

무인항공기를 응용한 미세먼지 모니터링 시스템 개발

이재호, 한재구*, 김영현
한국건설기술연구원 건설정책연구소

Fine dust monitoring system development applying for UAV

Jaeho Lee, Jae Goo Han*, Young Hyun Kim

Dept. of construction policy research, Korea institute of civil engineering and building Technology

요약 최근 무인항공기를 이용한 다양한 응용기술이 개발되고 있으며 건설 분야에서도 무인항공기를 이용해 기본 계획을 위한 측량부터 시설물 유지관리 단계까지 공사의 전 단계에 투입될 수 있도록 기술개발을 진행하고 있다. 기술적으로도 많은 발전이 이루어져서 사용자들의 활용 범위가 넓어졌으며 단순히 작업의 목적만이 아닌, 취미나 레저로도 많은 각광을 받고 있다. 본 논문에서는 무인항공기를 이용한 사례를 인간의 오감을 중심으로 기능 정리 및 분류하였다. 분류된 기능 체계 내에서 후각에 해당하는 미세먼지 모니터링 시스템을 개발하여 건설 현장 내에서 파일럿 테스트를 시행하였고, 저감 장치 효과를 검증하기 위해 전후 미세먼지 측정을 분석하였다. 모니터링 지역 내에서 PM10 기준, 69 PPM에서 52.5 PPM으로 최대 24% 저감하는 수치를 확인하였고, PM2.5 기준, 47.5 PPM에서 37 PPM으로 22% 감소되는 효과를 확인하였다.

Abstract Various application technologies using uncrewed aerial vehicles (UAV) have been developed, and in the field of construction, the company is also developing technologies that can be used to enter all stages of construction, from surveying for basic planning to the maintenance of facilities. Technological advances have also been made, which have broadened the scope of use for users and attracted considerable attention for work, hobbies, and leisure. This study examined the use and development of the technology for UAVs and organized the information that could be acquired by the operator around the human five senses. The status of the development of UAV technology was determined using a classified functional system. A particulate dust monitoring system corresponding to the sense of smell was developed, and piloted tests were carried out within the construction site. The utilization and operation of the dust monitoring system were verified by assessing the potential of the particulate dust reduction device to analyze the measurement of particulate matter before and after implementation. Within the monitoring area, a maximum 24% reduction from 69 PPM to 52.5 PPM at PM10, and a 22% reduction from 47.5 PPM to 37 PPM at PM2.5 were confirmed.

Keywords : UAV, Infrastructure System, IPO Model, Drone, Construction

1. 서론

무인항공기의 개념은 사용자가 직·간접적으로 항공기 비행에 개입하여 목표지점에 정확하게 도달하는 것으

로 접근하였다[1]. 오늘날 무인항공기는 다양한 목적을 가진 사용자의 접근과 비행 조작이 용이해지면서 활용 저변이 확대되었다. 일반적으로, 지면에서 2차원적인 시야와 활동이 무인항공기에 부착된 고해상도 카메라를 통

본 논문은 국토교통부 / 한국건설기술연구원 스마트건설지원센터 지원으로 수행되었음.(과제번호: 20220212-003, 20220212-004)

*Corresponding Author : Jae Goo Han(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

email: jghan@kict.re.kr

Received June 27, 2022

Accepted August 3, 2022

Revised July 27, 2022

Published August 31, 2022

해 3차원 이미지로 정보를 전달하면서 범위가 확장하였다. 또한 정확한 목적지 도달 외에도 비행 간 사진측량 및 모델링을 통해 전반적인 산업 분야에 적용하고 있다.

건설 분야에서 측량 및 시설물 유지관리를 위해 무인항공기를 도입하고 있으며, 현장 내의 환경 및 안전 모니터링을 위해 무인항공기를 활용한 응용 기술을 개발 중이다. 특히, 면적 1,000m² 이하 소규모 현장은 정부와 지자체의 법적 규제의 사각지대로 세륜 시설, 방진막, 그리고 살수차 등의 미세먼지 저감 조치 의무 사항에서 제외되어 있다.

본 논문은 전반적인 산업 분야에서 중점적으로 적용하고 있는 무인항공기 활용과 관련된 문헌조사를 중심으로, 목적과 기능을 IPO (Input-Process-Output, IPO) 모델을 기반으로 도식화하여 무인항공기 응용 기술개발을 위한 분류 체계를 제시한다. 도식화 된 항목 내의 기능은 인간의 오감(Five-senses)으로 인지하는 부분을 Input으로, 기능에 대한 데이터 분석 및 의사결정까지의 흐름을 Process로, 마지막으로 의사결정 이후 무인항공기의 비행 혹은 동작하는 것을 Output으로 구분한다. 문헌조사로 도출된 IPO 모델을 통해 인간의 오감 중 후각(입자 산출)에 해당되는 응용 기술이 적용된 모듈을 무인항공기에 탑재하고, 미세먼지 모니터링 시스템에 필요한 기능(지형 3D 모델링, 미세먼지 수치 가시화, 지형정보 내 미세먼지 정보 통합)을 구현한다. 또한, 1,000m² 이하 건설 현장 내의 저감 활동을 위한 분사 무인항공기의 효과와 기술 수준을 검증한다.

2. 국내외 무인항공기 응용 기술 개발

사례 현황

2.1 국내 문헌 조사

국내 문헌조사를 위한 무인항공기의 정의로 국내 무인항공기 관련법에서는 자체중량 포함 180kg 이하의 길이 20m 이하인 무인비행선으로 범위를 두고 있다[2].

