

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2024.10.6.759>

JCCT 2024-11-93

농업용 방제 드론의 분사 노즐 변화에 따른 실험적 분석

Experimental Analysis of the Effects of Spray Nozzle Variations on Agricultural Pest Control Drones

이우람*

Wooram Lee*

요약 최근 멀티콥터를 적용한 농업용 방제 작업에 대한 수요가 높아짐에 따라 높은 작업 효율, 편의성 및 적용성 등에 관한 요구가 높아지고 있다. 농업용 방제 작업의 경우 비산 현상에 관한 문제를 개선하기 위해 선행연구와 비교 분석을 통해 다양한 노즐에 대한 비산 현상 저감 방안에 대한 실험적 검증을 수행하였다. 본 연구에서는 노즐 변화에 따른 비산 현상에 관한 특성을 실험적으로 검증하는 것을 목적으로 하며, 살포 후 감수지에 대한 평가를 통해 도포 성능을 예측할 수 있다. 실험 결과 DG 노즐이 피복률이 상대적으로 높게 나타났으며, 비행 속도가 증가함에 따라 피복률은 상대적으로 감소하였다. 이는 비행 속도를 증가하기 위해 기체의 기울기 변화 및 로터의 추력 증가에 따라 하향 풍이 상대적으로 감소하여 비산 현상에 대한 영향을 증가시켜 목표 지점에 낙하 입자를 감소시켰다. 비행 고도가 증가함에 따라 피복률은 상대적으로 감소하였다. 이는 비행 고도가 높아짐에 따라 유효 살포 거리가 넓어지며, 단위 면적당 낙하 입자의 부착량이 감소하였다. 이를 통해 적절한 분사 조건(비행 고도 및 속도)을 도출할 수 있으며, 방제 작업의 비산 현상을 최소화하여 최적의 방제 작업 공정에 적용하고자 한다.

주요어 : 농업용 드론, 비산, 노즐, 비행 고도, 비행 속도, 분사 조건

Abstract An agricultural drones are the increasing demand for the use of multicopters in spraying operations, there is a growing emphasis on high operational efficiency, convenience, and applicability. In agricultural spraying tasks, efforts to address the issue of spraying drift have led to experimental validation of various nozzle designs aimed at reducing drift through comparative analysis with prior research. This study aims to experimentally validate the characteristics of drift associated with different nozzles and predict application performance by evaluating the target areas post-spraying. The results showed that the DG nozzle achieved a relatively higher coverage rate. As flight speed increased, coverage rate decreased relatively. This was due to reduced downward wind resulting from changes in the aircraft's tilt and increased rotor thrust, which enhanced drift and reduced the number of droplets reaching the target area. This was because higher flight altitude resulted in a wider effective spraying distance, which reduced the droplet deposition per unit area. Similarly, as flight altitude increased, the coverage rate also decreased relatively. This decrease in coverage was due to the wider effective spraying distance at higher altitudes, resulting in reduced droplet deposition per unit area. These findings allow for the derivation of optimal spraying conditions(flight altitude and speed) and aim to minimize drift in pest control operations, thereby applying these optimal conditions to improve the spraying process.

Key words : Agricultural drone, spraying drift, Nozzle, Flight altitude, Flight speed, Spraying condition

*정회원, 경운대학교 무인기공학과 조교수 (단독저자)
접수일: 2024년 8월 15일, 수정완료일: 2024년 9월 19일
게재확정일: 2024년 11월 5일

Received: August 15, 2024 / Revised: September 19, 2024

Accepted: November 5, 2024

*Corresponding Author: wooramlee@ikw.ac.kr

Dept. of Unmanned and Autonomous Vehicle Engineering ,
Kyungwoon University, Korea

