건물 분야의 탄소 시장 접근을 위한 블록체인 에너지 모니터링, 보고 및 검증 (MRV)[1] 시스템 연구

우정훈 Powell Center for Construction&Environment at University of Florida
선임연구위원 jhoon3037@ufl.edu

1. 서론

기후 변화는 이미 일상이 되었고, 우리의 삶에 많은 영향을 미치고 있다. 미국 서부와 호주에서 대규모 산불이 일어나는가 하면, 유럽은 때아닌 겨울 물난리로 고통받고 있고, 1000년 빈도의 폭우와 태풍, 허리케인도 자주 발생하고 있다. 사실 유럽을 비롯한 선진국에서는 기후 변화의 문제가 개별국가의 노력만으로는 해결할 수 없다고 보고, 몇십 년 전부터 전 지구적 대응을 위한 노력을 계속해 왔다. 하지만 교토의정서(1997)와 파리협정(2015)으로 대변되는 인류의 기후 변화 대응 노력은 현재까지는 큰 반향을 일으키지 못한 체, 시간은 자꾸 흘러가고 있다.[2]

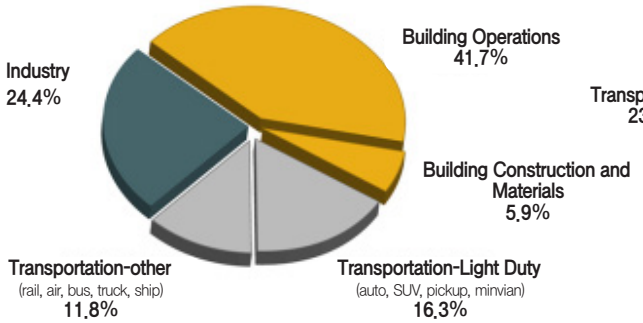
건물분야는 [그림 1]과 [그림 2]에서 볼 수 있듯이, 미국 에너지 사용량의 절반 가까이 차지하고 있고, 전 세계 이산화탄소 배출량의 약 40%가량을 배출하고 있다. 그러나 급격한 도시화와 인구증가로 건물 연면적은 갈수록 늘어날 것으로 예상하는바, 건물 분야의 에너지 사용 절감과 온실가스 배출 감축이 전제되지 않는 기후 변화 대응은 상상하기 어렵다.

현재까지 건물 분야는 "녹색 건물" 또는 "에너지 고효율 건물" 등 친환경 건물 인증을 통해 기후 변화 대응에 동참하고자 노력해 오고 있다. 이러한 노력은 각국 정부의 제도나 법령, 세제 혜택 등을 통해 뒷받침되기도 하지만 아직은 건물주의 의지나 마케팅 전략에 기대는 경우가 대부분이다. 따라서 기존의 혜택이나 전략 외에 탄소 시장 참여라는 또 다른 유인책이 추가된다면, 건물 분야가 더 적극적으로

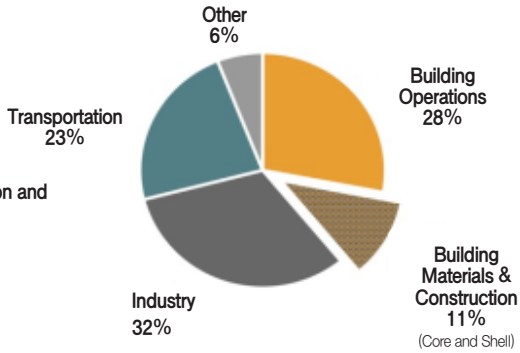
1) MRV: Measurement, Reporting and Verification의 약자로 건물의 에너지 사용을 측정(Measurement)하고, 그 내용을 관계자들에게 공개 · 보고(Reporting)하며, 그 결과를 공신력 있는 제삼자로부터 평가 · 검증(Verification)받는 것을 의미한다.

2) "The International Panel on Climate Change (IPCC) Special Report on Global Warming of 1.5℃"에 따르면 현재의 온실가스 배출 경향이 지속할 경우, 전 세계 평균 기온이 산업화 이전 기준보다 1.5℃ 이상 상승하기까지 약 16년 정도 남았다고 본다. 그러나 "Conversation USA"에서는 약 12년 정도 남은 것으로 추정한다. (https://theconversation.com/the-climate-clock-counting-down-to-1-5-107498)

[그림 1] U.S. Energy Consumption by Sector



[그림 2] Global CO_2 Emission by Sector



자료: architecture2030.org (https://architecture2030.org/buildings_problem_why/)

기후 변화 대응에 참여할 방안이 될 수 있다고 생각된다. 다만, 탄소 시장에서 요구하는 투명한 회계 기준을 만족시키기 위해서는, 건물의 에너지 사용과 온실가스 배출을 투명하고도 체계적으로 관리하는 MRV 시스템 구축이 필요하다. UNFCCC에서 구축한 MRV 시스템은 각국의 기후 변화 대응 노력을 공유하기 위해 도입되었으나[3], 아쉽게도 건물 분야를 대상으로 한 것은 아직 개발되지 못했다.

따라서 건물 분야가 탄소 시장에 참가하려면, 친환경 건물 인증 등에서 사용되는 MRV를 준용하여야 하는데, 이들 인증방식은 대규모 문서 작업과 인적 검증 등으로 비용이 많이 들고, 시간 소요가 많다. 이 지점에서 블록체인은 비용과 시간을 획기적으로 줄일 수 있다. 그 이유는 블록체인은 분산 원장 기술로서 모든 참여자가 모든 정보를 동시에 공유하기 때문이다. 즉, 블록체인 MRV는 모든 과정을 디지털화할 수 있을 뿐만 아니라, 불필요한 중간 과정들을 생략하고, 이중 계산을 방지하며, 사람의 개입을 최대한 제거하고, 정보를 투명하게 공개해 데이터 수집 및 보고와 검증에 드는 비용과 시간을 줄일 수 있다.

이에 본 고는 블록체인 기술을 건물 에너지 사용 MRV에 접목함으로써 투명하면서도 저렴한 에너지 MRV 시스템을 구축하고, 친환경 건물의 탄소 시장 접근을 가능케 해, 궁극적으로 건물 분야의 기후 변화 대응력을 높이고자 한다. 2절에서는 건물 분야와 탄소 시장을 살펴보고, 3장에서는 건물 에너지 사용 MRV 현황을 알아보며, 4장에서는 블록체인 기술의

3) UNFCCC(United Nations Framework Convention on Climate Change)에서는 2007년부터 각국의 기후 변화 대응 노력을 공유할 수 있도록 MRV 시스템을 강화하기 시작했고, 2013년 큰 틀이 완성되었다. UNFCCC 회원국들은 격년으로 기후 변화 대응 보고서를 제출해야 하는데, 이를 통해 온실가스 배출을 포함한 기후 변화 대응 노력, 그 효과, 지원받는 내용 등을 효과적으로 공유할 수 있게 되었다. 제출된 보고서들은 ICA (international Consultation and Analysis)를 통해 투명성과 대응력을 높이는 데 활용되고 있다.

