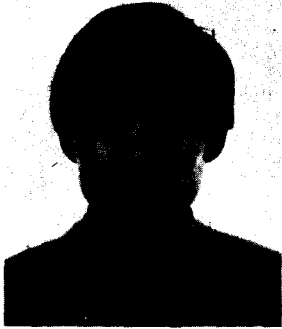


代替에너지 開發을 위한 바이오매스 이용성과 에탄올生産에 관한 技術 開發의 現況 및 展望



安 宗 石

(韓國科學技術院 遺傳工學센터
微生物工學研究室 前任研究員·理博)

■ 目 次 ■

- I. 序 論
- II. 바이오매스의 特性 및 利用性
- III. 에탄올生産의 技術開發現況
- IV. 世界各國의 바이오에너지開發現況
- V. 우리나라의 바이오에너지開發現況 및 展望

I. 序 論

20세기 이후의 현대사회는 석탄, 석유, 천연가스 등의 化石資源의 에너지원이나 화학공업 원료로서의 대량 소비에 의해서 발전하게 되었다. 그러나, 이들 化石資源의 매장량의 有限성과 지역적인 偏在性으로 인하여 이러한 化石資源을 代替할 수 있는 資源의 利用에 관한 技術 開發이 끊임없이 시도되고 있었다. 1970年代의 두차례의 石油波動을 겪으면서 에너지원으로서의 석유가 국제정치, 경제 문제의 중심이 되게 되었던 것이다. 따라서 전세계 각국은 化石資源의 有限성과 대량소비에 대한 공해의 심각성등의 위기로 부터 탈피하기 위하여 代替에너지 開發에 박차를 가하게 되었고, 에너지 消費節約의 소극적인 대처방안 보다는 근본적인 해결방법이라는 관점에서 전세계적으로 人類가 해결해야하는 과제인 것이다.

代替에너지로서 開發되고 있는 것으로는 原子力에너지, 太陽熱에너지, 風力, 潮力 및 廢資源에너지와 바이오매스로 부터의 바이오에너지 開發 등이다. 石油時代 이후에 대비한 에너지원이나 산업사회의 原料物質의 공급이라는 양면을 해결할 수 있는 것으로는 太陽에너지의 이용과 함께 바이오매스 에너지를 개발하는 것이 가장 각광받고 있는 것이다. 바이오매스를 이용한 에너지 생산은 再生이 가능하며 그 量이 막대한 것으로年間 세계에서 사용되는 에너지 총량인 $7.2 \times 10^{16} \text{Kcal}$ 의 약 10배에 해당하는 $7.2 \times 10^{17} \text{Kcal}$ 의 에너지가 1년중 지구상에서 태양에너지를 植物과 微生物의 光合性작용에 의해 바이오매스 속의 에너지로 생산되고 있으며, 生態界에 유해하지 않고 어떤 새로운 기술이나 위험성이 요구됨이 없이 쉽게 實用化가 가능하며, 또한 사용을 위한 저장에 용이하다는 점에서 그 이윅을 설명할 수 있다.

한편 우리나라는 경제규모가 확대되고 국민생

활이 크게 향상됨으로써 에너지需要가急増함에 따라 에너지의 海外依存도가 심화되어 75% 이상을 상회하게 되었고, 이미 80年代 초반에 70億弗 이상의 외화가 지출되고 해가 갈수록 에너지 수입량은 증가일로에 있다. 아울러 에너지의 소비 구조도 석유중심으로 변모되어 56%를 석유에 의존하고 있어서 에너지구조의 심각성이 매우 큰 상황이다. 이의 해결을 위해서 에너지소비의節約을 유도하고 대체에너지로서 원자력에너지의 보충과 수입 석탄에너지의 공급을 증가시키고 있지만, 이들 유엔탄및 원자력자원 역시 수입에 의존해야만 하는 한계성에 부닥쳐 있다. 그러므로 이러한 에너지문제의 근본적인 해결책은 非枯渴性이고 新, 再生에너지의 적극적인 개발에 달려있다. 新, 再生資源으로서의 바이오매스에너지의 개발은 化石資源의 枯渴에 대비한 새로운 에너지資源의 개발과 함께 화학공업의 출발 원료물질 및 유용물질 생산을 위한 原料物質의 공급이라는 양면을 해결할 수 있는 것으로 그 중요성이 더욱 부각되고 있다.

이와 같은 관점에서 本稿에서는 代替에너지開發이라는 면에서의 바이오에너지源으로서 바이오매스의 利用性을 중심으로 하는 특성과 바이오에너지로서의 燃料用 에탄올생산에 대한 기술 및 개발 현황을 考察해보고, 아울러 세계각국의 바이오에너지 개발정책과 우리나라의 개발정책 및 기술개발 현황을 에탄올을 중심으로 살펴보고자 한다.

II. 바이오매스의 特性 및 利用性

바이오매스(Biomass)는 본래는 生態學의 용어로 生物現存量 혹은 生物量이라고 번역한다. 太陽光에너지를 生命體의 光合成에 의해서 무기물로 부터 유기물을 합성한 후, 이 유기물을 먹는 動物, 이들을 분해하는 微生物 등의 생태학 용어

의 生産者, 消費者, 分解者, 및 이들로 부터 유래하는 有機物體 전체의 양으로 표시하는 말이다. 즉, 지구상에서 생성, 존재하는 생명현상에서 생기는 有機物總量인 것이다. 삼림, 농경지작물, 목초지에서 생산되는 유기물, 축산, 양어의 유기물과 육수, 해양에서 생산되는 유기물 등으로 林木, 펄프, 섬유, 고무, 식량, 사료, 축산폐기물, 농산폐기물, 식품가공폐기물, 도시폐기물, 폐수처리 과정에서 생기는 活性汚泥 들도 바이오매스인 것이다. 그러므로, 바이오매스는 일시적인 어떤 형태를 지니고 있으며 지구상의 生態界 내에서 계속 순환하고 있는 것으로 再生産性이 있는 有機物의 總體인 것이다.

