

블록체인 기반 공급망 추적성 분야 연구 동향 분석*

이종옥**, 권오훈***

요약

본 논문의 목적은 4차 산업 핵심 기술 중의 하나인 블록체인에 대한 비즈니스적 관점의 해석을 통해 기술과 경영의 괴리를 축소하여 블록체인의 비즈니스화를 촉진하고, 동 분야에 대한 국내외 연구 동향을 분석하여 향후 연구방향을 제시하기 위함이다. 본 연구에서는 '구글학술검색', 'ScienceDirect' 및 'DBpia'를 통해서 식별된 블록체인 관련 연구문헌과 블록체인 기반 공급망 추적성 분야의 연구논문(해외 109편, 국내 6편)을 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다. (1) 분산애플리케이션을 지향하는 3세대 블록체인이 등장한 이후 관련 연구가 활성화되고 있다. (2) 주요 연구분야는 기술(공학) 분야는 블록체인의 확장성 영역에, 비즈니스(적용) 분야는 블록체인기반 공급망 추적성 분야에 집중되어 있다. (3) 해외에 비해 국내 연구결과는 매우 열악하다. (4) 향후 4차 산업 사회의 구현과 글로벌 협업을 위해 블록체인을 기술이 아닌 비즈니스 서비스의 수단이라는 인식이 확산되어야 할 것이다.

주제어 : 블록체인, 스마트 계약, 하이퍼원장, 지속가능성, 공급망 추적성

Analysis of Research Trends in the Field of Blockchain-based Supply Chain Traceability*

Lee, Jong-Ok** · Kwon, Oh-Hun***

Abstract

The purpose of this study is to analyze the research trends in the field of Blockchain that is one of the core technologies of the 4th Industry, and present future research orientation. In this study, (1) Blockchain technologies in business perspective are summarized; (2) analysis criteria of Blockchain fields are established; and (3) results of analysis are presented and future research orientation is proposed. Major findings are as follows: (1) related research is being activate with the advent of the 3rd generation blockchain which aims for distributed applications. (2) major concerns of the technology (engineering) field is blockchain scalability and of the business (application) field is blockchain-based supply chain traceability. (3) Compared to overseas, domestic research results are very poor. (4) to catchup the gap, the spreading of awareness that blockchain is not a technology but a business means is required.

Keywords : blockchain, smart contract, hyperledger, sustainability, supply chain traceability

Received May 31, 2021; Revised Jun 1, 2021; Accepted Jun 10, 2021

* This article was supported by the 2019 Dongguk University research year supporting project.

** Professor, in Department of MIS at Dongguk University Seoul Campus(jolee@dongguk.edu)

*** Corresponding author, Doctorial Student, in Department of MIS at Dongguk University Seoul Campus(ohkwon@dongguk.edu)

I. 서론

최근의 괄목할만한 정보기술의 발달은 4차 산업 사회를 견인 하고 있다. 4차 산업 사회를 구축할 수 있는 대표적 핵심 기술로는 디지털 트윈과 CPS, 그리고 블록체인 기술이라 할 수 있다. 디지털 트윈과 CPS는 현실세계를 스마트하고 안전하게 견인할 수 있는 디지털 세상을 구축할 수 있는 기반 기술이라면(Cinar, et al., 2020; Ghaemi, 2017), 블록체인 기술은 기존의 중앙 집중적이고 계층적인 사회체계를 유지해오던 신뢰 있는 제3기관(TTP, Trusted Third Party)의 통제나 중재가 필요 없는 탈중앙화된 피어-투-피어(p2p, Peer-to-peer) 세상을 구현할 수 있는 핵심기술(Carter & Ubacht, 2018; Conoscenti, et al., 2017)로 인식되고 있다.

블록체인 또는 블록체인시스템은 Nakamoto (2008)의 논문에 의해 출현한 암호화폐인 비트코인에 의해 세상에 알려졌으며, 그간의 분산시스템에서 해결하지 못하였던 비잔틴장군의 문제와 이중지출 문제 등을 해결함으로써 TTP가 존재하지 않는 p2p 세계를 구축할 수 있었다(Jani, 2020; Lamport, et al., 1982; Peters & Panayi, 2016; Zheng, et al., 2017).

우리에게 비트코인과 함께 최초로 다가왔던 블록체인 기술(BCT, BlockChain Technology)은 분산원장기술(DLT, Distributed Ledger Technology)이다(McConaghy, et al., 2016; Vukolić, 2016). 이제까지 트랜잭션의 기록인 원장을 중앙집중형 데이터베이스 기술로 구축하고 이를 TTP가 운영해오는 체제이었다면, BCT를 이용한 DLT는 네트워크 구성원 누구나 원장을 소유함으로써 TTP가 존재하지 않는 새로운 세상을 구현하였기에 BCT에 대한 과도한 기대(Ølnes, et al., 2017)가 있어왔다. 이는 곧 블록체인을 비즈니스 수단이 아닌 기술로 인식한 결과라 하겠다. 이제까지 인류의 역사를 되돌아보면 기술은 항상 혁신의 초석이었지 혁신을 주도한 것은 해당 기술

로 새로운 서비스 영역을 창출해온 비즈니스이었다(Hanelt, et al., 2016). 기술인 애플의 아이폰은 단지 모바일 시대를 탄생시켰을 뿐, 현재의 고도화된 모바일 시대를 확산시키고 진화시킨 것은 기술을 수단으로 활용해 서비스를 확산시킨 비즈니스와 소셜 네트워크의 구성원들인 모바일 생태계(Feijoo, et al., 2009)인 것이다.

이제 블록체인도 3세대 하이퍼원장이 출현하면서 블록체인을 비즈니스 수단으로 투영하기 시작하였고, 이에 따라 블록체인을 비즈니스에 적용하고자 하는 연구가 폭발적으로 늘어나고 있다. 최근의 연구에 따르면 2015년부터 2017년 사이에 1세대 블록체인 기술인 DLT와 관련된 거의 90%에 가까운 비즈니스 프로젝트는 중단되었다(Behnke & Janssen, 2020). 이와 같은 결과는 블록체인을 도입할 비즈니스 영역은 비즈니스 마다 독특한 고유성과 차별성이 존재하는데도 불구하고(Queiroz & Fosso Wamba, 2019) 대부분 BCT의 p2p 원장 기술에 편향된 기술적 관점으로 접근하였기 때문이다(Yli-Huumo, et al., 2016).

그간 비즈니스 혁신을 선도하기 위해 해당 시기의 첨단 기술로 ERP, SCM, CRM, 및 MES 등의 혁신적인 비즈니스 정보시스템을 구축했을 때마다 경험했던 것은 시스템 성공과 실패 주요 요인들의 공통적 요소 중의 하나가 비즈니스와 기술의 갭, 즉 비즈니스적 관점에서 기술을 투영해오지 못했기 때문이다(Khan, et al., 2018; Law & Ngai, 2007; Pan, et al., 2007). 이 갭을 줄일 수 있는 방안 중의 하나로, 비즈니스에 기술을 올바르게 보편성 있게 적용할 수 있도록 다수의 논문들이 연구동향에 대해 연구해 왔다. 국내의 경우도 다수의 연구가 해당 시기의 주목받고 있는 정보기술에 대한 비즈니스적 관점의 연구동향을 연구해 왔다. 예를 들면, Lee & Hwang(2014)가 국내 공공 정보화 정책을 가치 철학적 관점으로 재조명하였고, Lee, et al.(2012) ITSM 분야의 국내외 연구동향에 대해서, Lee, et al.(2014)는 모바일 시대의 헬스케

어 연구에 대하여, 그리고 Kang and Hwang(2018)는 최근의 4차 산업에 대한 국내외 연구동향을 분석 및 제시함으로써 국내 연구 활성화와 산업발전에 기여 해온 바가 있다.

본 연구도 최근 주목받고 있는 블록체인에 대해 국내외 연구문헌의 분석을 통해 연구 동향을 분석하고, 주요 연구 방향에 대한 시사점을 도출함으로써 국내 블록체인 관련 연구의 방향제시와 함께 비즈니스 영역에 BCT 기술을 도입하여 새로운 서비스를 창출할 수 있는 기본 방향을 제시하고자 한다. 본 연구의 목적 달성을 위해 다음과 같은 주요 연구를 진행하였다.

- 비즈니스 관점에서 주요 BCT 기술에 대한 기본 개념을 정리해 제시한다.
- 최근 주목받고 있는 비즈니스 지속가능성과 공급망 추적성에 관한 선행연구의 정리를 통해 연구 주제 등을 포함해 다양한 분석기준의 기초를 수립한다.
- 이론적 배경과 선행연구에서 정리한 내용을 바탕으로 분석기준을 확립하고, 해당 분야의 연구문헌 분석을 통해 연구동향을 파악하고 향후 연구방향을 제안한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 제I장은 서론으로서 연구의 배경, 연구 내용, 및 논문의 구성을 서술한다. 제II장은 이론적 배경으로서, 본 연구 분야의 제반 이론을 정리하여 제시한다. 이 장은 분산원장의 기술, 비즈니스 원장으로서의 블록체인 시스템, 스마트 계약과 하이퍼원장, 및 비즈니스 지속가능성과 공급망 추적성의 주제에 대해 선행연구들을 정리해 소개한다. 제III장은 문헌분석 방법과 기준을 포함해 연구수행방법에 대해 설명한다. 제IV장에서는 제III장에서 정의한 방법과 절차에 따라 실시한 문헌분석의 결과를 시사점과 함께 제시한다. 제V장은 결론으로서, 주요 연구결과를 종합적으로 요약해 제시하고, 이 분야의 향후 연구방향을 제안한다.

II. 이론적 배경

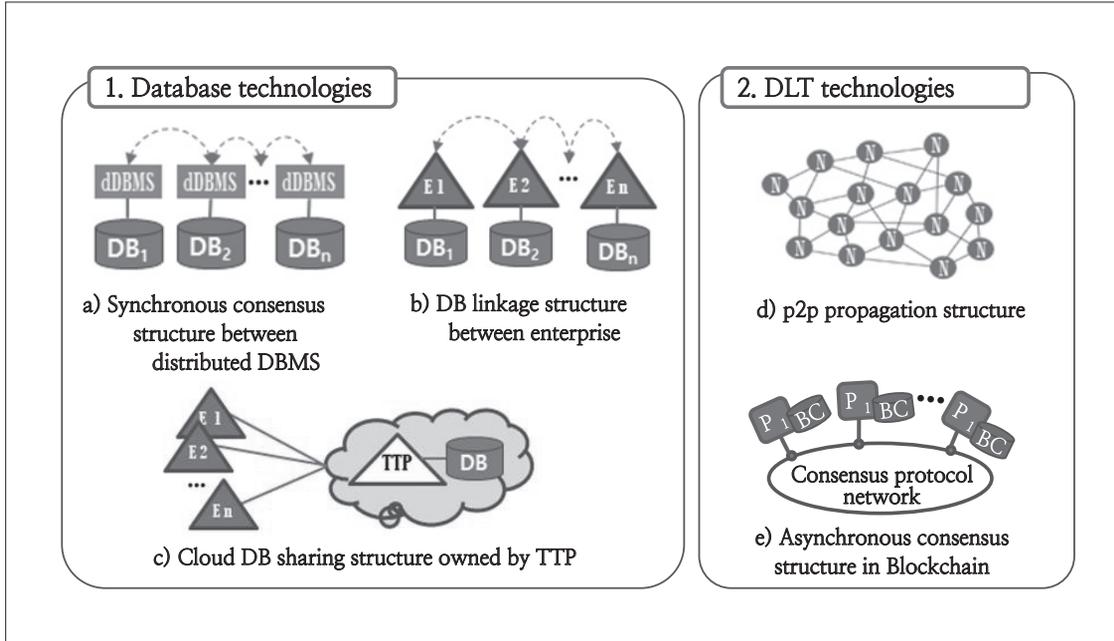
1. 블록체인

1) 비즈니스 분산원장기술 (DLT)

원장(Ledger)이란 부기 또는 회계 절차에 따라 거래내역을 기록한 장부를 말하며, 비즈니스의 이익 또는 손실을 파악하는 수단으로서 뿐만 아니라 비즈니스 활동과 상태를 서술하는 중요한 기록으로써 비즈니스와 외부 세계를 연결해주는 중요한 연결고리의 역할을 한다(Palanza, 1999). 데이터베이스 기술이 출현한 이래 원장은 중앙집중형 데이터베이스로 구축되고 관계자들이 공유함으로써 비즈니스 운영 및 협업의 핵심적인 시스템으로 자리매김해오고 있다. 그러나 데이터베이스 기반 원장의 공통적인 문제는 데이터베이스가 기본적으로 갱신(Update)을 기반으로 하기에 변경 및 조작 등에 대한 우려에서 자유로울 수가 없어 원장 내역의 정확성을 보장할 수 있는 무결성이 본질적으로 존재하지 못한다는 것이다(Liang, et al., 2017; Huang, et al., 2021; Peters, & Panayi, 2016). 데이터베이스 기반 원장은 일반적으로 다음의 3가지 유형의 구조(〈그림 1〉의 1 참조)와 제약점을 가진다.

a) **단일 조직 내의 동기적 합의에 의한 분산원장:** 원장 공유의 한 방편으로 동일 내역의 분산된 복제(Replica) 원장을 유지하기 위한 분산 DBMS 기반 원장은 데이터베이스관리시스템 간에 2단계 커밋 방식의 동기식 합의방식을 사용해야 했기에(Fischer, et al., 1985) 고비용과 극히 제한된 확장성(Scalability)이 존재하였고, 이기종 간 구현의 어려움 등으로 일반적으로 단일 조직 내에서만 일부 활용되었다.

b) **비즈니스 협업 지원을 위한 데이터베이스 연동 구조:** 공급망 관리 시스템 등과 같이 다수의 기업이 협업하는 공간에서는 원장 정보를 공유해왔다. 그러나 이 구조는 참여 기업들이 별도로 유지 관리하는 단절(Siloed)된 데이터베이스의 연동일 뿐, 원장 공유 구조는 아니기에 여전히 무결성과 신뢰성의 문제를



source: author.

〈그림 1〉 비즈니스 원장 기술의 진화
 〈Fig. 1〉 The evolution of business ledger technology

내포하고 있다.

c) 클라우드 기반 중앙 집중형 공유원장 구조: 모바일 시대에 이르러서는 원장의 공유성과 신뢰성을 향상시키기 위해 TTP가 클라우드에서 원장을 유지 관리하는 체제를 널리 활용해 오고 있으나 별도의 TTP 유지를 위해 고비용을 부담해야 하는 문제(Crosby, et al., 2016; Shi, et al., 2020)와 더불어 하나의 원장만을 유지하기에 단일실패지점의 문제(Tian & Austria, 2017; Wang, et al., 2018; Zhen, et al., 2018)를 내포하고 있다.

인터넷과 모바일 시대에 진입하면서 사회와 서비스 구조도 계층적 중앙집중형 구조에서 중앙 통제가 없는 p2p로 진화함에 따라, 또한 본질적으로 무결성과 신뢰성을 담보할 수 없는, 거래 참여 일방이 관리하는 데이터베이스 원장보다는 구성원 모두가 참여해 원장을 유지하는 분산원장 기술(DLT, Distributed Technology)

에 비즈니스가 주목하게 되었다. 본질적으로 비즈니스 공간은 거래 참여자체를 제한 또는 통제하지 않는, p2p 공간이기에 비신뢰 공간이다. DLT 또는 분산원장이란 기존의 데이터베이스 기반의 분산 원장과는 달리 중앙관리자 또는 TTP가 존재하지 않는 신뢰할 수 없는 p2p 네트워크 환경에서 지리적으로 분산된 다수의 복제되어 있는 공유 원장의 무결성과 신뢰성을 확보할 수 있는 기술을 말한다. DLT 기술은 일반적으로 2가지 유형의 구조를 가진다(〈그림 1〉의 2 참조).

d) 피어-투-피어 전파 구조: 가장 널리 알려진 DLT를 적용한 p2p 원장 시스템은 인터넷의 도메인 네임을 유지하는 도메인 네임 서비스(DNS, Domain Name Service)라 할 수 있다(McConaghy, et al., 2016). DNS는 p2p 네트워크인 인터넷 전반에 걸쳐 분산되어 있는 DNS 서버가 유지하는 분산원장의 무결성을 확보하기 위해 '수정 사항이 인지되면 네트워크

크로 연결된 이웃 DNS 서버에 즉시 통보한다.’라는 단순한 합의사항을 준수함으로써 비신뢰 공간인 인터넷에서 도메인 네임 원장의 신뢰성을 유지한다.

