

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2024.10.2.531>

JCCT 2024-3-63

방제드론 전용노즐의 유효살포폭 내 액적분포 및 수치해석 시뮬레이션

Simulation of The Effective Distribution of Droplets and Numerical Analysis of The Control Drone-Only Nozzle

임진택*, 유성구**

Jinteak Lim*, Sunggoo Yoo**

요약 최근 농업분야의 스마트 농기계로 분류되고 있는 방제드론은 농촌지역의 고령화 시대를 맞이하여 작업 시간 단축과 방제효과를 높이기 위해 하드웨어 및 소프트웨어를 결합하여 스마트 방제 및 자동방제 시스템 구축을 위해 노력하고 있다. 본 논문에서는 관리관제 및 자동방제 시스템 구축을 위한 기초연구로 방제드론 전용노즐의 특성을 분석하였다. 다양한 드론 모델의 종류, 방제사, 바람, 비행속도, 비행고도, 날씨 조건, UAV 농약 종류 등 다양한 변수를 고려하기 위해서는 노즐의 특성파악과 범용성을 고려하여 약제살포 기준 제시가 가능한 관련 연구가 필요하다. 따라서 다양한 변수 고려가 가능하도록 자체 설계노즐을 기반으로 유동해석(CFD) 시뮬레이션을 실시하고 감수지 실험을 통하여 액적분포의 이론값과 실험값을 비교 분석하였다. 추후 드론운용에 따른 다양한 변수를 고려하여 정확한 비산을 산출하고 관리관제 및 자동방제 시스템에 활용하고자 한다.

주요어 : 방제드론, 유동해석, 액적분포, 노즐, 유효살포폭

Abstract Control drones, which are recently classified as smart agricultural machines in the agricultural field, are striving to build smart control and automatic control systems by combining hardware and software in order to shorten working hours and increase the effectiveness of control in the aging era of rural areas. In this paper, the characteristics of the nozzle dedicated to the control drone were analyzed as a basic study for the establishment of management control and automatic control systems. In order to consider various variables such as the type of various drone models, controller, wind, flight speed, flight altitude, weather conditions, and UAV pesticide types, related studies are needed to be able to present the drug spraying criteria in consideration of the characteristics and versatility of the nozzle. Therefore, to enable the consideration of various variables, flow analysis (CFD) simulation was conducted based on the self-designed nozzle, and the theoretical and experimental values of the droplet distribution were compared and analyzed through water reduction experiments. In the future, we intend to calculate accurate scattering in consideration of various variables according to drone operation and use it in management control and automatic control systems.

Key words : Control drone, Computational fluid dynamics, Droplet distribution, Nozzle, Effective spread width

*정회원, 전주비전대학교 전기공학과 조교수 (제1저자)
**정회원, 전주비전대학교 전기공학과 조교수 (교신저자)
접수일: 2024년 1월 5일, 수정완료일: 2024년 1월 25일
게재확정일: 2024년 1월 31일

Received: January 5, 2024 / Revised: January 25, 2024
Accepted: January 31, 2024
**Corresponding Author: yoosunggoo@gmail.com
Dept. of lectric Engineering, Jeonju Vision College, Korea

I. 서론

최근 급변하는 산업 구조와 경제 활동에 있어 핵심적인 역할을 하고 있는 '4차 산업 혁명'은 전 세계의 산업현장에서 주목하고 있으며 나아가 '6차 산업'에 관심을 가지게되는 계기가 되었다. '6차 산업'은 농작물과 제조업(1차 산업과 2차 산업)을 서비스업(3차 산업)과 결합하여 제조업을 창출하는 산업 구조를 의미한다. 6차 산업은 기존의 농림수(1차)와 가공하는 제조업(2차), 그리고 관광, 판매, 문화 콘텐츠와 연계된 서비스업(3차)을 통합한 개념으로, 1차 산업을 기반으로 생산의 효율을 높이고 다양한 형태로 비즈니스 활동을 가능하게 한다.