I. 서 론

현재 무인이동체(UAV(Unmanned Aerial Vehicle, 무인항공기) 및 드론 등) 등을 활용한 산업 분야에는 방송 및 군집 비행, 측구 및 레이싱, 물류 및 이송, 에너지 활용 및 농업 분야 등 다양한 분야에서 상대적으로 높은 효율성 및 적용성을 나타내고 있다 [1]. 또한 국내 무인이동체 분야 시장의 규모 또한 2020 년 6 월 기준 4,595 억원이며, 2026 년까지 연평균 약 29%의 급성장으로 예상된다. 특히, 농업 및 임업 분야에서는 국내 민수용 시장에서 드론의 적용이 56% 로 가장 높은 비율을 가지고 있으며, 병해충 감시 및 방제 등 다양한 분야에 활발하게 적용 및 활용되고 있다 [2]. 덧붙여, 많은 노동력이 투입되거나, 위험성이 높은 분야에서의 드론의 역할은 수많은 기술의 발전과 새로운 분야의 성장 동력의 산업 분야로 발전 가능성이 매우 큰 것으로 예측된다. 이러한 농업용 드론 분야는 국내에서 농가 인구 부족 문제 및 고령화에 따라 이의 대응 방안으로 작업의 효율성 및 생산량 증가를 위해 스마트 농업 시장에서 비교적 빠른 성장 및 수요를 보인다 [3]. 또한, 농작물 관리 체계 및 효율성에 제고에 대한 농작물의 식생지수 분석을 드론으로 대체하고 있으며, 병해충 방제 작업은 노동력 대비 농작물 품질 및 생산량 증가가 필수적인 요소이다. 드론에 장착된 다양한 임무 장치를 이용해 토양 모니터링, 농작물 성장 상태, 파종 및 살포 등의 임무를 수행할 수 있다 [4-5].

고온/다습한 환경에 농약을 살포하는 경우 노동력의 비중이 다소 높아 농약 중독 환경에 노출되며, 농약 대량 살포 시 비산 현상이 발생하여 정밀한 분사 작업이 어렵고, 경제적인 손실도 수반된다. 덧붙여, 드론을 활용한 방제 작업으로 인한 농약의 비산 피해와 분쟁이 증가하고 있으며, 2023년 농식품부에서는 농약 피해 분재 조정 위원회가 설치되었다 [2]. 덧붙여, 국내에서 적용되고 있는 스마트 농업 방식 및 분야에서는 농업용 방제 드론에 걸맞은 운용 기준 및 방법 등이 부재하여, 방제 작업 시 발생하는 비산 현상 및 피해에 관한 해결 방안 기초 연구가 부족한 실정이다.

농업용 방제 드론의 경우 방제면적 산출, 유효 살포 시간, 간격 및 폭 등을 정의에 관한 연구가 보고가 되었다 [4]. 이처럼 농업용 방제 드론은 수치적인 검증은 수행되었으나, 노즐 변화에 따른 살포 및 비산에 관한

연구 보고는 상대적으로 부족한 상황이다. 기존 방제 작업 시 Teejet 사의 XR 계열의 노즐이 대중적으로 장착이 되었다 [6]. 이와 관련하여 드론의 살포 특성에 관해 분석하고 있지만, 실용성이 상대적으로 낮아 드론의 비행 고도 및 속도로 인해 방제용 드론의 전용 노즐의 개발이 필수적이며, 다양한 노즐이 개발되어 관련 연구가 지속해 이루어지고 있는 추세이다 [7]. 이처럼 정밀한 살포 범위, 성능 및 변수 등이 요구되며, 이를 위해 보다 정확한 살포 특성에 대한 평가를 통해 살포 기술의 최적화가 필요하다.

