JKSCI

한국컴퓨터정보학회논문지
Journal of The Korea Society of Computer and Information
Vol. 31 No. 11, pp. 257-272, November 2026
https://doi.org/10.9708/jksci.2026.31.11.257

Layered Analysis of Korean National Standards for Plug-and-Play Interoperability in Smart Greenhouses

Byeongbeom Kang*, Hyeok Ki**, Cheolwoo Han***, Donghyeon Kang****

*Senior Researcher, Jeonbuk Technopark, Jeonju, Korea
**Researcher, Korea Agriculture Technology Promotion Agency (KOAT), Iksan, Korea
***Professor, Department of Agricultural Bio-System, Korea Polytechnic Colleges Jeonbuk Campus, Gimje, Korea
****Professor, Department of General Education, Korea National University of Agriculture and Fisheries, Jeonju, Korea

[Abstract]

The rapid expansion of smart agriculture has led to the widespread deployment of Information and Communication Technology sensors and actuators in greenhouses, but the lack of interoperability across manufacturers hinders system scalability and maintenance. This paper is a standards analysis and conceptual architecture study without experimental evaluation. Ten Korean national and industrial standards related to plug-and-play (P&P) in smart greenhouses are analyzed; five P&P conditions — attachment without modification, configuration-free commissioning, automatic device identification, automatic register-map derivation, and semantic continuity of data — are derived from their requirements; the standards are then reconstructed into physical/hardware, communication, metadata, and application layers, and the standards applicable to each interface among devices, nodes, the integrated controller, and the platform are classified. The analysis shows that the normative references between layers are specified in the standards themselves and that the device auto-registration procedure requires a specification repository. However, because no nationally accredited repository has been made available to date and current certification and deployment requirements cover only the physical and communication standards, integrated controllers rely on the default register map, and P&P is realized only up to the communication layer. On this basis, two field scenarios are compared against the five conditions, and improvement tasks are presented in order of priority, with establishment of the repository as the first task.

▸ **Key words**: Smart Farm, Plug-and-Play, Interoperability, Metadata, National Standards

• First Author: Byeongbeom Kang, Corresponding Author: Cheolwoo Han, Donghyeon Kang
*Byeongbeom Kang (bbk211030@gmail.com), Jeonbuk Technopark
**Hyeok Ki (hyukkki@koat.or.kr), Korea Agriculture Technology Promotion Agency (KOAT)
***Cheolwoo Han (hcw7@kopo.ac.kr), Department of Agricultural Bio-System, Korea Polytechnic Colleges Jeonbuk Campus
****Donghyeon Kang (kang6906@korea.kr), Department of General Education, Korea National University of Agriculture and Fisheries
• Received: 2026. 07. 13, Revised: 2026. 11. 04, Accepted: 2026. 11. 05.

Copyright © 2026 The Korea Society of Computer and Information
http://www.ksci.re.kr pISSN:1598-849X | eISSN:2383-9945
www.kci.go.kr

[요 약]

최근 스마트 농업이 빠르게 확산되면서 온실 내에는 다양한 정보통신기술 기반의 센서와 구동기가 널리 보급되고 있으나, 제조사 간 상호운용성 부족은 시스템 확장과 유지보수를 제약하고 있다. 본 논문은 실험을 수반하지 않는 표준 분석 및 개념적 아키텍처 연구로, 스마트 온실 플러그 앤 플레이(P&P)와 관련된 국가표준 및 산업표준 10건을 분석하여 그 요구사항으로부터 무개조 연결, 무설정 설치, 장치 자동 식별, 레지스터 맵 자동 산출, 데이터 의미의 연속성의 다섯 가지 조건을 도출한 후, 표준을 물리·하드웨어, 통신, 메타데이터, 응용의 4계층으로 재구성하고 장치·노드·통합제어기·플랫폼 간 각 인터페이스에 적용되는 표준을 분류하였다. 연구 결과, 계층 간 인용 관계는 표준 자체에 규정되어 있으며, 장치 자동 등록 절차는 규격 저장소를 필요로 함을 확인하였다. 그러나 현재까지 공개된 공인 규격 저장소가 없고 현행 검정 및 보급사업 요건이 물리·통신 계층의 표준만을 대상으로 함에 따라, 통합제어기는 디폴트 레지스터 맵에 의존하게 되며 P&P는 통신 계층까지만 실현되어 있다. 이를 바탕으로 두 가지 현장 시나리오를 다섯 조건과 대조하고, 규격 저장소 구축을 첫 번째 과제로 하는 개선 과제의 우선순위를 제시하였다.

▸ **주제어**: 스마트팜, 플러그 앤 플레이, 상호운용성, 메타데이터, 국가 표준

I. Introduction

최근 기후 변화로 인한 기상 이변과 농촌 인구의 급격한 고령화는 전통적인 노지 재배 중심의 농업 생산성을 저하시키는 요인이 되고 있다[1]. 이에 대한 해결책으로 통제된 환경에서 작물의 생육에 필요한 빛, 온도, 습도, 양분 등을 최적으로 공급하여 연중 안정적인 생산이 가능한 시설원예 스마트팜이 빠르게 확산되고 있다. 국내 시설원예 스마트팜은 정부의 보급 사업과 스마트팜 혁신밸리 조성 등의 정책적 지원을 통해 보급 규모가 확대되었으며[2], 이제는 정보통신기술과 인공지능을 결합한 지능형 모델로의 질적 고도화를 도모하고 있다.

그러나 스마트 온실의 고도화에 선행되어야 할 요건은 농기자재 간 상호운용성이다. 현재 보급된 다수의 스마트 온실은 서로 다른 제조사에서 생산된 환경 센서, 제어기, 개폐기 및 관수 밸브 등의 구동기, 그리고 양액공급기 등이 혼재되어 운영되고 있다[3]. 기기 간 통신 프로토콜과 물리적 연결 규격이 제조사마다 달라, 특정 제조사의 제어기에 타사의 센서나 구동기를 별도의 설정 없이 연결하여 사용하는 플러그 앤 플레이(Plug-and-Play, 이하 P&P)가 이루어지지 않는

Table 1. Purpose and Description by Standard Category

Category	Purpose and Description
Hardware & Communication Standards	Unification of physical interfaces and communication protocols (e.g., RS-485) for sensors and actuators
	KS X 3265 (2018/2022), 3266 (2018/2022) (interface), KS X 3267 (2018/2022), 3288 (2022) (RS-485 Modbus), KS B 7958 (2024) (Modbus TCP)
Device Registration & Metadata Standards	Standardization of data attributes and device registration processes for interoperability among heterogeneous devices
	KS X 3268 (2018/2022), 3269 (2018/2022) (metadata), KS X 3286 (2022) (registration)
Equipment-specific Standards	Requirements and control/data collection information of specific equipment; nutrient solution suppliers within the scope of this paper
	KS B 7952 (2022), 7955 (2022)
Growth & Common Collection Data	Quantification of crop growth status and farming information for integration with environmental data
	SPS-X KOAT-0009-7470, SPS-X KOAT-0006-7468
Agricultural Robot Standards	Terminology, safety guidelines, and performance test methods for autonomous greenhouse robots
	SPS-B KOAT 0031-7595, TTAK.KO-10.1587

www.kci.go.kr

다. 이는 농가의 시스템 유지보수 비용을 증가시키고, 설비 확장과 부품 교체를 특정 제조사에 종속시킨다.

상호운용성의 부재는 데이터의 비일관성으로 이어진다. 스마트팜의 목표는 온실 내 환경 데이터와 작물의 생육 데이터를 수집·분석하여, AI 기반의 최적 생육 알고리즘을 도출하고 이를 통해 자율 제어를 실현하는 것이다. 그러나 규격화되지 않은 센서와 제어기를 통해 수집된 데이터는 그 형식과 단위, 측정 기준이 서로 다른 문제점이 있어, 양질의 농업 빅데이터로 활용하기 어렵다[4]. 따라서 데이터의 형식과 의미가 일관되지 않으면 농가 맞춤형 융합 서비스를 제공하기 어렵다.

2022년부터 농촌진흥청 주관하에 한국농업기술진흥원은 이러한 P&P 제약 및 데이터 비일관성 문제를 해결하기 위한 표준개발협력기관으로 지정되어 다수의 스마트팜 관련 국가표준(Korean Industrial Standards, KS) 및 단체표준을 제정·운영함과 동시에, 「농업기계화 촉진법」에 따른 검정과 스마트팜 ICT 기자재 국가표준 확산 지원사업을 통해 농산업체가 기존의 비표준 기자재를 표준 규격에 맞게 개선하고 검정을 받도록 지원하고 있다[5]. 센서·구동기와 그 노드에 대한 검정 및 농가 보급사업[6]의 설치 요건은 KS X 3265, 3266, 3267을 대상으로 한다[7]. 그 결과 표준에 적합한 기자재가 출시되어 있으나, 2025년 ICT 시설 도입 지원 3,572건에 비해 표준 적용 기자재의 농가 실증은 누적 159호이며, 기자재 간 규격 불일치로 인한 유지보수의 어려움은 정부 계획에서 여전히 현황으로 기술되고 있다[5]. 표준 체계가 규정하는 P&P가 현장에서 어디까지 실현되어 있는지는 분석된 바 없다.

본 논문은 P&P와 관련된 국가표준 및 산업표준 10건 — 하드웨어 인터페이스(KS X 3265, 3266)[8][9], 통신 프로토콜(KS X 3267, 3288, KS B 7958)[10][11][12], 기기 메타데이터(KS X 3268, 3269)[13][14], 디바이스 등록 절차(KS X 3286)[15], 양액공급기 표준(KS B 7952, 7955)[16][17]을 계층적 관점에서 분석하여, 표준 체계가 규정하는 P&P가 현장에서 어디까지 실현되어 있는지와 그 원인을 표준의 규정과 적용 범위에서 밝힌다. 본 논문은 표준 분석 및 개념적 아키텍처 연구이며, 실험을 수반하지 않는다.

