

탄소중립 건축을 위한 블록체인 기술의 잠재력과 미래전망

Potential and future outlook of blockchain technology for carbon-neutral construction



이동민 Dongmin Lee
중앙대학교 건축학부
조교수
E-mail : dmlee@cau.ac.kr



김도형 Dohyeong Kim
중앙대학교 건축학부
박사과정
E-mail : rawkasa@cau.ac.kr

1. 서론: 탄소중립 건축 현황과 관련 현황

기후변화에 대한 위기의식이 증대됨에 따라, 2015년 12월 195개국이 참여한 UN 파리 기후변화협약으로 촉발된 전 세계적인 탄소중립 선언이 이어지고 있다. 우리나라 역시 2020년 12월, 정부 차원에서 ‘2050 탄소중립’ 달성을 국가 목표로 지정하고, 이듬해 10월에 ‘2050 탄소중립 시나리오’를 수립하였으며, 2022년 9월 25일 기후 위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법이 시행되었다. 탄소중립(Carbon Neutrality)이란 ‘재생 가능한 에너지원의 지속적 이용 및 에너지 효율 극대화를 통해 화석에너지 의존도 및 에너지 소비를 최소화하고, 경제·사회 활동 등에서 불가피하게 발생하는 탄소 배출량을 억제하여 최종적으로는 탄소 배출량을 0으로 만들고자 하는 개념’을 의미한다. 대한민국의 ‘2050 탄소중립’ 역시 최종적으로 국내 탄소 순배출량을 0으로 만드는 것을 최종 목표로 하고 있으며, 이러한 목표 달성을 위해서는 필연적으로 단일 탄소 배출 지점에서의 탄소 배출량 억제가 아닌, 전방위적인 탄소 배출량 감축 노력이 필요함을 의미한다.

한편, 국제에너지기구(International Energy Agency, IEA)에 따르면, 건설산업은 건설자재의 생산과 운송, 시공 과정, 건축물의 운영, 그리고 해체에 이르는 전체 프로젝트 생애 주기 동안, 2019년 기준 전 세계 온실가스 배출의 약 38%를 배출하는 것으로 나타났다. 건설산업은 이러한 밸류체인(Value chain) 속에서 막대한 양의 에너지를 소모하고 탄소를 방출하며, 이에 따라 건설산업에서의 탄소중립 달성은 단일 산업 내 탄소 배출 감축에 그치지 않고, 글로벌 탄소 배출 목표 달성에도 중대한 영향을 미친다.

이에 따라 건설산업의 탄소중립은 국제적인 기후 변화 대응 전략의 핵심 요소로 간주되며, 전 세계 건설산업 역시 향후 점진적인 탄소중립 달성을 위한 정책 및 투자 계획을 수립하고 있는 추세이다. EU 집행위원회는 2020년 10월 공개된 실행방안을 통해 에너지 빈곤 개선, 공공부문 에너지 효율 개선, 냉난방 에너지 효율 개선을 3가지 골자로 건물 에너지 효율 향상을 설계하고 있으며, 일본의 경우 탄소중립 설비 투자 기업 세제 우대, 건축 자재·설비의 에너지 효율 기준 강화 및 성능평가제도·표시제도 확립 등을 배출 저감 대책으로 수립하였다. 대한민국 역시 탄소중립 달성을 위해 제로에너지 건축물 확대, 기존 건축물 대상 에너지 성능 향상 지원, 지속 가능한 건축 자재 개발 및 보급 등 건설산

업 내 탄소 배출량을 줄이고 지속 가능한 발전을 촉진하기 위한 정책을 지속적으로 시행하고 있다.

