

건설현장 미세먼지 억제를 위한 물 입자 분사 드론 시스템 개발에 대한 연구

최영민, 함영복*, 박중호, 김홍욱
한국기계연구원 열시스템연구실

A Study on the Development of Water Particle Spraying Drone System for Reducing Fine Dust in Construction Site

Young-Min Choi, Young-Bog Ham*, Jung-Ho Park, Hong-Uk Kim
Department of Thermal Systems, Korea Institute of Machinery and Materials

요 약 본 논문은 소규모 건설현장을 포함하는 도심지 건설현장에 대한 미세먼지 저감 방안에 대하여 드론기반의 water fog 분사시스템에 관한 것이다. 직경 200 μm 의 노즐을 사용하여 8 ~ 15 MPa 압력 조건에서 약 10 μm 직경의 미분수 분포를 확인하였다. 시뮬레이션 해석결과, 1,000 RPM에서 노즐 토출압력 7.83 MPa, 총 유량 1.03 ℓ 를 나타내며 분사시간에 따라 점차적으로 감소하였고, 모터 회전속도에 비례하여 토출압력이 증가하였다. 한편 2000 RPM에서 노즐 한 개당 유량은 1.42 ℓ 로써 10 ℓ 의 용량으로 10분간 분사가 가능한 것으로 나타났다. 실제, BLDC모터를 1,000 RPM으로 구동하여 한 개의 노즐에서 최대 토출압력 5.51 MPa 및 총 유량 0.69 ℓ 를 나타냈다. 그리고 모터 회전속도에 비례하여 토출압력 및 유량이 증가하였으며, 2,500 RPM에서 노즐 한 개당 1.00 ℓ /min 이상의 유량과 10 MPa 이상의 압력을 나타냈다. 따라서 드론 기반의 water fog 분사시스템 구축이 가능한 것으로 나타났다.

Abstract In this paper, a drone-based water fog spraying system was investigated for its effectiveness in reducing fine dust at urban construction sites. A nozzle with a diameter of 200 μm was used to determine the distribution of differential fractions with a diameter of about 10 μm under a pressure of 8 to 15 MPa. The result of the simulation analysis shows that the outlet pressure of the nozzle was 7.83 MPa, and the total flow rate was 1.03 liter at 1,000 RPM. The outlet pressure was increased proportional to the rotation speed of the motor. The integrating flow rate of the nozzle was 1.42 liter at 2000 RPM. The BLDC motor was driven at 1,000 RPM, resulting in a maximum outlet pressure of 5.51 MPa and a flow rate of 0.69 liter/min at the nozzle. The outlet pressure and flow rate were increased with the rotational speed of the motor. The flow rate was more than 1.00 liter/min for the nozzle, and the outlet pressure of more than ten MPa at 2,500 RPM. Therefore, these results suggest that it is possible to establish a water fog spraying system using drones.

Keywords : Construction Site, Drone, Fine Dust, PM10, Water Fog Spraying

본 연구는 한국기계연구원 연구과제, 국토교통과학기술진흥원 국토교통기술촉진연구사업 「도심지 건설현장 미세먼지 억제를 위한 Smart 감시 및 드론 기반의 water fog 분사시스템 개발」 연구비 지원으로 수행되었다.

*Corresponding Author : Young-Bog Ham(Korean Institute of Machinery and Materials)
email: hyb665@kimm.re.kr

