

## 열화학 플랫폼 : 바이오차 연구 동향

우승한, 이철우\*

한밭대학교 화학생명공학과  
{shwoo, \*cwlee}@hanbat.ac.kr

### 서론

오늘날 화석연료의 과도한 사용으로 인한 온실가스의 발생량 증가는 지구촌 곳곳에서 급격한 기후변화 징조를 야기하고 있고 이에 대한 우려가 점차 현실화되고 있다. 이를 막고자 하는 전 세계적인 기후변화 대책과 온실가스 감축 노력에 의해 2005년 2월 교토 의정서가 발효되었고, 현재는 2020년까지 유보된 상태지만 2015년까지 포스트 교토의정서에 대한 합의를 필요로 하고 있는 상황이다. 2014년에는 기후변화에 대한 정부간협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) 제5차 보고서가 발표되었고, 그 내용에 의하면 지구 평균온도가 산업화 이전 대비 2°C 이상 상승하는 것을 억제하기 위해서는 오는 2050년까지 세계 온실가스배출량을 2010년 대비 40~70%를 감축해야 한다. 우리나라는 현재 온실가스 의무감축국은 아니지만 이산화탄소 배출량 규모 세계 9위이므로 포스트 교토 2020 체제에 포함될 가능성이 높음에 따라 적극적인 탄소배출 저감 정책과 관련 기술의 개발이 시급히 필요하다 하겠다.

한편 2007년 코넬대학교의 Lehmann 교수는 "A handful of carbon"이라는 *Nature* 논문에서 바이오차(Biochar)의 탄소 negative 메커니즘을 제안한 바 있다. 2008년 *Discovery Science*의 *Ecopolis* 프로그램에서 노벨상 수상자이자 오바마 에너지 자문인 UC버클리의 Kammen 교수는 20개 혁신적 탄소저감 기술을 비교한 결과 바이오차 기술이 21% 탄소감축으로 가장 효과적인 대안이 될 수 있음을 소개하였다. 바이오

차는 바이오매스를 이용하여 산소가 없는 환경에서 열분해할 때 만들어지는 탄소함량이 높은 고형물이다. 바이오차는 탄소감축으로서의 효용성뿐만 아니라, 바이오매스 폐기물을 원료로 하는 환경관리 측면, 토양 개량제로의 사용을 통한 농업 생산성 개선, 환경오염 물질의 직접적인 제거, 신재생 바이오에너지로의 활용과 같은 다양한 효용성으로 인해 최근 전 세계적으로 크게 주목받고 있다. 현재, 목질계 바이오매스를 이용한 열분해 산물로 바이오차 연구는 활발히 진행 중에 있으나 해조류 바이오매스 유래 바이오차는 초기 연구단계이다. 이에, 본 기고에서는 넓은 범위에서 기후변화 저감과 관련된 바이오차 연구 동향을 중심으로 살펴보겠다.

### 바이오차의 발견

1879년에 Herbert Smith는 아마존을 탐험하던 중 원주민의 설탕 농업에 대해, 사탕수수의 높이가 3 m에 굵기가 손목 두께에 이르며 경이로운 생산력을 가지고 있다고 보고한 바 있다. 그는 그 비밀이 아마존의 *terra preta* (dark earth, 검은 흙) 토양에 있다고 설명하였다. 아마존에서 검은 흙이 발견된 지역은 과거에 아마존 강을 따라 사람들이 모여 살았던 지역과 일치하며, 오래된 것은 7,000년 전에 생성된 것도 있다고 한다. *terra preta*에 대한 최초의 과학적 연구는 Wim Sombroek에 의해 집대성되었는데, 그는 1966년 아마존에서의 다양한 농업적 관찰들을 정리한 "Amazon Soils"라는 책을 발간하였다. 그와 함께 연

구한 바 있는 독일 베이루트 대학의 Bruno Glaser는 아마존 토양이 곡물 생산성을 2배 정도 증가시킬 수 있다고 보고하였다. 바이오차를 토양에 주입하면 질소와 인 같은 영양분의 손실이 적고, 물의 건조를 방지하고, 토양 산성화를 방지하며, 미생물의 성장을 돕는 효과를 가지고 있다. 일반 토양의 경우 탄소의 함량은 1% 미만인데 비해 아마존 토양의 경우 탄소 함량이 약 10%까지 증가할 수 있다. Sombroek는 1992년 *terra preta*에서 작물 경작을 하면 그렇지 않은 경우(1 ha 당 100 톤)에 비해 2.5배 많은 탄소를 저장할 수 있는데, 이는 바이오차에 의한 탄소량의 증가, 미생물 유기물의 증가, 곡물 생산성의 증가에 기인한다. 아마존에서 *terra preta*를 발견한 이후 오랜 세월동안 농업 생산성 향상의 측면에서 주로 관심을 가지고 있었으나, 이와 같이 탄소격리의 관점에서 중요성을 발견한 이후로 큰 주목을 받기 시작했다고 할 수 있다.