국내·외 농업 분야에서는 인간의 먹거리와 밀접한 관계가 있기에 지구온난화 현상에 대비하여 전 세계 국가들은 중장기 발전계획을 수립하여 기술개발을 추진하고 있다. 특히 스마트 팜 기술은 미래 농업의 중심이 될 것으로 보여진다. 인공지능(AI), 빅데이터, 인터넷(IoT)과 같은 최첨단 기술을 통해 정보통신(ICT)의 발전을 기반으로 관리관제 시스템, 방제드론 자동방제, 생육지수 관별을 위한 항공촬영, 생육정보 칩 등 다양한 산업으로 확장되고 있으며 이를 기반으로 식량문제를 해결하기 위한 노력이 이루어지고 있다[1].

스마트 농업 구현을 위해서는 하드웨어 부분과 소프트웨어 2가지로 분류할 수 있다. 하드웨어 부분은 기존의 농기계이며 소프트웨어 부분은 농기계에 다양한 영농 정보, 농민의 노하우가 포함시키며 농기계에 대한 소프트웨어 융합기술은 스마트 농업이 가능한 생산 기반을 구축하게 된다.

국내에서 시도되고 있는 스마트 농업 분야 중 방제드론은 운용 기준과 매뉴얼이 없어 방제드론으로 약제 살포 시 발생하는 비산현상에 대하여 해결책을 마련하기에는 국내의 기초연구가 부족한 실정이다. 이와 관련하여 하드웨어 특성을 파악하기 위해 선행연구에서 방제 면적을 산출, 유효살포시간, 유효살포간격, 유효살포 폭 Domain 정의하였다[2]. 또한 미래 농업 기술인 자율드론방제가 가능하도록 방제 서비스 시스템 및 UI를 제안하고 있다[3].

방제드론의 보급으로 노즐에서 살포되는 약제의 비산 문제가 대두되고 있다. 기존의 방제드론에는 Teejet사의 XR계열의 노즐이 장착되어 있다. 관련하여 드론

의 살포 특성을 분석하고 있지만 범용성이 낮아 방제드론의 비행고도, 비행속도로 인하여 방제드론의 전용노즐 개발이 필요하고 AI노즐과 AVS16 노즐이 최근에 설계 개발되어 관련 연구가 지속적으로 이루어지고 있다[4,5].

방제드론의 전용노즐은 방제의 살포 균일도를 높이기 위함이다. 특히 방제드론의 특성 중 유효살포간격 내 살포 균일도를 파악하는 것이 선행되어야하며 이를 통해 살포 균일도를 예측하는 것이 필요하다[6]. 또한 작물에 따라 효과는 다르게 나타나므로 벼중심의 방제드론 활용에서 벗어나 과수원, 콩과 관련된 방제드론 활용 연구에서 살펴보면 분무 입자의 체적중위직경(Volume Median Diameter)의 크기를 키워 비산효과를 방지하고 있으며 추후 비산 예측과 관련된 빅데이터 자료로 활용이 가능함을 보이고 있다[7,8]. 실제 비산 현상으로 벼 항공방제 실시 지역에서 비산으로 인한 콩작물 피해가 발생하고 있음을 보이고 연구에서 있다[9].

방제드론의 운용 조건은 고도 3m 이상에서 운영되고 작업 현장을 고려할 때 비행 속도는 최소 4m/s 이상으로 운영하고 있는 것으로 파악하고 있다. 이는 할당된 면적에 대한 방제 임무 수행을 완료하기 위해서는 고도와 속도가 높을수록 방제사의 수익과 직결되기 때문이다. 이는 노즐의 특성을 고려하지 못하고 비행하는 경우로 VMD 입자를 크게하여 비산을 방지하는 방법에는 한계가 있다. 따라서 관련 문제점을 해결하기 위해서는 전용노즐 설계를 통해 다양한 노즐 살포의 유동특성을 시뮬레이션하고 실제 값과 비교 분석하여 최적의 설계방안을 도출하는 프로세서가 필요하다[10,11].

