

YOLO 기반 오염 감지와 위상최적화 경량 설계를 적용한 하이브리드 자율주행 태양광 패널 청소 로봇

2270013 김도은 2270022 김승연 2270096 노유정 2270103 안지혜 2270069 전희선 2270106 한수진

이화여자대학교 휴먼기계바이오공학부

프로젝트 개요

본 프로젝트는 태양광 패널 오염으로 인한 발전 효율 저하 문제를 해결하기 위해 건식·습식 하이브리드 자율 청소 로봇을 개발하는 것을 목표로 한다. YOLO 기반 오염 감지 시스템을 통해 패널 오염 영역을 식별하고, 내장형 급수 시스템으로 필요한 구역에만 선택적으로 습식 청소를 수행하여 물 사용량과 작업 시간을 최소화한다. 초음파 센서로 장애물과 패널 경계를 감지하고 최적 경로 주행 알고리즘을 적용해 주행 효율과 안정성을 향상시켰다. 또한 위상최적화 기법으로 차체를 설계해 경량화와 강성을 확보하였으며, 맞춤형 캐터필러 바퀴를 적용해 패널 표면 접지력과 흡착력을 높이고 기존 청소 로봇의 배터리 무게 의존 문제를 완화하였다.

프로젝트 배경

기존 태양광 패널 청소는 주로 수작업에 의존해왔다. 상용 청소 로봇은 약 600만 원대의 높은 가격으로 인해 널리 보급되기 어려웠다. 이로 인해 대부분의 주택 및 소규모 발전소 패널이 사설상 방치되고 있어, 가볍고 합리적인 가격대의 청소 로봇을 기획했다. 또한, 기존 로봇은 습식이나 건식 중 단일 방식만을 사용해 먼지와 새똥 등 다양한 오염 환경에 대응하기 어렵다는 한계가 명확했다. 이에 ‘청소해조’는 습식과 건식이 모두 가능한 ‘하이브리드 청소’를 적용했다. 나아가 커스텀 YOLO 알고리즘으로 오염도를 분석하고 습식 청소가 필요한 구역만 물을 분사함으로써 기존 습식 로봇의 문제였던 물 낭비를 줄였다. 또한 외부 노즐 없이 내장형 급수만으로 작동 가능하도록 구현했다.

