

바이오에너지의 開發 現況과 展望

李 尚 基

(韓國科學技術院 先任研究員)

■ 차례 ■

- 1. 序 論
- 2. 바이오매스의 種類와 特性
- 3. 바이오에너지의 形態別 利用實態
 - 3.1 에타놀
 - 3.2 메탄가스
 - 3.3 水素가스
- 4. 바이오에너지의 經濟性
- 5. 우리나라의 바이오에너지 開發現況과 當面課題
- 6. 結 論
 - 參考文獻

1 序 論

에너지源으로 오랜 세월을 통해 人類文明 發達에 지대한 공헌을 해 온 石油나 가스, 石炭등의 매장량이 점차 고갈되어 가고 있음에도 불구하고 世界的으로 에너지 수요는 계속 增加해 가고 있다. 따라서 이들 有限 化石에너지를 代替할 수 있는 新에너지의 開發이 무엇보다도 時急한 실정이다.

代替에너지로서 最近까지 많은 研究가 進行된 分野가 核에너지分野인데 石油代替 에너지로서의 잠재력이 큰 反面 막대한 設備投資등 경제적인 측면에서 다른 에너지分野와의 경쟁력을 상실하고 있을 뿐만 아니라 核物質로 인해 야기될지도 모르는 人類生存에 대한 위협 때문에 부정적인 國際여론에 直面하고 있어 開發이 늦어지고 있는 狀況이다. 이러한 理由로써 最近 長期的인 新에너지 開發 대책으로서 注目을 받고 있는 分野가 거의 無限한 에너지源으로 쓰일 수 있는 太陽 에너지를 利用하는 것이다. 1년동안 地表上에 放射되는 太陽에너지의 總量은 約 3×10^6 EJ로서 이 量은 현재 地球상에 매장되어 있는 化石에너지 總量의 約 75배에 달하는 막대한 量이다.

實際로 太陽에너지를 利用하는 方法에 있어 物理化學的으로 集熱板이나 光電池를 使用하여 熱에너지나 電氣에너지로 轉換시켜 利用하는 것 보다는 未來

의 에너지資源 開發의 側面에서 太陽에너지를 生物學的인 轉換方法(bioconversion)에 의해 一名 綠色 에너지라고 불리는 바이오에너지(bioenergy)形態로 轉換시키는 것이 중요하다.

生物轉換法은 生物體가 光合性(photosynthesis)過程을 통해 農作物, 풀, 木材, 藻類등의 形態로 生物資源(biomass)을 合成하고 이 바이오매스를 基質의 種類에 따라 알코홀이나 메탄가스와 같은 燃料物質로 變換시켜 使用하거나 또는 光合成 微生物에 의해 물을 直接 光分解하여 水素가스를 生産하여 에너지로 使用하는 것을 意味한다. 地球上에서 光合成을 통해 바이오매스 形態로 전환되고 있는 年間 太陽에너지의 量은 全世界가 使用하는 年間總에너지 수요량의 約 10배 가량이 되고 또한 地球上에 現存하는 바이오매스의 總量은 化石燃料의 總量에 匹敵하는 事實로 부터 太陽에너지와 바이오매스로 부터의 바이오에너지의 개발은 現在人類가 當面한 중대과제라 하겠다.

이러한 觀點으로 부터 本稿에서는 바이오에너지源으로서의 바이오매스의 特性과 代表的인 바이오에너지의 개발현황을 에너지 形態별로 알아보고 이에 대한 앞으로의 전망에 관해서도 살펴 보고자 한다.

2 바이오매스의 種類와 特性

바이오에너지源으로 使用되는 바이오매스는 원래

生態學的인 用語로서 直譯하면 生物量이 되지만 現在는 넓은 뜻에서 모든 生體有機物 또는 生物資源으로 通用된다. 즉 地球生物圈 (biosphere)의 물질순환과정에서 生成되는 모든 動植物 및 微生物과 같은 生物有機體 및 이로 부터 유래된 有機廢棄物을 통틀어 바이오매스로 定意한다. 太陽에너지로 부터 生成되는 바이오매스의 利用 및 순환과정을 <그림 1>에 表示하였다.

