

신재생 대안 에너지로서의 셀룰로스 에탄올

조우석, 정유희, 김보경, 서수정, 고완수, 최성화*
서울대학교 자연과학대학 생명과학부

Cellulosic Ethanol as Renewable Alternative Fuel

Woo Suk Cho, Yuhee Chung, Bo Kyung Kim, Su Jeoung Suh, Wan Soo Koh, and Sunghwa Choe^{*}

School of Biological Sciences, College of Natural Sciences, Seoul National University, Seoul 151-747, Korea

ABSTRACT Global warming crisis due primarily to continued green house gas emission requires impending change to renewable alternative energy than continuously depending on exhausting fossil fuels. Bioenergy including biodiesel and bioethanol are considered good alternatives because of their renewable and sustainable nature. Bioethanol is currently being produced by using sucrose from sugar beet, grain starches or lignocellulosic biomass as sources of ethanol fermentation. However, grain production requires significant amount of fossil fuel inputs during agricultural practices, which means less competitive in reducing the level of green house gas emission. By contrast, cellulosic bioethanol can use naturally-growing, not-for-food biomass as a source of ethanol fermentation. In this respect, cellulosic ethanol than grain starch ethanol is considered a more appropriate as a alternative renewable energy. However, commercialization of cellulosic ethanol depends heavily on technology development. Processes such as securing enough biomass optimized for economic processing, pretreatment technology for better access of polymer-hydrolyzing enzymes, saccharification of recalcitrant lignocellulosic materials, and simultaneous fermentation of different sugars including 6-carbon glucose as well as 5-carbon xylose or arabinose waits for greater improvement in technologies. Although it seems to be a long way to go until commercialization, it should broadly benefit farmers with novel source of income, environment with greener and reduced level of global warming, and national economy with increased energy security. Mission-oriented strategies for cellulosic ethanol development participated by government funding agency and different disciplines of sciences and technologies should certainly open up a new era of renewable energy.

서 론

최근 영국에서 발간된 “기후변화의 경제학 (Stem Review)” 보고서에 따르면 인간에 의해 대기 중에 방출되는 온실가스의 증가 경향성은 매우 심각한 수준인 것으로 드러났다. 보고서에 의하면 산업혁명 이전의 이산화탄소 농도가 280 ppm 이었던 것에 비해 현재는 400 ppm을 넘어섰으며 만일 현재의 수준으로 계속 온실가스를 방출한다면 2035년경에는

600 ppm에 도달할 것으로 내다보고 있다. 이는 돌이킬 수 없는 환경 문제를 야기해 해수면 상승과 해일, 폭풍 등 심각한 자연재해 문제를 초래할 것이라고 경고 하고 있다. 따라서 장기적인 기후 안정화를 위해서는 이산화탄소 배출량의 억제가 필요하며 이를 위해서는 지금 즉시 그 양을 현재의 80% 수준으로 낮춰야 한다고 주장하고 있다. 대기 중에 방출되는 이산화탄소는 인류에 의한 화석연료의 지속적인 소비에서 원인을 찾을 수 있다. 수백만 년 전 광합성 과정을 통해 고정된 탄소는 화석형태로 지하에 격리되어 있는데, 인류가 이를 채굴해 방출하기 때문에 탄소 농도의 순증가로 귀결

*Corresponding author Tel 02-880-6691 Fax 02-872-1993
E-mail: shchoe@snu.ac.kr

되는 것이다. 이러한 문제를 해결하는 방안 중의 하나는 에너지원을 재생 가능한 형태로 바꾸는 것이다. 재생 가능한 에너지원으로서 식물의 바이오매스 유래 셀룰로스 에탄올이 우선 고려되고 있다. 셀룰로스 에탄올의 사용은 “탄소 중립적 (carbon-neutral)”이다. 즉, 대기 중에 존재하는 탄소를 흡수하여 생성되는 식물의 바이오매스가 산화과정을 통해 다시 방출되는 순환구조이기 때문에 탄소의 순 증가율은 거의 0에 근접하는 것이다 (그림 1).

셀룰로스 에탄올은 식물 세포벽의 주성분인 셀룰로스를 발효해서 생산되는 에탄올을 일컫는 말이다. 셀룰로스 에탄올은 화학 구조상 쌀, 고구마 등 녹말의 발효에 의해 생산되는 에탄올과 동일하지만 당화 과정에서 특이적 효소가 사용된다면 면에서 차이점을 보인다. 셀룰로스 에탄올에 대한 관심은 전술한 바와 같이 비교적 최근에 증가되었으나 기초과학적인 연구는 미국을 비롯한 여러 나라에서 오래 동안 지속되어 왔다. 미국 에너지성 (US DOE 2006)의 연구결과에 의하면 기존의 화석 에너지의 일부를 셀룰로스 에탄올로 대체할 경우 동일한 에너지양에 해당하는 가솔린에 비해 온실가스 방출을 85%까지 줄일 수 있다고 한다 (US DOE 2006) (그림 2). 이에 비해 전분으로부터 생산되는 당질계 에탄올은 온실가스 배출 감소량이 18-29%로 낮은데 (Schubert 2006). 이는 당질계 에탄올을 생산할 경우 원료가 되는 곡물의 재배 및 수확과정에서 농업용수, 비료, 농약의 형태로 많은 화석 에너지가 소비되기 때문이다. 또한, 미국의 조지 부시 대통령이 2006년 국정 연설에서 바이오에탄올 개발 계획을 발표한 후 미국의 옥수수 가격이 지난 10년 내 최고가로 급등하였다. 이와 같이 식용으로 사용되는 전분을 연료용으로 전환할 경우 사료 가격의 폭등이나 원재료를 생산하는 개발도상국의 식량 문제 등 여러

