

## 포플러를 이용한 활성화탄 제조 시스템에 대한 전과정 평가

# Life Cycle Assessment of Activated Carbon Production System by Using Poplar

김미형 · 김건하<sup>†</sup>

Mihyung Kim · Geonha Kim<sup>†</sup>

한남대학교 건설시스템공학과

Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University

(Received September 22, 2014; Revised October 27, 2014; Accepted November 14, 2014)

**Abstract :** Phytoremediation is a technology to mitigate the pollutant concentrations such as metals, pesticides, solvents, oils, or others in contaminated water and soils with plants. The plants absorb contaminants through the root and store them in the root, stems, or leaves. Rapid growth trees such as poplar are used to remove low concentrated contaminants eco-friendly and economically in a wide contaminated region. This study was practiced to evaluate an activated carbon production system by using poplar wood discarded after phytoremediation. Life cycle assessment methodology was used to analyze environmental impacts of the system, and the functional unit was one ton of harvested poplar. It was estimated that the small size rotary kiln for activated carbon production from poplar wood had an environmental benefit in optimized conditions to minimize energy consumptions. The results of an avoided environmental impact analysis show that the system contribute to reduce environmental impacts in comparison with activated carbon production from coconut shell.

**Key Words :** Poplar, Phytoremediation, Activated carbon, Environmental impact, Life cycle assessment

**요약 :** 식물정화공법(Phytoremediation)은 식물을 이용하여 오염된 토양 또는 폐수의 유해한 오염물질을 흡수, 제거, 안정화, 무독화 시키는 기술을 의미하며, 친환경적, 경제적인 오염정화 방안이다. 포플러는 생장이 빠른 속성수종으로써 수분과 양분을 흡수하는 능력이 우수하여 각종 오염물질을 효과적으로 흡수제거하므로, 유기오염물질, 중금속 등 유해물질 제거에 높은 효율을 보이고 있다. 본 연구에서는 식물정화공법의 부산물로 발생하는 포플러를 원료로 이용한 활성화탄 제조시스템을 대상으로 전과정평가 기법에 의해 환경에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 최적의 탄화 및 활성화 조건에서 이동식 소규모의 로터리킬른 회전로를 사용하여 에너지소비를 최소화 하였을 때 환경편익이 가능한 것으로 추정되었다. 시스템경계확장방법을 적용하여 야자각을 원료로 한 활성화탄 제조시스템의 환경영향의 회피분석결과 자원고갈을 제외한 환경영향 범주에서 마이너스 효과를 보이므로 잠재적 가능성이 있는 것으로 사료된다.

**주제어 :** 포플러, 식물정화공법, 활성화탄, 환경영향, 전과정평가

## 1. 서론

식물정화공법(Phytoremediation)은 식물을 이용하여 오염된 토양 또는 폐수의 유해한 오염물질을 흡수, 제거, 안정화, 무독화 시키는 기술을 의미한다.<sup>1)</sup> 즉 식물이 뿌리로 수분과 토양의 양분을 흡수하는 능력을 이용하여 지하수와 토양의 환경오염물질을 분해하는 방법이다. 뿌리에 있는 미생물의 공동작용으로 오염물질이 정화되며, 특히 낮은 농도로 넓은 범위에 걸쳐 오염된 경우에 효과적인 것으로 알려져 있다. 흡수된 오염물질은 식물체내의 미생물에 의해 분해되어 처리되지만, 식물체내에 농축된 경우에는 식물을 잘라내서 제거하기도 한다. 식물정화공법의 장점은 그 방법이 친환경적, 경제적, 친사회적이며 또한 범용적이라는 데 있으나, 효과가 나타나기까지 장시간이 소요되며, 오염 정도가 심할 경우에는 적용이 어렵다는 단점이 있다.<sup>1)</sup> 이러한 단점을 극복하기 위해 유전공학기술을 통한 형질전환 식물을 적용하기 위한 연구도 진행되고 있다.<sup>2)</sup>

식물 중 나무는 초본식물과 달리 비교적 척박한 지역에

도 적응력이 뛰어나며, 또한 오랜 수명을 가진 다년생 식물로 숲을 조성하면 장시간 정화와 복구를 동시에 가능하게 하여 비용효과적이다. 포플러나 버드나무와 같이 생장이 빠른 속성수종은 수분과 양분 흡수 능력이 우수하여 각종 오염물질을 흡수제거하는 능력이 뛰어나므로, 식물정화공법에 가장 많이 이용되고 있으며, 실용성도 매우 높은 것으로 보고되고 있다.<sup>3,4)</sup> 식물정화공법은 주로 유류오염 지역 토양 복원 및 광산지역의 중금속 오염지역 토양복원에서 연구가 진행되어 왔으며, 최근에는 유기오염물질 제거, 매립지 침출수 처리, 축산폐수가 처리된 토양정화 등에서 포플러를 이용하여 오염물질 정화 효율을 보이고 있다.<sup>5-10)</sup>

유럽, 미국, 호주 등에서 생체량이 큰 속성수 중 오염정화를 목적으로 주로 이용하는 포플러는 일년에 3-5 m까지 자라는 속성수이며(Fig. 1), 증산량이 많아 지하수의 오염물질을 제거하는데 효과적이다(Table 1). 또한 동물이나 사람이 식용으로 섭취하는 식물이 아니므로 안전하고, 가지의 일부를 잘라내어 땅에 꽂아 쉽게 번식이 가능하며, 지상부를 수확하고 난 후 그루티기로부터 새로이 자랄 수 있다. 포플러

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



Fig. 1. Phytoremediation by poplar to remove volatile organic compounds in Troutdale gravel aquifer groundwater ((a) Department of Environmental Quality, Oregon), Phytoremediation by poplar ((b) Crookston, Minnesota) and the harvesting (c) Crookston, Minnesota).