II. Preliminaries

2.1 Trends in Domestic Standardization

국내 시설원예 스마트팜의 P&P 실현과 고품질 데이터 확보를 위해 국가기술표준원의 국가표준, 한국농업기술진흥원 단체표준, 한국정보통신기술협회의 단체표준 등은 다양한 기기와 데이터 영역에 걸쳐 표준화를 추진하고 있다. 본 논문은 이러한 국내 표준화 동향을 종합적으로 파악하기 위해, 관련 주요 표준들을 하드웨어·통신, 디바이스 등록·메타데이터, 기자재별 표준, 생육·공통 수집 데이터, 농업용 로봇의 5가지 범주로 분류하였다(표 1). 첫째, '하드웨어 및 통신 규격' 영역은 다양한 제조사의 센서와 구동기가 통합제어기와 물리적으로 연결되고 데이터를 교환할 수 있도록 RS-485 모드버스 등의 통신 프로토콜(KS X 3267, 3288, KS B 7958)과 기계적, 전기적 인터페이스를 통일하는 표준(KS X 3265, 3266)을 포함한다. 둘째, '디바이스 등록 및 메타데이터' 영역은 네트워크에 연결된 이기종 장비들이 서로의 정보를 자동으로 식별하는 디바이스 등록 절차(KS X 3286)와 각 기기가 생성하는 데이터의 속성을 규격화하는 메타데이터 표준(KS X 3268, 3269)으로 구성된다. 이 두 영역의 표준이 P&P를 규정한다. 셋째, '기자재별 표준' 영역은 특정 기자재의 일반 요구사항과 제어·수집 정보를 규정하는 표준으로, 본 논문의 범위에서는 양액공급기 표준(KS B 7952, 7955)이 이에 해당한다. 넷째, '생육 및 공통 수집 데이터' 영역은 기기 제어와 별도로, 수집되는 환경 정보와 작물의 생육 상태, 영농 정보 등을 융합·분석할 수 있도록 데이터 엘리먼트 구조를 통일한 표준(SPS-X KOAT-0009-7470, SPS-X KOAT-0006-7468)[18][19]을 다룬다. 마지막으로 '농업용 로봇' 영역은 자율주행, 수확 로봇 등의 구조적 안전성 및 성능 시험 기준(SPS-B KOAT 0031-7595, TTAK.KO-10.1587)[20][21]을 규정한다.

2.2 Related Work and Position of the Korean Standards

국제표준에서의 P&P는 장치가 식별 정보와 규격을 상위 장치에 스스로 제공하는 기능(self-identification, self-description)을 통해 구현된다. ISO/IEC/IEEE 21451(구 IEEE 1451)은 센서·구동기가 제조사, 종류, 측정 범위, 데이터 형식 등을 담은 변환기 전자 데이터 시트(Transducer Electronic Data Sheet, TEDS)를 보유하고, 네트워크 응용 프로세서(Network Capable Application Processor, NCAP)가 이를 읽어 장치를 식별하고 데이터를 해석하도록 규정한다[22][23]. 농업 분야에서는 ISO 11783(ISOBUS)이 트랙터와 작업기 간 P&P를 물리 계층(Controller Area Network, CAN)부터 응용 메시지·태스크 컨트롤러까지 계층별로 규정하고, 농업산업전자재단(Agricultural Industry Electronics Foundation,

www.kci.go.kr

Table 2. Five P&P conditions derived from the standards

Cond.	Condition	Definition	Normative basis (standard, clause)
C1	Attachment without modification	A device can be physically attached to a node or directly to the integrated controller, and a node to the integrated controller, without modifying either	KS X 3266 4.1-4.2, Table 2; KS X 3265 4.1-4.3, Table 2; KS X 3267 Clause 4, Table 1 (connector, RS-485, Modbus RTU, address range)
C2	Configuration-free commissioning	After attachment, the integrated controller starts communicating with the node without manual configuration other than presetting the node address	KS X 3267 5.1.2, Annex A (default register map), 6.1.1 (node information at fixed addresses 1-8); KS X 3288 6.1.1, Annex A
C3	Automatic device identification	The integrated controller identifies the type, manufacturer, and model of a node and its attached devices via communication	KS X 3286 5.1 a), 7.1 (node information), 7.3 (device codes); KS X 3267 6.1.1
C4	Automatic register-map derivation	The integrated controller derives the register map from the node/device specifications	KS X 3286 7.2, 7.4 (specification acquisition), Clause 8 (register-map calculation); KS X 3267 5.1.1; KS B 7958 5.2
C5	Semantic continuity of data	The unit, range, and type of a value generated by a device are preserved up to the integrated controller and the platform	KS X 3286 9.1.3 (ValueUnit, ValueRange, ValueType); KS X 3269 Clause 5; KS X 3268 Clause 5*; KS X 3267 6.2 (referencing KS X 3269); KS B 7955 Annex A

AEF)의 적합성 시험을 통해 제조사 간 호환을 확인한다[24][25]. 두 표준은 모두 장치가 자신의 규격을 기계 판독이 가능한 형태로 제공하고 상위 장치가 이를 취득하는 절차로 P&P를 구현하며, 이는 KS X 3286의 노드·디바이스 규격 파일과 자동 등록 절차에 대응한다. IoT 참조 아키텍처 ISO/IEC 30141은 이러한 장치 계층을 포함한 전체 시스템의 계층 구조와 상호운용성 요구사항을 정의하며[26], 온실 분야에서는 IoT 기반의 다중 온실 관리 아키텍처가 제안되어 있다[27].

범용 IoT 표준은 이와 다른 층위에서 상호운용성을 다룬다. OPC UA(IEC 62541)는 정보 모델과 서비스를 통해 장치 데이터의 의미를 기술하고[28], MQTT(ISO/IEC 20922)는 발행-구독 방식의 경량 메시지 전송을 규정하며[29], oneM2M과 FIWARE의 NGSI-LD는 플랫폼 계층에서 장치 데이터를 공통 자원·엔터티 모델로 관리한다[30][31]. 이들 표준은 특정 도메인 기자재의 커넥터·전기 규격이나 레지스터 수준의 등록 절차를 규정하지 않는다. 이에 비해 국내 KS 체계는 시설원예 기자재에 대해 물리 연결부터 통신, 메타데이터, 등록 절차까지를 인용 관계로 연결하여 규정한다는 장점이 있으나, ISOBUS와 달리 노드 주소를 자동으로 할당하는 절차가 없고 국제 표준과의 공식 매핑 규격이 없다는 한계가 있다. 국내 메타데이터 표준을 OPC UA·MQTT와 연계하는 방안은 4.4절에서 다룬다.

국내 연구는 크게 세 가지 주제로 진행되었다. 농업 분야의 ICT 융합 기술 동향과 노지·시설원예·축산 분야의 스마트팜 적용 사례, 표준화 과제는 선행 연구에서 정리되었고[1-4], 표준 개발로는 농업기술실용화재단(현 한국농업기술진흥원)이 스마트팜 ICT 기기 표준의 확대·고도화 연구를 통해 KS X 3265·3266 개정안과 양액공급기 인터페이스 국가표준안을 개발하였으며[32], 적합성 시험으로는 KS X 3266에 근거한 농업용 풍향·풍속 센서의 검정 시스템[33]과 온실 통합제어기의 표준 적합성 판정 방법론[34]이 제안되었다. 국제 동향으로는 이기종 IoT 장치 통합을 위한 미들웨어 및 마이크로서비스 기반 아키텍처가 제안되고 있으나[35], 이들은 프로토콜 변환으로 이기종을 수용하는 접근이어서 표준 기반 P&P와는 구별된다.

기존 연구는 표준화 동향 정리, 개별 표준의 개발, 특정 표준에 대한 적합성 시험을 다루었다. 국내 표준 체계 전체를 P&P의 조건을 기준으로 계층별로 분석하고, 표준의 규정과 검정·보급 요건의 적용 범위를 대조하여 P&P가 어느 계층까지 실현되어 있는지를 밝힌 연구는 확인되지 않는다.

2.3 Research Method

분석 대상은 다음 세 기준을 모두 충족하는 표준으로 하였다. 첫째, 시설원예 스마트 온실을 적용 범위로 한다. 둘째, 장치, 노드, 온실 통합제어기, 플랫폼 사이의 인터페이스 중 적어도 하나를 규정한다. 셋째, 국가표준(KS)이거나 국가표준이 인용하는 단체표준이다. 이 기준에 따라 KS X 3265, 3266, 3267, 3268, 3269, 3286, 3288과 KS B 7952, 7955, 7958의 10건을 선정하였다. 생육·공통 수집 데이터 표준과 농업용 로봇 표준은 둘째 기준을 충족하지 않으므로 제외하였다.

www.kci.go.kr

Table 3. Comparison of Physical Layer Interface Standards

Item	KS X 3265 (Actuator)	KS X 3266 (Sensor)
Target devices	9 types of actuators	13 types of sensors
Connection terminal	Terminal block (mandatory)	M13 4-pin circular connector (mandatory)
Wiring / pin scheme	Color-coded power lines (2/3/4-wire)	Pin-numbered order (2/3/4-wire)
Supply voltage	Pilot DC 5/12/24 V Power DC 5/12/24/48 V, AC 220/380 V	DC 5/12/24 V
Signal / operation	Open-close type (FWD/OFF/REV) Switch type (ON/OFF)	Analog 1-5 V (rain sensor: contact output)
Revision direction (2022)	Unification of specs (single terminal type)	Unification of specs (single connector type)

분석에는 각 표준의 최신판(KS X 3265~3288 및 KS B 7955: 2022년판, KS B 7958: 2024년판)과, 적용 범위 분석을 위한 스마트팜 ICT 기자재 국가표준 확산 지원사업의 적용표준 체계[7], 농림축산식품부 스마트팜 ICT 융복합확산사업 시행지침[6], 2026년 스마트농업 육성 시행계획[5]을 사용하였다. 분석은 네 단계로 수행하였다. 첫째, 10건의 표준에서 P&P를 위해 규정된 요구사항을 추출하고, 이를 다섯 조건으로 정리하였다(표 2). 각 조건은 표 2에 제시한 표준의 규정 절에 근거한다. 둘째, 다섯 조건을 기준으로 10건의 표준을 물리·하드웨어, 통신, 메타데이터, 응용의 4계층으로 재구성하고, 장치-통합제어기(직접 연결), 노드-통합제어기, 통합제어기-플랫폼의 각 인터페이스에 적용되는 표준을 계층별로 분류하였다(III장). 이때 표준 간 인용 관계는 각 표준의 인용표준 절과 본문의 인용 문장으로 확인하였다. 셋째, 타사 센서 노드 교체와 레벨 3 양액기 증설의 두 현장 시나리오를 다섯 조건과 대조하여 충족되지 않는 조건을 확인하였다(4.3). 넷째, 검정 및 보급사업 요건의 대상 표준을 계층별 분류와 대조하여 조건이 충족되지 않는 원인을 표준의 적용 범위에서 분석하였다(4.4).

III. Layered Analysis of National Standards for Interoperability

본 장에서는 2.3에서 선정한 10건의 표준을 다섯 조건(C1~C5)을 기준으로 물리·하드웨어 계층, 통신 계층, 메타데이터 계층, 응용 계층의 4개 계층으로 재구성하여 분석한다. 이 계층 구분은 이기종 장비의 연동이 물리적 연결, 데이터 전송, 의미 해석, 도메인 응용의 순서로 이루어진다는 점에 따른 것이며, 각 계층의 표준은 인접 계층의 표준을 인용 관계로 참조한다.