가지 부정적 효과가 발생할 수 있다. 이에 비해 셀룰로스 에탄올은 작물의 부산물 - 벚집, 옥수수대 등 - 이나 자연환경에서 자라는 식물을 주재료로 하기 때문에 큰 차이가 난다. 또한, 셀룰로스 에탄올의 가치와 관련하여 미국의 조지 부시 대통령은 2006년에 이어 2007년 국정연설에도 향후 2017년까지 미국의 에탄올 생산을 350억 갤런 (약 1300억 리터)으로 올리겠다고 발표했다. 미국에서 옥수수 발효에 의해 생산 가능한 에탄올 양이 150억 갤런임을 감안하면 셀룰로스 에탄올로 나머지 200억 갤런을 채우겠다는 의미로 해석되며, 이를 위해 총 36억불의 예산을 셀룰로스 에탄올 생산에 투자하겠다고 밝힌바 있다.

현재 바이오에탄올을 비롯한 여러 가지 대체에너지가 개발되고 있다. 바이오에탄올이 다른 대체에너지에 비해 갖는 중요성은 다음과 같이 정리할 수 있다. 먼저 바이오에탄올은 액체 연료라는 점이다. 즉, 현재 화석연료 수요의 상당한 부분을 점유하고 있는 자동차 등의 수송용 연료를 큰 기계적 결합 없이 바이오에탄올로 대체할 수 있다는 것이다. 또한, 셀룰로스에서 생산되는 바이오에탄올은 필수적으로 우리 농업을 기반으로 한다는 점이다. 한미 FTA의 타결에 따른 이행을 앞두고 가장 큰 타격을 받을 것으로 예상되는 우리나라 농업을 수익모델을 갖는 구조로 탈바꿈시킬 수 있기 때문이다. 즉, 각 지역 특성에 맞는 바이오에너지 작물을 재배하여 현장에서 직접 바이오에탄올을 생산케 하여 판매한다면 지금까지의 주곡 위주의 농업에서 벗어나 새로운 수입원이 창출될 수 있기 때문에 농촌 경제가 활성화될 것임은 자명하다 하겠다. 새로운 수익모델을 갖는 농업의 발전은 또한 지방자치 단체의 재정 차립도 제고에도 기여할 것이다. 무엇보다 셀룰로스 에탄올 개발 및 사용에 있어서 가장 큰 수혜자는 자연 생태

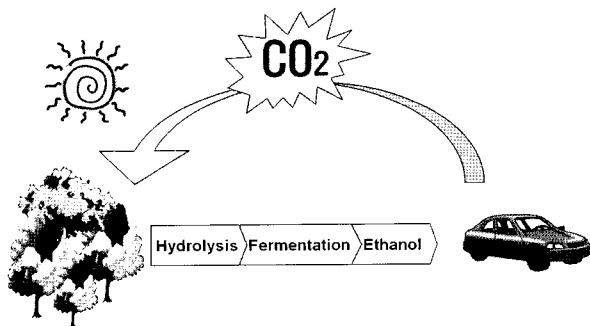


Figure 1. CO₂ circulation upon cellulosic ethanol utilization. CO₂ emitted by transportation vehicles is taken up by green plants through photosynthesis. The stored CO₂ as glucose polymer is hydrolyzed into glucose monomer before production of ethanol via yeast fermentation. Due to the circulating pattern of CO₂, the net increase of the green house gas in the atmosphere nearly equals to zero.

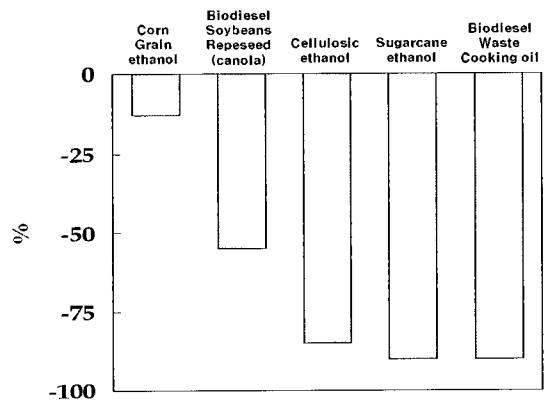


Figure 2. Difference in lowering effects of green house gas emission. Compared to the use of ethanol produced from corn grain, cellulosic ethanol dramatically decreases the net emission of green house gas by almost 80% (Source: Schubert, 2006).

환경일 것이다. 전술한 바와 같이 셀룰로스 에탄올을 사용할 경우 현재의 화석연료 사용에 비해 약 85%까지의 온실가스를 저감시킬 수 있을 뿐 아니라 기타 부수적인 환경 보전 효과가 있을 것으로 보인다. 즉, 셀룰로스 에탄올의 원재료가 되는 에너지 작물은 들녘의 녹화를 기본으로 한다. 보다 짙은 녹음을 가진 벌판은 새를 비롯한 여러 동물의 보금자리를 제공하여 동물 다양성과 보전에 기여할 것이다. 또한 다년생 에너지 작물을 광범위하게 재배할 경우 토양 유실 방지에도 큰 기여를 할 것이며 유기물의 유입에 따른 토양의 질을 높이는 데도 도움을 줄 것으로 보인다.

