

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2023.9.6.245>

JCCT 2023-11-30

고속 동기화를 위한 디지털트윈 개념 모델 설계

Designing Digital Twin Concept Model for High-Speed Synchronization

임채영*, 여채은**, 성호진***

Chae-Young Lim*, Chae-Eun Yeo**, Ho-jin Sung***

요약 현실공간의 정보를 가상의 공간으로 모사하는 디지털 트윈 기술은 다양한 분야에서 채택되고 있다. 디지털 트윈에 대한 관심은 Industry 4.0 기반의 스마트제조와 같은 첨단 제조 분야를 중심으로 관심이 커지고 있다. 그리고 디지털 트윈의 시스템을 운영하면 수많은 데이터가 발생하며 기술의 분야에 따라 발생하는 데이터는 특성이 다르기때문에 효율적으로 자원을 관리하고, 최적화된 디지털 트윈 플랫폼 기술이 필요하다. 첨단 제조 분야를 중심으로 디지털 트윈의 파이프라인에 대한 연구가 지속적으로 진행되어 왔으나 플랜트 분야의 데이터에 적합한 고속의 파이프라인 연구는 아직 부족하다.

그렇기에 본 논문에서는 Apache Kafka를 통해 고속으로 쏟아지는 플랜트분야의 디지털 트윈 데이터에 특화된 파이프라인 설계 방식을 제안한다. 제안된 모델은 플랜트의 정보를 revit 기반으로 적용하고, 플랜트에 특화된 데이터를 Apache Kafka 통해 수집하며, 경량화된 CFD엔진을 탑재하여 기존의 제조 분야의 디지털 트윈 기술보다 플랜트분야에 적합한 디지털 트윈의 모델을 구현할 수 있다.

주요어 : 바이오매스 플랜트, 플랜트 디지털 트윈, 아파치 카프카, 전산유체해석, 고속동기화엔진

Abstract Digital twin technology, which copies information from real space into virtual space, is being used in a variety of fields. Interest in digital twins is increasing, especially in advanced manufacturing fields such as Industry 4.0-based smart manufacturing. Operating a digital twin system generates a large amount of data, and the data generated has different characteristics depending on the technology field, so it is necessary to efficiently manage resources and use an optimized digital twin platform technology. Research on digital twin pipelines has continued, mainly in the advanced manufacturing field, but research on high-speed pipelines suitable for data in the plant field is still lacking.

Therefore, in this paper, we propose a pipeline design method that is specialized for digital twin data in the plant field that is rapidly poured through Apache Kafka. The proposed model applies plant information on a Revit basis. and collect plant-specific data through Apache Kafka. Equipped with a lightweight CFD engine, it is possible to create a digital twin model that is more suitable for the plant field than existing digital twin technology for the manufacturing field.

Key words : Biomass Plant, Plant Digital Twin, Apache Kafka, CFD, High Speed Synchronization Engine

*정회원, 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지환경IT융합 Received: October 3, 2023 / Revised: October 13, 2023

그룹 선임연구원 (제1저자)

Accepted: November 5, 2023

정회원, 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지환경IT융합*Corresponding Author: hjsung@iae.re.kr

합그룹 연구원 (참여저자)

Dept. of Energy Environment IT Convergence Group,

***정회원, 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지환경IT융합Institute for Advanced Engineering, Korea

그룹 수석연구원 (교신저자)

접수일: 2023년 10월 3일, 수정완료일: 2023년 10월 13일

게재확정일: 2023년 11월 5일

I. 서 론

스마트팩토리는 ICT와 융합하여 인간중심의 작업 환경을 구현하고, 최적비용 및 시간으로 고객맞춤형 제품을 생산하는 팩토리를 말한다. 또한 ICT를 활용하여 기존 제조업의 전 과정을 디지털화하고, 미래 첨단 산업으로 디지털 전환(Digital Transformation)함으로써 국가 산업구조를 혁신하기 위한 제반 활동을 의미한다 [1].

스마트팩토리는 제조업의 핵심적이고 대표적인 기술이라고 할 수 있으며, 이를 통해 현장 설비와 공정을 실시간으로 모니터링하고 분석 및 제어할 수 있다 [2]. 이를 통해 분석한 데이터는 제조 프로세스나 생산 공정에 소요되는 시간과 비용을 절감시키는 최적제어 및 가이드인스를 제공한다 [3].