특징, 중요성, 건물 에너지 MRV와의 연계성에 대해 기술한다. 5장과 6장에서는 University of Florida에서 연구 중인 건물 에너지 블록체인 MRV 시스템의 내용과 그 시사점에 대해서 살펴보고자 한다.

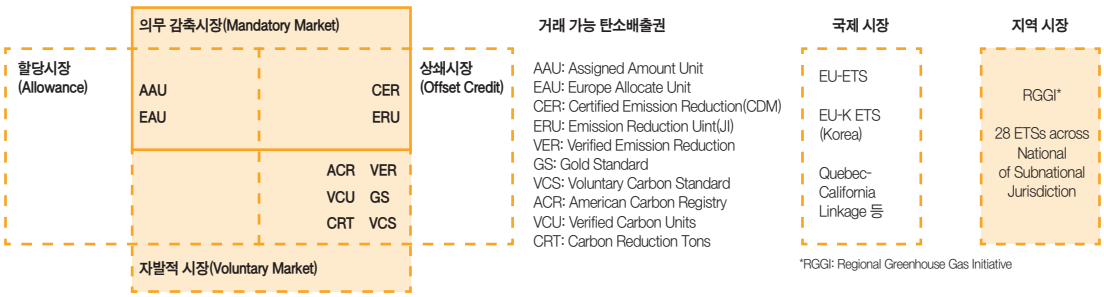
2. 건물 분야와 탄소 시장

가. 탄소 시장 (ETS)[4]

탄소 시장은 의무 감축 시장과 자발적 시장으로 구분할 수 있으며, 의무 감축 시장은 할당시장(Allowance)과 상쇄시장(Offset Credit)으로 나눌 수 있다. 자발적 시장은 상쇄시장의 형태로 온실가스 감축 프로젝트를 기반으로 하여 이루어진다. 즉, 탄소 감축 의무로부터 자유로운 기업 등이 사회적 책임을 위해 시행한 프로젝트로부터 얻은 탄소배출권 또는 상쇄배출권을 거래하는 시장이다. [그림 3]은 전 세계에서 운영 중인 탄소 시장의 종류와 거래 가능한 탄소 배출권을 시장에 따라 보여 주고 있다. 탄소 시장은 약 11기가톤의 이산화탄소 배출을 거래하고 있으며, 이는 전 세계 온실가스의 약 20% 정도이다. 따라서 기후 변화 대응을 위해 더 많은 탄소 배출이 탄소 시장에서 통제될 필요가 있다.

현재 전 세계적으로 운영되고 있는 28개 ETS에서 건물 분야를 포함하고 있는 시장은 소수인데 영국, 호주, 일본 그리고 우리나라 정도이다. 하지만 이들도 의무시장이기 때문에 개별 건물주가 해당 건물의 에너지 사용 절감을 통한 탄소 배출 감축량을 자유롭게 사고팔 수는 없다. 따라서 현재 건물 분야가

[그림 3] 탄소 시장의 종류



자료: 저자 작성

4) 탄소 시장은 1997년 주요 선진국 37개국 및 기타 참여국들에 의해 제정된 지구 온난화의 규제 및 방지를 위한 국제협약인 기후변화협약의 수정안인 교토의정서(Kyoto Protocol)에 의해 도입되었다. 선진국들은 이 의정서를 기반으로 탄소 시장 (ETS: Emission Trading System)과 탄소세 등을 도입하고, 온실가스 배출량을 할당 · 통제하게 되었으며, 배출량을 줄이지 않는 국가에 대해 비관세 장벽을 적용하고자 하였다.

참여 가능한 탄소 시장은 자발적 시장이며, 앞으로 건물 분야 에너지 효율성 제고 및 MRV 기술 발전으로 의무 감축 시장에도 참가 가능한 시기가 곧 올 것이라 예상한다.

나. 친환경 건물 인증과 자발적 시장

1) 녹색 및 친환경 에너지 건물 인증

건물 분야의 에너지 사용 절감과 기후 변화 대응을 위해 각국에서는 친환경 건축 규제 강화, 세제 혜택, 녹색 건물 인증제도 (Green Building Certificates) 도입 및 이를 통한 마케팅 인센티브 등을 제공하고 있다. 미국의 LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)나, Green Globe, 영국의 BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), 호주의 GREEN STAR, 일본의 CASBEE (Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency), 한국의 GBCS (Green Building Certification System) 등이 대표적인 녹색 건물 인증제도이다. 하지만 녹색 건물 인증제도만으로는 기후 변화 대응이 가능한 수준으로 건물의 에너지 사용량을 줄일 수 없다. 그 이유는 인증제도를 통해서 준공되고 운영되는 건물은 전체 건물 연 면적의 절반에도 미치지 못하기 때문이다.

건축되는 건물 중에서 예상보다 녹색 빌딩 인증 비율이 낮은 이유는 녹색 인증을 통해 건물 에너지 사용 절감을 달성한다고 하더라도 이를 통해 수익을 창출하거나 세금 감면을 받을 수 있는 수단이 많지 않기 때문이다. 심지어 녹색 건물은 마케팅을 위한 미끼나, 사회적 압력 아래 인허가를 쉽게 획득하기 위해 생색내기 정도에 그치고 있다는 평가가 나오기도 한다. 수직 정원, 옥상 정원, 지역 생산 자재 구매, 태양광 패널이나 저 방사 유리(Low-Emissivity Glass) 등 녹색 건물 인증을 위한 여러 전략은 에너지 모델에서는 큰 의미가 있을지 모르나, 실제 건물의 에너지 사용 절감과는 거리가 있는 경우가 많았다. 따라서 녹색 건물 인증은 건물주의 사회적 책임 준수 등 선의에 의한 투자에 크게 의존하고 있으며, 녹색 건물 건축을 강제할 법률이나 지방 조례 등의 제정은 경제 상황을 고려하여 그 범위가 크게 후퇴하고 있는 것이 사실이다. 예를 들어 2016년 미국의 LEED 인증을 받은 사무실은 전체 사무실 건설 시장 규모의 4.7%를 차지했으며, LEED를 포함하여 "녹색" 또는 "에너지 효율" 인증을 받은 사무실은 미국 전체 사무실 건물 시장의 38% 정도에 불과했다. 이는 녹색 건물 또는 에너지 효율 인증이 건물주에게 무조건 건물 건축에 도입해야 할 도구가 될 수 없음을 말해준다. 그러므로 건물로부터 배출되는 온실가스를 줄이기 위해서는 건물주가 에너지 사용 절감시설에 대한 투자를 늘릴 수 있도록 유인하는 강력한 정책과 재정적 보상이 요구되고 있으며, 자발적 시장은 이를 위한 좋은 대안이 될 수 있다.