본 논문에서는 새로운 대체에너지로서 주목받고 있는 셀룰로스 에탄올의 특성과 생산 과정, 그리고 에탄올 생산의 효율을 높이는 데 필요한 식물 생명 공학적 개량 등을 살펴보고 우리나라에 있어서 셀룰로스 에탄올개발을 위해 고려할 사항들을 살펴보기로 하겠다.

바이오매스를 대량 생산하는 것이다. 두 번째 단계는 전처리 과정이다. 확보된 바이오매스는 물리 화학적인 과정을 통해 부피를 줄여 셀룰로스 섬유에 대한 효소의 접근성을 증대시키는 과정이다. 세번째는 전처리된 셀룰로스나 헤미셀룰로스를 분해할 수 있는 미생물을 접종하여 당화 및 에탄올 발효과정을 수행하는 것이다. 마지막으로 생산된 에탄올을 분별 증류하여 상품화하고 유통하는 과정이다. 위의 세 번째 과정은 난분해성 식물의 세포벽을 미생물 유래 효소를 통해 분해하는 과정으로 셀룰로스 에탄올 생산의 큰 이슈 중의 하나이다. 이 분야는 본 논문에서 자세히 다루지 않을 예정이다. 대신 기존의 총설 논문 (서진호와 진용수 2006)을 참조하기 바란다. 또한 물리화학적 전처리 과정 역시 정밀한 조절이 필요한 과정으로 산, 열수, 암모니아 등을 이용한 기술이 개발되어 사용되고 있다 (Kim and Lee 2005, Eggeman and Elander 2005).

본 론

셀룰로스 에탄올 생산의 공정

바이오매스 유래 에탄올 생산은 크게 4단계의 공정에 의해 이뤄진다. 먼저 저렴한 자원 투입과 환경친화적인 방법으로

식물 세포벽의 특성

포도당은 모든 생명체에 필수적인 물질로서 대장균을 비롯한 미생물에서부터 식물과 사람에 이르기까지 모든 세포가 이를 사용하여 에너지를 얻는다. 포도당은 생명체 내에서 크

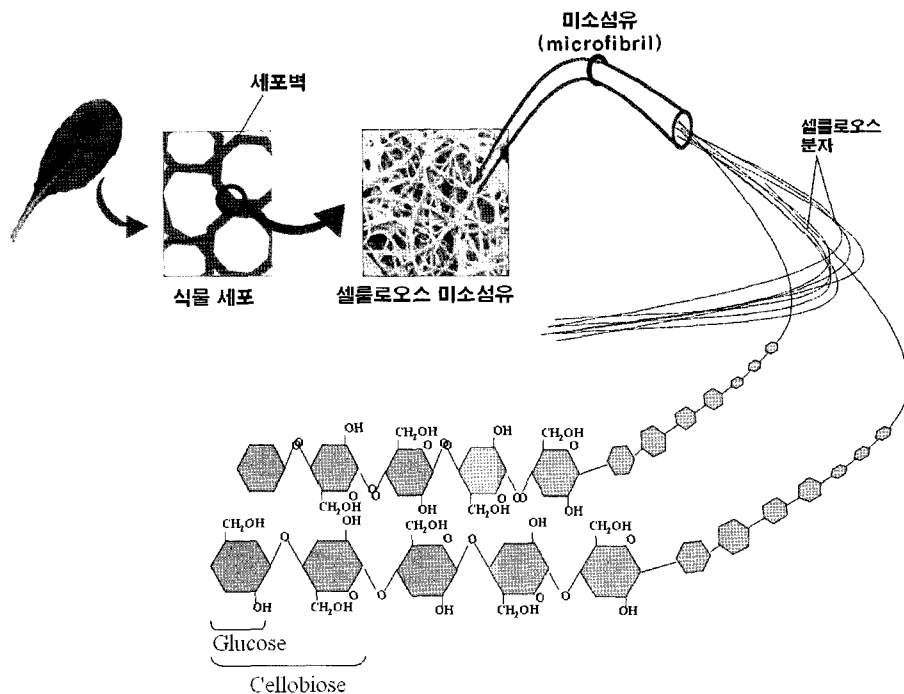


Figure 3. Molecular structure of cellulose which is a major component of plant cell wall. Both starch and cellulose are polymers of glucose, however, they differ in the bonds linking the glucose monomer. Starch is formed by linking the glucose monomers with alpha orientation, whereas cellulose is beta (β -1,4-glycan).

계 두가지 형태로 존재한다. 하나는 녹말이나 글리코젠 등의 다당체로 주로 생물이 에너지를 저장할 때 형성하는 구조이다. 다른 하나는 식물의 세포벽을 구성하는 셀룰로스 다당체이다. 이 두 가지 형태는 포도당이 단위체로 사용되지만 포도당과 포도당 사이를 연결하는 구조가 다른 점이 특징이다. 즉, 녹말이나 글리코젠은 포도당 사이의 결합이 알파 결합인데 비해 세포벽을 구성하는 셀룰로스는 베타결합 (β -1,4-glucan)을 하고 있다. 사람을 비롯한 여러 동물은 녹말의 알파 결합을 분해하는 효소를 가지고 있어서 녹말을 소화시켜 에너지를 추출하지만 셀룰로스의 베타 결합을 분해하는 효소는 가지고 있지 않다.