바이오매스의 種類로서는 여러가지 生物體가 다양하게 存在하고 있다. 그 중 單細胞的인 것으로서 光合成細菌이나 藻類등을 들 수 있는데 이들 微生物들은 生育地가 다양할 뿐만 아니라 보통 3~5%의 太陽에너지를 固定할 수 있는 能力이 있고 生育週期도 짧아 에너지 回收가 빠른 特性을 지니고 있다. 陸生系 바이오에너지로서는 樹木類, 草本類를 총망라한 植物體가 이 범주에 속하고 있는데 이 部類가 現在 地球上에서 生産되고 있는 바이오매스의 대부분을 차지한다. 이 중에서도 特히 森林資源이 큰 비중을 차지하고 있으며 재배식물 중에서는 油脂, 澱粉, 설탕등을 生産하는 카사바 (cassava), 사탕수수등이 代替에너지 資源植物로 有望하다. 水生系 바이오매스로서 代表的인 것은 주로 綠藻, 褐藻, 紅藻類등의 海藻類가 이에 속하는데 海洋開發이 미진한 現狀

態에서는 아직도 開發의 餘地가 많은 部類라 할 수 있다. 이상 열거한 천연적인 바이오매스 이외에도 人間이나 家畜의 배설물, 도시쓰레기, 下水汚物등도 가스나 化學物質로 轉換시킬 수 있는 바이오매스의 일종이라 할 수 있다.