정보 기술적으로 DNS의 사례는 DLT에 있어서의 두 가지 내결함성 문제에 대한 해결책을 제시하였다(Belotti, et al., 2019). 첫 번째는 충돌내결함성(CFT, Cash Fault Tolerance)으로, p2p 분산 네트워크 시스템의 구성요소인 일부의 네트워크, 서버, 또는 소프트웨어 등이 비정상적인 상태, 오류, 또는 붕괴에도 불구하고 분산 네트워크 시스템이 정상적으로 유지될 수 있는 특성을 말한다. 일반적으로 네트워크 내에 비정상적인 노드 수(cf)가 전체(n)의 50%가 되지 않는 한, 즉 $n > 2cf + 1$ 이 유지되는 한 분산 네트워크 시스템은 올바르게 작동한다고 알려져 있다(Belotti, et al., 2019; Vukolić, 2016). 두 번째는 비잔틴내결함성(BFT, Byzantine Fault Tolerance)으로, 악의적이거나 예측할 수 없는 노드들의 행동에도 불구하고 p2p 분산 네트워크 시스템이 신뢰 상태를 유지할 수 있는 역량을 말하며, 일반적으로 악의적인 노드 수(bf)보다 세배 이상의 신뢰 있는 노드가 존재한다면($n > 3bf + 1$) 네트워크 시스템은 정상적으로 유지된다고 알려져 있다(Christidis & Devetskiotis, 2016; Shi, et al., 2020). 그러나 DNS 프로토콜을 포함한 기존의 DLT 기술은 동일한 자산을 두 번 거래하는 이중지출을 방지할 수 없기에 재산을 다루는 비즈니스 데이터베이스 원장의 용도로는 활용될 수 없다.

e) **블록체인, 분산 합의 네트워크 구조:** 비즈니스 트랜잭션은 원자성(Atomic)과 일관성(Consistency)을 유지해야 하는 고유한 특성이 있다. 원자성이란 트랜잭션이 실행되면 분산되어 있는 모든 복제 원장에 그 결과가 모두 적용되거나 또는 일부 원장에 적용할 수 없다면 모든 원장에 적용하지 말아야 한다는 것이고, 일관성이란 트랜잭션이 분산되어 있는 모든 복제된 원장의 상태를 하나의 상태에서 다른 유효한 상태로 모두 동일하게 변경해야 한다는 특성을 말한다(Luu, et al., 2016; Vukolić, 2016). 특히 비즈니스 원장은

분산된 환경에서도 복제되어 있는 다수의 원장이 동일한 상태를 유지해야 하는 상태머신(State Machine)의 특성(McConaghy, et al., 2016; Vukolić, 2016)을 만족시키지 못한다면 이를 악용해 동일한 자산을 두 번 거래하는 이중지출의 빌미를 제공(Nakamoto, 2008; Peters & Panayi, 2016; Tschorsch & Scheuermann, 2016)하기에 비즈니스 환경에서는 시차적 일관성이 존재할 수밖에 없었던 기존의 DLT 기술을 활용할 수 없었다.

그러나 Nakamoto(2008)에 의해 제안된 블록체인 또는 비트코인 암호화폐는 p2p 기반의 분산 환경에서 여러 곳에서 동시 다발적으로 발생하는 트랜잭션들로부터 동일한 메시지 시퀀스인 블록을 생성할 수 있는 구조와 원장의 원자성과 일관성을 유지할 수 있는 프로토콜이 제시됨에 따라 비즈니스 영역에서도 DLT로서의 블록체인시스템에 대한 관심을 갖게 되었다.

2) 원장의 무결성과 유효성: UTXO 모델과 블록체인 구조

디지털 자산이란 디지털 형식으로 존재하고, 사용할 권리가 명시되어 있는 모든 것을 말한다. 블록체인이 출현하기 이전의 디지털 콘텐츠는 무한히 복제할 수 있는 특성, 즉 디지털 희소성(Digital Scarcity)이 존재할 수 없었기에 별도의 지적재산권 등으로 보호되지 않는 경제적 가치가 없었다(Szabo, 2017). 최근 들어 비즈니스가 블록체인시스템에 대해 주목하는 이유는 첫째, 블록체인은 디지털 표현이 아닌 디지털 자산 자체를 표현할 수 있다는 것이다. 즉, 블록체인으로 기록되는 콘텐츠 또는 자산은 블록체인의 구조적 특성으로 인해 디지털 희소성이 보장되기에(즉, 복제 및 이중지출 방지) 암호화폐 등과 같이 가치를 보유할 수 있게 되었다(Back, et al., 2014; Bonneau, et al., 2015). 둘째, 블록체인은 비신뢰 p2p 비즈니스 공간을 신뢰 있는 공간으로 창출할 수 있다는 것이다. 즉, TTP의 중계나 개입 없이도 거래 당사자 간에 디지털 자산의 직거래가 가능한 p2p 네트워크의 실현(Jani, 2020)이 가능하기 때문이다. 이는

〈표 1〉 UTXO 모델과 계정 모델의 개념과 특징 비교
 (Table 1) Concepts and features comparison of UTXO model and Account model

Features	UTXO Model	Account Model
Basic concept	(Triple entry accounting) Records the asset movement (transaction history) with the result of the transaction.	(Double entry accounting) Maintains account balance as a result of transactions
Structure and status expression	(History-oriented) All transactions (histories) are organized in a manner of a directed acyclic graph which expresses the details and association of all transactions including STX and UTX. Blockchain size also increases as new transactions is added..	(Result-oriented) A table containing all accounts represents the current status (balance) of each account. Table size grows as accounts are added and is independent from the number of transactions.
Result of transaction execution	(Append history) Creates two new UTXs (pay and change) from the output of UTXO.	(Update) Update balance per account (row values in a table)
Account and balance	(No account & Anonymity) No account at all, so no balance at ledger level. But individual balance can be identified at individual's e-wallet.	(KYC) The balance is the current value of the account that is maintained as a row of a table.

블록체인 시스템이 데이터베이스 기반 원장에서 유지되어 오던 계정모델(Account Model)이 아닌 미사용 트랜잭션 모델(UTXO Model)과 복식부기(Double-entry Accounting)가 아닌 삼식부기(Triple-entry Accounting) 회계시스템을 사용하기 때문이라 할 수 있다. 블록체인의 UTXO 모델과 데이터베이스의 계정 모델에 대한 특징의 비교는 〈표 1〉에 요약한 바와 같다.

비즈니스 관점에서 트랜잭션이란 거래 당사자(예; 판매자와 구매자) 간에 수행되는 자산 교환에 대한 합의(Agreement)의 결과이다. 일반적으로 데이터베이스 원장에는 트랜잭션 실행의 결과를 차변과 대변에 두 가지 항목으로 동시에 기록하는 복식부기시스템을 활용하나(Cai, 2021), 디지털 자산인 비트코인과 같은 암호화폐 기반의 블록체인 시스템에서 트랜잭션은 디지털 자산에 대한 소유권의 이전 또는 할당을 기록한다.

블록체인에서의 트랜잭션은 사용된 트랜잭션 출력(STXO, Spent Transaction Output)과 미사용 트랜잭션 출력(UTXO, Unspent Transaction Output)으로 구분된다(Tschorsch & Scheuermann, 2016; Vujic'ic, et al., 2018). STXO는 디지털 자산의 가

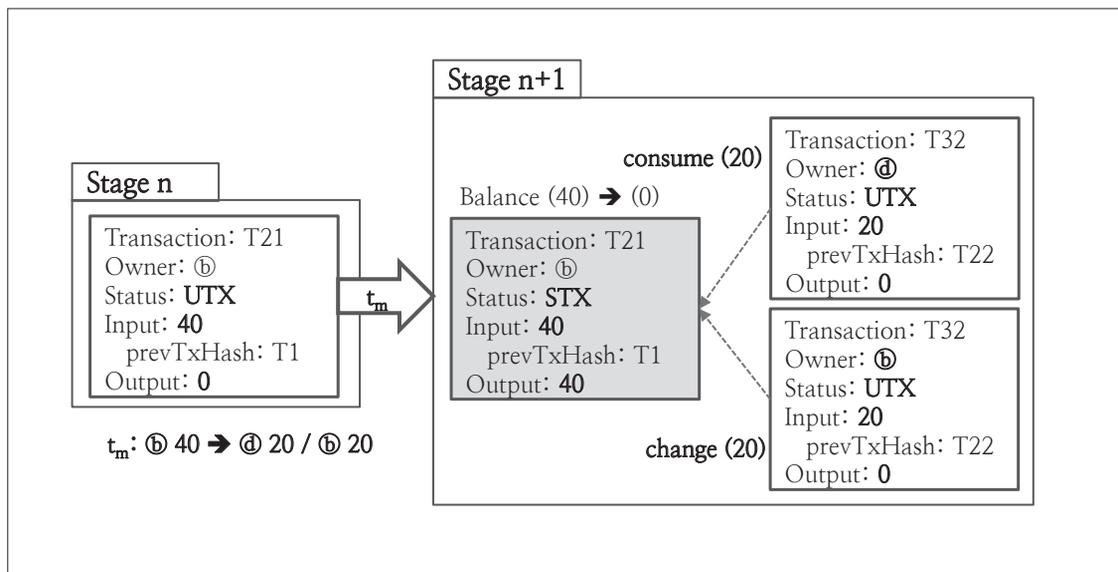
치를 나타내는 입력이 출력으로 모두 소진(output=input)되어 잔존하는 가치가 없기에 더 이상 사용할 수 없는 디지털 자산을 말하며, UTXO는 입력에 표시된 디지털 자산의 가치가 아직 소비되지 않았기에 (output=0) 추후 사용이 가능한 디지털 자산을 지칭한다.

블록체인 트랜잭션의 항목은 헤더, 입력, 및 출력 영역으로 구성된다. 입력 영역은 해당 디지털 자산의 가치 또는 값과 더불어 해당 가치를 전송한 이전 트랜잭션의 해시값(txHash)으로 표현되는 주소(prevTxHash)와 이전 소유자의 전자서명 항목으로 구성된다. 출력 영역은 전송 또는 분할할 자산의 가치와 해당 가치를 전송할 주소, 즉 신규 소유자의 공개키로 표현되는 디지털지갑주소를 표시한다. 트랜잭션 헤더는 해당 자산의 소유자를 해당 소유자의 디지털 지갑 주소로 식별하고, 트랜잭션 발생시간(lockTime) 등을 포함하며, 트랜잭션의 주소를 나타내고 트랜잭션 내역 변경을 감지하기 위한 트랜잭션의 해시값(txHash)으로 구성된다(Tschorsch & Scheuermann, 2016; Vujic'ic, et al., 2016).

데이터베이스에서의 트랜잭션은 원장의 상태를 업데이트하는 용도로만 활용되지만 블록체인에서는 원장의 상태를 변경시킨 자산의 이력을 나타낸다. 예를 들자면 현실세계에서 5만원 권으로 3만원을 지불하였을 때 데이터베이스 원장은 3만원이 지불되어 잔고 총액이 3만원 감소된 것만 나타내는데 반하여 블록체인은 현물자산인 5만 원권이 사용되어 3만원을 수신자에게 지불(전송)하고 2만원의 거스름을 받아 잔액이 남아있다는 현물의 이동(영수증)을 그대로 표현한다. 즉, <그림 2>의 예시와 같이 Stage n에서 트랜잭션 T21은 ㉞가 소유한 40의 값이 있는 UTX이며, ㉠에게 20을 지불하기 위한 트랜잭션 t_m 에 의해 다음 단계(Stage n+1)에서 트랜잭션 T21은 STX로 변경되면서 새로운 UTX 트랜잭션인 ㉠ 소유의 T32와 T21의 거스름인 ㉞ 소유의 T32로 분할 생성하여 자산 이동에 대한 이력을 기록한다. 이와 같은 방식으로 블록체인에서는 거래기록을 T32로 나타나는 수취인에 대한 credit, 지급자에 대한 차변, 및 영수증(당사자가 전자

서명한 자산의 이동 내역) 등의 세 가지 항목을 원장에 기록하기에 삼식부기 회계시스템이라 하며, 본질적으로 부인방지성과 포괄적인 감사성(Auditability)도 내포하기에 원장 유지의 효율성과 더불어 이를 활용하는 효과성이 제고 된다(Peters & Panayi, 2016).

블록체인을 디지털 자산을 표현하는 것으로 활용할 때 블록체인이 나타내는 총 자산의 합은 변화되지 않는다. 이는 비즈니스 영역에서 유통되는 통화량은 변경이 없으며 단지 네트워크 내에서 이동만 되듯이 블록체인 트랜잭션도 STX에서 복수의 UTX로 분할만 될 뿐이지 총 자산 가치는 불변이라는 것이다. 다만 현실세계에서 중앙은행이 새로운 화폐를 발행할 때 전체 통화량이 증가하듯이 블록체인에서도 네트워크 내의 통화량 또는 자산적 가치가 증가할 수 있는 경우는 채굴을 통해 새로운 자산을 보상받을 경우이며, 이 경우 이전 트랜잭션에 대한 이력의 존재 없이 신규 STX가 생성되며, 이를 코인베이스(Coinbase) 트랜잭션(Christidis & Devetsikiotis, 2016; Tschorsch &



source: author.

<그림 2> 블록체인의 사용(STX) 및 미사용(UTX) 트랜잭션의 예
<Fig. 2> An example of spent and unspent transactions in a blockchain

Scheuermann, 2016; Vujčić, et al., 2016)이라 한다. 비트코인의 경우 최초 블록에 코인베이스 트랜잭션으로 50코인 (50 BTC)이 보상되었고, 보상금이 1 사토시 (Satoshi, 10⁻⁸ BTC)까지 축소될 때까지 매 210,000 블록마다 절반으로 감소하도록 설계되어 총 통화량을 조절한다(Bonneau, et al., 2015; Tschorsch & Scheuermann, 2016; Vujčić, et al., 2018).