대중적으로 무인항공기의 활용이 빈번하게 늘어남에 따라, 산업 분야에 활용되는 작업 품셈을 제시하고 무인항공기 활동에 대한 경제성을 분석한 사례가 있다[3]. 품셈에 대한 제안으로 1km²의 면적을 1일 이내로 처리가 가능하다고 판단하여 품셈을 제시하였으나, 현재 문헌에서 제시한 조건보다 높은 성능의 이미지 처리 속도와 장비의 발전으로 일일 촬영범위의 확대가 가능할 것으로

예측된다.

국내 건설 현장에서 토량의 물리적인 이동에 대해서 오차를 줄이기 위한 시도가 진행되었으며 총 11,000m²의 면적의 택지 개발 공사를 대상으로 5% 이내의 오차를 을 파악한 사례가 있다[4].

이러한 오차를 최소화하기 위해 라이더(Light Detection And Ranging, LiDAR)를 통한 토공 물량 산정을 하여 정확도를 향상하였으며, 위성 항법 장치(Global Navigation Satellite System, GNSS)의 측량 대비 10분의 1로 오차가 감소하였다[5].

무인항공기가 공사 현장 및 시설물의 사면 붕괴와 같이, 물체를 파악하여 위험 요소 및 환경오염을 감시하지만 법·제도적인 기반이 이루어지지 않았다고 판단하고 있다. 따라서, 시각적인 효율 및 실용화를 높일 수 있는 삼림 훼손 지역의 구분을 기준으로 성토와 절토량을 분석하여 단시간 저비용으로 복원계획 및 기초 자료를 생성할 수 있다고 기대하였다[6].

이러한 이미지 분석으로 토량과 같은 지상의 부피 변화가 시각적으로 구분되는 것을 중점적으로 연구하고 있으며, 그 외에 저변 확대 방안으로 국내 법 체계에 대한 개선 사항이 1) 25kg 이하 드론의 비행 활성화 지원, 2) 500m 이하의 고도 제한 조정, 3) 통신 보안 대역 조정을 제시하였다. 또한, 군사적인 목적의 활용도 가능한 다양한 범위의 관점을 제시한 사례도 있다[7].

최근에는 미세먼지 간이 측정모듈을 드론에 탑재하여 비행과 함께 미세먼지 맵핑을 통해 복합적인 시스템 구현을 시도하고 있다[8].

2.2 국외 문헌

국외 사례에서는 국내 사례와 두괄적으로 비교되는 사항이 연구에 활용되는 무인항공기의 주요 기동 방식의 차이가 있었다. 국내에서는 무인항공기가 주로 회전익을 활용하면서 이착륙 공간을 수직으로 비행함에 따라 어디서든 공간 확보가 가능하고, 지정 고도의 호버링을 통해 다양한 시점의 안정적인 데이터를 확보하는 것에 목적을 두고 있다. 그러나 국외는 회전익보다는 고정익을 통해서 하향풍에 대한 간섭을 최소화하며 장시간 비행의 이점으로 기상 데이터와 회전익보다 넓은 범위의 맵핑 데이터를 확보함에 차이가 있다[9].

무인항공기 응용 기술에 대한 검토로 170여개 다수의 논문을 참고하여 분석한 결과로는 무인항공기의 개발 수준에 대한 한계점과 활용 기술에 대한 응용 분야를 엔터테인먼트 및 설계 등에 접목될 것을 기대하였으며, 기능

적인 부분에서도 꾸준히 응용할 수 있는 소형화된 모델이 개발되고 있으며 단순한 이미지 분석 이상의 데이터 수집이 가능하다고 예측하고 있다[10].

국의 드론 활용 분야의 추세는, 국내 문헌의 목적과 유사하게 모니터링을 중심으로 연구 개발이 진행되고 있으며, 주요 인프라 시설물 중 하나인 파이프라인 모니터링에 대해 비행 중량에 따른 비행시간과 임무에 대한 시나리오를 제시하고 있다[11].

또한, 국내 문헌 사례와 같이 삼림 훼손 지역 파악하거나 재난 현황을 통해 분석 및 예보하기 위한 무인 항공 체계(Unmanned Aerial System, UAS) 개념으로 비행에서 받은 데이터를 운영에 활용할 수 있는 수준으로 확장하고 있다[6,12,13]. 농경지의 경작도에 대해서도 무인항공기의 촬영으로 경작 방법에 대해 유추가 가능할 수 있을 정도의 세밀화도 연구되고 있다[14].

모니터링 분야에서는 해안 주변에서 해수면으로부터 약 5.7m의 고도로 저공 비행하며 파도의 굴절을 투시하여 해양 생물 서식지를 3차원 맵핑을 구현하며 일반적으로 단순한 시각 맵핑의 기술을 심화하여 개발하고 있다[15].

건설 분야에서는 유지관리 단계의 모니터링으로, 교량 하부를 촬영하여 안전진단을 시도한 사례가 있다[16]. 일반적인 기성 무인항공기를 통해 카메라를 상향으로 촬영하여 교량 부식 정도에 대한 분석을 진행하였다. 그러나 완전한 수직 상향 촬영이 아닌, 측면에서 상향으로 촬영하여 이미지를 분석하였다. 교량 하부를 촬영하면서 비행 시, 교각과 같은 장애물에 대한 회피 불가 위험성 때문에 측량과 같은 기법으로 전면적인 촬영을 이용한 맵핑까지는 이루어지지 않았다.

건설 현장의 안전과 관련된 연구로, 작업자에 대해 안전 관리자가 주기적으로 활동하는 무인항공기에 스피커를 부착하여 음성 지원 기능으로 작업자들의 활동에 대해 주의 및 안내를 할 수 있는 연구도 진행 중이다[17]. 그리고 설계와 실제 공사에 대한 기성 판단 및 감리의 역할을 비교할 수 있도록 BIM과 3D 맵핑을 비교한다[18,19].

고속도로에서도 교통 정보를 파악하고 시설을 이용하고 있는 운전자에게 실시간 정보를 제공하기 위해 시스템을 구현한 시도가 있다[20].

