

新技術개발과 BIO-ENERGY의 經濟性

이 논문은 한국과학기술단체총연합회 주최로 지난 11월23-24일 2일간 열렸던 「바이오에너지와 에너지정책심포지움」에서 발표된 요지이다.

張 好 男

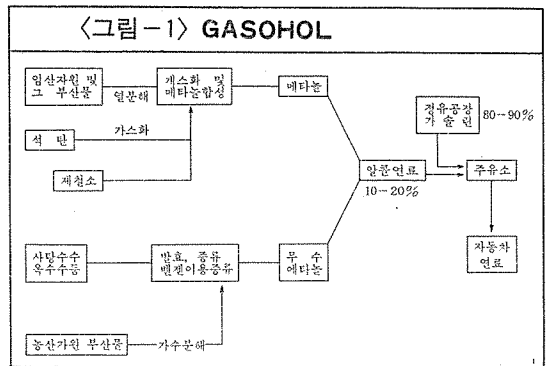
(韓國과학기술원 화공과 教授)

현재 주에너지원으로 사용되고 있는 석유는 가격상승과 공급의 불안정성을 내포하고 있으며 또한 그 자원의 유한성 때문에 세계각국에서는 그 대체에너지개발에 많은 관심을 집중하고 있다. 대체 에너지로는 우선 태양에너지, 원자력, 석탄이용의 확대 등을 들 수 있으나 바이오매스로부터 생물공학기술을 써서 에너지를 얻는 방법이 크게 주목받고 있다.

지구상에 도달되는 막대한 태양에너지의 일부가 광합성에 의해 전환되는 바이오매스는 녹색식물에 의해 생성되는 탄수화물로 볼 수 있는데 이를 대별하면 임산자원, 농산자원 및 해양식물군으로 나눌 수 있다. 에너지전환이 가능한 바이오매스로서 임산자원에는 목재, 농산자원에는 당질 또는 전분작물, 해양자원으로는 해조류를 들 수 있으며 각자원의 가공폐기물도 에너지전환이 가능한 바이오매스로 간주할 수 있다. 이들은 셀룰로즈, 헤미셀룰로즈, 리그닌, 전분류 등을 주성분으로 하는데 그대로 연료로 사용하거나 가공하여 에타놀이나 메탄가스등의 고급에너지로 전환하여 사용할 수 있다. 이중 발

효에 의한 에타놀생산이 세계각국의 주목을 끌고 있는 이유로서는 기술적으로 어느정도 확립된 공정이고, 가솔린에 섞어 직접 대체연료로 사용가능하며 비교적 환경에 영향이 적은 깨끗한 에너지라는 점을 들 수가 있다. 가솔린에 10~20% 섞어 사용하는 가스홀은 브라질의 경우 국가정책적인 차원에서 추진하고 있다는 것은 주지의 사실이고 미국에서도 실용화 되고 있다. 일본의 경우는 1980년에 결성된 신연료유개발기술조합(RAPAD)를 중심으로 여러차원으로부터 에타놀생산에 대한 연구가 수행되고 있다. 그런데 에타놀에너지의 실용화를 좌우하는 경제적인 요인들로는 원료가격, 공정기술에 따른 생산비, 부산물판매수익 등이 있는데 또한 원유가격과의 경쟁성, 국가정책적인 면도 함께 고려되어야 한다.

본고에서는 바이오매스의 에타놀 전환을 중심으로 현재의 기술개발 연구동향을 살펴보고 이들 각 공정, 각 원료로부터의 경제적 타당성을 고찰하고자 하였다. 또 우리나라의 경우 이용가능한 바이오매스와 이를 이용한 에타놀생산시에 검토되어야 할 점에 대하여 논의 하였다.

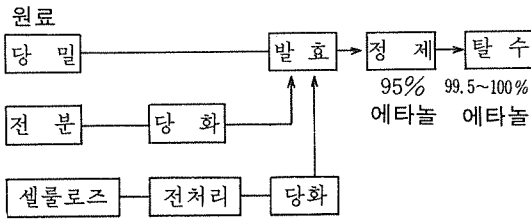


◇ 에타놀발효의 원료

에타놀생산공정은 원료의 전처리를 거쳐 발효, 정제, 탈수과정을 거쳐 무수에타놀을 얻게 되는 과정이다.