본 연구에서는 방제드론의 비산문제를 해결하기 위해 감수기를 활용한 실제 값을 확인하고 CFD 시뮬레이션을 통한 이론 값을 비교하여 분석하여 노즐 분사시스템이 포함하고 있는 펌프 압력, 노즐 관, 토출 속도, 방제면적, 유효살포간격 내 균일 액적 분포 등의 변수를 고려하여 최적 노즐 설계 구현이 가능하도록 관련 기초 연구를 수행하고자 한다.

II. 방제드론 전용노즐 특성 실험

1. 방제드론 및 노즐 구성

본 연구에서는 국내에서 유통되고 방제드론에 장착되어 있는 Teejet 사 노즐은 동일 노즐임에도 장착 위

치, 프로펠러 크기, 모터 등 다양한 변수에 따라 결과 값이 다르게 나타나고 범용성이 떨어진다. 따라서 본 연구에서는 기 개발한 방제드론 전용노즐 AVS16 노즐을 사용하여 범용성과 여러 변수들을 제거하고 실험하였다. AVS16 노즐을 보이면 그림 1과 같다.



그림 1. AVS16 노즐
 Figure 1. AVS16 Nozzle

2. 노즐 감수지 실험

노즐 실험은 총 8m 폭 내 감수지 시험지 Water Sensitive Paper 76x52mm 17개를 50cm 간격으로 배치하였다. 노즐의 각도는 45°, 노즐의 토출 속도는 2m/s 분사하였다. 살포 후 감수지는 그림 2와 같다.

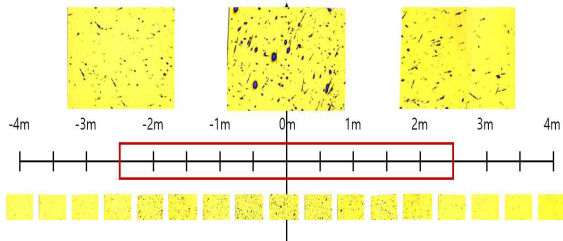


그림 2. AVS16 노즐 살포 감수지 실험
 Figure 2. AVS16 Nozzle Spray Resin Experiment

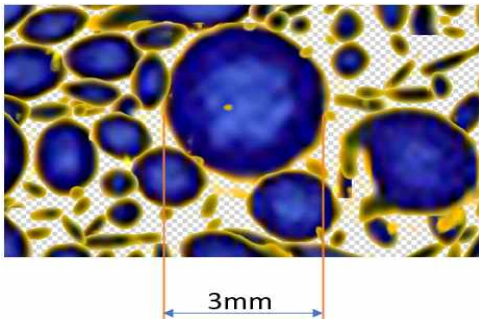


그림 3. 감수지 액적크기 측정
 Figure 3. Sensitive Droplet Size Measurement

감수지의 액적 분포를 파악하기 위하여 직접 측정을 진행하였다. 감수지를 촬영하여 CAD 프로그램을 사용하여 10배 확대하여 측정하였다. 액적 크기, 확률 밀도를 파악하였다. 여기서 액적 크기는 도포시 번짐 현상을 고려하여 가장 짧은 지름을 기준으로 측정하였다.

표 1. 유효살포폭 내 액적의 크기 및 입자 수

Table 1. The size and number of particles in the effective spread

Water Sensitive Paper	Particle Size				Number of particles
	3mm	2mm	1mm	0.5mm	
#5	3	37	122	445	607
#6	3	66	167	510	762
#7	3	21	132	253	409
#8	19	35	99	305	442
#9	13	91	154	707	1072
#10	17	37	80	334	468
#11	5	19	144	220	388
#12	6	77	160	480	723
#13	3	45	129	453	630

III. 수치 해석 및 결과

1. 수치 해석 대상 모델

비압축성 유동장을 풀기 위한 지배방정식은 식 (1) 및 식 (2)와 같은 연속방정식(continuity equation)과 Navier-Stokes 방정식이다.

