

산불피해강도가 소나무림 산림토양의 열화탄소 생성에 미치는 영향 분석

김태현¹ · 최다현² · 임상준^{2,3*}

¹아시아산림협력기구, ²서울대학교 농림생물자원학부, ³서울대학교 농업생명과학연구원

Effects of Vegetation Burn Severity on the Composition of Pyrogenic Carbon in Pine Forest Soils

Taehyun Kim¹, Dahyeon Choi² and Sangjun Im^{2,3*}

¹Asian Forest Cooperation Organization, Seoul 07330, Korea

²Department of Agriculture, Forestry and Bioresources, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

³Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

요약: 전세계적으로 기후변화로 인해 대형산불의 빈도와 강도가 점차 강해지며, 산불연료 연소로 인한 탄소배출에 대한 관심도 증가하고 있다. 산불 후 형성된 열화탄소는 분해저항성이 높아 산불피해지에 장기간 탄소를 저장하지만, 침식에 취약하여 산불 직후에 바람과 강우에 의해 쉽게 유출된다. 이 연구는 국내 소나무림에서 발생한 대형 산불피해지를 대상으로, BPCA법을 활용하여 산불에 의해 형성된 연소잔여물과 토양의 총유기탄소와 열화탄소를 분석하였다. 또한, 중단기 모니터링을 통해 토양표면과 토양 속 열화탄소의 잔류량을 분석하였으며, 식생의 산불피해도가 심할수록 연소잔여물의 유기탄소 축적량(1.1-2.1 MgC/ha)과 열화탄소 축적량(18.3-443.0 kgC/ha)이 증가함을 확인하였다. 그러나 연소잔여물이 사라짐에 따라 열화탄소의 지표축적량이 초기에 비해 30일 후 87.8% 감소하였다. 산불 진화 후부터 첫 조사 전에 강우가 발생한 산불 피해지는 상부 토양에서 토양의 열화탄소가 관측되었으며, 최소 2년, 최대 19년까지 잔류함을 확인하였다. 이 연구에서는 BPCA법을 이용한 열화탄소 분석 방법의 적용 가능성을 확인하였으며, 산불 직후 토양침식 방지 공법 및 응급복구조립 등을 통하여 산불피해지의 탄소 유출을 막고 열화탄소를 체류시켜, 산불에 의해 배출되는 이산화탄소량을 상쇄하고 궁극적으로 산림의 탄소 저장량 증대에 기여할 것이다.

Abstract: Due to climate change, the frequency and intensity of wildfires are increasing worldwide, drawing substantial attention to wildfire-induced carbon emissions. Pyrogenic carbon (PyC) generated during wildfires is highly resistant to decomposition, enabling it to act as a temporary carbon sink within burned areas. However, it is also susceptible to erosion and can be transported from waterbodies by wind and rainfall shortly after a fire. In this study, we examined total organic carbon (TOC) and PyC contents in combustion residues and soils from fire-affected *Pinus densiflora* forests in Korea using the benzene polycarboxylic acid (BPCA) method. The results showed that the accumulation of OC (1.1-2.1 Mg C ha⁻¹) and PyC (18.3-443.0 kg C ha⁻¹) in combustion residues increased with burn severity. However, surface-accumulated PyC declined by 87.8% within 30 days as combustion residues diminished. In burned sites that received rainfall before the first sampling, PyC was identified in upper soil layers, where it persisted for at least 2 years and up to 19 years. This study highlights the utility of the BPCA method for quantifying PyC in wildfire-affected soils in Korea and indicates that post-fire erosion control measures and emergency reforestation could reduce PyC loss, thereby helping offset wildfire-induced CO₂ emissions and strengthening the long-term carbon storage capacity of forest ecosystems.

Key words: pyrogenic carbon, organic carbon, BPCA analysis

서론

산불은 지표면의 유기물을 연소시켜 대기 중으로 많은 양

의 이산화탄소를 방출한다(Dong et al., 2023; Singh, 2022). 2023년 산불로 인하여 전세계적으로 약 2.2 PgC의 탄소가 배출되었으며, 이는 2023년 전체 탄소 배출량의 5.8%에 해당한다(Coppola et al., 2022). 우리나라도 2025년 경북 지역에서 동시다발 발생한 대형산불로 인해 10.4만ha의 산림이 연소되었으며, 약 764만 톤 Co2eq의 온실가스가 배출된 것으로 추정되었다(NiFoS, 2025). 이처럼 우리나라를 비롯하여

* Corresponding author
E-mail: junie@snu.ac.kr

ORCID

Sangjun Im  https://orcid.org/0000-0003-3782-9288

전세계적으로 점차 산불의 빈도와 강도가 강해짐에 따라 산불에 의한 탄소 배출량은 증가할 것으로 예측된다(UNEP, 2022).

산불로 인해 완전연소된 유기물은 이산화탄소 형태로 대기 중으로 방출되며, 불완전연소된 유기물은 연소잔여물(Pyrogenic Organic Matter, PyOM)의 형태로 지표에 체류한다(Bird et al., 2015; Santín et al., 2015; Coppola et al., 2022). 연소잔여물은 특정 유기물만을 지칭하는 것이 아닌 다양한 크기의 연속체로서 Char, Charcoal, Soot, Ash, Micrographite 등을 통칭한다(Preston and Schmidt, 2006; Bird et al., 2015). 연소잔여물에 존재하는 유기탄소(Organic Carbon, OC)의 일부는 열화학 작용으로 방향족 축합(Aromatic condensation)이 진행됨에 따라 다환 방향족 탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)가 결합된 열화탄소(Pyrogenic Carbon, PyC) 연속체의 형태를 가진다(Schmidt and Noack, 2000; Bird et al., 2015; Coppola et al., 2022). 열화탄소는 유기탄소 복합체가 연소됨에 따라 작용기가 탈락한 원소탄소 형태의 구조체로, 일반적인 유기탄소보다 물리·화학적인 분해에 저항성이 높아 장기적으로 탄소를 저장하는 효과가 있다(Preston and Schmidt, 2006; Bird et al., 2015; Figure 1).

열화탄소의 형성에는 온도, 연소 지속시간, 산소 가용성 등이 영향을 미치며, 온도가 높아질수록 PAHs 군집의 크기가 커지고 미생물에 의한 분해 저항성이 증가한다(Bird et al., 2015; Santín et al., 2015; Abney and Berhe, 2018). 미생물 군집의 특성, 효소의 활성도, 환경 조건에 따라 차이가 있지만 열화탄소의 잔류시간(Residence time)은 수 세기부터 수 천년까지 지속된다(Lehmann et al., 2006; Preston and Schmidt, 2006; Bird et al., 2015; Santín et al., 2015; Abney and Berhe, 2018; Coppola et al., 2022). 이에 따라 열화탄소는 탄소순환의 측면에서 분자 구조화된 탄소 중 가장 잔류시간이 길고 양적으로 많은 부분을 차지한다(Reisser et al., 2016; Coppola et al., 2022).

또한, 열화탄소는 일반 유기탄소에 비해 분해 속도가 느리기 때문에, 산불피해지의 열화탄소 체류는 산불에 의한 이산화탄소 배출 효과를 상쇄할 수 있다(Santín et al., 2015; Coppola et al., 2022). 이러한 산불의 탄소 저장(Carbon storage) 기능에 관한 연구는 아직 기초 단계에 머물러 있으며, 열화탄소의 정량화와 잔류시간 등을 평가하기 위한 분석 방법은 명확히 정립되지 않았다(Hammes et al., 2007; Zimmerman and Mitra, 2017; Bostick et al., 2018).