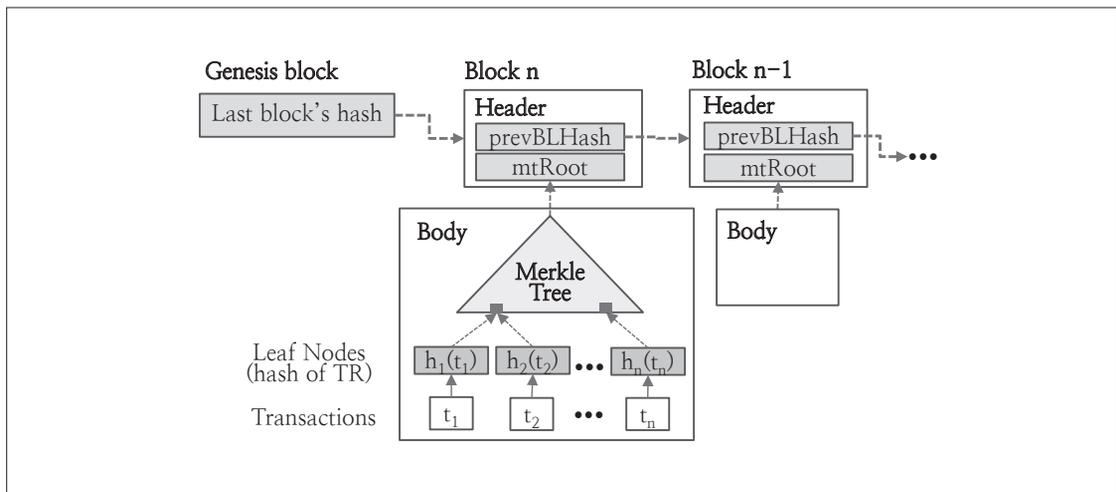
블록체인 원장은 p2p 네트워크 내에 존재하는 모든 자산의 소유상태(Ownership status)와 상태전이 이력(State transition history)을 나타내는 상태전이 시스템(STS, State Transition System)이다(Peters & Panayi, 2016; Sunny, et al., 2020; Vujčić, et al., 2016). 특정 시점에서의 원장의 전역상태(Global State)를 나타내는 것을 블록이라 하며, 블록은 해당 시점에 존재하는 모든 트랜잭션을 머클트리 형식으로 체계화해 보유해 자산의 소유상태를 나타내고, 각 블록은 생성시점의 역순으로 체인화하여 상태전이이력을 표현하고, 그 시작점은 최종 블록의 주소를 가지고 있는 제니시스 블록으로 나타낸다(Shi, et al., 2020;

Vujčić, et al., 2016; Zheng, et al., 2017).

원장의 필수 요건은 진실성 확보를 통해 신뢰성을 담보하는 것이다. 블록체인은 <그림 3>의 예시와 같이 비교적 단순한 구조를 가졌음에도 불구하고 블록체인 데이터구조의 특성으로 인해 전체 수명주기에 걸쳐 기록의 정확성과 일관성을 보장하기에 무결성이 확보되고, 블록체인, 블록, STX, UTX 등의 구조와 의미가 적법함을 나타내는 유효성(Validity)이 담보된다.

원장 또는 장부란 기본적으로 새로운 트랜잭션이 추가되어야 하기에 writable 저장매체인 하드디스크를 사용할 수밖에 없다. 기존의 데이터베이스 기반은 갱신기반이기에 사후 변조에 대한 대책이 없어 무결성을 담보하지 못한다. 블록체인도 하드디스크를 사용하나 변경이나 변조가 발생하면 이를 곧 감지할 수 있는 구조를 유지하기에 악의적인 의도로 블록 내의 트랜잭션 내용을 수정하고자 하는 의도를 가지지 못하도록 함으로써 원장의 무결성을 확보한다. 이는 마치 수많은 CCTV를 설치해 놓으면 해당 공간의 범죄행위가 사라지는 효과와 같다고 할 것이다.

블록체인 원장의 변경을 즉시 감지함으로써 무결성



source: author.

<그림 3> 블록체인 구조
<Fig. 3> Structure of Blockchain

과 유효성을 담보할 수 있는 중요한 기반 기술은 해싱과 머클트리이다. 암호화 해시함수(CSF, Cryptographic Hash Function)란 임의크기의 데이터(메시지)로부터 고정크기 비트문자열(메시지 요약)로 매핑하는 함수으로써 현대 암호화 기법의 기본도구이다. CSF는 일방향(One-wayness) 함수로 해시값으로부터 원본 메시지를 역추정할 수 없기에 암호화의 기본인 사전이미지 저항성(Preimage Resistance)을 가지며, 동일 데이터에 대해 항상 동일한 해시값을 생성하는 결정성(Deterministic)을 이용해 동일 메시지 식별에 사용되고, 입력데이터가 변하면 예측 불가능한 해시값을 산출하는 의사난수(Pseudorandom)의 특성을 활용해 위변조 식별에 사용되고, 동일한 해시값을 가지는 둘 이상의 데이터가 존재할 수 없는 충돌회피(Collision Resistance)의 특성으로 인해 디지털 지문(싸인) 또는 데이터 비교에 활용되는 등, 블록체인 영역에 활용된다(Peters & Panayi, 2016; Sharma & Balamurugan, 2020).

머클트리란 블록의 몸체를 구성하며, 모든 잎 노드(Leaf node)가 데이터 블록(트랜잭션)의 암호화 해시값으로 레이블이 지정되고, 잎 노드가 아닌 다른 모든 노드는 이웃한 두 개의 하위 노드 레이블의 암호화 해시로 정의되는 이진트리구조를 갖는다. 블록체인에서 하나의 블록은 해당 블록이 생성될 시점의 모든 유효한(Valid) 트랜잭션을 저장하는데 사용된다(Tschorsch & Scheuermann, 2021; Vujčić, et al., 2016; Zheng, et al., 2018). 일반적으로 트리는 루트에서부터 잎 노드까지 하향식으로 구축되는데 반해 머클트리는 상향식으로 구축된다. 이러한 머클트리와 암호화 해시의 특성을 활용하면 머클트리의 크기가 얼마이든지 간에 산출된 머클트리의 해시값이 블록 헤더의 mtRoot 항목에 저장된 해시값과 동일하다는 것만 확인하면 별도의 내용확인 없이 해당 머클트리와 모든 트랜잭션의 유효성, 즉 해당 시점의 원장기록이 변조되지 않았음을 효율적이고 안전하게 확인할 수 있다(Shi, et al., 2020). 또한 블록 헤더와 블록 몸체

(머클트리와 모든 트랜잭션) 전체에 대한 해시값을 블록 주소로 사용하고, 이를 활용해 블록의 체인화를 이룸으로써 악의적 공격자가 특정 블록의 내용을 변조한다면 해당 블록의 주소가 변경되어 선행 블록이 저장하고 있는 후행블록의 주소(prevBLHash)와 일치하지 않는 결과를 가져와 궁극적으로 블록의 체인화가 단절되는 현상이 나타남으로써 블록체인의 구조와 내용이 훼손되었는가를 손쉽게 빨리 알 수 있게 된다.

따라서 암호화 해시와 머클트리의 특성을 활용한 블록과 블록체인 구조는 본질적으로 위변조가 발생할 경우 즉각적으로 인지할 수 있기에 원장상태의 무결성과 트랜잭션의 유효성을 보장한다. 다만 블록의 위변조 식별이 아닌 p2p 네트워크상에 분산된 다수의 복제 블록체인(원장)을 위변조할 수 없게 만들어 원장의 불변성을 보장하기 위해서는 네트워크 구성원들의 합의 프로토콜과 이를 준수할 수 있도록 만드는 시스템이 필요하며, 이를 블록체인 시스템이라 한다.

3) 분산 합의: 원장의 불변성

분산 합의(Distributed Consensus)란 p2p 네트워크 환경에서 다수의 분산된 복제 원장들 간의 무결성과 일관성을 유지하기 위해서는 블록체인 네트워크는 ① 어떤 트랜잭션을 어떤 순서로 원장에 커밋할 것인가에 대한 동의가 선행되어야 하고(Jani, 2020; Luu, et al., 2016), ② 상태머신의 복제 방식(Luu, et al., 2016; McConaghy, et al., 2016), 및 ③ 원자적 브로드캐스트에 대한 합의(Christidis, & Devetsikiotis, 2016; Vukolić, 2016)가 전제되어야 한다.

블록체인 네트워크는 신규 블록 생성을 경쟁하는 채굴자와 블록체인 원장을 유지하는 피어 및 트랜잭션을 발생시키는 클라이언트로 구성된다. 블록체인 네트워크는 익명성이 보장되는 순수한 p2p 네트워크이며, 기본적인 커뮤니케이션 수단이 이웃한 노드들에게 메시지를 전송함으로써 일정 시간 이후에는 네트워크 구성원들 모두가 해당 메시지를 수신하는 가십(Gossip) 프로토콜을 사용한다.

비트코인 등의 암호화폐 기반의 블록체인에 활용되는 작업증명(PoW, Proof of Work) 기반의 합의는 참여와 역할을 제한하지 않은 비허가형 (Permmisionless) 시스템이기에 누구에게나 공평하기 위해 우연과 경쟁, 그리고 보상이라는 개념 하에 무작위적 동시성 제어 개념으로 네트워크가 운영된다. <그림 4>에 요약된 비트코인의 생애주기(Crosby, et al., 2016; Jani, 2020)를 살펴보면, ① 불특정 장소에서 불시에 발생하는 트랜잭션과. ② 이 트랜잭션이 가십 방식을 통해 채굴자들에게 전파되는 것도, 또한 ④ 채굴자들이 그간에 수집된 트랜잭션으로 새로운 블록을 제일 먼저 생성하기 위한 경쟁도 무작위적 우연성이 내재되어 있다.

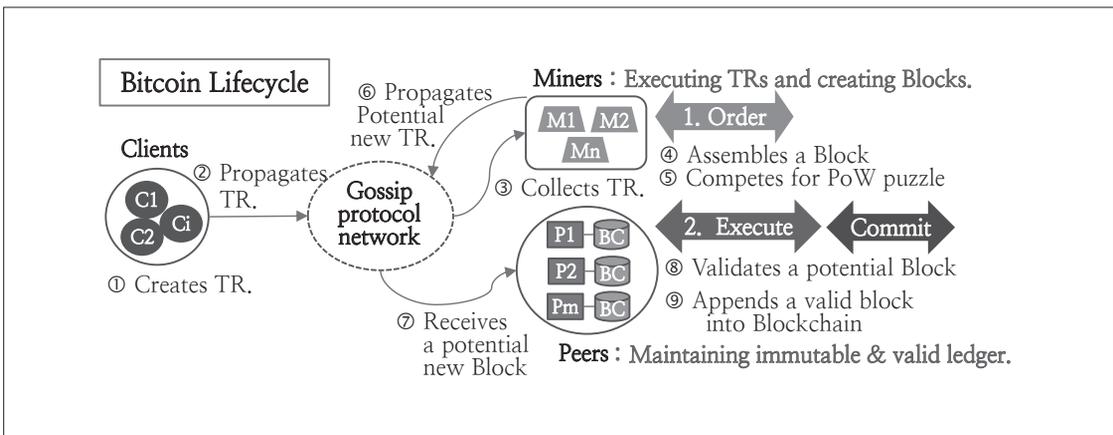
익명의 참여자로 구성된 블록체인 네트워크가 복제 원장의 불변성을 유지하는 것은 경쟁과 보상이라는 제도가 있기 때문이다. 경쟁이란 채굴자들이 신규블록을 생성하기 위해 네트워크가 요구하는 블록헤더의 항목인 임의의 수 너스를 산출하고, 이를 포함한 블록 전체의 해시 값으로 해당블록의 주소를 결정함으로써 신규블록을 제일 먼저 형성하는, 소위 ⑤ PoW 암호 풀기 경쟁을 하는 것이며, 계산적 낭비가 소모되는 PoW 경쟁의 참여를 유도하기 위해 우승자에게 코인베이스 트

랜잭션으로 보상을 한다.

PoW 경쟁의 우승자도 네트워크의 합의에 의해 결정된다. 즉, 블록체인 네트워크는 순수 p2p 네트워크이기에 경쟁자들은 주변 상황을 알 수 없고, 따라서 자신이 우승했는지 인지할 수 없다. 우승자는 원장을 유지하고 있는 피어들의 합의에 의해 결정된다. 즉, ⑦ 피어들은 가십네트워크로부터 신규 블록을 수신하고, ⑧ 수신된 잠재적 신규 블록의 타임스탬프의 기록 확인을 통해 제일 먼저 만들어진 블록을 인지하고 이들의 유효성을 검사한 후 ⑨ 적법한 블록으로 인정되면 기존의 블록체인의 제일 처음에 추가(Append)한다.

유효한 불변의 블록체인 원장을 유지하는 책임을 수행하는 피어들은 기존의 데이터베이스 기반 원장들이 계층적 체계에서 TTP 등이 우승자를 결정하는 동기식 방식을 사용하는데 반하여 각 피어가 우승자라고 간주하는 블록을 블록체인에 추가한 이후 주위의 피어와 원장 내역을 지속적으로 비교하면서 만약 잘못 판단하였을 경우 이를 수정하는 방식의 비동기식 합의를 수행한다.

블록체인의 가십 프로토콜로 인해 다수의 피어와 다른 신규블록을 수신한 일부 피어는 <그림 5>의 b)



source: author.

<그림 4> 비허가형 블록체인의 생애주기
 <Fig. 4> The lifecycle of a permissionless blockchain

예시와 같이 정상적인 체인을 형성하지 못한 포크(Fork)를 가지게 된다. 합의에 도달한 다수는 <그림 5>의 a)와 같이 블록체인을 지속적으로 추가해갈 것이기에 가장 긴 체인(Longest Chain)을 형성해나갈 것이며, 비정상적인 포크를 가진 소수의 피어들도 가십프로토콜을 통해 가장 긴 체인을 복사해옴으로써 얼마간 시간(비트코인의 경우, 최대 대략 6개 블록이 생성되는 시간 이내까지 지연됨)(Tschorsch, & Scheuermann, 2016; Vukolić, 2016)이 지나면 네트워크 내의 모든 블록체인 원장이 가장 긴 체인으로 합의에 도달하게 된다.

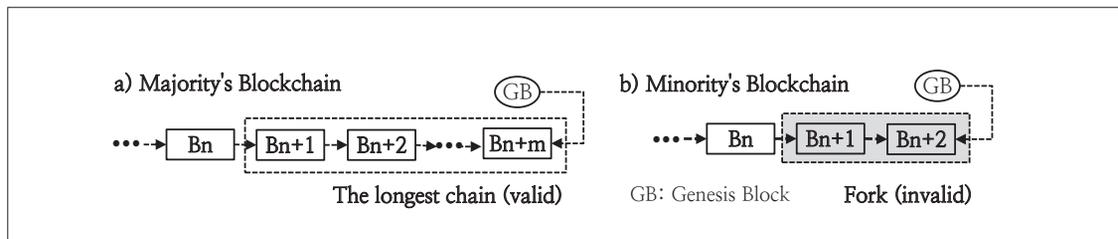
이와 같이 네트워크에 대한 악의적 공격(예, Sybil Attack)에 따른 위변조의 결과로 또는 비결정적, 확률적 합의 프로토콜로 인해 네트워크 내에 발생할 수도 있는 비정상적인 원장(포크)은 일정 시간 이내에 정상적인 원장(가장 긴 체인)으로 복원되는 것을 블록체인의 복원력 또는 탄력성(Christidis & Devetsikiotis, 2016; Tschorsch & Scheuermann, 2016; Vukolić, 2016)이라 하며, 이 복원력으로 인해 블록체인이 불변성을 가지게 된다.

Nakamoto(2008)는 이전의 p2p 분산 네트워크에서 해결하지 못하였던 고전적인 비잔틴장군의 문제에 대한 해결책(Lamport, et al., 1982; Peters & Panayi, 2016; Zheng, et al., 2017), 즉 이중지출이 근원적으로 발생할 수 없는 PoW 기반 합의 제시를 통해 불변의 탈중앙화 분산 공유 원장의 초석을 제공하

였으나, PoW 퍼즐 풀기 경쟁과 우승자, 즉 신규 블록에 대한 비결정성(non-deterministic) 등으로 인한 막대한 전산자원과 전력이 낭비되며(O'Leary, 2017; Vukolić, 2016), 무엇보다도 초당 7개 정도의 트랜잭션 처리 능력과 시간 당 6개 정도의 블록 생성 능력 등의 성능 제약성에 대한 단점이 존재한다(Zheng, et al., 2017, 2018). 또한 PoW 기반의 블록체인은 우연과 무작위를 추구했으나 시간이 지남에 따라 더 큰 계산능력을 보유한 채굴자들이 경쟁에서 승리하게 됨에 따라 몇몇 채굴자 연합(Mining Pools)이 전체 채굴의 절반 이상을 취득하는 등 순수 p2p가 아닌 중앙집중화 경향도 나타나게 되었다(McConaghy, et al., 2016; Tschorsch & Scheuermann, 2016; Zheng, et al., 2018).