3.1 Physical/Hardware Layer: Mechanical and Electrical Interfaces

3.1.1 Actuator Interface (KS X 3265)

KS X 3265는 스마트 온실에서 사용되는 구동기 9종(천창, 측창, 보온 커튼, 차광막, 환풍기, 유동팬, 관수모터, 관수밸브, 냉난방기)의 기계적·전기적 연결 규격과 작동 방식을 규정한다. 2018년 최초 제정 시에는 선택 규격이 많아 표준으로서의 역할이 제한적이었으나, 2022년 1차 개정을 통해 접속 단자를 터미널 단자로 단일화하고 계전기 형식 항목을 삭제하는 등 단일 규격 체계로 정비되었다. KS X 3265:2022의 해설에 따르면, 이 개정은 국가표준 적용 지원사업 과정에서 참여기업 및 이해관계인과의 논의를 거쳐 단일 규격을 도출한 결과이다[8]. 동 표준의 주요 규정은 다음 세 가지이다. 첫째, 기계적 연결에서 접속 단자는 터미널 단자로 강제하고, 동력선 식별은 KS C IEC 60227-1에 따라 2선식(직류: 갈색 +, 청색 −), 3선식(교류: 갈색, 청색, 녹색), 4선식(교류: 갈색, 청색, 녹색, 흑색)의 색상 체계를 규정한다. 둘째, 전기적 연결에서 파일럿 신호 전원은 DC 5/12/24 V 중 선택하며, 동력선 전원은 직류 DC 5/12/24/48 V 또는 교류 AC 220 V 단상·삼상, 380 V 삼상까지 허용한다. 셋째, 작동 방식은 구동기의 물리적 특성에 따라 이원화되어, 개폐 동작이 필요한 천창·측창·보온커튼·차광막 4종은 '정방향/OFF/역방향'의 스위치 작동방향 제어를, 환풍기·유동팬·관수모터·관수밸브·냉난방기 5종은 'ON/OFF'의 스위치 작동모드 제어를 강제사항으로 규정한다. 이 세 가지의 규정은 구동기에 대한 C1 조건이며, 작동 방식의 이분법(개폐형/스위치형)은 후술할 구동기 메타데이터(KS X 3268)의 디바이스 유형 분류와 통신 프로토콜(KS X 3267)의 제어 명령 체계에 같은 분류로 반영되어 있다.

www.kci.go.kr

3.1.2 Sensor Interface (KS X 3266)

KS X 3266은 온도, 습도, CO2, 일사, 풍향, 풍속, 감우, 광양자, 토양 함수율, 토양 수분 장력, EC, pH, 지온 등 13종 센서에 대한 연결 규격을 정의한다. 기계적 연결은 M13 크기 4핀 원형 커넥터로 단일화하고, 센서 측을 암(female), 제어기·센서노드 측을 수(male)로 규정하고, 결선은 2선식(전원 1번-접지 4번), 3선식(전원 1번-신호 2번-접지 4번), 4선식(전원 1번-신호1 2번-신호2 3번-접지 4번)의 단자 순서를 정의한다. 전기적 연결은 전원 전압 DC 5/12/24 V 중 선택, 출력 신호는 아날로그 전압 1~5 V를 강제사항으로 규정하며, 유일한 예외로 감우 센서는 DC 24 V 전원의 접점출력 방식을 사용한다. 이 규정들은 C1 중 아날로그 센서 호환성 부분에 해당한다. 또한 6절(표 3)에서 센서별 측정 범위(예: 온도 −20~80 ℃, CO2 0~3,000 ppm, 일사 0~2,000 W/m2, EC 0~10 dS/m)를 규정하며, 센서 메타데이터 표준(KS X 3269)은 센서별 측정 범위를 이 규정에 따르도록 인용한다.

3.1.3 Analysis of the Physical Layer

표 3은 두 표준의 규격을 비교한 것이다. 물리 계층에서의 표준은 장비 교체 시 재배선 없이 커넥터·터미널 수준에서 탈착이 가능한 환경, 즉 C1을 충족하는 규정을 둔 것이다. 두 표준은 모두 2022년 개정에서 선택 규격을 축소·단일화하였으며, 이는 개정 과정에서 규격 선택의 폭보다 제조사 간 호환성을 우선한 결과이다[8]. 다만 센서 출력이 아날로그 전압(1~5 V)으로 규정되어 있어 측정값의 교정 정보나 디지털 식별 정보를 물리 계층에서 전달할 수 없으며, 이러한 부분은 통신, 메타데이터 관련 표준에서 규정한다.

3.2 Communication Layer: RS-485 Modbus Protocols and TCP Extension

3.2.1 Sensor/Actuator Node Communication (KS X 3267)

KS X 3267은 온실 통합제어기와 센서·구동기 노드 간 RS-485 기반 모드버스 RTU 인터페이스를 규정하는, 통신 계층의 기본 표준이다[10][36]. 물리적으로는 M12 4핀 원형 커넥터(1번: 전원+ 24 VDC 적색, 2번: RS485-A 녹색, 3번: RS485-B 백색, 4번: GND 흑색)를 규정하고, 기본 통신속도 9,600 bit/s, 모드버스 주소 1~247, 프로토콜 버전 101을 정의하는 것으로 이 규정이 노드-통합제어기 인터페이스에 대한 C1에 해당한다. 2022년 개정에서는 하나의 데이터 값이 복수 레지스터에 걸치는 경우의 바이너리 인코딩 방식을 '워드 내 빅 엔디언, 워드 간 리틀 엔디언'으로 확정하여 제조사별 해석 차이로 인한 비호환 요인을 제거하였다.

동 표준에서 P&P와 직접 관련된 규정은 5절의 '레지스터 맵 확보 방법'으로, 온실 통합제어기가 이기종 노드의 레지스터 맵을 확보하는 경로를 두 가지로 규정한다. KS X 3286에 정의된 노드 자동 등록 기능을 통한 제조사별 맞춤 레지스터 맵 확보와 KS X 3267에 제시된 자동 등록 미지원 노드에 대한 부속서 A의 디폴트 레지스터 맵 적용이다. 노드 정보 레지스터(주소 1~8: 기관 코드, 회사 코드, 제품 타입, 제품 코드, 프로토콜 버전, 채널 수, 노드 시리얼 번호)에서 기관 코드와 회사 코드가 모두 0인 경우 디폴트 맵 지원 노드로 간주한다. 이에 따라 통신 방법은 두 가지로 나누어지는데, 디폴트 맵 경로에서는 고정 주소의 노드 정보와 부속서 A만으로 통신이 시작되므로 C2가 충족되나, 노드와 장치의 식별(C3)과 레지스터 맵 산출(C4)은 부속서 A의 고정 값으로 대체된다. 자동 등록 경로에서는 C3·C4가 KS X 3286의 규정에 따라 충족되며, KS X 3267은 센싱 값의 단위와 범위를 KS X 3269 5절에 따르도록 규정하여(6.2), C5의 근거를 메타데이터 계층에서 규정한다.

3.2.2 Nutrient Solution Supplier Node Communication (KS X 3288)

KS X 3288은 KS X 3267의 프레임워크를 양액기 노드로 확장한 표준으로, 양액기를 기능 지원 수준에 따라 레벨 0~3(디바이스 코드 201~204)으로 분류하고, 제어 명령으로 ON(코드 401, 기 설정된 EC·pH 값에 따른 1회 관수), OFF(0, 강제 정지), AREA_ON(402, 구역 지정 관수), PARAM_ON(403, EC·pH 파라미터 전달형 관수)을 정의한다. 특히 레벨 3 양액기만 지원하는 PARAM_ON 명령은 관수 시작·종료 구역, 관수 시간과 함께 EC 설정값과 pH 설정값을 float 2워드로 전달받아 작동하므로, 온실 통합제어기 상위의 AI 생육 알고리즘이 산출한 배양액 제어 변수를 표준 프로토콜만으로 양액기에 전달할 수 있다. 또한 제어권(control) 개념을 도입하여 LOCAL(노드 자체 제어), REMOTE(원격 제어), MANUAL(수동 제어)의 3원 체계로 제어 주체를 관리하는데, 이는 자율 제어와 작업자의 현장 개입이 공존해야 하는 스마트팜의 운영 조건을 반영한 규정이다. 센서 값의 단위와 범위는 KS X 3269 5절을 따르도록 규정하며(6.2), KS X 3269 5절은 단위와 데이터 타입을 정하고 측정 범위는 KS X 3266 6절(표 3)을 따르도록 한다. 레지스터 맵 확보 방법은 KS X 3267과 동일하게 자동 등록과 디폴트 레지스터 맵의 두 경로를 둔다.

www.kci.go.kr

3.2.3 Modbus TCP Extension (KS B 7958)

2024년 제정된 KS B 7958은 RS-485 시리얼 통신의 속도·확장성 제약을 해소하기 위해 KS X 3267 및 KS X 3288의 인터페이스를 인터넷 환경의 모드버스 TCP로 확장한 표준이다. RS-485 패킷(슬레이브 주소 + 모드버스 PDU + CRC)과 TCP 패킷(MBAP 헤더[처리 식별자, 규약 식별자, 길이, 단위 식별자] + 모드버스 PDU)의 구조를 비교하고, 게이트웨이 노드가 두 패킷을 상호 변환할 때 슬레이브 주소와 단위 식별자, 기능 코드와 데이터가 일치해야 함을 규정함으로써 기존 RS-485 네트워크와의 호환성을 확보한다. 게이트웨이 노드는 개념적 장비로서 기존 온실 통합제어기가 그 역할을 겸할 수도 있고 물리적 게이트웨이 장치를 별도로 둘 수도 있어, 농가가 기존 설비를 유지한 채 단계적으로 인터넷 기반 네트워크로 이행하는 경로를 제공한다. 레지스터 값 표현 방법(워드 내 빅 엔디언, 워드 간 리틀 엔디언) 역시 KS X 3267과 동일하게 유지하여, 시리얼에서 TCP로 전송 매체가 바뀌어도 응용 수준의 데이터 해석 로직은 변경이 불필요하다.

3.2.4 Genealogy and Analysis of the Communication Layer

통신 계층의 세 표준은 KS X 3267(2018 제정, 2022 개정: 센서·구동기) → KS X 3288(2022: 양액기 확장) → KS B 7958(2024: TCP 확장)의 확장관계를 가지며, 동일한 레지스터 맵과 제어 명령 체계를 유지한 채 대상 기기와 전송 매체를 확장하였다. 이는 신규 표준 제정 시마다 기존 장비의 폐기를 요구하지 않는다는 이점이 있으나, RS-485 환경에서 설계된 레지스터 기반 데이터 모델이 TCP 환경에서도 그대로 유지됨에 따라 대용량 영상 데이터나 이벤트 기반(event-driven) 통신에는 적용되지 않는다. 세 표준 모두 C2는 디폴트 레지스터 맵으로 충족하고, C3·C4는 KS X 3286을, C5는 KS X 3269를 인용하여 규정한다.

3.3 Metadata Layer: Semantic Standardization of Device Data Attributes

통신 계층이 데이터를 '어떻게 전달할 것인가'를 규정한다면, 메타데이터 계층은 전달된 데이터가 '무엇을 의미하는가'를 규정한다. KS X 3268(구동기)과 KS X 3269(센서)는 W3C XML Schema 데이터 타입(xs:float, xs:integer, xs:NMTOKEN, xs:unsignedShort)을 기반으로 각 기기의 정보·상태·제어 데이터를 엘리먼트 단위로 정의하며, 각 엘리먼트에 M(필수)/O(선택)/−(미지원)의 지원 수준을 부여한다.