Received August 30, 2021

Accepted October 1, 2021

Revised September 27, 2021

Published October 31, 2021

1. 서론

초기 군사용으로 개발된 무인항공기(UAV: Unmanned Aerial Vehicle)는 드론(drone)이라는 용어로 사용되면서 큰 관심을 불러일으켰다. 현재 드론은 개인이 수월하게 운용할 수 있는 수직이착륙형 멀티콥터(multi-copter)의 형태로 우리의 일상생활에서 다양한 응용분야를 가지고 있다[1-3]. 드론은 최근 몇 년 동안 영상 촬영, 측량, 기반 시설 검사, 농·임업 관리 및 물류와 같은 분야에서 활용되고 있다. 드론을 융합한 기술은 고소작업과 항공 작업 등에서 인명피해를 제로화 할 수 있으며, 헬기 등 항공기를 사용하는 것에 비하여 경제적인 이점을 갖는다. 특히, 드론의 영상 이미지는 위성에 기반한 다른 솔루션에 비하여 촬영 대상에 더 큰 근접성을 가지므로 공간 해상도를 증가시킬 수 있다[4]. 그러므로 드론은 미래 신산업의 발전을 이끌 수 있는 첨단 기술들을 다양한 방식으로 융합하여 새로운 부가 가치를 창출할 수 있는 플랫폼으로 드론의 유형에 따라 200여개의 활용분야를 가질 것으로 전망하고 있다. 그중에서 향후에도 계속 성장할 것으로 예상되는 운영 부문 중 하나는 드론 살포이다. 한국 등 일부 국가들은 농업 면적의 약 30%를 드론을 활용하여 농약을 살포한다. Yamaha RMax Helicopter (Yamaha Motor Co., Japan)와 같은 무인헬기는 1990년대 중반부터 일본에서 드론 살포를 개척했고, 2016년 Agras MG-1(DJI, China)과 같은 무인헬기가 시장에 선보였다. 그리고 현재 전 세계적인 코로나바이러스감염증-19 대유행은 드론을 이용한 방역 활동에도 영향을 주고 있다. 소독액이 분산된 물과 펌프를 드론에 탑재하여 소독 방역제를 공기 중으로 살포하여 소규모 저점 방역에 이용되고 있다[5-7].

최근 국내는 기후변화의 영향으로 폭염, 가뭄, 산사태, 생태계변화, 태풍·호우피해, 농작물 재배지 변화, 해수면 상승 등 여러 가지 심각한 문제가 발생하고 있다. 이중 미세먼지로 인한 피해는 도심지역에서 그 심각성을 더해가고 있으며, 미세먼지는 입자크기에 따라서 분류되고 보통 직경 10 μm 이하를 미세먼지라고 한다. 전국 발생 미세먼지는 약 120,000 ton에 달하고 있으며, 이중 건설공사 현장에서 발생하는 비산먼지 발생량은 전체 미세먼지 발생비율에서 약 20%를 차지한다.

따라서 본 연구에서는 소규모 건설현장을 포함하는 도심지 건설현장에 대한 미세먼지 저감 방안을 제시한다. 기존 법에서 규정하고 있는 방법 이외에 소규모 건설현장에도 적용이 용이하고 4차 산업혁명 시대의 도입에 맞

추어 드론, GIS, water fog 등 다양한 스마트 건설기술을 활용한 미세먼지저감 대책기술을 개발하고자 한다. Water fog 발생에 필요한 고압 급수 시스템을 우선적으로 개발하고 이 시스템을 드론에 탑재하여 소규모 건설 현장에서 발생하는 PM10급 미세먼지를 억제하는 방안에 대해서 검토한다.

2. 본론

2.1 물 분사 시스템

2.1.1 분사압력 및 노즐 선정

공급 압력변화에 따른 미분수 입경을 측정하여 목표로 하는 미세먼지의 직경 10 μm (PM10)와 유사한 분사조건을 검토하였다. Makarand Joshi의 연구결과에 따르면, 미분수 입자 직경이 미세먼지의 입자 직경보다 크면 미세먼지 입자는 주변 공기의 기류를 따르게 되고, 미분수 입자 직경과 미세먼지 입자 직경이 비슷한 경우에는 미세먼지 입자는 미분수 기류를 따라 움직이므로 미세먼지 억제에 효과적이라고 밝혔다[8].

Fig. 1에서 직경 200 μm 의 노즐을 사용하여 5 ~ 15 MPa 압력 조건에서 미분수 입경 분포를 확인하였다. 토출 압력이 증가할수록 미분수 입경이 미세한 결과가 나타났으며, 적어도 10 MPa 이상 토출압력으로 분사해야 PM10급 미세먼지 억제에 효과적인 미분수 입경을 얻을 수 있는 것으로 판단하였다.

