

UAV의 노즐과 분무 조건이 벼 포장 내 방제 성능에 미치는 영향

유승화¹, 이지근², 강영호³, 이춘구^{1*}

¹국립농업과학원, ²전북대학교 기계시스템공학부, ³전라북도 농업기술원

Effects of UAV Nozzle and Spraying Condition on Spraying Performance in Rice Field

Seung-Hwa Yu¹, Jeekeun Lee², Youngho Kang³, Chun Gu Lee^{1*}

¹National Institute of Agricultural Science

²Division of Mechanical System Engineering, Jeonbuk National University

³Jeollabuk-do Agricultural Research & Extension Science

요약 최근 국내에선 멀티콥터를 이용한 무인항공방제가 높은 작업 효율과 작업 편의성으로 인하여 관심을 받고 있다. 무인항공방제의 비산 문제를 해결하기 위하여 선행연구를 통하여 비산 저감용 공기흡입형(AI) 노즐을 개발하였다. 본 연구에서는 개발한 AI 노즐의 현장 적응성을 평가하고자 벼 포장에서 무인항공방제를 수행하면서 노즐과 분무 조건이 방제 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 실험은 벼 포장에서 두 종류의 노즐(XR, AI)을 이용하여 3가지 비행 속도와 3가지 비행 고도에서 수행하였다. 방제 성능을 평가하기 위하여 감수지를 이용하여 피복률과 침투율을 측정하였다. 모든 비행 조건에서 AI 노즐을 사용한 경우의 피복률이 더 높게 측정되었다. 비행 속도가 2m/s에서 4m/s로 증가함에 따라 두 노즐 모두 피복률이 선형적으로 감소하였다. 비행 고도가 2m에서 4m로 증가할 때도 두 노즐 모두 피복률이 선형적으로 감소하였다. 벼의 상부와 하부에 설치한 감수지를 이용하여 침투율을 계산한 결과 XR 노즐의 침투율이 AI 노즐보다 낮았다. 분석 결과 AI 노즐이 XR 노즐 보다 방제 성능이 우수한 것으로 나타났고, 비행 속도와 고도의 경우 제한 범위 내에서 작업 효율을 고려하여 적절한 분무 조건을 찾아야 할 것으로 보인다.

Abstract Unmanned aerial spraying using a multicopter has attracted attention due to its high work efficiency and convenience in Korea. In order to solve the drift problem in aerial spraying, an air induction(AI) nozzle was developed. The aim of this study was to evaluate the field adaptability of the AI nozzle by analyzing its effects on the performance of unmanned aerial spraying in rice fields in various spraying conditions. An experiment was conducted at three different flight speeds and three different flight altitudes with two types of nozzles(XR and AI) in rice fields. To evaluate the spraying performance, the coverage and penetration rates were measured by water-sensitive paper. Coverage with the AI nozzle was higher in all flight conditions. As the flight speed increased, the coverage of both nozzles decreased linearly. As the flight altitude increased, the coverage of both nozzles also decreased linearly. The penetration rate of the XR nozzle was smaller than that of the AI nozzle. It was found that the AI nozzle had better spraying performance than the XR nozzle. In terms of flight speed and altitude, it is necessary to find an appropriate spraying condition for work efficiency of the unmanned aerial spraying system within the limits.

Keywords : Air Induction Nozzle, Coverage, Penetration, Spraying, UAV

본 연구는 농촌진흥청 농업과학기술 연구개발사업(과제번호:PJ01557501)의 지원에 의해 이루어진 것임.

*Corresponding Author : Chun Gu Lee(National Institute of Agricultural Sciences)

email: llccgg@korea.kr

Received October 17, 2022

Revised November 17, 2022

Accepted December 7, 2022

Published December 31, 2022

1. 서론

병해충은 식물의 생리장해를 일으켜 작물의 생산량을 감소시키고 품질을 저하하는 문제를 일으킨다. 또, 주변의 농경지로 전파가 잘 되고, 발생 시 치료가 어려운 문제점이 있다. 실제로 2021년 전북지역에 병해충이 발생하여 전체 벼 재배면적의 43.1 %에 해당하는 4만 9,303 ha에 피해가 발생하였다. 병해충으로 인한 피해를 줄이기 위하여 효과적인 방제작업이 필요하다.

