

잡초 및 농림부산물을 이용한 Biorefinery 기술개발

황인택^{1*}, 황진수, 임희경, 박노중

Biorefinery Based on Weeds and Agricultural Residues

In Taek Hwang^{1*}, Jin Soo Hwang, Hee Kyung Lim and No-Joong Park

ABSTRACT The depletion of fossil fuels, ecological problems associated with CO₂ emissions climate change, growing world population, and future energy supplies are forcing the development of alternative resources for energy (heat and electricity), transport fuels and chemicals : the replacement of fossil resources with CO₂ neutral biomass. Several options exist to cover energy supplies of the future, including solar, wind, and water power; however, chemical carbon source can get from biomass only. When used in combination with environmental friend production and processing technology, the use of biomass can be seen as a sustainable alternative to conventional chemical feedstocks. The biorefinery concept is analogous to today's petroleum refinery, which produce multiple fuels and chemical products from petroleum. A biorefinery is a facility that integrates biomass conversion processes and equipment to produce fuels, power, and value-added chemicals from biomass. Biorefinery is the co-production of a spectrum of bio-based products (food, feed, materials, and chemicals) and energy (fuels, power, and heat) from biomass [definition IEA Bioenergy Task 42]. By producing multiple products, a biorefinery takes advantage of the various components in biomass and their intermediates therefore maximizing the value derived from the biomass feedstocks. A biorefinery could, for example, produce one or several low-volume, but high-value, chemical or nutraceutical products and a low-value, but high-volume liquid transportation fuel such as biodiesel or bioethanol. Future biorefinery may play a major role in producing chemicals and materials as a bridge between agriculture and chemistry that are traditionally produced from petroleum. Industrial biotechnology is expected to significantly complement or replace the current petroleum-based industry and to play an important role.

Key words: bioenergy; biofuel; biomass; biorefinery; industrial biotechnology.

¹ 한국화학연구원 Biorefinery 연구센터. 305-600 대전시 유성구 장동 100(Biorefinery Research Center, Korea Research Institute of Chemical Technology, Daejeon 305-600, Korea).

* 연락저자(Corresponding author) : Phone) +82-42-860-7447, Fax) +82-42-860-7034, E-mail) ithwang@kricr.re.kr

(Received December 2, 2010; Examined December 6, 2010; Accepted December 10, 2010)

서 언

20세기 중반부터 석유를 중심으로 한 화학산업은 크게 발달하게 되었는데 각종 정밀 화학제품(fine chemicals), 의약 화학제품(pharmaceutical chemicals), 범용 화학제품(bulk chemicals), 플라스틱 및 연료에 이르는 다양한 제품들이 석유로부터 생산되게 되었다. 그러나 화석원료로 대표되는 석유, 가스 및 석탄은 그 자원의 한정성으로 인하여 가격이 지속적으로 상승하게 될 것이며, 이의 원활한 확보를 위한 국가간 경쟁이 가열되고 있다. 더욱이 화석원료로부터 생산되는 화학제품들은 제조공정에서 부산물로 지구온난화 gas와 폐기물을 발생시켜 환경오염을 초래하고 있으며, 이는 기존의 화학산업을 급격히 위축시키는 요인이 되고 있다(이와 박 2006).

에너지의 대부분을 수입에 의존하는 우리나라에서는 국가안보와 지속적인 경제성장을 유지하기 위해 에너지 수입 의존도를 최대한 감소시킬 수 있는 장기적인 에너지 수급정책의 수립과 근본적인 청정 대체 에너지 개발이 필수적이다. 이러한 현실에서 바이오매스는 화석연료의 고갈과 환경오염에 대한 우려를 해소할 수 있는 대체 에너지의 한 분야로 주목받고 있다. 석유자원의 고갈과 고유가 행진에 따른 석유 수

급 불안, 화석연료 사용으로 인한 온실기체 배출억제 등 환경규제 강화 움직임이 세계 경제의 발전에 저해 요인으로 작용하고 있다. 특히 고유가와 환경규제에 가장 직접적인 영향을 받고 있는 화학산업은 화석연료 의존도를 줄이고 환경친화형 산업구조로의 변화가 중요한 대안으로 인식되고 있다. 따라서 화석원료에 기반을 둔 화학공정을 대체할 수 있는, 즉 화석원료의 소비와 인류에게 유해한 폐기물의 생산을 최소화할 수 있는 바이오매스를 원료로 사용하는 환경친화적인 새로운 생물화학공정의 개발이 필요하다.

환경친화적인 생물화학 공정개발을 위한 방법으로 최근에 주목할 만한 움직임 가운데 하나는 biomass를 이용한 바이오리파이너리 분야가 두각을 나타내고 있다는 것이다. 「바이오리파이너리(biorefinery)」란 화석원료를 사용하지 않고, 오로지 바이오매스로부터 생물학적 및 화학적 전환과정을 거쳐 바이오연료 및 화학제품을 제조하는 새로운 개념이다(그림 1). 기존의 석유화학산업에서 원유를 정제한다는 의미의 리파이너리(refinery)란 용어를 두고 탄생하기는 했지만 실제로는 바이오매스 원료로부터 생물학적 및 화학적 전환과정을 거쳐 바이오연료를 포함한 모든 바이오 화학제품을 생산하는 전주기적 핵심 기술을 의미한다(김기수 2003; Kamm과 Kamm 2004;

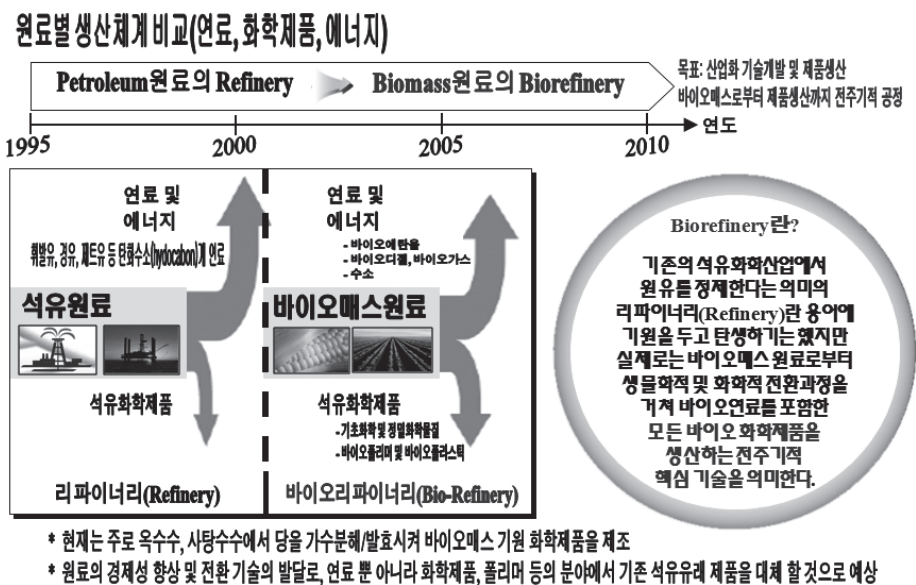


Fig. 1. Petroleum based refinery and biomass based biorefinery.

Werpy와 Peterson 2004; Klemm 등 2005; Fernando 등 2006; Corma 등 2007; Sanders 등 2007).

바이오리파이너리

원유를 원료로 하여 산업용/수송용 연료와 각종 화학제품을 생산하는 리파이너리가 종합적인 일관공정(integrated process)으로 개발된 것처럼 바이오리파이너리는 바이오매스를 원료로 바이오 연료 에탄올, 부탄올, 아세톤 등과 화학원료 젯산, 숙신산 등을 만드는 기술과 이를 구현하기 위한 종합적인 플랜트 시스템으로 구축되는 통합공정을 의미한다(Clark 등 2006; Fernando 등 2006; Sanders 등 2007). 그러나 이러한 개념상의 공통점에도 불구하고 여러 가지 차이점을 갖는데 가장 큰 차이점은 원료이다. 리파이너리는 비교적 균질한 원유를 원료로 사용하는데 비해 바이오리파이너리는 주로 목재나 폐기물 등 비균질한 원료를 사용한다. 따라서 바이오리파이너리에서는 원료의 전처리공정이 매우 복잡하고 비용이 많이 든다. 그러나 바이오매스는 재생가능 원료이고 대기 중 이산화탄소의 농도를 증가시키지 않으므로 환경친화적이다. 리파이너리를 통해 생산하는 연료나 화학제품도 바이오리파이너리를 통해 생산하는 연료나 화학제품과 많은 차이가 있다. 리파이너리는 휘발유, 경유, 제트유 등 탄화수소(hydrocarbon)계 연료를 생산하지만 바이오리파이너리는 에탄올, 부탄올 등 알코올계 연료를 생산한다. 또한 리파이너리는 에틸렌, 프로필렌, 부틸렌, BTX 등을 기본원료(feedstock)로 생산하지만 바이오리파이너리는 글루코오스, 자일로오스 등의 당류와 에탄올, 젯산, 숙신산, 아미노산 등 미생물 대사산물을 기본원료로 생산하게 된다.

따라서 바이오리파이너리는 특정 기술과 제품으로 한정하지 않고 바이오매스 원료를 변환시키고 분리 정제하는 모든 화학적, 생물학적 기술과 이로부터 바이오연료와 바이오기반 화학제품을 생산하는 매우 포괄적인 개념이다. 특히 바이오리파이너리에서는 발효공정과 발효산물의 촉매 전환공정이 결합된 “Syncretic Process(융합공정)”를 통해 기존의 석유화학제품의

신공정 또는 새로운 화학제품의 생산이 가능하게 하는 특징을 갖는다. 바이오매스 중에는 열분해·가스화와 같이 아직 연구 개발단계에 머물러 있는 분야도 있지만 바이오디젤, 바이오알콜과 같이 전 세계적으로 이미 상용화단계에 접어든 분야도 있다. 그러나 기술 수준에 관계없이 바이오매스에 대한 연구개발은 앞으로도 전 세계적으로 지속될 것이며, 향후 5~10년을 기점으로 바이오매스 기반의 화학산업은 급격히 성장할 것으로 전망되고 있다(Clark 등 2006; Fernando 등 2006; Sanders 등 2007).

바이오리파이너리를 통한 바이오매스 기반의 화학산업은 크게 3가지 기술로 나눌 수 있는데 친환경 바이오화학 산업의 핵심 기술 군으로 첫 번째는 “바이오화학원료 제조 기술”로 바이오매스를 화학제품화하기에 용이한 형태로 전환해 주는 기술로 크게 열화학적 바이오매스 전환기술과 생물학적 바이오매스 전환기술로 나누어 질 수 있다. 두 번째로는 “바이오화학제품 제조 기술”로 바이오 화학 원료로부터 플랫폼 화합물, 범용 바이오 화학제품, 바이오 플라스틱 및 기능성 화학제품을 효율적으로 생산하는 기술이 해당된다. 마지막으로 이들이 해결되기 위해서 필요한 “산업화 원천기반 기술”이 필요한데 이는 화학축매 기술, 효소공학 기술, 대사공학, 발효 및 분리정제 등 바이오매스로부터 제품을 효과적으로 생산하기 위하여 필요한 원천기반 기술이다. 아래 표 1은 바이오 화학산업의 핵심기술들과 그 특징을 나타낸 것이다(Fernando 등 2006).

바이오리파이너리 공정을 단계별로 구분하면 그림 2와 같이 생물자원의 확보, 전환공정/기술개발, 제품개발 순으로 진행된다. 즉 목질계, 전분계, 유지계 및 조류 등 다양한 바이오매스의 안정적인 확보를 위하여 품종개발, 생산량 증대 등을 위한 재배기술과 이들의 수집, 소형화, 이동 및 보관 등의 기술이 우선되어야 다음 단계의 전환공정/기술이 개발될 수 있으며 실용화가 가능하게 된다. 이들 바이오매스로부터 당을 얻기 위하여 먼저 바이오매스 전처리를 수행하여야 하는데 바이오매스의 종류에 따라 전처리 기술이 다르기 때문에 충분한 량의 바이오매스 생산과 이에 적합한 전처리 기술 개발이 이루어져야 할 것이다

Table 1. Biorefinery core technology and companies.

