

드론기반 대기오염 탐색을 위한 적정 탐색고도 연구

하일규^{1*} · 김기현² · 김진형²

Research on appropriate search altitude for drone-based air pollution search

Il-Kyu Ha^{1*} · Ki-Hyun Kim² · Jin-Hyung Kim²

^{1*}Assistant Professor, School of Computer Science, Kyungil University, Gyeongsan, 38428 Korea

²Undergraduate Student, School of Computer Science, Kyungil University, Gyeongsan, 38428 Korea

요 약

최근 드론은 환경보호와 자연재해감시 등 환경문제 해결에 많이 활용되고 있다. 본 연구는 도심의 대기환경을 유지하기 위하여 대기오염을 탐색하는데 드론을 활용하고자 할 때 드론의 탐색고도 문제에 초점을 둔다. 특히, 드론을 활용하여 도시의 대기오염을 탐색할 때 대기오염원 별 그리고 통신모듈 별 적절한 탐색고도를 파악하기 위한 다양한 실험을 진행한다. 실험을 통해 가장 일반적인 대기오염원인 CO(일산화탄소), NO₂(이산화질소), O₃(오존), P10, P2.5(미세먼지)를 위한 최대측정가능고도를 파악하고, 각 대기오염원 별 유효한 탐색고도를 도출한다. 실험 결과 법적 측정가능고도 등 세 가지 유형의 드론 탐색고도가 제시되었다. 통신모듈 측정가능고도는 통신모듈에 따라 60m에서 120m로 나타났으며, 유효 측정가능고도는 10m에서 100m로 분석되었다.

ABSTRACT

Recently, drones have been widely used to solve environmental problems such as environmental protection and natural disaster monitoring. This study focuses on the problem of the search altitude of drones when using drones to search for air pollution in order to maintain the urban air environment. In particular, when exploring air pollution in cities using drones, various experiments are conducted to determine the appropriate search altitude for each air pollution source and each communication module. Through the experiment, the maximum measurable altitude for the most common air pollutants, such as CO (carbon monoxide), NO₂ (nitrogen dioxide), O₃ (ozone), and P10, P2.5 (fine dust), was identified, and the effective search altitude for each air pollution source was determined. As a result of the experiment, three types of drone search altitudes including legally measurable altitudes were suggested. The communication module measurable altitude was 60m to 120m depending on the communication module, and the effective measurable altitude was analyzed from 10m to 100m.

키워드 : 드론기반 대기오염 탐색, 드론 탐색 고도, 드론 대기오염 센서, 드론 통신 모듈

Keywords : Drone-based air pollution search, Drone search altitude, Drone air pollution sensor, Drone communication module

Received 31 December 2021, Revised 5 January 2022, Accepted 9 January 2022

* Corresponding Author Il-Kyu Ha(E-mail: ikha@kiu.kr, Tel:+82-53-600-5564)

Assistant Professor, School of Computer Science, Kyungil University, Gyeongsan, 38428, Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2022.26.2.294>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

© 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.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

최근 드론은 다양한 분야에 활용되고 있다. 드론은 넓은 범위를 손쉽게 탐색할 수 있다는 장점 때문에 자연재해 예방과 감시, 농작물 성장과 피해 감시, 환경오염 예방과 감시 등에 활용되어 왔다. 특히 환경에 대한 관심이 증가하면서 드론을 광범위한 지리적 탐색과 환경보호에 활용하고자 하는 노력이 지속되어왔다. 한편으로 대기오염은 지구온난화의 한 원인으로 현대사회의 큰 문제로 부각되고 있고, 이를 감소시키려는 노력이 진행되고 있다. 드론은 이동이 자유롭고 비교적 광범위한 지역을 탐색할 수 있다는 특징 때문에 대기오염을 연구하는데 다양하게 활용되고 있다[1].

대기오염은 산업화, 교통수단발달, 자연환경파괴 등 다양한 원인으로 발생될 수 있고, 이로 인해 CO, NO₂, O₃, 미세먼지 등 다양한 오염물질이 발생된다. 이러한 대기오염의 정도를 파악하고 원인을 분석하는 등 다양한 대기환경 보호에 드론을 활용하고 있다[2]. 지금까지 국내외에 드론을 활용하여 대기오염을 측정하고 분석하는 연구가 있어왔으나, 대기오염원 별 그리고 통신모듈 별 적합한 측정고도에 대한 연구는 잘 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 드론을 활용한 대기오염 탐색에서 각 대기오염 탐색을 위한 적정고도를 찾기 위한 실험을 진행하고, 실험결과 분석을 통해 그에 대한 답을 찾고자 한다.

2장에서는 드론 활용 대기오염 측정에 관한 연구를 비교하고 분석하며 본 연구에서 사용된 대기오염 측정 모듈과 통신 모듈에 대해 설명한다. 3장에서는 드론의 대기오염 탐색을 위한 적정고도 파악 실험의 환경과 방법에 대해 설명하고, 4장에서는 측정가능 최대고도, 대기오염별 측정수치분석, 측정가능 유효고도 등 실험결과를 분석한다. 5장에서 연구의 의의를 설명하고 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

2장에서는 드론을 활용한 대기오염 측정에 관한 기존 연구들을 비교하고 분석하며 본 연구에서 사용된 IoT 모듈에 대해 살펴본다.

2.1. 드론 기반 대기오염 모니터링 관련 연구

표 1은 드론을 활용한 대기오염 측정에 관한 기존의 몇 가지 특징적인 연구들을 분석한 것이다. [3]은 O₃, CO, 미세먼지 등 3가지 대기오염원에 대해 파악하고 이를 표시할 수 있는 앱을 제안한 연구이다. 하지만, 드론의 자세한 탐색 방법에 대한 언급이 부족하다. [4]은 인공지능망과 드론을 활용하여 도심지역의 대기오염 모니터링 시스템을 제안하였다. 그러나 드론의 자세한 비행방법에 대한 설명이 부족하다. [5]는 대기오염 단속을 위하여 드론 촬영 영상을 분석하고 가스배출시설을 탐지하는 방법을 제안하였다. [6]은 드론을 활용하여 환경재난지역을 모니터링하고 환경감시를 위해 드론을 활용하여 대기질을 측정하는 방법을 설명하고 있다. [7]은 다양한 대기오염을 측정할 수 있는 센서 셋을 개발하고 이를 드론에 부착하여 세 측정장소에서 실험을 통해 센서의 효과성을 입증하고 있다. 그러나 다양한 고도에서의 측정값이 부족하다.