2) 건물 분야의 자발적 시장 참여

자발적 시장은 정부 주도 · 산업 중심의 의무 · 할당 시장과는 다르게 참여자가 자발적으로 동참하는 시장이다. 이 시장에서는 의무 할당에서 자유로운 기관, 기업, 비영리단체 등이 자신들의 사회적 책임을 다하고 기후 변화 대응에 동참하기 위해 프로젝트를

〈표 1〉 각국의 INDC 중 건물 분야 포함 국가 수

기후변화 대응(Mitigation Sectors)	참여 국가 수
에너지	154
교통	111
농업	93
산림	117
폐기물	108
산업	77
건물	45

자료: http://spappssecext.worldbank.org/sites/indc/Pages/FAQ.aspx

시행하고 그 프로젝트의 결과로 발생한 탄소 배출권을 거래한다. 프로젝트는 대체로 탄소 배출을 줄이거나, 탄소를 저장하여 대기로부터 제거하는 것을 목표로 하는데, 신재생 에너지 도입, 에너지 효율 제고, REDD+[5] 등이 대표적인 대상이다.

건물 분야가 참여 가능한 프로젝트로는 신재생 에너지 도입 및 에너지 효율 제고, 도심의 산림 조성 등이며, 이는 녹색 건축이나 친환경 에너지 건축 인증과 대부분 내용이 중복된다. 따라서 친환경 건축 인증과 동시에 인증에 따른 에너지 사용 절감과 그에 따른 온실가스 배출 저감은 자발적 시장 참여를 위한 기회를 제공한다.

다행인 것은 파리협정에 따라 각국은 기후 변화 대응(Climate Change Mitigation Sectors)과 기후 변화 적응 대책(Climate Change Adaptation Sectors)을 수립하도록 요구받고 있는데, 온실가스 감축을 주목적으로 하는 기후 변화 대응 부문에서 많은 국가가 건물 분야를 포함하고 있는 것은 고무적인 일이다. 〈표 1〉을 보면 기후 변화 대응 부분, 즉 온실가스 감축 부분에서 건물을 자국의 INDC에 포함 시키고 있는 국가가 45개국임을 알 수 있다. 정책적, 시스템적으로 뒷받침만 된다면 건물 분야가 자발적 시장에 적극적으로 참가할 수 있는 길은 열리고 있는 셈이다. 정책적인 부분은 건물 분야가 자발적 탄소 시장에 참가할 수 있도록 정부가 제도적으로 장려하는 것을 말하며, 시스템적인 부분은 건물 분야의 참여를 뒷받침하는 에너지 사용 MRV 시스템, 블록체인 탄소 거래시장 등을 구축하는 것이라고 할 수 있다.

5) REDD+: Reforestation, afforestation and REDD (Reducing Deforestation and Forestation Degradation)의 약자로, 황폐해진 산림의 복원, 신규 조성, 산림 벌목의 감축, 산림 황폐화를 방지하는 프로젝트들을 포괄한다.

3. 건물 에너지 사용 MRV

가. 자발적 시장에서 요구하는 MRV

자발적 시장에서는 참여자가 해당 산업 및 참여 프로젝트의 에너지 사용 절감량 및 온실가스 배출량, 기후 활동의 영향 추정 등을 보고하고 이에 대한 진실성을 검증받아야 한다. 보통 프로젝트들은 MRV (Measurement, Reporting and Verification)라는 프로세스를 거쳐 탄소 배출권을 획득하는데, 측정(Measurement)이란 에너지 사용 절감량, 온실 가스 배출량 및 감축량 그리고 그 부수적 결과를 계량화하는 것을 의미한다. 보고(Reporting)는 데이터 및 관련 분석을 투명하게 공개하고 검증기관에 평가 · 검증받기 위해 제출하는 것을 말한다. 검증 (Verification)은 제출된 데이터의 적정성, 진실성, 완결성 등을 독립적인 제삼자가 검증 · 평가하고 그 결과를 탄소 배출권에 반영하는 것을 말한다. 검증을 위해 제출된 자료는 투명한 방법을 통해 작성돼야 하고, 이전 자료와 비교 가능해야 하며, 믿을 수 있어야 하며, 다양하게 사용 가능하며, 요구된 시간 내에 제출되어야 하고, 완결된 것이길 요구받는다.

나. 건물 에너지 사용 MRV 사례

현재 사용되고 있는 건물 에너지 MRV 사례는 다음과 같다. 미국의 대표적인 그린 빌딩 인증 프로그램인 LEED는 건물 에너지 소비에 대한 데이터 제공을 위해 스마트 미터기를 설치하도록 요구한다. 에너지 사용 관련 요구 자료는 전기, 천연가스, 냉각수, 증기, 연료, 바이오매스의 사용량이다. 사용량 측정 기간은 최소 한 달에 한 번이다. 또한, LEED 인증 이후 인증 유지를 위해 에너지 소비량을 측정하는 스마트 미터 또는 그 하위(Sub) 미터기를 설치하도록 요청하고 있으며, 인증 유지를 위한 에너지 사용량 보고 기간은 1년 이상이다. 또 다른 미국의 녹색 건물 인증 프로그램인 그린 글로브(Green Globes)는 인증을 위한 절차로 건물 에너지 사용량의 측정, 보고 및 검증을 요구한다. 에너지 효율성 측정 대상은 조명 및 조명 제어, 플러그 부하, 주요 냉난방 공조 장비, 냉각수 생산, 온수 및 증기 생산, 보일러, 건물 운전 모니터링 및 중요 냉난방 공조 장비 제어, 식수 사용 및 현장 재생 가능 에너지 전력 생산의 검증 등이다. 호주에서는 건물의 탄소 중립 달성을 위해, 건물 분야가 자체적으로 에너지 사용량을 측정하여, 온실가스 감축량 및 상쇄량을 계량하고, 이를 공개 및 보고하며, 제삼자를 통해 제출된 자료를 검증받도록 하고 있다.

한편 전 세계적으로 "녹색 건물" 및 "친환경 에너지" 건물 인증을 위한 인증시스템과 그들이 요구하는 MRV 프로세스는 무수히 많다. 지구상에는 약 600개의 녹색 및 친환경 인증 프로그램이 있다고 한다. 따라서 이러한 인증 프로그램의 홍수 속에서 비전문가인 건물주가 자신의 건물에 적합한 인증 프로그램을 선택하는 것은 어려운 일일 수 있다. 또한, 이 인증을 위한 평가 단계는 시간이 오래 걸리고 비용이 많이 들어 부담을 느끼는 건물주도 많다. 인증 비용이 많이 드는 이유는 인증 프로그램은 대규모의 문서 작업과 인적 검증으로 진행되기 때문이다. 이것이 녹색 건물 인증 확대를 방해하는 중요한 원인이다. 그러므로 녹색 건물 및 친환경 에너지 건물 인증을 더 빠르고 간단하며, 저렴하게 할 수 있는 새로운 MRV 시스템이 필요하다. 블록체인 기술은 이 지점에서 큰 역할을 할 수 있다.

