

목질계 바이오매스를 이용한 바이오에너지 기술개발 동향

권구중¹ · 김남훈^{1*}

¹강원대학교 산림환경과학대학

Trend on Technology Development of Bioenergy from Woody Biomass

Gu-Joong Kwon¹, and Nam-Hun Kim^{1*}

¹College of Forest and Environmental Sciences, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

ABSTRACT : Recently, various efforts for the extended utilization of woody biomass has been attempted due to the fact that global warming, energy and environmental problems are urgent ones to be solved. Development of new energy sources at our national security level is desperately needed as we depend on almost all of energies supplied from other countries, let alone the economic crisis caused by oil price hike. Woody biomass can be converted to energy by means of thermochemical, biological, or direct combustion processes. Many processes are available for producing bioenergy, such as bioethanol, wood pellet, wood chip, combined heat, and power system. Political support and R&D investment should be provided that can boost the utilization of the wood biomass, the eco-environment, and recyclable and alternative energy resources for national power security. In addition, a long-term strategy that can utilize unused and low efficient woody biomass resources, and systematically collect and manage them in a national level should be set up. Even though the possibility in total exchange of fossil oil with woody biomass is quite low, technology developments of woody biomass for the solution to global warming and environmental problem through its commercialization are expected to grow steadily.

Keywords : Woody biomass, Alternative energy, Bioethanol, Pellet, Wood chip

서 론

인류는 화석자원을 에너지원으로 사용하여 현재의 고도로 발달된 문명을 건설하였다. 화석에너지 자원의 고갈과 지구온난화 문제가 현재의 인류문명을 위협하는 국제적 현안으로 대두되고 있다. 화석자원의 고갈과 지구온난화라는 국제적인 문제를 해결하기 위한 대안으로 바이오매스를 이용한 친환경적인 신·재생에너지의 개발이 전 세계적으로 활발해지고 있다. 바이오매스로부터 신·재생 에너지를 확보하는 기술은 국가 에너지 확보에 중요한 기술로 에너지 기술 자립화를 이룰 수 있으며, 해외 에너지 자원 수입으로 발생하는 막대한 비용을 절감할 수 있고, 에너지를 확보할 수 있는 기회가 될 것이다.

이를 위해 이산화탄소 감축을 위한 신·재생에너지 개발 정책과 연계하여 목질계 바이오매스를 활용한 대체에너지

개발이 주목을 받고 있다. 목질계 바이오매스는 농업폐기물, 산림폐기물 등의 유기물로 셀룰로오스(Cellulose), 헤미셀룰로오스(Hemicellulose) 및 리그닌(Lignin)으로 구성되어 있다. 이것은 대기중의 이산화탄소를 증가시키지 않는 탄소중립적(Carbon-neutral)특성을 가지고 있으며, 연소과정은 화석연료와 비교해서 황산화물이 거의 발생하지 않는 친환경적인 청정에너지원이다. 또한 해외에서 수입해서 한번 소비하면 재생되지 않는 화석연료와는 달리 목질계 바이오매스는 국내 부존자원을 활용할 수 있는 특성과 재생산이 가능한 자연순환적 특성을 가지고 있다. 이러한 특성들로 인해 목질계 바이오매스는 기후변화협약에 대한 대응과 에너지 자립에 중요한 역할을 담당할 것으로 기대를 하고 있다.

목질계 바이오매스를 이용하여 에너지화하는 기술은 종류와 원료가 다양하기 때문에 에너지 변환방법도 다양하다

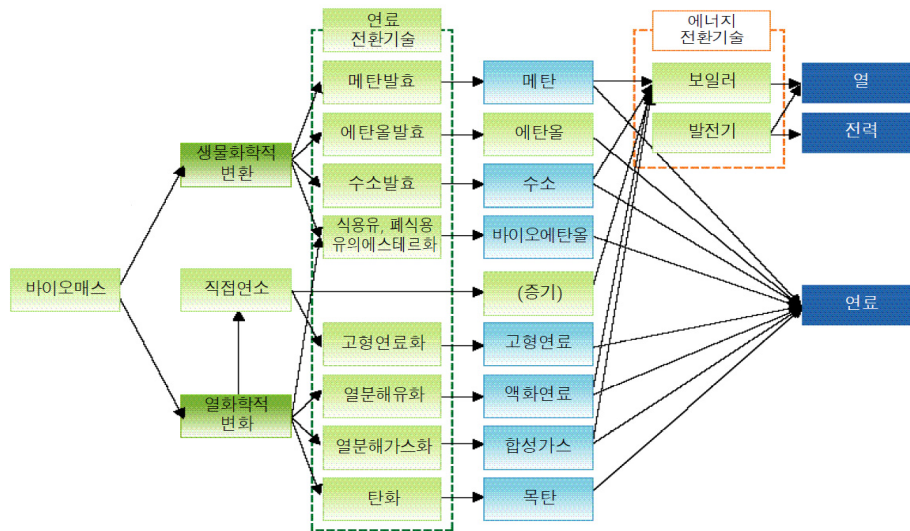


Fig. 1. Scheme of biofuel technology for transportation (김정대, 2009).

(Fig. 1). 일반적으로 가스화, 열분해, 탄화와 같은 열화학적 변환을 통하여 에너지화하는 기술과 메탄올, 에탄올, 수소와 같은 생물화학적 변환을 통하여 에너지화하는 기술로 크게 나눌 수 있다. 이들 열화학적 및 생물화학적 변환기술은 연료 및 전기와 열을 생산하여 내부 및 외부에 공급이 가능하기 때문에 최근 고유가로 인한 화석연료의 대체 에너지 개발기술로서 관심이 집중되고 있다(김정대 등, 2008).