로봇 제어 방식

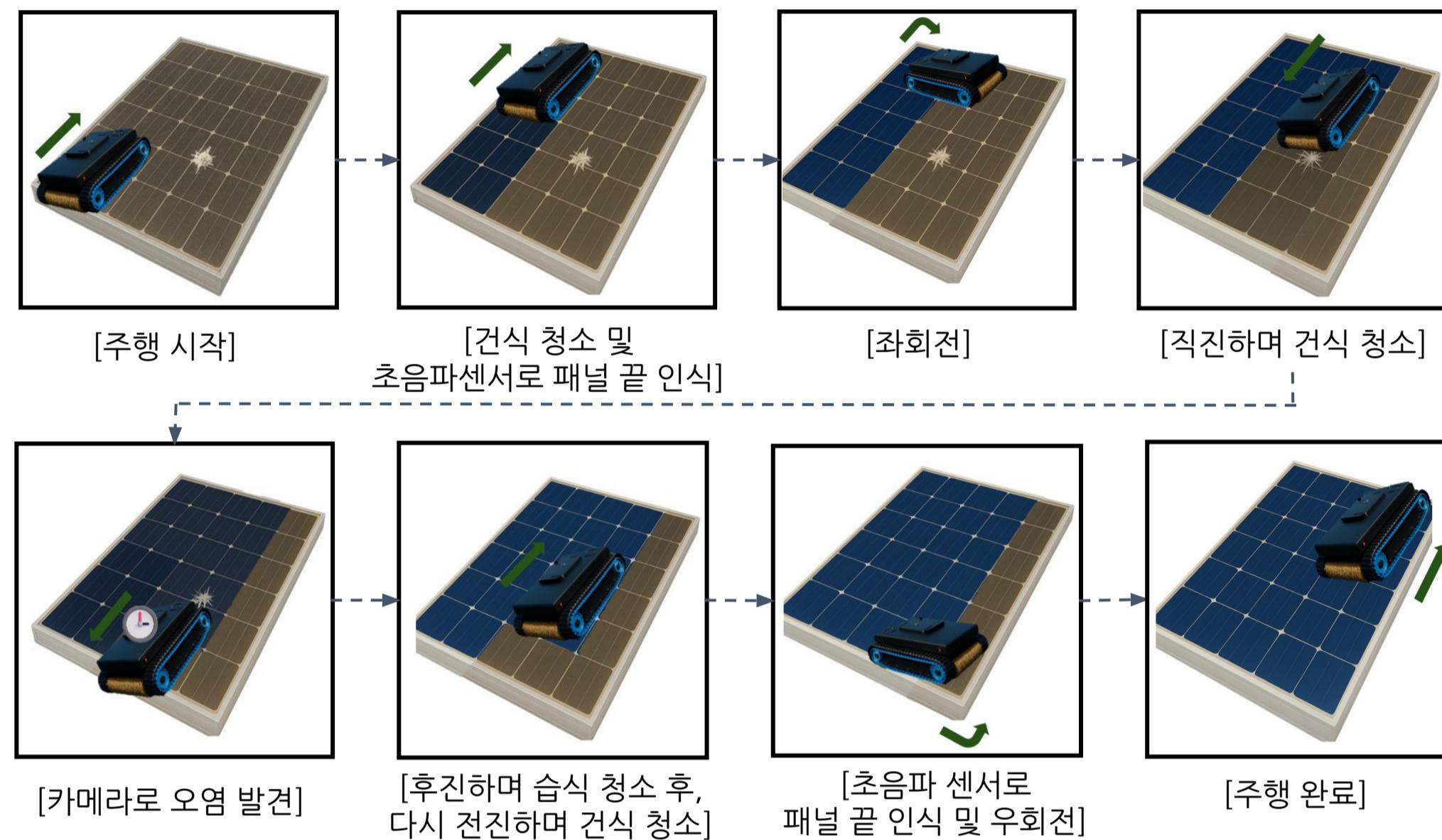


Figure 1. Operational Flow of the Solar Panel Cleaning Robot

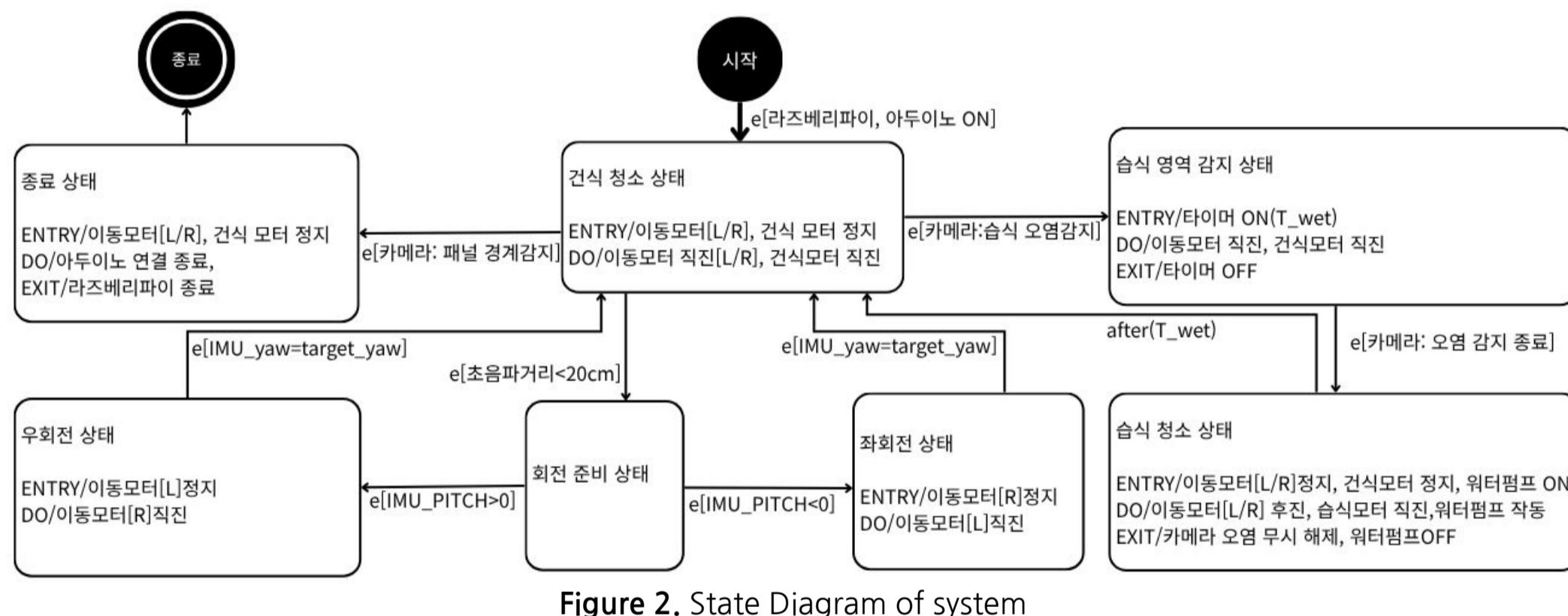


Figure 2. State Diagram of system

Fig 1은 실제 동작 시뮬레이션을 기반으로 제작되었다. 로봇은 패널의 왼쪽 아래에서 주행을 시작해 기본적으로 건식 청소를 수행하며, 초음파 센서로 패널 끝을 인식하면 자동으로 회전한다. 후면의 카메라가 건식 청소로 제거하기 어려운 오염을 감지하면 오염 구간의 길이를 계산한 뒤 해당 거리만큼 후진하면서 내부 물 펌프 모터와 후면 습식 브러쉬 모듈이 작동해 해당 구간에 물을 분사하고 세정한다. 이 과정(Fig 2)을 반복함으로써 로봇은 불필요한 물 사용을 최소화하면서 효율적인 청소를 달성할 수 있다. 모든 제어는 센서 입력에 기반하여 완전한 자율 주행으로 이루어진다. 따라서, 오염 상태 인식부터 주행 제어, 브러시 및 펌프 동작까지 일련의 과정이 자동 반복되는 자율 청소 시스템을 기반으로 한다.