기술 분류	핵심 기술 군	핵심 이슈사항	기술 보유 대표 기업 (국가)
바이오 화학원료 제조기술	1. 열화학적 전환 2. 생물학적 전환	- 비식용작물 원료활용 - 에너지 저소비형 기·액상 열화학 전환 - 고효율 cellulase 저가화 - 6탄당 및 5탄당 동시 이용 - 고효율 발효 균주개발 - 리그닌의 효과적 활용	Novozyme(덴) Genencor, Cargill, ADM, Iogen(캐) JGC(일)
바이오 화학제품 제조기술	3. 플랫폼화합물 4. 범용 화학제품 5. 바이오플라스틱 6. 기능성 화학제품	- 기존 에너지 인프라 적용 가능성 - 이산화탄소 저감효과 - 바이오화학제품의 시장 파급성 - 석유기반 플라스틱 물성강화 (고순도·고활성 기능성 화학제품) - 국제환경협약 대응	ADM, Metabolix, NatureWorks, Dow, DuPont(미) Iogen(캐) DSM(네) BASF, Henkel(독) Lonza(스위스)
산업화 원천기반 기술	7. 화학촉매 기술(촉매 및 공정기술) 9. 효소공학 기술(효소발굴, 분자진화) 10. 대사공학 기술(시스템/합성 생물학) 11. 발효 및 분리정제	- 나노바이오 융합을 통한 신촉매 개발 - 반응 및 분리공정의 일체화 - 맞춤형 효소 개발 - 대사회로 변경 및 내성 균주 개발 - 목적 발효산물의 경제적 생산	Dow, Codexis, Genometica, LS9, Amyris, Gevo, Diversa(미)

(Mosier 등 2005; Li 등 2010). 전처리 과정을 통해서 표준화, 균질화된 바이오매스를 당화(糖化)시키기 위해서는 생화학적인 방법과 열화학적인 방법이 있다. 생화학적인 전환을 위해서는 효소당화와 미생물 발효 기술이 개발되어야 하는데 효율적인 전환공정 개발을 위해서는 유전자 발굴 및 대사공학 등의 기술이 요구된다. 열화학적 전환공정 개발을 위해서는 새로

운 촉매 개발, 반응제어 기술, 시설 및 장치가 필요하게 된다. 이러한 전환공정을 통해서 포도당, 과당, 리그닌, 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스 등이 최종물질이면서 새로운 제품을 개발하기 위한 화학원료가 생산된다. 생산된 각종 플랫폼 화학물질들은 바이오 연료, 바이오 화학제품 및 바이오 에너지로 제품개발을 하게 된다(정 등 2008; Zakzeski 등 2010).

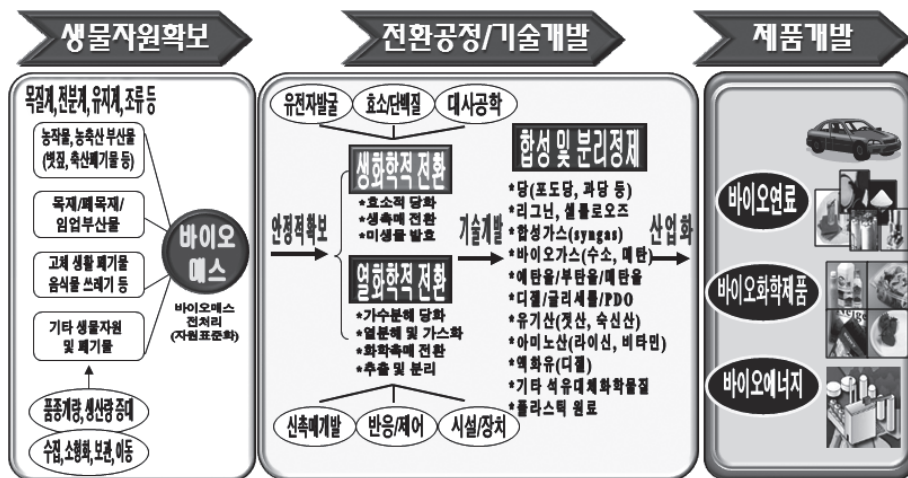


Fig. 2. Biorefinery process (Chemicals, Fuels, Energy).

바이오매스의 특성 및 확보방안

바이오매스란 생태학에서 말하는 생물부존량(생태 활동에 의해 생성되는 것 또는 식물, 미생물체를 물량 단위로 환산한 유기물)의 의미로 정의되었던 학술용어이기도 하지만, 바이오 화학산업에서 통용되고 있는 바이오매스에 대한 종합적 정의는 태양에너지를 받은 식물과 미생물의 광합성에 의해 생성되는 식물체, 균체와 이를 먹고 살아가는 동물체를 포함하는 생물 유기체를 총칭한다.

바이오매스 자원은 곡물, 감저류를 포함한 “전분질계”, 사탕수수, 사탕무와 같은 “당질계”, 초본, 임목과 벗짚, 잡초, 농림부산물 등을 포함하는 “목질계”는 물론, 바이오 디젤 생산원료로 이용되는 식물성 기름 및 폐식용유 등 “바이오 디젤용 기름“, 가축의 분뇨, 사체와 미생물 균체를 포함하는 “단백질계”의 자원까지를 포함하는 다양한 성상을 지녔다. 또한, 각종 산업 활동으로부터 발생하는 유기성 폐기물과 도시 공간에서 발생하는 오폐수, 음식 찌꺼기 등의 유기성 폐기물도 바이오매스에 포함되며, 미국 에너지성은 바이오매스를 “동·식물로부터 얻을 수 있는 에너지 자원”으로 규정하고 있다(DOE USA). 농업 생산 등을 포함한 각종 생물자원 부존량은 지구상에 건량으로 약 $1.8 \sim 2.0 \times 10^{12}$ 톤으로 추산되며 이는 태양으로부터 지구로 유입되는 전체 에너지의 약 0.3%에 해당하는 것으로 이를 석유로 환산하면 $6.5 \sim 7.2 \times 10^{11}$ toe (tons of oil equivalent)에 이른다.

그러나 이 모든 자원을 한꺼번에 이용할 수는 없으며 매년 재생산되는 바이오매스의 양은 현 부존량의 약 10%인 2,000억톤/년으로 추정하고 있다. 이들 자원 중에서 현재 전 세계에서 주로 연료로 이용되고 있는 바이오매스 자원은 5.5×10^7 TJ로서 해마다 재생산되는 자원의 1.83% 정도를 에너지원 또는 연료로 사용하고 있으며 나머지 자연에 방치되어 소멸되고 있다. 이 에너지량은 전 세계 에너지 소비의 14%를 담당하고 있었으므로 지구상에서 매년 생산되는 바이오매스의 13% 정도만을 모두 활용한다면 전 세계 에너지 소비전량을 공급할 수 있다는 계산이 가능하다(Clark 등 2006; Sanders 등 2007).

바이오매스 기반의 화학산업은 전체 이산화탄소의

발생량이 증가되지 않기 때문에 환경적 부하가 없는 환경친화적인 산업이며 각 국가별로 자국의 자원 현황에 따라 특화되어 발전되어지고 있다. 즉 브라질에서는 풍부한 사탕수수로부터 바이오 에탄올을 생산하여 자동차원료의 30% 가량을 대체하고 있으며, 유럽은 자동차 배기가스의 문제를 해결할 수 있는 바이오 디젤 개발에 주력하고 있다. 바이오매스 자원을 고루 보유하고 있는 미국의 경우 각 기술이 고르게 발전하고 있다(산업자원부, 2007). 이론적으로 기존 석유화학 유래 제품생산이 바이오매스로부터 가능하므로, 기술적 문제만 해결된다면 바이오매스 기반의 화학산업은 일상생활과 산업 전반에 엄청난 파급효과를 일으킬 수 있는 산업이다. 바이오매스를 구성하는 탄수화물은 석유를 구성하는 탄화수소와 동일한 요소이기에 화학, 생물공학기술을 발전/응용하면 이론상으로 일상생활에서 사용되는 모든 화학제품의 제조가 가능하다. 그러나 효율적인 인프라/생산시설에서 비교적 저렴하게 공급되는 석유화학 제품에 비해 태동기의 바이오매스 산업제품은 경제적 가치가 상대적으로 낮을 수 있다.

바이오매스의 특성

바이오매스의 종류는 크게 목질계, 전분질계, 당질계 및 바이오 디젤용 식물유 등의 유지계가 있다. 먼저 목질(lignocellulose)계 바이오매스는 셀룰로오스가 포함된 나무, 초본식물을 의미하며 이들에서 파생된 제품이나 그것의 폐기물 즉 목재, 폐목재 및 종이 등을 포함한다. 지구상의 전체 바이오매스 중 99% 이상은 육상 식물체로 구성되어 있고 이들 바이오매스는 셀룰로스(cellulose), 헤미셀룰로스(hemicellulose) 및 리그닌(lignin)의 3성분으로 구성되어 있다. 전분질계 및 당질계와 달리 목질계 바이오매스는 초본과 수목의 형태와 강도를 유지하기 위한 구성 물질로서 각각 독특하고 안정된 구조를 가진 탄소, 수소 및 산소로 구성된 탄수화물(carbohydrate)의 복합 고분자 화합물이다. 셀룰로스(cellulose)는 포도당(glucose)의 고분자 화합물로서 중합도는 약 $7 \sim 12 \times 10^3$ 개의 단량체로 구성되며, 분자량은 $1.2 \sim 2.2 \times 10^6$ 정도이다. α -1,4 글루코오스 결합을 갖는 나선형 구조의 전분과

달리 목질계 바이오매스는 β -1,4의 직선화된 글루코오스 결합을 지니고 있기 때문에 보다 견고하고 결정화된 구조를 지니고 있다. 헤미셀룰로스는 자일로스(xylose), 만노스(mannose), 갈락토오스(galactose), 람노스(rhamnose), 아라비노스(arabinose) 등 여러 종류의 당류 물질을 포함하는 생체 고분자 물질로, 전반적으로 셀룰로스보다 분해가 쉬운 결합 형태를 지니고 있으며, 자일로스의 고분자물질인 자일란(xylan)이 가장 많은 양을 차지하고 있다. 자일란은 셀룰로스와 유사한 구조를 지니고 있으나, 복합체를 구성하는 단량체가 탄수소가 6개인 포도당이 아니라 5개인 자일로스이며 활엽수, 짚, 대나무, 옥수수 등에 특히 다량으로 있다(Zhang 등 2005; Hwang 등 2010).

전분질계 바이오매스는 물에 녹지 않는 탄수화물의 복합체이며 식물이 생육하면서 체내에 저장한 잉여의 포도당이 저장된 것으로 영양학적으로 매우 중요한 영양원이며 거의 모든 식품에서 50% 이상의 성분을 차지하고 있다. 그 원료는 곡물, 뿌리, 근경 등 식물체로부터 유래하지만 세계적으로 주요한 식량작물인 벼, 밀, 보리, 옥수수 등 식품으로 이용되고 있다. 전분은 아밀로스와 아밀로펙틴, 두 종류의 포도당 중합체들이 혼합된 고분자 물질이며, 아밀로스는 포도당이 일직선상의 연속적으로 α -1,4 결합한 나선 구조로 보통 300~3,000개의 포도당이 중합되어 있으며 소화효소인 아밀라아제(amylase)에 의하여 분해된다. 아밀로펙틴은 포도당 분자들이 α -1,4 결합을 이룬 직선 사슬에 α -1,6 결합이 매 24~30개의 포도당 단위마다 추가되어 가지를 친 형태로 결합되어 있으며 아밀로펙티나제가 분해를 담당하는 효소이다.

당질계 바이오매스로 이용되는 식물 자원은 지극히 제한적으로 사탕수수(sugarcane)와 사탕무(sugar beet)로부터 설탕을 채취하여 바이오 에탄올 생산에 이용되고 있는데 식물체를 직접 착즙하여 당성분을 채취하기 때문에 일명 식물쥬스(plant juice)로도 불리고 있다. 사탕수수는 6속의 37종이 전 세계적으로 재배되고 있으며 키가 2~6m까지 자라는 매우 큰 일년생 초본식물로서 마디가 있는 줄기로부터 10~15%의 설탕 농도로 착즙된다. 사탕무는 주로 온대지

역에서 자라는 2년생의 초본식물이며 EU 국가들, 미국, 러시아가 주요 재배 국가들이며 약 100일 정도의 재배기간을 가진다. 사탕무는 1년차 생육기간 중에 채취되며 뿌리의 무게는 약 1~2kg으로 자라고 이중 15~20%가 설탕이고 전 세계 설탕 생산량의 약 30%가 사탕무 설탕이다.

