

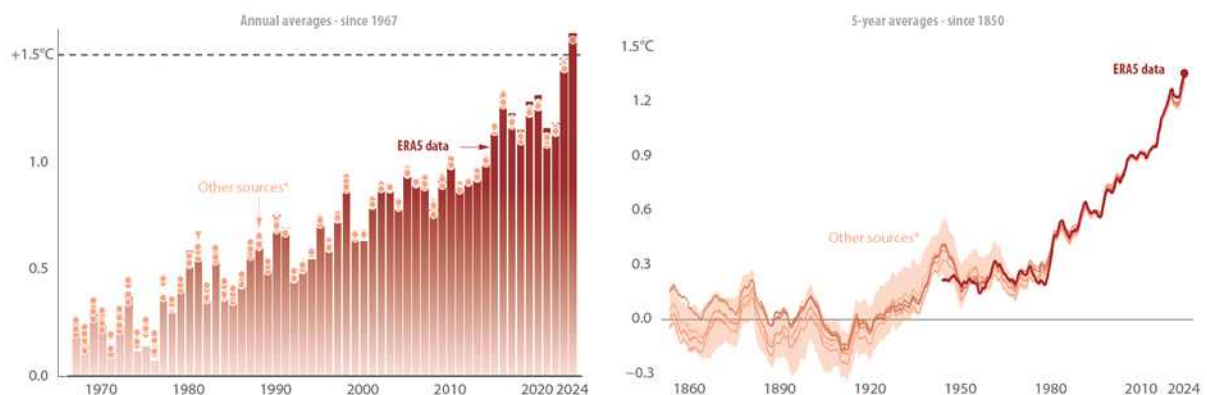
오픈소스 생태계의 기후변화 대응 표준 동향

권영환 소프트웨어정책연구소 산업정책연구실 책임연구원

1. 머리말

코페르니쿠스(Corpernicus)는 EU(유럽연합, European Union)가 지구환경 관리와 지속가능한 발전을 위해 시행 중인 지구관측 및 모니터링 프로그램의 중요 프로젝트다. 이는 전 세계 기상 정보를 수집해 기후변화 서비스(Climate Change Service)를 제공하고 있다.

코페르니쿠스 기후변화 서비스가 제공하는 [그림 1]과 같은 연도별 평균 온도를 보면, 2024년은 기록상 가장 더운 해로 평균 기온이 산업화 이전보다 1.6°C 높았다. 파리기후 협약의 지구 온도 상승폭 제한 권고인 1.5°C를 초과한 첫 해가 된 것이다. 특히, 5년치 평균 온도자료를 보면, 1980년대 이후 지구 온도 상승폭이 커지면서 지구 온난화가 가속되고 있음을 보여준다[1].



[그림 1] 코페르니쿠스의 지구 평균 기온 상승 정보[1]

전 세계 국가들은 파리기후협약이라 불리는 제21차 UN 기후변화 협정에서 기후변화 대응을 결의했다. 이들은 자발적인 온실가스 감축 목표를 수립하고, 2050년 탄소 배출량 0(넷제로) 달성을 목표로 각자 온실가스 감축에 동의한 것이다. 그럼에도 불구하고, 기후변화가 빨라지면서 해수면 상승, 잦은 기상이변(가뭄, 집중호우, 태풍, 폭한, 폭서)으로 인한 식량생산 감소, 재난복구 비용 증가, 에너지 공급 불안정 등 다양한 문제들이 현실화되고 있다.

한국은 2020년에 2050 탄소중립을 선언했고, 2021년에 탄소중립·녹색성장 기본법을 제정했으며, 2023년엔 탄소중립 녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획을 수립했다. 과학기술정보통신부는 2021년 '탄소중립 기술혁신 추진 전략'을 발표하며 탄소중립을 위한 10대 핵심기술을 개발하는 동시에 혁신 생태계 조성을 추진하기로 했다[2].

기후변화가 전 세계적으로 다양한 문제를 발생시키며 인류 생존을 위협하는 현재, 기후변화 대응 기술은 인류 생존을 위한 핵심으로 인식되고 있다. 이에 더해, 선진국들이 온실가스 배출 감소 목표 달성을 위해 탄소세 부과, 탄소배출권 거래제 도입을 적극 추진하면서, 여러 산업 분야에서 기후변화 대응 기술이 더욱 주목받고 있다. 탄소배출 측정 및 감소 기술은 여러 규제·인센티브와 직접적으로 관련됐기 때문에 객관적이고 신뢰할 수 있는 표준화가 중요한 분야다. 이번 원고에선 기후변화 대응을 위한 오픈소스 생태계의 표준화 동향을 소개하고자, LF 에너지(Energy) 재단과 그린소프트웨어(Green Software) 재단의 표준 프로젝트들을 소개한다.