[8]은 드론을 이용하여 산업단지 지역의 대기오염물질을 실험적으로 측정한 연구이다. 그러나 드론 부착 센서의 구체적인 제작 방법과 측정고도에 대한 설명이 부족하다. [9], [10], [11] 그리고 [12]는 드론을 활용하여 도심지역 또는 대형 산업단지의 대기오염 측정 및 모니터링에 관한 방법을 제시한 연구들이다. 이러한 연구들 역시 자세한 센서 장치의 구성방법, 그리고 측정고도에 대한 연구가 부족하다. [13]은 드론을 활용하여 도심지역의 대기오염 분포를 측정한 연구이다. 다양한 대기오염 종류를 측정하였으나 드론의 자세한 비행고도에 대한 연구는 부족하다. [14]는 드론을 활용한 대기오염 측정 시스템을 제안하고 미세먼지 P2.5에 대하여 고도변화에 따른 수치를 측정하였다. 드론의 고도변화에 따른 실험을 진행하였으나 다양한 대기오염에 대한 측정 사례가 부족하다. [15]는 드론을 활용한 대기오염 측정에서 드론의 속도와 측정고도의 영향에 대해 실험을 진행하고 그 결과를 분석하였다. [16]은 드론을 활용한 대기오염 탐색방법을 제안하였다. 특히 탐색공간을 원형으로 탐색하는 알고리즘을 제안하였다. 그러나 탐색고도의 변경에 대한 자세한 논의는 부족하다. [17]은 드론을 활용하여 대기오염을 측정할 때 드론에서 발생하는 바람의 영향으로 대기오염 센서의 측정값이 위치에 따라 달라질 수 있음을 실험하였다.

Table. 1 Characteristic studies on air pollution measurement using drones

Studies	Characteristic
[3]	suggests an app that identifies and displays three air pollution sources: fine dust, ozone, and carbon monoxide. However, it lacks detailed navigation methods of drones.
[4]	develops an air pollution monitoring system in urban areas using artificial intelligence networks and drones, but it lacks details on how drones fly
[5]	detects gas emission facilities by analyzing drone footage for air pollution control.
[7]	a study in which a specific air pollution measurement sensor was attached to a drone and actual data was measured. However, lack of measurement data for various altitudes
[8]	measures air pollutants in the industrial complex area using drones. However, detailed research on the specific manufacturing method and measurement altitude of drone attached sensors is lacking.
[13]	measures the distribution of air pollution in urban areas using drones. It has measured various types of air pollution, but studies on the detailed flight altitude of drones are lacking.
[14]	develops an air pollution measurement system using drones. However, there is a lack of numerical measurement according to altitude change for P2.5 and various air pollution measurement cases
[15]	conducted experiments on the effects of drone speed and measurement altitude on air pollution measurement using drones and analyzed the results.
[16]	studies a method of detecting air pollution using drones. It proposes an algorithm to search the search space in a circular manner, but detailed discussion on the change in altitude is lacking.
[17]	examines the effect of wind generated by drones when measuring air pollution using drones, and reveals that the measured values of air pollution sensors may vary depending on location.
[18]	develops a sensor set that can measure various air pollution, such as carbon monoxide and benzene, at once, and measures the level of fine dust according to altitude changes through experiments.

[18]은 CO, 벤젠 등 다양한 대기오염을 한번에 측정할 수 있는 센서 셋을 개발하고 고도의 변화에 따른 미세먼지 수치를 실험을 통해 측정한 연구이다. [19]는 도심지역에서 드론을 활용하여 소음, 대기오염, 온도, 습도 등 다양한 환경요소를 측정하고 이를 시각화하여 제공하는 시스템을 제안하였다. [20]은 도시의 대기오염

관리에 드론이 활용될 때 안전성 및 보안성에 관하여 설명한 연구이다. [21]은 대기 중의 가스를 측정하기 위하여 적외선 센서를 활용하는 방법을 제시한 연구이다. [22]는 대기오염을 측정할 수 있는 센서들을 하나의 보드에 집적하고 드론의 프로펠러로 인한 공기의 흐름을 고려하여 대기오염을 측정할 수 있는 적정한 드론 군집 형태를 제시한 연구이다.

이상과 같이 드론을 활용한 대기오염 측정에 관한 기존 연구들은 드론이 다양한 대기오염 측정 센서들을 활용하여 대기오염 측정에 활용될 수 가능성을 보여준 연구들이다. 그러나 본 연구에서 초점을 두고자 하는 드론의 탐색고도에 대한 연구들은 매우 부족하다. [14]와 [15]가 본 연구에서 초점을 두고자 하는 대기오염 측정 고도에 관한 연구들이다. 하지만, 다양한 고도에서의 측정 사례가 부족하고, 고도에 따른 통신 모듈의 영향에 대한 분석이 부족하다.

따라서 본 연구에서는 드론의 대기오염 탐색에 있어서 탐색고도에 초점을 두어 대기오염별 적정한 탐색고도, 즉 측정 가능한 최대 고도, 유효한 측정 가능 고도를 실험을 통해 도출하고자 한다.

2.2. 대기오염측정 센서 및 통신 모듈

본 연구에 사용된 대기오염 측정 센서는 그림 1과 같다. 연구에서 사용된 센서는 환경부의 대기오염 기준의 의거하여 CO (일산화탄소), NO₂ (이산화질소), O₃ (오존), P10, P2.5 (미세먼지)를 측정하기 위해 선정되었다. CO는 기체로 연소 시 산소가 부족하거나 연소온도가 낮을 때 발생하는 연소생성물이다. 이는 무색, 무미, 무취의 기체로 자동차 배기가스, 연탄 등의 난방용 연료에서 배출된다. 사람이 CO에 노출되면 산소운반능력을 저하시키고 심하면 사망에 이를 수 있다[15]. MQ-9 CO 센서는 대기 중의 CO와 기타 가연성 가스 농도 측정이 가능하다. NO₂는 질소와 산소로 이루어진 화합물이다. 적갈색의 기체 상태로 존재하며 자동차의 배기가스에서 주로 배출된다. 사람이 NO₂에 노출되면 청색증, 호흡곤란, 나른함 등의 질환이 있을 수 있다[23]. MICS-4514 NO₂ 센서는 대기 중의 NO₂ 농도 측정이 가능하다. O₃은 무색의 기체로 자동차 등에서 배출하는 질소산화물과 휘발성 유기화합물질이 반응하여 생성된다. 이는 낮은 농도에서도 인체에 유해한 가스로서 지속적으로 노출 시 폐에 영구적으로 해를 입히게 된다[23]. MQ-131 O₃

센서는 대기 중의 O_3 농도 측정이 가능하다. 미세먼지는 부유 물질을 의미하며 자동차의 배기가스, 주행 과정에서 발생하는 먼지에서 발생한다. 사람이 미세먼지에 노출되면 호흡기 및 심혈관계 질환의 발생 원인이 된다 [24]. PM2008 미세먼지 센서는 미세먼지와 초미세먼지의 농도 측정이 가능하다. 아두이노에 사용 가능한 통신 모듈에는 Bluetooth, Zigbee, 와이파이, 로라 모듈 등 다양한 통신 모듈이 있다.

본 연구에 사용된 통신모듈은 Bluetooth, Zigbee 모듈이다. Bluetooth는 컴퓨터, 노트북, 스마트폰, 음향기기 등과 같이 기기들을 서로 연결하여 정보를 교환할 수 있는 근거리 무선기술의 표준이다. 이는 단거리 저전력 무선통신으로 가장 보편적으로 드론에 적용이 가능하다 [25]. Zigbee는 저전력 디지털 라디오를 이용해 개인 통신망을 구성하여 통신하기 위한 표준 기술이며 IEEE 802.15 표준을 기반으로 만들어졌다. 이는 메시 네트워크 방식을 이용, 여러 중간 노드를 거쳐 목적지까지 데이터를 전송함으로써 저전력임에도 불구하고 넓은 범위의 통신이 가능하다[26]. Bluetooth와 Zigbee 모듈은 간섭현상이 상대적으로 낮고, 저전력 통신을 제공해 많은 데이터 통신이 필요하지 않은 드론 통신 제어에 적합하다. 그러나 와이파이모듈은 다른 모듈과 달리 AP (Access Point)의 의존성이 높아 AP의 성능에 따라 실험 결과 차이의 폭이 넓으며 출력이 제한되어 드론 제어에 통신 제약이 존재하여 본 실험에서 제외한다.