제어시스템 설계

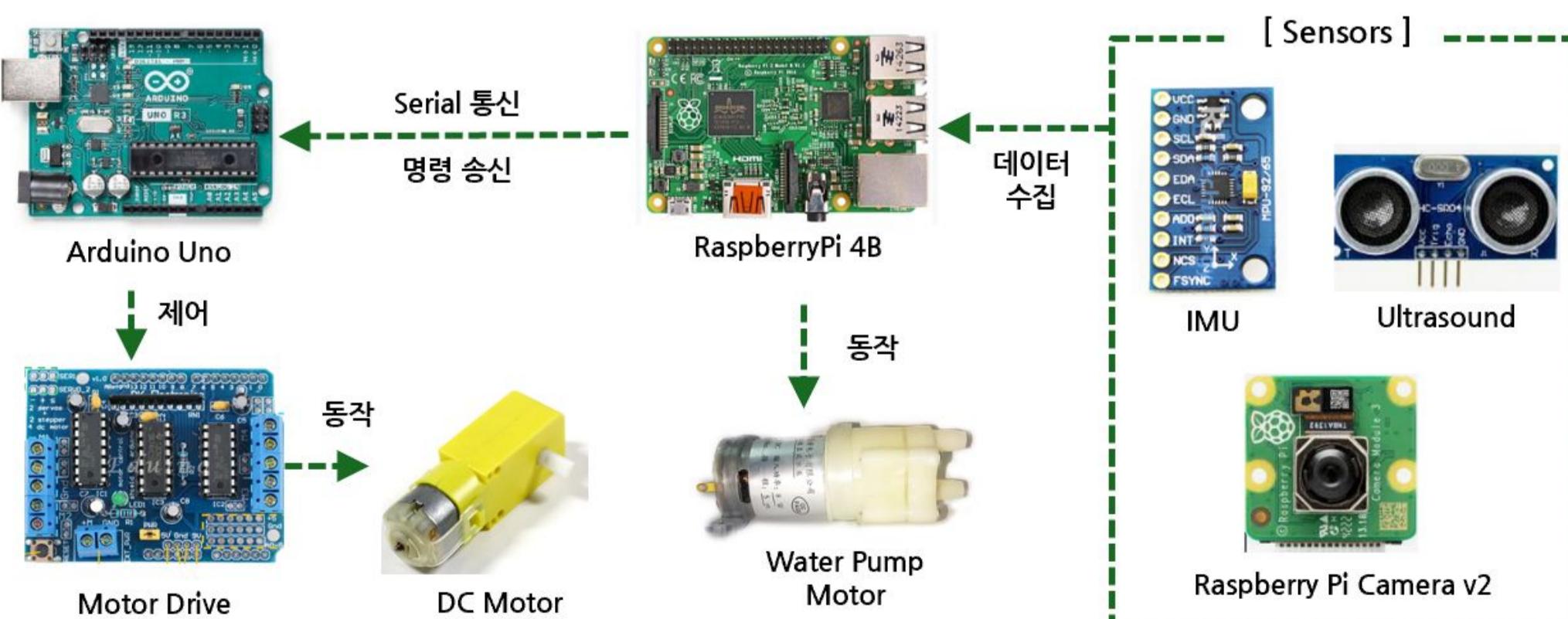


Figure 3. System Architecture of the Solar Panel Cleaning Robot Using Raspberry Pi-Arduino Serial Communication

시스템은 센서 데이터를 주기적으로 갱신하며 동작 명령을 반복 수행하는 개방형 반복 제어 구조로 설계됐다(Fig 3). 라즈베리파이 4B는 중앙 제어기로서 초음파·IMU·카메라 데이터를 통합 분석해 주행과 청소를 제어한다. 초음파 센서는 낙하 위험을 감지하고, IMU는 회전 주행 안정성을 돋는다. 카메라 프레임은 Python 환경의 YOLOv8n 모델로 처리되어 오염 영역을 인식하고, 결과에 따라 습식 청소를 선택적으로 수행한다. 판단된 명령은 pyserial 기반 시리얼(UART) 통신으로 아두이노 우노에 전달되며, 아두이노는 Adafruit Motor Shield를 통해 차체 바퀴 네 개의 DC모터를 PWM 제어해 이동 및 회전을 수행한다. 건식·습식 브러시는 각각 별도 모터로 구동되고, 습식 모드에서는 워터펌프가 세정수를 분사한다.

