

## 수송용 대체 에너지-EtOH 생산에 관한 기술개발 전략

허 병 기

인하대 생물공학과

### Strategy of Technology Development for the production of EtOH as an Alternative Automobile Fuel.

Byung Ki Hur

Department of Biological Engineering, Inha University

#### 1. 서 언

20세기 인류가 이룩한 물질문명의 화려한 발전은 물질의 과량소비 에너지의 과다소비 공해물질의 대량배출 등의 바탕 위에 이루어졌다는 것을 아무도 부인하지 못할 것이다. 이 기간 동안 인류의 삶의 질은 향상되었을지 모르나 물질 및 에너지 자원의 고갈 지구환경의 파괴 질병의 유발 등과 같은 풀기 어려운 숙제를 후손들에게 남겨놓게 되었다.

에너지 측면에서 살펴볼 때 현 인류는 한세기 동안 아무런 철학 없이 지구가 수십억년 동안 저축해 놓은 화석에너지의 대부분의 양을 낭비하고 있으니 최소한 에너지 고갈문제를 해결하기 위한 실마리라도 풀어놓아야 할 책임과 의무를 현 인류는 지고 있다. 최근에 이르러서야 석유에너지의 보전, 에너지 절약, 환경보전 등의 문제를 종합적으로 해결하기 위하여 화석연료에 대한 의존도를 줄이고 청정에너지인 신재생에너지에 대한 의존도를 높이며 현재의 대량에너지 소비구조를 개선하는 에너지 절약기술개발에 관심을 돌리기 시작하였다.

에너지원은 그 물리화학적 특성에 따라 에너지 전환 시스템이 다를 뿐만 아니라 변환되어 생산되는 에너지 형태 또한 상이하다. 따라서 현재 사용되고 있는 에너지원이 어떤 특성의 것이냐에 따라 고려할 대체에너지원 또한 달라질 것이다. 현재까지 알려진 재생에너지원으로부터 현 에너지원에 대한 대체가능성을 살펴보면 다음과 같다. 난방용의 저온에너지에 대체가능한 재생에너지원으로는 태양에너지와 대기에너지원이 적합할 것이며 수송 취사 보일러 등의 고온에너지원에 대하여서는 바이오매스(매탄, 에탄올)와 수소에너지 등이 있다. 전력 생산을 위한 재생가능한 에너지원으로 풍력, 수력, 수소, 바이오매스 해양에너지(조력, 파력, 온도차, 농도차) 태양

에너지 지열 등이 있다.

Fig. 1은 현재 사용되는 에너지 생산기술 matrix를 나타내며 Fig. 2는 대체에너지 생산기술 matrix를 나타내고 있다. 이 중 수송용으로 사용되는 석유연료의 대체에너지로 각광을 받고 있는 알콜생산에 대한 당위성과 그 생산기술 개발전략에 대하여 논의하여 보고자 한다.

#### 2. 석유에너지

##### 2-1. 세계의 화석에너지 생산 및 소비

Fig. 3은 세계의 일차에너지 생산량의 자원별 비율을 나타내고 있다. 1990년도의 일차에너지 생산구조가 1970년도에 비하여 약간의 차이는 있으나 석유석탄 및 천연가스로 대별되는 화석 연료가 현재 세계 에너지 생산 및 소비량의 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다. 특히

#### 허 병 기



- '72 서울대 공대 화학공학과 공학사
- '73~'78 국방과학연구소 연구원
- '78~'83 아주대학교 종합연구소 선임연구원
- '92 불란서 Compiègne공대 공학박사
- '83~'84 한국중공업 기술본부 발전용보일러 시스템 설계실장
- '84~현재 인하대공대 생물공학과 교수
- '85~'86 대한환경공학회 총무이사
- '89~'90 한국생물공학회 총무이사
- '90~'91 한국생물공학회 기획간사

에너지 자원	에너지 자원				에너지 자원의 가공 가공 및 변화	에너지의 전환			에너지의 소비												
	자원탐사	생산	수송	저장		전환 System	저장	수송	소비 System	고온	사온	전력	원료								
<b>화석에너지자원</b>					적질연소용 코우크스화 가스화 액화	발전			내연기관 외연기관 동력 원료	●	●	●	●								
● 석유														발전			내연기관 외연기관 동력 원료	●	●	●	●
● 원유유지크렌드														발전			내연기관 외연기관 동력 원료	●	●	●	●
<b>원자력에너지원</b>					핵연료물질의 가공	발전	원자로 재래식 경수로 개발형전환로 신형전환로 고온가스로 중수로 액체감속열차 고속중수로 가스냉각 용융염중수로 물의 열분리 (수소생산)		내연기관 외연기관 동력 원료	●	●	●	●								
● 유리늄, 플루토늄	광산 해수	농축 원분리 가스화산																			
● 수소, 리튬	해수					발전			내연기관 외연기관 동력 원료	●	●	●	●								

Fig. 1. Matrix for Energy production technology.

에너지 자원	에너지 자원				에너지 자원의 가공 가공 및 변화	에너지의 전환			에너지의 소비				
	자원탐사	생산	수송	저장		전환 System	저장	수송	소비 System	고온	사온	전력	원료
<b>재생에너지자원</b>					발전	발전			내연기관 외연기관 동력 원료	●	●	●	●
● 태양에너지													
● 바이오매스					발전				내연기관 외연기관 동력 원료	●	●	●	●
● 대기에너지						발전			냉난방	●			
● 수력, 조수력						발전			동력		●		
● 풍력						발전			동력		●		
● 해양에너지 (조력, 파력, 온도차, 농도차)						발전			동력		●		
● 지열에너지						발전			동력		●		

Fig. 2. Matrix for Alternative Energy production technology.

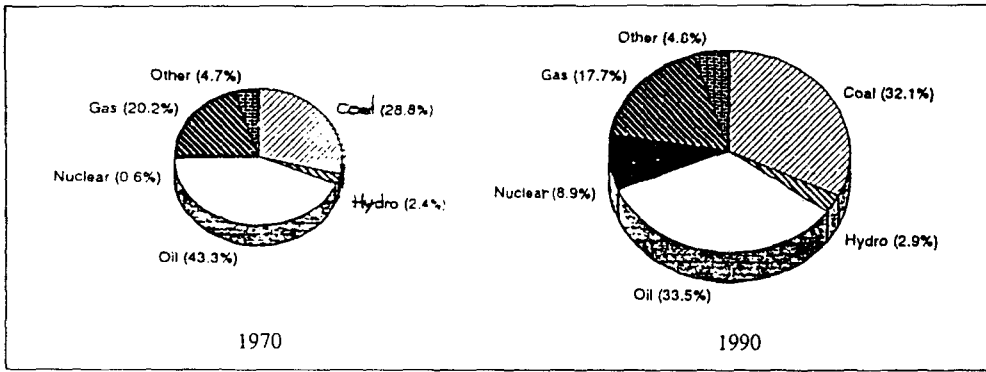


Fig. 3. Primary Energy production by source (%).

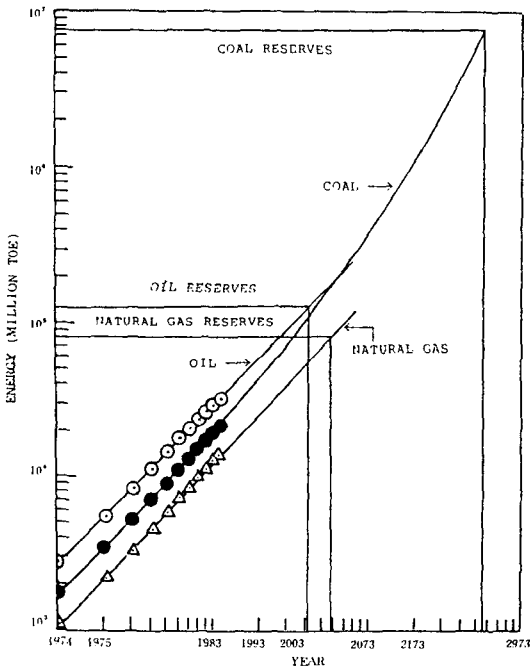


Fig. 4. Cumulative Energy Consumption vs. Year  
 DATA: Oil and Gas journal (12/31/1984).  
 BP Statistical Review of the World Energy (1984).

