

## 폐목재를 이용한 바이오차 생산 및 토양적용의 환경평가

### Analysis of Environmental Impacts for the Biochar Production and Soil Application

김미형 · 김건하<sup>†</sup>

Mihyung Kim · Geonha Kim<sup>†</sup>

한남대학교 건설시스템공학과

Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University

(2014년 6월 25일 접수, 2014년 7월 8일 수정, 2014년 7월 14일 채택)

**Abstract :** Biochar is a carbon rich solid produced by the pyrolysis of biomass such as energy crops, forestry residues, and wood wastes. Biochar returned to soil is to mitigate climate change and the feedstock of wood wastes reduces fossil fuel consumption as well as disposal costs. This study was practiced to evaluate a biochar system by gasification in terms of global warming regarding the soil application of the produced biochar. Life cycle assessment methodology was used to analyze the environmental impacts of the system, and the functional unit was 1 tonne of wood wastes. The result shows that the biochar system by using wood wastes as feedstock produces 4.048E-01 kgCO<sub>2</sub>-eq from the pre-treatment process as chipping and drying, 4.579E-01 kgCO<sub>2</sub>-eq from the pyrolysis process, and 9.070E-02 kgCO<sub>2</sub>-eq from the spreading to agricultural land, therefore total 9.534E-01 kgCO<sub>2</sub>-eq are generated. About 252 kg of CO<sub>2</sub> is still stored in the produced biochar in soil after carbon offsetting of the system. Therefore, the net carbon of the system is -251 kg of CO<sub>2</sub>-eq.

**Key Words :** Biochar, Pyrolysis, Wood Waste, Carbon Sequestration, Life Cycle Assessment

**요약 :** 바이오차(biochar)는 산소가 제한된 환경에서 바이오매스를 열분해를 시켜 얻을 수 있는 고체물질을 말한다. 원료가 되는 바이오매스는 에너지작물, 임업부산물, 농업부산물 등의 폐기물을 사용할 수 있으며, 토양으로 적용 시 기후변화 완화, 화석연료 소비저감, 폐기물 처리비용저감 등의 장점이 있다. 본 연구에서는 폐목재를 원료로 바이오차를 생산하는 시스템을 대상으로 전과정평가 기법에 의해 환경에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 폐목재 1톤을 기능단위로 하였을 때 생산되는 바이오차를 토양에 적용하는 시나리오를 구성하고 지구온난화에 미치는 영향을 중심으로 환경영향을 분석한 결과, 파쇄 및 건조의 전처리 공정에서 4.048E-01 kg, 가스화 열분해공정에서 4.579E-01 kg, 토양살포 공정에서 9.070E-02 kg의 온실가스를 발생하여 총 9.534E-01 kg의 온실가스가 발생하는 것을 확인하였다. 바이오차의 토양적용 시 탄소저장효과는 252 kg으로 분석되어 251 kg의 탄소 네거티브 효과를 보였다.

**주제어 :** 바이오차, 열분해, 폐목재, 탄소격리, 전과정평가

## 1. 서론

바이오차는 산소가 제한된 환경에서 목재 등 바이오매스를 열분해를 시켜 얻을 수 있는 고체물질을 말한다. 유사한 물질로서 charcoal, soot, black carbon, agrichar 등의 형태로 다양한 연구가 수행되어왔지만 biochar라는 용어를 이용하여 탄소격리와 관련된 새로운 시각으로 주목을 받고 다양한 연구를 시작한 것은 최근의 일이다.<sup>1)</sup> Jirka and Tomlinson의 연구결과<sup>2)</sup>에 의하면 2013년 약 100개 이상의 공공 및 민간 기관에서 바이오차와 관련된 연구를 수행중이며, 2008년 발표된 논문은 약 60편이었으나, 2013년에는 약 360편으로 급증한 것으로 보고되었다(Fig. 1).

Lehmann은 바이오매스로부터 바이오에너지를 회수하는 방법은 탄소 중립적인데 반해 바이오차를 토양에 넣는 방법은 진정한 탄소네거티브 방법임을 제안하였다.<sup>3)</sup> 바이오차는 기후변화대응, 토양개량, 에너지생산, 폐기물관리 측면에서 중요성을 내재하고 있다.<sup>4)</sup> 바이오차는 유기물과 달리 안정성이 뛰어나므로 토양에 투입하게 되면 분해가 거의 일

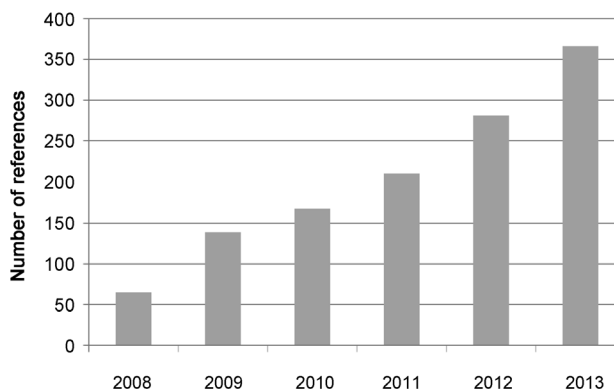


Fig. 1. Growth in peer-reviewed biochar-related publication from 2008-2013.<sup>2)</sup>

어나지 않아 대기 중의 이산화탄소를 장기간 저장함으로써 기후변화 완화에 기여할 수 있는 친환경 물질이다.<sup>3,5)</sup> 또한 바이오차의 생산과정에서 발생하는 부산물인 바이오-오일과 바이오가스는 에너지원으로 이용될 수 있다.<sup>6)</sup> 바이오차의 토양개량 효과와 관련하여서는 많은 연구가 진행되고

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: kimgh@hnu.kr Tel: 042-629-7534 Fax: 042-629-8366