바이오 디젤용 기름인 식물성 기름과 동물성 유지 성분 중의 triglyceride라는 지방산 에스테르 화합물을 메탄올과 반응시켜 경유의 물성과 유사하도록 합성한 화합물을 바이오 디젤이라 한다. 자원으로서는 대두, 종려나무 및 유채 등이 이용되고 있는데 최근에는 미세조류(microalgae)로 부터의 바이오 디젤 생산이 검토되고 있다. 매우 높은 함량의 단백질(40%)과 식물성 기름(20%)을 지니고 있는 대두(미국 soybean, 영국 soya bean)와 기름 함량이 37~50%인 유채(rapeseed, oilseed rape)가 대표적인 바이오 디젤 에너지 작물로서 재배 면적이 증가하고 있다. 천연의 유채 종자유에는 에루식산(erucic acid)이라는 인체에 유독한 성분이 함유되어 있어 캐나다에서는 에루식산의 농도가 낮은 유채 품종을 육종하여 카놀라(canola, "Can. O. L-A": Canadian Oilseed, Low-Acid)로 명명하고 마니토바주에서는 채취된 기름을 카놀라유(canola oil)로 상표등록을 하였다. 종려나무(oil palm tree)는 열매로부터 팜유(palm oil)를 채취하기 위하여 재배되며 아프리카종 및 아메리카종 단 2종의 식물만이 존재한다. 나무의 크기는 약 20m까지 생육하고 성숙한 열매의 무게는 40~50kg에 달하기도 하며 25% 내외의 기름 함량을 지녔다. 팜유의 주요 구성 성분은 지방산과 에스테르글리세롤이며 이들의 포화도는 매우 높아 각각 50%, 80%에 달하기 때문에 상온에서 액상을 나타내지 못한다. 조류(algae)는 물속의 N 및 P, 공기 중의 이산화탄소를 영양원으로 광합성을 하여 탄수화물과 단백질 및 지질을 체내에 주요 성분으로 저장한다. 미세조류(microalgae)는 다른 바이오매스에 비해 다량의 지질이 포함되어 있는데 심지어 자기 무게의 60%가 지질인 종도 존재한다. 미세조류로부터의 바이오 디젤용 기름생산 연구는 시작단계로서 제 3세대의 바이오매스로 주목받고 있다.

국외 바이오매스 이용현황

현재, 미국의 바이오매스 이용 화학제품 생산의 중심은 바이오 에탄올이며 자동차 연료용 바이오 에탄올 생산에 옥수수의 전분이 대량으로 이용되고 있다. 2002년에는 약 2,300만톤의 옥수수에서 968만kl(연료용은 800만kl)의 바이오 에탄올을 생산하였는데 이는 미국의 옥수수 생산량 전체의 약 10%를 차지한다(The Council for Chemical Research 1996). 미국은 바이오매스 산업 육성 정책에 탈석유자원, 지구 환경보호 목적 이외에도 자국 농민 소득보전 개념도 추가하고 있기에 1997년 대비 바이오 에탄올생산에 따른 옥수수의 가격이 2005년 18.6% 상승하여 농가의 수입이 50억 달러 증가하였다. 또한 관련된 산업에서 52,000명의 고용이 창출되는 등 바이오 에탄올 산업은 미국의 옥수수 재배농가와 바이오 에탄올 생산자에 있어서 상당히 중요한 산업이다(일본공업신문사 2006).

최근 새로운 전분계 바이오매스 자원으로 주목받고 있는 고구마(sweet potato)는 북미 지역에서 Yam(yam)으로도 불리며 생육온도에 따라 수확기까지 짧게는 2개월에서 9개월까지 재배기간이 소요되는 다년생 식물이다. 카사바(cassava)는 일명 유카(yuca)로도 불리는 남미 원산의 일년생 식물로서 뿌리에 전분질을 다량 함유하고 있어 식품의 탄수화물원으로 원산지를 비롯하여 동남아시아, 아프리카 등 열대/아열대 지역에서 대규모로 재배되고 있는 식물이다. 카사바는 사탕수수 다음으로 일일에너지 축적량이 많은 식물로서 대량재배/수확의 용이성을 위하여 육종되어 전분질은 매우 풍부하나 기타 성분들이 부족한 불균형 식품소재이다.

유럽은 전체적으로 바이오매스 이용이 상당히 진전되고 있는데 목질계 바이오매스가 그 중심을 이루고 있다. 프랑스가 가장 높은 이용량을 보이고 있고 그 뒤를 스웨덴과 핀란드가 이어가고 있다. 독일의 경우 전년도 대비 20.7%가 증가하였고 오스트리아의 경우 8.6% 증가하였다. 핀란드의 재생에너지 사용량은 기후 조건이나 목재산업의 경기 변동에 영향을 받기는 하지만 지난 30년간 꾸준히 높은 수준으로 유지되어 왔다. 오스트리아는 목질계 바이오매스 도입을

강조하여 40~50%의 투자보조금을 지원하고 있으며 500kW~30MW 용량의 마을단위 집중형 난방시설이 1980년 도입된 이후 2005년말 현재 1,002개 이상의 플랜트가 건설되어 그 용량이 1,132MW에 이르고 있다. 특히 우드 펠릿을 이용한 열 공급이 급격히 증가하여 전년대비 8.6%의 성장률을 보이고 있다.

영국은 독일과 같이 휴경지에서 에너지 작물재배 보조를 하고 있으며 농가는 휴경지에 에너지작물을 경작함으로써 “에너지작물 재배보조”로 최고 100파운드(약18만엔/ha)를 환경식량지방행정성(DEFRA)으로부터 받을 수 있고 재배된 에너지작물은 SRC라고 불리는 버드나무, 포플러, 참억새를 대상으로 하고 있다. “에너지작물보조”외에 에너지작물을 연료로 한 발전설비는 “바이오 에너지 투자지원보조”를 무역생산성(DTI)에서 받을 수 있다.

일본은 2002년 바이오매스를 자원으로 이용하기 위한 최초의 국가 전략인 “Biomass Nippon”을 수립하여 순환형 사회건설, 지구 온난화 방지, 신산업창출, 농업·임업·어업 및 지방정부 활동의 활성화를 목표로 하였다(Toyota Motor Co. 2002).

바이오 디젤 생산은 독일을 비롯한 유럽 국가들이 전 세계 시장을 주도하고 있는데 원료로는 유채유 비중이 가장 높다(83%). 바이오 디젤용 원료물질 채택은 각 국가의 상황에 적합하도록 이루어져야 하며, 특히 부존자원의 안정적이고 지속적 확보 여부는 산업의 성공 여부를 결정하는 중요한 요인이 된다. 대부분의 국가들은 정책적으로 자국내에서 대규모 생산이 가능한 바이오매스로부터 바이오 디젤용 원료로 채택하여 정책적으로 지원하고 있는데 일본 및 한국과 같이 경지면적이 좁아 자원 확보가 어려운 국가들은 조속히 자원 확보 방안을 계획하여야 할 것이다.

국내의 바이오매스 현황

우리나라의 임야는 2005년말 기준 6,394천ha로 전체 국토 면적(9,965천ha)의 약 64%를 차지하고 있으며 이중 63%가 임목지이다. 전 세계 산림면적이 전체 국토면적의 29.6%(핀란드 72.0%, 일본 64.0%)임을 고려할 때, 우리나라는 산림면적이 국토에서 차지하는 비중이 매우 높고 지역별로는 강원도가 1,371천

국내 자급 가능 바이오매스 량

* **기존 석유화학제품** (석유석 전연가스를 원료로 하여 얻어지는 연료 이외의 용도에 사용하는 화학제품)
 대체율 100%에 필요한 목질계 바이오매스는 1,300만톤/년
 계산 기준: 에틸렌(프로필렌 기준 1,000만톤/년 소비, 목질계 바이오매스 함유량: 60%, 당 전환율: 50%, 에틸렌(프로필렌 전환율): 20%)

* **휘발유(06년 사용량 950만톤)**(E10일 경우 95만톤 필요)
 전분계 바이오매스 1,600만톤/년 또는 목질계 바이오매스 4,200만톤/년 소요
 계산 기준: 휘발유(바이오디젤 함유량 5%, 에탄올 전환율 10%), 목질계 바이오디젤(당 함유량 30%, 에탄올 전환율 10%), 에틸렌(바이오에탄올 함유량 5%)

* **경유(06년 사용량 2,300만톤)**(BD5일 경우 바이오디젤 115만톤 필요)
 유채(1.6톤/ha)의 경우 179만 ha(경지면적 220만 ha의 90%)의 경작 필요
 계산 기준: 휘발유(바이오디젤 함유량 5%, 전환율 10%)

국내 생산성 증대 방안

생활 폐목재와 임목 및 농업부산물 등의 목질계 바이오매스 활용, 품종개발과 재배기술 향상 등을 통한 원료작물의 생산성 향상
 # 산림청에서는 2004년부터 5년간 백만헥타의 산림에 대한 숲 가꾸기 추진 중
 # 폐기물 중 폐목재 등이 목질계 바이오매스 자원으로 확보 가능
 # '07년 바이오디젤 연료용 유채재배 시범사업 시행 중(농림부)
 # 미세조류 재배를 통한 지속적 바이오매스 확보(잠재력보유)

해외자원 활용 방안

원재료 수입: 국내 소비자 경제성이 열악한 해외 유관산업을 보호유형에 주는 결과 초래
 # 자국내에서 생산되지 않은 바이오매스 이용시 이산화탄소 저감효과 상실

Fig. 3. Biomass requirement for self-sufficient in Korea.

ha로 가장 많고, 경북이 1,346천ha로 두 번째로 넓다. 임목축적량은 2005년 현재 506,377천m³이며 이중 침엽수림이 216,600천m³로 전체 축적량의 43%를 차지한다. 활엽수림은 136,451천m³로 27%, 혼합림이 153,265천m³로 30%를 차지하고 있다.

세계 각국의 바이오매스 생산량 및 이를 재배할 수 있는 전체 가용면적이 중국 1,369, 미국 1,018, 호주 1,105million acres에 비해서 한국은 5million acres로 중국의 1/273에 불과하다. 1인당 가용면적은 콩고 125, 호주 56, 아르헨티나 12million acres에 비해서 한국은 0.3million acres이다. 1인당 가용면적에서는 인구수가 상대적으로 적은 콩고가 가장 넓고 이어서 호주, 아르헨티나 순으로 나타났다.

먼저 국내 바이오매스 현황을 분석하면 약 1억5천만톤 바이오매스(세계 보유량의 0.07% 정도)를 보유하고 있고 10% 내외(1,500만톤)가 재생산 될 수 있다고 보고되었다. 이를 통해서 국내 자급 가능한 분야를 알아보기 위해서 화학물질, 휘발유, 경유 등 3개 분야별로 추산해보면 다음과 같다. 기존 석유화학 제품을 만드는데 국내에서 소비되는 에틸렌/프로필렌이 매년 1,000만톤이다. 목질계 바이오매스에 함유된 당(glucose, xylose)은 60%, 이들의 전환율 50%, 에틸렌/프로필렌 전환율 250%라고 한다면 목질계 바이오매스 1,300만톤/년이 필요하다는 결론이 나온다. 국내에서는 매년 1,500만톤의 바이오매스가 재생산 되기 때문에 노력하면 자급이 가능하다는 것이다.

2006년에 사용했던 휘발유는 950만톤인데 앞으로

E10(바이오 에탄올 10% 함유)을 목표로 할 경우 95만톤의 에탄올이 필요하다. 전분계 바이오매스로부터 에탄올 95만 톤을 만들고자 할 경우 1,600만톤이 매년 필요하고, 목질계 바이오매스를 원료로 할 경우 4,200만톤이 매년 필요한데 불가능하다는 것을 알 수 있다. 2006년도 경유 사용량은 2,300만톤 이었고, BD5(바이오디젤 5% 함유)일 경우 115만톤이 필요하다. 이를 유채로부터 만들고자 할 경우 헥타아르당 1.6톤 수확할 경우 179만ha가 필요하고 이는 우리나라 경지면적 220만ha의 90%를 경작해야하는 것이다. 이와 같이 부족한 바이오매스를 어떻게 확보할 것인가? 국내 생산성 증대 방법과 해외농장을 이용하는 방법이 있다.