다. 블록체인 에너지 사용 MRV

블록체인 에너지 사용 MRV 시스템은 MRV의 디지털화가 가능하고, 에너지 사용량과 온실가스 배출량 계산을 스마트 계약으로 진행함으로써 이중 계산 및 부정방지가 가능하다. 또한, 모든 정보를 모든 참여자가 공유하게 됨으로써 사기적인 거래도 막을 수 있다. 나아가 모든 데이터 수집과 문서 작업에서 사람의 개입을 최대한 억제함으로써 비용 및 시간 절감, 투명성 확보를 달성하여 건물 분야의 자발적 시장 접근을 뒷받침할 수 있다. 이를 통해 건물주는 에너지 사용량 절감에 따른 온실가스 감축분을 탄소 배출권으로 손쉽게 전환할 수 있으며, 기후 금융을 통한 재정적 지원도 받을 수 있다. 블록체인은 원격 감지, 사물 인터넷 (IoT), 빅 데이터 및 인공 지능과 같은 디지털 기술과 결합할 경우 건물의 에너지 사용 효율화에도 큰 도움을 줄 수 있다. 그렇다면 블록체인 기술이 무엇인지 좀 더 자세히 알아보도록 하자.

4. 블록체인 기술 (Blockchain Technology)

가. 분산 원장(Distributed Ledger)

블록체인은 분산 원장(Distributed ledger)을 기반으로 하는 기술이다. 분산 원장이란 같은 데이터를 여러 곳에 분산하여 동시에 저장하는 것을 말한다. 마치 아마존이나 네이버가 여러 곳에 데이터 센터를 세우고, 만일의 사태에 대비해 백업시스템을 구축하는 것과 같은 원리다. 분산 원장 시스템에서는 사용자가 자신의 접근 코드를 이용하여 원격으로 다양한 작업을 수행할 수 있다. 또한, 모든 네트워크 참여자가 같은 원장 사본을 소유하기 때문에 사본의 모든 수정 사항이 단시간에 업데이트된다. 재무적인 내용, 계약 관련, 전자적인 정보 등 모든 것들이 데이터화의 대상이 될 수 있다.

나. 블록체인 (Blockchain) 정의 및 종류

블록체인은 데이터 분산 처리 기술이다. 즉, 네트워크 내의 모든 거래 내역 등 데이터를 모든 참여자가 분산하여 저장하는 기술이라 할 수 있다. 2008년 사토시 나카모토라는 익명을 쓰는 한 프로그램 개발자 또는 무리가 비트코인을 개발하여 배포한 이후 블록체인은 비트코인(BitCoin), 이더리움(Etherium) 등 가상화폐의 채굴 및 그 거래에 집중되었다. 하지만 최근에는 그 활용도를 넓혀 물류나, 은행 서비스, 환전 등 다양한 분야로 확장되어가고 있다.

블록체인의 중요한 특징들은 거래의 투명성, 거래 내용의 불변성, 거래의 추적성, 중간자의 제거 가능성, 스마트 계약 등이다. 블록체인은 모든 거래를 모든 참여자와 동시에 공유하게 됨으로써 투명한 거래가 가능하다. 한번 블록에 저장된 내용은 그 누구도 변경할 수 없다. 그리고 저장된 모든 내용은 언제든지 추적이 가능하다. 거래가 투명하게 진행되기 때문에 신뢰할 수 있는 중간 매개가 필요 없어 은행, 거래소 등과 같은 중간자 제거가 가능하고 이에 따라 비용과 시간을 절약할 수 있다. 또한, 스마트 계약 등을 통해 미리 계약된 특정 조건을 만족하면 다음 거래가 자동으로 진행되게 함으로써 역시 중간자 제거, 비용과 시간 절약, 이중 계산 방지가 가능하다. 이러한 블록체인의 특징들은 신기후체제 하의 국제 탄소

〈표 2〉 블록체인의 종류

구분	적용 사례
공개형 (Public)	Bitcoin, Ethereum, Stellar
폐쇄형 (Private)	Hyperledger Fabric, Corda, NASDAQ LINQ
연합형 (Consortium)	J.P. Morgan Coin/Quorum

자료: https://hedgetrade.com/3-types-of-blockchain-explained/

시장에서 요구하고 있는 실질적이고, 영구적이며, 추가적이고, 보고 가능하고, 검증 가능한 감축 실적을 성과로 도출해야 하며, 노력의 이중 계산을 방지해야 하며, 순 온실가스 배출량의 감소를 달성할 필요가 있는 엄격한 산정체계 구축을 만족시킬 수 있다.

한편, 블록체인은 세 가지 종류로 나눌 수 있다. 〈표 2〉는 블록체인의 종류를 간단히 보여주고 있는데, 공개형 (Public blockchain), 폐쇄형 (Private blockchain), 그리고 연합형(consortium blockchain)이 그것이다. 공개형 블록체인은 거래 내용과 네트워크 내의 모든 정보가 공유되어 추적이 가능하다. 네트워크 참여자는 누구나 블록을 생성할 수 있으며, 비트코인이나 이더리움 등 가상화폐들이 대표적인 공개형 블록체인이다. 폐쇄형 블록체인은 허가된 참여자 외에는 거래 내용과 기타 정보를 열람 또는 이용할 수 없다. 이 네트워크에 참여하기 위해서는 허가를 받아야 하며, 허가를 내주는 것은 네트워크를 관장하는 주체이다. 대표적인 예로는 세계 최대 금융 컨소시엄 R3의 코다(Corda)와 IBM 및 리눅스 재단의 하이퍼렛져 패브릭(Hyperledger Fabric), 나스닥(NASDAQ)의 링크(LINQ)가 있다. 연합형 블록체인은 공개형과 폐쇄형의 혼합형이다. 연합형은 공개형과 폐쇄형의 중간 형태라고 볼 수 있는데 공개형의 투명한 거래 내용의 공유와 폐쇄형의 네트워크 조정 권한의 집중을 동시에 가지고 있는 블록체인이라고 생각하면 된다. 예로는 J.P. Morgan Coin/Quorum이 있다.

다. 블록체인과 합의 알고리즘(Consensus Algorithm)

현재 사용되고 있는 블록체인 플랫폼들은 블록을 생산하는 합의 알고리즘에 따라 구분할 수 있다. 블록체인은 미리 설정된 합의 알고리즘에 따라 모든 참여자가 새로운 블록이 생성되기 전 합의에 이르게 된다. 일단 블록이 생성되고 나면 모든 참여자는 그 내용을 수정할 수 없게 되고, 암호화된 해시를 통해 다음 블록과 체인을 연결하게 된다. 비트코인(BitCoin)이 처음 사용하였던 작업 증명 (PoW: Proof of Work), 그리고 이더리움(Ethereum)이 도입한 지분 증명 (PoS: Proof of Stake), IBM 하이퍼렛저 패브릭(Hyperledger Fabric)이 사용하고 있는 실용적 비잔틴 결함 허용 (PBFT: Practical Byzantine Fault Tolerance), 비트쉐어가 사용하고 있는 위임 된 지분 증명 (DPOS: Delegated Proof of Stake), Ripple이 사용하고 있는 Ripple 알고리즘, Stellar 알고리즘 등 다양한 합의 메커니즘이 존재한다.

각각의 알고리즘들은 각 플랫폼이 지향하는 바에 따라 블락을 생성하는 방식이 다르며, 비트코인의 PoW 알고리즘이 가지고 있던 에너지 다소비 문제와 10건에 불과한 초당 거래 건수 등을 해결하기 위해 개발되었다.

