

# 착륙 구조물의 형상과 중력을 활용한 드론 자동 충전 스테이션

## Automated Drone Charging Station Using Gravity and Shape of Landing Structure

이재우<sup>1</sup>, 정성균<sup>1\*</sup>, 봉재환<sup>1\*</sup>(Jaе Woo Lee<sup>1</sup>, Seongkyun Jeong<sup>1,\*</sup>, and Jae Hwan Bong<sup>1,\*</sup>)<sup>1</sup>Department of Human Intelligent Robot Engineering, Sangmyung University

**Abstract:** This paper proposes a novel automated charging station for small drones. This system uses the three-dimensional shape of the landing structure and gravity to guide small drones, which are challenging to control precise landings, to the charging position. It employs a contact-based charging method using a single actuator to drive the vertical one-degree-of-freedom motion of the charging cable, enabling connection to the drone's charging terminal. The developed system continuously verifies the start of charging and tries to connect the charging cable to the drone until it successfully initiates charging. Performance evaluations demonstrate high charging success rates across various situations, with drones landing on the station at different positions and orientations. Most experiments have achieved successful charging within five attempts to connect the charging cable to the drone. This research demonstrates that mechanical design, utilizing the landing structure's shape and gravity, can achieve stable drone charging automation. The developed system is simply designed, making it cost-effective and easy to maintain.

**Keywords:** drone charging station, automated charging, landing structure design, gravity-based alignment

### I. 서론

드론은 무인 지상 로봇과 달리 지형의 제약 없이 3차원 공간에서 이동이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 드론은 무인 지상 로봇의 접근이 어려운 군사 작전이나 재난 현장에서 정찰 임무를 수행하거나, 농업 분야에서 작물 모니터링, 농약 살포, 환경 데이터 수집 등 다양한 작업에 활용되는 등 최근 다양한 분야에서 활용되며 그 가치를 인정받고 있다[1-3].

실내 식물공장에서는 작물 생육 상태 모니터링을 위해 카메라가 장착된 드론을 운용한다. 실내 식물공장은 통제된 환경으로 바람과 같은 외란의 영향이 적어 소형 드론 운용에 적합하다. 그러나 소형 드론은 탑재된 배터리 용량의 한계로 비행 가능 시간이 짧다. 무인 환경에서의 소형 드론의 안정적인 운용을 위해서는 배터리 충전 자동화가 필수적이다.

소형 드론은 배터리 용량의 한계로 비행 시간이 짧다[4-5]. 무인 환경에서 소형 드론의 안정적인 운용을 위해서는 배터리 충전의 자동화가 필요하다. 기존에 연구된 드론의 자동 충전 시스템은 크게 비접촉식과 접촉식으로 구분된다[6-10]. 비접촉식 충전은 드론이 충전 코일 위에 착륙하면 충전이 시작되어 정밀한 착륙 제어가 불필요하다는 장점이 있으나, 충전 효율이 낮다는 한계가 있다. 반면 접촉식 충전은 고속 충전이 가능하지만, 충전 단자에 충전선을 연결하기 위해 드론이 비행 제어를 통해 정확한 위치에 착륙해야 한다.

소형 드론은 탑재 가능한 센서와 제어기의 성능 제약으로

인해 정밀한 착륙 제어가 어렵다. 이를 해결하기 위해 착륙한 드론을 충전 위치로 재정렬하는 시스템들이 개발되었으나, 대부분 복잡한 기계 장치와 다수의 액추에이터를 필요로 하여 시스템이 대형화되고 제작 비용이 증가하며 유지보수가 어렵다는 문제점이 있다.

본 논문에서는 실내 식물공장에서 운용되는 소형 드론을 위한 새로운 자동 충전 스테이션을 제안한다. 제안하는 시스템은 하드웨어 형상과 중력을 이용해 착륙한 드론을 충전 위치로 유도하고, 단일 액추에이터로 구동되는 충전선의 1자유도 움직임을 통해 충전 단자와 충전선을 연결한다. 제안한 시스템은 낮은 자유도를 갖는 간단한 구성으로 소형 드론의 착륙 오차를 보정하고 고속 충전을 지원하여 무인 환경에서 소형 드론의 효율적인 운용이 가능하도록 한다.

### II. 드론 자동 충전 스테이션

개발한 드론 자동 충전 스테이션은 3차원 형상을 가진 착륙 구조물과 충전 연결부로 구성된다. 드론이 임의의 위치와 자세로 착륙하면 중력에 의해 드론이 충전 위치로 정렬되도록 착륙 구조물의 3차원 형상을 설계하였다. 충전 연결부는 충전 위치로 정렬된 드론에 충전선을 자동으로 연결하고 분리하기 위해 설계되었다. 충전 연결부에는 리니어 모터를 사용해 충전선이 1자유도 직선 운동을 하도록 하였다. 개발한 드론 자동 충전 스테이션의 개념도를 그림 1에 나타내었다.

\* Corresponding Authors

Manuscript received December 20, 2024, revised January 2, 2025, accepted January 7, 2025

이재우: 상명대학교 휴먼지능로봇공학과 학부생(jaezoodo@naver.com, ORCID<sup>®</sup> 0009-0002-6104-0340)

정성균: 상명대학교 휴먼지능로봇공학과 부교수(skjeong@smu.ac.kr, ORCID<sup>®</sup> 0000-0001-9775-3882)

봉재환: 상명대학교 휴먼지능로봇공학과 조교수(drbong@smu.ac.kr, ORCID<sup>®</sup> 0000-0003-1221-6522)

※ 본 연구는 2023학년도 상명대학교 교내연구비를 지원받아 수행하였음.

