

목질 바이오매스의 활용에 대한 동향 분석

- 목질 바이오매스의 생산·공급, 그리고 활용을 중심으로 -

안병일 · 김철환^{†1} · 이지영¹ · 심성웅² · 조후승² · 이경선² · 이지영²
접수일(2012년 7월 23일), 수정일(2012년 8월 3일), 채택일(2012년 8월 6일)

Analysis on the Trend of the Utilization of Woody Biomass

- Production, supply, and practical use of woody biomass -

Byeong-Il Ahn, Chul-Hwan Kim^{1†}, Ji-Young Lee¹, Sung-Woong Shim², Hu-Seung Jo²,
Gyeong-Sun Lee² and Jee-Young Lee²

Received July 23, 2012; Received in revised form August 3, 2012; Accepted August 6, 2012

ABSTRACT

Wood biomass including forest residues, waste wood, and construction residuals has been widely generated in Korea, but forest biomass from the National Forest Management Operation Project plays a big role in generating wood biomass. Unfortunately the promotion policy of woody energy organized by the Forest Service in Korea concentrates more on demand creation rather than on supply expansion. Therefore, in order to utilize insufficient wood resources effectively, it is greatly required to develop uses for maximizing their added value. In particular, more attention to the use of the second generation biomass has been paid in foreign countries because there is a threshold that the first generation biomass cannot produce enough biofuel without threatening food supplies and biodiversity. In Korea, wood pellets are regarded as the alternative clean fuels to oils and coals that emit green house gases into the atmosphere. However, using wood as pellet raw materials can not be an economic way because the value of wood disappears right after burning in the boiler in spite of its contribution to the decrease of carbon emission. Differently from wood pellets, kraft pulping process using woody biomass produces black liquor as a by-product which can be used to generate electricity, bioenergy and biochemicals through gasification. Thus, it can be more economical to make a torrefaction of lignocellulosic biomass such as low-quality wood and agricultural leftovers as raw materials of pellets.

• Dept. of Food and Resource Economics, Korea University, Seoul, 136-701, Korea
1. Dept. of Forest Sciences/IALS, Gyeongsang National Univ., Jinju, 660-701, Korea
2. Graduate student, Dept. of Forest Products, Gyeongsang National Univ., Jinju, 660-701, Korea
† 교신전자 (corresponding author): E-mail: jameskim@gnu.ac.kr

Keywords: *Woody biomass, the first generation biomass, the second generation biomass, wood pellets, torrefaction*

1. 서론

현재 2050년이면 가용할 수 있는 석유 자원의 고갈이 예상되면서 이를 대체할 수 있는 바이오연료에 대한 관심이 날로 증가하고 있다. 미국과 브라질을 중심으로 1세대 바이오매스인 전분과 설탕류과 같이 비섬유소계 바이오매스를 이용하여 화석연료를 대체할 수 있는 바이오연료 제조용 원료로 사용하여 왔다. 하지만 세계적으로 1세대 바이오매스의 사용에 대한 급지 않은 시선이 존재하는데, 이는 식량 및 가축 사료 수급 차질, 식량 위기, 재배 과정에서 탄산가스 총량의 증가 등의 문제점 때문에 이들 바이오매스의 지속적 이용에 한계가 있다는 의구심 때문이다.^{1,2)} 이에 비식용 섬유소계 바이오매스인 리그노셀룰로오스계 자원을 원료로 한 2세대 바이오매스를 이용한 바이오연료 제조에 대한 관심이 고조되고 있다. 물론 목질계 바이오매스를 중심으로 한 2세대 바이오매스는 한 해 100-500억 톤 정도 발생하고 있고 재생 가능한 자원이라는 장점이 있지만 성장 속도가 느리고 리그닌과 결합되어 있는 셀룰로오스의 분해가 어렵다는 단점이 있다.³⁾ 하지만 이러한 단점을 개선하기 위한 연구가 세계적으로 진행되고 있기 때문에 5-10년 내에 상용화 가능할 것으로 기대되어 대체 에너지원으로서의 잠재력이 가장 크다고 할 수 있다. 한편 3세대 바이오매스는 연안 양식이 가능하고 생장 과정에서 바닷물 중의 유기 영양성분을 흡수하는 거대 조류와 미세 조류를 포함한다. 하지만 이들 바이오매스는 전 세계적으로 사업의 타당성 측면에서 검토 단계에 있기 때문에 향후 추가적인 연구를 통하여 검증 작

업이 필요하여 불확실성이 높다는 점이 상용화에 주 걸림돌이 되고 있다.⁴⁾

2세대 바이오매스는 목재 부산물, 벃짚, 밀겨, 왕겨, 수수대, 사탕수수찌꺼기 (bagasse) 등이 있지만 국내와 같이 국토의 64%가 산림으로 덮여진 조건에서는 최대의 리그노셀룰로오스계 자원은 목재라는 사실에 의심의 여지가 없다. 국내의 목질바이오매스 활용을 살펴보면 목질바이오매스 2011년 기준으로 연간 1,223 톤이 생산되어 이중에 산림부산물이 784톤을 점하고 있으며 각종 개발사업 부산물이 나머지 부분을 차지하고 있다.⁵⁾ 그러나 숲가꾸기사업의 부산물들이 효율적으로 수집되지 못함으로 인해 주요 목질바이오매스가 효과적으로 이용되지 못하고 있는 실정이다. 더욱이 국제에너지기구(IEA)의 발표에 따르면 우리나라는 2006년 기준으로 이산화탄소 배출량이 세계 9위, 1차 에너지 소비 또한 세계에서 11위를 점하고 있는 상황이라는 점을 감안할 때, 목질바이오에너지의 효율적인 활용에 대한 다양한 연구들이 이루어져야 할 것으로 판단된다.⁶⁾ 따라서 본 연구에서는 목질바이오매스의 활용과 관련하여 국내·외에서 진행되고 있는 산림바이오매스의 공급 및 수집, 고체연료의 사용에 관한 정책 및 연구동향에 대하여 정리하고 이를 통해 향후 국내 목질바이오매스의 효율적인 활용에 대한 방안을 모색하고자 한다.

2. 본론

2.1 목질바이오매스의 생산과 공급

2.1.1 국내동향

Table 1. Classification of biomass

Biomass classification	Types	Biomass
1st generation	sugar, starch, vegetable oil	sugar cane, corn, soy, rapeseed, jatropha, sunflower, palm oil, etc.
2nd generation (advanced biofuel)	sustainable lignocellulosic feedstock	wood, sugar cane bagasse, corn stalk, switch grass, etc.
3rd generation	Algae-based biofuel including macro algae and micro alage	sea tangle, laver, brown seaweed, algae, etc.

우리나라는 지난 40년간 지속적인 산림녹화와 산림 자원 육성정책을 적극 추진하여 입목 축적과 목재 자급률이 꾸준히 증가하였지만 현재에도 목재의 약 85%를 수입에 의존하고 있다.⁷⁾ 산림녹화는 성공했지만 경제적인 조림사업이 수행되지 못해 목재 제품의 원료로 사용될 수 있는 조림 수종이 거의 전무한 실정이었다.