현재 국내외적으로 목질계 바이오매스를 이용한 에너지 기술개발은 자원과 이용기술이 다양한 만큼 각각 자국의 실정에 맞는 바이오에너지를 개발, 이용하고 있다. 선진국에서는 목재를 칩, 펠릿, 브리켓 등으로 가공하여 열병합발전소나 보일러 공장용 연료로 이용하고 있으며, 수송용 바이오 연료를 상용화하고 있다. 선진국의 목질계 바이오매스가 전체 1차에너지 소비에서 차지하는 비중을 보면 핀란드가 20.5%, 스웨덴 15.5%, 오스트리아 10.7% 등으로 주요 에너지원으로 부상하고 있다. 그러나 우리나라는 브리켓, 목탄 등으로 이용하여 전체 1차 에너지 수요의 0.06%에 그치고 있다. 최근 들어 우리나라에도 바이오매스 열병합발전소가 건설되고, 발전회사나 지역난방업체, 식품, 섬유회사 등에서 바이오매스를 이용한 에너지 생산에 대한 관심이 높아지고 있다(배정환, 2006).

우리나라는 에너지원을 화석연료에 크게 의존하고 있고, 대부분 수입에 의존하고 있는 실정이다. 이에 국제 정세의 변화에 따라 큰 충격을 받아왔다. 따라서 목질계 바이오매스의 에너지 개발은 국토의 64%를 차지하고 있는 산림자원을 에너지원으로 활용할 수 있기 때문에 에너지 수입의존

도 증가에 따른 위험성과 취약성을 최소화하는 방안이 될 수 있다. 국내 목질계 바이오매스 가용 자원량은 풍부하여 에너지 자급률을 향상시킬 수 있는 가능성을 가지고 있다. 바이오매스 에너지에 대한 활용 시스템을 갖추는 것은 이러한 외부충격을 완화하는 완충장치를 갖추게 되는 것이다.

따라서 본 연구에서는 목질계 바이오매스에 대한 관심이 높아지는 현 시점에서 목질계 바이오매스를 원료로 이용한 에너지화의 기술개발 동향을 검토하고자 하였다.

바이오매스의 에너지 기술개발

목질계 바이오매스를 에너지원으로 이용할 수 있는 바이오에탄올, 목재펠릿과 칩, 열병합발전과 가스화, 목탄에 대한 기술개발 동향을 기술한다.

바이오에탄올

바이오에탄올은 화석연료의 자원공급의 제한성에 의한 가격상승과 지구온난화에 대한 대책의 일환으로 대체에너지의 필요성이 대두되고 있는 시점에서 화석연료에 비해 지구온난화에 미치는 영향이 적고 기술개발에 따른 생산단가가 낮다는 점에 대체에너지원으로 주목을 받고 있다. 그러나 옥수수나 사탕수수와 같은 식량자원이 원료로 사용됨에 따른 국제 곡물가격 상승으로 인한 식량자원의 무기화 등의 또 다른 사회적 문제를 일으키고 있다(Cho et al., 2007).

이러한 문제점을 극복하기 위한 대안으로서 제기되어지

는 것은 목질계 바이오매스를 원료로 한 바이오에탄올의 생산기술이다. 이것은 재생산 가능한 산림자원을 이용하므로서 식량위기를 부추기는 옥수수유래 에탄올과는 달리 사회적 반발과 세계 식량위기에서 자유로운 친환경 대체 에너지 기술로 평가받고 있다.

목질계 바이오매스를 원료로 한 바이오에탄올은 원료의 공급측면에서 보면 화석연료에 비해 전세계에 고루 분포되어 있어 공급이 용이하다. 원료 생산의 경제적 측면에서 보면, 화석연료와 비교하여 지구온난화에 문제가 되고 있는 이산화탄소 가스의 배출이 적다는 것이다. 그러나 목질계 바이오에탄올 생산을 위해서는 기술적으로 해결해야 할 문제들이 있다. 첫번째는 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스의 저분자화에 의한 수용성 단당류의 획득, 두번째는 효과적인 수용성 단당류의 발효, 세 번째는 전체 공정에 있어 에너지의 소비를 최소화해야 한다(Hahn-Hägerdal et al., 2006). 이것을 기술적으로 해결하기 위한 많은 연구개발이 진행되고 있다(Chae et al., 2007; Cardona and Sánchez, 2007; Gray et al., 2006; Lin and Tanaka, 2006).

목질계 바이오매스는 복잡한 구조로 이루어져 있고 있기 때문에 분리하여 유용한 물질을 얻고자 하는 경우에는 구성 성분의 수율이 높으면서 화학적 구조가 손상되지 않는 전처리 공정이 필요하다. Fig. 2는 목질계 바이오매스의 전처리 목적도를 나타낸 것이다(Mosier et al., 2005).

전처리 공정은 바이오에탄올 제조 공정에 있어서 경제적, 기술적으로 가장 중요하다. 즉, 리그닌과 헤미셀룰로오스를 다량으로 함유하는 목질계 바이오매스를 원료로 한 바이오에탄올의 생성에서 전처리공정의 중요성이 더욱 높아진다. 이것의 목적은 바이오에탄올 제조공정에서 다당류의 가수분해 및 에탄올 발효의 효율을 높이기 위한 것이다. 이러한

전처리 방법으로는 산, 알칼리(Silverstein et al., 2007) 열수(Sassner et al., 2008), 용매(Mabee et al., 2006; Sun and Cheng, 2002) 암모니아(Teymouri et al., 2005), 산소(Kline et al., 2002) 등을 첨가하여 고온, 고압에서 리그닌과 섬유소를 파괴하는 공정등이 있다. 그러나 이러한 전처리 방법은 섬유소 자체의 결정도, 물질의 다공성 등과 리그닌이나 헤미셀룰로오스 함량이 목질계 바이오매스의 반응성에 영향을 미치는 주요한 요소이기 때문에 획일적으로 적용될 수 없으며, 침엽수, 활엽수 등 다양한 목질계 원료에 따라 최적의 처리 조건들이 확립되어야 한다.