Table 1. Estimates of evapotranspiration rates by hybrid poplars (re-citation)<sup>11)</sup>

Rate	Source
100 to 200 L/day/tree (~26 to 53 gallon/day) for 5 year old trees	Newman et al. (1997)
100 L/day/tree for a 5 year old tree under optimal conditions	Stomp et al. (1994)
13 gallons per day (estimated) when trees are calculated as low-flow pumping wells	Sheldon nelson-workshop on phytoremediation of organic contaminants (1996)
1.6 to 10 gpd/tree (observed) sap flow rates for young hybrid poplars at the Aberdeen Proving grounds in Maryland	Compton (1997)
10~11 kg/tree/day (observed) in early summer for 1-2 year old Eastern cottonwoods growing in Texas	Greg harvey (personal communication)
40 gallons per day (observed) for 5 year old trees in Utah in the summer	Ari ferro-workshop on phytoremediation of organic contaminants (1996)

의 근권부의 깊이는 4-5 m에 이르기 때문에 심토오염의 제거도 가능한 장점이 있으며 경관개선에 기여할 수 있다. 또한 바이오매스 생산량이 많기 때문에 오염정화 목적의 이용이 끝난 후 수확하여 재활용이 가능하다. 최근 국립산림연구원에서 포플러를 이용하여 중금속 해독연구가 보고되면서 포플러의 오염물질 제거능력에 대하여 국내에서도 많은 관심을 받고 있다.<sup>1)</sup>

경관을 중요시하는 현대인의 요구에 따라 향후 다양한 분야에 친환경적 정화기술인 식물정화공법의 적용이 확대될 것으로 기대되고 있다. 식물정화공법의 특성상 오염물질을 포함하는 부산물의 발생이 필연적으로 수반되게 되어 이에 대한 처리가 반드시 고려되어야 하며,<sup>12)</sup> 발생된 폐바이오매스 내 금속 및 유해한 성분이 포함되었는지 정밀한 검토에 따라 적합한 방법에 의해 처분하여야 한다.<sup>13)</sup>

활성탄은 목재, 갈탄, 무연탄, 야자각 등을 원료로 제조되는 미세기공이 잘 발달된 무정형 탄소의 집합체로서, 산업분야에서 폐가스 처리 및 휘발성 용제회수, 정수장의 고도정수처리용 등 국내 활성탄 소비량은 점차 증가하고 있다.

반면 다용도, 고기능의 다양한 제품이 개발되어 활용되고 있는 선진국에 비해 국내에서는 야자각 등 원료는 거의 전량 수입에 의존하고 있는 실정이며, 국제 원자재 가격상승과 국제 환율변동에 따라 원활한 공급에 영향을 미칠 것으로 우려되고 있다.<sup>14-16)</sup> 이에 도시생활폐기물 뿐 아니라 폐목재, 하수슬러지 등 폐바이오매스를 이용한 활성탄 제조와 관련된 연구도 진행되고 있다.<sup>17,18)</sup> Alade<sup>19)</sup>는 농업부산물을 원료로 한 활성탄 제조시스템의 인벤토리를 분석하였다. 포플러를 원료로 한 활성탄의 흡착능에 관하여 Acar<sup>20)</sup>는 포플러칩을 활성화시킨 후 Cu(II)이온의 흡착능력을 평가하였으며, Shokoohi<sup>21)</sup>는 포플러를 원료로 제조된 활성탄의 염료 흡착효율을 연구하였다. 반면 활성탄 제조시스템의 환경영향을 분석한 연구는 거의 없는 실정이며, 포플러를 원료로 한 활성탄 제조시스템의 환경영향과 관련한 연구는 이루어지지 않았다. Bayer<sup>22)</sup>는 전과정평가 기법을 이용하여 석탄을 원료로 한 활성탄 제조과정의 환경영향을 분석하였으며, Hjalila<sup>23)</sup>는 올리브슬러지를 원료로 한 실험실 규모의 활성탄 제조시스템의 환경영향평가를 수행하였다. Noijuntra<sup>24)</sup>는 코코넛껍질과 야자각을 원료로 한 활성탄 제조시스템의 환경영향을 분석하였다.

