



구조물의 능동 유지보수를 위한 드론부착형 분사장치 개발

Development of Drone-attached Spraying Device for Active Maintenance of Structures

양승한¹, 이광일^{2,#}
Seung-Han Yang¹ and Kwang-Il Lee^{2,#}

¹ 경북대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University)
² 경일대학교 기계자동차학부 (School of Mechanical and Automotive Engineering, Kyungil University)
Corresponding Author / E-mail: kilee@kiu.kr, TEL: +82-53-600-5351
ORCID: 0000-0003-0093-2783

KEYWORDS: Active maintenance (능동 유지보수), Maintenance agent (유지보수제), Spraying device (분사장치), Damage (손상부), Structure (구조물)

Exteriors of structures (apartments, buildings, bridges, dams, power plants, etc.) are subject to deterioration and damage (cracks, rust, etc.), mainly due to thermal expansion/contraction and environmental humidity. The damages shorten the lifespan of structures and cause unnecessary reconstruction, increasing social costs. The existing damage maintenance methods, which are directly constructed by the workers, have problems such as reduced work efficiency, increased work cost, lack of timely maintenance, and high work risks. In this paper, a spraying device attached to a drone for active and flexible maintenance of structures is developed. To simplify maintenance, the device consists of a solenoid motor, detachable parts for maintenance agent, and a lightweight-designed frame, manufactured with a 3D printer. In particular, the lever mechanism that amplifies the pushing force of the solenoid motor is designed to spray the maintenance agent when a switch comes into contact with the exterior of the structure. The prototype of a spraying device is attached to a commercial drone (Mavic3, DJI) and tested for effectiveness in structure maintenance. It demonstrates successful, cost-effective maintenance of structural damages in less than 10 minutes.

Manuscript received: August 22, 2023 / Revised: September 25, 2023 / Accepted: September 25, 2023

NOMENCLATURE

L = Lever Ratio
 x_i = Input Displacement [mm]
 x_o = Output Displacement [mm]
 F_i = Input Force [N]
 F_o = Output Force [N]

1. 서론

드론(Dynamic Remotely Operated Navigation Equipment,

DRONE)은 사전 입력된 프로그램에 따라 비행하는 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)와 제한된 공간을 비행하는 소형 드론을 통칭하는 비행 로봇이다[1,2]. 드론 시장 규모는 연평균 성장률 7.8%로 2030년에는 약 72조원(558억\$)을 예상한다[3]. 국내 드론 산업은 4차 산업혁명을 선도하는 신성장동력을 창출하기 위한 2017년 제1차 드론산업발전 기본계획에 따라 규모가 크게 성장하였으며, 2023년 제2차 드론산업발전 기본계획을 통하여 기술혁신과 규제 개선의 드론 활용 확산, 생활편의 제고 그리고 글로벌 기술 선도를 목표로한다[4,5]. 또한 국내 드론 산업 경쟁력을 제고하기 위해 10년 동안 반드시 확보해야 하는 6대 공통핵심기술과 5대 용도별 플랫폼을 제시하였다[6].

