

식량원료를 이용한 바이오에탄올 생산 방법

양재경 · 최명석

경상대학교 환경산림과학부

Production of Bioethanol Using Food Resources

Jae-Kyung Yang, Myung-Suk Choi

Environmental Forest Science, Gyeongsang National University

서 론

1. 바이오에너지와 바이오매스

바이오에너지(bioenergy)란 바이오매스(biomass)로부터 생산되는 모든 에너지를 일컫는 말로 바이오에너지의 형태는 매우 다양하다(그림 1). 바이오매스는 유채, 콩, 팜(야자), 자트로파(jatropha) 등의 유지작물과 옥수수 등의 곡물과 감자류를 포함한 전분질계의 자원, 사탕수수, 사탕무와 같은 당질계 자원, 초본, 임목과 벗짚, 왕겨와 같은 농업 부산물을 포함하는 셀룰로오스계의 자원을 비롯해 가축의 분뇨, 사체와 미생물의 균체를 포함하는 단백질계의 자원까지 매우 다양하다. 또한 이들 바이오매스로부터 생산되는 바

이오에너지 역시 매우 다양한데 크게 액체연료와 가스연료로 나누며, 액체연료에는 당질계, 전분질계, 목질계 원료에서 생산되는 바이오에탄올(bioethanol)과 유지작물로부터 생산되는 바이오디젤(biodiesel)로 이루어지며, 가스연료에는 섬유소나 기타 유기성폐기물의 발효를 통하여 생산되는 바이오가스(biogas) 등이 있다.

바이오에탄올을 생산하는 바이오매스는 앞서 언급한 바와 같이 사람이 식량으로 사용할 수 있는 당질계, 전분질계 바이오매스와 식량으로 사용할 수 없는 셀룰로오스계 바이오매스로 나눌 수 있다.

국내 바이오매스 부존자원은 연간 석유환산 1,128만 toe이며 현재 기술로 이용 가능한 보급 잠재량은 232만 toe이고, 현재 국내 바이오매스

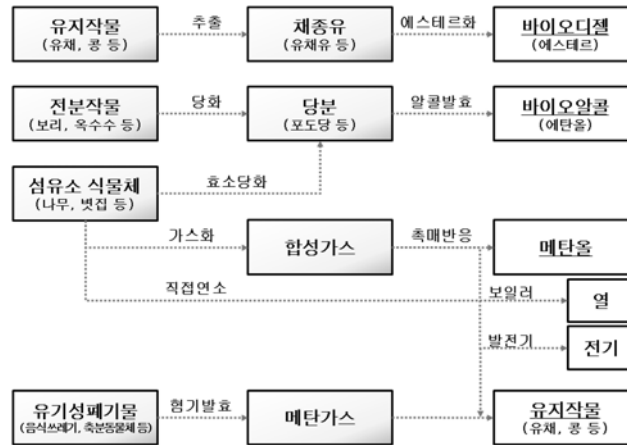


그림 1. 바이오매스 자원과 바이오에너지 생산

보급활용은 보급 잠재량의 10~15% 수준이다. 우리나라가 한해 수입하는 원유가 1.1억 톤 이상임을 감안하면 국내의 바이오매스는 턱없이 부족하고 그나마도 잘 활용되지 못하고 있는 실정이다.

2. 바이오에너지 개발 타당성

바이오에너지의 도입을 통한 생산과 소비는 현재의 시장가격만을 고려할 경우 경쟁력은 매우 낮다. 하지만 바이오에너지를 사용함으로써 발생하는 여러 가지 사회적 편익의 증대가 가능하므로 가격 경쟁력만을 기준으로 판단하기에는 곤란하며 시장가격에는 반영되지 않는 다음과 같은 사회적 편익을 고려해야 한다. 첫째, 바이오에너지를 생산할 수 있는 원료작물을 국내에서 재배하여 농가 소득 증대와 함께 관련 산업의 고용창출 효과가 발생한다. 둘째, 지구

온난화를 유발하는 가스인 CO₂의 발생량을 감소시킬 수 있다. 셋째, 에너지원의 다변화와 해외 의존도 감소를 통한 에너지 안보의 강화이다. 현재 우리나라는 세계 7위의 석유 소비국가이며 사용되는 에너지의 약 97%를 수입에 의존하고 있어 국내의 경제도 국제 유가의 변동에 따라 크게 영향을 받을 수도 있어 바이오에너지의 사용을 통하여 에너지 해외 의존도를 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 에너지원의 다변화에도 기여할 수 있을 것이다.

본고에서는 세계적 이슈가 되고 있는 바이오에너지 개발에 있어 특히 식량원료를 이용한 바이오에탄올의 생산원리, 국내외 동향, 생산의 문제점 및 전망에 대해 간략히 논하고자 한다. 본고에서는 바이오에탄올 관련 내용 외에도 식량원료를 활용한 바이오에너지 개발에 있어 중요한 바이오디젤 관련 내용도 간략히 언급하였다.

바이오에탄올 생산 원리

1. 바이오에탄올 생산 과정

당질계 또는 전분질계 바이오매스를 원료로 사용할 경우 식량을 에너지로 사용한다는 도덕적 문제 뿐만 아니라 앞으로 식량 수요가 늘어날 경우 원료 수급에 문제가 발생할 수 있다. 이러한 피상적 이유 외에도 현재 생산하고 있는 바이오 에탄올은 원료 비용이 높아 원가 측

면에서 비교하면 휘발유에 비해 가격이 높은 문제점에 있다.

이러한 문제를 극복하기 위해 보다 값싸고 원료 수급에 문제가 적은 셀룰로오즈계 바이오매스를 원료로 사용하는 기술을 개발하고 있다. 하지만 셀룰로오즈계 바이오매스는 앞에서 언급한 당질계, 전분질계 바이오매스에 비해 매우 견고한 구조를 가지고 있어 이를 분해하여 에탄올을 생산하는데는 여러 단계의 공정을 거쳐야 한다(그림 2). 먼저 바이오매스 자원을 수집