그러나, 건설산업 내 탄소중립 실현이라는 과제를 해소함에 있어 다음과 같은 이슈들이 존재한다. 첫째로, 건설산업 내 발생하는 탄소 배출량은 밸류체인 특정 단계에 집중되어 있다. 즉, 건설 현장에서 직·간접적으로 배출되는 온실가스의 비중은 전 세계 온실가스 배출량 중 약 0.5%로 많지 않으나, 건설자재 생산과 운송, 완공 건물의 운영과 폐기까지 밸류체인(Value Chain) 전반에서 발생하는 배출량은 약 38%에 이른다. 특히 탄소중립의 주요 대상인 에너지 생산 관련 이산화탄소의 경우, 건설산업에서만 47%를 배출함에 따라 전체 산업들 중 가장 높은 에너지 소비 및 탄소 배출 비중을 가지는 것으로 평가되고 있다.

둘째, 건설산업 내 탄소 배출 관련 데이터의 관리가 까다롭다. 실시간 데이터 관리 및 분석을 위한 모니터링, 탄소 배출 전략의 수립 등을 위해서는 탄소 배출 관련 데이터의 투명하고 추적 가능한 관리가 필연적으로 이행되어야 한다. 그러나, 건설산업은 자재의 생산부터 운송, 시공, 운영, 해체에 이르는 여러 단계로 이루어진 프로젝트 수행 과정과 더불어 다양한 이해관계자가 얽혀 있으며, 탄소 배출 관련 데이터들 또한 일관되지 않은 형식 및 방법으로 수집된다.

셋째, 탄소중립 실현을 위한 유도 수단의 부족함이다. 국내 건설산업 내 민간 프로젝트의 건설 수주는 수수료액 기준 공공 프로젝트 대비 약 8.9배에 달하며, 탄소중립의 실현을 위해서는 민간기업의 적극적인 참여가 절실하다. 그럼에도 국내·외 탄소중립 관련 건설 정책들은 공공 프로젝트의 참여를 위주로 맞추어져 있으며, 민간 프로젝트의 참여를 위한 인센티브는 친환경 건축 자재 비용 및 친환경 에너지 전환 설비 구축비용 등 높은 초기 투자 부담에 미치지 못하는 수준이다.

2. 탄소중립을 위한 탄소배출권 거래 시스템의 개념과 적용현황

앞서 설명한 전 세계적인 탄소중립 트렌드 속에서, 탄소중

립을 촉진하기 위한 다양한 정책들이 시행되거나 검토되고 있다. 대표적인 정책으로는 1) 온실가스 배출량에 비례해 세금을 부과하는 ‘탄소세’, 2) 정부가 온실가스 다량 배출자에게 감축 목표를 설정하고, 목표 미달 시 패널티를 부과하는 ‘목표관리제’, 3) 시장 매커니즘을 이용해 온실가스 감축을 유도하는 ‘배출권거래제’가 있다. 하지만, 탄소세와 목표관리제는 일반적으로 패널티를 부과하는 방식으로 단기적인 목표 달성에는 효과적일 수 있으나, 기존에 규제 없이 온실가스를 배출해온 기업 입장에서는 지나치게 강하고 경직된 규제 방식으로 느껴질 수 있다.

반면, 배출권거래제는 시장 매커니즘에 기반하고 있어, 기업이 배출량을 감축하고 남은 배출권을 판매하면 경제적 이익을 얻을 수 있어 감축에 대한 동기가 부여된다. 또한, 감축 목표 달성에 실패하더라도 부족한 배출권을 구매함으로써 세금이나 과징금 등의 직접적인 제재를 받지 않아도 되며, 배출권을 거래 가격이 낮을 때 구매하면 비용을 최소화할 수 있으며, 남은 배출권은 다음 연도로 이월하거나, 부족한 배출권을 다음 연도의 배출권에서 차입할 수도 있다. 더 나아가, 스스로 감축사업을 시행하기보다 타인의 감축을 지원하는 것이 비용적으로 유리할 경우, 상쇄 장치를 통해 다른 기업의 감축 실적을 인정받을 수도 있다. 이러한 배출권거래제의 특성은 기업이 자발적으로 감축 노력을 투자하도록 유인할 수 있으며, 기업 입장에서도 유연하게 대응할 수 있어 비용 효율성을 극대화하기에 기업의 참여에 심리적 저항을 최소화함과 동시에 상대적으로 적은 비용으로 효과적인 온실가스 감축을 유도할 수 있다고 평가된다.