그러나, 현재는 이 용어가 생태학의 영역을 벗어나 일반적으로 사용되고 있는 것이다. 미국의 에너지연구개발기구(ERDA)가 발표한 에너지공급 구상에는 化石燃料, 核 에너지 및 太陽에너지로 크게 구별되어 있는데, 生命體의 太陽에너지 固定을 이용해서 연료를 얻고자 하는 목적에서 바이오매스의 용어를 사용하게 되었다. 아울러 에너지 이용면에 첨가해서 식량, 사료, 공업용 원재료로서의 이용과 환경의 유지 및 개선을 위한 복합적인 목적을 갖는 종합적인 이용을 위한 의미로 바이오매스라고 하는 개념이 정립되어 가고 있는 것이다. 1980년에 國際石油資本 2위의 회사인 Royal Dutch Shell(Shell Canada)이 옥수수를 원료로 해서 燃料, 化學品, 醫藥品 등을 생산, 판매하는 Biomass-combinat의 건설을 발표하였는데, 이는 Canada Ontario湖 북안의 옥수수 경작지대를 기반으로 하는 corn starch 생산공장을 중심으로 연료용 에탄올, 항생물질, 구연산, 비타민C, lysine, 이성화당을 종합적으로 생산하려고 하는 계획으로 세계 각국의, 이 분야에 최고의 기술수준을 보유하는 기업들의 참여를 요구하였다.

지구상에 도달하는 年間 太陽에너지의 總量은 $7.2 \times 10^{20} \text{Kcal}$ 이고 이중 光合成에 의해서 바이오매

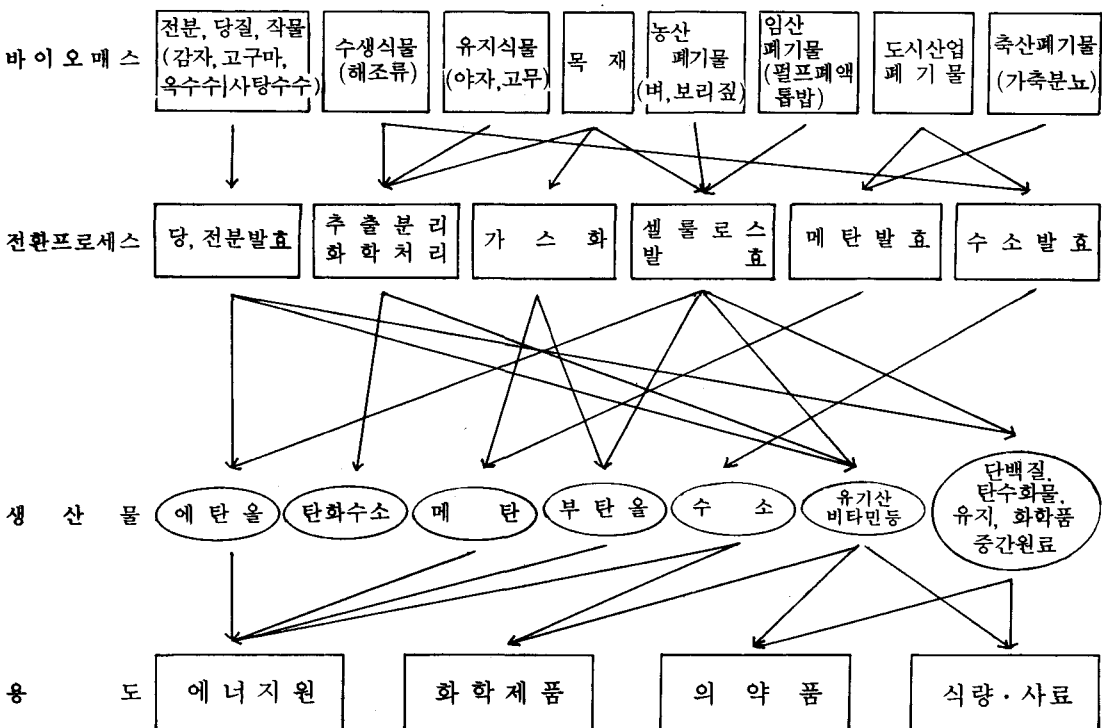
스 에너지로 固定되는 총량은 $7.2 \times 10^{17} \text{Kcal}$ 로 世界의 年間 에너지소비 총량 $7.2 \times 10^{16} \text{Kcal}$ 의 약 10배에 해당하는 것으로 이 양은 막대한 것이다. 현재 지구상의 바이오매스 총량은 $7.2 \times 10^{16} \text{Kcal}$ 로 전 세계의 화석계 연료 매장의 총량 $1.03 \times 10^{19} \text{Kcal}$ 에 육박하는 것으로 이 중의 $\frac{1}{10}$ 은 매년 再生産되고 있는 것이다. 그러므로 이러한 막대한 양의 바이오매스를 인류의 에너지원 및 산업사회의 發展을 위하여 세계각국에서 적극적인 活用을 위한 기술개발에 주력하고 있는 것이다.

이러한 막대한 양의 바이오매스資源을 活用하기 위해서는 이의 특징을 살펴 보아야 할 것이다. 바이오매스의 특징으로는 첫째, 太陽에너지의 良好한 變換, 貯藏시스템이라는 점이고 둘째는, 再生이 가능한 無限定한 資源, 셋째 石油, 石炭에 비해서 環境面에의 영향이 매우 적은 깨끗한 資源, 넷째 에너지 食糧, 飼料, 有用物質 등을 위한 多目的 利用이 가능하며 다섯째로 석유와 같이

지역적인 偏在性이 없이 세계의 전지역에 분포한다는 점을 들 수 있다. 한편 바이오매스資源은 기본적으로 分布密度가 낮으며 대량으로 수집, 운송에 어려움이 있고, 에너지의 발생량이 타 에너지원에 비해 낮으며, 생산면에서 기후등의 環境의 영향이 심하고 생산량의 變動이 있으며, 種類가 다양하여 이용기술이 각각에 따라 적당하게 개발되어야 만 한다는 문제점도 지니고 있는 특징이 있다. 따라서 지역성에 맞고 바이오매스의 회수 운반등이 최소화하는 소지역 분산형의 방향으로 기술개발이 진행되고 있으며, 아울러 단순히 석유의 代替에너지源으로서의 이용면 뿐만 아니라 물질순환의 自然環境을 파괴하지 않는 범위 내에서 食糧, 飼料, 有用物質, 에너지등의 종합적인 이용을 병행해서 고려하는 방향으로 진행되고 있다.(그림1. 참조)

바이오매스는 高水分 含有體부터 低水分系까지 많은 종류와, 구성성분이 셀룰로스, 전분질 다

그림 1. 바이오매스의 전환 및 이용 체계



당류, 단백질, 리그닌, 유지 등의 여러 성분이 복잡한 고차구조를 하고 있기 때문에, 각 성분의 분해, 抽出이 대단히 어렵다. 이러한 분해와 變換을 쉽게하기 위해서 化學的, 物理的 前處理가 요구되고 있으나 현재는 變換처리에 高溫, 高壓, 化學的처리 등의 에너지消費型的 기술이 사용되고 있어서 기술적으로나 에너지적인 면에서 문제점이 있는 것이다. 그러므로 바이오매스의 變換, 이용에 있어서는 常溫, 常壓에서 바이오매스자원의 성분 중 選擇的으로 變換시킬수 있는 微生物이나 酵素등의 生物機能을 이용해 효율적으로 분해, 變換시키는 것이 가장 유리하다. 이러한 生物學的 방법은 부차적인 副産物의 생성이 거의 없는 목적하는 生産物을 고효율로 회수할 수 있는 방법으로 바이오에너지의 개발에 필수적인 기술로서 이용되고 있다.