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left[\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla) V \right] = -\nabla p + \rho g + \mu \nabla^2 V \quad (2)$$

여기서 V 는 속도 벡터, p 는 압력, t 는 시간, ∇ 는 구배 연산자, ρ 는 밀도, g 는 중력 가속도, μ 는 점성 계수를 각각 나타낸다. 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics)을 활용한 노즐 유동 시뮬레이션은 상용프로그램인 ANSYS-CFX 2020 R1을 사용하였고, 난류 모델은 SST(Shear Stress Transport) 모델을 사용하였다.

시뮬레이션에 사용된 노즐의 형상 Fig. 4와 같고, 3개 노즐의 결합 및 노즐 간의 간격은 Fig. 5와 같이 첫 번째 노즐은 inlet에서 465mm 지점에 두 번째 및 세 번째

제 노즐은 첫 번째 노즐로부터 480mm, 960mm에 위치해 있다.

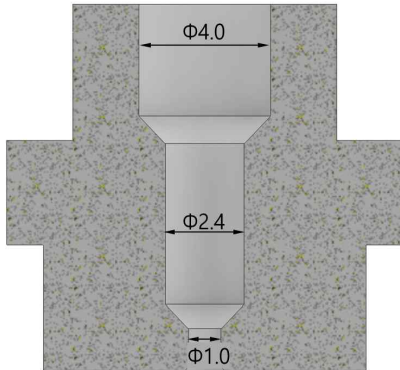


그림 4. 노즐 형상
Figure 4. Nozzle shape

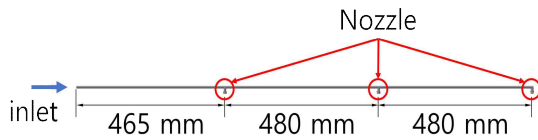


그림 5. 노즐 간격
Figure 5. Nozzle spacing

2. 경계 조건 및 격자 구성

시뮬레이션에서의 해석 영역은 Fig. 6과 길이 방향으로 4,500mm, 폭 방향으로 4,000mm, 높이 방향으로 4,500mm이다. 또한, 노즐은 바닥에서 4,000mm에 높이에 위치한 것으로 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

