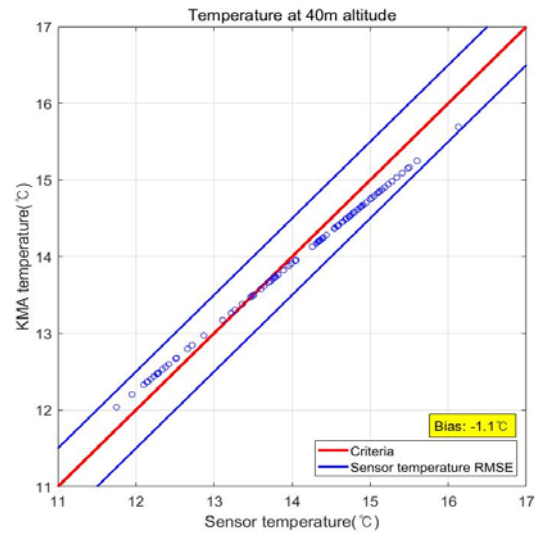


Fig. 17. Comparison of Bosung Tower and SSOS measurements after calibration: temperature sensor.

있었지만 해당 식을 기상청 측정 온도 데이터 및 SSOS 측정 온도 데이터 비교에 적용시켰을 시 오차허용범위 이내로 들어오는 것을 확인할 수 있었다. 또한 Fig. 17의 잔차의 평균을 구해본 결과 0으로 귀결되었다.

3.3. 드론(저층대기) 관측검증

앞에서 제시한 기상관측시스템을 드론에 장착하여 측정한 센서의 고도별 습도, 온도 측정값과 국립기상과학원의 고도별 습도, 온도 측정값을 서로 비교하였다. 관측은



Fig. 18. Bosung Tower measurements and SSOS measurements using drone at the same height.

지상에서부터 20 m까지 진행하였으며 드론을 상승 및 하강시키면서 드론의 센서에서 측정한 값과 기상청 센서에서 측정한 값들을 동일한 높이 기준으로 서로 비교하였다.

기상관측에 사용된 드론은 4개의 프로펠러가 있는 쿼드콥터(quad-copter)형을 사용하였으며, 강한 바람에도 비교적 안정적인 비행이 가능하다. 기상관측시스템(SSOS)을 장착한 드론의 총 무게는 약 830 g이며, 기상관측시스템을 탑재한 채로 총 비행시간은 약 10분이다. 크기는 대각으로 280 mm의 크기를 가지며, 중량이 증가함에 따라 채공 가능 시간은 단축된다. 관측이 가능한 고도는 통신 장비의 제약으로 인하여 지상으로부터 약 30 m까지 측정가능하였다.

Fig. 18은 보성글로벌표준기상관측소의 기상관측 타워 옆에서 드론을 활용한 SSOS센서로 기상을 관측하는 모습이다. SSOS센서에 있는 습도 센서가 드론의 프로펠러로부터 나오는 바람(추풍력)의 영향을 받지 않도록 하기 위하여 드론으로부터 약 5 m거리를 이격시켜 달았다. 해당 측정값과 보성글로벌표준기상관측소에서 측정한 기상관측값과 비교하여 측정값의 정확도를 판별하려 한다. 동일한 높이의 기상데이터를 비교하기 위하여 SSOS센서의 지상으로부터 높이를 기상관측 타워 측정기기 높이와 동일하게 하였다.