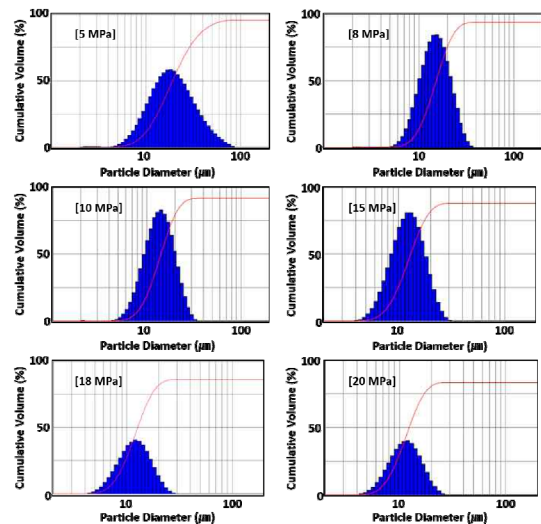


Fig. 1. Particle size distribution of water in accordance with pressure

2.1.2 고압 급수 시스템 설계

4차 산업혁명의 농업은 스마트 농업으로 변모하고 있으며, 특히, 농업용 방제드론의 활용 및 기술적 향상이 지속적으로 개선되고 있다[9]. 현재 국내에서 판매되고 있는 방제드론의 대부분이 10 ℓ 용량의 탱크를 탑재한 기체이며, 드론마다 상이한 제원을 확보하고 있지만 평균적으로 약 8,000 m²(약 2,400평 규모)의 면적을 방제할 수 있다. 본 연구에서는 고압의 압력으로 10 ℓ의 물을 분사할 계획이며, 한 기체 당 1,000 m² 면적(소규모 건설현장 기준)의 미세먼지를 억제할 수 있도록 설계하였다.

2.2 실험

2.2.1 드론 기체

본 연구에서 사용한 드론은 EFT社 E610 상용 제품으로 Fig. 2 (a)에 나타났다. 헬사드론 타입으로써 8120/340 KV BLDC 모터를 탑재하고 있으며, 비행 제어 시스템으로 K3A Pro를 사용한다. 제품 크기는 펼쳐진 프로펠러를 고려하여, 1,723 × 1,723 × 560 mm이며, 탱크 용량은 10 ℓ, 최대 이륙 중량은 26 kg이다. 그리고 약 4 kg의 22.2V 16,000 mAh Li-Po 배터리 두 대를 사용하며, 작업시간은 가득 찬 물 탱크 기준으로 약 13분이다. 본 사양은 고압용 물 분사장치를 탑재하기 위한 최소조건으로 판단하고 기체를 선정하였다.

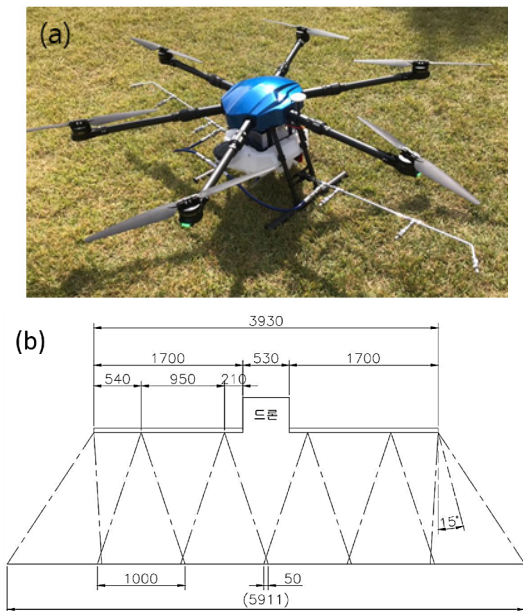


Fig. 2. Photo of (a) spraying drone and schematic design of (b) spraying width

본 연구에서 설계한 고압용 분사장치 모듈은 유체이송부와 분사부로 분류된다. 유체 이송부는 탱크에서 고압 펌프를 거쳐 스테인리스 스틸 재질의 유체공급배관으로 이어지며, 분사부는 직경 200 μm의 노즐로써 탱크 좌, 우 세 개씩 총 6개로 구성된다. Fig. 2 (b)에서 분사 폭은 약 6 m를 유지할 수 있도록 설계하였다.

2.2.2 고압 펌프 및 구동 모터

PM10급 미세먼지를 효율적으로 저감시키기 위하여 8 ~ 15 MPa 토출 압력으로 미분수 입경 10 μm를 확보할 계획이다. 본 연구에서 사용된 방제드론의 탱크 용량은 10 ℓ이며, 약 10분간 작업이 가능한 분사 시스템을 설계하여 배제용적 1.0 ml/rev의 펌프를 선정하였다. 펌프에서 발생되는 동력은 토크와 회전수의 관계로 나타낼 수 있으며, Eq. (1), (2), (3)을 연계하여 사용하였다.