무인항공기에 대한 인식은 일반적으로 높은 고도에서 촬영하는 방식으로 실외에서 주로 활용하지만, 실내에서 활용할 수 있도록 하향풍의 영향이 적은 소형 회전의 무인항공기로 실내에서 운영을 하면서 자동화 모니터링을 하는 방안에 대한 연구 사례도 있다[21].

또한, 무인항공기의 응용 기술로, 코로나 바이러스와 같은 방역을 위해 분사기능을 추가하였다[22]. 최적의 결과는 높이 2.4m 에 0.5m/s 속도로 비행 할 경우 유효한 방역이 이뤄 질 것으로 도출하여 무인항공기 응용분야의 실질적인 효과를 검증했다.

2.3 무인항공기 기능 분류

Fig. 1 과 같이, 무인항공기를 이용한 응용기술을 검토하여 IPO 모델을 통해, 무인항공기의 기술개발의 현황을 분류하고 지표로 활용될 수 있도록 문헌 정보의 내용은 외부 환경의 영향 요소로 인식할 수 있는 기능을 인간이 대표적으로 인지하는 시각, 청각, 후각, 미각, 촉각, 오감으로 분류하고 구조화하였다. 그리고 무인항공기의 전략적 기술 발전 방향과 요소 기술에 대해 도출하였다.

기능에 대한 인지개념을 전제로, 무인항공기의 기본적인 감각은 시각을 중심으로 분석 및 판단의 도구로 활용되고 있다.

무인항공기의 청각 관련 기능에서, 회전익은 비행 중 최대 소음을 측정할 결과, 실내용 제품은 67 dB ~ 83 dB 수준이며, 실외용 제품은 80 dB ~ 93 dB 수준으로 가까운 거리라도 청각의 인지는 어렵다[23]. 고정익은 지속적으로 비행하기 때문에 실내나 저고도는 기본적으로 비행에 요구되는 속도대비 측정이 어려우며, 높은 고도 또한, 거리 때문에 현실적인 기술의 발전이 필요하다.

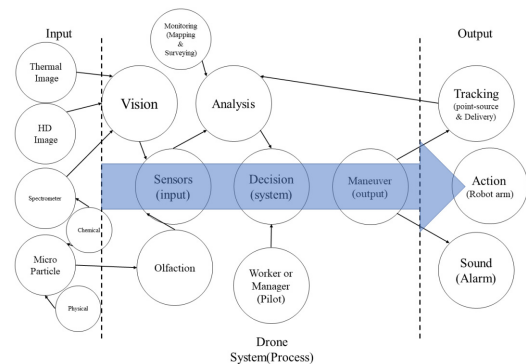


Fig. 1. IPO Model based on function of drone application

직접적인 접촉 인지감각인 미각과 촉각은, 현재 무인항공기의 강점으로 활용하고 있는 시각적 확장성과 모니터링에 비해, 상대적으로 접촉 기능을 구현하기 위한 높은 적재용량을 요구하기 때문에 효율성에는 한계점이 노출되고 있다. 촉각과 유사한 열감지와 같은 기술은 시각

적으로 확인할 수 있는 열화상 센싱이 대체할 수 있다고 판단하였기 때문에 시각 기능으로 포함하였다.

간접적인 접촉의 후각 기능은 미세입자에 대한 접촉인 지로 판단할 수 있지만, 후각은 미각, 촉각과 다르게 비행하면서 미세입자를 인지하기 때문에 무인항공기에 동작에 대한 영향을 주지 않고 기능을 수행할 수 있다. 추가적으로 무인항공기에 적재 가능한 소형 모듈러에 간이 미세먼지측정기를 탑재함에 따라 구현이 용이할 수 있다. 따라서 현재 무인항공기의 기능적 분류는 크게 시각과 후각이 주인지 기능으로 구분할 수 있다.

2.3.1 시각 기능

인간의 주요 판단 근거가 되는 시각화 분석은 고해상도 카메라를 활용하거나 이미지 간의 물리적 측정 정확도를 위해 라이다(Light Detection And Ranging, LiDAR) 센서를 활용하여 3D 이미지 모델링을 주요 목표로 한다. 사용자가 목표한 비행 구간 내에 전체적인 측량을 중심으로 응용기술이 발전하고 있으며, 추가적으로 열화상 기능을 추가하여 군사 목적 및 화재 발생 등을 모니터링하거나 정온 동물들의 생태계 파악을 위해 활용할 수 있다.

또한, 지구 궤도 위성에서 활용하는 분광기와 같은 분석 장비를 무인항공기에 모듈러로 탑재하여 목표하는 지역 범위 내의 지질 성분비를 파악하여 지반의 사전정보를 제공함에 따라 토공사 작업량 및 시간에 대한 구체적인 예측을 계산할 수 있을 것이라 기대된다.

2.3.2 후각 기능

후각 기능으로, 실제 인원이 직접적으로 투입하지 않는 무인항공기의 강점을 활용하기 위해, 오염 및 재난지역에 투입하여 기체상 미세입자의 유해성을 감지함과 동시에 주변 작업자 및 거주자의 대피를 조기 경보할 수 있다. 일반적인 이미지 분석은 고해상도 대용량 데이터를 자체 저장하고 비행 종료 후에 고성능의 데이터 분석 장비를 요하지만, 후각 기능은 입자를 단순 수치로 표현하기 때문에 데이터 용량이 적어 실시간 데이터 전송을 중심으로 즉각적인 반응에 도움을 줄 수 있다.