바이오매스연구에 있어서 그 대상으로는 未利用資源의 利用性開發을 위해서 農産系, 林産系, 畜産系, 食品産業系 등의 廢棄物 및 都市廢棄物 利用性開發과 목적하는 바이오매스資源으로서의 植物栽培技術의 開發로 高生産性的의 바이오매스資源 확보에 대한 것과 海洋生物資源의 開發이 중요하며 새로운 利用性을 갖는 生物體의 開發이 각광을 받는 것이다. 바이오매스를 이용하기 위한 變換 및 生産工程에 cellulose의 選擇的의 분해 微生物의 探索 및 脱리그닌酵素 개발과 生澱粉 分解酵素, 高生産性알콜醱酵 微生物, 매탄가스 생산기술, 수소가스 생산기술과 미생물을 이용한 微生物電池 등의 기술개발을 통한 새로운 에너지의 이용성개발이 이루어지고, 또한 바이오에너지 외에도 食糧, 飼料素材로의 이용과 有用物質生産을 위한 종합적인 기술의 개발이 이루어지고 있다.

Ⅲ. 에탄올生産의 技術 開發 現況

1. 대체에너지로서의 에탄올生産의 諸問題

현재 바이오매스로 부터 石油 代替에너지로서 가장 연구가 활발하고 實用化의 단계에 이른 것이 微生物 醱酵에 의한 에탄올 생산이다. 에탄올은 再生産이 가능한 바이오매스인 農作物로 부터 생산할 수 있으며 1l의 에탄올에서 같은 양의 석유에서 얻을수 있는 연소열의 $\frac{2}{3}$ 에 해당하는 $5.8 \times 10^6 \text{ kcal}$ 의 연소열을 얻을 수 있는 좋은 연소효율을 갖고 있으며, 연소후에도 CO_2 와 H_2O 밖에 생기지 않기 때문에 내연기관의 燃料로서 현재의 자동차연료인 가솔린에 바로 섞어서 사용할 수 있을 정도로 燃料로서의 이용기술이 발달되어 있다. 한편 에탄올은 燃料로서 뿐만 아니라, 化學工業의 出發原料物質로서 利用할 수 있기 때문에 가장 활발하게 연구되고 있다. 한편 그 생산기술은 전통적인 釀造와 酒精工業에 기초해서 확립되어 왔으므로 가장 쉽게 代替에너지 開發을 위해서 사용할 수 있는 技術이다. 1973年 이후의 두차례의 오일쇼크에 의해서 세계각국은 바이오매스 이용기술개발에서 가장 먼저 燃料用 에탄올 생산에 관한 연구에 초점을 맞추고 그 연구에 박차를 가했다. 에탄올 생산의 제일의 문제점은 原料供給에 있다. 현재 에탄올발효의 原料로는 사탕수수, 糖蜜 등의 糖質原料와 옥수수, 쌀, 보리 등의 穀類 및 감자, 고구마, 카사바, 만니옥과 같은 薯類 등의 澱粉質 作物의 原料에 한하고 있는데, 이들은 食糧으로서 이용되기 때문에 에탄올생산원료로 이용하기에는 문제점으로 대두되고 있다. 따라서 燃料用 에탄올 생산은 미국, 브라질, 아르헨티나 등의 食糧輸出國에 한정되어 있는 상태이다. 이러한 문제점으로 인하여 미래의 에탄올 생산을 세계적 규모로 확대할 때는 人口問題의 해결과 耕地開拓의 노력과 아울러 새로운 Biotechnology技術에 의한 多收穫作物의 育成과 未利用 植物纖維質資源의 利用技術 開發을 이룩하여 原料의 에너지 收支 및 經濟性을 보완한 大量生産方式을 확립하여 에탄올생산이 식량수급과 상호보완적으로 이루어

어 지게 해야 한다. 또 한편 에탄올 생산공장을 원료물질의 생산지와 근접시켜서 農業부문과 變換가공 부문을 일체화 시켜 閉鎖的 循環 시스템의 에너지 절약형 생산방식을 확립할 필요가 있다. 에탄올 생산의 또다른 문제점으로는 에탄올 生産工程에의 에너지 收支에 있다. 澱粉質源料의 蒸餾, 糖化, 蒸留, 廢液濃縮 등의 諸工程에 물리, 화학적 에너지의 투입으로 인한 생산 에탄올의 화학적 燃燒에너지와의 收支를 비교할 때 原料와 工程에 따른 많은 차이가 있겠으나 糖蜜을 원료로 했을 때 이외의 경우에는 에너지收支면에서 마이너스가 대부분으로 酒類工業의 商業的 제품을 생산하고자 하는 경우가 아닌 燃料用 에탄올의 생산시에는 커다란 문제점에 봉착하고 있는 것이다. 여기에 에탄올 醱酵工程 이외의 原料의 생산, 수확, 운송 등의 農業部門 투입 에너지까지 고려하면 이러한 문제점은 더욱 확대되어져야 할 것이다.