2006년 필라델피아에서 열린 World Congress of Soil Science에서 일군의 과학자들은 *terra preta*를 탄소격리와 바이오 연료의 관점에서 새롭게 재조명할 필요가 있다는 논의를 하면서 “Black is the new green”이라는 제목으로 *Nature*에 기고하였다. 그리고 2007년 코넬대 Lehmann 교수는 *Nature*에 발표한 논문에서 기존의 식물을 키워서 바이오 에너지를 회수하는 방법은 탄소 중립적인데 반해 바이오차를 토양에 넣는 방법은 진정한 탄소 negative 방법이라는 것임을 제안하였다. 이 시점 이후로 바이오차에 대한 관심이 학술적으로 또는 정책적으로 급격하게 증가하고 있다. 물론 오래 전부터 유사한 물질로서 charcoal, soot, black carbon, agrichar 등의 용어로 다양한 방면에서 연구가 되어 왔지만, “biochar”라는 용어를 이용하여 탄소격리와 관련된 새로운 시각으로 주목을 받고 다양한 연구를 시작하게 된 것은 그다지 오래 되지 않았다. 2005년 이후 scopus DB를 이용하여 “biochar”를 키워드로 발표 논문을 조사하면 최근에 그 수가 급격하게 증가하고 있는 것을 볼 수 있는데, 2005년에는 1편이던 것이 2013년에는 530편의 논문이 발표되었다(그림 1). 물론

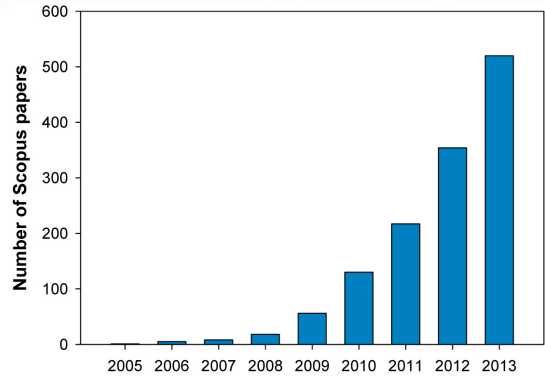


그림 1. SCOPUS DB에 발표된 바이오차 관련 연구논문의 수

위의 검색방법에 의해 검색되지 않은 biochar 관련된 논문들이 2005년 이전에도 발표되었다는 것은 염두에 둘 필요가 있다. 특히 주목할 만한 것은 탄소격리 이슈의 중요성으로 인해 2006년 이후 지금까지 바이오차 관련된 논문이 *Nature* 및 *Science*에만 약 10여 편 정도 발표되고 있다는 점이다.

### 바이오차의 탄소감축 원리

바이오차는 탄소중립의 기존 바이오매스 에너지와는 달리 대기 중의 탄소를 토양에 저장하는 carbon negative 도구가 될 수 있다. 바이오매스의 열분해를 통해 생산되는 gas와 oil로부터 에너지를 회수하고, 바이오차는 토양으로 주입하여 탄소를 반영구적으로 저장함으로써 전체적으로 지구의 탄소함량을 줄일 수 있다는 개념이다[그림 2]. 이산화탄소가 식물의 광합성에 의해 흡수되면 50%는 호흡에 의해 다시 대기 중으로 방출되고, 50%는 바이오매스의 증가를 야기시킨다. 증가된 바이오매스는 결국 토양으로 축적된 후 토양미생물에 의해 분해되어 결국 모두 이산화탄소로 대기 중에 방출되므로 탄소중립이 되고, 바이오매스가 바이오에너지로 사용된다면 마찬가지이다. 반면, 바이오차의 경우에는 바이오매스에 축적된 50%의 이산화탄소 중 약 절반의 탄소는 바이오차에 저장되고, 이를 토양에 넣으면 약 80%는 거의 분해되