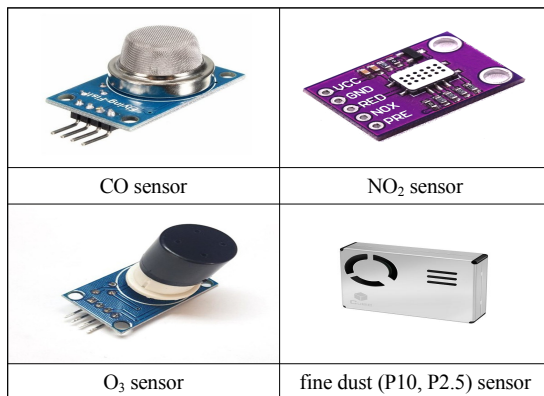


Fig. 1 Air pollution measurement sensors used in this study

III. 대기오염탐색 적정고도 실험

3.1. 실험 환경

드론을 활용한 대기오염 탐색을 위한 최적고도 실험을 위해 표 2와 같은 실험 환경을 준비한다. 대표적인 대기오염원인 CO , NO_2 , O_3 , 미세먼지를 측정할 수 있는 대기오염 센서를 준비하고, Bluetooth와 Zigbee 통신모듈을 준비한다. 그림 2는 대기오염탐색을 위해 구성한 측정 장비를 보여준다.

최적고도 실험은 표 3과 같이 3개의 장소에서 이루어진다. Site 1은 대기오염 수치가 높을 가능성이 있는 도심지역이고, Site 2와 Site 3은 비교적 대기오염 수치가 낮을 가능성이 있는 외곽 대학 캠퍼스이다.

각 장소에서 실험은 지상에서부터 수직으로 10m씩 상승하면서 각 센서가 파악한 데이터를 측정하도록 하고 측정 데이터의 정확성을 위하여 2회에 걸쳐 진행한다. 센서가 파악한 데이터는 약 0.5초마다 베이스 스테이션으로 전달한다. 고도를 높여나가면서 데이터를 전달할 때 약 3초 이내 지연이 있을 때의 측정 수치를 유효 수치로 하여 파악하였고, 약 10초 이상 통신지연이 있을 때의 높이를 표시하였다. 이는 각각 유효한 측정고도, 측정 가능한 최대 고도를 파악하기 위한 자료로 활용된다.

Table. 2 Experiment environment

Item	product specification	
air pollution sensor	CO : MQ-9 O_3 : MQ-131	NO_2 : MICS-4514 fine dust: PM2008
communication module	Bluetooth: HC-06 Bluetooth module Zigbee: Digi Xbee Pro S1	
drone	Phantom3 standard	
laptop	Samsung-300E4A/300E5A/300E7A/3430EA /3530EA	

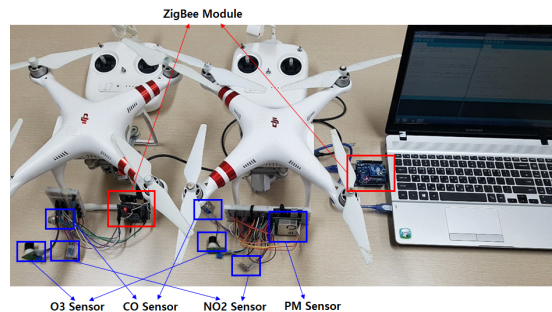


Fig. 2 Measuring equipment configured to measure air pollution

3.2. 실험 장소와 실험 방법

실험은 세 곳에서 이루어진다. 각 Site에서의 실험은 표 3과 같이 2021년 8월 11일, 8월 13일, 8월 18일에 이루어진다. 표 3에는 각 실험장소의 해당 일자의 대기환경 조건을 보여준다. 기온 및 풍속 등 데이터는 보건환경연구원으로부터 입수한다. 그림 3은 Site 1의 위성지도를 보여준다. 비교적 도심지역에 위치한 공원의 드론 비행이 가능한 주차장 지역에서 실험이 진행된다. 그림 4는 Site 3의 위성지도를 보여준다. 이는 비교적 외곽 지역에 위치한 대학 캠퍼스이다.

Table. 3 Test locations where air pollution measurements were made

Item	Site 1 (8/11)	Site 2 (8/13)	Site 3 (8/18)
Average temperature	26.1	25.7	23.1
Highest temperature	30.9	30.2	26.1
Minimum temperature	21.6	23.4	21.2
Precipitation (mm)	0.0	0.0	1.3
Average cloudiness	6.8	7.9	8.4
Relative Humidity (%)	71.3	69.4	76.3
Wind speed (m/s)	2.4	2.3	1.8



Fig. 3 Location of Site 1

표 3의 실험 장소에서 측정된 대기오염 수치와 비교하기 위하여 객관적인 비교 데이터를 수집한다.

표 4는 표 3의 Site에서 측정한 데이터와 비교하기 위

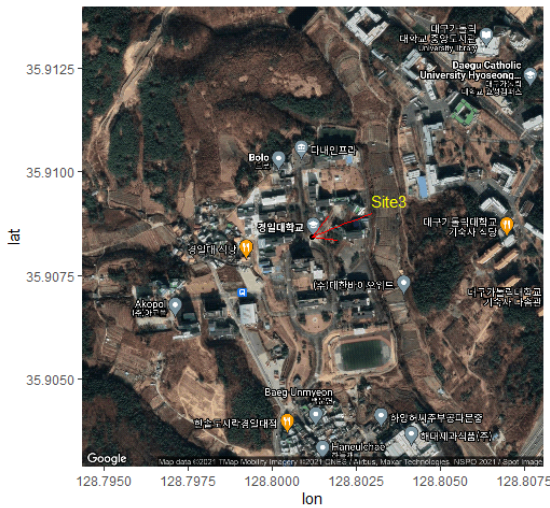


Fig. 4 Location of Site 3

한 객관적인 데이터로 실험 Site와 가장 가까운 위치에 있는 공공기관의 대기오염 데이터 측정 위치를 보여준다. 표 5는 각 공공기관에서 측정된 비교 데이터를 보여준다. P-Site 1에서 측정된 데이터인 Data 1은 Site1에서 측정한 데이터와 비교하기 위한 데이터로 활용하고, P-Site 2에서 측정된 Data 2와 Data 3은 Site2와 Site3에서 측정한 데이터와 비교하기 위한 데이터로 활용한다.

