

A Review on International Carbon Credit Certification Methodologies for Biochar as a Soil Amendment

Kyung-Hwa Han¹, Seok-In Yun^{2*}, Jin-Hyeob Kwak³, and Sun-Il Lee⁴

¹Research Professor, Institute of Life Science and Natural Resources, Wonkwang University, Iksan 54538, Korea

²Associate Professor, Department of Life and Environmental Sciences and Institute of Life Science and Natural Resources, Wonkwang University, Iksan 54538, Korea

³Associate Professor, Department of Rural Construction Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

⁴Researcher, Climate Change Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea

*Corresponding author: siyun@wku.ac.kr

ABSTRACT

Received: September 26, 2023

Revised: October 23, 2023

Accepted: October 23, 2023

Edited by

Woo-Jung Choi,
Chonnam National University,
Korea

Won-Pyo Park,
Jeju National University, Korea

ORCID

Kyung-Hwa Han
<https://orcid.org/0000-0003-2840-0893>

Seok-In Yun
<https://orcid.org/0000-0002-0456-9216>

Jin-Hyeob Kwak
<https://orcid.org/0000-0001-7392-0287>

Sun-Il Lee
<https://orcid.org/0000-0002-0519-3150>

The high organic carbon (C_{org}) sequestration ability of biochar can greatly contribute to atmospheric CO_2 removal for global C neutrality. These climate-positive services of biochar are traded as C credits on international C trading platforms through reliable methodologies. Here, we reviewed the international biochar C credit certification methodologies and quality standards to build foundations for biochar C credit trading in Korea. The quality of biochar includes the quantity of C_{org} sequestered over 100 years, the content of toxic contaminants below their threshold values, and the biochar properties related to soil fertility, as described by European Biochar Certificate (EBC) and International Biochar Initiative (IBI) certification guidelines. The higher amount of C_{org} sequestered over 100-year in biochar is ascribed to the lower the molar H/C_{org} and O/C_{org} ratios, resulting from pyrolysis of feedstock at a high temperature over $350^\circ C$. For assuring the permanence of biochar, the threshold value of molar H/C_{org} ratio is 0.7 in both EBC and IBI. Besides, EBC standards also have the threshold value 0.4 of a molar O/C_{org} ratio for all biomass and require a pyrolysis condition of exceeding $500^\circ C$ for 3 min at minimum for animal-derived biomass. Quality-certified biochar can be used for C credits. Biochar C credit is the amount of net CO_2 -eq removed over 100-year by the biochar activity, i.e., biochar C_{org} sequestered over 100-year minus greenhouse gas (GHG) emissions over the biochar life cycle. The three voluntary C credit trade platforms with their own biochar methodologies are Puro.earth with life cycle assessment, Carbonfuture with C-sink certification, and Verra with UNFCCC Clean development mechanism (CDM) methodology. All three methodologies present standards for permissible biomass for feedstock, energy efficiency and by-product treatment for production, permissible matrices and tracking system for end use, and the third-party verification. On a regional basis in Korea, where biochar feedstock is mainly biogenic waste, GHG emissions during biochar lifetime mainly depend on the production stage. In pyrolysis facilities that meet EBC and Verra's high-tech standards, GHG emissions during the production stage could be assumed to be very low. However, low-tech facilities with high GHG emissions during biochar production could deteriorate biochar C credits. Therefore, securing biochar C credits could be achieved through the modernization of pyrolysis facilities. Besides, it is essential to establish a process-oriented measurement, reporting, and verification systems, to ensure scientific reliability of biochar C credit certification.

Keywords: biochar quality, life cycle assessment, organic C sequestration, permissible biomass, pyrolysis condition



Calculation methods for biochar carbon (C) credits called CORC, C-sink, and VCU used in voluntary C credit trade platforms, Puro.earth, Carbonfuture, and Verra, respectively.

C credit trade platform	C credit calculation methods (tCO ₂ eq)	Comments
Puro.earth	• $CORC = E_{\text{stored}} - E_{\text{biomass}} - E_{\text{production}} - E_{\text{use}}$ • $E_{\text{stored}} = Q_{\text{biochar}} \times C_{\text{org}} \times F_p^{\text{TH}, T_s} \times 44/12$ • Q_{biochar} is the amount of biochar produced over the reporting period; C_{org} is the organic C content of the biochar produced; $F_p^{\text{TH}, T_s} = c + m \times H/C_{\text{org}}$ is the permanence factor of biochar organic C over a given time horizon TH in a given soil at temperature T_s, where the coefficients c and m are a function of TH and T_s	• E_{stored}: CO₂ sequestered over 100 years • E_{biomass}, $E_{\text{production}}$, E_{use}: Life cycle GHG during each stage
Carbonfuture	• C-sink is determined by integrating C-sink potential, greenhouse gas emissions (GHG) during C-sink tracking after leaving factory gate, and C remaining % after 100 y in applied matrix • C-sink potential = C_{org} content of biochar - GHG during biomass sourcing - GHG during production - Safety margin • Safety margin = 10% of the total GHG emission of biomass sourcing and production	• EBC C-sink standard requires that the biochar may only be used in specific ways
Overall equation	• $VCU = ER_{\text{PS}, y} - PE_{\text{AS}, y} - LE_y$, in year y • $ER_{\text{PS}, y}$ = GHG emission removals at production; $PE_{\text{AS}, y}$ = GHG emissions at application; LE_y = Total leakage emissions, primarily attributed to transport emissions • $ER_{\text{PS}, y} = \sum((\sum CC_{t,k,y} \times 44/12) - (\sum PE_{\text{PS},t,p,y}))$ • $CC_{t,k,y}$ = Organic carbon content, sequestered over 100 years, on a dry weight basis for biochar type t used for application type k; $PE_{\text{PS},t,p,y}$ = Project GHG for production of biochar type t at production facility p may arise from pretreatment like drying wet waste, thermodynamic conversion, or use of external energy	• GHG reduction at the sourcing stage is zero following a conservative scenario • GHG by transport must be accounted for only if the distance is more than 200 km in round trip
Verra	• High tech. production: Thermodynamic conversion emissions are zero and renewable energy use reduces GHG • Low tech. production: Thermodynamic conversion includes CH₄ emissions, which can be obtained using estimation equation • GHG for the pretreatment and use of external energy can be obtained using CDM Tool 05 (UNFCCC, 2008a) and CDM Tool 03 (UNFCCC, 2008b)	

Introduction

지구온난화로 인한 해수면상승, 남극빙하 붕괴, 생물다양성 저하, 온열질환 및 전염병 증가 등 당면한 기후위기에 대응하는 기후행동은 온실가스 배출량 감소, 기후적응, CO₂ 제거의 세 기둥으로 구성된다 (IPCC, 2023). 특히 IPCC (2023)는 생태계와 인류의 안전을 위한 마지노선인 산업화이전보다 1.5°C 상승이라는 지구표면온도 억제를 위한 탄소중립을 달성하기 위해서는 온실가스 배출량 감소 뿐만 아니라 대기 CO₂ 제거가 필수불가결하다고 언급했다.

CO₂ 제거는 조림 등 자연적 해법과 직접 공기 포집 등 기술적 해법으로 나뉘는데, 바이오차는 자연적 해법으로 분류된다 (Erbach and Victoria, 2021). 바이오차가 대기 이산화탄소를 제거하는 원리는 탄소순환에서 미생물의 바이오매스 분해속도를 매우 느리게 하는 데 있다 (Lehmann et al., 2006). Lehmann (2007)은 바이오매스 열분해를 통해 생

산된 바이오차에 바이오매스 탄소함량의 약 40%가 저장되며 약 20%는 토양생태계에서 100년 이상 보존되는 탄소를 평가될 수 있다고 보고하였다. 이런 원리로 바이오차는 자연적 해법으로 분류되지만, 바이오차 생산을 위한 저탄소 열분해 설비에는 에너지 효율적인 방식으로 환경에 해를 끼치지 않는 진보된 기술이 결합되어 있다 (EBC, 2023a). 또 한 다른 자연적 해법인 조림 등의 탄소저장기간이 수십 년에서 수백 년임에 반해 바이오차는 수백 년에서 수천 년으로 길다는 장점이 있다 (IPCC, 2022). 뿐만 아니라 Roe et al. (2021)은 다양한 CO₂ 제거 기술 중 바이오차의 탄소가격이 CO₂ 톤당 가격을 최대 USD 100로 가정할 때 2020년에서 2050년 사이 아시아 태평양 지역에서 가장 경제적인 기술이라고 제시했다. 이러한 경제적 이점이 있을 뿐만 아니라 바이오차 토양사용은 토양 양이온흡착용량과 보수력 등 토양의 물리화학적 향상, 토양 N₂O와 CH₄ 배출 감소 등의 추가적 이점이 있다고 보고되고 있다 (Omondi et al., 2016; Kim et al., 2017; Lee et al., 2021; Li and Tasnady, 2023). 바이오차의 CO₂ 제거량 산정에 대한 기본적 방법론을 IPCC (2019)가 바이오차 생산공정인 열분해 (pyrolysis)와 가스화 (gasification)에 대해 온도별 원료별 100년 이상 격리 유기탄소량을 구할 수 있는 인자로 제공함에 따라 국제적인 바이오차 탄소배출권 (carbon credit) 시장이 열리게 되었다.

바이오차는 원료, 생산조건, 생산 후 관리 등에 따라 CO₂ 제거량과 환경에 미치는 영향의 스펙트럼이 넓기 때문에 바이오차의 탄소배출권은 환경에 부정적 영향을 주지 않는다는 것을 전제로 한다 (Nabuurs et al., 2022). 그 중 가장 주의가 필요한 것은 중금속, 다환방향족탄화수소 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAH) 등의 유해물질 관리이다 (Hilber et al., 2017a). 이들 유해물질은 바이오차 원료 특성과 생산 조건에 따라 다양한 수준으로 존재할 수 있어 안전 사용을 위한 품질기준이 필수적이다 (Dutta et al., 2017; Hilber et al., 2017a; Xiang et al., 2021). 국제적으로 바이오차 품질 인증에는 유럽바이오차인증 (European biochar certificate, EBC)과 국제바이오차이니셔티브 (international biochar initiative, IBI) 인증이 있으며, 미국과 캐나다 등에서도 바이오차 품질 기준을 설정하고 이에 따라 인증을 하고 있다 (Draper, 2019). 각 품질 기준은 유사점도 있지만 차이점도 존재한다. 우리나라 바이오차의 국제적 품질 인증을 위해서는 그 내용을 자세히 파악할 필요가 있다. 특히 바이오차 EBC 인증은 유럽의 자발적 산업표준으로 품질 규정뿐만 아니라 원료별 바이오차 생산 시 제한사항과 생산시설 규정을 포함하고 있다. 이는 탄소배출권, 즉 CO₂ 제거량 인증과 연결된다 (EBC, 2023a).