그림 1에서 왼쪽은 드론 자동 충전 스테이션의 외형을 보여 주며, 오른쪽은 파란색 평면으로 자른 드론 자동 충전 스테이션의 단면을 보여준다.

그림 1에서 드론 자동 충전 스테이션 구성 요소를 살펴보면 다음과 같다. 그림 1(a)는 드론을 정렬하기 위해 3차원 형상을 가진 착륙 구조물을 나타낸다. 그림 1(b)는 착륙 구조물과 충전 연결부의 구성요소를 배치하기 위한 프레임이 나타난다. 충전 연결부의 구성요소인 배터리와 아두이노를 프레임 바닥에 배치하였다. 그림 1(c)에는 리니어 모터의 한쪽 끝을 고정하였다. 리니어 모터의 다른 한쪽 끝에는 그림 4에 나타난 충전기 홀더를 부착하였다. 그림 1에서 드론 자동 충전 스테이션의 전체 크기는  $254\text{ mm} \times 254\text{ mm} \times 410\text{ mm}$ 이며, 착륙 구조물과 프레임은 설계 후 3D 프린팅으로 제작하였다.

그림 1의 드론 자동 충전스테이션은 상용 소형 드론(DJI Tello, DJI, China)이 착륙하는 것으로 가정하고 설계 치수를 정하였다. 대상으로 하는 상용 소형 드론에는 드론의 충전 단자와 충전선의 연결을 돕고 연결된 충전선이 분리될 때 가해지는 힘을 분산하기 위해서 그림 2와 같은 구조물을 추가로 부착하였다. 드론 부착물은 그림 2(a)와 같이 설계하여 3D 프린터로 제작하였다. 그림 2(b)와 그림 2(c)는 제작한 구조물을 드론에 장착하고 드론의 위와 아래에서 촬영한 이미지이다. 드론 부착물은 그림 2(a)에 표시한 것과 같이 가로와 세로 모두 160mm의 크기를 가지며 드론이 이착륙할 때 드론의 프로펠러 가드를 포함해 드론의 본체가 착륙 구조물의 경사면에 닿지 않도록 보호하였다. 드론 부착물은 M3 규격의 볼트와 너트를 이용해 그림 2(a)의 네 지점에서 드론의 프레임에 고정되었다.

개발한 드론 자동 충전 스테이션은 충전 연결부의 상하 직선 운동을 통해 착륙한 드론의 아래에서 충전선을 연결하는 방식이지만 대상으로 하는 상용 소형 드론의 충전 단자는 드론의 옆면에 위치하였다. 드론의 충전 단자와 충전선의 연결을 돕기 위해 그림 2(b)와 같이 드론 충전 단자에 선을 연결하고 선의 다른 쪽 끝에는 자석 단자를 추가로 부착하여 자기력으로 인해 단자와 충전선의 연결이 용이하게 하였다. 자석 단자를 그림 2(a)의 가운데 구멍에 고정하여 그림 2(c)와 같이 자석 단자가 구조물 밖으로 노출되도록 하였다.

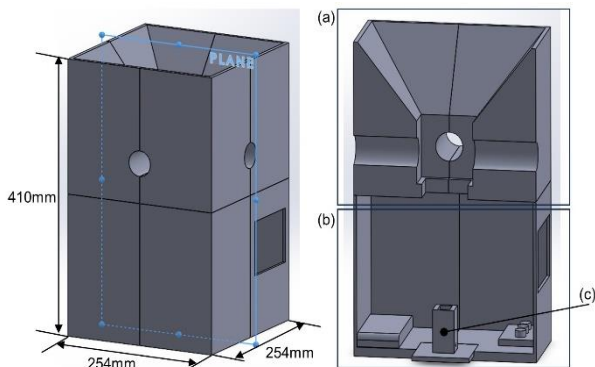


그림 1. 드론 자동 충전 스테이션의 개념도.

Fig. 1. Conceptual diagram of automated drone charging station.

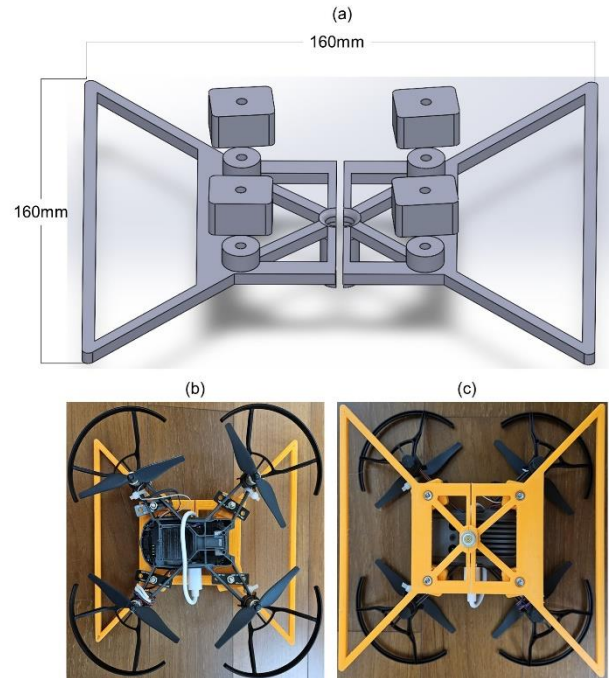


그림 2. 드론 보호와 충전 단자 방향 전환을 위한 부착물.