$$Q_{pump} = V_{pump} \times N_{pump} [L] \quad (1)$$

Where, Q_{pump} [ℓ/min] denotes flow rate of pump, V_{pump} [ℓ] denotes displacement of pump and N_{pump} [RPM] denotes rotation speed of pump

$$T_{pump} = \frac{V_{pump} \times P_{pump}}{2\pi} [N \cdot m] \quad (2)$$

Where, T_{pump} [N·m] denotes torque of pump, V_{pump} [ℓ] denotes displacement of pump and P_{pump} [N/mm²] denotes pressure of pump

$$W_{pump} = \frac{T_{pump} \times N_{pump}}{9.55} [W] \quad (3)$$

Where, W_{pump} [W] denotes power of pump

Fig. 3 (a)는 선정된 소형 액시얼 피스톤 펌프로써, Janus社 P-1 제품이다. 스테인리스스틸(SUS 316)로 제작되어 물을 포함한 다양한 유체를 사용할 수 있으며, 1.0 ml/rev의 배제용적을 갖는다. 최대 압력은 16 MPa이고, 중량은 1.5 kg이다. 드론의 유효하중(payload)를 고

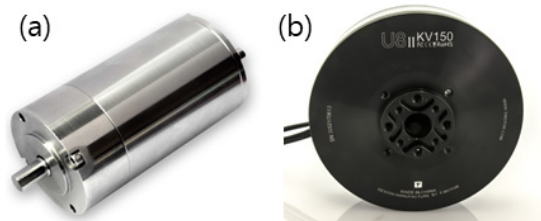


Fig. 3. Photos of (a) piston pump and (b) T-motor U8-II BLDC motor

려하여 경량인 모터를 검토하였다. 선정된 제품은 T-motor社 U8-II 모터로써, Fig. 3 (b)에 나타낸다. 이 모터는 BLDC 모터로써, 크기는 87 × 29 mm이고, 중량은 273 g, 구동전압은 24 V, 그리고 최대 토크 및 회전속도는 각각 1.8 N·m, 2,800 RPM이다.

2.3 실험결과 및 고찰

2.3.1 전력 소비량

드론은 특성상 모터와 프로펠러의 힘으로만 움직이기 때문에 전력 소모가 크다. 이를 극복하기 위하여 배터리의 용량을 늘리거나 장착 개수를 늘리게 되면 무게가 추가되는 만큼 비행에 더 많은 에너지가 필요하다. 따라서 효율적인 드론 작업을 위하여 적절한 배터리의 용량, 크기, 무게 선정이 필요하다. 다음은 본 연구에서 추가된 물 분사 시스템의 전력소비량을 알아보기 위하여 펌프 동력계산식 Eq. (4)를 나타낸다.

$$W_{pump} = \frac{Q_{pump} \times P_{pump}}{0.612} [W] \quad (4)$$

Where, W_{pump} [W] denotes power of pump, Q_{pump} [ℓ/min] denotes flow rate of pump and P_{pump} [N/mm²] denotes outlet pressure of pump

10 MPa 압력으로 1.0 ℓ/min 유량을 갖는 펌프의 전력 소비량은 0.16 kW으로 나타났다. 이때, BLDC 모터는 1.0 ℓ/min이상의 유량을 확보하기 위하여 배제용적 1.0 ml의 P-1 펌프를 1,000 RPM이상으로 구동해야한다. 본 연구에서는 구동전압 24 V의 BLDC 모터를 사용하였으며, 모터 제원에 의하면 1,000, 1,500, 2,000, 2,500 RPM에서 각각 2.5, 3.5, 8.5, 17.0 A의 전류가 필요하다. 즉, 회전속도에 따라 약 0.06 ~ 0.41 kW 전력이 모터를 구동하는데 추가적으로 소모된다. 최종적으로 물 분사 시스템에서 0.22 ~ 0.57 kW 전력량이 소모되며, 기존의 드론 배터리 2개의 총 에너지 저장용량 1.33 kW/h 중 16.5 ~ 42.9%를 차지하게 된다. 따라서 드론의 운용시간을 최대한 확보하기 위하여 물 분사 시스템용 배터리를 추가로 탑재하였다. 추가 탑재된 배터리는 Parrot DISCO 11.1 V로써, 크기 88 × 44 × 34 mm, 중량 0.19 kg의 소형-경량 배터리 두 대를 직렬로 연결하여 모터 구동전압에 맞게 사용한다. 결과적으로, 물 탱크, 펌프, 구동 모터 및 추가 배터리를 포함한 분사 장치 모듈의 총 무게는 13.23 kg으로써 드론의 허용 이륙중량에 해당하므로 드론 작업에 적절한 것으로 판단한다.

