

특집논문 (Special Paper)

방송공학회논문지 제26권 제4호, 2021년 7월 (JBE Vol. 26, No. 4, July 2021)

<https://doi.org/10.5909/JBE.2021.26.4.398>

ISSN 2287-9137 (Online) ISSN 1226-7953 (Print)

농·축산 산업을 위한 디지털 트윈 아키텍처 및 세부 기술 구현에 관한 연구

정 득 영^{a)}, 김 세 한^{b)*}, 이 인 복^{c)*}, 여 욱 현^{c)}, 이 상 연^{c)}, 김 준 규^{c)}, 박 세 준^{c)}

A Study on the Implementation of Digital Twin Architecture and Detailed Technology for Agriculture and Livestock Industry

Deuk-Young Jeong^{a)}, Se-Han Kim^{b)*}, In-Bok Lee^{c)*}, Uk-Hyeon Yeo^{c)}, Sang-Yeon Lee^{c)},
Jun-Gyu Kim^{c)}, and Se-Jun Park^{c)}

요 약

코로나-19 이후 세계 식량 부족 인구가 1억 3천만 명에서 2억 7천만 명으로 2배 이상 증가했다. 여기에 기후변화 등 식량 산업과 관련된 다양한 이슈들이 생겨나는 가운데 농·축산 분야의 중요성이 더욱 높아지고 있다. 특히 현장에서 발생하는 데이터의 활용에는 여전히 어려움을 겪고 있다. 본 논문에서는 단편적 분석 중심의 데이터 활용의 한계 및 디지털 트윈의 필요성을 설명하고, 디지털 트윈 기술의 적용을 통해 농·축산 생산 분야에 적합한 아키텍처 및 필요한 기술을 제안하였다. 시설원예, 축산 등에 지능정보 융합 기술을 접목하여 노동력 절감과 생산성 향상, 개인화된 소비, 운송, 유통 등 가까운 미래에 사용될 수 있는 디지털 트윈 기반의 서비스도 제안하였다.

Abstract

Since COVID-19, the world's food shortage population has more than doubled from 130 million to 270 million. In addition, as various issues related to the food industry such as climate change arise, the importance of agriculture and livestock is increasing. In particular, it is still difficult to utilize data generated in these field. Therefore, the objective of this study was to explain the limitations of using data based on fragmentary analysis and the necessity of Digital Twin. The additional objective was to propose an architecture and necessary technologies of a Digital Twin platform suitable for agricultural and livestock. It also proposed a Digital Twin-based service that could be used in the near future, such as labor reduction, productivity improvement, personalized consumption, transportation, and distribution by incorporating intelligent information convergence technology into facility horticulture and livestock farming.

Keyword : Digital Twin, Smart Farm, Federation, Architecture, Agriculture & Livestock

1. 서론

디지털 트윈은 ICT 요소 기술(IoT, Cloud, Bigdata, AI 등)간 융합된 형태의 복합 기술로써, ICT 융합 분야의 이해가 필요하다. ICT 융합 분야는 지능정보기술 등 다양한 ICT 요소 기술을 융합하여 미래사회 문제에 선제적으로 대응하고, 쏘 산업의 ‘디지털 전환(Digital Transformation)’을 이끄는 사람을 중심으로 한 혁신적인 新 융합 기술·서비스 구현을 목표로 하는 ‘인간을 위한’ 도구로써, 기술 중심(Technology Driven)이 아닌 인간의 편리하고 안전한 삶과 사회 전반의 고민과 과제를 해결하는데 이바지하는 사람 중심(Human Driven)의 서비스를 목표로 한다. ICT R&D 기술로드맵에서도 ICT 융합 기술을 초개인화·초자동화·초연결화로 변화하는 미래사회에서 모두의 지속 가능한 삶을 제공하기 위한 ICT 기술 간 융합과 전통 산업의 디지털 전환 등을 통해 혁신적인 新 산업·서비스를 창출하는 기술로 정의하였다^[1]. 이러한 융합 서비스를 구현하는 기술로서 디지털 트윈 기술이 부각되고 있으며, 특히 디지털 트윈 기술은 현실 세계에서 발생하는 다양한 문제 해결을 위해 필요한 시간, 비용, 공간, 정보의 물리적 한계를 극복 가능케 하는 미래지향적 새로운 비즈니스 모델로 재창출이 가능하다. 즉, 디지털 트윈이란 현실 세계의 물리적 대상(사람, 사물, 공간, 시스템, 프로세스

등)을 디지털 세계의 디지털 대상으로 복제하여, 현실 세계의 문제 해결, 또는 수정 및 개선 등을 위한 다양한 모의를 디지털 세계에서 실행하여, 최적의 해답을 찾아 현실 세계에 적용함으로써 보다 안전하고 효율적인 현실 세계 구축에 필요한 “디지털 기술 간 융합된 기술 플랫폼”이라고 볼 수 있다^[2]. 최근 디지털 트윈이 주목받는 이유로는 전문가뿐만 아니라 일반인도 비교적 쉽게 접근 가능한 숫자, 도표, 2D/3D, VR/AR/XR 등의 기술을 통해 가시화하는 기술의 발전과 빅데이터·인공지능 등 데이터의 중요성에 대한 새로운 인식과 이를 처리하기 위한 기술적 진보의 영향이 크다. 디지털 트윈 기술을 적용하기 위해서는 ①가상화, ②동기화, ③모델링 & 시뮬레이션, ④연합, ⑤서비스 등 5가지 핵심요소 기술에 대한 이해와 디지털 트윈이 적용되는 응용 도메인에 대한 전문적인 지식 등 두 가지 조건 성립되어야 가능하다^[2].