목질바이오매스를 이용하여 바이오에너지를 생산하기 위해서는 목질자원의 효율적인 수집과 운송이 최우선적으로 이루어져야 한다. 그런데 목질바이오매스를 이용한 바이오에너지 생산은 다른 태양열, 풍력, 지열 등과 같은 다른 신·재생에너지와는 달리 원료가 안정적으로 공급되지 못하면 지속적이고 안정적으로 에너지를 생산할 수 없고 특히 세계적으로 자국의 산림보호정책이 강화되면서 천연림으로부터 목질바이오매스를 수집하기가 점점 힘들어지는 상황이다. 이와 같은 이유에서 향후 인공림에서 목질자원을 생산하는 것이 필요하다는 주장도 주목을 받고 있다.⁸⁾ 산림청에서는 Table 2에서 보는 바와 같이 2007년부터 산림바이오매스 산물 수집과 화목보일러 시설비를 지원하고 있고, 2008년에는 펠릿제조시설 지원과 펠릿보일러 보급 시

범 사업을 추진 중에 있으며, 열병합 발전소용 우드칩 수요도 2012년에는 180만 m³에 이를 것으로 전망하고 있다.⁹⁾ 또한 산림청에서는 2013년 제2차 온실가스의 무감축을 대비하여 탄소흡수원을 확보하기 위해 신규 조림, 재조림, 해외조림 등의 조림사업을 확대하기로 하였고 바이오매스의 안정적 공급을 위한 바이오 순환림을 2008년부터 2017년까지 순차적으로 총 10,000 ha를 조성하는 것을 목표로 조성하고 있다. 이후 사유림, 간척지, 매립지, 유휴농지 등으로 확대할 계획이다.¹⁰⁾

산림청에서 추진하는 숲가꾸기 산물의 활용 용도에 관한 정책을 보면 대체로 연소연료(burning fuel)에 초점을 맞추고 있는데,¹¹⁾ 이러한 정책의 근거가 되는 경제성 분석에 대한 오류가 지적되고 있기도 하다. 2012년 1분기 산림청이 공표한 자료에 따르면 목재 펠릿 제조업체별 목재 펠릿의 가격은 배송비 포함 톤당 35만~40만 원에 판매되고 있고, 2010년 산림조합중앙회의 목재유통센터에 제시한 펠릿 생산비용은 시간당 2톤을 생산하는 시설규모에서 시설비용이 25억 원인 경우, 목재 가공부산물(톱밥 등)을 70% 원료로 사용하고 원목 30%를 사용하는 경우, 원목 100%를 원료로 사용하

Table 2. Base-setting plan and projected supply goal for use of forest biomass

	2007	The 5 th Period of Forest Management Operation Plan		Note
		The 1 st -half period ('08-'12)	The 2 nd -half period ('13-'17)	
Product collection (×10 ³ m ³)	328	4,942	6,350	Annual mean 1.1×10 ⁶ m ³
Supply No. of wood boiler	740	10,000	25,000	Annual mean No. 3,500
Supply No. of pellet boiler	-	5,000	10,000	Annual mean No. 1,500
Supply of manufacturing facilities for pellet boiler	-	7	3	
Short rotation intensive culture (ha)	On investigating	2,000	5,000	Annual mean 1,000 ha
Recycling of waste woods (%)	60	75	90	MDF 50%, PB 100%
Facilities for transporting products (km)	-	9,250	12,500	Annual mean 2,000 km
R&D funds for developing bioenergy (×10 ³ million won)	10	107	125	Annual mean budget 23×10 ³ million won
Forest road (km)	1,205	7,000	9,800	New 4,300, Supplement 12,500
Forest machinery (×10 ⁶ won)	2,190	12,500	12,500	Annual mean budget 25×10 ³ million won

Source: Korea Forest Service, Practical Measures to Use Wood Pellets as an Energy, 2009

는 경우, 동남 아시아산 원료를 사용하여 현지에서 생산·반입 하는 경우에 대해 생산비를 계산하였는데, 그 결과 톤당 생산비용은 27만원-34만 원이 소요된다고 밝히고 있다. 여기서 원료비가 차지하는 비중은 37-40%에 해당되고, 각종 제조비용을 고려한다면 생산원가를 제외했을 때 순수익은 2-3%에 불과한 실정이다. 만약 목재 펠릿 생산을 위한 원료 수급에 문제가 생길 경우 그 비중은 보다 더 높아 질 가능성도 있어 펠릿의 소비자 가격이 가파르게 상승할 가능성이 항상 잠재되어 있다. 이러한 상황에서 숲가꾸기 산물을 연소연료의 관점에 한정된 사고를 하거나 혹은 이에 기반한 정책을 집행하다 보면 산물이 갖는 잠재적 가치를 과소평가할 가능성이 크기 때문에 다양한 용도 활용이라는 관점에서 접근할 필요가 있다.

산림청에 따르면 목질계 바이오매스는 2010년말 기준 년 기준 연간 370만 m^3 이상 생산가능하다. 목재 자급률은 13.5%로 증가하였지만 여전히 국내 목재의 수요량은 126만 4천 톤 수준이기 때문에, 공급량은 발생량의 12.7%인 12만 5천 톤에 불과하여 여전히 약 85%를 수입에 의존하고 있다.⁷⁾ 국내의 산림바이오매스 발생량 산정과 관련해서는 연구자에 따라 발생량이 다르게 계산되는데, 석 등의 연구에 의하면 우리나라 사업지 가운데 II, III, IV 영급 산림의 면적 4,156,791 ha을 대상으로 10년 주기의 숲가꾸기를 실시할 경우 연간 숲가꾸기 대상면적은 약 416,000 ha가 되고 숲가꾸기 과정에서 발생하는 목질 바이오매스의 연간 총량을 약 12,480,000 m^3 에 이를 것으로 추정하고 있다.¹²⁾ 하지만 숲가꾸기사업 자료와 임목벌채허가실적 통계는 상당부분이 중복될 가능성이 존재하고 임목벌채허가실적에서 수집할 수 있는 산림바이오매스는 개인에 의해 관리되기 때문에 용도 파악이 어렵고, 그 양 또한 수치화하기 어려운 단점이 있다. 또 다른 연구자는 숲가꾸기 사업에서 발생하는 바이오매스의 양을 ha당 20 m^3 로 가정하고, 이를 근거로 숲가꾸기에서 발생하는 바이오매스를 2,615천 m^3 로 추정하였지만 ha당 20 m^3 로 가 발생한다는 근거는 제시하지 못한 한계가 있다.¹³⁾ 현재까지 정확한 산출 근거가 마련되지 못하였지만 산림청에서는 연간 약 370만 m^3 이상의 목질계 바이오매스가 발생한다고 보고 한다.⁷⁾

만약 연간 발생하는 산림 바이오매스 산물을 전량 석유 대체 원료로 이용한다고 가정한다면, 4천억 원의 원

유 수입대체효과를 기대할 수 있다고 산림청에서는 예측하고 있지만 현재의 수집 체계로는 목표한 양 만큼을 수집하는 것이 쉽지 않을 뿐만 아니라 수집된 산물의 용도를 석유 대체 원료로 사용한다는 것 자체에 대한 비판도 무시되어서는 안 된다.