농민들은 방제를 위하여 다양한 방법들을 사용하고 있다 [1]. 가장 대표적인 방법으로는 작물보호제를 살포하는 화학적 방제법이 있다. 화학적 방제는 작업이 간편하고 넓은 면적에 적용하기 좋은 장점이 있다. 작물보호제를 살포하기 위하여 동력분무기, SS기, 분방제기, 광역방제기, 농업용 헬기 등 다양한 장비들을 이용했으나 최근 멀티콥터를 이용한 방제에 관심이 증가하면서 이용률이 점차 증가하고 있다 [2].

멀티콥터를 이용한 무인 항공방제의 경우 하향풍을 이용하여 잎의 후면이나 작물의 뿌리 부분까지 작물보호제가 전달되어 약물 전달 효과가 높다. 또, 시간당 작업 면적이 넓으며 경로 설정을 이용한 자동방제까지 가능한 장점이 있다 [3]. 다만 다른 방제 기계들과 같이 비산으로 인한 피해가 발생하므로 비산을 줄이는 방법에 관한 연구가 필요하다.

국내의 경우 멀티콥터를 이용한 항공방제가 주로 벼 재배포장에서 시행되고 있으나 벼와 같이 초장이 긴 식물에 대하여 약제 침투에 관한 연구가 부족한 상황이다. 또 멀티콥터의 비행속도와 비행 고도와 같이 방제 성능에 영향을 미치는 인자들에 대한 분석이 초기 단계에서 진행 중이다 [4].

본 논문은 선행연구에서 개발한 공기흡입형(AI: Air Induction, 이하 AI) 현장 적응성을 검토하기 위하여 관행 드론과 신개발 비산 저감형 드론의 방제 성능을 비교하여 평가하고자 하였다. 이를 위하여 비행 속도와 비행 고도에 따른 분무 입자의 피복률을 측정하고, 작물 사이로 전달되는 분무 입자들의 침투율에 대한 분석을 수행하였다. 이를 활용하여 AI 노즐과 XR 노즐의 차이점을 비교하고 무인 항공방제를 위한 적합한 분무 조건을 구하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험 환경

실험은 2021년 9월 6일 전북 김제시 봉남면 일원 농가의 벼 재배포장에서 수행하였다. 벼의 시험품종은 신동진벼로 6월 2일에 재식밀도 50주/3.3 m²로 이앙하였으며, 농촌진흥청 표준재배법에 따라 관리하였다. 벼의 출수기는 8월 18일이었으며 간장 및 수장은 86 cm, 21 cm였다. 실험 당시 벼의 생육은 양호한 상태였다 (Fig. 1).

실험 중 기상환경은 휴대용 기상계 (Kestrel 5500, KestrelMeters, USA)를 이용하여 측정하였다. 실험 당시 현장의 온도는 24.8~26.1 °C이었으며 풍속은 0.2~1.21 %의 수준이었다 (Table 1).



Fig. 1. View of experiment field

Table 1. Environment condition

Plant		Atmosphere	
Density	Length	Temperature	Wind speed
15.2 ea/m ²	86 cm	25.4±0.5 °C	0.73±0.18%

2.2 실험 재료

선행연구를 통하여 개발한 AI 노즐은 공기를 흡입하여 노즐 내에서 물과 혼합시켜 물방울 내부에 공기 방울이 포함된 형태의 분무 입자를 생성한다. 이에 따라 체적중위직경(VMD: Volume Median Diameter, 이하 VMD)이 더 큰 분무 입자들이 만들어진다. 그 결과 입자들의 전체 표면적이 감소하여 증발량이 감소하고, 개별 입자들의 표면적과 자중이 증가하여 입자의 운동성이 증가하고 드론에서 발생하는 하향풍의 영향을 많이 받아 비산이 감소하는 특징이 있다. 일반 XR 노즐의 VMD가 189 μm, 개발한 AI 노즐의 VMD는 384 μm로 크기가 2배 차이였다 [5].



Fig. 2. Unmanned Aerial Spray System (SG-10P)

방제를 시행하기 위하여 로터의 개수가 8개인 멀티콥터(SG -10P, 한국삼공, 대한민국)를 이용하였다 (Fig. 2). 멀티콥터에는 XR110015(XR) 노즐과 AI 노즐 2가지를 교대로 장착하여 사용하였다. 노즐들은 로터의 수직 아래에 위치하였고 전방의 2개의 노즐만을 사용하여 실험하였다. 두 노즐 사이의 수평거리는 158 cm이었다. 실험 시 분무 시스템의 설정값은 ANSI와 ASTM의 기준을 참고하여 설정하였다 (Table 2) [6,7].