이러한 代替에너지로서 燃料用 에탄올 생산시의 문제점을 극복하여 實用化하기 위해서 原料物質의 經濟的 확보를 위한 未利用 바이오매스 資源의 利用技術 開發로 셀룰로스系 資源의 발효기질로의 變換技術과 變換微生物의 開發 및 育種이 활발히 연구되고 있으며, 醱酵工程의 源價節減을 위한 無蒸餾醱酵, 高濃度醱酵, 高溫醱酵, 同時糖化醱酵, 連續醱酵, 減壓醱酵, Flash醱酵法 등의 새로운 高收率 醱酵工程의 개발과 에탄올 回收를 위한 蒸留工程의 개선과 가열증류가 아닌 막분리법에 의한 에너지수지를 개선할 수 있는 工程의 開發이 활발히 연구되어 實用化의 단계에 이르렀다. 아울러 셀룰로스를 분해하여 에탄올을 생성할 수 있는 微生物과 澱粉으로부터 직접 에탄올을 생산하는 酵母 혹은 박테리아의 開發 및 育種의 연구와 高生産性 에탄올 발효균주개발 에탄올내성, 高凝集性酵母, 高溫性菌株 개발을 위해서 遺傳工學的 技術을 이용한 연구가 전 세계적으로 각광을 받고 이루어지면

서 우수한 에탄올 醱酵微生物의 開發이 속속 보고되고, 이들 미생물을 이용한 에탄올 생산의 實用化의 단계에 접어들기 시작하게 되었다. 한편으로 에탄올 회수 후의 최종 醱酵廢液의 처리시에 環境保護와 바이오에너지로서의 메탄가스 생산을 동시에 이룩하고, 飼料회수 후 飼料로서의 이용성을 개발한다. 발효시 생기는 CO₂가스의 상업적 이용을 개발하여 에탄올 생산의 經濟性을 향상시킬 수 있는 기반이 조성되고 있다.

이상과 같은 에탄올생산의 문제점 해결을 위한 새로운 技術開發에 대해서 부문별로 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

2. 알콜 醱酵 微生物

대체에너지로서의 알콜 생산시에 가장 중요한 것은 우수한 알콜생산능력을 갖는 微生物의 開發이다. 지금까지 알려진 에탄올을 생성시키는 미생물을 표1에 요약하였다. 現在 産業的으로 가장 많이 이용되고 있는 에탄올 발효미생물로는 酵母 *Saccharomyces cerevisia*, *S. uvarum*, *S. sake* 등으로 이들은 澱粉등의 多糖類의 분해에 의해 생성된 glucose, fructose, galactose 등의 單糖類를 基質로 하여서 20~30% 糖質로부터 10~15% 에탄올을 생산할 수 있다. 한편 1970年代 이후에는 멕시코의 과일주에서 분리된 bacteria 인 *Zymomonas* 가 월등한 에탄올 생산성으로 인하여 연구개발에 각광을 받고있다. 그러나 아직 *Zymomonas* 에 의한 에탄올생산은 효모에 의한 에탄올발효의 꾸준한 균주개발과 공정의 개발에 비해서 아직은 미흡하여 실용화의 단계에는 오지 않았으나, 세계각국의 연구자들이 이 미생물에 대한 微生物生理, 遺傳, 分子生物學, 醱酵工學적 연구에 박차를 가하여 조만간에 實用化가 이루어질 것이다. 한편 이들 酵母나 박테리아는 전분질과 같은 多糖類의 원료를 분해하여 에탄올을 생산할 수 없는 데 반하여 酵母 *Saccharomyces diastaticus*는 전분을 분해할 수 있는 능력이 있

표 1 주된 에탄올 생성 미생물

균 주(기 질)	최적온도	에탄올생성량*	기타생산물*
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	中 温	1.9	젖산(미량)
<i>S. uvarum</i>	中 温	1.9	
<i>S. sake</i> (hexose)	中 温	1.9	
<i>Lactobacillus brevis</i> (hexose, pentose)	中 温	0.7	젖산(1.5)
<i>Ruminococcus albus</i> (cellulose, hexose, pentose)	中 温	0.7	초산(0.7) H ₂ (2.7)
<i>Sarcina ventriculi</i> (hexose)	中 温	1.7	초산(0.2) H ₂ (0.4)
<i>Eymomonas mobilis</i> (hexose)	中 温	1.9	젖산(미량)
<i>Clostridium thermocellum</i> (Cellulose, cellobiose)	高 温 (60~65℃)	0.7	초산(0.7) H ₂ (0.1)
<i>C. thermohydrosulfuricum</i> (Starch, hexose, pentose, cellobiose)	高 温 (68℃)	1.9	초산(0.1) H ₂ (0.1)
<i>Thermoanaerobacter ethanolicus</i> (hexose, pentose, starch)	高 温 (69℃)	1.8	젖산(0.1) 초산(0.1)
<i>Thermoanaerobium brockii</i> (Starch, hexose, cellobiose)	高 温 (65~70℃)	1.0	젖산(0.8) H ₂ (0.5)
<i>Thermobacteriodes acetohylicum</i> (Starch, hexose, cellobiose)	高 温 (65℃)	0.8	초산(1.0) H ₂ (1.2)

* : glucose 1분자로부터의 생성분자수

어서 *S. diastaticus*를 이용한 전분질원료로부터 직접 에탄올을 생산하고 자 하는 연구가 활기를 띠고 있다. 또한 최근에는 셀룰로스를 직접 분해해서 에탄올을 생산할 수 있는 혐기성박테리아인 *Clostridium*이 관심을 끌고 있다. *C. thermohydrosulfuricum*과 *C. thermocellum*은 60℃ 이상의 고온에서 셀룰로스를 분해해서 에탄올을 생산할 수 있는 대표적인 혐기성박테리아로 에탄올 생산능력이 낮고 혐기적인 배양방법에 의해서만 가능하다는 단점이 있어서 아직은 실용화의 단계에는 이르고 있지 못하지만 고온성과 셀룰로스 분해성이라는 장점이 있어서 미래에는 바이오매스로부터 에탄올생산을 위한 가장 중요한

微生物이 될 것이다. 혐기성세균 *Clostridium*중에는 *C. butylicum*이나 *C. acetobutylicum*은 에탄올과 함께 부탄올 혹은 프로판올 등의 고급 알코올을 생성한다. 부탄올은 연소열에서 에탄올 보다 좋으며, 燃料用으로 사용할 때 개솔린과의 친화성이 좋으며, 비등점이 개솔린과 거의 비슷하여 엔진에 전혀 무리를 주지 않고, gashol제조시 부탄올을 界面活性劑로 사용할 수 있으며 자동차 내연기관의 옥탄가를 향상시킬 수 있으므로, 이들 미생물을 이용하여 纖維素資源으로부터 에탄올 및 부탄올 생산에 관한 연구가 근래에 들어 활발히 진행되고 있다.