있다. 바이오차를 토양에 투입하면 토양 흡착능력증가, 토양 pH 증가, 토양의 양이온교환능력의 증가 등 화학적 특성과 미생물에 서식처를 제공함에 따른 생체량 증가, 미생물 활성도 증가 등의 생물학적 특성, 토양의 통기성 증가, 토양의 수분 보유능력 증가, 토양의 용적 밀도 감소 등 물리학적 특성에 의해 농업생산성을 향상시킬 수 있다.<sup>3)</sup> 또한 항생물질 제거 등 다양한 유기오염물질의 제거에 광범위하게 적용될 것으로 판단되고 있다.<sup>7)</sup>

전과정평가(life cycle assessment, LCA)는 ‘제품의 전과정에 걸쳐서 소모되는 자원과 발생하는 배출물의 양을 정량화하여, 이들이 환경에 미치는 영향을 종합적으로 평가하는 환경영향평가기법’이다. 원료획득으로부터 제조, 사용, 처리, 재활용, 그리고 최종처분에 이르기까지 제품의 전과정(요람에서 무덤까지)에 걸쳐 환경 측면에서의 잠재적인 환경영향을 분석하는 방법이다.<sup>8,9)</sup>

바이오매스 열분해공정에 의한 에너지생산 시나리오의 전과정평가 연구는 몇 편의 연구결과로 보고된 바 있다. Han<sup>10)</sup>은 바이오매스 고속열분해 방법에 의한 에너지생산의 전과정평가를 수행하고 부산물인 바이오차는 토양으로 환원하는 시나리오를 분석하였다. Fiorentino<sup>11)</sup>은 바이오매스 열분해로부터 바이오기반 화학제품과 바이오연료 등을 생산하는 바이오리파이너리 시스템을 전과정평가 방식으로 분석하였다. 이 연구에서 공정 부산물인 바이오차는 리그닌과 혼합하여 전력을 생산하는 것으로 시나리오를 구성하였다. Gaunt<sup>12)</sup>은 바이오에너지 작물(switchgrass, miscanthus, forage corn)과 농업폐기물(wheat straw, corn stover)을 원료로 바이오에너지 생산공정을 전과정평가 접근법으로 분석하고, 부산물인 바이오차를 토양적용 시 탄소저감효과가 높은 것을 확인하였다. Huang<sup>13)</sup>은 바이오차와 석탄을 혼합한 전력생산공정의 전과정평가 방법을 이용한 분석 결과 10%와 20% 혼합비에 따라 각각 연간 ha당 4.32, 4.68톤의 탄소저감 효과가 있는 것으로 보고하였다. 반면 바이오차 생산시스템을 중심으로 평가한 연구는 거의 이루어지지 않았다. Hammond<sup>14)</sup>

은 저속 열분해공정의 전과정평가 기법에 의한 분석에서 바이오차의 토양환원에 의한 탄소저감 효과를 확인하였다. Roberts<sup>15)</sup>은 전과정평가 분석방법에 의해 바이오차의 에너지적, 경제적, 기후변화대응적 측면에서 분석하고 탄소저감의 가능성을 확인하였다.

본 연구에서는 폐목재를 바이오매스 원료로 바이오차를 생산하기 위한 열분해 시스템을 대상으로 환경영향을 평가하고자 하였다. 분석방법은 전과정평가방법의 국제기준을 준수하였으며, 환경영향 평가범위는 자원고갈, 산성화, 부영양화, 수계생태독성, 지구온난화, 인체독성, 오존층고갈, 광화학산화물생성, 육상생태독성 등의 영향범주별로 특성화하였다. 본 연구는 국내에서 아직까지 연구가 활성화되지 않은 바이오차 생산공정의 환경영향을 분석하여 기초자료를 제공하는 것을 목표로 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 연구목적 및 범위

본 연구는 열분해 방식으로 바이오차를 생산하는 공정을 연구대상으로 하여 시스템경계를 구성하고 전과정평가 분석방법에 의하여 환경영향을 평가하고자 하였다(Fig. 2). 시스템에 유입되는 바이오매스를 폐목재로 선정하여 바이오차 생산공정의 시스템 내로 투입되는 모든 물질들과 배출되는 모든 물질들을 기능단위에 맞게 정량화하여 목록을 구성하였다.

### 2.2. 바이오차 생산공정 및 산업규모 분석

바이오차를 생산하기 위하여 산소가 제한된 환경에서 약 300~1,000℃로 가열하는 열분해 기술을 이용하게 된다. 목재를 가열하면 100℃ 전후에서 수분이 증발하고, 200℃ 부근에서 열분해하기 시작하여, 일산화탄소, 수소, 메탄 등의

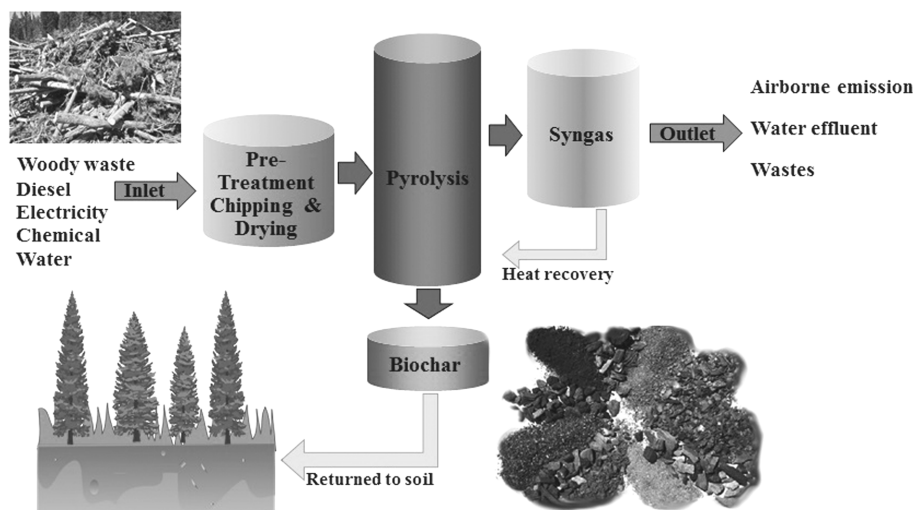


Fig. 2. Schematic flowchart of biochar production system.

