

“바이오에너지-미생물생태계를 이용한 에너지문제의 해결”

한국과학기술원부설 유전공학센터 이 상 기

1. 서 론

이제까지 인류가 이룩한 고도의 공업적 성장과 기술 발달의 배경에는 석유자원을 효율적으로 이용할 수 있었기 때문이라는 점을 간과할 수 없을 것이다. 지난 이십여년간 산유국들에 의한 자원의 무기화로 인해 수차례나 폭등하여 세계 경제질서를 뒤흔들어 놓았던 석유가는 최근 산유국간의 정치적 갈등이나 국제 경제의 기류변화로 인해 비교적 저가의 안정세를 누리고 있으나 이 현상은 일시적인 것으로서 언제 어떤 형태로 또 다른 에너지쇼크가 닥칠지 전혀 예측할 수 없는 상황이다. 실제로 화석연료자원 특히 석유의 매장량이나 가채량, 그리고 인구증가율이나 공업화 속도를 감안해 볼 때 서기 2000년을 정점으로 인류가 이용할 수 있는 화석에너지원은 하강기를 맞게 되어 서기 2100년경에는 완전 고갈될 것으로 추정되고 있다. 따라서 유한적인 화석에너지를 대체할 수 있는 신에너지의 개발은 필수적이라 할 것이다.

대체에너지를 개발하고자 할 때 반드시 고려해야 할 사항으로는 새롭게 개발된 대체에너지가 산업의 석유 의존도를 낮출 수 있어야 하고, 환경을 오염시키지 않으며, 공급이 안정되고 필요에 따라서는 언제나 재생이 가능해야 한다. 이러한 제조건을 충족시킬 수 있는 대체에너지로서 가장 유망한 것이 무한한 태양에너지를 생물학적 전환방법을 통해 연료화할 수 있는 바이오에너지이다. 바이오에너지란 광합성을 통해 형성된 바이오매스를 생물학적인 시스템을 이용하여 여러가지의 에너지형태로 전환시킨 것이다. 바이오매스의 생물학적 전환과정에서 가장 중요한 역할을 담당하는 것이 생태계에 널리 분포하고 있는 미생물이며 이들 미생물의 독특한 물질대사와 환경조건에 따라 다양한 형태의 바이오에너지가 얻어지는 것이다.

2. 바이오에너지원으로서의 바이오매스

바이오매스란 원래 생태학적 용어로서 직역하면 “생물현존량” 또는 “생물량”이 되지만 광의로 해석하면 모든 생체유기물 또는 “생물자원”으로 통용된다. 즉 지구생물권(biosphere)의 물질순환과정에서 생성되는 모든 동식물 및 미생물과 같은 생물유기체 및 이로부터 유래된 유기폐기물을 통틀어 바이오매스로 정의한다. 바이오매스의 종류를 좀 더 구체적으로 살펴보면 단세포적인 것으로서 광합성 세균이나 조류 등을 들 수 있는데 이들 미생물은 생육지가 다양할 뿐만 아니라 보통 3~5%의 태양 에너지를 고정할 수 있는 능력이 있고 생육주기도 짧아 에너지 회수가 빠른 특성을 지니고 있다. 육생계 바이오매스로는 수목류, 초본류를 망라한 식물체가 이 범주에 속하고 있는데 이 부류가 현재 지구상에서 생산되고 있는 바이오매스의 대부분을 차지한다. 이중에서도 특히 삼림자원이 큰 비중을 차지하고 있으며 재배식물 중에서는 전분, 설탕 등을 생산하는 카사바, 사탕수수 등이 대체에너지 자원식물로 유망하다. 수생계 바이오매스로는 해조류가 이에 속하는데 해양개발이 미진한 현상에서는 아직도 개발의 여지가 많은 부류라 할 수 있다. 이와같은 천연적 바이오매스 이외에도 인간이나 가축의 배설물, 도시 쓰레기, 하수오물 등도 가스나 화학물질로 전환시킬 수 있는 바이오매스의 일종이다. 그림 1에 생태계에서의 바이오매스의 순환과정을 표시하였다. 이와같은 물질순환과정에서 미생물은 발효라는 형태의 생물전환과정을 통해 바이오매스로부터 에탄올이나 아세트산-부탄올 등의 액체연료나 메탄가스, 수소가스 등의 기체연료상태로 바이오에너지를 생산하게 된다.