Java 기반의 영상처리 프로그램을 이용하여 감수지(water sensitive paper)에서 도포 면적을 검출해 살포 결과를 분석하였고 [8], 비행 속도, 노즐 크기 등의 분무 변수, 기압 및 온도 등의 기온 변수를 고려하여 회귀모델을 살포 결과에 반영하였다 [9]. 이미지 전처리 및 가공 방식을 접목하여 개선된 성능의 살포 면적 분석 및 감지 프로그램 개발 [10] 등 여러 선행 연구를 통해 다양한 살포 결과 측정이 가능해졌다. 이처럼 살포 결과를 영상 기반으로 추정하는 기술은 배경의 혼잡, 원근 변화 및 시점 변화 등의 다양한 잡음 및 변수에 대한 정확한 패턴 및 정보를 도출하는 방법이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 노즐 변화에 따른 비산 현상에 관한 특성을 실험적으로 검증하는 것을 목적으로 하며, 살포 후 감수지에 대한 평가를 통해 도포 성능을 예측할 수 있을 것으로 예상된다. 이는 드론을 이용한 방제 작업 성능 평가에 기초 자료 및 기술로 적용할 수 있다.

II. 실험 재료 및 방법

1. 농업용 드론 사양

본 연구에 적용된 방제용 드론은 EFFORT TECH 社 EFT 610 상용 모델로 Figure 1. 에 나타내었다 [7]. 해당 드론의 경우 FC 는 A3-AG(DJI 社), 크기 1,495 × 1,308 × 500 mm, 분사 용량 10 L, 최대 이륙 중량 24.9 kg 이다. 배터리 용량 22.8 V, 12,000 mAh Li-Po 배터리 2 개를 사용하였으며, 실험 시간은 약 6-7 min 정도이다. 탑재된 장치의 사양은 고압용 분사 장치를 최소 조건으로 판단 및 설치하여 장치를 적용하였다.



그림 1. 방제용 드론 형상(EFT 610)
 Figure 1. Photo of spraying drone(EFT 610)

적용된 분사 장치의 경우 Teejet 社 DG11002 와 XR110015VS 를 선정하였고, 노즐 직경은 약 200 μm , 189 μm 의 노즐로써 탱크 중앙 1 개, 좌·우에 3 개씩 총 7 개(전동 노즐 3 개, 연장 노즐 4 개)의 노즐로 장착되었다(Figure 2). 분사 간격은 전동 노즐 약 3-4 m, 연장 노즐 약 4-5 m 를 유지할 수 있도록 적용되었고, 모터 펌프의 경우 WJD 社 의 BPP-25 모델을 사용하였다[7].

다양한 액적의 크기 및 수치 데이터를 도출하기 위해 분사하는 평균 액적 크기는 체적 중위 직경(volume median diameter) 과 유량(flow rate) 이 다른 노즐 팁을 선정하여 시험을 진행하였다.



(a) DG11002 (200 μm) (b) XR110015VS (189 μm)
 그림 2. 노즐 팁 형상
 Figure 2. Photo of nozzle series

2. 살포 비행 시험

본 연구에 적용된 드론 기체의 노즐 팁에 따른 액적 살포 양상, 피복도(Coverage)의 유의성 및 실험적 검증을 위해 선행연구의 수치적 예측을 감수지를 통해 실험적으로 낙하 입자를 분석하였다. 선행연구[4, 7] 에서 제시된 비행 속도 변화에 따른 분포를 실험적으로 검증하는 목적이 있으며, 노즐 팁 변화에 따른 목표 지점의 피복도 차이를 실험해 유의성 및 적용성을 확인하였다.

실험 장소는 경남 진주시 집현면 지내리에서 진행되었으며, 선행 연구 보고[7]를 통해 바람의 영향이 상대적

으로 약한 오전 7-9 시 사이에 수행하였다.

Figure 2. 는 낙하된 액적의 분포를 관찰할 수 있는 감수지 부착 위치 및 수량이며, 가로 7장, 세로 5장, 총 35장으로 구성되어 부착하였다. 살포 고도는 농촌진흥청에서 제시하는 3 m 의 기준으로 2-4 m 범위에서 1 m 씩 증가시켜가며 실험하였고, 비행 속도는 선행연구 보고[4-7]를 통해 2-4 m/sec. 기준으로 1 m/sec. 씩 증가시켜가며, 약 90 회 비행을 설정하여 실험을 수행하였다.