라. 스마트 계약(Smart Contract)

블록체인 기반 스마트 계약은 특정 조건이 충족되면 자동으로 실행되는 코드를 말한다. 스마트 계약은 동일 증명 작업을 기반으로 사전에 상호 합의된 룰에 따라 정해진 절차를 모두 코드화하여 맺어진다. 여러 비즈니스 영역 중, 서비스 업무 영역이 가장 큰 효과를 발휘하는 영역이다. 그 이유는 상호 거래 및 검증이 잦고, 데이타의 소유 및 보안에 민감하며, 업무 자동화 시 효율성 제고가 용이하며, IT 시스템의 확장 및 타 시스템과의 연결이 상대적으로 유리하기 때문이다. 스마트 계약에 사용되는 언어로는 Java, Go 및 Python이 있다.

마. 토큰화(Tokenization)

토큰은 블록체인 네트워크에서 탈중앙화 응용 프로그램 (DAPP: Decentralized Application)의 활성화에 큰 도움을 주고 있다. 흔히 블록체인의 코인이라고 하면 많은 계산량과 에너지를 사용으로 새로운 블록을 생성한 채굴자에게 보상으로 주어지는 가상의 화폐이다. 이 때문에 코인은 비트코인이나 이더리움같이 독립된 블록체인 네트워크 안에서 유통된다. 하지만 독립적인 블록체인 네트워크가 없는 경우에는 비트코인이나 이더리움을 플랫폼으로 하여 다른 거래를 할 수도 있다. 이때 토큰은 블록체인 코인을 기반으로 다른 재화나 서비스를 제공하는 일종의 증권 같은 것이라고 할 수 있다. 예를 들자면 카지노에서 판매하는 칩은 현금을 상징하는 토큰이라고 할 수 있으며, 사람들은 이 칩을 가지고 베팅을 좀 더 효율적이고, 재미있게 즐기게 된다. 따라서 자체 코인을 생성할 수 없는 DAPP에서는 토큰을 사용함으로써 화폐의 기능뿐만 아니라 다른 자산의 기능을 할 수 있게 되었고, 이는 다양한 블록체인 서비스를 가능하게 하는 기반이 되고 있다.

바. 블록체인 에너지 사용 MRV와 탄소 시장

블록체인의 위와 같은 특징들은 탄소 시장에서 요구하는 강력하고 투명하며, 추적 가능한 데이터 관리 체계를 충족한다. 블록체인 기술을 이용하면 국가별로 탄소 배출권의 거래 시간뿐만 아니라 탄소 거래와 관련된 모든 정보를 기록하고 추적할 수 있다. 이를 통해 기후 변화 대응이나, 기후 변화 적응을 위한 프로젝트의 결과로 발생하는 탄소 배출 감축량을 탄소 배출권이라는 금융 자산으로 변경할 수 있다. 블록체인은 이 금융 자산을 뒷받침하는 배출권의 진실성과 무결성을 보장하고, 이중 계산을 방지한다. 또한, 스마트 계약을 통해 계약의 이행을 자동화하고 인간의 관여를 제거함에 따라 특정 이해집단의 왜곡과 사기적인 거래를 막을 수 있다. 결국, 투명한 감시 체계와 지속 가능한 자산에 대한 객관적 평가를 제공하여 기후 변화에 대응할 수 있는 사회적, 정책적 도구를 가지게 되는 것이다. 그동안 건물 부분은 이러한 투명한 정보의 제공에 소홀하였고, 녹색 건물 인증 후에도 건물 설계 시 설계사로부터 제안받았던 건물의 온실가스 배출량 전망치(Base

Energy Model)와 온실가스 배출 감축 전망치(Proposed Energy Model) 등이 실제 에너지 사용량에 부합하는지에 대한 모니터링에 큰 관심을 두지 못했다. 따라서 블록체인의 도입으로 그동안 달성하기 힘들었던 건물의 에너지 사용 데이터의 투명성을 높이고, 쉽고 빠르게 검증받을 수 있는 시스템을 마련함으로써 건물 분야가 탄소 시장에 더 쉽게 접근할 수 있는 전기를 마련할 수 있다고 생각한다.

5. 건물 에너지 블록체인 MRV 시스템 연구

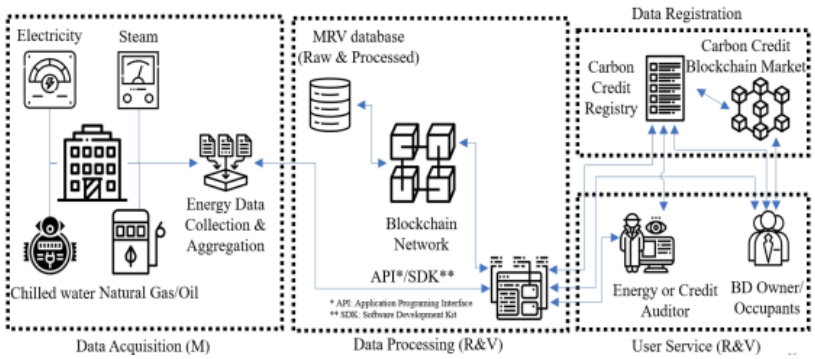
이를 위해 University of Florida의 Powell Center for Construction&Environment에서는 블록체인 기술을 활용하여 건물 에너지 사용과 관련한 MRV 시스템을 구축하는 연구를 진행하고 있다. 이를 통하여 건물 분야가 더 쉽게 녹색 건물 및 친환경 에너지 인증을 받을 수 있게 하고, 탄소 시장에 보다 용이하게 접근하기 위한 교두보를 마련하고자 하였다.

가. 건물 에너지 블록체인 MRV 아키텍처(Architecture)[6]

본 연구에 사용된 블록체인 MRV 아키텍처는 [그림 4]에서 볼 수 있듯이, 건물 에너지 블록체인 MRV 아키텍처는 데이터 획득 (Data Acquisition), 데이터 처리 (Data Processing), 데이터 등록 (Data Registration)과 사용자 서비스 (User Service) 등 크게 4가지로 나눌 수 있다.

데이터 획득 단계에서는 건물이 사용하는 에너지 종류에 따라 각각의 스마트 미터 (Smart meter) 또는

[그림 4] 건물 에너지 블록체인 MRV 아키텍처



자료: 저자 작성

6) IEEE Std 1471-2000 (JHilliard, R., 2000) 에 따르면 프로그램 아키텍처란 하나의 시스템이 그것을 구성하는 요소와, 그 요소들 또는 주변 환경과의 상호작용을 관장하는 근본적인 구조나 그 시스템의 디자인이나 진화를 유도하는 원리들을 말한다.

IoT 센서 등을 통하여 에너지 사용량을 측정하고 그 결괏값을 블록체인 네트워크로 전송한다. 이 단계에서는 인간의 관여를 줄이고, 오로지 스마트 미터 등 센서를 통한 자동화에 집중함으로써 데이터 수정에 따른 데이터 진실성 훼손을 방지한다. 이러한 자동화 측정은 UN에서 추구하는 온실가스 감축 프로젝트에 도입 가능하며, 그동안 문제가 되었던 개발도상국 또는 저개발국가의 온실가스 감축 UN 프로젝트 진행 과정에 대한 검증과 지원을 쉽게 한다. 이 투명성 제고를 통해 더 많은 프로젝트가 진행되고, 이를 통해 더 많은 온실가스 배출 감축을 달성할 수 있기를 기대하고 있다.