식물의 세포벽은 일반적으로 5가지 성분으로 이루어져 있다: 셀룰로스, 헤미셀룰로스, 펙틴, 리그닌, 그리고 단백질이다. 셀룰로스는 전술한바와 같이 포도당의 베타 결합으로 이루어진 다당류로서 지구상에서 가장 풍부한 유기물이다. 헤미셀룰로스나 리그닌에 비해 상대적으로 생화학적 변형이 쉬운 물질로서 한 가닥의 셀룰로스 미소섬유 (microfibril)는 약 36개의 단위 사슬의 복합체로서 3-6 nm 굵기의 직경을 갖는다. 셀룰로스 미소섬유는 세포벽에서 결정형과 무정형의 반결정형으로 존재한다. 식물체에 지지와 더불어 유연성을 부여하는 구조이다. 셀룰로스 생합성 효소 (Cellulose synthase)는 세포막에 로제트 (rosette) 형태로 존재하는데 이 효소 복합체는 골지체에서 불활성 상태로 조립되었다가 세포막으로 이동한 후 활성을 갖는 것으로 알려져 있다 (Somerville, 2006). 셀룰로스 생합성 효소 중 하나인 CESA는 모델 식물인 애기장대에 10개의 복사본으로 존재하는 데 유전학적인 돌연변이 연구를 통해 그 기능분석 연구가 일부 진행되어 왔다. 하지만 세포벽의 셀룰로스를 형성하는 효소의 메커니즘과 세포골격과의 관계 등에 대한 자세한 과정은 아직 많은 부분 베일에 가려져 있는 실정이다.

셀룰로스 미소섬유는 시멘트와 같은 역할을 담당하는 헤미셀룰로스에 의해 상호 연결된다. 헤미셀룰로스는 자일로스, 아라비노스 등의 5탄당을 함유하는 분지된 복합 다당체 구조다. 헤미셀룰로스는 셀룰로스 미소섬유뿐 아니라 리그닌과도 공유결합 방식으로 연결되어 있어 세포벽의 여러 성분을 서로 단단히 엮는 역할을 담당하고 있다. 이러한 복잡한 구조로 인해 헤미셀룰로스는 리그닌에 비해서는 덜하지만 셀룰로스 다당체 보다는 더 난분해성으로 여겨진다.

리그닌은 방향성 고리구조를 갖는 페닐알라닌으로부터 유래되는 폴리머 구조물이다. 리그닌의 구조와 결합 방식에 관해서는 아직도 잘 알려지지 않은 부분이 많다. 리그닌은 식물의 2차벽에 존재하는 물질로 세포벽에 견고성을 더해주는 역

할을 담당하고 있다. 곰팡이 등의 생명체에 의해서도 잘 분해되지 않는 구조로서 식물의 방어에도 깊이 관여하는 것으로 알려져 있다. 셀룰로스 다당체의 합성은 세포막에 존재하는 셀룰로스 합성효소 복합체에 의해 합성된 후 세포벽에 첨가되는 것으로 알려져 있지만 헤미셀룰로스와 리그닌은 골지체에서 합성된 후 특정 세포 표면으로 이송되어 분비된다.

세포벽 단백질은 세포벽을 구성하는 다당류들이 네트워크를 형성할 때 핵으로 작용하는 등 여러 가지 기능을 수행하는 것으로 알려진 단백질들의 그룹이다. 프롤린, 수산화 프롤린, 그리고 글리신 등의 아미노산이 반복적으로 나타나는 구조를 가지고 있는 특징이 있다. 예를 들어 proline rich protein (PRP), hydroxyproline rich glycoprotein (HPGP), glycine rich protein (GRP), extensin, 및 expansin 등이 존재한다. 이중 expansin은 활성화될 경우 세포벽을 연화시키는 기능을 수행한다.

에너지 전용 작물의 종류와 특징

원재료 면에서 보았을 때 셀룰로스 에탄올은 옥수수대나 벚짚 등 곡물 수확 후 파생되는 부산물, 목재 처리과정에서 발생하는 부산물을 사용하여 생산 가능하다. 하지만 식물이 함유하고 있는 여러 종류의 2차 대사산물은 전처리 과정에서 변형되어 미생물에 의한 효소적 분해 단계를 억제하는 문제를 초래한다. 따라서 에탄올 생산 효율을 증대시키기 위해서는 에탄올 생산 공정에 최적화된 에너지 작물을 원료로 사용하는 것이 유리하다. 에너지 작물로 고려되는 식물들은 기본적으로 “최소한의 자원투입으로 최대한의 바이오매스 생산”을 담보하는 식물 종들이다. 또한 생산 공정에서 필요한 전처리 과정을 단순화시킬 수 있고 고순도의 셀룰로스를 회수할 수 있는 식물이 적합하다. 이러한 식물로는 포플라, 버드나무 등의 목본 식물, 그리고 다년생 식물인 Switch grass (*Panicum virgatum*)와 역새 (*Miscanthus sp.*), 그리고 습지에서 자생하는 갈대 등을 예로 들 수 있다 (Sanderson 2006). 이들 모델 식물은 표 1에서 나타난 바와 같이 셀룰로스 함량이 상대적으로

Table 1. Percent contents of cellulose, hemicellulose, and lignin in major energy crop plants. Relative contents are shown by percentage (%) (Source: Wiselogle et al. 1996)

Feedstock	Cellulose	Hemicellulose	Lignin
Corn stover	36.4	22.6	16.6
Wheat straw	38.2	24.7	23.4
Rice straw	34.2	24.5	23.4
Switchgrass	31.0	24.2	17.6
Poplar	49.9	20.4	18.1

높고 생산 비용이 적게 소요되는 등의 장점을 가지고 있다.