토양은 유기물과 무기물이 혼합된 지오폴리머(geopolymer) 형태를 가지기 때문에, 열화탄소의 탐지가 대기와 물에 비해 어렵다(Zimmerman and Mitra, 2017). 이에 따라 375°C의 열화학적 산화로 분해에 강한 열화탄소를 특정하여 정량화하거나(CTO-375), 13C 핵자기공명영상 분석을 통해 주피수에 따른 열화탄소 분자의 분광특성으로 열화탄소의 다환방향족 구조를 분석하는 방법이 주로 쓰여왔다(Zimmerman and Mitra, 2017; Bucheli et al., 2004; Simpson and Hatcher, 2004). 그러나 최근에는 분석 대상 물질을 질산, 염산 등으로 분해하고 BPCA(Benzene polycarboxylic acids) 표준물질의 크로마토그래피와 비교하여 열화탄소의 종류와 함량을 분석하는 BPCA 분자마커법이 사용되고 있다(Brodowski et al., 2005; Wiedemeier et al., 2015; Zimmerman and Mitra, 2017). BPCA법은 PAHs와 같은 고분자의 열화탄소 연속체를 질산화(Nitration)하여 작은 분자 단위로 쪼갬 후, 각 BPCA 분자 함량을 정량분석하는 방법이다(Brodowski et al., 2005; Ziolkowski et al., 2011; Wiedemeier et al., 2015; Zimmerman and Mitra, 2017). BPCA법의 분석 대상 분자는 벤젠고리에 3-6개의 카르복실산(Carboxylic acid)이 붙어있는 형태로, 이들 분자의 각 함량에 따라 방향족 축합, 생성 온도, 잠재 수명 등 열화탄소의 특성을 분석할 수 있다는 장점이 있다(Schneider et al., 2011; Ziolkowski et al., 2011; Wiedemeier et al., 2015; Vaezzadeh et al., 2023a,b).

초본과 낙엽 등의 산림유기물은 상대적으로 가볍고 침식에 취약한 연소잔여물을 생성하고, 리그닌이 풍부한 목질로부터 고온의 조건에서 형성된 열화탄소는 방향족 축합 정도가 증

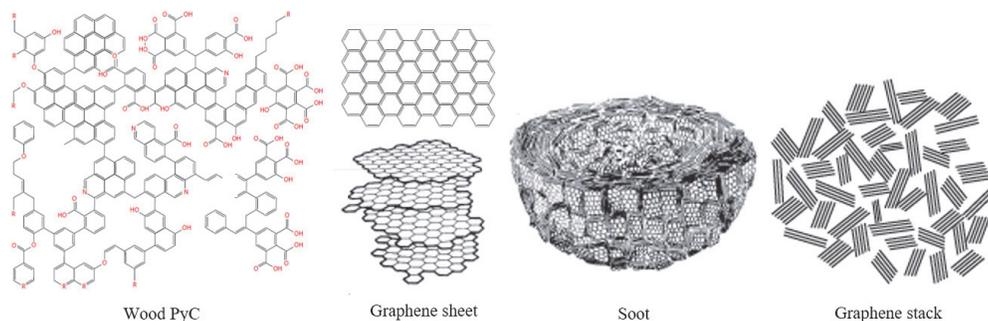


Figure 1. PyC and soot molecular structures(Bird et al., 2015; Preston and Schmidt, 2006).

가하기 때문에 고분자의 BPCA(B5CA, B6CA) 함량이 증가한다(Schneider et al., 2010; 2011; Ziolkowski et al., 2011; Bird et al., 2015; Wiedemeier et al., 2015; Abney et al., 2019a). 그러나 BPCA 분자 중 B3CA와 B4CA는 산분해 과정 중 열에 의해 변형되지 않은 유기탄소 연속체로부터 분해되어 나올 수 있기 때문에 연소잔여물의 열화탄소량을 과대 추정할 가능성이 존재한다(Kappenberg et al., 2016; Bostick et al., 2018; Goranov et al., 2024). 이에 따라 BPCA 분석과정에서 검출되는 고분자(B5CA와 B6CA)를 열에 의해 응축된 방향족 탄소(Condensed aromatic carbon, ConAC)로 정의하여 열화탄소를 분석하기도 한다(Kappenberg et al., 2016; Bostick et al., 2018; Goranov et al., 2024).

국내 산불피해지의 열화탄소에 관한 선행연구에서는 PAH 분자마커법을 주로 활용하였는데(Kim et al., 2011; Choi, 2014), 자연상태에 존재하는 PAH는 주로 화석연료의 연소와 유류 유출로부터 기인하기 때문에 산불에 의한 영향을 정확하게 분리해 낼 수 없다(Choi, 2014; Yim et al., 2014). 국내의 열화탄소 분석 선행연구에 따르면 미피해지에서도 PAH가 검출되기 때문에, 산불에 의한 열화탄소의 형성량을 정량 분석하기 어렵다.

Kim et al.(2011)은 2000년 발생한 동해안 산불피해지 토양의 PAH 함량을 정성 및 정량 분석하였으며, 장마 후 산불 직후에 비해 평균 83.1%의 총 PAHs가 감소하였다. Choi(2014)는 2004년에 발생한 산불피해지 소나무의 수피와 잎, 토양의 PAH 함량을 분석하였다. 모든 분석 대상의 총 PAHs는 산불 후 시간에 따라 감소하였으며, 수피에 총 PAHs가 가장 많았다.

Nguyen et al.(2009)은 최대 100년 전부터 현재까지 진행된 화전 농업지를 대상으로 열화탄소의 잔류시간을 분석하였으며, 열화탄소의 분해속도와 토양으로의 수평 및 수직 이동을 고려하여 열화탄소는 약 8.3년 동안 잔류할 수 있다고 하였다.

이처럼 국외에서는 다양한 접근이 이루어지고 있으나, 우리나라 소나무림에서 발생하는 산불피해지의 열화탄소의 생

성과 체류에 관한 연구는 매우 부족한 상황이다. 산불에 의해 형성되는 열화탄소의 거동을 정량적으로 규명할 수 있다면, 산불피해지의 탄소 저장 기능을 재평가하고 탄소 순환 모델의 정확도를 높일 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 열화탄소 정량화 기법을 제시하고, 국내에서 발생한 산불피해지의 열화탄소량을 분석하여, 산불피해지 토양 내 열화탄소의 형성 특성을 평가하고자 한다.

재료 및 방법

1. 연구대상지 및 개요

이 연구는 2022년 영덕 산불피해지와 울진·삼척 산불피해지, 2023년 합천 산불피해지와 금산·대전 산불피해지의 토양시료를 채취하여 실시하였다(Figure 2). 추가적으로 열화탄소의 체류시간을 추정하기 위해 2005년 양양 산불피해지와 2019년 강릉·동해 산불피해지에서 토양교란이 발생하지 않은 미벌채지를 대상으로 토양시료를 채취하였다.

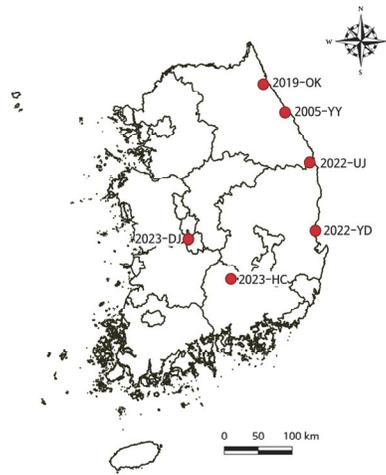


Figure 2. Locations of forest fire-affected areas in the study (OK: Okgye, YY: Yangyang, UJ: Uljin, YD: Yeongdeok, DJ: Daejeon, HC: Hapcheon).

Table 1. Vegetation burn severity classification used in the study (NIFoS, 2013; Li et al., 2021).

