

미국의 바이오연료와 연구 동향

이종경 · 데이빗 브랜스비*

Biofuel Industry and Recent Research in USA

Joung Kyong Lee and David Bransby*

ABSTRACT

Demand for alternatives to petroleum is increasing the production of biofuels from food crops such as corn, soybeans, sorghum and sugarcane, etc. At least for the next 5 years, ethanol demand will be increased greatly in the United States and in the world. Presently, most ethanol produced in the United States is corn (*Zea mays*) ethanol. As a result, especially in the Americas and Southeast Asia, agricultural land is diverted to biofuel production. Even though biofuel industry has many advantage including national security, economical, energetical and sustainable impacts, it is driving grain prices up and creating considerable concern about the potential negative impacts on a wide range of food products that depend on grain : chicken, pork, beef, and dairy products such as milk, cheese, yoghurt, cream and ice cream. Feedstock crops are crops such as switchgrass (*Panicum virgatum*, L.), corn stover and grasses that can be used in industrial processes such as fermentation into alcohol fuels. Feedstock is no compete with food. Furthermore it is friendly environmental bioenergy crops. In Korea, with increasing demand for fossil fuels the exploration of alternative sources of liquid fuel is inevitable. I suggest Korea need to research and to develop actively on feedstock for biofuel production through this review.

(Key words : Biofuel, Ethanol, Corn, Cellulosic biomass)

I. 서 론

텍사스 증질유 가격이 작년 12월 중순에 90 달러 아래에서 맴돌다가 새해 벽두(2008년 1월 2일)부터 배럴당 99.64달러로 최고점을 갱신하였다. 미국에서 자동차용 가솔린 가격은 2008년에도 상승이 계속되어 봄에는 갤런당 3.5달러까지 올라가고 2008년과 2009년 사이에 갤런당 평균 3달러 이상을 유지할 것이라고 한다(Energy Information Administration, 2008). 지난 25년간 미국에서 에탄올 생산은 크게 증가하였다. 증가 요인은 에탄올 생산이 계속된 이

득을 가져오는데 대부분 기인한다. 에탄올 공장에 이득을 가져다주는 주요 요인들은 에탄올 가격과 원료(주로 옥수수) 및 연료비용이다. 에탄올 가격은 가솔린 가격에 의해 가솔린 가격은 원유 가격에 의해 결정된다. 시나리오(Table 1)에 따르면 에탄올 생산은 2007/08년에 크게 증가하다가 그 다음에는 증가속도가 조금 느려질 것으로 예상되고 있다(Cassman 등, 2006). 주로 사료용 옥수수를 바이오연료 생산 원료로 사용하는 미국에서도 축산 농가의 어려움은 예외가 아니다. 미국에서 힘차게 불어오는 사료용 옥수수를 이용한 에탄올 생산 바람

농촌진흥청 축산과학원(National Institute of Animal Science, RDA, Cheonan 330-801, Korea)

* 어번대학교(Department of Agronomy & Soils, College of Agriculture, Auburn University, Auburn, AL 36849, USA)

Corresponding author : Joung Kyong Lee, National Institute of Animal Science, RDA, Cheonan 330-801, Korea. Tel : +82-41-580-6750, Fax : +82-41-580-6779, E-mail : leejk58@rda.go.kr

Table 1. Projected ethanol production and corn use by marketing year

Marketing year	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2010/11
Ethanol produced (billion gallon)	3.7	4.6	5.9	7.0	9.7
Corn required (billion bushel)	1.32	1.65	2.11	2.51	3.46
Coproduct feeds produced (dry equivalent) (million tons)	11.02	13.71	17.58	20.87	28.79
Corn crop (billion bushel)	11.81	11.11	10.74	11.48	12.50
% of corn crop	11.2	14.8	19.6	21.8	27.6
U.S. farm corn price (\$/bushel)	2.06	1.98	2.33	2.54	2.64

Note : 1 gal (=3.785 liter), 1 ton of corn (=dry matter 36 bushel).
(Cassman et al, 2006).

으로 미국 옥수수의 주요 수출시장인 우리 축산농가와 관련 업계도 커다란 고민에 빠져있다. 따라서 최근에 미국에서 발행된 바이오연료 관련 자료들을 토대로 바이오연료 생산이 다른 산업에 미치는 영향은 무엇인지 알아보도록 한다. 그리고 지금까지 바이오연료 원료로 사료용 옥수수가 주로 사용되어 왔으나 사료용 옥수수 이외에 대체할 수 있는 원료들은 무엇이 있는지 그리고 연구는 어느 정도까지 왔는지 알아보도록 한다.