Table. 4 Location of public data acquisition and measurement altitude

Item	Location	Measuring Altitude
P-Site 1	Seongmyeong Eementary School, 55 Seongdang-ro 30-gil, Nam-gu, Daegu	about 9m
P-Site 2	Meteorological Agency, 119-1, Hayang-ro, Hayang-eup, Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do	0m(ground)

Table. 5 Comparative data measured by public institutions

Item	Data 1 (8/11)	Date 2 (8/13)	Data 3 (8/18)
Fine dust : ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	22	13	3
Ozone : (ppm)	0.038	0.042	0.035
Nitrogen dioxide : (ppm)	0.014	0.005	0.005
Carbon monoxide : (ppm)	0.3	0.4	0.4

표 6은 본 연구에서 진행한 실험의 자세한 진행 방법을 보여준다. 실험은 세 실험 장소에서 통신모듈을 달리

하여 2회씩 대기오염 측정 실험이 진행된다. 첫 번째 실험에서는 Zigbee 통신모듈을 사용하고, 두 번째 실험에서는 Bluetooth 모듈을 사용한다. 데이터 정확성을 위하여 각 통신 모듈에 대해 2회씩 측정한다. 측정 방법은 지상 0미터부터 10미터씩 수직상승하면서 미세먼지, O₃, NO₂, CO의 수치를 측정한다. 통신지연을 포함하여 3초 이내에 측정된 데이터를 각 고도의 수치로 파악한다. 측정 가능한 최대고도는 각 통신모듈을 이용하여 통신할 때 통신지연이 10초 이상 발생할 경우의 고도로 파악한다. 측정 가능한 통신지연 값을 10초로 설정한 이유는 드론이 후버링 동작을 취하면서 안정적으로 데이터를 수집할 수 있는 지연시간[17]을 넘어선 시간으로 파악하였기 때문이다.

Table. 6 Data collection method

Item	Experiment 1	Experiment 2
Communication module	Zigbee	Bluetooth
Measured value	Measurement values of fine dust, ozone, NO ₂ , and CO Measured value when communication delay occurs within 3 seconds	
Measured altitude	altitude that rises vertically in steps of 10 m from the ground	
Maximum altitude	Altitude at which communication delay occurs more than 10 seconds	

IV. 실험 결과 및 분석

4.1. 측정가능 최대 고도

대기오염 측정가능 최대 고도는 앞선 실험에서 약 10초 이상 통신지연이 발생했을 때의 비행고도로 파악할 수 있다. 표 7은 실험을 통해 파악된 측정가능 최대 고도를 보여준다. Zigbee 모듈은 통신 지연 현상이 자주 나타났으나, 이에 비해 Bluetooth는 지연이 비교적 적었다. 표 7의 평균 수치는 보는 바와 같이 Zigbee 모듈을 사용할 경우, 측정 가능 최대 고도는 약 113.3m 이고, Bluetooth 모듈을 사용할 경우 측정 가능 최대 고도는 약 83.3m 이다. Zigbee 모듈은 측정 가능 최대 고도는 높았으나 통신 지연 등이 발생하였고, Bluetooth 모듈은 비교적 측정 가능 최대 고도는 낮았으나 통신이 안정적이었다.

Table. 7 Measurable maximum altitude

	Zigbee	Bluetooth
Site 1 - 1	100	60
Site 1 - 2	100	60
Site 2 - 1	120	100
Site 2 - 2	120	80
Site 3 - 1	120	110
Site 3 - 2	120	90
Average	113.3m	83.3m

측정 가능한 최대고도는 통신 모듈에 의존적이라고 할 수 있다. 보다 성능이 우수한 통신 모듈을 사용할 경우, 측정 가능 최대고도는 높아질 수 있을 것이다. 하지만 본 연구에서 사용한 통신 모듈은 라즈베리파이, 아두이노와 같은 일반적인 마이크로컨트롤러에 집적해서 사용할 수 있는 일반적인 통신 모듈이고, 일반적인 대기오염 측정에서 사용할 수 있는 통신모듈이다. 따라서 가장 일반적인 통신 모듈로 실험을 진행하였다. 지상으로부터 100m는 아파트 약 35층에 해당되는 고도이고, 일반적으로 도심지역의 대기오염을 측정하는 데는 실험에 사용된 통신 모듈로도 충분히 가능하다고 판단한다. 본 연구에서 사용한 Phantom 3와 같은 초경량 드론(무인비행장치)의 조작 비행을 위해서는 4급 이상의 조종자격 취득이 필요하고, 비행금지구역이나 공항 주변반경 9.3km이내인 관제권, 고도 150m이상인 경우에는 비행이 금지됨을 사전에 인지하여야 한다. 150m 고도의 제한은 모든 드론에 적용되므로 150m를 측정 가능한 제한 고도로 볼 수 있다.

그림 5는 실험을 통해 파악한 대기오염 측정을 위한 드론의 비행 고도를 보여준다. 그림과 같이 세 가지의 비행 고도를 제안할 수 있다.

첫째, 법적 측정가능고도(Legal measurable altitude)이다. 이는 각 국가에서 법적으로 허용하는 비행가능구간을 말한다. 우리나라의 경우 앞서 언급한 바와 같이 150m의 제한고도를 가진다.

둘째, 통신모듈 측정가능고도(Communication module measurable altitude)이다. 이는 법적측정가능고도 내에서 통신모듈을 사용하여 측정이 가능한 구간이다. 통신모듈의 성능에 따라 달라질 수 있으나 본 실험에 사용한 일반적인 통신모듈을 사용하였을 때는 120m가 한계 고도였다.

셋째, 유효 측정가능고도(Effective measurement altitude)이다. 이는 통신모듈 측정가능고도 내에서 통신 모듈이 측정 데이터를 안정적으로 전송하는 구간으로 파악할 수 있다.

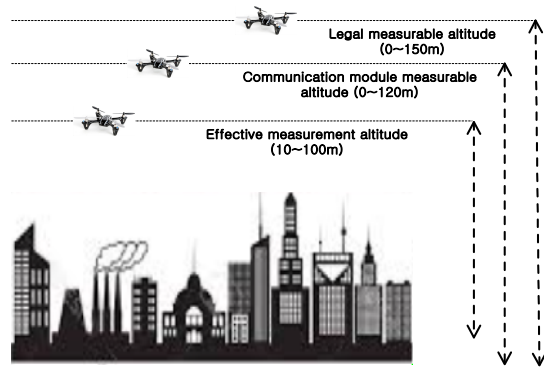


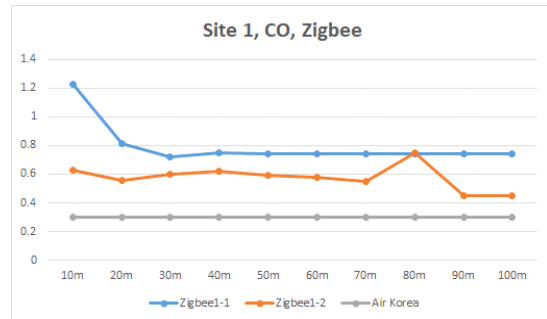
Fig. 5 Flight altitude of drones to measure air pollution