석유는 에너지원으로써는 물론 중화학공업의 기본원료로도 없어서는 안될 자원이나 재생 불가능한 특성을 지니고 있다. 따라서 석유를 보다 부가 가치가 높은 중화학공업의 원료로만 사용하기 위해서는 에너지 생산에 대부분을 소비하고 있는 현재의 석유소비구조를 대폭수정하지 않으면 안될 것이다. 이를 위해서는 석유연료를 대체할 새로운 에너지원이 최우선적으로 개발되어야 할 것이다.

Fig. 4는 1974년부터 1990년까지 전세계가 소비한 석유, 석탄 천연가스의 누적소비량 경향으로부터 화석 연료의 매장량이 고갈되는 시기를 예측한 그림을 나타내고 있다. 석유인 경우 지금으로부터 20내지 30년 후에는 고갈되며 천연가스 경우에는 40내지 50년 후에는 고갈 될 것으로 예측된다. 그러나 석탄의 경우 그 매장량이 석유에 비하여 70내지 80배에 달하기 때문에 그 고갈시기 또한 200년 후로 예측된다. 그러므로 화석연료 중 우선적으로 대체하여야 할 에너지원은 석유와 천연가스가 될 것이다.

2-2. 우리나라의 석유에너지 소비경향

Table 1은 1970년에서 2010년까지의 우리나라 에너지 총 소비량과 석유에너지의 분야별소비량 및 총 에너지소비량에 대한 비율을 나타내고 있다. 이 결과에 의하면 우리나라 총에너지소비량 중 석유에너지가 차지하는 비중은 1970년 전체 에너지소비량의 41.2%에서 1990년에는 60.3%까지 상승하였다. 수송용으로 사용되는 석유에너지량은 1970년 전체에너지의 12.7%이었던 것이 1990년에는 18.8%까지 증대하였으며 2000년도에는 25.5%까지 상승될 전망이다. 이 증가 추세를 양적인 측면에서 살펴보면 1990년도의 수송용 석유소비량은 1970년의 95Pj에 비하여 무려 6배 이상이나 증가한 589 Pj에 이르고 있다. 이와 더불어 에너지의 수입의존율도 상승하여 1980년에 전체 에너지소비량의 74%를 수입에 의존하던 것이 1991년도에는 91%까지 수입에 의존하는 실정에 이르게 되었다.

Table 1과 같은 석유에너지의 소비추세를 감안하여 불 때 탈냉전 이후 세계적으로 일고 있는 자원의 자국화 및 전술화의 바람은 석유의 부존자원이 전무한 우리나라의 에너지문제에 심각한 영향을 미치게 되고 결국에는 국가 경제 전반에 심각한 타격을 가할 것이 명약관화하다.

**Table 1. Energy Demand by Sources and Sector (Pj).**

분야 \ 년도	1970	1973	1979	1980	1988	1989	990	2000	2010
석유 에너지									
• 공업용	153 (20.5)	232 (24.8)	452 ( 9.2)	458 (29.1)	611 (24)	667 (24.2)	837 (26.7)	1467 (27.0)	1840 (26.5)
• 수송용	95 (12.7)	127 ( 13 .)	233 (15.1)	204 (13.0)	446 (17.5)	510 (18.5)	589 (18.8)	1386 (25.5)	1745 (25.1)
• 가정/상업용	21 ( 2.8)	609 ( 3.1)	90 ( 5.8)	93 ( 5.9)	223 ( 8.7)	280 (10.2)	371 (11.8)	655 (12.0)	716 (10.3)
• 기 타	39 ( 5.2)	46 ( 4.9)	59 ( 3.8)	75 ( 4.8)	80 ( 3.1)	90 ( 3.3)	95 ( 3.0)	86 ( 1.6)	80 ( 1.2)
소 계	308 (41.2)	433 (46.3)	835 (54)	830 (53.8)	1360 (56.2)	1547 (60.3)	1893 (66.1)	3595 (63.0)	4381
총에너지 소비량	748 (100)	936 (100)	1547 (100)	1573 (100)	2551 (100)	2753 (100)	3139 (100)	5439 (100)	6950 (100)

(괄호안의 숫자는 연간 총에너지 소비량에 대한 백분율임)

**Table 2. Physical Properties of Gasoline and EtOH.**

Properties \ Fuel	Molecular Formular	Density	Vapor Density (Air;1)	Boiling point	Flash point	Ignition Temp.	Higher Heating Value	Explosive Limits %(v/v)
Gasoline	-	0.73~0.76	3~4	30~200℃	40℃	250℃	11,000 kcal/kg	6~13.5
EtOH	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	0.794	1.59	78.32℃	13℃	518℃	7,119.6 kcal/kg	3.28~19.0

### 3. 수송용 대체에너지-EtOH

있다.

알콜은 에너지밀도, 수송및저장 특성이 석유의 특성과 유사할 뿐만 아니라 비 고갈적이며 재생이 가능한 특성도 내포하고 있다. 특히 발효알콜의 원료는 국내 바이오매스 자원으로도 충당 가능하기 때문에 특별한 대체 자원이 없는 우리나라 실정에는 발효알콜이 수송용 연료인 석유의 대체에너지 자원으로 가장 유망하다. 그러나 발효알콜을 수송용 대체에너지원으로 사용하기 위해서는 앞에서 언급한 바와 같이 수송기관의 에너지 변환시스템에 대한 연료로서의 특성이 적합하지 않지 않으면 안된다.

현 수송기관의 에너지변환 시스템인 내연기관이 개솔린 또는 경유의 연소 및 물리적 특성에 알맞게 설계 되어 있기 때문에 순수알콜만을 현 내연기관의 연료로 사용할수는 없을 것이다. 그러나 알콜 함량이 무게비로 15% 이하인 개솔린-에탄올의 혼합연료인 개소홀은 현재 사용중인 내연기관의 구조를 전혀 개조하지 않거나 일부만 개조함으로써 순수개솔린의 대체연료로 사용하고

#### 3-1. EtOH의 물리화학 및 성능특성

알콜이 개솔린의 대체연료로 사용될수 있기 위해서는 연료로서의 특성이 어떤 제한된 범위내의 값을 지녀야 한다. 연료특성이 규격을 벗어나게되면 연소가 불안정하게 되어 기관의 성능 및 내구성을 보장할 수 없게 된다. 연료의 특성으로는 휘발도, 점도, 부식성 인화점, 점화온도 연료-공기비, 옥탄가, 열함량 비등점 등이 있다. 이중 반드시 평가하여야 할 특성으로는 antiknock quality와 balanced volatility이다. 이외에 개소홀과 같이 두연료의 혼합물인 경우에는 두물질간의 상용성(compatibility)또한 점검하지 않으면 안될 특성이다.

##### 3-1-1. Gasoline과 EtOH의 물리화학적 특성

Table 2는 개솔린과 에탄올의 물리적특성을 나타내고 있다. 이 표에서 알 수 있듯이 순수에탄올의 연료 특성이 개솔린과 상당한 차이를 나타내고 있기 때문에 순수에탄올을 현재의 개솔린 엔진에 직접 적용 할 수 없음을 알수있다. 따라서 EtOH 10%와 개솔린 90%의 혼합연

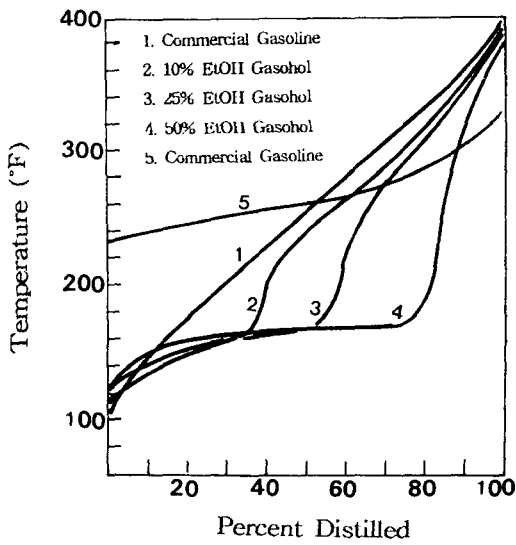


Fig. 5. ASTM Distillation Curve of Various Fuels.