바이오차의 탄소배출권 가치는 단순히 CO₂ 제거량으로 결정되는 것이 아니고 다양한 기준을 충족시켜야 한다. EU 탄소 제거 인증 프레임워크 (carbon removal certification framework, CRCF)는 탄소중립을 위한 CO₂ 제거 인증에서 꼭 갖추어야 할 4가지 기준으로, ‘정량 가능하며 정량된 것 (be quantifiable and quantified)’, ‘기후적 이점에 있어서 추가성 (additional to existing climate benefits)’, ‘장기간 탄소저장 (strive for long-term storage)’, ‘지속가능성에 기여 (contribute to sustainability)’를 제시했다 (Göss, 2023). 예를 들면, 고품질의 바이오차 제품이 토양비옥도 증진에 효과적이라 해도 열대우림을 벌채하여 만든 것이라면 이는 지속 가능하다고 볼 수 없어 탄소배출권으로의 가치를 갖지 못한다 (EBC, 2023a). 바이오차 품질과 탄소인증의 위 4가지 기준을 만족하더라도 원료운송거리, 원료가 되는 바이오매스의 가용성, 그리고 생산기술 및 에너지 수요 등에 따라 바이오차 탄소배출권의 가치는 달라진다 (Lehmann and Joseph, 2015). 따라서, 바이오차의 원료공급, 생산, 사용 등에 대한 전과정평가 (life cycle assessment, LCA)가 필요하다. 전과정평가는 사업활동의 전체 과정 동안 환경영향을 평가하는 기법으로 국제표준화기구 ISO에서 ISO 14040 및 14044 등 LCA 표준을 제시하고 있다. Bergman et al. (2016)은 ISO 표준에 따라 식물성 원료 바이오차의 LCA 평가를 실시하는 방법을 제시한 바 있다. Carvalho et al. (2022)은 바이오차 생산에 대해 실시된 다양한 LCA를

검토한 결과 생산시설과 원료에 따라 CO₂ 제거량이 음의 값에서 바이오차 톤당 2 t CO₂-eq까지 분포하는 것을 파악하였다. 우리나라에서도 Kim and Kim (2014)이 폐목재를 활용한 바이오차에 대한 LCA를 실시하여 CO₂ 제거량이 폐목재 1톤당 242 kg CO₂-eq로 보고하였다.

바이오차 탄소배출권을 거래하는 자발적 탄소시장 플랫폼은 퓨로어스 (Puro.earth), 카본퓨처 (Carbonfuture), 베라 (Verra)가 대표적이다. 각 플랫폼은 바이오차 탄소배출권 인증방법론을 가지고 있다. 2023년 3월 IPCC 58차 총회에서 단기 기후행동의 시급성을 강조한 IPCC 6차 보고서가 승인됨에 따라 CO₂ 제거에 세계 각국이 사회경제적 힘을 실을 것으로 전망된다 (IPCC, 2023). 이에 부응하여 바이오차 탄소배출권 방법론은 탄소제거량 보증의 신뢰도를 높이기 위해 새롭게 갱신되고 있다 (EBC, 2023a; Puro.earth and Nasdaq, 2023; Verra, 2023).

우리나라는 국토의 70% 이상을 차지하는 산지에서 산림부산물, 농경지에서 작물잔사 또는 왕겨 등 농업부산물, 축산업에서 가축분 등 축산부산물 등 바이오매스 자원이 풍부하다 (Shin and Hwang, 1998). 또한 우리나라 토양은 점토 함량이 평균 16%로 높지 않고 주로 산악지형으로 척박하여 (NIAST, 1992), 바이오차의 농업적 활용을 통해 보수력, 흡착용량, 유기탄소 함량 증진 등 토양물리성과 비옥도 개선효과를 기대할 수 있다 (Woo, 2013; Han et al., 2014; Jang et al., 2018). 국가적으로는 2030 NDC (국가 온실가스 감축목표, Nationally determined contribution) 달성과 2050 탄소중립을 위해 바이오차를 이용한 CO₂ 제거에 지속적으로 노력할 필요가 있다. 하지만 우리나라는 국가 차원에서 바이오차 품질기준과 탄소배출권 관련 제도가 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 우리나라의 바이오차 품질 기준과 탄소배출권 인증방법론 설정을 위해 현재 국제적으로 활용되고 있는 바이오차 품질 기준과 탄소배출권 인증방법론을 검토하였다.

Materials and Methods

바이오차의 품질 인증 탄소배출권으로 쓰이는 바이오차의 품질을 인증하는 주 목적은 바이오차의 안전 사용과 탄소격리능력이다. 그런데 국제적인 바이오차 인증기관인 IBI와 EBC간에 품질인증의 범위에 차이가 있다. 유럽산업 표준인 EBC (2023a)는 CO₂ 제거 해법으로 바이오차가 가져야 할 특성을 품질인증에 포함한다. 반면 IBI (2015)는 포장된 바이오차 제품의 특성에 초점을 맞추어 인증한다. 이러한 인증목적의 차이는 각 기관의 바이오차 정의에도 반영되어 있다 (Table 1). IBI는 2012년에 바이오차 인증지침을 제정하였고, 2015년에 공급원료 관리를 포함하는 것으로 갱신하였다. IBI 바이오차 인증 프로그램 및 품질기준의 최신버전인 버전 2.1을 분석대상으로 하였다 (IBI, 2015). EBC는 2012년에 제정하여 2023년까지 인증 지침을 갱신하여 왔으며 본 논문에서는 가장 최신인 버전 10.3E를 분석 대상으로 하였다 (EBC, 2023a). EBC의 경우, 사료, 유기농업, 농업, 도시환경, 건축자재 등의 용도에 따라 7가지의 바이오차 인증 등급을 제시하고 있다. 이 중에서 토양 시용 용도가 포함된 인증 등급인 유기농업 (EBC-AgroOrganic), 농업 (EBC-Agro), 도시환경 (EBC-Urban)에 한하여 분석하였다. IBI와 EBC 외에도 미국과 캐나다 등에서 이루어지는 바이오차 품질 인증을 조사하고 분석하였다.

Table 1. The differences of biochar certifications between the European biochar certificate (EBC, 2023a) and the international biochar initiative (IBI, 2015) guidelines.

Subjects		IBI	EBC
Biochar definition	A solid material obtained from the thermochemical conversion of biomass in an oxygen limited environment		• Biochar is a porous, carbonaceous material that is produced by pyrolysis of biomass and is applied in such a way that the contained carbon remains stored as a long-term C sink or replaces fossil carbon in industrial manufacturing • It is not made to be burnt for energy generation
Certification target	Biochar product		• Biochar product + Feedstock + Production process
Certification classes for soil application biochar	Biochar that is used in soil (one class)		• EBC-Agro for agriculture • EBC-AgroOrganic for organic agriculture • EBC-Urban for tree planting, park maintenance, sidewalk embellishments, ornamental plants and rainwater drainage and filtration (three classes)
Biomass feedstock	Submission of feedstock chain of custody: i) Feedstock type and description, ii) Feedstock conversion rate, and iii) Feedstock harvest location		• The feedstock application classes and application restrictions specified in the 'Positive List of Acceptable Biomass for Biochar Production' must be adhered to
Biochar production batch	Not subject to certification		• Each production batch has to be registered on the EBC website • Managed the traceability of the biomass feedstock, the production and biochar quality using the ID and QR code
Biochar sampling	Not subject to certification		• Taking representative biochar sample following the CSI approved sampling plan and sending it to the accredited laboratory
Analysis of biochar properties	Test Categories A (basic utility properties) and B (toxicant assessment) are required, but Test Category C is optional for all biochars		• Elemental analysis, physical parameters, TGA (thermogravimetric analysis), nutrients, heavy metals, and organic contaminants are required for all biochars
Pyrolysis	Not subject to certification		• No-use of fossil fuels except the preheating of the pyrolysis reaction, recovered or burned pyrolysis gas, compliance with national emission limit values, and carbon efficiency of at least 70%
Work safety and health	Not subject to certification		• Compliance with fire and dust protection regulations, and providing all workers with notice of all possible hazards and appropriate protective equipment

바이오차의 탄소배출권 인증방법론 국제적인 자발적 탄소 시장 플랫폼 중 자체의 바이오차 탄소배출권 인증 방법론을 가진 플랫폼은 퓨로어스, 카본퓨처, 베라이다 (Table 2). 퓨로어스는 2020년 가장 먼저 바이오차 탄소배출권 거래를 시작하고 나스닥 (Nasdaq)과 전략적 파트너십을 구축한 플랫폼이다 (Nasdaq, 2021). 퓨로어스가 2022년 등재한 버전 2의 퓨로 바이오차 표준 방법론 (Puro standard biochar methodology)를 분석대상으로 하였다 (Puro.earth, 2022). 카본퓨처는 EBC 탄소싱크 (C-sink) (EBC, 2021)와 세계은행 분류상 고소득국가가 아닌 국가에 대한 글로벌 아티전 탄소싱크 (Global Artisan C-sink) (Ithaka Institute, 2022)로 나누어 바이오차 탄소배출권을 거래하고 있다. 우리나라는 고소득국가로 분류되어 글로벌 아티전 탄소싱크에는 해당되지 않는다. 따라서 EBC 탄소싱크 (C-sink)

지침 중 최신버전인 2.1E (EBC, 2021)를 분석 대상으로 하였다. 베라는 2007년에 설립되어 조림 등에 대한 검증된 탄소 표준 (verified carbon standard, VCS) 프로그램을 자발적 탄소시장에 제공해 오고 있다. 베라의 바이오차 VCS 방법론 중 최신버전인 2023년 버전 1.1 (Verra, 2023)을 분석대상으로 하였다.

Table 2. Brief descriptions of biochar carbon (C) credit methodologies used in C credit trade platforms, Puro.earth, Carbonfuture, and Verra.

C credit trade platform	Methodology	Main methods in determining biochar C credit, meaning net C sequestration over 100 years by biochar	Comments
Puro.earth	Puro standard biochar methodology V2 (Puro.earth, 2022)	Using feedstock with proven sustainability and certified biochar, the life cycle of biochar is divided into the biomass, production, and use stage, and the CORC (carbon dioxide removal certificate), the C credit unit in Pure.earth, is determined by the result of life cycle assessment of each stage and Woolf et al. (2021)	- Working together with Nasdaq - Headquarters in Finland
Carbonfuture	EBC biochar-based C sinks V2.1 (EBC, 2021)	- EBC C-sink potential from biomass sourcing to biochar factory gate for EBC certified biochar is obtained, and C-sink Trader is responsible for product transportation and use - Total net C-sink, the C credit unit in Carbonfutures, is determined by integrating the C-sink potential and C-sink tracking	- Joining EU Carbon Removal Certification Framework - Headquarters in Germany
Verra	Verified Carbon Standard Methodology 0044 V1.1 (Verra, 2023)	- It targets certified biochars of purely biogenic wastes with proven sustainability, and greenhouse gas emission reduction with VCU (verified carbon unit), the C credit unit in Verra, is determined by subtracting the baseline from biochar project minus the baseline 100 years sequestered C contents in biochars are calculated about high technology and low technology, respectively	- Other voluntary C markets use this methodology - Headquarters in USA

바이오차 전과정 (life cycle) 동안 탄소발자국 (carbon footprint)에 대한 시스템적 접근은 전과정평가 (LCA)를 수행하는 Puro.earth (2022)에 잘 나타나 있다. Fig. 1은 바이오차 탄소배출권 방법론의 특징과 시스템 경계를 나타낸 것이다. Puro.earth (2022)는 바이오차 전과정의 시스템 경계를 ‘요람에서 문까지’와 ‘요람에서 무덤까지’로 나누어 제시하였다 (Fig. 1). 바이오차의 ‘요람에서 문까지’는 원료공급과 바이오차 제품 생산까지이다. 말하자면 바이오차 원료인 바이오매스부터 바이오차 제품이 열분해 설비가 작동하는 공장을 떠날 때까지 바이오차 과정의 탄소발자국을 말한다. 반면 바이오차의 ‘요람에서 무덤까지’는 원료공급, 생산, 최종사용까지 바이오차 전과정에서 탄소발자국을 말한다. 바이오차의 전과정을 이렇게 두 가지로 나누는 이유는 인증의 투명성과 효율성을 위해서이다. 최종적으로 평가하는 것은 ‘요람에서 무덤까지’이지만 포장된 바이오차 제품까지인 ‘요람에서 문까지’를 확실히 보증함으로써 인증의 신뢰성을 높이하고자 하는 것이다 (Puro.earth, 2022). EBC의 탄소싱크 (C-sink) 인증은 원료에서 포장된 바이오차 제품까지에 대한 탄소싱크포텐셜 (C-sink potential) 인증과 바이오차 제품이 생산공장을 떠난 후 과정, 즉 바이오차 제품의 사용처로 운송과 최종 사용에 대한 것을 탄소싱크 추적 (C-sink Tracking)으로 구분하여 다루고 있다. 탄소싱크 추적은 이타카 연구소 (Ithaka Institute)에서 인증된 추적시스템 (tracking system)을 활용하여 탄소싱크 거래 플랫폼 (C-sink Trader)이 담당한다. EBC에서 인증한 거래 플랫폼은 본 논문의 분석대상인 카본퓨처와 퓨로어스 등이다 (EBI, 2021).