바이오매스를 바이오에너지로 轉換시킬 경우 비록 生産된 에너지의 原料當 에너지 發生量이 적기 때문에 多量의 原料가 필요하고, 轉換된 에너지의 形態

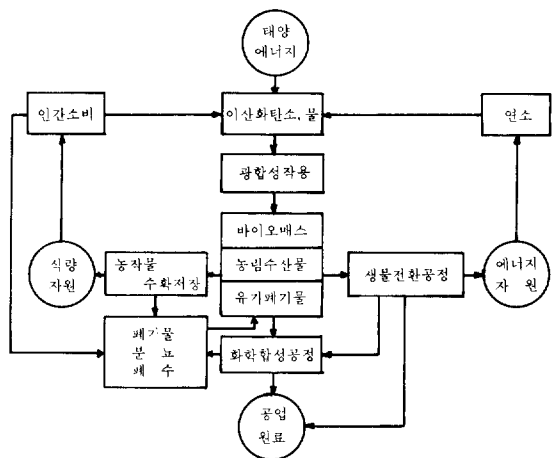


그림 1. 바이오매스의 利用 및 순환과정

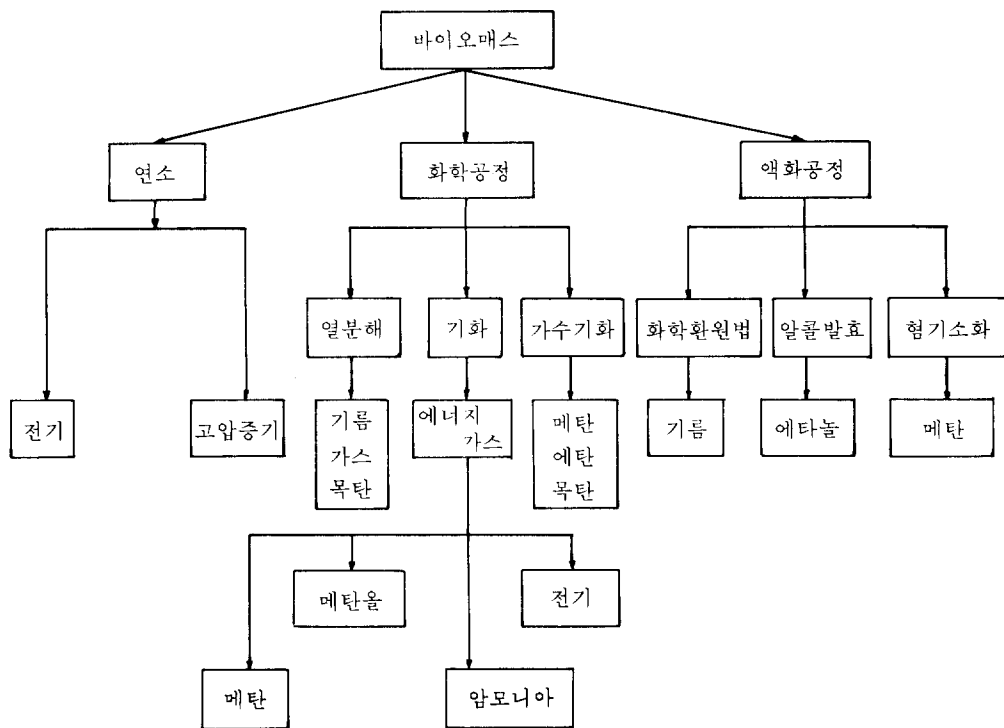


그림 2. 바이오매스로 부터의 에너지 轉換과정

가 多樣하여 均一性이 없으며, 質的인 面에서 電氣 에너지와 같은 良質이 아니며 原子力이나 石油火力 과 같이 量産할 수 없기 때문에 高度의 工業技術 시스템에는 使用하기 어려운 것이 問題點으로 지적되고 있지만 再生 및 永續的인 生産이 可能하고 太陽 에너지의 効率的인 轉換과 蓄積이 可能하며 地域의 인 相應性이 높고 現在의 人力이나 原料를 利用하여 最少의 投資로써 技術開發이 可能하며 化石燃料에 비해 環境汚染을 極少化시킬 수 있다는 長點이 있다.

바이오매스를 바이오에너지로 轉換시키기 위해서는 여러가지 工程<그림 2 참조>을 거쳐야 하는데 熱處理 또는 化學的인 處理에 의해 가스화시킬 수도 있지만 經濟적인 측면에서 生物學的인 시스템을 利用하는 것이 가장 有利하며 이의 代表的인 例로서 醱酵法에 의해 에타놀 또는 아세트-부타놀을 생산하거나 嫌氣性 박테리아등에 의해 메탄가스를 生産할 수 있다.

3 바이오에너지의 形態別 利用實態

3.1 에타놀

에타놀은 石油代替燃料로서 오래 전부터 使用되어 왔으나 이제까지는 石油에 비해 生産單價가 높고 熱量이 낮다는 理由로 인해 實用化가 늦었다. 그러나 1973년의 1次 油類波動이후 全世界의 에너지 需給과 經濟體系가 흔들린 이래 에타놀을 연료화 시키려는 努力이 各國에서 활발히 추진되었고 最近 바이오매스로 부터의 에타놀 생산 및 이용에 있어서 特別 矚目할 만한 成果를 올리고 있다. 自動車燃料로서 에타놀의 熱量은 가솔린의 약 70%에 불과하지만 가솔린에 에타놀을 10~20% 혼합시킨 개소홀(gasohol)의 경우에는 자동차의 엔진을 變조할 필요 없이 가솔린의 에너지 효율 및 엔진 주행거리를 5~10% 增大시킬 수 있을 뿐만 아니라 옥탄가를 높이기 위해 납을 첨가할 필요가 없어 大氣汚染을 걱정할 필요가 없게 되며 또한 개소홀을 사용할 경우 腐蝕性