제공되는 서비스 중 제조현장의 설비와 공정을 동일하게 볼 수 있도록 쌍둥이 모델을 통한 디지털트윈 기술이 각광 받고 있다 [4]. 디지털 트윈은 현실 공간의 물리적 엔티티를 가상의 공간에 디지털적으로 모사하고, 이를 통해 문제 해결 또는 최적화하는 기술로, 이를 통해 실제 시스템이나 프로세스를 실시간으로 모니터링하고, 분석하고, 시뮬레이션하는 것을 의미한다 [5]. 현실공간에서 사물의 정보 및 환경에 대한 정보가 가상공간에서 유기적으로 연계되어 기존에 없었던 새로운 서비스들이 가능해지면서, 디지털 트윈의 응용 분야가 지속적으로 확장되고 있다 [6]. 디지털트윈에 대한 관심은 Industry 4.0 기반의 스마트제조와 같은 첨단 제조 분야를 중심으로 산업 공공 환경 등 다양한 분야에서 디지털트윈에 대한 관심이 커지고 있다 [7]. 이러한 디지털 트윈 시스템은 다양한 기술이 어우러져 디지털 트윈의 시스템 전체를 이루며 그 과정에서 각 기술들은 대용량의 데이터를 고속으로 송/수신 및 분석 저장하게 된다. 이러한 데이터를 특성에 맞게 동작할 수 있도록 디지털 트윈의 데이터 파이프라인에 대한 다수의 연구에서 데이터 전송에 관한 연구를 진행하였으나, 플랜트분야의 데이터에 특화된 연구는 충분히 진행하지 않았다. 이에 따라 미활용 플랜트 분야의 디지털 트윈에서 발생하는 데이터에 적합한 파이프라인 설계에 관한 연구를 진행했다.

본 연구에서는 Apache Kafka 위주로 플랜트용 디지털 트윈 개념모델 설계 및 제안한다. 본 고의 3장과 4장에서 플랜트용 디지털 트윈의 개념 모델의 설계 방법과 방법론을 기술한다.

II. 관련연구

1. 디지털 트윈(Digital Twin)

디지털 트윈은 대표적으로 모든 기능적 특징 및 작업 요소와의 연결을 나타내는 물리적 장치 또는 시스템의 컴퓨터화 된 모델을 디지털 트윈이라 정의 하였다. 디지털 트윈은 3단계의 발전 단계를 갖고 있으며, 1단계는 3차원 CAD, GIS, BIM, 공공데이터 등으로 3차원 가상세계 서비스를 제공하고, 2단계는 실시간으로 모니터링 및 제어 서비스를 제공하며, 3단계는 분석, 예측, 최적화, 교육훈련 서비스를 제공하여 가상세계가 현실세계를 정확하게 모사하고 실시간으로 데이터를 받아 동일하게 움직이는 것이라고 정의하였다 [8].

이를 기반으로 생산시설의 원격제어를 웹기반 디지털 트윈 모델링을 통해 시스템을 제안하였다. 수학적 모델링을 해당 가상세계 객체에 적용하여 무선 네트워크에서 디지털 트윈을 기반으로 한 원격수술 제어 어플리케이션을 제안하였다 [9].

2. 시뮬레이션 기반 디지털 트윈

디지털 트윈의 개념은 많은 논문에서 다양하게 유사한 방식으로 제시되고 있다. 디지털 트윈은 전체 제품 수명주기 동안 결과를 예측하기 어려운 환경과 여러 방식으로 상호작용하는 복잡한 자산이나 공정을 모델링 하도록 설계되었으며, 그림 1은 물리적 세계의 제조 공정모델을 디지털 세계의 쌍둥이로 표현한 것이다 [10].

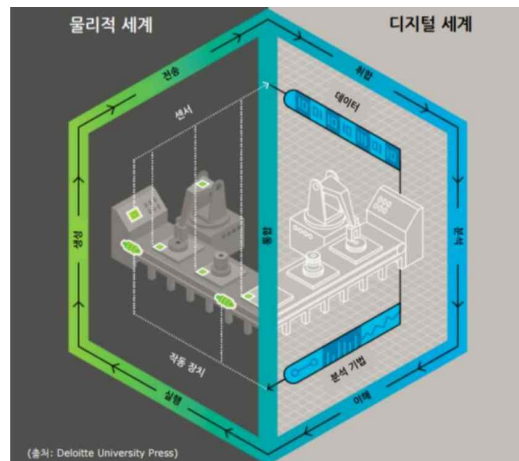


그림 1. 제조 프로세스 상의 디지털트윈(출처: Deloitte University Press)

Figure 1. Digital twin on manufacturing process (source: Deloitte University Press)

3. Apache Kafka Architecture

Apache Kafka 는 2011 년에 출시된 도구로 실시간으 로 기록 스트림을 게시, 구독, 저장 및 처리할 수 있는 분 산 데이터 스트리밍 플랫폼이다 [11]. 그림2는 Kafka의 기본구성 요소이다. Kafka는 producer, consumer, broker 로 구성되어 있다.