다년생 식물이 에너지 전용 작물로서 적합한 이유는 다음과 같다. 첫째 생산비가 상대적으로 적게 든다. 다년생 식물의 경우 해마다 종자를 심어야 할 필요가 없다. 또한, 농경지의 경작을 위해 사용되는 농기계 운영비와 인건비의 절감이 가능하다. 이는 필연적으로 농기계 운영에 소요되는 화석연료 등의 비용을 줄일 수 있기 때문에 온실가스 감축에 기여한다. 다년생 식물은 또한 성장기간이 아닌 겨울동안에도 뿌리 시스템이 살아 있어 근권 미생물과의 상호작용을 통해 지속적으로 토양의 질을 보전할 수 있다. 또한 성장 기간동안 고정된 에너지의 일부를 뿌리 시스템에 저장하기 때문에 유기물질을 뿌리 시스템에 고정하는 효과를 갖는다 (그림 4). 이는 다음해의 생존 경쟁에서도 우위를 점할 수 있게 한다. 즉, 1년생 식물들이 파종 후 배젖에 저장된 양분을 이용해 발아하여 성장을 이루는 데 까지 걸리는 시간을 단축시키는 효과를 갖기 때문에 이듬해 지상부의 형성에 있어 우위를 점할 수 있다. 더욱이, 다년생 에너지 작물의 경우 C4 대사로 인해 광합성 효율이 높아 성장 속도가 빠르다. 실제로 1년생 식물과 다년생 식물을 비교해 보았을 때 다년생 식물이 광합성 기간이 길어 전체적인 생산성이 높게 나타나고 있음이 밝혀진 바 있다 (US DOE 2006). 이는 옥수수 등 1년생 식물보다 캐노피를 형성하는 속도가 빨라 태양광을 효과적으로 선점하는 효과에 일부 기인한다. 또한, 뿌리 시스템의 지속적인 유지는

사용되는 비료의 유실을 줄일 수 있다는 장점이 있다. 연구 결과에 의하면 다년생 벼과 식물의 경우 투입 비료의 유실율은 옥수수의 1/8에 달하며 토양 유실율 역시 옥수수에 비해 1/100로 나타난다 (US DOE 2006). 대단위 초지 조성은 여타 다른 동물의 보금자리를 제공하는 효과가 있어 조류의 서식지를 제공하기 때문에 환경친화적임이 드러난다. 또한 기존의 식량작물과는 달리 에너지 작물을 재배하는 경우 에너지 작물과 동시에 다른 식물을 재배할 수 있어 혼합경작에 따른 환경 및 토양 생산의 효율성을 기대할 수 있다. 다년생 에너지 작물인 억새나 갈대는 또한 생명공학적인 응용에 필수적인 형질전환 기술이 개발되어 있어서 생명공학의 환경 친화적 적용이 가능한 장점을 가지고 있다.

생명공학을 통한 에너지작물의 개발의 필요성과 방향

셀룰로스 에탄올을 현재 사용 중인 수송용 화석 연료의 10% 가량을 대체한다고 가정할 때 필요한 바이오매스는 다음과 같이 역산해볼 수 있다. 한국석유공사 석유정보망에 따르면 2005년 한해 우리나라 원유 소비량은 8억 4천만 배럴이라고 한다. 이중 수송용으로 사용되는 비율이 약 30% 수준이기 때문에 연간 약 2억 5천만 배럴이 자동차 등 수송용 연료로 소비되어 온실가스를 배출하고 있다. 수송용 원유의 10%는 2천 5백만 배럴로 금액으로 환산해 본다면 수조원이 넘는다. 에탄올이 석유에 비해 갖는 에너지 양은 약 65% 수준이기 때문에 2천 5백만 배럴의 에너지 양에 해당하는 에탄올은 약 3천 9백만 배럴이다. 미국의 경우 향후 목표치를 건조중량 1톤당 약 80갤런의 에탄올 생산을 목표로 두고 있다 (US DOE 2006). 이 수준의 에탄올 생산은 가솔린 뿐 아니라 전분 유래 에탄올 가격과 경쟁력이 있는 수준이다. 이러한 에탄올 추출 효율을 그대로 적용한다면 3,900만 배럴의 에탄올을 생산하기 위해서는 약 2,000만 톤의 건물 바이오매스가 필요하다. 2000년 기준 연간 볏짚 생산량은 약 600만 톤이라고 한다. 이중 30%는 가축용 조사료로 사용되기 때문에 나머지 중 약 300만 톤을 수거하여 바이오에탄올 생산에 사용한다고 해도 연간 1,700만톤 가량의 바이오매스가 추가로 필요하다는 계산이 나온다. 이를 위해서는 전술한 바와 같은 바이오매스 생산성이 높은 에너지 전용 작물을 개발하여 국내외의 유향 농지나 간척지 등의 조건 불리 지역에서 재배하여 확보할 수 있을 것이다. 에너지 전용 작물이 갖춰야 할 조건과 개량 방향으로는 다음과 같다.