본 연구에서는 식물정화공법에서 사용된 포플러가 폐바이오매스로 발생 시 처분방안 중 열분해기술을 이용하여 활성탄으로의 재활용에 따른 환경영향을 분석하고자 하였다. 분석방법은 전과정평가방법의 국제기준을 준수하였다. 입력자료는 현장자료를 우선적으로 이용하되, 국내에는 폐바이오매스로 배출된 포플러를 이용하여 활성탄을 생산하는 사례가 없으므로 문헌조사에 의한 자료를 선정하여 보완하였다. 전과정평가 분석 환경영향 범위는 자원고갈, 산성화, 부영양화, 수계생태독성, 지구온난화, 인체독성, 오존층고갈, 광화학산화물생성, 육상생태독성 등의 영향범주별로 특성화하였다. 본 연구는 국내에서 아직까지 연구가 활성화되지 않은 식물정화공법의 잠재적 적용가능성에 기인하여, 부산물로 발생하는 폐바이오매스 재활용방안으로서 활성탄 생산시스템의 환경영향을 분석하여 관련분야에 기초자료를 제공하는 것을 목표로 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 연구목적 및 범위

본 연구는 식물정화공법의 부산물로 발생하는 페바이오매스의 처분방안 중 열분해기술을 적용하여 활성탄으로의 재활용가능성을 분석하고자 하였다. 현재 활성탄은 수질 및 대기질 관리를 목적으로 환경분야, 식품공업 등 산업분야에서 사용되는 대표적인 흡착제로서 필터링, 탈색, 탈취, 용제회수, 가스제거 등 다양한 분야에 사용이 확대되고 있다. 반면 원료는 거의 전량 수입에 의존하고 있는 실정으므로, 페바이오매스를 이용한 활성탄제조 공정이 환경에 미치는 영향을 평가하여 향후 이용가능성을 폐기물관리 측면에서 분석하여 기초자료를 제공하고자 하였다.

### 2.2. 분석방법

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, 즉 요람에서 무덤까지에 걸쳐 환경 측면에서 잠재적인 환경영향을 분석하는 방법이다. 전과정평가 방법론의 국제기준에 의한 절차는 목적 및 범위 정의 단계, 목록분석 단계, 영향평가 단계, 해석 단계의 4단계로 구성된다.<sup>25,26)</sup>

본 연구에서는 페바이오매스로 배출되는 포플러를 원료로 사용하는 활성탄 생산공정을 시스템 경계로 설정하여(Fig. 2), 시스템 내로 투입되는 모든 물질들과 배출되는 모든 물질들을 기능단위에 맞게 정량화하여 목록을 구성하였다. 전과정평가 기법을 사용함으로써 활성탄 생산공정에 사용된 모든 물질재료의 종류별 사용량과 에너지 사용량을 분석하여 각각의 재료와 에너지 생산과정에서 발생하는 총 오염물질의 양을 포함하여 정량적으로 평가할 수 있게 된다.

### 2.3. 바이오매스의 활성탄 생산공정

활성탄제조공정은 전처리공정, 탄화공정, 활성화공정, 후처리공정의 4단계로 구분된다. 전처리공정은 유입되는 바이오매스의 조건을 탄화 및 활성화공정에 적합한 조성을 갖추도록 원료를 처리하는 단계이다. 탄화공정은 유기질성분인 원료를 약 500℃ 정도로 가열하여 산소, 수소, 질소 및 유황 등 비탄소 성분을 감소시켜 활성화에 필요한 탄소질 재료를 얻어내기 위한 공정이며, 산소가 없거나 거의 없는 상태에서 실시한다. 이 열분해 반응과정에서 물, 이산화탄소, 경질 탄화수소가 휘발되면서 동시에 액상 타르가 유출되며, 최종 부산물인 목탄이 생성된다. 활성화공정은 800~1,000℃의 온도범위에서 일어나는 탄소의 산화반응으로 탄화물의 표면을 침식시켜 탄화물의 미세공 구조를 발달시키는 공정이며, 가스(수증기, 이산화탄소, 공기 등 산화성 가스)활성화법과 약품(염화아연, 인산, 황산 등 각종 탈수성 무기약품)활성화법으로 구분되는데 장치부식, 2차 환경오염 및 제조공정의 복잡성 등의 문제로 인해 가스활성화법이 보다 널리 사용되고 있다.<sup>27)</sup>

### 2.4. 자료수집 및 분석모델

포플러를 원료로 한 활성탄 생산공정과 관련하여 국내에는 연구가 시도되고 있지 않는 실정므로, 신뢰할 수 있는 현장 데이터가 없으므로 투입산출물의 데이터는 문헌조사에 의하여 자료를 수집하였다. EU Commission에서 제공하는 포플러를 원료로 이용한 탄화공정의 전처리 단계인 파쇄 및 건조 공정의 인벤토리를 이용하여 본 연구의 전처리 공정의 데이터를 구축하였다.<sup>28)</sup> 탄화공정의 자료는 국외 4개 로터리킬른 제조업체의 기술담당자와의 설문에 의해 추정하였으며, 활성화공정의 자료는 국내 활성탄 제조업체인 W사, U사의 기술담당자의 설문에 의해 수집하였다. 분석에 필요한 상위흐름과 하위흐름 자료는 환경부와 지식경제부에서 구축한 데이터베이스를 이용하였으며, 분석도구는 환