숲가꾸기사업에서 발생하는 산물을 포함해서 국내 목질바이오매스는 산림부산물, 폐목재, 개발부산물 등으로 발생되고 있으며, 정부주도의 숲가꾸기사업에서 얻어지는 산림부산물의 발생량이 가장 많은 것으로 나타나고 있다. 하지만 향후 숲가꾸기사업을 통해 발생하는 총 산물량은 점차 줄어들 것으로 예상되며,^{14,15)} 이렇게 얻어지는 산림부산물도 약 8-10%만이 활용되고 있고 나머지는 산림 중에 방치되고 있는 실정이다. 또한 개발부산물은 퇴비 등으로 재활용될 수 있으나 약 80%는 폐기되고 있고 폐목재 중 생활폐목재의 경우에도 약 3%만이 재활용되고 나머지는 매립되거나 소각되고 있다.¹⁶⁾ 국내 산림에서는 유럽지역과 같이 대규모 벌채가 불가능하기 때문에 임목부산물이 경쟁력을 가지기 위해서는 원목과 임목부산물을 저비용으로 수집할 수 있는 방법의 개발이 우선시 되어야 하고 이에 따른 적절한 용도 개발이 매우 필요하다. 하지만 우리나라의 경우 산림청의 목질에너지 산업 육성정책이 원재료 공급 확보보다는 수요창출 쪽에 무게중심이 많이 쏠려 있는 상황이다.

현재 국내에서는 숲가꾸기를 통해 나온 부산물을 이용한 다양한 활용방안을 연구·검토하고 있는 단계인데, 예를 들어 산림부산물과 생활폐목재의 재활용률을 재고하기 위해 정부에서 폐목재 재활용 활성화 대책을 관계기관과 합동으로 제시하고 있다.¹⁷⁾ 재활용 활성화 정책의 주요 내용을 보면 우선, 폐목재의 오염정도에 따라 분류하여 무의미하게 폐기되는 폐목재의 양을 최소화하고 폐목재의 칩을 에너지 시설에서도 사용할 수 있도록 하는 것을 들 수 있다. 또한 임목부산물의 수거를 확대하기 위하여 재원을 확보하고 수집 장비, 목재파쇄기 등의 기계화를 지원하고 발전차액을 단계적으로 확대하고 칩 연료 구입가격의 일부를 지원하는 방안도 시행 중에 있다.¹⁸⁾ 이와는 달리 지식경제부에서는 2011년 바이오에너지 생산 발전사가 건설 및 사업장의 폐목재 재활용을 통하여 전력 생산시 RPS 인증에서 제외하기로 했다. 대신에 국내 파티클보드 업체 등 가구 제조업체에서 건설계, 사업장계 폐목재를 우선 활용토록 규정

하고 있다. 이외에도 산림 폐바이오매스를 발효시키는 과정에서 발생하는 열을 이용하는 연구,¹⁹⁾ 산지 폐잔재를 활용하여 목탄, 목초액 등을 생산할 수 있는 조립식 탄화로 개발 관련 연구,²⁰⁾ 폐잔재의 건식 해섬을 통한 충격 흡수용 완충소재 개발²¹⁾ 등과 같은 다양한 연구들이 수행되었지만 아직 실용화 단계에는 이르지 못하고 있다. 따라서 산림바이오매스의 경제적 활용을 위해서는 현재 이용 가능성이 높은 목질계 판상재료, 펄프 제조용 칩 등으로 이용하는 것이 바람직하다.

참고로 국내에서 발생되는 목질 바이오매스는 산림청에서 업체별, 용도별, 기간별로 수요량을 파악하여 목재 수급 계획을 수립하고 있다. 2012년 기준 용도별 수급계획을 보면 칩·펄프용은 986천 m³, 보드용재는 1,807천 m³, 합판용재는 10천 m³, 토목용재는 9천 m³, 갱목용 23천 m³, 제재용 451천 m³, 바이오매스용 371천 m³, 한옥·목조주택용 65천 m³, 기타 451 m³을 공급할 계획을 갖고 있다.⁷⁾ 여기서 바이오매스 용도로 371천 m³의 목재를 공급할 계획을 잡고 있는데 이는 Table 2의 펄릿용 목질 바이오매스의 수급 계획과는 상당한 차이가 있다. 목재 펄릿 제조를 위한 목재 수집을 2008년부터 2012년까지 4,942천 m³ (연 평균 988.4천 m³) 계획하고 있지만 실제 산림청의 용도별 수급 계획에서는 371천 m³만 공급하는 것으로 계획하고 있어 계획한 펄릿 제조용 원료를 어떻게 충당할 수 있을 것인가에 대한 명쾌한 해답을 찾기 어렵다.

2.1.2 해외동향

Fig. 1은 유럽의 재생에너지 목표치에 부합하는데 있어서 바이오매스의 종류별 역할을 보여주는 그림이

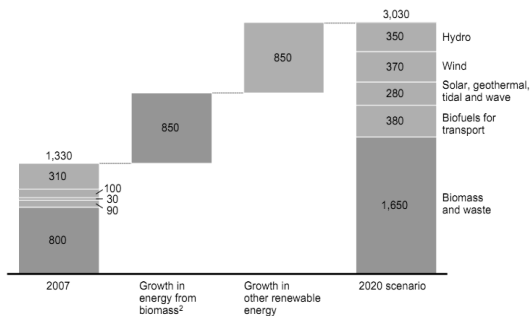


Fig. 1. Role of biomass in meeting Europe's renewable energy targets (European Climate Foundation, 2010).²²⁾

다. 유럽의 경우 2020년까지 바이오매스를 이용한 열과 전력 소비는 2020년까지 800 TWh에서 1,650 TWh까지 약 두 배 가량 증가될 것으로 예상하고 있다.²²⁾ 증가폭은 바이오매스를 제외한 기타 재생에너지원의 합과 동일한 값이고, 특히 증가폭 850 TWh는 EU 국가에서 석탄과 갈탄으로부터 생성되는 오늘날의 에너지 소비량의 약 1/2에 해당한다.

지난 2000-2007년 사이에 바이오에너지 소비는 연간 약 25 TWh까지 증가하였고, 이들 중 10 TWh는 공장 자체의 운전이나 가정용 난방 등에 직접 이용한 경우이고, 나머지는 15 TWh는 상업용 전기 및 난방을 위해 사용되었다. 만약 바이오에너지 소비가 계속된다면 2020년까지는 해마다 총 300 TWh로 2020년까지 1,100 TWh까지 증가할 것으로 전망된다. 이는 대략 스웨덴, 노르웨이, 그리고 핀란드의 총 전기 소모량과 일치하는 매우 엄청난 증가라 할 수 있다 (Ericsson et al., 2006; 민경택, 2006).