이러한 관점에서 농·축산처럼 다양한 요소들이 상호 간 직·간접적 영향을 미치는 복잡한 환경에서 디지털 트윈 기술을 적용하는 것은 매우 어려운 것이 현실이다. 생산·가공·유통·소비 부분과 환경오염·에너지·저탄소·질병 등 현안 해결 부분, 노동력 절감·생산성 최적화 부분 등 고려해야 하는 요소도 다른 도메인에 비해 무척 다양하고 복잡하다. 디지털 트윈 기술의 적용 범위를 살펴보면 시설원에 시설, 장치, 작물, 인력의 가상화를 통해 작물·농작업의 모델링, 질병 방어 시스템, 온실의 모델링 및 제어, 정식, 수확, 포장, 드론, 청소 등 로봇 자동화, 온실 내 에너지 등 효율화 및 교육 시스템 등에 활용이 가능하고 스마트 축사의 경우 축사를 구성하는 시설, 장치, 동물 행동, 인력 등의 가상화 및 모델링을 통한 시뮬레이션 및 현장 제어, 인수 공통질병 방어 시스템, 동물 행동 및 환경에 따른 사양관리, 급이기, 청소 등 축산 로봇 자동화, 공기 질, 에너지 등 효율화, 축산 교육 시스템 등에 활용이 가능하다.

본 연구에서는 농·축산 생산 분야에 디지털 트윈 기술의 적용 가능성에 대해 살펴본다. 이를 위해 세부적으로 2장에서는 지금까지 제안된 디지털 트윈 아키텍처에 관해 설명하고 3장에서는 농·축산 분야에서 디지털 트윈이 필요한 이유 및 현장에 적용 가능한 디지털 트윈 아키텍처 및 세부 기술을 제안한다. 4장에서는 디지털 트윈 기술의 도입에 따른 서비스와 예상되는 변화를 논한다.

a) 정보통신기획평가원(Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation)
b) 한국전자통신연구원(Electronics and Telecommunication Research Institute)
c) 서울대학교(Seoul National University)
‡ Corresponding Author : 김세한(Se-Han, Kim)
E-mail: shkim72@etri.re.kr
Tel: +82-42-860-6196
ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2565-7186
‡ Corresponding Author : 이인복(In-Bok Lee)
E-mail: iblee@snu.ac.kr
Tel: +82-2-880-4586
ORCID:https://orcid.org/0000-0002-0401-7657

※ 이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2018-0-00387, 축산질병 예방 및 통제 관리를 위한 ICT 기반의 지능형 스마트 안전 축사 기술개발).

※ This work was supported by Institute for Information & communications Technology Promotion grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2018-0-00387, Development of ICT based Intelligent Smart Welfare Housing System for the Prevention and Control of Livestock Disease).

· Manuscript received May 26, 2021; Revised July 5, 2021; Accepted July 5, 2021.

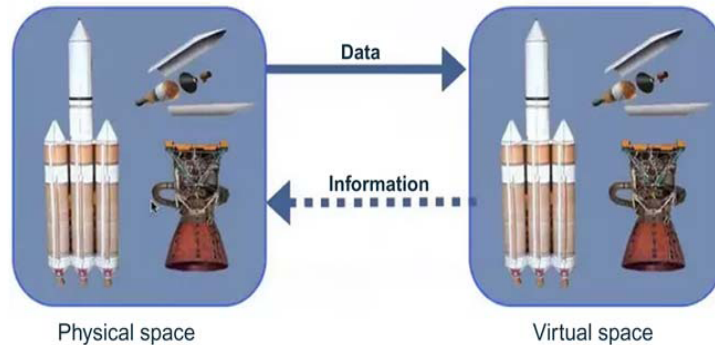


그림 1. 3차원 디지털 트윈의 개념
Fig. 1. Concept of 3-dimensional digital twin

II. 디지털 트윈 아키텍처

최근 다양한 응용 분야의 특성에 따라 디지털 트윈에 대한 구현 방법이 논의되고 있으며, 이에 따른 개념 모델 또한 다양한 형태로 발전되고 있다. [그림 1]과 같이 2014년 마이클 그리브스(Michael Grieves)박사가 제안한 3차원 디지털 트윈은 ①물리적 공간의 물리적 실체, ②가상 공간의 가상 실체, ③물리적 실체와 가상 실체를 함께 연결하는 데이터와 정보의 연결로 구성되며, 항공기, 레이더 및 관련 기반 시설과 같은 물리적 실체는 기능을 포함하여 존재한다. 물리적 공간에서 특정 임무를 수행하고 실제 출력을 생성할 수 있다. 가상 실체는 기하학적 치수, 물리적 특성 및 행동 등을 포함한 다른 관점에서 물리적 대응물을 설명하는 일련의 모델로 구성되며, 실시간 동기화를 기반으로 충실한 매핑 및 높은 결합도로 실제적 수명(Life Cycle)을 동반하는 디지털 거울(Mirror)로 존재한다. 부품을 구성하는 모듈 간 상호작용은 연결을 통해 활성화된다. 한쪽에서는 물리적 엔티티의 실시간 데이터가 수집되어 모델 업데이트 및 보정을 위해 가상 복제본으로 전송되고, 다른 한쪽에서는 가상 시뮬레이션에서 생성된 중요한 정보가 물리적 공간에 다시 공급되어 해당 물리적 엔티티를 최적화한다^[3]. 하지만 이런 방식은 새로운 애플리케이션, 모델링 객체, 다양한 서비스 등의 수용이 불가능하다. 이를 해결하기 위해 데이터와 서비스가 추가된 5차원 방식의 디지털 트윈이 제안되었다^[4].

[그림 2]는 5차원 디지털 트윈에서는 서비스와 데이터를 위한 8가지 기본 규칙을 정의하고 있다. 첫 번째로 데이터와 지식은 디지털 트윈을 위한 모델링의 가장 기초적인 구