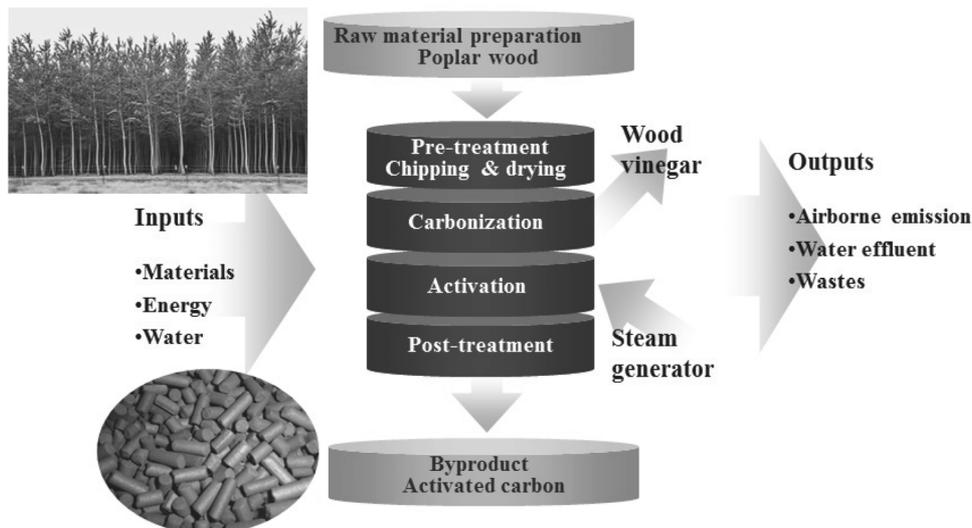


Fig. 2. Schematic diagram of activated carbon production system.

정부에서 개발한 TOTAL 4.0을 사용하였다.

### 2.5. 기능단위 및 가정사항

본 연구는 열분해 방식으로 활성탄을 생산하는 공정을 연구 대상으로 하여 시스템경계를 구성하고, 시스템에 유입되는 바이오매스를 포플러로 선정하였다. 활성탄제조시스템의 원료로 사용되는 페바이오매스인 포플러 1톤을 기능단위로 하였으며, 정량적 평가를 위한 기준흐름(reference flow)은 포플러 1톤으로 설정하였다. 그러나 데이터 수집의 한계로 인하여 본 연구에서는 다음과 같은 가정을 하였다.

- 가축매몰지 등 침출수로 인한 토양 및 지하수 오염이 우려되는 지역의 오염을 정화하며, 동시에 경관을 개선할 수 있는 방안으로 고려되는 유기오염물질의 정화기술인 식물정화공법 적용을 가정하였다.
- 원료로 사용된 포플러는 식물정화공법의 부산물로 발생하였으며, 중금속이 축적되어 있지 않음을 가정하였다.
- 식물정화공법의 부산물인 페바이오매스의 처분방안은 소각 또는 퇴비화,<sup>13)</sup> 압밀 및 열분해를 통한 중간처리와 회화 등의 최종처리<sup>12)</sup>으로 구분하여 처리되게 되며, 본 연구에서는 열분해기술을 이용하여 활성탄으로 재활용하는 시나리오를 가정하였다.
- 활성탄은 목재를 원료로 하여 로터리킬른 반응기에서 탄화공정과 활성화공정을 연속수행하는 것으로 가정하였다.
- 운반거리, 목초액 등 부산물의 이용은 시스템경계 내에 포함하지 않았다.
- 생산된 활성탄의 이용단계 및 재생사용단계는 시스템경계 내에서 제외하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 인벤토리 구축 결과

원료로 선정된 바이오매스인 포플러의 물리화학적 특성은 Table 2와 같다. 포플러는 단기 속성수로 이탈리아의 Gadesco Pieve Delmona에서 재배되어 회수되었으며, 특성 분석은 고품연료에 관한 EU 표준에 의해 수행되었다.<sup>28)</sup>

회수된 포플러는 파쇄공정과 건조공정을 거쳐 열분해를 위한 적합한 상태로 전처리한 후, 탄화장치로 투입된다. 파쇄 및 건조공정의 에너지 사용량 및 물질수지 자료는 European Commission 보고자료를 이용하였다.<sup>28)</sup> 포플러 1톤을 전처리하기 위하여 파쇄공정에서 경유 1.18 L가 소비되었으며, 건조공정에서 요구되는 에너지는 연료에너지 185 MJ와 열에너지 1,666 MJ 에너지가 소비된 것으로 분석되었다 (Table 3). 시스템경계로 유입되는 포플러의 수분함량은 60%이며, 건조 후 수분함량은 10%로 나타났다.

국내 활성탄제조 업체인 W사 관계자와의 심층설문결과, 국내에서 목재를 원료로 활성탄을 제조하는 생산업체는 전

Table 2. Feedstock characterization<sup>28)</sup>

Parameters	Value-name	Units	Reference methods
particle size < 3,15 mm	11	%	CENTS 15149-1:2006
particle size < 3,15 -16 mm	47	%	CENTS 15149-1:2006
particle size < 16-40 mm	42	%	CENTS 15149-1:2006
particle size > 40 mm	0	%	CENTS 15149-1:2006
Bulk density	260	kg·m <sup>3</sup>	UNI EN 15103:2010
Humidity	58	%	UNI EN 14774-1:2009
Ash550 °C	5,06	%	UNI EN 14775:2010
Lignin	39,1	%DM	Detergent method for total lignin-Christian K,R,1971-Fd, Stn, Rec, Div, PI, CSIRO 10:29-34
Cellulose	37,8	%DM	Detergent method for total lignin-Christian K,R,1971-Fd, Stn, Rec, Div, PI, CSIRO 10:29-34+ASPA Van Soest: 1980
Hemicelluloses	7,5	%DM	ASPA Van Soest: 1980
Low calorific power	4,352	cal·g <sup>-1</sup> DM	UNI EN 14918:2010