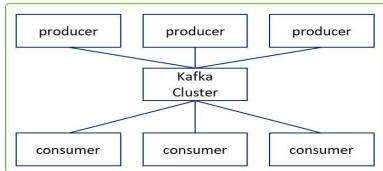


그림 2. Kafka 기본 구성요소
 Figure 2. Basic components of Kafka

III. 디지털 트윈 개념 모델 설계

1. 디지털 트윈 플랫폼 고속 동기화 모델 설계

본 논문에서 제안하는 고속 동기화 모델을 설계 하기 위해 이벤트 스트리밍 플랫폼인 Apache Kafka.2.4.0 를 적용하여 설계하였으며, 이에 대한 Architecture는 그림 3과 같이 설명한다. 카프카(Kafka)의 구성으로 메시지를 생산 및 발송하는 프로듀서(Producer)는 처리해야 할 데이터가 발생하면 Broker의 Topic에 메시지를 발행한다. 해당 Topic을 구독하는 Consumer가 Topic에 발행된 메시지를 가져가서 데이터를 처리한다. 메시지가 반드시 한번만 쓰여야 하는 기존 플랫폼의 제약 조건과 순서대로 메시지가 처리되어야 하는 조건들을 순차적으로 메시지를 처리하고, seekToEnd()를 활용하여 offset.reset 방법으로 동기화를 고속으로 진행한다.

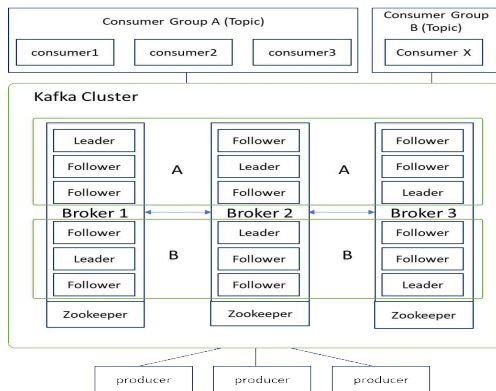


그림 3. Apache Kafka 구성도
 Figure 3. Apache Kafka Configurations

최소 리플리케이션 팩터를 지정하는 옵션과 ack의 수정을 통해 바이오매스 플랜트 카프카(Kafka)의 프로듀서(Producer)는 데이터의 특성에 따라 데이터의 유실 방지보다 고속의 데이터 처리가 가능하도록 적절한 지점을 찾아 가용성과 일관성 모두 갖게 된다. 그림 4는 min.insync.replicas=3으로 수정했을 때의 동작방식이며, 조정시에 브로커의 장애가 발생한다면 ISR의 리더와 팔로워의 상태 및 에러 로그를 면밀하게 검토할 필요성이 있으며, 최소 리플리케이션 팩터를 조정해야 한다.

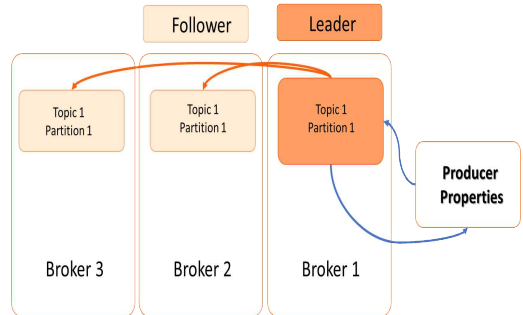


그림 4. 최소 리플리케이션 팩터의 동작 방식
 Figure 4. Architecture of Minimum replication factor

2. 고속 동기화 엔진의 성능향상

바이오매스 플랜트의 디지털트윈에서 발생하는 데이터는 시계열 데이터로 발생 빈도가 매우 높은 편이며, 2D 데이터에 비해 크기 작고 특성상 빠른 처리를 요구하지 않기 때문에 대역폭 확보를 통해 시스템의 안정성을 보장하는 것이 효율적인 운영 방법이다. 또한 프로듀서(Producer)가 적은 양의 데이터로 Broker에게 빈번히 쓰기 요청을 하면 불필요하게 많은 통신이 이루어져 네트워크 대역폭 부하를 가중시켜 시스템의 운영효율을 떨어뜨린다. 이에 본 연구에서는 성능 향상을 위해 acks, linger.ms, batch.size 조절을 통해 한 번에 쓰기 요청을 하는 데이터의 양은 늘리고, 네트워크 대역폭을 줄이는 방법을 적용한다.