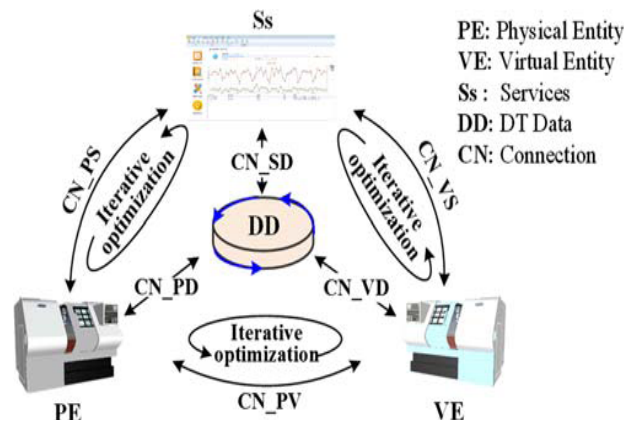


그림 2. 5차원 디지털 트윈의 개념
Fig. 2. Concept of 5-dimensional digital twin

성으로 기존 지식이 모델링 프로세스 중에 준수해야 하는 기본 규칙을 제공하며, 디지털 트윈에 새로운 지식을 제공하고 초기 상태의 가상 모델, 서비스 및 데이터 구조를 지속해서 보정하려면 실시간 데이터를 지속해서 제공되어야 한다. 두 번째는 이기종 하드웨어, 다기능 모델, 다중 소스 데이터, 다양한 서비스 등을 포함하게 된다. 이러한 상황에서 모델링 효율성을 개선하기 위해 모듈화는 디지털 트윈 구성을 분리할 수 있고, 재조합하여 유연성과 재사용성이 가능해야 한다. 즉 다양한 환경에 따라 분해 가능해야 하고, 서로 다른 애플리케이션에 대해 부분 컴파일 가능한 구조여야 한다. 세 번째는 물리적 실체에 대한 신뢰성을 유지하고 버전에 따른 다양한 서비스를 제공하기 위해 복잡한 구조와 메커니즘을 가진 여러 모델로 구성될 수 있다. 이로 인해 실시간 계산과 시뮬레이션이 어려워질 수 있는 문제

를 보완하기 위해 짧은 전송 시간, 빠른 실행 속도 및 실시간 성능을 달성하기 위한 경량형 모델의 지원이 필요하다. 네 번째는 데이터, 지식, 모델, 서비스 등을 포함한 모든 자원을 중앙에서 저장하고 처리하면 전송, 계산 사용 및 유지 보수가 어렵기 때문에 계층형 구조가 필요하다. 이는 엣지 클라우드 기술을 통해 정보와 자원의 비대칭형 구조를 지원함으로써 서로 다른 계층으로 분산 처리될 수 있다. 다섯 번째는 서비스 소프트웨어 및 데이터베이스 구성에 있어 서로 다른 인터페이스 및 통신 프로토콜을 사용할 수 있다. 이는 모듈 통합, 통합 데이터 교환, 정보 식별 및 유지관리 등에 어려움을 발생시킨다. 이러한 서로 다른 구성요소 간의 신뢰성 있는 상호작용을 위해서 반드시 표준화가 필요하다. 여섯 번째는 디지털 트윈 플랫폼에 접근하는 일반 사용자는 모델링, 시뮬레이션, 데이터 통합과 같은 관련 분야에서 전문적인 지식이 없을 수 있음을 가정하여 쉽고 편리한 사용 도구를 제공하는 것이 필요하다. 일곱 번째는 외부의 다양한 모델, 서비스 및 도구 등과 통합할 수 있도록 개방형으로 구성되어야 한다. 이는 디지털 트윈 플랫폼이 다른 플랫폼이나 시스템과의 작업에 더 나은 호환성을 갖도록 하고 다른 플랫폼의 기능을 활용하여 기능을 추가할 수 있어야 한다. 마지막으로 불확실성, 역동성, 복잡한 환경에서 사용될 수 있도록 내부 구조의 일부의 변화를 통해 쉽게 변경 가능해야 한다.

디지털 트윈은 최근 다양한 분야에서 언급되고 있다¹²⁾.

하지만 실제 어떤 부가가치를 창출할 수 있는지, 그리고 명확하지 않은 생성과정, 업데이트 절차 및 많은 구축비용으로 인해 디지털 세계에서 비즈니스 모델을 창출하는데 어려움이 존재한다¹⁵⁾. 또한 디지털 트윈을 가시화 기술로 오해하고 있는 경우도 많으며, 실제 구축에 있어 물리적 현실 세계와 디지털 트윈 간 데이터 동기화, 모델링 및 시뮬레이션이 가능한 구조는 여전히 난해하기만 하다. 디지털 트윈 구현을 위해 다양한 응용 프로그램과 연동 가능한 아키텍처를 고민하는 것은 실제 설계에 있어 매우 중요하다.

Ⅲ. 농·축산을 위한 디지털 트윈 아키텍처 및 세부 기술

1. 디지털 트윈 필요성 및 범위

농·축산을 위한 디지털 트윈은 디지털 공간상에 가상의 팜(Plant 및 Animal)을 구축하고, 실제 팜과의 데이터 연동을 통해 환경·생육 관리에 필요한 다양한 시뮬레이션을 수행함으로써 최적의 팜 운영·생산 환경에 대한 예측 및 최적 제어 서비스를 제공하는 지능화 융합 기술을 의미한다. 디지털 트윈을 적용하면 시설원에 및 축사 등을 구성하는 사람, 생물, 시설, 환경, 기자재, 로봇 등의 실물 객체와 디지털

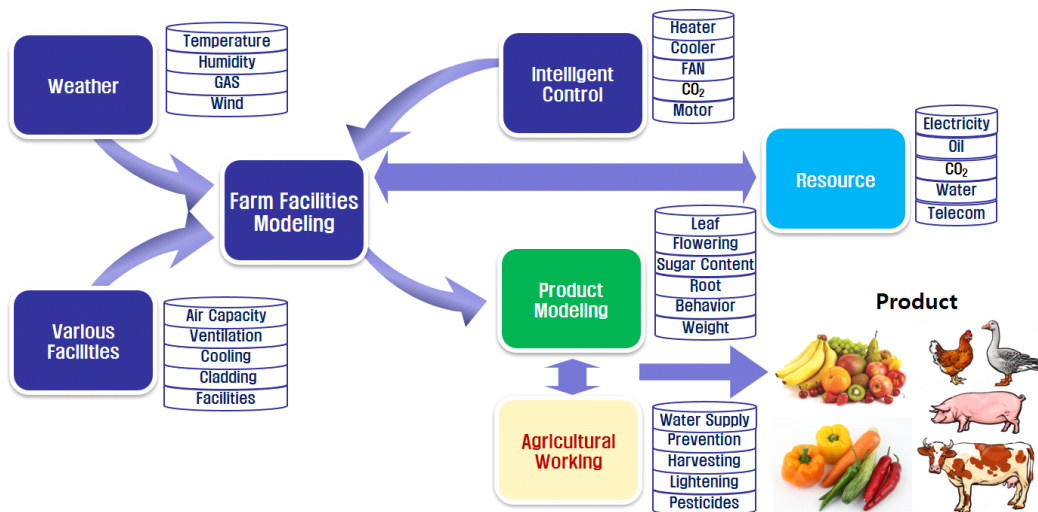


그림 3. 원예작물 및 축산의 모델링 및 시뮬레이션을 위한 필요 요소

Fig. 3. Necessities for modeling and simulation of horticultural crops and livestock