Fig. 2. Attachment for drone protection and reorientation of charging terminal.

드론이 착륙하는 착륙 구조물의 형상과 상세 설계 치수를 그림 3에 나타내었다. 그림 3(a)는 착륙 구조물의 전체 형상을 보여준다. 그림 3(a)에서 착륙 구조물의 네 옆면에 있는 원기둥 모양 구멍은 드론이 이착륙 하면서 프로펠러에 의해 생기는 바람이 빠져나가는 통로 역할을 하였다. 중앙에 위치한 사각기둥 모양 구멍으로 그림 4의 충전기 홀더가 상하로 움직여서 드론에 충전선을 연결하였다.

착륙 구조물을 그림 3(a)에 표시한 파란색 평면으로 자른 단면을 그림 3(b)에 설계 치수와 함께 표시하였다. 드론의 정중앙이 착륙 구조물의 정중앙에 위치해서 착륙하도록 제어해도 드론은 위치 오차를 가지고 착륙하게 된다. 드론의 정중앙이 착륙 구조물의 정중앙에서 반경 30mm 범위에서 임의의 오차를 가지고 착륙하는 것으로 가정하였다. 그림 2의 구조물을 부착한 드론은 가로 세로 160mm의 크기를 가지므로 착륙 오차를 고려하면 드론 부착물의 끝부분이 착륙 구조물의 정중앙에서 110mm 떨어진 위치까지 닿을 수 있는 것으로 계산하였다. 따라서 착륙 구조물의 최상단에서 중심과 경사면 사이의 수평 너비는 110mm 이상이어야 하며, 10%의 안전계수를 적용하여 그림 3(b)에 표시한 것과 같이 121mm가 되도록 설계하였다.

그림 2의 구조물을 부착한 드론이 착륙 오차로 인해 착륙 구조물의 임의 위치에 착륙하면 드론 부착물이 착륙 구조물의 경사면에서 미끄러지며 드론이 충전 위치로 정렬하게 된다. 드론이 충전 위치로 정렬하면서 드론 부착물의 끝부분이 그림 3(b)의 흰색 화살표 부분에 걸리며 충전 단자가 위치한 드론의 밑면과 착륙 구조물의 경사면이 끝나는 부분이 수직 방향으로 50mm 거리를 두도록 설계하였다. 착륙 구조물의 경사면은 반복 실험을 통해 약  $50^\circ$ 의 각도를 갖도록 설계

하였다. 착륙 구조물의 경사면 각도가 작아지면 드론 부착물을 경사면에서 미끄러지게 하는 힘이 작아져서 드론을 충전 위치로 정렬하는데 문제가 생기며, 착륙 구조물의 경사면 각도가 커지면 착륙 구조물 최상단의 공간을 확보하기 위해 착륙 구조물의 높이를 높여야 하는 문제가 생긴다.

충전선 끝이 그림 2에서 드론의 아래 방향으로 노출된 자석 단자와 가까워지면 자기력으로 충전선과 드론 충전 단자가 연결되어 충전이 시작되도록 충전선 끝에 자석 단자를 부착하였다. 충전선은 그림 4에 표시한 충전기 홀더에 고정되어 충전기 홀더와 함께 움직였다. 그림 4(a)는 충전기 홀더의 전체 형상을 보여준다. 충전기 홀더 상단의 경사면은 드론의 충전 단자를 충전기 홀더 중앙의 충전선으로 안내하도록 설계하였다. 충전기 홀더의 하단은 리니어 모터에 연결하여 충전기 홀더가 상하운동을 하도록 설계하였다. 충전기 홀더는 그림 4(a)의 파란색 평면을 기준으로 두 부분으로 나누어 3D 프린터로 제작하였다. 충전기 홀더를 그림 4(a)의 파란색 평면으로 자른 단면은 그림 4(b)에 표시하였다. 그림 4(d)의 파이프 형태 공간에 충전선을 먼저 삽입하고 그림 4(e)에 볼트와 너트를 사용해 두 부분으로 나누어 출력한 충전기 홀더를 하나로 결합하면서 충전선이 충전기 홀더에 고정되었다. 충전기 홀더에서 그림 4(f) 부분이 리니어 모터와 연결되었다. 제작한 충전기 홀더에 충전선을 고정하고 리니어 모터와 연결한 모습을 그림 4(c)에 나타내었다. 리니어 모터가 작동하면 충전선을 고정한 충전기 홀더가 그림 4(g)에 표시한 위아래 방향으로 움직였다.

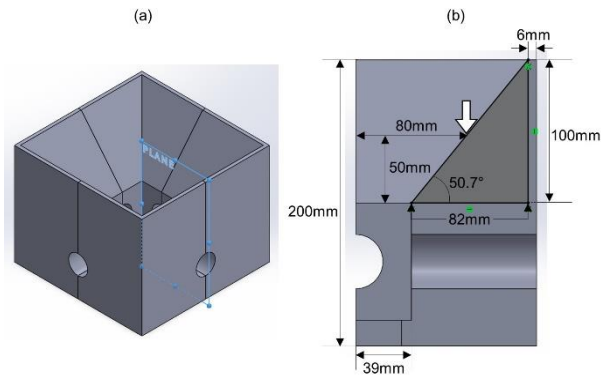


그림 3. 착륙 구조물의 3차원 형상.  
Fig. 3. Three-dimensional shape of landing structure.