2.3.3 비행 및 기동 기능

무인항공기에서 표현 할 수 있는 기능으로, 비행 소음 이상의 경고음을 발생하거나 능동적으로 작업자에게거나 주의·경고 수준의 알림을 줄 수 있다. 다른 행동의

기능이 있기 위해서는 로봇팔과 같은 자율적인 구조를 요구하지만, 무인항공기의 적재용량의 한계와 적재된 기체를 구동하기 위한 별도의 에너지를 요구하기 때문에 시스템에서 자체적으로 지원할 수 있는 성능 향상이 필요하다. 드론을 이용한 로봇 팔이 구현될 경우, 인간이 접근하기 어려운 난지역(오염지역 및 위험지역)의 투입과 함께 안전재해사고의 경감할 수 있는 대안이 될 수 있다.

3. 미세먼지 모니터링 시스템

IPO 모델을 활용한 기능 분류 체계에서 ‘후각’ 기능에 해당하는 입자 산출 모듈을 제작 및 무인항공기에 탑재하여 미세먼지 모니터링 연구를 수행하였다. 사전 연구에서 수행한 미세먼지 측정을 위성으로 제공되는 지형정보의 시차로 현장의 정보를 제 시간에 반영하지 못하는 한계점을 해결하고 미세먼지 오염 저감 활동에 대한 검증 위해, 실험 설계의 시나리오를 Fig. 2에서 제시하였다[8].

Fig. 2에 제시된 내용으로 미세먼지 모니터링의 사전 작업으로 측정 데이터를 반영하기 위한 맵핑을 진행하고, 정해진 지역 내의 미세먼지를 측정한다. 그리고 미세먼지 측정의 차이점을 확인하기 위해 저감 활동이 가능한 무인항공기를 투입하여 저감 작업을 하고, 이후의 저감 효과를 확인하기 위해 모니터링을 하는 방식으로 설계하였다.

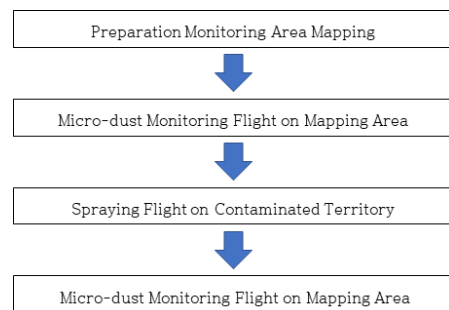


Fig. 2. Design of Experiment

시스템 개발의 시나리오는 1) 사전 맵핑, 2) 맵핑된 지형정보 기반의 미세먼지 측정, 3) 별도의 저감 활동, 그리고 4) 전후대비 비교분석이 가능한 미세먼지 재측정으로 구성되어 있다. 그 외에 별도의 저감 활동을 포함하지 않더라도, 주기적인 미세먼지 모니터링을 통해 건설 현

장에서 소규모로 발생하는 미세먼지 오염을 파악하여 주변 지역의 알람 및 정보를 실시간으로 제공할 수 있다. 시스템의 오염도 판단 근거는 한국환경공단의 오염도와 동일하게 기준을 반영하였으나 오염도 판단기준이 저감 무인항공기의 비행 효과를 시각적으로 차이를 구분하기에는 넓은 범위를 보유하고 있었다.

시험 일시 및 장소는 2022년 1월 6일, 인천광역시 서구 불로동 택지개발공사현장 내에서 진행 하였으며 Fig. 3 에 제시된 맵핑은 공사 작업 전에 시행하여 모니터링 시스템 내에 사전 지형을 반영하였다. 당시, 환경공단에서 제공하는 에어코리아(airkorea.or.kr)의 일일평균미세먼지는 PM10 60ppm으로 '보통', PM2.5 35ppm으로 '나쁨'으로 안내되었다.

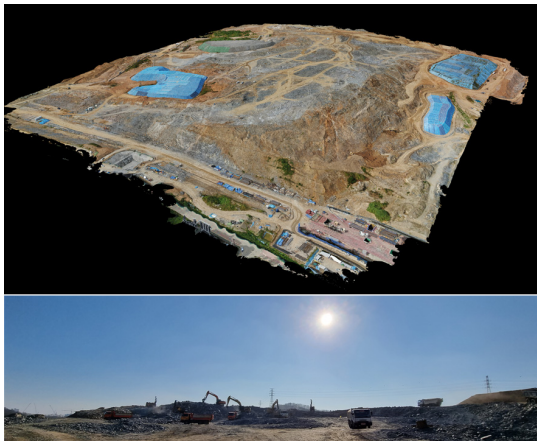


Fig. 3. Mapping and Constructing Area

3.1 미세먼지 측정 및 분사 드론 준비

사전 맵핑 정보를 반영하여 미세먼지 농도 현황을 파악하기 위해 미세먼지 측정과 저감 드론을 별도로 준비하였으며, Fig. 4에서 준비된 방수포는 이착륙 시 발생하는 하향풍으로 인한 먼지를 발생차단하고 장애물이 없는 곳을 확보하기 위해 설치되었다.

미세먼지 측정을 위한 모듈 및 모듈 내에 센서에 대한 사양 정보를 Table 1,2와 같이 구축하였다.

비행 이착륙 지점과 미세먼지 모니터링 지역 간의 거리는 100m 정도로 이착륙에 대한 미세먼지 데이터의 오염을 피할 수 충분한 거리를 확보하였다. 미세먼지 모니터링 고도는 이착륙지점 기준 30m로 수평 범위는 약 정도 45m에 위도 20m로 건설현장의 미세먼지 저감 활동에 대한 법적 규제가 되지 않는 1,000m² 이내의 범위를 모니터링 하였다.