Wildfire type	Class	Definition
Crown-fuel Consumption (CC)	Severe	Areas where the canopy has been completely burnt out and charred organic matter and ash have covered the soil surface.
Foliage Necrosis (FN)	Mild	Areas where the canopy is partially burned and more than 60% of canopy is degraded by thermal radiation.
Surface-fuel Consumption (SC)	Light	Areas where more than 60% of the canopy survived, surface fuel and lower vegetation were all burned.
Unburned (UB)	Control	Areas unaffected by wildfire

연구대상지는 국립산림과학원에서 식생피해를 기준으로 분류한 산불피해지도를 적용하여 산불피해 정도를 구분하였다(Table 1).

또한, 사면 경사에 따라 산불 후 연소잔여물의 생성량과 토양과 유기탄소의 이동이 달라지기 때문에, 「산림자원의 조성 및 관리에 관한 법률」의 “공·사유림 경영계획 작성 및 운용요령”에 따라 연구대상지를 급경사(>25°), 중경사(15-25°), 완경사(<15°)로 각각 구분하였다.

2022 영덕 산불피해지(2022-YD)는 총 405 ha 면적이 산불 피해를 입었으며, 주요 수종은 3-4영급 소나무림(*Pinus densiflora*)이었다(Figure 3). 2022 울진·삼척 산불피해지(2022-UJ)는 총 16,301 ha의 산림이 산불로 인해 피해를 받았으며(KFS, 2022), 4-5영급 소나무와 일부 참나무류가 분포하였다. 2023 합천 산불피해지(2023-HC)는 약 179 ha의 산림이 연소되었으며, 4-5영급의 소나무가 주로 분포하였고, 2023 금산·대전 산불피해지(2023-DJ)는 총 889 ha의 산림이 연소되었으며, 주요 수종은 3-4영급의 소나무이었다. 토양의 4개 산불피해지에서 모두 *Inceptisol*로 분류되었다.

2. 연소잔여물 및 토양시료 채집 방법

산불피해지에서의 열화탄소 분석을 위해 연소잔여물과 토양시료를 각 연구대상지에서 채취하였다. 시료 채취를 위해 20 cm×20 cm 크기의 사각형 모서리와 중심부의 총 5 지점에서 연소잔여물의 두께를 측정 후, 연소잔여물을 시료 상자에 채취하였다. 채취한 연소잔여물은 실험실에서 105°C에서 24시간 오븐 건조 후, 수분함량과 건조 중량을 측정하였다. 총유기탄소(Total Organic Carbon, TOC)는 서울대학교 농생명과학공동기기원(National Instrumentation Center for Environment Management, NICEM)에 의뢰하여 분석하였으며, 동일한 시료를 이용하여 열화탄소 함량을 분석하였다.

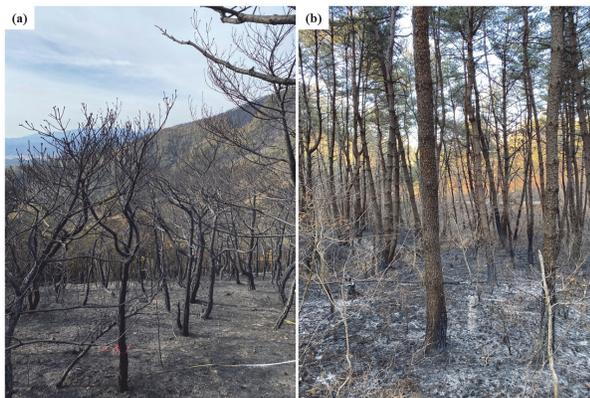


Figure 3. (a) Crown-fuel Consumption forest, (b) Surface-fuel Consumption forest. Both photos were taken immediate after the 2022-YD fire.

토양 채집을 위해 연소잔여물을 채집한 지점의 0층 토양을 제거하고 토양 깊이 5 cm와 15 cm 지점에서 토양궤(100 ml)과 채토기를 사용하여 미교란 시료를 채취하였으며, 열화탄소 분석을 위한 교란 시료도 추가로 현장 채취하였다.

3. BPCA법을 활용한 열화탄소 추정 및 분석방법

열화탄소 분석은 Wiedemeier(2014)가 제안한 고성능액체크로마토그래피(High Performance Liquid Chromatography, HPLC) 분석 방법을 활용하였으며, BPCA법을 활용하여 분석물질 내 각 BPCA분자의 비율과 양을 분석하고, BPCA 분자들의 비율에 따른 연소잔여물의 형성 온도를 추정하였다. 이때 연소잔여물과 같이 유기탄소의 함량이 높은 물질을 대상으로 산분해 하면 B3CA와 B4CA가 형성될 수 있기 때문에, 고분자의 함량만을 활용하여 열화탄소를 정량적으로 분석하였다. 모든 전처리 과정이 동일하지는 않지만, 분석의 목적물질이 동일하기 때문에 가장 최근에 제시된 Bostick et al.(2018)이 제안한 조정계수를 이용하여 BPCA 분자에 포함된 열화탄소의 함량을 계산하였다(식 1)(Kappenberg et al., 2016; Bostick et al., 2018; Goranov et al., 2024). 한편 이 연구에서는 총 탄소는 분석하지 않아 총유기탄소 함량을 이용하여 열화탄소 함량을 계산하였다.

$$PyC = \frac{7.04 \times [B6CA_c(mg) + B5CA_c(mg)]}{Sample\ weight(mg) \times OC(\%)} \times 100 \quad (1)$$

연소잔여물과 토양의 열화탄소는 B3CA, B4CA만 존재하면 열화탄소가 없는 경우(0)로, BPCA가 전혀 검출되지 않은 경우 ND(No Data)로 표현하였다. 연구대상지의 산불피해도, 지형경사, 산불 후 경과시간에 대하여 각각 현장 채취한 6개의 연소잔여물에 대해 열화탄소를 분석하였으며, 토양은 0-10 cm (5 cm 채취) 3개 시료에 대해 열화탄소를 분석하였다.

BPCA법에 따른 열화탄소 분석 절차는 크게 질산 분해, 양이온 제거, 비극성 화합물 제거, 크로마토그래피 분석으로 나뉜다. 첫 번째로, 질산 분해를 위해 분석용 연소잔여물과 토양을 모두 2 mm 토양체로 거름하여 막자사발로 분쇄한 후, 1000 mg의 토양시료를 압력분해장치(Ecopre, OdLlab社) 테프론 용기에 담아, 65% 질산 용액 2 ml 투입 후 170°C에서 8시간 동안 순환 분해를 진행하였다. 이후 분해된 용액을 045 μm의 syringe filter로 여과 후 3차 증류수를 25 ml까지 투입한 후 냉장보관하였다. 이후, 양이온 제거를 위해 유리칼럼(직경 15 mm, 높이 400 mm)에 양이온 치환 레진(Dowex Mac-3 (H+) Cation Exchange Resion, Aldrich社)을 11 g 투입하였다. 투입 후, 3차 증류수 2회, 2M-NaOH 용액 1회,

Table 2. BPCA standards list and molecular formula.

	Isomer	BPCA Standards	Molecular formula
B6CA	-	Mellitic	$C_{12}H_6O_{12}$
B5CA	-	Pentacarboxylic	$C_{11}H_6O_{10}$
B4CA	1,2,4,5	Pyromellitic	$C_{10}H_6O_8$
B3CA	1,2,3	Hemimellitic	$C_6H_3(CO_2H)_3$
	1,2,4	Trimellitic	

Table 3. Chromatography Settings for BPCA analysis(Wiedemeier et al., 2016).

