

노지 환경에서의 실시간 토양 정보 모니터링 시스템 개발

(Development of a Real-Time Soil Information Monitoring System in Open Fields)

서승용*, 정승진*, 김승아*, 박기동*, 임류갑**

(Seung Yong Seo*, Seung Jin Jung*, Seung A Kim, Ki Dong Park*, Ryu Gap Lim**)

요약

본 연구에서는 노지 농경지 환경에서 토양 함수율을 실시간으로 측정하고 공간적으로 해석하기 위한 토양 정보 모니터링 시스템을 구축하였다. 토양의 유전 특성을 이용하는 FDR(Frequency Domain Reflectometry) 방식 토양 함수율 센서를 라즈베리파이 기반 측정 시스템에 결합한 측정 모듈을 구성하고, 12 × 13 m 규모의 농경지 내 18개 지점(n = 18)에서 토양 함수율 데이터를 수집하였다. 동일 지점에서 토양강도를 추가적으로 측정하여 토양 물리 특성의 공간적 분포를 해석하였다.

측정된 토양 함수율 데이터는 중량법 및 상용 센서(TEROS 10) 측정값과 비교하여 통계적으로 검증하였다. 등분산성 위배를 고려하여 Welch의 일원배치 분산분석을 적용한 결과, 세 측정 방식 간 체적 수분함량의 평균 차이는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다($p > 0.05$). 또한 QGIS 기반 공간 분석을 통해 토양 함수율과 토양강도의 공간적 분포를 시각화함으로써 연구 대상지의 토양 물리 특성 이질성을 정량적으로 표현하였다. 본 연구에서 구축한 토양 정보 모니터링 시스템과 맵핑 결과는 노지 농경지의 토양 상태를 이해하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

■ **중심어** : 토양정보맵핑 ; 노지 ; 토양수분센서 ; 토양강도 ; GIS(Geographic Information System)

Abstract

This study presents a soil information monitoring system for real-time measurement and spatial analysis of soil volumetric water content under open-field conditions. A dielectric-based Frequency Domain Reflectometry (FDR) soil moisture sensor was integrated with a Raspberry Pi-based data acquisition system, and field measurements were conducted at 18 locations (n = 18) within a 12 × 13 m agricultural field. Soil penetration resistance was additionally measured at the same locations to interpret the spatial distribution of soil physical properties.

Soil moisture data were statistically evaluated through comparison with reference methods, including the gravimetric method and a commercial sensor (TEROS 10). Considering heteroscedasticity, Welch's one-way analysis of variance indicated no statistically significant differences in volumetric water content among the measurement methods ($p > 0.05$). Spatial analysis using QGIS enabled quantitative visualization of the spatial distributions of soil moisture and soil penetration resistance. The proposed monitoring system and soil information maps can serve as foundational data for understanding soil conditions in open-field agriculture.

■ **keywords** : Soil Mapping ; Open Field ; Soil Moisture Sensor ; Soil Compaction ; Geographic Information System (GIS)

1. 서론

1. 연구 배경

노지 농경지는 아스팔트나 콘크리트와 같이 규격화 된 노면과 달리, 토양 함수율, 토양강도, 입도 분포, 지형 기복 등 다양한 지반 특성이 복합적으로 작용하는 비정형 환경으로 구성된다. 이

* 준-정회원, 국립순천대학교 스마트농업공학과

** 정회원, 국립순천대학교 융합바이오시스템기계공학과

이 논문은 2025년도 교육부 및 전라남도의 재원으로 전라남도RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과임.(2025-RISE-14-003).

리한 토양 물리적 특성은 농작업 환경 전반에 영향을 미치는 주요 요인으로, 농작업 기계의 운용 효율, 작업 안정성, 토양 관리 전략 수립 등에 중요한 역할을 한다. 특히 토양 함수율과 토양강도는 토양의 지지력, 침하 가능성, 배수 특성 등을 직접적으로 반영하는 핵심 지표로서, 농경지 환경을 정량적으로 이해하기 위한 기초 정보로 활용되고 있다.

최근 농업 환경의 정밀한 이해와 효율적 관리를 목적으로, 토양 물리 특성이 농작업 기계의 주행 특성 및 작업 성능에 미치는 영향을 분석하려는 연구들이 다수 보고되고 있다. A. Lajunen(2024)는 농업 로봇을 대상으로 한 동력계 분석을 통해, 토양 종류, 함수율, 하중 조건에 따라 에너지 소비 특성이 크게 달라질 수 있음을 제시하였으며, 동일한 시스템이라도 토양 조건에 따라 운용 효율에 유의미한 차이가 발생함을 보고하였다[1]. 후속 연구에서는 휠 구동 방식, 무게 중심 배분, 작업 깊이 등의 요소가 토양과 휠의 상호작용에 따라 구동 저항과 미끄러짐률, 에너지 손실 특성에 직접적인 영향을 미친다는 점을 제시하였다[2].

Terramechanics 기반의 이론 연구 또한 토양 물성과 기계 시스템 간 상호작용의 중요성을 강조하고 있다. Z. jia(2012)는 압력과 침하 관계, 전단 응력, 접지면 형상과 같은 토양 역학적 요소들이 휠 기반 이동체의 추진력과 안정성, 조향 성능을 결정하는 핵심 메커니즘임을 정량적으로 설명하였다. 특히 불균일하거나 습윤한 토양 조건에서는 토양 물성이 시간에 따라 지속적으로 변화하므로, 지반 상태를 고려하지 않은 운용은 미끄러짐 증가나 침하와 같은 문제로 이어질 수 있음을 지적하였다[3].

유사한 경향은 케도형 이동체를 대상으로 한 연구에서도 확인된다. O.Rauf(2024)는 토양 함수율의 증가가 지반지지력 감소와 침하량 증가를 유발하며, 특정 조건에서는 이동체의 정상적인 기동이 제한될 수 있음을 보고하였다[4]. 이러한

결과는 토양 함수율과 강도와 같은 물리적 지표가 농작업 환경 해석에 있어 중요한 변수임을 시사한다.

한편, 실제 농경지 환경에서 토양 조건을 분류하거나 예측하려는 연구도 활발히 진행되고 있다. M. Noguchi(2014)는 SVM 기반 알고리즘을 활용하여 모래, 자갈, 초지 등 다양한 지형 유형을 분류함으로써, 토양 조건에 따른 작업 전략 선택 가능성을 제시하였다[5]. 또한 V.-D. Băjenaru(2025)는 온도, 수분, pH, EC, NPK 농도 등 다양한 토양 상태 정보를 장기적으로 수집하는 IoT 기반 멀티센서 플랫폼을 제안하며, 토양 상태의 시간적 변동성을 지속적으로 관측하는 시스템의 필요성을 강조하였다[6].