기상청에서는 데이터를 1초단위로 받아, 1분 단위로 평균을 내어 해당 값을 측정값으로 삼는다. 따라서 드론에서도 1분 동안 동일한 높이에서 데이터를 받아 평균을 내어 해당 측정값을 0 m, 10 m, 20 m 단위로 기상청 센서의 측정값과 비교하였다. Fig. 19와 Fig. 20은 드론이 상승하면서 0 m, 10 m, 20 m 높이에서 각각 1분씩 머물면서 측정한 온도 및 습도값과, 기상청의 0 m, 10 m, 20 m의 1분 단위로 평균낸 습도 및 온도 측정값을 서로 비교한 것이다. 해당 그래프로 판단했을 때 드론의 SSOS센서의 측정값과, 기상청 센서의 측정값은 다소 차이가 나는 것으로 판단이 되었지만, 온도와 습도 모두 각각 오차범위($\pm 5\%$ & $\pm 0.5^\circ\text{C}$)이내에 들어가는 것으로 확인된다. 이와 같이 드론을 활용하여 기상을 관측할 때 기상청 타워의 관측값과 일치하지는 않지만 해당 드론의 관측값이 기상청 허용범위 이내에 들어감을 확인할 수 있었다.

4. 고찰

제4차 산업혁명의 발달로 인하여 IoT가 산업과 연관되면서 다양한 방식의 기술의 융합이 이루어지고 있다. 기후변화에 따른 태풍, 집중호우 등 기상재해로 인한 피해는 전 세계적으로 빈도 및 피해규모가 심화되고 있다. 이와 같은 자연재해의 피해를 줄이기 위해서는 해상도 높은 기상 관측 시스템을 구축하여 자연재해에 대처할

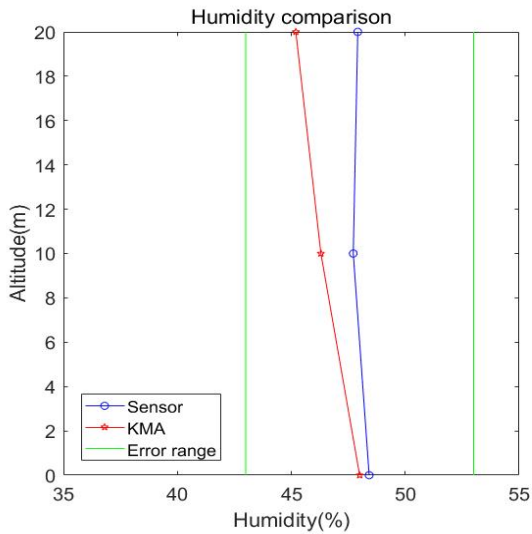


Fig. 19. Comparison of meteorological Tower at Boseong and SSOS measurements using drone: humidity sensor.

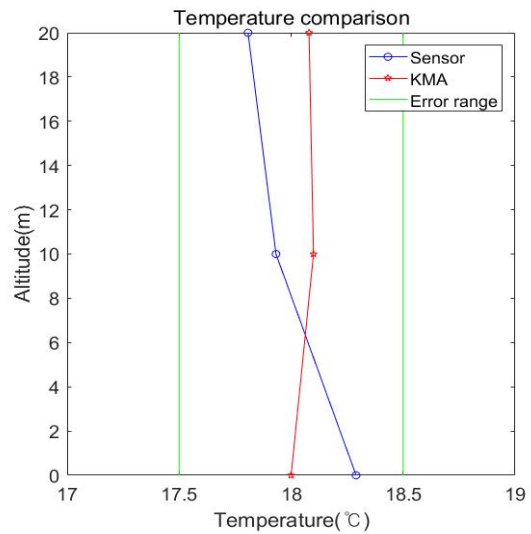


Fig. 20. Comparison of meteorological Tower at Boseong and SSOS measurements using drone: temperature sensor.

수 있어야 한다. 해외에서는 3D프린터를 이용한 저가의 기상관측망을 설치하여 자연재해에 대비하려는 모습을 보인다(Paul A et al., 2015). 또한 드론을 활용하여 기상 관측을 수행하는 것은 제4차 산업혁명의 또 다른 모습이라고 볼 수 있다. 이러한 드론을 활용한 기상관측은 국내 외적으로 이루어지고 있다.