II. 본 론

1. 세계의 바이오연료 생산

현재 바이오에탄올 생산과 이용은 지구상 구석구석까지 파급되고 있다. 많은 국가들은 원유가 언제까지나 지속적으로 원활하게 공급되느냐에 대한 걱정과 지구 온난화가 계속되는 한 석유 의존도와 환경에 미치는 영향을 줄이기 위하여 더욱 바이오에탄올 등 재생에너지 생산에 총력을 기울일 것이다. 2006년 세계 에탄올 생산은 135억 갤런에 달하였으며, 미국이 5,276.9천 갤런으로 가장 큰 생산국이었으며 브라질이 4,491.4천 갤런으로 두 번째 생산국이었으며 중국과 인도와 다른 여러 국가들이 빠르게 생산량을 늘리고 있다. 참고적으로 같은 시기에 대한민국은 15.9천 갤런과 일본은 29.9천 갤

런을 생산하였으며 중국은 1,017.2천 갤런을 생산하여 세계 3위 생산국 대열에 합류하였다. 크게 증가된 에탄올 생산과 이용으로 재생에너지의 국제 교역 시장을 성장세로 이끌고 있으며, 대부분은 바이오연료를 생산한 국가에서 자체 소비하지만 일부 국가는 미국이나 일본 등에 수출을 하여 이익을 보고 있다.

2. 미국의 바이오연료 산업

가. 미국에서 바이오연료 생산의 중요성

(1) 국가 에너지 안보

세계 인구의 4%를 차지하는 미국은 세계 석유 공급량의 25%를 소비하고 있다. 2004년 4월 에너지부는 2006년에 석유 가격은 잠시 내렸다가 연간 0.7%씩 상승하여 2025년에는 27달러까지 될 것이라고 예측하였다. 2006년 6월 1일 OPEC 컨퍼런스 기조연설에서 베네주엘라 대통령 차베스는 “석유가격은 끝이 없이 천정부지로 올라 미국 제국은 결국 망하게 될 것이다”라고 하였다. 그러나 향후 상황은 전혀 개선될 기미가 없으며 자국내 원유 생산은 감소되어 외국에 의존도는 오히려 계속 증가하고 있는 실정이다. 총 원유 공급량의 65% 정도가 수입되고 수요는 계속 증가하므로 계속 높은 가격을 유지하고 있다. 그러나 자연 재해, 정치적 불안, 경제 불안정에 의한 공급 혼란의 위협이 상존하고 있는 실정이다. 국가의 에너지

안보를 확보하는 가장 효과적인 방법은 청정하고 효율적이고 자체 생산한 에너지 자원인 다양한 재생 에너지 포트폴리오와 함께하는 것이다. 이 포트폴리오 중 액체 수송연료를 단기간에 대체하는 데는 바이오연료가 큰 역할을 할 것이다. 2006년에 미국은 약 50억 갤런의 에탄올 생산과 이용으로 1억 7천만 배럴 (110억불 이상)의 석유 수입량을 절감하였다(Table 2).

(2) 경제적 성장

미국의 강한 바이오매스 산업은 무역적자 감소, 일자리 창출 및 농업 시장의 강화를 포함하여 중요한 경제적 이득을 준다.

1) 일자리 창출: 2006년에 에탄올 산업은 미국 경제에서 160,000개의 직업을 창출하고 경제활동 증가와 새 직업을 통하여 60억 7천달러의 가정 수입을 올렸다.

2) 무역 적자 감소 : 2006년에 미국 무역적자의 33%인 1/4 이상은 석유 수입이 원인이다. 2005년보다 18% 증가한 2,710억 달러이다.

(3) 환경적 이득

바이오연료는 전통적인 화석 연료에 비하여 많은 환경적인 이득을 제공한다. 가장 두드러진 것은 온실가스 방출 감소이다. 미국에서 주요 온실가스인 이산화탄소의 1/3을 수송 분야가 책임 있는 현실에서 청정 수송연료는 기후 변화에 중요한 역할을 한다. 또한 원료 생산과

수확시 소요되는 화석연료의 사용을 줄이며 원료에 따라 차이가 있다. 옥수수 에탄올은 석유 생산에 비하여 25%까지 온실가스 방출을 감소시키며, 섬유질 에탄올(스위치그라스, 옥수수 줄기 잎, 농업부산물 등)은 86%까지 감소시킨다.

나. 바이오연료와 관련된 미국의 정책

(1) 20 in 10

향후 10년 내에 미국 가솔린 사용을 20%까지 감소시킨다는 내용이다(White house, 2007). 2017년까지 연간 350억 갤런까지 바이오연료를 포함하여 대체 연료의 소비를 확대한다는 목표를 두고 있다. 이것은 에너지 효율의 개선 뿐만 아니라 재생 또는 대체 에너지 자원에 의하여 계획된 가솔린 사용의 20%를 대체한다는 의미이다.