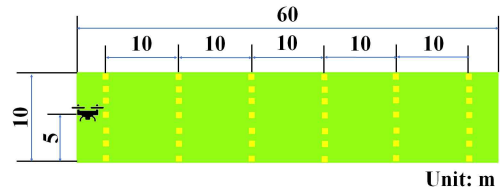


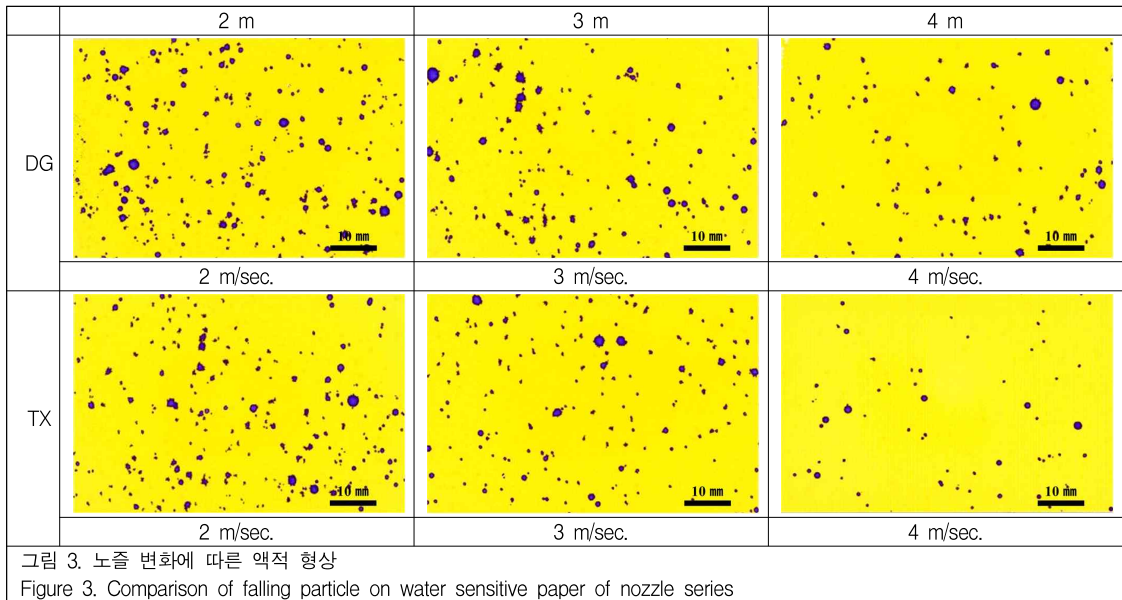
그림 2. 분사 실험 모식도
 Figure 2. Field Test of Spraying with Drone

III. 결과 및 토론

1. 낙하 액적 관찰 및 분석

선행연구 보고[12]에서 제시한 실험적 검증을 통해 드론용 약액 분사 시스템은 유동 특성 및 분무 특성(성능 등) 평가를 위해선 최적화된 계측 시스템이 필요하다. 드론의 비행 각도, 속도 및 프로펠러 rpm 등을 제어할 수 있는 자동 운용 모드와 드론의 하향 풍 및 분사액의 유체역학적 거동을 측정할 수 있는 실험적 계측 파트 구성이 필수적이다.

Figure 3. 은 노즐 팁 별 낙하 액적에 대한 감수지 형상이다. 낙하된 약액이 비산되거나 하향풍에 의해 상쇄되는 거리를 살포 유효거리를 적용하여 관찰한 결과 액적의 입자 낙하 양상은 노즐 별로는 차이가 비교적 없는 것으로 판단된다. 비행 고도가 높아질수록 입자의 수가 적어지는 경향은 관찰되었고, 이는 고도 2 m 일 때 살포 유효거리가 작아졌기 때문이다. DG 노즐을 기준으로 XR 노즐의 경우 입경의 크기가 작아지는 경향이 나타났고, 이는 DG 노즐이 방제 대상에 가장 많은 약액을 낙하하는 것을 의미하며, 주변으로 비산 현상으로 손실된 약액이 상대적으로 많다는 것으로 판단된다. 비행 고도 2 m 에서 액적 부착 특성이 양호하게 유지하고 있으나, 3 m/sec. 속도에서는 액적 부착이 불안정함을 알 수 있다. 이는 일정한 분무 압력으로 분사 유