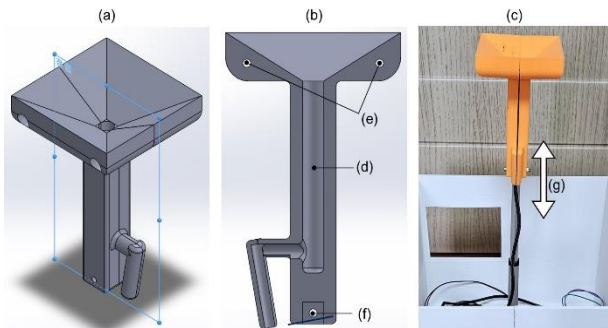


그림 4. 충전기 홀더의 3차원 형상.  
Fig. 4. Three-dimensional shape of charger holder.

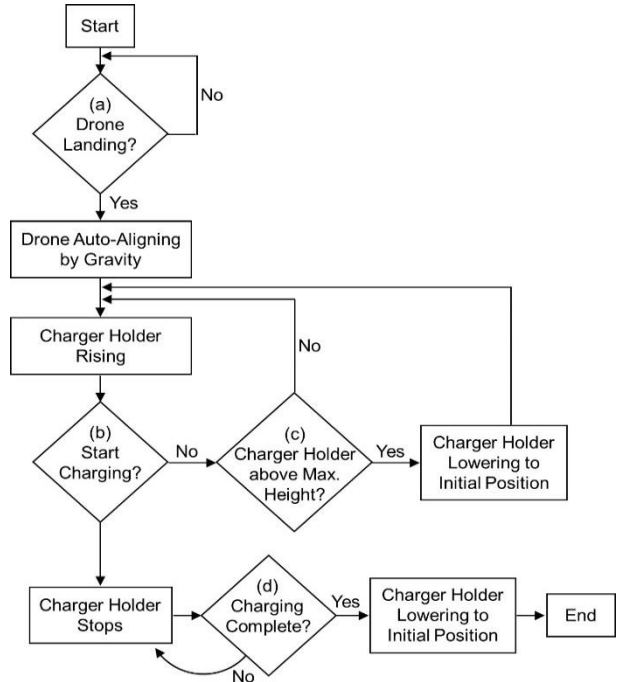


그림 5. 드론 자동 충전 스테이션의 작동 순서도.  
Fig. 5. Operation flowchart for automated drone charging station.

드론 자동 충전 스테이션은 드론이 착륙하면 착륙 구조물에 의해 정렬되고 충전기 홀더의 상하 이동을 통해 드론에 충전기를 연결하고 분리하는 순서로 작동하였다. 드론 자동 충전 스테이션의 상세 작동 순서는 그림 6에 나타내었다. 먼저, 그림 5(a)에서 드론 SDK (Software Development Kit)을 이용해 드론에 착륙 명령이 전달됐는지와 드론의 속도가 0인지를 검사하여 드론이 착륙했는지 확인하였다. 드론은 착륙 후 착륙 구조물에 의해 충전 위치로 정렬되며 드론에 충전기를 연결하기 위해서 충전기 홀더가 상승하였다. 그림 5(b)에서는 충전선에 ACS712 전류 센서를 연결하여 전류 세기를 확인하고 충전이 시작되었는지 확인하였다. 드론에 충전기가 연결되어 충전이 시작될 때까지 충전기 홀더는 상승하고 충전이 시작되면 충전기 홀더가 정지하였다. 드론이 착륙 구조물에 의해 충전 위치에 제대로 정렬되지 않으면 충전기 홀더가 상승해도 드론에 충전기가 연결되지 않을 수 있다. 그림 5(c)에서 충전이 시작되지 않았으나 충전기 홀더가 최고 높이까지 이동한 경우에는 충전기 홀더를 처음 위치로 되돌리고 다시 충전기 홀더가 상승하였다. 이 때, 충전기 홀더가 최고 높이에 도달하면 충전기 홀더 위에 드론이 놓이게 되고 드론이 들려 착륙 구조물에서 일정 거리만큼 떨어지게 된다. 충전기 홀더가 처음 위치로 하강하면서 드론이 착륙 구조물에 다시 닿으면서 충전 위치로 한 번 더 정렬되었다. 착륙한 드론에 충전기가 연결되어 충전이 시작될 때까지 충전기 홀더는 최고 높이까지의 상승과 처음 위치로의 하강을 반복하였다. 그림 5(d)에서는 드론 SDK를 이용해 배터리 충전량을 확인하고 전류 센서를 이용해 충전선의 전류 세기를 감시하여 드론의 충전이 완료되었는지 확인하였다. 충전이 완료되면 충전기 홀더가 처음 위치로 하강하면서 드론과 충전기를 분리하였다.

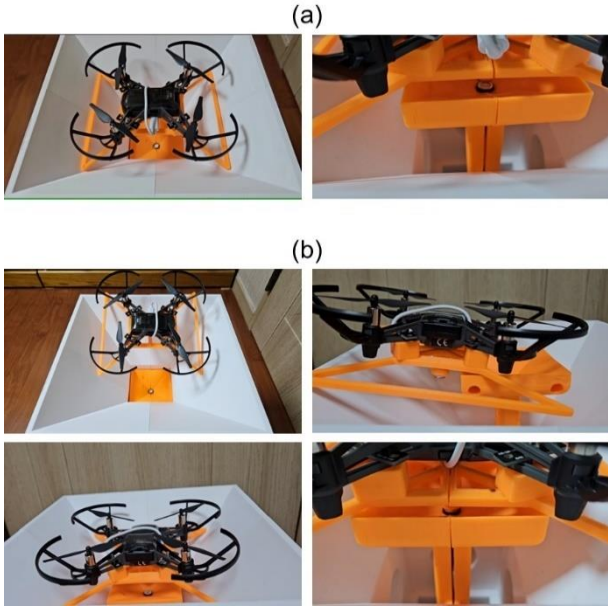


그림 6. 드론 자동 충전 스테이션의 프로토타입 작동 모습.  
Fig. 6. Operational demonstration of prototype automated drone charging station.