앞서 언급한 선행 연구들과 같이 농경지 환경을 정량적으로 이해하고 효율적으로 관리하기 위해 토양 함수율과 토양강도와 같은 토양 물리 정보를 현장에서 계측하고, 이를 공간적으로 해석하는 과정의 중요성을 공통적으로 제시하고 있다. 그러나 실제 노지 농경지 조건에서 적용할 수 있는 저비용 및 다지점 측정이 가능한 실시간 토양 계측 시스템과, 계측된 데이터를 공간적으로 분석하여 토양 정보 맵으로 구축한 연구 사례는 아직 제한적인 실정이다. 특히 토양 함수율과 토양강도를 함께 고려한 통합적 토양 정보 맵핑 연구는 충분히 축적되지 않았으며, 현장 적용을 고려한 실시간 토양 정보 모니터링 시스템에 대한 연구가 요구되고 있다.

2. 연구 목적

본 연구의 목적은 노지 농경지 환경에서 토양 함수율을 실시간으로 계측할 수 있는 토양 정보 모니터링 시스템을 구축하고, 계측된 토양 물리 정보를 공간적으로 해석하여 토양 정보 맵으로 표현하는 데 있다. 이를 위해 토양의 유전율 특성을 이용하는 FDR(Frequency Domain Reflectometry) 방식의 토양 함수율 센서를 라즈베리파이 기반 계측 시스템에 결합한 실시간 토

양 함수율 측정 모듈을 구성하고, 실험 대상지 내 다지점에서 토양 함수율 데이터를 수집하였다.

또한 동일 지점에서 토양강도를 추가적으로 측정하여 토양 함수율 데이터와 함께 공간적 분포 특성을 분석하였으며, 수집된 토양 함수율 데이터는 중량법 및 상용 센서 측정값과의 비교를 통해 통계적으로 검증하였다. 이를 통해 노지 환경에서 적용 가능한 실시간 토양 함수율 계측 시스템의 현장 적용성과 데이터 신뢰성을 확인하고, GIS 기반 공간 분석을 통해 토양 물리 특성의 공간적 이질성을 시각적으로 표현하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 실험 대상지

본 연구는 전라남도 순천시 상사면에 위치한 12 × 13 m 규모의 채소 재배 농경지에서 수행하였다. 실험 지점은 토양 함수율의 공간적 변동성을 분석하기 위하여 약 5 m 간격으로 총 18개 지점을 선정하여 배치하였다. 연구 대상지의 지표면 특성을 정밀하게 파악하기 위해 Mini 4 Pro(DJI, China) 모델을 활용해 고해상도 항공 촬영을 수행하였으며, 선정된 모델의 제원은 다음 표 1과 같고, 항공 촬영한 연구 대상지는 다음 그림 1과 같다.

표 1. DJI Mini 4 Pro 제원

Item	Specification
Weight	< 249 g
Max Flight Time	34 min (Standard)
Lens	24 mm eq., f/1.7
Photo / Video	48 MP / 4K up to 100 fps
Obstacle Sensing	Omnidirectional
Max Range	Up to 20 km (FCC)



그림 1. 18개 토양 측정 지점을 포함한 실험 대상지의 위성 및 UAV 영상 비교

2. 토양 함수율 측정 시스템 구성 및 제작
본 연구에서 구축한 토양 함수율 측정 시스템은 Raspberry Pi 4B(Raspberry Pi Foundation, UK) 모델을 중앙 제어 장치로 사용하였으며, 제원은 다음 표 2과 같다.

표 2. Raspberry Pi 4 모델 제원

Item	Specification
Processor	Broadcom BCM2711, Quad-core ARM Cortex-A72 (64-bit), 1.5 GHz
GPU	Broadcom VideoCore VI
Memory	2 GB / 4 GB / 8 GB LPDDR4 SDRAM
Options	
Storage	microSD card slot
Connectivity	Gigabit Ethernet, 2.4/5 GHz Wi-Fi, Bluetooth 5.0
USB Ports	USB 3.0 × 2, USB 2.0 × 2
Video Output	Dual micro-HDMI ports (up to 4K@60 Hz single display or 4K@30 Hz dual displays)
GPIO	40-pin GPIO header
Power Input	USB-C, 5 V = 3 A

토양 함수율 측정 센서로는 FDR 방식의 센서를 적용하였다. 이 방식은 토양의 유전율을 감지해 토양 함수율을 산출하는 구조로, 기존의 텐시오미터나 저항식 센서와 달리 반응 속도가 빠르고 유지 관리가 용이하며, 장기간 무인 관측에 적합하다는 장점이 있어 FDR Soil Moisture Sensor(Generic, China) 모델을 센서로 적용하였고, 센서의 모델의 제원은 다음 표 3과 같다. 센서 출력은 아날로그 형태로 송출되며 MCP3008(Microchip Technology, USA) 모델을 ADC 변환기로 사용해 디지털 신호로 변환하였

다. 해당 장치는 최대 8개의 채널 입력을 지원하여 토양 함수율 측정 시스템 한 세트당 6개의 FDR 방식의 토양 함수율 측정 센서로 구성하여, 총 3세트를 제작하였다. 이는 본 연구에서 요구된 다지점 및 동시 측정 조건을 충족시키는 중요한 요소였으며, 또한 외부 전력 인프라가 부족한 농경지의 환경 특성상 지속적인 전원 공급을 위해 보조 배터리를 사용하였고, 라즈베리파이가 소모하는 전력이 낮기 때문에 최대 36시간 독립 운영이 가능하도록 설계하였다.