이와 같은 배출권거래제의 장점을 바탕으로, 유엔기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)은 글로벌 탄소 배출 감축을 촉진하기 위해 다양한 국제 협약과 체계를 도입해 왔다. 예를 들어, 교토 의정서는 첫 번째 국제적 탄소 배출 감축 약속을 설정했으며, 파리협정은 국가별 자발적 기여(Nationally Determined Contributions, NDC)를 통해 장기적인 온실가스 감축 목표를 제시하고 있다. 이러한 국제 협약들은 각국이 자국의 배출권 거래제와 연계하여 탄소 감축 목표를 달성하도록 유도하고 있

으며, 배출권 거래 시장의 확대와 효율적인 운영을 지원하고 있다.

또한, 배출권거래제의 통합적 접근은 각 국가 또는 지역별로 분산화되어 설립된 배출권 거래 시장을 상호 연결하고, 국제적인 배출권 거래를 촉진하기 위한 노력을 강화하고 있는 추세이다. 이러한 접근은 탄소 시장의 유동성을 높이고, 글로벌 차원에서의 탄소 배출 감축을 보다 효과적으로 추진할 수 있도록 돕고 있다. 각국은 자국의 배출권 거래 시스템을 통해 국내 감축 목표를 달성하면서도 국제적으로 통합된 시장에서의 거래를 통해 추가적인 감축 기회를 모색하고 있다.

이러한 배출권거래제의 유용성에도 불구하고, 배출권거래제가 효율적으로 활성화되기 위해서는 해결되어야 할 몇 가지 문제점이 존재한다. 첫째는 데이터의 신뢰성과 투명성 부족이다. 현재의 배출권거래제는 기업의 탄소 배출량과 소지 탄소 배출권 등 모든 관련 데이터가 중앙집권화된 기관에 의해 단독적으로 관리되며, 이는 데이터 관리의 불투명성을 야기할 수 있으며 데이터 추적을 보장할 수 없어 부정행위의 발생에 매우 취약하다. 가령 EU 배출권 거래 시장의 경우, 이중 계산(Double Counting), 법규 공백 악용 등 10가지 유형의 부정행위가 적발되었으며, 2008년~2009년 사이 18개월의 기간 동안 약 50억 유로 정도로 추정되는 조세수입 손실 문제가 발생하였다.

둘째는 배출권 거래 시장의 복잡성과 비효율성이다. 기업은 배출량 보고에 있어 사업장별 배출시설의 종류·규모·부하율, 배출량, 배출량의 계산·측정 방법 및 그 근거, 관련 보고서, 사용·감축 실적 및 판매·구매 등 이동 정보 등 다양한 명세서를 작성해야 하며, 이는 필연적으로 많은 문서작업 및 중개자의 개입을 필요로 한다. 이는 거래 소요 시간과 비용의 증가로 이어지며, 필연적으로 비효율성으로 인한 기업의 참여가 저해되는 원인이 된다.

셋째, 배출권거래제 내에서는 데이터 추적 및 모니터링이 어렵다. 효율적인 배출량의 산출 및 배출권 거래를 위해서는 산업 내 각 기업 및 배출원에서의 배출량 및 거래가 실시간으로 추적 및 모니터링 되어야 하나, 각기 다른 형식과 기준으로 수집된 배출량, 보고된 배출량 데이터의 검증, 실시간 모니터

링의 부재는 시스템의 신뢰성과 효과성을 유지하기 어렵게 만든다. 특히 배출권의 경우 그 인증과 감축 실적 검증이 복잡하며, 개별 프로젝트의 배출량은 공유되지 않는 것이 일반적이기에 중앙기관을 제외한 외부에서는 추적 및 모니터링이 거의 불가능하다.