텔 객체 간의 정밀한 연동을 통해 생산, 유통, 가공, 에너지, 환경오염, 질병관리, 저탄소 등의 분야와 각 도메인 간 연결을 통한 현장 문제 해결을 위한 서비스를 제공할 수 있다. [그림 3]은 농·축산 분야에서 디지털 트윈의 적용이 필요한 이유를 설명하기 위한 것으로 생산 과정은 어느 한 가지 요소에 의해 결정되는 것이 아니라 매우 복잡한 메커니즘을 통해 이뤄진다. 지금까지의 연구들은 대부분 특정 요소를 중심으로 최적화되거나 예측하는 방법을 중심으로 이뤄져 왔다. 하지만 살아 있는 생물을 다루는 농·축산 분야는 매우 다양한 요소들의 복합체로 모델링과 시뮬레이션이 매우 어렵다. 딸기, 토마토 등의 원예작물이나 돼지, 닭, 소 등의 산업동물을 재배하고 키우는 시설(온실, 축사), 시설 내·외부의 환경 및 제어정보, 작물/동물의 모델링 정보, 농민의 작업, 재배에 필요한 요구 자원 등의 생산 데이터 등의 복합적 상호 역할 관계가 이뤄진다. 온실과 축사 등 제어 대상이 되는 시설별 모델링을 위해서는 시설 내부에 직접적 영향을 줄 수 있는 국지적 외부 환경 정보(온습도, 일사량, 풍향/풍속 등)와 시설 내부의 환경에 영향을 주는 피복, 구조, 재배 및 사육 시설(배드 시설, 환풍-배기팬, 보광, 냉난방기, 분무 등)에서 자동으로 수집되는 시공간 데이터에 대한 분석이 필요하다. 또한 환경 구성 및 영양 공급을 위해 사람에 의한 수동 제어의 정보와 컴퓨터에 의한 복합 환경 제어에 대한 정보가 필요하다. 원예작물의 경우 생산에 기본이 되는 입면적·엽수, 개화/화방수와 시기, 근권(根圈) 정보, 생산량, 생산물의 품질 및 생리장해 병해충이 중요하며, 동물의 경우 다양한 사양 정보, 질병 정보, 개체의 영양 정보, 번식, 증체량, 행동 분석 등 사육 환경 변화에 따른 모델링 정보가 있어야 한다. 이뿐만 아니라 현장에서 사람에 의한 품질관리 및 생산량 조절에 필요한 수작업 또는 농기계 등을 통해 이뤄지는 정보가 작물이나 동물의 모델링 정보와 연동을 통한 분석도 함께 이뤄져야 한다. 안전한 먹거리와 적정량의 공급을 위해 재배농가, 재배/생산 면적과 재배/개체 수, 농약/백신 등 방제정보, 유통 정보, 소비자 소비 정보 등이 함께 모델링 되어야 정확한 예측과 최적의 제어가 가능할 것이다.

2. 농·축산분야 적용을 위한 디지털 트윈 아키텍처

농·축산을 위한 디지털 트윈 플랫폼의 효율적 구현을 위

해서는 현장 중심의 정형, 비정형 데이터의 구성뿐만 아니라 시스템을 구성하는 구조에 대한 이해가 필수이다. [그림 4]와 같이 농·축산 분야에서 디지털 트윈의 적용을 위해서는 현장을 구성하는 실제 농장(Physical World), 농장을 위한 운영 시스템(Edge World), 다양한 실시간 정보의 모델링, 분석 및 예측을 위한 디지털 트윈 플랫폼(Virtual World)으로 구성된다. 농장을 위한 운영 시스템 및 농장 내의 시스템 구성은 한국의 정보통신 단체표준에 정의되었다^[6]. 농장 내 운영 시스템은 생산 시설 내에서 센서 노드를 통하여 다양한 센싱 정보를 수집하고 이를 활용해 생산 환경을 조성하는 설비기기의 제어 노드를 통해 운영이 가능한 시스템으로 생산 환경 관리 및 제어와 같은 서비스 기능 제공이 가능하다. 디지털 트윈의 적용을 위한 농장의 운영 시스템(FARM Manager)은 농장에서의 영상, 제어, 센서, 관리 등의 로컬 정보의 데이터베이스를 수집하며, 이를 가시화하고 자동으로 상황을 인식하기 위한 사용자 인터페이스를 갖는다. 디지털 트윈 플랫폼과의 실시간 데이터의 전달 및 비대칭적 데이터 교환을 위한 클라이언트 모듈을 포함한다. 또한 디지털 트윈 플랫폼에서 제공하는 다양한 예측 및 최적 정보를 기반으로 농장을 제어하기 위한 경량화된 제어 소프트웨어가 탑재되어야 하며, 원격으로 떨어진 다수의 농장에서 발생하는 다양한 형태의 실시간 데이터의 트래픽을 관리하기 위한 미들웨어가 탑재되어야 한다. 그리고 사용의 편리성을 모바일 단말을 통한 모니터링과 편의 중심의 원격 제어가 가능한 모바일 서비스용 앱(App)이 필요하다. 디지털 트윈 플랫폼은 다수의 농장 운영 시스템(FARM Manager)과의 실시간 인터랙션(Interaction)이 가능해야 한다. 또한 사용자 레벨에 따른 다양한 기능의 제공이 가능한 확장 가능한 구조여야 한다. 첫 번째 디지털 트윈의 사용자는 농장주와 작업자, 현장 컨설팅 관련자, 시스템 설계 및 개발자, 데이터 분석가 등 레벨에 따른 사용자 인터페이스의 제공이 가능해야 한다. 이를 위한 다양한 수준의 가시화 및 요구하는 품질의 데이터 제공이 가능한 형태여야 한다. 두 번째, 가상의 농장을 설계하고 구성하기 위한 가상 팜 관리 기능이 제공되어야 한다. 농장의 구성은 생산 목적 및 현장에 따라 매우 다양한 형태로 되어 있다. 또한 재사용성과 타 농장과 비교 분석을 위한 표준화된 포맷을 제공하는 농장 저작도구의 제공이 필요하다. 세 번째,