이 낮아 엔진의 수명연장을 期待할 수 있다. 따라서 에타놀 생산에 대한 世界各國의 觀心도 대단하며 美國의 경우 1978年 國家개소홀 위원회를 構成하였고 新에너지 政策을 통해 1990년까지 石油輸入量을 半減시킬 계획이다. 실제로 1983年 美國의 燃料用 에타놀 生産用량은 2×10^6 K1에 도달하였고 수년내에 전체에너지의 4.5%를 바이오에너지로 代替시킬 계획이다. 日本의 경우 1980年 바이오매스 資源利用 技術開發計劃을 통해 320억엔을 新燃料開發에 투자하고 있으며 西獨의 경우도 糖質과 澱粉質原料로 부터 에타놀을 生産하기 위한 2개의 파일로드 계획을 1982년부터 추진하기 始作하여 전체에너지 소비량의 3%정도를 바이오에너지로 代替할 계획을 樹立하였다. 이 밖에 캐나다, 호주, 태국등에서도 바이오매스로 부터의 에타놀 생산연구를 활발히 추진중에 있지만 汎國家的 次元에서 누구보다도 가장 야심적이고 강력한 에너지 政策을 추구하는 나라로서 브라질을 들 수 있다. 이 나라는 제 1차 석유 파동이 일어난 직후인 1975년부터 개소홀 생산 10개년계획을 수립하고 政府를 중심으로 확고한 에너지 政策을 추구해 온 결과 1977年 1.5×10^6 K1였던 에타놀 생산량이 1983年 8.4×10^6 K1로 增加하였다. 實際 바이오매스로 부터 에타놀을 生産하는데 있어 經濟성의 문제가 아직 남아 있음에도 불구하고 브라질 政府가 개소홀 生産을 강력히 추진하고 있는 것은 國家의 地域의 特性, 즉 광대한 국토 및 풍부한 原料資源의 生産 이외에도 에너지 위기를 자기 실정에 알맞는 方法으로 解決하려는 國家의 努力의 一環이라 하겠다.

에타놀 生産의 原料物質로서는 사탕수수로부터 設糖을 추출하고 남은 찌꺼기인 糖蜜이나 熱帶性 澱粉作物인 카씨바나 薔고(sago), 또는 고구마, 옥수수등이 주로 사용되고 있다. 이러한 澱粉物質을 原料로 사용할 경우 澱粉分解酵素인 아밀레이즈(α -amylase)의 處理에 의해 澱粉을 單糖類인 포도당으로 分解시킨 후 이를 酵母나 박테리아로 하여금 에타놀로 轉換시킨다. <그림 3> 그러나 이 경우 醱

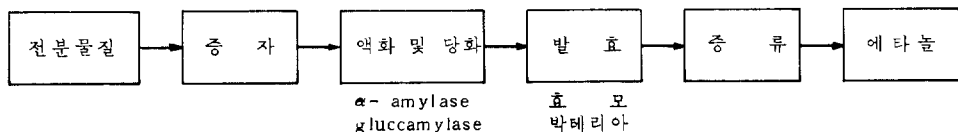


그림 3. 전분질로부터의 에타놀 발효 공정

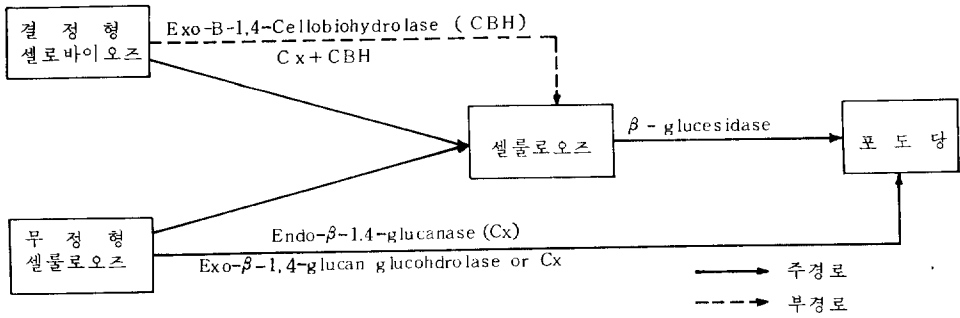


그림 4. 섬유소의 효소 분해 과정

酵基質인 澱粉物質은 食糧資源으로서도 利用될 수 있으므로 우리나라와 같은 食糧輸入國의 入場으로서는 이와 같이 食用可能한 物質보다는 植物體의 대부분을 차지하고 있는 섬유질을 분해시켜 에타놀로 轉換시키는 것이 바람직하다.