3.3.1 Sensor Metadata (KS X 3269)

센서 메타데이터는 센서 정보(SensorInfo)와 센서 상태 정보(SensorStatusInfo)로 구성된다. 센서 정보는 디바이스ID, 디바이스클래스, 디바이스유형(2022년 개정으로 이슬점·유량·강우량·전압·무게·전류·누적유량 센서 등이 추가되어 20종)을 필수 항목으로, 위치(Location)·대상(Target)·단위(ValueUnit) 등을 선택 항목으로 정의한다. 센서 상태 정보는 센싱 값(Value, xs:float)과 함께 상태(Status)를 필수화하고, 상태 코드를 정상(READY)·오류(ERROR)·처리불능(BUSY)뿐 아니라 동작 전압·전류·온도 이상, 휴즈 이상, 소모품 교체 요망(NEED_REPLACE), 교정 요망(NEED_CALIBRATION) 수준까지 세분화하였다. 이로써 표준의 범위는 측정값뿐 아니라 센서 데이터의 품질 관리(교정 요망, 이상 감지)까지 포함한다. 5절의 센서 종류별 데이터 범위 및 단위는 KS X 3267 6.2가 인용하는 규정으로, C5에 해당한다.

3.3.2 Actuator Metadata (KS X 3268)

구동기 메타데이터는 구동기 정보·상태 정보·제어 정보로 구성되며, 디바이스 유형을 물리 계층(KS X 3265)의 작동 방식 이분법을 계승하여 개폐형/스위치형 × 레벨 0~2의 6개 유형으로 분류한다. 제어 정보는 유형별로 다르다. 개폐형 구동기의 제어명령(Operation)은 OPEN, CLOSE, STOP, TIMED_OPEN, TIMED_CLOSE, SET_POSITION이며, 레벨 2에서 개방위치(Position, 0~100 %)로 개방도를 지정한다. 스위치형 구동기의 제어명령은 ON, OFF, TIMED_ON, DIRECTIONAL_ON이며, 레벨 2에서 동작강도(Ratio, −100~+100 %, 음수는 역방향)로 출력과 방향을 지정한다. 두 유형에 공통으로 명령ID(OPID)와 지속시간(HoldTime, 초 단위)이 있으며, 레벨이 높아질수록 필수 항목이 증가한다 (레벨 1: 시간 제어 명령 시 HoldTime 필수, 레벨 2: DIRECTIONAL_ON 시 HoldTime·Ratio 필수). 명령ID(OPID)는 매 명령마다 변경되는 0 이상의 값으로, 비동기 통신 환경에서 명령과 그 실행 결과를 연결하여 추적할 수 있게 하는 규정이다.

3.3.3 Analysis of the Metadata Layer

두 메타데이터 표준의 부속서는 각 엘리먼트가 KS X 3267의 레지스터 주소 체계에 어떻게 매핑되는지를 규정함으로써, XML Schema 기반의 데이터 모델과 모드버스 레지스터 전송 규격을 연결한다. 예컨대 센서의 디바이스ID는 노드 내 채널의 레지스터 주소(101~200번지)에 저장된 디바이스 코드 정보에 매핑된다. 이러한 '프로토콜 독립적 메타데이터

www.kci.go.kr

Table 4. Standards applicable to each interface by layer, and the P&P conditions specified at each layer

Layer	Device / Device-Controller (direct)	Node-Integrated controller	Controller-Platform	Conditions
Application	KS B 7952, 7955 (nutrient supplier data items)	KS X 3288 (nutrient supplier node)	–	C5 (domain items)
Metadata	KS X 3268, 3269 (data attributes, referenced by KS X 3267 6.2)	KS X 3286 Clause 9 (node/device specification file)	KS X 3286 9.1.3 (ValueUnit, ValueRange)	C3, C4, C5
Communication	–	KS X 3267 (RS-485 Modbus RTU), KS X 3288, KS B 7958 (Modbus TCP)	KS B 7958 (TCP)	C1 (node-controller), C2
Physical/Hardware	KS X 3265 (actuator), KS X 3266 (sensor)	KS X 3267 Clause 4, Table 1 (M12 connector, RS-485)	–	C1

정의 + 프로토콜별 매핑 부속서'의 이중 구조는, 향후 모드버스 이외의 프로토콜(예: MQTT, OPC UA)이 도입되더라도 메타데이터 본체의 재정의 없이 매핑 부속서 추가만으로 확장할 수 있다. 다만 메타데이터 표준이 정의하는 단위·범위·유형이 통합제어기에 전달되는 경로는 KS X 3286 9.1.3의 노드·디바이스 규격 파일에 정의된 ValueUnit, ValueRange, ValueType 항목이며, 디폴트 레지스터 맵 경로에서는 부속서 A의 고정 값으로만 존재한다. 따라서 C5의 충족 여부는 규격 파일의 유통에 따라 결정된다.

3.4 Application Layer: Vertical Integration of Nutrient Solution Supplier Standards

양액공급기는 하드웨어 일반 요구사항(KS B 7952), 제어 정보·데이터 수집 요구사항(KS B 7955), 통신 인터페이스(KS X 3288)의 세 표준이 인용 관계로 연결된 기자재로, 본 논문에서는 이를 응용 계층으로 분류한다. 응용 계층은 통신·메타데이터 계층의 규정을 특정 기자재의 데이터 항목과 제어 명령으로 구체화하는 계층이다. 표 1의 기자재별 표준 범주는 이 응용 계층에 대응한다.

3.4.1 General Requirements (KS B 7952)

KS B 7952는 농업용 관수장비로서 양액공급기의 구성과 기능에 관한 일반 요구사항을 규정하며, KS B 7955가 용어(전자밸브 등)와 장비 구성을 인용하는 기초 표준의 역할을 한다.

3.4.2 Control Information and Data Collection Requirements (KS B 7955)

2022년 제정된 KS B 7955는 혼합탱크를 갖춘 양액공급기를 대상으로, 수집 데이터의 항목·단위·측정범위와 설치 요구사항을 규정한다. 측정 데이터는 배지(온도 0~50 ℃, 함수율 0~99 %, EC 0~10 dS/m, pH 0~14), 배액(EC 0~5 dS/m, pH, 배액량 0~50,000 L/day), 배양액(급액량, 공급횟수 0~100 n/day, EC·pH 소수점 1자리), 일사량(순간 W/m2, 누적 J/cm2)으로 구분되고, 제어 데이터로 전자밸브(최대 32채널)와 교반기(최대 9채널)의 상태 표시를, 진단 데이터로 EC·pH·유량·전자밸브 이상에 대한 비트 스트림 방식의 경보 메시지를 규정한다. 특히 데이터 정밀도를 반복조건에서 95 % 이상으로 정량화하고 정보 저장 기간을 1년 이상으로 의무화한 점, 그리고 센서 설치 요구사항에서 EC 센서의 자기장 차폐 및 온도 센서 병설 보정, pH 센서의 진동 회피 설치, 센서 정확도(pH ±0.5, EC ±0.1 dS/m 이내)를 명시한 점은, 수집 데이터의 품질을 표준의 규정 대상에 포함한 것이다. 아울러 동 표준은 EC·pH 센서의 물리적 연결을 KS X 3266에 따르도록 인용하여 물리 계층 표준과 연결된다.

3.4.3 Analysis of the Application Layer

양액공급기 도메인에서 세 표준의 관계를 요약하면, KS B 7952가 장비의 구성·기능을, KS B 7955가 수집·표시해야 할 데이터의 항목과 품질을, KS X 3288이 그 데이터를 온실 통합제어기와 주고받는 통신 규격을 각각 담당한다. 예컨대 KS B 7955가 규정한 배양액 EC 측정값(소수점 1자리, 0~5 dS/m)은 KS X 3288의 양액기 노드 레지스터 맵에서 EC 센서 디바이스(디바이스 코드 12)의 float 값으로 조회되고, 역방향으로 상위 제어기의 EC 설정값은 PARAM_ON 명령의 float 파라미터로 하달된다. 양액기 노드 센서의 단위·범위는 KS X 3288이 KS X 3269 5절을 인용하고 KS X 3269가 측정 범위를 KS X 3266에 위임함으로써 규정되며, KS B 7955도 EC·pH 센서의 연결을 KS X 3266에 따르도록 한다. 다만 누적유량 센서는 KS X 3266의 13종에 포함되지 않아, 그 측정 범위는 KS B 7955와 KS X 3286의 규격 파일(ValueRange)로만 규정된다. 이처럼 '데이터 규격 표준'과 '통신 표준'이 항목 단위로 일치하는 구조는, 다른 기자재(예: 냉난방기, 환기 시

www.kci.go.kr

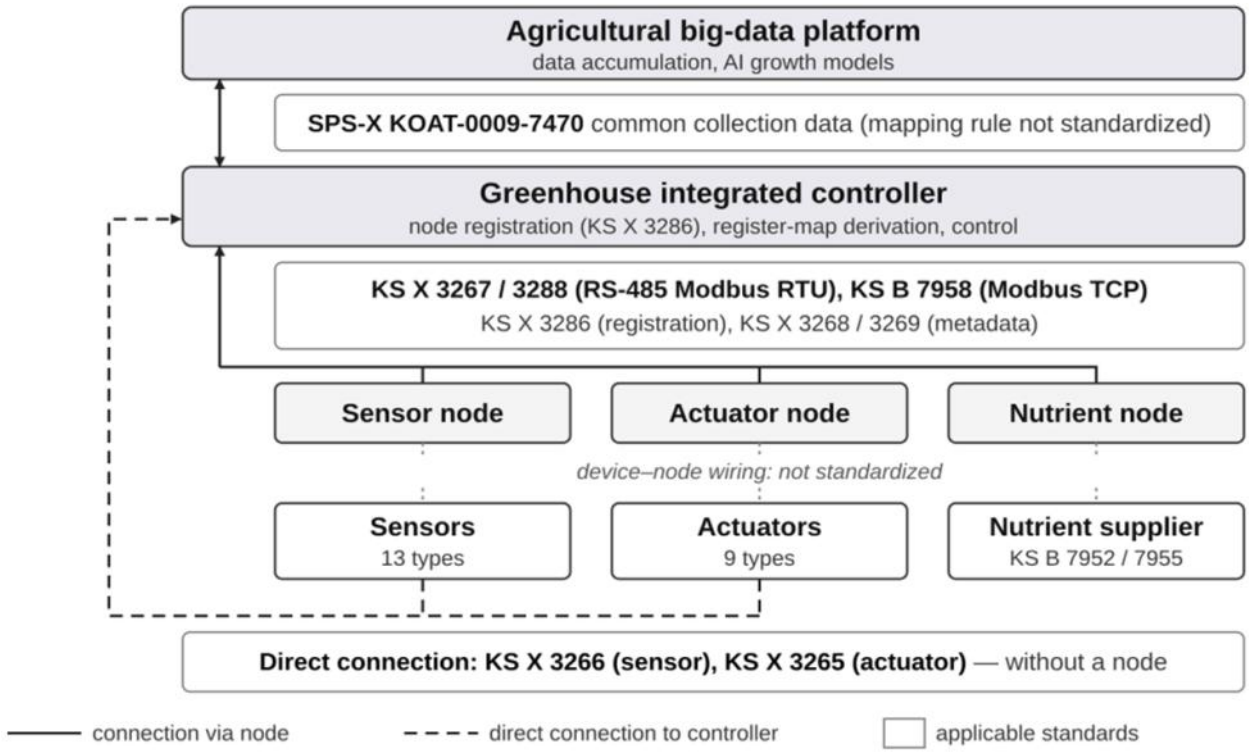


Fig. 1. System architecture of a smart greenhouse and standards applied at each interface

스템) 도메인 표준화의 참조 모델로 활용될 수 있다.