이와 같은 문제들을 해결하지 않고서는 배출권 거래제가 가진 잠재력을 최대한 발휘하기 어려우며, 시스템의 지속 가능성도 보장할 수 없다. 따라서, 배출권 거래제의 이러한 한계를 극복하고, 보다 신뢰성 있고 효율적인 시스템을 구축하기 위한 새로운 접근이 필요하다. 이에 따라, 다음 장에서는 블록체인 기술을 기반으로 한 배출권 거래 시스템을 통해 앞서 언급된 문제점들을 어떻게 해결할 수 있을지에 대해 다루고자 한다.

3. 블록체인 기반 탄소배출권 거래 시스템 및 인센티브 매커니즘

블록체인은 데이터를 암호화된 블록의 형태로 재구성하여 시간 순서대로 연결한 데이터 관리를 목적으로 설계된 분산형 네트워크이다. 블록은 네트워크마다 그 상세는 차이가 있지만, 일반적으로 <그림 1>과 같이 블록의 해시(Hash) 값, 블록의 기본적인 정보를 담고 있는 헤더(Header), 그리고 데이터 처리의 최소 단위인 트랜잭션(Transaction)들로 구성된 바디(Body)로 구성된다. 해시 값은 해시 매커니즘을 통해 생성된 고유한 값으로, 하나의 데이터는 항상 고유의 해시 값을 생성하나, 역으로 해시 값을 통해 원본 데이터를 추정하는 것은 불가능하다. 블록체인 내 블록들은 이전 블록의 해시 값을 다음 블록이 포함하게 되는 연속적인 체인 형태를 띠고 있어, 특정 블록 내 데이터를 수정할 경우 이후의 블록 전체의 해시가 변하게 되며, 이에 따라 특정 블록의 데이터를 선택적으로 위조하는 것은 불가능하다.

더불어, 네트워크 내에서 새롭게 생성된 데이터는 네트워크 참여자들에게 실시간으로 분산된다. 블록체인 내에서 이루어지는 모든 데이터 처리(예: 데이터 입력, 읽기 요청 등)는



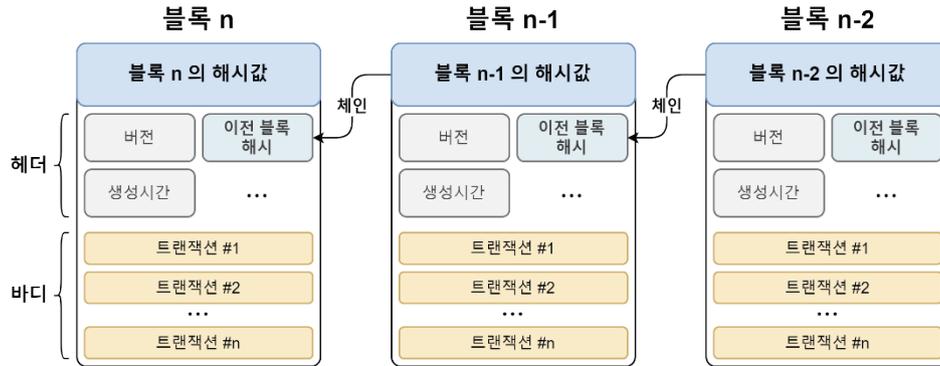


그림 1. 블록체인의 구조

트랜잭션 형태로 요청되며, 이러한 트랜잭션은 네트워크 참여자들 간의 합의 메커니즘(Consensus Mechanism)을 통해 검증된다. 합의 메커니즘은 분산형 네트워크 상에서 모든 참여자가 동일한 데이터 및 상태를 공유하기 위한 프로토콜로, 이를 통해 트랜잭션의 무결성과 적정성이 보장된다.

특히, 블록체인 네트워크는 자동화된 계약은 스마트 컨트랙트(Smart Contract)를 사용한다. 스마트 컨트랙트는 특정 조건이 충족되면 계약이 자동으로 실행되도록 프로그래밍된 코드로, 이를 통해 신뢰할 수 있는 데이터를 기반으로 시스템 내에서 자동화된 의사결정을 가능하게 하며, 이를 통해 중개자 없이 데이터의 실시간 처리 및 검증, 계약의 자동화된 이행이 가능하다.