발효에 사용되는 원료로는 사탕수수등에서 나오는 당밀, 곡류, 카사바등에서의 전분 및 목질

〈그림-2〉 에타놀생산공정



〈표-1〉 Crop에서의 Ethanol Yield

Crop	Ethanol Yield (L/ton)	Crop	Ethanol Yield (L/ton)
Sugar Crops		Starch Crops	
Sugar Cane	70	Cassava	180
Sugar beet	95	Sweet potato	125
Sweet sorghum	86	Jerusalem artichoke	82
(Molasses)	280	Potato	100
		Corn(maize)	370
Cellulosic Materials		Wheat	
Wood	160	Babassu palm nut	80
Rice straw, bagasse*	277		

Source : World Bank (1980), Kardos and Mulcock (1977)
* Rapad Data (Japan)

자원에서 나오는 셀룰로즈가 있다. 에타놀발효는 기질로써 당질이 이용되므로 전분이나 셀룰로즈는 발효공정에 들어가기 전에 당화과정을 거쳐야 한다. 각종 자원으로부터 얻을 수 있는 에타놀의 수율과 원료비는 〈표-1〉, 〈표-2〉,

〈표-2〉 전형적인 에타놀 생산비 구성비

● 원료	- 63.5%
● 효소 및 효모	- 7.6%
약품	- 2.3%
● 동력	- 7.8% (스팀 4.3%, 전기 2.2%, 수도 1.3%)
노무	- 4.9%
수리 및 관리	- 3.0%
기타공급품	- 1.3%
오버헤드	- 9.4%

	100%

〈표-3〉에 나타낸 바와 같다. 에타놀생산에서 원료비가 차지하는 비율이 60% 이상이라고 볼때 당시의 농작물의 작황이나 수급상의 문제가 매우 중요한 요소가 됨을 알 수 있다. 각 원료로부터 에타놀생산시 경제규모를 갖는 생산량과

이의 건설비는 〈표-4〉에 나타냈는데 이는 원료비 및 원료가공비와 직접적인 연관이 있음을 보여주고 있다.

〈표-3〉 에타놀의 생산비

원료	원료비가격/ℓ-EtoH
사탕수수 - 10.9\$/ton (1977)	16.4¢/33.3¢
당밀 - 11.0\$/ton of sugar	
옥수수 - 39.4\$ - 137.8\$/ton	10.0¢/22.4¢ - 35.7¢/37.24¢
Cassava - 29.2\$/ton	20.0¢/33.8¢
돼지감자 - 10.0\$/ton	17.0¢/21¢
목질자원 - 19.8\$ - 27.55\$/ton	/31¢
도시쓰레기 -	3.5¢/32¢
볏짚 - 50\$/ton	
EtoH 1 liter 당 가격 (21¢ - 70¢)	
원료비 (3.5¢ - 30¢)	
원료가격/ton당 : 10.0\$ - 44.00\$ (운반비포함)	

한편 사탕수수나 옥수수같은 곡물류는 식량으로서의 경쟁적인 입장을 간과할 수 없으므로 공급의 유한성을 고려해야 한다. 따라서 자원이 풍부하고 재생력이 큰 셀룰로즈 이용 가능성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 셀룰로즈는 산 가수분해로 당화 하거나 생물공학적인 효소 셀룰라제에 의하여 당화하는 공정이 있는데 에너지절약적인 측면에서 생물공학적인 방법이 유력시되며 당화와 발효의 복합공정개발도 시도

〈표-4〉 경제규모 및 공장건설비

원료	연산(일산)·M ³	건설단가(s/liter·년)
사탕수수	27,000(150)	0.559
옥수수	62,000(710)	0.329
Cassava	45,000(150)	0.371
감자	-	0.12
돼지감자	5,000	0.30
나무	40,000	0.551
옥수수깻	17,000	-
볏짚	70,000	0.80

* 최신기술, 조업일수, 원료수급

되고 있다. 생물공학적인 당화에는 다량의 셀룰라제가 소요되는데 셀룰라제의 생산능을 높히는 균주개발을 위해서는 유전공학적인 방법도 고려되어야 할 것이다. 결국 셀룰로즈의 이용은 분해 당화하는 전처리 공정의 효율화가 주요 관건

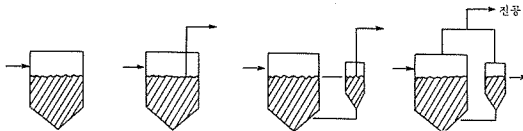
이 되고있다.