프로토타입으로 제작한 드론 자동 충전 스테이션의 작동 시연 사진을 그림 6에 나타내었다. 드론이 착륙한 후 착륙 구조물의 경사면을 모두 미끄러져 내려오면 그림 6(a)의 왼쪽 사진과 같이 드론이 충전 위치에 정렬된다. 드론 부착물의 모서리가 그림 3(b)에 하얀색 화살표로 표시한 착륙 구조물에 놓이게 되며 그림 2(c)의 중앙에 위치한 드론의 충전 단자와 그림 4(a)의 충전기 홀더 중앙에 위치한 충전선 단자가 상하 방향으로 같은 선상에 놓이게 된다. 그림 6(a)의 오른쪽 사진과 같이 충전기 홀더가 상승하여 드론의 충전 단자와 충전선의 단자가 자기력으로 인해 연결되고 충전이 시작되었다. 드론이 착륙한 후 착륙 구조물의 경사면을 모두 미끄러져 내려오지 못하고 도중에 멈추는 경우에는 그림 6(b)의 왼쪽 위 사진과 같이 드론이 착륙 구조물의 경사면에 놓이게 된다. 이 경우 드론의 충전 단자와 충전기 홀더 중앙에 위치한 충전선 단자 사이에 거리가 있으며 경사면에 의해 드론이 roll 방향이나 pitch 방향으로 기울어져 있다. 그림 6(b)의 오른쪽 위 사진과 같이 충전기 홀더가 상승하면 충전이 시작되지는 않지만 충전기 홀더가 드론과 드론 부착물을 들어올려 경사면에서 떨어지게 하고 충전기 홀더가 하강하면서 드론이 경사면을 다시 미끄러져 내려와 그림 6(b)의 왼쪽 아래 사진과 같이 충전 위치로 정렬되었다. 그림 6(b)의 오른쪽 아래 사진과 같이 초기 위치까지 하강했던 충전기 홀더가 다시 상승하여 드론의 충전 단자와 충전선의 단자를 연결하고 충전이 시작되었다.

### III. 충전 성능 검증 실험 및 결과

착륙한 드론은 대부분 그림 6(a)와 같이 착륙 구조물의 경사면에 의해 충전 위치로 정렬되지만 경우에 따라서는 그림 6(b)와 같이 충전 위치가 아닌 착륙 구조물의 경사면 위에

임의의 위치와 자세로 놓이기도 하였다. 드론이 착륙하여 충전 위치로 정렬되는 경우와 경사면에 놓이는 경우를 모두 포함해 드론이 착륙해서 착륙 구조물에 놓일 수 있는 다양한 위치와 자세에 맞춰 사람이 드론을 착륙 구조물에 내려놓는 방법으로 드론이 충전 스테이션에 착륙하는 다양한 상황을 시뮬레이션하였다.

드론이 충전 스테이션에 착륙한 상황에 따라 충전 스테이션의 충전 성능을 검증하기 위해 그림 5의 알고리즘에 따라 충전을 시도하고 충전 성공률을 확인하였다. 각 충전 시도에서 충전기 홀더가 1회 상승하여 바로 충전이 시작되는 경우와 충전기 홀더가 5회 이내로 상승과 하강을 반복하여 충전이 시작되는 경우를 나누어 충전 성공률을 계산하였다. 충전기 홀더가 5회 상승과 하강을 반복하였음에도 드론 충전이 시작되지 않는 경우는 충전이 실패한 것으로 판단하였다.

먼저, 착륙한 드론이 착륙 구조물의 경사면을 완전히 미끄러져 내려와 그림 6(a)와 같이 충전 위치로 정렬된 경우에 충전 성공률을 확인하였다. 그림 7은 충전 실험을 위해 사람이 드론을 착륙 구조물의 계획한 위치에 놓고 구성한 실험 환경을 보여준다. 그림 7에서는 드론의 충전 단자와 충전기 홀더의 충전선 단자가 상하 방향으로 같은 선상에 놓이도록 하였고 드론이 roll 방향과 pitch 방향으로 기울어지지 않고 지면과 평행하도록 착륙 구조물에 올려두었다. 계획한 위치에 놓인 드론을 yaw 방향으로 각도를 바꿔가며 각도 별로 충전을 20회씩 시도하였다. 그림 7에서 빨간색 점선은 기준선을 나타내고 빨간색 화살표는 드론 앞부분의 방향을 나타낸다. 그림 7의 (a)에서 (e)까지 드론은 모두 계획한 위치에 놓여있고 yaw 방향으로 각도가 각각 0°, 30°, 45°, 60°, 90°가 되도록 드론 앞부분의 방향을 돌려놓은 상태에서 충전을 시도하였다.