Table 1. Specification of sensor [8]

PPM	0.3~1.0, 1.0~2.5, 2.5~10	µm
Efficiency	50 % @ 0.3 µm 98 % @ >0.5 µm	
Scope of effect	0~500	µg/m ³
Max. scope	≥1000	µg/m ³
Resolution	1	µg/m ³
Max. Consistency Error (PM2.5)	±10% @ 100~500 µg/m ³ ± 10 µg/m ³ @ 0~100 µg/m ³	
Volume	0.1	Litre
Single reaction time	1	Second

Table 2. Specification of fine dust measurement module [8]

Weight	650 g
Volume (L×W×H)	165 × 134 × 60 mm
Time	4 hours
Battery	5,000 mAh , 5V2A
Operation Temp.	-20 ~ +50 ℃
Sensor	Plantower PMS3003
Measurement	PM1.0, PM2.5, PM10
GPS	ublox NEO-6M-0-001
Communication Speed	9600 bps
Protocol Sign	GPS satellites_HDOP_latitude_longitude_date _height_velocity_CF_PM1.0 CF_PM2.5 CF_PM10 AT_PM1.0 AT_PM2.5 AT_PM10
Transmission Distance	2 km

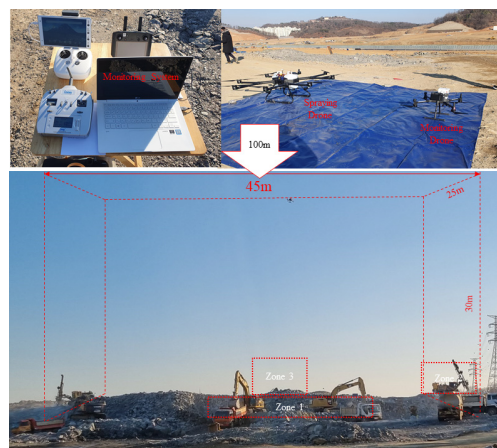


Fig. 4. Monitoring Drone and Spraying Drone on the Landing Screen

저감 활동 전과 후를 기준으로 미세먼지를 모니터링 하였으며, 본 실험에서는 미세먼지 저감 활동에 대한 검증 을 주목표로 하기에, 저감 드론에 대한 정보는 간략하 게 요약하여 제시하고자 한다. 저감 드론은 분사압력 100 Bar, 분사범위는 비행방향의 수직 5m 범위로 배터 리를 공유하기 때문에 비행 중 지속적인 분사가 가능한 것으로 제작되었다. 저감 비행은 측정 고도보다 3m 높은 곳에서 실시하였다.

3.2 미세먼지 측정 및 분사 드론 비행

1차 모니터링은 미세먼지 저감 비행을 하기 직전의 활 동으로 15시 57분에 시행하였으며 이착륙을 포함한 비 행시간이 총 275초이다. 모니터링 구간의 비행 시간은 158초로 약 900m²의 면적을 비행하였다. 2차 모니터링 비행은 저감 비행이 종료된 후, 16시 16분에 비행하였 으며, 총 241초 비행으로 모니터링 맵핑 구간은 118초로 1차와 다른 경로로 변경하여 모니터링 하였다.

경로 상의 위치 및 데이터를 비교하여 공통된 주요 맵 핑 유효데이터는 76개로 한정하였다.

Fig. 5, 6 에서 모니터링 2회의 비행을 통합한 미세먼 지 분포도에서 유사한 오염원이 발생하는 곳은 총 3 곳 으로 파악되었으며, 파악된 곳은 앞서 제시된 Fig. 4에서 Zone 1, 2, 3으로 구분하였다. Zone 3는 Fig. 4 시점인 2차원 시야에서는 파악하기 어려운 작업 활동을 분포도 를 통해 확인할 수 있었다.

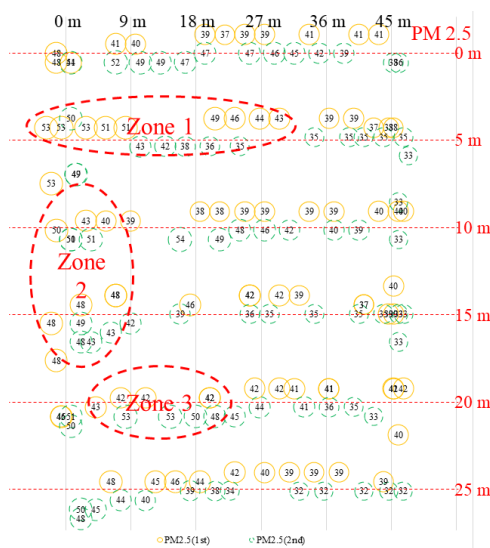


Fig. 5. Micro Dust Distribution Chart (PM2.5)

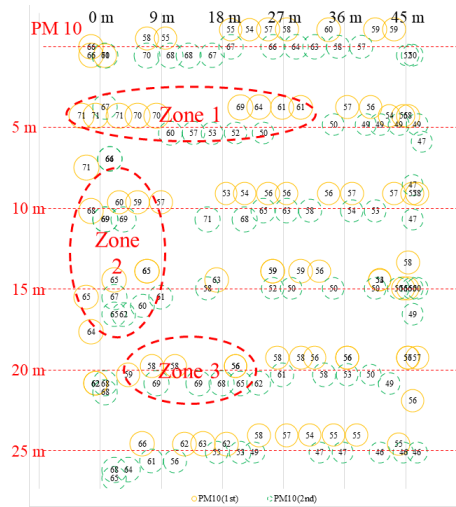


Fig. 6. Micro Dust Distribution Chart (PM10)

4. 미세먼지 모니터링 시스템 구현

4.1 시스템 내 미세먼지 오염도 시각화

본 논문에서 구축한 미세먼지 운영시스템의 미세먼지 오염도에 대한 시각화는 환경공단에서 제공하는 4단계 (좋음, 보통, 나쁨, 매우 나쁨) 판단기준과 동일하게 구분 하였다.