◇ 바이오리액터와 정제기술

에타놀발효를 위한 바이오리액터의 개발목표는 고수율(이론치의 90%이상), 고생산성 및 고농도에타놀을 얻는데 있다.

〈표-5〉 바이오 리액터

batch(회분식, 재래식)	수 율 : 90-95%
	생 산 성 : 1.8-2.5kg ETOH/M ³ ,hr
	최종농도 : 10-16%
연속식	생 산 성 : 5kg ETOH/M ³ , hr
연속식, Cell Recycle	특 징 : 고농도 yeast 유지 생 산 성 : 40kg ETOH/M ³ , hr
진공, Cell Recycle	생 산 성 : 80kg ETOH/M ³ , hr



종래의 회분식 발효의 경우 생산성이 매우 낮아서 1.8~2.5kg EtoH/m³, hr 정도이나 연속식이나 cell recycle 연속식등에 의하여 최고 30~40kg EtoH/m³, hr 까지의 높은 생산성을 갖는 바이오리액터가 개발되고 있다. 고생산성을 위해서는 발효조내에 고농도의 cell을 유지해야 한다. cell recycle을 용이하게 하기위해 응집성이 큰 효모를 개발하거나 Hollow Fiber Membrane을 이용한 강제적 여과에 의해 cell을 recycle시키는 연구도 진행되고 있다. 근래 미생물을 고정화시키는 기술이 발달함에 따라 효모의 고정화법이 시도되고 있다. 일본 RAPAD속 연구자들은 칼슘알지네이트를 담체로한 고정화 효모를 써서 파이롯트프랜트 규모의 에타놀공정의 시운전에 성공하였다. 이들은 고정화 효모법이 고수율, 고생산성, 저렴한 운전비의 연속조업 가능성등의 장점이 있음을 보고하였다. 고농도 cell유지에 의한 생산성의 향상은 발효조에 대한 장치비를 줄일 수 있는데 각종 바이오리액터에 따른 공장건설비 및 생산비에 대한 비

교는 〈표-6〉에 나타내었다. 연속식, Cell recycle식으로 갈수록 장치비와 생산비는 감소한다. 여기서 진공 recycle방식이 소개되고 있는데 기술적인 면이나 저장치비 저생산비에 대한 전망은 확실한 것으로 볼 수 없다.

〈표-6〉 각종 바이오리액터에 따른 공장건설비 및 생산비

공장건설비 (단위1,000\$, 용량 : 295m³/day, 95%에타놀)

	batch	continuous	continuous cell recycle	vacuum-cell recycle
발 효	14900	4800	2484	3366
에타놀회수	928	928	928	824
효모회수	962	962	1362	794
저 장	811	811	811	233
계	17601	7509	5585	5217

생산비 (단위 \$/M³ of ethanol)

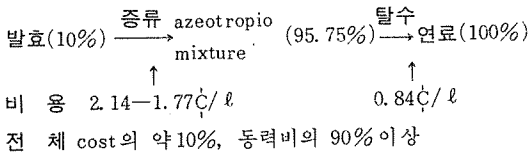
	batch	continuous	continuous cell recycle	vacuum-cell recycle
투 자	27.21	12.94	10.57	9.25
인 건 비	8.98	2.64	1.58	1.32
동 력 비	31.43	28.26	29.06	21.92
기 타	5.01	1.84	1.32	1.05
계	72.63	45.68	42.53	33.54

한편 고농도의 에타놀을 얻는 것은 에타놀정제과정의 비용을 줄이는데 유리하다. 그러나 고농도의 에타놀에서는 효모의 생존성이 감소하여 생산성의 저하가 따르게 된다. 따라서 고농도에타놀에서 생존할 수 있는 알콜내성 효모를 개발하거나 진공하에서 발효하여 발효조내의 에타놀농도를 줄여주는 방법이 연구되고 있다. 근래는 membrane을 이용 발효조내의 에타놀을 연속적으로 추출하여 효모의 생존능력을 유지시키는 방법도 보고되고 있다.