높은 공간접근성에 따라 드론 활용은 농업, 물류, 재난 및 건설 분야를 포함해 광범위한 영역에서 지속적으로 증가하고

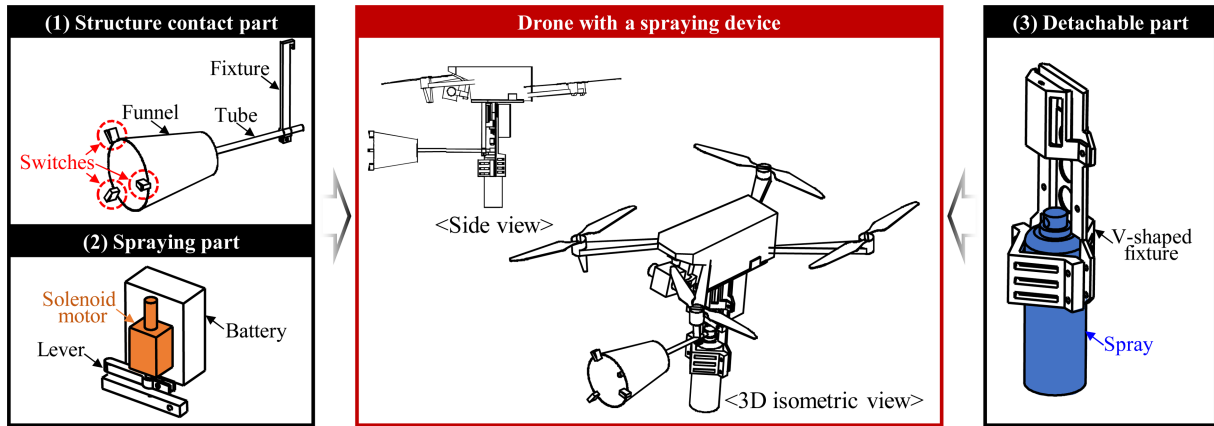


Fig. 1 Configuration of a drone with a designed spraying device

있다[7,8]. 농업분야에서 드론은 작물 생산성을 높이기 위해 다양한 정밀 농업에 활용하며, 살충제와 비료를 선택적으로 살포하여 농업의 효율 개선과 농부의 질병을 감소시킨다[9]. 또한 2050년 96억명으로 예상되는 세계 총인구의 식량 수요를 충족시키기 위해 정밀 농업은 드론 구조와 다중 센서 개발, 살충제의 주요 영역 살포, 작물의 원격 모니터링의 인공지능과 딥러닝을 적용한다[10]. 수송과 물류 분야에서 드론은 기존 모빌리티의 낮은 공역(Air Space)을 3차원으로 확장하여 화물과 승객 운송의 효율을 높이며[11], 드론 기반 물류 모델을 설계하고 계획하여 운영의 유연성, 대응성, 비용절감, 지속 가능성을 목표로한다[12,13]. 재난 분야에서 드론의 주요 적용 영역은 매핑 또는 재난 관리, 수색 및 구조, 운송, 훈련이며, 재난구조 효율성은 드론의 피해자 식별을 통해 높이고자 한다[14].

드론 활용은 건축, 엔지니어링과 건설 산업에서 빠르게 진행되고 있으며, 해당 산업은 2020년대에는 드론의 2번째 시장으로 크게 성장할 것으로 예상한다[15]. 특히 현대 사회는 다양한 고층 구조물(아파트, 빌딩, 다리, 댐, 발전소 등)을 건설하였으며, 드론을 활용한 구조물 모니터링이 지속적으로 이루어지고 있다. 건물의 에너지 활용성은 Syracuse 대학 건물을 대상으로 표준 절차를 적용하여, 비행 경로의 변수 설계, 적외선 카메라의 열 이상 영역 식별, 적외선 및 RGB의 CAD 모델링을 통하여 확인하였다[16]. 또한 철도시설물과 교량 하부의 무인자동화 점검은 헬콥터 구조의 드론을 개발하여 수행하였으며[17], 해체 대상 구조물의 실내의 구조 실측은 드론 촬영과 LiDAR 스캐닝을 통한 정밀 정합을 통해 진행하였다[18]. 도로의 균열 인식과 균열 유형 구분은 도로 영상데이터와 물체탐지 알고리즘을 사용하여 확인하였으며, 도로자산관리체계는 드론과 인공지능형 균열검지 시스템을 통해 구축하였다[19]. 또한 사회기반시설물인 교량의 교각에 발생한 균열은 딥러닝 네트워크를 개발하여 계측하고 자동으로 검출 및 평가하였다[20]. 벽면 부착의 드론은 시설물을 근거리에서 정확하게 점검하고 드론의 비행에너지를 개선하기 위해 설계하였으며, 유효성은 실험적으로 검증하였다[21,22].

앞서 서술한 바와 같이, 드론은 높은 공간접근성을 통해 다양한

응용분야에서 비약적 성장을 이루고 있으며, 현대 사회의 고층 구조물을 모니터링하고 필요 시 작업자에 의한 유지보수에 활용하고 있다. 하지만, 기존 모니터링 방법은 획득한 영상에서 손상부(예. 균열과 녹)의 유무를 단순히 판단하는 수동적인 방법으로 작업자의 추가 유지보수를 필요로 한다. 작업자의 개입은 유지보수 비용과 작업의 위험성을 직접 증가시키며, 손상부를 적시에 유지보수하지 못하고 시간 지연으로 손상부가 확대 악화되는 문제가 추가 발생하여 최종적으로 구조물의 수명을 크게 단축시킨다.