이에 따라 우연과 무작위에 대한 공평성 관점을 달리하여 채굴의 중앙집중화 경향을 회피하기 위해 채굴 보상인 인센티브 문제를 다른 관점에서 해결하고자 하는 PoW를 변형한 다양한 합의방식을 사용하는 블록체인 기반 암호화폐가 제안되었고, 이를 총칭해 대안화폐(Altcoin)라 한다(Back, et al., 2014; Bonneau, et al., 2015; Tschorsch & Scheuermann, 2016).

대표적인 PoX 기반 합의 프로토콜로서는 암호화폐 보유지분율에 따라 의사결정 권한을 부여하는 지분증명(PoS, Poof of Stake), 지분 비례의 투표권 행사로 선출된 대표자들이 의사결정을 내리는 위임지분증명(DPoS, Delegated PoS), 활동적인 채굴자에게 보



source: author.

<그림 5> 가장 긴 체인과 포크
<Fig. 5> Longest chain and fork

상하고자 하는 활동증명(PoA, Poof of Activity), 거래기여도를 기준으로 보상하는 중요도증명(PoI, Poof of Importance), 대기시간이 제일 적은 노드를 선출하는 경과시간증명(PoET, Poof of Elapsed Time), 및 화폐의 소유와 유통을 모두 장려하는 지분증명속도(PoS, Poof of Stake Velocity) 등 다양한 합의 방식이 제안되었으나(Shi, et al., 2020; Tschorsch & Scheuermann, 2016; Zheng, et al., 2017, 2018), 사실은 경쟁에 있어서 공평성이란 존재하지 않기에 대한 화폐는 제안된 합의 방식이 적합한 영역에서만 활용되고 있는 실정이다.

2. 블록체인 시스템의 발전

1) 1세대 비트코인

2008년도에 비트코인이 소개되면서 널리 알려진 블록체인 시스템(Nakamoto, 2008)은 <표 2>에서 예시한 바와 같이 1세대 암호화폐기반의 블록체인에서, 스마트 계약을 도입한 2세대 이더리움(Ethereum)으로, 그리고 분산애플리케이션을 구현하기 위한 하이퍼레저 패브릭(Hyperledger Fabric) 시스템까지 지속적으로 그 적용범위를 확장하면서 진화해 왔다.

비트코인과 같은 1세대 블록체인은 디지털 자산에 대한 소유권 증명과 이전을 위한 불변의 원장을 유지하는 역할만 제공하기에 통칭해서 암호화폐 기반 블록체인이라 한다. 1세대 블록체인은 정보기술적 문제로 인해 그간에 구현하지 못해 왔던 DLT 문제를 분산 합의라는 새로운 접근으로 이를 해결함으로써 기록의 불변성을 이루었고, 데이터베이스 이외에는 선택권이 없었던 원장의 유지방식에 획기적인 기술적 진보를 이루어 왔으나 다음과 같은 사유로 암호화폐 이외의 다른 비즈니스 영역에는 별다른 관심을 받아오지 못해왔다.

• **트랜잭션 처리 성능의 문제:** 1세대 블록체인은 데이터베이스를 소유한 TTP의 통제나 중계가 필수적이었던 그간의 거래구조를 TTP의 중계 없이, 비록 신뢰하지 않은 거래 당사자 간에도 직접 거래할 수 있

는 피어-투-피어 구조를 획기적으로 제공하였다. 그러나 1세대 블록체인은 비허가형 공개 네트워크에 누구나 참여하는 작업증명 형식의 분산합의는 합의이 비결정성을 가질 수밖에 없었고(Christidis & Devetsikiotis, 2016; Tian, & Austria, 2017; Vukolić, 2016; Zheng, et al., 2017, 2018), 이로 인해 궁극적인 합의도달에 최대 60분(10분당 1개의 블록 생성, 및 최대 6개 블록이 소모되는 지연 합의과정)이 소모되고 초당 7개 정도의 트랜잭션을 처리할 수밖에 없는 성능(Bonneau, et al., 2015; Vukolic, 2016; Zheng, et al., 2017, 2018)의 약점이 암호화폐 이외의 영역에 블록체인 기술을 적용하기 어렵게 하였다.

• **비즈니스 프라이버시 문제:** 1세대 블록체인은 누구나 참여할 수 있는 익명성 네트워크에 누구나가 원장을 유지하는 피어의 역할과 트랜잭션의 유효성을 검토하는 채굴자가 될 수 있음을 의미한다(O'Leary, 2017; Wang, et al., 2018; Zheng, et al., 2017). 이는 곧 민감한 비즈니스 데이터를 포함하는 원장과 트랜잭션이 누구나에게 공개되는 프라이버시 문제(Shi, et al., 2020)가 내재되어 있음을 의미하기에 비즈니스 영역에서는 익명의 비허가형 네트워크의 도입이 쉬운 문제가 아니었다.

• **적용 영역의 확장성 문제:** 비즈니스에 새로운 시스템이 도입될 때 기존 시스템과의 연동성 또는 상호 운용성은 매우 중요한 고려 사항이다. 비즈니스 시스템은 통상 하나의 시스템으로 구성되는 것이 아니라 장시간 동안 체계적으로 쌓아온 비즈니스의 주요한 투자된 자산이기에 신규 시스템이 도입될 때 기존 시스템과의 연동성은 경제적 관점에서 중요한 평가척도가 된다. 그러나 1세대 블록체인은 비록 그 탁월한 기술적 우월성에도 불구하고 타 시스템과의 연동성을 위한 기능이 거의 없기에 비즈니스 영역에 도입되기 어려운 상황이었다. 그간에 블록체인 시스템이라 하면 타 시스템과 연동 없이 단독으로 운용되는 암호화폐 시스템만 알려진 것도 이러한 이유이다.

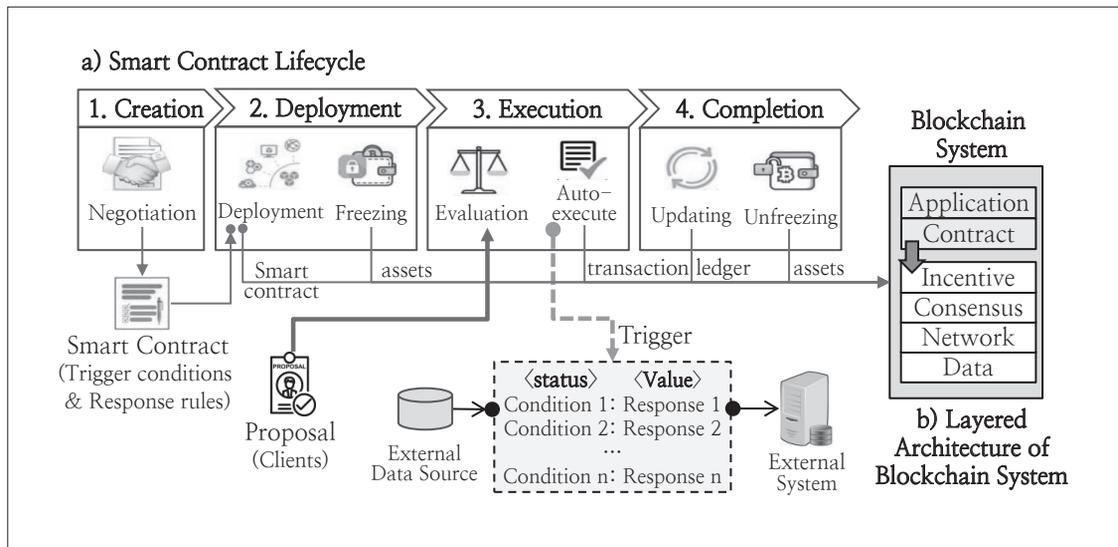
2) 2세대 이더리움

2세대 블록체인인 이더리움은 1세대 블록체인이 거래결과인 소유권 관련 원장만 유지하던 기능을 스마트 계약(Smart contract)을 도입함으로써 비즈니스 적용범위를 분산 애플리케이션 영역으로까지 확장하였다(Hewa, et al., 2021; Jani, 2020; Tschorsch & Scheuermann, 2016; Vukolić, 2016; Wang, et al., 2018). 스마트 계약이란 법적 언어가 아닌 컴퓨터 언어로 거래 약관이 기록된 계약으로서(Government Office for Science, 2016), 거래 계약의 조건이 충족될 때 거래가 자동으로 실행되어 트랜잭션을 발생시키도록 하는 블록체인에 내장된 컴퓨터 프로그램(Jani, 2020) 또는 계약 조건을 실행하는 컴퓨터화된 트랜잭션 프로토콜로 정의된다(Szabo, 1997).

이더리움의 스마트 계약은 튜링-완전형 고급언어인 Solidity로 프로그래밍되기에 거래 과정인 비즈니스 프로세스를 반영할 수 있고, 스택 기반 바이트 코드 언어로 변환되어 이더리움 가상 머신(EVM, Ethereum

Virtual Machine)에서 실행(Beck, 2018; Wang, et al., 2018; Luu, Chu & Olickel, 2016)되기에 블록체인 시스템에 저장해 놓고 여러 번 호출해 사용될 수 있는 상태 저장형 계약(Luu, Chu & Olickel, 2016)이다. 따라서 이더리움은 스마트 계약을 실행할 수 있는 탈중앙화 플랫폼(Jani, 2020) 또는 분산 응용 프로그램을 구현하기 위한 플랫폼(Kim & Laskowski, 2018)으로 인식된다. 스마트 계약이 도입된 이더리움은 블록 데이터, 가십 네트워크, 분산 합의, 및 작업 증명과 보상 등의 4계층으로 구성되어 있던 1세대 블록체인의 기능적 계층 상단에 스마트 계약 계층과 애플리케이션 계층을 가진 6계층 시스템(Wang, et al., 2018)으로 확장되었다(〈그림 6〉의 b 참조). 이더리움에서 스마트계약과 트랜잭션의 처리과정 다음과 같다.

- 1) 비즈니스 거래 공간에 참여한 거래 당사자들의 사전 합의에 따라 스마트 계약이 생성(Creation)되어
- 2) 블록체인 시스템에 배포(Deployment)되어 저장된다.
- 3) 애플리케이션의 거래 제안(Proposal)으로 스



Source: (Jani, 2020; Wang, et al., 2018) combined & revised.

〈그림 6〉 스마트 계약의 생애주기
〈Fig. 6〉 The lifecycle of Smart Contract

마트 계약이 실행되면 제안의 계약 조건 충족여부를 평가하고, 유효한 제안이면 해당 제안에 대한 트랜잭션이 실행(Execution)되면서 그 과정에서 블록체인 시스템의 외부 시스템과 연동 또는 상호작용하는 프로그램 코드를 실행할 수 있다. 4) 최종적으로 스마트 계약이 실행된 결과인 트랜잭션을 활용해 블록체인 원장의 상태를 갱신함으로써 종료(Completion)되는 라이프사이클(Jani, 2020)을 가진다(〈그림 6〉의 a 참조).

이더리움이 암호화폐로만으로 제한되었던 블록체인 시스템의 역량을 스마트계약을 도입함으로써 일부 비즈니스 분산 애플리케이션을 위한 플랫폼으로 확장 및 발전하였지만 비즈니스 정보시스템분야에 널리 활용되기에는 다음과 같은 몇 가지 제약이 있었다.

- **비즈니스 현실과의 괴리:** 이더리움은 1세대 블록체인과 마찬가지로 비허가 형식의 개방형 네트워크이기에 익명성이 보장되는 시스템이다. 그러나 현실의 비즈니스 세계에서는 범죄 및 탈세 등의 예방을 위한 글로벌적 정부 규제인 자금세탁방지법(AML, Anti-Money Laundering)과 금융실명제(KYC, Know Your Customer)를 준수(Cartier, et al., 2018; Government Office for Science, 2016; Hewa, et al., 2021; Moyano & Ross, 2017)해야 하는 의무가 있기에 익명성을 보장할 수가 없다. 또한 이더리움은 스마트 계약을 암호화폐인 이더로 결제하도록 되어 있으나 이 또한 동일한 문제로 현실의 비즈니스에서는 화폐안정성이 결여되어 있는 암호화폐로 결제하는 것을 수용하기 어렵다.
- **처리 성능의 제약:** 1세대 블록체인이 누가나 참여하는 분산 합의로 인한 비결정성 및 지연성 등의 비효율을 개선하기 위해 2세대 이더리움은 작업증명보다는 합의 지연성이 적은 지분증명을 사용하는 등으로 초당 약 20여개의 트랜잭션의 처리능력과 블록 확정에 약 15분 정도 시간이 지연되는 정도로 개선하였다(Hewa, et al., 2021). 그러나 일례로 비자카드의 경우, 초당 47,000~60,000여개의 트랜잭션 처리능력을 요구(Chang, et al., 2020; Vukolić,

2016)하는 경우와 같이 실제 비즈니스 영역에 적용하기에는 여전히 성능제약의 문제가 대두된다.

- **기존 시스템과의 연동성 제약:** 이더리움은 고급 언어인 Solidity를 사용하여 스마트 계약을 작성하고, 이 계약을 통해 외부 시스템과 저수준의 상호연동이 될 수 있는 방안은 제공하고 있으나, 기존 정보시스템과의 상호 운용성에 제약이 있으며, 기존 소프트웨어 엔지니어들에게는 Solidity가 낯선 언어인 등의 사유로 출현 당시 기대보다는 비즈니스 영역에 활용도가 낮은 편이다.

3) 3세대 하이퍼원장

암호화폐 계열의 1세대 블록체인과 2세대 이더리움에서 나타났던 블록체인의 제약점을 개선하고, 블록체인의 비즈니스 가용성을 제고하기 위한 제3세대 블록체인 플랫폼이 등장하였다. 하이퍼원장 패브릭은 사용자가 플러그-앤드-플레이(Plug and Play) 형식으로 블록체인 시스템을 구현할 수 있는 블록체인 개발 플랫폼으로써, 2016년도에 리눅스 재단에 의해 소개되었다(Hulea, et al., 2018; Sharma & Balamuruganb, 2020), 3세대 블록체인 시스템인 하이퍼 원장은 이전 세대와 비교하여 다음과 같은 특징을 가진다.

- **비암호화폐 기반 허가형 네트워크:** AML과 KYC의 규제를 받는 비즈니스 현실은 가상화폐인 암호화폐가 아닌 법정화폐를 사용해야 하고(Government Office for Science, 2016; Hewa, et al., 2021), 또한 익명의 아무나가 아닌 신분이 확인된 거래당사자 간의 거래를 수행해야 한다. 이에 따라 하이퍼원장 블록체인은 암호화폐가 없으며, 네트워크의 일원이 되기 위해서는 멤버십 서비스 제공자(MSP, Membership Service Provider)의 신분 확인이 필요한 허가형 네트워크(Liang, et al., 2017; Shi, et al., 2020)이다. 하이퍼원장의 허가형 운영 역량(Operational Capability)은 이해 관계자가 운영할 피어, 원장 범위 및 향상된 개인 정보 보호를 선택할 수 있는 유연성을 제공한다(Hewa, et al., 2021).