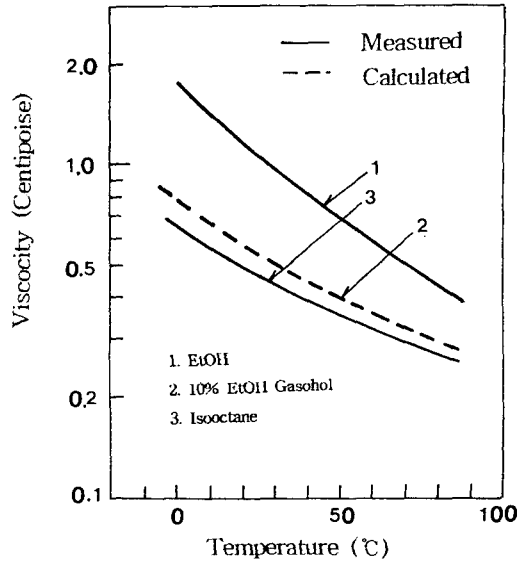


Fig. 7. Viscosity vs. Temperature.

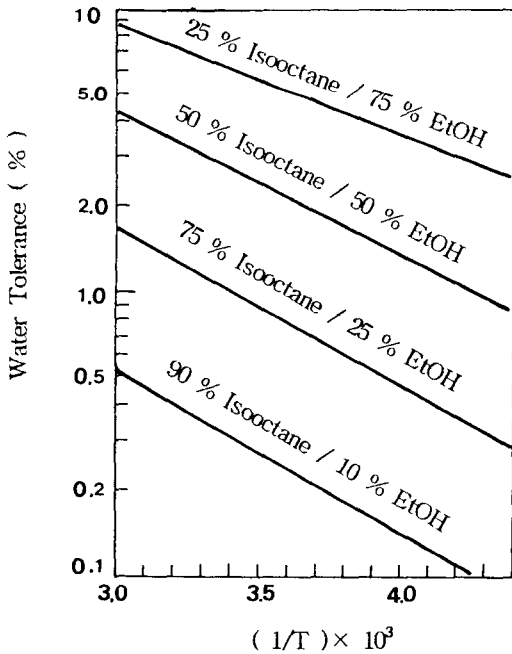


Fig. 6. Water Tolerance vs. Reciprocal Temperature, Case of Isooctane.

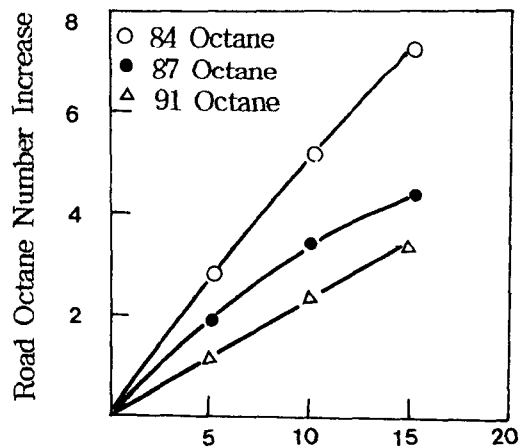


Fig. 8. Octane Quality Increase due to Methanol Addition to Gasoline.

료인 개소홀이 현 개솔린 기관에 적합한 연료인지를 검토하여 보자.

3-1-2. 분류 특성곡선 (Distillation Curves)

연료특성 중 balanced volatility는 내연기관의 성능 특성 즉, 시동성, warm-up rate, mileage, vapor lock,

증발에 의한 연료손실 및 crankcase dilution 등과 함수관계가 있다. 따라서 개소홀을 현 개솔린 기관의 연료로 사용하기 위해서는 개소홀의 balanced volatility를 나타내는 분류특성 곡선이 개솔린의 분류특성곡선과 유사하여야 한다. Fig. 5는 상용휘발유와 EtOH 함량이 10,25,50% 인 개소홀의 분류특성곡선을 나타내고 있다. 이 결과에 의하면 EtOH 가 10 wt% 함유된 개소홀의 분류특성은 상용휘발유의 분류특성과 유사하나 EtOH 함량이 50% 까지 증가하면 휘발유의 분류특성에서 크게 벗어남을 알 수 있다.

3-1-3. 상용성 (Compatibility)

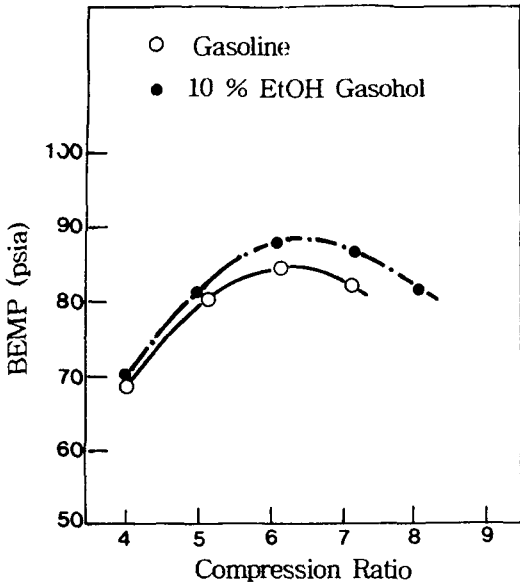


Fig. 9. Effect of Compression Ratio on the Maximum BMEP Obtainable with various Blends 1400 rpm, Optimum Inlet Air Temperature, Optimum Spark Advance.

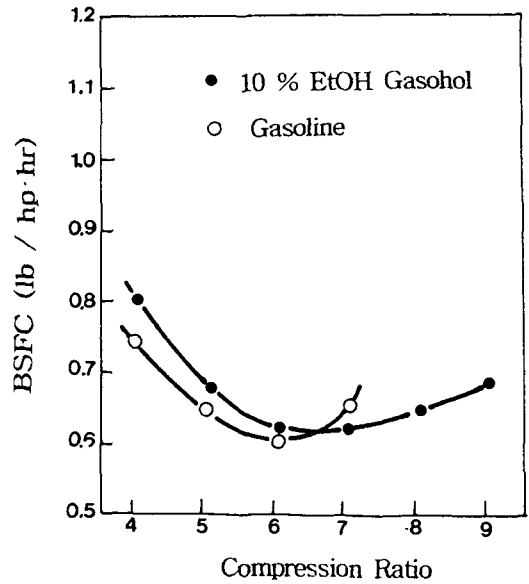


Fig. 10. Effect of Compression Ratio on the minimum BSFC Obtainable with Various Blends. 1400 rpm, Optimum Inlet Air Temperature, Optimum Spark Advance.

식 (1)은 Kretschmer 와 Wiebe에 의하여 개발된 알콜-탄화수소 혼합물에 대한 물의 허용치를 나타내는 수식이다.

$$\log S = a - (b/T) \tag{1}$$

위 식에서 S: 물의 허용치, 부피 %

a, b: 탄화수소의 구조 및 농도에 따른 상수

T: 절대온도, K

이 식을 이용하여 EtOH 함량에 따른 개소홀의 수분허용치를 도시하면 Fig.6과 같다. 혼합물의 온도를 고정시켰을 때 EtOH의 함량이 증가하면 상분리가 일어나는데 필요한 수분의 함량 또한 증가한다. EtOH의 함량이 10 wt% 인 개소홀에 대하여 알콜과 개솔린의 상분리가 발생되지 않는 수분의 최대 허용치를 살펴보자. 여름철에 개소홀의 온도가 60 라고 가정하면 수분의 최대 허용치는 부피비로 약 0.5%이며 겨울철의 개소홀의 온도가 -5 라고 하면 수분의 최대 허용치는 0.2%가 된다. 따라서 EtOH을 10% 함유한 개소홀을 내연기관에 사용하려면 개소홀내에 포함된 수분의 량이 부피비로 0.2% 미만이어야 한다는 결론에 도달하게 된다.