본 연구는 구조물 외부의 손상부를 적시에 능동적으로 유지보수하고 구조물의 수명 향상을 위한 드론부착형 분사장치를 개발하며 현장 적용하여 검증한다. 여기서 능동적 유지보수는 드론을 사용하여 구조물 외부의 손상부를 직접 유지보수하며, 기존 작업자가 유지보수하는 수동적 유지보수와 대비된다. 또한 능동적 유지보수는 구조물 측정, 손상부 판단, 지능형 보수 작업을 모두 드론이 진행하는 자동 유지보수의 전 단계이다. 분사장치는 구조물 유지보수의 간소화를 위해 시중에서 구입이 용이한 스프레이 형태의 유지보수제를 솔레노이드 구동으로 구조물 손상부에 직접 분사하는 구조이며[23], 상용 드론에 탈부착이 용이하도록 설계한다. 또한 구조물의 손상 종류에 따라 방청, 방오, 방수의 기능성 유지보수제를 구조물의 손상부에 선택적으로 원격 분사하여 유지보수하는 공정을 구현한다. 설계한 분사장치의 주요부품은 3D 프린팅으로 제작하고, 제작한 분사장치는 경일대학교 건물의 손상부에 적용하여 유지보수를 진행한다.

2. 드론부착형 분사장치 설계

2.1 분사장치 구조

드론부착형 분사장치는 구조물 손상부에 접촉하여 유지보수제를 자동으로 분사하며, Fig. 1과 같이 구조물 접촉부, 분사구동부, 유지보수제 탈부착부로 구성한다. 여기서, 분사장치의 주요 구성품인 솔레노이드와 유지보수제는 드론의 무게중심

수직축에 위치하도록 설계하여 안정적인 드론비행을 도모한다.

(1) 구조물 접촉부(Structure Contact Part)

구조물 접촉부는 분사장치가 부착된 드론이 구조물의 손상부에 접촉하면 동작하는 접촉 스위치와 유지보수제를 일정 영역에 제한적으로 분사하기 위한 깔때기 형상으로 설계한다. 또한 구조물 손상부에 접촉 시 드론의 자세가 다소 불안정한 경우에도 유지보수제를 안정적으로 분사하기 위하여 다수의 접촉 스위치로 구성한다.

(2) 분사 구동부(Spraying Part)

분사 구동부는 구조물 접촉부의 스위치 신호에 따라 솔레노이드를 On/Off 구동시키고, 스프레이 형태의 유지보수제가 분사하는 기능을 수행한다. 하지만 소형 솔레노이드는 스프레이를 분사하기 위하여 충분한 구동력, F_i 을 발생시키지 못하며, 솔레노이드의 구동력 F_i 은 Class II의 레버 기구(Lever Mechanism)를 사용하여 구동력 F_o 로 증폭시킨 후 스프레이를 분사하도록 하였다. 여기서 식(1)의 레버 비율 L 은 3장에서 실험적으로 결정하였다.

$$L = \frac{x_i}{x_o} = \frac{F_o}{F_i} \tag{1}$$

(3) 유지보수제 탈부착부(Detachable Part)