바이오에탄올 제조는 생물화학적 방법 이외에 열화학적 방법에 의한 시도도 행하여지고 있다. 바이오매스 자원중 가장 풍부하게 존재하고 있는 셀룰로오스를 열분해시키면 무수당인 레보글루코산이(Levogluconan, 1, 6-β-D-Anhydro glucopyranose)이 다량으로 생성된다(Pictet and Sarasin, 1918; Shafizadeh, 1968; Shafizadeh, et al., 1979; Ward, 1963; Sandermann and Augustin, 1964). 이렇게 얻어진 레보글루코산은 산가수분해에 의해 간단하게 글루코오스로 변환시킬 수 있고, 발효공정을 거쳐 바이오에탄올을 제조할 수 있다. 이러한 열분해법은 생물화학적 방법보다 전처리가 필요하지 않아 바이오에탄올 공정을 보다 간단하게 할 수 있다. Kwon et al., (2006, 2007)은 레보글루코산의 수율을 향상시키기 위한 연구를 수행하여 기존의 프로세스에서 얻어진 레보글루코산의 수율보다 다소 높은 수율을 얻을 수 있는 새로운 프로세스를 개발에 성공하여 앞으로 실용화를 위한 기술개발로의 전개가 기대된다.

바이오에탄올에 대한 국내외 기술개발 현황을 보면 미국은 목질계 바이오매스로부터 바이오에탄올 생산하는데 있어 여러 애로기술 중 저가의 셀룰라제 생산 기술을 미국의

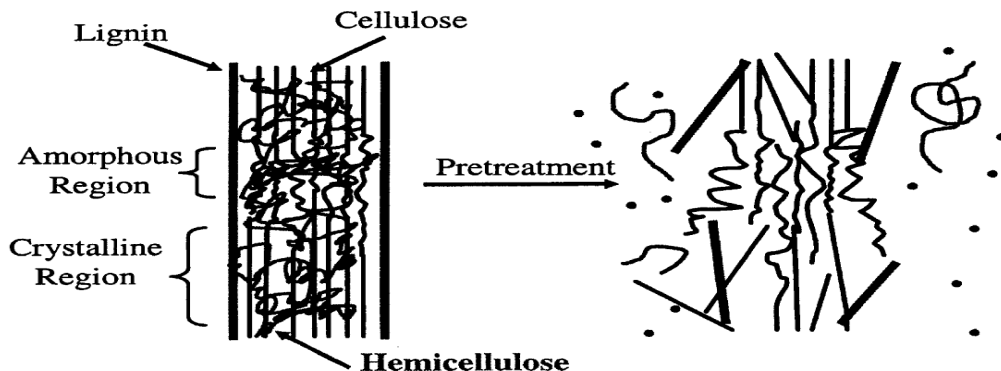


Fig. 2. Schematic of goals of pretreatment on lignocellulosic material (Mosier et al., 2005).

효소 전문 회사인 Genencor Inc와 덴마크 Novozymes Inc에서 연구를 수행하여 셀룰라제 생산비용을 기존 기술대비 1/10이하로 낮추는데 성공하였다. 이 연구로 셀룰라제 생산비용이 낮아져 원료비와 전처리 비용이 총 생산비의 중요한 부분이 되었다. 이에 보다 효율적인 전처리 기술 개발을 위한 집중적인 연구비를 계속 지원하고 있다(에너지관리공단 신·재생에너지센터, 2007). 그러나 장기적으로 별도의 효소 당화과정을 거치지 않고, 단일 미생물에 의해 당화 및 발효가 모두 가능한 공정 개발을 추진하고 있다. 구체적인 R&D 목표는 2012년까지 가격 경쟁력이 있는 목질계 바이오에탄올을 생산하고, 2015년까지 목질계 바이오에탄올 30억갤런/년, 2022년까지 160억갤런/년 생산이 목표이다. 그리고 2030년까지 미국 휘발유사용(2004년 기준)의 30%를 바이오에탄올로 대체하는 것이다(Kim, 2008). 유럽에서는 목질계 바이오에탄올의 효율적인 생산을 위한 신기술 개발에 관심을 갖고 2002년부터 유럽국가가 공동으로 이미 1단계 연구사업을 마무리하고, 현재 2단계 연구사업을 수행하고 있다. 2002년부터 2005년까지 3년간 유럽의 에너지안보와 친환경 미래수송연료의 보급확대를 위한 목질계 바이오에탄올의 효율적인 생산공정 개발을 목표로 6개국 7개기관이 참여하여 TIME (Technological IMprovement for Ethanol production from lignocellulose)라고 하는 연구사업을 수행하였다. 사업목적은 목질계 바이오매스로부터 에탄올을 생산하는 전반적인 공정상의 생산비용을 10~20%정도 절감할 수 있는 기술개발, 목질계 바이오에탄올 공정상의 단계별 성능개선, 생산비용의 분석평가와 LCA (Life Cycle Assessment)에 의한 환경영향 평가이다. 이 사업에 이어 2009년까지 프랑스의 에너지 연구소가 주축이 되어 11개국의 21개 기관이 참여하여 바이오에탄올의 생산공정 관련 신기술 개발을 목적으로 NILE (New Improvements for Ligno-cellulosic Ethanol)이라는 사업이 추진중에 있다. 이 사업목표는 목질계 바이오매스의 당화작용을 위해 새로운 효소 시스템의 설계, 생산으로 효소가수분해의 비용절감, 목질계 바이오매스의 가수분해물에 대한 발효기술개선과 전분질계와 당질계 대비 생산성 향상 등이다(Jeong, 2007). 일본에서는 현재 폐목재와 휴경지 작물재배 목질계 바이오매스에서 200~220 만kL의 목표 달성하기 위해 800억원의 R&D비용을 투자할 것을 계획하였다. 폐목재로부터 바이오에탄올 생산하는 기술개발을 위해 해외에서 목질계 바이오 에탄올 생산공정의 상용화 방안을 검토하기 위한 실증 연구를 지원하고 있으며, 2010~2030년까지는 에탄올 수요가 상당히 증가하는데