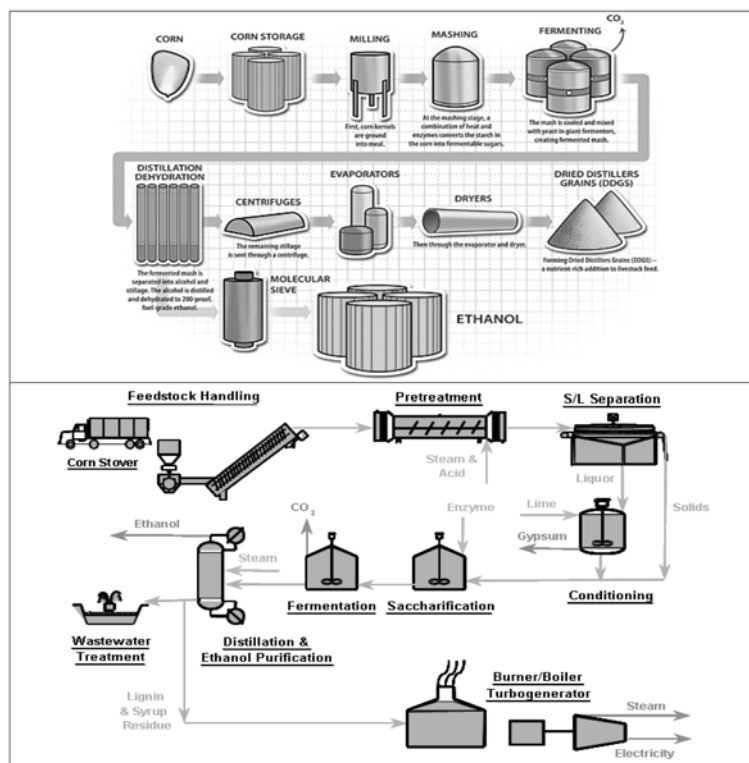


그림 2. 전분질계(위쪽)와 셀룰로오즈계(아래쪽)으로부터 바이오에탄올 생산 공정 (출처 : NREL 자료)

하고, 이를 파쇄한 후 리그닌을 제거하고 셀룰로오스를 얻기 위해 전처리를 수행한다. 이후 효소를 이용하여 당으로 분해하고 얻어진 당을 알코올 생산용 미생물 배양에 넣어 발효를 수행한다. 당질계는 효모에 의한 1단 발효에 의해 에탄올로 전환된 후 농축과정을 거쳐 연료용 에탄올로 만들어진다. 전분질계 바이오매스는 증저 과정을 통해 전분을 포도당으로 전환한 후, 효모에 의해 발효시키는 2단계 공정을 거친다. 생산된 바이오에탄올을 농축해 자동차 연료로 쓴다.

2. 바이오에탄올 생산 공정별 기술

2.1. 바이오에너지 원료작물 생산

바이오에너지 개발에 있어서 가장 큰 어려움 가운데 하나는 생산원료의 안정적 공급이라고 할 수 있다. 연구보고에 의하면 우리나라는 좁은 국토면적으로 말미암아 바이오에너지 원료 생산에는 매우 부정적인 것으로 보고하고 있지만 2007년부터 유채 재배 시범단지 조성 사업과 유희농지에 대한 활용방안계획 등을 수립하였다.

앞서 언급한 바와 같이 식량자원에서 벗어난 셀룰로오스계 바이오매스를 생산하기 위한 노력이 진행되고 있다. 현재 미국, 영국 등에서는 초본류인 Swichgrass(*Panicum virgatum*)는 5년에 평균 에이커 당 11.5 톤의 바이오매스를 생산하며, 이것은 연간 에이커 당 1150 갤런

(1,750 리터/ha/년)의 바이오에탄올을 충분히 생산할 수 있는 양으로, 옥수수에서 생산되는 바이오에탄올과 비교한다면 생산량이 3배 이상이라고 보고하고 있다. 게다가 생산비 등을 고려한다면 Swichgrass에서 생산되는 바이오에탄올의 생산수율은 옥수수보다 15~20배의 경제성을 가지는 것으로 보고되고 있다. 또한 역새풀을 이용하여 바이오에탄올을 생산한 결과 높은 바이오에탄올 생산 가능성을 나타내었다는 보고도 있다. 미국 에너지부(Department of Energy)에서는 셀룰로오스를 이용한 바이오에탄올 생산에서 배출되는 온실가스의 양과 오염도가 전통적으로 사용되고 있는 옥수수 유래의 바이오에탄올보다 훨씬 낮으며 그 수확량도 현저히 많다고 보고하고 있다. 또한 목본식물 중에는 속성수로 포플러가 집중 조명되고 있다. 연간 4 m 이상 자라는 포플러가 개발되고, 최근 생명공학 기술의 발달과 더불어 포플러의 바이오에너지 연구는 새로운 전기를 맞고 있다. 이미 연구자들에 의해 gene family evolution, 세포벽 생합성과정 조절, 내병성, 각종 스트레스저항성, 이차대사 과정 등이 연구된 만큼 향후 바이오에너지 관련 연구가 활성화 될 것으로 보인다.

식량자원 중에서 바이오에너지 원료로 부각을 받는 것은 식물성유지 생산용 콩, 유채, 해바라기, 쌀겨, 팥, 코코넛, 야자, 자트로파 등이다. 이 중 유채는 기름함량이 45%로 높을 뿐만 아니라 올레인산(C 18:1)의 함량이 높아 엔진을 오작동시키는 온도인 저온 필터 막힘점(Cold Filter Plugging Point, CFPP)이 -8°C로

코코넛 기름(영양 17°C)보다 훨씬 낮아 추운 겨울철에도 안전하게 사용할 수 있는 장점이 있어 에너지 작물로 각광을 받고 있다. 그 외에도 올레인산의 수준을 높이고 리놀레산 수준이 상대적으로 낮게 개량된 작물은 safflower(잇꽃), sunflower(해바라기), soybean(콩), canola(유채), maize(옥수수) 및 peanut(땅콩)과 같은 기름작물을 개발하고 있다.

2.2. 전처리 공정

당질과 전분질은 바이오에탄올 생산을 위해 좋은 원료자원임에는 분명하지만, 식량자원이라는 점과 원료자원 조달에 한계와 원료자원의 비용이 높다는 한계점을 가지고 있다. 이러한 상황에서 셀룰로오스계 자원이 바이오에탄올의 원료자원으로 각광을 받고 있다. 셀룰로오스계 자원은 폐신문지나 폐목재 등과 같은 폐자원을 활용한다는 측면에서 환경적, 경제적으로 큰 강점을 가지고 있으나 기술적으로 극복해야 할 점들을 가지고 있다.

목질계자원에 함유되어 있는 셀룰로오스 성분은 포도당으로 구성되어 있는 다당류이므로 셀룰로오스 성분을 효율적으로 분해하는 시스템을 개발해야만 한다. 현재까지 셀룰로오스 성분을 분해하여 포도당으로 전환시키는 공정은 pin milling, ball milling 장치 등과 같은 물리적 공정, 산이나 알칼리를 이용하여 분해하는 방법, cellulase 등을 이용한 효소적인 방법들이 개발되어 있다. 그러나 이러한 방법들은 각각의

문제점을 가지고 있다. 즉 효소적인 처리나 물리적인 공정만으로는 포도당의 형태로 셀룰로오스의 전환이 효율적이지 못하며, 산이나 알칼리 처리 등에 의해 셀룰로오스는 포도당의 형태로 분해되나 산이나 알칼리의 회수, 발효 시 저해물질 생성 등의 문제점들이 있다. 최근에는 전처리 공정을 효율적으로 수행하거나 배제하기 위하여 ionic liquer에 대한 연구가 진행되고 있고, 2시간 처리만에 세포벽 성분이 파괴되어 효소의 침투를 용이하게 하였다는 보고가 있다.