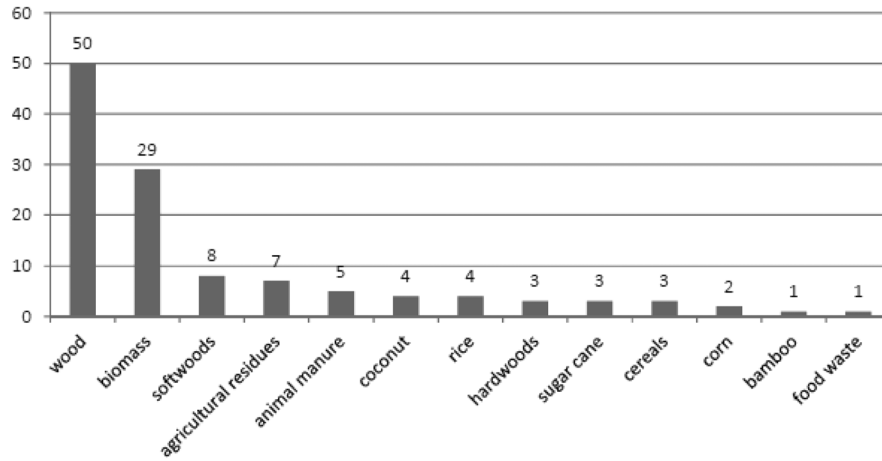


Fig. 3. Feedstocks reported by companies producing biochar.<sup>2)</sup>

가연성 가스가 발생하게 된다. 220~260℃에서 헤미셀룰로오스 중 펜토산이 분해되어 급속한 중량감소를 나타내게 되며, 315℃에 대부분 분해된다. 315℃ 이후 셀룰로오스의 분해가 시작되어 350℃ 전후에서 급속한 중량감소를 나타내게 되며 400℃까지 지속적으로 분해된다. 리그닌은 비교적 저온인 160℃에 분해가 시작되어 900℃까지 지속적으로 분해되면서 서서히 중량을 감소시켜 고온에서도 약 40% 정도는 남아 있게 된다.<sup>16,17)</sup> 바이오매스의 열분해로부터 바이오차와 바이오-오일, 바이오가스를 생산한다.<sup>6)</sup> 열분해공정의 바이오매스 원료로는 목재가 가장 많이 사용되고 있지만 농업부산물, 임업부산물, 하수슬러지 등 유기성폐기물을 이용할 수 있으므로 폐기물을 재활용할 수 있는 장점이 있다(Fig. 3).

바이오차는 다양한 바이오매스 원료와 다양한 기술을 통해 생산이 가능하다. 일반적으로 바이오매스의 열분해를 통해 syngas(가스상), bio-oil(액상), 그리고 biochar(고체상)의 부산물이 생산된다. 바이오매스 열분해공정은 방식에 따라 고속 열분해(fast pyrolysis), 저속 열분해(slow pyrolysis), 가스화(gasification), 열수탄화(hydrothermal carbonization)의 방식으로 구분<sup>6)</sup>하며, 열분해 방법 중 가열속도가 느리고 온도가 낮을수록 생성되는 고형물인 바이오차의 비율이 증가한다.<sup>18)</sup> 따라서 바이오차 생산을 위해서는 주로 저속 열분해 방법을 적용하고, 바이오-오일 생산을 목표로 할 경우 고속 열분해 방법을 적용한다. 일반적으로 저속 열분해를 통해 얻는 바이오차 수율은 20~50% 정도로 보고되고 있다.<sup>1)</sup> 가스화

방법은 800~1,800℃의 고온에서 바이오매스로부터 syngas와 바이오차를 생산한다. 원료가 되는 바이오매스는 파쇄, 건조와 같은 전처리를 거친 후 열분해 반응기에 투입된다. 공정부산물로 회수되는 바이오차는 토양개량제로 이용되며, 바이오-오일은 산업용 연료유로 사용되거나 개조 후 수송용으로 사용될 수 있을 뿐 아니라 바이오가스 에너지는 열분해 공정을 위한 열원으로 이용이 가능하다.<sup>1)</sup> 전세계적으로 약 84개의 산업체에서 바이오차를 생산하고 있으며 규모는 Table 1과 같다. 지역별로는 북미 40, 유럽 26, 아프리카 7, 오세아니아 6, 아시아 4, 남아메리카 1곳의 산업체가 분포되어 있다.<sup>2)</sup>

바이오매스가 함유하고 있는 탄소량의 약 50%는 공정 중 이산화탄소로 대기 배출되고 나머지 50%는 바이오차에 포획되어 남아 있게 된다. 식물은 광합성에 의해 대기 중 탄소를 생체 내 이동하여 저장함으로써 탄소저감 효과를 가지므로, 공정 중 저장된 탄소를 모두 배출하더라도 탄소중립적 순환으로 평가된다. 그러나 바이오차는 생산공정 및 운반과정에서 배출되는 탄소를 상쇄하고도 상당한 양의 탄소를 안정하게 저장할 수 있으므로 탄소네거티브 효과를 가진다. 바이오차를 토양에 적용하였을 때 생체 저장량의 20%를 장기간 격리할 수 있는 것으로 평가되고 있다.<sup>3,6)</sup>

### 2.3. 분석방법

전과정평가 방법론의 국제기준에 의한 절차는 목적 및 범위 정의 단계, 목록분석 단계, 영향평가 단계, 해석 단계의

Table 1. Scales, examples, and numbers of biochar producing technologies<sup>2)</sup>

Scale	Capacity (throughput)	Example technology and use	Numbers
Large	>10 tons/day	Industrial pyrolysis plant used to produce heat energy for power generation and a biochar byproduct for wholesale	30
Mid	1-10 tons/day	Mobile continuous feed pyrolyzer used to convert forestry slash in situ to biochar for forest soil regeneration	29
Small	10-1,000 kg/day	Batch retort kiln used by small farmers to convert agricultural residues to biochar for retail sale via niche outlets	17
Micro	<10 kg/day	High efficiency biochar-producing cookstove used in developing countries to cook meals and produce biochar for home gardens	8