베라는 생물기원 폐기물만 원료로 하고 원료수송 또는 제품수송 등 이동에 관련된 과정 등을 누출(leakage)로 따로 정의하는 특징이 있다. 그러나 최종적으로는 바이오차 전과정이라는 시스템 경계 안에 있는 모든 과정을 포괄하고 있다 (Fig. 1).

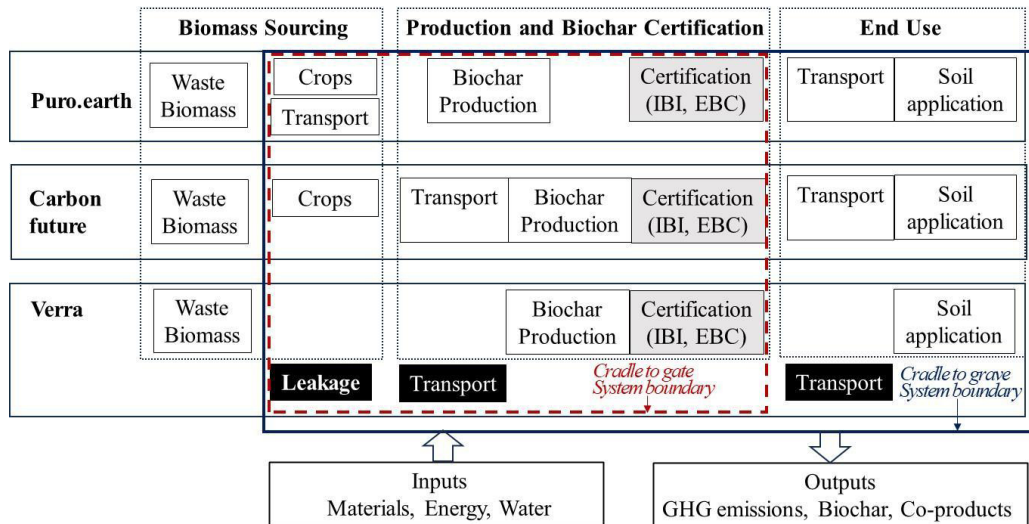


Fig. 1. Overall system boundary and the main processes for a biochar lifetime in each methodology described by Puro.earth, Carbonfuture, and Verra.

Results and Discussion

바이오차 품질인증: 100년 이상 격리 유기탄소량 바이오차 100년 이상 격리 유기탄소량은 바이오차 유기탄소함량(C_{org})에 바이오차 유기탄소함량 중 100년 이상 격리 비율인 영속성 계수(permanence factor)를 곱하여 구한다. 따라서 바이오차의 C_{org} 함량이 높을 때 100년 이상 격리 유기탄소량도 증가한다. IBI (2015)의 경우, C_{org} 함량 최소 10%라는 기준을 제시하고 함량에 따라 3가지로 바이오차를 구분한다 (Table 1). EBC (2023a)는 2012년에는 C_{org} 함량 50% 이상이라는 기준이 있었으나 현재는 기준이 없이 C_{org} 함량을 신고하는 것으로 하고 있다. 반면 미국 식물식품관리위원회 (AAPFCO)는 바이오차에 대해 최소 60% C_{org} 함량이라는 기준을 제시하고 있다 (Draper, 2019).

바이오차 영속성 계수는 H/C_{org} 몰 비율에 따라 달라진다. 이 H/C_{org} 몰 비율은 바이오차의 탄화 정도와 안정성을 나타내는 지표로 바이오차 품질인증에서 중요하다 (EBC, 2023a). H/C_{org} 몰 비율은 열분해온도가 높을 때 낮고 (Camps-Arbestain et al., 2015), 고리형 방향족탄소함량이 높을 때 낮아진다 (Wang et al., 2023). IBI와 EBC가 공통으로 제시하는 H/C_{org} 몰 비율 기준은 0.7 이하이다 (Table 3). 이 기준은 바이오차 탄소배출권 인증방법론에서도 모두 채택하고 있는 기준이다. Budai et al. (2013)은 H/C_{org} 몰 비율에 따라 100년 이상 격리 C_{org} 함량을 계산하여 제시하였다. H/C_{org} 몰 비율 0.4에서 평균 80.2%, 0.7에서 58.2%였다. 즉, H/C_{org} 몰 비율 0.7의 바이오차에서 측정된 C_{org} 중 58.2%가 적어도 100년 동안 안정적으로 남아있을 가능성이 있음을 나타낸다. IPCC (2019)에서는 영속성 계수를 열분해온도 600°C 이상에서 평균 0.89, 450 - 600°C에서 0.80, 350 - 450°C에서 0.65, 그리고 정확한 열분해온도가 없을 경우 0.56로 제시하였고, 이 인자는 Verra (2023)에서 활용되고 있다. H/C_{org} 몰 비율, 열분해 온도 등 바이오차 제품과 관련된 인자 외에 영속성 계수에 미치는 인자로 토양온도가 있다. Lehmann et al. (2015)은 같은 H/C_{org} 몰 비율의

바이오차의 영속성 계수가 토양온도 20°C보다 10°C에서 더 높음은 보여주었다. 이러한 특성에 대한 실험자료와 모델링 등을 종합하여 Woolf et al. (2021)은 영속성 계수를 H/C_{org} 몰 비율에 대한 일차함수로 나타내고 그 일차함수의 절편값과 기울기를 100년 기간 기준으로 토양온도별로 제시하였다. 이 방법은 퓨로어스 방법론에서 채택하고 있으며 Verra (2023)에서도 활용 가능성을 밝히고 있다.

EBC (2023a)은 IBI (2015)와 다르게 O/C_{org} 몰 비율 0.4 이하라는 기준을 추가로 제시하고 있다. O/C_{org} 몰 비율도 H/C_{org} 몰 비율처럼 방향족탄소함량이 증가하면서 감소하는 특성을 가지고 있다 (Li and Tasnady, 2023). O/C_{org} 몰 비율은 바이오차를 특성화하기 위해 중요한 인자로 간주되지만 때때로 열분해 후 처리 또는 산화 또는 촉매 작용 첨가제를 사용한 공동 열분해로 인해 0.4를 초과할 수 있다. 이때는 EBC 타당성 검사를 수행하여 제품 품질 및 환경 보호가 보장된다면 적절한 면제를 부여할 수 있다고 제시하고 있다 (EBC, 2023a).

Table 3. Basic properties that must be limited or declared in the European biochar certificate (EBC, 2023a) and the international biochar initiative (IBI, 2015) guidelines.

Biochar test	IBI	EBC (EBC-AgroOrganic, EBC-Agro, EBC-Urban)
Organic carbon (C_{org})	10% minimum Class 1: $\geq 60\%$ Class 2: $\geq 30\%$ and $< 60\%$ Class 3: $\geq 10\%$ and $< 30\%$	Only declaration (no limit value)
$H:C_{org}$ molar ratio	0.7 maximum	0.7 maximum
$O:C_{org}$ molar ratio	Not specified	0.4 maximum
IBI test category A	Declaration of moisture, total ash, total nitrogen, electrical conductivity, liming (if pH is above 7), particle size distribution ($\% < 5$ mm; $\% 0.5 - 1$ mm; $\% 1 - 2$ mm; $\% 2 - 4$ mm; $\% 4 - 8$ mm; $\% 8 - 16$ mm; $\% 16 - 25$ mm; $\% 25 - 50$ mm; $\% > 50$ mm)	-
IBI test category B parameters	Germination inhibition assay, toxic contaminants	-
IBI test category C parameters (optional)	Declaration of N, P, K, Ca, Mg, S, Volatile matter, total surface area, and external surface area	-
EBC elemental analysis	-	Declaration of C_{tot} , C_{org} , H, N, O, S, ash
EBC physical parameters	-	Declaration of water content, dry matter (as received and @ < 3 mm particle size), bulk density (DM), WHC, pH, salt content, electrical conductivity of the solid biochar
EBC thermogravimetric analysis (TGA)	-	TGA needs to be presented for the first production batch of a pyrolysis unit
EBC nutrients	-	Declaration of N, P, K, Mg, Ca, Fe

바이오차 품질인증: 기본특성 바이오차의 기본 특성에는 주로 토양 시용 시 토양 물리화학적, 식물생육, 양분 함량, 토양비옥도 등에 영향을 주는 인자로 Table 3에 나타나 있다. 수분함량, 총회분함량, 총질소함량, 전기전도도 등은 IBI (2015)와 EBC (2023a)에서 공통적으로 꼭 신고되어야 할 필수항목이다. 이는 EBC (2023a)에서 필수항목

으로 총건물중, 입경 3 mm 이하 건물중, 전용적밀도, 수분보유용량, 양분함량 (질소, 인, 칼륨, 마그네슘, 칼슘 및 철), 열중량분석 (TGA) 등을 IBI (2015)보다 추가로 더 요구하고 있다. 열중량분석 기술은 시료가 일정한 속도로 가열될 때 발생하는 무게 변화를 모니터링하여 재료의 열 안정성과 휘발성 성분의 비율을 결정하는 분석으로 다른 휘발성 유기화합물 분석방법보다 간편한 장점이 있다 (Yi et al., 2013). EBC (2023a)는 또 선택항목으로 비표면적 및 공극 크기 분포 측정을 권장하고 있다.

IBI (2015)에서 EBC (2023a)와 다른 추가 필수 항목으로 기본활용특성 Test A parameter에서 입자크기분포, pH 7 이상 시 석회값 (liming)이 있고 독성물질 분석그룹인 Test B parameter에서 발아저해시험과 B, Cl, Na 등의 함량이 있다. IBI (2015)에서 양분함량 등은 선택 항목인 Test C parameter로 제시하고 있다. 입자크기분포의 경우, EBC (2023a)에서 분석방법이 제시되고 있어, 필수 항목은 아니더라도 선택 항목으로 채택된 것으로 판단된다. 즉, 토양특성에 영향을 미칠 수 있는 바이오차의 다양한 특성을 EBC (2023a)와 IBI (2015)에서 포괄하지만 필수 항목 또는 선택 항목에 차이가 있으며 EBC에서 요구하는 필수항목이 더 많은 것으로 나타났다. 한편으로 바이오차의 식물 독성을 직접 평가하는 발아저해시험을 필수항목으로 하는 IBI (2015)는 농업적 안전성에 중점을 둔다고 판단할 수 있다.

바이오차 품질인증: 중금속 기준 독성오염물질 임계치는 Table 4와 Table 5에 나타나 있다. EBC의 토양사용 바이오차 중 EBC-AgroOrganic는 EBC-Agro, EBC-Urban 보다 임계치가 낮아 더 엄격하게 관리되는 것으로 나타났다. IBI (2015)는 EBC항목에 추가로 Co, Mo, Se에 대한 임계치를 제시하고 있고 EBC (2023a)는 추가로 Ag를 측정 필수항목으로 지정하여 신고하게 되어 있다. Ag는 나노입자형태에서 세포대사에 독성을 나타낼 수 있다고 보고되는 물질 (Zhang et al., 2022)로 2023년에 추가되었다 (EBC, 2023a). 독성물질에 대한 임계치에서 IBI (2015)는 EBC (2023a)과 달리 하나의 임계치가 아닌 범위로 제시되어 있다. 그 이유는 유럽, 호주, 캐나다, 영국, 미국 등 전 세계 다양한 나라에서 토양개량제 또는 비료의 기준을 고려하였기 때문이다. IBI (2015)는 독성물질의 한계기준치에 대해서 바이오차가 생산되고 사용되는 나라의 기준에 따르도록 언급하고 있다. 예를 들어 미국의 Hg 임계치는 건물중 1톤당 17 g로 IBI (2015)의 최대값에 해당한다 (USDA NRCS, 2022). EBC-Agro, EBC-Urban중금속 임계치는 IBI 임계치 범위에서 최저값과 유사하거나 낮았고 EBC-AgroOrganic은 모두 최저값보다 낮게 나타났다. 이로 볼 때 최근 갱신된 EBC (2023a) 중금속 기준은 세계적으로 엄격함을 알 수 있다.