섬유소자원은 林産資源이나 벗질등 농산폐기물에 풍부한 再生資源으로서 전체 바이오매스중 1/3~1/2을 차지하고 있다. 構成成分으로서 셀룰로오스 (cellulose), 헤미셀룰로오스 (hemicellulose) 및 리그닌 (lignin) 으로 區分되는데 이 중에서 특히 셀룰로오스 성분을 利用하여 에타놀을 生産하려는 研究가 활발히 추진중이다. 天然셀룰로오스는 結晶型 (crystalline) 과 非結晶型 (amorphous) 성분으로 構成된 不溶性 基質로서 이를 포도당으로 糖化시키기 위해서는 서로 역할을 달리하는 4개 이상의 酵素로 構成된 酵素復合體가 關여하고 있다. <그림 4> 셀룰로오스의 酵素分解는 基質特異的이고 常溫常壓에서 反應이 進行되며 生成된 糖의 2次分解가 일어나지 않는다는 長點이 있는 反面 分解率이 낮고 反應速度가 느리다는 短點이 있다. 따라서 糖化率과 速度를 增加시키기 위해서 셀룰로오스와 밀접하게 結合되어 있는 리그닌 成分을 제거하고 셀룰로오스의 結晶構造를 파괴시킬 수 있는 物理, 化學 또는 生物學的 前處理法을 거쳐야 한다. 이러한 諸過程을 거쳐 포도당으로 轉換된 섬유소 資源은 澱粉物質의 경우와 마찬가지로 微生物을 利用하여 에타놀로 醱酵시킨다. 이 때 이용되는 微生物은 주로 嫌氣性 박테리아로서 Clostridium 등이 이에 속한다.

이와 같이 섬유소 자원을 에타놀 生産原料로 利用하려는 시도가 多角的으로 이루어지고 있지만 연료용 에타놀 生産은 경제성과 에너지 효율이라는 두 가지 측면에서 工程開發이 이루어져야 하므로 섬유소의 경제적인 糖化工程 및 셀룰로오스의 分解能이 강한 菌株의 확보, 에타놀 생성 저해물로서 섬유소 醱

酵의 副産物인 酢酸을 제거시킬 수 있는 方法開發등 섬유소자원의 효율적 利用에는 아직도 解決되어야 할 問題點이 많이 남아 있다.

3.2 메탄가스

바이오매스를 燃料化시키는 또 하나의 方案으로서 生物體로 부터 유래되는 여러가지 有機物을 嫌氣性 醱酵를 거쳐 메탄가스로 轉換시킬 수 있다. 이러한 方法을 거쳐 生産된 가스를 바이오가스 (biogas) 라고 하는데 메탄 발효를 거친 가스는 60~70%의 메탄과 30~40%의 이산화탄소 (CO₂) 및 소량의 硫化수소 (H₂S) 또는 암모니아 (NH₃) 로 構成되어 있다. 바이오가스 중의 메탄 含量이 65%이상인 경우 1 m³당 약 6,000 Kcal의 熱量을 내는데 이는 도시가스나 프로판가스 보다 높은 熱量으로서 메탄가스가 이들 가스의 用途를 代身할 수 있다.

메탄가스의 生産利用은 公害源으로 作用할 수 있는 農畜産 廢棄物이나 都市汚物의 處理를 兼할 수가 있으므로 有機廢資源의 再利用이라는 靚點에서도 各광을 받고 있다. 즉 메탄 醱酵는 분뇨에서 에너지를 生産할 수 있을 뿐만 아니라 분뇨의 生物學的 酸素要求量 (BOD) 감소 및 惡臭 제거, 病原菌 및 기생충의 死滅, 분뇨의 위생적 처리, 良質의 퇴비생산, 廢液을 利用한 사료생산등에 이용할 수 있는 등 여러가지 利點이 있어 UNICEF, FAO, WHO, UNEP 등 국제기구가 各國, 특히 開發途上國의 메탄가스 生産 事業을 직, 간접으로 지원하고 있으며, 우리나라의 경우에도 農村振興廳을 中心으로 주로 農村의 난방 혹은 취사 목적으로 벗질과 가축분뇨로 부터 메탄가스를 생산할 수 있는 시설을 普及하고 있다.