현재 가장 활발하게 연구되고 있는 에탄올생

산 미생물에 관련된 것은 거의 醱酵工程면에서나 微生物學的 연구가 확립되어 있는 Saccharomyces 屬 효모나, 에탄올 생산능력이 우수한 Zymomonas에 집중되어 있다. 이들 微生物들은 澱粉, 纖維素 등의 多糖類의 原料物質을 직접 이용 할수 없는 단점이 있다. 따라서 動物의 침샘 amylase, 소화기관의 amylase와, 곰팡이인 Aspergillus, Rhizopus 등의 amylase나 glucoamylase, Bacillus의 amylase나 cellulase, 혹은 곰팡이 Trichoderma Viridat 의 cellulase 와 Clostridium의 cellulase를 遺傳子操作法(Recombinant DNA), 原形質體融合法(Protoplast fusion) 등의 遺傳工學技術을 이용하여 이들에게 이런 遺傳子를 옮겨주어서, 이들 가장 우수한 에탄올생산 微生物에서 糖化工程이 없이 바로 澱粉이나 纖維素資源으로 부터 에탄올을 생산하려고 하는 것이다. 지금까지는 원하는 유전자의 이들 미생물에서의 發現과 유전적 安定性 등의 문제점이 완전히 해결되지는 않았으나, 수 년 이내에 實用化微生物이 등장하리라는 것은 명확한 사실이다.

아울러서 에탄올醱酵 菌株의 에탄올 生産性을 向上시키기 위해서 기존의 微生物育種法과 遺傳工學的方法을 동원하여 高温性, 高에탄올 生産性, 高에탄올 耐性, 高擬集性 酵母의 개발에도 박차를 가해서 괄목할만한 성과를 이룩하고 있다.

3. 澱粉의 糖化

에탄올발효에 가장 많이 利用되고 있는 原料物質이 澱粉으로서, 현재 에탄올생산에 쓰이는 酵母菌株에는 澱粉分解能이 없어서, amylase나 glucoamylase 등의 澱粉分解酵素를 처리하는 糖化工程과, 이들 효소작용을 돕기위한 高温에서의 糊化工程이 필수적으로 요구된다. 따라서 이들 糖化工程에 필요한 에너지와 經費를 줄이기 위한 노력에 의해 새로운 糖化法의 開發이나 工程의 개선이 이루어지고 있다.

이중의 하나로 澱粉質原料의 無蒸餾糖化法의

개발이 연구되어 低温蒸餾法이나 無蒸餾糖化法의 실용화가 가능하게 되었으나 아직 해결해야 할점이 남아 있다. 첫째로 糖化酵素 사용량의 過多로서 원래 보다 2~5배의 glucoamylase가 필요한 점이다. 이를 해결하기 위해서는 좀 더 糖化力이 좋은 glucoamylase의 개발이 선결되어야 하거나, 高温醱酵을 위한 菌株의 개발로 인한 효소 사용량을 줄일 수 있는 방안이 있다. 둘째는 개발된 無蒸餾法이 모든 種類의 澱粉原料에 적용하기 곤란한 점이다. 그러므로 각각의 원료에 따른 독특하고 가장 효율적인 공정 的 開發과, 각 지역이나 공장의 원료물질 확보에 따른 공정 的 一元化가 필요하다. 셋째는 高温에서의 처리가 생략되므로 雜菌汚染의 위험성이 큰 점이다. 이의 해결을 위해서 발효액의 PH강하, 낮은 PH에서의 에탄올 醱酵菌株의 개발과 화학적 殺菌劑의 첨가가 연구되고 있다. 생산된 에탄올에 의해 잡균증식의 억제가 가능하므로 初期 醱酵速度가 빠른 균주의 개발과 함께 에탄올耐性 醱酵菌株 및 高濃度 에탄올 生産菌株의 개발이 필요하다.

무증자당화법과 함께 당화과정의 축소를 위하여 生澱粉 分解能이 우수한 Rhizopus, Aspergillus awamari, Endomyces 등의 강력한 glucoamylase를 사용하는 同時糖化醱酵法(SSF, Simultaneous Saccharification and Fermentation)의 개발도 실용화하기 위해서는 위에서 열거한 문제점들을 보완할 필요가 있다.

4. 纖維素 및 木質系資源 利用

셀룰로스계 바이오매스자원은 지구상에서 가장 양이 많은 자원으로, 연간 1,000億톤 이상의 셀룰로스資源 이 식물에 의해서 再生産되고 있으며, 우리나라에서도 연간 1千萬톤 이상이 생산되고 있다. 바이오에너지 생산을 위해서 원료물질로서의 澱粉質資源은 食糧으로서의 사용을 고려해야 하므로 셀룰로스資源이 장기적인 공급면과 가격면에서 가장 유리하다. 아울러 셀룰로스

資源은 에너지생산 뿐 아니라 化學工業原料, 食飼料用 SCP(미생물 단세포 단백질)생산 등에도 이용될 수 있으므로 셀룰로스資源의 糖으로의 轉換技術이 활발히 연구되고 있다.

셀룰로스나 木質系資源은 cellulose, hemicellulose, lignin, 등 難分解性 高分子化合物의 집합체로서 결정성으로 존재하기 때문에 유효하게 이용하기 위해서는 lignin을 제거하고 결정성을 파괴해서 可溶性으로 변환시키기 위한 轉換過程이 필요하다. 기존의 전환과정은 加水分解에 의한 糖化를 위해서 酸糖化法이 사용되고 있는데, 여기에는 強酸, 高溫, 高壓등이 필요해서 裝置的, 技術的, 經劑的 어려움이 수반되고있다. 그러므로 溫和한 條件(中性 PH, 常溫, 常壓)에서 당화가 가능한 酵素糖化나 微生物糖化法이 각광을 받고 있는 것이다.

그러나 酵素에 의한 셀룰로스전환은 轉換速度가 느리고 大量의 酵素가 필요하다는 어려움이 있다. 따라서 강력한 셀룰로스分解酵素(Cellulase)를 생산하는 酵素生産菌을 개발하고, 효소생산조건을 개선하여 cellulase 生産성과 力價를 증진시키고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 lignin 分解微生物에 의한 lignin分解酵素 生産과, 셀룰로스의 당화액 중에 존재하는 cellobiose, celooligosaccharide 를 함유하는 경우가 빈번하므로 이들 당의 單糖類로의 변환과 hemicellulose分解에 필요한 hemicellulose分解酵素의 개발도 진행되고 있다.

천연의 셀룰로스의 분해에는 여러가지 酵素의 協同作用에 의해 일어난다. 結晶性(crystal), 非結晶性(amorphous)의 셀룰로스 분해과정을 그림2에 표시했다.