Fig. 2는 EU의 바이오매스 공급 시나리오를 나타낸다. 내부적으로 전체 1,000 TWh의 부가적인 재생에너지 공급이 가능하고, 2020년까지는 2,000 TWh까지 공급량을 늘려 나갈 계획을 잡고 있지만 필요한 수요량 2,300 TWh에 미치지 못하게 때문에 연간 500 kton의 펄릿을 생산하는 120여 펄릿 개별 공장에서부터 펄릿을 수입하여야 할 필요성 또한 인식하고 있는 실정이다.²²⁻²⁴⁾

여러 가지 원료 중에서 임산물은 오늘날 가장 큰 바이오매스 공급원으로 주요 에너지의 연간 필요량의 약 770 TWh를 담당하고 있다. 임산물의 약 절반은 산업체에서 나오는 부산물로서 흑액, 톱밥, 수피 등이고, 360

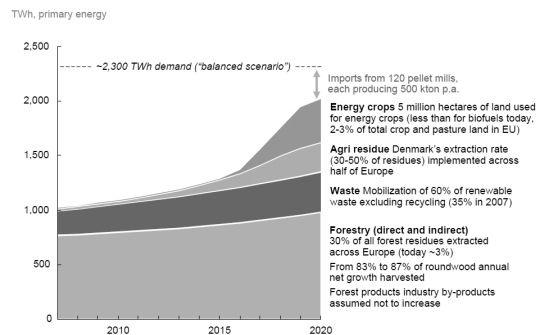


Fig. 2. Aggressive EU biomass supply scenario (European Climate Foundation, 2010).²²⁾

TWh는 원목, 30 TWh는 가지, 수관부, 그리고 그루터기에 해당한다. 현재 바이오에너지 생산을 목적으로 3-15년이면 수확이 가능한 단기 순환림 조성을 목적으로 포플러류 (*Populus spp.*), 버드나무류 (*Salix spp.*), 유칼리투스류 (*Eucalyptus spp.*) 등이 속성 재배용으로 육종되어 식재되고 있다.⁴⁹⁾

유럽의 경우 숲의 울창한 정도를 나타내는 기준인 임목축적을 보면 독일이 35억 m³, 스웨덴 27억 m³, 프랑스 25억 m³, 핀란드 21억 m³이다. 참고로 우리나라는 약 8억 m³ 수준(ha당 125.6 m³)으로 산림 선진국의 3배 이하로 매우 낮다.⁷⁾ 이러한 임목축적은 목질계 바이오매스 이용에도 영향을 미쳐 2004년 기준 프랑스, 스웨덴, 핀란드, 독일을 중심으로 목질계 에너지의 최대 소비를 기록하였고, 목질계 에너지 소비 비중 측면에서는 스웨덴과 핀란드가 각각 15.5%, 20.5%의 비중을 차지하여 EU 국가들 중 가장 높은 비중을 나타내었다.^{24,25)}

미국은 바이오에탄올 생산을 위해 1세대 바이오에탄올 원료인 전분질계 옥수수를 90% 이상 사용하고 있으며 이를 이용하여 연간 16.6백만 kL의 바이오에탄올을 생산하고 있다. 이는 전 세계 생산량의 35.2%에 해당하는 양이다. 미국의 바이오에탄올 보급 계획에 따르면 2010년 100억 갤런, 2013년 1,000억 갤런, 그리고 2020년 10,500억 갤런(약 39,742억 L)의 바이오에탄올을 공급할 예정이다.²⁶⁾ 하지만 옥수수가 식량 자원과 관련된 논쟁의 중심에 서면서 셀룰로오스계 자원을 이용한 바이오에탄올 연구에 주력하기 시작하고, 2010년부터 2022년까지 160억 갤런의 셀룰로오스계 에탄올을 공급할 계획을 세우고 있다.²⁶⁾ Fig. 3에서 보는 바와 같이 2009년 기준 미국 바이오매스 에너지의 약 49%를 목재와 그 부산물로부터, 나머지 약 40%는 바이오연료, 약 12%는 고품 폐기물로부터 충당하고 있다.²⁷⁾ 참

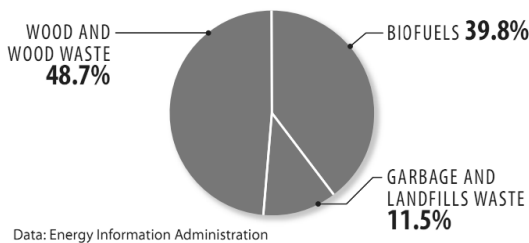


Fig. 3. US source of biomass in 2009 (Source: US Energy Information Administration).²⁷⁾

고로 미국의 나무총량(임목축적)은 ha당 154.9 m³로 우리나라의 125.6 m³보다 높다.⁷⁾

현재 전 세계적으로 농업 부산물, 산림 부산물, 초본 및 목질계 에너지 작물 등과 같은 2세대 바이오매스에 대한 관심이 높아지고 있는데 이러한 2세대 바이오매스의 경제성을 평가하는데 사용하는 중요 지표들 중에는 재배 면적, 생산성, 바이오연료 제조비용 등이 고려된다.²⁸⁾ 따라서 바이오매스의 공급량 추정도 중요하지만 바이오매스 수확이 가능한 면적에 대한 분석도 매우 중요하다. Fig. 4는 FAO에서 추정된 자료에 근거하여 2020년 에너지 생산 목표 달성을 위해 이용 가능한 세계 바이오매스 공급량을 보여준다.²²⁾ 이를 토대로 유추해 볼 때 2020년까지 예상되는 소비 수준의 2배를 넘어서는 바이오매스 공급이 가능한 것으로 결론내릴 수 있다. 이러한 공급량 산정에는 현재 열대우림이 차지하는 면적은 제외되었는데, 에너지 작물 재배 지역을 빼고는 목질계 바이오매스를 얻을 수 있는 산림 지역으로부터 가장 많은 양을 공급받을 수 있음을 알 수 있다. 바이오매스 소비에 있어서는 유럽과 북미 지역이 가장 높은 소비율을 보여주고 있으며, 다음으로 아시아, 남미의 브라질 순이다.

참고로 2010년 기준 바이오매스를 원료로 하여 제조하는 바이오에탄올의 시장규모는 총 1,159억 달러로서 2009년에 비해 52.9%로 급성장하였다. 2018년까지 신재생에너지 시장 중 바이오에탄올과 바이오디젤은 2007년 245억 달러, 2008년 348억 달러이고 2018년까지 1,054억 달러 규모까지 시장이 확대될 것으로 전망된다.^{29,30)} 바이오에탄올의 경우 미국과 브라질이 전체

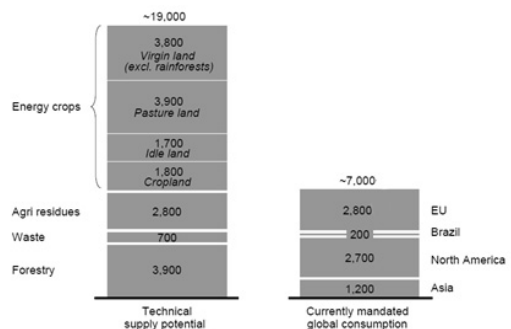


Fig. 4. Technical global biomass supply potential available for energy production in 2020 relative to currently mandated 2020 targets.²²⁾

소비량의 86%를 차지하고 있다. 하지만 이들 두 나라는 바이오연료 제조용 원료 공급이 매우 원활하기 때문에 우리나라와는 분명 차이가 있음에 주목하여야 한다.