일본에서는 드론을 통해 기상정보를 감시하고 재해발생 시의 상황을 파악할 수 있도록 드론에 기상관측센서를 탑재시켜 저층역의 기상관측 네트워크를 구축했다. 그를 통해 게릴라성 호우와 안개 등 국지적인 기상현상을 감시하거나 재해발생 시의 상황을 파악할 수 있다. 미국 중부의 Oklahoma주에서는 미국 전역에서 발생하는 토네이도의 25%가 발생하는데, 지금까지는 토네이도 관측이 인공위성과 직접적인 목격에만 의존하여 토네이도 관련 기상데이터가 관측되지 않는 부분이 발생했었다. 이를 관측하기 위하여 드론을 활용하였고, 토네이도 발생 사전 예보 시간을 15분에서 1시간 이상으로 끌어올리려 하고 있다.

드론을 사용하게 된다면 현재 사용되는 장비에 비하여 공간 분해능을 높일 수 있다. AWS나 ASOS등의 기상관측 장비는 위치가 고정되어 있으며, 각 지점간의 밀집도가 13 km를 형성하고 있다. 또한 AWS로 측정이 안

되는 부분에서 드롭존데나 라디오존데와 같은 장비를 활용하여 기상 관측을 실시하게 된다. 하지만 해당 장비들은 사용이 1회성으로 한정되어 있으며, 다시 수거하여 재사용시 지면과의 충돌로 인하여 센서의 정밀도에 오차가 발생하게 된다. 따라서 AWS와 같은 기상관측 장비가 관측할 수 없는 곳에서 드론을 날리게 된다면 드롭존데나 라디오존데가 가지는 단점을 없애면서 기상 관측 공간 분해능을 높일 수 있다(James.L et al., 2003). 또한 일정 지역에서 동시에 여러대의 드론을 띄워 여러 지점의 동일한 고도의 기상정보를 동일한 시간에 얻을 수 있으며, 센서를 다양하게 부착하여 해당 위치의 여러 가지 정보를 한꺼번에 얻을 수 있다(Lars Yndal et al., 2017). 이러한 기상정보를 통하여 태풍이나 폭우 같은 급작스러운 국지성 기후 변화를 더욱 빠르게 알려줄 수 있으며 인명 및 재산피해를 사전에 방지할 수 있다(An et al., 2011). 그리고 드론의 배터리를 충전하여 지속적인 측정이 가능하므로 비용적인 측면에서도 더 좋은 결과를 보인다.

보성기상타워에 사용된 센서들을 살펴봤을 때 기상측정에 사용되는 장비들의 대부분이 Vaisala, Campbell Scientific등 해외에서 개발된 장비들이다. 따라서 드론과 센서를 활용한 관측시스템 개발시 국산장비를 활용하게 된다면, 기상 분야 장비의 국산화에도 또한 도움이 될

것으로 생각된다.

현재 드론을 활용하여 기상관측시 기온, 습도를 관측하는 실험은 다방면으로 이루어지고 있다. 과학기술정보통신부에서도 현재 드론을 활용하여 기상의 기온, 습도를 관측하는 장비를 개발하는데 박차를 가하고 있다. 따라서 대기경계층을 관측시 기온, 습도 관측시스템을 수정 보완한다면 정확한 기상정보를 얻는데 도움이 될 것으로 생각된다.

5. 결론

본 연구에서는 SSOS센서를 활용하여 해당 센서를 기상청 센서와 대비하여 그 사용가능성에 대하여 판단하였다. SSOS센서는 기압관측에 사용된 BMP180센서와, 습도 및 기온관측에 사용된 HTU21D로 나뉜다. 기압, 기온, 습도의 기상청 측정값보다 SSOS센서의 측정값이 더 작게 나와 SSOS센서가 과소추정되었다. 지상 AWS와 비교시 SSOS센서의 측정값들은 전체가 과소추정되었으며, 40 m에서 측정을 하였을 시 온도만 과대추정되었다. 이러한 과소추정 및 과대추정은 SSOS센서로 외부 영향을 많이 받는 전기저항식 센서를 사용하여 발생한 것으로 생각된다.