3-1-4. 점도

Fig. 7은 아이소옥테인, EtOH 및 개소홀의 온도와 점도사이의 함수관계를 나타내고 있다. 동일한 온도에서 아이소옥테인과 순수 EtOH의 점도는 상당한 차이를

나타내나 10% EtOH의 개소홀의 점도는 아이소옥테인의 점도와 별한 차이가 없음을 알 수 있다.

3-1-5. 옥탄가 (Octane Number)

옥탄가는 연료의 연소 녹킹에 대한 저항성을 측정하는 상대값으로 옥탄가의 증가에 비례하여 엔진의 성능이 증가하게 된다. 녹킹현상을 방지하기 위하여 기하학적 및 연소공학적인 측면에서 많은 연구가 수행되어 많은 성과를 얻었다. 세계 1차대전을 전후하여 녹킹현상 억제제를 위하여 물 혹은 메칠 및 에칠 알콜이 사용되었으나 연료에 가용성인 tetra-ethyl-lead의 출현과 더불어 알콜의 사용이 중단되었다. 그러나 에너지자원의 감소현상과 더불어 tetra-ethyl-lead에 의한 납공해 문제가 심각하게 대두되면서 옥탄가 향상 및 공해물질 감소를 위한 알콜의 사용이 다시 각광받기 시작하였다. Johnson, Allsup 및 Wolfe 등은 메탄올-개솔린의 혼합물을 일단 실험기관 및 주행시험을 통하여 메탄올 함량이 5, 10, 15%인 개소홀의 옥탄가를 측정하여 메탄올의 함량에 따른 옥탄가의 증가율이 원래 옥탄가가 낮은 개솔린을 사용한 경우가 옥탄가가 높은 개솔린을 사용한 경우 보다 높다는 Fig. 8의 연구결과를 발표하였다.

3-1-6. 배기가스 (Emission)

개소홀은 순수개솔린 연료에 배하여 배기가스 내의 공해물질이 줄어드는 경향을 나타낸다. Table 3은 순수개솔린을 연료로 사용하였을 때 배출되는 배기가스

내의 공해물질량에 비하여 EtOH가 10내지 20% 혼합된 개소홀에 의하여 배출되는 공해물질이 얼마나 줄어드는지를 보여주는 연구결과이다. 이 결과에 의하면 NO<sub>x</sub>의 농도는 수 %가 감소하며 HC의 농도는 2내지 10%가 줄어든다. 특히 개소홀을 연료로 사용하였을 때 순수 개솔린에 비하여 배기가스내의 환상 방향족 화합물의 농도가 크게 감소하는 경향을 보이고 있다.

3-1-7. 출력 및 연료의 경제성

Table 1에서 알 수 있듯이 알콜의 heating value는 개솔린의 약 60%이나 증발잠열은 약 3배이기 때문에 manifold 에서의 유입연료는 상당히 냉각되어서 부피 효율을 높게한다. 그 결과 연효율은 증가하나 공기의 최적유입온도는 개솔린에 비하여 높아야 한다는 결점도 있다.

Rogowski의 실험결과에 의하면 알콜혼합비율 25%까지는 순수 개솔린의 공기 최적온도와 동일하였다.

Fig. 9는 개솔린과 개소홀을 연료로 사용하고 C.F.R 엔진을 최적조건으로 작동시켰을때 압축비와 BMEP (Brake Mean Effective Pressure)사이의 함수관계를

나타내고 있다. 동일한 압축비에서 BMEP의 값은 개소홀인 경우가 순수개솔린의 경우보다 약간 높은 값을 나타내었으나 최적압축비는 모두 6을 나타내었다.

Fig. 10은 최적운전조건하에서의 압축비에 따른 BSFC (Brake Specific Fuel Consumption)을 나타내고 있다. 압축비 6.5 이하에서는 동일한 압축비인 경우 개소홀의 BSCF값이 순수 개솔린의 BSCF값에 비하여 약간 높았으나 6.5 이상에서는 반대의 경향을 나타내었다. 그러나 BSCF값이 최소가 되는 압축비는 두연료 모두에 대하여 6값을 나타내고 있다.

3-2. EtOH 생산 및 지원정책

3-2-1. 바이오매스량

지구가 태양으로부터 흡수하는 연간 에너지의 총량은  $7.2 \times 10^{20}$  Kcal이며 이중 약 1000분의 1이 식물의 광합성 작용에 의하여 바이오매스로 축적된다. 따라서 매년 재생되는 바이오에너지량은  $7.2 \times 10^{17}$  Kcal로 연간 세계에너지 총소비량의 10배에 해당하는 량이다.

Table 5는 우리나라에서 연간 생산되는 가용 바이오매스 자원량과 바이오 에너지 최대생산량을 나타내고 있다.

Table 5의 량은 생물공학적인 식물개량으로 더욱 증대 될 수 있을 뿐만 아니라 유휴지의 개발과 이에 적합한 식물의 선택 등의 과정을 통하여 보다 많은 바이오매스를 생산할 수 있을 것이다.

3-2-2. 수송용 대체에너지 EtOH의 생산 및 생산지원 정책

석유에너지원의 고갈에 대처하고 석유자원을 보전하고 에너지의 자국화 및 전략화를 목표로 브라질 정부는 PERALCOOL 계획을 수립하고 에탄올에 대한 가격 및 시장성보장, 사탕수수 민디오카 등의 농작물 경작과 알코올 증류업에 대한 금융지원, 에탄올 생산에 대한 장려 등의 정책을 수행함으로써 1980년 400만KL의 에탄올 생산량을 1985년도에는 1070만KL 까지 끌어올렸으며 장래에는 개솔린의 50% 이상을 에탄올로 대체하

Table 3. Reduction of Air Pollutants.

공해 물질	감 소 량
CO 농도	순수 개솔린 연료에 비해 30% 내외 감소
NO 농도	순수 개솔린 연료에 비해 수 % 감소
HC 농도	순수 개솔린 연료에 비해 2내지 10% 감소

Table 4. Biomass Production.

항 목	에너지 량(kcal)
태양 에너지 연간 총량	$7.2 \times 10^{20}$
화석 에너지 총량	$1.03 \times 10^{19}$
현존 바이오매스 총량	$7.2 \times 10^{18}$
세계의 연간 에너지 총량	$7.2 \times 10^{17}$
세계의 연간 식량 총 소비량	$3.6 \times 10^{15}$

Table 5. Available Biomass Annual Production and Predicated Maximum Annual Production of Bioenergy.

바이오매스	생산량(억톤)	알콜생산(백만 KL)	바이오가스생산(m <sup>3</sup> )	석유 환산 열량(백만 TOE)	석유 대체율(%)
산림	136	12.7	—	6.37	23.9
농산 폐기물	9.1	3.1	—	1.55	5.8
전문 원료	—	0.4	—	0.2	0.8
축산 폐기물	4.9	—	$1.0 \times 10^9$	0.64	2.4
도시 폐기물	—	—	—	1.8	6.9
계	150.3	16.2	$1.0 \times 10^9$	10.56	39.8

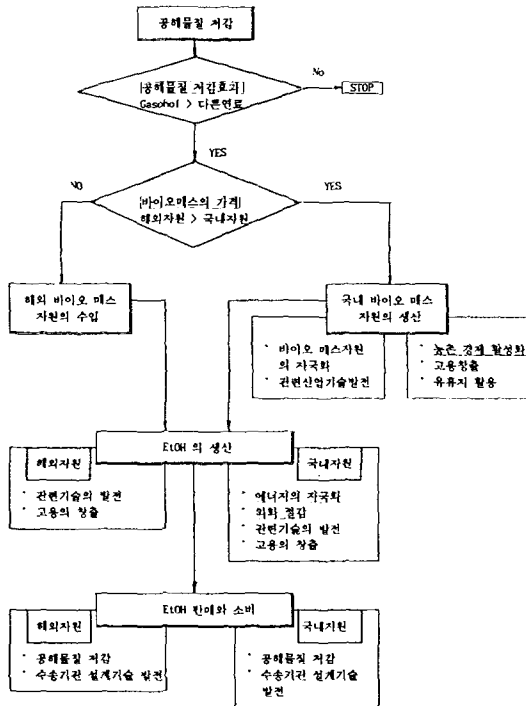


Fig. 11. Flow Diagram for the Objectives of Production of EtOH.