데이터 처리 단계에서는 블록체인 네트워크와 스마트 계약을 이용하여, 수집된 정보를 분석하고, 에너지 사용 절감량과 이에 따른 온실가스 배출 감축량을 자동 계산하고, 이를 뒷받침하는 문서들은 자체 서버나, 검증기관 서버에 저장한 뒤, 블록체인 해시 코드를 사용하여 관계자들은 언제나 접근 가능하도록 설계되었다.

데이터 등록 단계는 실제 탄소 시장에서 탄소 배출권을 확보하는 단계로, 에너지 사용량 감사 및 온실가스 배출량 감사를 통해 검증받은 온실가스 배출량 감축분을 탄소 배출권으로 전환한다. 현재 탄소 배출권 거래를 위한 블록체인 탄소 시장들이 개소되었거나 개소 준비 중이며, 건물 분야가 이 시장에 참가할 수 있다면 더 손쉽게 탄소 시장에서 탄소 배출권을 거래할 수 있다고 생각된다.

마지막으로 사용자 서비스는 건물의 에너지 사용량 측정 및 에너지 사용 절감량, 온실가스 감축량, 에너지 및 온실가스 감축량 감사 진행 과정 등을 모든 참여자에게 제공한다. 이를 통하여 투명하고, 공개적인 건물 에너지 사용을 공유할 수 있으며, 이를 건물 에너지 사용과 관련한 정책 수립의 근간으로 활용할 수 있다. 그렇다면 단계별 세부 내용을 살펴보도록 하자.

나. 데이터 획득(Data Acquisition) 단계

앞서 기술한 바와 같이 데이터 획득 단계에서는 건물이 사용하는 에너지원에 따라 스마트 미터, IoT 센서, 또는 건물 자동화 시스템 (Building Automation systems)[7]을 사용하여 에너지 사용량을 측정한다. 측정 대상 에너지원은 전기, 증기, 냉각수, 천연가스, 그리고 석유류이다. 이들의 사용량은 지역 에너지 공급업자가 스마트 미터를 이용하여 측정하고 발행한 사용량 고지서나 각 건물에 있는 개별 에너지 사용량 미터기를 통하여 측정하게 된다. 어느 경우이든 사람이 직접 읽어 점검하는 것은 배제하며, 이를 통해 에너지 사용량의 축소/과대 보고, 누락 등의 오류를 줄일 수 있다. 현재 Uiversity of Florida에서 제공하는 건물의 에너지 사용량 측정 방식은 다음의 표와 같다.

7) BAS (Building Automation Systems)란 건물의 냉난방공조 시스템을 운영하기 위해 필요한 다양한 업무들을 자동화한 시스템을 말한다. 최근의 스마트 빌딩들은 BAS를 구성함에 있어, 정보공학, 컴퓨터 사이언스, 자동제어 이론 등 다양한 기술들을 사용하여 실시간 자동 점검 및 조정을 수행한다 (Xiao and Fan, 2014).

〈표 3〉 University of Florida의 건물 에너지 사용량 측정 방식

건물 에너지 사용 분야	사용량 측정 단위	측정 자료
전기	Kwh	사용량 고지서 또는 미터 값
증기	Lbs	〃
냉각수	Tons	〃
천연 가스	MCF[8]	사용량 미터 값
석유류	Gallon	〃

자료: 저자 작성

다. 데이터 처리(Data Processing) 단계

1) 블록체인 네트워크 구성 요소 추출

블록체인 네트워크에서 데이터를 처리하기 위해서는 다양한 선행 작업이 필요하다. 네트워크 참여자는 누구인지, 어떤 거래들이 이루어지는지, 그리고 그러한 거래를 뒷받침하는 법이나, 규정 등은 어떤 것이 있는지 등이 결정되어야 한다. [그림 5]는 네트워크를 구성하는 요소를 추출한 내용을 나타내고 있다.

먼저 본 연구에서는 LEED나 Green Globes, Green Star, 그리고 APX[9] 등의 사례에서의 참여자를 참고하여 블록체인 네트워크 참여자를 선별하였다. 우선 건물주와 건물 사용자, 건물의 에너지 사용과

[그림 5] 블록체인 MRV 네트워크 구성을 위한 요소 추출

자료: 저자 작성

8) MCF: the volume of 1,000 Cubic Feet (1000 ft3)
9) APX는 미국 최대의 Voluntary Carbon Credit Registry 업체이다.

온실가스 배출량을 검증할 감사인들, 탄소 배출권을 등록하고, 유통을 관장할 조직들, 그리고 블록체인 탄소 시장에서 배출권 거래를 할 거래자들이 네트워크 참여자들이다. 다음으로 거래 내용은 건물의 특성과 지역에 따른 참여 시장의 선별을 가능할 수 있는 사전 계획 제출 및 승인, 그리고 에너지 사용량의 측정 및 제출, 온실가스 배출량의 측정 및 제출, 제출된 디지털 문서에 대한 검증 및 인증, 탄소 배출권의 등록 등이다. 마지막으로 거래와 관련된 여러 규정, 방법들은 기존의 MRV 시스템 등을 참고하여 블록체인 스마트 계약에 사용될 것들만 간단히 추출하였다. 연구가 진행되면서 이러한 규정들은 보다 고도화되고, 자세한 내용들이 추가 될 것으로 예상하고 있다.

2) MRV 프로세스

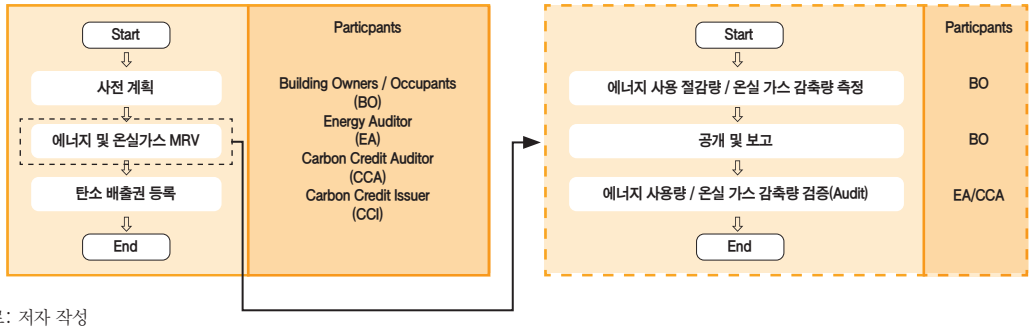
건물의 에너지 사용 절감량과 온실가스 배출 감축량에 대한 MRV 프로세스는 [그림 6]의 단계로 진행된다. 사전 계획에서는 건물의 총바닥면적에 따라 온실가스 저감 프로젝트 참여 가능 여부와 참여 시장 등을 결정하고, 에너지 및 온실가스 MRV 절차에 따라 건물의 에너지 사용을 측정하게 되며, 그리고 그 결과를 가지고 탄소 배출권 등록을 추진하게 된다.