표 3. FDR 토양 수분 센서 제원

Item	Specification
Measurement Principle	Frequency Domain Reflectometry
Measured Parameter	Relative Volumetric Water Content
Measurement Range	Relative (Dry to Saturated Soil)
Accuracy	Requires user calibration
Output Signal	Analog Voltage (~0 - 3.0V @ 5V VCC)
Power Supply	3.3 - 5.5 V DC
Current Consumption	< 15 mA
Response Time	< 1 s
Operating Temperature	-20 to +60 °C
Sensor Dimensions	Approx. 9.8 cm (L) × 2.3 cm (W)

또한 토양 함수율 측정 모듈은 실외 환경에서 장시간 운용되는 것을 고려하여 하드웨어적인 안정성을 확보하는 방향으로 제작하였다. 이를 위해 센서 본체와 전자부품을 보호하기 위한 전용 케이스를 제작하였으며, 케이스는 3D 모델링을 통해 설계한 후 Ender 3 등급의 FDM 방식 3D 프린터(Creality, China)를 이용하여 출력하였으며, 제작된 케이스는 외부 충격, 토양과의 접촉, 비산 먼지 등을 최소화하여 시스템이 실험 기간 동안 안정적으로 작동할 수 있도록 설계하였고, FDR 센서 케이블과 라즈베리파이 간 연결부는 습기나 강우에 직접 노출되는 부분으로 관통형 실리콘 실과 열수축 튜브를 이용해 다중 방수층을 형성하였다. 센서 커넥터 외부는 실리콘

수지로 코팅하여 미세 틈새로의 수분 침투를 방지하였으며, 라즈베리파이와 연결되는 배선 부는 열수축 튜브로 1차 밀폐한 뒤 방수 테이프를 이용해 2차 보호층을 형성하였다. 이러한 처리방식은 전기적 접촉 불량을 예방하고 토양 함수율이 높은 환경에서도 장비가 장기간 안정적으로 데이터 수집이 가능하도록 설계하였으며, 제작한 토양 함수율 측정 모듈은 다음 그림 2와 같다.

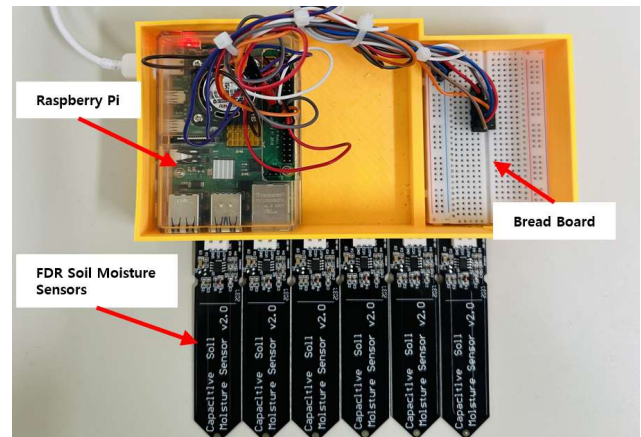


그림 2. Raspberry Pi 기반 토양 수분 측정 모듈

3. 토양 함수율 측정 센서 보정 및 비교 측정 유전율 기반 FDR(Frequency Domain Reflectometry) 방식의 토양 함수율 센서는 센서 출력 전압과 실제 체적 수분함량(Volumetric Water Content, VWC) 간의 관계가 토양 조건 및 수분 범위에 따라 비선형적으로 나타나는 특성을 가진다. 이러한 특성으로 인해 원시 센서 출력 신호를 그대로 활용할 경우, 토양 함수율 변화에 대한 응답의 일관성이 저하될 수 있다. 이에 본 연구에서는 노지 환경에서의 측정 일관성과 현장 적용성을 확보하기 위해 단계적인 보정 절차를 적용하였다. 본 보정 절차는 센서 출력 신호와 토양 함수율 간의 관계를 정량적으로 최적화하기 위한 것이 아니라, 기준 측정 방법과의 비교를 통해 현장 적용에 필요한 측정 일관성을 확보하는 데 목적이 있다.

먼저 실내 보정 실험을 위해 동일한 토양 시료를 대상으로 완전 건조 상태와 완전 포화 상태를

각각 조성하고, 해당 조건에서 제안된 토양 함수율 측정 모듈의 센서 출력 전압을 측정하여 기준점을 설정하였다. 실내 보정 결과, 센서 출력 전압과 토양 함수율 간의 관계는 전 수분 구간에서 선형적으로 나타나지 않았으며, 저수분 및 고수분 영역에서 비대칭적인 비선형 응답 특성이 관찰되었다. 이에 따라 본 연구에서는 유전율 기반 센서의 비선형 응답 특성을 고려하여, 경험적 보정 방법으로 3차 다항식 변환을 적용하였다. 해당 보정식은 식 (1)과 같다.

$$\theta_{raw} = aV^3 + bV^2 + cV + d \quad (1)$$

여기서 θ_{raw} 는 3차 다항식 변환을 통해 산출된 임시 체적 수분함량을 의미하며, V 는 센서 출력 전압, a, b, c, d 는 실내 보정 실험을 통해 산출된 보정 계수이다. 다항식 변환 이후에는 완전 건조 상태와 완전 포화 상태를 기준으로 출력 범위를 정규화하여, 토양 시료 조건에 따른 기준 범위 편차를 보정하였다. 범위 정규화 과정은 식 (2)와 같다.

$$\theta_{norm} = \frac{\theta_{raw} - \theta_{dry}}{\theta_{sat} - \theta_{dry}} \quad (2)$$

여기서 θ_{dry} 와 θ_{sat} 는 각각 완전 건조 상태와 완전 포화 상태에서 측정된 센서 출력값을 의미한다. 정규화된 값 θ_{norm} 은 후속 비교 분석을 위해 식 (3)과 같이 백분율(%) 형태의 체적 수분함량으로 변환하였다.

$$\theta_{VWC} = \theta_{norm} \times 100 \quad (3)$$

이후 실내 환경에서 동일한 토양 시료를 대상으로 상용 FDR 방식 토양 함수율 센서인 TEROS 10(METER, USA)으로 측정된 기준값과 제안된 측정 모듈의 보정 결과 간의 관계를

회귀 분석하여, 기준 센서와의 체계적인 차이를 보정하기 위한 선형 상관 보정식을 도출하였다. 해당 보정 식은 식 (4)와 같다.

$$\theta_{adj} = \alpha\theta_{VWC} + \beta \quad (4)$$

여기서 α 와 β 는 TEROS 10 측정값을 기준으로 도출된 회귀 계수를 의미하며, θ_{adj} 는 기준 센서 기반 상관 보정이 적용된 체적 수분함량 값이다. TEROS 10의 주요 제원은 표 4에 제시하였다.