려고 하고 있다. 이런 정책의 수행결과 1980년도의 알콜전용 자동차 댓수가 193,000이었던 것이 1981년에는 608,000대로 증가 하였으며 이런 증가 추세는 지속되고 있다. 이에 따라서 외화 절감효과도 크게 나타나기 시작하여 1985년 환해동안에만도 약 50억 불에 달하는 외화를 절감할 수 있었다.

미국에서도 1979년 EPA에서 개소홀 판매를 허용함은 물론 개소홀을 연방자동차 연료조세에서 면세시키는 에너지 조례를 통과시켰다. 또한 같은 해에 Illinois 주 Springfield에서 10%EtOH를 혼합한 개소홀을 판매하기 시작하였다. 1980년에는 Energy Security Act를 제정하여 개솔린 소비의 10%에 해당하는 알콜생산을 목표로 알콜 생산업체에 대한 금융혜택과 아울러 Crude Oil Windfall Profit Tax Act 제정을 통하여 알콜생산업체에 대한 세제혜택 및 개소홀의 면세를 1992년까지 연장하도록 하였다. 이런 환경조성에 따라 1981년 수송용 순수 EtOH의 생산량이 2.64억L에 이르렀으며 1992년에는 생산량을 38억L로 설정하였다. 이를 국가 이외에도 독일, 프랑스, 태국, 인도네시아 등의 국가에서도 이미 10년전에 수송용 EtOH 생산계획을 수립하고 그 계획을 추진하여 오고 있다.

Table 6. Objectives and Additional Effects for Production of EtOH as Automobile Fuel.

1. 공해 물질의 저감
2. 외화의 절감
3. 에너지의 자국화
4. 농촌 경제의 활성화
5. 고용의 창출

#### 4. 수송용 대체연료 EtOH생산기술의 개발전략

위의 분석을 통하여 바이오매스를 원료로 하는 발효 알콜이 석유의 대체연료로 적합하다는 이유에 대한 충분한 타당성이 입증되었다고 할 수 있다. 그러나 우리나라와 같이 바이오매스 자원이 빈약한 나라인 경우에는 단순히 경제적 측면에서의 분석을 통하여 발효 알콜이 수송용 대체연료로 적합하다고 판단하기는 어려울 것이다. 현재까지 알콜을 수송용 연료인 석유의 대체연료로 사용하고 있는 나라는 바이오매스 자원이 풍부한 2내지 3개의 국가에 불과하다. 바이오매스 가격이 충분히 저렴하지 않는 국가인 경우 생산된 알콜의 단위 발열량당의 가격이 석유에 비하여 고가일 수 밖에 없는 현실 때문에 현재의 석유 가격이 상승되지 않는 한 단기적 측면에서 볼 때 알콜이 수송용 대체에너지원으로써의 경쟁력이 없다는 딜레마에 빠지게 된다.

특히 우리나라인 경우 바이오알콜을 수송용 대체연료 사용하기 위해서는 생산 기술개발 연구초기부터 몇가지 목표를 설정하고 이 목표에 최적인 기술개발 및 생산 전략을 수립하지 않으면 바이오알콜생산을 위한 사업은 성공하기 어려울 것이다. 먼 장래에 석유의 고갈로 인하여 석유가격이 상승하고 값싼 바이오매스자원이 개발되었을 때 수송용 연료로써의 바이오알콜이 석유와 경제적 측면의 경쟁력을 지닐 것이나 현재는 물론 가까운 장래에 경쟁력을 지닐 것이라는 것은 거의 불가능하다.

##### 4-1. EtOH 생산을 위한 기본 목표설정

수송용 석유 대체연료 EtOH를 생산하는 목표 및 그 부대효과를 다음의 몇가지로 요약할 수 있을 것이다.

EtOH 생산에 대한 위의 다섯가지 목표는 서로 유기적인 관계를 가지고 있으나 계획 수립 방향에 따라서 달성되는 목표는 서로 다를 것이다.

EtOH 생산의 대전제로 삼을 수 있는 목표는 공해물질 저감과 에너지의 자국화의 두가지로 집약된다. 이를 각



경우에 대하여 위의 다섯가지 목표가 서로 어떤 유기적 함수관계를 나타내는지 분석하여 보자. Fig. 11은 수송용 연료 EtOH 생산의 최우선 목표를 공해물질 저감에 두는 경우에 대한 Table 6의 각 목표와 부대효과 사이의 관계를 나타내고 있다. 이 경우 개소홀에 의한 공해물질 배출량이 다른 연료 또는 개량된 연료의 공해물질 배출량과 비교 분석하여 개소홀이 생성하는 공해 배출량이 많은 경우에는 다음 단계로 진행시킬 의미가 없지

된다. 그 반대인 경우 그 다음 단계로 진행하여야 할 사항이 EtOH 생산 원료인 바이오매스에 대한 해외 자원 가격과 국내자원 가격의 비교 분석이다. 동일한 량의 EtOH를 생산하는데 소요되는 바이오매스의 가격이 해외자원이 국내자원 보다 저렴한 경우에는 Fig. 11의 왼쪽 방향으로 사업을 진행시켜야 할 것이다. 이 경우 도달할 수 있는 목표와 기대할 수 있는 부대효과는 EtOH 생산에 관련된 발효기술, 분리기술 등의 발전을 도모할 수 있으며 이 사업의 진행에 따른 고용의 창출효과를 얻을 수 있게 된다. 또한 생산될 EtOH의 판매 및 소비와 연관되어 공해물질 저감의 목표에 도달함은 물론 내연기관 설계기술의 발전을 이룩할 수 있을 것이다. 현 상황에서는 해외 바이오매스 자원 가격이 국내의 자원 가격 보다 훨씬 저렴하다. 그러나 국내 바이오매스 자원의 값이 해외자원의 가격 보다 경제적이라고 가정하면 Fig. 11의 오른쪽 방향으로 사업을 진행시켜야 할 것이다.

이 경우 획득할 수 있는 결과로는 국내 바이오매스 자국화 및 농촌경제의 활성화의 목표에 도달할 수 있을 뿐만 아니라 고용창출 유희지의 활용 등의 부대효과도 기대할 수 있을 것이다. 또한 EtOH 생산을 통한 수송용 대체에너지의 자국화 및 외화절감 EtOH 생산을 위한 생물공학 기술의 발전, EtOH 생산산업의 발전에 따른 고용창출 등의 효과 또한 기대할 수 있다. 이외에 마지막 단계인 EtOH의 에너지전환시스템인 내연기관의 실제 기술발전과 이에 따른 자동차 산업의 발전에도 기대효

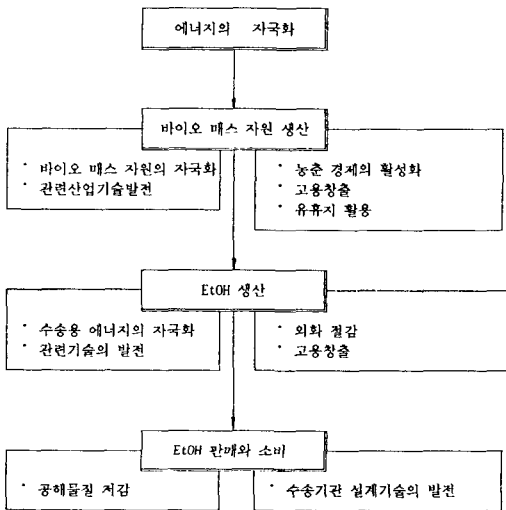


Fig. 12. Flow Diagram for the Objective of Production of EtOH as Alternative Automobile Fuel.