(2) 25 x '25 vision

2025년까지 미국에서 사용하고 있는 에너지의 25%를 바람, 태양과 바이오연료 같은 재생 가능한 자원으로부터 얻겠다는 목표이다. 이 미래 에너지 목표를 달성하면 1) 매년 7천억불의 새로운 경제적 활동이 발생하고, 2) 2025년에 370억불을 포함하여 1,800억불까지 농가 수입이 증가하고, 3) 4~5백만개의 새 직장이 생기며, 4) 1일 250만 배럴의 원유 사용이 감소되고, 5) 10억톤까지 이산화탄소 방출의 감소가

Table 2. The world's leading oil players (million barrels/day)

Oil production		Oil consumption		Top oil exporters		Top oil importers	
Saudi Arabia*	11.1	USA	20.7	Saudi Arabia*	9.1	USA	12.4
Russia	9.5	China	6.9	Russia	6.7	Japan	5.2
USA	8.2	Japan	5.4	Norway	2.7	China	3.1
Iran*	4.2	Russia	2.8	Iran*	2.6	Germany	2.4
Mexico	3.8	Germany	2.6	UAE*	2.4	South Korea	2.2
China	3.8	India	2.6	Nigeria*	2.3	France	1.9
Canada	3.1	Canada	2.3	Kuwait*	2.3	India	1.7
Norway	3.0	Brazil	2.2	Venezuela*	2.2	Italy	1.6
Venezuela*	2.8	South Korea	2.2	Algeria*	1.8	Spain	1.6
UAE*	2.8	Mexico	2.1	Mexico	1.7	Taiwan	1.0

* : OPEC members.
(Zubrin, 2007)

예상된다(25 × '25 vision, 2007).

(3) 30×30 vision

2030년까지 2004년 기준 자동차 가솔린의 30%를 에탄올로 공급한다는 시나리오이다. 현재 미국은 연간 수송연료의 1,400억갤런 중 일부분을 45억갤런의 옥수수 곡물 이용 에탄올로 사용하고 있다. 에너지장관의 발표대로라면 2012년까지 실질적이고 비용면에서 우수한 대체제(갤런당 1.07달러)로 에탄올을 만들고 2030년까지 가솔린의 30%(600억갤런)을 대체한다는 것이다(USDOE, 2006). 2030년까지 가솔린 소비의 30%를 지속적이고 충분히 대체하는 데는 바이오매스가 건물수량으로 약 10억톤이 필요하다. 30×30 vision을 달성하는데 모든 바이오연료 생산의 최적화뿐만 아니라 기술적인 장벽을 극복하는데 1) 전환기술 특이 원료자원 개발, 2) 원료 생산, 저장과 분배 개선, 3) 생화학 전환기술, 4) 열화학전환기술 등의 R & D 노력이 포함된다.

다. 미국에서 바이오연료 생산 증가 요인

2008년에 80억갤런을 생산하면 미국 가솔린 소비의 약 5%를 대체할 수 있다(Table 3).

(1) 가솔린 대체제로서 에너지 가치 : 에탄올의 에너지 가치는 가솔린 1갤런의 70%정도로 가격도 가솔린의 70% 이상은 받아야 하는데 현재 경제성이 있다.

(2) 에탄올에 제공되는 정부 보조금 (현재 에탄올 \$0.51/갤런, 옥수수 \$1.35/부셸)과 정책 인

센티브 가치가 크다.

(3) 주로 가솔린의 산화 또는 옥탄가를 증가시키는 첨가제로서 에탄올의 가치: 가솔린은 87이나 에탄올은 106의 옥탄가를 가지고 있다. 그동안 사용하였던 첨가제 MTBE가 독성을 발생시키는 등 환경 위험물질로 더 이상 사용을 할 수 없기 때문에 에탄올은 유리하다.

라. 주요 바이오연료 원료 : 옥수수

(1) 바이오에탄올 생산은 옥수수 재배 농가에게 커다란 이득을 제공

미국에서 2006/2007년 기간 동안 옥수수는 사료와 부산물용 46.8%, 에탄올용 17.2%, 수출용 17.2%, HFCS (과당시럽)용 4.1%, 당료제조용 1.9%, 전분용 2.2%, 알코올용 1.1%, 시리얼용 1.5%로 이용되었고 7.9%가 잉여량이었다(NCGA, 2007a). 에탄올 산업은 가솔린 가격, 에탄올과 옥수수 가격에 의하여 이익이 발생되어 확대되고 있다. 그 결과 옥수수가 많이 소요되고 옥수수 가격은 상승되어 농가들은 다른 경쟁작물보다 이익을 내는 옥수수를 많이 재배하고 있다. 옥수수 재배면적은 2004~2006년에 73.6백만 에이커에서 2010년에는 79.9백만 에이커로 약 9% 증가가 예상되며 추가적인 옥수수 생산으로 대두, 밀, 목화, 보리, 수수 및 자연보호구역이 감소되고 있다. 미국의 옥수수 생산 농가는 커다란 이득을 보고 있으며 앞으로도 생산량 감소 없이 지속적인 생산을 하여 국내와 국외에 공급할 수 있을 것이라고 자신감을 내보이고 있다. 2006년 50억 갤런의 에탄올이