우리나라에서 추진하고 있는 바이오 에너지 원료 작물 생산 연구현황을 보면 2006년부터 품종개발을 하고, 2011년 이후부터 품종보급이 계획되어 있다. 대상작물은 유채, 보리, 옥수수, 돼지감자 등이다. 이외에도 트리티케일, 해바라기, 스위치그래스 도입, 진주조, 단수수, 유채 논재배 등 많은 노력을 하고 있다. 여기에 잡초를 대상으로 선정해보면 좋을 것 같다. 어떠한 바이오매스가 선정된다하여도 농민들이 재배할 경우 수급체계를 갖추어야만 할 것이고, 수익성을 보장하지 않는다면 농민들은 생산하지 않을 것이다. 그러나 부산물 대신 재배를 통한 수급체계는 바이오매스 원료값이 증가되어 최종 제품생산 단가를 증액시키는 직접적인 원인으로 작용하기 때문에 생산체제를 원천적으로 차단하는 원인이 될 수

도 있다.

국내 자원의 양이 부족하기 때문에 바이오매스의 확보를 위하여 국외에 생산 및 가공기지를 건설하려는 시도는 당연한 것이며 이미 기업을 중심으로 활발하게 진행되고 있다. 실질적으로 해외 바이오매스 확보용 농장을 확보한 기업은 2007년도 조사결과, 창해에탄올 5만ha(파푸아뉴기니), CJ컴보디아 8천ha(컴보디아), 엘비엘네트웍스 10만ha(인도네시아), 오디코프 21만2천ha(인도네시아), 바이오매스코리아 16만1천ha(러시아) 등이며, 산림자원으로 마이애셋 6만ha(인도네시아), 한국증권 20만ha(인도네시아), 코린도그룹과 기타 시설 및 인프라 확보기업은 코오롱, 신창건설 등이었다. 용도별로 종합하면 바이오에탄올 생산을 위해서 36만5천ha, 바이오디젤 생산을 위해서 16만천ha, 산림자원으로 26만ha 총괄적으로 78만6천 ha(우리 국토의 36%)를 확보하였다. 해외농장을 이용하면 결국 해외유관산업을 보호해주는 결과를 초래하고, 이산화탄소 저감효과를 확보하지 못하게 되는 단점이 있다.

자원이 많다는 미국의 경우에도 바이오에탄올 10억톤을 생산하기 위한 바이오매스 시나리오는 옥수수 등의 식용 에너지작물 8%, 목초류 33%, 농작물 부산물 39%, 산림목재류 14%, 폐목재류 6% 포함 11억5,700만 톤의 바이오매스가 필요한 것이다. 이와 같이 어느 한 종류의 바이오매스로 원하는 물질을 생산할 수 없기 때문에 다양한 에너지 작물들이 개발 재배되고 있다. 이러한 대상으로 환경적응성이 큰 잡초의 이용이 기대된다. 그동안 보도된 자료들이 많지만 몇 가지를 정리하면 다음과 같다. ‘옥수수보다 5.4배 에탄올 생산하는 잡초, 옥수수 에탄올이 아니라 잡초에탄올 시대 개막’, ‘잡초 부들에서 옥수수나 사탕수수보다 많은 연료 뽑아, 미국 부들군락 독점’, ‘잡초를 원료로 한 항공유로 80% 대기오염 감소’, ‘잡초로 바이오연료 만든다’, ‘머지않아 들판 잡초가 미래에너지 될 것’, ‘기후변화 막는 기특한 식물 미스캔더스’, ‘밭에서 캐는 유채꽃 석유 바이오 디젤’, ‘2세대 바이오연료는 식용식물이 아닌 잡초로’, ‘아무도 찾지 않던 잡초 야트로파’ 등이 있다.

바이오매스의 전처리

목질계 바이오매스의 주성분이 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스로 구성된 탄수화물과 방향족 화합물인 리그닌으로 구성되어 있으므로 목질계 바이오매스 자원으로부터 유용한 화학물질을 생산하기 위해서는 전처리 과정이 필요하다(Pérez 등 2002; Mosier 등 2005; Zakzeski 등 2010). 바이오매스기반의 화학제품 생산을 위한 여러 단계 공정 중 기질의 전처리 공정은 도입되는 다양한 기질의 공정 적응도의 중요한 인자이며 어떤 형상의 당화액을 얻을 수 있느냐가 전체 공정의 효율을 좌우할 수 있다. 이러한 전처리 공정으로 화학적, 물리적, 미생물학적인 방법이 검토되고 있지만, 대량처리, 무공해, 소비에너지 절감, 후처리 공정 등이 요구되고 있다. 특히 다양한 목질계 바이오매스 자원의 종류에 따라 구성 성분이 다르기 때문에 전처리 과정이 다를 수 있다.

목질계 바이오매스 자원은 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 리그닌의 3성분이 복잡한 구조를 이루고 있고 셀룰로오스는 글루코오스의 중합체로 결정영역과 비결정영역을 가지는 특징적인 구조를 이루고 있다. 헤미셀룰로오스는 만노스, 아라비아노스 등의 6탄당 및 xylose 등의 5탄당을 주요 구성성분으로 하는 다당류이다. 리그닌은 페놀프로판을 기본 단위체로 하는 방향족 고분자로서 헤미셀룰로오스와 공존하기 때문에 셀룰로오스와 cyclocoupling 형태로 존재하여 셀룰로오스계 바이오매스의 화학적 이용, 당화에 장애를 일으키는 일이 많다(지식경제부 2009; Jeffries 1994; Hammel 1997; Zakzeski 등 2010).

셀룰로오스 및 헤미셀룰로오스로 부터 효율적으로 당을 회수하기 위해서는 효과적인 전처리 방법이 필요한데 이를 위하여 화학약품 및 효소가 표면적을 증가시키고, 다공성을 부여하고, 리그닌을 저분자화 하고, 셀룰로오스의 결정화도를 낮게 하여야 한다. 지금까지 보고된 전처리 방법으로는 물리적 처리법, 화학적 처리법 및 미생물적 처리법으로 대별된다(Li 등 2010; Mosier 등 2005).

물리적 전처리법

대표적인 방법은 원료를 초기에 chip화하여 햄머

밀, 볼밀, 진동밀, 롤밀 등을 사용하여 미분쇄 처리하여 표면적의 증대와 셀룰로오스의 결정화도를 저화 촉진시키는 방법이다. 칩업수에 유용한 처리방법이며 효소 당화율과 당화 속도를 상승시키는데 특히 미립자화와 함께 충격력을 가미한 진동볼밀이 효과적이다. 리그닌을 함유하지 않은 셀룰로오스계의 경우에는 효소 당화율, 초기 당화 속도와 미분쇄 시간이 길어지는 문제가 있다. 이 방법은 환경친화적이나 많은 에너지가 소요 된다. 목질 재료의 화학적 변질이 거의 없으며 효소 가수분해를 증가시키고 성분 분리 효율을 급등시킨다.

증기 폭쇄법은 바이오매스 원료 칩에 고온·고압의 증기를 초단시간에 주입시키고 급격히 감압하여 상압에서 분쇄하는 방법이다. 그러나 180~250℃(1.6~4MPa)의 고온·고압 증기에 의해 원료 중에 있는 헤미셀룰로오스와 리그닌은 화학반응을 수반하게 된다. 헤미셀룰로오스의 대부분이 xylan으로 구성되어 있는데 xylan의 아세틸기가 유리되어 pH 3 정도의 산성을 나타낸다. 이 조건하에서 헤미셀룰로오스는 가수분해반응을 수반하여 xylose 등의 단당, 올리고당으로 분해되어 수용액화되는데 일부는 계속 탈수반응이 일어나 furfural로 되기도 한다(Mamman 등 2008). 리그닌도 알킬아릴에테르 결합이 파괴되어 저분자화 되고 물, 알칼리, 산, 유기용매 등에 가용화되거나 세포조직이 급격히 감압 하에서 물리적으로 파괴되어 해리되며, 해리된 용액 혼합물은 사이클론에서 분리하게 된다. 이 방법에 의해 셀룰로오스의 80% 이상이 효소당화가 가능하게 되는데, 증기폭쇄 시간은 200~250℃의 경우에는 5분 내지 10분 이내이며, 처리조건은 셀룰로오스 자원의 종류, 회수물의 사용 목적, 회수율 등을 고려하여 정할 필요가 있다. 그러나 증기 폭쇄법은 성분의 변형이 초래되고 추가 분리 설비가 요구된다.

조사법은 원료 목재칩 또는 목재 분말을 물 공존하에서 마이크로파로 가열하면 증기 폭쇄법과 동일한 현상으로 처리되어 액의 pH가 저하되고 원료 중의 헤미셀룰로오스의 가수분해, 리그닌의 저분자량화되어 당화효소와의 반응이 가능하게 된다. 가열온도 190~220℃에서 급격히 반응을 수반하며, 함유 당성

분의 90% 이상이 가수분해반응을 일으켜 단당류를 생성한다. 이외에도 전자선 조사, 감마선 등의 방법에 의해 셀룰로오스의 표면적을 증가시켜 당화효과를 상승시키는 방법이 있으나, 원료 종류에 따라 효과가 다르고 에너지 소비가 큰 이유로 소규모의 시험에 적합하다.

화학적 전처리법

산, 알칼리, 유기용매 등으로 처리하여 리그닌의 분리 및 팽윤, 셀룰로오스의 결정화도를 저하시켜 전처리하는 방법으로 이의 기술은 종이·펄프 원료의 제조기술로서 오래 전부터 연구개발되어 왔다. 묽은 황산 처리법은 묽은 황산으로 가수분해반응을 행하여 셀룰로오스와 리그닌의 일부를 가용화하여 셀룰로오스의 결정화도를 낮추어 당화를 용이하게 하는 방법으로 비교적 저온, 단시간에 처리하여 furfural의 생성을 억제하는 조건으로 처리하는데, 묽은 황산 처리법의 장점은 xylose의 회수율이 높은 점이며 일반적으로 90% 이상의 회수율로 얻어진다.

알칼리 처리법은 탈리그닌 처리법이며 헤미셀룰로오스의 가용화도 가능한 여러 가지 전처리 기술이 연구되고 있다. NaOH 단독, NaOH와 H₂O₂의 병용, 소석회, 암모니아수 등의 화학물질이 사용되며 알칼리 처리법과 폭쇄법을 병행하여 처리하는 것이 효과적이다. 산 처리법과 비교하면, 바이오매스 원료에 따라 전처리효과가 차이가 있으며 약품비가 황산에 비해 고가이다.

유기용매에 의한 리그닌의 분리는 일반적으로 organosolv법이라 불리어지며 메탄올, 에탄올, 프로판올, 아세톤 등의 저비점 용매와 에틸렌글리콜, 글리세린, 에탄올아민 등의 고비점 용매를 사용한 연구가 행하여지고 있다. 유기용매에는 일반적으로 리그닌, 헤미셀룰로오스에 대한 용해도가 높고, 해중합, 용출 등을 촉진하기 위해서는 50%정도의 물이 가하여진다. 유기용매법은 고압에서 행하여지며 고가의 용매를 회수하는 프로세스가 복잡한 설비가 요구되는 단점이 있다. Alcell 프로세스는 50% 에탄올 수용액에서 204℃, 3.4MPa에서 처리하며 산, 알칼리를 병행하여 첨가하면 탈리그닌 반응을 촉진하여 소량

침가하여도 150~170°C의 저온 저압에서도 처리가 가능하다.