블록체인 네트워크는 크게 public 네트워크와 private 블록체인 네트워크로 구분된다. Public 블록체인 네트워크는 누구나 관리 조직의 승인 없이 참여할 수 있는 개방형 네트워크로, 다수의 참여자를 통해 데이터의 투명성을 강화할 수 있다. 반면, private 블록체인 네트워크는 허가된 조직만 참여할 수 있어 높은 데이터 기밀성을 보장한다.

더불어, 블록체인 네트워크는 NFT(Non-Fungible Token)를 통해 고유화된 데이터를 구축할 수 있으며, 이를 통해 사용자 고유의 자격 인증서 및 자유롭게 거래할 수 있는 디지털 자산 등으로 활용될 수 있다. 이러한 특성 덕분에 블록체인은 탈중앙화된 거버넌스를 기반으로 신뢰할 수 있는 데이터 관리, 자동화된 의사결정, 데이터의 처리와 검증, 그리고 발전된 형태

태의 온라인 시장을 구현할 수 있는 기술로 평가받는다. 그리고 이러한 블록체인을 기반으로 한 탄소배출권 거래 시스템은 1) 신뢰할 수 있고 투명한 탄소 배출량 정보 공유 및 배출권 거래를 가능하게 하고, 2) 탄소 배출량의 계산·측정을 자동화할 수 있으며, 3) 실시간으로 정보의 추적 및 검증이 가능하다.

이에 따라, 제안하는 블록체인 기반 탄소배출권 거래 시스템 및 인센티브 메커니즘은 블록체인 네트워크의 성격에 따라 두 부분으로 나뉜다. 첫 번째는 private 블록체인 네트워크를 통해 개별 건설 프로젝트 내 전 과정에서 배출량 관련 데이터를 수집하는 부분이다. 이는 건설 프로젝트 내 배출량을 산출하기 위해서는 자재/장비 정보, 건축물 운영 정보, 거래 및 계약정보 등 민감한 정보의 관리가 필요하며, 이러한 민감한 정보들은 프로젝트 당사자들 간에만 공유되어야 하기에 private 블록체인 네트워크를 통해 관리되는 것이 업계의 요구에 알맞기 때문이다. 둘째는 public 블록체인 네트워크를 기반으로 배출량 데이터를 공유하고 탄소배출권을 거래하는 부분이다. 이는 프로젝트 참여자(기업)들뿐만이 아닌 배출량을 감시하고자 하는 외부 참여자들(정부기관, 환경단체 등)에게도 정보를 공유하여 데이터의 신뢰성과 투명성을 강화하는데 목적이 있다.

Private 블록체인 네트워크 내에서는 두 가지 방법을 통해 프로젝트 참여자의 건축 생애 주기별 배출량의 산출이 이루어진다. 1) 프로젝트 참여자는 네트워크 권한을 통해 자재 및 장비 등의 사용 물량을 입력한다. 국내는 배출량 산출에 있어 배출 계수 활용법이 널리 활용되며, smart contract는 IPCC 가