그림 7과 같은 실험 환경에서 수행한 yaw 각도별 40회씩 총 200회의 모든 충전 실험에서 충전기 홀더가 1회 상승하여 드론의 충전 단자와 충전기 홀더의 충전선 단자가 연결되었고 충전이 시작되었다. 착륙한 드론이 착륙 구조물의 경사면을 중간에 멈춤 없이 미끄러져 내려와 충전 위치로 정렬되면 정렬된 드론의 yaw 각도에 상관없이 단번에 드론에 충전기가 연결되고 충전이 가능하다는 것을 확인하였다.

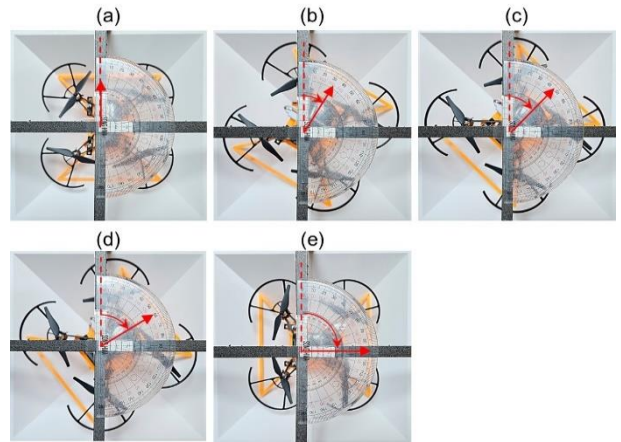


그림 7. 드론 자세에 따른 충전 성공률 실험 환경.  
Fig. 7. Experimental setup for evaluating charging success rate according to drone orientation.

다음으로 착륙한 드론이 착륙 구조물의 경사면을 미끄러져 내려오다가 중간에 멈춰서 그림 6(b)와 같이 드론이 착륙 구조물의 경사면에 위치하는 경우의 충전 성공률을 확인하였다. 드론이 경사면에 놓여 있는 경우를 드론의 충전 단자와 충전기 홀더의 충전선 단자 사이의 거리와 방향에 따라 6 가지로 나누어 그림 8과 같이 실험 환경을 구성하였다. 그림 8의 (a)에서 (c)는 드론의 앞쪽 방향으로 드론의 충전 단자와 충전기 홀더의 충전선 단자 사이 거리를 늘려가며 구성된 실험 환경을 보여준다. 이때 거리가 멀어질수록 착륙 구조물의 경사에 의해 드론이 pitch 방향으로 기울어졌다. 드론의 앞쪽 방향으로 드론 충전 단자와 충전기 홀더의 충전선 단자 사이 거리는 그림 8(a)에서 20mm, 그림 8(b)에서 40mm, 그리고 그림 8(c)에서 70mm였다. 그림 8의 (d)에서 (f)는 드론의 왼쪽 방향으로 드론 충전 단자와 충전기 홀더의 충전선 단자 사이의 거리가 멀어진 실험 환경을 보여준다. 이때는 거리가 멀어질수록 경사면에 의해 드론이 roll 방향으로 기울어졌다. 드론 충전 단자와 착륙 구조물의 중앙 사이의 거리는 그림 8(d)에서 20mm, 그림 8(e)에서 40mm, 그리고 그림 8(f)에서 70mm였다. 드론 충전 단자와 충전기 홀더의 충전선 단자 사이의 거리가 드론의 뒤쪽 방향과 오른쪽 방향으로 멀어지는 경우는 드론의 앞쪽 방향과 왼쪽 방향으로 거리가 멀어지는 경우와 대칭인 것으로 판단하여 실험을 진행하지 않았다.

그림 8에 표시한 6가지 위치에 드론을 올려두고 위치별 40 회씩 총 240회의 충전 실험을 수행하였다. 위치별 충전 성공률은 표 1에 표시하였다. 표 1의 1열에서 각 알파벳은 그림 8의 6가지 실험 환경을 나타낸다. 예를 들어 표 1의 1열에서 알파벳 (a)는 그림 8(a)와 같이 드론을 놓고 수행한 충전 실험을 의미한다. 표 1의 2열은 첫 충전 시도에서의 성공률과 5회 이내 충전 시도에서의 성공률을 나타낸다. 여기서 충전 시도는 충전기 홀더가 상승한 횟수를 나타낸다. 표 1의 3열은 충전에 실패한 확률을 나타낸다. 표 1에서 드론 충전 단자와 충전기 홀더의 충전선 단자 사이의 거리가 20mm인 실험

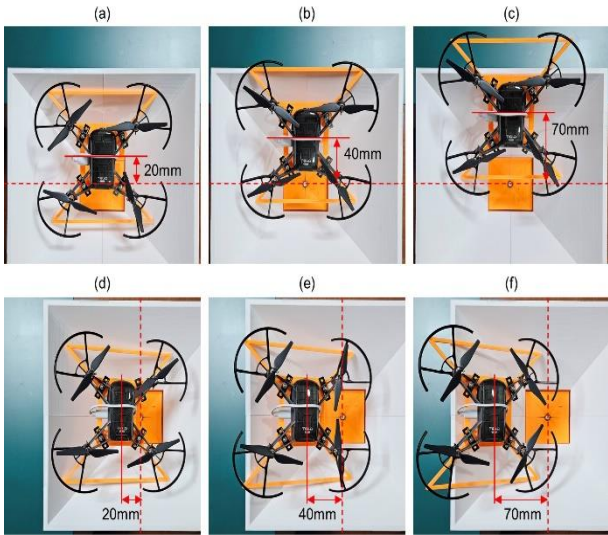


그림 8. 드론 위치에 따른 충전 성공률 실험 환경.