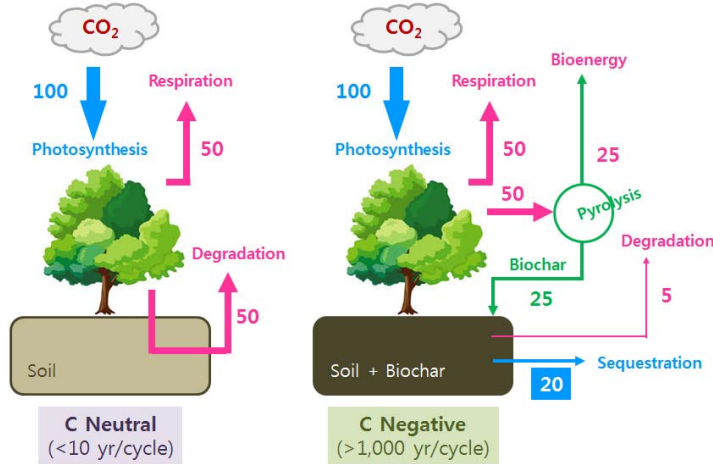


그림 2. 바이오차의 탄소감축 원리

지 않고 남아있게 된다. 전체적으로 보면 초기 이산화탄소의 약 20%를 토양 속으로 바이오차의 형태로 격리시킬 수 있다. 이는 마치 인류 문명이 오랜 세월동안 자연에 의해 만들어진 석유와 석탄을 잠자고 있던 지하로부터 꺼내어 대기중으로 방출시켜온 과정의 반대 방향인 대기 중의 이산화탄소를 지하로 넣는 과정이라고도 할 수 있다.

이러한 원리가 설득력이 있는 이유는 바이오차의 안정성에 기인하는데 바이오차는 미생물 분해에 대해 강한 저항성을 가지고 오랜 세월 동안 토양 내에 존재할 수 있기 때문이다. 단기적인 탄소순환의 경우에는 나무심기, 숲 보존 등의 방법이 탄소 negative가 될 수 있는데, 대기 중의 이산화탄소가 광합성에 의해 바이오매스의 형태로 고정화되기 때문이다. 그러나 바이오매스의 일부는 토양으로 축적(예를 들어 낙엽의 형태)되었다가 일반적으로 10년의 순환기로를 가지고 토양 미생물에 의해 모두 분해되어 이산화탄소로 다시 대기중으로 방출된다. 장기적으로 보았을 때 결국 식물의 수명이 다하게 되면 초기 식물을 기준으로 탄소 positive가 된다고 볼 수 있다. 반면 바이오차의 경우에는 초기에는 바이오매스를 수거하는 에너지, 바이오차 생산을 위해 소모되는 에너지, 열 손실 등으로 탄소 positive가 될 수 있으나, 바이오에너지 (가스 및

오일) 회수, 바이오차로의 탄소 저장,  $N_2O$ 와  $CH_4$  방출 저감, 농업 생산성 증대 등의 단기적 효과뿐만 아니라, 바이오차의 안정성에 기인한 장기적 관점에서 탄소 negative가 가능하다.

한편 바이오차의 탄소저감 영향에 대한 다양한 연구가 수행되었다. Whitman과 Lehmann은 바이오차가 아프리카와 같은 제3국에서 교토 메카니즘의 하나가 될 수 있다고 보고하였다. Roberts 등은 LCA(Life Cycle Assessment)를 이용하여 바이오차의 에너지적, 경제적, 기후변화 대응적 측면을 계산하고 탄소저감 가능성을 다시 확인하였다. 2010년 *Nature Communications* 논문에 Woolf 등이 바이오차의 지속가능성에 대한 지구적 탄소저감 시나리오를 종합적으로 발표한 바 있다. 이 시나리오에서는 바이오매스의 종류, 원료의 이용가능성, 수송 및 토양 탄소 손실, 바이오매스 사용에 의한 탄소발생 회피성, 바이오차의 분해 등을 고려하였다. 바이오차 생산 대신 바이오매스를 에너지로 사용할 경우와 비교하고, 농지의 수준과 에너지 밀도의 영향을 검토하였다. 결과적으로 바이오차가 바이오매스를 에너지로 사용하는 경우보다 탄소 저감율이 높으며, 지구의 탄소함량을 12% 저감할 수 있는 것으로 예측하였다. 세계바이오차협회(IBC, International Biochar Initiative)에서는

많은 공동 연구진과 함께 바이오차에 의한 탄소저감 인증을 추진하고 있으며, 2014년 4월 현재 최종적으로 작성된 보고서가 public comment를 받고 있는 중이며 향후에는 CCS(Carbon Capture and Storage) 방법으로서 인증받을 수 있을 것으로 전망하고 있다. 이 보고서에는 바이오차 원료의 종류, 바이오차의 품질, 분석방법, 탄소절감량 계산 등에 대한 방법론을 제시하고 있다.