2. 기후변화 대응을 위한 오픈소스 생태계의 표준화 동향

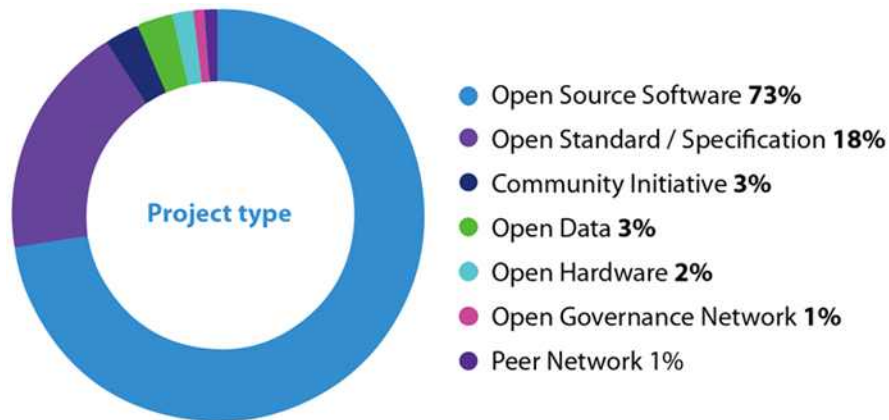
2.1 오픈소스 생태계와 표준화

오픈소스 생태계는 1980년대 리처드 스톨만(Richard Stallman)의 자유소프트웨어 운동(Free Software Movement)으로부터 태동됐다. 자유소프트웨어 운동은 SW(소프트웨어, Software) 상업화로 인한 폐쇄적인 SW 개발 및 SW 기술 파편화를 방지하고자, SW 소스코드를 공개해 4가지 자유를 부여 하자는 SW 분야 개방형 혁신 운동이다. 실행, 연구·수정, 재배포, 공개라는 4가지 자유는 SW 개발자들로 하여금 선행 개발자가 공개한 SW를 재사용하고, 이렇게 개발한 새 SW 역시 공개하도록 유도했다. 이를 통해, 기술혁신을 가속화하고 호환성을 향상시킬 수 있게 된 것이다. 대표적인 자유소프트웨어로는 리눅스(Linux), MySQL, 파이어폭스(Firefox) 등이 있다. 이러한 자유소프트웨어는 기술(소스코드) 공개와 재사용을 바탕으로 상호운영성 향상, 비용 절감, 기술혁신 가속화, 지속 가능성 향상 등을 꾀하기 위해, 표준화와 유사한 속성을 가지고 있다.

자유소프트웨어는 SW 사업화를 제한하진 않는다. 다만 수정 SW의 소스코드 공개의무를 가진 카피레프트 라이선스로 인해 SW 사업화의 핵심인 지적재산권(변형 소스코드)을 공개해야 하고, 이는 사업화에 어려움을 가져온다. 이에 1998년 오픈소스 개념이 널리 제안되면서, 기업의 오픈소스 개발을 확산시키기 위해 변형 소스코드 공개의무 조항이 없는 퍼미시브 라이선스가 적극 채택됐다. 그 결과, 구글(Google)을 포함한 많은 기업들이 오픈소스 개발에 적극 참여하면서 오픈소스 생태계의 외연이 크게 확장됐다.

퍼미시브 라이선스를 채택한 대표적 오픈소스로는 구글이 개발한 안드로이드(Android), 텐서플로우(TensorFlow), 쿠버네티스(Kubernetes), 페이스북(Facebook)이 개발한 리액트(React), 파이토치(PyTorch) 등이 있다. 이들 기업들의 움직임은 새로운 기술의 소스코드(핵심기술)를 공개하며 생태계 외연 확장과 신시장 창출을 적극 추진한다는 점에서, 기술 표준화와 유사한 속성을 가지고 있다.