덧붙여, 비행 고도가 높아짐에 따라 하향 풍이 확산하고, 비행 속도에 따른 비행 각이 커지면서 후방으로 후류가 크게 발생하는 것으로 추정한다.

드론 기체의 정중앙 노즐 부분에서 하향 풍 영향을 상대적으로 작게 받는 경향은 드론 프롭펠러가 기체의 가장자리에 있어 하향 풍이 기체 중앙으로 확산하지 못하는 것으로 판단된다. 또한 선행연구[6-7]와 비교 분석한 결과 비행 고도 3 m 이상에서는 하향 풍의 확산이 정성적으로 높아지는 것을 실험적으로 검증하였다. 하향 풍의 세기는 약 12 m/sec. 내외인 것으로 판단되며, 비행 고도가 4 m 이상에서는 하향 풍이 확산하기 때문에 세기가 점차 낮아지는 것을 예측할 수 있다.

이와 같은 결과를 종합하면, 농업용 방제 드론의 경우 비행 고도 1 m 정도에서는 하향 풍이 강하게 목표까지 도달하지만, 하향 풍이 확산하지 않아 액적의 유효 살포 거리의 폭이 좁아지게 되고, 상대적으로 좁은 면적에 강한 하향 풍이 불면 작물에 영향을 줄 것으로 판단된다. 또한, 비행 고도 1 m 이하일 경우 방제 작업 시 추락에 즉각적인 대응이 어려워 사고의 위험성이 존재한다. 비행 고도 3 m 이상으로 비행할 때 하향 풍의 확산이 커져 하향 풍 영향이 상대적으로 적어짐에 따라 약액이 목표(작물) 지점까지 도달하지 않을 경우도 발생한다. 감수지 형상을 관찰한 결과 비행 고도는 2-3 m 안의 범위에서 하향 풍의 세기와 확산이 적절하다고 추정되며, 이에 대한 안전성을 확보할 수 있다.

2. 피복도 분석

방제 작업 시 비행 속도가 피복률에 미치는 영향을 분석한 결과를 Figure 4. 로 표현하였다. DG 및 TX 노즐의 경우 비행 속도가 증가함에 따라 피복률이 감소하였다. 이는 일반 드론 및 방제용 드론 모두 해당하는 구조적 특성 때문으로 판단된다. 비행 속도가 증가할 때 드론의 피치 수치가 상대적으로 증가하게 되고, 이를 통해 노즐의 분사 방향이 지면 및 목표에서 공중 방향으로 변화하게 된다. 따라서 하향 풍이 약해지고 분무 입자들이 후방 또는 측면으로 이동하는 양이 많아져 비산 현상을 유발하는 것을 선행연구[13]에서 보고하였다. 또한, 비행 속도를 증가시킬 때 프롭펠러(로터)의 회전 속도가 증가하여 발생하는 바람의 세기가 상대적으로 높아지는데, 이는 분무 입자의 비산량을 증가시켜 피복률을 감소시킨다. 따라서 방제 성능을 극대화하기 위해서는 비행 속도를 일정 범위에서 제한하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

덧붙여, 비행 고도가 증가함에 따라 유효 살포 거리의 폭이 넓어지지만, 단위 면적당 낙하하는 약액의 양이 감소하는 만큼 방제 효율 또한 감소한다. 또한, 분무 입자가 낙하하는 거리가 증가하는 만큼 후류 및 측면 풍이 비산할 가능성 또한 증가한다. 따라서 비행 고도의 경우 약 3 m 이하에서 비행하는 것이 바람직하다.