2.3. 효소개량 및 당화공정

당화는 셀룰로오스 성분이 효소의 작용에 의해 글루코스로 전환되는 과정이며, 셀룰라제 효소가 셀룰로오스의 반응표면에 붙어 셀룰로오스를 셀로비오스로 바꾸는 과정과 셀로비오스가 베타-글루코시다아제의 효소 반응으로 글루코스로 전환되는 과정으로 나뉜다. 당화과정에서는 산보다는 효소를 이용한 생물학적 공정이 장점이 많다. 효소를 사용하면 부산물 생성이 적고, 상온·상압 반응이므로 시설비가 적게 들며 반응하지 않고 남은 리그닌은 변형이 없어 다른 용도로 사용할 수 있다. 생물공정은 새로운 공정 및 기술이 계속 개발되고 있어 공정개선 및 경제성 제고가 용이하다. 효소를 사용한 에탄올 생산은 오랫동안 연구되었으며, 현재는 대량생산공정에 적용 가능한 수준이다.

현재 바이오에탄올 전체 생산가의 1/3을 차지하는 것이 cellulase 비용이다. 따라서 바이오

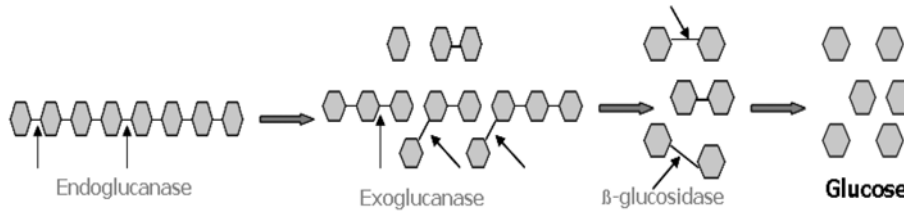


그림 3. 셀룰로오스 분해 효소에 의한 당화

에너지 공정의 성공적 산업화를 위해서는 효율적이고 경제적으로 셀룰로오스 분해 효소의 개발이 필수적이다(그림 3). 미생물을 통한 cellulase 생산은 효소의 특이적 활성보다는 생산량에 치중해 다량의 cellulase를 생성하는 기주를 분리하고 개발하여 유전자 변형 기주를 통해 cellulase 생산량을 극대화하는데 치중하고 있다. 가장 대표적인 사례로 진균류인 *Trichoderma reesei*를 이용한 cellulase 개발인데, 현재 가장 산업적인 단계까지 개발하고 활용하고 있다. 덴마크 Novozymes사는 다양한 전분의 원료에 따라서 최적의 효소를 개발하여 2005년에는 기존의 5달러에 이르던 에탄올 갠런 당 효소비용을 10~18 센트까지 낮출 수 있는 옥수수 전분 분해효소시스템을 개발하였고, 최근 곡식의 전분에서 여러 단계의 공정을 거치지 않고 곧바로 에탄올을 만들어 낼 수 있는 효소 시스템을 개발하는 등 바이오연료관련 효소 시장의 주도권을 장악하고 있다.

또한 복합체를 이루지 않고 각각의 독립된 cellulase를 생성하는 호기성 진균주의 경우 여러 단계의 전처리 과정을 거친 비결정질 섬유소를 사용해야 하는 단점이 있어 이를 극복하기 위

해 최근에는 유전자 조작이 간편하고 바이오매스 분해 효율이 높은 혐기성 세균을 이용한 거대 세포의 cellulase 효소 복합체인 셀룰로솜(cellulosome)에 대한 연구가 주목을 받고 있다.

2.4. 발효과정(Fermentation)

당화과정을 거친 고분자 탄수화물인 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스는 포도당과 xylose와 같은 단당의 형태로 분해되게 된다. 이들 단당들은 효모와 다른 미생물들에 의하여 에탄올로 전환되는 발효과정을 거친다. 미생물을 이용한 당 발효는 이미 주류산업이나 공업용 알코올 생산 산업에서 사용되고 있는 당에서 에탄올로의 전환과 같은 일반적인 방법을 이용한다. 다만 바이오매스에 포함된 셀룰로오스 구성물질 6탄당인 포도당과 헤미셀룰로오스의 주요 5탄당인 xylose를 동시에 높은 수율로 에탄올까지 전환하는 야생 미생물이 현재까지 존재하지 않기 때문에, 유전자조작을 통하여 이를 이루려는 연구들이 진행되고 있다. 대표적인 예로 5탄당 발효에 관여하는 효소(xylose reductase, xylitol dehydrogenase)의 유전자들을 *Pichia* 속에서 분

리하여 *Saccharomyces cerevisiae*나 *Zymomonas mobilis* 발현시키거나 *Zymomonas mobilis*로부터 에탄올 증대를 위해 pyruvate decarboxylase나 alcohol dehydrogenase 효소의 유전자를 대장균에 발현시키는 방법 등이 그것이다. 하지만 경우에 따라 유전자 조합균들이 에탄올에 대한 내성이 낮다든지, 전처리과정에서 생산되는 아세트산, 리그닌분해물, fufural 화합물과 같은 발효저해물질에 약하거나 또는 발효에 걸리는 시간이 긴 것과 같은 아직도 개선해야 할 점들이 많이 남아있다.

2.5. 분별증류과정(separation / distillation)

증류과정은 끓는점이 각기 다른 화학물질들을 가열하여 낮은 온도에서 끓는 화학물질을 먼저 증기화 하고 이를 응축시켜 혼합물을 분리해내는 과정이다. 에탄올발효 용액내의 에탄올이 물에 비해 끓는점이 낮으므로 증류과정을 통해 에탄올을 분리해 낼 수 있다. 일반적으로 증류과정에 사용되는 에너지 경제성을 담보하기 위해서는 적어도 최종발효단계의 에탄올 농도가 4%(w/v) 이상이 되어야 한다고 알려져 있다. 에탄올 농도를 높이기 위해서는 헤미셀룰로오스에서 유래한 당들의 에탄올전환이 필요하다. 예를 들어 이를 포함시키지 않을 경우 바이오매스가 약 40%의 셀룰로오스를 포함하고 있다고 가정하면 초기당화과정에 바이오매스의 농도가 건량기준으로 약 20% 이상을 포함하여야 하고 당화수율과 발효효율이 90% 이상을 유