Table 3. Recent ethanol industry expansion

Industry	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Biorefineries online	54	56	61	68	72	81	95	110
Capacity (mgy)	1,748.7	1,921.9	2,347.3	2,706.8	3,100.8	3,643.7	4,336.4	5,493.4
Corn utilization in ethanol (million bushels)	627	681	819	1,077	1,260	1,430	1,800	—
Distillers grains (million tons)	2.7	3.1	3.6	5.8	7.3	9.0	12.0	—

* 1bu. of corn = 2.7~2.8gal. of ethanol and 17lb. of distillers grains, mgy : million gal per year. (RFA, 2007)

생산되어 2001년 생산량의 거의 3배가 생산되었으며, 옥수수는 약 20억 부셀이 에탄올을 생산하는데 사용되었다(Table 4).

(2) 바이오에탄올을 위한 옥수수 재배 및 생산량 예측

1) 증가하는 옥수수 수량 : 옥수수 생산량은 그동안 생명공학과 개선된 재배 기술로 큰 속도로 증가해 왔다. 1990년부터 2005년까지 15년간 옥수수 생산추이를 평가할때 2015년에 에이커당 173부셀까지 생산된다고 가정하면 1억5천만 부셀이 추가 생산되어 에탄올 4억2천만 갤런을 생산하는데 옥수수가 추가적으로 사용될 것이다.

2) 재배면적 증가 : 대두, 목화나 밀 같은 작물 재배에서 옥수수로 전환이 되고 있다. 현재 보호지역으로 지정된 3,500만 에이커의 일부가 옥수수 생산에 투입되고 매년 대략 100만 에이커의 면적이 옥수수를 추가 생산할 것이다.

3) 에탄올 사용 이외의 옥수수 수요는 변동 없음 : 가축 사료를 위한 옥수수 소요량은 장기간 크게 증가되지 않았다. 경제학자들은 2007년과 2016년 사이에 옥수수가 가축과 다른 용도로 평균 55억~58억 부셀과 수출에는 19

억~21억 부셀이 사용되며 큰 변동이 없을 것이라고 예측하였다.

4) DDGS는 사료를 점점 대체함 : 에탄올 생산의 증가는 증류된 곡류 부산물(주정박)의 공급을 증가시킨다. 부산물은 2008~2009년부터 연간 10억 부셀 이상의 옥수수를 대체할 것이라고 내다봤다.

5) 개선된 에탄올 효율 : 오늘날 에탄올 전환율은 옥수수 부셀당 2.8갤런이며 3갤런으로 증가될 것이다(Table 5). 따라서 옥수수 섬유소가 전환된다면 옥수수 부셀당 10~13%의 에탄올 생산을 증가시키고 높은 발효 특성의 전분을 가진 교잡종은 옥수수 부셀당 3~5%의 에탄올 생산을 더 증가시킬 것이다. 따라서 옥수수 재배 면적의 큰 변동없이 에탄올 생산은 증가될 것이라고 내다보았다. 더구나 미래의 에탄올 생산은 동일한 면적에서 옥수수 줄기와 잎의 이용으로 배 이상 생산하게 될 것이다.

마. 에탄올 제조시 발생하는 부산물 이용

미국에서 에탄올 생산시 생기는 증류 곡류 부산물(주정박)은 가축에게 중요한 단백질원으로 사용된다. 에탄올 생산으로부터 생기는 부산물은 에탄올 생산 형태에 따라 다르다. Dry

Table 4. Ethanol yields from candidate crops

Crop	Crop yield (ton/ha/yr)	Ethanol (liters/ton)	Ethanol (liters/ha/yr)
Sugarcane	90	90	8,100
Sweet sorghum	80	80	6,400
Sugar beet	50	90	4,500
Fodder beet	90	90	8,100
Wheat	2.7	400	1,080
Barley	3.3	410	1,270
Oats	2.2	410	902
Rice	3.5	480	1,680
Corn	9.4	440	4,136
Sorghum	3.5	440	1,540
Potatoes	44	110	4,840
Cassava	30	170	5,100
Sweet potatoes	27	167	4,509

(Zubrin, 2007)

Table 5. Corn yield and Corn grain ethanol yield

Year	Corn yield (bushel/acre)	Conversion rate (gallons/bushel)	Corn grain ethanol yield (gallons/acre)
1984	106.7	2.40	256.1
1994	138.6	2.52	349.3
2004	160.4	2.72	436.3
2014	178.0	3.30	587.4