C_x 는 β -1, 4-endoglucanase로 非晶性cellulose를 무작위적으로 분해하여 glucose, cellobiose, celotriose 등을 생성시키고, C_1 로 표시되는 β -1, 4-exoglucanase는 cellulose분자의 非還元末端으로부터 glucose 두분자가 β -1, 4 glucoside 결합

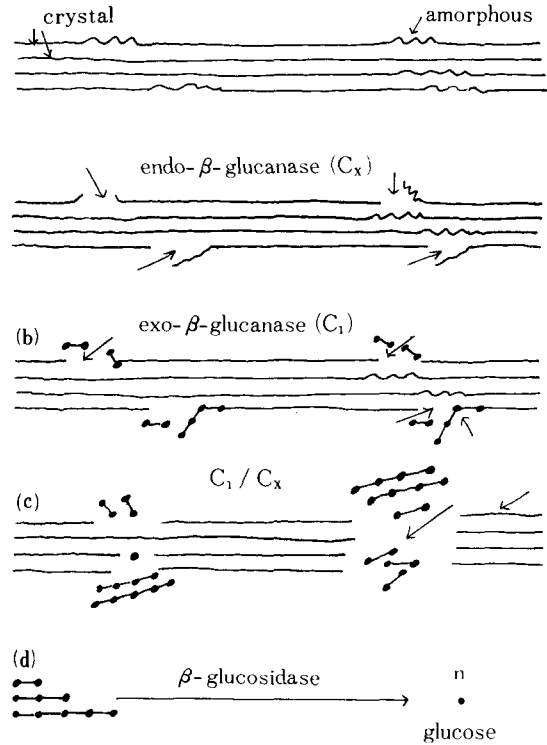


그림 2. Cellulose에 의한 Cellulose 분해과정

을하고 있는 cellobiose단위로 분해하며, Cb로 표시되는 B-glucosidas는 cellobiose를 가수분해하여 glucose 두분자를 생성한다. 이들 효소는 단독으로는 셀룰로스 분해능이 매우약하지만 이들이 동시에 작용하면 강력한 분해활성을 갖는 相乘效果(Synergism)가 있다. 또한 이들 효소는 최후의 분해 생성물인 cellobiose나 glucose에 의해 活性에 阻害를 받고 있어서, 기질로서 대량의 셀룰로스를 고농도의 당으로 분해시키기 위해서는 해결해야 하는 문제점인 것이다. 이에대한 해결책으로 이들 효소를 擔體에 固定化시킨 固定化酵素法이 연구되고 있다.

한편 lignin의 분해를 위해서 lignin 分解微生物을 탐색하여, 이들을 이용한 微生物學的 lignin分解를 피하고 있으며, lignin分解酵素의 生産성을 증대하기 위해서 이들 미생물에 대한 연구가 활기를 띠고 있다.

 表 2 Cellulose 生産 微生物

細菌(好氣性, 中温菌)

*Colloviobrio fulous**Cellulomonas**Pseudomonas fluorescens*

細菌(嫌氣性, 中温菌)

Ruminococcus albus

細菌(嫌氣性, 高温菌)

*Clostridium thermo cellum**C. thermocellulaseum*

곰팡이(好氣性, 高温菌)

*Sporotrichum dimorphosporum**S. thermophilum**Chrysosporium lignorum**C. pruinsum**Phanerochaete chrysosporium**Humicola insolens**Chaetomium thermophilum**Thermoascus aurantiacus**Talaromyces emersonii*

放線菌(好氣性, 中温菌)

Streptomyces QM814

放線菌(好氣性, 高温菌)

*Thermo actinomyces**Thermomonospora curvata**Thermonospora fusca*

곰팡이(好氣性, 中温菌)

*Aspergillus niger**Aspergillus aculeatus**Trametes sanguinea**Myrothecium verrucaria**Pestlotiopsis westerdijkii**Penicillium iriensis**P. purpurogenum**Pellicularia filamentosa**Fusarium solani**Trichoderma viride**Trichoderma reesei**Acremonium cellulolyticus*

 表 3 주요한 Lignin 分解 微生物

Classification

Species name

*Basidiomycetes**Coriolus versicolor**Poria subacida**Sporotrichum pulverulentum**Phanerochaete chrysosporium**Gandoderma lucidum**Lentinus edodes*

Fungi imperfecti

Fusarium solani

Ascomycetes

*Streptomyces badius**S. viridosporus*

Bacteria

*Pseudomonas**Flavobacterium**Agrobacterium**Xanthomonas**Micrococcus*

5. 바이오리액터(Bioreactor)와 固定化菌體 醱酵

에탄올 醱酵生産性を 向上시켜서 에탄올의 cost-down를 이루기 위해서 새로운 醱酵槽과 運轉方法의 開發이 꾸준히 이루어져서 많은 성과가 있었다. 이들은 기존의 차례식 回分醱酵法을 개량해서 連續醱酵法을 채택하고 있으며, 발효 효모

나 박테리아의 菌體를 직접 발효조 내에서 사용하는 것과 天然高分子物質이나 合成高分子物質에 固定化시키는 固定化菌體醱酵法으로 구분할 수 있다.

이들은 單純攪拌連續醱酵(simple continuous stirred tank reactor CSTR), 多段式連續醱酵(series C.S.T.R), 菌體再循環(cell recycle), 塔型醱

표 4. 개량된 에탄올 발효법의 비교

Process	Ethanol productivity	Comments
Batch fermentation	Very low (1.8-2.5 g l ⁻¹ h ⁻¹)	Very high capital and operating cost
Simple CSTR fermentor	Low (6 g l ⁻¹ h ⁻¹)	Mechanically simple equipment, simple continuous operation
Series CSTR fermentors	2-3 times rate for simple CSTR	Simple continuous operation
Perforated plate CSTR with centrifuge cell recycle	Not reported	Mechanically complex
CSTR with alternative recycle scheme	High (30-40 g l ⁻¹ h ⁻¹)	Added energy requirements and added operator attention required for centrifuge
Tower fermentors	High	Settlers appear to be too large for industrial application. Whirlpool separators may be attractive
Slant tube fermentors	High	Mechanically simple with simple continuous operation, but start up period is very long
Packed bed, tower fermentor	High	Mechanically complex
Dialysis fermentor	Not reported	Plugging and by-passing are major problems
Pressure dialysis fermentor	Not reported but potentially high	Reaction rate limited by substrate diffusion through membrane.
Rotor fermentor	High (36 g l ⁻¹ h ⁻¹)	Membrane fouling may require frequent shutdowns
Hollow fiber	Not reported but potentially high	Membrane fouling will be a major problem
Plug fermentor	High (72 times greater than for similar batch fermentation)	Membrane fouling problem overcome but the fermentor device is mechanically quite complex.
Gel entrapment	90% yield from 10% glucose solution in 10 h	Membrane destruction by mechanical shear may be a problem
Chemically bound yeast cells	Not reported	Expensive units. Mass transfer limitation may limit productivity
Direct extractive fermentation	Potentially very high	Frequent shutdowns for yeast rejuvenation in an aerobic environment will be required. High power feed pumps are required
Membrane extractive fermentation	Not reported, but potentially very high	Very simple system with no agitation or recycle equipment required. Half life of entrapped cells must be increased to make this process attractive
Selective membrane fermentation	Not reported but potentially very high	The cell viabilities do remain high after covalent bonding. If productivities also remain high, this could yield in very simple, high productivity system
Vacuum fermentation	Very high (80 g l ⁻¹ h ⁻¹)	No suitable extractant has been found
Flash fermentation	Very high	Membrane fouling may be a problem. Process is otherwise simple
		Membranes with sufficiently high throughput rates have not yet been developed
		Mechanically complicated equipment requiring constant monitoring. Small added energy requirements for vapor compression. Contamination of the vacuum vessel may be a problem. Pure oxygen must be sparged
		Mechanically very complicated. Energy requirements only slightly increased over conventional processes. Contamination problem greatly reduced as compared to direct vacuum process and pure oxygen is not required