토양 유기물의 분해 및 순환 사이클을 느리게 하는 수단으로서 안정화된 유기물 형태인 퇴비가 하나의 대안이 될 수도 있으나, 실제 토양에서의 분해 속도는 일반 유기물과 유사한 것으로 나타났다. 바이오차는 분해속도가 매우 느려 수백 년 이상 잔존할 수 있는데, 이론적으로는 광합성에 의해 포획되는 120 Gt의 20%인 24 Gt의 탄소가 바이오차로 저장될 수 있다. 한편, 지구상의 "slash-and-burn" (나무를 태워서 토양에 영양분을 공급하고 지력이 약해지면 경작을 쉬어야 하는 화전농업 방식) 관습에서 "slash-and-char"로 변경하면 0.2 Gt, 농업 및 산림 폐기물로부터 0.16 Gt의 탄소를 저장할 수 있다고 한다. 전 세계의 농경지는 약  $1.5 \times 10^{10}$  ha 정도 있는 것으로 추정되며, Gaunt 등의 계산에 의하면 10년에 한번씩 이 땅에 바이오차를 적용한다고 볼 때 0.65 Gt/yr에 해당한다고 한다.

기존의 바이오매스 처리방법은 일반 도시 및 농촌의 바이오매스 폐기물의 경우 대부분 매립에 의존하고, 혐기성 환경에서 주로 메탄( $\text{CH}_4$ ) 생성을 야기한다. 한편 질소 성분이 많은 축산 폐기물의 경우 분해되어 메탄이나 아산화질소( $\text{N}_2\text{O}$ )를 생성할 수 있다. 이러한  $\text{CH}_4$ 와  $\text{N}_2\text{O}$ 는 지구온난화지수(Global Warming Potential)가  $\text{CO}_2$ 에 비해 각각 25배와 298배에 이르러 지구온난화에 미치는 영향이 훨씬 크다.  $\text{N}_2\text{O}$ 는 지구적  $\text{CO}_2$  환산가로 계산한 배출량의 8%,  $\text{CH}_4$ 는 14%에 달한다. Yanai 등은 바이오차를 처리한 경우  $\text{N}_2\text{O}$  발생량이 최대치 기준으로 15% 수준으로 감소하였다고 한다. 토양에서  $\text{N}_2\text{O}$ 가 발생이 저감

되는 기작으로는 여러 미생물 단계 중에서  $\text{N}_2\text{O}$  환원 미생물의 증가를 야기시키는 denitrification 저해에 의한 것으로 추정하고 있다. 그러나 이러한 온실가스의 저감 원인은 아직 명확하게 규명되지 않았으며 많은 연구가 진행중에 있다.

## 결론

바이오차는 산불과 같은 자연적인 화재로부터 발생할 수 있는 자연의 산물이기도 하면서, 목재연료의 온도보다 더 높은 온도의 연료로 사용될 수 있어 철의 제조를 가능하게 하였으며, 오래전부터 인류의 농업 생산성을 증대시키기 위해 다양하게 생산되고 사용되어 온 바 있다. 오늘날 바이오차는 지구의 기후변화 저감을 위한 수단이 될 수 있다는 새로운 관점과 이를 뒷받침하는 다양한 과학적 증거들의 발견으로 인해 그 효용성이 새롭게 주목받고 있다. 인류의 미래를 위협하는 기후변화 문제, 식량 문제, 날이 갈수록 심각해지는 에너지 문제, 주위에 넘쳐나는 유기성 폐기물의 문제, 물, 대기, 토양의 심각한 환경오염의 문제들과 밀접하게 관련이 있는 바이오차의 특성은 이를 어떻게 효율적으로 생산하고, 현명하게 시스템적으로 구성하여 활용하느냐에 따라 그 효용성이 결정된다고 할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- 1) Marris, E., "Black is the New Green," *Nature*, **442**, 624-626 (2006)
- 2) Lehmann, J., "A handful of carbon," *Nature*, **447**, 143-144 (2007)
- 3) Lehmann, J. and Joseph, S., "Biochar for environmental management: An introduction," in Lehmann, J., and Joseph, S., Eds., *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*, Earthscan, London (2009)
- 4) Woolf, D., Amonette, J. E., Street-Perrott, F. A., Lehmann, J., and Joseph, S., "Sustainable biochar to mitigate global climate change," *Nat. Commun.*, **1**(5), 1-9 (2010)