IV. 구현

1. 디지털 트윈 개념 모델 구현 및 가시화

본 연구에서 제안한 디지털 트윈 플랫폼의 가시화는 Unity를 통해 시각화 모듈을 구현한다. Unity와의 호환을 위해 설비들의 가시화는 3ds MAX를 통해 설비를 객

체 fbx로 Export하였고 과정은 그림 5과 같다.

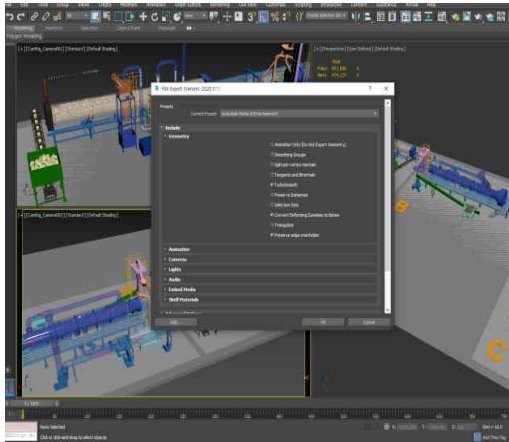


그림 5. 3ds MAX기반 플랜트 설비의 fbx Option
Figure 5. fbx option for 3ds MAX-based plant facilities

객체정보는 revit 정보를 기반으로 각 영역(Zone)에서 가시화되며, 가시화된 객체인 반탄화 구조물은 탄화물 배출부 외통의 표면 온도와 내통의 온도를 CFD와 연동하여 그림 6과 같이 실시간으로 가시화하여 보여준다.

반탄화물의 품질예측 정보는 반탄화 설비에 대한 데이터를 H&MB 데이터와 비교하여 제공한다.

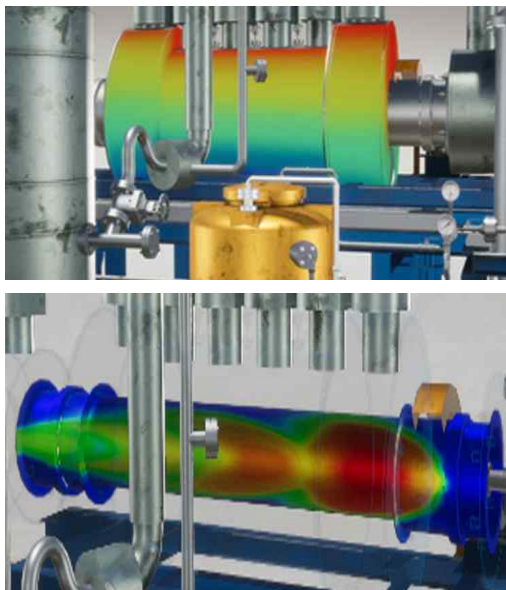


그림 6. 시간에 따른 내/외통의 온도변화 및 가시화
Figure 6. Temperature changes and visualization of internal/external air over time