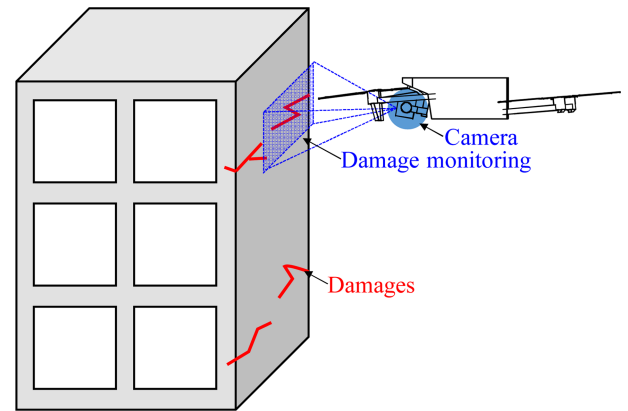
유지보수제는 방청, 방오, 방수 기능을 포함하여 다양한 종류가 있으며, 손상부는 적절한 유지보수제를 선택적 혹은 순차적으로 사용하여 유지보수한다. 따라서 드론부착형 분사장치는 다양한 크기를 가진 스프레이 유지보수제의 탈부착이 용이하여야 한다. 원통형 스프레이 유지보수제는 ‘V’형상의 치구에 고정하여 분사장치에 조립하며, 여러 크기의 ‘V’치구를 사용하여 유지보수제를 분사장치에 용이하게 탈부착한다.

2.2 손상부 유지보수 공정

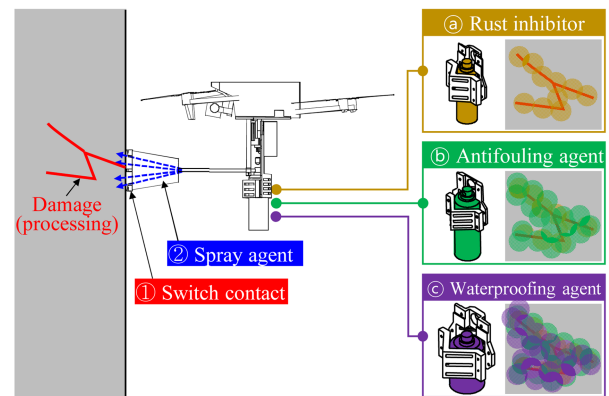
구조물 외부의 손상부는 Fig. 2(a)와 같이 드론에 장착한 카메라를 사용하여 지상에서 모니터링하며, 작업자는 지상에서 분사장치를 드론에 부착하고 고층의 손상부를 유지보수한다. 유지보수는 Fig. 2(b)와 같이 손상부에 따라서 방청, 방오, 방수 기능의 스프레이 유지보수제를 분사장치에 선택적 혹은 순차적으로 탈부착하여 진행한다.

3. 구조물 손상부 유지보수의 실험

본 연구에서 제안한 분사장치는 구조물을 적시에 능동 유지보수하기 위하여 상용 드론에 탈부착이 용이하며, 널리 사용하고 있는 상용 카메라 드론(Mavic3, DJI, China)에 부착하여 유지보수 여부를 확인한다.



(a) Damage monitoring of a structure using a drone



(b) Sequential spraying of maintenance agents

Fig. 2 Active maintenance processes for structure damages

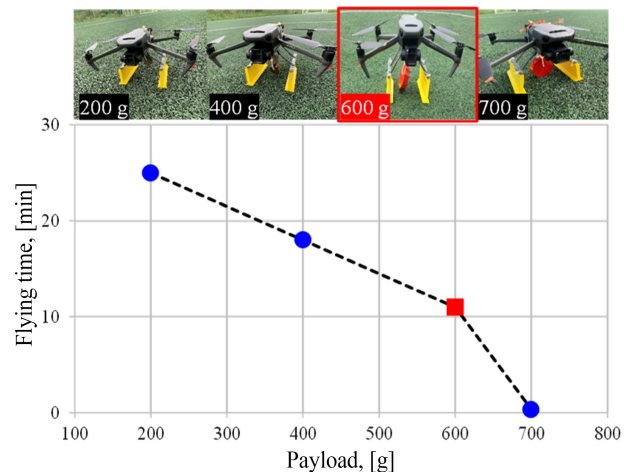
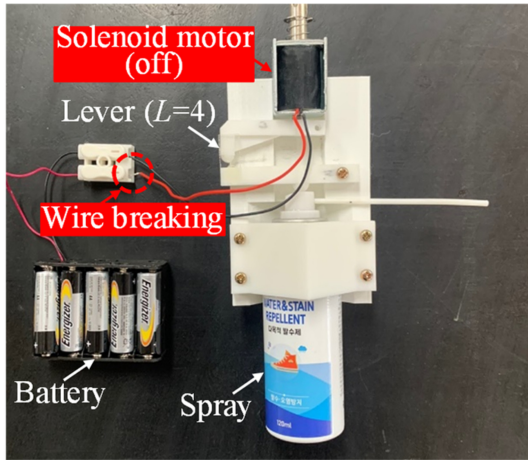