우리나라 비료공정규격에서 부속 유기질 비료의 중금속 임계치는 건물중 기준 1톤당 g으로 Pb 130, Cd 5, Cu 360, Ni 45, Hg 2, Zn 900, Cr 200, As 45이다 (RDA, 2023). 이는 EBC (2023a) 임계치보다 높고 IBI (2015) 임계치 범위에서 낮은 쪽에 속한다. 우리나라에서 가장 풍부한 생물기원 폐기물인 가축분을 원료로 한 가축분퇴비에서 Zn와 Cu의 함량은 각각 25.7 - 5,102 mg kg⁻¹, 68 - 1,243 mg kg⁻¹으로 넓은 범위로 나타난다고 보고되었고, 높은 값이 나타나는 이유는 사료에서 Zn와 Cu의 함량이 높게 나타나기 때문으로 제시하고 있다 (Ko and Kim, 2016). 그런데 가축분퇴비가 열분해 탄화과정을 거쳐 바이오차가 되면, 총 건물중이 줄어드는 만큼 중금속이 농축되어 함량이 더욱 높아질 수 있으며, 이로 인해 잠재적 생태독성에 변화가 있을 수 있다 (Wang et al., 2019, 2021; Rathnayake et al., 2023). EBC (2023a)는 2023년 바이오차 원료로 허용가능한 바이오매스에 비식물성 원료를 포함하면서 원료의 중금속함량에 대해 언급하고 있으며, 하수오니 등의 바이오솔리드는 대체로 중금속함량이 매우 높게 나타나 토양활용 바이오차 (EBC-Agro, EBC-Urban) 원료로서 허용하지 않고 건축자재 사용으로만 허용한다고 규정하고 있다. 이는 중금속함량이 생물기원폐기물의 바이오차 제조 원료로서의 허용가능성을 결정하는 주요한 제한조건이 됨을 보여주는 사례이다.

Table 4. Thresholds for toxic elements including heavy metals recommended in biochars of the European biochar certificate (EBC, 2023a) and the international biochar initiative (IBI, 2015) guidelines.

Toxic element	IBI	EBC	
		EBC-AgroOrganic	EBC-Agro, EBC-Urban
Pb (g t ⁻¹ dw [†])	121 - 300	45	120
Cd (g t ⁻¹ dw)	1.4 - 39	0.7	1.5
Cu (g t ⁻¹ dw)	143 - 6,000	70	100
Ni (g t ⁻¹ dw)	47 - 420	25	50
Hg (g t ⁻¹ dw)	1 - 17	0.4	1
Zn (g t ⁻¹ dw)	416 - 7,400	200	400
Cr (g t ⁻¹ dw)	93 - 1,200	70	90
As (g t ⁻¹ dw)	13 - 100	13	13
Co (g t ⁻¹ dw)	34 - 100	-	-
Mo (g t ⁻¹ dw)	5 - 75	-	-
Se (g t ⁻¹ dw)	2 - 200	-	-
B, Cl, Na (g t ⁻¹ dw)	Declaration	-	-
Ag (g t ⁻¹ dw)	-	No limit value, only declaration required	

[†] dry weight.**Table 5.** Thresholds for organic compounds recommended in biochars of the European biochar certificate (EBC, 2023a) and the international biochar initiative (IBI, 2015) guidelines.

Organic compounds	IBI	EBC	
		EBC-AgroOrganic	EBC-Agro, EBC-Urban
16 EPA PAH (g t ⁻¹ dw [†])	6 - 300	6.0 + 2.4	6.0 + 2.4 for EBC-Agro, declaration for EBC-Urban
8 EFSA PAH (g t ⁻¹ dw)	-	1.0	1.0
benzo[e]pyrene benzo[j]fluoranthene (g t ⁻¹ dw)	3 TEQ [‡] dw	<1.0 for each of both substances	
PCB (g t ⁻¹ dw)	0.2 - 1	<0.2; Once per pyrolysis unit for the first production batch	
Dioxins & furans (ng kg ⁻¹)	17 TEQ	<20 I-TEQ WHO [§] ; Once per pyrolysis unit for the first production batch	

[†] dry weight; [‡] a toxicity equivalents; [§] international toxicity equivalents following WHO (world health organization).

바이오차 품질인증: 독성화합물 기준 독성 유기화합물인 폴리염화비페닐 (polychlorinated biphenyls, PCB), 다이옥신 (PCDD, PCDF) 및 푸란 (furans)의 함량은 주로 열분해된 바이오매스의 염소함량에 따라 달라진다 (Gullett et al., 2000). IBI (2015)는 제품에 대해 매번 검사하지만, EBC (2023a)은 인증된 저탄소 열분해 설비는 이러한 독성 유기화합물을 최소량만 생산하므로, 토양사용 바이오차의 경우 열분해 첫번째 제어 연도에 한번 측정하면 충분하다고 간주한다. 하지만 이는 바이오차 원료가 되는 바이오매스가 염소함량이 낮아 PCB, 다이옥신 및 푸란의 생성이 낮을 때를 전제로 한다. 만약 바이오매스의 염소함량이 높다면 추가 분석이 필요할 수 있다고 제시하고 있다 (EBC, 2023a). PCB 임계치는 Table 5에 나타나 있으며 IBI (2015)의 최소값이 EBC (2023a)의 임계치와 같았다. 다이옥신 및 푸란의 임계치는 다른 독성물질과 반대로 IBI (2015)보다 EBC (2023a)가 약간 높게 나타났다.

다환방향족탄화수소 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAH)는 유기 물질의 열분해시 불완전연소로 생성되는 물질로, 일반적으로 열분해 가스와 함께 방출되어 연소되면 파괴된다. PCB, 다이옥신 및 푸란과 달리, PAH는 바이오매스 공급원료에 거의 영향을 받지 않는다 (Hilber et al., 2017a). 그런데 공정조건에 따라 생성된 PAH가 바이오차에 흡착될 수 있다. 특히 열분해 가스가 있는 상태에서 바이오차를 냉각하면 PAH가 응결 흡착되어 함량이 더 높아질 수 있다 (EBC, 2023a). IBI (2015)는 미국 환경보호국 (EPA) 우선환경오염물질로 속한 16 EPA-PAH (EPA 규정 16개 PAH 화합물)로 임계치 범위로 제시하고 있으며 EBC (2023a) 임계치는 그 범위의 최저값에 해당한다 (Table 5). EBC (2023a)는 16개의 PAH 화합물 중 더 복잡한 발암성 PAH 8개에 대한 임계치를 추가로 제시하고 있다. 그 이유는 발암성 PAH는 더 높은 분자량으로 바이오차에 더 잘 남아있을 수 있기 때문이다 (Hilber et al., 2017b). 이는 유럽 식품안전청 (EFSA)을 따르는 것으로 8 EFSA PAH로 표기한다. 16 EPA-PAH는 평균 6.0 g t^{-1} , 8 EFSA PAH는 1.0 g t^{-1} 의 임계치를 가진다. 또한 발암성물질 벤조[e]피렌 또는 벤조[j]플루오란텐에 대해 EBC (2023a)는 각각 1 mg kg^{-1} 보다, IBI (2015)는 총합으로 3 mg kg^{-1} TEQ dw보다 높은 농도로 포함되지 않도록 제어하고 있다 (Table 5). 여기서 TEQ는 생물독성을 나타낼 때 쓰이는 독성등가환산농도로 다이옥신 등에서 독성물질 종류가 여러 가지일 때, 각 물질의 실측농도에 독성등가환산계수 (toxic equivalent factor, TEF)를 곱한 후 여러 가지를 모두 합산한 값이다. 바이오차 PAH함량 제어를 위해서는 열분해공정에서 바이오차에 PAH가 응결 및 흡착하지 않는 온도에서 열분해 가스를 분리하여 연소하는 등으로 환경에 노출되지 않게 차단하는 것이 매우 중요하다 (Hilber et al., 2017b; EBC, 2023a). 이를 위해 EBC는 2012년부터 생산시설 인증에 PAH 함량이 매우 낮은 바이오차를 생산하는 기술 타당성 입증에 포함하였다 (EBC, 2023a).

바이오차 탄소배출권 인증의 주요 원칙 탄소배출권으로 인정받기 위해서는 지속가능성 (sustainability)과 기후적 이점에서의 추가성 (additionality to existing climate benefits)의 두 가지 원칙을 만족하여야 한다. UN 세계환경개발위원회 (WCED)에서는 지속가능성을 미래 세대가 그들의 욕구를 충족할 수 있는 기반을 손상시키지 않는 범위 내에서 현세대의 요구를 충족시키는 것으로 정의하고 있다 (UCLA Sustainability, 2023). 바이오차 탄소배출권에 있어 지속가능성은 환경 안전성과 더불어 바이오매스를 바이오차 원료로 사용하면서 육지의 탄소저장량이 감소되지 않는 것을 말한다. 기후적 이점에서의 추가성은 탄소배출권 없이는 발생하지 않았을 온실가스 배출감소 또는 제거를 말한다 (Gillenwater, 2012). 그리고 국가 규정 등에 의해 강제적으로 수행된 것이 아니어야 한다. 즉, 의무사항이 아닌 자발적 참여로 사업을 수행하며 사업자체로는 경제성이 부족하지만 탄소배출권으로 경제성 확보가 가능한 사업에 추가성이 인정된다 할 수 있다.

지속가능성과 추가성을 만족할 때 인증되는 탄소배출권은 바이오차 사업활동으로 100년 이상 순제거된 CO_2 량으로, 이는 100년 이상 격리된 바이오차 C_{org} 에서 바이오차 전과정 동안 발생한 온실가스 배출량을 차감한 값이다. 이 제거 탄소배출권 (removal C credit)은 2019년 이후 거래가 활발해졌는데, 그 전까지는 삼림벌채 방지, 재생에너지 등의 회피 탄소배출권 (avoidance C credit)이 자발적 탄소시장의 주를 이루었다 (Dawes et al., 2023). 2019년 이후 CO_2 제거에 초점을 두고 유럽에서 설립된 퓨로어스와 카본퓨처는 제거 탄소배출권을 다루는 반면, 2007년부터 자발적 탄소시장에 방법론을 제공해온 베라는 제거 탄소배출권뿐 아니라 회피 탄소배출권을 바이오차 원료단계에서 적용하고 있다 (Verra, 2023). 회피 탄소배출권은 탄소배출권 사업활동이 없을 때인 베이스라인 시나리오 온실가스 배출량에서 탄소배출권 사업활동 온실가스 배출량을 차감한 온실가스 감축량을 말한다. 이 때 보수적 베이스라인 (conservative

baseline) 설정 원칙이 적용된다. 이는 베이스라인 시나리오 온실가스 배출량을 ‘평상시 활동 (business as usual)’ 배출량 예측 이하로 낮게 설정하는 것을 말한다 (Gustavsson et al., 2000; UNFCCC, 2021). 베라는 보수적 베이스라인 설정 원칙을 따라 바이오차 원료 단계 베이스라인을 0으로 정하고 있다 (Verra, 2023). 이로서 원료 단계 바이오매스에 대한 회피 탄소배출권은 0이 되어, 베라의 탄소배출권 또한 퓨로어스와 카본퓨처와 같이 100년 이상 순제거된 CO₂량으로 정해진다.