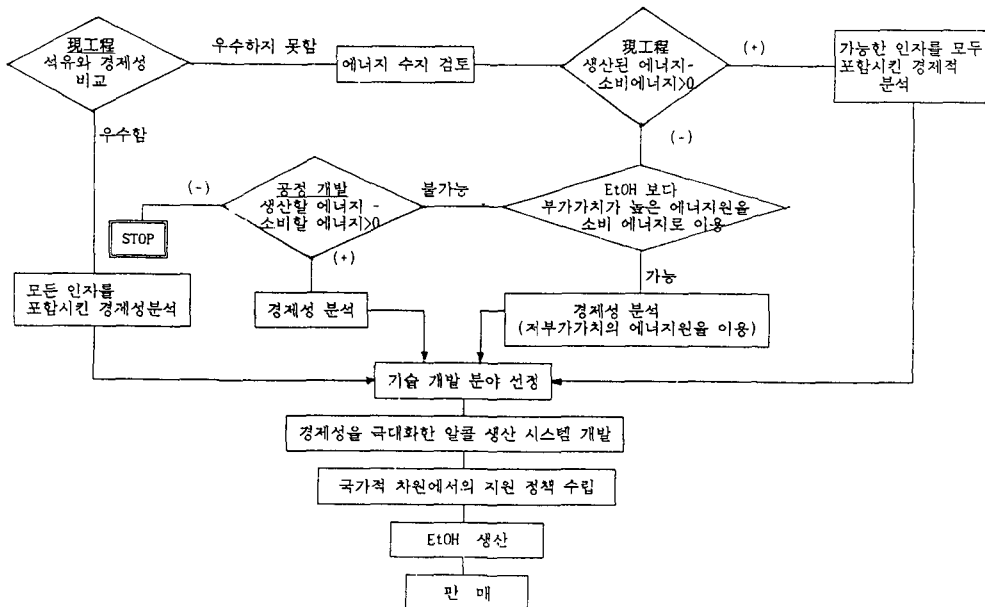


Fig. 13. Strategy for EtOH Production as Automobile Fuel.

과가 있을 것이다. 그러나 바이오매스의 가격 때문에 EtOH 생산의 최우선 목표를 공해물질저감으로 설정할 경우 Fig. 11의 오른쪽 방향으로 진행되기는 거의 불가능 할 것이다.

EtOH 생산의 최우선 목표로 에너지의 자국화로 설정할 경우에 대하여 고찰하여 보자. Fig. 12에서 알 수 있듯이 바이오매스의 국내생산, EtOH 생산, EtOH 판매 및 소비가 전제되지 않으면 에너지 자국화는 성립될 수 없다. 따라서 EtOH 생산의 대명제가 에너지자국화로 결정되면 Fig. 12에 명시한 바이오매스 자원의 자국화, 농촌경제의 활성화, 수송에너지의 자국화, 외화절감, 고용창출 등의 목표는 반드시 달성될 것이다. 그러나 얼마나 합리적이고 경제적으로 그 목표에 도달할 수 있는냐는 별개의 문제이다. 위의 분석에 의하면 우리나라의 경우 EtOH 생산목표를 Fig. 11과 같은 방법으로 설정하는 것 보다 Fig.12의 흐름에 따라 설정하는 것이 보다 합리적일 것이다.

4-2. 수송용 대체에너지원 EtOH 생산기술 개발전략

이제 Fig. 12와 같이 설정된 목표에 보다 효율적이고 경제적으로 도달할 수 있는 수송용 대체에너지 EtOH 생산기술 전략에 관하여 고찰하여 보자. 앞에서 언급했듯이 바이오 알콜의 가격이 현재의 석유가격에 대하여 경쟁력을 가진다는 것은 거의 불가능하기 때문에 Fig. 12에서 설정된 목표에 도달하기 위한 기술 개발 추진 전략은 경제적 측면에서 각 공정을 최적화 시키면서 각

공정에 소요되는 에너지를 최소화시키는 방향으로 수립하는 것이 보다 합리적일 것이다.

Fig. 13은 EtOH 생산을 위하여 소비하여야 할 에너지량과 생산될 에너지량, 부가 가치가 낮은 에너지와 부가 가치가 높은 에너지 등을 고려하여 EtOH 생산 기술 개발을 어느 방향으로 추진하는 것이 에너지 소비를 최소화함은 물론 부가 가치가 낮은 에너지를 이용하여 부가 가치가 높은 EtOH를 생산할 수 있는가를 나타내는 그림이다.

현재공정을 이용하여 생산된 알콜이 석유 보다 경제성이 우수한 경우는 공정에 대한 경제성분석을 통하여 기술개발 분야를 선정하고 경제성을 극대화 할 수 있는 알콜 생산 시스템을 개발하며 알콜을 생산 판매하는 수순을 밟으면 될 것이다. 이 경우에도 물론 바이오매스 생산 판매 소비에 대한 국가적 차원에서의 지원정책이 뒤따라야 할 것이다. 현 공정에 의하여 생산된 알콜의 경제성이 석유 보다 우수하지 못할 경우 에너지 수치 분석을 통하여 바이오매스 생산에서부터 최종 알콜제품을 생산하기까지의 모든 과정에서 소비되는 에너지량과 생산된 알콜이 내포하고 있는 에너지량을 비교분석하여야 할 것이다. 이 경우 생산된 에너지량이 생산에 소요되는 총소비 에너지량 보다 클 경우에는 가능한 모든 인자를 포함한 경제성분석을 통하여 기술개발분야를 선정하고 Fig. 13의 다음단계로 넘어가면 될 것이다.

그러나 생산된 알콜의 에너지량이 총소요에너지량

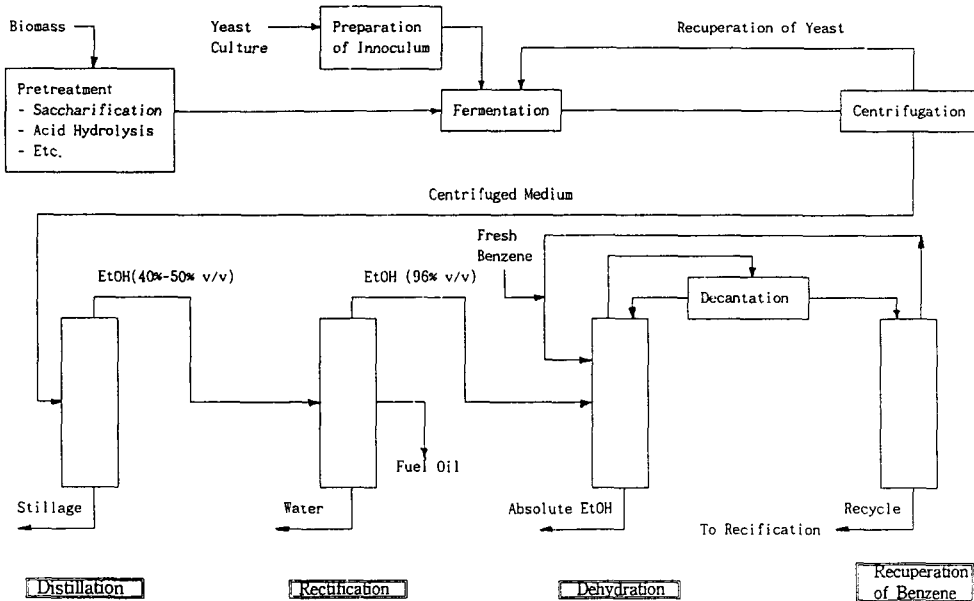


Fig. 14. Block Diagram of Air Absolute EtOH Plant.