**Table 2.** Characteristics of the thermochemical carbonization plant<sup>22)</sup>

Materials of plant	Value-Name	Units	Comments
Capacity of plant	1,400	tons year <sup>-1</sup>	Assuming 4,000 hours annual operating and considering 350 kW electrical power
Duration*	<3	h	Assuming that 1 kg of processed feedstock gives 1 kWe
Temperature	1,200	℃	
Pressure	Atmospheric	-	Gasifier works at atmospheric pressure
Biochar yield*	0.1	tons	Biochar yield strictly depends on feedstock chemical and physical properties (ash content, particle size, bulk density, etc). It is generally assumed yield from 5 to 15% (on dry matter basis).
Gas yield*	2,400	Nm <sup>3</sup>	Gas (syngas) is a mix of carbon monoxide and dioxide, hydrogen, methane and nitrogen. Syngas low calorific power: 1,075 kcal Nm <sup>-3</sup>
Fate of gas	Direct use	-	Syngas is used to power a diesel-cycle endothermic engine in order to produce electricity and heat
Oil yield	No	L	
Other products	No	-	

\*Reference value is 1 tonne of processed feedstock

4단계로 구성된다.<sup>19,20)</sup> 전과정평가 기법을 사용함으로써 바이오차 생산공정에 사용된 모든 물질재료의 종류별 사용량과 에너지 사용량을 분석하여 각각의 재료와 에너지 생산과정에서 발생하는 총 오염물질의 양을 포함하여 정량적으로 평가할 수 있게 된다.

#### 2.4. 자료수집 및 분석모델

생산시스템을 평가하기 위한 입출력자료는 국내 현장자료가 있을 경우 최대한 사용하며, 국내 자료가 없을 경우, 문헌조사를 통하여 수집하여 이용하게 된다. 바이오차의 생산과 관련하여 국내에는 실험실 규모의 연구가 시도되고 있는 실정으로 생산단계의 신뢰할 수 있는 데이터가 없으므로, 문헌조사에 의하여 자료를 수집하였다. 분석에 필요한 상위흐름과 하위흐름 자료는 환경부와 지식경제부에서 구축한 데이터베이스를 이용하였으며, 분석도구는 환경부에서 개발한 TOTAL 4.0을 사용하였다.

#### 2.5. 기능단위 및 제한조건

본 연구에서는 임업부산물 및 사업장부산물로 발생하는 폐목재 1톤을 기능단위로 바이오차 생산 시스템을 평가하고자 하였으며, 정량적 평가를 위한 기준흐름(reference flow)은 폐목재 1톤으로 설정하였다. 그러나 데이터 수집의 한계로 인하여 다음과 같은 제한이 요구된다.

- 1) 전세계의 바이오차 생산량은 2005년 기준 4,400만톤, 수율은 바이오매스의 20% 정도이며, 국내의 바이오차와 관련된 시장은 아직 형성되지 않았다.<sup>1,21)</sup> 국내에서 바이오차와 관련된 연구는 오염물질 저감 분야에서 실험실 규모로 연구가 진행되고 있으며, 현장적용 및 실용화에 대한 구체적인 연구는 미미한 실정이다. 그러므로 국내에서 생산시스템의 부재를 대체하여 문헌자료를 사용하였다.
- 2) 본 연구에서 바이오차 생산의 원료가 되는 바이오매스는 폐목재로 선정하여 평가함으로써 폐기물 관리 측면에서 긍정적인 효과를 기대하였다.

- 3) 본 연구에서 시스템 경계는 폐목재의 전처리, 열분해 공정, 바이오차의 토양살포로 하고, 폐목재를 처리시설로 운반하는 단계는 제외하였다.
- 4) 본 연구에서 바이오차 생산을 목적으로 열분해공정을 평가하였으며 부산물로 발생하는 syngas는 시스템 내에서 열분해공정의 에너지원으로 사용하였다.
- 5) 본 연구는 바이오차 생산을 중심으로 지구온난화 저감효과에 중점을 두어 평가하였으므로 생산된 바이오차의 토양적용 시 탄소격리효과를 포함하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 인벤토리 구축 결과

##### 3.1.1. 전처리 공정

폐목재는 파쇄공정과 건조공정을 거쳐 열분해를 위한 적합한 상태로 전처리한 후, 열분해장치로 투입된다. 파쇄 및 건조공정의 에너지 사용량 및 물질수지 자료는 일정규모이상 생산 및 자료를 구축한 국내 우드칩 생산업체인 J사, W사, H사, S사로부터 담당자 설문을 통해 수집하였으며, 물질수지 및 신뢰성 분석을 통하여 자료를 선별하여 이용하였다. 폐목재 파쇄공정의 자료조사 결과, 연간 7,936톤의 폐목재로부터 7,508톤의 우드칩이 생산되며, 107,120 kWh의 전력과 경유 53,650 kg을 소비하는 것으로 조사되었다. 폐목재 1톤에 해당하는 환경영향을 평가하기 위하여 데이터를 재산정하면 0.703E-02 kWh의 전력과 5.746 kg의 경유를 소비하는 것으로 분석되었다. 이때 0.946톤의 우드칩이 회수되었다.

##### 3.1.2. 열분해 공정

열분해공정의 에너지 사용량 및 물질수지 자료는 European Commission의 보고자료를 이용하였다.<sup>22)</sup> 1톤의 목재를 투입하여 열분해 시 바이오차 수율은 유입 바이오매스의 물리화학적 성상에 좌우되나 건조중량 기준 일반적으로 5~10%

Table 3. Inputs and outputs for TC plant<sup>22)</sup>

Inputs-outputs		Value-name	Units
Inputs	Input energy*	300	MJ
	Input-compressed air*	50	
	Total dusts	<30	
Output-engines emissions in atmosphere**	Carbon monoxide	<300	mgNm <sup>-3</sup>
	Nitrogen oxides (as NO <sub>2</sub> )	<500	
	Sulphur oxides (as SO <sub>2</sub> )	<200	

\* Reference value is 1 tonne of processed feedstock (10% humidity)

\*\* The gas clean system is associated to a closed-loop process that recovers tar and other impurities and continuously returns these back to the reactor.