Table 2. Spraying system setting value

Nozzle	Pressure	VMD	Flow rate (per nozzle)	Spray angle
XR	280kPa	189 μ m	780LPM	110°
AI	280kPa	384 μ m	775LPM	110°

분무 성능을 확인하기 위하여 감수지(WSP: Water Sensitive Paper)를 이용하여 분무 입자들을 수집하였다. 감수지의 경우 특수코팅 처리된 용지로 노란색 표면에 지름 50 μ m 이상의 물방울이 닿으면 파란색으로 변화한다 [8]. 76 mm×52 mm 크기의 감수지를 각도 조절라벨에 부착한 후 설치대에 결합하여 높이를 조절할 수 있도록 하였다. 수집 장치는 비행 센터라인과 좌우 2 m 거리에 한 개씩 총 3개를 설치하였다.



Fig. 3. Image Analysis system

실험 후 감수지는 수분과 접촉하지 않도록 개별 포장하여 회수하였다. 감수지는 프로파일 구조물 내 설치된 카메라(mvBlueFOX3, MatrixVision, Germany)를 이용하여 감수지 영상을 촬영하고 사진 내에서 분석 영역을 설정한 후 분석 영역 면적 대비 물방울이 부착된 면적 비율인 피복률 값을 계산하였다 (Fig. 3).

2.3 드론 비행 속도와 고도, 노즐 종류에 따른 분무 성능 측정

드론의 분무 조건에 따른 분무 성능의 차이를 분석하기 위하여 드론 비행 속도와 비행 고도에 따른 피복률을 측정하였다. 비행 속도는 관행적으로 사용하는 2, 3, 4 %로 설정하였고, 비행 고도의 경우 일반적 비행 고도인 2, 3 m에 4 m까지 추가하여 수행하였다. 실험마다 3 반복씩 수행하였다.

2.4 드론 비행 속도와 노즐 종류에 따른 분무 입자 침투율 측정

작물보호제 종류에 따라 작물 내부까지 약제 전달이 필요하다. 약제가 작물의 하단부에 전달되어야 하는 경우 작물의 길이나 형상에 따라 방제 성능이 다르게 나타날 수 있다. 벼와 같이 수형은 단순하나 초장이 긴 작물을 대상으로 방제를 시행할 때 작물 내부에 약제의 전달량을 측정하고자 하였다.

드론의 비행 고도를 2 m로 유지하고 비행 속도를 2, 3, 4 %로 증가시키면서 작물이 존재하는 상태에서 약액의 작물 내부의 침투율을 분석하고자 하였다. 비행마다 감수지를 비행 센터라인에 지면으로부터 40 cm(하부), 60 cm(중부), 80 cm(상부)에 설치하여 피복률을 측정하였다 (Fig. 4). 측정된 피복률을 바탕으로 상부의 피복률에 대한 하부 피복의 비를 침투율로 계산하였다 (Eq. 1).



Fig. 4. WSP attached on the angle head plant label (40,60,80 cm)

$$PR = \frac{Coverage_{Lower}}{Coverage_{Upper}} \times 100 \quad (1)$$

Where, PR denotes penetration ratio

3. 결과 및 고찰

3.1. 드론 비행 속도와 고도에 따른 방제 성능

비행 속도가 피복률에 미치는 영향을 분석한 결과 두 노즐 모두 비행 속도가 증가함에 따라 피복률이 XR 노즐의 경우 53~81%, AI 노즐의 경우 65~83% 감소하였다 (Fig. 5). 이는 드론의 구조적 특성에 의한 것으로 판단된다. 드론의 비행 속도를 증가시키는 경우 드론 피치 값이 증가하여 노즐의 분사 방향이 지면에서 공중 방향으로 변화하게 된다 (Fig. 6). 따라서 하향풍이 약해지고 분무 입자들이 후방 혹은 측면으로 이동하는 양이 많아진다.