에너지 및 온실가스 MRV는 다시 에너지 사용 절감량 및 온실가스 감축량을 측정, 공개 및 보고, 그리고 에너지 사용량 및 온실가스 감축량의 검증 과정으로 진행된다. 그리고 MRV 프로세스 상에서 이루어지는 모든 거래는 블록체인의 합의 알고리즘에 의해 모든 참여자가 거래 내용을 검증하고, 승인하여, 블락(Block)에 기록됨으로써 종료된다.

3) 에너지 사용 절감량 측정 및 보고

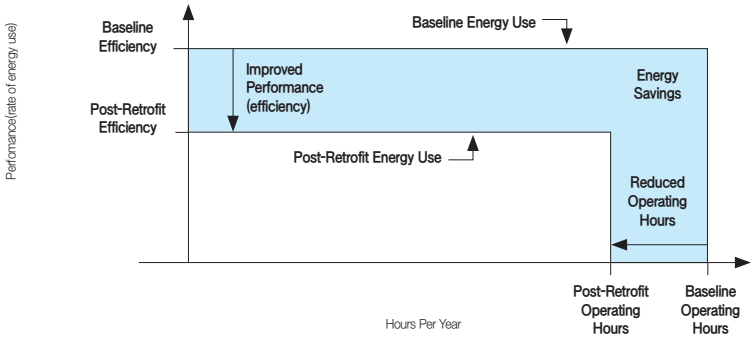
블록체인을 구성하는 요소들이 추출되고, MRV 프로세스 정립됨에 따라 스마트 계약 내에서 수행할 에너지 사용 절감과 온실가스 배출 감축량에 대한 기준이 필요하다. 본 연구에서 사용한 에너지 사용 절감량 계산 방식은 [그림 7]과 같다. [그림 7]은 미국의 FEMP (Federal Energy Management Program of Department of Energy of the US)의 에너지 절약 공식[10]을 그림으로 표현한 것이다. 즉, 에너지 사용 절감량은 건물 디자인에 있어 녹색 기술들을 적용하기

[그림 6] MRV 프로세스 단계별 내용



자료: 저자 작성

[그림 7] 에너지 사용 절감량 산출 방법



Energy Savings = (Baseline Energy − Post−Installation Energy) ± Adjustments

(source: FEMP M&V Guidelines.)

자료: Webster, L., et al., M&V Guidelines: Measurement and Verification for Performance-Based Contracts, 2015

전의 베이스라인(Baseline) 모델의 에너지 사용량 추정치에서 녹색 기술들을 적용한 건물의 실제 에너지 사용량을 차감한 것이라고 할 수 있다.

〈표 4〉에서는 본 연구에 사용된 베이스라인 에너지 모델과 실 에너지 사용량 측정법을 밝히고 있다. 베이스라인 에너지 모델과 에너지 사용량 측정법은

〈표 4〉 본 연구에 적용된 베이스라인 에너지 모델 및 에너지 사용량 측정 방법

Baseline Energy Models	Post-Installation Energy Measurement
Energy Star Target Finder	IPMVP[11]
ASHRAE[12] 90.1	ASHRAE Guideline 14
ANSI[13]/GBI[14] 01-2010	ISO[15] 50002
ASHRAE bEQ[16]	FEMP M&V

자료: 저자 작성

10) 본 공식은 에너지관리공단에서 2015년에 발간한 기기 교체 등에 대한 에너지 절감량 산출 M&V 가이드라인에서도 같이 사용되고 있다.
11) PMVP: International Performance Measurement and Verification Protocol
12) ASHRAE: The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
13) ANSI: American Nation Standards Institute
14) GBI: Green Building Initiative
15) ISO: International Organization for Standardization
16) bEQ: Building Energy Quotient

여러 가지 있는데 본 연구는 베이스라인 에너지 모델로 ASHRAE 90.1.을 사용하였으며, 에너지 사용량 측정과 관련하여서는 ASHRAE Guideline 14을 사용하였다. ASHRAE 90.1.은 여러 베이스라인 에너지 모델 중 LEED 및 그린 글로브에서 모두 채택한 모델이며, ASHRAE Guideline 14 역시 두 인증 프로그램에서 사용하고 있으므로 본 연구의 모델과 에너지 사용량 측정 방법으로 사용하였다.

[그림 7]과 〈표 4〉에 따른 에너지 사용 절감량은 블록체인 스마트 계약 내에서 자동 계산되며, 이 결과는 에너지 사용량 감사인에게 통보된다. 그리고 제삼지대 독립 감사인은 통보된 내용과 블록체인 데이터 베이스에 저장된 데이터들을 비교 · 대조하고, 결괏값들이 같다면 그 내용을 인증한다.

4) 온실가스 배출 감축량 추정 및 보고

에너지 사용 검증이 종료되면 블록체인 스마트 계약에 의해 자동적으로 온실가스 배출 감축량 계산을 시작한다. 건물의 온실가스 배출량을 측정하는 방법은 The Greenhouse Gases Equivalencies Calculator of the U.S. Environment Protection Agency (EPA)를 사용하였다. 에너지 사용 절감량이 계산되면, 배출 계수를 활용하여, 절감된 에너지 사용량만큼의 배출 가스 감축량이 계산된다. 〈표 5〉는 EPA에서 사용하는 에너지 소스별 온실가스 배출계수를 제공하고 있다. 다만 이 표의 값은 미국 전역의 평균값이나, 배출계수는 국가별, 지역별, 에너지 MIX에 따라 달라지므로 각 건물이 속한 지역에 따라 배출 계수를 다르게 적용하여야 한다.

온실가스 배출 감축량이 계산되면 스마트 계약에 따라 감축량 데이터가 온실가스 감축량 감사인에게 통보된다. 또한, 제삼지대 독립 감사인은 통보된 내용과 블록체인 데이터 베이스에 저장된 데이터들을 비교 · 대조하고, 결괏값들이 같다면 그 내용을 인증하며, 인증이 끝나면 탄소 배출권 등록을 위한 절차가 시작된다.

〈표 5〉 온실가스 배출 계수

온실가스 배출 분야	사용량 측정 단위	배출 계수
전기	Kwh	0.707 kg CO_2/Kwh
증기	MLbs	22.24 kg CO_2/MLbs
냉각수	MBtu	52.70/73.89/49.31 Kg CO_2 /MBtu (Electric/Absorption Natural Gas/Engine-Driven Natural Gas)
천연 가스	Therm	5.3 Kg CO_2/therm (therm = 0.1mmbtu)
석유류	Gallon	10.180 Kg CO_2/gallon of diesel

자료: 저자 작성

라. 데이터 등록 (Data Registration) 단계

데이터 등록단계는 건물 에너지 사용 절감과 온실가스 배출 감축의 결과를 탄소 배출권으로 교환하는 단계이다. 확보된 배출권은 탄소 시장에서 거래가 가능하다. 현재 소수의 블록체인 자발적 탄소 거래시장이 오픈하였거나 준비 중인데, NORI, Veridium, Poseidon 등이 있다. 각 블록체인 탄소 거래 시장의 특징은 〈표 6〉와 같다. 블록체인 탄소 거래 시장은 모두 자발적 시장의 탄소 배출권을 거래하며, 탄소 배출권 레지스트리 업체와 협력하여, 배출권을 블록체인 네트워크를 통해 거래할 수 있도록 하고 있다.