지하여야 한다. 이러한 수준의 효율은 초기 당화 과정에 10% 이상의 바이오매스를 포함할 경우 유리수가 적어 교반이 쉽지 않고, 바이오매스 자체의 효소분해 수율도 높지 않아 쉽게 도달할 수 있는 목표가 아니다. 하지만 헤미셀룰로오스를 이용하게 되면 초기 발효할 수 있는 당 농도가 높아지게 되므로 결과적으로 에탄올의 농도를 높일 수 있어 증류과정의 에너지 경제성을 가질 수 있는 에탄올 생산을 기대할 수 있다. 이외에 고려해야 할 점으로는 증류과정에 도달하는 바이오매스 발효용액에는 전분이나 설탕을 이용한 에탄올 생산과정에 비하여 상대적으로 회분의 함량이 높기 때문에 파이프 내에 침전물이 남을 수 있는데 이 물질이 파이프 내면 벽에 쌓이게 되면 열전달을 방해하여 궁극적으로 공정수율을 낮추게 됨으로 증류를 시작하기 전에 이를 낮추기 위한 노력이 필요하다. 에탄올의 경우 96%(v/v)까지는 증류과정을 통해 생산될 수 있으나 그 이상의 농도의 에탄올 생산을 원할 경우는 molecular sieve나 벤젠과 같은 분리첨가제(material separation agent)를 사용하여 더 높은 농도로 올릴 수 있다.

2.6. 바이오 화학원료 생산 기술(Biorefinery)

바이오 화학원료 생산 기술은 바이오 정제 기술로도 불리며, 당질계, 전분질계, 셀룰로오스계 작물 및 폐기물 등을 원료로 사용한다. 당화공정을 통해 원료로부터 포도당, 과당, 맥아당, 갈락토즈, 만노즈, 아라비노즈 등과 같은 단당류

와 이당류를 생성하고, 이를 발효시켜 에탄올, 부탄올, 아세톤과 같은 연료와 젃산, 숙신산 등의 화학원료를 생산한다. 앞에서 언급한 바이오매스 자원은 화학원료로 만들 수 있을 뿐만 아니라 전력과 열원을 생산하는 바이오파워, 생분해성 플라스틱, 천연폴리머 등 바이오상품의 원료가 되기도한다. 화학원료 생산 기술을 이용한 제품 중 세계적으로 가장 시장성이 높은 제품은 자동차 연료로 쓰이는 바이오에탄올과 젃산, 초산, 아세톤, 부탄올 등의 화학원료 제품이다. 수송용 바이오에탄올은 엔진효율이 높고 공해물질의 배출량이 적은 장점을 가진 반면 가격이 비싸고, 국내에서는 자체 원료 생산이 경제

성이 없어, 원료 공급이 제한적이라는 단점을 갖고 있다. 독일의 BASF사는 에탄올을 원료로 다양한 화학제품 생산의 플랫폼을 작성해 놓고 에틸렌·부타디엔 등의 기술개발을 진행하고 있으며, 최근에 미국 Dow사는 브라질의 에탄올 회사를 인수하여 에틸렌 제조로부터 폴리에틸렌 공장건설 계획을 발표하였다(그림 4).

2.7. 미국 에너지부(US-DOE)의 기술 개발 계획

이른바 에너지 작물은 최근 진보된 과학 기술을 통해 새롭게 탄생되고 있다. 미국의 수송용 에너지의 30%를 바이오에너지로 대체하려

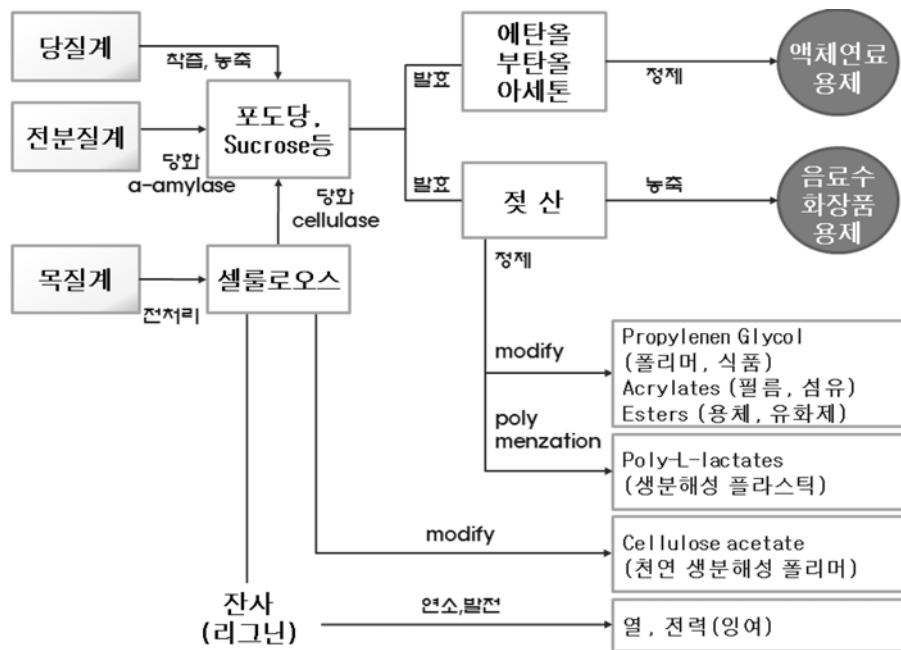


그림 4. 바이오 정제 기술에 의한 생성물과 공정의 개념도
(출처 : 한국과학기술연구원, 2002)