Fig. 8. Experimental setup for evaluating charging success rate according to drone position.

(a)와 (d)는 모든 실험에서 첫 충전 시도에 충전을 성공하였다. 드론 충전 단자와 충전기 홀더의 충전선 단자 사이의 거리가 40mm와 70mm로 떨어진 실험 (b)와 (e)의 경우에도 모든 실험에서 첫 충전 시도에 충전을 성공하였으나, 실험 (c)와 (f)에서는 대부분 실험에서 충전 시도 5회 이내에 충전을 성공하였다. 실험 (f)에서 40회 중 1회는 충전에 실패하였다.

드론 부착물의 전후 방향 모양과 좌우 방향 모양이 다르기 때문에 실험 (b), (c)와 실험 (e), (f)에서 드론 충전 단자와 충전기 홀더의 충전선 단자 사이의 거리가 같은 경우에도 다른 충전 성공률이 나타났다. 실험 (b), (c)에서는 충전기 홀더가 상승하면서 드론을 들어올리는 것이 용이하였고, 충전기 홀더가 드론을 들어올린 후에 충전기 홀더가 하강하면 경사면에 의해 드론이 미끄러져 내려오며 드론 충전 단자와 충전선 단자가 연결되었다. 하지만 실험 (e), (f)에서는 충전기 홀더가 상승하면서 드론을 들어올리는데 제한이 있었고 충전기 홀더가 여러 번 상승과 하강을 반복해야 드론이 경사면을 미끄러져 내려와 충전이 시작되었다. 실험 (f)에서 충전에 실패한 경우는 충전기 홀더가 5회 상승과 하강을 반복했음에도 드론이 경사면에서 미끄러져 내려오지 않았다.

마지막으로 드론이 착륙 구조물의 최상단에서 거리를 두고 프로펠러 회전을 멈추고 자유 낙하했을 경우에 충전 성공률을 확인하였다. 실험에서 드론이 자유 낙하한 위치와 자세를 그림 9에 표시하였다. 드론의 높이 방향 위치는 그림 9(a)에 빨간 선으로 표시한 착륙 구조물의 최상단보다 30mm 높은 곳으로 하였다. 그림 9(b)에서 빨간 점은 착륙 구조물의 정중앙으로 충전선 단자와 상하 방향으로 같은 선 상이다. 드론의 충전 단자를 그림 9(b)의 빨간 점에 위치하고 드론의

표 1. 드론 위치에 따른 충전 성공률.

Table 1. Charging success rate according to drone position.

| Experimental Setup | Charging Success                 | Charging Failure |
|--------------------|----------------------------------|------------------|
| (a)                | 100 % (on 1 <sup>st</sup> trial) | 0 %              |
| (b)                | 100 % (on 1 <sup>st</sup> trial) | 0 %              |
| (c)                | 100 % (on 1 <sup>st</sup> trial) | 0 %              |
| (d)                | 100 % (on 1 <sup>st</sup> trial) | 0 %              |
| (e)                | 100 % (within 5 trials)          | 0 %              |
| (f)                | 97.5 % (within 5 trials)         | 2.5 %            |

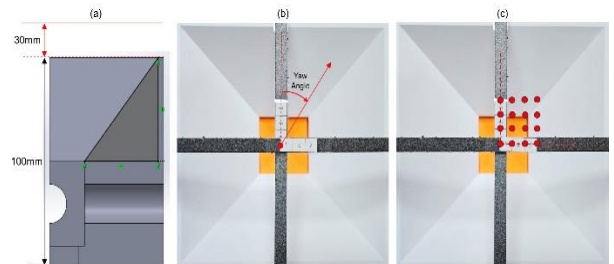


그림 9. 드론의 자유 낙하 위치와 자세에 따른 충전 성공률 실험 환경.

Fig. 9. Experimental setup for evaluating charging success rate according to drone free-fall position and orientation.

머리 방향을 yaw 방향으로 0°, 10°, 20°, 30° 돌린 상태에서 드론이 충전 스테이션으로 자유 낙하하고 드론에 충전을 시도하였다. 각 yaw 방향 각도별 20회씩 총 80회의 충전 실험을 하였고 모든 실험에서 첫 충전 시도에 충전을 성공하였다. 그림 9(c)에서 착륙 구조물의 정중앙을 기준으로 드론의 오른쪽과 앞쪽으로 3cm 거리까지 1cm 간격으로 빨간 점을 표시하였다. 드론의 머리 방향 yaw 각도는 0° 로 고정하고 드론의 충전 단자를 그림 9(c)의 16개 빨간 점에 위치한 상태에서 드론이 충전 스테이션으로 자유 낙하하고 드론에 충전을 시도하였다. 각 위치별 20회씩 총 320회의 충전 실험을 하였고 마찬가지로 모든 실험에서 첫 충전 시도에 충전을 성공하였다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 실내 식물공장에서 운용되는 소형 드론의 효율적인 운용을 위한 새로운 자동 충전 스테이션을 제안하였다. 제안한 시스템은 착륙 구조물의 3차원 형상과 중력을 이용하여 정확한 착륙 제어가 힘든 소형 드론을 충전 위치로 유도하고, 충전선의 1자유도 상하 움직임을 단일 액추에이터로 구동하여 드론의 충전 단자와 충전선을 연결하여 드론을 충전하는 구조로 설계되었다.