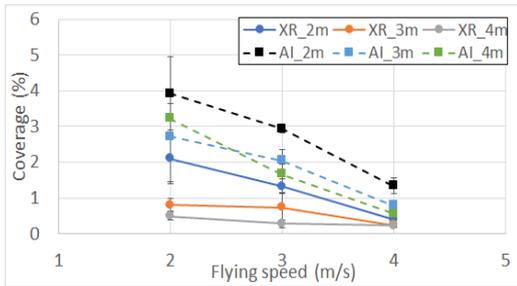


Fig. 5. Effect of flying speed on Coverage

또 가속하는 경우 로터의 회전속도가 증가하여 발생하는 바람의 세기가 강해지게 되는데 이는 분무 입자의 비산량을 증가시켜 감수지들의 피복률을 감소시킨다. 따라서 방제 성능을 위해서는 항공방제를 수행할 때 속도를 일정 범위 내에서 제한하는 것이 필요하다.

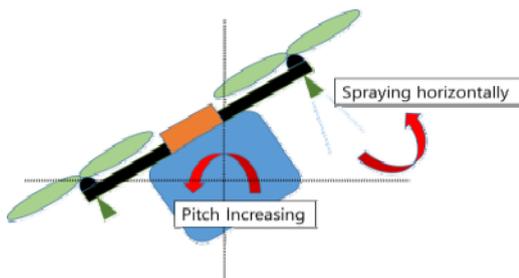


Fig. 6. Flying velocity increasing drone rotation and horizontal spraying

다만 XR 노즐의 경우 고도가 증가할수록 속도 증가에 따른 감소율이 감소하였고, AI 노즐의 경우 고도가 증가할수록 속도 증가에 따른 감소율이 증가하였다.

비행 고도가 피복률에 미치는 영향을 분석한 결과 두 노즐 모두 비행 고도가 증가함에 따라 피복률이 XR 노즐의 경우 41~80% 감소하였고, AI 노즐의 경우 18~60% 감소하였다 (Fig. 7). 단 XR 노즐의 경우 비행 속도가 빠를 때 전 비행 고도에서 피복률이 낮아 감소율도 작게 측정되었고 AI 노즐의 경우 일부 조건에서 측정 오차로 인하여 감소율이 작게 측정되었다.

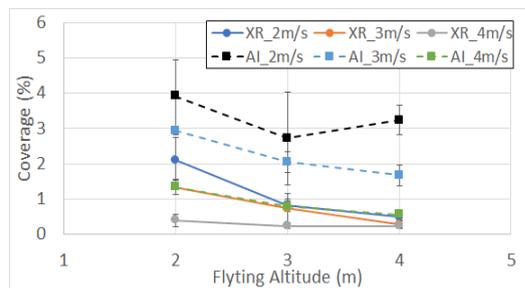


Fig. 7. Effect of flying altitude on Coverage

비행 고도가 증가하는 경우 드론의 분사 폭은 넓어지지만, 단위 면적당 떨어지는 약제의 양이 감소하는 만큼 방제 효율은 감소한다. 또 분무 입자가 낙하하는 길이가 증가하는 만큼 측면풍이나 후류에 의하여 비산할 가능성이 증가한다. 따라서 고도의 경우도 현재의 3 m 이하의 고도에서 비행하는 방제 조건을 유지하는 것이 필요하겠

다. 모든 분무 조건에서 AI 노즐이 XR 노즐에 비하여 피복률이 크게 측정되었다. 이는 XR 노즐에서 분무된 입자들의 크기가 더 작아 비산이 많이 발생하였고 그 결과 수집기로 낙하한 분무 입자의 양이 적었기 때문이다. 따라서 AI 노즐이 XR 노즐보다 무인항공방제시스템에 적합한 것으로 판단된다.

3.2 드론 비행 속도와 노즐 종류에 따른 침투율

수집기 설치 높이별로 방제 성능을 측정된 결과 높이에 따라 감수지의 피복률이 선형적으로 감소하였다 (Fig. 8). 비행 속도에 의한 영향이 상부의 수집기에서는 뚜렷이 나타났으나 하부의 수집기에서는 차이가 없었다.