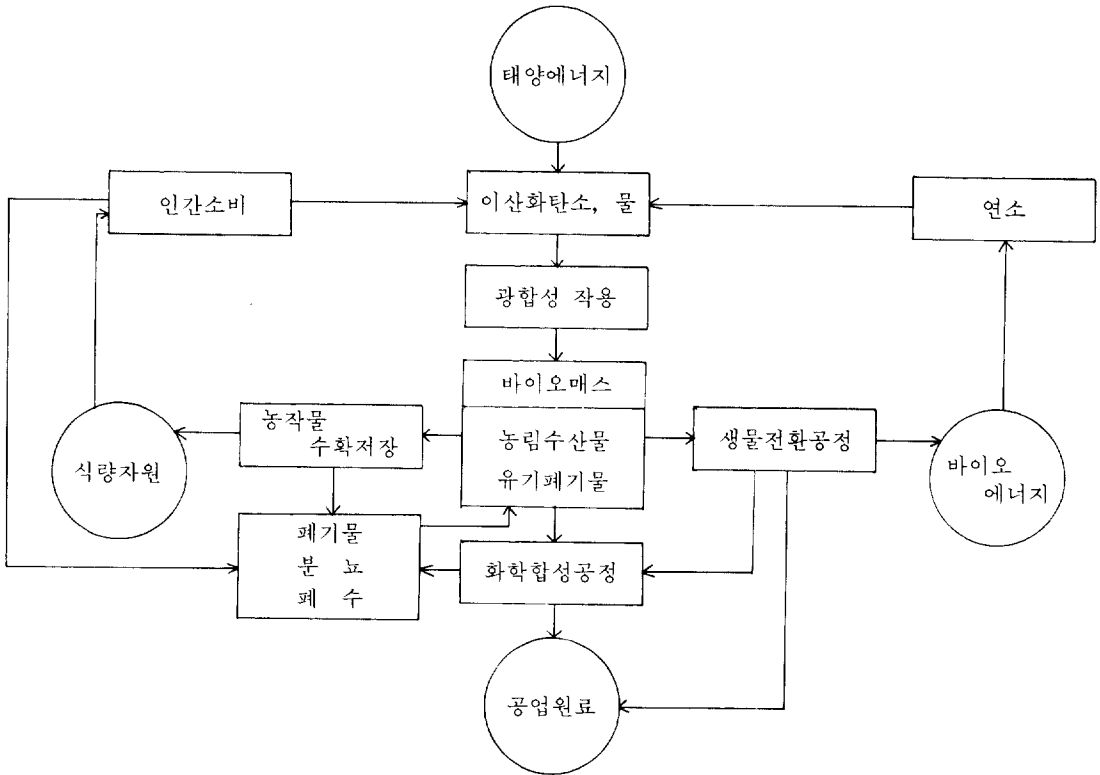


그림 1. 생태계에서의 바이오매스의 이용 및 순환과정.

3. 에탄올

에탄올은 석유대체연료로서 오래전부터 사용되어 왔으나 이제까지는 석유에 비해 생산단가가 높고 열량이 낮아 실용화가 늦었다. 그러나 1973년 1차 석유파동이후 에탄올을 연료화시키려는 노력이 각국에서 활발히 추진되고 있으며 특히 바이오매스로부터 에탄올을 생산, 이용하는데 많은 성과를 올리고 있다. 자동차연료로서 에탄올의 열량은 가솔린의 약 70%에 불과하지만 가솔린에 에탄올을 10~20% 혼합시킨 개소홀(gasohol)의 경우에는 자동차의 엔진을 변조하지 않고도 가솔린의 에너지효율 및 엔진주행거리를 5~10% 증대시킬 수 있을 뿐만 아니라 옥탄가를 높이기 위해 납을 첨가할 필요가 없어 대기오염 방지효과를 거둘 수 있고 엔진의 수명연장도 기대할 수 있다.

미생물발효법을 이용하여 에탄올을 생산할 때 원료물질로서는 당밀이나 카사바, 고구마, 옥수수 등의 전분질이 사용되며, 필요에 따라 효소 또는

경제성을 고려할 때 원료로서 전분질보다는 임산자원이나 볏짚 등 농산폐기물에 풍부한 섬유소자원을 이용하는 것이 유리하다. 섬유소는 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스 및 리그닌 등으로 이루어져 있는데 에탄올을 생산하기 위해서는 섬유소분해능이 있는 *Trichoderma* 속의 미생물을 이용하여 섬유소성분을 포도당 등으로 전처리 당화시킨 후 효모 등의 에탄올발효균주를 이용, 최종적으로 에탄올을 생산한다. 이때 고온혐기성 박테리아인 *Clostridium thermocellum*을 이용하면 자체적으로 섬유소분해효소를 생산하므로 전처리 당화과정 없이 직접 에탄올을 생산할 수 있어 경제적인 측면에서 유리하다. 그러나 이 경우 물질대사의 최종산물로서 에탄올 이외에 초산이나 유산 등의 부산물도 동시에 생산되므로 대사과정이 다른 *C. thermohydrosulfuricum*과 혼합배양(co-culture) 시킴으로써 동일한 발효환경내에서의 두 미생물간의 밸런스를 조절하여 에탄올의 생산수율을 높이는 방법이 활발히 연구되고 있다.