에너지 전용 작물을 개발하는 데는 생명공학적 방법 특히 기능 유전체 생화학 (Biochemical genomics)적 접근이 유용한

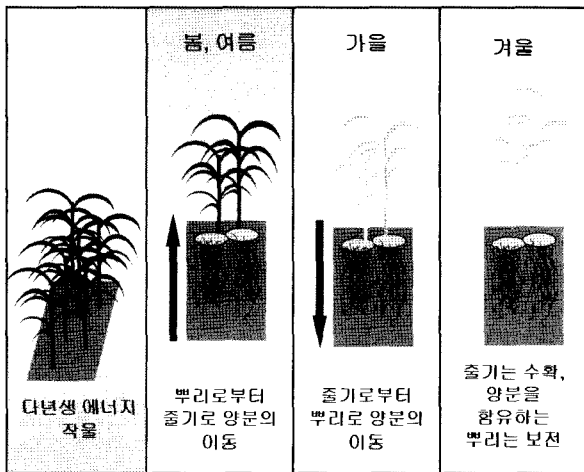


Figure 4. Nitrogen use efficiency hypothesis of perennial plants. Roots and aerial organs of perennial plants alternate between energy storage and use. During Spring and early Summer, stored energy in the roots move up to the aerial parts to initiate growth. When the Fall stimulates senescence, the energy moves down to the root for storage. Aerial parts can be harvested for cellulosic ethanol production during winter season without severely harming the life pattern of the perennial plants (Source: US DOE 2006).

도구가 될 것이다. 추구하고자 할 에너지 작물의 목표 형질은 높은 생산량, 우수한 식물 초형, 생물학적 및 비생물학적 스트레스에 대한 저항성, 후처리가 용이한 바이오매스 조성 등이 될 것이다. 구체적으로 보면 첫번째로 광합성 효율의 증대를 통해 태양 에너지의 변환율을 증가시킨다. 전 지구적인 관점에서 보았을 때 식물은 지구에 도달하는 태양 에너지의 약 2%이하 정도만 수용할 수 있다. 이는 식물이 가시광선 부분만 광합성으로 사용할 뿐 아니라 광호흡으로 인해 고정된 에너지를 일부 소비하기 때문이다. 또한 각종의 식물은 진화과정에서 형성된 메커니즘을 통해 자신의 생장에 필요한 만큼의 광합성만을 수행하는 경향이 있다. 생식과 생장에 필요한 만큼만 광합성을 수행하고 이 에너지는 다음세대를 위한 저장이나 생장에 필요한 조직을 형성하는 데 쓰이는데 생장에 필요한 부분은 주로 세포벽에 셀룰로스나 기타 벽 구성물질의 형태로 저장된다. 실제로 동일종의 식물을 빛이 강한 곳과 빛이 약한 곳에서 동시에 키워 보면 최초 성장속도는 빛이 없는 곳에서 더 빠르다는 것을 알 수 있다 (그림 5). 빛은 식물에게 광합성을 할 수 있는 에너지를 제공하지만 생장을 억제하는 효과도 가지고 있다. 생명공학적 방법론을 통해 빛에 의한 식물 성장 억제 부분을 개선한다면 태양에너지 고정 효율을 극대화할 수 있을 것이다. 예를 들어 식물의 광 수용체인 파이토크롬 유전자의 발현을 적절하게 제어한다면 식물의 생

장 속도를 증대시킬 수 있을 것이다 (그림 5). 둘째, 질소 대사 효율 증대로 바이오매스의 증산을 유도한다. 보고에 의하면 *Glutamine Synthase1* 유전자를 포플러에 도입하였을 때 질소 이용 효율 증가로 포플러 바이오매스는 약 141%까지 증가하였다고 한다 (Man et al. 2005). 셋째, 스트레스에 대한 적응성 향상 필요성이다. 최근 생물학적 및 비생물학적 스트레스에 대한 방어 유전자가 속속 밝혀지고 있다. 이러한 스트레스 관련 유전자의 발현을 정밀하게 제어하여 가뭄, 고온, 저온, 및 병원균에 대한 저항성을 증대시키거나 염분 농도가 높거나 수분이 부족한 극한 지역에서도 안정적으로 바이오매스를 생산할 수 있어야 한다. 넷째, 개화시기의 지연이다. 식물은 광합성을 통해 고정한 많은 양의 에너지를 생식에 투입한다. 바이오매스의 생산이 주 목적일 경우 고정된 에너지를 생식에 투입하는 대신 영양기관의 지속적 발달에 투입하도록 유도하는 기술이 고려될 수 있을 것이다. 또한 겨울 휴면기간을 단축시켜 영양 성장 기간을 증가시킬 경우 역시 바이오매스 생산 증가로 연결시킬 수 있다. 다섯째, 세포벽의 구조와 조성의 개량 분야는 핵심적인 연구 대상이 될 것이다. 리그닌은 식물 세포벽의 강도를 증진시키는 역할을 하지만 리그닌의 함량이 높으면 물리적인 파쇄과정에 많은 에너지가 소비될 뿐 아니라 효소의 접근성 또한 떨어지게 된다. 따라서 식물의 전체적인 성장 속도는 일정하게 유지한 채 리그닌의 조성이나 양을 변형시킬 수 있다면 이는 에너지 작물로서의 가치를 매우 높이는 결과로 연결될 수 있을 것이다.