4.2. 대기오염별 측정수치 분석

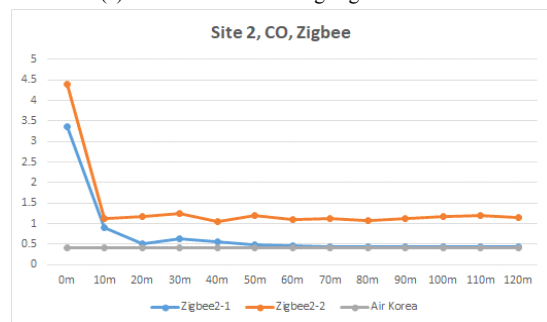
Zigbee모듈을 이용하여 CO 수치를 파악했을 때 그림 6과 같이 지상에서부터 고도가 높아지기 시작할 때 수치가 급격하게 낮아졌다. 이후 수치는 비교적 안정적으로 유지되었다. 초기의 높은 수치는 CO의 성질로 인한 것으로 파악된다. CO는 비중이 0.6으로 공기보다 가볍고 퍼지는 성질을 가지고 있으며 지상의 자동차 배기가스로부터 발생하는 경우가 많기 때문에 지상에 가까울수록 수치가 높은 것으로 파악할 수 있다. 고도의 증가에 따라 10m까지 급격한 수치의 변화가 감지되고 그 이후 구간에서는 급격한 수치의 변화는 없다. 다만 그림 6의 (C)와 같이 Site 3에서 측정했을 때 고도의 증가에 따라 수치는 비교적 적어지는 경향을 나타내었다.

CO 측정을 위한 적정고도는 10m 이상의 고도에서 고도의 상승에 따라 비교적 일정한 수치를 보여주므로 지상 약 10m 이상의 고도에서부터 비행 여건에 따라 100m까지는 가능하다고 판단할 수 있다. 또한 통신모듈의 성능에 따라 측정가능 고도인 150m까지 고도를 더 높이는 것도 가능하다.

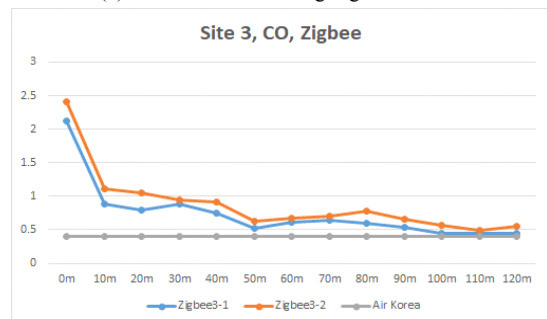
그림 7은 Bluetooth 모듈을 이용하여 CO 수치를 파악한 경우를 보여준다. Zigbee모듈과 유사하게 지상으로부터 측정을 시작할 때 10m까지 측정 수치가 높았다가 이후 고도를 높여나갈 때 수치가 급격하게 변하지 않고 수치는 비교적 안정적으로 유지되었다. 하지만 Zigbee 모듈의 분산값이 Bluetooth 보다 높았다.



(a) CO measurement using Zigbee at Site 1

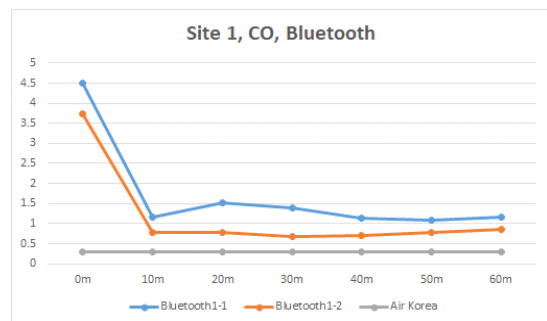


(b) CO measurement using Zigbee at Site 2

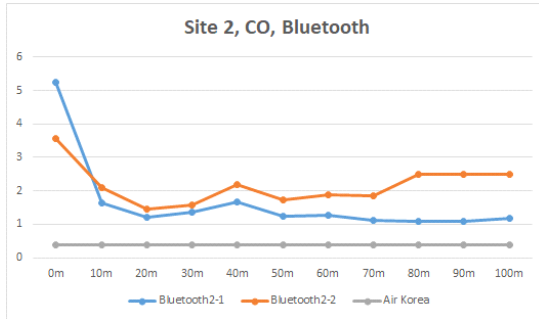


(c) CO measurement using Zigbee at Site 3

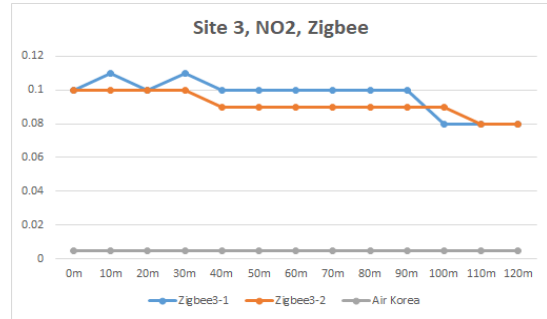
Fig. 6 CO measurement using Zigbee (ppm)



(a) CO measurement using Bluetooth at Site 1

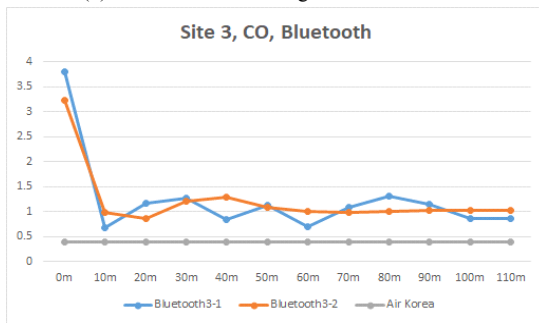


(b) CO measurement using Bluetooth at Site 2



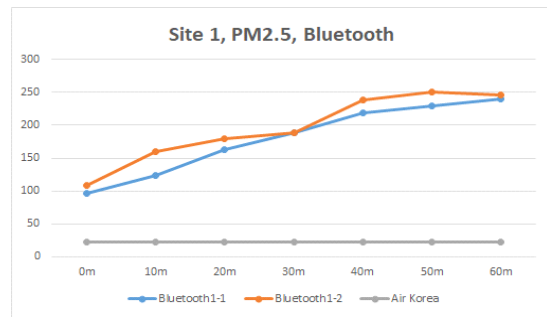
(c) NO₂ measurement using Zigbee at Site 3

Fig. 8 NO₂ measurement using Zigbee (ppm)

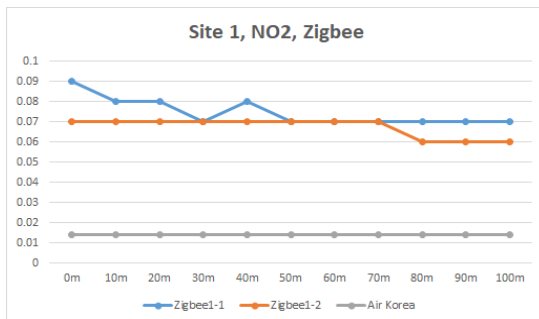


(c) CO measurement using Bluetooth at Site 3

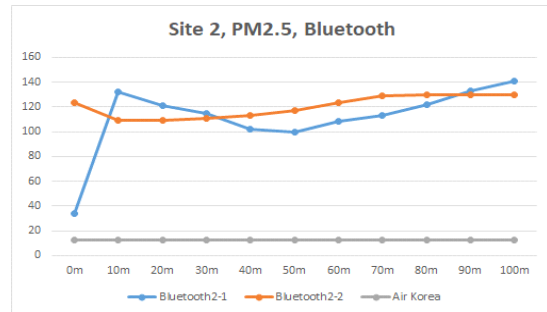
Fig. 7 CO measurement using Bluetooth (ppm)