비해 목질계 바이오매스의 에탄올 전환기술이 미비할 것으로 예측하고 목질계 에탄올 생산에서 가격경쟁력을 가질 수 있는 기술개발을 위한 기초연구 지원에 주력하고 있다(에너지관리공단 신·재생에너지센터, 2007).

국내에서는 바이오에탄올의 보급을 위해 주유소 등 유통 인프라를 개조하는 실증 연구를 2006년부터 2008년까지 2년간 수행하였으며, 현재 보급 타당성을 분석중이다(에너지관리공단, 2008). 보다 자세한 바이오에탄올에 관한 최근 연구개발 동향에 대해서는 최근에 발표된 논문(Kim, 2008, 2009)을 참조하기 바란다.

목재 칩과 목재펠릿

목재칩과 목재펠릿은 열효율이 높고 이용이 편리하여 열병합발전소나 보일러의 원료로 사용되고 있다. 목재 칩은 숲가꾸기, 간벌 등으로 생산되는 산림바이오매스를 일정한 크기로 파쇄하여 사용할 수 있고, 가격이 싸다는 장점을 가지고 있다. 해외에서 임산자원이 풍부한 핀란드, 스웨덴 등에서는 조림에 의해 생산된 목재를 칩으로 가공하여 지역난방 등 대규모 소비에 주로 사용하고 있다. 국내에서는 차두송 등(2007)이 고유가를 극복하기 위해 목재칩을 활용한 목질계 바이오에너지 자원의 연료에 대한 연구를 수행한 결과를 토대로 자동화된 친환경 고효율 목재칩 보일러를 국내 최초로 개발하여 관심을 끌고 있다. 이후 여러 목재칩의 종류별 물리적 특성을 조사하여 목질계 바이오에너지 자원의 활용에 기초 자료로서 제공하였다(Hwang et al., 2009). 자동화 목재칩 보일러는 기존 기름보일러 보다 사용이 간편하고 연료비도 70% 가량 줄일 수 있는 것이 큰 장점으로 알려져 있다. 또한 등유와 연탄 등 화석연료에 비해 이산화탄소 발생률을 80% 이상 줄일 수 있어 지구 온난화 방지 효과 있으며, 고유가 시대의 농가의 연료절감에 크게 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

목재 펠릿은 숲가꾸기 산물이나 제재소 등에서 발생하는 목재부산물을 톱밥과 같은 작은 입자로 분쇄, 건조, 압축하여 성형한 난방원료로 경유를 사용할 때보다 이산화탄소 발생을 1/12 수준으로 경감시킬 수 있어 저탄소 녹색성장시대에 적합한 친환경 대체에너지라 할 수 있다. 펠릿의 길이는 10~20 mm, 직경 6~15 mm로 하며 최대 25 mm까지 가능하며, 가정용으로는 6 mm 정도가 적합하다. 이것은 고착시키기 위한 접합제 등의 첨가없이 고온 압축과정을 거쳐 생산되는 것으로 열량은 대략 4500 kcal/kg이며, 난방유 0.5 l

의 열량과 같다.

목재펠릿은 여러 장점이 많은 연료이다. 다른 바이오매스 연료에 비해 에너지 밀도가 높으며, 크기가 작고 표준화되어 있어 운반이나 이용이 매우 용이하며, 발화성이 낮아 운송시 폭발위험성이 전혀 없다. 연소시 방출되는 유독가스의 양이 적으며, 유황분과 회분 발생량도 적어 친환경적이고, 자동화에 따른 온도조절이 가능하다(최돈하, 2004; 산림조합중앙회 문화홍보실, 2009).

국내외 기술개발동향을 보면 유럽의 대표적인 임업선진국인 스웨덴에서는 오래전부터 목재펠릿 제조와 사용 시스템에 대해서 많은 노력을 기울였으며, 목재펠릿을 연료로 이용한 열병합 발전분야와 산업용 보일러 제작기술수준이 상당히 높다. 이탈리아는 유럽에서 목재펠릿 연료 시장이 가장 빠르게 성장하고 있는 나라로 소형오븐에 대한 기술과 know-how가 매우 우수하다(에너지관리공단 신·재생에너지센터, 2007). 또한 미국, 독일 등 여러 선진국에서는 미활용 임산폐기물 뿐만아니라 도시에서 배출되는 폐목재 등을 펠릿화하여 석탄 화력 발전소에서 석탄과 함께 사용되는 혼소 기술도 개발하여 적용하고 있다. 혼소 기술을 적용할 경우 석탄의 사용량을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 공해 물질 및 온난화의 저감 효과가 기대되어진다(에너지관리공단, 2008). 우리나라는 그동안 대부분 국내 수요량 3만톤을 중국, 캐나다 등에서 수입해 왔다. 그러나 국내에서도 산림부산물자원을 활용하여 목재펠릿을 연료화하기 위한 연구가 활발하게 수행되고 있다(Kwon et al., 2007; Han and Choi, 2002; Han and Yeo, 2003; Han and Kim, 2006). 또한 산림조합중앙회를 비롯하여 4개 업체에서 목재펠릿 제조를 위한 생산공장이 진행되고 있어 2009년부터 본격적인 고품연료의 생산 및 유통이 될 것이다. 그 생산량도 연간 35,000톤 이상으로 추정되고 있다. 이러한 고품연료는 앞으로 고유가시대의 대체 에너지 및 탄소배출량 감축사업에 있어 중요한 부분을 차지하게 될 것이다.