본 연구에서 진행하고 있는 건물 에너지 MRV 블록체인과 탄소 거래시장 블록체인은 별도의 블록체인 네트워크이며, 이를 연결하기 위해서는 KAFKA나 다중 체인 통신 기술이 별도로 필요하다.

마. 사용자 서비스 (User Service)

사용자 서비스는 건물 사용자와 에너지 및 온실가스 배출 감사인 등에게 건물 에너지 사용 및 측정 현황을 사용자 편리에 맞추어 제공한다. 이는 핸드폰 애플리케이션으로도 제작 가능하며, 다양한 모바일 기기에서 확인할 수 있다.

〈표 6〉 블록체인 탄소 거래 시장

구 분	NORI	Veridium	Poseidon
운영조직	NORI LLC.	InfiniteEarth	Poseidon Foundation
블록체인 플랫폼	Ethereum	Stellar	Stellar
합의 알고리즘	POS (in switching to Proof of Stakes)	Stellar Decentralized Consensus	Stellar Decentralized Consensus
블록체인 종류	Public permissioned	Public permissioned	Public permissioned
코인 공개년도	2020	2020	2019
코인 공개국가	USA	Hong Kong	USA, CANADA
탄소 토큰 (One ton of CO2e)	NRT	CARBON	CARBON CREDIT
시장 규모	$5 billion (500 million tokens)	-	$2.3 million (36 billion tokens)
거래 토큰	NORI	VERDE	OCEAN
협력카본 레지스트리	Climate Action Reserve, The American Carbon Registry, and Verra	HIS Markit Registry, APX registry	-

자료: 저자 작성

바. Case Study

본 연구는 University of Florida가 속한 Alachua county 내 LEED Platinum Certificates 건물인 UF Clinical and Translational Science Institute Building (2013년 인증)과 Four Green Globes Certificates 건물인 Meadowbrook Elementary Building (2013년 인증)을 대상으로 블록체인 네트워크 구축 및 스마트 계약, 제삼자 검증, 인증 등의 과정을 시연하고, 그 결과에 대해 분석할 예정이다. 두 건물을 선정한 이유는 미국의 녹색 건물 인증의 가장 대표적인 두 브랜드의 인증을 각각 받은 건물들로, 에너지 사용 절감에서 온실가스 배출 감축에 이르는 전 MRV 과정을 시험해 볼 수 있기 때문이다. UF 건물은 BAS 시스템을 사용하고 있어 데이터 측정과 활용에 있어 오류를 줄일 수 있을 것으로 판단되며, Meadowbrook Elementary School은 건물 준공 이후 큰 변화가 없었기에 에너지 사용 절감량 추이 계산에 유리할 것으로 보인다.

6. 시사점 및 과제

UN을 중심으로 많은 국가에서는 탄소 시장의 활성화와 기후 변화 대응 및 적응의 효율적 추진을 위해 각 부문의 MRV를 강화하는 추세이다. 신기후체제 하의 국제 탄소 시장은 엄격한 산정체계를 요구하는데, 이는 보고 가능하고, 검증 가능한 감축 실적을 달성해야 하며, 노력의 이중 계산을 방지해야 한다. 블록체인 MRV 시스템의 투명성, 불변성, 추적성, 중간자의 제거, 스마트 계약 등의 특징들은 이 요구사항들을 충족시키고, 비용과 시간 절약이 가능하다. 따라서 본 연구는 건물 분야의 블록체인 에너지 사용 MRV 시스템을 제안함으로써 건물 분야가 자발적 탄소 시장에 접근할 기회를 마련코자 하였다.

또한 블록체인 에너지 MRV 시스템은 앞으로 LEED 또는 Green Globes 등 녹색 건축 및 친환경 에너지 건물 인증에도 활용될 수 있으며, 우리나라의 배출권거래제, 목표 관리제, 녹색건물 인증제도, 제로 에너지 빌딩 등에서도 실제 에너지 사용량, 온실가스 배출량 등을 관리하고, 검증하는 디지털 MRV 시스템으로도 확장이 가능하다. 이를 통해 각종 인증에 소요되는 비용과 시간을 절약하고 투명성을 확보함으로써 건물주들이 녹색 및 친환경 인증에 더 쉽게 참여할 수 있게 하여 기후 변화 대응력을 높이는 데도 기여할 수 있다.

하지만 개발도상국이나 저개발국가에서 시행하는 CDM (Clean Development Mechanism)과 같은 프로젝트들은 여전히 지역적, 환경적, 인력 풀의 한계 등으로 에너지 MRV 시스템을 구축하기가 쉽지 않다. 즉, 블록체인 MRV가 도입되더라도 데이터 입력 단계에서 자동화가 이루어지지 않는 한 그 데이터의 진실성을 보장하기는 어렵다. 이에 IoT 센서들이나 스마트 미터들이 현재보다 싼 가격으로 보급되고 안정적인 인터넷 환경이 구축되어야 하는데 이것은 더 시간이 걸릴 예정이며, 추가적인 연구를 통해서 해결해야 하는 과제라고 하겠다.

참고문헌

〈국내 문헌〉

관계부처 합동, 제2차 국가 기후 변화 적응 대책(2016-2020) 요약본, 2015. 12

김길환 외, "신기후체재 하의 국제 탄소시장에 관한 최신 논의 현황과 시사점," Journal of Climate Change Research 제8권 제1호, 2017, pp. 73~80

김승도 외, "Post-2020 의 MRV 체계 수립을 위한 우리나라 대응 방향," 환경정책연구, 제14권 제4호, 2015, pp. 3-21

에너지관리공단, 기기 교체 등에 대한 에너지 절감량 산출 M&V 가이드라인, 2015.3

〈외국 문헌〉

UNFCCC, Handbook on Measurement, Reporting and Verification for developing country parties, 2014. 12

Hilliard, Rich, "IEEE-std-1471-2000 recommended practice for architectural description of software-intensive systems," IEEE, 12(16-20), 2000

Swan, Melanie, Blockchain: Blueprint for a New Economy, 2015

Webster, L., Bradford, J., Sartor, D., Shonder, J., Atkin, E., Dunnivant, S., ... & Schiller, S., M&V Guidelines: Measurement and Verification for Performance-Based Contracts, 2015

Xiao, F., & Fan, C. "Data mining in building automation system for improving building operational performance," Energy and buildings, 75, 2014, 109-118

〈웹사이트〉

APX, https://apx.com/

Architecture2030, https://architecture2030.org/buildings_problem_why/

EPA, https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gases-equivalencies-calculator-and-references

Jktech, https://jktech.com/insight/blogs/consensus-in-hyperledger-fabric/

The conversation, https://theconversation.com/the-climate-clock-counting-down-to-1-5-107498

Worldbank, http://spappssecext.worldbank.org/sites/indc/Pages/FAQ.aspx