Figure 5. Derepression of light-dependent growth inhibition. A mutant plant that is defective in the photosensory protein PHYB displays an increased growth rate relative to a wild-type plant. It should be possible to increase biomass production by using this technique.

생명공학의 적용 예

바이오에탄올 생산에 있어서 전처리 과정이 비교적 쉽고 양질의 셀룰로스를 저렴하게 생산하기 위해서는 에너지 작물의 선정과 개량이 필요하다. 우선 고려대상이 되는 방법은 전술한바와 같은 전통 육종학의 적용이다. 야생 상태에 적응하며 자라는 다양한 야생형 종자를 확보한 후 교배와 선발을 통해 목표 형질에 가까운 라인을 확보할 수 있을 것이다. 또 다른 방법으로는 생명 공학적인 방법을 접목시키는 것이다. 셀룰로스 함량이 높은 목본 식물인 포플러 (표 1)의 경우 최근 유전체 염기서열이 결정되어 기능유전체학적 연구가 활발히 진행 중이다 (Tuscan et al. 2006). 포플러는 성장 속도가 빠르고 성장여건이 불리한 지역에서도 자랄 수 있는 등의 특성이 있을 뿐 아니라 무엇보다도 형질전환이 가능하다는 장점을 가지고 있다 (임업연구원). 본 연구실에서는 포플러의 성장 속도를 증대시키기 위해 모델식물인 애기장대에서 그 기능이 입증된 유전자를 중심으로 연구를 진행 중이다 (그림 6).

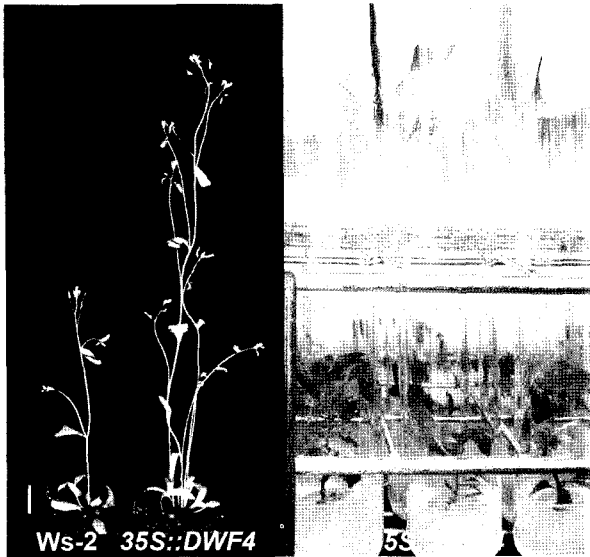


Figure 6. Phenotypes of the transgenic plants that overexpress the brassinosteroid biosynthetic gene, *DWARF4*. Left panel: comparison of wild type (Ws-2) and a 35S::DWF4 plant. The overall height of the 35S::DWF4 plant increased more than 50% relative to wild type due to growth - promoting effects of the transgene. Right panel: to obtain poplar trees that have an increased growth rate, the same construct was introduced into poplar. Stably transformed T3 generation will be identified and evaluated for the growth traits.

생명공학의 접목은 필수적으로 식물의 전반적인 생활사에 관계되는 유전자의 확보가 시급하다. 식물의 광합성을 통한 세포벽의 형성과정에는 적어도 수천개의 유전자가 관여할 것으로 예상되고 있다. 리그닌은 셀룰로스 에탄올 생산시 여러 가지 부정적인 영향을 미친다. 우선 견고한 리그닌 복합체는 당화효소가 셀룰로스나 헤미셀룰로스에 접근하여 작용하는 과정을 차단하는데 이는 당화효소를 흡착하는 효과 때문이다. 또한 리그닌은 전처리 과정에서 변형되어 이후 진행되는 에탄올 발효의 강력한 억제제로 작용한다. 하지만 리그닌은 식물의 기능에 있어서 필수적인 물질이다. 따라서 식물의 기능은 보전하면서도 리그닌의 양적 및 질적 조성을 변경시키는 연구가 필요하다. 또한 헤미셀룰로스의 경우에도 당쇄에 O-acetylation이 에탄올 생산의 억제제로 작용한다. 전처리과정에서 이탈하는 아세틸기는 효소반응과 발효 과정에서 억제제로 작용하여 그 효율을 감소시키는 경향이 있다. 따라서 식물 세포벽의 기능을 최대한 보전하는 조건에서 아세틸레이션을 감소시키는 방향의 연구 역시 필요하다.