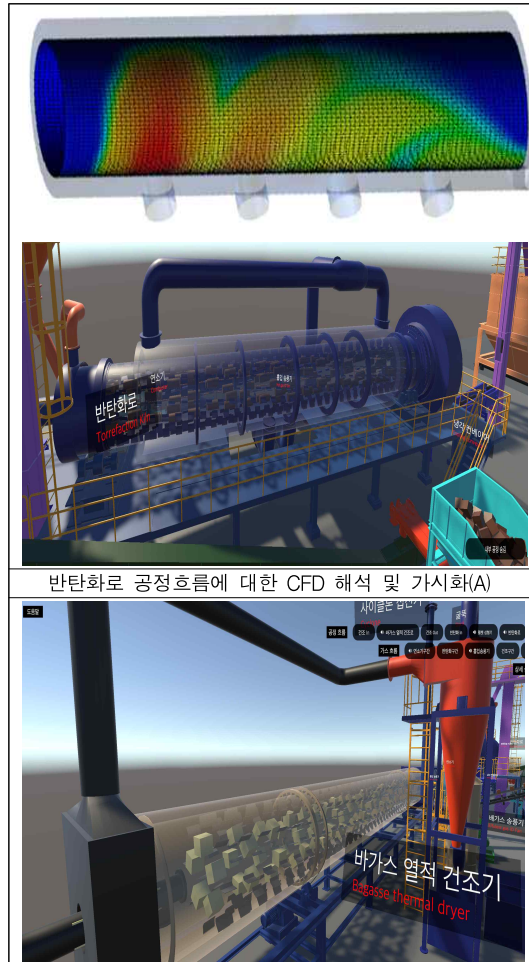
제안된 플랜트용 디지털 트윈의 개념 모델은 그림 7

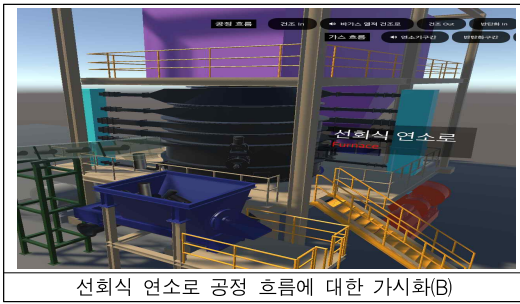
과 같이 설정 메뉴로 구현하고, 공정의 흐름과 스팀에 대한 흐름은 실시간 데이터와 해석된 수치로 반탄화물에 연동되어 그림 8과 같이 객체를 3D로 가시화 한다.



그림 7. 공정흐름/가스흐름/상세설정 메뉴
Figure 7. Process Flow/Gas Flow/Detailed Settings Menu

이때, 건조로 및 반탄화 내부의 Mesh의 경우 Texture 밀림 현상 발생시 acks, linger.ms, batch.size 조절을 통해 한 번에 쓰기 요청하여 데이터의 양은 늘려 구현해야 Gradation이 실시간으로 반영된다.





선회식 연소로 공정 흐름에 대한 가시화(A,B)
 그림 8. 바이오 매스 플랜트 공정 흐름에 대한 가시화(A,B)
 Figure 8. Visualization of Biomass Plant Process Flow

2. 프레임 및 성능향상을 위한 Object Pool Pattern

Object Pooling은 플랫폼 내에서 재활용되는 Object 들을 Instantiate 및 Destroy 하지 않고, 컨테이너에 그 Object 를 삽입하여 Object 활성화 및 비활성화를 통해서 Object 의 생성 및 파괴를 연출하는 방법이다. 오브젝트를 생성 및 파괴할 때 Instantiate 및 Destroy를 사용하게 되면 성능 소모와 프레임 저하가 발생할 수 있기 때문에 그림 9과 같이 SpinLauncher가 SpinObject를 생성해야 할 땐, PoolList 내의 비활성화된 Object를 Pop하며, 만약 PoolList 내에 Object가 없다면 생성하여 구현한다.

```
void CreatePref()
{
    GameObject p;
    if (PoolList.Count > 0)
    {
        p = PoolList[0];
        PoolList.RemoveAt(0);
    }
    else p = Instantiate(Pref, gameObject.transform);

    p.SetActive(false);
    p.transform.position = gameObject.transform.position;
    p.transform.rotation = Quaternion.identity;
    SpinObject ps = p.GetComponent<SpinObject>();
    ps.SL = this;
    ps.originCol = originCol;
    ps.targetCol = targetCol;
    ps.speed = speed;
    ps.vspeed = vspeed;
    ps.zspeed = zspeed;
    ps.rotspeed = rotspeed;
    ps.Initialization();
}
```

그림 9. Object Pool Pattern 프로그래밍
 Figure 9. Object Pool Pattern Programming

3. 고속 동기화를 위한 GPU Instancing

Instance로 복제되어 Batching이 깨져 성능 저하가 발생하면 Material의 Mesh는MeshRenderer.material.Set 메소드를 활용하여 Drawcall을 동적 매칭한다.

MaterialPropertyBlock을 생성하여 Unity Mesh 일부를 분리 후 실시간 데이터로 유체 흐름을 나타내며, 데이터는 카프카를 통해 처리한다. 스팀의 고온은 붉은색, 저온은 회색으로 시각화한다.