탄소배출권 인증 방법론: 원료공급단계 바이오차는 원료 바이오매스가 공급되어야 만들 수 있는 CO₂ 제거 기술로 바이오차의 대표적 한계가 바이오매스 원료를 두고 이루어지는 다른 산업과의 경쟁이다 (IPCC, 2022). Verra (2023)는 바이오차 사업활동의 지속가능성 척도로 소비되는 원료 바이오매스의 최대임계치를 사용가능한 폐기물 바이오매스 총량의 5%로 규정하고 2021년 기준 전 세계 바이오차 생산량 비율을 산정한 결과가 임계치 5% 미만인 0.06%이라고 보고하면서 바이오차 사업활동이 가능함을 제시하였다.

사업활동의 지속가능성뿐 아니라 바이오차 원료 자체가 탄소배출권 인증의 주요한 원칙인 지속가능성을 만족하여야 한다. Puro.earth (2022)는 사용된 바이오매스 공급 원료의 원산지 및 지속가능성 증명과 바이오매스 생산과 공급에 대한 전과정평가 결과를 요구한다. 즉, 산림 바이오매스의 경우 FSC (forest stewardship council)의 산림경영인증 등의 인증서를 요구하며, 비산림폐기물 바이오매스의 경우 인증서는 요구하지 않으나 지속가능한 방식의 공급이 필수조건이다. EBC 탄소싱크 인증에서는 원료의 탄소중립성을 요구한다. 원료의 탄소중립성은 지속가능성과 유사한 개념이다. 즉, 원료 바이오매스가 수확된 곳에서 바이오매스가 다시 자라 탄소저장량이 보전된 경우에만 바이오차가 탄소 흡수원으로 인식될 수 있다는 필수 원칙을 제시하고 있다 (EBI, 2021).

바이오차 원료의 특성은 바이오차의 품질과 생산과정, 사용 등에 크게 영향을 미친다 (Ippolito et al., 2020; Fawzy et al., 2022). 따라서 IPCC (2019)에서 그룹화된 원료목록이 제시되었고, EBC (2023b)와 Verra (2023)에서도 제시한 원료 목록이 있다. 퓨로어스는 IPCC (2019)와 EBC (2023b)의 원료 목록을 채택하고 있고, 카본퓨처는 EBC (2023b)의 원료목록을 채택하고 있다. Verra (2023)의 경우 지속가능하고, 순전히 생물기원폐기물 바이오매스이며 목적성으로 재배하지 않고 다른 국가에서 수입되지 않았어야 한다고 규정하고 있다. Verra (2023)의 원료목록에는 IPCC (2019)와 EBC (2023b) 원료목록에 없는 열병합발전소 부산물인 고탄소비산회 (high-carbon fly ash from biomass)가 있다는 것이 주목할 만하다. 단, 고탄소비산회는 연간폐기물 바이오매스 처리량의 5%를 넘지 않고 바이오차를 추출하기 위해 적극적 기술이 사용되었다는 정보를 제공해야 하며 바이오차 추출로 인한 열량손실로 화석연료원이 사용되지 않았다는 것을 입증하여야 하고 IBI 바이오차 품질기준을 만족하여야 탄소배출권을 위한 바이오차 원료로 인정된다 (Verra, 2023).

EBC (2023b) 원료목록은 IPCC (2019)의 원료목록을 다 포함하면서 가장 세분화되고 특성화된 목록을 제시하고 있다. 2022년까지는 식물성 바이오매스만으로 원료목록으로 제시하다가 2023년 하수슬러지, 바이오가스 소화물 또는 뼈, 가축분 등의 다양한 비식물성 바이오매스를 원료로 포함하는 것으로 갱신하고 원료별 특별 요구조건을 명시하였다. Table 6은 EBC (2023b)의 원료목록 중 개별승인없이 토양시용 바이오차로 활용가능한 원료를 간추려 제시한 것이다. 특별요구조건을 살펴보면 유기농업에 사용하는 EBC-AgroOrganic용은 유기농업으로 경작된 것이어야 한다는 것이다. 그리고 경작한 것은 비료사용량 등이 명시되어야 한다. 삼림과 목재 부산물의 경우 지속가능성 증빙이 필요하다. 또 경관관리 바이오매스의 경우 도로 청소용 물질이 없어야 하고 토양 또는 모래함량이 10% 이하이어야 한다.

재활용, 식품가공잔류물, 식물 등에서는 플라스틱 오염 1% 이하, 합성섬유 1% 이하 등을 규정하고 있다. 그리고 2023년 추가된 동물성 원료는 생물학적 위험과 미량오염물질 제거를 위해 열분해 조건이 최소 3분간 500°C를 초과해야 한다는 요구조건이 있다. 이는 Guo (2020)가 제시한 바이오차의 안전한 유기탄소함량이 식물성 원료에서 350°C 이상에서, 가금류폐기물에서 열분해 온도 500°C 이상에서 최대로 증가한 것과 연결된다. 특히, 500°C 이상의 열분해공정을 거친 가축분 바이오차는 가축분에서 많이 발견되는 병원균, 스테로이드, 항생제 등 유기오염물질이 제거되어 토양시용시 환경적 안전성이 높아진다 (Rathnayake et al., 2023).

Table 6. Permissible biomasses for EBC-AgroOrganic, EBC-Agro, and EBC-Urban without individual approval, partly extracted from “Positive list of biomass feedstock (EBC, 2023b)”.

Biomass types		Special requirements
Agriculture	Annual and perennial energy crops grown specifically for energy or material biomass use; Woody biomass from short rotation plantations (SRC); Tree, vine and shrub pruning; Harvest residues such as straw, cabbage, leaves, stalks, husks; Old straw and grain dust; Vegetables; Seeds	• For EBC-AgroOrganic only from organic cultivation • For C-sink certification, the amount of fertilizer used must be declared
Forestry and wood processing	Bark, wood chips only from mechanically treated wood (pure firewood); Wood, wood residues from mechanical processing (waste wood A1); Sawdust, sawdust shavings	• Only from certified, sustainable forestry • Approved are the FSC and the PEFC labels, others on request
Landscape management	Foliage; Root stocks; Biomass from nature conservation; General landscaping residues	• No road wiping material • The soil or sand content $\leq 10\%$
Recycling economy	Urban green cuttings; Wastepaper; Untreated waste wood (A1), wood shavings, bark, wood wool; Residues from industrial biomass processing; Paper fiber sludge	• For EBC-Agro, only defined sub-assortments from defined sources and with small amounts of foreign matter: total content of synthetic coating, varnishes and plastic contamination must not exceed 1%
Kitchen, canteen, and restaurant residues		• Contamination by plastic $\leq 1\%$
Food processing residues	Material from washing, cleaning, peeling, centrifugation and separation processes; Pomace, kernels, husks, grist or press residues; Expired food residues; Manufacturing residues from the production of canned food; Residues (from starch production, etc.)	• The soil or sand content $\leq 10\%$ • Contamination by plastic $\leq 1\%$ • Only vegetable food • Only pure vegetable residues
Water maintenance & vegetal marine biomass - Screenings, floating debris, mowed material; Aquatic plants and algae		• Contamination by plastic $\leq 1\%$ • Water quality control is required
Textiles	Cellulose, cotton, and plant fibers; Fibers of hemp, sisal, etc.	• The content of synthetic fibers must not exceed 1%
Plant-based digestate; Digestate from secondary plant biomass		• Not contain sewage sludge
Anaerobic digestion - Manure digestate; Animal by-product digestate Animal by-products - Bones; Manures		• Pyrolysis conditions must exceed 500°C for 3 min at minimum to eliminate biological hazards and micropollutants

탄소배출권 인증 방법론: 바이오차 생산 단계 바이오차 유기탄소의 토양에서 영속성, 즉 분해저항성은 열분해로 인해 나타나므로 바이오차를 발열성 탄소 포집 및 저장 (pyrogenic carbon capture and storage) 기술이라고도 한다 (Schmidt et al., 2019; Carbonfuture, 2022). 열분해 공정과 바이오매스의 전처리, 바이오차 후처리 등이 바이오차

생산단계를 구성하는 요소이다.

Table 7은 IPCC (2019)에서 제시한 공급원료별 열분해 과정별 바이오차의 유기탄소 비율이다. 열분해가 가스화보다 높은 값을 가지며 공급원료 중에서는 목재에서 가장 높은 값을 보이고 있다. Ippolito et al. (2020)은 바이오차의 토양 내 C_{org} 영속성은 열분해 온도가, 바이오차에 의한 토양 물리화학적 변화는 원료가 주로 영향을 미친다고 밝혔다. 열분해 형태, 즉 빠른 열분해 또는 느린 열분해는 바이오차 특성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보고하였다(Ippolito et al., 2020). 따라서 원료와 열분해 온도에 따라 생산되는 바이오차의 특성이 정해지고 그 특성에 맞는 최적화된 활용이 정해질 필요가 있다(Wang et al., 2023).

Table 7. Organic carbon content factor of biochar by feedstock and production type (F_{CP}) from IPCC (2019) Table 4Ap.1.

Feedstock	Pyrolysis production process	Values for F_{CP}
Animal manure	Pyrolysis	$0.38 \pm 49\%$
	Gasification	$0.09 \pm 53\%$
Wood	Pyrolysis	$0.77 \pm 42\%$
	Gasification	$0.52 \pm 52\%$
Herbaceous (grasses, forbs, leaves, excluding rice husks and rice straw)	Pyrolysis	$0.65 \pm 45\%$
	Gasification	$0.28 \pm 49\%$
Rice husks and rice straw	Pyrolysis	$0.49 \pm 49\%$
	Gasification	$0.13 \pm 49\%$
Nut shells, pits, and stones	Pyrolysis	$0.74 \pm 49\%$
	Gasification	$0.40 \pm 49\%$
Biosolids (paper sludge, sewage sludge)	Pyrolysis	$0.35 \pm 49\%$
	Gasification	$0.07 \pm 49\%$

Puro.earth (2022)는 생산단계에서 전과정평가에 포함될 활동목록을 제시하고 관련된 활동에서 발생하는 모든 온실가스 배출량이 포함되도록 하고 있다. 열분해 공정의 부산물인 열, 전기, 또는 바이오 오일이 생산과정에서 활용되지 않고 중요 제품으로 간주되는 경우 바이오차와 부산물사이 에너지 할당을 적용하여 전과정평가를 실시한다. 반면 카본퓨처의 EBC 탄소싱크에서는 열분해 공정의 부산물이 기후에 긍정적이라 해도 이를 탄소싱크에는 포함시키지 않는다(EBC, 2021).

EBC (2023a)는 일련의 생산설비로 구성되는 바이오차 생산배치(production batch)를 웹사이트에 등록하게 하여 고유 ID와 QR코드로 관리한다. 그리고 바이오차 생산과정에서 열분해 온도가 생산과정에서 20% 이상 변경되지 않아야 하고 바이오매스 구성 또한 20% 이상 변하지 않아야 한다고 규정하고 있다. 또한 공인 샘플러(sampler)에 의해 대표 샘플링(sampling)을 하여 분석하도록 하고 있다. 또 열분해 공정은 에너지 효율적인 방식, 즉 예열 외에는 화석 연료 사용을 금지하고, 열분해 과정 중 생성된 열분해 가스는 회수되거나 태워야 하며, 합성가스배출은 국가 배출제한 값을 준수해야 하고, 바이오차 생산은 열분해 가스 연소 폐열 회수 등으로 탄소기준 에너지효율이 70% 이상이어야 한다. EBC (2023a)의 이러한 규정을 Verra (2023)에서 첨단기술(high technology) 생산시설로 채택하고 있다. 이를 만족하지 못하는 생산 시설은 비첨단기술(low technology) 생산시설로 구분한다. 그리고 생산단계에서 발생하는 온실가스 배출량을 생산시설 기술수준별로 따로 계산한다.