- **비즈니스 지향 하이퍼원장:** 계정 모델을 사용하는 데이터베이스는 계정별 잔액 또는 현 상태를 쉽게 관리할 수 있으나 기록의 불변성 유지에 취약하고(Peters & Panayi, 2016), 암호화폐 기반 블록체인이 사용하는 UTXO 모델 원장은 기록의 이력관리와 변조방지에는 탁월하나 개인별 상태관리 어렵다. 하이퍼원장은 계정모델과 UTXO 모델 두 가치를 모두를 원장으로 유지함으로써 비즈니스 요구사항인 고객별 상태와 기록의 불변성 모두를 충족시킨다(Hyperledger Fabric, 2021). 즉, 고객별 상태는 <키, 값>으로 유지하는 세계 상태(World state) 데이터베이스로 나타내고, 트랜잭션과 이력은 불변의 순서화된 블록체인에 저장한다.
- **합의의 결정성 제고 및 성능향상:** 하이퍼원장은 인증된 사용자 간의 다중 투표를 요구하는 PBFT(Practical BFT)를 합의알고리즘을 사용(Jani, 2020; Shi, et al., 2020; Wang, et al., 2018; Zheng, et al., 2017)하며, 블록 채굴자 역할을 하는 리더 노드인 오더러(Orderer)가 트랜잭션의 순서화와 신규 블록의 생성을 전담하도록 하는 등 합의 결정성을 대폭 제고함으로써(Christidis & Devetsikiotis, 2016; Hyperledger Fabric, 2021), 초당 20,000개의 트랜잭션을 처리할 수 있고 합의 지연도 1초 이내로 대폭 축소(Hewa, et al., 2021)하여 트랜잭션 처리 기반 비즈니스 업무도 담당할 수 있을 만큼 개선되었다.
- **보안성 제고 및 비즈니스 프라이버시 보호:** 이전 세대의 블록체인은 익명으로 참여하는 비허가형 네트워크이고 암호화폐를 다루기에 시빌 공격과 해킹 등의 보안위협이 있어왔다. 실제로 이더리움은 2016년도에 500억원이 넘는 이더(Ether, 이더리움의 암호화폐)가 해킹당하는 사고가 발생하여 모든 분산원장의 구조를 변경하는 하드포크(Hard Fork)를 실시한 바가 있다(Wang, et al., 2018; Vukolić, 2016). 또한 이전 세대 블록체인은 원장의 복사본을 누구나 갖질 수 있는 체제이기에 이를 비즈니스 용도로 활용하였을 때는, 특히 스마트 계약이 추가될 때에는 비즈니스

노하우가 공개되는 프라이버시 논란이 발생할 수 있다. 그러나 하이퍼원장은 허가형네트워크이므로 보안위협이 상당히 감소될 뿐만 아니라 원장도 허가된 피어만 유지할 수 있으며, 채널로 분리된 피어는 타 채널의 원장을 열람할 수 없도록 되어 있어 비즈니스 프라이버시를 보호할 수 있는 체제(Hyperledger Fabric, 2021)를 제시한다.

- **자바기반 스마트 계약과 기존 시스템과의 연동성 극대화:** 1세대 블록체인은 타 시스템과의 연계를 위한 방안이 제시되지 않았고, 2세대인 이더리움은 스마트 계약을 통해 타 시스템과 연동될 수는 있었으나 이더리움 고유의 언어인 Solidity만 사용해야 했기에 상호운영성은 제한적이었다. 이에 반해 하이퍼원장은 기존 시스템 구축에 널리 활용되고 있는 Java 등의 범용언어로 스마트 계약을 개발할 수 있도록 하여 기존 시스템과의 상호운영성이 확대되었다(Jani, 2020; Hewa, et al., 2021; Wang, et al., 2018).
- **구현의 다양성과 용이성:** 1세대 블록체인 시스템은 전체를 개발하여야 했고, 2세대 이더리움은 개발 플랫폼을 제시하여 개발 용이성은 제공하였으나 대부분의 블록체인 기능이 플랫폼 내부에 하드코딩되어 있기에 다양한 비즈니스 환경을 구축하기 어려웠다. 이에 반해 개발 플랫폼인 하이퍼원장은 구성요소가 모듈로 구성되고 환경설정에서 구성요소의 디자인적 사항을 설정할 수 있도록 하였으며, 대부분 플랫폼의 API만 호출하여 구축하도록 되어진 플랫폼 이기에 다양한 비즈니스 환경을 반영하여 디자인 및 구축할 수 있는 개발도구이다(Sharma & Balamurugan, 2020). 따라서 플러그-앤-플레이 및 모듈화 방식으로 다양한 블록체인 시스템을 용이하게 개발할 수 있는 환경을 제공한다.

전술한 비트코인, 이더리움 및 하이퍼원장에 대한 논의를 간략히 요약, 정리하면 <표 2>와 같고, 이 비교표는 구축하고자 하는 블록체인 시스템의 유형과 방법론을 결정하는데 유용한 의사결정 요인으로 활용될 수 있다.

〈표 2〉 비트코인, 이더리움 및 하이퍼원장 비교
(Table 2) The comparison of Bitcoin, Ethereum, and Hyperledger

		Bitcoin	Ethereum	Hyperldger
Generation		1 st	2 nd	3 rd
Released		2008	2015	2016
Purpose		Cryptocurrency	Distributed Application	Distributed Application
		Generic Blockchain	Generic Blockchain Platform	Modular Blockchain Platform
Network	Type	Permissionless	Permissionless	Permissioned
	Operation mode	Public	Public / Private	Private / Consortium
	Anonymity	Yes	Yes	No
Native cryptocurrency		Bitcoin	Ether	None
Consensus	Mechanism	PoW	PoS	Pluggable
	Level	Ledger	Ledger	Transaction
	Finality	No	No	Yes
	Latency	60 min.	15 min.	1 second
Ledger Type		UTXO model	UTXO model	UTXO & Account model
Smart Contract	Service	No	Yes	Yes
	Language	None	Solidity	Java, Go, etc.
Privacy		None	None	Through channel
Interoperability with Legacy		None	Narrow	Wide
Capacity (Throughput)		7 tps	20 tps	20,000 tps
Power consumption		Very poor	Poor	Good

3. 블록체인과 공급망 추적성

고도의 산업화는 편리한 삶을 영위할 수 있게도 하였지만 지구 환경 생태계의 악화를 가속화시키는 반대급부도 동시에 가져왔다. 1987년, 세계 환경 및 개발 위원회 (WCED)는 이에 대한 글로벌적 대처방안으로서의 지속가능성(Sustainability)을 ‘미래 세대의 요구를 충족시키는 능력을 손상시키지 않고 현재 세대의 요구를 충족시킬 수 있는 개발’ (Govindan, et al., 2014; Rajeeve, et al., 2017), 즉 지구의 생태계

와 인류 문명과의 공존성으로 정의한 바가 있다. 이의 연장선에서 기업이 비즈니스 생태계인 사회와 공존하면서 비즈니스를 지속할 수 있는 역량인 기업의 지속가능성에 대한 관심이 증가되고 있다. 특히 최근 들어 기업의 비재무적 요소인 ‘환경·사회·지배구조(ESG, Environment, Social, Governance)의 중요성이 부각(Alsayegh, et al., 2020; Dubey, et al., 2017; Fatemi, et al., 2018.; Govindan, et al., 2014; Rajeeve, et al., 2017) 되고 있는 것도 지속가능성 전략의 일환(Marrewijk & Wer, 2003)이라 할 수 있다.

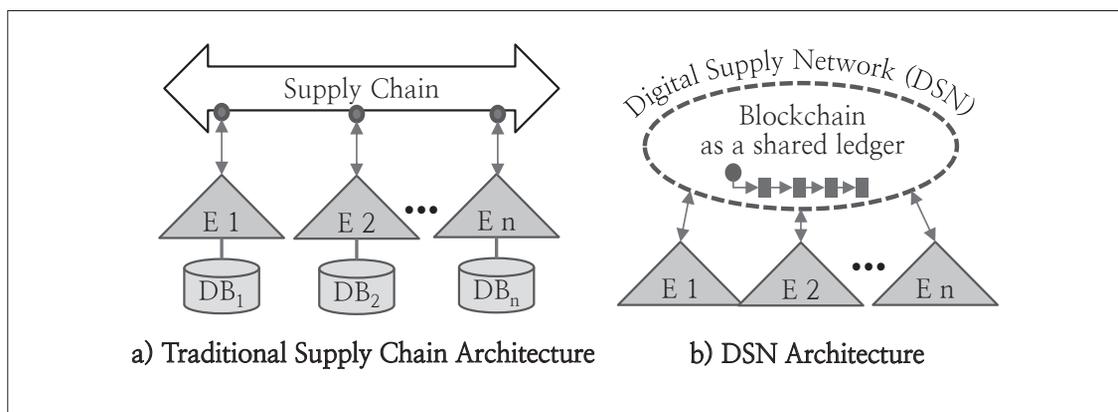
기업의 지속가능성을 지원하는 비즈니스 핵심요소 중의 하나가 기업 활동과 소비자 및 사회와의 접점을 제공하는 공급망이다(Mercan, et al., 2020). 네트워크 시대의 공급망은 공급자와 물류를 단순 통합하거나 또는 소비자에게 재화나 서비스를 전달하는 채널의 역할을 뛰어 넘어 각 활동에 대한 출처나 이력 등을 포함하는 과정의 투명성을 확립하고 이를 외부에 제공하는 역할이며, 이것이 궁극적으로 공급망을 포함한 비즈니스 전체에 대한 위험 완화와 지속가능성을 제고시킬 수 있다고 본다(Cartier, et al., 2018). 투명한 공급망이 되기 위해서는 원장 기록의 사후 변조를 방지할 수 있는 불변성과 기록 내용을 옛지에서부터 반대편의 옛지까지 역추적 할 수 있는 추적성이 보장되어야 한다(Bollen, 2009; Cartier, et al., 2018; Chang, et al., 2020; Figorilli, et al., 2018; Henchion, et al., 2017; Hobbs, 2016; Molina, et al., 2019; Tian & Austria, 2017).

정보시스템의 구조적 관점에서 볼 때, 전통적 공급망 구조는 추적성 시스템을 완벽하게 지원할 수 없다. 전통적 공급망의 구조는 <그림 7>의 a에 예시한 바와 같이 데이터베이스 기반 원장을 사용한다. 이와 같은 구조는 추적성 관점에서 여러 가지 문제를 야기한다.

첫째는 추적성 정보에 대한 신뢰성의 문제이다. 즉,

데이터베이스는 갱신을 기반으로 한 기술이기에 공급망 내의 데이터베이스는 언제든지 위변조 될 수 있는 가능성이 상존하고, 이에 따라 공급망 외부의 소비자 들은 기록의 신빙성에 대한 의구심을 가질 수 있다. 둘째는 공급망 정보의 투명성의 문제이다. 즉, 공급망의 정보는 각 기업이 관리하는 데이터베이스가 연계된 형태이기에 단절적인 구조를 가진다. 이 구조에서 일부 기업이 정보공개를 거부하거나 또는 일부를 숨기는 경우, 모든 정보가 투명하게 공개되지 않거나 이로 인해 추적이 단절될 개연성이 존재한다. 세 번째는 단일장애점(Single Failure Point) 문제이다. 이는 특정 정보는 특정 데이터베이스에 존재하게 되는 구조이기에, 만약 해당 데이터베이스에 장애 등이 발생된다면 추적은 해당 지점에서 종료될 수밖에 없는 구조적인 문제를 가지고 있다.

최근 들어 경영환경이 경영 이코시스템으로 변혁됨에 따라 전통적 공급망 구조도 디지털 공급망 네트워크(DSN, Digital Supply Network)로 진화되고 있다. 이전의 정적인 경영환경에서는 견고한(Chained) 직선형 공급망 구조이었다면 역동성 있는 이코시스템에서는 견고성이 아닌 유연성(Flexibility)이, 직선형이 아닌 네트워크 구조의 공급망으로 나타나며 이를



source: author.

<그림 7> 그림 공급망과 블록체인 기반 디지털 공급망 네트워크
<Fig. 7> Traditional Supply Chain and Digital Supply Network based on Blockchain

DSN이라 한다(Deloitte, 2016). 이 공급망은 정적이 아니기에 특정 공급이 완료되는 시점에는 해당 공급망이 상존하지 않을 수 있으며, 이에 따라 데이터베이스의 연동성이 단절되기에 추적이 불가능하며, 특히나 글로벌 DSN의 경우는 추적성이 더욱 어려워지거나 불가능할 경우도 있다.

이와 같은 상황을 개선하기 위한 대안으로 DSN의 추적성 데이터를 블록체인 구조로 유지하는 것이 제안되고 있으며(Figorilli, et al., 2018; Ronaghi, 2020; Tian & Austria, 2017), 그 구조는 <그림 7>의 b에 예시한 바와 같다. 블록체인은 본질적으로 불변성을 가지기에 전통적 공급망에서 제기되었던 신뢰성의 문제를 해결할 수 있는 대안이며, 블록체인은 구성원 모두가 복제된 원장을 보유하기 때문에 논리적으로는 통합된 데이터베이스와 같은 효과를 가지기에 정보의 투명성 문제에 대한 해결책이며, 또한 다수의 복제된 원장이 유지되기에 단일장애지점의 문제도 극복할 수 있는 대안적 저장매체이다. 특히 DSN의 경우, 이전 상황에 대한 공급 주체들이 상존하지 않거나 또는 공급망에서 배제되더라도 해당 정보는 DSN 내에 블록체인 원장으로 상존할 뿐만 아니라 블록체인의 고유한 특성으로 인해 언제든지 역추적 가능한 추적성을 본질적으로 내재하고 있는 원장구조이다.

최근의 비즈니스 영역에 대한 블록체인 연구는 공급망의 추적성 또는 원장 기록의 추적성 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 소비자들의 최근 관심인 건강과 안전을 충족시키기 위해 식품안전을 위한 농식품공급망(Bollen & Emond, 2014; Desai, et al., 2019; Henchion, et al., 2017; Hobbs, 2016; Kosba, et al., 2016; Ronaghi, 2020; Tian & Austria,

2017), 의료 및 의약품 공급망(Abu-elez, et al., 2020; Chan, et al., 2020; Gul, et al., 2021; Hulea, et al. 2018; Hung, et al., 2021; Molina, et al., 2019; Reda, et al., 2020; Sharma, & Balamurugan, 2020) 등의 추적성을 위해 블록체인을 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

Ⅲ. 연구수행 방법

1. 문헌분석 방법

본 연구는 블록체인 기반 공급망 추적성 관련 연구 동향을 분석하기 위해 해외문헌의 경우는 '구글학술검색'과 주요 해외연구문헌 데이터베이스인 'ScienceDirect'를 활용하였고, 국내문헌의 경우는 'DBpia'를 활용하였다.

구글학술검색의 경우, 본 연구를 위한 예비검색과정에서 'blockchain & supply chain & traceability' 키워드로 2008년도 검색된 총 5건의 논문 모두가 연도식별에 오류가 있음이 발견되었다. 3건¹⁾의 논문은 2020년도이나 구글은 2008년도로 분류하였고, 2건의 논문은 연도를 식별할 정보가 없었으나 그 중 1건²⁾은 타 논문에서 2018년도 논문으로 참조되었고, 다른 1건³⁾은 해당 논문에서 2019년도 논문을 참고하였기에 적어도 2008년도는 아닌 것으로 확인되었다. 연도별 연구 동향이 주요 연구결과로 기대되는 본 연구의 특성상 구글학술검색을 주된 검색도구로 활용할 수 없었다.

본 연구는 학술연구논문을 분석하는 것이 주목적이기에 검색된 학술문헌 중에서 연구논문만을 주 대상으로 하고, 리뷰논문, 학술발표, 연구보고서, 백서, 단행

1) Chhodvadiya, et al., (2020) "A Survey on Electronic Health Records using Blockchain with Attribute-based Signature Scheme.", International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 7(5). / Ghanghoria, et al. (2020) "Secure E-Documents Storage using Blockchain.", International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 7(5). / Sarvanan, et al. (2020) "Food Supply Chain Management using Blockchain in Food Traceability.", International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 7(5).