醱槽(tower fermentor) 分離膜醱槽(membrane fermentor), 발효액의 에탄올을 진공에 의해서 계속 회수함으로써 생성에탄올에 의한 발효효도의 생육억제를 피할 수 있는 減壓醱法(vacuum fermentor, extractive fermentor), CO₂와 air는 별도로 회수하고 주발효조와 별도로 flash vessel에서 에탄올을 회수한 후 여액을 다시 주발효조로 flashing 시키는 flash醱法 등이다. 이때 醱槽設計나 運轉方法의 개발에서 에너지 소비의 절감, 운전방법의 단순성, 원료로서의 당의 사용도 장치용적의 최소화를 고려할 필요가 있다. 표 4에 새로운 에탄올 발효장치에 대해 그 생산성과 장, 단점을 간단히 열거하였다. 固定化菌體法은 雜菌汚染의 위험성이 낮고, 菌體濃度의 증가와 菌體回收工程의 생략, 高活性의 菌體를 長期間 유지시킬 수 있다는 장점 때문에 連續醱法에 적용해서 이용하고 자하는 연구가 이루어졌고 많은 연구자에 의해 實用化되었다. 固定化方法으로는 擔體 内部에 고정시키는 包括法(entrainment)과 擔體의 表面에 단순히 物理, 化學的 힘에 의해서 부착시키는 吸着法(attachment)이 있다. 包括法에 사용되는 擔體로는 天然物質인 褐藻類의 alginate, 紅藻類의 caraginan과 agar 및 gelatin이 이용되며, 人工合成物質인 polyacrylamide가 사용된다. 吸着法에는 絹造托, PVC, 나무, cellite, 이온交換樹脂 등이 固定化 擔體로 사용된다.

IV. 世界各國의 바이오에너지 開發現況

1. 브라질

브라질은 1973년의 第一次 石油危機에 의한 석유價格의 대폭적인 상승에 따른 國際收支의 악화로 砂糖産業의 不振을 해결하기 위하여 國家 Alcohol計劃(PROALCOHOL)을 1975년에 확정시키면서 世界에서 가장 먼저 燃料用 에탄

올의 實用化를 이룩하였다. 이후 1979년에 國家 알콜계획을 새로이 조정(CNAL)하여 1990년까지의 長期計劃을 추진하고 있다. 브라질은 전국에 400개 이상의 에탄올 생산공장에서 1973년에는 150만kl를 생산했고, 1983년에는 580만kl를 거쳐 1986년에는 1,000만kl에 이르는 생산량을 기록하고, 이러한 증가추세는 계속되고 있다. 생산된 에탄올은 브라질 정부의 강력한 행정적 뒷받침에 의해서 주로 자동차의 燃料用으로 사용되고 있다. 브라질은 현재 240만대 이상의 자동차가 100%의 에탄올을 연료로 사용하는 것이고, 20%의 에탄올을 gasoline에 첨가한 gashol 자동차를 포함해서 전체의 67%이상의 자동차가 에탄올을 연료로 사용하고 있을 정도이다.

브라질의 바이오에너지 개발에 관한 연구는 정부의 商工部 소속의 STI(Secretariat for Technology & Industry)산하의 연구소와 상파울루州 소속의 IPI(Instituto de Pasguisias Tecnologia S/A)와 협력하는 각 대학과 브라질 국영석유회사인 PETROBRAS에서 주관하여 수행하고 있다.

2. 미국

1978년에 에너지부의 '알콜政策檢討計劃'에 기초하여 1979년에 '알콜燃料利用政策'을 결정했다. 아울러 1980년에는 에너지부, 農務省(USDA)산하의 연구기관과 각 대학이 참여하는 'Biomdss Energy and Alcohol Fuel Acts'를 결성해서 종합적인 바이오매스의 개발정책을 추진시키고 있다. 옥수수를 원료로 해서 생산된 에탄올을 10%로 gasoline에 혼합한 gashol이 미국의 中部에서 사용되고 있으며, gasoline의 옥탄가를 향상시키는 데에도 이용하면서 液體燃料增量劑의 판매량이 늘고있다. 에탄올 생산량이 1985년에 이미 350만kl에 달했고, 1990년에는 3,800만kl를 gashol로 사용할 계획을 세워놓고 있으면서, 이를 위한 행정적 뒷받침을 동시에 실시하고 있다.

3. 일 본

일본은 우리나라와 바이오매스資源의 상태가 매우 흡사하고 또한 에너지의 의존실태도 비슷하여 석유를 전량 수입하는 어려운 상황이 代替 에너지 개발을 위한 바이오매스 이용성의 개발에 대한 필요성이 절실하다. 에탄올의 代替燃料로서의 실용화는 일본이 바이오매스자원, 사정에 의해 현재는 불가능하지만, 장래의 석유고갈시기를 대비한 강력하고 장기적인 연구 개발을 국가의 주도하에서 진행시키고 있다.

바이오매스로 부터의 燃料用 에탄올 생산을 위한 연구는 通産省의 관장하에 '新燃料油開發技術研究組合(RAPAD)' '新에너지 總合開發機構(NEDO)'와 '燃料用알콜開發技術研究組合(FA-RA)' 등을 구성하여 국,공립연구소, 대학, 기업이 참여하는 공동연구로 진행되고 있다.