생산단계에서 발생하는 온실가스 배출량은 열분해 설비의 예열, 바이오매스의 파쇄, 균질화, 펠릿화 및 건조 등의 전처리, 열분해 후 분쇄 등 후처리, 수집창고로의 운송, 그리고 전기사용과 열분해 과정 중 메탄배출 등이 있다. 메탄은 배출 후 최초 20년 이내에 온실효과가 CO₂보다 86배 높다 (EBC, 2023a). 열분해가스를 태우거나 회수하지 않은 전통적인 숯가마 등의 기술은 메탄 배출량이 높아 처음 20년 동안은 바이오차의 기후 긍정적 효과를 상쇄시키거나 더 나아가 기후에 부정적 효과를 줄 수도 있다. 이러한 이유로 EBC (2021)은 열분해장비 유형 인증을 도입하였는데 매년 5 ppm 미만의 낮은 메탄 배출량 측정은 기술적으로 매우 복잡하고 소요되는 비용이 큰 것을 보완하기 위해서이다. 전처리, 열분해공정, 후처리 등을 모두 포함한 바이오차 생산 설비와 기술이 선택된 바이오매스로 온실가스 배출을 최소화하면서 고품질의 바이오차를 생산할 수 있도록 설계되고 운영된다면 바이오차 탄소배출권의 가치는 더욱 높아질 수 있다 (EBI, 2020; Fawzy et al., 2021, 2022).

탄소배출권 인증 방법론: 바이오차 제품 사용 단계 바이오차가 사용가능한 매트릭스(matrix)로는 퇴비 등 생물학적 물질, 농경지 등 토양, 콘크리트 등 무기 물질, 플라스틱 등 재료로 다양하며, 이 중에서 바이오차가 토양에 투입되는 경우는 단독으로 토양에 직접 사용되는 경우와 생물학적 물질 중 토양사용 물질인 퇴비, 비료 등과 혼합된 형태이다. 바이오차가 단독 또는 혼합 형태로 토양에 사용된 후, 토양이라는 생태계에서 기후, 생물, 토양환경, 인간활동 등과 복잡한 상호작용을 겪으며 다양한 동태를 보일 수 있다 (Hilber et al., 2017a). 이는 바이오차 탄소배출권 인증에서 불확실성을 높이는 요소로 인식되고 있다 (McDonald et al., 2021; Nabuurs et al., 2022). 예를 들어 바이오차 사용으로 발생하는 토양 자체 유기탄소의 분해인 프라이밍 효과(priming effect)로 인한 토양유기탄소량 감소와 바이오차 미세입자가 먼지로 날리는 것 등은 기후 긍정적이라 보기 어렵다 (Hilber et al., 2017a; Xiang et al., 2021; IPCC, 2022; Nabuurs et al., 2022). 이러한 다양한 문제와 불확실성을 줄이고자 각 방법론은 사용가능한 매트릭스와 사용조건, 추적시스템 등을 갖추고 있다.

바이오차 탄소배출권 인증에서는 바이오차의 사용으로 토지에서 탄소저장이 감소되지 않아야 하고 바이오차가 사용된 매트릭스가 추적관리 되어야 하며 사용시기는 바이오차 생산 당해 년도로 정하고 있다 (EBC, 2021; Verra, 2023).

탄소배출권 산정을 위해 가장 처음 바이오차 방법론을 제시한 IPCC (2019)에서는 방법론 적용가능 토지를 농경지와 초지로 제한하고 있다. EBC 사용가능 매트릭스 목록(EBC, 2023c) 중 토양과 퇴비, 비료 등 토양 사용 생물학적 매트릭스를 추출하여 Table 8로 나타내었다. Table 8은 바이오차 사용 매트릭스별로 안전마진(safety margin), 바이오차 유기탄소의 영속성 계수 및 조건을 제시하고 있다. 영속성 계수는 모두 100년 기준 0.82, 1000년 기준 0.75로 제시되었는데, 이는 각각 바이오차 C_{org} 중 82%가 100년 동안 토양에 남아있고, 75%가 1000년 동안 남아 있다는 의미이다. 이 영속성 계수는 EBC 탄소싱크 인증방법론을 사용하는 카본퓨처의 탄소배출권 계산에 쓰인다. 안전마진은 안전을 확보하기 위해 필요한 제한범위를 말하며, 습지에서 100%, 삼림에서 0 - 20%로 주어졌다. 습지 안전마진이 100%라는 것은 100%를 제한한다는 의미로 바이오차 사용으로 습지의 유기탄소가 분해될 위험이 있고 아직 과학적 데이터가 매우 적기 때문에 현재 바이오차 사용 매트릭스로 습지를 사용할 수 없음을 뜻한다. 삼림의 경우, 특정 아한대 삼림에서 바이오차가 유기탄소의 분해를 가속화할 수 있어 최대 20%의 안전 마진이 적용되며 자연림의 토양은 기계와 외부물질에 의해 방해받지 않는 것이 좋다는 조건을 제시하고 있다. 농경지, 도시환경, 광산복원에서는 사용 증명과 추적가능조건을 제시하고 있다.

Table 8. Biochar application matrices and their conditions for agriculture and vegetation, partly extracted from “Positive list of permissible matrices for the establishment of biochar C-sinks (EBC, 2023c)”.

C-sink matrix	Security margin	C remaining % after		Conditions
		100 y	1000 y	
Agricultural soil	-	82	75	• Tracking and prove of soil application must be provided
Urban soil	-	82	75	• Tracking or reporting and prove of soil application must be provided
Mine reclamation	-	82	75	• Tracking or reporting and prove of soil application must be provided
Wetlands	100%	82	75	• Biochar may lead to accelerated mineralization of wetlands • Too few scientific data available • Not accepted as C-sink matrix today
Forest	0 - 20%	82	75	• Biochar may lead to accelerated mineralization of certain boreal forests where a higher security margin is applied • The soil of natural forests should better not be disturbed by machines and substrates
Compost [†]	-	82	75	• The use of compost as soil amendment must be proven • Potting soil cannot be certified as most of it end up in waste treatment plants
Solid manure [†]	-	82	75	• The use as soil amendment must be proven, must not be pyrolyzed or combusted
Liquid manure [†]	-	82	75	-
Biochar based fertilizer [†]	-	82	75	• The fertilizer does not reduce the permanence, but biochar may increase emissions during manufacturing and storage • A GHG balance of the production must be provided

[†]biological matrix.

Verra (2023)에서도 습지에서는 바이오차를 사용할 수 없다고 규정하고 있다. 그 이외의 토지에서 토양 개량제로 사용할 수 있으며 적격 토지 유형에는 경작지, 초원 및 숲이 포함된다고 제시하였다. 그리고 바이오차의 토양 표면 활용시 퇴비, 거름 또는 혐기성 소화의 소화물과 같은 다른 물질과 혼합되어야 하며 토양 속 활용시는 단독으로 토양 개량제로 활용하거나 다른 물질과 혼합하여 활용할 수 있다고 제시하고 있다. 이는 Guo (2020)가 제안한 적정시용법 (right placement)인 바람이 적은 날에 축축한 수분 조건에서 과립형 바이오차를 토양표면에 흩뿌리거나 퇴비와 함께 토심 0 - 15 cm 토양과 잘 혼합하는 것과 유사하다.

추적시스템은 바이오차가 사용된 토양 또는 장소의 지리적 위치와 소유자는 기록되어야 한다는 원칙을 따른다 (EBC, 2021; Puro.earth, 2022; Verra, 2023). 특히 바이오차 또는 바이오차를 함유한 물질이 적용된 토지는 GPS를 통해 기록되어야 한다. EBC의 경우, 추적시스템 인증을 통해 탄소싱크 추적과 정량에 대한 신뢰도를 높이하고자 하고 있다 (EBC, 2021).

기후 서비스와 더불어 바이오차가 시용목적에 맞게 효과성을 가지는 것도 매우 중요하다. 이를 위해 목적에 맞는 시용방법 등의 정보가 사용자에게 잘 전달될 필요가 있다. USDA NRCS (2022)는 바이오차 시용방법을 제시하면서 해당 기후조건에서 바이오차가 시용한 토지에서 이탈할 위험을 줄이는 방법이어야 함을 강조하고 있다. 이는 여름 집중 강우가 잦은 우리나라에서 특히 유념해야 할 사항이다. 또한 AAPFCO 정의에 따라 바이오차 제품 포장에 부피, 사용목적, 사용방법, 원료와 비료성분 등을 표시하게 하고 있다 (USBI and NRCS, 2019). 바이오차 시용 토양조건과 시용률에 대해 Guo (2020)는 pH 7.5 이하 및 EC 2.7 dS m⁻¹ 이하의 토양에 식물성원료 바이오차는 2 - 5%, 가축분원료

바이오차는 1 - 3%의 사용률을 추천하고 있다. Lehmann et al. (2006)은 바이오차 사용량이 50 t ha^{-1} 을 초과하지 말아야 한다고 언급했는데, 이는 작토깊이 10 cm 기준으로 약 5%에 해당한다. 우리나라에서는 왕겨 바이오차 사용효과가 주로 보고되고 있다. Park et al. (2021)은 상추재배에서 왕겨 바이오차 4%와 퇴비의 혼용 사용이 토양 질 개선과 함께 무기질 비료 사용 시와 유사한 생산량을 나타내었다고 보고하였다. Kim et al. (2022)은 시설수박에서 왕겨바이오차 2 t ha^{-1} 을 적정 사용량으로 보고하였는데, 이는 작토깊이 10 cm 기준으로 약 0.2%에 해당한다. 이처럼 원료가 같은 바이오차라 하더라도 작물과 토양특성, 영농방법 등에 따라 적정 사용량이 달라질 수 있어 바이오차의 최적 활용을 위한 연구가 다양한 작물에 대해 더 필요하다고 판단된다.

바이오차 탄소배출권 계산과 검증 바이오차 탄소배출권의 단위는 $\text{t CO}_2\text{-eq}$ (CO_2 등가)이다. CO_2 뿐만 아니라 메탄 등 다른 온실가스도 지구온난화지수를 이용하여 등가의 CO_2 로 환산함으로써 $\text{t CO}_2\text{-eq}$ 의 단위로 표기된다. 퓨로어스와 베라의 탄소배출권 계산은 바이오차의 100년 이상 격리 가능 유기탄소량에서 각 단계에서 배출한 모든 온실가스량을 차감하는 것이다 (Table 9). 각 단계에서 온실가스 배출량은 Puro.earth (2022)는 전과정평가를 통해 구한다. Verra (2023)는 생산단계에서 첨단기술 생산시설과 비첨단기술 생산시설에 따라 구하는 방법이 다르다. 특히 비첨단기술 생산시설에서 전기 등 에너지소비, 메탄배출 등에 대해 유엔기후변화협약 (UNFCCC)의 청정개발체제 (clean development mechanism, CDM) 방법론 (UNFCCC, 2008a, 2008b)을 활용하여 온실가스배출량을 산정한다. 카본퓨처의 EBC 탄소싱크는 최종 사용용도에 따라 영속성 계수가 달라질 수 있어 최종 사용용도가 명기된 상태에서 탄소배출권을 구하는 특징이 있다. 즉, 바이오차 C_{org} 에서 원료 및 생산 단계의 온실가스 배출량과 그의 10%를 안전마진으로 추가로 차감하여 탄소싱크포텐셜로 하고 최종 탄소배출권은 바이오차 제품운송 등에서 온실가스 배출량을 차감한 값에 최종사용용도에서 영속성 계수를 곱하여 산정된다.