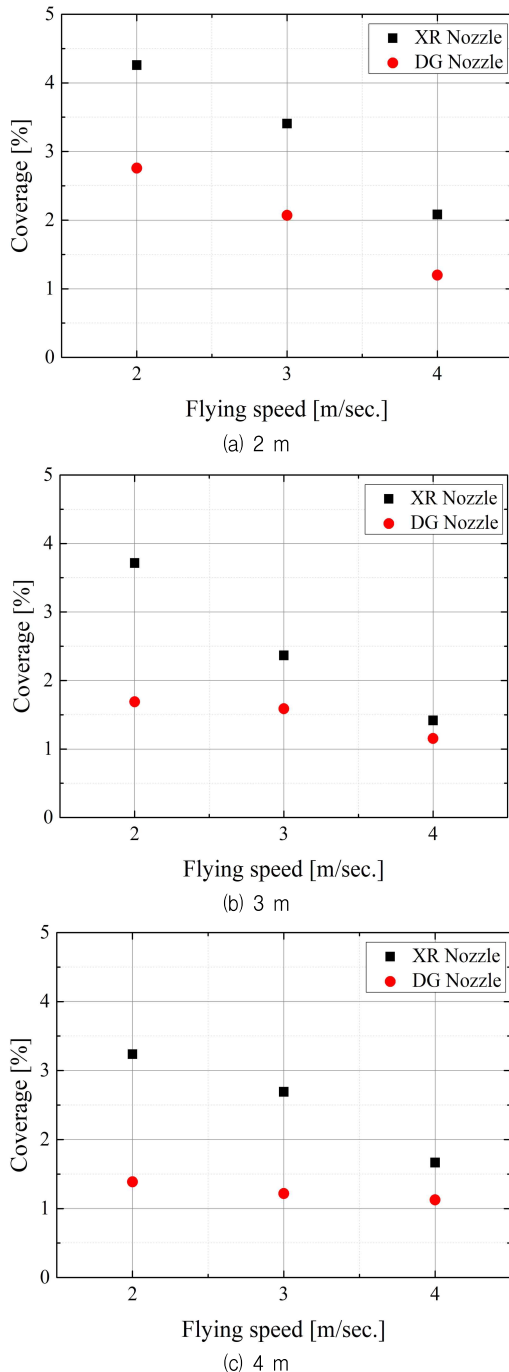


그림 4. 비행 고도 변화에 따른 피복률
 Figure 4. Effect of flying altitude on coverage

IV. 결론

본 논문에서는 분사 노즐 팁 변화에 대한 현장 적용성에 대한 평가를 통해 이에 대한 성능을 실험적으로 분석하였다. 선행연구에서 실험적으로 제시한 DG 과 XR 노즐 팁을 이용하여 다양한 분무 조건에서 실제 방제와 동일한 조건을 실험적으로 검증하였다. 비행 고도 2-4 m, 비행 속도 2-4 m/sec. 을 실험 조건으로 설정하였고, 이에 대한 분석은 낙하 액적 관찰 및 피복도 분석을 수행하였다. 제안된 실험 방법을 통해 분석된 결과는 다음과 같이 요약하였다.

1) DG 노즐과 XR 노즐을 비교한 결과 실험 조건에서 DG 노즐이 피복률이 상대적으로 높게 나타났다. 이는 XR 노즐을 사용할 경우 낙하 입자가 더 커서 후류, 측면 및 하향 풍에 의한 영향을 상대적으로 덜 받기 때문이다.

2) 비행 속도가 증가함에 따라 피복률은 상대적으로 감소하였다. 이는 비행 속도를 증가하기 위해 기체의 기울기 변화 및 로터의 추력 증가에 따라 하향 풍이 상대적으로 감소하여 비산 현상에 대한 영향을 증가시켜 목표 지점에 낙하 입자를 감소시켰다.