오픈소스 생태계의 SW 기술은 소스코드를 공개한다는 점에서, 기술명세(Specification)를 공개하는 표준화와는 다소 다르다. 그래도, 상호운영성 확보, 비용절감, 기술혁신 가속화, 지속가능성 향상, 기술 생태계 확산, 신시장 창출 등의 효과를 얻는다는 점에서 표준화와 유사한 측면이 있다. 실제 최근 산업 영역의 오픈소스 프로젝트들은 단순히 SW만 오픈소스로 개발하는 것이 아니라 표준화를 같이 추진하며, 오픈소스 개발 효과를 극대화하고 있다. 2024년 리눅스 재단 연간 보고서에 의하면, [그림 2]와 같이 리눅스 재단 오픈소스 프로젝트의 18%는 개방형 표준/기술명세(Open Standard/Specification)로 분류될 정도로 오픈소스 개발과 표준화 간 관련성이 커지고 있다[3].

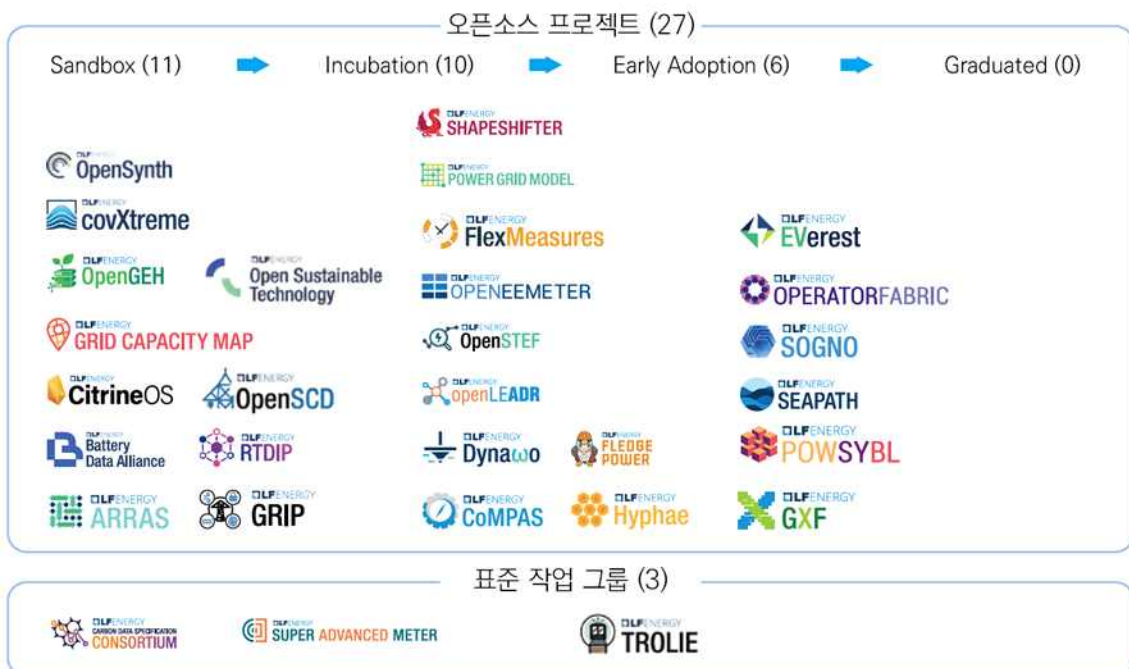


[그림 2] 리눅스 재단의 오픈소스 프로젝트 분류

2.2 에너지 혁신을 위한 LF 에너지 표준화 동향

한국의 전력 산업은 탄소배출량의 37%를 차지하고 있다. 때문에 탄소중립을 위해 에너지 생산(발전), 유통(전력망), 사용(소비 효율화)과 같은 밸류체인 모든 과정에서 혁신이 요구되는 상황이다 [4]. 이에 전력 산업분야 탄소배출 감소와 탈탄소화를 위해, 리눅스 재단 산하 LF 에너지 재단이 2018년 설립돼, 새로운 전력기술 생태계 구축을 위한 오픈소스 협업을 추진하고 있다.