2.2 목질 바이오매스의 이용

2.2.1 바이오에탄올 생산

2010년 기준 세계 바이오에탄올 시장 규모는 총 1,159억 달러로 전년도에 비해 55.9% 성장하였다. 신재생에너지에 대한 수요가 증가하면서 F.O. Licht의 예측에 따르면 2012년에는 바이오에탄올 시장 규모가 650억 리터 규모가 될 것으로 전망하고 있다.³¹⁾ 그리고 전 세계 바이오연료의 사용 비율은 바이오에탄올이 90%, 그리고 바이오디젤이 10% 수준으로 알려져 있다. 미국 농무성 (USDA)의 자료에 따르면 2017년 전체 가솔린 소비량 중에서 바이오에탄올 점유비율은 약 7.5% 정도로 예상하고 있으며,³²⁾ 2020년에는 전체 바이오연료 수요량 중에서 73%가 에탄올이 차지하고 그 양은 약 1,200억 L 이상이 될 것으로 전망하고 있다.³²⁾

1세대 바이오연료를 생산하기 위해서는 옥수수과 밀과 같은 전분질 작물과 사탕수수와 사탕무와 같은 당질 작물을 이용한다. 미국에서는 1세대 바이오연료를 제조하는데 사용되는 옥수수의 경우 2014년을 정점으로 감소하기 시작할 것으로 전망하고 있다.³³⁾ 그러나 리그노셀룰로오스계 바이오매스를 이용하는 기술이 개발됨으로써 전분질과 당질 작물들과 함께 산림으로부터 발생하는 목질계 바이오매스와 폐잔재도 함께 이용할 수 있게 되었다. 이를 통해 생산되는 연료가 2세대 바이오연료이다.^{33,34)}

2세대 바이오매스를 제조하기 위해서는 1세대 바이오매스에 비해서 보다 더 복잡한 가수분해 단계가 필요하다. 이는 리그노셀룰로오스계 바이오매스에 포함되어 있는 셀룰로오스가 글루코오스의 긴 체인으로 이루어져 있어 이를 깨기 위해서는 더 복잡한 효소 처리가 요구되기 때문이다. 따라서 2세대 바이오매스를 이용한 바이오연료 생산은 기술적으로 더 복잡하고 결국 생산원가 상승의 요인이 되고, 이는 앞으로 2세대 바이오연료의 양산을 위해 극복해야 할 부분이다.³⁵⁾

목질계 바이오매스로부터 바이오에탄올을 생산하기 위해 일련의 가수분해 과정을 통하여 목질계 바이오매스의 세포 구조를 개열시켜야 하고, 이를 위해 필요

한 전처리의 효율을 극대화시키기 위하여 물리적, 화학적, 그리고 이들 전처리의 조합이 요구된다. 현재 증기 폭쇄 (steam explosion) 처리가 최신 기술로 고려되고 있더라도 약산 및 진한 산 전처리 공정이 상업화에 근접해 있다.²⁹⁾ 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 그리고 리그닌이 서로 결합되어 있는 구조를 갖는 목질계 바이오매스를 효과적으로 가수분해시키기 위해서는 새로운 혹은 개량된 효소가 요구된다. 현재 *Trichoderma*, *Penicillium*, 그리고 *Aspergillus* 같은 목재 부후균에 의해 생산되는 상당수의 셀룰라아제 (cellulase)가 사용된다. 하지만 이들 효소의 생산 비용은 여전이 높은 편이고, furfural, hydroxy methyl furfural, 수지 산과 같은 산물 저해제 (inhibitor) 또한 최소화시킬 필요가 있다.³⁷⁻³⁹⁾ 효소 재사용은 생산 비용을 낮추는데 있어 가능한 방법 중의 하나이고, 산물 저해제의 영향을 최소화시키기 위해서는 리그노셀룰로오스계 가수분해 산물로부터 저해물질을 제거하거나 저해물질에 내성을 갖는 종류를 선별하거나 리그노셀룰로오스를 분해 및 발효시키기 위한 공정 인자들을 최적화시켜야 한다.^{42,43)}

Fig. 5는 현재 널리 사용되는 2세대 바이오매스를 이용하여 바이오에탄올을 생산하는 공정이다. 발효에 앞서 셀룰로오스 자체만 가수분해 (Separate Hydrolysis and Fermentation)되거나 효소 가수분해된 헤미셀룰로오스와 함께 발효 (Separate Hydrolysis and Co-fermentation)될 수 있다.⁴²⁾ 2세대 바이오에탄올의 상업화를 위한 핵심 목표는 전처리 및 가수분해 단계에서 만들어진 오탄당과 육탄당을 포함하는 모든 당을 에탄올로 발효시키는 것이다. 현재 오탄당과 육탄당을 동시

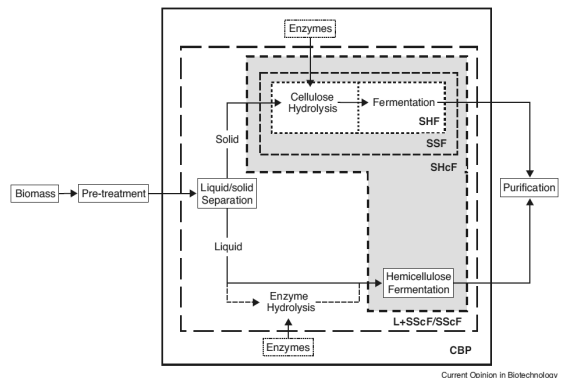


Fig. 5. Process for producing bioethanol using lignocellulosic biomass.⁴²⁾

발효시키기 위한 미생물 처리 기술에 있어서 상당한 발전이 있었지만 고수율로 오탄당과 육탄당을 동시 발효시키는 능력을 갖는 천연 유기체는 아직 알려진 바 없고 향후 관심을 가지고 연구해야 할 분야이다.