표 4. TEROS 10 토양 함수율 센서 사양

Item	Specification
Measurement Principle	Frequency Domain Reflectometry
Measured Parameter	Relative Volumetric Water Content
Measurement Range	0 - 0.70 m ³ /m ³
Accuracy	±3% VWC
Output Signal	70 - 1200 mV
Power Supply	3.0 - 15 V DC
Current Consumption	< 10 mA
Response Time	< 10 ms
Operating Temperature	-20 to +60 °C
Sensor Dimensions	9.4 cm (L) × 1.8 cm (W)

현장 적용 시에는 토양 온도, 입도, 매설 깊이, 센서 삽입 상태 등 환경적 요인으로 인해 잔여 편차가 발생할 수 있으므로, 이를 보정하기 위해 현장 오프셋 보정을 추가로 수행하였다. 이를 위해 제안된 측정 모듈과 TEROS 10을 동일 지점의 지표면으로부터 약 10 cm 깊이에 매설하여 측정하였으며, 동일 지점에서의 평균 차이를 현장 오프셋 보정 항으로 정의하였다. 최종 체적 수분함량은 식 (5)와 같이 산출하였고, 이때 동일 지점에서 측정된 제안된 측정 모듈과 TEROS 10의 측정값 비교 결과는 그림 3에 제시하였으며, 이를 통해 현장 조건에서 두 측정값 간의 상대적 차이를 확인하였다.

$$\theta_{final} = \theta_{adj} + \Delta\theta_{site} \quad (5)$$

여기서 $\Delta\theta_{site}$ 는 동일 지점에서 측정된 TEROS 10과 제안된 측정 모듈 간 평균 차이를 기반으로 산출된 현장 오프셋 보정 항이다.

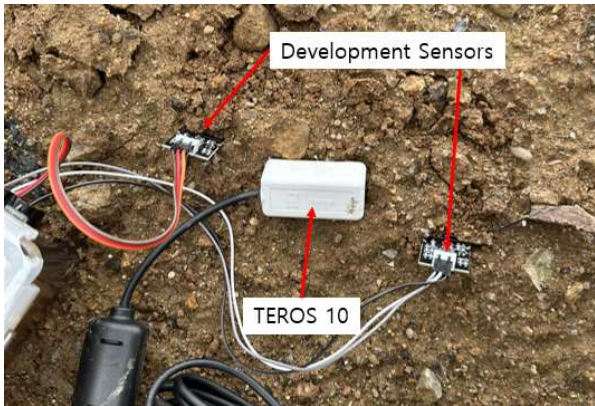


그림 3. 동일 지점에서의 Raspberry Pi 모듈과 TEROS 10 비교를 통한 정확도 검증

이러한 4단계 보정 절차는 센서의 고유한 비선형 응답 특성, 기준 범위 설정에 따른 편차, 기준 센서와의 체계적 차이, 그리고 현장 환경 요인에 의해 발생할 수 있는 잔여 편차를 각각 구분하여 고려하기 위해 구성되었다. 전체 보정 과정은 각 단계의 역할과 흐름을 명확히 하기 위해 그림 4와 같은 절차적 구조로 정리하였다.

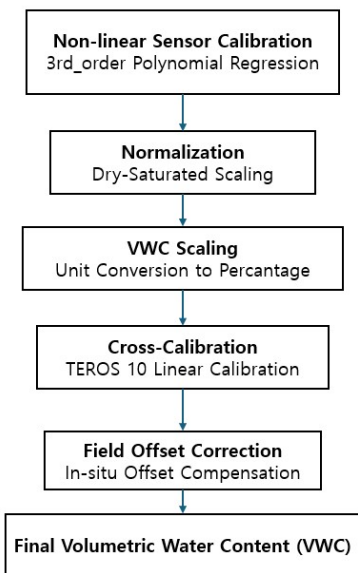


그림 4. 개발 시스템 모듈의 보정 절차 플로우

또한 동일 지점에서 채취한 토양 시료를 중량

법(gravimetric method)으로 분석하여 제안된 측정 모듈 및 TEROS 10의 측정값과 비교하였다. 중량법은 실측 기반의 기준값을 제공하므로, 이를 활용하여 제안된 측정 모듈의 측정 결과가 기준 방법과 통계적인 구분 여부를 확인하였고, 중량법에 의한 체적 수분함량은 식 (6)으로 계산하였다.

$$\theta_{grav} = \frac{W_{wet} - W_{dry}}{W_{dry}} \times \rho_b \quad (6)$$

여기서 M_w 는 습윤 토양 질량, M_d 는 건조 토양 질량, ρ_b 는 토양 체적밀도를 의미하며, 토양 시료는 105°C에서 24시간 건조했으며, 중량법 실험에 사용된 토양 시료의 건조 과정 및 무게 측정 절차는 그림 5에 제시하였다.



그림 5. 중량법 기반 시료 건조 및 무게 측정

4. 토성 분석

토양의 물리적 특성을 해석하기 위해 대상지에서 채취한 시료를 이용하여 입도분석을 수행하였다. 토성 분석은 미국 USDA의 토성 분류 체계에 따라 체 분석법을 적용하였다[7]. 시료는 먼저 자연 풍건 상태에서 균질화한 후 표준체 세트 (Chung Gye industrial, Republic of Korea)를 이용하여 아래 표 5를 기준으로 입자 크기별로 분류하였다.

표 5. USDA 기준 토양 입자 크기 분류표

Category	Particle Size
gravel	≥ 2mm
sand	0.05 ~ 2mm
silt	0.002~ 0.05mm
clay	≤ 0.002mm

5. 토양강도 측정

토양강도는 토양 내 입자 간 결합 정도 및 공극률을 반영하는 물리적 지표로, 토양 수분과의 상관성을 분석하기 위해 대상지 전 지점에서 측정을 수행하였다. 토양강도는 그림 6과 같이 SpotOn Digital Soil Compaction Meter(Spectrum Technologies, USA) 사용하여 관입 저항 방식으로 측정하였다.



그림 6. 원추 관입계를 이용한 토양 관입 저항 측정

측정 장비의 프로브는 일정한 속도로 토양에 수직 삽입되며, 삽입 깊이에 따른 관입 저항값(kPa)을 실시간으로 표시한다.

각 측정 지점에서는 동일한 깊이 조건 10 cm를 유지하여 데이터의 일관성을 확보하였다. 측정된 강도 값은 이후 토양수분 데이터와 결합하여 두 변수 간 상관성을 분석하는 데 활용되었으며, 특히 수분함량 증가 시 강도가 감소하는 일반적 토양 물성과의 일치 여부를 확인함으로써 개발 시스템 모듈 데이터의 신뢰성을 보완하는 참고 지표로 사용되었다[8]. 본 연구에서 사용된 원추 관입계의 제원은 다음 표 6과 같다.

