

플랜트 O&M을 위한 블록체인 기반 IoT Edge 장치의 적용에 관한 탐색적 연구

류양선¹⁾ 박창우¹⁾ 임용택^{2)*}

1) 서울대학교 공학전문대학원, 2) 고등기술연구원

An Exploratory Study on Block chain based IoT Edge Devices for Plant Operations & Maintenance (O&M)

Yangsun Ryu,¹⁾ Changwoo Park,¹⁾ Yongtaek Lim^{2)*}

1) Graduate School of Engineering Practice, Seoul National University

2) Institute for Advanced Engineering

Abstract : Receiving great attention of IoT and 4th industrial revolution, the necessity comes to the fore of the plant system which aims making it smart and effective. Smart Factory is the key realm of IoT to apply with the concept to optimize the entire process and it presents a new and flexible production paradigm based on the collected data from numerous sensors installed in a plant. Especially, the wireless sensor network technology is receiving attention as the key technology of Smart Factory, researches to interface those technology is actively in progress. In addition, IoT devices for plant industry security and high reliable network protocols are under development to cope with high-risk plant facilities. In the meanwhile, Blockchain can support high security and reliability because of the hash and hash algorithm in its core structure and transaction as well as the shared ledger among all nodes and immutability of data. With the reason, this research presents Blockchain as a method to preserve security and reliability of the wireless communication technology. In regard to that, it establishes some of key concepts of the possibility on the blockchain based

Received: December 21, 2018 / **Revised:** July 15, 2019 / **Accepted:** July 15, 2019

* 교신저자 : Yongtaek Lim, yylim@iae.re.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

IoT Edge devices for Plant O&M (Operations and Maintenance), and fulfills performance verification with test devices to present key indicator data such as transaction elapsed time and CPU consumption rate.

Key Words : Plant O&M, IoT Edge Device, Block chain, TPM, Feasibility

1. 서론

사물인터넷(Internet of Things)과 4차 산업혁명이 큰 관심을 받으면서, 지능화/효율화를 목적으로 한 플랜트 시스템의 필요성이 대두되고 있다. 스마트 팩토리는 생산 공정의 통제 및 유지보수, 안전 관리에서 물류까지 전 과정을 최적화하는 개념으로 사람과 사물, 사물과 사물이 소통하는 IoT의 핵심 적용 분야이다. 스마트 팩토리는 플랜트에 설치된 수많은 센서에서 수집된 데이터를 바탕으로 고장 징후 예측, 작업자 안전 모니터링 등에 대한 지능형 응용 서비스뿐 아니라 다품종 소량생산과 같은 새롭고 유연한 생산 패러다임을 제시하고 있다. 특히, 무선 센서 네트워크 기술은 기존 유선 센서를 설치하기 어려운 회전체, 이동체 및 작업자에 대한 센서 데이터 취득을 가능하게 하여, 스마트 팩토리의 다양한 응용 서비스에 필요한 핵심 기술로 주목받고 있으며, 산업 영역에 무선 센서 네트워크 기술을 접목하기 위한 연구가 진행되고 있다[1].

석유화학, 발전 플랜트와 같이 대규모 면적에 대해서 효율적인 비용으로 고위험 시설물 및 설비에 대한 지속적인 모니터링을 위해서는 무선통신기술에 대한 요구가 증가되고 있다. 그러나 현재의 지그비(Zigbee), 블루투스(Bluetooth)와 같은 USN(Ubiquitous Sensor Network) 기술은 신뢰성 및 보안성이 취약하며 대규모 플랜트 환경에 적용이 어렵다[2].

또한 최근 RFID/IoT 기술이 시범 사업 수준의 테스트 환경을 벗어나 산업현장 전반에 적용이 시도되고 있으나, 신뢰성 및 보안성이 취약하고 적용 노하우가 부족하여 대규모 플랜트와 같은 난환경 현장에 적용이 어려운 현실이다. 이에 고위험 산업 시설물인 플랜트 설비들에서 발생할 수 있는 다양

한 통신 장애 상황에 대응 가능하도록 국제 표준 규격인 ISA100 기반의 플랜트 산업안전용 IoT 디바이스와 고신뢰성 네트워크 프로토콜도 개발하였다[3].

본 연구에서는 플랜트 O&M을 위한 무선통신 기술의 신뢰성 및 보안성을 확보하기 위한 방안으로 블록체인 기술의 적용을 검토하려고 한다.