암모니아법은 액체 암모니아를 사용하여 1.5MPa 정도의 압력에서 50~80°C의 비교적 저온에서 처리하면 폭쇄법과 동일한 양상으로 처리가 되는 AFEX (Ammonia fiber/Freeze Explosion)법이 있다. 이러한 방법은 목질계 바이오매스처리에는 힘들고 농업 폐기물, 초목류에는 적용이 가능하며, 증기 폭쇄법보다 효과적인 처리법으로 알려져 있다. SO₂를 사용하여 수증기 분해, 폭쇄 등을 조합하여 처리하는 방법이 보고되었다. 전처리에 사용되는 그 외의 약품 및 처리법으로는 초산 또는 유기산에 의한 리그닌의 추출법, 묽은 염산, 묽은 초산에 의한 촉매산·증기법, 알칼리 아황산소다 수용액에 의한 증기법 등이 펄프화법으로 오래 전부터 알려져 있다(Mosier 등 2005; Li 등 2010).

생물학적 전처리법

바이오매스를 에너지, 식량, 사료, 공업용원료 등으로 전환시킬 때, 기본적으로 고려해야 할 점은 바이오매스 자원에 함유되어 있는 특정 성분만 선택하여 사용하는 것이 아니라, 총괄적으로 이용하여 부가가치

를 향상시켜야 하기 때문에 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 리그닌, 유지 등의 다성분으로 3차원 구조를 갖는 다종다양한 바이오매스 자원에서 고부가가치의 성분을 만드는 에너지 절약형 선택적 기술개발이 필요하다. 이와 같은 선택적 처리로 가장 적합한 방법은 미생물 및 효소를 이용하는 기술이 활발히 개발 중에 있다(Mosier 등 2005; Li 등 2010).

세포벽 중의 다당류는 가수분해 효소의 작용을 받아 분해되며, 다당류 가수분해 효소의 생성은 일반적으로 효소의 기질이나 기질 분해물의 유도체에 의하여 유도된다. 셀룰로스는 곰팡이, 박테리아 및 프로토조아 등 미생물들이 지닌 셀룰라제(cellulase)라는 효소로 분해되며, 셀룰라제는 결정화 셀룰로오스의 중간 결합을 분해하는 엔도셀룰라제(endocellulase), 작아진 셀룰로오스 분자의 말단 2~4개의 포도당 단위를 자르는 2종의 엑소셀룰라제(exocellulase), 각각의 포도당을 자르는 베타글루코시다제(β -glucosidase)로 구성되어 있으며 각 효소의 역할은 그림 4에 나타내었다. 자일란은 자일라나제(xylanase)에 의하여 분해가 이루어지며, 셀룰로오스의 분해와 유사하게 엔도자일라나제, 2종의 엑소자일라나제, 베타자이로시다제로 구성되어 있다(Hwang 등 2010).

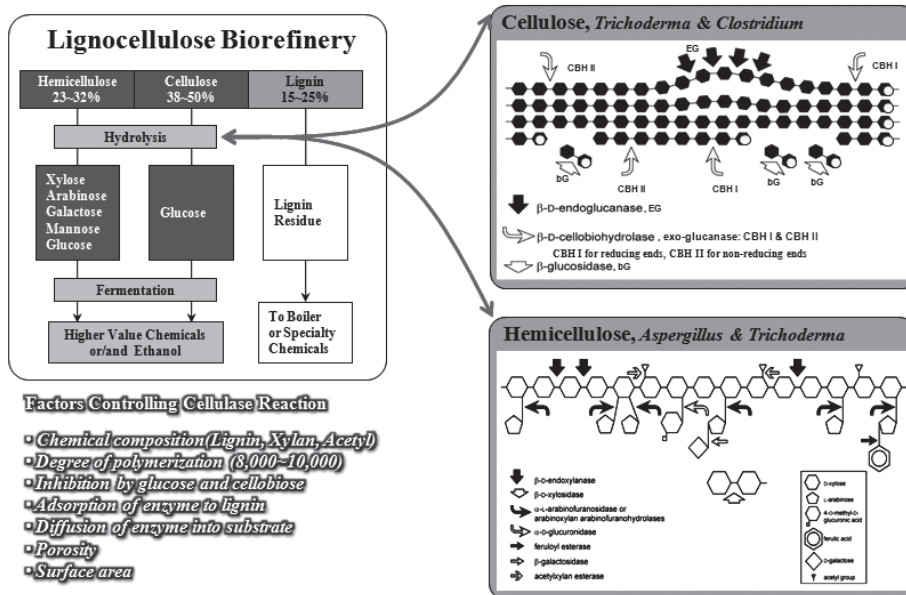


Fig. 4. Cellulose structure and hydrolysis enzyme.

일반적으로 리그닌은 미생물에 대한 높은 저항성을 가지고 있지만 목재 부패균으로 리그닌을 분해할 수 있다. 이 방법은 환경에 우수한 환경친화적인 처리법이지만 반응시간이 비교적 길고 리그닌 부후균은 리그닌뿐만 아니라 헤미셀룰로오스, 셀룰로오스도 용해·분해하는 경향이 있어 선택성이 높은 균을 개발하여 전처리하는 것이 과제이다. 목재 부후균은 이들에 의해 부후된 목재의 색상, 조직학적 특징 및 분해된 목재 성분 등에 기준하여 갈색부후균(*brown-rot fungi*), 백색부후균(*white-rot fungi*) 및 연부후균(*soft-rot fungi*)으로 대별된다. 연부후균의 목재 부후력은 그다지 강하지 않지만 목재 섬유 2차벽에 원추상의 구멍을 뚫고 생육하는 특징을 가진다. 갈색부후균은 주로 다당류를 분해하며 리그닌은 거의 분해하지 아니하는데 비하여, 백색부후균은 다당류와 리그닌을 동시에 분해한다. 리그닌의 분해에 관여하는 효소로는 리그닌퍼옥시다제(LiP), 망간퍼옥시다제(MnP) 및 락카제(Lac)의 3종류가 알려져 있다(Jeffries 1994; Hammel 1997; Pérez 등 2002).

생물화학/열화학적 전환기술

바이오매스를 이용하는 *biorefinery*의 경로는 원료의 형태에 따라 3가지로 분류할 수 있는데, 첫째, 곡식을 수확하고 버려지는 짚이나 건초 등을 원료로 하는 리그노셀룰로스 바이오리파이너리(*lignocellulose biorefinery*), 둘째, 옥수수나 유채 등 곡식을 원료로 하는 전곡물 바이오리파이너리(*whole crop biorefinery*), 셋째, 완전히 자라지 않은 초본이나 곡식을 원료로 하는 녹색 바이오리파이너리(*green biorefinery*) 등이 있다(Howard 등 2003; Sanders 등 2005; Clark 등 2006).

생물화학적 전환기술

생체고분자 물질들을 전처리 기술(또는 선처리 기술)로 각각의 성분별로 분리한 후 다음 단계로 수용성이 높은 단량체의 물질로 분해하는 과정 및 바이오연료, 폴리머용 단량체, 특수기능 물질 등 유용한 물질로의 전환을 위하여 효소 또는 고효율 미생물을 이용한 생물화학적 전환기술이 적용된다. 즉 바이오공

산품의 생산을 위한 기능유전자의 발굴 및 조절, 생촉매(효소) 또는 미생물 균주의 개발 및 적용기술, 균주 개량 및 대량 생산에 관한 기술로 정의한다(Garcia 등 2000). 고효능 또는 신규의 생촉매(효소)를 개발하기 위하여 우선적으로 목표로 하는 기능유전자 또는 필요한 기능을 지닌 미생물을 발굴하여 기능을 확인하고 발현되는 생촉매의 특성 및 유전자의 조절 기작을 규명하여 적용 가능한 생촉매로서 개발한다. 다음 단계로, 대사공학 및 효소 역학적 모델링 등의 기법을 이용하여 목적 바이오 공산품의 생산에 최적인 시스템을 구축하고 효소의 기능을 최적화, 효율의 최대화를 위한 효소공학, 분자진화, 효소고정화 등의 기술을 적용한다. 그외 해조류, 생활 쓰레기, 축산 오폐수, 폐지 등 재생 가능한 바이오매스 자원들은 개별적으로 다양한 성분들로 구성되어 있기 때문에 이러한 바이오매스의 생물화학적 전환에는 각각의 독립적인 효소 및 전환공정의 개발이 요구된다. 생물화학적 전환 기술에 이용 가능한 효소들이 많은 생명체로부터 지속적으로 발견되고 있으며 유전공학적 기법을 통하여 그 기능의 개선/적용 연구가 연속적으로 수행되어 몇 효소들은 경제적으로 대규모 생산이 가능하다(Wright 등 2007; Li 등 2010).

이용 가능한 바이오매스의 종류는 매우 다양하며 대량 생산이 기대되는 바이오 공산품(*bioproducts*)의 종류도 무수히 많기 때문에 보다 효율적이며 새로운 기능을 지닌 효소의 발견과 적용기술의 개발이 요구되며 이에 대한 지적소유권 확보는 필수적인 사항이다. 현재 바이오 화학산업에서 이용되고 있는 효소들의 종류 및 용도는 매우 다양하며 대부분이 바이오매스의 생물화학적 전환에 이용될 수 있으며, 향후 바이오리파이너리 산업의 발달에 따라 기능의 향상은 물론 더욱 많은 종류가 요구될 것이다.

바이오매스는 어떻게 전환하느냐에 따라 그 가치가 크게 달라지는데 에너지로 전환시킬 경우 640(€/ha), 수송용 연료로 전환시킬 경우 1,360(€/ha), 범용 화학제품으로 전환시킬 경우 6,400(€/ha)로 에너지로 전환시킬 경우보다 10배 이상의 가치가 창출될 수 있으므로 다양하고 부가가치가 높은 신규 화학제품 생산체제 구축에 필수적인 생촉매(효소)의 개발

및 적용은 바이오리파이너리의 상업적 성공 열쇠가 될 것이다(Sanders 등 2005; 2007).

바이오매스로부터 바이오연료, 폴리머용 단량체, 및 고부가 특수 기능물질 등 바이오 공산품의 생산을 위하여 이용되는 고효능 또는 신규의 생촉매(효소)를 개발하기 위하여 우선적으로 목표로 하는 기능유전자 또는 필요한 기능을 지닌 미생물을 발굴하여 기능을 확인하고, 발현되는 생촉매의 특성 및 유전자의 조절 기작을 규명하여 적용 가능한 생촉매를 개발하여야 한다. 다음 단계로 대사공학 및 효소역학적 모델링 등의 기법을 이용하여 목적 바이오공산품의 생산에 최적인 시스템을 구축하고, 효소의 기능을 최적화, 효율의 최대화를 위한 효소공학, 분자진화, 효소 고정화 등의 기술을 적용하게 된다. 마지막으로, 최종 생산을 위하여, 생촉매 공정을 디자인하고, 반응기 및 용량을 결정하며, 화학 촉매반응과 융합 반응 공정 등을 구축하여, 생성물의 효율적인 회수 방법 등을 결정하게 된다.

바이오 촉매(생물 촉매 또는 생촉매)란 체내의 갖가지 화학반응이 일어날 때 중개역할을 하는 물질을 의미하며 효소가 가장 대표적인 바이오 촉매이며, 이외에 특정 효소가 포함된 미생물, 동물세포, 식물세포 등이 이용되고 있다. 바이오 촉매는 초정밀성, 특이성, 선택성 및 고효율성의 특성을 가지고 있어서 다양

한 산업분야에 이용되고 있고 점차 그 이용분야가 확대되고 있다. 바이오 촉매 공정을 이용하려는 산업은 점차 증가하고 있으며, 미국의 경우 산학연 협의체인 화학연구위원회(Council of Chemical Research)를 중심으로(1999년 화학산업 전망 보고서(한국기술거래소 2006)에) 생략 바이오산업 로드맵을 작성하여 중점 추진하고 있다.

바이오 촉매의 개발 및 산업적 적용 시 고려해야 할 사항들은 아래 그림 5에 나타난 바와 같이 매우 다양한 요소가 포함되어야 하며, 이러한 요소들이 충족된 시스템을 ‘이상적인 생물전환 공정(ideal bioconversion process)’이라 할 수 있다(Burton 등 2002). 바이오 촉매는 산화환원반응, 전이반응, 가수분해반응, 이탈 및 부가반응, 이성화반응, 합성반응 등을 촉매하는 일반적인 기능은 물론이고 특이한 기질을 이용하여 특별한 반응 생성물을 생산하기도 한다. 고온, 고압, 유기용매 등의 특수한 반응조건에서도 촉매반응을 수행할 수 있는 특성을 가지고 있어 산업적 적용범위가 무한하다고 할 수 있으며 미래 산업용 소재로서 활용 가치가 매우 높은 품목이라 할 수 있다.