Engines exhaust gases are treated in a three-way catalytic converter reducing carbon monoxide, nitrogen oxides, and unburned hydrocarbons. The gasifier does not produce water waste. Emission of charcoal dusts is prevented by use of a closed dedicated extraction system. Each engine ensures the related minimum environmental performance.

로 알려져 있다. 발생하는 가스는 일산화탄소, 이산화탄소, 수소, 메탄, 질소 등이 혼합되어 발생된다. 가스는 회수되어 전력으로 생산되거나 또는 폐열로 이용된다. 본 연구에서 분석 대상인 열분해시스템 장비는 350 kW 전력을 사용하여 연간 4,000시간 운전능력을 가지며 처리용량은 연간 1,400 톤에 해당한다. 이 장비는 원료가 되는 바이오매스의 물리·화학적 특성에 차이가 있으나, 일반적으로 10%의 바이오차 생산수율을 가지며, 이때 회수되는 syngas는 2,400 Nm<sup>3</sup>으로 보고되었다. 회수가스는 디젤사이클 엔진의 동력으로 공급되어 전력 또는 열에너지로 생산된다. 본 연구에서 회수가스는 시스템 경계 내 열분해시스템의 에너지로 공급된다. 열분해 시스템의 특성은 Table 2에 나타낸 바와 같다.

Table 2에 제시한 고온열분해 장비를 사용하여 바이오매스 원료인 폐목재 1톤의 열분해 시 300 MJ의 에너지를 소비한 것으로 조사되었다(Table 3). 생산된 가스는 열분해 장비의 열원으로 리사이클링되어 사용된다.

### 3.1.3. 바이오차 토양적용

생산된 바이오차는 트랙터와 스프레더를 이용하여 토양 1 ha 당 5,617 kg의 비율로 토양으로 적용된다(Fig. 4). 트랙터 스피드는 3.4 km/hr로 운전되었으며, 스프레더는 540 rpm



으로 운전되었다.<sup>23)</sup> 적재량은 6 m<sup>3</sup>이다. Byne and Nagle에 의하면 바이오차의 bulk density와 목재의 bulk density 상관관계는 다음과 같다.<sup>24)</sup>

$$\text{Biochar bulk density} = 0.8176 \times \text{wood bulk density}$$

폐목재의 bulk density는 230 kg/m<sup>3</sup>을 적용하면 바이오차의 bulk density는 188 kg/m<sup>3</sup>으로 계산된다.<sup>25)</sup> 1톤의 목재로부터 열분해공정에 의해 100 kg의 바이오차가 생산되므로 이는 0.530 m<sup>3</sup>에 해당한다.

Husk는 현장적용 실험에 근거하여 바이오차의 미세한 입자의 특성으로 인하여 토양적용 과정에서 손실율은 약 30% (스프레더 적재 시 2%, 현장이동 중 3%, 현장살포 시 25%) 정도 되는 것으로 보고하였다.<sup>23)</sup> 바이오차를 토양에 적용하기 전에 수분을 추가하면 운반과정 및 살포시 손실량을 줄일 수는 있으나 중량을 증가시켜 연료소비는 증가하게 된다. 따라서 본 연구에서는 손실률 30%를 적용하여 1톤의 목재로부터 바이오차 70 kg (0.371 m<sup>3</sup>)이 최종 토양 적용되는 것으로 가정하여 연료소비량을 산정하였다.

트랙터의 연료소비량을 24 L/h로 가정하고,<sup>26)</sup> 적재량을 최대로 한 후 중량 할당에 의하여 연료소비량을 산정하였다. 일반적으로 트랙터의 폭은 약 2 m에 해당한다. 도로의 구조시설 기준에 관한 규칙(국토해양부령 제 101호)의 지방지역 일반도로 폭 3 m 기준을 고려하면 1 ha (100 m\*100 m)의 부지에 바이오차를 살포하기 위하여 트랙터는 약 33회 반복운행 하게 된다. 이 때 트랙터의 회전반경은 무시하고 안전율 10%를 고려하면 총 운행거리는 3,630 m가 된다. 본 연구에서 선정한 트랙터의 스피드를 고려하면 운행시간은 1.07시간, 경유소비량은 25.68 L로 산정된다. 1 ha 기준 5,617 kg 바이오차를 살포한다고 가정하면, 적재량 1,128 kg인 트랙터는 5회 반복 운행하여야 하므로 총 운행거리는 18,150 m이므로, 경유소비량은 128.4 L로 계산되었다. 1톤의 폐목재로부터 생산된 바이오차는 70 kg이므로, 살포를 위한 경유사용량은 비중 0.830 kg/L를 적용했을 때 1.6 L (1.33 kg)로 산정되었다.

### 3.1.4. 탄소격리효과

바이오차는 미생물 분해에 대한 강한 저항성을 가지고 오랜 세월(수천 년까지) 동안 토양 내에 존재할 수 있기 때문에



Fig. 4. Biochar spreading (left) & after spreading (right).<sup>25)</sup>

**Table 4.** Mass balance results for wood waste treatment in pyrolysis facilities<sup>27)</sup>

Unit of output (MWh)	Process efficiency (%)	Biochar yield	Mass balance-waste input (tonnes)	Biochar output (tonnes)	Energy output efficiency (MWh/tonne)	Carbon stored in biochar (tonnes)	Carbon stored in biochar (tonnes/tonne feedstock)
1,00	25	0,10	0,80	0,08	1,25	0,36	0,45
1,00	25	0,35	1,11	0,39	0,90	0,36	0,33