메탄의 生成過程은 一般的으로 세단계로 이루어지고 있다. <그림 5> 그 첫단계로서 高分子 有機物이 加水分解와 通氣性 微生物의 作用으로 可溶性 底分子 物質로 分解되며, 둘째 단계에서 이들 底分子

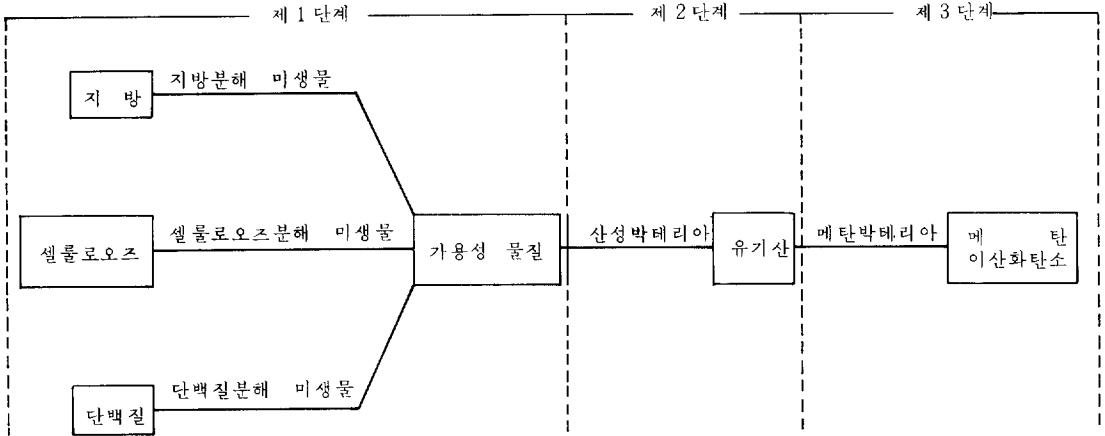


그림 5. 메탄가스의 생성과정

有機物質이 酸性微生物에 의해 酢酸 등의 有機酸으로 轉換되면 제 3 단계에서 이들 有機酸이 메탄생성균의 作用으로 메탄가스 및 CO₂로 전환된다. 메탄 생성률이 가장 좋을 경우 1 M/T의 乾燥有機物로부터 얻을 수 있는 메탄가스의 量은 약 310~460m³로서 에너지 含量을 고려할 때 약 50%의 收率을 나타낸다.

有機廢棄物 외에 메탄가스 생산의 基質로서 적당한 燃料物質을 재배하여 이를 燃料化시킬 수도 있다. 그러나 이들 物質을 陸上에서 재배하는 데에는 實用性的의 문제가 있으므로 바다를 利用하여 燃料用 바이오매스를 生産하는 方法을 고려해 볼직하다. 特히 巨大한 褐藻類인 켈프(kelp)의 경우 前處理가 필요 없어 메탄가스 생산에 경제적으로 이용될 수 있으므로 美國 등에서 이를 利用하여 燃料化시키려는 研究가 활발히 遂行중에 있다.

3.3 水素가스

아직 實用化 단계에 와 있지는 않지만 未來의 에너지源으로 有望한 것으로서 水素가스의 生産이 있다. 水素가스는 化學에너지 形態로 運搬되거나 저장될 수 있으며 여러가지 動力機關의 연료로 직접 사용될 수 있는 에너지源이다. 特히 水素가스는 化石燃料와는 달리 酸化한 후에 水分만이 남게 되므로 無公害燃料일 뿐만 아니라 물을 分解하여 無限대로 얻을 수 있기 때문에 資源의 고갈문제를 야기시키지 않는다는 長點이 있다.

水素가스는 核燃料나 太陽熱을 利用하여 물을 分解하여 얻거나 증기발전을 통해 얻은 電氣 에너지를 利用하여 電氣分解하여 生産할 수 있지만 生物化學

的方法으로 太陽에너지를 利用하여 물을 生物光分解(biophotolysis) 시킴으로써 生産될 수도 있다. 이 경우 水素還元酵素(hydrogenase)를 지닌 綠藻類나 光合性細菌이 주로 이용되는데 이 酵素는 酸素에 의해 敏感하게 阻害받는다. 즉 물을 光分解할 경우 반드시 발생되는 酸素는 水素還元酵素를 阻害하여 水素生産을 停止시킨다. 따라서 效率인 水素生産을 위해서는 酸素에 대한 耐性을 지닌 水素還元酵素를 갖는 菌株의 개발이 필요하다. 또 한가지 水素가스 生産의 問題點으로 指摘되는 것으로서 特히 藻類의 光合成 電子傳達系는 대낮의 直射光과 같은 高光度의 光에너지를 충분히 이용하지 못한다는 點이다. 따라서 光合成 電子傳達系의 制限要因을 변화시켜 強光을 利用할 수 있는 系統을 개발하는 것이 필수적이다.