열화학적 전환기술

열화학적 변환기술로는 열분해, 가스화, 액화 방법 등이 있다. 바이오매스 가스화는 탄화수소를 포함하

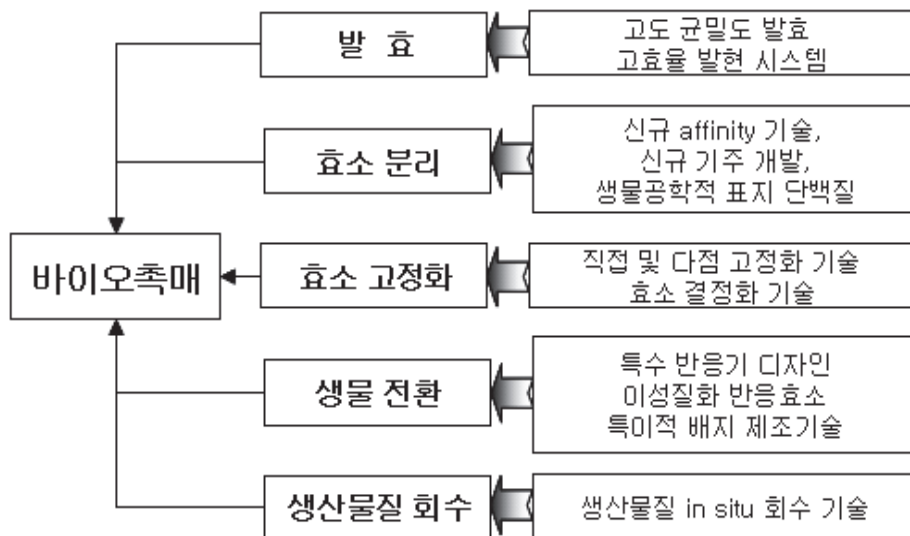


Fig. 5. Element for design of Ideal biochemical conversion process.

는 고체 또는 액체의 biomass를 공기, 산소 또는 물과 반응시켜 CO, H₂, CO₂, N₂ 등을 포함하는 합성가스(syn-gas) 또는 생성가스(producer gas)를 생산하는 과정으로 정의한다(Ni 등 2006). 바이오매스의 가스화 공정의 예상될 수 있는 반응으로는 열분해, 부분산화, 수성 가스화 공정이 있고, 열분해 공정은 산소 또는 증기를 포함하지 않은 바이오매스의 순수한 분해 공정이다. 합성가스에 비교하여 생성가스는 낮은 함량의 CO, H₂, CO₂, CH₄ 등을 포함하고, 상대적으로 높은 N₂를 포함하기 때문에 전기 또는 열 생산에 주로 사용된다. 바이오매스 가스화 공정은 유럽에서 1940년대 중반에 자동차의 동력원으로 사용된 매우 오래된 기술로서 석탄화 가스화 공정과 유사하지만 상대적으로 낮은 온도에서 가스화 과정이 발생하고 슬래그 또는 퇴적물이 양산되는 문제점이 있다(Woodward 등 2000; Garcia 등 2000).

바이오매스로부터 수소 혹은 유분을 얻기 위해 현재까지 연구된 기술은 바이오매스의 가스화(gasification)후 얻어지는 합성가스의 water-gas 전이 반응(WGSR : water-gas shift reaction)에 의한 수소 제조(혹은 Fischer-Trosch에 의한 유분의 제조), 고온 열분해 후 바이오 오일의 리포밍에 의한 유분 혹은 수소로의 전환, 생물학적 발효에 의한 제조 등이 있다. 이러한 방법들은 고온으로 인한 낮은 에너지 효율은 물론이고 낮은 수소 생산속도와 복잡한 장치/운전 등의 큰 단점이 있다. 비교적 저온에서 polyol과 당 같은 바이오매스 유도체는 수용액에서의 용해도가 상당하므로 수용액 반응을 이용하면 저온에서도 수소와 C₁~C₁₅ 등의 다양한 유분을 얻을 수도 있다.

바이오 디젤의 합성 방법으로는 현재 상업 생산되고 있는 트랜스에스테르화 방법 외에 수소화 크래킹 방법, 열분해 방법 등이 개발되고 있다. 트랜스에스테르 반응 공정은 촉매의 종류에 따라서 산 촉매공정, 염기촉매공정, 효소촉매공정, 고체촉매공정으로 반응의 상(phase)에 따라서 균일계와 불균일계 공정으로 나누어진다. 트랜스에스테르화 반응에서는 오일(지방)인 트리글리세라이드 한 분자에 3분자의 메틸알콜이 촉매 하에서 반응하여 3분자의 지방산 메틸에스테르와 한분자의 글리세롤을 생성하며, 반응의 무거운

에서 보면 약 10kg의 오일과 1kg의 메틸알콜을 반응하여 10kg의 바이오디젤과 1kg의 글리세롤이 생성된다. 대표적인 바이오 디젤 생산공정으로 상용 디젤의 품질 기준에 만족하는 제품을 생산하고 있으며, 특히 연속공정을 이용한 대규모 바이오 디젤 생산기술은 고수율 및 고품질의 바이오 디젤을 생산하는 기술로 열화학적 기술의 대표성을 갖는 기술로 급격히 발전하고 있다.

종합적 전환기술

바이오매스를 원료로 하여 다양한 화학제품을 생산하는 공정에서 생물 또는 열화학 변환공정으로 출발하여 표적대상 물질을 제조함에 있어서 제조공정의 일부를 화학 변환공정으로 대체하거나 병용 또는 결합 공정으로 기술 개발하는 것으로 정의되며, 가수분해와 에스테르화, 수소화/환원, 탈수소화, 산화, 탄소-탄소 본드 붕괴(bond cleavage), 중합 등의 주요 반응을 통해 화학원료, 용매, 계면활성제, 정밀화학 제품을 포함하는 기능성 바이오 화학제품과 바이오 플라스틱을 제조할 수 있다. 종합적 전환기술에서는 중간 핵심 기본 화학물질 제조와 이 물질에서 최종 화학제품까지 이르는 후단계(downstream) 기술을 주로 다루며 여기에는 촉매변환, 화학변환, 생물변환 기술 등이 종합적으로 포함된다. 촉매변환 및 화학변환 공정을 도입함으로써 제품의 순도, 수율과 경제성 향상을 위한 공정을 개선하고 전체적인 전환공정의 효율성을 제고하며 옥수수로부터 출발하여 핵심 화학원료를 생산하는 경우에 발효와 같은 생물 변환공정, 가수분해와 수소화반응과 같은 촉매 또는 화학 전환 공정을 거치게 된다(Tan 등 2009).

바이오 플랫폼 화학물질의 생산

미국 에너지성은 미국 국립연구소(NREL, EERE, PNNL)들과 함께 바이오매스로부터 생물학적 또는 화학적 전환공정을 이용하여 당류를 기반으로 한 12가지의 기본 구성화합물을 제시하였다(Werpy 등 2004). 300개의 후보 화합물로부터 시장성과 화학적 물성, 기능성 그리고 선정에 참여한 연구진들의 경험을 토대로 30개의 후보물질로 압축하였고, 30개의 잠

재적인 후보군 중에 기본요소(building block)와 유도체들의 시장성과 합성방법의 기술적인 복잡성에 대해 검토하여 생물학적이거나 화학적인 변형을 통해 당으로부터 생산되어질 수 있는 12개의 대체원료(chemical feedstocks), 다시 말해 유용하게 사용하는 분자들로 변형할 수 있는 잠재력을 가진 다기능성 분자들을 최종적으로 선정하였다. 이들은 top value-added chemicals로 호칭되며 바이오피오너리에 있어서 경제적으로 가장 먼저 고려되어진다. 이들 물질을 탄소수에 따라 정리하면 아래 표 2와 같다.

C3 플랫폼 화합물로 선정된 고부가 물질은 글리세롤(glycerol)과 3-하이드록시 프로피오닉 산(3-hydroxy propionic acid)이며, C4 화합물은 3-하이드록시 부티롤락톤(3-hydroxybutyrolacton), 아스파르트산(aspartic acid), C5 화합물로는 글루탐산(glutamic acid), 이타콘산(itaconic acid), 레블린산(levulinic acid), 자일리톨(xylitol/Arabitol), 1,4-카르본산(4-diacids : succinic, fumaric, malic acids), C6 화합물로는 2,5-퓨란 다이카르본산(2,5-furan dicarboxylic acid)과 글루카르산(glucaric acid)이 선정되었다(Werpy 등 2004; Yang 2006; Corma 등 2007).

그 밖에 30개 후보물질은 일산화탄소와 수소(syngas), lactic acid, malonic acid, propionic acid, serine, acetoin, fumaric acid, malic acid, succinic acid, threonine, furfural, proline, xylonic acid, aconitic acid, 2,5-furandicarboxylic acid, lysine, levoglucosan, sorbitol 등이었다. 그 외에 바이오매스 기반 C2 플랫폼 화합물로 대표적인 것은 바이오 에탄올이다. 바이오 에탄올은 대체 에너지 개발, 에너지 안보 강화, 환경개선, 농가소득 증대 등 사회 전반의

다양한 파급효과를 미치는 산업으로 관련 산업 및 시장은 막대한 성장 잠재력을 보유하고 있다.

대체에너지 중에서 특히 바이오 에탄올 가격은 수송용 에너지로 사용 가능하기 때문에 석유가격과의 연관성이 밀접하며 석유가격에 비해 가격이 비쌀 경우 세금 우대 및 정책적 지원이 필요하다. 따라서 선진국들은 성장 잠재력을 인식하여 가격 경쟁력이 없음에도 불구하고 정책적으로 바이오 연료 도입을 추진하고 있다. 대표적인 바이오 화학제품을 보면 가장 앞서가는 것이 polylactic acid(PLA), 이어서 1,3-propandiol(PDO), polyol, 생분해성 플라스틱으로 관심을 쏟아가고 있다. 완제품들을 보면 화장품, 의류, 윤활유, 접착제 등은 물론이거니와 각종 플라스틱이 개발되면서 플랜트보틀(plantbottle)이 생산되고 생산 단가를 낮추어 코카콜라를 담겠다는 것이다. 대표적으로 미국, 독일, 브라질, 일본, 네델란드, 스페인 등인데, 앞으로는 중국을 포함해서 인도 등이 등장하게 될 것이며, 경쟁은 치열하게 진행될 것이다. 왜냐하면 시그너스 컨설팅(Cygnus Business Consulting & Research)이 예상한 세계 바이오 화학제품 시장규모는 2005년 212억달러(전체 화학시장의 1.7%)에서 2025년 4천830억달러(약 22%)까지 확대될 전망이다.

또한 맥킨지(McKinsey) 자료에 따르면, 바이오 화학시장이 2007년 약 1천억 달러(전체 화학시장의 5%)에서 2012년 약 1천530달러(9%)로 늘어날 것으로 추산된다. 네델란드 화학기업인 디에스엠(DSM) 고위 관계자는 “바이오 기반 플라스틱이 향후 15년 내에 전체 플라스틱 수지의 15~20%, 20년 내에 25%를 대체할 것”으로 전망했다(Sudesh 등 2000; Bachmann 2007; 지식경제부 2009).

Table 2. Twelve top value-added chemicals.

탄소	대체화학 물질
3	글리세롤(Glycerol), 3-하이드록시 프로피오닉산(3-Hydroxy propionic acid)
4	3-하이드록시 부티롤락톤(3-Hydroxybutyrolacton), 아스파르트산(Aspartic acid)
5	글루탐산(Glutamic acid), 이타콘산(Itaconic acid), 레블린산(Levulinic acid), 자일리톨(Xylitol/Arabitol), 1,4-카르본산(4-Diacids : succinic, fumaric, malic acids)
6	2,5-퓨란 다이카르본산(2,5-Furan dicarboxylic acid), 글루카르산(Glucaric acid), 솔비톨(Sorbitol)

해외 주요국의 바이오리파이너리 관련 기술개발 현황을 살펴보면 연료용 바이오 에탄올 생산기술은 아직까지 전분질 또는 당질계 바이오매스를 이용하여 상용화를 했는데, 미국의 ADM, POET, Cargill 사에서는 전분을 원료로 생산하여 400억달러 시장을 형성하였다. 바이오 플라스틱용 1,3-propanediol (PDO)은 미국의 DuPont사에서 Genencor사와 협력 체계를 구축하고 2006년말 연간 5만톤 규모로 상용화하였다. 또한 lactic acid를 원료로 하는 바이오플라

스틱 PLA를 미국의 Cargill, 네델란드 Purac사 등에서 2002년 연간 14만톤을 생산하였고, 2007년도에는 일본 Teijin사에 지분 50%를 매각하였다. 그러나 목질계 바이오매스를 이용하는 에탄올 생산, 숙신산 유도체 생산 기술 등은 완성되지 못했지만 캐나다 Iogen, 미국 Mascoma, POET, Verenium, 스위스 Abengoa, 미국의 Invista, 독일의 BASF Lyondell, 일본의 Mitsubishi 등에서 개발 중에 있다(표 3).