알콜발효에서 생산되는 발효액중의 알콜농도는 10%정도에 불과하므로 이를 정제하여 무수 에타놀로 만드는데는 많은 에너지가 소모된다. 보통 정제과정의 동력비는 전공정동력비의 90% 이상을 차지하며 전체 에타놀생산비중의 10% 이상을 차지한다. 무수에타놀 제조의 어려움은 에타놀이 농도 95.7%에서 물과 공비점을 형성

한다는데 있다. 이 공비점에서 탈수과정은 재래적인 이중 증류등으로는 에너지소모량이 많아 용매추출법이나 진공증류법등이 개발되었다.

정제기술



〈표-7〉에는 각종 정제공정에 대한 에너지소모량이 표시되었는데 특히 membrane을 이용한

〈표-7〉 각종 정제공정의 에너지소모량

에타놀농도(%) 최초 최종	공정	에너지소모량 (KJ/L)
10 100	재래식 "이중" 증류	7650
10 100	CO ₂ 로 추출정제	2200-2800
10 100	solvent 추출*	1000
10 100	진공증류	1000
10 95	증류	5000
10 95	증기재압축 증류	1800
10 95	"다중" 진공증류	2000
95 100	재래식 공비증류	2600
95 100	흡착에 의한 탈수*	330
95 100	개솔린을 이용한 저온정제	840
95 100	Molecular sieve*	1300-1750
5 10	역삼투압	140

*물질분리 인자를 사용한 정제

역삼투압방식이 에너지소모량이 적어 특히 관심을 모으고 있다. 에타놀의 정제비용은 원료비와 함께 에타놀생산비 중의 가장 큰 비중을 차지하고 있으므로 에너지 절약공정개발은 경제성 제고에 중요한 요소가 되고 있다.

◇ 바이오매스 에너지의 에너지수지

새로운 에너지로써 에타놀이 의미를 갖기 위해서는 생산된 에타놀이 갖고 있는 에너지가 생산에 소모된 에너지보다 적어서는 않된다. 소모 에너지로는 원료바이오매스생산으로 부터 운반 발효생산에 소모되는 에너지를 포함하게 된다. 여기에는 농사에서 농기계연료 및 비료, 농약

등에 사용된 에너지가 포함되어야 하나 그밖의 한계가 불분명한 것이 많아 에너지수지의 정확한 계산에는 어려움이 있어서 수지상의 득실에는 아직도 논란의 여지가 있다.

〈표-8〉 에너지수지(옥수수에타놀)

에타놀1 liter KJ	에타놀1 liter KJ
(생산)	(소모)
에타놀 21052	농작 12805
알데하이드, 퓨젤 300	운반 434
줄기, 기타부산물 46173	에타놀생산 30052
소계 67525	소계 43291

순에너지 생산: 24, 234
순에너지 손실: 21, 939(줄기, 기타부산물 제외)

〈표-9〉 목질자원 에타놀

	산가수분해(10 ⁶ KJ)	효소가수분해(10 ⁶ KJ)
(생산)	에타놀 6.84	8.06
	리그닌 4.41	4.41
	회수 11.25	12.47
	회수 52.35%	58.03%
(소모)	자동가수분해 0.70	0.70
	가성소다추출 0.12	0.12
	가수분해 0.70	0.23
	증류 1.97	2.32
	3.49	3.37
	순에너지 생산 36.1 %	42.3 %

(기준: 1000kg의 Aspen Woodchips(건조 중량기준)
21.48×10⁶KJ 함유(연탄 1, 200개 열량)

옥수수 에타놀과 목질자원 에타놀에 대한 대략적인 에너지수지는 〈표-8〉, 〈표-9〉에 나타내었다. 전체적인 수지상에서는 순에너지 생산으로 볼 수 있지만 줄기, 기타 부산물을 제외한 에너지수지상으로 보면 에너지손실 측면에서 부정적인 점이 있다.

◇ 우리나라의 경우

우리나라는 좁은 국토와 기후조건으로 바이오매스생산에 불리한 위치에 있다. 사탕수수는 물론이고 옥수수도 매년 많은 량을 도입하고 있는 형편이다. 국내의 이용가능 바이오매스자원을 〈표-10〉에 나타내었는데, 고구마와 감자는

대부분 주정원료로 식용에타놀생산에 충당되고 있는 실정이므로 가장 가능성이 높은 자원은 벧짚과 보릿짚이라 할 수 있다. 벧짚은 한때 벧짚펠프로 이용되기도 하였으나 경제적인 전망은 불확실한 것으로 알려졌으며 에타놀생산에 이용하기 위해서는 셀룰로즈 분해공정의 확립을 전제로 하고 있다.