**Table 7. Overall Energy Balance for Alcohol Production.**

	corn (kJ/L gallon EtOH)	Sugar cane (mcal/ha/year)	Manioc (cal/ha/year)	Sorghum (mcal/ha/year)
Energy production				
-Ethanol	79,682	18,747	13,271	19,856
-Aldehyde, fusel oil	1,138			
-Atalks, cobs, etc.	(174,768)	(17,550)	(9,112)	(11,830)
TOTAL	255,588	36,297	22,283	31,686
Energy consumption				
-Farming operation	48,469	4,226	4,042	4,667
-Transportation	1,6444			
-Alcohol plant	113,748(87,693)	10,814(8,100)	8,983(6,700)	11,883(8,900)
TOTAL	163,861	15,040	12,925	16,551
Net Energy production	91,727	21,257	9,358	15,136
Net Energy Loss without stalks, cabs, etc.	-83,041	+3,707	+246	+3,266

**Table 8. Energy (MJ/L of Pure EtOH) Required to Produce an Absolute Alcohol.**

Process stage.	Substrate							
	Beefs		Cane		Starch		Corn	
	MJ/L	%	MJ/L	%	MJ/L	%	MJ/L	%
1. Digestion/Hydrolysis								
-Batch	4~5	28	-		7~8	39.5		30.5
-Continuos	-		-		2			
2. Milling	-	-	1.1~1.5	1	-	-		1.5
3. Extraction	0.8~1	5.6	2~3	16.7	-	-		-
4. Fermentation								
-Batch	0.06	0.4	0.06	0.4	0.06	0.3		0.2
-Continuous	0.1	0.6	0.1	0.6	0.1	0.5		
5. Distillation (Rectification, Dehydration)								
-Conventional	10~13	72	10~13	76	10~13	61		64

보다 적을 경우에는 알콜보다 저 부가가치의 에너지원을 알콜생산의 소비에너지로 사용할 수 있는지를 검토하여야 한다. 사용가능한 저 부가가치의 자원이 있는 경우 이 자원을 이용한 알콜생산시스템에 대한 경제성 분석을 통하여 기술개발분야를 선정하고 경제성을 극대화 할 수 있는 알콜생산시스템을 개발하고 그 다음단계로 개발전략을 추진하면 될 것이다. 만일 알콜 보다 부가가치가 낮은 에너지를 알콜생산의 소비에너지로 사용할

수 없는 경우에는 공정개발을 통하여 소비에너지를 극소화 시킴으로써 생산될 에너지량이 소비에너지량 보다 많아질 수 있는지를 분석하여야 할 것이다. 공정개선을 통하여서도 생산된 에너지량이 소비에너지량 보다 적을 경우에는 수송용 대체에너지로 알콜을 생산하는 사업은 중단하고 다른 대체에너지원 개발에 대한 추진전략을 수립하는 것이 타당할 것이다. 그러나 생산할 알콜의 에너지량이 소비에너지량 보다 클 가능성이 있는 경우

Table 9. EtOH Production Cost for Different Operation Mode.

	Production Cost (cent/gal)			
	Batch	Continuous	Continuous Cell Recycle	Vacuum Cell Recycle
Investment related cost	10.3	4.9	4.0	3.9
Operating labor	3.2	0.9	0.5	0.4
Supervision and clerical	0.2	0.1	0.1	0.1
Utilities				
Water	0.6	0.6	0.6	0.4
Power	1.2	0.6	0.9	0.6
Steam	10.1	9.5	9.5	6.8
Oxygen	—	—	—	0.5
Laboratory changes	0.1	0.1	0.1	0.1
Plant overhead	1.8	0.6	0.4	0.3
<b>Total</b>	<b>27.5</b>	<b>17.1</b>	<b>16.1</b>	<b>12.7</b>

	Production Cost (cent/gal)			
	Batch	Continuous	Continuous Cell Recycle	Vacuum Cell Recycle
Fermentation	16.8	6.6	5.0	4.8
EtOH Recovery	8.1	8.1	8.1	6.7
Yeast Recovery	2.0	2.0	2.4	1.0
Storage	0.6	0.6	0.6	0.2
<b>Total</b>	<b>27.5</b>	<b>17.3</b>	<b>16.1</b>	<b>12.7</b>

에는 경제성을 극대화 할 수 있는 Fig. 13의 다음단계를 추진하여야 할 것이다.

#### 4-2-1. 알콜 생산 에너지 수치

Fig. 14는 수송용 알콜을 생산하기 위하여 현재 사용하고 있는 알콜 생산 공정을 나타내고 있다. 이 공정에 대하여 에너지 총 생산량과 에너지 총 소비량을 원료 별로 분석해 놓은 것이 Table 7이다. 이 결과에 의하면 식물의 줄기, 잎 등의 에너지를 에탄올 생산에 필요한 소비용 에너지로 이용하지 않으면 바이오매스에 의하여 생산되는 에너지의 총량은 소비 에너지의 총량 보다 적거나 많더라도 그 양이 대단히 미비하다. 에너지 측면에서 고찰하여 볼 때 수송용 대체에너지원으로써 에탄올이 의미를 지니기 위해서는 우선 알콜생산 플랜트에서 소요되는 에너지량을 대폭 절감시켜야 하며 그 다음으로는 부가가치가 낮은 에너지원을 알콜 생산의 소비에너지로 이용하여야 된다는 것을 알 수 있다.

Table 8은 무수알콜 생산의 각 공정에 소요되는 에너지량을 바이오매스 원료에 따라서 분석해 놓은 결과를 나타내고 있다. 이 결과에 의하여 무수알콜 생산의 각 공정중 증류에 소요되는 에너지가 전 공정에 소요되는

에너지의 60내지 70%를 차지하고 있다. 따라서 에너지 절감을 위한 공정개발의 우선 순위는 알콜의 분리공정임은 자명한 일이다.

#### 4-2-2. 알콜생산 원가

Table 9는 바이오매스의 가격을 제외하고 여러 가지 발효방식에 따른 알콜 생산원가를 나타내고 있다. 원가에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 투자와 관련된 비용과 에너지 비용이다. 공정 별로 생산원가에 미치는 영향을 분석하여 보면 회분식일 경우에는 발효공정에 소요되는 비용이 가장 큰 반면 연속식일 경우에는 알콜 회수공정에 소요되는 비용이 가장 크다. 따라서 알콜의 생산원가를 줄이기 위하여 개선하여야 할 공정으로는 발효공정과 에탄올 회수공정으로 결론을 내릴 수 있다.

#### 4-2-3. 알콜 분리 공정

바이오매스로부터 연료용 알콜을 생산하기 위하여 현재 가동되고 있는 알콜 생산 플랜트에서 발효액으로부터 에탄올을 분리하는 공정으로 에탄올-물의 Azeotropic point composition 까지는 Two-column distillation process 에 의하여 Azeotropic composition 에서 무수 에탄올 까지는 Azeotropic distillation with solvent 공

Table 10. Energy Usage in Conventional and Modified Conventional Systems for Ethanol Recovery.

Ethanol Conc.(wt.%)		process	Energy Usage (KJ/L of product Ethanol)	References
initial	Final			
6~10	95	Two-column conventional distillation	4730~5850	1, 2, 4, 10
10	95	Two-column distillation with vapor recompression		
6~10	95	Two-column distillation with vapor re-use	1950~3340	1, 6, 10
10	95	Three-column distillation with vapor re-use (aldehyde free ethol production)	4730~5850	4
6	95	Four-column conventional distillation (high quality ethanol production)	8080	4
13	95	Vacuum distillation (one-column)	2200	4
92.5~10	99.0	Azeotropic distillation with benzene	2000	2, 4, 10
92.5~95	99.9	Azeotropic distillation with pentane	1800~2620	3, 4
95	99.9	Azeotropic distillation with ether	835	4
92.5	99.9	Extractive distillation with ethylene glycol	2710	3
95	gasohol	Extractive distillation with gasoline	2060	3
6.4~10	99.9	Two-column conventional distillation second vacuum distillation	10300	2, 3
6.4	99.9	Conventional distillation+ azeotropic distillation with benzene	9650	3
10	99.9	Conventional azeotropic distillation with pentane	7630	2, 3
6.4	99.9	Conventional distillation+ azeotropic distillation with ether	8100	3
10	99.9	Conventional distillation+ azeotropic distillation with ether	5570	5
10	99.9	Conventional distillation with vapor recompression + azeotropic distillation with benzene	4400	9
6.25~10	99.9	Conventional distillation+ benzene azeotropic distillation with vapor re-use	5000	4, 8
10	99.9	Conventional distillation+ benzene azeotropic distillation with vapor recompressibl and vapor re-use	4230	8
10	99.9	Conventional distillation+ ether azeotropic distillation with vapor re-use(katzen process)	4730	4, 6
10	99.0	IHOSR distillation+ extractive distillation with salt(kAc)	1700	8
6~10	99.9	Conventional distillation+ ethylene glycol extractive distillation with vapor re-use	1700~2000	7
6.4	gasohol	Conventional distillation+ extractive distillation with gasoline	8100	13

정을 이용하고 있다. 그러나 발효알콜이 수송용 대체 에너지로써 진정한 의미를 지니기 위해서는 현 공정이 에너지 절약형 공정으로 대체되지 않으면 안된다. Table 10과 11은 에탄올 분리 시스템에 주입되는 주입액의

에탄올농도와 시스템을 거쳐 나오는 제품의 에탄올 농도에 따라서 현재 이용되고 있거나 제안된 분리공정과 각 공정에 소요되는 분리에너지의 소비량을 나타낸 것이다. 이 결과에 의하면 현재 사용중인 에탄올 분리공

Table 11. Energy Usage in Non-Conventional Systems for Ethanol Recovery.