표 6. 토양강도 측정을 위한 원추 관입계 제원

Item	Specification
Probe Length	30 in (76 cm)
Measurement Range	0 - 825 PSI (0 - 5690 kPa)
Cone Size	0.505 in (12.8 mm) Diameter / 30° Angle
Weight	1.9 lbs (0.6 kg)

6. SPSS를 활용한 통계 분석

개발된 토양 함수율 측정 시스템의 측정값이 TEROS 10 및 중량법과 통계적으로 유의한 차이가 존재하는지를 검증하기 위해 SPSS(IBM Corporation, USA)를 활용하여 통계 분석을 수행하였다. 분석에는 실험 대상지 18개 지점에서 동일 시간대에 측정된 세 가지 센서 데이터를 사용하였으며, 총 144개의 데이터셋을 구성하였다. 각 데이터는 센서 종류(sensor type)를 독립변수로 하고, 체적수분함량(VWC, %)을 종속변수로 설정하였다.

먼저, 세 집단 간 분산의 동질성을 확인하기 위해 Levene's Test를 수행하였다. 분산의 동질성 가정 충족 여부는 분산분석 결과의 신뢰성 및 적용 가능한 분석 방법 선택에 중요한 영향을 미치므로, 이를 사전에 검토하였다.

표 7. 등분산성 검정

Variable	Levene F	df1	df2	p
Volumetric water content (VWC)	16.711	2	141	< 0.001

Levene's Test 결과, 집단 간 분산의 동질성 가정이 충족되지 않은 것으로 나타나($p < 0.05$), 본 연구에서는 등분산성을 가정하지 않는 Welch의 일원배치 분산분석(Welch's ANOVA)을 적용하였다.

Welch's ANOVA를 통해 측정 방식에 따른 평균 체적 수분함량의 차이가 통계적으로 유의미한 차이가 있는지 검정하였으며, 유의수준은 $\alpha = 0.05$ 로 설정하였다. 집단 간 평균 차이의 발생 양상을 구체적으로 파악하기 위해 Games - Howell 사후검정을 수행 후, 분석 결과는 표 형

태로 정리하여 개발 시스템 모듈의 측정 정확성과 기존 기준 측정법과의 통계적 동등성을 검증하는 근거로 활용하였다[9].

이와 같은 SPSS 기반 통계 분석 절차는 개발 시스템 모듈의 보정 및 현장 적용 가능성을 평가하는 핵심적 방법론으로 활용되었다.

7. QGIS를 활용한 토양 함수율 및 토양강도 맵핑

본 연구에서는 센서 기반으로 수집된 토양수분 데이터와 현장에서 측정한 토양강도 데이터를 공간적으로 분석하기 위해 QGIS(QGIS.org Association, Switzerland) 3.34 버전을 활용하였다. 실험 대상지의 18개 측정 지점을 기준으로, 각 지점에서 획득된 토양 함수율, 토양강도의 측정값을 CSV 파일로 정리한 후, QGIS에서 공간 포인트 레이어로 변환하여 분석을 수행하였다.

실험 대상지의 공간 데이터는 국가 기준 좌표계(EPSG:5186)를 적용하여 정합성을 유지하였다. 토양수분 자료는 시간대별로 반복 측정된 데이터를 포함하고 있어, 각 측정 시점의 CSV 파일을 개별 포인트 레이어로 구성하였다. 이를 바탕으로 QGIS의 Temporal Controller 기능을 적용하여 시간 경과에 따른 토양 함수율의 공간 분포 변화를 확인하였으며, 실험 기간 동안 나타나는 토양수분의 시공간적 변동 양상을 단계적으로 분석하였다.

토양 함수율의 공간 분포 추정을 위해 Inverse Distance Weighted(IDW) 보간기법을 적용하였다. 본 연구에서는 거리 가중치의 영향을 반영하기 위해 Power 값을 2로 설정하였으며, 공간 해상도는 1 m 셀 크기를 기준으로 구성하였다. 또한 보간 과정에서는 각 지점 주변의 12개 이웃 점을 고려하였다. 생성된 보간 래스터는 실험 대상지 경계를 기준으로 클리핑하여, 분석 영역 내에서의 분포 특성만을 시각적으로 표현하였다.

토양강도 데이터는 시계열 구조를 갖지 않으므로 단일 시점의 공간 분포 분석을 수행하였다.

토양강도 측정값 또한 동일한 좌표계 기반의 포인트 레이어로 변환한 뒤, 토양 함수율 레이어와 동일한 IDW 방식으로 보간 기법을 적용하여 토양강도의 공간 분포도를 생성하였다.

8. 데이터 저장 및 전송

본 연구의 토양 함수율 측정 시스템은 라즈베리파이를 기반으로 수집된 측정값을 일정 주기로 저장하고 원격으로 전송할 수 있도록 구성하였다. 센서로부터 획득된 디지털 신호는 라즈베리파이에서 실행되는 Python 측정 스크립트를 통해 보정식이 적용된 후 최종 체적수분함량(VWC)으로 변환된다. 변환된 값은 10분 주기로 자동 기록되며, 기록된 데이터는 CSV 파일 형식으로 라즈베리파이 내부 저장장치에 누적 저장된다.

저장된 데이터는 Tailscale 기반의 VPN 환경을 통해 외부 네트워크에서도 안전하게 접근할 수 있도록 설정하였다.

이와 같은 구성에 따라 측정 모듈의 동작 상태와 데이터 수집 여부는 현장 방문 없이도 원격 환경에서 확인할 수 있었다. 수집된 데이터는 CSV 형식으로 저장되었으며, 이후 통계적 검증을 위한 SPSS 분석과 공간 분포 해석을 위한 QGIS 기반 분석에 활용하였다. 전체 데이터 수집 및 처리 과정의 흐름은 그림 7과 같다.

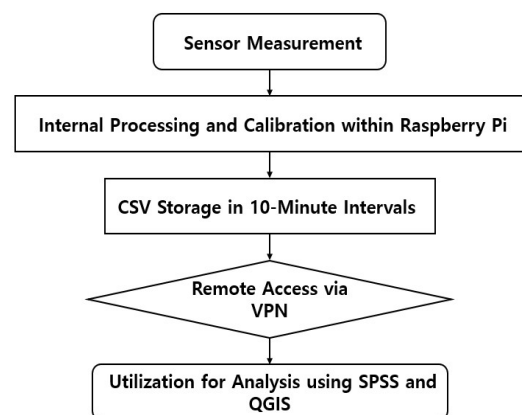


그림 7. 데이터 수집 및 처리 과정

III. 결과 및 고찰

1. 토성 분석 결과

실험 대상지에서 채취한 토양 시료에 대해 체 분석을 실시한 결과, 모래(Sand) 약 60%, 미사(Silt) 약 30%, 점토(Clay) 약 10%의 입도 분포를 나타냈다. 해당 시료는 USDA 토성 분류 기준에 따라 사양토(Sandy loam)로 분류되었다. 사양토는 상대적으로 공극 구조가 발달한 토양 유형으로, 수분 이동과 배수 특성이 비교적 빠르게 나타나는 경향이 있다. 이러한 특성으로 인해 본 연구 대상지에서는 토양수분 변화에 따른 센서 응답 특성을 관찰하기에 적절한 조건을 제공하는 것으로 판단된다.