2.2.2 가스화

바이오매스는 직접 연소, 가스화 및 열분해 과정을 기초한 다양한 기술들을 이용하여 동력과 연료로 전환된다. 이중 가스화 공정은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 600-1,000°C 온도에서 바이오매스 혹은 목재를 구성하는 탄화수소를 분해하여 연소형 가스로 전환하는 과정이다.⁴³⁾ 일반적으로 펄프 공정에서 증기 생산을 위해 보일러에서 연소되는 바이오매스원은 부산물인 흑액이다. 목재 칩의 크라프트 펄프화 과정에서 발생하는 흑액의 가스화는 재래 연소 공정에 비교해서 몇 가지 고유한 이점들이 있다. 가스는 고형 연료나 액상 연료에 비해 가스가 갖는 산소와 연료 사이의 향상된 접촉으로 인해 보다 더 효율적으로 연소된다. 가스화 공정에서 발생하는 합성가스(syngas)는 가스 터빈에서 연소될 수 있는데, 이는 증기 터빈보다 훨씬 더 효율적으로 전기 생산에 이용되고 있다.⁴⁴⁾ 또한 합성가스는 다양한 화학처리 공정을 거쳐 기타 연료,약품, 재료 등으로도 가공될 수 있다.

목질계 바이오매스를 가스화 공정에 그대로 이용하는 것은 귀중한 자원 낭비에 해당한다. 따라서 목질계 바이오매스는 일차적으로 펄프 제조와 같은 최종 산물을 만드는 원료로 사용하여야 하고, 이 과정에서 얻어지는 부산물인 흑액을 가스화 원료로 이용하는 것을 적극적으로 고려하는 것이 필요하다. 다른 나라에서는 대형 크라프트 펄프 공에는 이러한 공정을 도입하여 약액 회수, 스팀과 전기를 동시에 생산하는 예를 많이 볼 수 있다. 전 세계적으로 화학펄프 공장은 약 450개 정도 되

고 여기서 생산되는 흑액은 전건 중량 기준 대략 2억 톤/년 수준이다.⁴⁵⁾

보통 크라프트 펄프화 공정에서 회수보일러(recovery boiler)는 흑액으로부터 에너지를 얻고 동시에 펄프 약액을 회수하는 것을 목적으로 운용되지만 에너지 생산 효율은 약 12%에 불과하고 설치 가격도 펄프 공정에서 가장 비싼 것이 특징이다. 또한 폭발의 위험과 공장의 황 수지(sulfur balance)를 제어하기가 어려운 단점이 있다. 하지만 흑액의 가스화 공정으로 전환한다면 회수보일러에 비해 에너지 생산 효율이 두 배 이상 향상되어 잉여 에너지를 팔 수 있고 액체 연료 생산이 가능하다. 또한 황 처리가 수월하고 환경에 대한 유해성을 훨씬 더 감소시킬 수 있다.⁴⁶⁾ 따라서 탄소배출권 문제와 맞물려 국내 유일의 화학펄프 공장을 보유하고 있는 무림 P&P(주)에서도 중장기적으로 가스화 공정 혹은 바이오리파이너리 공정의 도입을 내부적으로 검토하고 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 공정의 도입은 펄프제지산업이 타산업의 생산에 미치는 효과가 크기 때문에 전체적인 국내 펄프제지산업의 녹색성장에도 큰 기여를 할 수 있을 것으로 보인다.⁴⁷⁾ 결론적으로 펄프제지공장에서 바이오리파이너리는 펄프 공장으로서 들어오는 바이오매스와 기타 원료들을 완벽히 이용하여 펄프 및 종이 제품 생산을 포함하여 에너지와 바이오약품을 동시에 생산할 수 있는 미래를 위한 매우 의미 있는 사업이라 할 수 있다.

2.2.3 목재 펠릿

현재 산림청에서는 기후 변화에 대응하고 화석 연료를 줄이기 위한 목적의 일환으로 청정 연료인 목재 펠릿의 공급량 확대에 주력하고 있다. 목재 칩과는 달리 세 배 이상 압축·고밀화된 목재 펠릿은 발열량인 2,700 kcal/kg 수준인 목재 칩보다 발열량이 1.7배 높은 약 4,500 kcal/kg 수준으로 1 m³의 나무로부터 450 kg의 펠릿을 얻을 수 있으며, 225 L의 경유를 태웠을 때의 열을 얻을 수 있다.⁴⁷⁾

산림청에서는 2012년에 연간 75만 톤 정도의 펠릿 수요를 예측하고 있지만 국내 생산으로는 40만 톤만 공급이 가능하고 나머지 35만 톤은 수입에 의존해야 한다.⁷⁾ 현재 국내 펠릿 제조 시설은 정부 지원 16개소, 민간투자 5개소이고, 2012년에는 14개소를 추가로 설치할 예정이다. 뿐만 아니라 펠릿 연료의 안정적 공급에

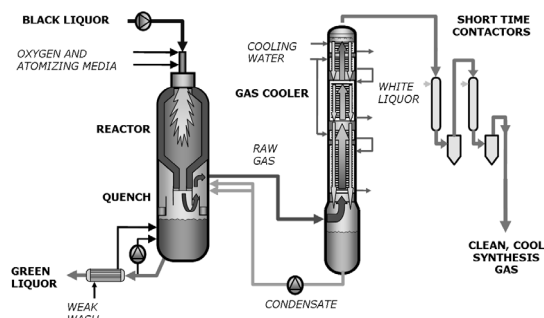


Fig. 6. Chemrec's gasifier in Pietea, Sweden.

대한 우려로 인하여 수요 증가가 매우 둔화되어 있는 상황에서 실제 생산능력에 비하여 수요는 매우 한정되어 있는 상황이다. 예를 들면, 2011년의 경우 20만 톤의 펄릿 생산능력을 가지고 있지만 실제 생산된 펄릿의 양은 12,858 톤에 불과한 실정이다.

우리나라와 같이 이용 가능한 산림 바이오매스 자원이 극히 부족한 상황에서는 목재 펄릿이 석유계 원료를 대체할 수 있는 경제성 있는 자원인가에 대해서는 신중하게 재고해 볼 필요가 있다. 2011년 기준 국내의 목재 펄릿 총 소비량 33,751 톤 중에서 61%인 20,893 톤은 수입에 의존하고 있다.⁷⁾ 더욱 안타까운 사실은 국내에서 생산되고 있는 펄릿의 원료들 중 일부는 외국에서 수입된 원료를 사용하여 제조하고 있다는 점이다. 결국 목재 펄릿 제조용 원료 공급이 원활하지 않을 경우 숲가꾸기사업에서 발생하는 바이오매스 중 상당 비율을 펄릿용 원료로 전환해야 하는 상황에까지 이를 수 있다. 이렇게 되면 목재 펄릿이라는 연소용 연료는 청정 연료라는 장점에도 불구하고 연소되는 즉시 그 탄소 중립적 연료로서의 가치가 바로 사라지기 때문에 경제성·효율성 측면에서 펄릿 제조용 목재 원료는 펄프와 같은 부가가치가 더 큰 용도로 사용하는 것에 비해 그 활용가치가 떨어질 가능성도 크다.⁴⁷⁾ 반면, 산림 바이오매스는 목질 재료나 펄프의 원료로 사용하고 벗짚, 고추대, 콩대, 옥수수대, 갈대, 부레옥잠 등과 같은 농업 부산물과 목재 가공 공정이나 칩 제조 공정에서 발생하는 부산물을 펄릿이나 바이오에탄올 제조용 원료로 사용한다면 바이오매스의 활용가치가 극대화시킬 수 있다. 특히 목재를 펄프용 원료로 사용할 경우 펄프 제조 과정에서 발생하는 흑액을 재활용하면 펄프 약액 회수와 함께 전기나 증기 생산, 바이오약품 생산이 가능하여 펄릿용으로 사용하는 것보다 훨씬 더 경제적인 이용방법이 될 수 있다.