Table 3. Pre-treatment of activated carbon production process<sup>28)</sup>

Treatment	Value-name	Units	Comments
Treatment process 1	Chipping	-	
Machinery required	Chipping harvester	-	
Manufacturer of machinery	Krone	-	
Model of machinery	BIG x 700	-	Characteristics: MNAN-V8 engine, 16,16 liters displacement, engine power 570/775 kW/hp, max, chopping power 492/669 kW/hp
Machinery capacity	30	tons h <sup>-1</sup>	
Surface performance	1	ha h <sup>-1</sup>	
Input-diesel*	1,18	L ton <sup>-1</sup>	
Other input	No	-	
Output-emissions	-	-	
Other output	No	-	
Treatment process 2	Drying	-	At 10% humidity
Machinery required	Static dryer	-	
Manufacturer of machinery	AGT-Adv, Gas, Tech,	-	
Model of machinery	D1	-	
Machinery capacity	6,650	ton year <sup>-1</sup>	
Input-energy*	185	MJ	
Input-heat*	1,666	MJ	
Other input	No	-	
Output-emissions	No	-	
Other output	No	-	
Process efficiency	70	%	

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

Table 4. Commercial rotary kiln for using data collection by survey

Product specification	Kiln dimensions			Capacity (t/d)	Rotation speed (r/min)	Motor power (kw)	Total weight (t)	Company
	Diameter (m)	Length (m)	Obliquity (%)					
Φ2,5×40	2,5	40	3,5	180	0,44-2,44	55	149,61	HH
Φ2,8×44	2,8	44	3,5	312	0,44-2,18	55	201,58	HS
Φ2,7×42	2,7	42	3,5	320	0,10-1,52	55	198,5	ZU
Φ2,2×45	2,2	45	3,5	106	0,21-2,44	45	128,3	HD

혀 없으며, 석탄계 원료를 사용하는 일부 업체를 제외하면 대부분 야자각을 원료로 활성탄을 제조하는 것으로 나타났다. 야자각은 현지에서 탄화공정까지 완료되어 수입되고 있으며, 국내에서 활성화공정을 거쳐 활성탄으로 생산된다. 본 연구에서는 식물정화방법으로 이용된 후 처분되는 목재의 재활용 방안으로서 활성탄제조 공정의 환경영향 분석을 목적으로 하였으므로 목재를 이용한 활성탄제조공정의 최적조건을 도출한 선행연구의 결과를 고려하여 수행하였다.<sup>27)</sup> 농림부의 선행연구에 의하면 활성탄제조공정은 로터리킬른형 반응기에서 탄화공정과 활성화공정이 연속으로 수행되며, 스팀활성화방법에 의해 활성화가 이루어진다. 파쇄 및 건조된 원료는 최적탄화조건(요오드흡착력, BET 값 등 물성치가 가장 높았으며 SEM을 이용한 관찰에서 세공이 가장 발달)인 500℃에서 2시간 저온열분해시켜 원료에 포함된 휘발성 조직을 연소시키고 탄소결정체로 조직화된 탄화물을 생성하였다.<sup>27)</sup> 활성화공정은 850~950℃에서 60분간 115℃의 수증기를 투입하여 미세한 다공질의 흡착탄을 생성하는 단계이다. 탄화공정의 수율은 약 30%, 활성화공정의 수율은 약 54%로 분석되었으며, 따라서 목재 1톤으로부터 활성탄 163 kg이 생산되었다. 로터리킬른 반응기를 이용한 탄화공정의 자료는 로터리킬른 반응기를 판매하고 있는 국외 4개 업체의 관련자와의 설문조사를 통하여 자료를 수집하였다(Table 4). 선행연구에 의한 최적조건과 유사한 탄화조건에서 1톤의 목재를 탄화하기 위한 에너지는 약 216 MJ인 것으로 추정되었다. 활성화공정의 자료는 W사, U사를 방문하여 현장자료를 수집하였다. W사, U사는 탄화처리된 야자각을 수입하여 원료로 사용하며, 로터리킬른 스팀활성화방법을 이용하여 활성탄을 제조하고 있다. 로터리킬른은 950℃에서 180분간 수행되며 로터리킬른의 모터구동과 스크러버 가동, 스팀보일러의 에너지가 소비되었다. W사와 U사의 공정자료를 기초로 할당의 방법에 의해 60분의

Table 5. Inventory of poplar-AC system

	Material/process	Value	Unit
Input	Material	Poplar wood	1 ton
		Water	75 kg
		Chipping	41,8 MJ
	Energy	Drying	1,851 MJ
		Carbonization	216 MJ
		Activation	127 MJ
Output	Product	Activated carbon	163 kg

공정자료를 추산하면, 목재 1톤의 활성화공정에서 약 127 MJ의 에너지가 소비되는 것으로 추정되었다. 소비되는 물사용량은 목재 1톤당 1시간 동안 75 kg 소비되는 것으로 추정되었다. 인벤토리는 Table 5에 제시한 바와 같다.