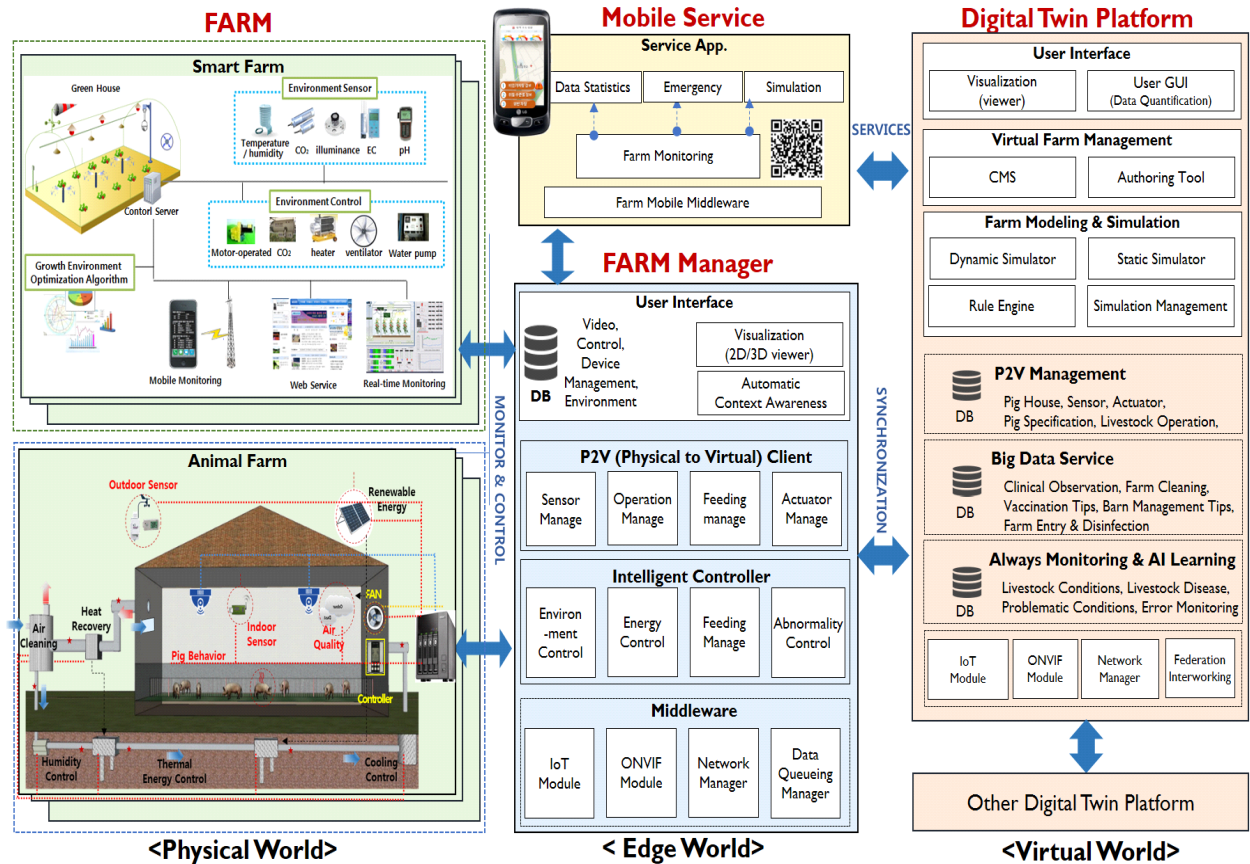


그림 4. 농·축산을 위한 계층적 디지털 트윈 아키텍처

Fig. 4. Architecture of hierarchical digital twin for agriculture & livestock

팜의 가상화는 농장의 신규 설계 및 구축, 기존 시설의 개보수, 구축된 시스템의 최적 운영 등이 고려되어야 한다. 신규 설계 및 구축 단계에서는 다양한 시설의 구성에 따른 시설 모델링, 내·외부 기상정보의 모델링, 제어 모델링, 작물 및 동물의 모델링, 작업자의 모델링 등이 고려되고 쉽게 이해가 가능한 통합적 모델링이 가능해야 한다. 특히 한번 구축되면 변경에 따른 큰 비용이 소모되므로 변경이 쉬운 형태의 구성도 함께 고려되어야 한다. 농가의 대부분은 이미 시설을 보유한 경우 많다. 하지만 실제 운영 과정에서 설계와 다르게 운영되는 경우가 많으며, 이에 따른 기존 시설의 변경을 고려한 모델링과 시뮬레이션 기능이 고려되어야 한다.

현장에서 기존의 시설을 개보수하는 경우 그에 따른 비용과 생산이 중단되는 점을 고려하였을 때 디지털 트윈 플랫폼을 통한 가상의 운영환경에서 시뮬레이션은 개보수에 따른

불확실성을 줄이는 데 필수적이다. 예를 들어 축사 내의 불안정한 대기 환경의 개선을 위해 배기팬을 추가하는 경우, 농장주는 높은 설치비용과 개선에 대한 불확실성으로 시설에 대한 투자를 망설일 수밖에 없다. 디지털 트윈 기술을 활용하면 배기팬 설치 전 가상의 시뮬레이션을 통해 현재 시설에서의 결과를 미리 예측해볼 수 있어 추가 시설투자에 따른 리스크를 최소화할 수 있다. 현장에 설치된 센서와 구동기의 운영은 에너지 최적화, 운영비용 최소화, 노동력 최적화, 생산성 최대화 등 다양한 목적의 모델링을 통한 시뮬레이션을 통해 현장의 최적제어가 가능해야 한다. 상기 목적의 모델링과 시뮬레이션을 위한 동적, 정적 시뮬레이터와 이를 농장 운영 시스템에 실시간으로 전달하기 위한 다양한 규칙 엔진 등의 제공이 가능해야 한다. 디지털 트윈 플랫폼은 농장 운영 시스템과 실시간으로 연계되며 재사용성과 다양한 서비스

스 제공을 위한 사용자별 P2V(Physical to Virtual) DB, 빅데이터 서비스, 상시 감시 및 다양한 학습 모델의 제공을 통한 예측 DB를 보유한다. 또한 기후, 유통, 에너지 등 농·축산업에서 중요한 또 다른 디지털 트윈 플랫폼과의 연함을 위한 인터페이스의 제공이 가능해야 한다.