로봇 차체 설계

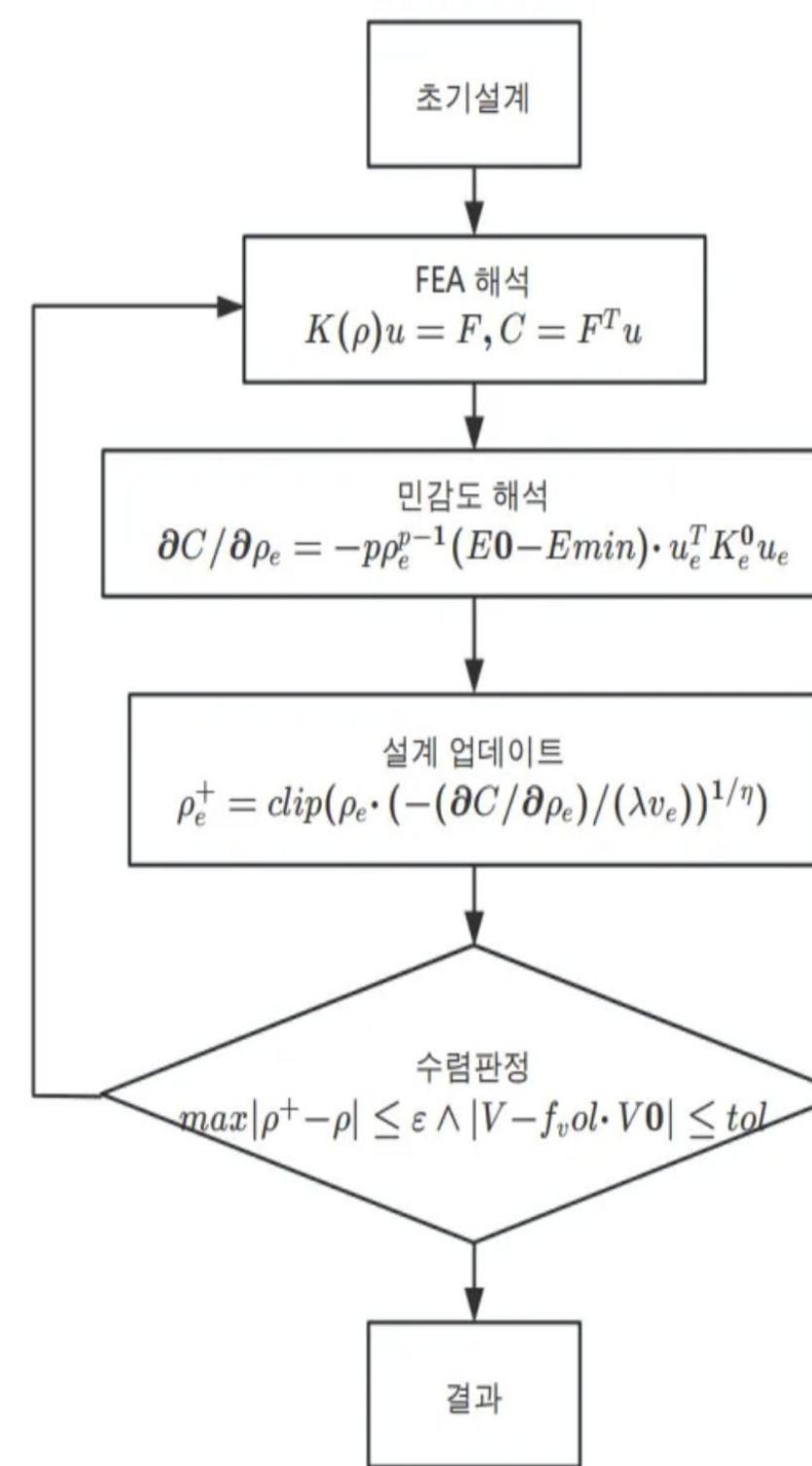


Figure 4. System Flowchart of the Robot Body Topology Optimization

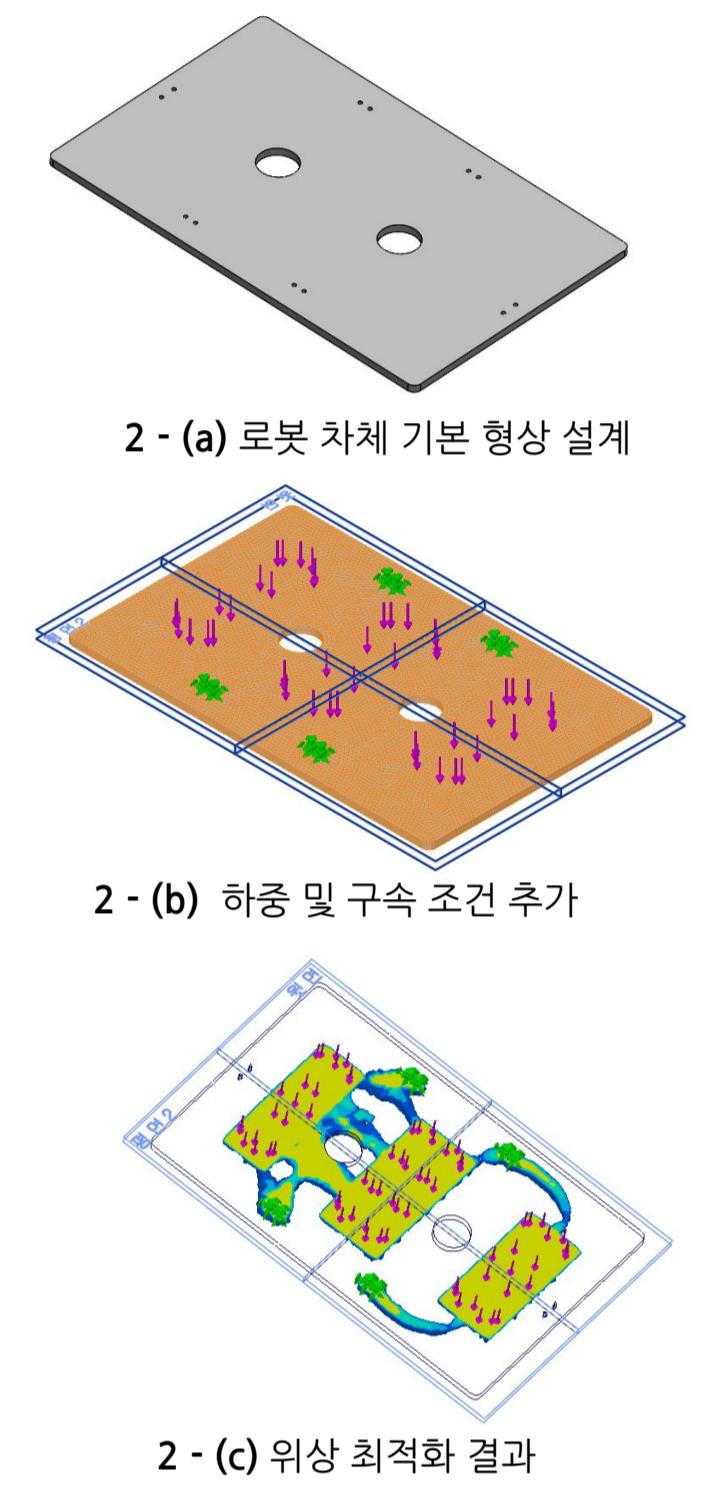


Figure 5. Visualization and Results of the Topology Optimization Process

위상 최적화 기법을 통해 재료 사용률을 60% 줄인 결과를 바탕으로 강성이 높은 재료를 핵심 뼈대에만 적용하여 전체 재료비를 절감하는 동시에 강성을 최대화했다. 또한 안전계수가 2 이하로 나타난 노치 영역에는 필렛을 적용해 응력 집중을 완화함으로써 안전계수를 약 18% 향상시켰다.