퓨로어스와 EBC 탄소싱크, 그리고 베라의 첨단기술 생산시설인 에너지 효율성과 가스회수 등을 갖춘 저탄소 열분해설비에서는 생산단계의 온실가스배출이 예열을 위해 사용한 에너지 등으로 제한되어 낮게 나타난다. 그러나 베라의 비첨단기술 생산시설에서는 생산단계의 온실가스배출이 많이 발생할 수 있어 이를 차감하면 바이오차 탄소배출권이 적어질 수 있다. Verra (2023)는 바이오차 원료와 제품 운송에서 왕복 200 km 이하의 운송거리에서 온실가스 배출은 무시할 수 있다고 제시하고 있다. 우리나라는 원료가 주로 생물기원폐기물 원료이고 지역단위 운송으로 거리가 왕복 200 km 미만일 경우가 많아 바이오차 전과정에서 온실가스배출은 주로 생산단계에서 좌우된다고 할 수 있다. 따라서 우리나라에서는 바이오차 생산시설의 저탄소화가 탄소배출권 확보에 중요하다고 판단된다.

Carbonfuture (2020), Puro.earth (2022), Verra (2023)는 이해관계가 없는 독립적인 제3자에 의한 검증을 모두 실시하고 있다. 더불어 바이오차의 전과정을 측정하고 보고하고 검증하는 시스템, 즉 측정 × 보고 × 검증 (monitoring, reporting, verification, MRV) 시스템을 구축하여 탄소인증의 신뢰도를 제고하고 있다. 특히 웹사이트에 탄소배출권 레지스트리를 공시하여 기업 등의 참여와 투명성을 높이고 있다 (Carbonfuture, 2023; Puro.earth, 2022; Verra, 2023).

바이오차를 이용한 글로벌 온실가스 감축량은 Pathak et al. (2022)이 연 0.3 - 6.6 Gt $\text{CO}_2\text{-eq}$ 로 전망했고 Wang et al. (2023)은 연 2.56 Gt $\text{CO}_2\text{-eq}$ 으로 글로벌 온실가스배출량의 5%로 추정했다. 그러나 기후 위기 해법으로써 바이오차는 여러가지 한계도 존재한다. 제한적인 대규모 생산시설, 소규모시설에서 고가의 생산비, 표준화와 품질관리의 한계 등이 그 예이다 (Gwenzi et al., 2015).

Table 9. Calculation methods for biochar carbon (C) credits called CORC, C-sink, and VCU used in voluntary C credit trade platforms, Puro.earth, Carbonfuture, and Verra, respectively.

C credit trade platform	C credit calculation methods (tCO ₂ eq)	Comments
Puro.earth	• $CORC = E_{\text{stored}} - E_{\text{biomass}} - E_{\text{production}} - E_{\text{use}}$ • $E_{\text{stored}} = Q_{\text{biochar}} \times C_{\text{org}} \times F_p^{TH, Ts} \times 44/12$ • Q_{biochar} is the amount of biochar produced over the reporting period; C_{org} is the organic C content of the biochar produced; $F_p^{TH, Ts} = c + m \times H/C_{\text{org}}$ is the permanence factor of biochar organic C over a given time horizon TH in a given soil at temperature Ts, where the coefficients c and m are a function of TH and Ts	• E_{stored}: CO₂ sequestered over 100 years • E_{biomass}, $E_{\text{production}}$, E_{use}: Life cycle GHG during each stage
Carbonfuture	• C-sink is determined by integrating C-sink potential, greenhouse gas emissions (GHG) during C-sink tracking after leaving factory gate, and C remaining % after 100 y in applied matrix • C-sink potential = C_{org} content of biochar - GHG during biomass sourcing - GHG during production - Safety margin • Safety margin = 10% of the total GHG emission of biomass sourcing and production	• EBC C-sink standard requires that the biochar may only be used in specific ways
Overall equation	• $VCU = ER_{PS,y} - PE_{AS,y} - LE_y$, in year y • $ER_{PS,y}$ = GHG emission removals at production; $PE_{AS,y}$ = GHG emissions at application; LE_y = Total leakage emissions, primarily attributed to transport emissions • $ER_{PS,y} = \sum((\sum CC_{tk,y} \times 44/12) - (\sum PE_{PS,t,p,y}))$ • $CC_{tk,y}$ = Organic carbon content, sequestered over 100 years, on a dry weight basis for biochar type t used for application type k; $PE_{PS,t,p,y}$ = Project GHG for production of biochar type t at production facility p may arise from pretreatment like drying wet waste, thermodynamic conversion, or use of external energy	• GHG reduction at the sourcing stage is zero following a conservative scenario • GHG by transport must be accounted for only if the distance is more than 200 km in round trip
Verra	• High tech. production: Thermodynamic conversion emissions are zero and renewable energy use reduces GHG • Low tech. production: Thermodynamic conversion includes CH₄ emissions, which can be obtained using estimation equation • GHG for the pretreatment and use of external energy can be obtained using CDM Tool 05 (UNFCCC, 2008a) and CDM Tool 03 (UNFCCC, 2008b)	

Conclusions

바이오매스 열분해로 생성된 바이오차는 자연과 기술이 융합한 CO₂ 제거 기술로 기후적 이점이 있을 뿐만 아니라 토양개량에 의한 생산성 증대 등 농업적 이익도 얻을 수 있는 기술이다. 국제적 바이오차 탄소배출권 인증방법론은 품질이 인증된 바이오차에 대해 원료공급에서 생산, 최종사용까지 측정, 보고, 검증 시스템을 통해 탄소배출권을 과학적으로 투명하게 산정한다. 이러한 시스템은 우리나라 바이오차 탄소배출권 인증방법론에 도입할 필요가 있다. 더불어 경제성, 바이오차 품질, 환경안전성 등의 다양한 측면을 고려할 필요가 있다. 경제성 측면에서, 왕겨, 전정가지 등 농업부산물로 주로 발생하는 주산단지 등의 지역단위로 바이오차 생산과 활용을 한다면 상대적으로 균질한 원료로 품질관리에도 유리할 뿐 아니라 왕복 200 km 이내 운송거리는 온실가스배출을 무시할 수 있어 탄소배출권에도 유리

할 것으로 판단된다. 또한 열분해 공정 등 생산시설에서 저탄소화는 바이오차 품질과 탄소배출권을 높이는 데 매우 중요한 부분이다. 특히, 500°C 이상의 열분해공정을 거친 가축분 바이오차는 가축분에서 많이 발견되는 병원균, 스테로이드, 항생제 등 유기오염물질이 제거되어 토양 사용시 환경적 안전성을 높일 수 있다. 여름 집중 강우시 바이오차 농경지 이탈 우려가 크므로 바이오차 토양사용의 시기와 방법이 토양침식 및 용탈 등을 최소화할 수 있도록 설정될 필요가 있다. 요컨대, 바이오차 탄소배출권 인증방법론이 원료, 생산, 사용 등의 바이오차 전과정을 고려하여 신뢰도 높게 설정될 필요가 있다. 이는 바이오차 활용 CO₂ 제거를 활성화할 뿐만 아니라 고품질 바이오차의 적정 활용으로 토양환경 개선과 작물생산성 증대에도 기여하리라 기대한다.

Acknowledgement

This work was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture & Technology Development (Project No. RS-2023-002129969)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Bergman, R.D., H. Gu, D.S. Page-Dumroese, and N. Anderson. 2016. Chapter 3: Life cycle analysis of biochar. p. 46-69. In V.J. Bruckman et al. (ed.) *Biochar: A regional supply chain approach in view of climate change mitigation*. Cambridge University Press, New York, NY, USA.
- Budai, A., A.R. Zimmerman, A.L. Cowie, J.B.W. Webber, B.P. Singh, B. Glaser, C.A. Masiello, D. Andersson, F. Shields, J. Lehmann, M. Camps Arbestain, M. Williams, S. Sohi, and S. Joseph. 2013. Biochar carbon stability test method: An assessment of methods to determine biochar carbon stability. IBI Document, Carbon Methodology. International Biochar Initiative, www.biochar-international.org (accessed 15 February 2014).
- Camps-Arbestain, M., J.E. Amonette, B. Singh, T. Wang, and H.P. Schmidt. 2015. Chapter 8: A biochar classification system and associated test methods. p. 165-193. In J. Lehmann and S. Joseph (ed.) *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation*. Routledge, New York, NA, USA.
- Carbonfuture. 2020. Carbon sink certification standards. https://raw.githubusercontent.com/carbonfuture/PublicResources/master/cfMinimumStandards_V1.2.pdf.
- Carbonfuture. 2022. What is biochar? <https://www.carbonfuture.earth/magazine/what-is-biochar>.
- Carbonfuture. 2023. Carbon removal you can trust. <https://platform.carbonfuture.earth/balancer/portfolios>.
- Carvalho, J., L. Nascimento, M. Soares, N. Valério, A. Ribeiro, L. Faria, A. Silva, N. Pacheco, J. Araújo, and C. Vilarinho. 2022. Life cycle assessment (LCA) of biochar production from a circular economy perspective. *Processes* 10(12):2684.
- Dawes, A., C. McGeady, and J. Majkut. 2023. Voluntary carbon markets: A review of global initiatives and evolving models. CSIS BRIEFS (www.csis.org).
- Draper, K. 2019. Biochar labeling & US certifications. <https://pyrolist.com/blog/biochar-labeling-us-certifications>.
- Dutta, T., E. Kwon, S.S. Bhattacharya, B.H. Jeon, A. Deep, M. Uchimiya, and K.H. Kim. 2017. Polycyclic aromatic hydrocarbons and volatile organic compounds in biochar and biochar-amended soil: A review. *GCB Bioenergy* 9(6):990-1004.
- EBC. 2021. Certification of the carbon sink potential of biochar. Version 2.1E of 1st February 2021. Ithaka Institute, Arbaz, Switzerland (<http://european-biochar.org>).
- EBC. 2023a. European biochar certificate - Guidelines for a sustainable production of biochar. Version 10.3 from 5th