LF 에너지 재단의 총 회원사 수는 67개다. 주요 회원사로는 RTE(Reseau de transport d'electricite), 로열더치 쉘(Royal Dutch Shell), GE(General Electric), 에네르기넷(Energinet), 하이드로 퀘벡(Hydro Quebec) 같은 에너지 기업, 구글, 마이크로소프트(MicroSoft), 아스펜(Aspen), 아비바(AVEVA) 같은 IT 기업, 프라운호퍼(Fraunhofer), 앨런튜링연구소(Alan Turing Institute), 스탠퍼드대, 아이오와주립대 같은 비영리 연구소·대학들이 있다. 현재 [그림 3]과 같이 오픈소스 프로젝트 27개, 표준작업그룹에 속한 표준 프로젝트 3개(Carbon Data Specification, Super Advanced Meter, Trolie)를 진행하고 있다[5][6]. 이번 원고에선 LF 에너지 재단의 표준 프로젝트들에 대해 소개한다.



[그림 3] LF 에너지 재단의 오픈소스 프로젝트와 표준 프로젝트

탄소 데이터 기술명세(Carbon Data Specification)는 에너지 생산 및 소비 과정의 탄소 배출량 측정·정량화·추적을 위해, 에너지 데이터에 대한 요구사항을 정의하는 표준 프로젝트다. 이 프로젝트가 개발하는 표준은 에너지 데이터의 신뢰성·활용도·확장성을 향상시키고, 데이터 호환성을 바탕으로 중앙집중형 플랫폼의 탄소배출 관련 데이터 집계를 가능토록 해, 탈탄소화 경로와 의사 결정을 지원한다. 현재 연결성 작업 그룹(Connectivity Working Group), 전력 시스템 데이터 작업 그룹(Power Systems Data Working Group), 고객 데이터 작업 그룹(Customer Data Working Group)이 표준화를 진행하고 있다[7].

연결성 작업 그룹은 유틸리티 및 중앙 엔티티의 검색·등록·연결·프로필 관리기능 제공을 위한 무료, 개방형 기술명세 표준화를 담당하고 있다. 현재 2개의 기술 명세(Server Metadata(CDSC-WG1-01)와 Client Registration(CDSC-WG1-02)) 표준화를 진행하고 있다. 향후 이 표준은 전력망의 유틸리티 관리를 위해 활용될 수 있다.

전력 시스템 데이터 작업 그룹은 전력 시스템의 체계적이고 정확한 탄소 배출량 보고를 위한, 원시 전력시스템 데이터에 대한 개방형 기술명세 표준화를 담당하고 있다. 현재 API 인터페이스(CDSC-WG2-03) 표준화를 진행하고 있다. 또한, 전력 생산방식 통합, 전력 구입 및 판매, 전력 시장 데이터, 배송 용량 및 제약, 발전량 등 데이터에 대한 표준화도 진행 중이다. 향후 이 기술명세는 특정 지역 및 전력 시장에서의 정확한 탄소 배출량 측정, 탄소 배출량을 고려한 전력소비 최적화, 최적 재생 에너지 장소 선정 등에 활용될 수 있다.

고객 데이터 작업 그룹은 탄소 배출량 계산과 탈탄소화 노력을 촉진하기 위해, 유틸리티 고객 데이터 접근성을 제공하는 무료, 개방형 기술명세 표준화를 담당하고 있다. 현재 Customer Data(CDSC-WG3-01) 표준화를 진행하고 있다. 향후 이 기술명세는 탄소 배출량 측정, 탈탄소 프로젝트, 분산 전력망 유연화 등에 활용될 수 있다.

초첨단 계량기(Super Advanced Meter)는 첨단 스마트 계량기 솔루션 제공을 위한 표준 프로젝트다. 이 프로젝트는 현재 EU(유럽연합, European Union) SGAM(Smart Grid Architecture Model)의 5가지 계층을 기반으로, 각 계층별 설계 원칙을 제시하고 있다. 제시된 계층별 설계 원칙은 다음과 같다.

- 비즈니스 계층: 비즈니스 모델을 제시
- 기능 계층: DSO(배전 시스템 운영자, Distribution System Operator)와 ESCO(에너지 서비스 기업, Energy Service Company)를 위한 기능을 제시. 구체적으로 그리드 및 에너지 기능, 유지 보수 기능, 보안 기능, 통신 기능 등
- 정보 계층: 펌웨어/운영체제, 프로토콜 등의 SW 기술들 제시
- 통신 계층: 통신을 위한 WAN(Wide Area Network)과 LAN(Local Area Network) 등의 통신 기술 제시
- 구성요소 계층 : 전기 기술 및 물리적 설계 기준 제시

초첨단 계량기를 위한 기술명세는 현재 연구 중이다. 또한, 구체적인 표준 정보는 아직 공개돼 있지 않은 상태다[8].