열병합발전과 가스화 기술

목질계 바이오매스와 같은 유기물을 에너지원으로 활용하는 여러 기술 중에서 전기 및 열을 생산하는 대표적인 방법으로는 열병합 발전이 있다. 이것은 목질계 바이오매스를 이용하여 전기와 열을 동시에 생산하는 시스템으로, 일반 발전에 비해 에너지 이용효율을 높일 수 있는 장점이 있다. 목질계 바이오매스의 열병합발전은 목재칩을 연료로 하여

연소실에 직접 연소하는 직접 연소방식과 가스화에 의해 생성된 혼합가스를 가스터빈에서 연소시키는 간접연소방식이 있다. 직접연소방식은 증기 터빈시스템을 이용한 열병합 발전으로 열에너지 활용 정도에 따라 터빈에서 증기를 추기하는 형태로 구성되며, 증기터빈의 종류에 따라 복수식, 배압식, 추기 복수식 등의 다양한 형태로 적용된다(강현구 등, 2008).

간접연소방식은 목질계 바이오매스를 가열시켜 생성된 가스를 이용하고 있다. 이미 석탄의 가스화 기술이 연구 개발되어져 상용화되어 있지만, 목재는 석탄보다도 반응성이 높다. 또한 석탄의 가스화가 1000℃ 부근의 온도에서 일어나는 것에 비해 목재는 석탄보다 저온인 700~800℃ 부근의 온도에서 일어나기 때문에 이것을 에너지원으로 활용하려는 시도가 이루어지고 있다. 일반적으로 가스는 열량에 따라서 고칼로리가스(700~1000 Btu/SCF, 27.48~39.26 MJ/m³), 중칼로리가스(300~700 Btu/SCF, 11.78~27.48 MJ/m³), 저칼로리가스(100~300 Btu/SCF, 3.92~11.78 MJ/m³)로 분류된다. 목질계 바이오매스에서 생성된 가스는 주로 저칼로리 및 중칼로리 가스이다(Klass, 1998). 이렇게 생성된 가스의 발열량은 가열방식(직접가열방식과 간접 가열방식)이 크게 영향을 끼치는데(Bain et al, 1998), 직접가열방식은 4.9~5.9 MJ/Nm³ 정도의 저칼로리 가스가 생성되는 반면, 간접가열방식은 직접가열방식에 비해 17.7~19.7 MJ/Nm³ 정도로 발열량이 높은 가스를 생성한다. 따라서 목질계 바이오매스를 이용한 가스화 기술은 간접 가열 방식으로 생성된 가스를 가스터빈을 이용하는 것이 바람직하다.

국내외 기술개발 현황을 보면, 영국에서는 최근 바이오매스를 석탄과 혼합연소하여 지역난방의 에너지원으로 활용하는 사업이 활발히 추진되고 있고, 덴마크, 핀란드, 스웨덴 등은 바이오매스를 원료로 한 에너지 공급량을 점차 늘려가고 있으며, 지역난방과 열병합발전을 위한 연소방법과 가스화하는 기술에 대한 연구가 진행 중에 있다. 개도국에서는 농업폐기물을 이용한 소규모 열병합 발전 사업이 활성화 되고 있다(이명구, 2008). 국내에서는 2006년 5월에 서대구 공단에 열·전기 공급을 위한 국내 최초의 바이오매스 열병합 발전소가 가동되기 시작하였다. 이를 시작으로 현재 동두천 염색단지, 대구 지역난방공사 등 여러 지역에서 건설이 진행되거나 계획되고 있다. 서대구 열병합발전소는 기존 개별 사업장에서 사용하던 중유를 목질계 바이오매스 연료로 대체하는 것으로 계획되었다. 이 시설에서 주로 사용되는 목질계 바이오매스로는 골프장, 도로, 댐건설현장 등에서 발생하고 있는 개발부산물에 주류를 이루고 있으나,

현재까지 산림부산물 확보에 다소 어려운 실정이다(강현구 등, 2008).

목탄

목질계 바이오매스의 탄화기술은 저산소 및 무산소상태의 밀폐된 공간에서 목재를 열처리하여 탄소재료(목탄)를 얻는 기술로, 소각에 비해 배출가스가 매우 적을 뿐만 아니라 탄소만으로 구성되는 탄화물을 생성시켜 에너지원을 얻는 기술이다(Kwon and Kim, 2006, 2007; Lee et al., 2007; Mun et al., 2007; Kim and Hanna, 2006; Kwon et al., 2009). 목탄은 목재의 발열량 3,000~4,000 kcal/kg 보다 다소 높은 흑탄 8,100 kcal/kg, 백탄 7,500 kcal/kg 이상의 고품질 연료이며, 버려지는 폐자원을 에너지원으로 활용할 수 있고, 운반 및 저장이 용이한 장점을 가지고 있다.

국내 바이오매스의 탄화공정 기술은 중소기업에서 이용하고 있다고는 하지만, 실질적으로 가동되는 경우는 거의 없다. 또한 에너지 효율성과 경제성에 대한 검토가 필요하며, 에너지 소비공정으로 인식하고 있어 이에 대한 학문적 검증이 필요하다(Rhee and Cho, 2008).