2.3.2 물 분사 시스템 해석모델

실제 물 분사 시스템의 최적화에 앞서서 기계, 유압과 관련된 물리적 모델링과 해당 시스템에 대한 정상상태 및 안정도를 분석하기 위하여 시뮬레이션 해석을 수행하였다. SimulationX(ver. 4.0)을 활용하여 다중 노즐을 연결한 water fog 시스템을 Fig. 4에 나타냈다. 모터 회전속도에 따른 최대 유량 및 최대 토출 압력을 검토하였으며, 시뮬레이션 모델링의 주요변수는 Table.1에 나타났다.

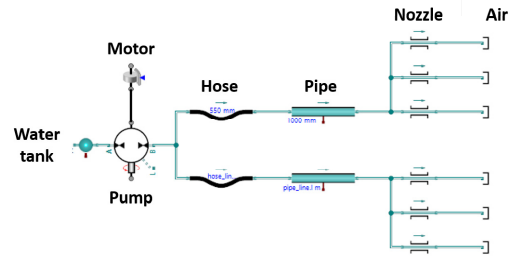


Fig. 4. SimulationX modeling for water fog spraying system using multi-nozzles

Table 1. Simulation parameters for spray system

Parameter	Unit	Value
Tank pre-fill pressure	MPa	0.1
Pre-fill temperature	℃	20.0
Water tank volume	ℓ	10.0
Displacement of pump	ml/rev	1.0
Rotation speed	RPM	1,000
Hose diameter	mm	3.0
Hose length	mm	550.0
Pipe diameter	mm	7.0
Pipe length	mm	700.0
Number of nozzles	EA	6
Nozzle diameter	mm	0.2
Nozzle length	mm	40.0
Nozzle cross-section	-	Circular

10 ℓ 용량 탱크에서 10분간 물 분사를 모사하였으며, SimulationX(ver. 4.0) 해석결과를 Fig. 5에 나타냈다. 1,000 RPM에서 최대 7.83 MPa의 노즐 토출압력을 나타내며 분사시간에 따라 점차적으로 감소하였고, 노즐 한 개당 적산유량 1.03 ℓ로써 해당 시스템에서 구성된 6개의 노즐에서는 총 6.18 ℓ 유량을 나타냈다. 또한 RPM에 비례하여 토출압력 및 유량이 증감하는 것을 확인하였으며, 1,200, 1,400, 1,600, 1,800 그리고 2,000 RPM에서 각각 10.65, 13.85, 17.40, 21.31 그리고

25.57 MPa를 나타냈다. 한편 2000 RPM에서 노즐 한 개당 적산유량은 1.42 l 로써 10 l의 용량으로 10분간 분사 가능하였다. 시뮬레이션 해석결과는 실제 실험 데이터와 비교하여 신뢰성을 검토할 예정이다.

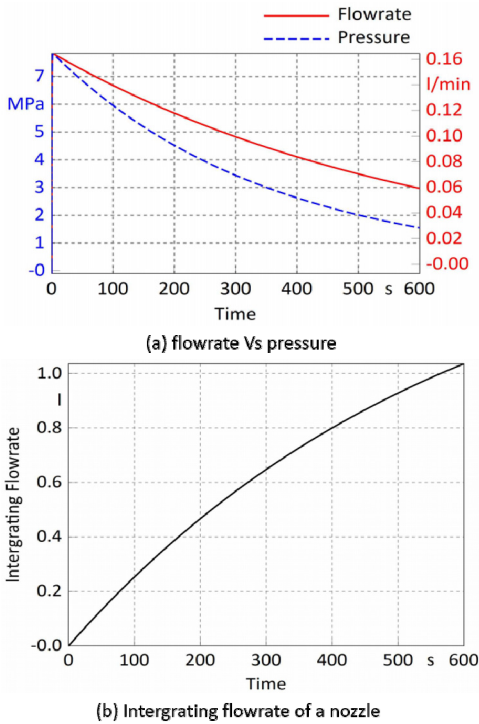


Fig. 5. Simulation analysis results of water fog spraying system using multi-nozzles

2.3.3 물 분사시스템 실험

드론기반의 고압 급수시스템에 사용될 고압펌프의 압력-유량 관계를 확인하기 위하여 Fig. 6과 같이, 토크미터 및 압력게이지 등 실험 장비를 구성하였다. 유체는 수돗물을 사용하였으며, 대기압 상태에서 직경 7 mm의 PVC 튜브를 사용하여 흡입하고, 토출은 직경 3 mm의 고압용 합성고무 튜브를 사용하였다.