최근 블록체인은 다양한 유형의 플랫폼이 급속히 차례로 출시되고 있다. 블록체인의 현재 단계는 기술 진화의 중간 단계로 볼 수 있으며, 개념과 이론으로부터 구현된 소프트웨어 솔루션으로 출시되고 있는 단계이다. 이 단계에서는 실제 운영환경에서의 성능 검증이 매우 중요한 의미를 갖는다. 이러한 성능 검증을 위하여 기술척도를 적용할 수 있으며, 기술척도는 시스템엔지니어링 표준과 핸드북에서 기술성능 관리를 목적으로 MOEs(Measures of Effectiveness), MOPs(Measures of Performance), TPMs(Technical Performance Measures)로 구분하고 있다[4] [5] [6] [7].

이러한 기술성능관리는 시스템의 임무 달성과 기술적 의사결정에 필요한 통찰력을 제공하는 중요한 성능 파라미터를 기술척도로 선정하여 그 상태를 추적 관리함으로써 임무 달성의 가능성을 높여주는 활동이다[8].

본 연구에서는 플랜트 O&M을 위한 블록체인 기반의 IoT Edge 장치의 적용가능성에 대한 탐색적 연구를 위하여 2장에서는 이론적 배경으로 IoT, 블록체인 적용 IoT에 대해 살펴보고 3장에서는 플랜트 O&M을 위한 블록체인 기반의 IoT Edge 장치의 적용가능성을 기술척도의 TPMs 수준에서 검토하였으며, 이를 위하여 블록체인 기반의 IoT Edge 장치의 개념을 정립하고, 실제 장치를 구성하였다.

그리고 적용가능성을 검토하기 위한 성능지표를 정의하였고, 실제 성능 검증을 수행하였다. 성능 검증 결과로부터 블록체인 기반의 IoT Edge 장치의 적용가능성을 확인할 수 있었다. 4장에서는 결론 및 향후 연구에 대해 기술하였다.

2. 이론적 배경

2.1 블록체인

블록체인의 핵심 내부 구조는 Figure 1과 같이 블록과 블록 간, 그리고 블록내부의 트랜잭션 데이터 또는 Private 데이터 간 서로 Hash로 연결이 되어 있는 구조이다[9].

모든 트랜잭션 또한 Hash 알고리즘을 사용하게 된다. 이러한 형태의 블록과 데이터들이 원장을 구성하게 되고, 이 원장은 전체 또는 다수의 노드 상에 Peer-to-Peer로 공유되게 된다. 한번 블록에 저장된 데이터는 구조상 영원히 지울 수 없는 특성을 가지고 있다. 이러한 이유로 데이터에 대한 해킹이 어렵고, 해킹되어 한 데이터가 위/변조된다 하더라도 문제가 되는 데이터를 쉽게 확인할 수 있게 되어 있어 높은 보안성과 신뢰성을 갖는다.

블록체인 상에 연결된 네트워크의 모든 노드에서 동일한 원장을 Peer-to-Peer방식으로 공유할 수 있는 구조로 되어 있어, 중간 매개자(Middleman)가 필요 없는 이른바 탈중앙화가 가능해 지는 특징을 가지고 있다. 이러한 탈중앙화의 특성은 기계간

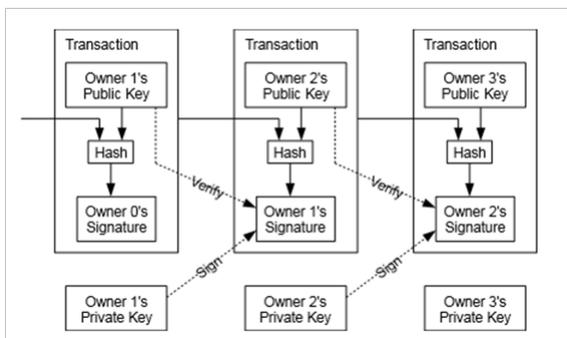
통신을 해야 하는 미래형 IoT장비에 블록체인이 필요한 중요한 이유가 되기도 한다. 블록체인은 트랜잭션 처리 동안, Smart Contract이라는 이름의 실행 가능한 처리기능을 가지고 있어, 기존의 복잡한 업무 처리과정을 간단하게 처리할 수 있는 기능을 지원한다.

블록체인 플랫폼은 금융 산업계를 시작으로 공공 장소, 물류, 인터넷의 물건 및 미디어 콘텐츠를 포함한 다양한 산업에 폭넓게 시범 적용해 보기 위하여 더 빠른 속도로 확산되고 있다. 이러한 상황에서 블록체인은 첫째로 자체 기술을 발전시켜야 하고, 또한 자체 출시 된 솔루션을 시스템 및 서비스와 함께 새로운 분야에 효과적으로 적용해야 하는 두 가지 임무를 수행해야 한다.