표 1. 미국 DOE의 바이오에너지 개발 관련 로드맵

연구 시기 (0~5년)	기술발달 단계 (5~10년)	Systems 병합단계 (10~15년)
<p>보유 자원과 초기 에너지작물 개발 (E-Crops): 바이오매스 자원 확충 및 이용성 향상</p> <ul style="list-style-type: none"> 조기 E-crop 개발 Cellulose 함량의 다양성 생산 단가 절감 기술개발 <p>원료(Feedstocks): E-crop의 지속가능성 추구</p> <ul style="list-style-type: none"> 토양생태계, 시비조건 구명 E-crop의 모델 시스템 개발 유전자, 본질, E-crop 하부조직 제어 기작 구명 - 세포벽의 조절 및 재구성 - 셀룰로오스 분해(deconstruction)와 발효 관계 <p>원료 전처리(Feedstock Deconstruction)</p> <ul style="list-style-type: none"> 전처리 비용 절감 효소-리그노셀룰로오스 관계 - 세포벽 recalcitrance 중성 효소 한계 조사 셀룰로오스 분해 가능 기관 및 전 대사 과정에 유전자 형질전환 시스템 개발 <p>에탄올 발효와 회수</p> <ul style="list-style-type: none"> 셀룰로오스 분해 모든 당을 이용하는 연구 스트레스반응과 억제물 연구 - 고수율의 알코올과 당농도 구명 제어와 조절의 이해 다양성을 지닌 발효미생물의 탐색 	<p>분자기술 배치</p> <ul style="list-style-type: none"> 10억 톤 이상의 바이오매스를 생산 가능한 신규에너지 작물 모들의 개선 및 단순화 systems biology, 화학기술 이용 합리적 systems의 디자인 <p>원료(Feedstocks): 에너지 작물의 이해</p> <ul style="list-style-type: none"> E-crops의 재배 저리그닌, 독성 저해제의 감소 및 당의 증가 수율과 토양의 지속성 증가 <p>셀룰로오스 분해(Deconstruction)</p> <ul style="list-style-type: none"> 효소 개량(rate, specificity) - 보다 넓은 기질특이성 - 억제 감소 - E-crop에 맞춤형 효소기질과의 관련성을 제어하고 진단하기 위한 기술개발 효소 개량 기술 <p>발효와 회수</p> <ul style="list-style-type: none"> C-5 and C-6 당의 동시발효 신규 균주(multiple) 개발 - Stress 저항성 - 고온 균주 완전 제어 기술 신속한 분석과 조절 기술 셀룰로오스 분해 및 고생산 알코올 균주 개발 	<p>병합 및 강화: 경제성 있는 기술군간의 융합</p> <ul style="list-style-type: none"> 통합된 bioenergy 시스템 다양한 분야에서 개발된 기술들 융합 기술의 개량(Buildout) <p>전과정 동시 제어가 가능한 Biofuel Systems(Biome-E Crop 과정)</p> <ul style="list-style-type: none"> 전과정 제어가 가능하고 지역에서 개발 기술의 System화 조성물이 향상된 E-crops 식물생명공학용 kit 기술 개발 biofuel systems 통합과정 - 셀룰로오스분해 효소 mix 개량 - 미생물 대사 공학 - Stress와 저항성 - 전 system의 제어 신속한 분석과 진단을 위한 kit

(출처: Breaking the Biological Barriers to Cellulosic Ethanol, A Joint Research Agenda, DOE, 2008 번역)

는 원대한 목표 하에 US DOE에서는 2030년까지 3단계의 기술개발 전략을 가지고 있다(표 1). 1단계(5년 이내) 개발 전략으로는 연구단계이다. 즉 바이오매스의 전처리 기술, 잔사처리, 1세대 에너지 작물 개발, 기타 액체 연료 개발

에 중점을 두고 있다. 이를 위해서 전처리 비용 절감 연구, 당화효소의 활성화와 안전성 향상 연구, 셀룰로오스 유래 당을 이용한 발효기술 개발 등 기본적 연구가 여기에 해당된다. 2단계(5~10년 이내)는 기술의 배치 단계이다.

당화에 적합한 에너지 식물의 창출, 유전공학적으로 재구성된 효소 친환경적이고 경제적인 기술개발 등이 여기에 포함된다. 2단계에서는 공정 등 기술의 병합이 시작된다.

3단계(15년 이내)는 기술의 통합단계이다. 이 시기의 바이오에너지 시스템은 생태환경을 위해 특별히 창출된 에너지 작물, 전처리기술, 당화효소, 발효공정이 잘 조화된 것을 의미한다. 이 시기는 식물과 미생물의 복잡한 통합공정이 완성되어 바이오에탄올 생산 효율을 증대시킬 것이다. 또한 이들과 연관한 모든 공정이 biofinery 공정으로 발전하게 될 것이다.

2.8. 국내의 바이오에너지 개발 현황

우리나라는 현재 온실가스 배출량 세계 10위 국가이고 국내총생산(GDP) 12위에 해당되는 국가이나 교토의정서 작성 당시 개발도상국으로 인정받아 1차 감축 의무대상국에 포함되지 않았다. 그러나 2013~2017년에 시행될 2차 온실가스 의무감축 국가에 포함될 가능성이 매우 높다고 할 수 있다. 이에 정부는 우리나라 온실가스의 83%가 화석 에너지 사용의 결과로 배출되고 있는 사정을 감안해, 현재 전체 에너지

사용량 가운데 2%대에 머물고 있는 신재생에너지 비중을 2030년까지 9%대로 늘리고 43%인 석유 의존도는 2030년까지 35%로 낮추기로 하였다. 또한 정부는 2007년 9월에 이를 위해 현재 0.5%의 혼합비율을 허용하고 있는 바이오디젤을 단계적으로 높여서 2012년까지 3%로 늘릴 계획을 발표하였다.

정부는 2011년까지 695억을 지원하여 국내에 탄소배출권을 사고팔 수 있는 탄소시장을 개설할 계획이다. 이로써 지구온난화의 주범인 온실가스를 줄이는 한편 환경친화적인 에너지원을 개발하여 세계 친환경 시장을 선점하겠다는 계획을 가지고 있다.

식품분야 활용방안

1. 바이오에탄올 원료

지금까지 가장 대표적인 바이오에너지인 바이오에탄올은 현재 식량자원을 이용하여 생산하고 있다. 바이오에탄올의 원료는 전분질계(starch based)와 당질계(Sugar-based), 그리고 셀룰로오스계(Ligno cellulosic)이 있다(표 2). 세계

표 2. 바이오에탄올 생산을 위한 원료

전분질계 (Starch-based)	곡류 서류	옥수수(미국, 중국), 쌀(한국, 동남아), 보리(EU), 밀(EU, 러시아) 카사바(동남아), 고구마, 감자(EU)
당질계(Sugar based)		사탕수수(브라질), 사탕무, sweet sorghum(인도)
셀룰로오스계(Ligno cellulosic)		벼짚, 버드나무, 포플러, 유칼립투스, switch grass

(출처: 최기욱, 2006)

표 3. 바이오에탄올 원료용 전분작물의 에탄올 생산량

작물	단수 (ton/ha)	에탄올 수율 (ton/ha)	에탄올 생산량	
			liter/ha	ton/ha
고구마	35	129	5,515	3.9
옥수수	8	375	3,000	2.6
감자	18	83	1,494	1.3
맥류	5	280	1,400	1.2

(출처: 농촌진흥청, 2005)

적으로 사탕수수, 옥수수, 카사바 등의 당질계와 전분질계 원료로부터 생산한다. 벚지, 옥수수대, 목재 등의 셀룰로오스계 원료로부터 에탄올 생산을 시도하고 있으나, 아직 상용화되지 않고 있다. 미국의 경우, 바이오에탄올 생산의 90% 이상을 옥수수에 의존하여 생산하고 있으며, EU의 경우도 프랑스, 스페인, 러시아 등을 중심으로 밀, 보리, 사탕무 등의 전분질계 또는 당질계로부터 에탄올을 생산하고 있다. 브라질은 사탕수수를 이용하여 바이오 에탄올을 생산한다. 중국의 경우는 동북지방의 옥수수, 남부지방의 카사바, 중남부 지방의 사탕수수를 원료로 이루어지고 있으며 아직은 옥수수의 비중이 가장 높다.