### 3.2. LCA 방법에 의한 환경영향 분석

환경에 미치는 영향정도를 정량적이고 정성적으로 추산하기 위하여 LCA 방법을 이용하였다. 포플러를 원료로 한 활성탄제조시스템이 환경에 미치는 영향을 평가하기 위하여 목록분석단계에서 규명된 에너지 및 천연자원의 소비와 배출물이 환경에 미치는 영향을 환경영향범주별로 분류하는 분류화(classification)단계와 분류된 항목들이 각각의 영향범주에 미치는 영향을 정량화하는 특성화(characterization)단계를 통하여 특정 영향범주에 속하는 모든 목록항목들의 영향을 합산하여 수치로 나타내게 된다. 영향범주는 자원고갈<sup>a)</sup>, 산성화<sup>b)</sup>, 부영양화<sup>c)</sup>, 수계생태독성<sup>d)</sup>, 지구온난화<sup>e)</sup>, 인체독성<sup>f)</sup>, 오존층고갈<sup>g)</sup>, 광화학산화물생성<sup>h)</sup>, 육상생태독성<sup>i)</sup> 등의 영향범주별로 특성화하였으며, 수식으로 나타내면 다음과 같다.<sup>29)</sup>

$$C_{ij} = Load_j \cdot eqv_{ij} \tag{1}$$

- $C_{ij}$  : 목록항목 j가 영향범주 i에 미치는 영향의 크기
- $Load_j$  : 목록항목 j의 환경부하량
- $eqv_{ij}$  : i 영향범주에 속한 목록항목 j의 상응인자 값

- a) Abiotic resource depletion; 세계자원매장량 기준 reserve-base 접근법으로 무생물 자원고갈의 환경부하 산정
- b) Acidification; 산성화를 유발하는 물질에서 방출되는 proton(H<sup>+</sup>)의 수를 SO<sub>2</sub>의 당량으로 나타냄
- c) Eutrophication; 부영양화를 유발하는 물질은 PO<sub>4</sub>의 당량으로 나타냄
- d) Freshwater aquatic ecotoxicity; 수생태계에 미치는 영향을 화학적, 생물학적 물질의 양을 1,4 DCB로 나타냄
- e) Global warming; 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
- f) Human toxicity; 대기, 수질 및 토양에 배출되는 오염물질이 인간에 미치는 영향을 1,4 DCB로 나타냄
- g) Ozone depletion; 오존층을 파괴하는 물질의 정도를 CFC11에 의한 오존감소정도를 기준
- h) Photochemical oxidant creation; 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 생성정도
- i) Terrestrial ecotoxicity; 육상생태계에 미치는 영향을 화학적, 생물학적 물질의 양을 1,4 DCB로 나타냄

**Table 6.** Environmental impacts of AC production from poplar

Impact category	Unit	Chipping	Drying	Carbonization	Activation	Total
Abiotic resource depletion	1/year	2,71E-02	8,87E-01	1,04E-01	6,21E-02	1,08E+00
Acidification	kg SO <sub>2</sub> -eq	1,44E-04	4,31E-01	5,02E-02	3,02E-02	5,11E-01
Eutrophication	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -eq	9,84E-06	8,01E-02	9,34E-03	5,61E-03	9,50E-02
Freshwater aquatic ecotoxicity	kg 1,4 DCB-eq	2,65E-04	1,81E-02	2,12E-03	1,27E-03	2,18E-02
Global warming	kg CO <sub>2</sub> -eq	7,02E-02	2,55E+02	2,97E+01	1,78E+01	3,02E+02
Human toxicity	kg 1,4 DCB-eq	2,22E-04	5,69E-02	6,64E-03	4,21E-03	6,80E-02
Ozone depletion	kg CFC11-eq	1,08E-10	5,86E-09	6,84E-10	4,11E-10	7,06E-09
Photochemical oxidant creation	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq	1,15E-05	1,76E-01	2,06E-02	1,23E-02	2,09E-01
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4 DCB-eq	3,42E-09	1,03E-08	1,20E-09	9,56E-10	1,59E-08

**Table 7.** Avoided environmental impact of AC scenario

Impact category	Unit	Environmental impact		Avoided environmental impact (a-b)
		Poplar (this study) (a)	Coconut shells (b)	
Abiotic resource depletion	1/year	1,08E+00	1,00E-01	9,80E-01
Acidification	kg SO <sub>2</sub> -eq	5,11E-01	8,22E+00	-7,71E+00
Eutrophication	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -eq	9,50E-02	4,93E-01	-3,98E-01
Freshwater aquatic ecotoxicity	kg 1,4 DCB-eq	2,18E-02	1,95E+01	-1,95E+01
Global warming	kg CO <sub>2</sub> -eq	3,02E+02	4,85E+02	-1,83E+02
Human toxicity	kg 1,4 DCB-eq	6,80E-02	2,02E+02	-2,02E+02
Ozone depletion	kg CFC11-eq	7,06E-09	1,41E-04	-1,41E-04
Photochemical oxidant creation	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq	2,09E-01	7,86E-01	-5,77E-01
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4 DCB-eq	1,59E-08	4,46E-03	-4,46E-03

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

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

본 연구에서 열분해공정을 이용하여 포플러 1톤을 원료로 활성탄을 생산하는 시스템의 환경에 미치는 영향을 분석한 결과, 자원고갈 1.08E+00/yr, 산성화 5.11E-01 kg SO<sub>2</sub>-eq, 부영영화 9.50E-02 kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-eq, 수계생태독성 2.18E-02 kg 1,4 DCB-eq, 지구온난화 3.02E+02 kg CO<sub>2</sub>-eq, 인체독성 6.80E-02 kg 1,4 DCB-eq, 오존층고갈 7.06E-09 kg CFC11-eq, 광화학산화물생성 2.09E-01 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-eq, 육상생태독성 1.59E-08 kg 1,4 DCB-eq로 분석되었다(Table 6).