그러기 때문에 실질적인 운영 환경에서 성능을 검증하는 것이 더 중요한 의미를 갖는다. 이러한 검증을 통해, 얻어진 데이터에 의해 블록체인의 기술 자체를 향상시키고, 위험을 통제하면서 각 산업에 적용 될 수 있다. 이러한 일련의 상황에서 IoT 영역의 블록체인에 대한 검증은 더욱 중요한 의미를 갖는다. IoT는 4차 산업 혁명 시대의 가장 중요한 대상 중 하나인 반면, 시스템 자원이 적다는 주요 특성 때문에 블록체인을 적용하려 할 때 특히 많은 항목을 검증해야 한다.

2.2 블록체인 적용 IoT

미래형 IoT 장치는, 탈중앙화, 보다 높은 보안 그리고 기계간 트랜잭션(Machine-to-Machine Transaction, M2M Transaction) 등과 같은 주요 기능이 필요하다. 이는 2020년 정도까지 약 500억이라는 IoT장비의 연결이 예상되어 기존의 Server/Client 방식 또는 Cloud방식의 아키텍처만으로는 원활한 기능과 서비스를 기대하기 어렵고, 인간의 개입 없이 인간으로부터 단순 반복 작업을 제거하고자 하는 4차 산업혁명시대의 요구조건으로부터 기인하기 때문이다. 블록체인은 이와 같은 요구조건을 모두 만족할 것으로 연구되고 있다. 그러나 블록체인을 적용하기 위한 IoT Edge 디바이스의 주된 제약은



[Figure 1] Blockchain Based IoT Edge Device Emulator Environment

낮은 컴퓨팅 성능이다. IoT의 낮은 시스템 자원으로 인해, Permissioned 방식의 블록체인 네트워킹을 제안하였고, 개선된 보안을 위해, 인증에 블록체인의 유사한 해시 알고리즘을 사용하는 방법을 연구하고 제안했다.

블록체인의 Fog와 Cloud 관점으로 실험을 이행하고 Indicator Data를 포함한 유사한 연구를 제시한 사례도 있다[10]. 그러나 상기와 같은 제안들이 유효한지 검증할 만한, 실제 운용환경에서의 성능지표를 제시하는 경우는 드물다.

2.3 블록체인 기반의 IoT Edge 장치

IoT Edge장치의 주된 제약사항은 낮은 컴퓨팅 성능이다. 이런 장치에 블록체인을 적용하기 위해 비신용(non-trusted) 네트워크에서 탈중앙화를 지원하지만 무거운 computing power를 소비하는 Public 블록체인 타입에 반하여, Permissioned 블록체인 형태를 제안하였다[11]. Permissioned 블록체인을 지원하는 대표적인 블록체인 플랫폼은 Ethereum, Hyperledger Fabric, Corda, Ripple, Quorum 등이다.

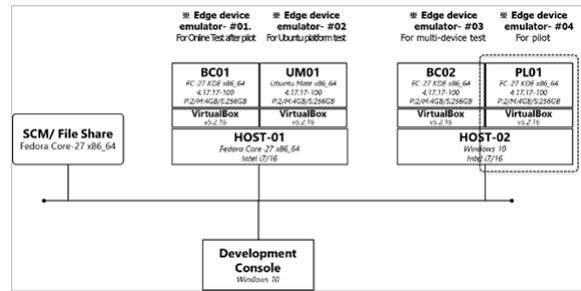
한편, IoT 장치에 대한 높은 보안과 관련하여 이전 연구에서는 블록체인의 핵심 기술인 Lamport 해시 및 Merkle 트리 인증을 제안하였다[11][12]. 블록체인 솔루션 중 일부는 이러한 이전 연구와 관련된 ‘보다 높은 보안’을 충족하기 위해 x.509 유형의 표준을 사용한다. 이러한 대표적인 블록 체인 솔루션은 Hyperledger Fabric이다.

M2M 트랜잭션 기능의 경우, 블록 체인은 Smart Contract, Chaincode 등과 같은 다양한 이름으로 트랜잭션에서의 실행 스크립트를 지원한다.

3. 플랜트 O&M을 위한 블록체인 기반의 IoT Edge 장치 적용의 탐색적 연구

3.1 블록체인 기반의 IoT Edge 장치 개념

본 연구에서는 블록체인을 사용하여, IoT 장치의 주요 제약 조건을 검증하기 위한 성능을 평가하기



[Figure 2] Blockchain Based IoT Edge Device Emulator Environment

위해, IoT뿐만 아니라 주로 비 금융분야에 다양하게 적용된 사례가 있는, 오픈 소스 플랫폼인 Linux Foundation의 Hyperledger Fabric을 선택하였다.