브러시 최적화

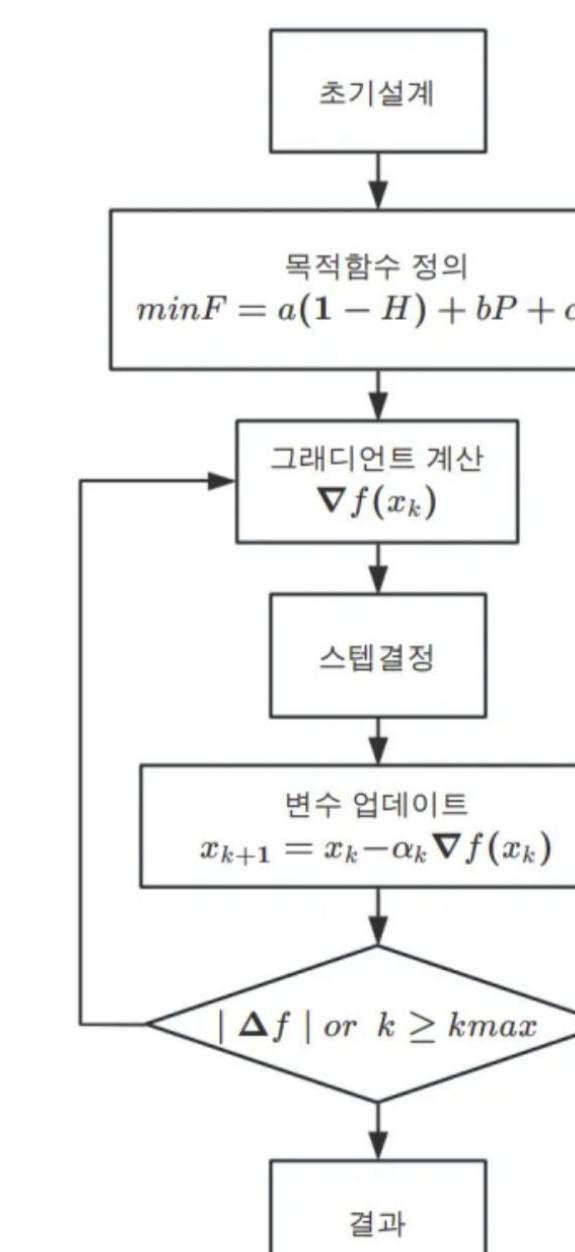


Figure 6. Flowchart of the Brush Optimization Process

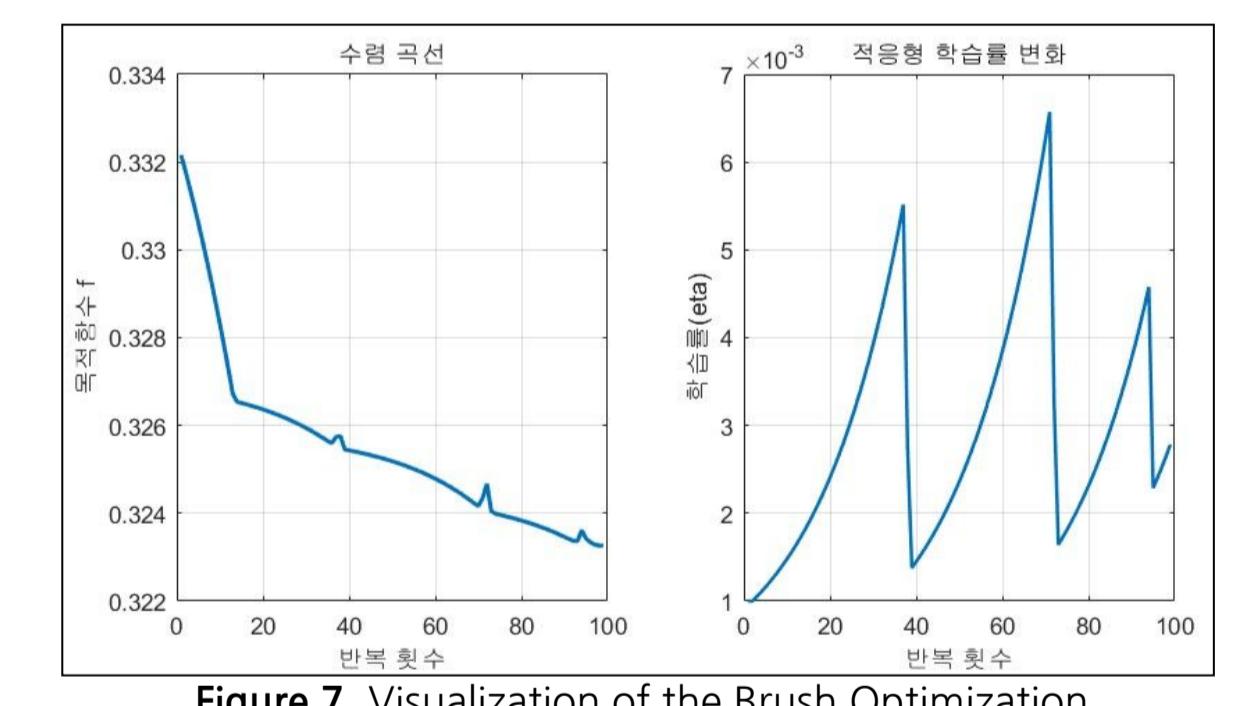


Figure 7. Visualization of the Brush Optimization

Table 1. Results of the Brush Optimization

	초기값	최종값	개선율
P (전력소모율)	5.27E-06	5.19E-06	1.38%
W (마모율)	0.0088	0.00084	5.12%
H (청소율)	0.000562	0.000579	3.07%
f (목적함수)	0.332546	0.323265	2.79%

전력 소모율, 마모율, 청소 효율을 고려한 다목적 최적화를 통해 브러시 구동 성능을 개선했다(Fig 6, Fig 7). 