Trolie는 Transmission Rating and Operating Limits Information Exchange(송전 등급 및 운영 한계정보 교환)의 약어로서, 송전 설비를 위한 전력 용량(등급), 안정적인 송전망 운영을 위한 한계 조건 정보를 교환하기 위한 표준 프로젝트다. 이 프로젝트는 다른 2개의 프로젝트와 달리 FERC(미연방 에너지 규제 위원회, Federal Energy Regulatory Commission) Order 881이라는 규정에 따라 추진되고 있다. 송전망 효율화와 전력시스템 신뢰성 향상을 위해, 기존 송전망의 등급체계 문제를 해결하고, 송전망 정보의 투명성을 확보하는 것이 목표다.

이 프로젝트에선 미국 에너지 기업인 MISO(Midcontinent Independent System Operator), GE 베르노바(GE Vernova) 주도로 2024년 11월 TROLIE v1.0 표준이 제정됐다. 이 표준은 미국 송전 시스템 운영 관련 기업들의 송전 등급 및 한계조건 정보 교환을 자동화함으로써, 송전망 상호운영성 향상에 크게 기여할 것으로 예상된다[9].

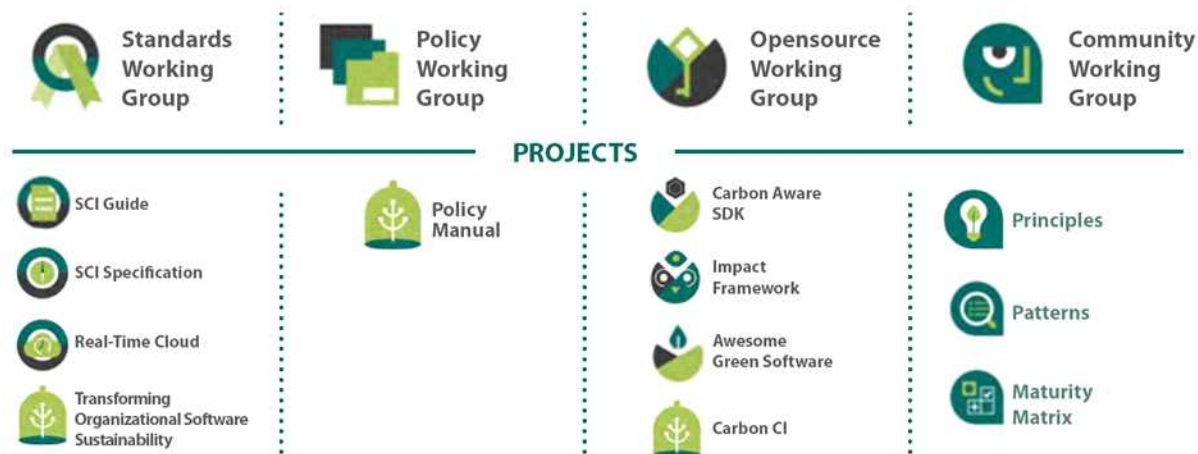
TROLIE 1.0은 모든 개발 언어를 위한 직렬화된 데이터 표현 표준인 YAML(YAML Ain't Markup Language) 형태의 개방형 API 사양 표준이다. 표준의 주요 구성으로서, 운영 부분은 실시간(Real-Time), 예측(Forecasting), 계절(Seasonal), 계절적 오버라이드(Seasonal Overrides), 임시 AAR 예외(Temporary AAR Exceptions), 모니터링 세트(Monitoring Sets)로 구분돼 각각의 상태, 메시지 포맷, 응답 코드 등이 정의된다. 또한, 공통 스키마로 한계 유형(Limit Type)에 대한 포맷이 정의돼 있다[10].

LF 에너지의 다양한 오픈소스 프로젝트들과 표준 프로젝트들은 에너지 산업의 탄소배출 측정 및 에너지 산업의 효율성 향상을 위한 호환성 있는 SW 기술을 개발하고 있다. 이에 더해, 에너지 산업의 상호운영성, 효율성, 확장성을 제공하기 위한 오픈소스 협업도 추진되고 있다. 특히, 오픈소스 개발과 표준의 연계를 통해, 개발되는 오픈소스 기술의 상호운영성을 향상시키고 LF 에너지 기술 생태계를 확산시킬 수 있다. 이는 전 세계 에너지 산업의 탄소중립 달성에 기여할 것으로 예상된다.