임베디드 기반 Edge 장치를 목표로, Linux Foundation의 대표 Permissioned 블록체인인 Hyperledger Fabric을 사용하여 IoT를 위한 테스트를 수행하고 기본 Indicator 데이터를 제공하고자 한다.

3.2 블록체인 기반의 IoT Edge 장치 구성

임베디드 시스템에 대한 효과적인 개발 접근을 위해 가상 머신(Virtual Machine)을 활용한 에뮬레이터가 채택되었다. 이 가상 머신들로 IoT Edge장치를 에뮬레이팅한다.

성능검증 시스템 배치도인 Figure 2에서 기술된 바와 같이, 시범장치(PL01)을 시험을 위한 대상 시스템으로 사용하였다. 이 장치에는 커널 버전 4.17.17-100인 Fedora Core-27 Linux x86 64bit을 설치하였고, 그 위에 Virtual Box 5.2.16 버전이 실행되고, 그 위에 한 가상머신이 실행된다.

이 가상 머신은 2개의 프로세서, 4GB의 물리적 메모리, 256GB의 저장소를 갖도록 설정되었다. 이 모든 환경은, i7 CPU, 16GB 물리 메모리를 가진 Windows 10의 호스트 시스템에서 기동되고 있다.

3.3 블록체인 기반의 IoT Edge 장치 성능지표

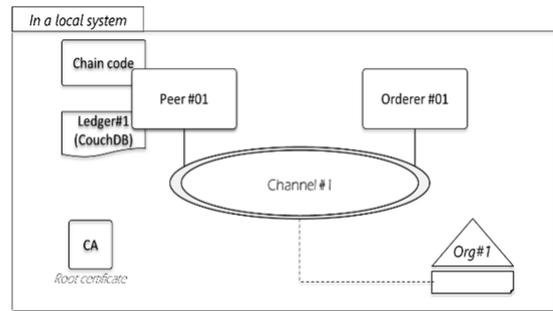
블록체인 기반의 IoT Edge장치에 대한 성능지표는 아래와 같은 변수들이 예상된다.

첫째, ‘트랜잭션 간격 변수’로 한 트랜잭션이 발생된 이후 다음 트랜잭션이 발생되기까지의 간격이다. 이 간격이 너무 짧으면 시스템 리소스를 상대적으로 더 많이 사용할 것으로 예상되고, 너무 길면 트랜잭션 전체 Throughput이 낮아질 것으로 예상된다. 둘째, ‘트랜잭션 수’로서, 동기화 트랜잭션(Synchronous Transaction)의 경우는 이 변수로 시스템이 크게 영향을 받지 않을 것으로 예상되나, 비동기 트랜잭션(Asynchronous Transaction)의 경우라면 한꺼번에 동시 처리해야 할 트랜잭션 양이 늘어나면서, 시스템 리소스 사용량이 급속하게 늘고, 트랜잭션 전체 처리 Throughput이 상대적으로 더 낮아지는 결과가 예상된다. 최악의 경우 트랜잭션 병목현상(Transaction Bottleneck)이 발생할 수 있을 것으로도 예상된다. 셋째, ‘Edge 장치에서의 Peer수’로서, 기본적으로 Edge 장치에서는 하나의 Peer 또는 필요에 따라 한 두개 더 추가되는 선에서 배치하는 것이 예상된다. Peer는 원장(Ledger)을 Access할 수 있는 Instant 이고, Edge장치에서는 병렬처리 또는 다수의 원장을 운용할 필요가 없을 것으로 예상되기 때문이다. 따라서 Edge 장치에서 Peer의 숫자는 Edge 장치 숫자 만큼의 node 수와 증가할 가능성이 높고, 모든 node에 각기 원장을 배치 할 경우, 전체적인 network부하와, 원장 동기화 시간에 영향을 미칠 수 있는 변수로 예상된다. 넷째, ‘Edge장치용 애플레이터 수’는 개발 및 test환경 속에서 node수와 증가하므로, 결국 node수와의 가감으로 나타나는 동일 또는 유사한 성능 변화가 예상된다. 다섯째, ‘트랜잭션 소요시간’은 한 트랜잭션이 발생되고 그것이 완료될 때까지 소요되는 총 시간이다. 여섯째 ‘CPU 소비율’은 트랜잭션이 처리되는 동안 사용되는 Edge장치의 CPU 소비율이다.