국내에서 재배 가능한 바이오에탄올 작물로는 고구마, 옥수수, 감자, 맥류(쌀보리, 겉보리)가 있으며, 각 작물의 에탄올 생산량은 표 3과 같다.

우리나라는 실제 고구마, 옥수수, 감자 등을 이용해 에탄올을 생산하고 있지만 93%가 음료용이다. 이마저도 생산량이 부족해 에탄올 생산업자들은 타피오카나 조주정(정제되지 않은 알

코올, 정제 후 음료로 사용)을 수입하고 있기 때문에, 현재 생산되는 에탄올의 일부를 연료용으로 돌리기는 어려울 것으로 보인다. E5(휘발유 95%+ 바이오에탄올 5%) 전면보급을 가정했을 때 필요한 바이오에탄올의 양은 55만 톤으로, 부피로 따지면 약 64만 kl이다. 이는 2005년 국내 주정업체의 에탄올 생산량인 약 30만 kl를 모두 사용해도 부족한 양이다 국내에서 원료를 조달하려면 생산량이 대폭 늘어나야 한다. 현재 고구마가 가장 에탄올 생산량이 많은 작물로 평가되고 있지만, 정상 시장가격 기준으로 고구마를 사용해 바이오에탄올을 생산할 경우 생산 원가는 약 2,500원/L 내외로, 정부의 보조금 지원 없이 보급이 불가능하다.

세계 각국에서 바이오에너지 작물 개발에 박차를 가하고 있지만, 만족할만한 수종을 발굴하기는 쉽지 않다. 현재 상황에서는 쉽게 당화와 발효가 되는 재생 가능한 바이오매스를 찾는 것이 필요하다. 목질계 섬유소는 리그닌 성분 때문에 쉽게 가수분해 되지 않기 때문에 공정의 어려움이 있어 아직 효율적인 기술의 개발이 필요한 실정이다. 전분은 효소에 의해서 쉽

게 가수분해되며, 효소들은 미생물에 의해서 생산된다. 전분은 비교적 저렴한 바이오 원료로서 바이오에탄올을 생산하기 위한 원료로서 경쟁력이 있다.

1.1. 당질계 자원으로부터 바이오에탄올 생산

사탕수수, 사탕무 등의 당질계 바이오매스는 원래 설탕의 원료로 재배되어 오던 것으로, 1세대 바이오에탄올 원료이다. 브라질을 중심으로 널리 보급되어 있으나 역시 옥수수처럼 식량가격에 영향을 미친다는 문제가 있다.

세계 최대 바이오에탄올 생산기업인 브라질의 코산사는 하루 2만 4,000톤의 사탕수수료 125만 리터의 알코올을 생산한다. 사탕수수를 수확하여 세척·분쇄·분삭과정을 거치면 조청과 같은 끈적한 액체 형태로 바뀐다. 발효와 정제를 거치면 바이오에탄올이 완성되는데 코산사의 경우 72시간 정도면 바이오에탄올을 만들 수 있다고 한다. 이 과정에서 나온 잎 등의 찌꺼기는 소각해 전력을 생산하고 잔여액은 비료로 활용한다. 브라질에서 에탄올 생산을 위한 사탕수수 재배면적은 전체 경작지의 0.5%에 불과한 만큼 식량위기를 부추긴다는 주장과 그렇지 않다는 주장이 맞서고 있다. 만약 브라질 전체 경작지의 13% 정도만 에탄올 생산에 활용해도 연간 7,000억 리터의 에탄올을 추출해 사우디아라비아의 원유 생산량을 앞설 것이라고 보고하고 있다.

1.2. 전분질계 자원으로부터 바이오에탄올 생산

전분D-글루코오스(포도당)가 축합하여 생긴 다당류를 포함하고 있는 식물로, 크게 곡류(Cereal Starch)와 서류(Root starch)로 구분할 수 있다. 곡류로는 옥수수, 쌀, 보리, 밀 등이 있고, 서류로는 고구마, 감자를 들 수 있다. 옥수수가 가장 많이 쓰이고 있으나 2006년 동안 가격이 크게 상승하여 문제가 된 바 있다. 카사바(Cassava)는 단위 면적 당 생산량이 높아 최근 많은 기대를 모으고 있으며, 국내 기업들이 동남아에 진출하여 대규모 재배를 추진하고 있다.

옥수수 외 쌀, 보리와 같은 곡류를 이용하여 에탄올을 생산할 수 있다. 식품원료를 분쇄하고, 원료와 증류수를 혼합하여 액화효소를 첨가하여 90°C에서 액화시킨 후, 60°C에서 복합 당화효소를 첨가하여 1시간 당화과정 처리 후, 32°C에서 활성건조효모를 넣어 배양하면 에탄올이 생산된다. 이때 발효조건 또한 중요한데 효모의 성장을 위해서는 물, 발효 가능한 탄소원, 세포막형성을 위한 산소와 지질, 질소원, 비타민 같은 성장인자, 무기이온들이 필요하다. 또한 각 원료에서 전분 함량은 에탄올 생산량에 영향을 주며, 전분 함량이 높을수록 에탄올 생산이 증가하는 것으로 알려져 있다. 쌀과 보리의 경우 단백질 함량이 낮을수록 에탄올 생산이 많이 되는 것으로 보고되고 있으며, 조섬유의 경우는 단백질 함량과 반대로 함량이 높을수록 에탄올 생산성이 높다고 하였다. 현미의 경우, 회분 함량이 높을수록 에탄올 생산이 낮

게 나타나며, 고구마의 경우는 수분 함량이 높을수록 에탄올 생산량은 낮아지는 것으로 분석되었다. 건조 전 작물 중량을 기준으로 할 때 가장 높은 에탄올 생산수율은 현미이며, 그 다음 옥수수 그리고 보리의 순이었으며, 수분함량이 높은 고구마의 경우 전분함량이 상대적으로 낮아 에탄올 생산량이 낮게 보고되고 있다. 건조 후 작물 중량 기준 시에는 건미 고구마가 530.6 l/ton으로 가장 높았고, 그 다음이 다산 현미 등의 현미, 정미 및 바이오미의 고구마, 옥수수, 보리의 순으로 생산된다고 한다. 단위면적당 에탄올 생산량 성적을 살펴보면 현미가 평균 2560.0 l/ha, 쌀보리가 평균 1523.6 l/ha, 옥수수가 평균 2992.3 l/ha, 고구마가 평균 4169.1 l/ha이며, 이중에서 건미 고구마가 5115.7 l/ha로 가장 높은 단위면적당 에탄올 생산량을 보였다고 한다.

고구마와 감자에 있는 전분을 이용한 알코올 발효인데, 현재 감자와 고구마의 알코올 발효는 대부분 증자 과정을 거쳐 효소 처리를 하는 복잡한 과정을 거쳐 공정상의 에너지 절감을 위해 많은 노력을 하고 있으며, 수율 또한 낮아 알코올 발효에 있어 문제점이 지적되고 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 증자를 하지 않은 감자와 고구마를 기질로 알코올 발효력이 우수한 균주의 개발과 개량이 필수적으로 요구되고 있다.