4. 아세톤-부탄올

아세톤이나 부탄올은 연료로서 보다는 공업용 원료로서의 이용도가 더욱 큰 관계로 제1차 세계대전을 전후로 하여 미생물을 이용한 발효법이 개발되어 많이 연구되었다. 그러나 제2차 세계대전 이후 석유를 원료로 하여 공업적으로 생산하는 것이 유리하게 됨으로써 최근들어 발효법에 의한 아세톤-부탄올 생산은 별다른 연구진전이 없는 상태이다. 앞으로 석유가가 올라갈 경우 다시 미생물 발효법이 각광을 받을 것으로 사료되는데 현재는 정치 지정학적 또는 기후조건 등이 특수한 몇개 지역에서만 이 방법에 의해 생산되고 있다. 에탄올 발효와 마찬가지로 아세톤-부탄올 생산 역시 당밀이나 전분질 또는 전처리 당화시킨 섬유소 등을 원료로 하여 *Clostridium acetobutyricum* 등의 균주를 이용하여 발효시키는데 사용균주의 종류 뿐만 아니라 발효환경의 차이에 의해서도 발효 최종산물의 비율이 달라지게 되므로 아세톤-부탄올의 효율적인 생산을 위해서는 사용 미생물의 생태생리학적 연구가 동시에 이루어져야 할 것이다.

5. 메탄가스

메탄가스는 생물체로부터 유래되는 여러가지 유기물이 혐기성 발효를 거쳐 가스 형태로 전환된 것이다. 메탄발효를 거친 바이오가스(biogas)는 일반적으로 60~70%의 메탄과 30~40%의 이산화탄소 및 소량의 유화수소 또는 암모니아로 구성되어 있는데 1m³당 약 6,000 Kcal의 높은 열량을

낼 수 있다. 메탄발효의 원료로서 농축산폐기물이나 도시 오물을 이용할 경우 공해처리를 겸할 수 있다는 장점이 있다. 메탄가스의 생성과정은 일반적으로 세단계로 이루어지고 있는데(그림 2) 그 첫단계로서 통기성 미생물의 가수분해 작용에 의해 고분자유기물이 포도당 등의 저분자물질로 분해되며 둘째단계에서 이들 저분자유기물이 *Clostridium propionicum*, *C. acetobutylicum*, *Eubacterium limosum* 등 산생성 박테리아에 의해 유기산으로 전환되면 제3단계에서 이들 유기산이 메탄생성박테리아의 작용으로 메탄가스 및 CO₂로 전환된다. 이와같이 메탄생성의 메카니즘에는 여러 종류의 미생물이 유기적으로 상호연관되어 있으므로 메탄가스를 고효율로 생산하기 위해서는 관련 미생물의 생태학적 고찰이 특히 중요한 것으로 사료된다.

6. 수소가스

수소가스는 실용화 단계에는 아직 도달하지 않았지만 미래의 에너지원으로 유망한 자원이다. 수소가스는 화학에너지 형태로 운반되거나 저장될 수 있으며 여러가지 동력기관의 연료로 직접 사용될 수 있는 에너지원이다. 특히 수소가스는 화석연료와는 달리 산화한 후 수분만 남게 되므로 무공해연료일 뿐만 아니라 물을 분해하여 무한대로 얻을 수 있기 때문에 자원의 고갈문제를 야기시키지 않는다는 장점이 있다. 수소가스를 생물전환방법으로 얻을 경우 메탄가스 생산과 유사한 방법으로도 얻을 수 있으나 에너지 수율이 낮으므로 주로