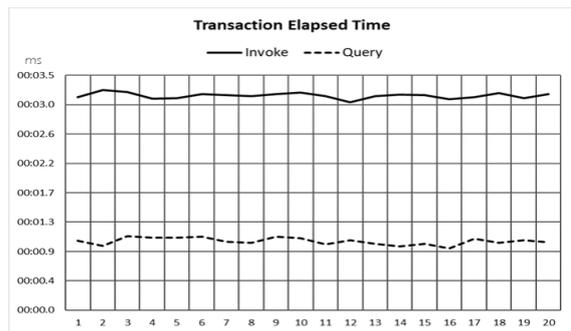
본 연구에서는 트랜잭션 소요시간과 CPU 소비율을 성능지표로 정의하여 성능 검증을 수행한다.

3.4 블록체인의 기반의 단일노드 IoT Edge 장치 성능 검증

Figure 3과 같이 가상머신 안에는 Hyperledger



[Figure 3] Basic Blockchain Test Environment



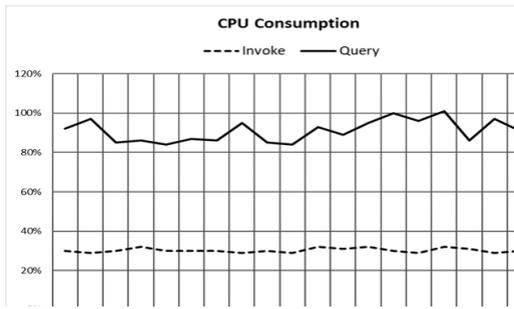
[Figure 4] Transaction Elapsed Time

Fabric 버전 1.2가 배치 기동 된다. 로컬 네트워킹은 물론 검증의 초기 단계로 최소한의 환경을 구축하는 것이 합리적이다. 그런 다음 검증을 위한 다음 전략은 단위별로 확장하거나, 원격 네트워크 환경에 더 많은 노드 객체를 추가하는 것이다. 블록체인의 환경에 대하여 Figure 2에서와 같이, “Organization #1”은 “Peer #1”과 발생한 트랜잭션의 순서를 정하는 “Orderer #1”이 연결된 “Channel #1”을 형성한다. “CA”는 x.509 형태의 인증을 활용한 root 인증서이다.

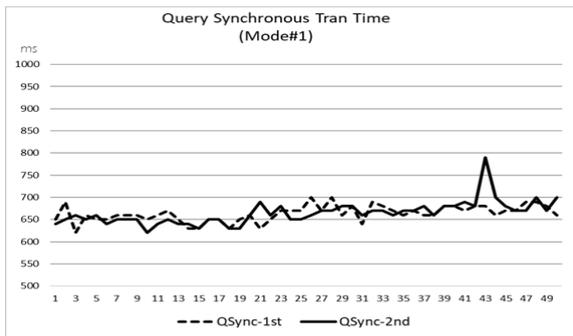
Figure 4는 Invoke와 Query 두 종류의 트랜잭션은 각 총 20회 실행하고 그 소요시간을 측정한 결과이다.

Invoke 트랜잭션은 원장에 레코드 생성을 수행하고, Query 트랜잭션은 4 개의 엔티티 데이터를 사용하여 원장에서 데이터 쿼리를 수행한다. 모드 Synchronous 트랜잭션을 실행하고, 각 트랜잭션 사이의 간격은 200ms으로 부과되었다.

Query 트랜잭션의 평균 소요 시간은 약 1,000ms



[Figure 5] CPU Consumption Rate



[Figure 6] Query Synchronous Transaction Elapsed Time

이며 1TPS (Transaction Per Second)로 계산 될 수 있다. Invoke 트랜잭션의 경우 약 3,200ms이며 약 0.3 TPS로 계산 될 수 있다.

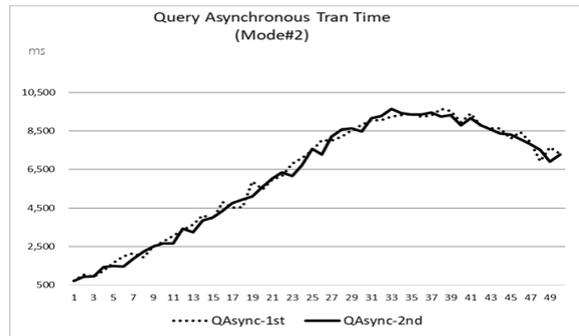
Figure 4에서의 동일한 조건에서 CPU 사용율을 측정하면 Figure 5와 같다. Query 트랜잭션의 평균 CPU 사용량은 약 91%이고 Invoke 트랜잭션의 CPU 사용량은 약 30%로 나타났다.