2) Development and security of blockchain consensus mechanism, 타논문에서 2018년도로 레퍼런스함.

3) Salem, et al. (?) "Report of Blockchain Techniques and Applications." 2019년도 논문 레퍼런스함.

본 등의 다양한 유형의 학술문헌은 주 분석에서 배제하였다. 따라서 본 연구에서는 연구논문의 분리검색이 어렵고 또한 일부 검색오류가 발견된 구글학술검색은 전반적인 블록체인 관련 연구 동향 분석에 활용하였고, 분류결과에 대한 신뢰도가 높고 다양한 조건 검색이 가능한 ScienceDirect는 문헌식별 도구로 활용하였다.

본 연구의 문헌 식별 방식은 동시단어출현분석을 원용해 논문원문에 둘 이상의 검색단어가 출현한 논문목록을 검색한 이후, 검색된 모든 논문을 다운받아 원문의 초록(Abstract)분석을 통해 연구대상 논문 여부를 판단하였다. 만약 초록만으로 판단할 수 없는 경우는 본문을 활용하였다.

본 연구의 연구목적에 부합하는 ‘블록체인 기반 공급망 추적성’ 분야의 연구논문(2020년까지)을 식별하기 위해 ‘Blockchain’, ‘supply chain’ 및 ‘traceability’의 3개 검색어를 활용해 ScienceDirect를 검색하였다.

해외논문의 경우, <표 3>에 예시한 바와 같이 검색된 총 730건이 논문 중에서 기타문헌(439건)을 제외한 438건의 연구논문을 식별하였고, 연구논문 중에서 기타 분야의 문헌(279건)을 제외한 159건을 경영분야 연구논문으로 식별하였다. 식별된 논문의 초록과 본문

을 분석하여 내용부적합 논문(총 50건)을 제외한 109건을 본 연구의 분석대상 논문으로 선정하였다. 주된 연구가 블록체인 기반 공급망이 아니며, 본문에서 단지 몇 차례 블록체인 또는 공급망에 대한 단어를 나열하는 수준의 논문은 내용부적합으로 판단하였다.

국내 문헌의 경우, 블록체인 관련 연구 결과가 상당히 적은 것으로 파악되어 검색 키워드를 해외문헌의 경우보다 폭넓게 적용하였고(‘블록체인 & 공급망’), 이 결과 총 9건의 문헌이 식별되었으며, 해외문헌과 동일한 절차를 거쳐 총 6건의 연구대상 논문을 식별하였다. 국내 문헌의 경우, 식별된 논문의 수가 적은 관계로 별도로 분류 및 분석하지 않고 전체 논문을 대상으로 토의하였다.

2. 문헌분석 기준

1) 연구동향 분석 기준

블록체인 분야 연구 동향의 분석을 위해 수집된 연구문헌을 연구분야별로 세분화하여 분석할 학문분야를 <표 4>와 같이 정의하였다. 해당 분석 기준을 적용해 수집된 문헌을 분류하고 이를 연도별로 세분화해

<표 3> 논문 식별 결과

<Table 3> Results of dissertation identification

Year	Oversea literatures (Blockchain & Supply chain & Traceability)						Domestic literatures(Blockchain & Supply Chain)					
	Total	LiteratureTypes		Searched literature			Total	LiteratureTypes		Searched literature		
		Research articles	others	Business	Inadequate	Target		Research articles	Others	Business	Inadequate	Target
2015	5	0	5	0		0	9	6	3	6		6
2016	3	1	2	0		0	0	0				0
2017	19	9	10	7	2	5	2	1	1	1		1
2018	68	34	34	6	0	6	2	0	2			0
2019	218	128	90	46	12	34	4	3	1	3		3
2020	417	266	151	100	36	64	1	1	0	1		1
Total	730	438	439	159	50	109	18	11	7	11	0	11

〈표 4〉 연구동향 분석을 위한 연구 분야 분류 기준
 〈Table 4〉 Criteria for Classifying Research Fields for Research Trend Analysis

Research area		Detailed research area
Business (Mgt.)		Management, accounting, & decision science related areas
Social Science		Social science, economics, & social psychology related areas
Technology (Engineering)	Basic	Computer & IT, environmental science, mathematics related areas
	Applied	Applied engineering area including enegy

〈표 5〉 일반 분석 기준
 〈Table 5〉 General analysis criteria

내용		Description
Publishing year		The year in which the article was published
Overall research method	Empirical	Research that present analysis results by observing actual phenomena
	non-empirical	Research on ideas and/or frameworks
Empirical	Experimental	Research with laboratory and field experiments
	Survey	Research using questionnaires
	Case study	Research that conduct in-depth analysis of one or more organizations/systems
Non-empirical	Conceptual framework	Research to present a conceptual model or framework to define the scope/content of the research field
	Math./Eng. framework	Research to present a mathematical or engineering model to define the scope/content of the research field

다양한 그래프로 작성하여 분석함으로써 연구동향에 대한 거시적 흐름을 파악 및 분석하고, 분석결과와 시사점을 토의하였다.

2) 연구방법 분석 기준

논문 발간 년도와 연구방법 및 세부 연구방법 등 일반적인 분석 기준에 따라 본 연구의 일반 분석 기준을 〈표 5〉와 같이 정의하였다. 이 기준에 따라 연구대상 논문을 분석하고, 결과와 시사점을 제시하였다.

3) 연구분야 분석 기준

블록체인 기반 공급망 추적성을 위한 연구논문은 의료를 포함한 헬스케어, 의약, 식음료, 제조기반 기

업, 금융을 포함한 서비스, 및 기타 등의 6가지 공급망 유형별로 연구논문을 분류 및 분석하고 시사점을 토의하였다.

IV. 분석 결과

1. 블록체인 관련 연구 동향

블록체인 관련 연구동향 분석을 위해 'Blockchain' 과 'Blockchain & business'의 키워드로 구글과 ScienceDirect를 검색하였고, 그 결과는 〈그림 8〉과 같다. 〈그림 8〉의 a는 모든 연구 관련 문헌을 검색한

구글학술검색의 결과이며, <그림 8>의 b는 연구논문만 검색한 ScienceDirect의 검색결과이다.

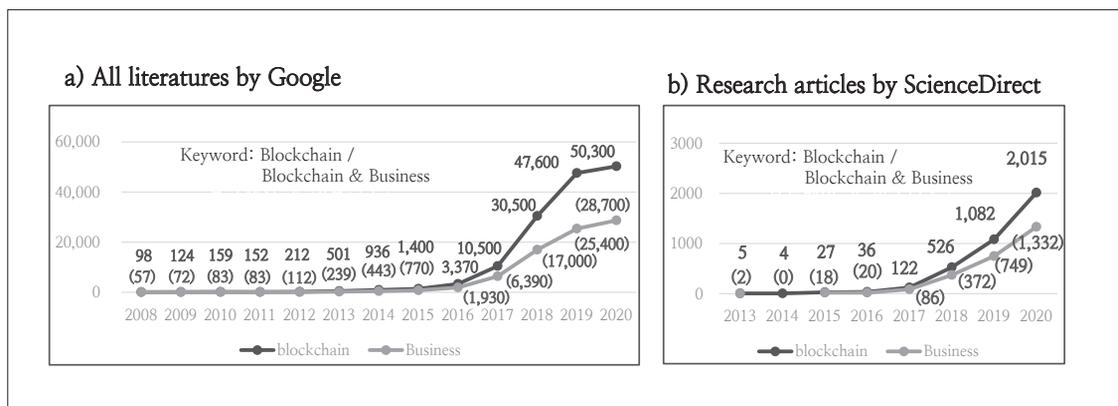
이 결과로부터 다음이 분석되었다.

• **연구 문헌과 연구논문의 상관성:** 모든 문헌의 검색 결과와 연구논문만의 검색결과는 그래프 상에서 유사 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 2020년도에 출간된 블록체인 관련 연구문헌은 총 50,300건이며, 이 중에서 비즈니스 관련은 28,700건으로써 전체문헌 대비 57.1%로 나타났다. 2020년도의 비즈니스 분야 연구논문은 총 1,332건으로 전체 2,015건 대비 66.1%로 나타났다. 구글로 검색한 'Blockchain'과 'Blockchain & Business'에 대한 모든 연구문헌과 동일한 조건으로 검색된 연구문헌의 증가추이에 대한 상관관계계수는 'Blockchain'은 0.9261, 'Blockchain & Business'은 0.9415로 나타나 둘 사이의 매우 높은 상관성이 있는 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구에서 수집한 연구논문이 모든 연구문헌을 대표할 수 있는 적합한 표본집단이라는 것을 확인 할 수 있었다.

• **3세대 블록체인 등장 이후인 2018년도부터 연구 활성화:** 모든 연구문헌과 연구논문의 검색결과인 <그림 8>의 a와 <그림 8>의 b에서 두 결과 모두 2008년도부터 연구 활동이 활발해졌음을 확인할 수 있다.

이는 2018년도 이전에는 블록체인 기술의 적용영역이 암호화폐에 국한되었고, 다양한 적용영역을 발견하지 못하였음을 나타낸다고 볼 수 있다. 즉, 2008년도에 출현한 비트코인은 그간에 기술적으로 해결하지 못하였던 DLT의 비잔틴장군의 문제 및 이중지출방지 등의 문제를 PoW 기반의 합의절차로 해결하였고, 이 결과 상호 신뢰하지 않는 당사자 간에도 p2p 방식으로 안전한 거래와 관리가 이루어질 수 있는 불변의 탈중앙화 분산 복제 원장기술이 확인되었음에도 불구하고 그 적용영역은 암호화폐에 국한되어 있었다.

비트코인의 성공을 확인한 이래 암호화폐가 아닌 분산기술 또는 분산원장 기술을 비즈니스에 적용하고자 하는 연구와 노력들이 진행되었고, 이 결과 스마트 계약을 도입하여 암호화폐만이 아닌 분산애플리케이션을 운용하고자 하는 플랫폼인 2세대 블록체인인 이더리움이 2015년도에 출현하였다. 또한 비즈니스 환경을 그대로 투영할 수 있고, 기존 비즈니스 시스템과도 연동이 가능하며, 모듈형으로 비즈니스 블록체인 시스템을 구현할 수 있는 개발 플랫폼인 제3세대 블록체인인 HyperLedger Fabric이 등장함에 따라 암호화폐만 아닌 비즈니스 분산 애플리케이션으로 확대된 관점으로 블록체인 기술을 활용할 수 있게 되었다.



source: author.

〈그림 8〉 비즈니스 분야의 블록체인 관련 연구 동향
 〈Fig. 8〉 Blockchain-related research trends in the business field

이의 결과로 블록체인을 다양한 영역에, 다양한 목적으로 활용하고자 하는 연구가 폭발적으로 증가하였고, 그 추이가 <그림 8>의 그래프 결과로 나타난 것이라 판단한다.

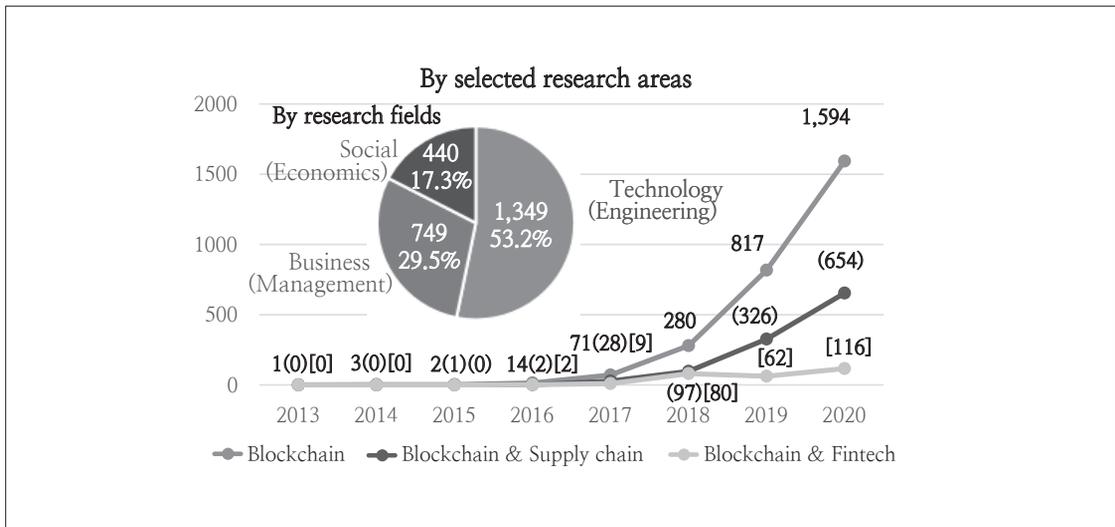
• **기술(공학)은 확장성, 비즈니스(적용)은 공급망 추적성에 초점:** 블록체인 관련 연구논문에 대한 연구 분야별 분석결과는 <그림 9>와 같으며, 전 분야 연구논문은 2020년도에 1,594건이고, 이 중에서 공급망 관련 연구가 654건(전체 대비 41.0%)이었고, 금융관련 핀테크(Fintech) 분야는 116건(전체 대비 7.3%)로 나타났다.

2013년도부터 누적한 전체 연구논문(4,919건) 대비 블록체인 공급망 관련 연구논문은 총 2,538건(51.6%)으로 파악되었다. 블록체인 공급망 분야 연구논문은 기술 및 공학 분야가 1,359건(53.2%), 비즈니스 및 경영부분이 749건(29.5%), 및 경제를 포함한 사회·문화 영역이 440건(17.3%)로 파악되었다. 전술한 조사결과는 다음과 같이 분석 및 해석될 수 있다.

블록체인기술을 암호화폐에만 적용하고자 했던 2018년도 이전에는 기술, 비즈니스, 및 사회 영역에

대한 연구가 부진하였다. 이는 곧 Nakamoto(2008)가 비트코인으로 구현하였던 블록체인 기술의 완성도가 높았기에 일부 합의 프로토콜의 개선을 위한 연구 이외에는 활성화되지 못해 왔음을 의미한다. 특히 블록체인이 처음 등장하였을 때, 분산원장을 활용하는 금융의 선진화에 대한 기대가 상당하였으나 <그림 9>에 나타난 바와 같이 블록체인 기술과 공급망 등에 대한 연구가 폭증하고 있는 2018년도 이후에도 핀테크 관련 연구는 정체된 현상을 보이고 있는 것으로 나타났다. 이는 곧 블록체인의 낮은 트랜잭션 처리역량에 기인하기도 하지만, 다른 관점에서는 비즈니스 영역에서는 블록체인 기술을 단지 트랜잭션과 분산원장이라는 관점이 아니라 분산애플리케이션과 이력추적을 통한 투명성이 주 추세를 나타낸다고 하겠다.

블록체인 관련 연구논문 중에서 공학 및 기술 관련 연구논문이 전체의 절반이 넘는 것으로 조사되었는데, 이들의 대부분이 또 다른 암호화폐가 아닌 블록체인의 확장성 관련 연구로 파악되었다. 즉, 블록체인 기술이 암호화폐 영역만이 아닌 비즈니스 영역으



source: author.

<그림 9> 블록체인 관련 연구논문의 분야별 추이
 <Fig. 9> Trends of research papers related to blockchain by field

로 확장되어 4차 산업 사회의 중추적 역할을 할 수 있도록 하기 위해서는 블록체인시스템의 단점으로 지적되어온 트랜잭션의 처리량의 획기적인 확대가 필요하다. 이에 따라 합의 프로토콜의 개선, 블록 크기와 구성의 경량화, 가십 프로토콜의 개선을 통한 네트워크의 처리량 확대 등에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있음을 확인하였다.