3. 농·축산을 위한 디지털 트윈의 세부 기술

본 절에서는 앞에서 설명한 농·축산을 위한 디지털 트윈 플랫폼의 구현을 위한 세부 기술을 설명한다. 크게 5분야로 실제 물리적 농장을 컴퓨터 속의 가상의 세계로 구현하기

표 1. 농·축산을 위한 디지털 트윈의 세부 기술

Table 1. Detailed technologies of digital twin for agriculture and livestock

	Detailed Technologies
① Digital Virtualization	Space-time synchronization and Data classification preprocessing technology for the big, heterogeneous data generated by living things, facilities, climate, macro/micro environment, labor, robots, etc. comprising Greenhouses, Livestock, Outdoor, etc.
	Multi-dimensional visualization technology according to the characteristics of data acquired in greenhouses, barns, etc., and technology that expresses the relationship between data to be easily derived through the visualization of multi-dimensional data, multi-scale conversion, etc.
	Technology to distinguish, measure, and continuously track down the physical space, objects with technologies such as RFID-USN-IoT for tangible/intangible objects that greenhouse, livestock, etc.
	Virtual sensor technology that reduces the number of redundant sensors and data, improves sensor utilization and uses optimization algorithms for collected data to calculate poor environmental areas such as livestock and farmland cultivation that are difficult to measure in hardware.
② Digital Twin Synchronization	Space-time synchronization technology between physical objects such as living things, facilities, and environments, and digital objects created virtually on a computer.
	Technology that updates changed information in the real world in a limited amount of time with minimal resources, minimizing errors in the real world and virtual world for seamless modeling and simulation.
	Technology to minimize and optimize incomplete elements such as duplication, errors, delays, etc. of digital objects and collected data
	Data validation technology that detects and corrects errors in data and object information collected in the real world in real-time(timeliness)
③ Digital Twin Modeling & Simulation	Multiple modeling and physical simulation techniques, including simulations of fluids, structures, air, acoustics, thermodynamics, etc. for facilities and environments (material, air quality, water quality, space composition, climate, energy elements) of agricultural and livestock
	Technology to predict crop growth over time, animal behavior, worker behavior, changes in disease, etc. through modeling and simulation
	Technology that automatically models and simulates large amounts of historical data and knowledge based on big data and machine learning algorithms
	Proactive response to uncertainty through productivity and business efficiency, optimization prediction techniques for error probability and cost reduction, and simulations that reflect multiple physical phenomena in practice
④ Federated Digital Twin	Analysis, identification, and management system operation technology for joint collaboration between digital twin models possible in various agricultural and livestock fields, such as production, distribution, processing, and consumption
	Technology for generating and managing meta-data about the capabilities, etc. of various federations that make up different digital twin models
	Distributed technology for sharing agricultural and livestock data based on reliability/convenience of the digital twin in conjunction with block chain technology
	Purposeful life-cycle management techniques for collaborating with each other (creating, sharing, maintaining, renewing, scrapping, etc.) and digital twin role management technologies for multi-role and role-specific federations
⑤ Intelligent Digital Twin Services	Visualization service technology to express object information in various forms in order to provide agricultural and livestock services suitable for the purpose of use
	Life-cycle management technology that efficiently supports reliable history management of various agricultural and livestock resources (sensors, actuators, devices, systems, communication etc.) and the use of resources (models, algorithms, data tools, etc.) in the digital twin.
	Appropriate service search technology based on matching algorithms according to user's needs and Objective evaluation techniques for service time, cost, reliability, functional similarity, security, maintainability, etc.
	Digital twin service technology for managing potential obstacles and responding in advance to agricultural and livestock field support services, etc.

위한 “①디지털 가상화”, 물리적 세계와 가상 세계의 연결과 가상 세계 간 연결을 위한 “②디지털 트윈 동기화”, 실제 데이터를 기반으로 목적에 따른 모델링을 통한 분석 및 예측을 위한 “③디지털 트윈 모델링 & 시뮬레이션”, 디지털 트윈 간 연합을 위한 “④연합 디지털 트윈”, 지능화된 다양한 서비스를 위한 “⑤지능형 디지털 트윈 서비스” 기술 등이 요구된다. 세부 기술에 대한 정의는 [표 1]과 같다.

IV. 농·축산을 위한 디지털 트윈 플랫폼 서비스 및 변화

디지털 트윈 기반의 농·축산 서비스는 생산 시스템을 구성하는 다양한 기술 요소들의 가상화를 통한 다양한 모델링과 시뮬레이션을 할 수 있으며, 이를 통해 내·외부 환경 상태의 정밀 예측, 센서·구동기·기자재 등의 수명 예측, 장비 제어 및 관리, 정밀 가시화를 통한 사용자의 높은 이해도 향상 등의 서비스 제공이 가능하다. 또한 현장에서 시간적·비용적 이유로 불가능한 다양한 테스트가 가능하며, 디지털 트윈 서비스를 통해 농장을 원격에서 모니터링하고, 수동·자동으로 단순·복합 제어 관리하는 운영 시스템과의 실시간 연동을 통해 지능화된 관리 서비스의 제공이 가능하다. 농업과 축산, 서로 다른 작물 및 축종과의 연계, 생산 외에 가공, 유통, 소비 등 다른 영역의 디지털 트윈 플랫폼과의 연합(Federation)을 통해 새로운 서비스 창출도 가능하다. 최종적으로 농장경영 의사결정에 필요한 보고 자료 조회 및 사전 예측 결과를 통해 농장의 생산, 경영의 극대화를 가능하게 한다.

디지털 트윈 기술의 도입은 현장에 도입되는 센서, 제어기 등의 ICT 장비뿐만 아니라 노동 편리성과 생산성을 위해 구축된 기자재의 고장진단과 수명 예측을 통해 유지보수의 편리성과 불필요한 장비의 도입 방지를 통한 무분별한 투자를 막는 효과도 가져올 수 있다. 온실이나 축사의 내부 환경은 대부분 고온다습하거나 장비의 수명을 급격하게 줄이는 분진 및 가스를 포함하고 있어 그 수명이 일반적인 대기 환경에 비해 짧다. 이는 농민뿐만 아니라 시스템을 공급하는 기업에도 적절한 교체 시점과 A/S가 가능하게 하여 첨단 기술의 적용에 따른 부작용을 감소시킬 수 있다.