2. 개발 시스템 모듈의 시계열 데이터 특성 분석

현장에서 측정된 개발 시스템 모듈의 시계열 토양 함수율 데이터는 배터리 교체 시간을 포함하여 약 36시간 동안로 수집되었으며, 측정값은 약 27 ~ 31% 범위에서 분포하였다. 실험 기간 동안 강우나 관개와 같은 외부 수분 유입 요인은 발생하지 않았고, 이에 따라 토양 함수율은 전반적으로 큰 변동 없이 완만한 변화 양상을 보였다. 이러한 결과는 비교적 일정한 환경 조건에서 센서 출력이 안정적으로 유지되고 있음을 시사한다. 18개 지점에 설치된 모듈의 시계열 측정 결과는 그림 8과 같다.

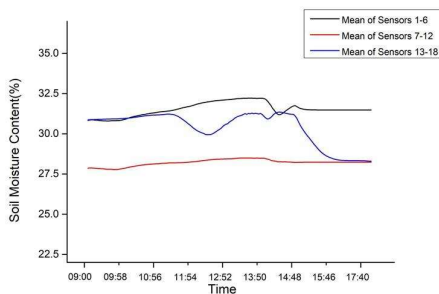


그림 8. 개발 시스템 모듈의 센서 그룹(1 - 6, 7 - 12, 13 - 18) 간 평균 토양 함수율 비교

각 측정 지점에서 수집된 토양 함수율 데이터는 시간 경과에 따라 급격한 변화 없이 유사한

패턴을 나타냈으며, 모든 지점의 값이 일정한 범위를 유지하고 있음이 확인되었다. 측정 지점 간 토양 함수율의 편차는 약 $\pm 3\%$ 수준으로 확인되었으며, 이는 동일한 토성 조건 내에서 발생할 수 있는 미세한 물리적 이질성이나 센서 설치 깊이의 차이를 고려할 때 합리적인 변동 범위로 판단된다. 해당 지점 간 비교 결과는 그림 9와 같다.

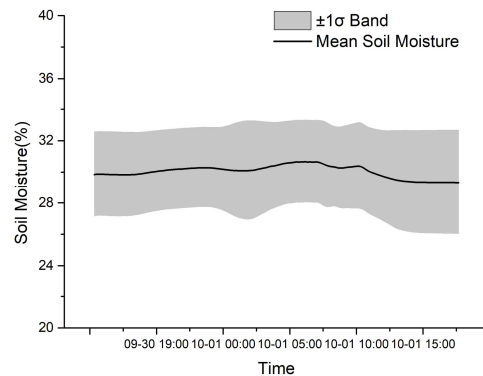


그림 9. 시간 경과에 따른 평균 토양 함수율 및 $\pm 1\sigma$ 변동성

이러한 경향은 개발 시스템 모듈의 장기간 연속 측정 환경에서 신뢰도 높은 시계열 데이터를 제공할 수 있음을 확인시켜 주는 것으로 판단되며, 특히 전력 공급, 방수 구조, 데이터 저장 절차 등이 야외 환경에서 안정적으로 유지되었음을 보여주며, 이는 개발한 토양 함수율 측정 시스템이 실측 환경에서도 충분한 내구성과 안정성을 확보한 것으로 판단된다.

3. 토양 함수율 시계열 비교 분석

그림 10은 개발 시스템 모듈의 평균값과 TEROS-10 센서 및 중량법으로 측정된 토양 함수율의 시간대별 평균값을 비교한 결과를 나타낸다. 세 가지 측정 방식은 동일한 시간대에서 유사한 경향을 보였으며, 측정 시점이 변화하더라도 함수율 값의 상대적 배열과 분포 범위는 안정적으로 유지되었다.

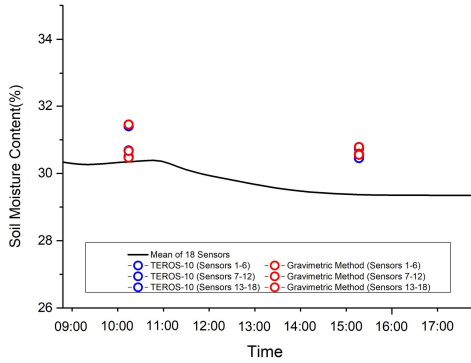


그림 10. 개발 시스템 모듈, TEROS 10 및 중량법으로 측정된 평균 토양 함수율의 시계열 비교

표 9에 제시된 바와 같이, 개발 시스템 모듈과 TEROS-10 및 중량법 간의 함수율 차이는 최소 0.13%, 최대 1.41% 범위로 나타났으며, 전 측정 기간 동안 비교적 작은 편차를 유지하였다. 이러한 시계열 비교 결과는 개발된 센서 모듈이 TEROS 10 및 중량법과 유사한 수준의 측정 정확도와 반응성을 나타내는 것으로 확인되었다.

표 9. 개발 시스템 모듈, TEROS 10 및 중량법에 의한 평균 토양 함수율 비교

Measurement Method	Sensor Group / Area	Soil Moisture Content (%)
Mean of 18 Sensors	Entire site	30.0 ± 0.4
TEROS-10	Sensors 1-6	31.1
TEROS-10	Sensors 7-12	30.5
TEROS-10	Sensors 13-18	30.6
Gravimetric Method	Point 1-6	31.1
Gravimetric Method	Point 7-12	30.5
Gravimetric Method	Point 13-18	30.6

4. 토양 함수율 측정 결과의 통계적 분석

기술통계 분석 결과, 중량법, TEROS-10, 그리고 개발 시스템 모듈을 이용하여 측정된 토양 체적수분함량의 평균값은 각각 28.2%, 28.7%, 29.2%로 나타나, 세 측정 방식 간 평균 수준은 전반적으로 유사한 범위를 보였다. 기술통계량 결과는 아래 표 10에 제시하였다.