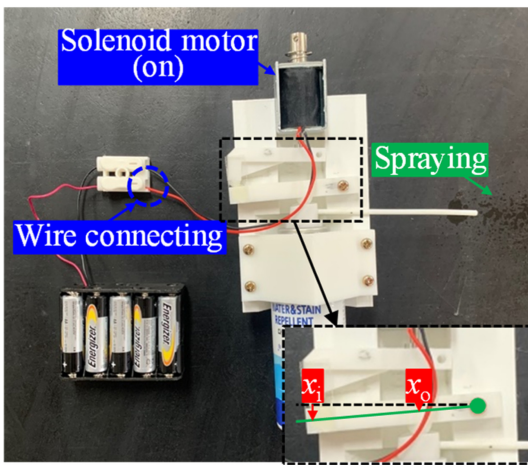
Fig. 3 Flying time of an experimental drone according to the payload

3.1 분사장치 제작

드론의 장시간 비행과 유지보수를 위하여 분사장치는 경량 설계가 필요하다. 본 연구에서 사용한 상용 드론은 카메라 드론이며, 제조사는 별도의 페이로드(Payload)를 제공하지 않는다. 따라서 페이로드에 따른 해당 드론의 비행시간을 Fig. 3과 같이 실험적으로 확인하였다. 드론의 비행시간은 페이로드의 증가에



(a) At wire breaking



(b) At wire connecting

Fig. 4 A testbed to determine the lever ratio for a spraying agent using a solenoid motor

따라 감소하며, 드론은 페이로드가 600 g 이상인 경우 불안정한 비행을 한다. 따라서 분사장치는 최대 중량 600 g을 가지도록 경량 설계하며, 이러한 경우 유지보수의 비행시간은 약 10분이다.

제작에 사용한 소형 솔레노이드는 구동력이 약 10 N이며, 실험적으로 확인한 스프레이 유지보수제의 최소 구동력은 약 30 N이다. 따라서 원활한 유지보수제 분사를 위하여 Fig. 4와 같이 레버 비율 $L = 4$ 를 가진 Testbed를 사용하여 솔레노이드 구동에 따른 스프레이 유지보수제의 분사를 확인하였다. 분사장치는 드론의 최대 페이로드 600 g 이내에서 3D 프린팅을 통하여 경량 제작하였으며, Fig. 5와 같이 페이로드 기준을 충족시킨다. 제작한 분사장치를 부착한 드론은 앞서 페이로드 실험과 같이 약 10분의 안정적인 비행시간을 나타낸다.

3.2 손상부 유지보수 실험

제작한 분사장치의 타당성은 경일대학교 건물에서 저층의 손상부에 적용하여 확인하고, 이후 해당 건물에서 고층의 손상부에 적용하여 유지보수한다. 손상부와 접촉하는 분사장치의

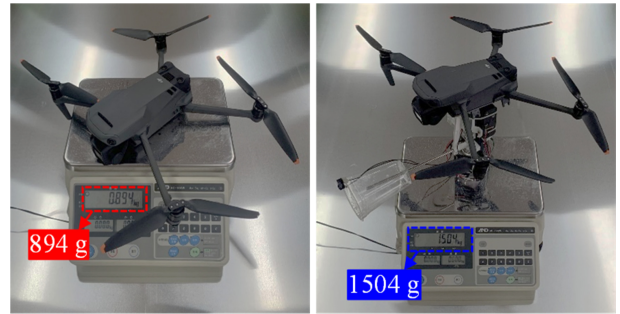


Fig. 5 Weight of the drone wo/w a spraying device

갈때기는 Fig. 5와 같이 투명한 재질로 제작하였으며, 이는 이상의 작업자가 육안으로 유지보수제의 분사여부를 Fig. 6과 같이 확인하기 위함이다.