3.5 Synthesis of the Layered Structure

그림 1(Fig. 1)은 시스템 구성 요소 간 인터페이스별로 적용되는 표준을 나타내고, 표 4는 각 인터페이스에 적용되는 표준을 계층별로 분류하고 각 계층이 규정하는 조건을 정리한 것이다. 이상의 분석에서 확인되듯, 국내 스마트 온실 표준은 개별 표준의 나열이 아니라 인접 계층의 표준을 인용하는 계층 구조로 규정되어 있으며, 각 계층의 규격이 인용 관계(KS B 7955 → KS X 3266, KS X 3288 → KS X 3267, KS X 3267 → KS X 3269, KS X 3267 → KS X 3286 등)로 명시적으로 연결되어 있다. 다섯 조건 중 C1·C2는 물리 계층과 통신 계층의 규정으로 충족되고, C3·C4·C5는 KS X 3286의 등록 절차와 규격 파일을 통해 충족되도록 규정되어 있다. 따라서 이 구조가 현장에서 P&P로 작동하는지는 KS X 3286의 등록 절차와 규격 파일의 유통에 달려 있으며, 이를 IV장에서 분석한다.

IV. Architecture Mapping and Analysis of P&P Conditions

본 장에서는 III장에서 계층별로 분석한 표준을 스마트 온실의 시스템 아키텍처에 매핑하고, C3·C4·C5의 충족 경로를 규정하는 디바이스 자동 등록 절차(KS X 3286)를 분석한다. 이어서 농가 현장의 장비 교체·증설 시나리오를 다섯 조건(C1~C5)과 대조하여 각 조건이 어느 표준의 규정으로 충족되는지 분석하고, 검정·보급 요건의 적용 범위와 대조하여 현행 표준 체계에서 P&P가 실현되는 범위와 개선 과제를 도출한다.

4.1 Smart Greenhouse System Architecture and Standard Mapping

그림 1(Fig. 1)에 도시한 바와 같이, 표준 기반 스마트 온실의 시스템 아키텍처는 최하단의 디바이스(센서·구동기·양액기), 이를 수용하는 노드(node), 노드들을 관제하는 온실 통합제어기(greenhouse integrated controller), 그리고 상위의 클라우드·빅데이터 플랫폼의 4개 층위로 구성된다. 각 층위 간 인터페이스에 III장의 표준이 다음과 같이 배치된다.

디바이스와 통합제어기의 연결에는 두 가지 구성이 있다. 센서·구동기가 노드 없이 통합제어기에 직접 연결되는 구성에서는 물리 계층 표준이 적용되어, 센서는 KS X 3266의 M13 4핀 원형 커넥터로, 구동기는 KS X 3265의 터미널 단자로 접속되며, 이 인터페이스에서 교환되는 것은 아날로그 전압 신호와 동력·파일럿 전원이다. 노드를 거치는 구성에서 센서·구동기와 노드 사이의 결선은 표준으로 규정되어 있지 않으며, 노드-제어기 인터페이스에는

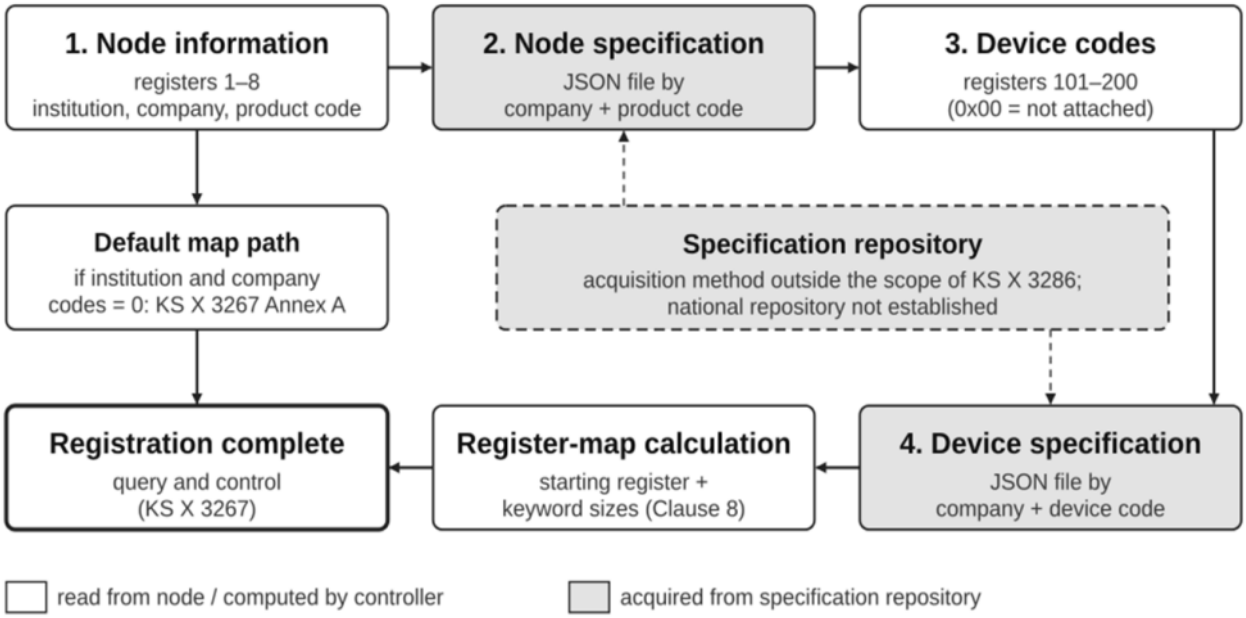


Fig. 2. Four-step automatic registration sequence between the integrated controller and a node (KS X 3286)

통신 계층 표준이 위치하여, RS-485 버스 상에서 KS X 3267(센서·구동기 노드) 및 KS X 3288(양액기 노드)의 모드버스 RTU 프로토콜이, 인터넷 구간에서는 KS B 7958의 모드버스 TCP가 적용된다. 이 인터페이스에서 교환되는 데이터의 의미 해석 기준은 메타데이터 표준(KS X 3268, 3269)이 제공하며, 노드가 버스에 연결될 때의 등록 절차는 KS X 3286이 규정한다. 마지막으로 제어기-플랫폼 인터페이스에서는 수집된 환경·제어 데이터가 플랫폼 수준의 공통 수집 데이터 규격(SPS-X KOAT-0009-7470 등)[18]의 데이터 엘리먼트로 변환되어야 하나, 그 매핑 규칙은 표준화되어 있지 않다(4.4 참조).

이 매핑에서 하위 계층의 표준은 상위 계층 데이터 품질의 전제가 된다. 물리 계층에서 잘못 결선된 센서, 통신 계층에서 비표준 레지스터 맵을 사용하는 노드, 메타데이터 없이 수집된 측정값은 각각 상위 계층에서 단위와 의미를 해석할 수 없는 데이터를 만든다. 따라서 각 인터페이스에서 해당 표준의 적합성을 확인할 필요가 있다.

4.2 Analysis of the Device Auto-Registration Procedure (KS X 3286)

4.2.1 Register Address Map Structure and Operational Requirements

KS X 3286은 노드의 모드버스 레지스터 주소 공간을 고정 영역과 자율 영역으로 이원화한다. 주소 1~100번지는 노드 정보(기관 코드, 회사 코드, 제품 타입, 제품 코드, 프로토콜 버전, 채널 수, 노드 시리얼 번호)를 기재하는 고정 영역이고, 101~200번지는 노드에 부착된 디바이스들의 코드 목록을 기재하는 고정 영역이며(코드 값 0x00은 미부착·미작동 디바이스로 간주), 상태 정보와 제어 정보의 주소는 제조사가 자율적으로 정할 수 있다. 고정 영역과 자율 영역의 구분은 자동 등록이 가능하기 위한 전제 조건이다. 제어기는 어떤 제조사의 노드든 1~200번지만 읽으면 노드의 제조사·제품과 부착된 디바이스를 식별할 수 있고, 제조사는 나머지 주소 공간을 자사 제품 구조에 맞게 자유롭게 설계할 수 있기 때문이다.

동작 요구사항으로는 (a) 각 노드의 모드버스 주소는 딥스위치 등 자체 방식으로 사전 지정됨을 가정하고, (b) 복수의 릴레이·모터로 구성된 개폐기라도 제어기에는 하나의 논리적 디바이스로 인식되어야 하며, (c) 파라미터를 갖는 제어 명령은 후속 명령이 파라미터를 덮어쓸 수 있으므로 별도 메모리 영역에 복사하여 사용해야 함을 규정한다. 특히 (b)의 논리적 디바이스 개념은 물리적 구현의 차이를 표준 인터페이스 뒤에 두는 캡슐화(encapsulation)에 해당하며, 제조사의 설계 자유도와 제어기 측 처리의 단순성을 함께 확보한다.

4.2.2 Four-Step Registration Sequence

노드 등록은 다음 4단계로 진행된다(Fig. 2). 1단계(노드 정보 취득): 제어기는 버스 상에서 검색된 주소를 노드 주소로 인식하고, KS X 3267 6.1의 절차에 따라 레지스터 1~8번지에서 노드 정보를 읽는다. 이 단계에서 기관 코드와 회사 코드가 모두 0이면 해당 노드는 자동 등록 미지원 장비로 판정되어 KS X 3267 부속서 A의 디폴트 레지스터 맵이 적용되는 대체 경로로 분기한다.

www.kci.go.kr

2단계(노드 규격 취득): 제어기는 확보한 회사 코드와 제품 코드를 키(key)로 하여 해당 노드의 규격 파일을 취득한다. 취득 방법(원격 저장소 조회, 파일 복사 등)은 표준의 범위 밖에 두었다. 따라서 이 단계는 회사 코드와 제품 코드로 규격 파일을 조회할 수 있는 저장소의 존재를 전제한다. 규격 파일은 KS X 3286 9절에 정의된 JSON 형식으로, Class(node), Type(sensor/actuator-node 등), Model, Name과 함께 통신 규격을 기술하는 CommSpec 필드를 포함한다.