알코올 발효 균주에 관한 개발은 glucoamylase를 분비하는 효모의 개발, 연료용 알코올 균주 개발, 고농도 알코올 내성 균주의 개발 등이 감

식초 제조를 위하여 알코올 발효력과 탄닌 내성이 우수한 효모를 감과실에서 분리하여 그 특성에 관한 연구 등 다양한 분야의 활용을 위한 균주의 분리 동정에 관한 연구가 되어 있다.

1.3. 셀룰로오스계 자원으로부터 바이오에탄올 생산

목질계 바이오매스라고도 하며, 농업 부산물(짚)과 나무(버드나무, 잡종 포플라, 유칼립투스), 키 큰 다년생 식물(switch grass, miscanthus) 등이 이에 속한다. 옥수수나 사탕수수와 달리 비식용이고 값이 싸며, 잠재적인 자원양이 많아 차세대 원료로서 많은 기대를 받고 있다. 하지만 전분질계에 비해 조직이 매우 견고해 에탄올 생산까지는 여러 단계의 공정을 거쳐야 하므로 복잡한 기술을 필요로 한다. 미국과 유럽은 이미 셀룰로오스계 바이오매스의 상용화를 위해 기술개발에 총력을 기울이고 있다.

1.4. 유지작물로부터 바이오디젤 생산

식물성 기름으로 석유 대체가 가능하게 되었다. 유지작물은 주로 식용 혹은 관상용으로 재배 되었지만 오늘날 연료용 바이오매스로 거듭나고 있다. 식물성 기름을 알코올과 반응시켜 만든 '바이오디젤(Biodiesel)'이 그 주인공이다. 바이오디젤은 '식물성유지와 알코올을 반응시켜 만든 지방산메틸에스테르(fatty acid methyl esters)로서 순도가 96.5% 이상인 것'을 말한다(산업

표 4. 바이오디젤 생산용 작물 원료

구분	작물
유지작물	유채(유럽), 대두(미국), 해바라기, 야자(말레이시아), 자트로파(인도네시아, 인도), 피마자(중국), 옥수수, 코코넛, 땅콩, 면화, 겨자 등
기타	폐식용유

(출처: 이유진 등, 바이오에너지 희망을 찾아서, 현황과 전망, 2007)

자원부 고시 제2005-55호). 말 그대로 경유 디젤을 대체하여 사용할 수 있으며 보통은 경유에 일정비율 섞어서 사용한다. 혼합비율에 따라 바이오디젤 20%에 경유 80%를 섞은 것은 BD20이라고 하며 바이오디젤 5%에 경유 95%를 섞은 것을 BD5라 한다. 해외에서는 바이오디젤 전용 자동차 엔진을 사용하여 바이오디젤 100%(BD100)로 사용하기도 한다.

바이오디젤의 원료로 사용될 수 있는 유지작물은 매우 다양하며, 지역마다 상황에 적합한 작물을 재배하고 있다. 편의상 식용작물과 비식용작물로 나눈다(표 4). 대부분의 식물성 기름은 식용가능하나 특성에 따라 공업용으로도 더 많이 사용된다. 세계적으로 상용화 되어있는 것은 유채유나 해바라기유, 대두유 등으로 유럽에서는 유채를 미국에서는 대두유를 주로 사용한다. 하지만 식물성 기름을 이용할 경우 원료비의 비중이 총생산의 70~80%에 달해 폐식용유 바이오디젤기술이 생산되어 일부 적용되고 있다. 선진국에서는 이미 생산량을 위해 유전자조작 유지작물을 생산하는 한편 비유지작물에서도 바이오디젤을 생산하기 위해 기술을 개발하고 있다. BTL-Biodisel 같은 합성기술을 사용하면 셀룰로오즈계 바이오매스도 바이오디젤로 전

환할 수 있다.

우리나라에서 현재까지 사용된 바이오디젤 원료는 수입대두유와 폐식용유, 미강유부산물살겨 등이다. 수입대두유가 대부분을 차지하는데 이는 국내에서 얻을 수 있는 폐용유나 미강유 부산물에 비해 안정적인 공급이 가능하기 때문이다. 하지만 대두유는 전량 수입에 의존하므로 가격변동에 취약하여 원료의 다양화와 국산화가 시급하다.

바이오에탄올 생산의 문제점

1. 식량자원 부족

바이오 연료의 가장 큰 문제점은 에탄올을 추출하기 위해 곡물이나 사탕수수 등의 식량자원을 사용한다는 점이다. 고유가와 바이오 연료 수요 증가에 따라 곡물가 상승과 현물 투기 등으로 말미암아 식량 자급이 불가능한 제 3세계 국가들에 큰 경제적 충격을 주었다. 특히 주요 곡물 수출국인 미국에서 옥수수를 이용한 바이오 에탄올을 시판하기 시작하면서 문제는 심각해졌다. 옥수수는 제 3세계 국가들의 주식으로,

가축 사료 용도, 옥수수당 등 식품원료로 이용되는데 미국산 옥수수의 가격급등으로 세계 곡물시장은 일대 혼란에 빠졌다. 유엔 산하 식량농업기구(FAO)에 따르면 50 리터의 자동차 연료 탱크를 채우는 데 필요한 에탄올 생산에 들어가는 옥수수가 232 kg인데, 이는 어린이 1명이 1년간 살 수 있다고 한다.

미국은 5%의 대체 에너지를 생산하면서 30% 이상의 소비를 하는 것으로 알려져 있다. 미국은 2006년부터 2,500만 톤의 옥수수를 에탄올 청정(green) 에너지 생산에 투입하고 있으며, 2010년에는 6배가 증가할 것이라고 한다. 그 후 다시 2020년이 되면 미국만 3억 톤의 옥수수가 소요될 것이고, EU연합은 2억 톤, 그리고 중국은 5천만 톤이 필요할 것으로 전망하고 있다.

따라서 식량윤리와 에너지문제 해결이 가능한 현명한 방안이 요구된다.

우리나라와 같이 식량의 자급률이 낮은 국가는 특히 바이오에너지 개발에 신중할 필요가 있다. 우리나라는 쌀 자급률(95.3%), 보리(46.5%)를 제외하고는 식량원료의 자급률이 매우 낮은 실정이다.

2. 전처리 및 발효공정상의 문제점

바이오에탄올 생산을 위해 크게 식량자원인 당질과 전분질원료, 비식량자원인 셀룰로오스계 자원으로 나눌 수 있다. 당질과 전분질은 원료 자원 조달 및 윤리적 문제까지 안고 있으며, 셀룰로오스계 자원은 환경적, 경제적으로 큰 강점

을 가지고 있으나 기술적으로 극복해야 할 점들을 가지고 있다. 따라서 이를 해결하기 위한 R&D 투자가 요구된다. 또한 효율성 높은 효소 개발과 생산성 높은 미생물 균주 개발이 필요하다.