(NCGA, 2007b)

mill과 Wet mill로 나누며 Dry mill은 옥수수 1부셸당 13%의 수분을 함유한 주정박 (DDGS)와 CO₂를 각각 17파운드를 생산한다. Wet mill은 옥수수 1부셸당 옥수수 글루텐 피드 12.4파운드, 옥수수 글루텐 밀 3파운드, 옥수수 기름 1.6파운드와 CO₂ 17파운드를 생산한다. 증류된 곡실로 비육우는 35~40% 정도, 젖소에게는 그보다 약간 낮은 비율로 급여할 수 있다. 양돈과 양계 사료에는 옥수수가 보통 65~70%를 차지하고 있어 옥수수 가격의 소폭 상승으로도 축산농가 이득에 큰 영향을 미칠 수 있다. 비록 건형 주정박(DDGS)를 돼지와 닭에게 급여한다고 하더라도 소화율, 아미노산 균형, 마이코톡신의 잠재적인 문제점 등이 있으며 또한 비육우와 달리 습형 주정박(WDGS)는 비반추동물에게는 효과적인 대체제가 아니기 때문에 건형 주정박(DDGS)만 급여한다. 닭과 돼지에 급여한다고 해도 돼지는 20%와 닭은 10%가 최대 급여량으로 효과적인 대체제가 아니다. 현재 비반추 동물에게 급여량을 증가시킬 수 있는 연구가 되고 있어 앞으로 급여량은 증가될 것이며 이러한 부산물의 이용은 일본과 중국 등에서 수요가 증가하여 외국의 수출 시장에서도 중요한 역할을 하고 있다. 2006년에 125만톤 이상이 수출되었다.

바. 에탄올 생산이 타 산업에 미치는 영향

(1) 가축 사료 가격에 영향을 미쳐 축산농가의 생산비 증가

미국에서 바이오연료를 생산하기 위하여 옥수수의 사용을 증가하면 축산물 가격 등이 증

가되는 것으로 나타났다. 2007년의 농장 곡물 가격을 기초로 환산하여 2005년에 생산된 작물의 농장 가격과 비교하면 미국 소비자들이 연간 220억 달러의 식료품 가격을 추가 지불한 것으로 평가되었다. 이 증가 중에서 150억 달러가 연료를 생산하기 위한 최근의 곡물 수요와 관련이 있는 것으로 보인다. 옥수수와 대두유는 미국에서 바이오연료를 위해 사용되는 주요 원료로서 다른 작물을 재배하던 토지를 옥수수 재배로 바꾸면 경합 발생으로 다른 작물의 가격을 증가시키는 경향이 있다. 높은 작물 가격이 높은 식료품 가격에 영향을 주는 속도와 비율은 생산물에 따라 다르다. 어떤 생산물은 높은 농장 가격이 소비자에게 그때그때 빨리 전달이 되나 돼지고기나 소고기는 소비자에게 충분히 영향을 미치려면 오랜 시간이 소요된다. 결국 연간 220억 달러중 거의 1/2은 단기간에 소비자에게 영향이 가지 않고 가축을 생산하는 농가가 떠안게 되었다. 가격 영향은 양계 39억, 양돈 26억, 비육우 26억, 낙농 11억 달러로 평가하였다(Alexander 및 Hurt, 2007).

(2) 에탄올에 대한 수요는 식품 소비자 가격에 영향

시리얼, 스낵 그리고 음료수 같은 분야는 옥수수가 차지하는 비율이 미미하여 옥수수 가격의 변동에 의하여 이러한 물품의 소비자 가격의 차이는 크지 않다. 그러나 옥수수는 고기, 우유 및 달걀을 생산하는데 있어서 매우 중요하다. 아직까지 미국에서 옥수수가 축산물 소매가격에 미치는 영향은 그렇게 크지는 않다

Table 6. Corn price and food price

Days	Corn (bu.)	Milk (gallon)	Chicken, fresh (lb.)	Eggs (dz.)	Pork, ham (lb.)	Beef, steak (lb.)	Ground Beef (lb.)	Non-diet cola (2 ltrs.)	All malt beverages (16 ozs.)
Jan. 2006 (\$)	1.98	3.20	1.06	1.45	2.21	5.06	2.74	1.13	1.11
Mar. 2007 (\$)	3.76	3.07	1.06	1.63	2.33	5.29	2.81	1.22	1.16

(USDA, BLS, 2007)

(Table 6).

3. 옥수수 이외의 바이오연료 원료

미국은 섬유질 원료를 이용한 에탄올 생산에 많은 투자를 하고 있다(Table 7). 미국 에너지부는 2007년 2월 향후 4년간 6개 섬유질 원료 정제공장에 3억 8천 5백만 달러를 투자하기로 발표하였다. 연간 섬유질 에탄올 1억 3천만 갤런이 생산될 것이라고 기대하고 있다. 산업비용 분담과 연합하여 10억 2천만 달러가 투자될 것이고 재료는 옥수수 줄기와 잎, 밀 짚, 마일로 그루터기, 스위치그라스와 기타 다른 재료 등이 사용될 것이다.