국내 목질계 바이오매스 에너지화를 위한 향후 과제

목질계 바이오매스를 활용한 바이오에너지 기술개발은 국내에서 시작한 지 얼마되지 않아 전체적으로 기초기술 확보와 초기응용연구단계에 머물고 있는 수준이다. 그러므로 목질계 바이오매스를 보다 효율적으로 에너지화할 수 있는 기술개발을 통해 장치, 시스템을 보급하는 것이 우선적 과제이다.

바이오에탄올 제조에 있어 국내 수송용 연료로서 활용하기 위한 보다 효율적인 전처리기술이 개발되어야 한다. 이와 더불어 고효율 저비용 바이오에탄올 정제기술 개발도 함께 추진되어야 바이오에탄올이 연료로서 가격경쟁력을 가질 수 있을 것으로 생각된다.

열병합 발전 및 목재고형연료제조 기술은 임업선진국의 경우, 이미 오래전부터 이것에 대한 상당한 기술개발로 상용화되어 많이 보급되어 있다. 국내에서는 최근, 목재고형연료의 제조기술과 전용 보일러가 개발되어 앞으로 목재 고형 연료의 활용 가능성을 크게 높였다. 향후, 목재 고형 연료 제조공정 및 열병합발전시스템에 대한 새로운 기술개발로 국내 목재 고형연료 생산공장의 증가와 그에 따른 목질

계 바이오매스를 활용한 바이오에너지 확산에 기여할 것으로 기대된다.

목질계 바이오매스를 이용한 가스화 기술은 국내에서 아직 대학이나 연구기관에서 기초적인 연구만 수행하고 있어 기술수준이 상당히 낮은 실정이다. 이 기술은 임업선진국에서도 아직 상용화가 실현되지 않은 분야로, 앞으로 신기술 개발에 의한 상용화가 예측되는 분야이기 때문에 국내에서도 이에 대한 연구에 중점을 두어 경쟁력을 강화시킬 필요성이 있다.

이러한 기술수준이외에도 시급한 것은 목질계 바이오매스 원료 생산 및 수집설비 기술이 개발되어야 한다. 이것은 목질계 바이오매스가 부피에 비해 발열량이 낮아 수입하기가 어렵기 때문에 국내에서 원료를 조달해야 되지만 아직까지 임도 및 가공설비의 부족 등의 여러 문제로 원료를 조달하는데 어려움이 있다. 산림청에서는 제5차 산림기본 계획(Korea Forest Service, 2007)에서 숲가꾸기 부산물 수집지원 및 수집량 확대, 국산 소경재 등을 이용한 바이오에너지 산업육성, 목질계 바이오매스 수집체계 개선 및 안정적 공급망 구축, 친환경적 임도 설치 및 관리 등을 확대하는 방안을 제시하였다. 이것은 산림자원의 경제적, 환경적 가치를 증진하고 산림관리 인프라 확충으로 비용절감 및 생산성을 향상시켜 미래 친환경 산업으로 목재산업을 육성하고자 하는데 목적이 있다. 또한 목질계 바이오매스 자원이 다른 자원들과 비교해서 경제성에서 뒤지지 않기 위해서는 에너지 생산지와 사용지가 근거리에 위치해야 한다. 생산된 에너지를 공급할 인프라가 갖추어 지지 않았거나 혹은 원거리일 경우에는 투자비용이 높아지므로 경제성이 떨어질 수 있다. 이 비용을 증대시키는 요인에는 임도망이 충분히 확보되어 있지 않기 때문에 숲에 접근하기가 어려워 운반비용이 높아지고, 목질계 바이오매스의 발생장소, 시기, 물량 등이 불안정하면 반입비, 운반비 등의 수집비용(인건비 등)이 시설의 운영경비와 채산성에 직접 영향을 미친다. 결국 목질계 바이오매스는 원재료의 생산 공장과 에너지 생산 사업장, 에너지 수용업체가 모두 근거리에 위치하는 것이 유리하게 작용할 것이며, 반드시 지역특성을 고려해서 도입해야 할 것이다(석현덕 등, 2005).

마지막으로 폐목재를 연료자원으로 활용할 수 있는 기술이다. 그러나 이것 역시 원료 수급문제가 가장 큰 문제로 나타나고 있다. 현재 재생 가능한 자원인 목질계 바이오매스는 산림에서 벌채 등으로 발생하는 산림부산물, 가정 등에서 발생하는 생활계 폐목재, 도로, 건설현장에서 발생하는

개발부산물, 사업장에서 목재가공 혹은 물류유통으로 등으로 발생하는 폐목재로 구분한다. 이것에 대한 자원발생량은 산림부산물, 폐목재, 개발부산물 순으로 나타나고 있다(강현구, 2008). 그러나 산림부산물은 8~10%정도만이 재활용되고 나머지는 산림중에 방치하고 있는 실정이며, 개발부산물은 약 80%가 재활용되지 않고 폐기되고 있다. 또한 폐목재 중 생활폐목재의 경우는 약 3%만이 재활용되고 나머지는 매립 및 소각되고 있는 실정이다(부경진 등, 2007). 이렇게 대부분 버려지거나, 매립 및 소각되고 있을 자원을 잘 수거해서 에너지로 활용하면 사회적, 경제적으로 상당한 이득이 될 것이다. 산업자원부(2007)는 한해 발생하는 목질계 폐기물 연간 581만톤에서 400만톤만 재활용한다고 해도 신재생 에너지 보급량의 32%에 해당하는 연간 160만 TOE를 목질계 바이오매스로부터 충당할 수 있다고 보고 있다. 그러나 건설폐기물이나 폐가구들을 이용할 때는 이미 처리되어 있는 유약이나 코팅제가 함께 연소되면 바이오매스 자원으로서의 질이 떨어지고 대기오염문제가 야기될 수 있으므로 이를 해결하기 위해서 연소시에 발생하는 유해물질 처리 방법을 마련해야 할 것이다.