Figure 6은, Query에 대한 동기 트랜잭션을 50 회씩 각 2회, 총 100개의 트랜잭션을 발생시켜 트랜잭션 소요시간을 측정하였다. 이번에는 평균 약 660ms에서 670ms이 소요되었다.

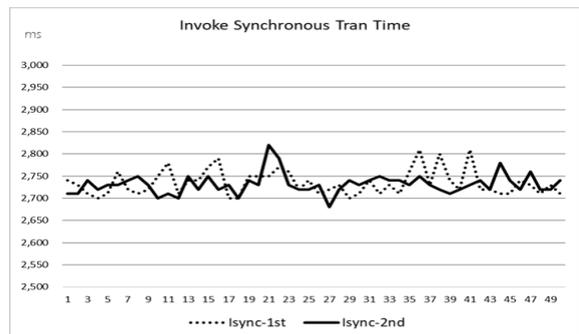
Figure 7은 Figure 6에서와 동일한 조건에서 비 동기 트랜잭션의 소요시간을 측정한 결과이다. 측정된 그래프에서와 같이, 트랜잭션 수가 늘어감에 따라 소요시간이 늘어나는 것을 볼 수 있다.

Figure 8은, Figure 6과 동일한 조건의 Invoke 비동기 트랜잭션 소요 시간을 나타낸다.

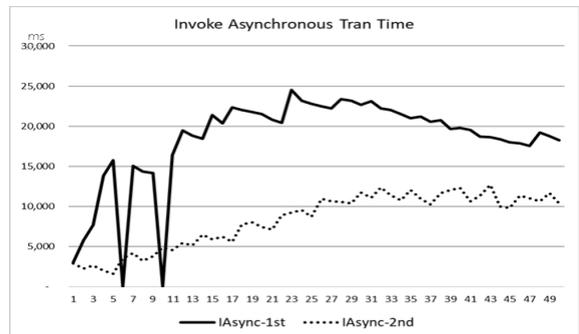
Figure 9는 Invoke의 비동기 트랜잭션의 소요시간을 나타낸다. 이 또한 트랜잭션 수가 늘어나면서



[Figure 7] Asynchronous Transaction Elapsed Time



[Figure 8] Invoke Synchronous Transaction Elapsed Time

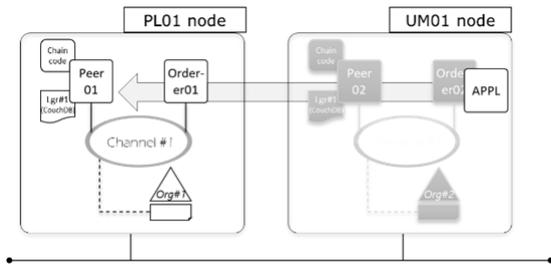


[Figure 9] Invoke Asynchronous Transaction Elapsed Time

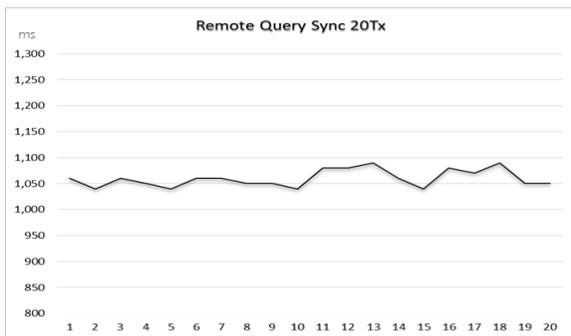
소요시간이 늘어나는 모양을 보여주고 있다. 왼쪽 하단의 두 dropping-point(그래프의 6번, 10번 트랜잭션) 그래프는 트랜잭션 실패를 나타내고, 100개 중 2개가 발생하여, 총 2%의 실패율을 나타냈다.

3.5 블록체인 기반의 듀얼노드 IoT Edge 장치 성능 검증

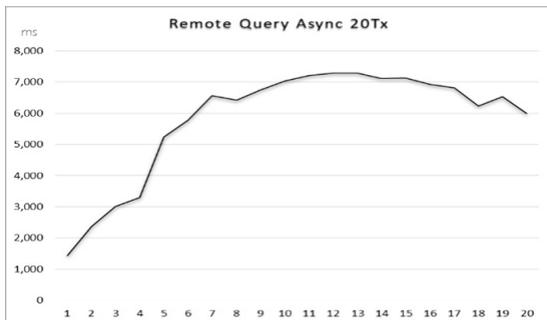
Figure 10과 같이 이전 섹션의 단일 노드환경을 확장하여 듀얼노드를 구성하고, 네트워크상의 원격