이들의 주된 연구분야는 바이오매스의 변환, 이용기술의 개발을 위한 연료용 알콜생산과 cellulose로부터의 에탄올, 부탄올생산 기술, 太陽에너지의 生體系로의 변환시스템, 당질자원의 개발 未利用 植物資源의 溶液化, 未利用 木材資源의 이용성 개발 등이고, 새로운 바이오매스자원의 개발을 위해서 石油植物, 바이오매스增産, 海洋 바이오매스의 개발 등이다.

이와 같은 조직적이고 종합적인 연구체제의 구축으로 일본이 바이오매스이용 기술에서는 세계에서 가장 앞선 상태에 이르고 있다. 通産省에서만 에탄올생산에 관한 연구에 만도 8億7千萬 엔을 투자할 정도이다. RAPAD는 사탕수수의 칩즙폐기물과 볏짚 등의 cellulose계를 원료로 하여 하루에 720kg의 원료로부터 150~200 l의 에탄올을 생산할 수 있는 Bench Plant를 성공하였다.

일본의 국내의 바이오매스자원의 한계성을 탈피하기 위하여 정부주도에 의해서 동남아시아 각국과 원료개발 및 합작Plant 개발을 위한 국제협력도 동시에 추진하고 있다.

4. 서독 및 프랑스

서독은 풍부한 森林資源을 근간으로 하여 化學工業의 原料物質을 얻기위한 바이오매스의 이용기술의 개발에 중점을 두고 있으며, 液體燃料의 개발을 위해서 바이오매스의 가스化에 의한 methanol로의 變換에도 관심을 기울이고 있다. 바이오매스의 이용은 단순한 에너지源으로서가 아니라 高付加價値의 生産物로의 이용을 추구하고 있다.

프랑스는 木材工業의 廢材를 이용한 메탄올생산과 메탄올의 gasoline에 10% 첨가하는 gasohol 개발에 주력하고 아울러 아세톤, 부탄올 등을 廢糖蜜로 부터 생산하여 gasoline엔진의 옥탄가향상과 gasohol생산에 이용하고자 한다.

V. 우리나라의 바이오에너지 開發現況 및 展望

그동안 國內에서의 바이오에너지 開發에 대한 연구는 1970年代 중반기 부터 이루어져 왔다. 이전에 酒精事業의 에탄올 생산에 관한 技術開發은 훨씬 前으로 거슬러 올라 갈 수 있다. 바이오매스로 부터의 에탄올 생산은 科學技術處의 주도로 1970年代의 중반에 시작되면서 본격적으로 연구가 시작되었다. 그러나 1980年代의 후반에 이르기 前까지는 實驗室內의 기초연구 단계에 머물러 있었다. 그러나, 이 분야의 연구의 必要性이 고조되면서 1984년에 'Bio-energy' 政策심포지움'을 계기로 政府次元에서의 적극적인 바이오에너지 개발을 추진하게 되었다. 1987年末에 '代替에너지 開發促進法'이 시행되면서, 바이오에너지의 개발에 動力資源部和 科學技術處의 지원을 기반으로 하여 전국의 관련 學界, 研究所, 産業體에서 연구의 활기를 띄게 되었다.

國土가 협소하고 農産物을 포함한 바이오매스資源이 充分치 않고 이용가능한 資源으로는 木

質系나 볏짚 등의 셀룰로스資源이 대부분인 우리나라에서는 일차적으로 이들의 効率的 利用을 위한 技術의 開發이 필요하고, 아울러 바이오매스의 大量確保를 위한 栽培技術의 開發이 필요하다. 한편으로는 農業廢棄物, 林産廢棄物 畜産廢棄物, 都市 및 産業廢棄物 등을 이용한 메탄가스의 生産도 매우 중요한 것이다. 그리고 未來의 바이오에너지源으로 사용이 가능한 무한한 海洋植物의 生産을 고려도 해야한다. 한편 바이오매스로서 쉽게 이용할 수 있는 에너지作物이 풍부한 東南亞 등의 개발도상국과 協力하여 바이오에너지資源을 확보할 수 있는 길도 모색해야 할 것이다.

國內의 바이오에너지技術은 各各의 분야에서는 어느 정도의 수준에 이르렀으나, 전체적인 바이오에너지 개발을 위한 綜合的인 技術에서는 아직 미흡한 실정이다. 바이오매스로 부터의 바이오에너지 生産은 利用技術에서나 研究成果의 파급면에서 광범위하여, 生物工學, 微生物學, 生化學, 分子生物學, 農學, 林學, 環境工學 등의 다양한 學問分野와의 복합적인 協力を 통해서만 成功할 수 있다.

현재의 研究現況은 에탄올과 메탄가스 생산에 집중되어 있으나, 셀룰로스 分解技術, 木質系原料의 變換技術, 嫌氣性微生物의 셀룰로스를 이용한 에탄올 부탄올생산과 수소가스생산에 대한 研究도 점차 活氣를 띠고있다. 國內研究人力의 풍부함과 質的인 우수함을 바탕으로 政府의 積極적인 지원이 뒤따르기 시작한 우리나라는 化石資源의 근본적인 부족으로 인하여 더욱 研究開發에 박차를 가하기 때문에 바이오에너지開發

의 展望은 매우 밝은 것이다.

參考文獻

1. H.Dellweg, Biotechnology, vol.3, 'Biomass, Microorganisms for Special Applications, Microbial Products I, Energy from Renewable Resources' Verlag Chemie (1983)
2. J.D.Bu'Lock, "Industrial Alcohol" in Microbial Technology ; Current State, Future Prospects, P310~P325, The Society for General Microbiology symposium 29, ed A.T.Bull, D.C.Ellwood and C.Ratlevge, Cambridge University Press (1979)
3. A.Fiechter, 'Advances in biochemical Engineering' vol 20, Springer.Verlag (1981).
4. 鈴木周一 編 'ドイオマスエネルギー變換', 講談社(1983)
5. 鈴木周一 編 'ドイオマスによた 燃料, 化學原料の開發 技術資料集成', フジ テワノシステム(1984).
6. 有馬 啓, 千葉 英雄, '바이오마스 生物資源의 高度利用' 日本農藝化學會, 朝倉書店(1985).
7. 野野內 隆, '21世紀를 拓人 도이오인드스토리 との展望と課題 通商産業省, 基礎産業局 編 (1985).
8. 趙完圭 'Bioenergy와 에너지정책 심포지움 논문집' 한국과학기술단체 총연합회(1984).
9. 田口 久治, 編 '文部省科學研究費, エネルギー特別研究', "生物ニエネルギーの利用と開發" 總合成果報告書(1986).