현재 대부분의 국내 농가는 직·간접적인 온·오프라인 컨설팅 서비스를 활용하고 있으나 그 신뢰성에는 대부분의 구심을 갖는 경우가 많다. 예를 들어 축사 내 공기 순환과 환기량은 온습도와 암모니아 조절에 절대적 영향을 미치며, 이를 고려한 축사의 설계, 환기 시스템의 구축 및 운영이 중요하다^{7)[8][9]}. 잘못된 운영은 생산하는 가축에 직접적 영향을 미치게 되고 이는 농가의 수익에 밀접한 영향을 준다. 하지만 농가 입장에서는 공기 유동학적 분석을 통한 환기 메커니즘, 가스 및 열의 순환, 질병의 원인 등을 사전에 확인할 방법이 없으며, 여기에 사용되는 에너지 부하 등에 대한 이해가 매우 어렵다. 디지털 트윈 기술이 적용되면 입체적인 가시화를 통해 쉽게 이해할 수 있으며, 객관적 시뮬레이션 데이터를 통해 효과적 운영이 가능하다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 눈에 보이지 않는 공기에 대한 거동 예측과 에너지 효율 측면에서 설명 가능한 도구를 제공함으로써 온·오프라인 농가 컨설팅 서비스뿐만 아니라 전문가 양성의 교육 자료로 활용할 수 있다^{10)[11][12]}.

농·축산 산업은 전 세계적으로 탄소 배출과 수질오염을 발생하는 주요 산업 중 하나이다. 생산과정에서의 폐기물, 양액으로 인한 부영양화, 축산 악취, 다양한 질병(인수공통전염병 등)의 원인이 된다. 한국의 경우 농가의 수는 감소하고 있지만 증가하는 수요를 만족시키기 위하여 농·축산 시설물이 대형화되고 있는데 특히 축사로 이로 인한 악취 등으로 인해 주변 민가의 민원이 증가하고 있는 실정이다^{13]}. 이러한 현장 문제 해결은 디지털 트윈 기술의 다양한 분석 방법 및 사전 예측 기능을 활용하여 악취 등 오염 원인에 대한 객관적인 데이터 제공과 함께 조치 후 부작용을 최소화함으로써 지역 주민 간의 갈등을 해소하는 데 도움을 줄 수 있다.

농·축산 산업은 고령화 및 노동력 부족으로 인한 어려움이 있으며, 이를 극복하기 위해 시스템 자동화와 데이터 중심의 영농을 통한 선진화를 추진하고 있다. 특히 기후와 먹거리가 다른 해외 시스템 도입의 한계로 인해 한국형 스마트팜 기술의 확보는 더욱 중요하다. 디지털 트윈 플랫폼은 3장 1절에서 설명한 것과 같이 매우 복잡한 형태의 농업 생산에 있어 경험적 생산에서 예측 가능한 복합 데이터 분석 중심의 생산을 가능하게 한다.

스마트 팜은 기존 경험 중심 농업과 ICT 기술의 융합을

통해 생산성을 향상하기 위한 농업방식이다. 특히 원격에서 제어가 가능한 1세대 수준의 기술이 현장에서 보급되고 있으나 투자 대비 효과에 있어서 부정적인 의견도 존재하는 게 현실이다. 디지털 트윈은 다양한 조건에 따른 매우 지능화된 방식의 생산을 가능하게 하고, 특히 단순한 원격 제어 수준에서 공간의 제약 없이 가상의 디지털 트윈에서 현실 세계 제어가 실시간으로 이루어져 무인화가 가능하도록 할 수 있다. 무인화는 결국 사람을 대신할 수 있는 로봇 관련 기술과의 융합을 통해 운영 관리에 필요한 인력·비용·시간 절감 효과가 가능할 때 그 효과가 나타날 것으로 판단된다. 현재 개발되고 있는 로봇 기술은 무인화보다 편리성 중심이지만 디지털 트윈 기술과의 연계를 통해 육안으로 확인이 불가하거나 위험성이 높은 작업을 실시간 모니터링하거나 가상공간에서 제어하여 사고 예방 및 피해 최소화가 가능하도록 할 수 있다.

디지털 트윈 플랫폼은 생산 분야뿐만 아니라 생산물의 가공 및 포장, 운송 및 소비 등과 연계된 스마트 시티, 스마트 환경 등 다양한 디지털 트윈 간 상호작용과 실시간 자율 협력을 위한 디지털 트윈 연합을 통해 디지털 트윈 모형 간 연계를 통한 새로운 비즈니스 모델로 발전할 것으로 예상된다. 특히 표준화된 공통 서비스 엔진 기술과 개방형 인터페이스를 통한 연합 디지털 트윈에서 신규 서비스가 생성될 수 있는 기술이 확보될 것으로 전망된다.

V. 결 론

디지털 트윈 기술은 응용 분야의 특성을 고려한 데이터 중심의 가시화, 모델링, 도메인 간 연합이 고려되어야 한다. 디지털 트윈의 장점은 시간과 비용 등 현장에서 검증 및 예측이 어려운 부분에 대한 기술적 해결을 통해 사용자에게 다양한 이해 능력을 키우는 데 큰 도움이 된다. 특히 농·축산과 같이 살이 있는 생물을 다루는 분야에서는 생물을 키우는 관련 시설, 내부 및 외부의 환경 정보, 사람의 작업 정보, 생물의 특성 등을 고려하여야 하며 이에 필요한 유의미한 결과 도출을 위해서는 상당한 시간이 소모되는 특징을 갖는다. 타 응용 분야에 비해 많은 시간이 걸리는 점과 비용 측면을 고려하면 반드시 디지털 트윈이 적용되어 현

실과 연계하여 사용되어야 한다. 본 논문에서는 이를 위해 적합한 아키텍처를 제안하였으며, 그에 필요한 세부 기술과 사용자에게 제공 가능한 서비스에 관해 설명하였다. 농·축산 분야에서 디지털 트윈 기술의 적용은 아직 초기 단계지만 활성화된 이후에는 로봇, 가공, 유통, 소비 등 농·축산 분야의 생태계 전반적으로 사용이 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌 (References)

- [1] Deuk-Young Jeong, Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP), ICT R&D Technology Roadmap 2025 (ICT Convergence, 2020)
- [2] Deuk-young Jeong, "Technical Definition of Digital Twin and Five-Level Model" OSIA S&TR Journal, ISSN 1738-9887 Vol. 34, No.2, pp.10-16, March 2021
- [3] Grieves, M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication; WhitePaper; NASA: Washington, DC, USA, 2014.
- [4] F. Tao, M. Zhang, Y. Liu, A.Y.C. Nee, "Digital Twin driven prognostics and health management for complex equipment", CIRP Annals Volume 67, Issue 1, 2018, Pages 169-172, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.055>
- [5] D. Adamenko et al., "Review and comparison of the methods of designing the Digital Twin," January 2020, Procedia CIRP 91:27-32 DOI:10.1016/j.procir.2020.02.146
- [6] TTAK.KO-06.0286, Requirements Profile for Environmental Control and Monitoring System in Greenhouse, TTA, 2012, Retrieved from <http://www.tta.or.kr>
- [7] Yeo, U. H., Lee, I. B., Kim, R. W., Lee, S. Y., & Kim, J. G. (2019). Computational fluid dynamics evaluation of pig house ventilation systems for improving the internal rearing environment. biosystems engineering, 186, 259-278.
- [8] Kim, R. W., Lee, I. B., Ha, T. H., Yeo, U. H., Lee, S. Y., Lee, M. H., ... & Kim, J. G. (2017). Development of CFD model for predicting ventilation rate based on age of air theory using thermal distribution data in pig house. Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, 59(6), 61-71.
- [9] Lee, S. Y., Lee, I. B., Kim, R. W., Yeo, U. H., Kim, J. G., & Kwon, K. S. (2020). Dynamic energy modelling for analysis of the thermal and hygroscopic environment in a mechanically ventilated duck house. biosystems engineering, 200, 431-449.
- [10] Kim, R. W., Kim, J. G., Lee, I. B., Yeo, U. H., Lee, S. Y., & Decano-Valentin, C. (2021). Development of three-dimensional visualisation technology of the aerodynamic environment in a greenhouse using CFD and VR technology, Part 2: Development of an educational VR simulator. Biosystems Engineering, 207, 12-32.
- [11] Kim, R. W., Kim, J. G., Lee, I. B., Yeo, U. H., & Lee, S. Y. (2019). Development of a VR simulator for educating CFD-computed internal environment of piglet house. biosystems engineering, 188, 243-264.

[12] Kim, J. G., Lee, I. B., Yoon, K. S., Ha, T. H., Kim, R. W., Yeo, U. H., & Lee, S. Y. (2018). A study on the trends of virtual reality application technology for agricultural education. Protected Horticulture and Plant Factory, 27(2), 147-157.

[13] Yeo, U. H., Decano-Valentin, C., Ha, T., Lee, I. B., Kim, R. W., Lee, S. Y., & Kim, J. G. (2020). Impact Analysis of Environmental Conditions on Odour Dispersion Emitted from Pig House with Complex Terrain Using CFD. Agronomy, 10(11), 1828.

저 자 소 개



정 득 영

- 2011년 : 서울과학기술대학교 공학석사
- 2011년 ~ 2014년 : 한국방송통신전파진흥원 차세대방송 PM실 주임연구원
- 2014년 ~ 현재 : 정보통신기획평가원 R&D 기획그룹 책임연구원
- 2019년 ~ 현재 : 서울대학교 박사과정
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-8466-3391>
- 관심분야 : 디지털 트윈, 농·축·수산 ICT, ICT 융합 플랫폼 및 응용 서비스, HCI



김 세 한

- 1998년 2월 : 한국항공대학교 컴퓨터공학
- 2000년 2월 : 한국항공대학교 통신공학 석사
- 2000년 1월 ~ 2000년 10월 : 삼성종합기술원 연구원
- 2006년 7월 : 충남대학교 컴퓨터네트워크 박사수료
- 2000년 10월 ~ 2016년 2월 : 한국전자통신연구원 농수산환경IT팀장, 사물감성융합연구실장
- 2018년 12월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 지능형시스템연구실장
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-2565-7186>
- 관심분야 : 디지털 트윈, 스마트 팜, ICT 융합, AI 및 클라우드 컴퓨팅, 사물인터넷서비스



이 인 복

- 1999년 ~ 2001년 : 일본 농업공학연구소 STA 특별연구원
- 2001년 ~ 2005년 : 농촌진흥청 농업공학연구소 농공연구사
- 2019년 : 국가농림기상센터 센터장
- 2019년 ~ 2021년 : 서울대학교 그린바이오과학기술연구원 원장
- 2005년 ~ 현재 : 서울대학교 농업생명과학대학 지역시스템공학과 교수
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-0401-7657>
- 관심분야 : 농공학, 농업시설환경, 농업 ICT, 가상현실, 머신러닝



여 옥 현

- 2016년 : 서울대학교 공학석사
- 2021년 : 서울대학교 공학박사
- 2021년 ~ 현재 : 서울대학교 농업생명과학연구원 연구조교수
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-5808-1294>
- 관심분야 : 농공학, 농업시설환경, 농업 ICT

저 자 소 개



이 상 연

- 2016년 : 서울대학교 공학석사
- 2016년 ~ 현재 : 서울대학교 농업생명과학대학 지역시스템공학과 박사과정
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-2622-8068>
- 주관심분야 : 농공학, 농업시설환경, 농업 ICT



김 준 규

- 2019년 : 서울대학교 공학석사
- 2019년 ~ 현재 : 서울대학교 농업생명과학대학 지역시스템공학과 박사과정
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-9429-2141>
- 주관심분야 : 농공학, 농업시설환경, 농업 ICT



박 세 준

- 2015년 : 서울대학교 공학석사
- 2015년 ~ 현재 : 서울대학교 농업생명과학대학 지역시스템공학과 박사과정
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-3747-2373>
- 주관심분야 : 농공학, 농업시설환경, 농업 ICT