결론적으로 목질계 바이오매스에 전적으로 의존하고 있는 목재 펄릿 제조 방식을 극복할 수 있는 방법을 찾는 것은 우리에게 주어진 중요한 과제 중 하나이다. 우리나라와 같이 유용 가능한 목재 자원이 극히 부족한 상황에서 펄릿 제조에 적용 가능한 기술은 반탄화 기술(torrefaction)이다. 반탄화 기술은 대기압·무산소 상태에서 바이오매스를 200-320℃의 온도에서 1시간 내에 열분해시키는 기술로 바이오매스의 발열량을 약 2배 정도 향상시킬 수 있다.⁴⁸⁾ 반탄화 기술은 산림 자원이 풍부한 유럽을 중심으로 적용되기 시작했는데 우리나라

와 같이 자원이 부족한 국가에서는 한정된 바이오매스 자원을 효율적으로 이용하고자 할 때 효과적으로 적용될 수 있다. 즉, 목재 펄릿의 원료로 목질계 바이오매스만 사용해야 한다는 한정된 사고를 할 것이 아니라 칩줄기, 낙엽, 수피, 수수대, 벗짚, 밤송이, 콩대, 고추대, 갈대, 부레옥잠, 잔디, 건과피, palm kernel shell (PKS), palm empty fruit bunch (EFB) 등과 같이 다양한 바이오매스를 반탄화시켜 펄릿 제조에 사용한다면 자원의 효율적 이용 측면에서 매우 도움이 될 수 있다. 그리고 이들 리그노셀룰로오스계 바이오매스를 목질계 바이오매스와 혼합하여 반탄화시키면 우수한 발열량을 갖는 펄릿 제조가 가능하기 때문에 목재 자원에만 의존한 펄릿용 원료를 다변화시킬 수 있는 계기가 될 것이다.

Fig. 6은 바이오매스 종류별 반탄화 전후의 발열량을 비교한 것이다. 반탄화 이후 바이오매스 종류별로 발열량이 1.5배에서 3배 이상 증가한 것을 확인할 수 있다. 특히 반탄화 후 목재를 포함해서 칩 줄기, 고추대, 땅콩 껍질, 침·활엽수 잎과 수피 등은 반탄화 전보다 6,000-7,300 kcal/kg 수준의 매우 높은 발열량을 나타내었다. 반탄화로 인해 바이오매스의 발열량이 반탄화 전보다 향상되는 것이 가시적으로 확인된 이상 목질부만을 이용하여 펄릿을 제조해야만 한다는 한정된 사고를 지양할 필요가 있다. 따라서 정부에서 계획한대로 청정 연료인 목재 펄릿을 만들어 공급하고자 한다면 목재 자원이 부족한 국내 실정에서는 목재만을 사용한 펄릿 제조는 지양하고, 다양한 리그노셀룰로오스계 바이오매스를 반탄화시키는 기술을 적용한 펄릿을 제조하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

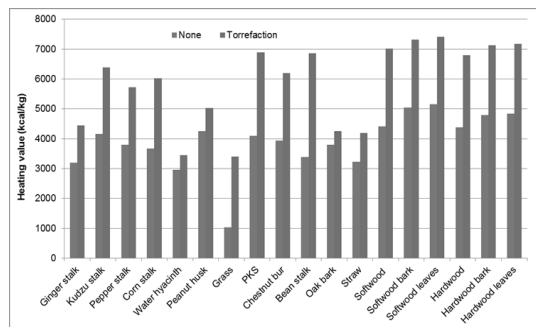


Fig. 6. Heating value change of different biomass before and after torrefaction (Source: Lab. of Advanced Materials for Pulp and Paper, GNU, Korea, 2011).

3. 결론

임목 축적이 낮은 우리나라는 임목축적이 매우 높은 선진국에 비해서 가용 산림자원이 매우 부족하기 때문에 산림 바이오매스의 활용이 매우 어려운 실정이다. 그럼에도 불구하고 정부 주도로 이루어지는 숲가꾸기 사업을 통하여 수집되는 산림 바이오매스를 연소용 연료로 대량 사용한다는 것은 산림 바이오매스의 가치 극대화에 역행하는 조치라 할 수 있다. 숲가꾸기사업을 통해 수집된 목질계 바이오매스를 1차 가공만 거친 채 연소용 연료인 목재 펠릿으로 대부분 소비한다는 것은 목질계 바이오매스의 부가가치 창출 가능성 측면에서 고려해 보았을 때 가장 효과적인 대안은 아니라고 할 수 있다. 오히려 펄프, 섬유판, 삭편판 등과 같이 목재로부터 제조되는 제품들의 원료 사용한다면 펄프 흑액의 재사용, 자원 재활용 등의 측면에서 보다 더 경제적이라 할 수 있다. 만약 목재 펠릿제조를 에너지 자급도 향상 등 다양한 이유 때문에 적극적으로 추진해야만 한다면, 목질계 자원만을 이용한 목재 펠릿 제조보다는 다양한 리그노셀룰로오스계 자원을 목질계 바이오매스와 혼합하여 반환화시켜 사용하는 것이 목재 자원의 절감 및 경제적 이용 측면에서 더 효율적이라고 할 수 있다.

사 사

본 논문은 2011년도 산림과학기술개발사업(과제번호 S120911L150000)의 지원으로 수행되었습니다.