표 10. 기술 통계량

Group	N	Mean(%)	Std. Deviation
Gravimetric method	54	28.2	1.10
TEROS-10	36	28.7	1.02
Developed system	54	29.2	3.99
Overall	144	28.7	2.60

개발 시스템 모듈은 다른 측정 방식에 비해 상대적으로 다양한 측정값 분포를 보였으며, 이는 측정 원리 및 설치 방식의 차이 등 여러 요인이 복합적으로 작용했을 가능성을 시사한다.

표 7의 등분산성 검정 결과를 고려하여, 본 연구에서는 등분산성을 가정하지 않는 Welch의 일원배치 분산분석을 적용하였다. 표 11의 Welch ANOVA 수행 결과, 측정 방식에 따른 토양 체적수분함량의 평균 차이는 통계적으로 유의한 수준에서 나타났다.

표 11. Welch ANOVA 결과표

Variable	F	df1	df2	p
Welch	3.335	2	85.993	0.040

Welch ANOVA 결과를 바탕으로, 측정 방식 간 평균 차이의 구체적인 양상을 확인하기 위해 Games - Howell 사후검정을 수행하였다. 표 12의 사후검정 결과, 중량법과 TEROS-10 그리고 개발 시스템 모듈의 센서 간 모든 쌍별 비교에서 유의확률은 0.05보다 크게 나타났으며, 95% 신뢰구간 또한 모두 0을 포함하였다. 이에 따라 개별 측정 방식 간 토양 체적수분 함량의 평균 차이는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다.

표 12. Games - Howell 사후검정 결과

Comparison (I-J)	Mean Difference (%)	Std. Error	p	95% CI Lower	95% CI Upper
Gravimetric method - TEROS-10	-0.497	0.227	0.079	-1.040	0.045
Gravimetric method - Developed system	-0.987	0.563	0.195	-2.341	0.367
TEROS-10- Developed system	-0.490	0.569	0.667	-1.857	0.877

이러한 결과는 세 측정 방식이 평균 토양 체적 수분함량 수준에서는 뚜렷한 차이를 보이지 않음을 의미하고, 개발 시스템 모듈이 기존 측정 방식과 비교하여 유사한 수준의 측정값을 도출함을 의미한다.

5. 토양 함수율의 공간 분포

QGIS를 활용한 IDW 보간 결과, 연구 대상지 내 토양 함수율은 최소 21.1%, 최대 33.4% 범위로 나타났으며, 일부 시점에서는 낮은 함수율 값이 관측되었다. 일부 낮은 지대에서는 함수율이 상대적으로 높게 나타났으며, 이는 지형적 영향 및 배수 특성에 기인한 자연스러운 현상으로 판단된다.

Temporal Controller를 적용하여 시계열 보간 영상을 구성한 결과에서도, 전체 측정 기간 동안 토양 함수율 분포가 크게 변하지 않았으며 이는 시계열 분석 결과와 동일한 해석을 지지한다.

즉 수분 변화가 적은 기간에서도 센서값은 안정적으로 유지되었으며, 토양 함수율의 공간적 보간 결과 또한 자연적인 토양 특성을 그대로 반영하고 있음을 확인할 수 있었으며, 공간분석 결과는 다음 그림 11과 같다.

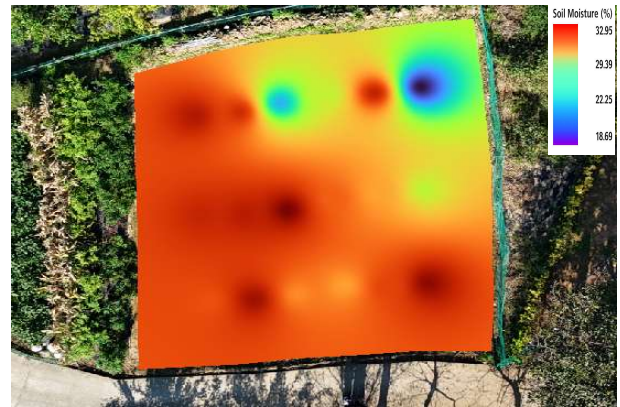


그림 11. QGIS기반 IDW 보간법을 이용한 토양 함수율 공간 분포 결과

6. 토양강도의 공간 분포 및 토양 함수율과의 상관성

원추 관입계를 이용해 측정한 토양강도 값은 평균 약 505 kPa 수준으로 나타났으며, 18개 측정 지점 간에는 약 ±75 kPa 범위의 차이를 보였다. 이를 기준으로 산정한 결과, 최소 토양강도는 약 430 kPa, 최대 토양강도는 약 580 kPa로 나타났다. 해당 토양강도 데이터에 대해 QGIS 환경에서 IDW 보간 기법을 적용한 결과, 강도 값은 공간적으로 일정한 분포 양상을 나타내지 않았으며, 일부 구역에서는 상대적으로 낮은 값이 분포하는 경향이 확인되었다. 특히 토양수분이 상대적으로 높게 나타난 영역에서는 토양강도가 낮게 분포하는 특징이 관찰되었으며, 이러한 공간 분포 결과는 그림 12와 같다.

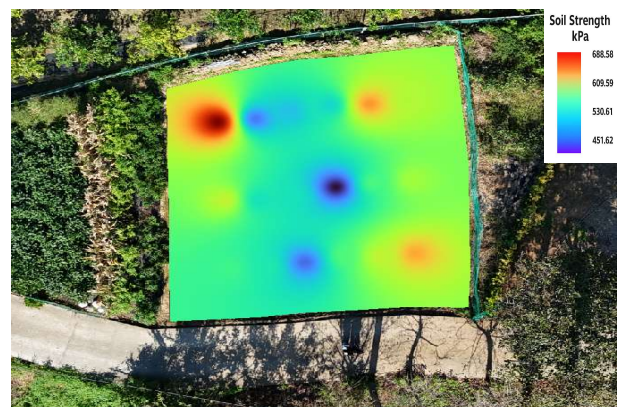


그림 12. QGIS-기반 IDW 보간법을 이용한 토양 강도 분포 결과

이와 같은 토양강도의 분포 특성은 토양 함수율 증가에 따라 입자 간 응집력이 감소하고, 공극 내 수분 충전으로 인해 압밀 저항이 저하되는 토양 물성 변화와 관련된 결과로 판단된다. 또한 개발 시스템 모듈을 통해 측정된 토양 함수율 데이터와 토양강도 데이터가 유사한 변화 경향을 보였다는 점은, 본 연구에서 개발한 토양 함수율 측정 시스템으로 계측한 함수율 정보가 현장 토양 상태를 적절히 반영하고 있음을 뒷받침한다.