(1) 저층의 손상부 유지보수

실험은 방청, 방오, 방수 기능을 가진 3가지 스프레이형 유지보수제를 각각 사용하였다. 유지보수는 2.2장에서 언급한 바와 같이 유지보수제를 순차적으로 분사장치에 부착하고 손상부에 분사하는 공정으로 진행한다. 건물의 저층 손상부는 실험자가 육안으로 선별하였으며, 이후 분사장치를 부착한 드론을 비행제어하여 Fig. 6과 같이 해당 손상부에 접촉하여 유지보수제를 분사하였다. 유지보수제의 분사여부는 손상부 주요 지점에서 RGB의 평균값을 사용하여 판단하였다. 구조물 손상부에서 주요 지점의 RGB 값은 보수 전/후 각각 (46, 26, 17), (162, 163, 158)이며, RGB의 평균값은 각각 30, 161으로 536%의 개선을 나타낸다. 따라서 구조물 손상부는 분사장치를 부착한 드론을 사용하여 성공적으로 유지보수 되었으며, 이를 통해 본 연구에서 개발한 분사장치의 타당성을 검증하였다.

(2) 고층의 손상부 유지보수

작업자의 접근이 어려운 고층의 손상부는 드론 촬영을 통하여 확인하였으며, 분사장치를 드론에 부착하고 방청, 방오, 방수의 유지보수제를 해당 손상부에 순차적으로 분사하였다. 손상부는 Fig. 6과 같이 유지보수 전/후에 명확한 차이를 보이며, 주요 지점의 RGB 값은 보수 전/후 각각 (75, 45, 29), (148, 133, 114)이며, RGB의 평균값은 각각 50, 132으로 264%의 개선을 나타낸다. 고층 손상부에서 RGB 평균값의 개선 정도는 저층 손상부의 개선 정도보다 작으며, 이는 고층에서 드론의 비행이 상대적으로 불안정하여 주요 지점에 집중적인 유지보수제 분사가 이루어지지 않아서 발생한다. 하지만 고층의 손상부에 유지보수제가 상당히 분사되었으며, 유지보수가 성공적으로 진행된 것을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 다양한 고층 구조물의 능동 유지보수를 위하여

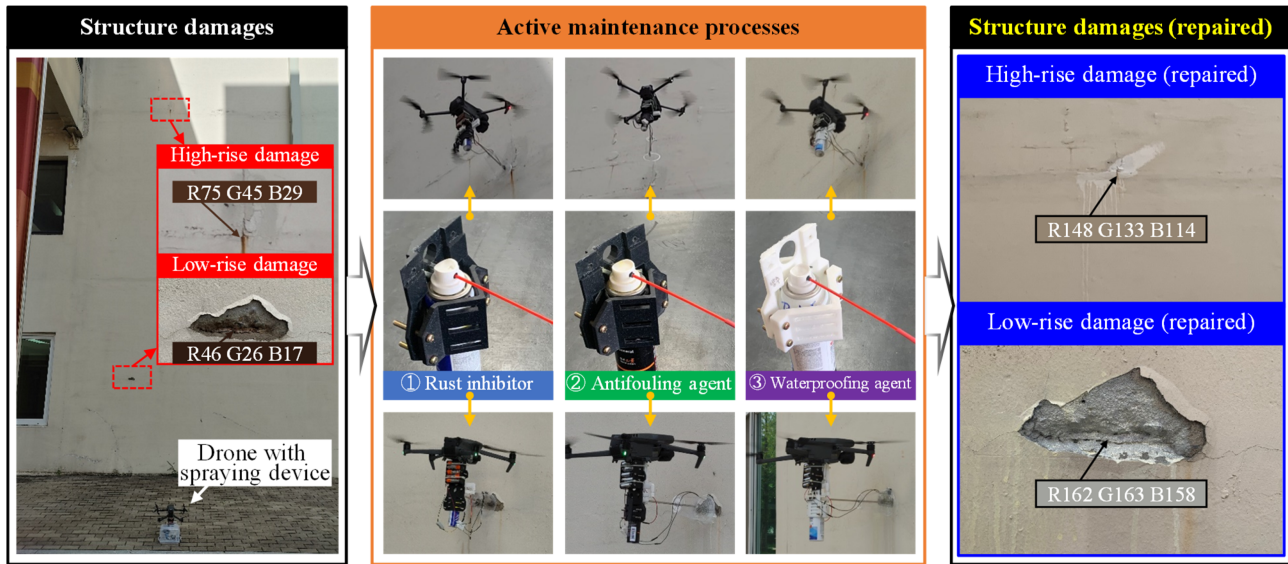


Fig. 6 Active maintenance processes using an drone with a spraying device for damages at high-/low-rise