3단계(디바이스 코드 취득): 제어기는 101~200번지에서 노드에 부착된 디바이스들의 코드를 워드(2바이트) 단위로 읽는다. 단, 2단계에서 취득한 노드 규격에 Devices 필드가 존재하는 경우(디바이스 구성이 고정된 비(非)P&P 노드), 모든 디바이스의 레지스터 맵 정보가 규격에 이미 포함되어 있으므로 디바이스별 규격 확보 과정은 생략하되 각 장치의 작동·존재 여부만 확인한다.

4단계(디바이스 규격 취득): 제어기는 회사 코드와 디바이스 코드를 이용하여 각 디바이스의 규격 파일을 취득한다. 이로써 제어기는 노드와 그 하위 디바이스 전체의 통신 특성 정보를 확보하게 된다.

4.2.3 Specification-Based Automatic Register Map Calculation

등록 절차의 마지막 단계는 취득한 규격으로부터 레지스터 맵을 산출하는 과정이다. 규격의 CommSpec 필드는 읽기(read)와 쓰기(write) 영역을 분리하고, 각 영역에 시작 주소(starting-register)와 접근 가능 항목 목록을 기술한다. 목록에 나열되는 항목은 표준이 정의한 키워드(status, opid, value, operation, hold-time, ratio 등)만 사용할 수 있고 각 키워드의 크기(워드 수)가 고정되어 있으므로, 제어기는 '시작 주소 + 키워드별 크기의 누적 합'만으로 전체 레지스터 맵을 결정론적으로 계산할 수 있다.

나아가 표준은 디바이스 규격에서 starting-register를 생략하는 것을 허용한다. 이 경우 101~200번지 디바이스 코드 목록의 순서에 따라 이전 계산 결과에 이어 연속적으로 주소를 배정하며, 시작 주소가 명시된 규격과 생략된 규격의 혼용도 가능하다(단, 주소 충돌 방지는 규격 작성자의 책임). 이 설계는 제조사가 디바이스 구성을 변경할 때마다 주소 체계를 재설계할 필요를 없애는 동시에, 관리자가 레지스터 맵을 수동으로 지정하는 작업을 없앤다. 즉 KS X 3286은 문서로 제공되던 레지스터 맵을 기계 판독이 가능한 규격으로 기술하도록 규정하며, 이 규격 파일을 통해 C3·C4·C5가 충족된다.

4.3 Criteria-Matching Analysis of P&P Scenarios

농가 현장에서 발생하는 두 가지 시나리오를 다섯 조건(C1~C5)과 대조하여, 각 조건이 어느 표준의 규정으로 충족되는지와 현재 적용 가능한 디폴트 레지스터 맵 경로에서 충족되지 않는 조건을 분석한다. 이 분석은 표준 문서에 근거한 것이며 실험을 수반하지 않는다.

4.3.1 Scenario 1: Replacement with a Third-Party Temperature Sensor Node

A사 온도센서 노드가 고장 나 B사 노드로 교체하는 상황을 가정한다. 센서-노드 간 결선은 표준으로 규정되어 있지 않으므로, 센서가 부착된 노드 단위의 교체를 가정한다. 첫째, 두 노드 모두 KS X 3267의 M12 4핀 커넥터 규격을 따르므로 기존 케이블에 그대로 접속된다(C1). 둘째, 관리자가 딥 스위치로 기존과 동일한 모드버스 주소를 설정하면, 제어기는 주기적 버스 스캔에서 해당 주소의 노드 정보(1~8번지)를 다시 읽고 통신을 시작한다(C2). 셋째, 자동 등록 경로에서는 회사 코드·제품 코드가 변경되었음을 확인한 제어기가 4.2.2의 등록 절차를 다시 수행하여 B사 노드의 규격 파일을 취득하고 레지스터 맵을 다시 산출한다(C3·C4). 넷째, 규격 파일의 DeviceType (temperature-sensor), ValueUnit(℃), ValueType(float)은 KS X 3269 5절에 따라 기술되므로, 플랫폼에 축적되는 온도 데이터의 단위와 형식이 교체 전과 같게 유지된다(C5). 이 경로에서 관리자의 작업은 물리적 장착과 주소 설정에 한정된다. 반면 B사 노드가 기관 코드와 회사 코드를 0으로 응답하는 디폴트 레지스터 맵 경로에서는 C1·C2는 충족되나, 노드와 디바이스는 KS X 3267 부속서 A의 고정 값으로 식별되고 단위·범위 정보는 통합제어기에 전달되지 않는다.

4.3.2 Scenario 2: Addition of a Level-3 Nutrient Solution Supplier

AI 기반 배양액 제어를 위해 EC·pH 파라미터 제어가 가능한 레벨 3 양액기(디바이스 코드 204)를 증설하는 상황을 가정한다. 물리·통신 계층에서 양액기 노드는 KS X 3288에 따라 RS-485 버스에 연결되고(C1·C2), 등록 절차는 KS X 3286을 준용하되 양액기 노드 특화 사항은 KS X 3288 5.3의 규정을 따른다. 등록 완료 후 제어기는 해당 노드의 디바이스 코드 목록(EC·pH·일사·누적유량 센서 및 양액기)을 인식하고, 레벨 코드(204)로부터 PARAM_ON(403) 명령의 지원 여부를 판별한다(C3·C4). 이후 상위 생육 알고리즘이 산출한 EC·pH 설정값은 KS X 3288의 파라미터 관수 명령(float 2워드)으로 하달되고,

www.kci.go.kr

공급 결과는 KS B 7955가 규정한 데이터 항목(급액량, 배액 EC·pH 등)과 품질 기준(정밀도 95 %, 저장 1년)에 따라 수집된다(C5). 이 시나리오에서 양액기 노드는 응용 계층(KS B 7955)부터 통신 계층(KS X 3288)까지의 규정을 모두 거치며, C3·C4·C5는 시나리오 1과 같이 KS X 3286 규격 파일의 취득을 전제로 충족된다.

두 시나리오의 대조 결과, C1·C2는 KS X 3267·3288의 규정만으로 충족된다. C3·C4는 통합제어기가 KS X 3286의 규격 파일을 취득할 수 있을 때 충족되며, C5는 규격 파일의 ValueUnit·ValueRange가 통합제어기에 전달될 때 충족된다. 디폴트 레지스터 맵 경로에서는 C3·C4·C5가 부속서 A의 고정 값으로 대체되므로, 두 시나리오 모두 P&P는 통신 계층까지만 실현된다. 표준을 따르지 않는 기자재로 구성된 온실에서는 커넥터와 통신 규격이 제조사마다 다르므로, 두 시나리오 모두 동일 제조사의 제품으로 교체하거나 통합제어기의 결선과 통신 설정을 다시 구성해야 하며 C1·C2부터 충족되지 않는다. 디폴트 레지스터 맵 경로에서는 부속서 A의 구성을 벗어나는 디바이스와 단위·범위 정보를 통합제어기가 자동으로 확인할 수 없으므로, 관리자가 이를 확인하고 설정해야 한다. 경로 간의 차이는 등록 성공률, 등록 소요 시간, 데이터 정합성, 장비 교체 시 관리자 작업 시간으로 측정할 수 있으며, 이 지표를 이용한 실험적 비교는 V장에 후속 연구로 제시하였다.

4.4 Discussion: Scope of Application of the Standards and Improvement Tasks

이상의 분석을 통해 국내 표준 체계가 P&P의 다섯 조건을 모두 규정하고 있음을 확인하였다. 그러나 4.3의 대조에서 디폴트 레지스터 맵 경로의 C3·C4·C5는 충족되지 않았다. 본 절에서는 그 원인을 표준의 적용 범위에서 찾고, 이를 바탕으로 개선 과제를 우선순위에 따라 제시한다.

첫째, 검정 및 보급사업 요건의 적용 범위와 규격 저장소이다. 센서·구동기와 그 노드에 대한 검정 및 보급사업의 설치 요건은 KS X 3265, 3266, 3267을 대상으로 한다. 통합제어기 품목의 적용표준에는 KS X 3286이 포함되어 있으나, 통합제어기를 포함한 모든 품목의 요건이 확인하는 내용은 물리적 연결과 통신 연결에 한정된다[7]. KS X 3267은 센싱 값의 단위와 범위를 KS X 3269 5절에 따르도록 규정하므로(6.2), 메타데이터 표준의 요구사항은 KS X 3267의 인용 관계를 통해 노드 요건에 포함된다. 다만 검정의 통신 시험은 패킷 구조와 레지스터 값의 인코딩을 대상으로 하므로, 메타데이터 계층의 적합성은 인용 관계에 따라 요건에 포함되는 것으로 간주될 뿐 별도로 확인되지는 않는다.

반면 KS X 3286의 요구사항은 노드 요건에 포함되지 않는다. KS X 3267 5절은 레지스터 맵 확보 방법으로 KS X 3286의 자동 등록과 부속서 A의 디폴트 레지스터 맵을 함께 규정하고, 기관 코드와 회사 코드가 0인 노드를 자동 등록 미지원 노드로 규정한다. 따라서 KS X 3286을 구현하지 않은 노드도 KS X 3267에 적합하며 검정·보급 요건을 충족한다. 그 결과 요건을 충족한 노드로 구성된 온실에서도 C3·C4는 실현되지 않을 수 있다.

KS X 3286 7.2와 7.4는 통합제어기가 회사 코드·제품 코드 및 디바이스 코드를 키로 노드·디바이스 규격 파일을 취득하도록 규정하되, 취득 방법은 표준의 범위 밖에 두었다. 현재까지 국가 차원의 공인 규격 저장소는 공개되어 있지 않고 노드 제조사가 규격 파일을 제공할 요건도 없으므로, 통합제어기는 디폴트 레지스터 맵에 의존하게 된다. 규격 파일이 없으면 KS X 3286 9.1.3의 ValueUnit·ValueRange 등 의미 정보도 통합제어기에 전달되지 않으므로, C5는 노드 단위에서 확인할 대상이 없다. 즉 규격 저장소의 부재는 C3·C4·C5가 실현되지 않는 공통 원인이며, P&P는 통신 계층까지 실현되어 있다.

따라서 첫 번째 개선 과제는 국가 차원의 공인 규격 저장소를 구축하여 기관 코드·회사 코드 발급 체계와 연동하고, 노드의 검정 대상에 KS X 3286을 추가하여 규격 파일 제공을 요건화하는 것이다. 저장소가 없으면 규격 파일을 등록할 곳이 없고, 요건이 없으면 저장소에 등록될 규격 파일이 없으므로 두 과제는 함께 추진되어야 한다.

둘째, 노드 주소 설정이다. 노드의 모드버스 주소가 딥 스위치 등 수동 방식으로 사전 지정됨을 가정하므로, 주소 중복 설정과 같은 인적 오류의 여지가 남는다. RS-485 버스의 특성상 완전 자동 주소 할당은 어려우나, KS B 7958의 TCP 환경에서는 DHCP와 같은 동적 주소 부여 방식의 표준화를 검토할 수 있다.