V. 결론 및 향후과제

다양한 분야에서 최적화, 효율적 운영 등의 이점을 얻기 위해 디지털 트윈을 도입했으며, 에너지 분야 또한 시물레이션을 통해 운영 최적화를 꾀하고 있다. 그 과정에서 대단히 많은 양의 데이터가 발생한다. 수집, 가공, 적재 파이프라인을 구축하고 시물레이터 고도화를 위한 기회를 데이터로부터 얻어야 한다. 디지털 트윈이라는 같은 기술을 활용하더라도 분야에 따라 발생하는 데이터의 특성은 다를 수 있다. 데이터 파이프라인을 구축할 때는 이 점에 유의하여 기술을 선택해야 한다.

본 논문에서는 플랜트 분야의 미활용 자원을 기반으로 하는 바이오매스를 이용한 플랜트의 운영 에너지를 최적화하고, 에너지 효율성을 향상 하기위해 수집되는 데이터의 특성을 반영한 고속 동기화를 위한 플랫폼 설계 방식을 제안하고, 고속동기화를 위한 바이오매스 플랜트용 디지털 트윈 플랫폼 모델을 구현하였다.

추후 연구에서는 해외 실증데이터를 확보하여 비교, 검증을 수행한 뒤 플랜트 분야에 특화된 디지털 트윈 플랫폼 구축에 대한 연구를 심화할 예정이다. 향후 제안된 프레임워크를 성능적으로 고도화하고 경량화 작업을 진행할 뿐만이 아니라, 플랜트의 운영 에너지를 최적화하고, 에너지 효율성을 향상 하기위해 더 다양한 예측 모델 연구에 적용하고자 한다.

References

- [1] G.N. Schroeder, C. Steinmetz, R.N. Rodrigues, R.V.B. Henriques, A. Rottberg, and C.E. Pereira, "A Methodology for Digital Twin Modeling and Deployment for Industry 4.0," P roceedings of the IEEE, Vol. 109, No. 4, pp. 556–567, 2020.
- [2] C.Y. Lim, C.E. Yeo, S.Y. Ahn, M.O Lee, H.J Sung "Design and Performance Evaluation of Digital Twin Prototype Based on Biomass Plant" The Journal of the Convergence on Culture Technology (JCCT) 9, no.5 (2023) 789–795.

- [3] S. H. Moon, "Big Data Platform Construction and Application for Smart City Development," *The Journal of the Convergence on Culture Technology*, vol. 6, no. 2, pp. 529-534, May 2020 DOI: <https://doi.org/10.17703/JCCT.2020.6.2.529>
- [4] D. Park, M. Choi, and D. Yang, "A Study on a Framework for Digital Twin Management System Applicable to Smart Factory," *Journal of Convergence for Information Technology*, Vol. 10, No. 9, pp. 1-7, 2020.
- [5] Chae-Young Lim, Chae-Eun Yeo, Woo-jin Cho, Jae Hoi Gu, Sang-Hyun Lee "Design and Implementation of IEC62541 based Industry Internet of Things Simulator for Meta-Factory" *The Journal of the Convergence on Culture Technology (JCCT)* 9, no.3 (2023) 789-795.
- [6] GE, <https://www.ge.com/> (accessed July 20, 2021)
- [7] Chae-Eun Yeo, Woo-jin Cho, Jae Hoi Gu, Chae-Young Lim, "Energy Consumption Analysis of Batch Type Heating Process for Energy Savings in Food Processing Plants" *The Journal of the Convergence on Culture Technology (JCCT)* 9, no.3 (2023) 817-823.
- [8] A. Madni, C. Madni, and S. Lucero, "Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering," *Systems*, Vol.7, No.1, pp. 1-13, January 2019
- [9] C. Liu, P. Jiang, and W. Jiang, "Web-based digital twin modeling and remote control of cyber-physical production systems," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol 64, No.1, pp. 1-16, August 2020.
- [10] H. Laaki, Y. Miche, and K. Tammi, "Prototyping a Digital Twin for Real Time Remote Control Over Mobile Networks: Application of Remote Surgery," *IEEE Access*, Vol.7, No.1, pp.20325-20336, February 2019.
- [11] Apache Kafka, Apache Kafka, 2020. [Online]. Available:<http://kafka.apache.org/documentation/>. [Accessed: 10- Nov- 2020].

※ 본 연구는 국토교통부와 국토교통과학기술진흥원 (Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, KAIA)의 지원을 받아 수행한 과제입니다.
No.RS-2021-KA161883, 미활용 자원 기반 바이오매스 플랜트 실증 기술개발 사업)