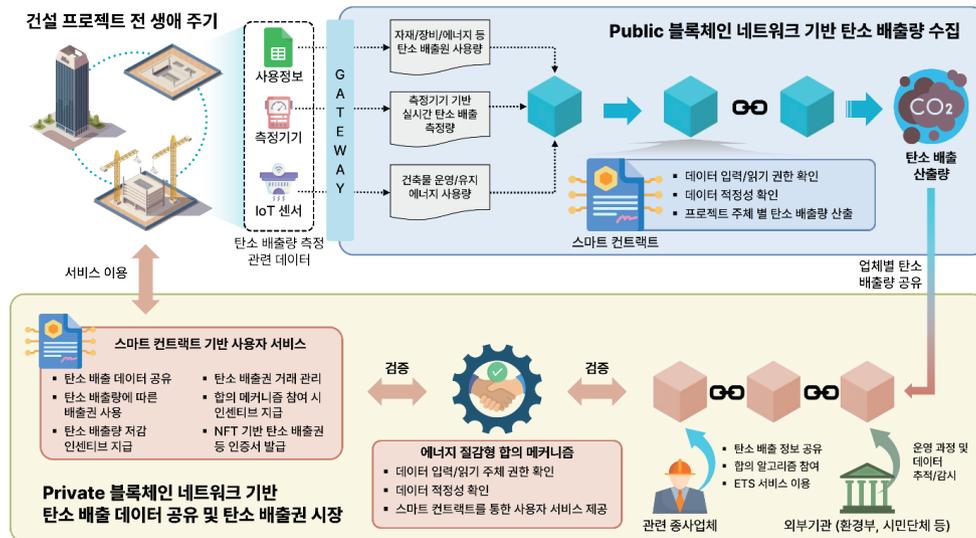


그림 2. 블록체인 기반 탄소배출권 거래 시스템 및 인센티브 매커니즘 프레임워크

이드라인이 제공하는 기본 배출 계수를 통해 물량 값으로부터 배출량을 자동으로 산출해낼 수 있다. 2) 측정 기기 및 IoT 센서 등을 통해 측정된(연속 측정법) 데이터들은 게이트웨이를 통해 수집되며, 이를 통해 참여자의 배출량을 실시간으로 측정 및 산출할 수 있다.

이렇게 수집된 프로젝트 참여자의 건축 생애 주기별 배출량은 크게 두 가지 목적으로 가공될 수 있다. 1) 특정 건축물 생애 주기별 온실가스 배출량 추적을 위한 정보의 가공 및 2) 특정 참여자(기업) 별 온실가스 배출량 추적을 위한 정보의 가공. 이렇게 가공된 배출량 정보는 각 프로젝트 내 배출량 산정 과정에 사용된 민감한 데이터가 그대로 공유되는 것을 방지할 수 있으며, 동시에 프로젝트 참여자들로부터 검증을 받을 수 있기에 그 신뢰성을 확보할 수 있기도 하다.

이렇게 private 블록체인 네트워크를 통해 수집된 데이터는 목적별로 집산되어 public 블록체인 네트워크로 전송, 공유된다. 이렇게 공유된 배출량은 기존 배출량 거래제 체계에서 제출된 배출량을 중앙기관 및 한정된 검증기관을 통해 검증받는 것과는 달리, 제안하는 매커니즘 하에서는 네트워크 사용자들 간에 그 무결성 및 적정성을 인정받게 된다. 이렇게 인증받은

배출량은 NFT 형태로 변환되어, 대체 불가능한 인증 정보로서 사용자의 배출량 인증에 사용할 수 있다.

또한, private 블록체인 네트워크 상에서는 NFT 알고리즘을 통해 생성된 토큰 기반의 거래 시스템으로 참여자 간에 배출권을 공유 및 거래할 수 있다. 이 거래 시스템은 기존 배출권거래제와 유사하게, 배출량을 배출권으로 상쇄하고, 남은 여분의 배출권을 다른 네트워크 참여자에게 토큰을 이용해 거래하는 것을 목표로 한다. 이때 거래의 시작은 사용자의 거래 요청과 수락 절차를 통해 이루어지며, 모든 거래는 smart contract를 통해 적정성을 검증받는다. 예를 들어, 사용자가 배출권 구매를 원할 경우, 여분의 배출권을 가진 상대방에게 거래 요청을 전송하게 된다. 이때 판별되는 거래 요청의 적정성은 1) 구매 요청자의 구매 배출권 수량 대비 토큰 보유량, 2) 거래 당사자 간 신원 확인, 3) 판매자가 보유한 배출권 수량과 요청된 배출권 보유 수량 간의 비교 등이 존재한다. 이러한 배출권 거래 과정과 사용 내역은 네트워크 참여자들 간의 합의 매커니즘을 통해 지속적으로 검증되고 감시되며, 이를 통해 거래의 투명성과 적정성을 확보하여 블록체인 기반의 배출권 거래 시스템이 신뢰할 수 있는 환경을 제공한다.