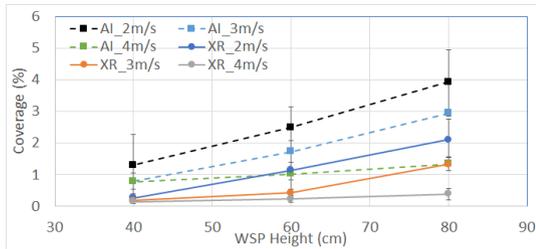


Fig. 8. Effect of WSP height and flying speed on Coverage

측정된 피복률을 이용하여 분무 입자의 침투율을 계산한 결과 XR 노즐의 경우 12.8~37.8 %, AI 노즐의 경우 27.1~58.7 %에 달하는 것으로 나타났다 (Table 3). AI 노즐의 침투율은 평균적으로 39.7 %로 XR 노즐의 침투율에 약 2배에 달하였다. 이는 AI 노즐에서 분무되는 입자들의 직경에 비례하여 운동량이 증가하여 측면풍과 작물에 의한 영향을 적게 받아 침투 깊이가 증가하였다.

Table 3. Penetration rate of XR, AI nozzle

Flying speed	Penetration (%)	
	XR	AI
2m/s	12.8	33.2
3m/s	13.5	27.1
4m/s	37.8	58.7
Average	21.4	39.7

비행 속도가 증가하는 경우 침투율이 증가하였으나 실제 하부의 피복률은 속도에 의한 영향이 없었다. 따라서 비행 속도와 내부의 약물 전달량과는 관계가 없었다.

또 분무 입자들의 침투율이 최대 60 % 이하이고 최저 12 %까지 떨어지므로 작물 보호제 중 뿌리에 전달 되어야 하는 약제의 경우 이를 고려하여 분사량을 증가시켜야 할 필요가 있겠다.

4. 결론

무인항공방제 시장이 성장하는 가운데 무인항공방제기의 문제점으로 제기된 비산을 저감하기 위한 AI노즐을 개발하였다. 개발된 AI노즐과 관행 XR 노즐을 이용하여 다양한 분무 조건에서 실제 방제를 수행하며 방제 성능을 측정하고 AI 노즐의 현장 적응성을 평가하였다. 실험은 2021년 9월에 김제 벼 포장에서 수행하였으며 옥타콥터를 이용하여 실험을 수행하였다. 노즐은 XR 노즐과

AI 노즐을 사용하였고 각 비행마다 2개의 노즐을 이용하여 분무였다. 분무 성능 측정을 위하여 감수지를 이용하여 비행 속도, 비행고도, 노즐 종류에 따른 피복율을 분석하였고, 작물 내 높이에 따른 피복율을 이용하여 침투율도 분석하였다. 분석한 결과는 다음과 같다.

1. AI 노즐과 XR 노즐을 비교한 결과 모든 실험 조건에서 AI의 피복률이 더 높게 나타나 XR 노즐을 대체하여 사용하기에 적합하였다. 이는 AI 노즐의 분무 입자가 더 커서 측면풍에 의한 영향을 덜 받기 때문이다.
2. 비행 속도가 증가할수록 피복률이 감소하였다. 이는 비행속도를 증가하기 위한 멀티콥터의 변화(기울기의 증가와 로터의 추력 증가)가 드론의 하향풍을 약화시키고 비산을 증가시켜 목표 영역내 분무 입자의 부착량을 감소시켰기 때문이다.
3. 비행 고도가 증가할수록 피복률은 감소하였다. 이는 비행고도가 높아지는 경우 드론의 분무폭은 넓어지지만 단위 면적당 부착량이 감소하였기 때문이다. 또 낙하하는 길이가 증가하는 만큼 측면풍 등으로 인하여 비산이 증가할 가능성이 증가한다.
4. 비행 속도와 비행 고도 모두 증가하는 경우 작업 효율은 개선되지만 실제 작물에 전달되는 분무 입자들의 양이 감소하는 만큼 추가적인 연구를 통하여 적절한 분무 조건을 설정해야 한다.
5. 침투율의 경우 AI 노즐이 XR 노즐에 비하여 침투율이 높았다. 분무 입자의 VMD가 커 운동성이 큰 만큼 작물에 의한 영향을 상대적으로 덜 받아 침투율이 높은 것으로 판단된다. 두 노즐 모두 침투율이 60 % 이하로 나타나 작물보호제 종류에 따라 분사량을 조절할 필요가 있다. 비행 속도에 따른 침투율의 변화는 작다.