결 론

온실가스 저감과 관련하여 바이오에너지의 적극적인 도입

은 이미 전 세계적인 관심사가 되었으며 우리나라도 예외가 아니다 (생명공학정책연구센터). 화석연료를 대체하는 탄소-중립적 에너지는 바이오매스 유래 셀룰로스 에탄올이 해당이다. 단기간의 문제 해결방법으로 우리 정부는 브라질산 에탄올 수입을 추진하고 있지만 보다 장기적인 관점에서는 우리나라에서 재생 가능한 에너지를 찾아야 할 것이다. 우리나라의 유휴 농경지나 새만금 간척지 등 새롭게 창출되는 농경지를 활용하여 바이오매스를 확보하고 이로부터 셀룰로스 에탄올을 생산하면 상당 수준의 에너지 독립성을 이룰 수 있을 것이다. 셀룰로스 에탄올의 생산과 유통은 식물 생명공학뿐 아니라 농학, 미생물학, 생물화학공학, 유통 등 다 학제적 연구가 유기적으로 통합되어야만 성공할 수 있기 때문에 정부가 의지를 가지고 국가적인 아젠다로 지원할 경우 성공 가능성이 매우 높다고 할 수 있다. 국내 연구진의 우수한 수준과 열의에 비춰보았을 때 국가적인 차원에서 착실하게 연구 개발에 임한다면 수년 이내에 바이오에너지 분야에서 세계적인 선두 주자로 나서 앞선 기술력을 수출할 수도 있을 것이다.

적 요

가속도가 붙은 지구온난화 문제와 수 십년 이내로 예상되는 화석연료의 고갈은 지속가능하면서도 환경친화적인 새로운 형태의 에너지 출현을 필요로 하고 있다. 이러한 추세에 맞추어 태양광, 조력, 지열, 풍력, 수소 에너지와 더불어 바이오에너지가 대체에너지로서 주목받고 있다. 바이오에너지는 태양에너지를 유기물로 변환하는 식물을 재료로 하여 바이오에탄올이나 바이오디젤 등을 생산하여 사용하는 것으로 대체에너지가 갖춰야 할 조건을 두루 갖춘 최적의 신재생에너지로 고려되고 있다. 하지만 바이오에너지가 진정한 의미에서의 환경친화적이면서 지속가능성을 갖추기 위해서는 아직 기술적으로 해결해야 할 문제점들이 많다. 최근 미국에서 바이오에탄올 생산을 위한 옥수수 소비량이 늘어 곡물 및 사료가격의 급등 현상으로 이어지고 있다. 또한 이러한 현상은 개발도상국 식량자원의 선진국 유입 등으로 빈곤의 심화 등이 새로운 문제점으로 지적되고 있다. 따라서 곡물이 아닌 비식용부위를 이용한 에탄올 생산이 대안으로 여겨지고 있는 바 셀룰로스 에탄올은 이러한 문제점을 극복할 수 있는 대체에너지로서 자리매김하고 있다. 셀룰로스 바이오에탄올은 사람 등의 동물이 소화하지 못하는 바이오매스의 대부분을 차지하는 식물 세포벽을 곰팡이 등에서 분리한 효소로 분해한 후 여기서 생성되는 당을 발효과정을 통해 생산되는 에탄올로서 전술한 바와 같은 문제점을 해결할 수 있는 유망한 대안 에너지로 고려되고 있다.

사 사

본 연구는 과학기술부의 자생식물이용기술개발 사업 (PF06304-01) 및 학술진흥재단의 순수기초연구그룹 지원 (KRF-2005-070-C00129)에 의해 수행되었습니다.

인용문헌

Eggeman T, Elander RT (2005) Process and economic analysis of pretreatment technologies. *Biores Technol* 96: 2019-2025

Kim TH, Lee YY (2005) Pretreatment and fractionation of corn stover by ammonia recycle percolation process. *Biores Technol* 96: 2007-2013

Man H-M, Boriel R, El-Khatib R, Kirby EG (2005) Characterization of transgenic poplar with ectopic expression of pine cytosolic glutamine synthetase under conditions of varying nitrogen availability. *New Phytol* 167: 31-39

Ragauskas AJ, Williams CK, Davison BH, Britovsek G, Cairney J, Eckert CA, Frederick Jr. WJ, Hallett JP, Leak DJ, Liotta CL, Mielenz JR, Murphy R, Templer R, Tschaplinski T (2006) The path forward for biofuels and biomaterials. *Science* 311: 484-489

Sanderson K (2006) A field in ferment. *Nature* 444: 673-676

Schubert C (2006) Can biofuels finally take center stage? *Nate Biotech* 24: 777-784

Service RF (2007) Biofuel researchers prepare to reap a new harvest 315: 1488-1491

Somerville C (2006) Cellulose synthesis in higher plants. *Annu Rev Cell Dev Biol* 22: 53-78

Stern Review: <http://www.sternreview.org.uk>

Tuscan GA, Difazio S, Jansson S. et al. (2006) The genome of black cottonwood *Populus trichocarpa* (Torr. and Gra). *Science* 313: 1596-1604

US Department of Energy (2006) Breaking the biological barriers to cellulosic ethanol: a joint research agenda. DOE / SC-0095. US Department of Energy Office of Science and Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (www.doe.gov/energyefficiency/biofuels/).

Wiseloge A, Tyson S, Johnson D (1996) Biomass Feedstock Resources and Composition. In: Wyman CE, (eds) *Handbook on Bioethanol: Production and Utilization* (Applied Energy Technology Series), CRC press, Washington DC, pp. 105-118

생명공학정책연구센터. (2006) 바이오에너지: 바이오에탄올과 바이오디젤을 중심으로.

서진호, 진용수 (2006) 국내외 바이오에탄올 개발 현황과 전망. *Biosafety* 7: 4-17

임업연구원 (2002) 포플러의 유전공학 2002. 임업연구원. 서울.

한국석유공사 석유정보망 (www.petronet.co.kr/)

(접수일자 2007년 6월 3일, 수리일자 2007년 6월 20일)