SSOS센서의 평균값과 지상AWS의 평균값의 차이만큼(습도: +5.92%, 기압: +6.2 hPa, 온도: +1.37°C) 해당 편차를 적용시킨 후 RMSE를 활용하여 오차율을 판단해본 결과(습도: 1.629, 기압: 0.056, 온도: 0.114)로 기상청에서 제시한 오차허용범위(기상청 기상측기 현지 검정 기준: 습도 $\pm 5\%$, 기압 ± 0.5 hPa, 온도 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 이내)이내에 있음을 확인할 수 있었다. 또한 보정을 위하여 최소자승법을 적용시켰을 때 잔차에 대한 평균은 0으로 귀결되었다.

지상AWS 측정값을 활용하여 구한 최소자승법 그래프를 지상으로부터 40 m에서 측정한 값에 편차를 수정한 후 활용하였다. 온도와 습도 모두 오차범위 이내에는 들어갔지만, 그래프의 기울기면에서 차이를 보였다. 온도보다 습도의 그래프가 기준선에서 44% 차이가 났다. 습도의 경우 온도의 변화와 그에 따른 포화수증기량의 변화에 따라 값이 변하게 된다. 저층 대기에서는 온도의 변화가 지속적으로 이루어지기 때문에 그에 따라 습도의 변화 또한 이루어진다. 이러한 이유들로 지상에서 측정

한 최소자승법으로 보정된 그래프의 기울기 차이가 습도가 온도보다 44% 더 발생한 것으로 생각된다. 또한 고도가 높아졌을 때 온도 같은 경우 과대추정으로 변하는 경향이 있었다. 즉, 고도가 달라질수록 편차가 달라졌고 이러한 부분을 다시 수정하여 센서의 측정값과 기상청 측정값을 비교하여야 할 것으로 생각된다.

드론을 활용하여 0 m, 10 m, 20 m에서 측정값을 판단했고 각 지점당 1분 단위로 값을 측정하여서 비교하였다. 오차가 존재하지만 해당값이 기상청 오차범위 이내에 들어가는 것을 확인할 수 있었다.

현재 SSOS센서와 기상청의 센서를 서로 비교하였을 때, SSOS센서가 전기저항식센서로서 한계를 가지는 부분이 있었다. 특히 습도의 경우 80%이상의 습도측정시 오차율이 더욱 커지는 특징을 보였고, 시간이 지날수록 오차율이 더욱 증가하는 특징이 있었다. 하지만 그 안에서 기상청의 센서와 비교하였을 경우 다소의 오차는 존재하지만, RMSE를 활용하여 오차율을 판단해본 결과 기상청에서 제시한 오차허용범위(기상청 기상측기 현지 검정 기준: 습도 $\pm 5\%$, 기압 ± 0.5 hPa, 온도 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 이내)이내에 있음을 확인할 수 있었다.

SSOS센서의 습도 같은 경우 20 ~ 80%에서 신뢰도 있는 값을 확인할 수 있는데, 기상청 국내기후자료에서 월별 상대습도를 살펴봤을 때, 서울 및 경기도 지방은 연중 최소 56%, 최대 78%로 나타났으며, 강원도는 연중 최소 58.4%, 최대 75.8%로 나타났다. 드론이 우천시 비행을 못 하는 점을 생각한다면 해당 습도 이내에서 측정된 기상관측값을 신뢰도 있는 수준으로 생각된다. 또한 시간이 지날수록 측정값의 오차범위가 커진다는 점 또한 드론을 활용한 기상관측이 짧은 시간 안에 이루어짐을 감안한다면 시간에 따른 오차의 영향이 크지 않을 것으로 생각된다. 그리고 해당 센서를 드론에 달아 관측타워와 관측값을 비교해볼 때 편차를 조절하여 오차범위 이내에 들어오게 한다면, SSOS센서를 드론에 달아서 하는 기상관측 또한 가능성이 있는 것으로 판단된다.