그 결과, 에너지 절감과 청소 성능 사이의 균형잡힌 개선이 이루어졌으며, 전체 시스템 효율과 안정성이 향상되었다(Table 1).

최종 결과

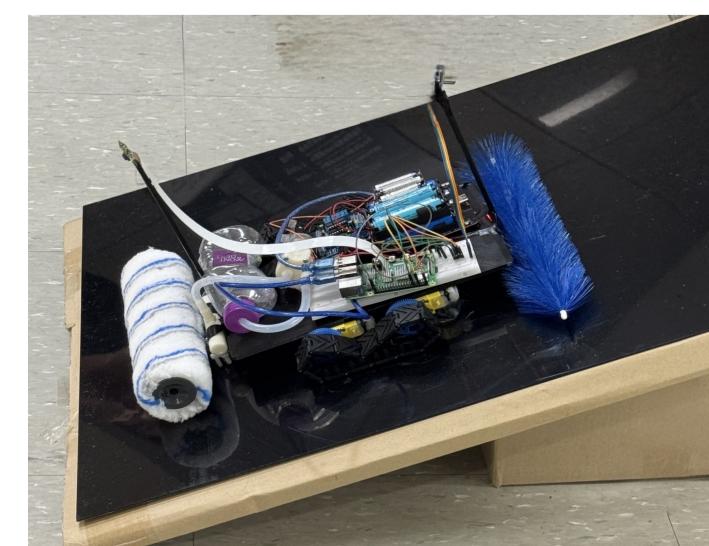


Figure 9. Final Product of the Solar Panel Cleaning Robot

청소가 이루어지지 않은 태양광 패널과 비교했을 때, 본 시스템을 활용해 정기적으로 청소를 수행한 패널은 발전 효율이 약 13.6% 향상되는 것으로 나타났다. 이는 오염물 제거로 인한 광투과율 증가와 표면 반사 손실 감소에 기인한다. 또한, 청소 과정에서의 마모율 감소 효과를 통해 태양광 패널의 전체 수명이 연장되는 결과를 기대할 수 있다. 더불어, 기존의 수작업 청소 방식에서 발생할 수 있었던 추락이나 감전 등의 안전사고 위험이 크게 줄어들어, 작업자의 안전성이 향상되는 효과도 기대된다.