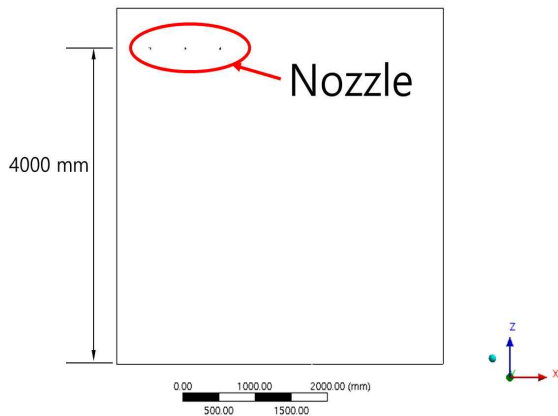


그림 6. 시뮬레이션 영역 및 노즐 위치
Figure 6. Simulation area and nozzle position

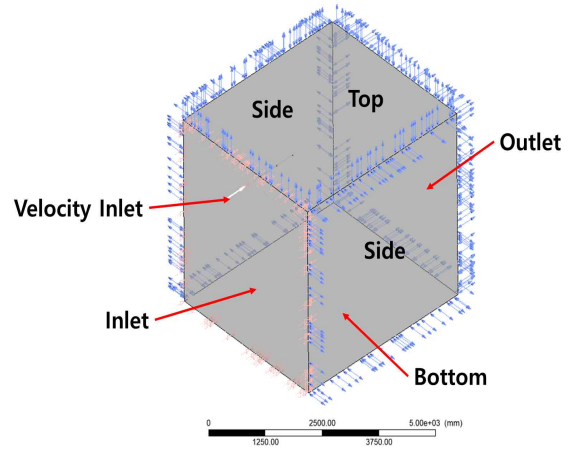


그림 7. 경계 조건
Figure 7. Boundary condition

시뮬레이션에 사용된 경계 조건은 Fig. 7에서와 같으며 경계 조건의 정보는 table. 8과 같다. Table에서와 같이 노즐과 바닥을 no slip 조건을 적용하였고, 노즐의 유입구에는 0.98234m/s의 속도로 유체가 유입되게 설정하였다. 또한, 유입구가 있는 벽면은 대칭 벽면임을 상정하여 Symmetric 조건을 적용하였고, 이외의 벽면은 opening 조건을 적용하여 압력의 정치가 생기지 않도록 시뮬레이션을 수행하였다.

표 2. 경계 조건 정보

Table 2. Information of boundary condition

Boundary	Condition	Vale (unit)
Velocity inlet	Velocity inlet	0.98234 m/s
Inlet	Symmetric	-
Nozzle	No slip	-
Side	Opening	0 bar
Outlet		
Top		
Bottom	No slip	-

유동해석 시뮬레이션에 사용된 격자는 자유 사면체 (free tetrahedral)의 격자를 사용하여 구성하였다. 노즐 주위에는 평균 0.2mm 크기를 외부 유동 영역에는 평균 8mm 크기의 격자를 구성하여 총 약 2천1백만개의 격자를 생성하였다. 노즐 주위에 생성된 격자의 형상은 Fig. 8에 도시하였다.

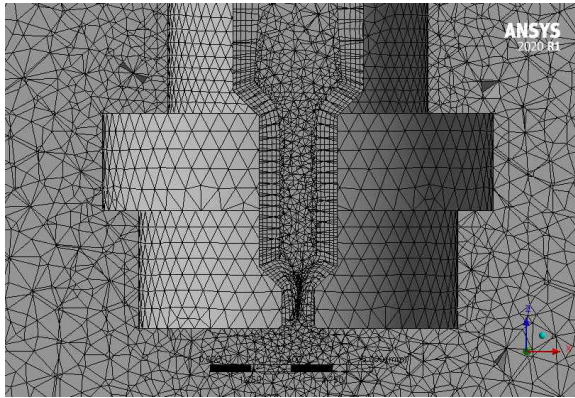


그림 8. 시뮬레이션 격자 구성
 Figure 8. Grid configuration of simulation

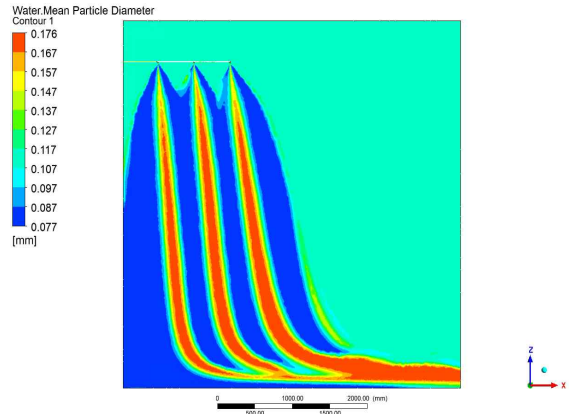


그림 10. 노즐 단면에서 유체 입자의 평균 직경 분포
 Figure 10. Mean diameter distribution of fluid particles in nozzle cross section