2020년도까지 출간된 블록체인 관련 연구논문의 상당부분이 공급망 관련 연구(51.6%)로 나타났다. 이는 현재 및 가까운 미래의 주된 연구 분야가 비즈니스 공간의 투명성(Transparency)을 제고하기 위해 블록체인 기술을 적용해 공급망의 추적성과 감사가능성(Auditability)을 제고하여, 궁극적으로는 소비자와 사회에 대한 비즈니스의 신뢰(Trust)를 제고하고자 하는 학계와 산업계의 노력의 결과라고 볼 수 있다.

전술한 내용을 종합하면, 연구논문 중심으로 분석한 최근의 블록체인 관련 분야의 연구동향은 기술 및 공학적 관점에서는 블록체인의 처리량을 높이기 위한 블록체인의 확장성 관련 연구가 주된 영역이며, 비즈니스적 관점에서는 분산 애플리케이션과 분산원장의 기술을 활용해 공급망의 추적성 구현을 통한 비즈니스의 신뢰확보에 관련 연구가 중심축임을 파악하였다.

2. 연구방법 분석

블록체인 기반 공급망 추적성을 연구한 논문들의 연구방법을 분석한 결과는 <표 6>과 같다. 총 109건의 분석대상 논문 중 비실증연구가 69건(63.3%), 실증연구가 40건(36.7%)으로 조사되었다.

이 분석결과는 이전의 혁신적 기술이 비즈니스에 적용될 때와 유사한 사례로 나타났다. 즉, 블록체인을 활용한 공급망의 구축은 아직은 도입단계이기에, 관련 시스템을 도입하기 위한 개념과 체계 및 아키텍처를 제안하는 수준의 논문이 대세를 이루고 있다.

일반적으로 비즈니스 시스템이 도입된 이후에는 성공과 실패에 대한 연구 및 해당 시스템의 성능을 평가하기 위한 연구가 보편적으로 행하여진다. 그러나 본 연구의 결과는 비즈니스에 구현되어 운영되는 블록체인 기반 공급망이 거의 없는 상황에서 성공과 실패 또는 성능 평가 등의 연구가 진행되기 어려운 환경을 나타내고 있다. 실험 연구가 4건이 식별되었으나 이는 프로토타입을 활용해 비즈니스 적용가능성을 확인하거나 또는 성능을 평가하는 수준이었다. 또한 대부분의 서베이 기반 연구들도 실제 시스템을 사용하는 최종사용자를 대상으로 진행한 것이 아니라 도입 단계

<표 6> 블록체인 기반 공급망 추적성 관련 연구논문의 연구 방법 분석 결과

<Table 6> Research method analysis results of research articles in the area of blockchain-based supply chain traceability

Year	Non-empirical research			Empirical research				Total
	Conceptual framework	Math./Eng. framework	Subtotal	Experiment	Survey	Case study	Subtotal	
2017	4	0	4	1	0	0	1	5
2018	2	1	3	0	0	3	3	6
2019	16	10	26	0	2	6	8	34
2020	17	19	36	3	8	17	28	64
합계	39 35.8%	30 27.5%	69 63.3%	4 3.7%	10 9.2%	26 23.9%	40 36.7%	109 100.0%

또는 도입을 검토하는 단계에서 관계자들을 대상으로 성공과 실패의 요인을, 또는 기대효과 등을 식별하는 연구가 대부분으로 나타났다. 대부분의 사례연구들은 특정 공급망이 블록체인으로 구현된 사례를 연구하는 것이 아니라 특정 비즈니스케이스에 대한 블록체인화에 따른 시나리오의 개발, 프로세스의 모델, 및 스마트 계약의 디자인 등에 대한 사례연구이었다.

본 연구에서는 연구대상 논문들을 분석한 결과 블록체인 기반 공급망과 추적성 시스템은 도입 초기 단계임을 확인할 수 있었다.

3. 연구대상 영역 분석

블록체인 기반 공급망 추적성을 연구한 논문들이 주 대상으로 하는 비즈니스 영역을 분석한 결과는 <표 7>과 같다.

상당부분의 연구가 전통적 공급망인 제조/판매 공급망(53건, 48.6%)을 연구대상체로 하였으며, 특정 공급망 분야를 적시하지 않고 일반적인 물류의 관점에서 공급망을 대상으로 한 연구가 43건(32.1%)로 나타났다. 이와 같은 현상은 다음의 두 가지로 설명될 수 있다.

첫째는 블록체인 기술의 특징 또는 장점이라 할 수 있다. 기존의 공급망은 각 기업이 보유한 ERP 시스템이나 또는 데이터베이스 시스템을 연계하는 아래로의 통합이라면 블록체인은 개념적으로 각 기업의 상위에

있는 공유원장이기에 하향이 아닌 상향적 통합을 의미하며, 일반적으로 상향통합은 기존 시스템보다 추상성을 가진다. 따라서 상위적 개념으로 구현되는 블록체인의 공급망 시스템은 하위의 비즈니스 영역의 영향을 거의 받지 않는다고 할 수 있다. 즉, 전사적 자원관리를 위한 ERP 시스템은 비즈니스 프로세스를 상향적으로 통합하기에 기업별로 상이한 비즈니스 프로세스에서부터 추상적으로 분리되어 있다. 이에 따라 동일한 ERP 패키지를 비즈니스 분야를 따지지 않고 도입하고, 설정이나 트랜잭션의 디자인만으로 적용할 수 있는 것과 유사하다 하겠다. 따라서 분석한 대부분 논문들은 블록체인을 기존 공급망을 상향통합하는 개념으로 인식하고, 추상적인 개념적 디자인이나 아키텍처를 제시하였다.

두 번째는 블록체인 기반 공급망 추적성 시스템은 초기 도입단계라는 사실이다. 초기 도입단계에서는 시스템의 실체가 존재하지 않기에 개념적 관점에서 연구할 수밖에 없다. 이에 따라 시스템에 대한 연구결과와 제안도 최상단의 추상적인 수준이기에 비즈니스의 세부 특성이나 차별성을 반영할 수 없었다고 판단된다.

4. 국내 논문 분석

블록체인 공급망 관련 국내 연구논문은 <표 8>과 같이 총 6건이 식별되었다. DBpia 학술정보 데이터베이스를 '블록체인 & 공급망'으로 분석하였을 때 총

〈표 7〉 연구 대상별 분석 결과
 〈Table 7〉 Analysis results by business area

Year	Healthcare	Medicine	Food	Manufacturing/Sales	Banking	Others	Total
2017	1	0	0	1	2	1	65
2018	0	0	0	5	0	1	6
2019	0	0	2	18	2	12	34
2020	1	3	7	29	3	21	64
Total	2	3	9	53	7	43	109

〈표 8〉 국내 블록체인 공급망 관련 연구 현황
 〈Table 8〉 Domestic Research on Blockchain Supply Chain

Year	Identified domestic research articles
2017	① A Implementation of Blockchain based Manufacturing Supply Chain Tracking System
2018	② A Survey on Blockchain Platforms for Supply Chain Management
2019	③ Distribution·Logistics Service Innovation Cases and Implications through Blockchain ④ A Study on the History Management System of Livestock Products Using Blockchain ⑤ An Exploratory Study on Blockchain Technology Application in Fast Fashion Industry: Focused on Reverse Logistics
2020	⑥ The Implications on the effective Establishment of a Trade Single Window using Blockchain Technology

9건의 문헌이 식별되었고, 2건은 학술발표, 1건은 전문잡지 기고문이며 제외하였다. 국내 논문은 그 수가 작은 관계로 각 논문의 내용을 간략히 정리하고 분석한다.

①번 논문은 하나의 PC 환경(Windows 10)에서 웹 기반 단순 입력창과 Solidity로 작성한 스마트 계약으로 구성된 실험실 수준의 이더리움 기반의 테스트 네트워크(TESTRPC)를 구축하고, 실험실 수준의 테스트를 실시하였다.

②번 논문은 공급망에서 활용될 스마트 계약과 IoT 기술에 대한 간략한 소개만 하는 것으로 조사되었다.

③번 논문은 연구논문이 아닌 전문기고문이며, 블록체인의 기술과 활용에 대한 소개문으로 조사되었다.

④번 논문은 축산물 이력관리를 위한 방안으로 블록체인 기술을 소개하고, 이를 축산물에 적용할 수 있는 방안을 제시하였다.

⑤번 논문은 패스트 패션 산업에 적용 가능한 블록체인 시스템 유형을 식별하기 위해 블록체인 시스템 유형을 비교하였다.

⑥번 논문은 무역간 거래의 정보를 통합해 볼 수 있는 무역 싱글윈도우를 실현시킬 수 있는 기술을 블록체인으로 인식하고, 각 국의 무역관계 프로세스에 시범적으로 활용하고 있는 시스템의 사례로부터 시사점을 도출하였다.

전술한 바와 같이 국내 문헌 6건 모두를 내용분석을 실시해보면 6건 모두 기술 수준은 블록체인을 교과서 정도 수준의 단편적인 소개 정도이며, 적용가능성은 연구 대상 비즈니스 영역에 적용할 수 있는 핵심의 도출이나 아키텍처 등을 제시하지 못하였기에 매우 낮게 나타났다.

이에 반해 해외연구도 블록체인 기반 공급망 추적성 관련 연구 또는 관련 시스템이 도입 초기단계임에 따라 〈표 6〉에 제시한 바와 같이 실증연구보다는 비실증 연구가 주를 이루고 있으나, 이들은 대체로 실제의 비즈니스 사례를 대상으로 use-case 시나리오를 개발하고, 이를 블록체인으로 구현할 수 있는 구체성이 있는 블록체인의 세부 기술의 활용방안과 더불어 전체적인 개념적 아키텍처를 제시하는 등, 비즈니스와 블록체인 간의 적용가능성에 대해 구체적인 방안을 제시하였다.

따라서 국내 블록체인 공급망 관련 연구도 연구 대상 비즈니스와 블록체인 기술의 적용가능성을 높일 수 있는 측면에서의 연구가 진행되어야 할 필요성이 제기된다.

V. 결론

본 연구는 블록체인의 비즈니스화를 위한 연구동향을 파악하기 위해 블록체인 연구문헌 목록을 수집하였

고, 특히 연구논문 115건(해외 109건, 국내 6건)을 수집하여 블록체인 기반 공급망 추적성 분야의 연구 동향을 분석하고, 향후 연구에 도움을 줄 수 있는 시사점을 제시하였다.

주요 연구 결과는 다음과 같다.

첫째, 블록체인 기술이 3세대 하이퍼원장으로 진화됨에 따라 이를 비즈니스에 적용하고자 하는 연구가 활성화되고 있음을 확인하였다. 1세대 암호화폐 기반 블록체인은 p2p 환경에서 익명으로 디지털 자산의 거래를 구현하는 분산원장 기반 기술이었다. 이 환경에서, 특히 소비자간 직거래가 일어나는 환경에서는 비즈니스가 개입할 여지가 없었기에 블록체인을 비즈니스에 적용하고자 하는 연구는 거의 없었다. 이에 반해 3세대 하이퍼원장은 스마트 계약을 활용하는 분산애플리케이션을 지원하기에 비즈니스 협업 분야에 해당 기술을 적용하고자 하는 연구가 2018년부터 대폭적으로 늘어나고 있음을 확인하였다.

둘째, 주 연구분야는 기업 간 협업부분의 추적성으로 나타났다. 블록체인 초기에는 분산원장을 활용해 금융서비스를 혁신하고자 하는 핀테크가 주목받았으나 비즈니스에서 블록체인 기반 분산원장만의 활용은 별다른 혁신을 가져오지 못한다는 것이 인지된 이후 정체되어 있다. 그러나 3세대 기술은 스마트 계약과 함께 분산애플리케이션의 구현 플랫폼을 제공함에 따라 분산애플리케이션이 최적으로 적용될 수 있는 기업 간 또는 글로벌 공급망에 블록체인 기술을 적용하고자 하는 연구와 노력이 경주되고 있음을 확인하였다.

셋째, 비즈니스 애플리케이션은 블록체인의 내재적 이력확인 또는 추적성 특성을 통해 비즈니스의 투명성과 신뢰성의 가치를 얻고자 한다. 최근 사회적으로 요구하고 있는 기업에 대한 ESG 압박은 그동안 폐쇄적이었던 비즈니스 공간에 대한 추적성을 제공함으로써 비즈니스의 투명성을 확보하고 이를 통해 기업의 신뢰를 구축하고자 한다. 이를 반영하듯 이제까지 비즈니스에 대한 연구가 재무적 관점의 효율성과 효과성에 대한 연구였다면 최근의 블록체인 기반 공급망의 추

적성에 관한 연구는 비재무적 요인인 ESG 달성을 위한 추적성과 투명성 확보를 목표로 하고 있음을 확인하였다.

넷째, 블록체인의 비즈니스화 또는 블록체인 기반 공급망 추적성 분야는 초기 도입단계임을 확인하였다. 대부분의 연구가 비실증 연구로써 개념적 프레임워크를 제시하고 기존 시스템과의 연동성 부분에 관한 연구가 이루어지고 있었다.

다섯째, 3세대 블록체인 기술인 분산애플리케이션을 적용해 비즈니스 협업 영역의 추적성과 투명성을 연구하는 해외연구는 활발한 반면 국내 연구는 양적으로도 질적으로도 거의 연구가 이루어지고 있지 않는 것으로 조사되었다.

전술한 바와 같은 분석결과를 종합하면 가까운 시일에 3세대 블록체인 기술을 적용해 기업 간 협업영역이 블록체인 기반으로 운영될 것으로 예측되나 국내의 현실은 이에 대한 이해와 연구도 매우 부족한 것으로 나타난다. 이는 곧 글로벌 공급망을 포함한 글로벌 비즈니스 프랙티스가 블록체인 기반으로 운용될 것으로 기대되기에, 낙후되어 있는 국내의 블록체인 연구역량을 제고하지 못한다면 중국에는 비즈니스 프랙티스가 글로벌 표준에 부합하지 못하는 결과를 초래할 수 있기에 매우 우려되는 현실이다.

분산 애플리케이션을 활용해 다자간 협업공간의 프랙티스를 혁신하기 위해서는 기술로서의 블록체인에 대한 접근보다는 ERP를 도입했던 초기과정과도 같이, 비즈니스 수단으로서의 블록체인에 대한 접근이 필요하다. 이를 위해서는 기술인력이 아닌 비즈니스 영역에서의 관심이 필요하고, 비즈니스 관점에서 블록체인에 대한 올바른 이해가 요구된다.

특히 블록체인의 최신 연구동향이 기업내부가 아닌 기업 간 협업과정에 초점이 맞추어져 있기에, 연구영역이 광대역화 되고 있다. 따라서 개인의 연구가 아닌 서로 다른 전문성의 다자간 연구가 요구되며, 이 부분에서 정부나 공공기관의 역할이 기대되고 있다. 즉, 정부나 공공영역이 광대역 협업 영역의 프랙티스와 이의

투명성 확보에 대한 연구의 이니셔티브 역할을 해주어 분산애플리케이션에 대한 연구역량 제고와 구현기술 확보를 견인함으로써 다가오는 4차 산업 사회의 글로벌 협업체계 선도할 수 있을 것이다.