비행속도와 고도에 의한 영향과 침투율을 분석하였을 때 AI 노즐이 XR 노즐에 비하여 방제 성능이 뛰어난 것으로 나타나 실제 방제 환경에서의 적합성이 우수함을 확인하였다. 향후 AI 노즐의 보급을 통하여 무인항공방제 효과를 개선할 수 있을 것으로 보인다. 또 비행 속도와 비행 고도의 증가가 방제 효과를 감소할 수 있음을 확인하였다.

References

[1] D. K. Giles, N. B. Akesson, W. E. Yates, "Pesticide

Application Technology: Research and Development and the Growth of the Industry”, *Transactions of the ASABE*, Vol.51, No.2, pp.397-403, 2008.

DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.24377>

- [2] H. Xiongkui, J. Bonds, A. Herbst, J. Langenakens, “Recent development of unmanned aerial vehicle for plant protection in East Asia”, *Int J Agric & Biol Eng*, Vol.10, No.3, pp.18-30, 2017
DOI: <https://doi.org/10.3965/ijabe.20171003.3248>
- [3] X. Xue, Y. Lan, Z. Sun, C. Chang, W. C. Hoffmann, “Develop an unmanned aerial vehicle based automatic aerial spraying system”, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.128, pp.58-66, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.07.022>
- [4] S.-H. Yu, Y.-K. Kim, H.-J. Jun, I. S. Choi, J.-K. Woo, Y.-H. Kim, Y.-T. Yun, Y. Choi, R. Alidoost, J. Lee, “Evaluation of Spray Characteristics of Pesticide Injection System in Agricultural Drones”, *J. Biosyst. Eng.* Vol. 45, pp:272-280, Oct. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s42853-020-00067-6>
- [5] R. A. Dafsari, M. Khaleghi, S.-H. Yu, Y. Choi, J. Lee, “Design and Performance Evaluation of Air Induction (AI) Nozzles to Reduce Drift Potential for Agricultural Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)”, *J. Biosyst. Eng.* Vol. 46, pp.462-473 Nov. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00119-5>
- [6] ANSI/ASAE S572.1. Spray nozzle classification by droplet spectra, American Society of Agricultural and Biological Engineers. 2009.
- [7] ASTM E799-03: Standard practice for determining data criteria and processing for liquid drop size analysis, ASTM, 2003.
- [8] M. Salyani, H. Zhu, R. D. Sweeb, N. Pai, “Assessment of spray distribution with water-sensitive paper”, *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, Vol.15, No.2, pp.101-111, 2013.

유 승 화(Seung-Hwa Yu)

[정회원]



- 2010년 2월 : 전남대학교 대학원 농업기계전공 (공학석사)
- 2017년 2월 : 전남대학교 대학원 농업기계전공 (공학박사)
- 2016년 7월 ~ 현재 : 국립농업과학원 농업연구사

<관심분야>

농작업 기계 · 자동화, 농업용드론

이 지 근(Jeekeun Lee)

[정회원]



- 1998년 8월 : 전북대학교 대학원 정밀기계공학과 (공학박사)
- 2000년 12월 ~ 2003년 6월 : 일본 히로시마대학 공학부 박사후 연구원
- 2003년 7월 ~ 2004년 8월 : 전북 자동차부품산업혁신센터 센터장
- 2004년 9월 ~ 현재 : 전북대학교 기계시스템공학부 교수

<관심분야>

광학계측, 난류유동, 미립화, 방제 드론 분무시스템

강 영 호(Youngho Kang)

[정회원]



- 2022년 2월 : 전남대학교 농업생명과학대학원 지역바이오시스템공학과 (박사수료)
- 2015년 10월 ~ 2017년 10월 : 고창군청 공업서기
- 2018년 1월 ~ 현재 : 전북농업기술원 농업연구사

<관심분야>

농작업 기계 · 자동화, 농업용드론

이 춘 구(Chun Gu Lee)

[정회원]



- 2009년 2월 : 서울대학교 농업생명과학대학 바이오시스템공학과 (공학학사)
- 2022년 2월 : 서울대학교 농업생명과학대학원 바이오시스템공학과 (공학박사)
- 2022년 3월 ~ 현재 : 국립농업과학원 전문연구원

<관심분야>

농작업 기계 · 자동화, 농업용드론