결론

최근 지구온난화, 에너지 및 환경적 문제 해결을 위해 바이오에너지에 대한 관심이 고조되면서 목질계 바이오매스의 이용 확대를 위한 다양한 노력이 추진되고 있다. 또한 세계 유가상승에 따른 경제적 문제가 발생하면서 에너지 해외 의존도가 높은 우리로서는 국가 에너지의 안보적 측면에서 자급가능한 에너지원 확보가 절실하게 요구되고 있다. 현재의 에너지 환경을 고려해서 지속적인 국가성장동력 확보를 위해서 재생 가능한 친환경 에너지원인 목질계 바이오매스 자원을 대체에너지로서 활용할 수 있는 정책적 지원과 기술 개발에 투자하여야 한다. 목질계 바이오매스를 에너지로 변환하는 방법에는 직접 연소, 열화학적 변환, 생물화학적 변환 등이 있고, 에너지로 이용하는 방법에는 바이오에탄올, 가스, 목재펠릿 등 고형연료, 목재칩, 열병합 발전시스템 등이 있다. 이것에 대한 활용방안은 여러 형태로 확대되어 연구되어야 할 것이다.

또한 비효율적으로 이용되거나 미이용되는 목질계 바이오매스 자원을 국가 차원에서 체계적으로 수집, 관리해서 에너지원으로 활용하기 위한 장기적 비전을 수립하여 바이오에너지 보급을 확대시켜 나가야 할 것이다.

결론적으로, 전 세계가 저탄소녹색성장을 추구하고 지구 온난화와 환경문제의 대책수단 마련이 시급한 때에 목질계 바이오매스는 화석연료를 대체할 가장 기대가 큰 자원중의 하나임에 틀림없으므로 이후 기초기술개발은 물론 실용화 및 상용화를 향한 기술개발로의 전개가 기대된다.

인용문헌

- 강현구, 이정순, 오창용. 2008. 목질계 바이오매스의 에너지 이용 사례(열병합 발전을 중심으로). *유기물자원화* 16(3): 20-27.
- 김정대. 2009. 목질계 바이오매스의 물질 이용 및 에너지 이용을 위한 적절방안 검토(I). *환경과 재활용* 15: 4-9.
- 김정대, 박준석, 도인환, 배재근. 2008. 목질계 바이오매스 에너지화를 위한 처리기술 및 방안 검토. *유기물자원화* 16(2): 13-23.
- 부경진 외 13인. 2007. 목질계 바이오매스의 에너지 활용 방안. *에너지 경제 연구원*. 375p.
- 배정환. 2006. 목질계 바이오매스에너지의 지역별 잠재적 파급효과 추정. *한국신·재생에너지학회 2006년도 추계학술대회논문집*, 217-220pp.
- 산림조합중앙회 문화홍보실. 2009. 친환경에너지 목재펠릿 본격생산. *산림지* 3: 104-105.
- 산업자원부. 2007. 목질계 바이오매스의 에너지 활용방안: 우드칩을 이용한 에너지 생산설비를 중심으로. *연구보고서*. 434-435pp.
- 석현덕, 민경택, 손철호, 장우환. 2005. 목질 바이오매스 열에너지 개발의 경제성 분석과 에너지용 산림폐재의 지속적 확보방안. *한국농촌경제 연구원*. 56-58pp.
- 이명구. 2008. 바이오매스를 이용한 열병합 소개. *대우엔지니어링 기술보* 24(1): 53-62.
- 에너지관리공단. 2008. 신·재생에너지 백서 2008. 지식경제부. 350p.
- 에너지관리공단 신·재생에너지센터. 2007. 신·재생에너지 RD&D 전략 2030-바이오(목질계), 에너지관리공단. 101-103pp.
- 에너지관리공단 신·재생에너지센터. 2007. 신재생에너지 RD&D 전략 2030-바이오(수송용). 에너지관리공단. 62-63pp.
- 차두송, 오재현, 황진성, 이재선, 배영수. 2007. 산림바이오매스 자원의 에너지 이용에 관한 연구(VI). *한국 임학회 학술연구 발표 논문집*, 381-382pp.
- 최돈하. 2004. 고유가 시대의 대안 “목질 펠릿연료”, *산림지* 11: 68-70.
- Bain, R. L., Overend, R. P. and K.R. Craig. 1998. Biomass-fired power generation. *Fuel process. Technol* 54: 1-16.
- Cardona, C. A. and J. Sónchez. 2007. Fuel ethanol production: Process design trends and integration opportunities. *Bioresource Technology* 98: 2415-2457.
- Chae, H.J., Jeong, K.E., Kim, C.U. and S.Y. Jeong. 2007. Development status of BTL (Biomass to Liquid) technology. *J. Energy Engineering* 16(2): 83-92.
- Cho, W. S., Chung, Y.H., Kim, B.K., Suh, S.J., Koh, W.S. and S.H. Choe. 2007. Cellulosic ethanol as renewable alternative fuel. *J. Plant Biotechnol* 34(2): 111-118.
- Gray, K.A., Zhao, L. and M. Emptage. 2006. Bioethanol. *Current Opinion in Chemical Biology* 10: 141-146.
- Hahn-Hägerdal, B., Galbe, M., Gorwa-Grauslund, M. F., Lidén, G.