BLDC 모터를 제어하기 위하여 ESC(electronic speed control) 구동회로가 탑재된 제어기를 제작하였다. 모터 구동은 PWM(pulse width modulation) 신호에 의하여 속도를 제어하였다. 속도제어 다이얼은 아날로그식이며, 비접촉식 RPM 측정기에 의하여 1,000 RPM ~ 2,500 RPM의 회전 속도를 확인하여 각 속도에서 실험을 진행하였다.

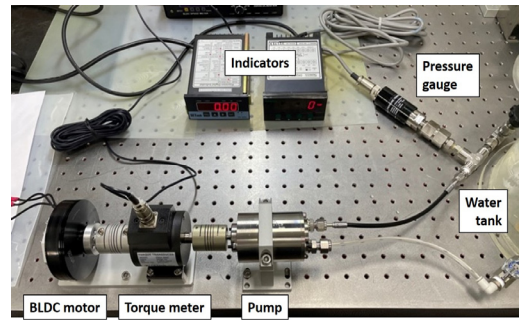


Fig. 6. Experiment setup for flow rate and pressure testing

모터 회전속도에 따른 고압펌프의 압력과 유량 관계를 Fig. 7에 나타냈다. 모터 구동 속도를 1,000 RPM으로 제어하여 한 개의 노즐에서 최대 토출압력 5.51 MPa 및 총 유량 0.69 l를 나타냈다. 전술한 시뮬레이션 결과와 비교하여 1,000 RPM에서 실제 노즐 토출압력은 70.37%, 유량은 66.99% 수준으로 나타났다. 토출압력 및 총 유량은 유체 관로 내 부손실, 관로 마찰, 노즐 형상, 모터/펌프의 전효율 등 영향을 받아 시뮬레이션 결과와 상이한 실험 값이 얻어진 것으로 여겨진다[10-15]. 한편, 모터 회전속도에 비례하여 토출압력 및 유량이 증가하였으며, 2,500 RPM에서 노즐 한 개당 1.0 l/min이상의 유량과 10 MPa이상의 압력을 나타냈다. 본 연구에서 구성된 분사시스템은 10 l 용량의 탱크와 총 여섯 개의 노즐을 사용하므로 10분간 작업이 가능하며, PM10급 미세먼지 입자 사이즈와 비슷한 물 입자의 분사가 가능한 시스템인 것으로 확인되었다.

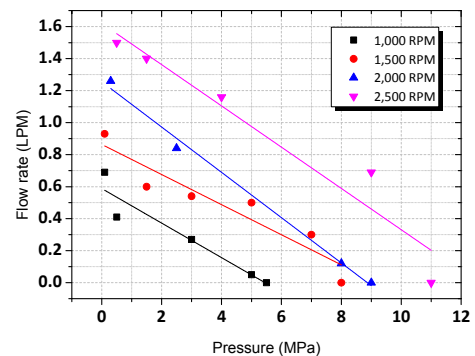


Fig. 7. Results of flow rate and pressure per a nozzle

2.3.4 현장 평가

Water fog 분사시스템을 EFT社 E610 드론에 탑재

후, 한국건설기술연구원 본원에서(낮 기온 최대 20℃, 풍속 2.0 %) 현장 실험을 수행하였다. 분사시스템 및 드론 비행 안정성, 비행시간을 최종 점검하였으며, Fig. 8에 나타낸다.

결과적으로, 분사장치에 의한 흔들림 등 불안전 요소는 확인되지 않았으며, 드론의 이·착륙, 전·후진 그리고 원주비행 등 안정적인 비행이 가능하였다. 또한 배터리 저전압 경고 발생시점까지 7분 15초 동안 작업이 가능했으며, 추가된 분사시스템 무게 및 장기간 미사용 보관으로 인한 배터리 성능저하, 외란 등 비행시간이 감소하였다. 한편, 드론 프로펠러기류에 의해 water fog가 하향했으며, 이에 따라 분사효과를 높일 수 있다고 판단하였다.



Fig. 8. Field performance evaluation of water fog spraying system using drone(EFT-E610)

3. 결론

본 연구는 소규모 건설현장을 포함하는 도심지 건설현장에 대한 미세먼지 저감 방안을 제시하며, 4차 산업혁명 시대의 도입에 맞추어 드론, GIS, water fog 등 다양한 스마트 건설기술을 활용한 미세먼지저감 대책기술을 마련하고자 드론기반의 water fog 분사시스템 개발에 대해서 검토하고 다음과 같은 결론은 얻었다.