국내의 바이오리파이너리 관련 기술개발 현황을

Table 3. Status of biorefinery technology in the world.

기술명	개발 단계	개발내용	개발주제
연료용 바이오에탄올 생산기술(전분질/원당)	상용화	• 전분을 원료로 연료용 바이오 에탄올 대량생산 기술, 미국 POET사 등은 고농도 에탄올 내성 균주 개발(약 200g/l 에탄올 생산 가능)	(미) ADM, POET, Cargill
		• 미국, 브라질 등을 중심으로 대량생산, 미국 400억 \$ 시장규모 형성	(브) 페트라브라스사
바이오 플라스틱용 1,3-PDO 생산기술	상용화	• 대사공학을 이용한 1,3-PDO 생산균주 개발(<i>E. coli</i>)	(미) DuPont(Genencor협력)
		• 1,3-PDO를 이용한 PTT 생산기술 개발 • 2006년 말 연산 5만 톤 생산규모의 상업용 생산시설 건립/상업화	(미) DuPont(Tate & Lyle)
바이오 플라스틱용 Lactic acid 생산기술	상용화	• <i>Lactobacillus</i> 균주 이용 lactic acid 대량생산, PLA 생산기술 개발 • 광학적으로 순수한 lactic acid 생산기술	(미) Cargill (네) Purac
		• 2002년 연산 PLA 14만톤 생산규모의 상업용 생산시설 건립 상업화 • 2007년 일본 Teijin사에 지분 50% 매각	(미) Cargill, NatureWorks
리그노 셀룰로오즈로부터 연료용 바이오 에탄올 생산기술	Pilot	• 현재 6개 대형 Biorefinery 프로젝트 진행 중, 총 연구비 12억 \$ 규모	(캐) Iogen
		• 1일 최대 2,000톤 리그노셀룰로오즈 바이오매스 처리 용량 • 리그노셀룰로오즈를 이용한 에탄올 및 화학소재 개발	(미) Mascoma, POET, Verenium (스) Abengoa
Succinic acid 유도체 생산기술	Pilot	• 미생물 이용 succinic acid 생산기술 개발(수율 110%, 농도 100g/l)	(미) DNP, MBI (독) BASF
		• Succinic acid 유도체인 BDO, GBL 등으로 화학 전환기술 개발	(독) BASF Lyondell (미) Invista (일) Mitsubishi
3-HP생산기술	Pilot	• 미생물을 이용한 3-HP 생산기술 • 글리세롤로부터 3-HP 생산기술	(미) Cargill, D대학
바이오 에탄올을 이용한 에틸렌 생산기술	기술검토	• 바이오에탄올의 탈수반응을 통한 에틸렌 생산 기술	(미) Dow Chemical (일) 신화학연구원

살펴보면 CJ제일제당과 (주)대상에서 사료 및 식품첨가용 아미노산 대량생산 기술을 개발하여 라이신, 쓰레오닌, 트립토판, 페닐알라닌 등의 생산기술을 개발하여 상용화하였다. 바이오 디젤분야에서는 에너지기술연구원과 가야에너지 및 LG생활건강에서 대두유 및 폐식용유를 활용한 바이오 디젤 생산기술을 개발 완료하였다. 바이오 에탄올은 삼성엔지니어링, 한국알콜조합, 에너지기술연구원 등에서 타피오카 전분을 이용한 바이오에탄올 생산기술 개발, 목질계 바이오매스를 이용한 바이오 에탄올 생산기술을 파일럿 규모에서 개발하고 있다. 또한 선진국 및 기업들의 기술과는 차별화하여 PLA, PHA 등 바이오 플라스틱 상용화를 위하여 CJ제일제당과 LG화학, 전남대학교, KIST, KAIST, 서울대, 한화, 한국화학연구원 등에서 기술개발에 박차를 가하고 있다. 한편으로는 대사공학을 이용한 숙신산 생산균주를 개발하거나 초미계수를 이용한 바이오매스 전처리 공정 개발을 수행하고 있다.

결 론

매장량이 한정된 석유자원의 고갈과 급격한 가격 상승에 의해 전통화학 산업에서 생산되는 정밀 화학제품, 의약품, 소재형 화학제품, 플라스틱 및 연료 등의 제품들을 화석원료이외의 물질로부터 생산할 수 있는 대체원료의 개발이 절실히 요구되고 있다. 바이오 플랫폼 화학물질은 바이오매스로부터 생물학적/화학적 전환을 통해 생산되며 바이오 화학제품 제조에 광범위하게 사용되는 기본 화합물이다.

바이오매스 기반 화학산업의 탄소순환은 수억년 전에 만들어졌던 화석자원을 꺼내서 쓰면 대기 중의 이산화탄소는 계속 증가하게 되지만 매년 생산되는 바이오매스를 사용한다면 이산화탄소는 증가하지 않고 현재의 상태를 지속적으로 유지할 것이다. 따라서 바이오매스기반의 바이오리파이너리 기술개발은 한국의 농업과 화학산업의 미래를 위해서 수행하여야 할 절대적인 과제인 것이다(이와 박 2006; 한국화학연구원 2007).

2009년초 지식경제부 바이오화학산업 발전전략에서 국내 기업의 적합도, 연도별 시장의 성장률, 세계 시장규모 등을 기반으로 분류한 바이오매스 기반의 화학제품 군으로 플랫폼 화합물, 범용 화학제품, 기능성 화학제품, 바이오 플라스틱, 효소 및 미생물 등으로 구분하였고, 한국의 석유화학 산업 및 자동차 산업의 국제 경쟁력 등을 고려할 때 바이오 플라스틱과 바이오 플랫폼 화합물 개발 투자가 바람직하다고 판단하였다. 또한 바이오 플라스틱 산업의 성공적인 정착을 위해서는 바이오 플랫폼 및 범용 화학제품의 경제성 확보가 필수 불가결하며 기능성 화학제품의 경우 국내 적합도 및 세계 시장 규모가 크므로 적극 육성이 필요하다고 판단되었다(한국화학연구원 2007; 지식경제부 2009).

외국의 사례를 분석해보면 특징이 있는데 미국은 풍부한 자원 특히 잉여농산물을 토대로 바이오 연료 중심의 기술개발을 진행하고 있다. 유럽은 바이오 연료 특히 디젤과 화학제품을 대상으로 기술개발 지원을 적극적으로 한다. 일본은 바이오매스 자원이 부족하기 때문에 화학제품 특히 플라스틱 개발에 집중하고 있다. 중국은 풍부한 농업자원 활용으로 세계 제3위의 바이오 에탄올 생산국이다. 또한 화학제품 기술 개발도 지원하고 있다. 우리나라는 기업을 중심으로 세계수준의 발효공정 기술 기 확보, 경쟁력 있는 생명공학 연구인력 풍부, 세계 5위권 석유화학산업 보유, 정부의 지원의지가 있다. 또한 바이오 화학산업은 세계적으로 산업화 초기단계로서 미개척분야가 많이 존재하기 때문에 적극적으로 참여하면 좋은 결과를 얻게 될 것이다. 그러나 바이오매스 자원의 절대적인 부족, 기반기술 및 인프라 취약, 한정된 국내시장 등의 약점을 가지고 있고, 선진국들의 집중투자가 확대되어 상대적으로 치우치게 되고, 원천특허 독과점이 심화될 것으로 예상되기 때문에 어서 빨리 서둘러야 할 것이다. 결론적으로 바이오매스 자원이 풍족하지 못한 우리나라의 실정을 최대한 살려 초기 투자위험을 분담하기 위한 정부주도형 장기 지원체제, 기업간 전략적 제휴가 필요하다. 따라서 한국형 바이오리파이너리 기술개발 전략은 첫째로 바이오 연료개발 측면은 정부의 시책으로 바이오매스 선정 및 확보방안

을 강구해서 해당 바이오매스의 전처리 기술, 당화발효 연속공정, 분리정제 기술을 신속하게 개발 또는 기존의 기술을 접목시켜 바이오연료를 만들어내는 것이다(그림 6). 둘째로 산업체의 니즈를 충족시키기 위해서는 바이오 화학제품 생산시범화 사업이 필요하고 부분적이 아니라 단량체로부터 최종제품까지 총괄적으로 연계하여야 할 것이다(그림 7). 명확한 한국형 개발목표 및 중장기 로드맵 작성이 필요하며, 중점사항으로는 국내산 바이오매스의 안정적 공급전략, 한국형 바이오리파이너리 기술개발 전략, 국내 개발 바이오 화학제품 생산전략으로 연계되어야 할 것이

다. 옛날에는 천연물을 써왔고, 오늘날에는 바이오텍 제품을 사용하고 있지만 앞으로는 생필품 모두를 바이오매스로부터 생산하게 되어 대기 중의 이산화탄소가 증가하지 않는 바이오리파이너리 시대를 개척하여야 할 것이다(그림 8).

요 약

이제 마야호로 21세기 탈석유 시대에 대비하기 위해서는 범국가적 차원의 새로운 산업전략이 필요하

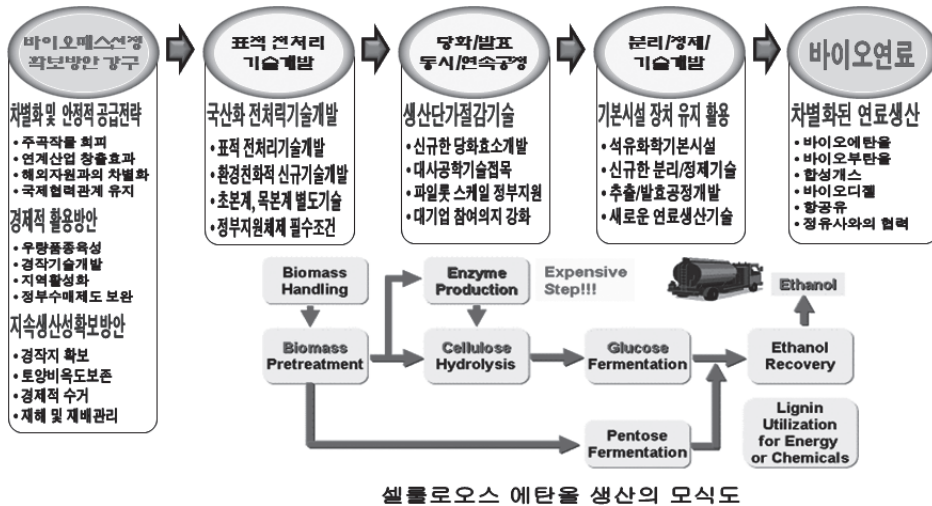


Fig. 6. Biofuel production supported by national policy.

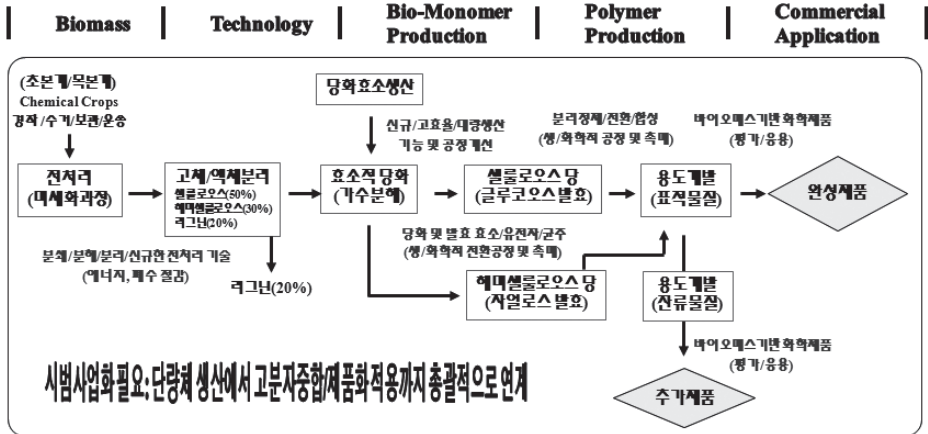


Fig. 7. Biochemical production supported by company.