구조물 접촉부, 분사 구동부, 유지보수제 탈부착부로 구성된 드론부착형 분사장치를 개발하였다. 분사장치는 구조물 손상부의 적시 유지보수를 위해 상용 드론에 스프레이형 유지보수제를 탈부착하도록 경량 설계하였다. 분사장치를 부착한 드론은 경일대학교 건물에서 저층과 고층의 손상부를 모두 유지보수하는 것을 확인하였으며, 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 드론은 높은 공간접근성의 강점을 가지고 다양한 응용분야에서 지속적으로 확대 사용하고 있으며, 관심 대상의 영상 분석을 통하여 문제를 해결하는 장점이 있다. 기존 영상 분석의 수동적 문제해결뿐만 아니라 새로운 드론 장치와 공정을 개발하여 사회적 문제를 능동적으로 해결한다면 드론의 응용분야는 더욱 비약적으로 확장된다.

(2) 고도화된 현대 사회는 다양한 고층 구조물을 건설하며, 기존의 유지보수 방법은 작업자의 개입에 따라 비용이 증가하고 균열과 녹이 발생한 손상부를 적시에 유지보수하지 못하여 구조물의 수명이 감소하는 문제가 있다. 드론의 능동적 활용은 손상부에 대한 작업자의 접근성을 높이고, 적시에 유지보수하여 구조물의 수명을 크게 개선한다.

(3) 안전이 보장된 지상에서 드론을 사용한 유지보수는 작업자의 부상과 질병을 방지하고 저층과 고층의 여러 손상부에 대한 유연한 접근으로 작업 효율이 높다. 경일대학교 건물의 유지보수 실험은 저층과 고층에 발생한 균열을 총 10분 내외의 시간으로 작업자가 지상에서 안전하게 유지보수하며, 드론을 사용한 능동 유지보수 방법의 타당성을 나타낸다.

(4) 드론을 사용한 구조물 유지보수는 드론의 활용 영역을 일상생활로 확대하고, 사회적 주요 자산인 구조물의 수명 향상에

기여하여 사회적 기회비용을 개선한다. 하지만, 드론의 능동적 활용은 핵심 기술을 개발하여 주요 위험(사생활 침해, 오작동과 손상, 안전과 소음, 법적 책임)을 감소시키고, 사회적 혜택(구조물 수명 향상, 아파트를 포함한 개인 자산의 가치 증가)을 극대화하여 대중화하는 것이 필요하다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 논문의 실험에 참여한 경일대학교 기계자동차학부생, 신재혁, 손동화, 이성현, 김준규 학생에게 감사를 표합니다.

REFERENCES

- Hassanalain, M., Abdelkefi, A., (2017), Classifications, applications, and design challenges of drones: A review, Progress in Aerospace Sciences, 91, 99-131.
- Korea Institute of Aviation Safety Technology, (2021), Domestic and foreign drone industry trends analysis report. http://www.kdrone.org/bbs/board.php?bo_table=data_rep&wr_id=18&sst=wr_hit&sod=desc&sop=and&page=1
- Drone Industry Insights, (2023), Global drone market report 2022-2030. <https://droneii.com/product/drone-market-report>
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport, (2017), Drone industry development basic plan. http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?lcmspage=1&id=95080117
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport, (2023), The 2nd drone industry development basic plan. http://www.molit.go.kr/USR/BORD0201/m_69/DTL.jsp?mode=view&idx=253539