Column	C18 reversed phase
Column temperature	15°C
Flow rate	0.4 ml/min
Identification	Retention time, UV absorption at 216 nm
Quantification	External standards of BPCAs
Pressure	120 bar
Mixing Gradient of Mobile Phases	
Time [min]	Mobile phase B [vol%]
0	0.5
5	0.5
25.9	30
26	95
28	95
28.1	0.5
30	0.5

3차 증류수 2회, 2M-HCL 1회, 마지막으로 3차 증류수 2회를 통과시켜 세척 하였다. 세척 후, 3차 증류수를 통과시켜 전기 전도기(Thermo scientific사)를 이용하여 용액의 전기전도도가 2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 미만으로 감소할 때까지 3차 증류수로 세척하였다. 전기전도도 확인 후, 준비된 시료를 양이온 치환 레진이 담긴 유리칼럼에 통과시킨 후, 통과된 용액에 3차 증류수를 50 ml까지 투입하여 동결 건조를 진행하였다. 이 과정에서 준비된 시료는 약 일주일동안 냉장 보관이 가능하다. 세 번째로, 비극성 화합물 제거를 위해 2.5 ml 메탄올과 5 ml 증류수를 1:1로 혼합하여, C18 고체상 추출 카트리지(Empore C18-SD, Merck社)를 세척 후, 메탄올-증류수 혼합액을 이용하여 동결 건조된 시료를 용해시킨 후 카트리지에 투입하였다. 이후, 질소가스 농축기로 45°C에서 50mbar의 압력으로 농축 후, 증류수 1 ml를 투입하여 냉장 보관 하였다. 마지막으로, 크로마토그래피 분석을 위해 85% 인산 20 ml와 3차 증류수 980 ml 혼합 용액을 제조한 후, 진공상태로 유리섬유 필터 통과시켜 용매 A를 준비하였고, 고순도 아세트나이트릴 용액을 용매 B로 준비하였다(Figure 4). 표준 농도 계산을 위해 각 BPCA 표준물질(Table 2)로 5, 10, 20, 50, 100, 200 $\mu\text{g}/\text{ml}$ 용액을 제조한 후 Table 3과 같이 크로마토그래피 분석을 진행하였다. 비극성 화합물 제거와 크로마토그래피 분석은 농생명과학공동기기원에 분석의뢰를 하여 진행하였다.

결과 및 고찰

1. 연소잔여물의 열화탄소 분석

Table 4와 Figure 5는 연소잔여물의 산불피해도별 생성량과 탄소함량 BPCA 분자 구성을 나타낸다. 토양과 연소잔여물의 유기탄소와 물리적 특성, BPCA 구성에 대하여 K-W 분석을 수행하였다. 연소잔여물층 두께는 경피해지가 19.3

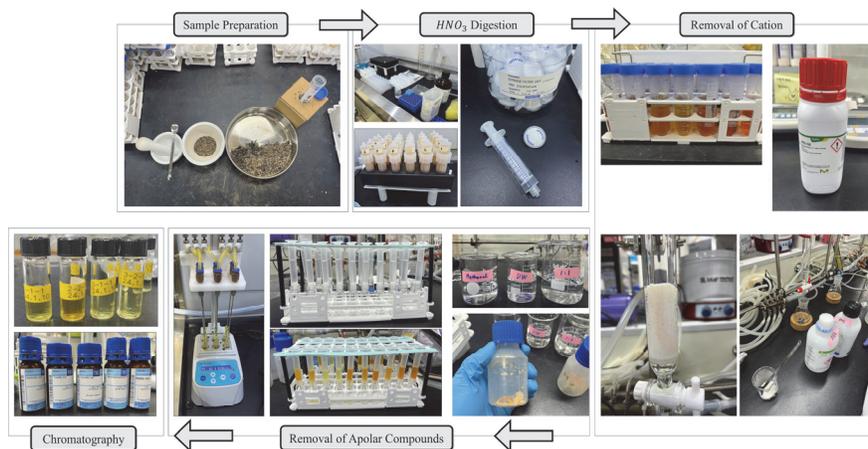


Figure 4. Preprocessing procedure for PyC analysis using BPCA method.

Table 4. Physical properties and Organic carbon of PyOM and PyC contents with BPCA analysis results based on severity. The superscript shows statistical groups by significance level(=0.05).

Burn Severity (n)	PyOM thickness (mm)	BD ¹ (g/cm ³)	MC ² (%)	PyOM ³ load (Mg/ha)	TOC ⁴ (%)	TOC load (MgC/ha)	PyC ⁵ load (kgC/ha)	PyC/TOC (%)	B5CA (%)	B6CA (%)
CC (19)	8.4±4.9 ^{ab}	0.27±0.21 ^a	2.3±1.8 ^a	21.9±23.6	13.4±9.7 ^a	2.1±1.9	443.0±766.8	16.5±22.7	14.6±13.4	15.2±12.7
FN (9)	6.6±4.7 ^b	0.40±0.27 ^a	3.4±5.1 ^a	26.5±18.4	5.4±7.4 ^b	1.4±1.0	429.7±677.7	21.8±32.6	22.2±12.7	24.5±31.0
SC (5)	19.3±8.3 ^a	0.04±0.02 ^b	7.5±1.4 ^b	6.6±2.9	16.1±1.6 ^a	1.1±1.2	18.3±14.4	2.4±3.6	6.2±6.2	2.0±2.0

Notes: Mean±s.d.; BD¹: Bulk Density; MC²: Moisture Content; PyOM³: Pyrogenic Organic Matter; TOC⁴: Total Organic Carbon; PyC⁵: Pyrogenic Carbon.

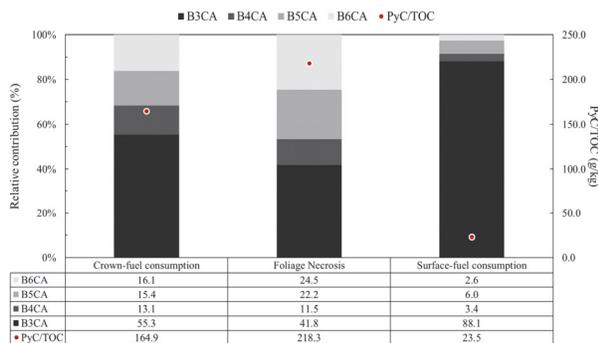


Figure 5. Relative contribution of BPCA molecules and PYC content based on burn severity.

mm로 중피해지 6.6 mm, 심피해지 8.4 mm에 비해 가장 두꺼웠다. 단위면적당 연소잔여물층의 생성량은 중, 심, 경피해지 순으로 많았지만, 조사 지역별 편차가 크게 나타나 통계적으로 유의미한 차이가 없었다(p>0.05). 단위면적당 연소잔여물층에 존재하는 유기탄소량은 심, 중, 경피해지 각각 2.1±1.9, 1.4±1.0, 1.1±1.2 MgC/ha로 심피해지가 가장 많았지만, 통계적으로 유의미한 차이는 없었다(p>0.05).

열화탄소 함량은 심, 중, 미피해지 순으로 적었으며, 단위면적당 연소잔여물의 열화탄소 함량도 심, 중, 미피해지 순으로 감소했지만 통계적인 차이는 나타나지 않았다(p>0.05). 총유기탄소 중 열화탄소가 차지하는 비율의 평균은 심피해지 16.5%, 중피해지 21.8%, 미피해지 2.4%로, 중피해지가 가장 높고 경피해지에서 가장 낮았다(Table 4). BPCA분자 중 열화탄소에 해당하는 B5CA+B6CA는 심피해지는 26.7±24.4%, 중피해지 41.7±32.6%, 경피해지 8.3±6.9%로 심피해지와 중피해지에서 높게 나타났지만 통계적으로 유의미한 차이는 없었다(p>0.05).