2007년 미 농무성의 에너지를 위한 농장 지원 법안을 보면 섬유질 에탄올 생산자에게 4년 동안 매년 25백만 달러씩 총 1억 달러가 직접 지원되고 10년동안 1억 5천만 달러가 섬유질 에탄올 연구비로 사용되며 바이오에너지와 바이오생산물을 위하여 농무성과 대학 연구비를 10년간 5억 달러로 늘릴 것이라고 하였다.

가. 옥수수 대체 부산물 원료

미국에서 연료용 에탄올 생산량은 조만간 72억 갤런을 넘을 것으로 내다보았다(Perlack 등, 2005). 이것은 2004년 그해에 미국에서 생산된 옥수수의 10%(2005년 13%)를 이용하여 생산한 에탄올의 두 배 가량이 된다. 따라서 미국 내에서도 옥수수를 이용하는 바이오연료의 수요 증가는 가축 사료와 경합이 되고 있으며, 섬유질 원료(밀 짚, 옥수수 줄기와 잎, 스위치그라스 등)를 이용한 에탄올 생산에 많은 관심

을 가지고 있다. 앞으로 섬유질을 이용한 에탄올 전환기술과 경제성 극복이 식품 산업과 연료에 대한 요구를 동시에 만족시킬 것이다. 미 농무성과 에너지부는 짚, 옥수수 줄기와 잎, 여러 목초들과 그루터기, 산림 부산물 형태의 섬유소 10억 톤이 매년 지속적으로 미국에서 수거되고 가공되어야 한다고 하였다. 이 만큼의 원료는 미국에서 가솔린 소비의 30%를 대체할 수 있는 670억 갤런의 에탄올과 같다.

(1) 옥수수 줄기 잎과 곡물 짚

현재 이용되는 부산물의 80%이상을 차지하며 옥수수의 바이오매스 50%인 250백만 톤(건물)이 수확 후 포장에 그대로 남아 있다. 곡물 중 대부분 바이오매스로 이용되는 짚은 밀 짚이며, 특히 쌀은 텍사스나 캘리포니아에서 중요한 자원이다. 수수, 보리와 귀리는 상대적으로 낮은 비중을 차지하고 있다. 옥수수 줄기 잎과 짚을 수거하는 수확 기계와 작물의 특성은 지역적인 차이가 있다. 짚의 경우는 수거

Table 7. Current sustainable availability of cellulosic biomass from agricultural lands

Source	Currently available biomass (million dry tons per year)
Corn stover	75
Wheat straw	11
Other small grains	6
Other crop residues (oil seeds, soybeans, sugar crops, root crops)	21
Corn fiber	6

(Perlack et al, 2005)

인프라가 잘 발달되어 있으나 옥수수의 경우는 다르다. 수확시 짙은 20%의 수분 함량을 가지고 있어 묽는 데에 적합하지만 옥수수의 경우는 50% 정도로 포장에서 건조시켜야 하며 기후에 따라 수거가 늦을 수 있다. 옥수수 줄기와 잎 수량은 곡물의 짙 보다 단위면적당 3~5배가 크나 관수시에 달성이 가능하다.

(2) 콩 깎지

현재 대두 생산은 60% 이상이 불경운 재배이며 토양에서 피복작물로의 이용성은 짙 류보다 높다. 옥수수와 윤작체계에 따라 에탄올 생산을 위한 이용도가 좌우된다.

(3) 버개스 (bagasse)

사탕수수에서 자당 (sucrose)이 추출된 후 남은 찌꺼기이다. 현재 6백만 톤 (건물)이 생산되며, 현재 공장에서 비효율적으로 태우고 있으나 효율적으로 이용된다면 1/3을 줄일 수 있으며 단순히 태우는 것보다 나머지를 연료와 화학적인 생산을 위해 효과적으로 사용할 수 있다.

(4) 옥수수 섬유소 (corn fiber)

옥수수 dry mill 에탄올의 부산물인 주정박 (DDG)의 구성분이며 셀룰로스의 중요한 자원이다. 현재 에탄올 생산 설비에서 수거되어 특별한 추가적인 기반시설이 필요 없다. 셀룰로스 에탄올을 생산 하는데 농가나 곡물 에탄올 생산자에게 참여할 수 있는 기회를 제공할 수 있다. 비록 재료 구성분, 가격과 균일성에 많은 차이가 있어도 옥수수 섬유소를 정제하는 바이오 기술은 결국에는 옥수수 줄기 잎에 적용될 수 있다. Table 8과 같이 옥수수 섬유소는 전분을 많이 가지고 있고 리그닌은 적으나 줄기와 잎은 리그닌이 많이 들어 있다.

(5) 다른 자원의 폐기물

목화의 면 부스러기와 종이 슬러지는 에탄올 생산 원료가 없는 상황에서는 잠재성이 있는 섬유질 원료이나 양이 적고 지속적으로 충분한 양을 공급할 수 있는 보증이 안 된다.