그러나 저감 효과에 대한 판단근거를 확인하기에는 PM2.5는 35에서 75 PPM이 '나쁨', PM10은 30에서 80 PPM이 '보통'의 오염도로 저감 활동에 대한 효과를 측정하기에는 넓은 오염 범위를 가지고 있었다. 또한, 당시 환경공단에서 고시하는 미세먼지 오염도는 맵핑을 하는 모든 구역에 저감 비행을 하였으나, 외부 환경 영향 이 크기 때문에 구체적인 효과를 파악하기에는 미비하였 다.

Fig. 7에서 PM2.5의 경우, 모니터링 지역의 '보통' 단 계가 일부 표현이 되었기 때문에 저감 활동의 효과에 대 해서는 미비하게 확인할 수 있었으나 공식적으로 보통과 나쁨의 경계 수치였기 때문에 효과에 대한 구분이 용이 하였다. Fig. 8의 경우, PM 10의 '보통' 범위는 30에서 80으로 오염 평균은 60 PPM 및 최저 46 PPM에서 최고 71 PPM의 범위를 가지고 있어서 시각적으로 저감 효과 를 파악할 수 없었다.

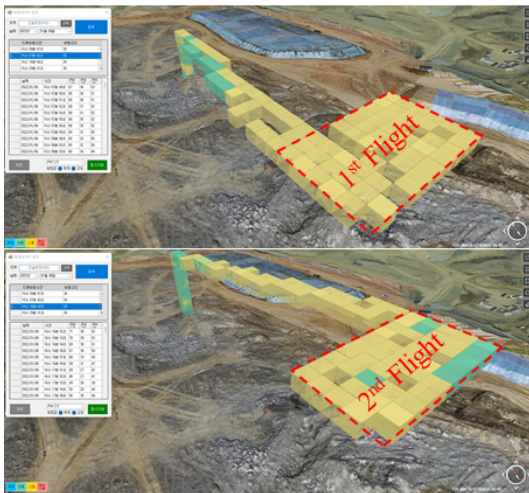


Fig. 7. Visualization on the System about PM2.5 Monitoring

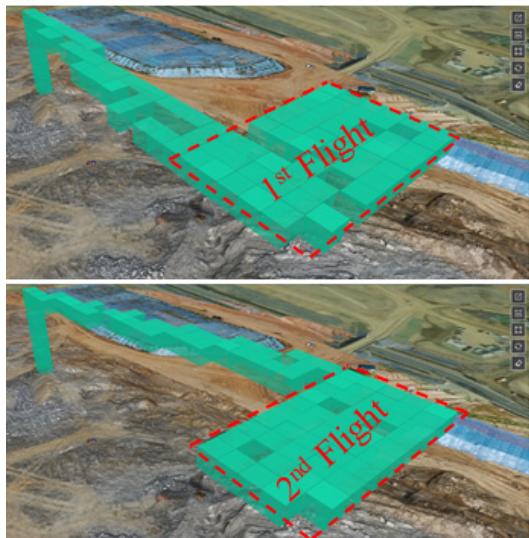


Fig. 8. Visualization on the System about PM10 Monitoring

4.2 미세먼지 오염도 계층화 분석

미세먼지 오염도에 대한 구체적인 분포수치를 알아보기 위해 5 PPM 단위로 계층화하여 미세먼지 저감 효과에 대한 분석을 하였다. Fig. 9은 PM2.5에 대한 비교분석으로 오염범위는 32 - 53 PPM로 모니터링 범위 내의 21 PPM의 차이를 확인하였다. 1차 비행에서 42.6 PPM, 2차 비행에서 41.7 PPM으로 전체 지역의 저감 효과는 미비하지만 국지적으로 저감 효과에 대해 파악할 수 있다. 작업발생이 지속적으로 일어나는 오염구간은

저감 활동의 영향이 미비하였으며 오염원에서 떨어진 구간 일수록 효과가 유의미하게 나타났다. 각 구역별로 비교하였을 때, 최대 저감 효율은 47.5 PPM에서 37 PPM으로 22% 감소되는 효과를 확인했다.

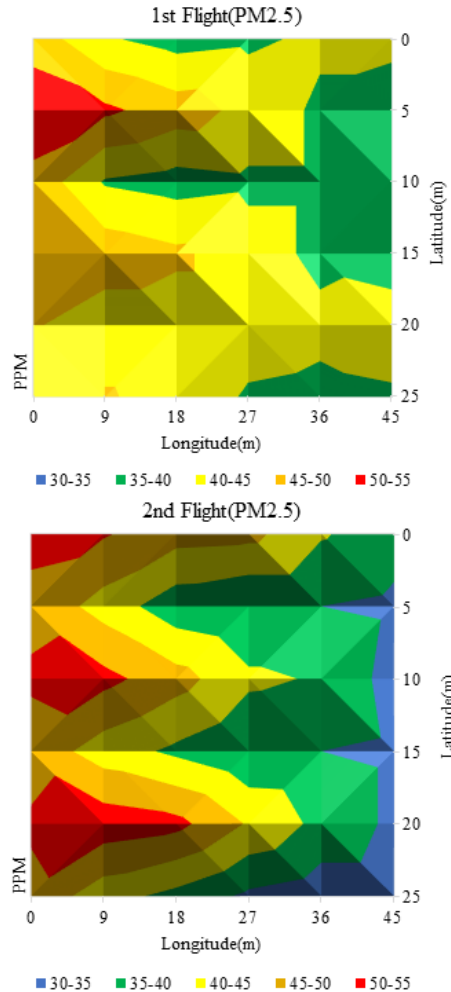


Fig. 9. Contour Graph on PM2.5

Fig. 10는 PM 10의 분포도를 분석하였으며, 오염원이 없는 지역은 1차 비행 평균 59.8 PPM 과 2차 비행 평균 58.4 PPM 으로 PM2.5와 유사하게 저감 효과는 파악되지 않았으나, 일부에서 69 PPM 52.5 PPM로 최대 24% 저감 효과를 확인할 수 있었다.