경피해지는 다른 지역에 비해 연소잔여물층이 가장 두껍게 형성됐지만, 열화탄소의 함량이 적고 유기탄소의 함량이 많아 산불의 강도가 가장 약했음을 알 수 있다. 심피해지와 중피해지의 연소잔여물층은 두께가 얇고, 열화탄소의 함량과 B5CA+B6CA의 비율이 높아 경피해지보다는 강한 피해를 입었음을 추정할 수 있다. 연소잔여물층의 두께도 심피해지가 중피해지보다 두껍고, 총유기탄소의 함량이 많고 PyC/TOC

가 중피해지보다 낮기 때문에 중피해지에 비해 연소 강도가 약하다고 판단할 수 있지만, 열화탄소의 함량은 중피해지보다 많았다(Schneider et al., 2010; Bird et al., 2015; Wiedemeier et al., 2015; Abney et al., 2019a). 그러나 동일한 산불피해도 일지라도 산불강도와 지속시간, 진행속도 현장의 연료량과 지형, 경사, 고도 등에 따라 연소잔여물과 열화탄소의 특성이 달라지게 된다(Bird et al., 2015; Santin et al., 2015, 2016; Abney and Berhe, 2018; Miesel et al., 2018; DeLuca et al., 2020).

또한 산불이 진화된 후 연소잔여물은 곧바로 바람과 강우에 의해 이동하기 때문에, 산불 진화 후 조사까지의 시간에 따른 표본 채집의 오류가 발생할 수 있다(Pereira et al., 2012; 2013; 2015; 2019; Miesel et al., 2018; DeLuca et al., 2020). 특히 연소잔여물은 산불 직후 바람침식에 가장 취약하므로, 이 연구는 산불 진화 후 최대한 빠른 시일내에 연소잔여물층 조사를 수행하였다. 합천 산불피해지는 진화 2일 후 첫 강우가 내렸고, 영덕은 진화 4일 후 현장 조사시까지 강우가 내리지 않았다. 이때 산불 진화 후부터 조사 전까지 합천의 시간별 풍속은 평균 1.1±1.1 m/s, 최대 4.6 m/s를 기록하였으며, 영덕은 평균 4.2±2.4 m/s, 최대 9.6 m/s를 기록하였다. 이에 따라 합천과 영덕 산불피해지는 진화 후 곧바로 바람에 노출되어 유역 외부로 연소잔여물이 유실됐을 가능성이 존재한다.

한편, 울진과 대진 산불피해지는 진화와 동시에 비가 내렸으며, 울진 산불피해지는 진화 후 누적강우량 30.8, 22.9 mm의 강우가 내렸고, 대진 산불피해지는 누적강우량 30.6, 13.2 mm 등 총 4회의 강우사상에 노출되었다. 산불피해지에 강우가 발생하면 빗방울이 연소잔여물층을 직접 타격함에 따라 토양 속으로 침투하며, 강한 강도에서 형성된 연소잔여물은 입자가 작기 때문에 토양 내로 침투 및 침투흐름에 의해 용탈된다(Onda et al., 2008; Woods and Balfour, 2010; Stoof et al., 2015). 따라서 산불 진화 후 조사가 된 연소잔여물은 일부분이 사라지거나 혼합되기 때문에 연소잔여물의 탄소, BPCA의 분자비율 등을 활용하여 연소잔여물의 생성온도와 산불의 피해정도를 추정하는 것에는 한계가 있다.

Table 5. PyOM, TOC, and PyC load by elapsed day after forest fire extinction.

	The days after forest fire extinction				
	17	25	32	39	46
PyOM load (Mg/ha)	12.6	11.1	3.9	2.6	1.9
TOC load (MgC/ha)	3.49	3.13	1.07	0.82	0.41
PyC load (MgC/ha)	0.82	0.73	0.24	0.19	0.10

Note: Mean±s.d

Table 5는 연소잔여물층 두께 조사일자별 연소잔여물의 축적량과 유기탄소 및 열화탄소의 축적량을 나타낸다. 연소잔여물의 유기탄소와 물리적 특성은 첫 조사시에만 조사를 수행하였으며, 두께 변화만을 고려하여 연소잔여물과 총유기탄소, 열화탄소의 축적량을 추정하였다. 첫 조사 시 연소잔여물의 축적량은 12.6 Mg/ha로, 연소잔여물층의 두께 분포가 유사한 Gorforth et al.,(2005)을 제외하고 다른 선행연구에 비해서 낮게 나타났다(Cerdà and Doerr, 2008; Woods and Balfour, 2010; Santín et al., 2012). 진화 17일 후부터 시간에

Table 6. PyC analysis of soil samples with antecedent rainfall event occurrence.

Site	Rainfall	Burn severity	Slope	Year	TOC (%)	B6+B5 (%)	PyC/Soil (gC/kg)	PyC/TOC (gC/gC)		
2022-YD	X	SC	M	0	2.03	0.0				
					1.87	0.0				
					1.94	ND				
					1.57	0.0				
					1.66	0.0				
		1.39	ND							
			UB	L	0	3.25±0.93	ND			
		2022-UJ	O	CC	H	0	2.07	0.0		
							2.82	25.1	5.1	0.18
							2.36	63.9	3.7	0.16
1.74	0.0									
1.67	0.0									
1.61	0.0									
1.70	0.0									
1.52	0.0									
1.93	0.0									
	UB				L	0	4.52±0.11	ND		
2023-HC	O	CC	H	0	2.85	0.0				
					3.24	0.0				
					4.19	66.3	26.0	0.62		
					3.62	0.0				
					1.97	0.0				
			1.5	0.0						
				FN	H	0	3.43	61.2	14.3	0.42
							1.34	0.0		
							1.71	ND		
					M	0	2.01	0.0		
				1.93	0.0					
				2.39	0.0					
	UB	L	0	2.15±1.24	ND					
2023-DJ	O	CC	M	0	0.86	60.2	1.17	0.14		
					1.39	61.2	8.47	0.61		
					0.97	62.1	1.96	0.20		
						UB	M	0	1.46±0.11	ND

따라 연소잔여물층의 두께가 감소하여 연소잔여물과 총유기탄소, 열화탄소의 축적량이 감소하였다. 조사 시작 30일 후 총유기탄소 축적량은 3.49 MgC/ha에서 0.41 MgC/ha로 약 3.08 MgC/ha가 유실됨에 따라 88.2% 감소하였으며, 열화탄소는 0.82 MgC/ha에서 0.10 MgC/ha로 0.62 MgC/ha가 유실됨에 따라 87.8% 감소함을 확인하였다.

2. 토양 내 열화탄소 분석

Table 6은 산불 후 첫 조사에서 채집한 0-10 cm 토양의 유기탄소와 열화탄소의 함량을 나타낸다. 모든 대상지의 미피해지에서는 BPCA가 검출되지 않았으며, 산불피해지에서는 영덕의 경피해지와 합천 중피해지의 일부 시료에서 BPCA가 검출되지 않았다. 울진 심피해지의 급경사지와 합천 심피해지와 중피해지의 급경사지, 대전 심피해지의 중경사지를 제외하고는 산불피해지 토양에서는 BPCA가 검출되었지만 B6CA와 B5CA는 검출되지 않았다.

한편, 산불 직후 첫 조사에서 영덕을 제외한 산불피해지에서 열화탄소가 검출되었는데(Table 7), 영덕을 제외한 산불피해지 조사 전에 강우사상이 발생하여 열화탄소가 토양 속으로 수직 이동한 것으로 추정된다(Rumpel et al., 2015; Santín et al., 2016; Abney et al., 2017; Abney et al., 2019b). 연소잔여물은 높은 온도에서 연소될수록 입자의 크기가 작아지고 표면의 극성이 사라진다(Zimmerman, 2010; Wang et al., 2023; Brewer et al., 2014; Rumpel et al., 2015; Abney and Berhe, 2018). 이때 공극이 발달한 토양은 선택류(Preferential flow)가 발달하기 때문에 작은 입자의 연소잔여물이 침투할 가능성이 증가한다(Rumpel et al., 2015; Abney et al., 2019b). 열화탄소가 검출된 심피해지는 모두 사질양토로 분류됐으며, 첫 조사 이전에 강우사상이 발생하였다. 이에 따라 강우에 의해 열화탄소가 토양 속으로 침투하여 0-10 cm 깊이의 토양에서 검출된 것으로 판단된다.