IV 결론

본 연구는 노지 농경지 환경에서 토양 함수율과 토양강도와 같은 토양 물리 정보를 현장에서 계측하고, 이를 공간적으로 해석하기 위한 토양 정보 모니터링 및 맵핑 기법을 제시하였다. 이를 위해 상용 FDR 방식의 토양 함수율 센서를 라즈베리파이 기반 계측 시스템에 결합한 실시간 토양 함수율 측정 모듈을 구성하였으며, 동일 지점에서 토양강도를 추가적으로 측정하여 토양 물리 특성에 대한 공간 분석을 수행하였다.

토양 함수율 측정 결과를 중량법 및 TERSO 10 센서 측정값과 비교·분석한 결과, 세 측정 방식 간 체적 수분함량의 평균 차이는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 확인되었으며, 시계열 측정 결과 또한 안정적인 경향을 보였다. 이는 개발한 계측 시스템이 노지 환경에서 토양 함수율을 안정적으로 계측할 수 있다고 판단되며, 현장 적용 가능한 토양 정보 수집 수단으로 활용될 가능성을 시사한다. 또한 토양강도 데이터와 결합하여 QGIS 기반 공간 분석을 수행한 결과, 연구 대상지 내 토양 함수율과 토양강도의 공간적 분포를 지형 특성과 연관된 형태로 정량적·시각적으로 표현할 수 있었다.

이러한 결과를 통해 본 연구에서 구축한 토양 정보 맵은 노지 농경지의 토양 물리 특성을 직관적으로 파악할 수 있는 기초 자료로 사용될 수 있다고 사료 되며, 특히 토양 함수율과 토양강도의 공간적 변동성은 농경지 내 토양 상태의 이질

성을 이해하는 데 유용한 정보를 제공하며, 향후 스마트 농업 시스템, 농작업 기계 운용, 농업용 주행 로봇 등 다양한 분야에서 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 단일 토양 유형과 제한된 지형 조건을 대상으로 수행되었으므로, 향후에는 점토질·사질·자갈 혼합층 등 다양한 토양 조건과 강우·관개 변화, 경사 지형을 포함한 환경에서의 추가 검증이 필요하다. 또한 장기 계측 데이터 축적과 무선 통신 기반 센서 네트워크 확장을 통해 보다 넓은 농경지 규모에서의 토양 정보 모니터링 및 맵핑으로 확장될 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] K. Kivekäs, A. Lajunen, "Effect of soil properties and powertrain configuration on the energy consumption of wheeled electric agricultural robots," *Energies*, vol. 17, no. 4, art. 966, 2024.
- [2] A. Lajunen, K. Kivekäs, "Energy consumption modeling of autonomous electric agricultural robots," *Energies*, vol. 17, no. 2, art. 285, 2024.
- [3] Z. Jia, W. Smith, and H. Peng, "Terramechanics-based wheel-terrain interaction model and its applications to off-road wheeled mobile robots," *Robotica*, vol. 30, pp. 491-503, 2012.
- [4] O. Rauf, Y. Ning, C. Ming, and M. Haoxiang, "Evaluation of ground pressure, bearing capacity, and sinkage in rigid-flexible tracked vehicles on characterized terrain in laboratory conditions," *Sensors*, vol. 24, art. 1779, 2024.
- [5] M. Noguchi, K. Ishii, and T. Watanabe, "Terrain classification for track-driven agricultural robots," *Procedia Technology*, vol. 17, pp. 108-115, 2014.
- [6] V.-D. Băjenaru, S.-E. Istrateanu, and P.-N. Ancuta, "Autonomous, multisensory soil monitoring system," *AgriEngineering*, vol. 7, no. 1, art. 18, 2025.
- [7] United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, *Keys to Soil Taxonomy*, 13th ed., USDA-NRCS, 2022.
- [8] Klonowski, J., Lisowski, A., Dąbrowska, M., Chlebowski, J., Sypuła, M., and Zychowicz, W., "The usefulness of soil penetration resistance measurements for improving the efficiency of

cultivation technologies,” *Sustainability*, vol. 16, no. 16, art. 6962, 2024.

[9] Juarros-Basterretxea J., Aonso-Diego G., Postigo Á., Montes-Álvarez P., Menéndez-Aller Á., García-Cueto E., “Post-hoc tests in one-way ANOVA: The case for normal distribution,” *Methodology*, vol. 20, no. 2, pp. 84 - 99, 2024.

저 자 소 개



서승용(준회원)
 2025년 ~ 국립순천대학교 융합바이오
 시스템기계공학과 학·석사 연
 계 과정
 2026년 ~ 현재 국립순천대학교 스마
 트농업공학과 석사과정

<주관심분야 : 인공지능, 농업로봇, 자율주행 트랙터,>



정승진(준회원)
 2025년 ~ 국립순천대학교 융합바이오
 시스템기계공학과 학부 과정
 2026년 ~ 현재 국립순천대학교 스마
 트농업공학과 석사과정

<주관심분야 : 인공지능, 농업기계, 농업로봇, 스마트
 농업>



김승아(준회원)
 2025년 ~ 국립순천대학교 융합바이오
 시스템기계공학과 학부 과정
 재학
 2026년 ~ 현재 국립순천대학교 스마
 트농업공학과 석사과정

<주관심분야 : 인공지능, 스마트농업, 농업로봇>



박기동(정회원)
 2012년 국립순천대학교 산업기계공
 학과 학사 졸업
 2014년 국립순천대학교 농업기계공
 학과 석사 졸업
 2022년 ~ 현재 국립순천대학교 산학
 협력단 연구원
 2025년 ~ 현재 국립순천대학교 스마
 트농업공학과 박사과정

<주관심분야 : 자율주행 트랙터, 디지털트윈, 농업로
 봇>



임류갑(정회원)
 2008년 국립순천대학교 생물산업기
 계공학과 학사 졸업.
 2016년 성균관대학교 바이오메카트
 로닉스학과 석사 졸업.
 2022년 충남대학교 바이오시스템기
 계공학과 박사 졸업.
 2022 ~ 2024 한국농업기술진흥원 스
 마트농업본부 혁신밸리실증팀장
 2024 ~ 현재 국립순천대학교 융합바이오시스템기계공
 학과 조교수

<주관심분야 : 자율주행 트랙터, 디지털트윈, 농업로
 봇>