2.3 SW 탄소배출 절감을 위한 그린소프트웨어 재단의 표준화 동향

ICT 분야 탄소배출 비중은 2007년까지만 해도 전체 탄소 배출량의 1.5%에 불과했다. 그러나, ICT 산업발전으로 인한 에너지 소비 증가로 2040년엔 14%까지 증가할 것으로 예상된다. ICT가 미래 주요 탄소배출 산업으로 부상하고 있는 것이다[11]. 이에 기후변화 대응과 SW 산업의 탄소 배출량 감소를 위해 리눅스 재단 산하의 그린소프트웨어 재단이 2021년 설립됐다. 그린소프트웨어 재단은 친환경 SW 개발 및 구축을 위한 표준, 도구, 모범 사례 발굴을 위한 오픈소스 협업을 추진하고 있다.

그린소프트웨어 재단의 총 회원사수는 68개다. 이중 최고 등급 회원인 조정 회원사는 총 10개로 액센츄어(Accenture), 깃허브(GitHub), 구글, 마이크로소프트, 아바나드(Avanade), 보스턴컨설팅 그룹(Boston Consulting Group), 인텔(Intel), NTT데이터(NTT Data), 지멘스(Siemens), UBS가 있다. 일반 회원으로는 아비바, 골드만삭스(Goldman Sachs), 구글, HSBC(Hongkong and Shanghai Banking Corporation), IBM(International Business Machines) 등 58개 회원사가 있다. 그린소프트웨어 재단은 [그림 4]와 같이 표준화 작업 그룹(Standards Working Group), 정책 작업 그룹(Policy Working Group), 오픈소스 작업 그룹(Open Source Working Group), 커뮤니티 작업 그룹(Community Working Group)으로 구분돼 친환경 SW 관련 표준과 오픈소스를 개발하고 있다[12][13].



[그림 4] 그린소프트웨어 재단의 작업 그룹과 주요 프로젝트

표준화 작업 그룹에서 개발하는 친환경 SW 표준으로는 SCI(소프트웨어 탄소 강도, Software Carbon Intensity) 표준, SCI 가이드(Guide), 실시간 클라우드(Real Time Cloud), 지속가능한 SW를 위한 조직 전환(Transforming Organisations for Sustainable Software) 등이 있다[14].

SCI 표준은 SW 애플리케이션의 탄소 강도를 측정하는 방법에 대한 표준으로서, 총 탄소 배출량을 계산하는 방법과 실제 물리적인 탄소 배출량의 감소 비율을 결정하기 위한 기준을 정의하고 있으며, 2024년 4월 v1.1이 공개됐다. 이 표준은 대규모 분산 클라우드 시스템부터 소규모 오픈소스 라이브러리, 온프레미스응용프로그램 또는 서버리스 기능에 이르기까지 다양한 SW 구현 환경에서의 SCI 점수를 계산할 수 있는 포괄적인 방안을 제시한다. SCI 점수 도출을 위해 필요한 구성요소로는 SW가 소비하는 에너지, 지역별 탄소 강도, 하드웨어의 탄소 배출량, 운영 과정의 배출량, SW 기능 단위가 있다.

이 표준의 계산식에 의한 SCI 점수는 절대적인 수치(탄소 배출량)가 아닐 수 있다는 한계가 있다. 그 이유는 SW 동작 환경(개인용 PC, 데이터센터, 초거대 클라우드 등의 하드웨어)에 따라 실제 탄소 배출량이 달라질 수 있기 때문이다. 하지만 이 표준은 절대적 탄소 배출량을 측정하는 방식으로는 명확한 한계점이 있음에도, 친환경 SW 설계·개발·배포·운영 방식을 고려할 때 필요한 탄소 배출 정보와 탄소배출 감소를 위한 기준을 제시할 수 있는 첫 표준이라는 점에서 실질적인 의미가 있다. 이러한 한계점을 극복하고자 최근 표준 작업그룹은 소프트웨어 표준 작업 그룹과 하드웨어 표준 작업 그룹으로 분리되고 있으며, 하드웨어 표준 작업그룹의 방향성을 정립하고 있다. SCI 가이드 표준은 추상적 SCI 계산 방식의 구성요소인 에너지, 탄소강도, 구체적인 배출량, 기능 단위값을 실질적으로 계산하기 위한, 다양한 방법론에 대한 접근 방식을 설명하는 표준이다. 아직 구체적 표준 내용이 공개돼 있지 않지만, 향후 SCI 계산에 필요한 실질적인 참조 데이터(SCI 구성요소별 참조값)를 제공함으로써 SCI 표준의 활용성을 향상시키기 위한 내용이 포함될 것으로 전망된다.