- and G. Zacchi. 2006. Bio-ethanol-the fuel of tomorrow from the residues of today. *Trends in biotechnology* 24: 549-556.
- Han, G.S. and B.R. Kim. 2006. Characteristics of charcoal from wood pellet. *Mokchae Konghak* 34(3): 15-21.
- Han, G.S. and D.H. Choi. 2002. Densified fuels from poplars. *J. Kor. For. En.* 21(3): 59-65.
- Han, G.S. and J.K. Yeo. 2003. High-pressure compaction of sawdust of Hyunsasi-poplar (*Populus alba* x *P. glandulosa*) for densified fuel. *J. Kor. For. En.* 22(2): 54-59.
- Hwang, J.S., Oh, J.H., Kim, N.H. and D.S. Cha. 2009. Preliminary study on the fuel processing with woody biomass(I) -Physical properties of wood chip. *J. Forest Sci.* 25(1): 75-84.
- Jeong, D.S. 2007. European project, TIME/NILE for ligno-cellulosic ethanol. *Auto Journal* 26(4): 50-54.
- Kim, N.H. and R.B. Hanna. 2006. Morphological characteristics of *Quercus variabilis* charcoal prepared at different temperatures. *Wood Sci, Technol* 40: 392-401.
- Kim, Y.S. 2008. Development and utilization trend of biofuel from lignocellulosic biomass. *Forest bioenergy* 27(1): 1-10.
- Kim, Y.S. 2009. A research trend of pretreatment in bioethanol production process with lignocellulosic biomass: A literature review. *Mokchae Konghak* 37(3): 274-286.
- Klass, D.L. 1998. Biomass for renewable energy, Fuels and Chemicals. Academic press, New york, 272-278pp.
- Korea Forest Service. 2007. The Fifth National Forest Plan (2008-2017). Korea Forest Service. 61-72pp.
- Kwon, G.J., Kim, D.Y., Kimura, S. and S. Kuga. 2007. Rapid-cooling, continuous-feed pyrolyzer for biomass processing: Preparation of levoglucosan from cellulose and starch. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 80: 1-5.
- Kwon, G.J., S. Kuga, S., Hori, K., Yatagai, M., Ando, K. and N. Hattori. 2006. Saccharification of cellulose by dry pyrolysis. *J. Wood sci.* 52: 461-465.
- Kwon, S.M., Cho, J.H., Lee, S.J., Kwon, G.J., Hwang, B.H., Lee, G.H., Han, G.S., Cha, D.S. and N.H. Kim. 2007. Evaluation for wood pellets from *Pinus densiflora* wood damaged by forest fire. *Mokchae Konghak* 35(4): 14-20.
- Kwon, S.M. Kim, N.H., and D.S. Cha. 2009. An investigation on the transition characteristics of the wood cell walls during carbonization. *Wood Sci. Technol.* 43: 487-498.
- Kwon, S.M. and N.H. Kim. 2006. Investigation of carbonization mechanism of wood (I). *Mokchae Konghak* 34(3): 8-14.
- Kwon, S.M. and N.H. Kim. 2007. Investigation of carbonization mechanism of wood (II). *Mokchae Konghak* 35(3): 45-52.
- Lee, O.K., Jo, T.S. and J.W. Choi. 2007. Changes in properties and surface FT-IR spectra of wood charcoal at different carbonization temperatures. *Mokchae Konghak* 35(4): 21-28.
- Lin, Y. and S. Tanaka. 2006. Ethanol fermentation from biomass resources: current state and prospects. *Applied Microbiology and Biotechnology* 69: 627-642.
- Mabee, W.E., Gregg, D.J., Arato C., Berlin, A., Bura, R., Gilkes, N., Mirochnik, O., Pan, X., Pye, E.K. and J.N. Saddler. 2006. Updates on softwood to ethanol process development. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 129~132: 55-70.
- Mosier, N., Wyman, C., Dale, B., Elander, R., Lee, Y.Y., Holtzapfel, M. and M. Ladisch. 2005. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology* 96: 673-686.
- Mun, S.P., Ku, C.S. and S.B. Park. 2007. Physicochemical characterization of pyrolyzates produced from carbonization of lignocellulosic biomass in a batch-type mechanical kiln. *Journal of industrial and engineering chemistry* 13(1): 127-132.
- Pictet, A. and J. Sarasin. 1918. Distillation of cellulose and starch in vacuo. *Helv. Chim. Acta.* 1: 78-96.
- Rhee, S.W. and Y.H. Cho. 2008. A Study on Characteristics of Carbonization Residue Produced from Woody Biomass. *Journal of Korea society of waste management* 25(6): 533-539.
- Sandermann, W. and H. Augustin. 1964. Chemische untersuchungen über die thermische zersetzung von holz. Dritte mitteilung. Chemische untersuchung des zersetzungsgsa-blaufs. *Holz Roh-Werstoff.* 22: 377-386.
- Sassner, P., Martensson, C.G., Galbe, M. and G. Zacchi. 2008. Steam pretreatment of H₂SO₄-impregnated *Salix* for the production of bioethanol. *Bioresource Technology* 99: 137-145.
- Shafizadeh, F. 1968. Pyrolysis and combustion of cellulosic materials. *Adv. Carbohydr. Chem.* 23: 419-474.
- Shafizadeh, F., Furneaux, R.H., Cochran, T.G., Scholl, J.P. and Y. Sakai. 1979. Production of levoglucosan and glucose from pyrolysis of cellulosic materials. *J. Appl. Polym. Sci.* 23: 3525-3539.
- Silverstein, R.A., Chen, Y., Sharma-Shivappa, R.R., Boyette, M.D. and J. Osborne. 2007. A comparison of chemical pretreatment methods for improving saccharification of cotton stalks. *Bio-resource Technology* 98: 3000-3011.
- Sun, Y. and J. Cheng. 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review, *Bioresource Technology* 83: 1-11.
- Ward, R.B. 1963. 1,6-anhydro- β -D-glucopyranose (Levoglucosan). In: Whistler RL, Wolfrom ML (Ed.) *Methods in Carbohydrate Chemistry II*. Academic Press Inc, London. 394-396pp.

(Received July 13, 2009; Accepted August 20, 2009)