<표-10> 바이오매스 자원

가솔린대체 (1983년도)		
자 원	생산추정량(M/T)	알콜생산가능량(kℓ)
벧 짚	7,334,032	2,300,000
보릿짚	2,095,201	650,000
고구마	1,011,697	172,000
감 자	468,947	37,000
목 재	6,000,000	1,100,000
계		4,259,000

* 가솔린 전소비량 1,000,000kℓ/년

국내 벧짚생산량은 연 7백만톤 이상으로 추정되고 있는데 벧짚중의 셀룰로즈 함량을 30% 이상으로 볼 때 에타놀 생산가능량은 연 2백30만 kℓ정도로 국내소비 가솔린량의 2.3배에 해당하는 량이다. 벧짚은 전국 농촌에 분포되어 있어서 운반에 어려움이 있고 큰 부피로 인한 저장 등에 문제점을 갖고 있다. 따라서 벧짚원료가의 60% 이상을 운반·잡하비가 차지하고 있다. 벧짚의 원가를 100원/kg이라 하고 에타놀 이론수율을 0.277 ℓ/kg이라하면 벧짚에타놀 생산가격의

<표-11> 벧짚 에타놀 원가계산

- 벧 짚 : 셀룰로즈(32-53%)
- 펜 토 산(21-24%)
- 리그 닌(19-25%)
- 가 격 : 40원/kg
- 운반비 : 65원/kg(평택→서울, 13만원/2톤)
- 원료비 : 100원/kg
- 벧짚 1kg당 에타놀 생산 0.277 ℓ

범위는 252원/ℓ ~ 553원/ℓ 으로서 현 국내 에타놀가격 668원/ℓ 보다 저렴하며 미국의 경우와 좋은 비교가 되고 있다.

또 국내 가솔린공정도 가격과 비교하면 벧짚 에타놀도 조건에 따라서는 경제성이 있을것으로

예측할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{최고가: 원료비} &= 100\text{원} \times \frac{1}{0.277} = 361\text{원}/\ell (\$121\text{톤}) \\ \text{가공비} &= \frac{192\text{원}/\ell (\text{미국옥수수줄기})}{\text{원가 } 553\text{원}/\ell} \\ \text{최저가: 원료비} &= 20\text{원} \times \frac{1}{0.277} = 72\text{원}/\ell (\$24.2/\text{톤}) \\ \text{가공비} &= 50\text{원} \times 3.5 = 180\text{원}/\ell \\ &= \frac{180\text{원}/\ell}{\text{원가 } 252\text{원}/\ell} \\ (\text{미국: } 37.2\phi/\ell \times 820\text{원}/\phi &= 305\text{원}/\ell (\$137.8/\text{톤})) \\ \text{현재우리나라의 에타놀가격} &= 668\text{원}/\ell \end{aligned}$$

<표-12> Gasoline의 국내가격

국내가격	공장도가격(세전)	소비자가격(원/ℓ)
고급휘발유	377.59	890
보통휘발유	281.80	660
균용휘발유	335.02	335.02

* 1983년 2월 이후 원가의 235% 정도

◇ 결 언

에너지의 대부분을 수입에 의존해야 하는 우리나라는 대체에너지로서 바이오매스의 이용은 그 중요성을 더해가고 있다. 현재 바이오매스 이용의 주요 관심사는 에타놀전환을 통해 가솔린 대체연료로 사용하고자 하는데 있다. 바이오매스 에타놀의 경우 가격면에서 석유연료와 경쟁성은 부족하나 값싼원료이용과 발효기술개신으로 원가절감에 큰 진전을 보이고 있다. 특히 풍부한 셀룰로즈를 이용한 에타놀생산은 미래 세계에너지수급에 희망을 던져주고 있다.

입지와 기후조건이 불리한 우리나라는 지역특성에 맞는 바이오매스 개발생산과 기술개발에 노력해야하며 저위도 개발도상국들과의 자원개발 및 기술교류로 값싼 바이오매스 확보에 눈을 돌려야 할때이다. 미래의 석유고갈에 대비한 대체에너지이용은 필연적이므로 국가 에너지수급면에서 정책적인 배려가 있어야 하며 장기적인 안목에서 유관산업계, 학계 및 에너지 정책수립자들간의 긴밀한 협동체제가 필요하다.