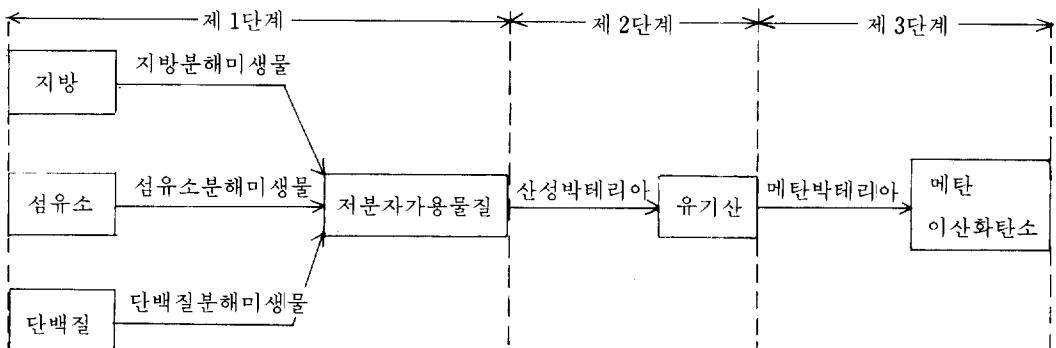


그림 2. 메탄가스의 생성과정과 관련 미생물.

태양에너지를 이용하여 물을 생물광분해(bio-photolysis) 시킴으로써 생산한다. 이때 수소환원효소(hydrogenase)를 지닌 녹조류나 광합성 세균이 이용되는데 수소환원효소는 물을 광분해할 경우 반드시 발생하는 산소에 의해 민감하게 저해받으므로 효율적인 수소가스의 생산을 위해서는 산소에 대한 내성을 지닌 수소환원효소를 갖는 균주의 개발이 필요하다. 또한 수소가스 생산균주인 조류의 광합성 전자전달계는 대낮의 직사광과 같은 고광도의 광에너지를 충분히 이용하지 못하므로 이들 미생물의 광합성 전자전달계에 관여하는 제한요인을 변화시킬 수 있는 시스템개발이 이루어져야 한다.

7. 결 론

바이오매스로부터 바이오에너지를 생산할 때 가장 중요한 사항은 물론 효율적인 에너지 생산공정을 개발하는데 있지만 바이오매스의 생물전환에는 반드시 미생물이 관여하게 되므로 에너지 생산공정개발에 있어서도 관여 미생물의 생태학적인 특성을 고려하여 이를 잘 활용할 수 있어야 한다. 즉 메탄가스 생산의 예와 같이 메탄발효의 세단계 과정에서 각 단계에 관여하는 미생물의 생리학적 성상을 충분히 이해하여 환경조건의 변화 등에 의해 균주간의 밸런스를 유지하고 공생할 수 있는 조건을 마련해 주어야 할 것이다. 또한 바이오에너지원인 바이오매스 자체를 대량생산하기 위한 연구에 있어서도 질소고정시의 공생관계 등 에너지자물과

미생물간의 상호관계를 밝히고 이를 적절히 활용함으로써 바이오에너지의 생산성(productivity)을 높이는 방안이 강구되어야만 바이오에너지 개발을 통한 궁극적인 에너지 문제의 해결이 가능해질 것이다.

참고문헌

1. Slesser, M. and L. Lewis, "Biological Energy Resources" E & FN Spon Ltd. (1979).
2. Atlas, R.M. and R. Bartha, "Microbial Ecology-Fundamentals and Applications" Addison-Wesley Publishing Co. (1981).
3. Zinder, S.H., American Society for Microbiology News **50**: 294 (1984).
4. Pimeniel, Z., Biotechnol. Bioeng. **22**: 1989 (1980).
5. Emert, G.H. and R. Katzen, "Biomass as a Nonfossil Fuel Sources" ACS, Washington D.C. (1981).
6. Hollander, A. ed. "Trends in the Biology of Fermentation for Fuels and Chemicals" Plenum Press (1981).
7. Klug, M.J. and C.A. Reddy, "Current Perspectives in Microbial Ecology" American Society for Microbiology (1984).
8. 別府輝彦. "바이오매스にみる燃料, 化學原料の開發技術資料集成" 富士テクノシステム社 (1984).
9. 이상기. 전기학회지 **33**: 691(1984).

<46 page에서 계속>

- tion of the medium to nitrifying bacteria. *J. Gen. Physiol.* **5**, p. 195-204.
8. Nybakken, J.W. (1982) Marine biology; An ecological approach. Harper & Row, p. 446.
 9. Staley, J.T. and Stanley, P.M. (1986) Potential commercial applications in aquatic microbiology. *Microb. Ecol.* **12**, p. 79-100.

10. Vedder, A. (1934) *Bacillus alcalophilus* n. sp.; benevens enkle ervaringen met sterk alkalische voedingsbodems. *Antonie van Leeuwenhoek* **1**, p. 141-147.
11. ZoBell, C.E. (1968) Bacterial life in the deep sea. *Bull. Misaki Mar. Biol. Inst., Kyoto Univ.*, **12**, p. 77-96.