Ethanol Conc.(wt.%)		process	Energy Usage (KJ/L of product Ethanol)	References
initial	Final			
85	99.9	Liquid-phase water adsorption in molecular sieve (zeolites)	1400	6, 8
89	99.9	Vapor-phase water adsorption in CaO	710	12
89	99.0	Vapor-phase water adsorption in cellulose	340	12
92	99.9	Vapor-phase water adsorption in corneal. Vaporized feed		
92	99.9	Vapor-phase water adsorption in corneal. Liquid feed	1390	13
96	gasohol	Liquid-phase water adsorption by polymeric compounds(HSPAN)+ ethanol extraction with gasoline	-	14
10	91	Supercritical fluid extraction with carbon dioxide	2500	19
10	99.5	Near critical fluid extraction with propane	2700	20
15	99.9	Ethanol adsorption in carbon+water adsorption in a molecular seive(hydrocarbon Res. Inc.)	6960	6
10	99.9	Conventional distillation+water adsorption in cornmeal	3340	6, 13
10	99.9	Conventional distillation with vapor recompression +water adsorption in cornmeal	2170	2
8	99.0	Liquid-phase ethanol sorption/desorption in polymeric compounds(resins)	7850	15
8	99.5	Conventional distillation+membrane-pervaporation system(GKSS)	3680	6
10	98.0	Conventional distillation to 26 wt%+two-step solvent extraction with 2 ethyl hexanol and ISOPAR-L respectively (Georgia Tech.)	4900	6
10	94.7 et. 4.5 oil	Conventional distillation to 30 wt%+two-step solvent extravtion at different temperaturewith light paraffin oil(Syst. Science Applicat. Inc.)	5200	6, 16
10	gasohol	Conventional distillation to 80 wt.% +solvent extraction with gasoline	500 KJ/L gas. (5500 KJ/L of ethanol)	17
10	gasoline	Conventional distillation with vapor re-use+ catalytic conversion to gasoline	550	9

정은 에너지 소비량이 크기 때문에 장래에 세워질 수송용 에탄올 생산 플랜트에는 vapor reuse 와 vapor recompression 공정을 내포한 distillation 공정 또는 Supercritical 및 Near supercritical fluid extraction 공정 등의 새로운 공정 도입이 필요하다.

#### 4-2-4. 발효공정

Table 9에서 알 수 있듯이 에탄올 생산원가에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 발효 방식이다. 발효방식에 따라서 생산원가를 20% 이상 절감할 수 있다. 따라서 현재의 회분식 발효에 의한 알콜 생산성을 대폭 증가시킬 수 있는 발효 방식의 개발이 시급한 과제로 등장하게 된다. 현재 실험규모의 발효실험에서는 회분식

발효 생산성의 20배 내지 30배 이상을 상회하는 Membrane Cell Recycle Bioreactor, Hollow Fiber Bioreactor 등이 개발되어 있으나 상업화를 위해서는 해결하여야 할 어려운 여러단계가 남아있는 실정이다.

#### 4-2-5. 국가적 차원에서의 지원정책

우리나라와 같이 에너지 자원이 거의 없는 경우에 수송용 대체에너지로 발효알콜을 생산하려는 사업이 성공을 거두기 위해서는 국가적 차원에서의 지원정책이 수반되지 않으면 안된다. 현 단계로 고려할 수 있는 국가적 지원정책으로는 바이오매스 생산 및 판매에 대한 보장, 생산된 알콜의 시장성 확보, 판매가격 보장, 세제상의 혜택 및 관련기술의 육성 등을 간단히 열거할 수 있다.

## 5. 결 언

현재까지 분석한 결과로 부터 수송용 대체에너지의 알콜 생산에 대한 전략을 간단히 요약하여 보자. 알콜 생산의 대전제를 에너지의 자국화에 두는 것이 타당하다. 이를 위하여 바이오매스의 자원또한 자급자족하는 전략을 수립하여야 한다. 또한 생산된 알콜 에너지의 효율 및 경제성을 극대화하기 위해서 저 부가 가치의 에너지원을 알콜생산에 소요되는 에너지원으로 사용하는 기술과 에탄올의 분리에너지를 극소화 할 수 있는 분리 시스템 설계 기술을 확보하여야 한다. 동시에 알콜의 생산성을 극대화 할 수 있는 발효 시스템의 개발이 완료되어야 할 것이다. 더욱이 이 사업의 성패는 주위 환경조성을 위한 국가적 지원 정책에 전적으로 달려 있다는 것을 부연하며 결론을 맺으려고 한다.

## 참고문헌

1. Kosarie, N., Wiczorek, A., Consentino, G. P., Magee, R. j. and Prenosil, J. E. (1983) in Dellweg, H. (Ed), "Biotechnology", 3, (3a), 257, Weinheim: Verlag Chemie (1983).
2. Busche, R. M., Biotechnol. Progress, 1(3), 165 (1985).
3. Black, C., Cmem. eng. Progree, 76(9), 78 (1980).
4. Maiolella, B., Wilke, Ch. R. and Blanch, W., "Adv. in Biochem. Eng", 20, 43, New York: Springer Veruag (1981).
5. Marion, L., Chem. Eng., 86(5), 78 (1979).
6. Douglas, L. Fienberg, D., "Evaluation of Non-distillation Ethanol Seperaton Process", Report No. DE 83011994, NTIS (1983).
7. Lynn, S. and hanson, D. N., ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 25, 168 (1986).
8. lynn, L. R. and Grethlain, H. E., Chem. Eng. Process, 80, 59 (1984).
9. Aldridge, G. A., Verykios, X. E. and mutharasan, R., Ind. Eng Chem. Process Des. Dev., 23, 733 (1984).
10. Parkinson, G., Chem. Eng., 90(11), 29 (1981).
11. Busche, R. M., Biotechnol. Bioeng. Symp., 13, 597 (1983).
12. Ladisch, R. M., Biotechnol. Bioeng. Symp., 206 (4409), 898 (1979).
13. Ladisch, M. R., Voloch, M., Hong, J., Bienkowski, P. and Tsao, G. T., Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 23, 437 (1984).
14. Fanta, G. F., Burr, R. C., Orton, W. L. and Doane, W. M., Science, 210, 646 (1980).
15. Pitt Jr., W. W., Hanng, G. L. and Lee, D. D., Biotechnol. Bioeng., 25, 123 (1983).
16. Mehta, G. D. and Fraser, M. D., Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 24, 556 (1985).
17. Leeper, S. A. and Wankat, Ph. C., Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 21, 331 (1982).
18. Remirez, R., Chem. Eng., 87(6), 57 (1980).
19. moses, J. M. Goklen, K. E., and de Filippi, R. D., paper presented at the Annual AIChE Meeting, Los Angeles (1982).
20. Mchugh, M., Mallett, M. W., and Kohn, J. P., "Chemical Engineering at Supercritical Fluid Conditions", 113 (1983)