초기 바이오매스가 저장한 탄소의 일부를 토양 속으로 바이오차의 형태로 격리시킬 수 있다.<sup>1)</sup> 바이오매스의 열분해에 의해 생산되는 합성가스와 바이오-오일로부터 에너지를 회수하고 바이오차는 토양으로 주입하여 탄소를 반영구적으로 저장할 수 있는데, 광합성에 의해 포획되는 탄소의 20%를 바이오차로 저장하는 것으로 보고된 바 있다.<sup>3)</sup> 목재 1톤의 광합성에 의한 탄소함유량은 약 0.5톤이므로, 이산화탄소량으로는 1.83톤이 된다. 따라서 1톤의 목재로부터 생산된 바이오차는 목재가 함유한 탄소의 20%인 0.36톤의 이산화탄소를 저장할 수 있는 것으로 추산된다. Esteinou의 연구에서도 폐목재를 원료로 바이오차를 생산하는 공정의 탄소저장량 분석에서 10% 수율로 생산된 바이오차는 Table 4와 같이 0.36톤의 탄소를 저장하는 것으로 분석하였다.<sup>27)</sup>

### 3.2. 바이오차 시스템의 환경영향 평가

환경에 미치는 영향정도를 정량적이고 정성적으로 추산하기 위하여 전과정평가 방법을 이용하였다. 바이오차 생산공정이 환경에 미치는 영향을 종합적으로 평가하기 위하여 분류화 단계에서 영향범주별로 분류하며, 특성화 단계에서는 분류된 천연자원 및 배출물들이 각각의 영향범주에 미치는 영향을 정량화하여 특정 영향범주에 속하는 모든 목록항목들의 영향을 합산하여 수치로 나타내었다. 영향범주는 자원고갈(abiotic resource depletion potentials, ADP; 세계자원매장량 기준 reserve-base 접근법으로 무생물 자원고갈의 환경부하 산정), 산성화(acidification potentials, AP; 산성화를 유발하는 물질에서 방출되는 proton (H<sup>+</sup>)의 수를 SO<sub>2</sub>의 당량으로 나타냄), 부영영화(eutrophication potentials, EP; 부영양화를 유발하는 물질은 PO<sub>4</sub>의 당량으로 나타냄), 수계생태독성(freshwater aquatic ecotoxicity, FAETP; 수생태계에 미치는 영향을 화학적, 생물학적 물질의 양을 1,4 DCB로 나타냄), 지구온난화(global warming potentials, GWP; CO<sub>2</sub>가 지구온난화에 미치는 영향을 기준으로 각각의 온실가스가 지구온난화에 기여하는 정도를 수치화한 것으로 IPCC factor 이용 CO<sub>2</sub>를 1로 볼 때 CH<sub>4</sub>는 21, N<sub>2</sub>O는 310, HFCs는 7000, SF<sub>6</sub>는 23900 기여함), 인체독성(human toxicity potential, HTP; 대기, 수질 및 토양에 배출되는 오염물질이 인간에 미치는 영향을 1,4 DCB로 나타냄), 오존층고갈(ozone depletion potentials, ODP; 오존층을 파괴하는 물질의 정도를 CFC11에 의한 오존감소정도를 기준), 광화학산화물생성(photochemical oxidant creation potentials, POCP; NO<sub>2</sub>나 VOC 등이 태양광선과 반응함으로써 대류권 내 생성된 산화물로 Ethene (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)을 기준으로 상대적인 생성 정도), 육상생태독성(terrestrial ecotoxicity potential, TETP; 육상생태계에 미치는 영향을

화학적, 생물학적 물질의 양을 1,4 DCB로 나타냄) 등의 영향범주별로 특성화하였으며, 수식으로 나타내면 다음과 같다.<sup>28)</sup>

$$C_{ij} = Load_i \cdot eqv_{ij} \quad (1)$$

$C_{ij}$  : 목록항목  $j$ 가 영향범주  $i$ 에 미치는 영향의 크기

$Load_j$  : 목록항목  $j$ 의 환경부하량

$eqv_{ij}$  :  $i$  영향범주에 속한 목록항목  $j$ 의 상응인자 값

$$C_i = \sum_j C_{ij} = \sum_j (Load_j \cdot eqv_{ij}) \quad (2)$$

$C_i$  : 특정 영향범주  $i$ 로 분류된 모든 목록항목들이 소속된 영향범주에 미치는 영향의 크기

본연구의 연구범위인 열분해공정을 이용하여 폐목재 1톤을 원료로 바이오차를 생산하는 시스템의 환경에 미치는 영향을 분석한 결과, 자원고갈 3.665E-01/yr, 산성화 1.952E-03 kg SO<sub>2</sub>-eq, 부영영화 1.342E-04 kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-eq, 수계생태독성 3.589E-03 kg 1,4 DCB-eq, 지구온난화 9.534E-01 kg CO<sub>2</sub>-eq, 인체독성 3.007E-03 kg of 1,4 DCB-eq, 오존층고갈 1.459E-09 kg of CFC11-eq, 광화학산화물생성 1.575E-04 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-eq, 육상생태독성 4.623E-08 kg 1,4 DCB-eq로 분석되었다(Table 5).

**Table 5.** Result of the characterization for the biochar production system

	Unit	Chipping/drying	Pyrolysis	Spreading	Total
ADP	1/year	1,548E-01	1,767E-01	3,500E-02	3,665E-01
AP	kg of SO <sub>2</sub> -eq	8,281E-04	9,382E-04	1,858E-04	1,952E-03
EP	kg of PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -eq	5,731E-05	6,414E-05	1,270E-05	1,342E-04
FAETP	kg of 1,4 DCB-eq	1,516E-03	1,730E-03	3,427E-04	3,589E-03
GWP	kg of CO <sub>2</sub> -eq	4,048E-01	4,579E-01	9,070E-02	9,534E-01
HTP	kg of 1,4 DCB-eq	1,271E-03	1,449E-03	2,870E-04	3,007E-03
ODP	kg of CFC11-eq	6,165E-10	7,033E-10	1,393E-10	1,459E-09
POCP	kg of C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq	6,794E-05	7,478E-05	1,481E-05	1,575E-04
TETP	kg of 1,4 DCB-eq	1,953E-08	2,229E-08	4,414E-09	4,623E-08