3 시뮬레이션 결과

노즐 분사에 의한 유동은 다분산 유동(Polydisperse Flow) 현상으로 해석하는 것이 적합하다. 이에 따라 유입 유체 입자의 크기를 0.01~0.41mm로 설정하여 정상 상태(steady state)에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션 영역 전체에서 분사된 유체 입자의 평균 입자 직경 분포를 Fig. 9에 도시하였다. 또한, 노즐 단면에서 유체 입자의 평균 직경 분포 및 노즐에서 3m 떨어진 면(지면에서 1m 지점)에서 유체 입자의 평균 직경 분포를 Fig. 10과 Fig. 11에 각각 도시하였다. 아울러 Fig. 12에 유체 입자의 직경에 의한 분사 범위 비교 하여 도시하였다. 그림에서와 같이 입자 크기가 작을수록 외곽에 분포하고, 입자 크기가 클수록 노즐 중앙 부분에 상대적으로 많이 분포함을 확인할 수 있다. 시뮬레이션 결과와 같이 균일한 분사를 위해서는 분사 입자의 크기가 작을수록 유리할 것으로 판단된다.

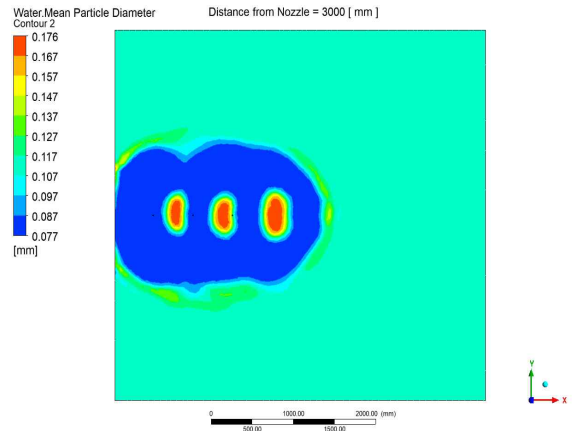


그림 11. 노즐에서 3m 떨어진 면에서 유체 입자의 평균 직경 분포
 Figure 11. Mean diameter distribution of fluid particles 3m away from nozzle

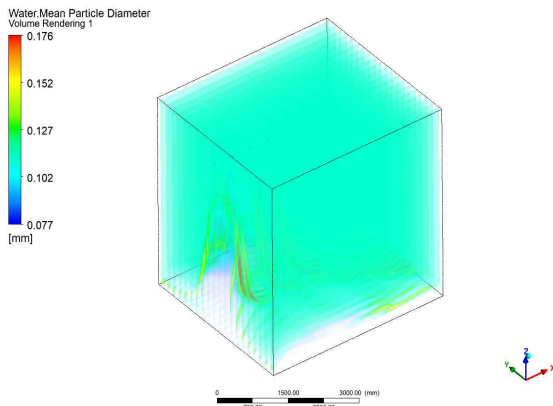


그림 9. 유체 입자의 평균 직경 분포
 Figure 9. Mean diameter distribution of fluid particles

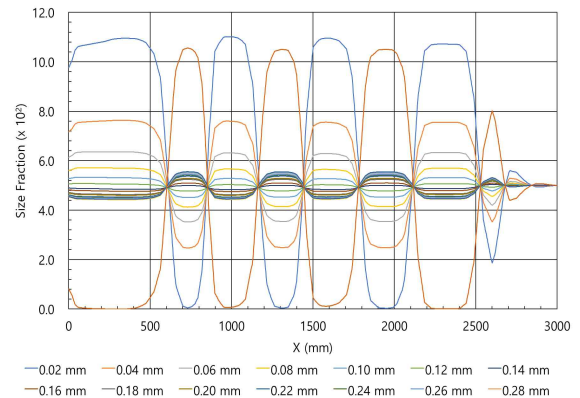


그림 12. 유체 입자의 직경에 의한 분사 범위 비교
 Figure 12. Comparison of injection range by fluid particle diameter

V. 결 론

본 연구에서는 기 개발된 AVS16 방제드론의 전용노즐을 기반으로 유효살포폭 내 액적분포를 살펴보았다. 또한 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics)을 활용한 노즐 유동 시뮬레이션을 통하여 입자의 분포를 확인하였다. 이는 다양한 범용성 드론을 고려하기 위하여 수행된 기초연구로 이는 기존에 국내외에서 연구되고 있는 방제드론 노즐 관련 유동특성 실험과의 차별성을 내포하고 있으며 다양한 변수를 고려하여 추가 연구가 가능하도록 구성하였다.