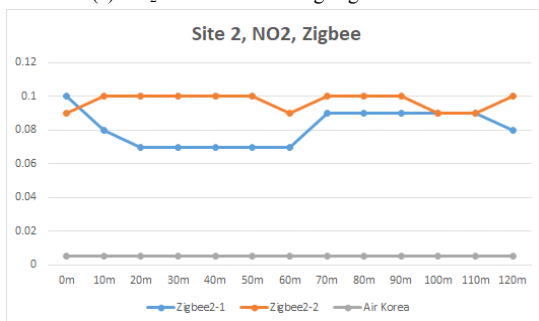
(a) P2.5 measurement using Bluetooth at Site 1



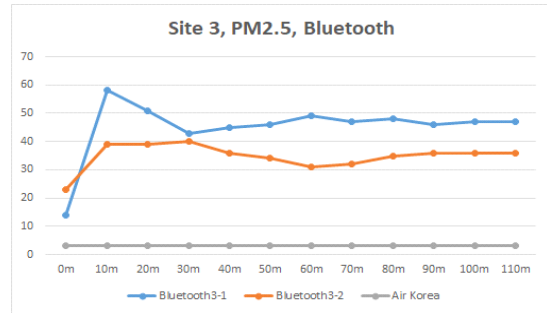
(a) NO₂ measurement using Zigbee at Site 1



(b) P2.5 measurement using Bluetooth at Site 2



(b) NO₂ measurement using Zigbee at Site 2



(c) P2.5 measurement using Bluetooth at Site 3

Fig. 9 P2.5 measurement using Bluetooth (µg/m³)

그림 8은 Zigbee 모듈을 이용하여 NO₂ 수치를 파악한 경우를 보여주고 있고, 그림 9는 Bluetooth를 이용하여 미세먼지(P2.5)를 측정된 결과를 보여준다. Zigbee를 이용하여 NO₂ 수치를 측정하였을 때, CO의 경우보다 초기의 수치 즉 지상의 수치가 급격하게 높게 측정되지는 않았다. Bluetooth를 이용하여 미세먼지(P2.5)를 측정하였을 때 초기에는 낮은 수치를 보였다가 이후에 비교적 안정적으로 유지되었고, 다만 Site 1에서는 고도의 증가에 따라 미세먼지의 수치가 증가하였다.

그림 10은 Zigbee를 이용하여 CO를 측정하였을 때 수치를 바(bar) 차트로 표현한 것이다. Site 1과 Site 3에서의 측정값 분포가 비교적 좁은 대역을 차지하고 있어 분산값이 적음을 알 수 있고, Site 2에서 측정된 값이 비교적 넓은 대역을 차지하고 있어서 분산값이 비교적 큰 것을 알 수 있다. 그림 11은 Bluetooth를 이용한 site별 CO 측정 수치를 바 차트로 표현한 것이다. 그림 10과 마찬가지로 Site 1과 Site 3에서 측정된 값이 Site 2에서 측정된 값보다 비교적 분산값이 적음을 알 수 있다. 그림 12는 Bluetooth를 이용하여 P2.5를 측정된 수치를 바 차트로 표현한 것이다. 그림과 같이 Site에 따라서 미세먼지의 분포는 매우 큰 차이를 보여주고 있다.

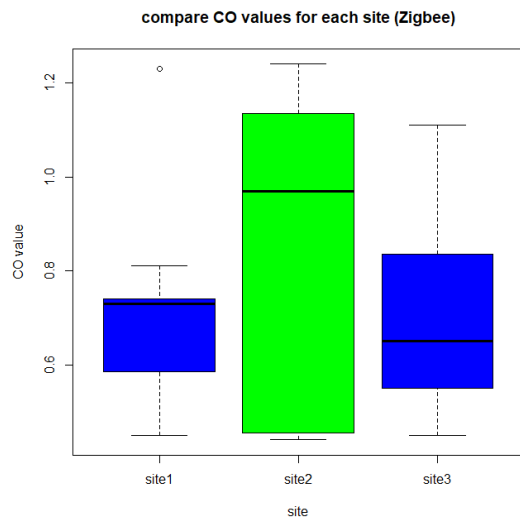


Fig. 10 Comparison of CO measurement by site using Zigbee($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

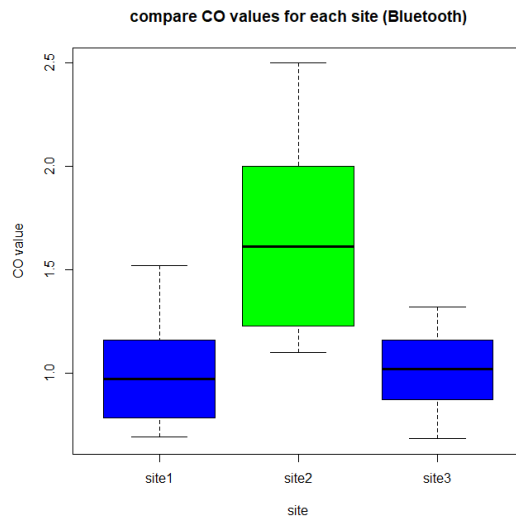


Fig. 11 Comparison of CO measurement by site using Bluetooth($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

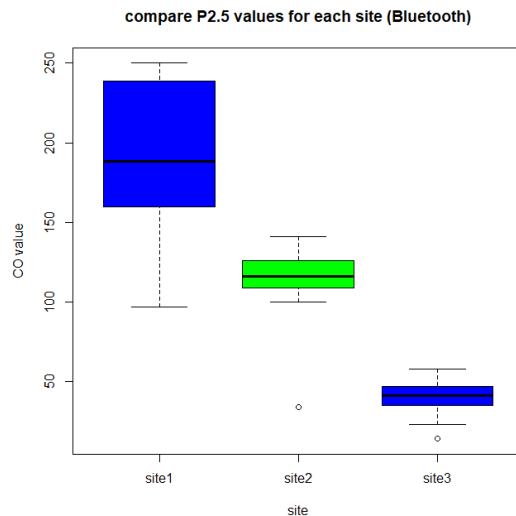


Fig. 12 Comparison of P2.5 measurement using Bluetooth($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

그림 13과 그림 14는 도심지역인 Site 1과 비교적 외곽 지역인 Site 3의 CO 수치와 미세먼지 P 2.5 수치 사이에 차이가 있는지를 판단한 것이다. 그림 13의 결과와 같이 p-value가 0.5보다 크므로 Site 1과 Site 3 두 지역의 CO 수치에 차이는 없다고 판단할 수 있다. 또한 그림 14의 결과에서 p-value가 0.5보다 극히 작으므로 Site 1과 Site 3 두 지역의 P2.5 수치 차이는 없다고 판단할 수 없다. 즉 두 지역의 미세먼지 P2.5차이는 있다고 판단할 수 있다.