6. Ministry of Science and ICT, (2018), Unmanned vehicle technology roadmap. <https://www.msit.go.kr/bbs/view.do?sCode=user&bbsSeqNo=65&nttSeqNo=1373988>
7. Ayanga, M., Akaba, S., Nyaaba, A. A., (2021), Multifaceted applicability of drones: A review, *Technological Forecasting and Social Change*, 167, 120677.
8. Ahmed, F., Mohanta, J., Keshari, A., Yadav, P. S., (2022), Recent advances in unmanned aerial vehicles: A review, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(7), 7963-7984.
9. Mogili, U. R., Deepak, B., (2018), Review on application of drone systems in precision agriculture, *Procedia Computer Science*, 133, 502-509.
10. Hafeez, A., Husain, M. A., Singh, S., Chauhan, A., Khan, M. T., Kumar, N., Chauhan, A., Soni, S., (2022), Implementation of drone technology for farm monitoring & pesticide spraying: A review, *Information Processing in Agriculture*, 10(2), 192-203.
11. Kellermann, R., Biehle, T., Fischer, L., (2020), Drones for parcel and passenger transportation: A literature review, *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 4, 100088.
12. Moshref-Javadi, M., Winkenbach, M., (2021), Applications and research avenues for drone-based models in logistics: A classification and review, *Expert Systems with Applications*, 177, 114854.
13. Rejeb, A., Rejeb, K., Simske, S., Treiblmaier, H., (2021), Humanitarian drones: A review and research agenda, *Internet of Things*, 16, 100434.
14. Daud, S. M. S. M., Yusof, M. Y. P. M., Heo, C. C., Khoo, L. S., Singh, M. K. C., Mahmood, M. S., Nawawi, H., (2022), Applications of drone in disaster management: A scoping review, *Science & Justice*, 62(1), 30-42.
15. Nwaogu, J. M., Yang, Y., Chan, A. P., Chi, H.-L., (2023), Application of drones in the architecture, engineering, and construction (AEC) industry, *Automation in Construction*, 150, 104827.
16. Rakha, T., Gorodetsky, A., (2018), Review of unmanned aerial system (UAS) applications in the built environment: Towards automated building inspection procedures using drones, *Automation in Construction*, 93, 252-264.
17. Kim, J. S., Yoon, H. J., Kim, D. H., Park, C. H., (2022), Evaluation of wind resistance of drone for unmanned inspection of railway facilities, *Journal of the Korean Society for Railway*, 25(9), 601-609. <https://doi.org/10.7782/JKSR.2022.25.9.601>
18. Shin, C. H., Min, G. J., Kim, G. G., Jeon, P. R., Park, H., Cho, S. H., (2022), A study on the 3D precise modeling of old structures using merged point cloud from drone images and LiDAR scanning data, *Explosives & Blasting*, 40(4), 15-26. <https://doi.org/10.22704/ksee.2022.40.4.015>
19. Kim, J. M., Hyeon, S. G., Chae, J. H., Do, M. S., (2019), Road crack detection based on object detection algorithm using unmanned aerial vehicle image, *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, 18(6), 155-163.
20. An, Y. K., Bae, H. J., Jang, K. Y., (2021), Deep learning-based crack evaluation of bridges using drone and climbing robot, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, 41(6), 349-357.
21. Kang, C. I., Lee, D. H., Chung, K. H., Ahn, H. J., (2022), Study on a wall climbing drone with tilt-rotor attitude conversion, *The Korean Society of Mechanical Engineers*, 10(1), 91-97.
22. Lee, D. H., Ahn, H. J., (2023), Adhesion force of the modular permanent magnet wheel-leg according to the posture of a wall climbing drone, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 40(6), 493-498. <https://doi.org/10.7736/JKSPE.022.132>
23. Kyungil University, (2020), Can-spray drones for building repair, 1020848530000. <http://kpat.kipris.or.kr/kpat/biblioa.do?method=biblioFrame>



Seung-Han Yang

Professor in the School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University. His research interests are intelligent manufacturing systems and CAD/CAM.
E-mail: syang@knu.ac.kr



Kwang-II Lee

Associate Professor in the School of Mechanical and Automotive Engineering, Kyungil University. His research interest are CAD/CAM/CAE, mechanical design for automotive and precision engineering.
E-mail: kilee@kiu.kr