[Figure 10] Dual Node Test Environment



[Figure 11] Remote Query Sync Tx Elapsed Time

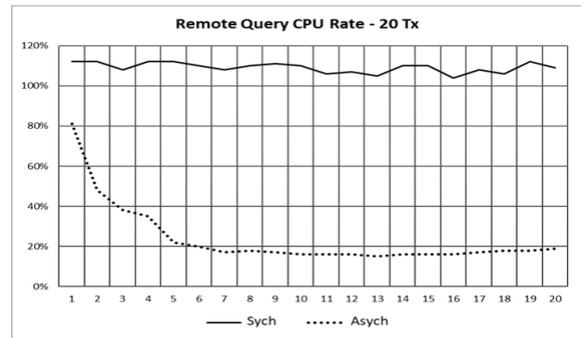


[Figure 12] Remote Query Async Tx Elapsed Time

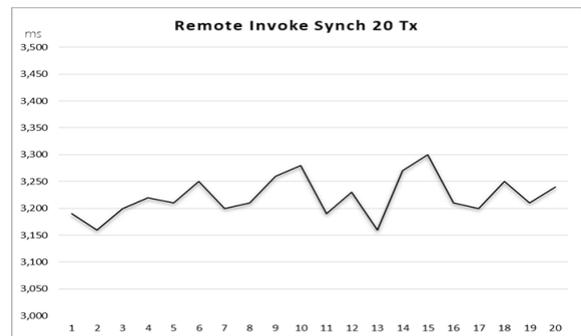
환경에서 트랜잭션을 발생시키고, 그 성능을 측정하였다. 그림의 오른쪽 'UM01' 시스템에서 'PL01'의 Peer01에 원격으로 트랜잭션을 발생시킨다.

이는 IoT Edge장치의 실제적인 운용환경에 더 가까운 환경으로, 이를 향후 다수의 노드로 확장하고 어떤 조건하에서 Peer와 Peer간 트랜잭션을 발생하도록 구성하게 되면, 궁극적으로 IoT Edge장치를 블록체인 네트워크상에서 운용하는 블록체인단의 실제 운용환경이 된다.

Figure 11은 원격에서 동기 Query트랜잭션을 20회 발생시키고 측정한 트랜잭션 소요시간이다.



[Figure 13] Remote Query Tx CPU Rate



[Figure 14] Remote Invoke Sync Tx Elapsed Time

평균 약 1,060ms이 소요되었다.

Figure 12는 원격 비동기 Query 트랜잭션방식으로 측정된 결과를 나타낸다. 트랜잭션 수가 많아질수록 소요시간이 길어지는 모습을 나타낸다.

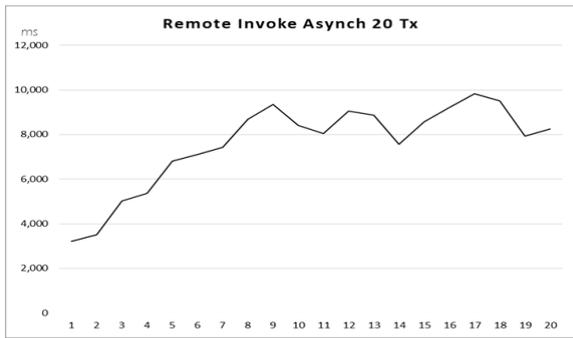
Figure 13은 원격 동기/ 비동기 Query 트랜잭션이 처리되는 동안의 CPU 사용율을 나타낸다.

비동기 트랜잭션 동안 CPU사용율이 동기 트랜잭션동안 보다 낮게 나타나지만, Figure 12에서와 같이 비동기 트랜잭션의 처리시간은 상대적으로 길어지게 된다.

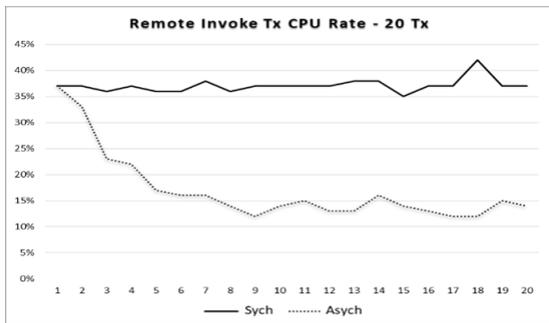
Figure 14는 원격에서 동기 Invoke트랜잭션을 20회 발생시키고 측정한 트랜잭션 소요시간이다. 평균 약 3,222ms이 소요되었다.