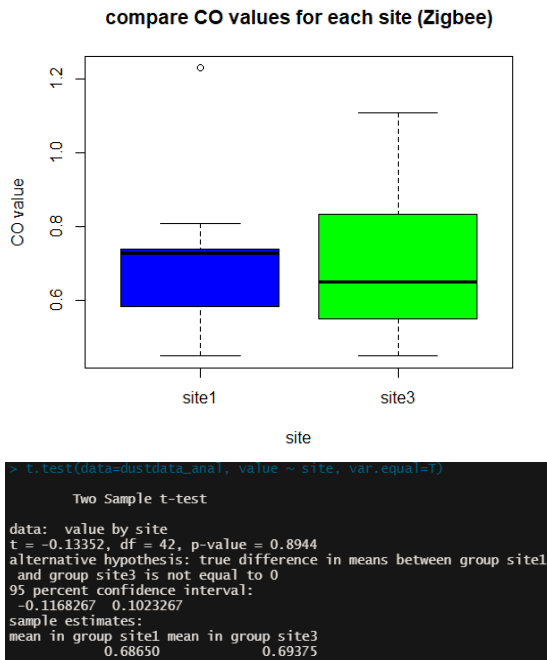


Fig. 13 Comparison of CO values between Site1 and Site3 (t-test)

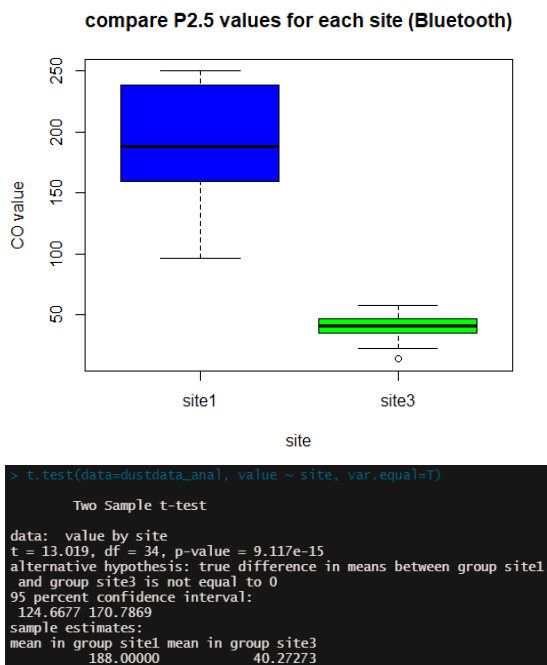


Fig. 14 Comparison of P2.5 values between Site1 and Site3 (t-test)

그림 15는 각 Site 별로 측정된 CO와 NO₂ 수치의 분산값을 표현한 것이다. 각 Site 별로 지상에서 측정가능 최대고도까지의 측정수치와 변동성이 심한 10m까지의 초기 측정 수치를 제외한 것을 비교하여 보여준다. 초기 측정치를 제외하였을 때 분산값에는 크게 차이가 없었다. 따라서 초기의 변동성이 심한 구간 10m를 제외한 그 이상의 구간을 유효한 측정적정고도로 할 수 있는 근거가 된다. 그림 16은 각 Site에서 측정한 미세먼지 P2.5의 분산값을 비교한 것이다. 그림 15와 같이 지상에서 측정가능 최대고도까지의 측정수치와 변동성이 심한 10m까지의 초기 측정 수치를 제외한 것을 비교하여 보여준다. Site 1에서는 고도를 높여나갈수록 측정수치가 높아지는 경향이 있었으므로 분산값이 비교적 크게 나타났으나, 변동성이 심한 10m까지의 구간을 제외한 분산값은 비교적 적음을 알 수 있다. 따라서 초기의 변동성이 있는 구간은 유효한 수치를 파악하기 위해 제외하는 것이 적절하다고 할 수 있다.

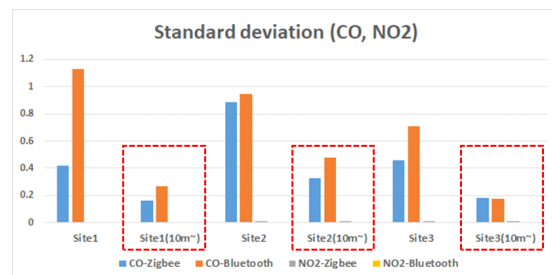


Fig. 15 Standard deviation of measurements for each site (CO, NO₂)

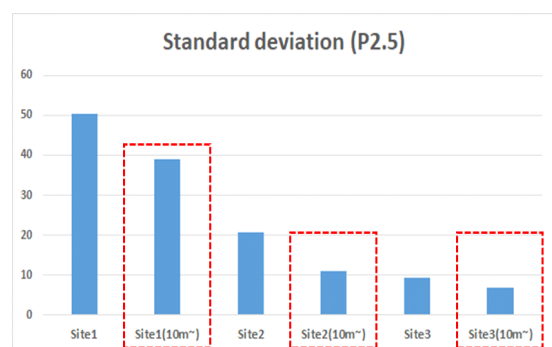


Fig. 16 Standard deviation of measurements for each site (P2.5)

V. 결 론

본 연구에서는 드론을 활용하여 도심지역의 대기오염원을 탐색하고자 할 때 통신 모듈 별 측정 가능한 최대고도와 유효한 측정고도를 파악을 위한 실험을 진행하였다. 실험결과 Zigbee 모듈은 측정가능 최대고도가 약 113.3m로 측정가능 고도는 비교적 높았으나 통신지연이 자주 발생하였고, Bluetooth 모듈은 최적가능 최대고도는 낮았으나 통신이 비교적 안정적이었다. 고도에 따른 대기오염원 별 측정가능고도 실험에서 초기의 10m까지는 대기오염의 성질 등으로 데이터의 변동성이 심하여 유효한 측정고도로 판단하기에는 문제가 있음을 발견하였다. 따라서 본 연구에는 실험을 통해 도심지역의 대기오염을 측정할 때 적절한 드론의 비행고도로, 법적으로 측정 가능한 구간인 법적 측정가능고도를 지상으로부터 150m까지의 고도로 도출하였고, 통신모듈의 성능을 감안한 통신모듈 측정가능고도로 지상으로부터 120m까지의 고도로 도출하였으며, 일정한 지연시간의 범위 안에서 안정적으로 데이터를 전달할 수 있는 고도인 유효 측정가능고도로 지상 10m부터 100m까지로 도출하였다.

본 연구의 실험에서는 일반적으로 자주 사용되는 통신모듈을 이용하였다. 통신모듈의 성능에 따라 통신모듈 측정가능고도는 변할 수 있을 것이다. 법적 측정가능고도도 국가와 지역에 따라 변할 수 있을 것이다. 본 연구의 실험을 통해 도시지역 대기오염원의 유효 측정가능고도로 지상 10m부터 100m까지로 파악하였으나, 추후 다양한 통신모듈과 실험환경 설정을 통해 보다 다양한 유효 측정고도가 도출될 수 있을 것이라 판단한다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (No.2021R1I1A3044091).