산불 후 12개월과 24개월의 각 지역별 산불피해도와 경사, 경과 개월에 따른 유기탄소 함량과 열화탄소의 함량은 Table 8과 같다. 산불 직후보다 많은 곳에서 열화탄소가 검출되었으며,

산불 후 12개월에는 합천의 심피해 급경사지를 제외하고 모든 지역에서 열화탄소가 검출됐다. 열화탄소가 검출된 토양을 대상으로 산불피해도에 따른 열화탄소의 함량을 분석한 결과, 심피해지의 B6CA+B5CA의 비율은 평균 73.4±28.2%였으며, 중피해지는 60.8±13.3%, 경피해지는 72.5±30.3%로 나타났다. PyC/Soil은 심피해지는 6.70±6.63 gC/kg, 중피해지는 18.56±9.98 gC/kg, 경피해지는 2.84±2.64 gC/kg으로 조사됐다. PyC/TOC는 심피해지 0.37±0.32, 중피해지는 0.48±0.12, 경피해지는 0.21±0.29로 나타났다.

영덕과 울진 산불피해지의 24개월 후 산불피해도에 따른 열화탄소의 분석 결과, B6CA+B5CA의 비율은 심피해지는 67.3±46.2%, 경피해지는 100.0±0.0%로 나타났다. PyC/Soil은 심피해지는 3.6±1.5 mgC/g, 경피해지는 3.3±0.7 mgC/g의 값을 나타냈으며, PyC/TOC의 비율은 심피해지는 0.15±0.07, 경피해지는 0.23±0.06의 값을 나타냈다.

또한 산불피해지 토양 속 열화탄소의 장기간 체류시간을 확인하기 위해 2005 양양 산불피해지와 2019 강릉·동해 산불피해지의 미벌채지를 대상으로 열화탄소를 동일한 방법으로 추가 분석한 결과, 열화탄소가 토양 속에 존재함을 확인하였으며, 다른 피해지와 비교하였을 때 열화탄소의 함량에는 차이가 없었다(Table 9).

Major et al.(2010)에 따르면 열화탄소는 용탈 과정에 의해 토양 속으로 침투하며, 토양 미생물의 호흡에 의해 무기화되어 사라진다. Abney et al.(2019b)는 연소잔여물의 생성온도가 토양 미생물의 호흡량에 미치는 영향에 대하여 분석하였는데, 200°C보다 500°C에서 형성된 연소잔여물이 존재하는 토양은 미생물에 의한 호흡량이 적었다. 이를 통해 고온에서 방향족 축합이 진행될수록 연소잔여물과 그 안을 구성하는 열화탄소의 생분해가 억제됨을 확인하였으며, 연소잔여물이 토양에 침투한 후 전체 BPCA 중 B3CA, B4CA는 미생물에 의해 분해되어 B5CA, B6CA의 비율이 증가하였음을 추정할 수 있다.

본 연구에서는 산불 직후보다 1년 후에 많은 시료에서 열화탄소가 검출되었으며, B5CA+B6CA의 비율과 PyC/TOC의 비율이 증가하였다. 이를 통해 산불에 의해 형성된 열화탄소가

Table 7. Summary of the detected PyC by burn severity.

Site	Rainfal(n)	Cumulative rainfall	Burn severity	Year	B6+B5 (%)	PyC/Soil (gC/kg)	PyC/TOC (gC/gC)	Soil texture
2022-YD	X	0	SC	0	0	0	0	Loam
2022-UJ	O(2)	53.7	CC	0	44.5 ±19.4	4.4 ±0.7	0.17 ±0.01	Sandy loam
2023-HC	O(1)	3.4	CC	0	66.3	26.0	0.62	Sandy loam
			FN	0	61.2	14.3	0.42	
2023-DJ	O(4)	46.9	CC	0	61.2 ±1.0	3.9 ±4.0	0.32 ±0.26	Sandy loam

Table 8. PyC analysis of soil samples based on burn severity, slope, and elapsed month.

Site	Burn severity	Slope	Elapsed month	TOC(%)	B6+B5 (%)	PyC/Soil (mgC/g)	PyC/TOC (gC/gC)								
2022-YD	CC	M	12	1.90	0.0	6.0	0.38								
				1.57	56.6										
				2.14	0.0										
			24	1.81±0.95	0.0										
			SC	M	12			1.99	100.0	1.2	0.06				
								3.04	76.5	0.7	0.02				
	2.93	0.0													
	L	12	24	1.94	0.0	6.5	0.23								
				2.25	ND										
				1.41	ND										
			2.82	64.1	1.0			0.04							
			2.86	25.2	4.8			0.70							
0.69			96.7	3.2	0.17										
24	M	12	1.89	100.0	4.1	0.24									
			1.67	100.0	2.7	0.28									
			0.98	100.0											
	2022-UJ	CC	H	12	2.12	0.0	3.4	0.11							
					2.13	0.0									
					3.14	21.2									
24				M	12	2.05			0.0	2.1	0.10				
						2.86			0.0						
						2.16			100.0						
L	12	24	2.70	0.0	0.7	0.02									
			2.79	0.0											
			3.25	56.8											
		24	M	12			7.92	0.0	4.2	0.20					
							2.51	0.0							
							2.13	34.6							
24	L	12	5.79	0.0	22.2	0.29									
			7.58	85.0											
			2.58	0.0											
		24	M	12			1.75±0.73	ND	4.1	0.18					
							3.42	0.0							
							2.05	0.0							
2023-HC	CC	H	12	2.21	ND	14.6	0.64								
				2.25	100.0			15.5			0.42				
				1.48	ND										
			24	L	12				1.97	ND		10.9	0.36		
									2.28	52.7				33.2	0.50
									3.66	66.0					
2023-DJ	CC	M	12	3.25	ND	8.0	0.94								
				3.07	47.6			5.6	0.74						
				3.32	77.0										
			24	M	12					2.51	ND	3.5	0.32		
										0.86	100.0			67.3	0.32
										0.76	100.0				
24	M	12	1.08	67.3	3.5	0.32									
			0.76	100.0											
			1.08	67.3											

Table 9. PyC analysis of soil samples based on burn severity, slope, and elapsed month(Cont).

Without site & slope							
CC	n=8	12	2.56±2.25	73.4±28.2	6.7±6.6	0.37±0.32	
		24	2.15±0.02	67.3±46.2	3.2±1.5	0.15±0.07	
FN	n=4	12	3.08±0.59	60.8±13.3	18.6±10.0	0.48±0.12	
SC	n=5	12	2.28±0.98	72.5±30.3	2.8±1.5	0.21±0.29	
		24	1.51±0.47	100.0±0.0	3.3±0.7	0.23±0.06	
Past forest fire damaged area							
2005-YY	SC	19 yrs	5.92	100.0	4.1	0.07	
			4.97	100.0	4.9	0.09	
			2.68	ND			
2019-OK	CC	5 yrs	1.80	100.0	4.6	0.26	
			1.54	100.0	3.9	0.25	
			1.71	ND			

시간에 따라 토양 속으로 침투하여 그 비율이 증가하였음을 확인하였다(Rumpel et al., 2015; Santín et al., 2016; Abney et al., 2017; Abney et al., 2019b). 또한 2년 후 응급복구조림이 진행된 심피해지에서도 열화탄소가 검출되었는데, 벌채·조림 과정에서 토양 상하부가 혼합됨에 따라 토양 속에 열화탄소가 저장된 것으로 판단된다(Santín et al., 2016; Rumpel et al., 2015).