실시간 클라우드 표준은 SW 분야에서 가장 많은 탄소를 배출하는 클라우드 워크로드(Workload)에 대한 탄소배출모델의 정확성을 향상하기 위한 표준으로, 2023년 7월 제안된 프로젝트다. 현재 영국, 유럽, 캘리포니아 등 일부 지역에서 클라우드 서비스 기업들이 워크로드별 집계된 실시간 탄소지표정보를 서비스 사용자에게 제공하고 있지만, 서로 다른 기준과 방식으로 계산하고 있어

혼선이 있는 상황이다. 따라서 이 표준은 클라우드 서비스 기업이 더 많은 정보를 제공하기 위한 표준 방식과 데이터 스키마를 정의하고, 클라우드 워크로드의 탄소배출모델을 정교하게 다듬어, 표준화된 클라우드 서비스의 실시간 탄소 강도 정보를 제공하고자 한다. 이 표준 개발에 아마존 웹 서비스(AWS), 애저(Azure), GCP(Google Cloud Platform)등이 참여하고 있으며, 향후 모든 클라우드 기업들이 동일한 기준의 데이터를 사용하는 것이 목표다.

지속가능한 SW를 위한 조직 전환 표준은 기업 같은 조직에서 SW 탄소배출 최소화가 가능한 지속가능한 SW를 채택하고, 이를 활용하기 위한 절차와 체계를 마련하기 위한 접근 방식을 정의하는 표준이다. 이 표준은 친환경 SW를 위한 조직 전략, 의사결정 방식, 비용-편익 분석 방법, 친환경 SW 개발 및 활용 방식, 성숙도 매트릭스 기반 조직 진단 등 포괄적인 프레임워크에 대한 정보를 제공할 예정이다. 이 표준에 포함되는 프레임워크는 성숙도 매트릭스를 프레임워크 입력값으로 사용하며, 조직 현재역량 진단, 중간 단계와 목표 설정, 지속가능한 IT 관행 개선을 위한 로드맵 개발에 활용될 수 있다. 현재 프레임워크를 위한 도구, 계산 방법론, 절차 등이 개발되고 있다. 그린소프트웨어 재단의 여러 그룹들은 SW 산업 내 탄소중립에 대한 인식 제고, 탄소 배출량 측정 기술 및 도구 개발, 모범 사례 발굴 등을 위한 여러 프로젝트들을 추진하고 있다. 특히 표준화 그룹은 전 세계 공통으로 적용할 수 있는 친환경 SW 기준 기술명세(baseline specification)와 컴퓨팅 플랫폼의 탄소중립 상호호환성을 제공하기 위한 표준을 개발하고, 이를 바탕으로 그린소프트웨어 생태계를 확산함으로써 2050 넷제로 달성에 기여하고 있다.

3. 맺음말

지금껏 기후 온난화와 북극 해빙 및 남극 빙하 감소는 큰 주목을 받지 못했다. 그러나, 작년 가을 폭염, 스콜성 장마 등 같은 이상기후가 급증하며 많은 사람들이 기후변화에 대한 관심을 보이고 있다. 특히 UN(국제연합, United Nations) 산하 IPCC(기후변화에 관한 정부간 협의체, Intergovernmental Panel on Climate Change)가 주도하는 기후협약에 의해 유럽, 미국 선진국들을 중심으로 본격적인 기후변화 대응 기술 개발과 각종 규제·인센티브가 추진되고 있다. 그리고, 선진국들은 기후변화 대응이라는 긍정적 이유를 들어 그 자체를 무역장벽 수단으로 활용하고자 하는 움직임을 보이고 있다. 실제 기업 제품에 재생에너지 비율, 탄소배출 총량관리 등을 명분으로 탄소세 부과 및 보조금 지급을 결정하고 있다.