1,2 차 비행을 통해 오염원이 지속적으로 발생하는 Zone 1,2,3의 구역인 Fig. 9과 Fig. 10에서 X축으로부터 0 - 22.5m, 22.5 - 45m까지 구분하여 비교하였을 때, 오염원이 지속적으로 발생하는 구간은 토공사의 작

업 특성상 순간적으로 발생하는 오염도의 차이도 있기 때문에 저감 효과에 반영되지 않았다.

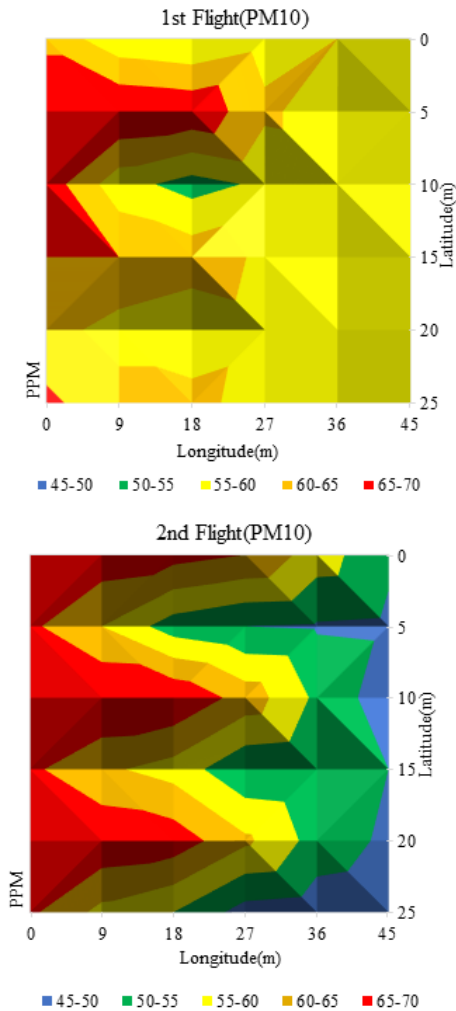


Fig. 10. Contour Graph on PM10

5. 결론

본 연구는, 무인항공기의 주요 강점으로 사용자 시야의 확장과 기동성을 인간이 인지하는 오감영역을 기준으로 응용 기술 발전 가능성을 도식화하기 위해 IPO 모델로 도식화하였다. IPO 모델을 바탕으로 오감영역 중 대부분의 응용 기술은 모니터링과 같은 시각적인 효과를 이용해 파악하는 것으로 유형화할 수 있다.

시각을 제외한 청각 기능을 활용하기 위해 고정적인

무인항공기를 활용하려면 높은 고도나 지속적인 비행을 요구하기 때문에 인지가 어려우며, 회전익은 자체 소음 발생부터 주변의 원하는 데이터를 확보할 수 있는 기술이 필요하다. 직접 접촉인 미각, 촉각은 드론의 적재 용량 및 추가 에너지를 고려해야 하는 기술적 한계가 있다. 간접 접촉인 후각은 비행에 직접적인 영향을 주지 않으며 소형 모듈을 탑재함으로써 모니터링이 가능하다.

이에 해당하는 응용 기술인 미세먼지 측정 데이터를 시각화하여 관리할 수 있는 모니터링 시스템을 개발하였으며, 본 시스템을 통해 국지적으로 발생하는 미세먼지와 저감 드론의 효과를 분석하였다. 5 PPM 단위로 계층화를 통해 지속적으로 발생하는 오염원 지역과 비 오염지역 간의 구분 및 저감 무인항공기의 효과를 확인하였고, 수치적으로도 PM2.5는 22% PM10은 24% 감소되는 성과를 확인할 수 있었다. 또한, 오염이 지속적으로 발생 되는 곳은 저감이 어려웠으나 오염원으로부터 약 10m 이상 떨어진 곳은 충분히 효과적이라고 판단할 수 있었다.

향후 지속 가능한 연구 방향으로, 오염구간은 미세먼지 저감효과가 작업의 종류 및 환경에 따라 분명한 성과를 보이지는 않았으나, 저감 활동을 위해 활용된 무인항공기가 1대로 운용되었기 때문에 군집 형태의 광역 범위로 저감 할 경우에 대한 오염구간의 성과 모니터링을 기대할 수 있다. 또한, 미세먼지 모니터링을 기존의 고정적인 측정소 외에도 국지적으로 발생하는 소규모 건설 현장 및 대기 오염이 예상되는 공단과 같은 지역을 주기적으로 모니터링하여 보다 정확한 오염원 파악과 현장의 오염 억제력에 기여할 것으로 예측된다.

References

- [1] S. A. Cambone, K. J. Krieg, P. Pace, L. W. II, "Unmanned Aircraft Systems(UAS) Roadmap, 2005-2030", Research Report, Office of the secretary of defense, U.S.A, 2005.
- [2] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Law of "Aviation Law Enforcement Rules", Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong-si, Korea, Jul. 2014.
- [3] D. I. Kim, Y. S. Song, G. Kim, C. W. Kim, "A study on the application of UAV of Korean Land Monitoring", *Journal of the Korean Society of surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol 32, No. 1, pp. 29-38, Feb. 2014.