### 3.3. 회피효과

포플러를 폐기처분하지 않고 회수하여 활성탄으로 재활용하게 되면 재활용되는 량에 해당하는 새로운 활성탄을 대체할 수 있게 되므로 환경에 미치는 영향을 회피하는 효과를 얻을 수 있게 된다. 시스템확장 방법을 이용하여 회피효과를 산정하였다. 활성탄의 원료로 톱밥, 목재, 야자각 등 식물계 원료와 갈탄, 역청탄 등 석탄계 원료, 석유 잔사 등 석유계 원료가 사용되는데 최근 활성탄의 원료로 가장 일반적으로 사용하고 있는 원료는 야자각으로 알려져 있다. 본

연구에서는 회피효과를 산정하기 위하여 야자각을 원료로 한 활성탄 제조시스템의 환경영향을 분석하였다. 데이터는 환경부 DB를 이용하였다. 야자각을 원료로 이용한 활성탄 제조시스템의 환경영향의 회피효과를 적용한 결과, 포플러를 이용한 활성탄 제조시스템의 환경영향은 자원고갈 9.80E-01/yr, 산성화 -7.71E+00 kg SO<sub>2</sub>-eq, 부영영화 -3.98E-01 kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-eq, 수계생태독성 -1.95E+01 kg 1,4 DCB-eq, 지구온난화 -1.83E+02 kg CO<sub>2</sub>-eq, 인체독성 -2.02E+02 kg of 1,4 DCB-eq, 오존층고갈 -1.41E-04 kg of CFC11-eq, 광화학산화물생성 -5.77E-01 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-eq, 육상생태독성 -4.46E-03 kg 1,4 DCB-eq로 분석되었다(Table 7).

## 4. 결론

미국, 독일 등 선진국에서는 1990년 초부터 식물정화공법을 적용하여 오염된 토양, 지하수 및 각종 오폐수 정화를 목적으로 광범위하게 이용하고 있다. 최근 미국에서는 중금속, 유류오염으로 인한 토양 및 지하수 오염 정화뿐 아니라 하천변에 수변완충림(riparian forest buffer)을 설치하여 하천생태계를 복원하고, 비점오염원 저감, 토양침식방지, 야생동물 은신처 제공 등 다양한 목적으로 식물정화공법을 적용하고 있다. 식물정화공법의 적용을 위해 오염물질 축적능력이 뛰어난 고축적식물을 이용할 수 있으나, 고축적식물의

대부분은 생체량이 매우 작은 식물종이 대부분이며, 매우 느리게 자라기 때문에 오염토양 전체를 기준으로 할 때 제거효율이 낮은 단점이 있다. 따라서 오염물질 축적농도는 낮지만 상대적으로 큰 생체량 때문에 흡수 절대량이 높은 생체량이 큰 속성수를 이용하는 기술이 현장에 적용성이 크다고 할 수 있다.

본 연구는 친환경적 오염정화기술인 식물정화공법의 부산물로 생산되는 폐바이오매스인 포플러를 재활용하는 방안으로 열분해기술을 이용한 활성탄제조공정 시나리오의 환경영향을 검토하고자 하였다. 분석결과 최적의 탄화 및 활성화 조건에서 이동식 소규모의 로터리킬른 회전을 사용하여 에너지소비를 최소화 하였을 때 환경편익이 가능한 것으로 추정되었다. 시스템계확장방법을 적용하여 야자각을 원료로 한 활성탄 제조시스템의 환경영향의 회피분석결과 자원고갈을 제외한 모든 환경영향 범주에서 마이너스 효과를 보이므로 잠재적 활용가능성이 있는 것으로 사료된다.

본 연구는 자료의 부족으로 신뢰성의 한계가 있으므로, 향후 추가적인 연구로 신뢰성을 확보할 필요가 있다. 그럼에도 본 연구의 결과는 경관의 중요도와 친환경적 자원재활용의 요구가 증가하는 현대사회의 요구에 따라 향후 확대적용될 것으로 기대되는 식물정화공법의 부산물인 포플러의 재활용방안을 분석한 자료로서 의미를 가지며, 향후 관련분야의 기초자료로 제공될 수 있을 것으로 사료된다.