1. 직경 200 μ m의 노즐을 사용하여 8 ~ 15 MPa 압력 조건에서 약 10 μ m 직경의 미분수 분포를 확인하고 PM10급 미세먼지를 저감하는데 적절한 것으로 판단하였다.
2. SimulationX (ver.4.0) 검토결과, 1,000 RPM에서 노즐 토출압력 7.83 MPa , 총 유량 1.03 ℓ 를 나

타내며 분사시간에 따라 점차적으로 감소하였고, 1,200, 1,400, 1,600, 1,800 그리고 2,000 RPM에서 각각 10.65, 13.85, 17.40, 21.31 그리고 25.57 MPa 의 토출압력을 나타냈다. 한편 2000 RPM에서 노즐 한 개당 적산유량은 1.42 ℓ 로써 10 ℓ 의 용량으로 10분간 분사가 가능한 것으로 나타났다.

3. BLDC모터를 1,000 RPM으로 구동하여 한 개의 노즐에서 최대 토출압력 5.51 MPa 및 총 유량 0.69 ℓ 를 나타냈다. 전술한 시뮬레이션 결과와 비교하여 노즐 토출압력 및 유량은 70.37%, 66.99% 수준으로써 유체 관로 내 부손실, 관로 마찰, 노즐, 모터/펌프의 전효율 등 영향을 받은 것으로 판단한다.
4. 모터 회전속도에 비례하여 토출압력 및 유량이 증가하였으며, 2,500 RPM에서 노즐 한 개당 1.0 ℓ /min이상의 유량과 10 MPa 이상의 압력을 나타냈으며, 드론 기반의 water fog 분사시스템 구축이 가능한 것으로 나타났다.
5. 현장평가 결과, 안정적인 비행을 보였으며, 드론 프로펠러의 기류에 의해 water fog가 하향하며 분사효과를 높일 수 있었다. 단, 비행시간이 13분에서 7분 15초로 55%로 단축되었다.

References

- [1] H. I. Ko, J. W. Park, G. J. Yoon, M. H. Kim, "Tilt-type small drone for river crossing operation", *Journal of the Korean Society for Environmental Technology*, Vol. 22, No. 2, pp. 173-181, 2021.
DOI:<https://doi.org/10.26511/JKSET.22.2.11>
- [2] G. Yun, M. Mazur, Y. Pederii, "Role of Unmanned Aerial Vehicles in Precision Farming", *Proceedings of the National Aviation University*, Vol. 70, No. 1, pp. 106-112, 2017.
DOI:<https://doi.org/10.18372/2306-1472.70.1.1430>
- [3] R. Clarke, "Understanding the drone epidemic", *Computer Law & Security Review*, Vol. 30, No. 3, pp. 230-246, 2014.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.clsr.2014.03.002>
- [4] H. G. Jorge, L. M. G. Santos, N. F. Alvarez, J. M. Sanchez, F. N. Medina, "Operational Study of Drone Spraying Application for the Disinfection of Surfaces against the COVID-19 Pandemic", *Journal of Drones*, Vol. 5, No. 18, pp. 1-8, 2021.
DOI:<https://doi.org/10.3390/drones5010018>
- [5] R. Saunt, China's Drone Army Fighting Coronavirus: Farm, Police and Personal Drones Are Repurposed to