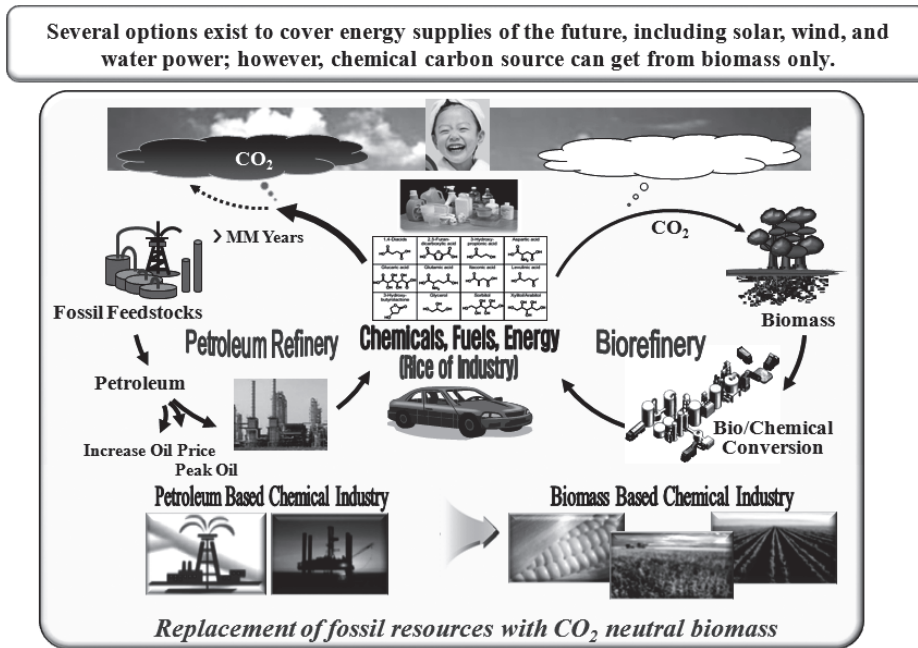


Fig. 8. Cycle of carbon dioxide and biorefinery.

게 되었다. 「바이오리파이너리」란 원유로부터 각종 화학제품을 생산하는 기존의 기술과 달리 석유대신 나무나 벚짚 등과 같은 식물을 원료로 해서 바이오화학제품이나 바이오연료 등을 생산하는 기술을 총칭한다. 바이오리파이너리를 통한 바이오매스 기반의 화학산업은 석유로부터 생성되는 많은 역기능적인 문제점들을 해결할 수 있다. 바이오리파이너리 기술을 이용해서 생산할 수 있는 제품을 특성별로 분류하면, 바이오 연료, 대체원료, 특수 기능물질, 바이오 폴리머 등이 있으며, 이러한 공정기술 개발이 미래 지속 성장 화학기술의 중심기술이 될 것이다. 바이오 연료에는 에탄올, 디젤, 수소 등이 있고, 대체원료 (chemical feedstock)로서는 글리세롤, 젖산, 아세트, 부탄올, 프로피온산, 부틸산, 부탄디올, 프로판디올, 구연산, 숙신산, 각종 아미노산 등이 해당된다. 특수 기능물질 중에는 향생제, 다당류, 미생물농약, 생리활성물질 등과 각종 생촉매 전환반응 생산제품, 바이오 식품소재 등이 있고, 바이오 폴리머는 미생물 대사산물 유기산을 원료로 하는 고분자와 미생물이 직접 생산하는 바이오 폴리머 등이 있다. 이러한 공정기술 개발이 미래 지속 성장 화학기술의 중심기술이 될 것이

며, 공정기술 중에서 가장 핵심이 되는 것은 충분한 양의 바이오매스 확보 및 생화학적/열화학적 전환기술이다. 바이오매스 확보를 위하여 환경적응성이 큰 잡초의 이용이 기대된다. 바이오리파이너리는 농업으로 시작되며, 농업과 화학산업의 다리역할을 하는 기술이 바로 바이오리파이너리인 것이다.

감사의 말씀

“본 연구는 산업기술연구회 협동연구사업(B551179-10-03-00) 초본계 바이오매스 기반 폴리카보네이트 고분자소재 개발 및 농림기술개발사업(109192-3) 농림부산물(반섬유소) 이용 젖산 생산기술(C5-SSF) 개발의 연구비 지원으로 수행되었습니다.”

인용 문헌

김기수. 2003. 셀룰로오스와 라이오셀(Lyocell) 섬유. KISTI 기술동향분석보고서, pp. 4-27.

- 석유화학공업협회. 2010. 홈페이지 [http : //www.kpia.or.kr/index.htm](http://www.kpia.or.kr/index.htm)
- 이선구, 박성훈. 2006. 산업 BT : 생물자원의 생물변환에 의한 연료, 화학원료 및 고분자의 생산. 한국화학공학회지 44(1):23-34.
- 일본공업신문사. 2006. 월간 지구환경 9월호.
- 정재훈, 권기석, 장한수. 2008. 수송용 바이오에너지 개발과 미래. 한국미생물생명공학회지 36(1):1-5.
- 지식경제부. 2009. 바이오화학산업 발전전략 기획보고서. 350 p.
- 산업자원부, 2007. 산업바이오 활성화를 위한 전략기술 분석(보고서). 316 p.
- 한국화학연구원. 2007. “지속성장 화학기술 개발사업 핵심기술동향 분석”, 기술검토보고서. 228 p.
- 한국석유화학공업협회. <http://www.kpia.or.kr/>
- Bachmann M. 2007. Global chemicals-Yearly Update 2006, Cygnus Business Consulting & Research; Informa Economics. [http : //www.marketresearch.com/search/](http://www.marketresearch.com/search/)
- Burton, S. G., D. A. Cowan and J. M. Woodley 2002. The search for the ideal biocatalyst. Nature Biotechnology 20:37-45.
- Clark, J. H., V. Budarin, F. E. I. Deswarte, J. J. E. Hardy, F. M. Kerton, A. J. Hunt, R. Luque, D. J. Macquarrie, K. Milkowski, A. Rodriguez, O. Samuel, S. J. Tavener, R. J. White and A. J. Wilson. 2006. Green chemistry and the biorefinery : a partnership for a sustainable future. Green Chem., 8:853-860.
- Corma, A., S. Iborra and A. Velty. 2007. Chemical routes for the transformation of biomass into chemicals. Chem. Rev. 107:2411-2502.
- DOE USA : Department of Energy, USA. Biomass Program, EERE. [http : //www1.eere.energy.gov/biomass/biomass_basics.html](http://www1.eere.energy.gov/biomass/biomass_basics.html).
- Fernando, S., S. Adhikari, C. Chandrapal and N. Murali. 2006. Biorefineries : current status, challenges, and future direction. Energy & Fuels 20:1727-1737.
- Garcia, L., R. French, S. Czernik and E. Chornet. 2000. Catalytic steam reforming of bio-oils for the production of hydrogen : effects of catalyst composition. Appl. Catal. A. 201:225-239.
- Hammel, K. E.. 1997. Fungal degradation of lignin, driven by nature : Plant litter quality and decomposition (eds G. Cadisch and K. E. Giller). pp. 33-45.
- Howard, R. L., Abotsi E., Jansen van Rensburg E. L., and Howard S. 2003. Lignocellulose biotechnology : issues of bioconversion and enzyme production. African J. of Biotechnology 2(12): 602-619.
- Hwang, I. T., H. K. Lim, H. Y. Song, S. J. Cho, J. S. Chang and N. J Park. 2010. Cloning and characterization of a xylanase, KRICT PX1 from the strain *Paenibacillus* sp. HPL-001. Biotechnology Advances 28:594-601.
- Jeffries, T. W. 1994. Biodegradation of lignin and hemicelluloses. C. Ratledge (ed.), Biochemistry of Microbial Degradation, 233-277. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.
- Kamm, B., and M. Kamm 2004. Principles of biorefineries. Appl. Microbiol. Biotechnol. 64: 137-145.
- Klemm, D., B. Heublein, H. P. Fink and A. Bohn. 2005. Cellulose : fascinating biopolymer and sustainable raw material. Angew. Chem. Int. Ed. 44:3358-3393.
- Li, C., B. Knierim, C. Manisseri, R. Arora, H. V. Scheller, M. Auer, K. P. Vogel, B. A. Simmons and S. Singh. 2010. Comparison of dilute acid and ionic liquid pretreatment of switchgrass : Biomass recalcitrance, delignification and enzymatic saccharification. Bioresource Technology 101:4900-4906.
- Mamman, A. S., Jong-Min Lee, Yeong-Cheol Kim, In Taek Hwang, No-Joong Park, Young Kyu Hwang, Jong-San Chang and Jin-Soo Hwang.

2008. Furfural : hemicellulose/xylo-derived biochemical. *Biofuels, Bioprod. Bioref.*, 2(5): 438-454.
- Mosier, N., C. Wyman, B. Dale, R. Elander, Y. Y. Lee, M. Holtzapple and M. Ladisch. 2005. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology* 96:673-686.
- Ni M., D. Y. C. Leung, M. K. H. Leung and K. Sumathy. 2006. An overview of hydrogen production from biomass. *Fuel Processing Technology* 87:461-472.
- Pérez, J., J. Muñoz-Dorado, T. de la Rubia and J. Martínez. 2002. Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin : an overview. *Int. Microbiol.* 5:53-63.
- Sanders, J., E. Scott and H. Mooibroek. 2005. Biorefinery, the bridge between agriculture and chemistry. http://www.biorefinery.nl/fileadmin/biorefinery/docs/sanders_br_the_bridge_between_agriculture_and_chemistry.pdf.
- Sanders, J., E. Scott, R. Weusthuis and H. Mooibroek. 2007. Bio-Refinery as the bio-inspired process to bulk chemicals. *Macromol. Biosci.* 7:105-117.
- Sudesh, K., H. Abe and Y. Doi. 2000. Synthesis, structure and properties of polyhydroxyalkanoates : biological polyesters. *Prog. Polym. Sci.* 25:1503-1555.
- Tan S. S. Y., D. R. MacFarlane, J. Upfal, L. A. Edye, W. O. S. Doherty, A. F. Patti, J. M. Pringle and J. L. Scott. 2009. Extraction of lignin from lignocellulose at atmospheric pressure using alkylbenzenesulfonate ionic liquid. *Green Chem.* 11:339-345.
- The Council for Chemical Research, Technology vision 2020. 1996. The U.S. Chemical Industry.
- US DOE 2006. Forest product industry technology roadmap.
- Werpy, T., G. Petersen (eds.). 2004. Top value added chemicals from biomass (ed). U. S. Department of Energy, Office of scientific and technical information, 2004, No. : DOE/GO-102004-1992.
- Woodward, J., M. Orr, K. Cordray and E. Greenbaum. 2000. Enzymatic production of biohydrogen. *Nature* 405:1014-1015.
- Wright, M. M., and R. C. Brown. 2007. Comparative economics of biorefineries based on the biochemical and thermochemical platforms. *Biofuels, Bioprod. Bioref.* 1:49-56.
- Yang, S. T. 2006. Bioprocessing for value-added products from renewable resources. Eds. Elsevier B.V., Amsterdam (Netherlands). p. 653.
- Zakzeski J., P. C. A. Bruijninx, A. L. Jongerius and B. M. Weckhuysen. 2010. The catalytic valorization of lignin for the production of renewable chemicals. *Chem. Rev.* 110:3552-3599.
- Zhang, Y. H. P., and L. R. Lynd. 2005. Toward an aggregated understanding of enzymatic hydrolysis of cellulose : noncomplexed cellulase systems. *Biotechnology and Bioengineering* 88 (7):797-824.