## Acknowledgement

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

KSEE

## References

- Lim, J., Lee, L., Bae, S. and Jeong, Y., "Development of phytoremediation technology in abandoned mine," Korea Forest Service, Daejeon, pp. 1~63(2012).
- Jeoung, Y-H., Kim, Y-N., Kim, K-R. and Kim, K-H., "Physiological response and cadmium accumulation of *MuS1* transgenic tobacco exposed to high concentration of Cd in soil: Implication to phytoremediation of metal contaminated soil," *Kor. J. Soil Sci. Fertilizer*, **46**(1), 58~64(2013).
- Koo, Y. B. and Yeo, J. K., "The status and prospect of poplar research in Korea," *J. Kor. Energy*, **22**(2), 1~17(2003).
- Shin, K. H., Son, A., Cha, D. k. and Kim, K. W., "Review on risks of perchlorate and treatment technologies," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **29**(9), 1060~1068(2007).
- Aitchison, E. W., Kelley, S. L., Alvarez, P. J. and Schnoor, J. L., "Phytoremediation of 1,4-Dioxane by hybrid poplar trees," *Water Environ. Res.*, **72**(3), 313~321(2000).
- Chang, S. W., "Phytoremediation study of diesel contaminated soil by indigenous poplar tree," *J. Kor. Soil Groundwater Environ.*, **11**(5), 51~58(2006).
- Ok, Y. S., Kim, S. H., Kim D. Y., Lee, H. N., Lim, S. K. and Kim, J. G., "Feasibility of phytoremediation for metal-contaminated abandoned mining area," *Kor. J. Soil Sci. Fertilizer*, **36**(5), 323~332(2003).
- Quinn, J. J., Negari, M. C., Hinchman, R. R., Moos, L. P., Wozniak, J. B. and Gatiliff, E. G., "Predicting the effect of deep-rooted hybrid poplars on the groundwater flow system at a large-scale phytoremediation site," *Int. J. Phytoremediat.*, **3**(1), 41~60(2001).
- Robinson, B. H., Mills, T. M., Petit, D., Fung, L. E., Green, S. R. and Clothier, B. E., "Natural and induced cadmium-accumulation in poplar and willow: Implications for phytoremediation," *Plant Soil*, **227**, 301~306(2000).
- Rugh, C. L., Senedoff, J. F., Meagher, R. B. and Merkle, S. A., "Development of transgenic yellow poplar for mercury phytoremediation," *Nature Biotechnol.*, **16**, 925~928(1998).
- Chappell, J., "Phytoremediation of TCE using *Populus*," EPA, Cincinnati, pp. 1~59(1997).
- Lee, J., Zhao, X., Han, J. and Kim, J., "Methane production potential from phytoremediation plant disposal by BMP test," *In proceedings of Kor. Soc. Waste Manage, Kor. Soc. Waste Manage.*, Seoul, **3**, p. 743(2013).
- EPA (Environmental Protection Agency), "Introduction to phytoremediation," Cincinnati, pp. 1~72(2000).
- Kim, J. M., Chung, C. K. and Min, B. H., "A study on development of activated carbons from waste timbers," *J. Kor. Inst. Resour. Recycl.*, **17**(6), 68~78(2008a).
- Kim, K. S., "Activated carbon and Zeolite," *J. Kor. Geo-Environ. Soc.*, **177**, 16~20(1998).
- Park, J. S., "A study on adsorption characteristics and economical valuation of activated carbon for water purification," *J. Kor. Technol. Soc. Water Waste Water Treatment*, **10**(2), 69~76(2002).
- Sang, H. S. and Cho, I. H., "A study on manufacturing of functional active coal from wastes," *In proceedings of Kor. Soc. Ind. Application, Kor. Soc. Ind. Application*, pp. 7~22(2004).
- Kim, J. M., Chung, C. K. and Min, B. H., "A study on the optimal condition of producing charcoals to develop activated carbons from a discarded timber," *J. Kor. Inst. Resour. Recycl.*, **17**(5), 66~75(2008b).
- Alade, A. O., Amuda, O. S. and Bello, M. O., "Life cycle inventory analysis (LCIA) of production of activated carbons from selected agricultural materials," *Pollut.*, **44**, 7275~7279(2012).
- Acar, F. N. and Eren, Z., "Removal of Cu(II) ions by activated poplar sawdust (samsun Clone) from aqueous solutions," *J. Hazard. Mater.*, **137**(2), 909~914(2006).
- Shokoohi, R., Vatanpoor, V., Zarrabi, M. and Vatani, A., "Adsorption of acid red 18(AR18) by activated carbon from poplar wood-A kinetic and equilibrium study," *E-J. Chem.*, **7**(1), 65~72(2010).
- Bayer, P., Heuer, E., Karl, U. and Finkel, M., "Economical

- and ecological comparison of granular activated carbon (GAC) adsorber refill strategies,” *Water Res.*, **39**, 1719~1728(2005).
23. Hjärla, K., Bacchar, R., Sarrà, M., Gasol, C. M. and Blázquez, P., “Environmental impact associated with activated carbon preparation from olive-waste cake via life cycle assessment,” *J. Environ. Manage.*, **130**, 242~247(2013).
  24. Noiuntira, I. and Kittisuparkorn, P., “Life cycle assessment for the activated carbon production by coconut shells and palm-oil shells,” The 2<sup>nd</sup> RMUTP Int Conference 2010, Bangkok, pp. 228~231(2010).
  25. ISO (International Organization for Standardization), “Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework, ISO 14040:2006(E),” Int Organ Standardization, Geneva, pp. 6~16(2006).
  26. ISO (International Organization for Standardization), “Environmental management-Life cycle assessment-Requirement and guidelines, ISO 14044:2006(E),” Int Organ Standardization, Geneva, pp. 6~26(2006).
  27. Chung, C. K., “Utilization of discarded tree debris for commercial production of activated carbon,” MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs), Sejong-si, pp. 1~234(2000).
  28. European Commission, “Biochar for carbon sequestration and large-scale removal of greenhouse gases (GHG) from the atmosphere,” EP7-ENV-1010, European Commission(2010).
  29. 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).