- April 2023. Carbon Standards International (CSI), Frick, Switzerland (<http://european-biochar.org>).
- EBC. 2023b. Positive list of permissible biomasses for the production of biochar. https://www.european-biochar.org/media/doc/2/positive-list_en_v10_3.pdf.
- EBC. 2023c. Positive list of permissible matrices for the establishment of biochar C-sinks. Version 1.4 as of 25th July 2023. https://www.european-biochar.org/media/doc/139/matrix_list_ebc.pdf.
- EBI. 2020. Biochar-based carbon sinks to mitigate climate change. https://www.biochar-industry.com/wp-content/uploads/2020/10/Whitepaper_Biochar2020.pdf.
- EBI. 2021. EBC carbon sink certification. http://www.biochar-industry.com/wp-content/uploads/2021/03/EBI_C-Sink_2.pdf.
- Erbach, G. and G.A. Victoria. 2021. Carbon dioxide removal: Nature-based and technological solutions. European Parliamentary Research Service (EPRS). [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI\(2021\)689336](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2021)689336).
- Fawzy, S., A.I. Osman, H. Yang, J. Doran, and D.W. Rooney. 2021. Industrial biochar systems for atmospheric carbon removal: A review. *Environ. Chem. Lett.* 19:3023-3055.
- Fawzy, S., A.I. Osman, N. Mehta, D. Moran, H. Ala'a, D.W. Rooney. 2022. Atmospheric carbon removal via industrial biochar systems: A techno-economic-environmental study. *J. Cleaner Prod.* 371:133660.
- Gillenwater, M. 2012. What is additionality? Part 1: A long standing problem. Discussion Paper No. 001 (Version 03). Greenhouse Gas Management Institute, Silver Spring, MD, USA.
- Göss, S. 2023. EU carbon removal certification framework: New rules to turn greenwashing into genuine removals. *EnergyPost.eu* (<https://energypost.eu/>).
- Gullett, B.K., A.F. Sarofim, K.A. Smith, and C. Procaccini. 2000. The role of chlorine in dioxin formation. *Process Saf. Environ. Prot.* 78(1):47-52.
- Guo, M. 2020. The 3R principles for applying biochar to improve soil health. *Soil Syst.* 4(1):9.
- Gustavsson, L., T. Karjalainen, G. Marland, I. Savolainen, B. Schlamadinger, and M. Apps. 2000. Project-based greenhouse-gas accounting: Guiding principles with a focus on baselines and additionality. *Energy Policy* 28(13): 935-946.
- Gwenzi, W., N. Chaukura, F.N.D. Mukome, S. Machado, and B. Nyamasoka. 2015. Biochar production and applications in sub-Saharan Africa: Opportunities, constraints, risks and uncertainties. *J. Environ. Manage.* 150:250-261.
- Han, K.H., Y.S. Zhang, K.H. Jung, H.R. Cho, and Y.K. Sonn. 2014. Evaluating germination of lettuce and soluble organic carbon leachability in upland sandy loam soil applied with rice husk and food waste biochar. *Korean J. Agric. Sci.* 41(4):369-377.
- Hilber, I., A.C. Bastos, S. Loureiro, G. Soja, A. Marz, G. Cornelissen, and T.D. Bucheli. 2017a. The different faces of biochar: Contamination risk versus remediation tool. *J. Environ. Eng. Landscape Manage.* 25:86-104.
- Hilber, I., P. Mayer, V. Gouliarmou, S.E. Hale, G. Cornelissen, H.-P. Schmidt, and T.D. Bucheli. 2017b. Bioavailability and bioaccessibility of polycyclic aromatic hydrocarbons from (post-pyrolytically treated) biochars. *Chemosphere* 174:700-707.
- IBI. 2015. Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil. Version of November 23, 2015. https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2023/01/IBI_Biochar_Standards_V2.1_Final.pdf.
- IPCC. 2019. Appendix 4 - Method for estimating the change in mineral soil organic carbon stocks from biochar amendments: Basis for future methodological development. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch02_Ap4_Biochar.pdf.
- IPCC. 2022. Carbon dioxide removal. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/outreach/IPCC_AR6_WGIII_Factsheet_CDR.pdf.

- IPCC. 2023. Summary for policymakers. p. 1-34. In Core Writing Team et al. (ed.) *Climate Change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.
- Ippolito, J.A., L. Cui, C. Kammann, N. Wrage-Mönnig, J.M. Estavillo, T. Fuertes-Mendizabal, M.L. Cayuela, G. Sigua, J. Novak, and N. Borchard. 2020. Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: A comprehensive meta-data analysis review. *Biochar* 2:421-438.
- Ithaka Institute. 2022. Guidelines for carbon sink certification for artisan biochar production. Version 1.0 (6th October 2022). Carbon Standards International (CSI), Frick, Switzerland. https://www.carbon-standards.com/docs/transfer/36_400EN.pdf.
- Jang, J.E., G.J. Lim, J.S. Park, J.M. Shim, C.S. Kang, and S.S. Hong. 2018. Application effects of biochar derived from pruned stems of pear tree on growth of crops and soil physico-chemical properties. *J. Korea Org. Resour. Recycl. Assoc.* 26(4):11-19.
- Kim, J., G. Yoo, D. Kim, W. Ding, and H. Kang. 2017. Combined application of biochar and slow-release fertilizer reduces methane emission but enhances rice yield by different mechanisms. *Appl. Soil Ecol.* 117-118:57-62.
- Kim, M. and G. Kim. 2014. Analysis of environmental impacts for the biochar production and soil application. *J. Korean Soc. Environ. Eng.* 36(7):461-468.
- Kim, Y.S., K.H. Kim, J.W. Han, T.G. Jeong, M.J. Kim, and I.J. Kim. 2022. Effect of rice hull-derived biochar application on watermelon growth, and soil physico-chemical properties under greenhouse. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 55(3):175-184.
- Ko, H.J. and K.Y. Kim. 2016. Heavy metals contents and chemical characteristics in compost from animal manures. *J. Korean Soc. Occup. Environ. Hyg.* 26(2):170-177.
- Lee, J.M., D.G. Park, S.S. Kang, E.J. Choi, H.S. Gwon, H.S. Lee, and S.I. Lee. 2021. Greenhouse gas emissions according to application of biochar by soil type in the closed chamber. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 54(4):451-466.
- Lehmann, J. and S. Joseph. 2015. Chapter 1: Biochar for environmental management: An introduction. p. 1-13. In J. Lehmann and S. Joseph (ed.) *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation*. Routledge, New York, NA, USA.
- Lehmann, J., J. Gaunt, and M. Rondon. 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - a review. *Mitigation Adapt. Strategies Global Change* 11:403-427.
- Lehmann, J., S. Abiven, M. Kleber, G. Pan, B.P. Singh, S.P. Sohi, and A.R. Zimmerman. 2015. Chapter 10: Persistence of biochar in soil. p. 233-280. In J. Lehmann and S. Joseph (ed.) *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation*. Routledge, New York, NA, USA.
- Lehmann. 2007. A handful of carbon. *Nature* 447(7141):143-144.
- Li, S. and D. Tasnady. 2023. Biochar for soil carbon sequestration: Current knowledge, mechanisms, and future perspectives. *C* 9(3):67.
- McDonald, H., N. Bey, L. Duin, A. Frelih-Larsen, L. Maya-Drysdale, R. Stewart, C. Pätz, M.N. Hornsleth, C. Heller, and P. Zakkour. 2021. Certification of carbon removals. Part 2: A review of carbon removal certification mechanisms and methodologies. REP-0796. Umweltbundesamt GmbH, Vienna, Austria. <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0796bfz.pdf>.
- Nabuurs, G.J., R. Mrabet, A. Abu Hatab, M. Bustamante, H. Clark, P. Havlik, J. House, C. Mbow, K.N. Ninan, A. Popp, S. Roe, B. Sohngen, and S. Towprayoon. 2022. Chapter 7: Agriculture, forestry and other land uses (AFOLU). In P.R. Shukla et al. (ed.) *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.009.
- Nasdaq. 2021. Nasdaq acquires emerging carbon removal market Puro.earth. <http://www.nasdaq.com/press-release/>

- nasdaq-acquires-emerging-carbon-removal-market-puro.earth-2021-06-14.
- NIAST. 1992. Korean soil review. National Institute of Agricultural Technology, RDA, Suwon, Korea.
- Omondi, M.O., X. Xia, A. Nahayo, X. Liu, P.K. Korai, and G. Pan. 2016. Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data. *Geoderma* 274:28-34.
- Park, J.H., S.W. Kang, J.J. Yun, S.G. Lee, S.H. Kim, J.S. Beak, and J.S. Cho. 2021. Effects of co-application of biochars and composts on lettuce growth. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 54(2):151-160.
- Pathak, M., R. Slade, P.R. Shukla, J. Skea, R. Pichs-Madruga, and D. Ürge-Vorsatz. 2022. Technical Summary. In P.R. Shukla et al. (ed.) *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.002.
- Puro.earth and Nasdaq. 2023. Carbon removals: Achieving a net-negative economy. <https://www.nasdaq.com/solutions/carbon-removal-platform>.
- Puro.earth. 2022. Puro standard Biochar methodology Edition V2. <https://puro.earth/methodologies/>.
- Rathnayake, D., H.-P. Schmidt, J. Leifeld, J. Mayer, C.A. Epper, T.D. Bucheli, and N. Hagemann. 2023. Biochar from animal manure: A critical assessment on technical feasibility, economic viability, and ecological impact. *GCB Bioenergy* 15:1078-1104.
- RDA. 2023. Fertilizer control act. Rural Development Administration. <https://www.law.go.kr/>.
- Roe, S., C. Streck, R. Beach, J. Busch, M. Chapman, V. Daioglou, A. Deppermann, J. Doelman, J. Emmet-Booth, J. Engelmann, O. Fricko, C. Frischmann, J. Funk, G. Grassi, B. Griscom, P. Havlik, S. Hanssen, F. Humpenöder, D. Landholm, G. Lomax, J. Lehmann, L. Mesnildrey, G.-J. Nabuurs, A. Popp, C. Rivard, J. Sanderman, B. Sohngen, P. Smith, E. Stehfest, D. Woolf, and D. Lawrence. 2021. Land-based measures to mitigate climate change: Potential and feasibility by country. *Global Change Biol.* 27(23):6025-6058.
- Schmidt, H.-P., A. Anca-Couce, N. Hagemann, C. Werner, D. Gerten, W. Lucht, and C. Kammann. 2019. Pyrogenic carbon capture and storage. *GCB Bioenergy* 11:573-591.
- Shin, H.S. and E.J. Hwang. 1998. State and prospects of organic waste composting in Korea. *J. Korea Org. Resour. Recycl. Assoc.* 6(2):7-30.
- UCLA Sustainability. 2023. What is sustainability? <https://www.sustain.ucla.edu/what-is-sustainability/>.
- UNFCCC. 2008a. Methodological tool: Baseline, project and/or leakage emissions from electricity consumption and monitoring of electricity generation. <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-05-v3.pdf>.
- UNFCCC. 2008b. Tool to calculate project or leakage CO₂ emissions from fossil fuel combustion (Version 02). <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-03-v2.pdf>.
- UNFCCC. 2021. Decision 2/CMA.3. Guidance on cooperative approaches referred to in Article 6, Paragraph 2, of the Paris Agreement. UNFCCC, Glasgow, UK.
- USBI and NRCS. 2019. Biochar labeling guidance document. <https://biochar-us.org/sites/default/files/Biochar%20labeling%20guidance%205-23-19%20final.pdf>.
- USDA NRCS. 2022. Conservation practice standard soil carbon amendment (Code 336). <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-11/336-NHCP-CPS-Soil-Carbon-Amendment-2022.pdf>.
- Verra. 2023. VM0044: Methodology for biochar utilization in soil and non-soil applications (Version 1.1). <https://verra.org/methodologies/vm0044-methodology-for-biochar-utilization-in-soil-and-non-soil-applications/>.
- Wang, A., D. Zou, L. Zhang, X. Zeng, H. Wang, L. Li, F. Liu, B. Ren, and Z. Xiao. 2019. Environmental risk assessment in livestock manure derived biochars. *RSC Adv.* 9(69):40536-40545.
- Wang, A., D. Zou, X. Zeng, B. Chen, X. Zheng, L. Li, L. Zhang, Z. Xiao, and H. Wang. 2021. Speciation and environmental risk of heavy metals in biochars produced by pyrolysis of chicken manure and water-washed swine manure.

Sci. Rep. 11:11994.

Wang, L., J. Deng, X. Yang, R. Hou, and D. Hou. 2023. Role of biochar toward carbon neutrality. *Carbon Res.* 2(1):2.

Woo, S.H. 2013. Biochar for soil carbon sequestration. *Clean Technol.* 19(3):201-211.

Woolf, D., J. Lehmann, S. Ogle, A.W. Kishimoto-Mo, B. McConkey, and J. Baldock. 2021. Greenhouse gas inventory model for biochar additions to soil. *Environ. Sci. Technol.* 55(21):14795-14805.

Xiang, L., S. Liu, S. Ye, H. Yang, B. Song, F. Qin, M. Shen, C. Tan, G. Zeng, and X. Tan. 2021. Potential hazards of biochar: The negative environmental impacts of biochar applications. *J. Hazard. Mater.* 420:126611.

Yi, Q., F. Qi, G. Cheng, Y. Zhang, B. Xiao, Z. Hu, S. Liu, H. Cai, and S. Xu. 2013. Thermogravimetric analysis of co-combustion of biomass and biochar. *J. Therm. Anal. Calorim.* 112:1475-1479.

Zhang, J., F. Wang, S.S.K. Yalamarty, N. Filipczak, Y. Jin, and X. Li. 2022. Nano silver-induced toxicity and associated mechanisms. *Int. J. Nanomed.* 17:1851-1864.