인용문헌

1. 이진석, 2세대 바이오연료 기술 개발 현황과 전망, 바이오에너지, BioIn 2009년 11호: 1-11(2009).
2. Eisentraut, A., Sustainable Production of Second-Generation Biofuels. IEA Information Paper (2010).
3. IATA, 2nd Generation Biomass Conversion Efficiency (2010).
4. Cushion, E., Dieterle, G., and Whiteman, A., Bioenergy Development: Issues and impact for poverty and natural resource management (2009).
5. 한국농촌경제연구원, 목질 바이오매스 열에너지 개발의 경제성 분석과 에너지용 산림 폐재의 지속적 확보방안 보고서(2005).
6. IEA, Key World Energy Statistics (2009).
7. 산림청, 산림과 임업 동향에 관한 연차보고서(2011).
8. 에너지관리공단 신·재생에너지센터, 바이오(목질계). 북스힐 (2008).
9. 산림청, 목재펠릿의 에너지 활용대책(2009).
10. 산림청, 제 5차 산림기초계획. pp. 50-54(2007).
11. 교육과학기술부, 행정안전부, 농림수산식품부, 지식경제부, 환경부, 국토해양부, 산림청 저탄소에너지 생산·보급을 위한 “폐자원 및 바이오매스 에너지 대책” 실행계획: 203-228(2009).
12. 석현덕, 민경택, 손철호, 장우환, 목질 바이오매스 열에너지 개발의 경제성 분석과 에너지용 산림폐재의 지속적 확보방안, 한국농촌경제연구원(2005).
13. 배정환, 목질계 바이오매스 에너지의 지역별 잠재적 파급효과 추정, 한국신재생에너지학회 추계학술대회 논문집: pp217-220(2006).
14. 안병일, 이균식, 김철환, 이지영, 숲가꾸기사업에서의 산림 바이오매스 발생량 추정(제 1보), 펄프종이기술 41(4): 15-24(2009).
15. 안병일, 이균식, 김철환, 이지영, 2009. 숲가꾸기사업에서의 산림 바이오매스 발생량 추정(제 2보), 펄프종이기술 41(4): 25-32(2009).
16. 강현구, 이정순, 오창용, 목질계 바이오매스의 에너지 이용사례(열병합 발전을 중심으로), 유기물자원화 16(3): 20-27(2008).
17. 국무조정실, 재정경제부, 기획예산처, 산업자원부, 환경부, 건교부, 산림청. 폐목재 재활용 활성화 대책 (2007).
18. 박상준, 목재 파쇄기 (Wood Chipper and Crusher), 산림 (6): 48 (2006).
19. 이돈구, 산림 폐바이오매스를 활용한 발효열교환장치 개발, 농림부 보고서(2005).
20. 장철수, 산림내 폐잔재의 현지 활용을 위한 한국형 조립식 탄화장치 기술개발 및 실용화 연구, 농림부 보고서(2004).
21. 이영민, 김철환, 김재욱, 김경윤, 신태기, 송대민, 박종열, 폐잔재의 펄프화를 통한 환경친화적 완충소재의 개발, 펄프종이기술 38(2): 61-71(2006).
22. European Climate Foundation, Biomass for Heat and Power - Opportunity and Economics (2010).
23. Ericsson, K., Nilsson, L.J., Assessment of the poten-

- tial biomass supply in Europe using a resource-focused approach, *Biomass & Bioenergy* 30: 1-15(2006).
24. 민경택, EU 목질 바이오매스 에너지 이용현황. 농촌경제 6: 1-12(2006).
 25. Pelkonen, P., Hakkila, P., Karajakubem, T., and Schlamadinger, B., Woody Biomass as an Energy Source - Challenges in Europe, EFI Proceedings No. 39 held in Joensuu, Finland (2001).
 26. Westcott, P.C., Ethanol Expansion in the United States - How will the Agricultural Sector Adjust?. A Report from the Economic Research Service, USDA (2007).
 27. US Energy Information Administration, Biomass. Secondary Energy Infobook: 12-15(2009).
 28. 고재홍, 목질계 바이오매스에너지, News & Information for Chemical Engineers 29(3): 351-354(2011).
 29. European Renewable Energy Council, Bioethanol Production and Use, EUBIA (2006).
 30. Kane, S., Forster, D., and Wilkinson, L., Biofuels Outlook - Ethanol Margins Improves; Biodiesel Capacity Still Idle, Equity Research Industry Report, April, 2010.
 31. Licht, F.O., The US as a Structural Ethanol Exporter, F.O. Licht's World Ethanol and Biofuels Report, 8(21): 430-431(2010).
 32. Global Biofuels Center, Global Biofuels Outlook 2011-2020(2011).
 33. Naik, S.N., Goud, V.V., Rout, P.K., and Dali, A.K., Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Review* 14: 578-597(2010).
 34. Sims, R., and Taylor, M., From 1st to 2nd - Generation Biofuel Technologies - An overview of current industry and RD&D activities, *IEA Bioenergy* (2008).
 35. de Mancilha, I.M., and Karim, M.N., Evaluation of ion exchange resins for removal of inhibitory compounds from corn stover hydrolyzate for xylitol fermentation, *Biotechnol. Progr.* 19: 1837-1841(2003).
 36. Chen, X., Li, Z.H., Zhang, X.X., Hu, F.X., Ryu, D.D.Y., and Bao, J., Screening of oleaginous yeast strains tolerant to lignocellulose degradation compounds, *Appl. Biochem. Biotechnol.* 159: 591-604 (2009).
 37. Almeida, J.R.M., Modig, T., Petersson, A., Hahn-Hägerdal, B., Lidén, G., and Gorwa-Grauslund, M.F., Increased tolerance and conversion of inhibitors in lignocellulosic hydrolysates by *Saccharomyces cerevisiae*, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 82:340-349 (2007).
 38. Petersson, A., Almeida, J.R.M., Modig, T., Karhumaa, K., Hahn-Hägerdal, B., Gorwa-Grauslund, M.F., and Lidén, G., A 5-hydroxymethyl furfural reducing enzyme encoded by the *Saccharomyces cerevisiae* ADH6 gene conveys HMF tolerance. *Yeast* 2006, 23:455-464.
 39. Palmqvist, E., and Hahn-Hägerdal, B., Fermentation of lignocellulosic hydrolysates. II: inhibitors and mechanisms of inhibition. *Bioresource Technology* 2000, 74:25-33.
 40. Carvalheiro, F., Duarte, L.C., Medeiros, R., and Girio, F.M., Optimization of brewery's spent grain dilute-acid hydrolysis for the production of pentose-rich culture media, *Appl. Biochem. Biotechnol.* 113: 1059-1072 (2004).
 41. Geddes, C.C., Nieves, I.U., and Ingram, L.O., Advances in ethanol production, *Current Opinion in Biotechnology* 2011, 22: 312-319(2011).
 42. Goswami, D.Y., *Alternative Energy in Agriculture*, CRC Press. pp 83-102(1986).
 43. Ciferno, J.P. and Marano, J.J., Benchmarking Biomass Gasification Technologies for Fuels, Chemicals and Hydrogen Production. U.S. Department of Energy. National Energy Technology Laboratory (2002).
 44. Risberg, M., *Black Liquor Gasification*. Lueå University of Technology. Sweden. MSc. Thesis (2011).
 45. Lindström, M., Jameel, H., and Naithani, V., Chapter 28. Integrating Black Liquor Gasification and Pulping: A Review of Current Technology, *A textbook of Materials, Chemicals, and Energy from Forest Biomass*, Argyropoulos, D.S. (ed), p434, American Chemical Society (2007).
 46. 김철환, 문지민, 김의경, 안병일, 펄프, 종이 및 종이 제품의 국민경제 기여도 분석, *펄프종이기술* 42(4): 45-55(2010).
 47. 산림청, 한국펄릿연료협회, 목재펄릿 길라잡이(2009).
 48. Bergman, P.C.A., Combined torrefaction and pelletization, ECN-C-05-073 (2005).
 49. Copeland, J.E. and Hardcastle, P.D., Biomass and Energy Crops III. Aspects of Applied Biology 90 held at Defra's Central Science Laboratory, Sand Uutton, UK. 10-12 Dec. 2008: 311-316.