나. 섬유질 원료 작물

Table 8. Corn fiber and stover composition

Composition	Corn fiber	Stover
Cellulose	12~18%	32~38%
Hemicellulose	40~53%	28~32%
Lignin (phenolic)	0.1~1%	15~17%
Starch	11~22%	None

(Perlack et al, 2005; Dry matter basis)

현재 상업적으로 이용되는 에너지 전용 작물은 없으나 20여년간 연구 결과 높은 바이오매스 수량을 가진 작물을 스크린중이며 전망이 매우 밝다. 스위치그라스 같은 다년생 초본류, 다른 자생 초원 목초, 미스캔더스 같은 비자생 목초, 단기 윤작 목본류인 포플라 잡종과 윌로우 등이다. DOE (에너지부)나 USDA (농무성)는 섬유질 바이오매스를 에탄올로 전환하는 기술이 상업적인 규모로 정착되면 6천만 에이커의 작물지대, 초지와 보호구역을 다년생 작물 재배 생산하는 땅으로 전환될 것이라고 예측하였다.

(1) 스위치그라스 (switch grass)

북 아메리카가 원산인 다년생 남방형 목초이다. 한번 정착이 되고 잘 관리가 된다면 10~20년간 지속성을 가지고 생육이 가능하다. 다양한 토양과 기후 조건에 잘 견디며 높은 섬유소 함량을 만드는 특성이 에탄올 생산을 위한 좋은 원료로 평가되고 있다. 토양과 기후에 따라 다르지만 연간 생산성은 1년차에는 건물수량으로 2톤/에이커, 2년차에는 5톤, 3년차부터는 7톤 생산이 가능하다. 평균적으로 연간 에이커당 5.5톤을 생산한다. 에탄올은 에이커당 약 500갤런을 생산하는 것으로 평가되고 있다 (Garland, 2007).

(2) 단수수 (sweet sorghum)

사탕수수보다 생육기간이 짧고 생산비용이 낮다. 총 환원당이 높으며 90%의 발효 효율을 가지고 있어 인도 등에서 에탄올 생산 원료로 가장 유망시 하고 있다. 생산성 (곡실, 당분 및 섬유소 등)이 높고, 염분이 높은 지역에서도 잘

Table 9. Biomass of bioenergy crops in both regions

Bioenergy crops	Dry matter yield (kg/ha)			
	Cheonan	Index	Jeju	Index
Corn	19,115	100.0	15,114	100.0
Sorgum	16,177	84.6	34,852	230.6
Sudangrass hybrd	16,138	84.4	33,261	220.1
Pearmillet	8,301	43.4	16,638	110.1
Barnyard grass	11,776	61.6	18,881	124.9
Guinea grass	15,585	81.5	21,705	143.6
Klein grass	5,443	28.5	21,986	145.5
Switch grass	7,254	37.9	25,013	165.5

(Lee, 2008)

적응하며 수분 요구량이 사탕수수의 1/3과 옥수수의 1/2 정도이다. 4,000종 이상의 많은 품종들이 이용되고 있으며, 열대, 아열대 및 온대 등 모든 대륙에서 재배할 수 있는 장점이 많은 작물이다 (이, 2007).

(3) 미스칸더스 (miscanthus)

유럽에서 주목을 받고 있으며 남방형식물이다. 대형 miscanthus는 잡종으로 4미터까지 성장하며 생육이 매우 빠르고 무기물 함량이 낮으며 바이오매스 수량이 높다. 1ha당 바이오매스로부터 3,700갤런의 바이오에탄올을 생산할 수 있으며 연구 중이다.

(4) 기타

북방형 목초로 자이언트 리드 (giant reed)와 리드카나리그라스 (reed canary grass)가 있으며 알팔파 같은 목초를 육종에 의하여 품질이 좋은 부분은 가축 사료로 이용하고 나머지를 에탄올 생산을 위한 섬유질 원료로 이용하는 이중목적에 대한 연구가 진행 중이다.

다. 섬유질 원료를 이용한 에탄올 생산

현재 미국에서도 실제적인 상품생산은 없고 연구 개발중에 있으며 조만간 공장이 만들어지고 생산될 예정이다. 아직 에탄올 전환 기술의 개선과 경제성 해결이 실마리며 지속적인 원료 공급이 관건이다. 즉, 에너지 생산을 위한 세포벽 구성물질의 조절, 적당한 에너지 작물 연구의 모델 시스템 개발, 다년생 초본과 목본 바

이오매스 작물의 양과 질의 개선과 옥수수 부산물, 기타 작물 부산물과 바이오매스 에너지 작물을 지속적인 바이오에탄올 원료로 만드는 기술 개발 등이다 (Weatherwax, 2007). 또한 바이오연료 자원으로 어떤 식물 종의 사용은 안전할지 모르지만 안전성은 농업과 생태적 분석에 의하여야 한다 (Raghu 등, 2006).