결론

이 연구는 국내 산불피해지에 형성된 연소잔여물을 산불피해도별로 채집하여 유기탄소 함량을 분석하고 BPCA 분석법을 통해 채집된 연소잔여물과 상부 토양의 열화탄소 함량을 추정하였다. 본 연구에서는 산불 직후보다 1년 후에 많은 시료에서 열화탄소가 검출되었으며, B5CA+B6CA의 비율과 PyC/TOC의 비율이 증가하였다. 이를 통해 산불에 의해 형성된 열화탄소가 시간에 따라 토양 속으로 침투하여 그 비율이 증가하였음을 확인하였다(Rumpel et al., 2015; Santín et al., 2016; Abney et al., 2017; Abney et al., 2019b). 또한 2년 후 응급복구조림이 진행된 심피해지에서도 열화탄소가 검출되었는데, 벌채·조림 과정에서 토양 상하부가 혼합되어 토양 속에 열화탄소가 저장된 것으로 판단된다(Santín et al., 2016; Rumpel et al., 2015). 또한, 산불피해도가 심할수록 B5CA, B6CA의 분자 비율이 증가하여 심, 중피해지의 연소잔여물이 200-250°C의 온도에서 형성되었음을 추정할 수 있었고, 산불 직후 중피해지와 심피해지의 상부 토양에서 열화탄소가 검출되었지만, 미피해지에서는 검출되지 않음을 확인하였다. 2005년과 2019년에 발생한 산불피해지의 토양에서도 열화탄소가 검출됨을 확인하였으며, 이를 통해 토양 속

열화탄소는 최소 2년, 최대 19년까지 잔류할 수 있음을 확인하였다.

향후에는 BPCA 분석을 위한 시료채집 방법을 국내 산불피해 현장에 맞게 개선한다면 산불피해지의 열화탄소의 생성과 이동을 구체적으로 정량화할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구를 통해 국내 산불피해지에서의 산불 후 형성된 열화탄소의 장기 잔류 가능성을 확인하였으며, 산불피해지의 잠재적인 열화탄소 저장 효과를 기대할 수 있을 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. RS-2022-NR06 9697).

References

Abney, R.B., Sanderman, J., Johnson, D., Fogel, M.L. and Berhe, A.A. 2017. Post-wildfire Erosion in Mountainous Terrain Leads to Rapid and Major Redistribution of Soil Organic Carbon. *Frontiers in Earth Science* 5:99.

Abney, R.B. and Berhe, A.A. 2018. Pyrogenic Carbon Erosion: Implications for Stock and Persistence of Pyrogenic Carbon in Soil. *Frontiers in Earth Science* 6: 26.

Abney, R.B., Kuhn, T.J., Chow, A., Hockaday, W., Fogel, M.L. and Berhe, A.A. 2019a. Pyrogenic carbon erosion after the Rim Fire, Yosemite National Park: The Role of Burn Severity and Slope. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 124(2): 432-449.

- Abney, R.B., Jin, L. and Berhe, A.A. 2019b. Soil properties and combustion temperature: Controls on the decomposition rate of pyrogenic organic matter. *CATENA* 182: 104127.
- Act on the Creation and Management of Forest Resources. Act No. 20086. Republic of Korea. (in Korean).
- Bird, M.I., Wynn, J.G., Saiz, G., Wurster, C.M. and McBeath, A. 2015. The Pyrogenic Carbon Cycle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 43(1): 273-298.
- Bostick, K.W., Zimmerman, A.R., Wozniak, A.S., Mitra, S. and Hatcher, P.G. 2018. Production and composition of pyrogenic dissolved organic matter from a logical series of laboratory-generated chars. *Frontiers in Earth Science* 6: 43.
- Brewer, C.E., et al. 2014. New approaches to measuring biochar density and porosity. *Biomass and Bioenergy* 66: 176-185.
- Brodowski, S., Rodionov, A., Haumaier, L., Glaser, B. and Amelung, W. 2005. Revised black carbon assessment using benzene polycarboxylic acids. *Organic Geochemistry* 36(9): 1299-1310.
- Bucheli, T.D., Blum, F., Desaulles, A. and Gustafsson, Ö. 2004. Polycyclic aromatic hydrocarbons, black carbon, and molecular markers in soils of Switzerland. *Chemosphere* 56(11): 1061-1076.
- Cerdà, A. and Doerr, S. H. 2008. The effect of ash and needle cover on surface runoff and erosion in the immediate post-fire period. *Catena* 74(3): 256-263.
- Choi, S.-D. 2014. Time trends in the levels and patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in pine bark, litter, and soil after a forest fire. *Science of The Total Environment* 470-471: 1441-1449.
- Coppola, A.I., Wagner, S., Lennartz, S.T., Seidel, M., Ward, N.D., Dittmar, T., Santín, C. and Jones, M.W. 2022. The black carbon cycle and its role in the Earth system. *Nature Reviews Earth & Environment* 3: 516-532.
- DeLuca, T.H., Gundale, M.J., Brimmer, R.J., and Gao, S. 2020. Pyrogenic Carbon Generation From Fire and Forest Restoration Treatments. *Frontiers in Forests and Global Change* 3: 24.
- Dong, P., Zhang, Z. and Zhang, M. 2023. Combination of Phytoextraction and Biochar Improves Available Potassium and Alters Microbial Community Structure in Soils. *Water* 16(1): 118.
- Goforth, B.R., Graham, R.C., Hubbert, K.R., Zanner, C.W. and Minnich, R.A. 2005. Spatial distribution and properties of ash and thermally altered soils after high-severity forest fire, southern California. *International Journal of Wildland Fire* 14(4): 343-354.
- Goranov, A.I., Sørmo, E., Hagemann, N., Cornelissen, G., Zimmerman, A.R. and Hatcher, P.G. 2024. Using the benzenepolycarboxylic acid (BPCA) method to assess activated biochars and their PFAS sorption abilities. *Chemosphere* 355: 141750.
- Hammes, K. et al. 2007. Comparison of quantification methods to measure fire-derived (black/elemental) carbon in soils and sediments using reference materials from soil, water, sediment and the atmosphere. *Global Biogeochemical Cycles* 21(3): 2006GB002914.
- Kappenberg, A., Bläsing, M., Lehdorff, E. and Amelung, W. 2016. Black carbon assessment using benzene polycarboxylic acids: Limitations for organic-rich matrices. *Organic Geochemistry* 94: 47-51.
- Kim, E.J., Choi, S.-D. and Chang, Y.-S. 2011. Levels and patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils after forest fires in South Korea. *Environmental Science and Pollution Research* 18(9): 1508-1517.
- KFS (Korea Forest Service). 2022. Implementation of forest policies for achieving carbon neutrality. https://www.forest.go.kr/kfswweb/cop/bbs/selectBoardList.do?bbsId=BBSMSSTR_1036&mn=NKFS_04_02_01. (2022.01.10). (in Korean).
- Lehmann, J., Gaunt, J. and Rondon, M. 2006. Bio-char Sequestration in Terrestrial Ecosystems – A Review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11(2): 403-427.
- Li, Q., Ahn, S., Kim, T. and Im, S. 2021. Post-Fire Impacts of Vegetation Burning on Soil Properties and Water Repellency in a Pine Forest, South Korea. *Forests* 12(6): 708.
- NIFoS (National Institute of Forest Science). 2013. Development of quantitative evaluation methods for wildfire damage severity and investigation of damage characteristics. Research Report No. 13-37. 204. Republic of Korea. (in Korean).
- NIFoS (National Institute of Forest Science). 2025. Greenhouse gas emissions from wildfires exceed 7.6 million tons. 2025. https://nifos.forest.go.kr/kfswweb/cop/bbs/selectBoardArticle.do?nttId=3207355&bbsId=BBSMSTR_1036&pageUnit=10&pageIndex=4&searchtitle=title&searchcont=cont&searchkey=&searchwriter=&searchWrd=%ed%83%84%ec%86%8c&ctgryLrcls=CTGRY150&ctgryMdcls=&ctgrySmcls=&ntcStartDt=&ntcEndDt=&mn=UKFR_03_03_01&orgId=kfri. (2025.05.07). (in Korean).
- Nguyen, B.T., Lehmann, J., Kinyangi, J., Smernik, R., Riha, S.J. and Engelhard, M.H. 2009. Long-term black carbon dynamics in cultivated soil. *Biogeochemistry* 92:

- 163-176.
- Major, J., Lehmann, J., Rondon, M. and Goodale, C. 2010. Fate of soil-applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration. *Global Change Biology* 16(4): 1366-1379.
- Miesel, J., Reiner, A., Ewell, C., Maestrini, B. and Dickinson, M. 2018. Quantifying Changes in Total and Pyrogenic Carbon Stocks Across Fire Severity Gradients Using Active Wildfire Incidents. *Frontiers in Earth Science* 6: 41.
- Onda, Y., Dietrich, W. E. and Booker, F. 2008. Evolution of overland flow after a severe forest fire, Point Reyes, California. *Catena* 72(1): 13-20.
- Pereira, P., Cerdà, A., Úbeda, X., Mataix-Solera, J., Jordán, A., Martín, D. and Burguet, M. 2013. Spatial models for monitoring the spatio-temporal evolution of ashes after fire – a case study of a burnt grassland in Lithuania. *Solid Earth* 4(1): 153-165.
- Pereira, P., Cerdà, A., Úbeda, X., Mataix-Solera, J., Arcenegui, V. and Zavala, L.M. 2015. Modelling the Impacts of Wildfire on Ash Thickness in a Short-Term Period. *Land Degradation & Development* 26(2): 180-192.
- Preston, C.M. and Schmidt, M.W.I. 2006. Black (pyrogenic) carbon: a synthesis of current knowledge and uncertainties with special consideration of boreal regions. *Biogeosciences* 3(4): 397-420.
- Reisser, M., Purves, R.S., Schmidt, M.W.I. and Abiven, S. 2016. Pyrogenic Carbon in Soils: A Literature-Based Inventory and a Global Estimation of Its Content in Soil Organic Carbon and Stocks. *Frontiers in Earth Science* 4: 80.
- Rumpel, C., Baumann, K., Remusat, L., Dignac, M.-F., Barré, P., Deldicque, D., Glasser, G., Lieberwirth, I. and Chabbi, A. 2015. Nanoscale evidence of contrasted processes for root-derived organic matter stabilization by mineral interactions depending on soil depth. *Soil Biology and Biochemistry* 85: 82–88.
- Santín, C., Doerr, S.H., Shakesby, R.A., Bryant, R., Sheridan, G.J., Lane, P.N.J., Smith, H.G. and Bell, T.L. 2012. Carbon loads, forms and sequestration potential within ash deposits produced by wildfire: new insights from the 2009 “Black Saturday” fires, Australia. *European Journal of Forest Research* 131(4): 1245-1253.
- Santín, C., Doerr, S.H., Preston, C.M. and González-Rodríguez, G. 2015. Pyrogenic organic matter production from wildfires: a missing sink in the global carbon cycle. *Global Change Biology* 21(4): 1621–1633.
- Santín, C., Doerr, S.H., Kane, E.S., Masiello, C.A., Ohlson, M., De La Rosa, J.M., Preston, C.M. and Dittmar, T. 2016. Towards a global assessment of pyrogenic carbon from vegetation fires. *Global Change Biology* 22(1): 76-91.
- Schmidt, M.W.I. and Noack, A.G. 2000. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges. *Global Biogeochemical Cycles* 14(3): 777-793.
- Schneider, M.P.W., Hilf, M., Vogt, U.F. and Schmidt, M.W.I. 2010. The benzene polycarboxylic acid (BPCA) pattern of wood pyrolyzed between 200°C and 1000°C. *Organic Geochemistry* 41(10): 1082-1088.
- Schneider, M.P.W., Smittenberg, R.H., Dittmar, T. and Schmidt, M.W.I. 2011. Comparison of gas with liquid chromatography for the determination of benzenepolycarboxylic acids as molecular tracers of black carbon. *Organic Geochemistry* 42(3): 275-282.
- Simpson, M.J. and Hatcher, P.G. 2004. Determination of black carbon in natural organic matter by chemical oxidation and solid-state ¹³C nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Organic Geochemistry* 35(8): 923-935.
- Singh, S. 2022. Forest fire emissions: A contribution to global climate change. *Frontiers in Forests and Global Change* 5: 925480.
- Stoof, C.R., Ferreira, A.J., Mol, W., Van den Berg, J., De Kort, A., Drooger, S. and Ritsema, C.J. 2015. Soil surface changes increase runoff and erosion risk after a low–moderate severity fire. *Geoderma* 239: 58-67.
- UNEP (United Nations Environment Programme). 2022. Spreading like Wildfire – The Rising Threat of Extraordinary Landscape Fires: A UNEP Rapid Response Assessment. Nairobi: United Nations Environment Programme.
- Vaezzadeh, V., Zhong, G., Gligorovski, S., Wang, Y. and Zhang, G. 2023a. Characteristics of dissolved black carbon in riverine surface microlayer. *Marine Pollution Bulletin* 194: 115301.
- Vaezzadeh, V., Zhong, G. and Zhang, G. 2023b. Benzene polycarboxylic acids as molecular markers of black carbon: Progresses and challenges. *Chemosphere* 341: 140112.
- Wang, S., McGehee, R.P., Guo, T., Flanagan, D.C. and Engel, B.A. 2023. Calibration, validation, and evaluation of the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model for hillslopes with natural runoff plot data. *International Soil and Water Conservation Research* 11(4): 669-687.
- Wiedemeier, D.B. 2014. New Insights into Pyrogenic Carbon

- by an Improved Benzene Polycarboxylic Acid Molecular Marker Method. Ph.D. dissertation, University of Zürich, Switzerland.
- Wiedemeier, D.B., Brodowski, S. and Wiesenberg, G.L.B. 2015. Pyrogenic molecular markers: Linking PAH with BPCA analysis. *Chemosphere* 119: 432-437.
- Woods, S.W. and Balfour, V.N. 2010. The effects of soil texture and ash thickness on the post-fire hydrological response from ash-covered soils. *Journal of Hydrology* 393(3-4): 274-286.
- Yim, U.H., Hong, S.H., Ha, S.Y., Han, G.M., An, J.G., Kim, N.S., Lim, D., Choi, H.-W. and Shim, W.J. 2014. Source- and region-specific distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Jinhae Bay, Korea. *Science of The Total Environment* 470-471: 1485-1493.
- Ziolkowski, L.A., Chamberlin, A.R., Greaves, J. and Druffel, E.R.M. 2011. Quantification of black carbon in marine systems using the benzene polycarboxylic acid method: a mechanistic and yield study. *Limnology and Oceanography: Methods* 9(4): 140-140.
- Zimmerman, A.R. 2010. Abiotic and Microbial Oxidation of Laboratory-Produced Black Carbon(Biochar). *Environmental Science & Technology* 44(4): 1295-1301.
- Zimmerman, A.R. and Mitra, S. 2017. Trial by Fire: On the Terminology and Methods Used in Pyrogenic Organic Carbon Research. *Frontiers in Earth Science* 5: 95.

Manuscript Received : November 13, 2025

First Revision : December 3, 2025

Accepted : December 4, 2025