실제 방제드론의 노즐에서 살포되는 액적의 크기가 클수록 노즐의 중심에서 가까운 곳에 도포되고 액적의 크기가 작을수록 노즐의 중심에서 먼 곳에 도포되었다. 이는 감수지 실험과 전산유체역학 시뮬레이션 결과가 일치함을 확인하였다. 이러한 데이터를 바탕으로 추후 바람, 비행속도, 비행고도, 날씨, 농약 종류 등 다양한 변수를 고려하여 추가실험을 진행하고 비산 예측을 통하여 자율방제 및 관리관제 시스템 구축이 가능할 것으로 사료된다. 또한 약제의 비산으로부터 발생하는 2차 피해 예방이 가능하도록 방제드론 운용의 매뉴얼을 구축할 예정이다.

References

- [1] J.G. Lee, "A Study on the Information Technology of the Agricultural Production Base for the Smart Agricultural Era." *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 59, No. 1, pp. 17-29, February 2017.
- [2] 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, October 2020. DIO: <http://dx.doi.org/10.22156/CS4SMB.2020.10.10.135>
- [3] S.Y. Choi, E.J. Seong, S.M. Lee, K.H. Cho, D.H. Joo, J.H. Kim and D.S. Lim, "Agricultural Pesticide Control Drone Controller UX Proposal," *2022 KSD S Fall International Conference & DSUS*. pp. 274-275, November 2022.
- [4] 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, December 2023. DOI : [10.23087/jkicps.2023.24.4.011](https://doi.org/10.23087/jkicps.2023.24.4.011)
- [5] W.R. 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, March 2023. DIO: <http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2023.9.2.575>
- [6] B.G. Seong, S.W. Kang, S.H. Cho, X.Z. Han, S.H. Yu, C.G. Lee, Y.H. Kang and D.H. Lee, "Predicting the spray uniformity of pest control drone using multi-layer perceptron," *Journal of Drive and Control*, Vol. 20, No. 3, pp. 25-34, September 2023. DOI : <http://dx.doi.org/10.7839/ksfc.2023.20.3.025>
- [7] S.W. Hong and R.W. Kim, "CFD Modeling of Pesticide Flow and Drift from an Orchard Sprayer," *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*. Vol. 60, No. 3, pp. 27-36, February 2018. DOI : <https://doi.org/10.5389/KSAE.2018.60.3.027>
- [8] C.G. Lee, S.H. Yu, J.K. Lee and Y.H. Kang, "Effect of Flight Conditions on Spraying Performance using Unmanned Aerial Vehicle with air induction and conventional nozzle in soybean field," *Journal of Agricultural Machinery Engineering*. Vol. 2, No. 1, pp. 17-23, December 2021. DOI : <https://doi.org/10.12972/jame.20220003>
- [9] Y.D. Jin, H.D. Lee, Y.K. Park, J.B. Kim and O.K. Kwon, "Drift and Distribution Properties of Pesticide Spray Solution Applied Aerially by manned-Helicopter," *The Korean Journal of Pesticide Science*, Vol. 12, No. 4, pp. 351-356, December 2008.
- [10] S.H. Yu, J.K. Lee and Y.H. 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, December 2022. DIO: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.12.803>
- [11] K.J. Kang, S.M. Chang, I.H. Ra, S.W. Kim and H.T. Kim, "Nozzle Flow Characteristics and Simulation of Pesticide Spraying Drone," *Smart Media Journal*, Vol. 8, No. 4, pp. 38-45, December 2019. DOI : <http://dx.doi.org/10.30693/SMJ.2019.8.4.38>

※ 이 연구는 첨단분야 혁신융합대학사업 에코업(주관:고려대학교(세종), 참여:전주비전대학교) 연구개발과제 지원에 의한 연구임