3) 비행 고도가 증가함에 따라 피복률은 상대적으로 감소하였다. 이는 비행 고도가 높아짐에 따라 유효 살포 거리가 넓어지며, 단위 면적당 낙하 입자의 부착량이 감소하였다.

덧붙여, 비행 속도 및 고도가 증가할수록 방제 작업의 효율은 상대적으로 높아지지만, 실제 작물에 전달되는 약액의 양이 상대적으로 감소하는 현상이 유발된다. 추가적인 연구 및 연구를 통해 적절한 분사 조건을 도출할 수 있을 것으로 판단되며, 추후 낙하 입자의 침투율을 실험적으로 검증할 예정이다.

References

[1] S. Lee, S. Y. Choi, K. H. Cho, D. Joo, D. Lim and J. Kim, "Drone Mapping System and Functions for Agricultural Spraying Drones Based on Spray Area," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers C*, Vol. 12, No. 1, pp. 1-9, 2024. <https://doi.org/10.3795/KSME-C.2024.12.1.001>.

[2] Korea Institute of Aviation Safety Technology, Domestic and Foreign Drone Industry Trends Analysis Report, *KIAST*, Incheon, Republic of Korea, pp. 1-228, 2021.

- [3] B. G. Gang, "The flight Test Procedures For Agricultural Drones Based on 5G Communication," *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 38-44, 2023. <https://doi.org/10.20910/JASE.2023.17.2.38>.
- [4] J. T. Lim, "Development of Spray Calculation Algorithm Using the Pest Control Drones," *Journal of Convergence for Information Technology*, Vol. 10, No. 10, pp. 135-142, 2020. <http://dx.doi.org/10.22156/CS4SMB.2020.10.10.13>.
- [5] Vijay Rana Mahima, "Impact of drone technology in agriculture," *Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, Vol. 9, No. 1, pp. 1613-1619, 2020. <https://doi.org/10.1002/9781394168002.ch14>.
- [6] U. J. Oh and J. T. Lim, "A Study on Drone Nozzle Design for Greenhouse Shading," *The Journal of Korea Institute of Convergence Signal Processing*, Vol. 24, No. 4, pp. 249-254, 2023. <https://doi.org/10.23087/jkicsp.2023.24.4.011>
- [7] W. Lee, S. B. Lee and J. T. Lim, "Study on Experimental Verification of Uniform Control using Agricultural Drone," *The Journal of the Convergence on Culture Technology*, Vol. 9, No. 2, pp. 575-580, 2023. <https://doi.org/10.17703/JCCT.2023.9.2.575>
- [8] N. Otsu, "A threshold selection method from gray-level histograms," *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, Vol. 9, No. 1, pp. 62-66, 1979.
- [9] C. Nansen, et. al., "Optimizing pesticide spray coverage using a novel web and smartphone tool, SnapCard," *Agronomy for Sustainable Development*, Vol. 35, pp. 1075-1085, 2015.
- [10] O. B. Ozluoyunak and A. Bolat, "Development and assessment of a novel imaging software for optimizing the spray parameters on water-sensitive papers," *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 168, 2020.
- [11] K. J. Kang, "Nozzle flow characteristics and simulation of pesticide spraying drone," *Smart Media Journal*, Vol. 8, No. 4, pp. 38-45, 2019. <https://doi.org/10.30693/SMJ.2019.8.4.38>
- [12] W. Lee, "Experimental Verification of the Characteristic Analysis of the Agricultural Drone using Smart Operating Mode," *The Journal of the Convergence on Culture Technology*, Vol. 9, No. 6, pp. 1049-1055, 2023. <http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2023.9.6.1049>
- [13] S. H. Yu, J. Lee, Y. Kang and C. G. Lee, "Effects of UAV Nozzle and Spraying Condition on Spraying Performance in Rice Field," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 23, No. 12, pp. 803-808, 2022. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.12.803>

※ 이 연구는 2024년도 경운대학교 교내학술 연구비 지원으로 연구되었음.