3. 원료자원의 안정적 조달 및 원료작물의 개발

바이오에너지 개발에 있어서 가장 큰 어려움 가운데 하나는 생산원료의 안정적 공급이라고 할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 국지적인 원료 공급처만을 감안하지 않고 전세계적인 네트워크를 구성해야만 할 것이다. 가장 이상적인 바이오에탄올 생산용 작물은 앞서 언급한 바와 같이 셀룰로오스계 원료이다. 즉 자원량이 많으면서, 재배, 수집 등의 비용이 저렴한 수종, 나아가 셀룰로오스 함량은 높고, 리그닌 함량은 낮은 수종의 개발이 필요한 것이다.

기대 효과 및 전망

한정된 화석에너지의 고갈 및 전 지구적 환경문제 해결에 대한 관심이 고조됨에 따라 산업 BT(White biotechnology) 기술개발을 통한 청정에너지 및 신·재생에너지 생산은 메가트렌드가 되었다. 이에 세계 각국은 기존 화석연료를 대체 가능하며 환경오염 배출 물질이 적은 바이오연료 생산 기술개발 및 보급을 위한

적극 지원에 나서고 있다. 우리나라도 2002년 국가에너지기본계획에 의한 정부의 바이오에너지 이용 목표는 2011년 105만 toe로 전체 에너지 사용량의 0.47%를 충당하는 것으로 계획을 잡고 있지만 선진국에 비해 매우 낮은 수준이다.

우리나라의 바이오에너지 개발은 매우 큰 약점을 안고 있는 것이 사실이다. 그러나 선진국들도 마찬가지로 바이오에너지 개발이 화석연료에 비해 경제적 타당성이 부족한 것으로 보고되고 있지만 엄청난 노력을 기울이고 있다. 이것은 바이오에너지 개발이 눈앞에 보이는 경제적 이득 외에도 각종 사회적 편익이 존재하기 때문이다. 우리나라가 바이오에너지개발 수행 시 얻어지는 이점은 다음과 같다.

첫째, 청정에너지 기술개발로 원천기술을 선점할 수 있다. 전통적으로 강점 기술인 효소 분해 및 발효공정 등은 바이오에너지 생산에 필수적인 기술로 이를 기반으로 핵심기술 확보 가능성이 비교적 높다. 그리고 청정에너지개발을 위한 융복합 기술 선점으로 원천기술의 확보가 가능하다. 또한 우리나라 고유의 생물종 발굴 및 생물자원 확보 기술을 통한 에너지 경쟁력을 확보할 수 있다.

둘째, 에너지 안보 강화에 이바지 할 수 있다. 에너지 보유국으로서의 국가 안보 및 국가적 위상 향상 및 삶의 질 향상에 기여 할 수 있다. 산업 폐기물 등의 바이오매스를 이용함으로써 환경 개선 및 이산화탄소 절감 효과 등으로 삶의 질 향상을 기대할 수 있다.

셋째, 대체에너지 효과이다. 우리나라는 연간

2천만 톤의 경유 생산용 원유(8조 2천억 원에 해당)를 수입하고 있는데, 이의 20% 정도를 바이오디젤로 대체할 경우 약 1조 6천억 원의 외화 절감효과가 있다. 그리고 폐자원의 자원화를 기할 수 있다.

넷째, 농촌경제 향상에 기여할 수 있다. FTA, WTO의 환경적 요인 및 농촌 인구 감소 등으로 증가되는 유휴경지에 다양한 바이오에너지 작물 재배를 통한 농가 소득 증대가 기대된다.

다섯째, 식량원료 생산에서 식품가공 및 폐자원의 발생 및 이것의 재이용에 이르는 순환시스템이 확립될 수 있다. 바이오에너지 개발은 곡물가 급증, 식량자원 부족에 따른 윤리 문제 등을 초래하였지만 자원의 효율적 활용면에서는 긍정적일 수 있다. 그러나 궁극적으로는 식량자원 활용보다는 비식용 셀룰로오스계 자원을 활용하여 바이오에너지 개발이 수행될 것이다.

참고문헌

1. 김광수, 김용범, 장영석, 방진기, 바이오에너지 원료작물 생산 및 연구동향, 식물생명공학회지, **34**(2), 103-109, 2007
2. 산업자원부, 해외 바이오에탄올의 도입 타당성 분석 연구, 2005
3. 이경은, 이재연, 김근, 작물의 성분 함량이 바이오에탄올 생산에 미치는 영향, 한국작물학회지, **53**(3), 339-346, 2008
4. 이유진, 이승지, 김희선, 바이오에너지 희망을

- 찾아서 - 현황과 전망. 한국지속가능발전센터 발행, 62-94, 2007
5. 이진석, 바이오매스 에너지기술의 현황과 전망, 가스연맹 에너지관리공단.신·재생에너지 홈페이지(<http://www.knrec.or.kr>), 50-57, 2004
 6. 정장호, 셀룰로식 (Cellulosic) 에탄올 생산, 한국생물공학회지, **23**(1), 1-7, 2008
 7. 정재훈, 권기석, 장한수, 수송용 바이오에너지 개발과 미래, Kor. J. Microbiol Biotechnol, **36**(1), 1-5, 2008
 8. 조우석, 정유희, 김보경, 서수정, 고완수, 최성화, 신재생 대안 에너지로서의 셀룰로스 에탄올, 식물생명공학회지, **34**(2), 111-118, 2007
 9. I del Campo, I Alegriaa, M Zazpea, M Echeverriaa, I Echeverriaa, Diluted acid hydrolysis pretreatment of agri-food wastes for bioethanol production, Industrial Crops and Products, **24**(3), 214-221, 2006
 10. US DOE Breaking the Biological Barriers to Cellulosic Ethanol: A Joint Research Agenda. A Research Roadmap Resulting from the Biomass to Biofuels Workshop, December 7-9, Rockville, Maryland, 2005

양재경 농학박사

- 소속 경상대학교 환경산림과학부
- 전문분야 1) 수목 추출물의 식약 및 의료소재화 연구
 2) 임산약용버섯의 재배 기술 연구 및 기능성 화합물 생산 연구
 3) 목질바이오매스로부터 바이오에탄올 생산 기술 연구
- E-mail jkyang@gnu.ac.kr
- TEL 055-751-5504

최명석 농학박사

- 소속 경상대학교 환경산림과학부
- 전문분야 1) 산림자원 식물의 이차대사산물 생합성 연구
 2) 유용 산림자원 식물의 탐색 및 대량 보급
 3) 바이오에너지 연구
- E-mail mschoi@gnu.ac.kr
- TEL 055-751-5493