ADP : abiotic depletion potentials

AP : acidification potentials

EP : eutrophication potentials

FAETP : freshwater aquatic ecotoxicity potentials

GWP : global warming potentials

HTP : human toxicity potential

ODP : ozone depletion potentials

POCP : photochemical oxidant creation potentials

TETP : terrestrial ecotoxicity potential

**Table 6.** Normalized impacts of the biochar production system according to ministry of trade, industry & energy

Impact category	Factor	Unit	Normalized impacts
ADP	24.9	kg/person-yr <sup>2</sup>	1.473E-02
AP	39.8	kg SO <sub>2</sub> -eq/person-yr	4.905E-05
EP	13.1	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -eq/person-yr	1.024E-05
FAETP	1.5	kg 1,4-DCB-eq/person-yr	2.393E-03
GWP	5,530	kg CO <sub>2</sub> -eq/person-yr	1.724E-04
HTP	1,480	kg 1,4-DCB-eq/person-yr	2.032E-06
ODP	0,0407	kg CFC-eq/person-yr	3.585E-08
POCP	10.3	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq/person-yr	1.529E-05
TETP	1.63	kg 1,4-DCB-eq/person-yr	2.836E-08

**Table 7.** Result of the GWP for the biochar production system

	Factor	Chipping/ drying	Pyrolysis	Spreading	Total
Carbon dioxide (CO <sub>2</sub> )	1	4.039E-01	4.570E-01	9.051E-02	9.514E-01
CFC-11	4,000	3.443E-10	3.928E-10	7.780E-11	8.149E-10
CFC-114	9,300	8.197E-10	9.353E-10	1.852E-10	1.940E-09
CFC-12	8,500	1.573E-10	1.795E-10	3.555E-11	3.724E-10
CFC-13	11,700	1.359E-10	1.551E-10	3.072E-11	3.217E-10
Halon-1301	5,600	3.451E-07	3.937E-07	7.799E-08	8.168E-07
HCFC-22	1,700	3.438E-11	3.923E-11	7.771E-12	8.138E-11
Methane	21	8.315E-04	8.894E-04	1.762E-04	1.897E-03
Nitrous oxide (N <sub>2</sub> O)	310	5.356E-05	5.731E-05	1.135E-05	1.222E-04
		4.048E-01	4.579E-01	9.070E-02	9.534E-01

바이오차 시스템의 정규화 분석 결과는 Table 6과 같다. 정규화는 각 특성화된 영향범주 값의 상대적 중요성 혹은 지표결과의 규모에 대하여 보다 깊이 있는 해석을 얻기 위하여 수행한다. 즉 각기 다른 단위값을 갖는 영향범주 값을 일정 지역 및 시간간의 총 환경부하량, 인구수, GNP 등의 공동단위로 나누어 단위를 없게 만들어 환경에 대한 영향범주 간 상대적 기여도를 평가한다.<sup>29)</sup> 본 연구에서는 산업자원의 국내발생 환경부하량의 자료를 이용하였다. 바이오차 시스템을 대상으로 분석 결과 자원고갈에 미치는 영향과 지구온난화에 미치는 영향이 높음을 알 수 있었다.

바이오차 시스템의 지구온난화에 미치는 영향을 분석한 결과는 Table 7에 제시한 바와 같이 파쇄 및 공정 등의 전처리 공정에서 온실가스 4.048E-01 kgCO<sub>2</sub>-eq, 열분해 공정에서 4.579E-01 kgCO<sub>2</sub>-eq, 토양살포 공정에서 9.072E-02 kgCO<sub>2</sub>-eq 발생하여 총 9.534E-01 kgCO<sub>2</sub>-eq가 배출되었다.

**Table 8.** GWP of the biochar production system

Chipping/ drying	Pyrolysis	Spreading	Carbon sequestration	Total
4.048E-01	4.579E-01	9.070E-02	-2.520E+02	-2.510E+02

폐목재 1톤으로부터 생산된 70 kg의 바이오차는 토양에 적용하였을 때 252 kg의 탄소저감효과를 가지므로 바이오차 시스템의 총 온실가스 배출량을 상쇄한 후 251 kg의 탄소네거티브적 영향을 나타내었음을 확인하였다(Table 8).

#### 4. 결론

본 연구에서는 임업부산물로 발생하는 폐목재 바이오매스의 재활용방법으로서 바이오차 생산방안의 가능성을 평가하고자 하였다. 폐목재는 대부분 파티클보드, MDF (medium density fiberboard) 등으로 가공하여 물질재순환하는 방안과 우드펠릿으로 가공하여 열병합 발전 등에서 원료로 사용하는 에너지재순환 방안으로 재활용된다. 폐목재자원의 재활용 흐름은 시장의 경제논리에 따라 영향을 받게 된다. 그러나 대규모로 발생하는 사업장폐목재 또는 건설폐목재 등과는 달리 임업부산물, 농업부산물 등으로 발생하는 소규모 목질계 폐기물은 재활용을 위한 사업장까지의 운반 및 보관 단계에서 경제성을 잃게 될 때, 그대로 자연환경에 방치되거나, 또는 매립이나 노천소각 등의 처분으로 환경에 부정적인 영향을 미치게 될 뿐 아니라 경관을 해치게 된다. 본 연구에서는 농촌지역 등에서 발생하는 부산물인 목질계 폐기물을 원료로 소규모로 처리가 가능하며 생산물의 이용에 있어 토양으로 환원이 가능한 바이오차 생산 방안에 대한 환경영향을 평가하고자 하였다. 바이오차 생산공정의 단계별 환경영향과 부산물인 바이오차의 토양적용 시 바이오차가 가지는 탄소격리효과를 고려하여 분석한 결과, 탄소저감의 편익이 매우 높은 것으로 평가되었다.