- Spray Disinfectant over Villages and Cities Hit by Killer Virus, Mail Online, 2020, Available from: <https://www.dailymail.co.uk/news/article-7952119/Drones-repurposed-spray-disinfectant-villages-cities-China-hit-coronavirus.html> (accessed Aug. 1, 2021).
- [6] Z. Kleinman, Coronavirus: Should the UK Use Drones to Disinfect Public Spaces, BBC NEWS, 2020, Available from: <https://www.bbc.co.uk/news/health-52109824> (accessed Aug. 1, 2021).
- [7] C. Pen, Spain's Military Uses DJI Agricultural Drones to Spray Disinfectant in Fight against Covid-19, South china Morning Post, 2020, Available from: <https://www.scmp.com/tech/gear/article/3077945/spains-military-uses-dji-agricultural-drones-spray-disinfectant-fight> (accessed Aug. 1, 2021).
- [8] M. Joshi, Failure of Dust Suppression Systems at Coal Handling Plants of Thermal Power Stations, Semantic Scholar, 2002, Available from: <https://www.semanticscholar.org/paper/Failure-Of-Dust-Suppression-Systems-At-Coal-Plants-Joshi/0efc742c540c470ea5ceec2f3e66e855bfd059a7> (accessed Aug. 1, 2020).
- [9] J. T. Lim, "A Study on the Characteristic Analysis of the Pest Control Drones Using Smart Operating Mode", *Journal of Convergence for Information Technology*, Vol. 9, No. 10, pp. 108-113, 2019. DOI:<https://doi.org/10.22156/CS4SMB.2019.9.10.108>
- [10] T. Kanwal, M. A. Trimzi, H. U. Kim, S. N. Yun, J. H. Park, Y. B. Ham, Analysis and Investigation of the Power Density of Positive Displacement Hydraulic Pumps and Motors, The Korea Fluid Power Systems Society, 2020, Available from: <https://www.dbpia.co.kr/pdf/pdfView.do?nodeId=NO DE09380049> (accessed Aug. 1, 2021).
- [11] A. Y. Ismail, M. M. Jeong, J. H. Woo, J. J. Mun, H. S. Jeong, Y. B. Ham, Analytical and Simulation Study of Tilting Torque Acting on the Swash Plate of an Axial Piston Pump, The Korea Fluid Power Systems Society, 2020, Available from: <https://www.dbpia.co.kr/pdf/pdfView.do?nodeId=NO DE10516121> (accessed Aug. 1, 2021).
- [12] M. A. Trimzi, Y. B. Ham, T. Kanwal, H. U. Kim, J. G. Han, Y. H. Kim, Development of a Rotating Swash Plate Axial Piston Pump Mounted on a Dust Suppression Drone for Construction Site, The Korea Fluid Power Systems Society, 2020, Available from: <https://www.dbpia.co.kr/pdf/pdfView.do?nodeId=NO DE09380046> (accessed Aug. 1, 2021).
- [13] M. A. Trimzi, Y. B. Ham, H. U. Kim, J. H. Park, S. N. Yun, Y. H. Kim, J. G. Han, Spray System Design and Analysis for Steady Supply of Water Mist, The Korea Fluid Power Systems Society, 2019, Available from: <https://www.dbpia.co.kr/pdf/pdfView.do?nodeId=NO DE09273528> (accessed Aug. 1, 2021).
- [14] Y. G. Kim, S. T. Kim, Y. B. Ham, S. N. Yun, H. Y. Son, "System Modeling of a Bi-directional Outlet Variable Swash Plate Type Axial Piston Pump with Two EPPR Valves", *The Korea Fluid Power Systems Society*, Vol. 17, No. 1, pp. 51-60, 2020. DOI:<https://doi.org/10.7839/ksfc.2020.17.1.051>
- [15] Y. M. Choi, S. N. Yoon, J. H. Park, H. U. Kim, Y. B. Ham, Performance Test of Water Pump driven by Miniature BLDC Motor, The Korea Fluid Power Systems Society, 2020, Available from: <https://www.dbpia.co.kr/pdf/pdfView.do?nodeId=NO DE10516122> (accessed Aug. 1, 2021).

최 영 민(Young-Min Choi)

[정회원]



- 2013년 8월 : 부경대학교 일반대학원 재료공학과 (공학석사)
- 2019년 2월 : 부경대학교 일반대학원 재료공학과 (공학박사)
- 2019년 3월 ~ 현재 : 한국기계연구원 박사후연구원

〈관심분야〉

압전세라믹스, 복합재료, 나노입자분산

함 영 복(Young-Bog Ham)

[정회원]



- 1900년 2월 : 금오공과대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2003년 2월 : 금오공과대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2004년 6월 : 동경공업대학교/야마나시대학교 객원연구원
- 1990년 3월 ~ 현재 : 한국기계연구원 책임연구원

〈관심분야〉

압전소자응용, 유·수압펌프, 무침주사기

박 중 호(Jung-Ho Park)

[정회원]



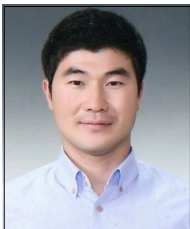
- 1996년 3월 : 동경공업대학 정밀 기계시스템전공 (공학석사)
- 1999년 3월 : 동경공업대학 정밀 기계시스템전공 (공학박사)
- 1999년 4월 ~ 2004년 2월 : 동경 공업대학 정밀공학연구소 조교수
- 2004년 3월 ~ 현재 : 한국기계연구원 책임연구원

〈관심분야〉

기능성액추에이터, 센서, 초소형 유체제어시스템

김 흥 욱(Hong-Uk Kim)

[정회원]



- 2012년 2월 : 광운대학교 환경공학 (공학석사)
- 2013년 7월 ~ 현재 : 한국기계연구원 선임기술원

〈관심분야〉

환경시스템, 유·수압펌프