Figure 15는 원격에서 비동기 Invoke트랜잭션소요시간이다. 트랜잭션 수가 많아질수록 소요시간도 길어졌고, 트랜잭션이 완료되는 순서도 일정하지 않았다.

Figure 16은 원격 비동기 Invoke트랜잭션이 처



[Figure 15] Remote Invoke Async Tx Elapsed Time



[Figure 16] Remote Invoke Tx CPU Rate

리되는 동안 CPU사용율이다. 동일한 조건의 Query 트랜잭션처리 때 보다 전체적인 CPU사용율은 상대적으로 낮게 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 플랜트 O&M을 위한 블록체인 기반의 IoT Edge 장치의 적용가능성에 대한 탐색적 연구를 수행하였다. 이에 관하여, 플랜트 O&M을 위한 블록체인 기반의 IoT Edge 장치의 적용가능성에 대한 주요 개념을 정립하고, 장치를 구성하여 실제 성능 검증을 수행하였다. 성능 검증을 위하여 기술성능 척도의 TPMs 수준으로 블록체인 환경에서의 ‘트랜잭션 소요시간’과, 트랜잭션이 처리되는 동안의 ‘CPU 소비율’과 같은 주요 기술적 성능 지표를 정의하고, 실험을 통해서 결과를 제시하였다.

이를 통하여 플랜트 O&M을 위한 블록체인 기반의 IoT Edge 장치의 적용 가능성을 확인하였다. 성능 분석에 따르면 개발환경에서의 총 TPS는 1TPS

미만으로, 블록체인이 동작 가능한 하지만 보다 빠른 트랜잭션 처리 속도를 확보하고, CPU 사용율을 낮추기 위해 블록체인을 포함한 환경적 요인, 시스템 설정 등 다양한 최적화가 필요해 보인다.

향후 분석에서는 트랜잭션 간격 변수, 트랜잭션 수, 에지 장치 노드 수, 원격 네트워크 환경 등과 같은 매개 변수를 더 많이 적용해 볼 수 있다. 이러한 매개 변수에 의한 테스트 및 구현 방법론 및 결과는, 최종 단계에서 Embedded Edge 장치로 마이그레이션 될 것이다.

플랜트 O&M에 블록체인 기반의 IoT Edge 장치를 적용하기 위하여는 Equipment, Instrument 등과 같이 플랜트에 설치되는 장치, 센서 등의 H/W가 IoT와 Edge Computing 환경으로 구성되어야 하며, 고성능의 네트워크 환경이 구축되어야 한다. 이를 위하여 현재 다양한 연구들이 수행되고 있으며 향후 이러한 환경을 구축하여 연구를 수행하고자 한다.

사 사

이 연구는 2017년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(10082562).

References

1. Y. S. Lee and S. H. Chung, "The IEEE 802.15.4e based distributed scheduling mechanism for the energy efficiency of industrial wireless sensor networks," J. KIISE, vol. 44, No. 2, pp. 213-222, Feb. 2017.
2. 강성민, 박수열, 여금수, 박재우, 무선 트랜스미터 기반의 석유화학 플랜트 안전관리 시스템, 한국구조물진단유지관리공학회지 Vol.19, No.6, 88-94, 2015.11.
3. (주)한국플랜트관리, 플랜트 산업안전용 고신

- 퇴성 네트워크 기술, 미래창조과학부, 2015.09.
4. IEEE Std 1220, IEEE Standard for Application and Management of the Systems Engineering Process, Sep. 2005.
 5. EIA-632, Processes for Engineering a System, Jan. 1999.
 6. ISO/IEC 15288, Systems and software engineering = System life cycle processes, 2nd Edition, Feb. 2008.
 7. INCOSE, Systems Engineering Handbook, v.3.2.1., 2011.
 8. 유일상, 조동현, 김근택, 우주발사체 개발사업을 위한 기술성능관리 프로세스, 한국시스템엔지니어링학술지 v. 10, n 2, pp. 71-79, 2014.08.
 9. Nakamoto, S., Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system, 2008.
 10. M. Samaniego and R. Deters, "Blockchain as a service for iot," in Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData), 2016 IEEE International Conference on. IEEE, 2016, pp. 433-436.
 11. J. K. Byeong-ju Park, Tae-jin Lee, "Blockchain-based iot device authentication scheme," Journal of The Korea Institute of Information Security and Cryptology, vol. 27, no. 2, pp. 343-351, 2017.
 12. M. Scherer, "Performance and scalability of blockchain networks and smart contracts," 2017.