■ References

- Abu-elezz, I., Hassan, A., Nazeemudeen, A., Househ, M. & Abd-alrazaq, A. (2020). "The benefits and threats of blockchain technology in healthcare: A scoping review." *International Journal of Medical Informatics*, 142.
- Alsayegh, M. F., Rahman, R. A. & Homayoun, S. (2020). "Corporate Economic, Environmental, and Social Sustainability Performance Transformation through ESG Disclosure." *Sustainability*, 12(9).
- Back, A., Corallo, M. & Dashjr, L. (2014). "Enabling blockchain innovations with pegged sidechains." Tech. Rep. Available: <http://www.blockstream.com/sidechains.pdf>
- Behnke, K. & Janssen (Marijn) M.F.W.H.A. (2020). "Boundary conditions for traceability in food supply chains using blockchain technology." *International Journal of Information Management*, 52.
- Belotti, M., Božic, N., Pujolle, G. & Secci, S. (2019). "A Vademecum on Blockchain Technologies: When, Which, and How," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(4), 3796-3838.
- Bonneau, J., Miller, A., Clark, J., Narayanan, A. Kroll, J. A. & Felten, E. W. (2015). *SoK: Research Perspectives and Challenges for Bitcoin and Cryptocurrencies*. 2015 IEEE Symposium on Security and Privacy, San Jose, 104-121. CA, USA.
- Bollen, A. & Emond, JP. (2014). "Traceability in Postharvest Systems." *Postharvest Handling (Third Edition), A Systems Approach*, 2014, 485-504.
- Buterin, V. (2014). "A Next-Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform. Ethereum White Paper." https://cryptorating.eu/whitepapers/Ethereum/Ethereum_white_paper.pdf(Retrieved on Jan. 15, 2021).
- Cai, C. W. (2021). "Triple-entry accounting with blockchain: How far have we come?" *Accounting & Finance*, 61, 71-93.
- Carter, L. & Ubacht, J. (2018). *Blockchain applications in government*. Proceedings of the 19th Annual International Conference on Digital Government Research: Governance in the Data Age. Article No. 126, 1-2.
- Cartier, L. E., Ali, S. H. & Krzemnicki, M. S. (2018). "Blockchain, chain of custody and trace elements - An overview of tracking and traceability opportunities in the gem industry." *The Journal of Gemmology*, 36(3), 212-227.
- Chang, Y., Iakovou, E. & Shi, W. (2020). "Blockchain in global supply chains and cross border trade: a critical synthesis of the state-of-the-art, challenges and opportunities." *International Journal of Production Research*, 58(7), 2082-2099.
- Christidis, K. & Devetsikiotis, M. (2016). "Blockchains and Smart Contracts for the Internet of Things." *IEEE Access*, 4, 2292-2303.
- Cinar Z. M., Nuhu A. A., Zeeshan Q. & Korhan O. (2020). *Digital Twins for Industry 4.0: A Review*. In: Calisir F., Korhan O. (eds) *Industrial Engineering in the Digital Disruption Era*. GJCIE 2019. Lecture Notes in Management and Industrial Engineering. Springer, Cham.
- Conoscenti, M. , Vetrò, A. & Martin, J.C. De. (2017). *Peer to Peer for Privacy and Decentralization in the Internet of Things*. 2017 IEEE/ACM 39th International Conference on Software Engineering Companion (ICSE-C), 288-290.
- Crosby, M., Nachiappan, Pattanayak, P., Verma, S. & Kalyanaraman, V. (2016). "BlockChain Technology: Beyond Bitcoin." *Applied Innovation Review*, 2, 6-20.
- Deloitte. (2016). *The rise of the digital supply network*. Deloitte Development LLC: Deloitte

- University Press.
- Desai, S., Deng, Q., Wellsandt, S. & Thoben, K.D. (2019). *An Architecture of IoT-Based Product Tracking with Blockchain in Multi-sided B2B Platform*. Advances in Production Management Systems. Production Management for the Factory of the Future. APMS 2019. IFIP Advances in Information and Communication Technology, 566, 458-465, Springer, Cham.
- Dubey, R., Gunasekaran, A. & Papadopoulos, T. (2017). "Sustainable supply chain management: framework and further research directions." *Journal of Cleaner Production*, 142, Part 2, 1119-1130.
- Fatemi, A., Glaum, S. & Kaiser, S. (2018). "ESG performance and firm value: The moderating role of disclosure." *Global Finance Journal*, 38, 45-64.
- Figorilli, S., Antonucci, F., Costa, C., Pallottino, F., Raso, L., Castiglione, M., Pinci, E., Vecchio, D. D., Colle, G., Rtofo, A. R., Sperandio, G. & Menesatti, P. (2018). "A Blockchain Implementation Prototype for the Electronic Open Source Traceability of Wood along the Whole Supply Chain." *Sensors*, 18(9).
- Fischer, M. J., Lynch, N. A. & Peterson, M. S. (1985). "Impossibility of Distributed Consensus with One Faulty Process." *Journal of ACM*. 32(2), 374-382.
- Ghaemi, A.A. (2017). *A cyber-physical system approach to smart city development*. 2017 IEEE International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC), 2017, 257-262.
- Government Office for Science. (2016). *Distributed Ledger Technology: beyond block chain*. U.K. Government Office Science, London, U.K., Tech. Rep., Jan. 2016. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/492972/gs-16-1-distributed-ledger-technology.pdf, (Retrieved on Nov. 22, 2020).
- Govindan, K., Azevedo, S. G. & Carvalho, H. (2014). "Impact of supply chain management practices on sustainability." *Journal of Cleaner Production*, 85, 212-225.
- Gul, M., Subramanian, B., Paul, A. & Kim, J. (2021). "Blockchain for public health care in smart society." *Microprocessors and Microsystems*, 80.
- Hanelt, A., Busse, S. & Kolbe, L. M. (2016). "Driving business transformation toward sustainability: exploring the impact of supporting IS on the performance contribution of eco-innovations." *Information Systems Journal*, 27(4), 463-502.
- Henchion, M., Backer, C.J.S. D. & Hudders, L. (2017). "Ethical and Sustainable Aspects of Meat Production: Consumer Perceptions and System Credibility." *New Aspects of Meat Quality From Genes to Ethics, Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition*, 649-666.
- Hewa, T., Ylianttila, M. & Liyanage, M. (2021). "Survey on Blockchain based Smart Contracts: Applications, Opportunities and Challenges." *Journal of Network and Computer Applications*, 177.
- Hobbs, J. E. (2016). "Effective Use of Food Traceability in Meat Supply Chains." *Advances in Food Traceability Techniques and Technologies, Improving Quality Throughout the Food Chain, Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition*, 2016, 321-335.
- Hulea, M., Rosu, O. & Miron, R. (2018). *Pharmaceutical cold chain management - Platform based on a distributed ledger*. 2018 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR), Cluj-Napoca, Romania, 24-26 May 2018, 1-6.
- Hung, H., Sun, X., Xiao, F., Zhu, P. & Wang, W. (2021). "Blockchain-based eHealth system for auditable EHRs manipulation in cloud environments." *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 148, 46-57.
- Hyperledger Fabric (2021). "A Blockchain Platform for the Enterprise." <https://hyperledger-fabric.readthedocs.io/en/release-2.2/>. (Retrieved on Jan. 15).
- Jani, S. (2020) "Smart Contracts: Building Blocks for

- Digital Transformation.” Indira Gandhi National Open University (IGNOU), NewDelhi, India.
- Kang, H.M., Hwang, K.T. (2018). “Analysis of Research Trends of Cyber Physical System(CPS) in the Manufacturing Industry.” *Journal of Information Technology Applications & Management*, 25(3), 3-28.
- {강형목·황경태 (2018). 제조 분야 사이버 물리 시스템(CPS) 연구 동향 분석. <정보화정책>, 25권 3호, 3-28.}
- Khan, S., Haleem, A., Khan, M. I., Abidi, M. H. & Al-Ahmari, A. (2018). “Implementing Traceability Systems in Specific Supply Chain Management (SCM) through Critical Success Factors (CSFs).” *Sustainability*, 10(1).
- Kosba, A., Miller, A., Shi, E. & Wen, Z. (2016). Hawk: *The Blockchain Model of Cryptography and Privacy-Preserving Smart Contracts*. 2016 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP), San Jose, CA, USA, 2016, 839-858.
- Lampert, L., Shostak, R. & Pease, M. (2019). “The Byzantine generals problem.” *ACM Books, Concurrency: the Works of Leslie Lamport*, 203-226.
- Law, C.C.H. & Ngai, E.W.T. (2007). “ERP systems adoption: An exploratory study of the organizational factors and impacts of ERP success.” *Information & Management*, 44(4), 418-432.
- Lee, J. M. & Hwang, K. T. (2014). “Philosophical Review of Korean Public Informatization Policy.” *Informatization Policy*, 21(4), 263-293.
- {이재민·황경태 (2014). 우리나라 공공 정보화 정책에 대한 철학적 조망. <정보화정책>, 21권 4호, 263-293.}
- Lee, J. O., Shin, S. H., Kim, H. K. & Hwang, K. T. (2012). “A Study on Research Framework and Research Trends in IT Service Management (ITSM) Area.” *Informatization Policy*. 19(1), 3-24.
- {이종욱·신성희·김홍근·황경태 (2012). IT 서비스 관리 (ITSM) 분야의 연구 프레임워크 및 연구동향 분석. <정보화정책>, 19권 1호, 3-24.}
- Lee, N. K., Lee, J. O. & Hwang, K. T. (2014) “A Study on Research Framework and Research Trends in the Healthcare Information Technology Area.” *Informatization Policy*. 21(3), 3-32.
- {이난경·이종욱·황경태 (2014). 헬스케어 정보기술 분야의 연구 프레임워크 및 연구동향, <정보화정책>. 21권 3호, 3-32.}
- Liang, X., Zhao, J., Shetty, S. & Liu, J. (2017). *Integrating blockchain for data sharing and collaboration in mobile healthcare applications*. 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), Montreal, QC, Canada, 2017, 1-5.
- Luu, L., Chu, D. H., Olickel, H. & Saxena, P. (2016). *Making Smart Contracts Smarter*. Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security, 254-269.
- Magazzeni, D., McBurney, P. & Nash, W. (2017). “Validation and Verification of Smart Contracts: A Research Agenda.” in *Computer*, 50(9), 50-57.
- Marrewijk M. V. & Werre M. (2003). “Multiple Levels of Corporate Sustainability.” *Journal of Business Ethics* 44, 107-119.
- McConaghy, T., Marques, R. & Mülle, A. (2016). “BigchainDB: A scalable blockchain database.” Bigchaindb-Whitepaper, <https://gamma.bigchaindb.com/whitepaper/bigchaindb-whitepaper.pdf>. (Retrieved on Jan. 15, 2021).
- Mercan, S., Cain, L., Akkaya, K. & Cebe, M. (2020). “Improving the service industry with hyper-connectivity: IoT in hospitality.” *International Journal of Contemporary Hospitality Management*, 33(1).
- Molina, J. C., Delgado, D. T. & Tarazona, G. (2019). *Using Blockchain for Traceability in the Drug Supply Chain*. In: Uden L., Ting IH., Corchado J. (eds) Knowledge Management in Organizations. KMO 2019. Communications in Computer and Information Science, 1027. Springer, Cham. 536-548.
- Moyano, J. P. & Ross, O. (2017). “KYC Optimization Using Distributed Ledger Technology.” *Bus Inf Syst Eng* 59(6), 411-423.
- Nakamoto, Satoshi (2008). “Bitcoin: A Peer-to-Peer

- Electronic Cash System.” Satoshi Nakamoto Institute. <https://nakamotoinstitute.org/bitcoin/>. (Retrieved on Nov. 20, 2020).
- O’Leary, D. (2017). “Configuring blockchain architectures for transaction information in blockchain consortiums.” *Intelligent Systems in Accounting, Finance and Management*, 24(4), 138-147.
- Ølnes, S., Ubacht, J. & Janssen, M. (2017). “Blockchain in government: Benefits and implications of distributed ledger technology for information sharing.” *Government Information Quarterly*, 34(3), 355-364.
- Palanza, D. (1999). “Network Bookkeeping System.” <http://www.welchco.com/02/14/01/60/99/07/1601.HTM>. (Retrieved on January 15, 2021).
- Pan, Z., Ryu, H. & Baik, J. (2007). *A Case Study: CRM Adoption Success Factor Analysis and Six Sigma DMAIC Application*. 5th ACIS International Conference on Software Engineering Research, Management & Applications (SERA 2007), 2007, 828-838.
- Peters, G. W. & Panayi, E. (2016). “Understanding Modern Banking Ledgers Through Blockchain Technologies: Future of Transaction Processing and Smart Contracts on the Internet of Money.” *Banking Beyond Banks and Money*, 239-278. New Economic Windows. Springer, Cham.
- Queiroz, M. M. & Fosso Wamba, S. (2019). “Blockchain adoption challenges in supply chain: An empirical investigation of the main drivers in India and the USA.” *International Journal of Information Management*, 46(June), 70-82.
- Rajeeve, A., Pati, R. K., Padhi, S. S. & Govindan, K. (2017). “Evolution of sustainability in supply chain management: A literature review.” *Journal of Cleaner Production*, 162, 299-314.
- Reda, M, Kanga, D. B., Fatima, T. & Azouazi, M. (2020). “Blockchain in health supply chain management: State of art challenges and opportunities.” *Procedia Computer Science*, 175, 706-709.
- Ronaghi, M. H. (2020). “A blockchain maturity model in agricultural supply chain.” *Information Processing in Agriculture*. Available online 10 November 2020, In press, corrected proof.
- Sharma, Y. & Balamurugan, B. (2020). “Preserving the Privacy of Electronic Health Records using Blockchain.” *Procedia Computer Science*, 173, 171-180.
- Shi, S., He, D., Li, L. Kumar, N., Khan, M. K. & Choo, K. K. R. (2020). “Applications of blockchain in ensuring the security and privacy of electronic health record systems: A survey.” *Computers & Security*, 97.
- Sunny, J., Undralla, N. & Pillai V. M. (2020). “Supply chain transparency through blockchain-based traceability: An overview with demonstration.” *Computers & Industrial Engineering*, 150.
- Szabo, N. (2017). “Money, blockchains, and social scalability.” <http://unenumerated.blogspot.com/2017/02/money-blockchains-and-social-scalability.html>. (Retrieved on Dec. 10, 2020).
- Tian, F. & Austria, V. (2017). *A supply chain traceability system for food safety based on HACCP, blockchain & Internet of things*. 2017 International Conference on Service Systems and Service Management, Dalian, 2017, 1-6.
- Tschorsch, F. & Scheuermann, B. (2016). “Bitcoin and Beyond: A Technical Survey on Decentralized Digital Currencies.” in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(3), 2084-2123.
- Vujičić, D., Jagodic, D. & Randić S. (2018). *Blockchain technology, bitcoin, and Ethereum: A brief overview*. 2018 17th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH), East Sarajevo., 1-6.
- Vukolić, M. (2016). *The Quest for Scalable Blockchain Fabric: Proof-of-work vs. BFT replication*. Open Problems in Network Security. iNetSec 2015. Lecture Notes in Computer Science, 9591, 112-125, Springer, Cham.
- Wang, S., Yuan, Y., Wang, X., Li, J. & Qin, R. (2018). *An Overview of Smart Contract: Architecture,*

Applications, and Future Trends. 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Changshu, China, 2018, 108-113.

Yli-Huumo, J., Ko, D., Choi, S., Park, S. & Smolander, K. (2016). "Where is current research on Blockchain technology? - A systematic review." *PloS One*, 11(10), 1-27.

Zheng, Z., Xie, S., Dai, H. & Chen, X. (2017). *An Overview of Blockchain Technology: Architecture, Consensus, and Future Trends*. 2017 IEEE International Congress on Big Data (BigData Congress), Honolulu, HI, 2017, 557-564.

Zheng, Z., Xie, S., Dai, H. & Chen, X. (2018). "Blockchain challenges and opportunities: a survey." *International Journal of Web and Grid Services*. 14(4), 353-375.