본 연구는 자료의 부족으로 인하여 환경영향을 정량화하는데 있어 한계를 가지며, 향후 추가적인 연구로 신뢰성을 확보할 필요가 있다. 국내에는 현재 바이오차의 토양적용과 오염물질 제거 흡착능력과 관련한 연구가 대학을 중심으로 활발히 이루어지고 있으나, 생산시스템의 분석 및 평가와 관련된 연구는 미미한 상황이다. 이와 같은 상황을 고려할 때, 본 연구의 결과는 관련 분야에 기초자료로 제공될 수 있을 것으로 사료된다.

#### 사 사

본 연구는 환경부 GAIA ‘토양·지하수오염방지기술개발사업’으로 지원받은 과제이며, 이에 감사를 드립니다.

**KSEE**

#### References

1. Woo, S. H., “Biochar for soil carbon sequestration,” *Clean Technol.*, **19**(3), 201~211(2013).

2. Jirka, S. and Tomlinson, T., "2013 State of the biochar industry," Int. Biochar Initiative, pp. 1~61(2014).
3. Lehmann, J., "A handful of carbon," *Nature*, **447**(10), 143~144(2007a).
4. Lehmann, J. and Joseph, S., "Biochar for environmental management: An introduction, in biochar for environmental management: Science and Technology," Earthscan, London, pp. 1~12(2009).
5. Woolf, D., Amonette, J. E., Street-Perrott, F. A., Lehmann, J. and Joseph, S., "Sustainable biochar to mitigate global climate change," *Nat. Commun.*, **1**(56), 1~9(2010).
6. Lehmann, J., "Bio-energy in the black," *Front Ecol. Environ.*, **5**(7), 381~387(2007b).
7. Lim, J. E., Kim, H. W., Jeong, S. H., lee, S. S., Yang, J. E., Kim, K. H. and Ok, Y. S., "Characterization of Burcucumber biochar and its potential as an adsorbent for veterinary antibiotics in water," *J. Biol. Chem.*, **57**(1), 65~72(2014).
8. Jeong, S. and Suh, S., "Assessment of environmental impacts and CO<sub>2</sub> emissions from soil remediation technologies using life cycle assessment-Case studies on SVE and biopile systems," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **33**(4), 267~274(2011).
9. Park, P. and Kim, M., "The development of Korean life cycle impact assessment index based on a damage oriented modeling," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **32**(5), 499~508(2010).
10. Han, J., Elgowainy, A., Dunn, J. and Wang, M., "Life cycle analysis of fuel production from fast pyrolysis of biomass," *Bioresour. Technol.*, **133**, 421~428(2013).
11. Fiorentino, G., Ripa, M., Mellino, S., Fahd, S. and Ulgiati, S., "Life cycle assessment of *Brassica carinata* biomass conversion to bioenergy and platform chemicals," *J. Clean Prod.*, **66**, 174~187(2014).
12. Gaunt, j. L. and Lehmann, J., "Energy balance and emissions associated with biochar sequestration and pyrolysis bioenergy production," *Environ. Sci. Technol.*, **42**, 4152~4158(2008).
13. Huang, Y. F., Syu, F. S., Chiueh, P. T. and Lo, S. I., "Life cycle assessment of biochar cofiring with coal," *Bioresour. Technol.*, **131**, 166~171(2013).
14. Hammond, J., Shackley, S., Sohi, S. and Brownsort, P., "Prospective life cycle carbon abatement for pyrolysis biochar systems in the UK," *Energy Policy*, **39**, 2646~2655(2011).
15. Roberts, K. G., Gloy, B. A., Joseph, S., Scott, N. R. and Lehmann, J., "Life cycle assessment of biochar systems: Estimating the energetic, economic, and climate change potential," *Environ Sci Technol*, **44**, 827~833(2010).
16. Kim, J. M., "A study on the low temperature pyrolysis with timber," Master thesis, Suwon University(2010).
17. Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H. and Zheng, C., "Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis," *Fuel*, **86**, 1781~1788(2007).
18. Bridgwater, A., "Biomass pyrolysis," *IEA Bioenergy Task*, **34**, 1~9(2007).
19. ISO (International Organization for Standardization) 14040, Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework, ISO 14040:2006(E), Int Organ Standardization, Geneva, pp. 6~16(2006).
20. ISO (International Organization for Standardization) 14044, Environmental management-Life cycle assessment-Requirement and guidelines, ISO 14044:2006(E), Int Organ Standardization, Geneva, pp. 6~26(2006).
21. Levernez, H. L., Tchobanoglous, G. and Darby, J. L., "Clogging in intermittently dosed sand filters used for wastewater treatment," *Water Res.*, **43**, 695~705(2009).
22. Pozzi, A., "Biochar for carbon sequestration and large-scale removal of greenhouse gases (GHG) from the atmosphere," EP7-ENV-1010, European Commission(2010).
23. Husk, B., Preliminary evaluation of biochar in a commercial farming operation in Canada, BlueLeaf Inc.(2009).
24. Byrne, C. E. and Nagle, D. C., "Carbonized wood monoliths-Characterization," *Carbon*, **35**, 267~273(1997).
25. Francescato, V., Antonini, E. and Bergomi, L. Z., Wood fuels handbook, Biomass Trade Centers(2009).
26. Kim, S. C., Kim, K. U. and Kim, D. C., "Modeling of fuel consumption rate for agricultural tractors," *J. Biosys. Eng.*, **35**(1), 1~9(2010).
27. Esteinou, R. I., "Pyrolysis for waste treatment: A life cycle assessment of biodegradable waste, bioenergy generation," and biochar production in Glasgow and Clyde valley, Master thesis, The University of Edinburgh(2009).
28. Kim, M. H. and Kim G. H., "Analysis of environmental impacts using LCA for the carcass burial," *Kor. Soc. Water Environ.*, **29**(2), 239~246(2013).
29. Ryu, J. H. and Kim, K. H., "Application of LCA methodology on lettuce cropping systems in protected cultivation," *Kor. J. Soil Sci. Fertilizer*, **43**(5), 705~717(2010).