따라서, 각 산업 분야 객관적인 탄소 배출량 측정 및 에너지 효율화의 중요성은 갈수록 커져가고 있다. 더욱이, 작년 평균 기온이 파리기후협약 권고선인 1.5°C를 초과하면서 탄소배출 규제 압박이 커져가고 있기 때문에, 기후변화 대응 기술은 더욱 중요해지고 있다. 이에 리눅스 재단에선 LF 에너지 재단을 중심으로 에너지 분야 탄소배출량 측정 및 에너지 생태계 효율화를 위한 신기술들을 개발하고 있으며, 관련 표준화 작업을 같이 추진하며 기술 생태계 확산을 가속화하고 있다. 이미 미국과 유럽에선 LF 에너지 재단의 일부 기술을 활용하고 있다.

글로벌 주요 클라우드 기업들이 참여하는 그린소프트웨어 재단에선 SW 분야 탄소 배출량 측정 및 관련 생태계 확산을 위한 오픈소스 협업이 활성화되고 있다. 특히 표준 작업 그룹은 친환경 SW 기술의 호환성 제공과 기업의 친환경 SW 문화 확산을 위한 표준화를 통해, 친환경 SW 생태계 확산에 기여하고 있다.

한국도 기후변화 대응 기술에 많은 관심을 가지고 있으며, 산·학·연 협력을 통해 원천기술 확보 및 기술 상용화를 체계적으로 추진하고 있다. 더욱이, 수출 주도 산업 구조를 가지고 있는 한국은 객관적인 탄소 배출량 측정이 매우 중요하기 때문에, 글로벌 표준과 연계된 탄소 배출량 측정 기술을 확보해야 한다. 따라서, 오픈소스 생태계의 표준 기반 탄소 배출량 측정기술에 많은 관심이 필요하다. 그 이유는 해당 기술이 글로벌 주요 기업의 참여로 사실상 표준이 될 가능성이 크고, 또한 글로벌 주요 기업과의 기술 호환성을 통해 향후 해외시장 진출 가능성이 높기 때문이다.

[주요 용어 풀이]

- 탄소 회계(Carbon Accounting): 조직, 프로젝트, 제품 또는 활동에서 배출되는 온실가스 양을 측정, 보고, 관리하기 위한 체계적 프로세스
- 탄소 강도(Carbon Intensity): 특정 활동, 프로세스, 제품 또는 서비스에서 발생하는 이산화탄소(CO₂)와 기타 온실가스(GHG)의 양을 측정하는 값으로 온실가스 배출의 효율성을 표현하는 지표

[참고문헌]

- [1] 한겨레, "기후재앙 '1.5도 마지노선' 첫 붕괴...작년 지구 가장 뜨거웠다.", 2025.01.11.
- [2] 탄소중립 정책포털, <https://www.gihoo.or.kr/netzero>, 2025.01.20. 방문.
- [3] 리눅스 재단, "Annual Report 2024: Accelerating Industry Innovation", 2024.12.
- [4] 김숙철, "탄소중립 시대, 전력산업 미래와 한전의 기술개발 전략", 한국산업기술진흥협회, 기술과 혁신 vol.451, 2022.01.
- [5] LF Energy, <https://lfenergy.org/>, 2025.01.20. 방문.
- [6] LF Energy, "2023 Annual Report", 2024.03.
- [7] LF Energy Carbon Data Specification Consortium, <https://github.com/carbon-data-specification>, 2025.01.20. 방문.
- [8] Super Advanced Meter(SAM), <https://github.com/super-advanced-meter>, 2025.01.20. 방문.
- [9] LF Energy TROLIE, <https://trolie.energy/>, 2025.01.20. 방문.
- [10] Transmission Ratings and Operating Limits Information Exchange (TROLIE) (1.0.1), <https://trolie.energy/spec-1.0>, 2025.01.25. 방문.
- [11] Salesforce, "Technologists Want to Develop Software Sustainably, But Nearly Half Don't Know How", 2023.05.04.
- [12] Green Software Foundation, <https://greensoftware.foundation/>, 2025.01.21. 방문..
- [13] Green Software Foundation, "Welcome to Green Software Foundation", 2024.05.
- [14] GitHub, "Green Software Foundation", 2024. 8. 8.

※ 출처: TTA 저널 제217호