셋째, 데이터 모델의 확장이다. III장에서 지적한 바와 같이 레지스터 기반 데이터 모델은 주기적 폴링을 전제하므로, 이벤트 기반 통신이나 영상·생육 이미지 등 대용량 비정형 데이터를 수용하지 않는다. 메타데이터 표준의 '프로토콜 독립적 정의 + 프로토콜별 매핑 부속서' 구조를 활용하여 MQTT, OPC UA 등 발행-구독형 프로토콜에 대한 매핑 부속서를 추가하는 방안을 확장 경로로 검토할 수 있다.

그림 3(Fig. 3)은 이 확장 구조를 나타낸 개념도이다. 통합제어기는 노드 쪽으로는 기존 모드버스 인터페이스(KS X 3267, 3288, KS B 7958)를 그대로 유지하고, 플랫폼 쪽으로는 KS X 3286 규격 파일의 DeviceType·

www.kci.go.kr

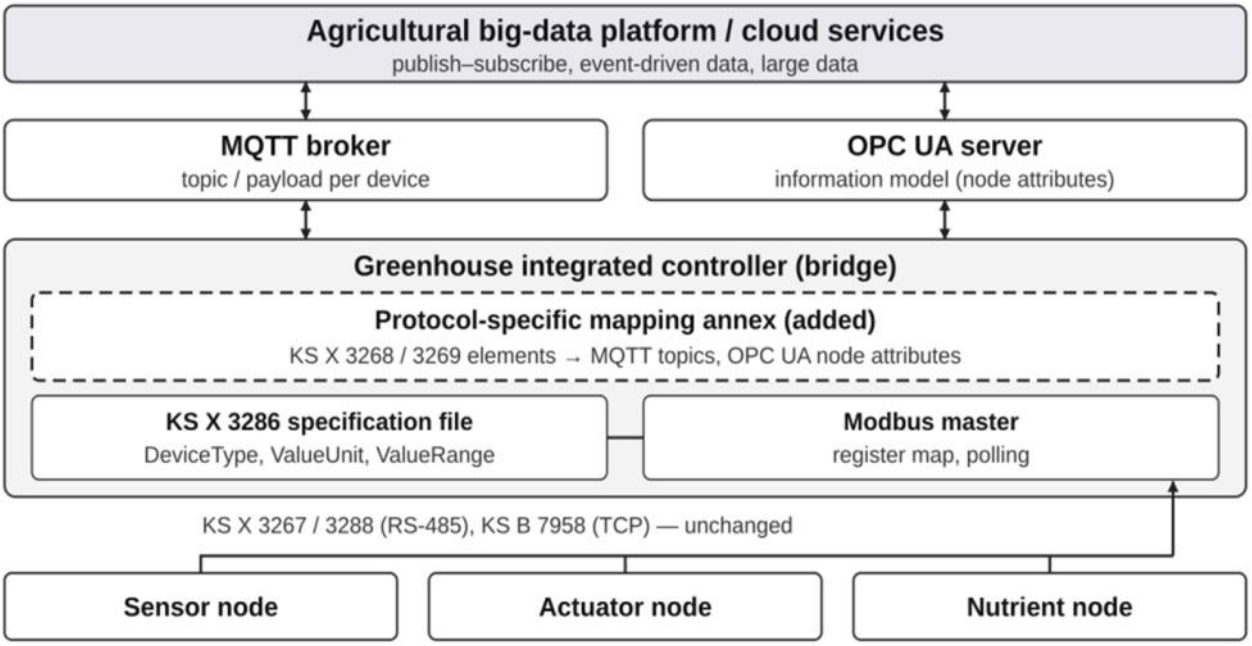


Fig. 3. Conceptual bridge structure for extending the standard stack to MQTT and OPC UA

ValueUnit·ValueRange와 KS X 3268·3269의 엘리먼트를 MQTT 토픽·페이로드 또는 OPC UA 정보 모델의 노드 속성으로 변환한다. 이 구조에서 노드와 기존 표준은 변경되지 않으며, 추가되는 것은 메타데이터 표준의 프로토콜별 매핑 부속서이다. 이 구조는 현행 표준에 규정된 것이 아니라 본 논문이 제시하는 개념 구조이다.

넷째, 수집 데이터 표준과의 매핑 규칙이다. 기기 수준의 메타데이터(KS X 3268, 3269)와 플랫폼 수준의 공통 수집 데이터 규격(SPS-X KOAT-0009-7470) 사이에, 노드에서 수집된 측정값이 플랫폼의 데이터 엘리먼트로 변환되는 매핑 규칙이 표준화되어 있지 않다. 이 매핑 규칙이 정해져야 개별 온실에서 수집한 데이터를 국가 농업 빅데이터 플랫폼에서 같은 단위와 의미로 활용할 수 있으므로, 이 규칙은 제어기-플랫폼 인터페이스의 표준으로 제정될 필요가 있다.

다섯째, 확장성·보안·장애 대응에 관한 규정이다. RS-485 버스는 모드버스 주소 범위(1~247)와 마스터 주도 폴링 방식을 따르므로, 노드 수가 늘어날수록 각 노드의 데이터 갱신 주기가 길어진다. KS B 7958의 TCP 확장은 전송 속도의 제약을 완화하나 폴링 방식은 유지된다. 보안 측면에서 모드버스 프로토콜은 인증·암호화 기능을 갖지 않으며[36], 인터넷 구간에 적용되는 KS B 7958에도 전송 구간 암호화, 노드 인증, 제어 명령의 접근 제어는 규정되어 있지 않다. 장애 대응 측면에서 KS X 3269의 상태 코드와 KS B 7955의 경보 메시지는 장애를 탐지하는 수단을 규정하나, 탐지 이후의 대체 노드 전환, 재등록, 데이터 결손 처리 절차는 규정되어 있지 않다. 따라서 보안 프로파일과 장애 대응 절차를 부속서 형태로 보완할 필요가 있다.

이상의 개선 과제와 별도로, 기존 스마트팜을 이 구조로 전환하는 과정에서는 다음과 같은 실무적 문제가 따른다. KS X 3267을 따르는 기존 노드는 디폴트 레지스터 맵 경로로 계속 동작하므로 교체 없이 유지할 수 있으나, 자동 등록 경로를 적용하려면 노드 펌웨어에 KS X 3286의 등록 레지스터와 규격 파일을 구현하고, 통합제어기 소프트웨어에 규격 파일 취득과 레지스터 맵 산출 기능을 추가해야 한다. 표준을 따르지 않는 기존 기자재는 커넥터와 통신 규격이 달라 표준 노드로 교체하거나 프로토콜 변환 장치를 거쳐야 하며, 교체 비용과 설치 기간의 제어 중단이 농가의 부담이 된다. 제조사에는 제품 개선과 검정에 비용이 발생하며, 스마트팜 ICT 기자재 국가표준 확산 지원사업은 표준적용 컨설팅, 시제품 제작·실증, 검정비용 바우처를 지원하고 있다[6]. 따라서 전환은 신규 설치와 노후 장비 교체 시점에 표준 기자재를 우선 적용하는 단계적 방식으로 추진하는 것이 현실적이다.

V. Conclusions

본 논문은 국내 시설원예 스마트팜에서 이기종 기자재 간 상호운용성 부재와 데이터 비일관성 문제를 해결하기 위해 제정된 국가표준 및 산업표준 10건을 P&P의 다섯 조

www.kci.go.kr

건을 기준으로 계층별로 분석하고, 스마트 온실의 시스템 아키텍처에 매핑하였다. 본 논문은 표준 분석 및 개념적 아키텍처 연구이며, 실험을 수반하지 않는다.

먼저 국내 표준화 동향을 하드웨어·통신, 디바이스 등록·메타데이터, 기자재별 표준, 생육·공통 수집 데이터, 농업용 로봇의 5개 범주로 분류하고, 이 중 P&P를 규정하는 표준을 물리·하드웨어 계층(KS X 3265, 3266), 통신 계층(KS X 3267, 3288, KS B 7958), 메타데이터 계층(KS X 3268, 3269), 응용 계층(KS B 7952, 7955)의 4계층으로 재구성하여 분석하였다. 분석 결과, 국내 표준 체계는 개별 표준의 단순 집합이 아니라 인접 계층의 표준을 인용하는 계층 구조로 규정되어 있음을 확인하였다. 또한 2022년 개정에서 물리 계층 표준은 공통적으로 선택 규격을 단일화하였고, 통신 계층은 KS X 3267에서 KS X 3288, KS B 7958로 이어지며 동일한 레지스터 맵과 제어 명령 체계를 유지한 채 대상 기기와 전송 매체를 확장하였다.

나아가 본 논문은 C3·C4·C5의 충족 경로를 규정하는 디바이스 자동 등록 절차(KS X 3286)를 분석하였다. 노드 정보 취득, 노드 규격 취득, 디바이스 코드 취득, 디바이스 규격 취득의 4단계 절차와 규격 기반 레지스터 맵 자동 계산 방식은, 레지스터 맵을 기계 판독이 가능한 규격으로 기술하여 관리자의 수동 설정 작업을 없애는 절차임을 확인하였다. 또한 타사 온도센서 노드 교체와 레벨 3 양액기 증설의 두 가지 현장 시나리오를 다섯 조건과 대조하여, 자동 등록 경로에서는 물리적 장착과 주소 설정 외의 설정 없이 C1~C5가 충족되나, 현재 적용 가능한 디폴트 레지스터 맵 경로에서는 C1·C2만 충족됨을 분석하였다.

한편 본 분석을 통해 표준의 적용 범위에서 비롯되는 개선 과제를 다섯 가지로 도출하였다. 첫 번째 과제는 국가공인 규격 저장소의 구축과 노드 검정 대상에 KS X 3286을 추가하는 것이며, 두 과제는 함께 추진되어야 한다. 이어서 모드버스 TCP 환경의 동적 주소 할당, 발행-구독형 프로토콜(MQTT, OPC UA 등)에 대한 메타데이터 매핑 부속서, 기기 수준 메타데이터와 플랫폼 수준 공통 수집 데이터 규격(SPS-X KOAT-0009-7470) 간 매핑 규칙, 보안 프로파일과 장애 대응 절차의 보완을 과제로 제시하였다.