농촌진흥청 축산과학원에서도 2007년부터 바이오에탄올 원료 우량작물 선발에 대한 연구를 수행하고 있으며, 1년 연구 결과 표 9와 같이 천안에서는 옥수수와 제주에서는 수수류가 우수한 에너지 작물이었으며 앞으로 바이오연료 원료자원에 대한 연구를 계속 수행할 계획이다 (이, 2008).

III. 결 론

최근들어 국제 곡물가격이 급상승하는 이유는 곡물 재고율이 바닥을 드러내고 기후 온난화에 따른 기상이변으로 작물의 작황이 부진하기 때문이다. 또한 바이오 연료용 옥수수 수요 급증으로 식용 및 사료용 기타 곡물의 국제가격이 동반 상승하고 에너지 가격 상승으로 인한 곡물 생산 비용의 증가 등이 주요 원인이다. 앞으로 섬유질 에탄올 생산이 상품화되면 옥수수 이용 에탄올 생산으로 인한 사료, 식품 및 축산물가격 변화 등에서 많은 완충기능을 할 것이다. 1세기전 헨리 포드의 첫차는 알콜

로 주행을 하였으며 루돌프 디젤은 땅콩유로 그의 이름의 엔진에 시동을 걸었다. 그러나 두 발명자는 곧 석유가 조금만 정제하면 식물유보다 훨씬 성공적이고 효율적이고 싸다는 것을 발견한 이후로 에탄올 산업은 자취를 감추게 되었다. 1973년 OPEC의 통상 금지같은 석유가 부족한 기간에만 미국과 몇몇 나라에서 공급을 늘리려고 가솔린에 에탄올을 섞어서 에탄올 산업은 서서히 복귀하였다. 그러나 앞으로 에탄올 산업은 많은 장점을 가지고 있는 산업이기 때문에 발전에 발전을 거듭할 것이다. 지구를 위해 옥수수나 다른 작물을 이용하여 연료를 생산하는 일은 여러 가지 측면에서 바람직하다. 변화 과정중 상당한 경제적·환경적 대가를 치루지만 않는다면 새로운 발견은 우리에게 매우 귀중하다(Table 10).

Table 10. Ideal ecological traits of biomass energy crops and their relevance to invasive species/invasiveness

Traits	Present (P) or contributing (C) to success in invasives
C4 photosynthesis	P,C
Long canopy duration	P,C
Perennial	P
No known pests or diseases	P,C
Rapid growth in spring (to out-compete weeds)	P,C
Sterile seeds	P
Partitions nutrients to belowground components in the fall	P,C
High water-use efficiency	P,C

(Raghu 등. 2006)

IV. 인용 문헌

1. 이종경. 2007. 바이오에너지와 식량·사료 곡물간의 경합, 어떻게 타개할 것인가? Biosafety Vol. 8 No. 3.
2. 이종경. 2008. 바이오연료! 섬유질 원료 이용하면 축산에 미치는 영향 줄일 수 있다. 월간 피드저널 2008년 2월호.

3. Alexander, C. and C. Hurt. 2007. Biofuels and their impact on food prices. Purdue Extension ID-346-W.
4. Bureau of Labor Statistics and USDA, ERS. 2007. Food prices and the price of corn.
5. Cassman, K.G., V. Eidman and E. Simpson. 2006. Convergence of agriculture and energy : Implications for research and policy. CAST Commentary QTA2006-3.
6. Energy Information Administration. 2008. Short-term energy outlook. Jan. 8, 2008.
7. Garland, C.D. 2007. Growing and harvesting switchgrass for ethanol production in Tennessee. UT Extension SP 701-A.
8. NCGA. 2007a. Producing food and fuel. US Corn Growers.
9. NCGA. 2007b. How much ethanol can come from corn? US Corn Growers.
10. Perlack, R.D., L.L. Wright, A.F. Turhollow and R. L. Graham. 2005. Biomass as feedstock for a bioenergy and bioproducts industry : The technical feasibility of a billion-ton annual supply. DOE/GO-102005-2135. Oak Ridge(TN).
11. Raghu, S., R.C. Anderson, C.C. Daehler, A.S. Davis, R.N. Wiedenmann, D. Simberloff and R. N. Mack. 2006. Adding biofuels to the invasive species fire. Science 313:1742.
12. RFA. 2007. Building new horizons. Ethanol industry outlook 2007.
13. 25x25 Vision. 2007. The 25x25 Action Plan. <http://www.25x25.org>.
14. USDOE. 2006. A production scenario (30x30) for cellulosic ethanol from corn stover. Energy efficiency and renewable energy. <http://feedstockreview>.
15. Weatherwax, S. 2007. Biomass to biofuels. Office of Science. DOE.
16. White House Office of communications. 2007. The 2007 state of the union address. President Bush's Domestic Agenda.
17. Zubrin, R. 2007. Energy victory. Prometheus Books.

(접수일: 2008년 2월 26일, 수정일 1차: 2008년 3월 10일, 수정일 2차 5월 10일, 게재확정일: 2008년 6월 9일)