References

- [1] D. Tsouros, S. Bibi, and P. Sarigiannidis, "A Review on UAV-Based Applications for Precision Agriculture," *information*, vol. 10, no. 11, Nov. 2019.
- [2] J. Hernandez-Vega, E. Varela, N. Romero, C. Hernandez-Santos, J. Sanchez-Cuevas, and D. Gorham, "Internet of Things (IoT) for Monitoring Air Pollutants with an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) in a Smart City," *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, vol. 213, no. 1, pp. 108-120, Mar. 2018.
- [3] S. Kim and H. Jung, "Design and Implementation of Air Pollutant Monitoring System using Drone," in *Proceeding of the Korean Institute of Information Technology Conference*, Jeju Korea, pp. 313-316, 2021.
- [4] B. Kim, H. Lee, and S. Lee, "Proposal of fine dust concentration prediction system using neural network model and drone," in *Proceeding of 2021 Korea Society of Management Information System International Conference*, Seoul Korea, pp. 285-290, 2019.
- [5] J. Shin, I. Kim, D. Hwang, J. Lee, and S. Lim, "Availability Analysis on Detection of Small Scale Gas Emission Facilities using Drone Imagery," *Journal of Cadastre & Land InformatiX*, vol. 47, no. 1, pp. 213-223, Jun. 2017.
- [6] J. Seo, S. Chae, J. Shim, H. Kim, and T. Han, "Research on post-response technology for environmental disasters using drones and analysis of research trends," *Korea Environmental Policy Evaluation Institute report*, vol. 16, no. 9, pp. 1031-1043, Jun. 2013.
- [7] N. Kim, "Development of atmospheric environment information collection system using drone," *Smart Media Journal*, vol. 7, no. 4, pp. 44-51, Dec. 2018.
- [8] S. Ryu, J. Kim, J. Kim, J. Yoo, B. Gong, and J. Park, "A Study on Air Pollution Point Source Tracking Method in the Industrial Complex Area Using Drone and Real-time Analyzer," *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, vol. 19, no. 4, pp. 259-266, Dec. 2019.
- [9] J. Kim, Y. Kim, H. Oh, Y. Son, H. Do, S. Kim, and K. Kwak, "Roadside Monitoring of Vertical NO₂ Distribution using Drone Measurement at an Urban Site," in *Proceeding of 2021 Korean Society for Atmospheric Environment Conference*, Changwon Korea, pp. 421-421, 2021.
- [10] W. Choi, J. Kim, Y. Park, G. Ahn, and J. Lee, "Characteristics of Spatial Distribution of Particulate Matters in the Atmosphere around the Large Point Sources in Chungnam: Based on the Drone Measurement," in *Proceeding of 2020 Korean Society for Atmospheric Environment Conference*, Online, pp. 165-165, 2020.
- [11] C. Lee, J. Han, S. Han, D. Choi H. Song, H. Joo, K. Kim, G.

- Cheon, and G. Moon, "Vertical Distribution of Air Pollutants 2 in Korea Using a Drone Monitoring System," in *Proceeding of 2021 Korean Society for Atmospheric Environment Conference*, Jeju, Korea, pp. 234-234, 2021.
- [12] S. Lee, H. Hwang, and J. Lee, "Measurement of Vertical Distribution of Air Pollutants near Roads using a Drone," in *Proceeding of 2021 Korean Society for Atmospheric Environment Conference*, Jeju, Korea, pp. 292-292, 2021.
- [13] G. Rohi, O. Fjofodomi, and G. Ofualagba, "Autonomous monitoring, analysis, and countering of air pollution using environmental drones," *Heliyon*, vol. 6, no. 1, Jan. 2020.
- [14] Q. Gu, D. Michanowicz, and C. Jia, "Developing a Modular Unmanned Aerial Vehicle(UAV) Platform for Air Pollution Profiling," *Sensors*, vol. 18, no. 12, pp. 4363, Dec. 2018.
- [15] R. Noori and D. Dahnili, "The Effects of Speed and Altitude on Wireless Air Pollution Measurements using Hexacopter Drone," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 11, no. 9, Sep. 2020.
- [16] N. Zema, E. Natalizio, and C. Calafate, "Using UAV-Based Systems to Monitor Air Pollution in Areas with Poor Accessibility," *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2017, no. 1, Aug. 2020.
- [17] H. Hedworth, T. Sayahi, K. Kelly, and T. Saad, "The effectiveness of drones in measuring particulate matter," *Journal of Aerosol Science*, vol. 152, no. 1, Feb. 2021.
- [18] S. Pochwala, A. Gardecki, P. Lewandowski, V. Somogyi, and S. Anweiler, "Developing of Low-Cost Air Pollution Sensor –Measurements with the Unmanned Aerial Vehicles in Poland," *Sensors*, vol. 20, no. 12, pp. 1-17, Jun. 2020.
- [19] D. Peleshko, T. Rak, J. Noennig, V. Lytvyn, and V. Vysotska, "Drone Monitoring System DROMOS of Urban Environmental Dynamics," in *Proceeding of the 1st International Workshop IT Project Management*, Slavsko, Ukraine, pp. 178-193, 2020.
- [20] D. Gallacher, "Drone Applications for Environmental Management in Urban Spaces: A Review," *International Journal of Sustainable Land Use and Urban Planning*, vol. 3, no. 4, pp. 1-14, Jan. 2016.
- [21] M. Rutkauskas, M. Asenov, S. Ramamoorthy, and D. Reid, "Autonomous multi-species environmental gas sensing using drone-based Fourier-transform infrared spectroscopy," *Optics Express*, vol. 27, no. 7, pp. 9578-9587, Mar. 2019.
- [22] G. Bolla, M. Casagrande, A. Comazzetto, R. Moro, M. Destro, E. Fantin, G. Colombatti, A. Aboudan, and E. Lorenzini, "ARIA: Air Pollutants Monitoring Using UAVs," in *Proceeding of the 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*, Rome, Italy, pp. 1-5, Jun. 2018.
- [23] S. Lee, Y. Lee, Y. Lom, J. Kim, and D. Shin, "Comparison Study of Nitrogen Dioxide and Asthma Doctor's Diagnosis in Seoul," *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, vol. 32, no. 6, pp.575-582, Jun. 2016.
- [24] D. Seo and K. Yoon, "A Study on the Smart Filter System for External Environment Recognition," *The Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 2, pp. 271-278, Feb. 2021.
- [25] K. Chang, "Bluetooth: a viable solution for IoT? [Industry Perspectives]," *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, no. 6, pp. 6-7, Dec. 2014.
- [26] I. Kuzminykh, A. Snihurov, and A. Carlessen, "Testing of communication range in ZigBee technology," in *Proceeding of the 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*, Lviv, Ukraine, pp. 133-136, 2017.



하일규(Ha Il-Kyu Ha)

1992 영남대학교 전산공학과 학사
2003 영남대학교 컴퓨터공학과 박사
2015~현재 경일대학교 컴퓨터사이언스학부 조교수
※관심분야: 드론기반통신, 드론기반목표물탐색, Body Area Networks, 빅데이터처리 등



김기현(Ki-Hyun Kim)

2022 경일대학교 컴퓨터사이언스학부 학부생
※관심분야: 드론기반통신, 드론기반목표물탐색, 빅데이터처리 등



김진형(Jin-Hyung Kim)

2022 경일대학교 컴퓨터사이언스학부 학부생
※관심분야: 드론기반통신, 드론기반목표물탐색, 빅데이터처리 등