DOI: <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2014.32.1.29>

- [4] S. Kim, Y. Kim, "Development and Evaluation of High-precision Earth-work Calculating System using Drone Survey," *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, vol. 18, no. 4, pp. 87-95, Dec. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.12814/jkgs.2019.18.4.087>
- [5] J. K. Park, K. Y. Jung, "Accuracy Evaluation of Earthwork Volume Calculation According to Terrain Model Generation Method", *Journal of the Korea Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 39, No. 1, PP. 47-54, Feb. 2021, ISSN 1598-4850
- [6] Y. S. Lee, D. G. Lee, Y. G. Yu, H. J. Lee, "Application of Drone Photogrammetry for Current State Analysis of Damage in Forest Damage Areas", *Journal of the Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol.24, No. 3, PP. 49-58, Sept. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.7319/kogsis.2016.24.3.049>
- [7] H. W. Kim, "A study on Application Methods of Drone Technology", *Journal of Korea Institute of Information, electronics, and communication technology*, Vol. 10, No. 6, PP. 601-608, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.17661/kiict.2017.10.6.601>
- [8] J. Lee, J. G. Han, Y. H. Kim, "Preliminary Study on GIS Mapping-based fine Dust Measurement in complex construction site", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol 22, No. 2, PP. 319-325, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.2.319>
- [9] T. Spiess, J. Gange, M. Buschmann, P. Vorsmann, "First application of the meteorological Mini-UAV'M2AV", *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 16, No.2, PP. 159-169, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2007/0195>
- [10] A. Mairaj, A. Baba, A. Y. Javaid, "Application specific drone simulators: Recent advances and challenges", *Simulation Modeling Practice and Theory*, Vol 94, 2019, PP. 100-117.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.01.004>
- [11] D. Hausmann, W. Zirning, G. Schreier, "Monitoring of gas transmission pipelines - a customer driven civil uav application", *5th ONERA-DLR Aerospace Symposium (ODAS 2003)*, Toulouse, France, Jun. 4-6, 2003.
- [12] L. Wallace, A. Lucieer, C. Watson, D. Tunner, "Development of a UAV-LiDAR System with Application to Forest Inventory", *Remote Sensing*, Vol 4, No. 6, PP. 1519-1543, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.3390/rs4061519>
- [13] A. Restas, "Drone Applications for supporting Disaster Management", *World Journal of Engineering and Technology*, Vol.3, No.3c, PP. 316-321, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.4236/wjet.2015.33C047>
- [14] R. Fanigliulo, F. Antonucci, S. Figorilli, D. Pochi D. F. Pallottino, L. Fornaciari, R. Grilli, C. Costa, "Light Drone-Based Application to Assess Soil Tillage Quality Parameters", *Sensors*, Vol. 20, No. 3, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.3390/s20030728>
- [15] D. Ventura, M. Breuno, G. J. Lasinio, A. Bellucio, G. Ardizzone, "A low-cost drone based application for identifying and mapping of coastal fish nursery grounds, Estuarine", *Coastal and Shelf Science*, Vol. 171, PP. 85-98, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cess.2016.01.030>
- [16] J. Seo, L. Duque, J. Wacker, "Drone-enabled bridge inspection methodology and application", *Automation in Construction*, Vol 94, PP. 112-126, Oct. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.06.006>
- [17] J. Irizarry, M. Gheisari, B. N. Walker, "Usability assessment of drone technology as safety inspection tools", *Journal of Information technology in construction*, Vol.17, PP. 194-212, 2012, ISSN: 1874-4753
- [18] X. Feifei, L. Jongjian, G. Dezhu, L. Hua, "Study on construction of 3D building based on UAV images", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences(ISPRS) Congress*, Vol. 34-B1, PP. 469-473, Aug. 25- Sept. 1st, 2012, Melbourne, Australia.
- [19] Y. Li, C. Liu, "Applications of multirotor drone technologies in construction management", *International Journal of construction Management*, Vol. 19, No.5, PP. 401-412, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1080/15623599.2018.1452101>
- [20] H. Seliem, R. Shahidi, M. H. Ahmed and M. S. Shehata, "Drone-Based Highway-VANET and DAS Service," *in IEEE Access*, Vol. 6, PP. 20125-20137, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2824839>
- [21] Y. Khosiawan, I. Nielsen, "A system of UAV application in indoor environment", *Production & Manufacturing Research*, Vol. 4, No. 1, PP. 2-22, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1080/21693277.2016.1195304>
- [22] H. González Jorge, L. M. González de Santos, N. Fariñas Álvarez, J. Martínez Sánchez, F. Navarro Medina, "Operational Study of Drone Spraying Application for the Disinfection of Surfaces against the COVID-19 Pandemic", *Drones*, Vol.5, No. 1, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.3390/drones5010018>
- [23] Korea Consumer Agency, "Differences in quality performance such as hobby drones, stationary flight performance, and maximum flight time", Press release, Aug. 19th, 2019, Examination and Inspection Bureau, Korea Consumer Agency (www.kca.go.kr)

이 재 호(Jaeho Lee)

[정회원]



- 2013년 8월 : 한양대학교 일반대학원 건설환경공학과 (공학석사)
- 2018년 2월 : 한양대학교 일반대학원 건설환경공학과 (공학박사)
- 2018년 4월 ~ 2019년 6월 : 한양대학교 산학협력단 선임연구원
- 2019년 7월 ~ 2020년 7월 : 엑스컨 주식회사 대표
- 2020년 8월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 박사후연구원

〈관심분야〉

건설관리, 건설제도, 건설자동화, 시스템통합

한 재 구(Jae Goo Han)

[정회원]



- 1999년 8월 : 경원대학교 일반대학원 건축학과 (건설관리 석사)
- 1999년 8월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 건설정책연구소 수석연구원

〈관심분야〉

건설관리, BIM, 스마트건설, 건설정책

김 영 현(Young Hyun Kim)

[정회원]



- 2000년 8월 : 한양대학교 한양대학원 토목환경공학과 (공학석사)
- 2010년 2월 : 한양대학교 한양대학원 토목환경공학과 (박사수료)
- 2012년 11월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 전임연구원

〈관심분야〉

건설관리, 건설사업관리 대가, 기술형입찰