더불어, 배출권거래제의 자발적인 참여와 네트워크의 지속적인 운용을 유도하기 위해, 본 메커니즘은 네트워크 참여자에게 두 가지 보상(Incentive)을 제공한다. 첫 번째 보상은 참여자들이 생애 주기별 배출량 데이터를 공유할 때 제공된다. 배출량 데이터를 투명하고 추적 가능하게 공유함으로써, 부정행위를 방지하고, 기업별 배출량 감축 정보를 효과적으로 공유할 수 있으며, 후행 기업이 배출량을 감축함에 있어 선행지표로 활용할 수 있다. 이는 참여자들이 ESG(Environmental, Social, Governance) 경영에 기여하는 또 다른 방법으로 자리잡을 수 있다.

두 번째 보상은 참여자가 합의 메커니즘에 참여하는 경우에 제공된다. 모든 트랜잭션은 일정 비율 이상의 네트워크 참여자들의 합의 메커니즘을 통해 검증되며, 이 과정에서 참여자들은 컴퓨팅 자원의 제공을 통해 네트워크에 기여한다. 참여자들이 자발적으로 합의 메커니즘에 참여하도록 유도하기 위해서는 이에 걸맞은 보상이 필요하며, 참여자 수가 적을 경우 블록체인 네트워크의 성능과 투명성이 보장되지 않을 수 있다. 따라서 본 연구는 public 블록체인에서 합의 메커니즘에 참여하는 참여자들에게 일정량의 토큰 또는 배출권을 제공하는 형태로 보상을 제공한다.

4. 향후 개발 방향

본 연구에서는 중앙집권화된 거버넌스로부터 비롯한 배출량 정보의 불투명성 및 배출권거래제의 부정행위 가능성의 문제점을 극복하기 위해 상반된 성격의 블록체인을 기반으로 배출량 정보를 공유하고 배출권 거래 등의 서비스를 제공하는 방안을 제안하였다. 이를 통해 생애 주기별 온실가스 배출량 정보 및 탄소배출권을 투명하게 관리할 수 있으며, 이러한 데이터에 기반하여 배출권거래제를 효과적으로 제공할 수 있다.

그러나, 블록체인은 많은 컴퓨팅 파워, 즉 많은 전력 에너지를 소모하여 구동되는 합의 메커니즘으로 유지되며, 이는 온실가스 배출량의 감축이라는 배출권거래제의 취지와 상충하는 부분이 있다. 또한, 많은 컴퓨팅 파워의 제공은 네트워크 참여자에게도 참여를 꺼리는 이유가 될 수 있다. 따라서, 블록체인 기반 탄소배출권 거래 시스템 및 인센티브 메커니즘의 성공적이고 친환경적인 정착을 위해서는 최대한 적은 에너지로 신뢰할 수 있는 합의를 구성할 수 있어야 하며, 이에 따라 향후에는 Proof-of-Authority (PoA) 알고리즘을 기반으로 한 에너지 절감형 합의 메커니즘을 개발, 적용하고자 한다.

담당 편집위원 : 박성우(중앙대학교)

● 학회 특별회원사 동정 안내

Magazine of RCR(한국건설순환자원학회지)은 계간으로 발행되어 회원을 비롯한 관련 업계, 학계, 유관기관 및 단체 등에 배포되고 있습니다. 특별회원사의 최신 정보 및 기술현황 등의 홍보사항을 학회지에 무료로 게재하여 널리 홍보하고자 하니 관심 있는 특별회원사는 아래 사항을 참조하여 원고를 송부하여 주시기 바랍니다.

1. 특별회원사 홍보내용

특허, 신기술, 신제품, 수상실적, 세미나 및 시연회, 사회공헌 등

2. 원고 분량

A4 2~4매 내외이나 특별한 제한이 없음(그림 또는 사진 포함 가능)

3. 보내실 곳

한국건설순환자원학회 오경숙 국장(E-mail : rcr@rcr.or.kr, Tel. : 02-552-4728)