본 연구의 결과는 스마트팜 기자재 제조업체에게는 표준 적용의 계층별 이행 경로를, 정책 당국에게는 표준이 정해지지 않은 영역의 제정 우선순위를 제시한다는 점에서 의의가 있다. 본 논문의 한계는 다음과 같다. 첫째, 표준 문서에 근거한 분석으로 실험을 수반하지 않았다. 둘째, 다섯 조건은 IEEE 1451의 TEDS와 ISOBUS의 P&P 요건에 대응되나 국내 표준의 규정에서 도출하였다. 셋째, 분석 대상은 시설원예의 표준 10건으로, 노지·축산 분야와 생육 데이터·농업용 로봇 표준은 포함하지 않았다. 넷째, 분석은 각 표준의 현행판과 2026년 사업 지침을 기준으로 하므로 이후 개정에 따라 결과가 달라질 수 있다. 다섯째, 전환 비용과 보안 위협은 정성적으로 논의하였으며 정량화하지 않았다. 향후 연구로는 KS X 3286 자동 등록 절차를 구현한 시제품과 기존 센서·구동기 노드를 이용하여 디폴트 레지스터 맵 경로와 자동 등록 경로의 등록 성공률, 등록 소요 시간, 데이터 정합성, 장비 교체 시 관리자 작업 시간을 실험으로 비교하고, 생육 정보 메타데이터 표준과의 연계를 통해 환경-생육 융합 데이터셋의 구축 방법론으로 확장하는 것을 계획하고 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Cooperative Research Program for Agriculture Science and Technology Development (RS-2026-25509723), Rural Development Administration, Republic of Korea.

REFERENCES

[1] J. U. Lee, J. H. Hwang, and H. Yoe, "Trends and Development Directions of Agricultural ICT Convergence Technology," Information and Communications Magazine, The Korean Institute of Communications and Information Sciences, Vol. 31, No. 5, pp. 54-60, Apr. 2014. (in Korean)

[2] Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), "Smart Farm Korea - Smart Farm Distribution and Innovation Valley Policy," *https://www.smartfarmkorea.net*

[3] S. J. Kim and H. Yoe, "Trend and Standardization of Smart Farm Technology," The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, Vol. 47, No. 11, pp. 1965-1973, Nov. 2022. DOI: 10.7840/kics.2022.47.11.1965

[4] J. H. Min and J. Y. Park, "Technology and Standardization Trends on Smart Agriculture," Electronics and Telecommunications Trends, Vol. 33, No. 2, pp. 77-85, Apr. 2018. DOI: 10.22648/ETRI.2018.J.330209 (in Korean)

[5] Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), "2026 Smart Agriculture Promotion Implementation Plan," pp. 8, 17, Nov. 2025. *https://www.mafra.go.kr/bbs/home/791/594105/download.do* (in Korean)

www.kci.go.kr

[6] Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), "2026 Implementation Guidelines for Agriculture, Food and Rural Affairs Programs," No. 129 Smart Farm ICT Convergence Dissemination (Facility Supply), pp. 257-258; No. 284 Smart Farm ICT Equipment National Standard Dissemination Support, pp. 536-537, Jan. 2026. *https://www.mafra.go.kr/bbs/home/795/576799/artclView.do* (in Korean)

[7] Korea Agriculture Technology Promotion Agency (KOAT), "Supported Equipment - Smart Farm ICT Equipment National Standard Dissemination Support Program," *https://www.smartfarm-standard.kr/main/menu?gc=1128CGDT* (in Korean)

[8] KS X 3265, "Actuator Interface for Smart Greenhouse," National Radio Research Agency, Korea, 2022.

[9] KS X 3266, "Sensor Interface for Smart Greenhouse," National Radio Research Agency, Korea, 2022.

[10] KS X 3267, "RS485-based Modbus Interface between Sensor/Actuator Nodes and Greenhouse Integrated Controller for Smart Greenhouse," National Radio Research Agency, Korea, 2022.

[11] KS X 3288, "RS485-based Modbus Interface between Greenhouse Integrated Controller and Nutrient Solution Supplier Node for Smart Greenhouse," National Radio Research Agency, Korea, 2022.

[12] KS B 7958, "Smart Greenhouse - Modbus Interface based on Transmission Control Protocol (TCP) between Nodes and Greenhouse Integrated Controller," Korean Agency for Technology and Standards, Korea, 2024.

[13] KS X 3268, "Actuator Metadata for Smart Greenhouse," National Radio Research Agency, Korea, 2022.

[14] KS X 3269, "Sensor Metadata for Smart Greenhouse," National Radio Research Agency, Korea, 2022.

[15] KS X 3286, "RS485/MODBUS-based Smart Greenhouse Node/Device Registration Procedures and Description Specification," National Radio Research Agency, Korea, 2022.

[16] KS B 7952, "Agricultural Irrigation Equipment - Nutrient Solution Supplier - General Requirements," Korean Agency for Technology and Standards, Korea, 2022.

[17] KS B 7955, "Smart Greenhouse - Nutrient Solution Supplier - Control Information and Data Collection Requirements," Korean Agency for Technology and Standards, Korea, 2022.

[18] SPS-X KOAT-0009-7470, "Smart Farm Collection Data Specification for Protected Horticulture," Korea Agriculture Technology Promotion Agency (KOAT), Korea, Apr. 2022. (in Korean)

[19] SPS-X KOAT-0006-7468, "Smart Greenhouse Crop Growth Information Metadata for Fruit Vegetables (Eggplant, Pepper, Mini Cucumber, Cherry Tomato, Cucumber, Paprika, Strawberry, Melon, Oriental Melon)," Korea Agriculture Technology Promotion Agency (KOAT), Korea, Apr. 2022. (in Korean)

[20] SPS-B KOAT 0031-7595, "Smart Greenhouse - Agricultural Robots - Part 1: Vocabulary and Classification," Korea Agriculture Technology Promotion Agency (KOAT), Korea, Feb. 2024. (in Korean)

[21] TTAK.KO-10.1587-Part3, "Test Requirements and Methods of Agricultural Robot for Smart Greenhouse - Part 3: Crop Harvesting Device (Tomato)," Telecommunications Technology Association (TTA), Korea, Dec. 2025. (in Korean)

[22] IEEE Std 1451.0-2007, "IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators - Common Functions, Communication Protocols, and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats," IEEE, Sep. 2007. DOI: 10.1109/IEEESTD.2007.4338161

[23] J. Rita, J. Salvado, H. da Rocha, and A. Espírito-Santo, "A Comprehensive Review of IoT Standards: The Role of IEEE 1451 in Smart Cities and Smart Buildings," Smart Cities, Vol. 8, No. 4, Article 108, Jun. 2025. DOI: 10.3390/smartcities8040108

[24] ISO 11783-1:2017, "Tractors and Machinery for Agriculture and Forestry - Serial Control and Communications Data Network - Part 1: General Standard for Mobile Data Communication," ISO, Dec. 2017.

[25] S. Brodie, T. Oksanen, and H. Auernhammer, "Buzzword ISOBUS," Informatik Spektrum, Vol. 46, No. 1, pp. 46-50, Feb. 2023. DOI: 10.1007/s00287-022-01518-4

[26] ISO/IEC 30141:2024, "Internet of Things (IoT) - Reference Architecture," ISO/IEC, 2024.

[27] F. Abou-Mehdi-Hassani, A. Zaguia, D. Ameyed, H. Ait Bouh, and A. Mkhida, "eSMARTGreen (ESG): A Scalable IoT-Based Architecture for Multi-Greenhouse Management," Sustainable Computing: Informatics and Systems, Vol. 47, Article 101152, Sep. 2025. DOI: 10.1016/j.suscom.2025.101152

[28] IEC 62541-1:2025, "OPC Unified Architecture - Part 1: Overview and Concepts," IEC, 2025.

[29] ISO/IEC 20922:2016, "Information Technology - Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) v3.1.1," ISO/IEC, 2016.

[30] oneM2M, "TS-0001 Functional Architecture," V4.15.0 (published as ETSI TS 118 101 V4.15.0), Sep. 2022. *https://www.onem2m.org*

[31] ETSI GS CIM 009 V1.9.1, "Context Information Management (CIM); NGSI-LD API," ETSI, Jul. 2025. *https://www.etsi.org*

[32] Foundation of Agri. Tech. Commercialization and Transfer (FACT), "A Study on the Expansion and Advancement of Smart Farm ICT Equipment Standards," Research Report PJ0153702020, Rural Development Administration (RDA), 2021. *https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO202200009094* (in Korean)

[33] C. Han, S. Baek, N. Kwon, Y. Kim, N. Bae, and D. Kang, "Development for Verification System of Agricultural Wind

www.kci.go.kr

Speed & Direction Sensor," The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, Vol. 47, No. 10, pp. 1716-1723, Oct. 2022. DOI: 10.7840/kics.2022.47.10.1716 (in Korean)

[34] J. Y. Kim, "A Virtualized DUT-in-the-loop Test Harness and a Differential Conformance-judgment Methodology for Standards Certification of Greenhouse Integrated Controllers," Precision Agriculture Science and Technology, Vol. 8, No. 2, pp. 172-183, Jun. 2026. DOI: 10.22765/pastj.20260014

[35] R. Gutierrez, W. Villegas-Ch, and J. Govea, "Modular Middleware for IoT: Scalability, Interoperability and Energy Efficiency in Smart Campus," Frontiers in Communications and Networks, Vol. 6, Article 1672617, Sep. 2025. DOI: 10.3389/frcmn.2025.1672617

[36] Modbus Organization, "MODBUS Application Protocol Specification V1.1b3," 2012. *https://www.modbus.org*

Authors



Byeongbeom Kang received the B.S., M.S. and Ph.D. degrees in Information and Communication Engineering from Sunchon National University, Korea, in 2013, 2015 and 2025, respectively.

Dr. Kang joined Jeonbuk Technopark, Jeonju, Korea, in 2021, where he is currently a Senior Researcher. He is interested in smart agriculture, ICT convergence, and standardization of smart farm equipment.



Hyeok Ki received the B.S. degrees in Agricultural Economics and English Language and Literature from Jeonbuk National University, Korea, in 2022. He joined the Smart Agriculture Headquarters at the Korea Agriculture Technology Promotion Agency (KOAT), Iksan, Korea, in 2022, where he is currently a Researcher in charge of the development and establishment of smart farm standards. He also serves as a delegate to ISO/TC 23/SC 19 and ISO/TC 347, and as a member of TTA PG426. He is interested in smart agriculture, standardization, and agricultural data policy.



Cheolwoo Han received the B.S., M.S. and Ph.D. degrees in Bio-Industrial Machinery Engineering from Gyeongsang National University, Korea, in 2010, 2014 and 2019, respectively.

Dr. Han joined the Department of Agricultural Bio-System at Korea Polytechnic Colleges Jeonbuk Campus, Gimje, Korea, in 2023, where he is currently a Professor. He is interested in smart agriculture, agricultural automation, and standardization.



Donghyeon Kang received the B.S., M.S. and Ph.D. degrees in Agricultural Machinery Engineering from Gyeongsang National University, Korea, in 2001, 2003 and 2006, respectively, and the Ph.D. degree in Agricultural Science (Field Robotics) from Kyoto University, Japan, in 2008. Dr. Kang joined the Department of General Education at Korea National University of Agriculture and Fisheries, Jeonju, Korea, in 2020, where he is currently a Professor. He is interested in smart agriculture, agricultural automation, and standardization.

www.kci.go.kr