개발한 드론 자동 충전 스테이션의 성능 검증을 위해 세 가지 충전 실험을 수행하였다. 먼저 착륙 구조물 경사면에 의해 드론이 충전 위치로 정렬되는 경우, 드론의 yaw 방향 각도에 관계없이 모든 실험에서 첫 시도에 충전에 성공하였다. 다음으로 드론이 착륙 구조물 경사면 중간에 멈춰 충전 위치와 거리가 있는 경우에도 5회 이내의 충전 시도에서 대부분 충전이 성공하였다. 마지막으로 드론이 충전 스테이션의 최상단보다 30mm 높은 위치에서 자유 낙하한 경우의 충전 실험에서는 다양한 자유 낙하 위치와 yaw 방향 각도 조건에서 총 400회의 실험을 수행하였고 모든 경우에서 첫 시도에 충전을 성공하였다. 이러한 실험 결과를 통해 개발한 시스템이 다양한 착륙 상황에 대해 높은 충전 성공률을 보인다는 것을 확인하였다.

본 연구를 통해 착륙 구조물의 형상과 중력을 활용한 기계적인 설계로도 안정적인 드론 충전 자동화를 구현할 수 있음을 확인하였다. 개발한 시스템은 단순한 구조로 제작 비용을 낮추고 유지보수가 용이하다는 장점이 있으며 무인 환경에서의 소형 드론 활용성을 높이는 데 기여할 것으로 기대된다. 추가 연구를 통해 다양한 드론의 크기와 형상에 맞춰 착륙 구조물의 형상을 최적화 설계하는 방법 마련이 필요하다. 또한 본 연구에서 드론 아래에 부착한 구조물은 드론 아래에 부착하는 센서의 측정에 방해가 될 수 있으므로 드론 부착물의 생략 방안에도 관해 추가 연구할 필요가 있다.

#### REFERENCES

- [1] H. Heo, H. Lee, and K. Lee, "Safe return home solution using a smart drone scout," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 30, no. 9, pp. 937-944, 2024.  
doi: <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2024.24.0131>
- [2] Y. J. Choi and S. Jung, "Experimental studies on solar panel cleaning task by a foldable robot arm of a drone," *Journal of*

*Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 29, no. 11, pp. 887-892, 2023.

doi: <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2023.23.0076>

- [3] J. Lee, H. J. Lee, S. K. Arachchige, N. Kim, H. Heo, and K. Lee, "Search operations with geolocation estimation of missing persons based on real-time drone images," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 30, no. 8, pp. 890-896, 2024.  
doi: <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2024.24.0087>
- [4] B. Lee, S. Kwon, P. Park, and K. Kim, "Active power management system for an unmanned aerial vehicle powered by solar cells, a fuel cell, and batteries," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 50, no. 4, pp. 3167-3177, 2014.  
doi: <https://doi.org/10.1109/TAES.2014.130468>
- [5] P. Sarunic and R. Evans, "Hierarchical model predictive control of UAVs performing multitarget-multisensor tracking," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 50, no. 3, pp. 2253-2268, 2014.  
doi: <https://doi.org/10.1109/TAES.2014.120780>
- [6] T.-H. Kim, W. Ahn, J.-I. Park, and J.-G. Yook, "High-power wireless power transfer of drones with wide charging area," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 3, pp. 225-234, 2020.  
doi: <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2020.31.3.225>
- [7] D.-N. Kim, Y.-K. Kim, S. H. Paik, S. W. Jung, and D. Cho, "Research on a contact-type battery charging station for continuous mission performance of rotary wing drone," *The Journal of Korean Institute of Information Technology*, vol. 19, no. 1, pp. 63-70, 2021.  
doi: <https://doi.org/10.14801/jkiit.2021.19.1.63>
- [8] S.-W. Kim, S.-M. Kim, J.-I. Moon, S.-H. Sohn, and I.-K. Cho, "Design and implementation of 240W drone wireless charging system control unit," *The 52th KIEE Summer Conference*, Pyeongchang, Korea, pp. 21, July 2021.  
<https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10609557>
- [9] Y.-K. Kim, H.-H. Jung, D.-N. Kim, and T.-C. Kang, "Design and implementation of drone station charging bed structure for rotary wing drone," *Journal of Korean Institute of Information Technology*, vol. 20, no. 6, pp. 41-50, 2022.  
doi: <https://doi.org/10.14801/jkiit.2022.20.6.41>
- [10] K. Kim, W.-S. Song, and H.-J. Choe, "A study on the wireless charging of mini drone using PCB coil," *The 55th KIEE Summer Conference*, Jeju, Korea, pp. 328-329, July 2024.  
<https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11916505>



이재우

2019년~현재 상명대학교 휴먼지능로봇공학과 학부 재학 중. 관심분야는 인간-로봇 인터페이스, 로봇제어, 로봇 설계.



### 정성균

2003년 서울대학교 기계항공공학부(공학사). 2005년 서울대학교 기계항공공학부 (공학석사). 2020년 한국과학기술원(KAIST) 대학원 항공우주공학과(공학박사). 2005년~2016년 한국전자통신연구원 선임연구원, 2016년~2020년 과학기술정보통신부 사무관, 2020년~현재 상명대학교 휴먼지능로봇공학과 교수. 관심분야는 위성항법, 비행동역학, 제어.



### 봉재환

2012년 고려대학교 기계공학부(공학사). 2014년 고려대학교 기계공학부(공학석사). 2020년 고려대학교 기계공학부(공학박사). 2020년~현재 상명대학교 휴먼지능로봇공학과 교수. 관심분야는 지능형 로봇, 인간-로봇 인터페이스.