또한 현재 제작한 센서 노드에는 외부의 공기가 센서 노드 내부로 들어와서 다시 빠져나가도록 하는 환기팬이 부착되어 있지 않다. 현재는 박스 외부에 구멍을 뚫어 외부 공기가 센서 노드 내부로 들어올 수 있도록 했다. 하지만 해당 구멍의 크기 및 드론이 움직일 때 외부 공기가 센서 노드 내부로 잘 흡입되지 못 하는 점을 고려한다면

공기의 순환이 잘 이루어지지 않는다고 판단이 되었고, 이러한 점이 측정값의 오차에 더 영향을 미친 것으로 판단된다.

결과적으로 SSOS 센서를 그대로 활용한다면 기상관측시스템을 개발하기에는 다소 부족하지만, 관측값에 영향을 주는 요건을 배제하여 최대한 정확한 관측값을 얻으려함과 동시에 분산을 줄일 수 있는 보정방법을 개발한다면, SSOS의 센서를 기상관측에 사용할 수 있다고 생각한다.

향후에는 기압, 기온, 습도뿐만이 아니라 CO₂와 미세먼지 센서를 활용하여 대기의 상태를 더욱 정확하게 관측하려고 하며, SSOS 센서가 외부환경에서 받는 영향을 고려하여 그러한 부분을 배제할 수 있도록 장비를 보완하려고 한다. 향후에 SSOS 센서의 데이터를 머신러닝과 같은 더욱 향상된 보정방법을 통하여 그 값의 정확도를 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 한국환경산업기술원 환경정책기반공공기술개발사업(과제번호: 2016000210001)의 지원으로 수행되었습니다. 또한 본 연구는 2018년도 고려대학교 석/박사 학위논문의 축약본(일부)입니다.

REFERENCES

- An, S. M., Kim, J. G., Yoo, J. H., Jung, S. J., Chung, W. Y., 2011, Design of WSN based field server for local weather monitoring, *Journal of Korea Institute of Information and Communication Engineering*, 2, 493-500.
- Brouwer, R. L., de Schipper, M. A., Rynne, P. F., Graham, F. J., Reniers, J. H. M., MacMahan, J. H., 2015, Surfzone monitoring using rotary wing unmanned aerial vehicles, *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 32(4), 855-863.
- Eresmaa, N., Karppinen, A., Joffre, S. M., Rasanen, J., Talvitie, H., 2006, Mixing height determination by ceilometer, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 1485-1493.
- Franklin, J. L., Black, M. L., Valde, K., 2003, GPS dropwindsonde wind profiles in hurricanes and their operational implications, *American Meteorological Society*, 18, 32-44.
- Korea Environment Corporation, 2017.4.27., Air Korea, <https://www.airkorea.or.kr/index>
- Kucera, P. A., Steinson M., 2015, A 3D printed weather station, NCAR/Research Applications Laboratory and UCAR/JOSS, Colorado, USA.
- Lars, Y. S., Lars, T. J., John, P. H., 2017, Low cost and flexible UAV deployment of sensors, *MDPI Sensors*, 17(1), 154.
- Ramanathan, V., Ramana, M. V., Roberts, G., Kim, D. H., Corrigan, C., Chung, C., Winker, D., 2007, Warming trends in Asia amplified by brown cloud solar absorption, *Nature*, 448, 575-578.
- Stull, Roland, B., 1988, *An Introduction to boundary layer meteorology*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 442.
- Van Der Kamp, D., McKendry, I., 2010, Diurnal and Seasonal Trends in Convective Mixed-Layer Heights Estimated from Two Years of Continuous Ceilometer Observations in Vancouver, BC, *Boundary-Layer Meteorology*, 137, 459-475.