4 바이오에너지의 經濟性

바이오에너지가 기존의 化石에너지에 비해 경제성이 있는가를 판단하기 위한 基準으로서 다음과 같은 여러가지 事項이 고려되어야 한다. 우선 바이오매스가 에너지源으로서 기존의 에너지源과 경쟁력이 있는가를 검토하고 바이오매스를 使用할 때의 馬力, 運動性, 설치기간등의 效率性, 農業構造, 氣候條件, 바이오매스의 現時勢와 앞으로의 價格, 바이오매스 處理 플랜트의 위치 및 처리용량, 알코홀市場의 規模, 기타 경쟁관계에 있는 에너지의 現時勢와 가격추이, 將來의 技術發展에 따른 경제성등 바이오매스의 利用度에 따라 農家와 産業界에 어느 정도의 利益을 가져올 것인가를 신중히 검토해야 한다. 에너지 作

物的 경우 알코홀 생산에 대한 채산성 계산이 必要한데 各國마다 生産條件이 다르므로 각자의 實情에 맞는 生産原價의 算出이 뒤따라야 한다. 이러한 微細經濟의 觀點 이외에도 에너지 생산에 필요한 原價와 投資위험, 과잉생산된 경우의 바이오매스에 대한 정부의 적절한 정책, 政府支援 없이도 경제성이 있는지의 여부등 전반적인 경제성 평가가 이루어져야 하며 또한 바이오에너지는 공해문제의 위험도가 낮지만 고용인원면에서 인원 흡수가 적고 에너지作物의 경작을 增大시킬 경우 토양의 초토화등을 유발시킬 수 있으므로 社會政策이나 環境面에서의 검토도 뒤따라야 할 것이다. 이러한 여러가지 要因을 充分히 고려하여 바이오에너지의 경제성을 평가한 결과 現狀에서 경제성이 높음이 日本의 한 研究機關에 依해 報告되었다.

5 우리나라의 바이오에너지 開發現況과 當面課題

우리나라의 에너지 수입의존율은 경제성장과 더불어 급속히 增大하여 1982년의 경우 76.8%에 이르고 있다. 輸入에너지의 主宗은 역시 石油의 形態로서 1983년의 石油輸入量은 26.7×10^6 TOE, 약 60 億 \$에 달하고 있어 경제발전에 큰 부담이 되고 있다. 따라서 政府에서도 脫石油政策을 통하여 전체 에너지에 대한 石油의 비중을 줄이고 相對的으로 石炭, 原子力등의 에너지 공급을 늘리려고 계획하고 있다. 그러나 이들 에너지源조차 수입에 의존하고 있는 형편이므로 궁극적으로는 우리나라에서 자체생산이 가능한 새로운 代替에너지의 개발이 세계 어느 나라보다도 시급한 실정이다.

그동안 國內에서의 바이오에너지 개발에 대한 연구는 1970年代 중반기 부터 이루어져 왔지만 아직 實驗室內的 基礎研究段階에 머물러 있는 狀態라 할 수 있다. 또한 政府次元에서의 적극적인 바이오에너지 개발정책이 아직 樹立되어 있지 않으나 최근 우리나라에서도 이 分野에 대한 觀心이 고조되고 있어 앞으로 종합적이고 體系的인 바이오에너지 개발 정책이 마련된다면 좋은 成果가 期待된다 하겠다. 특히 바이오에너지 생산의 경우 바이오매스의 大量確保와 에너지 收支를 맞출 수 있는 경제적인 變換技術의 開發에 그 成敗가 달려있으므로 우리나라와 같이 國土가 협소하고 농산물을 포함한 바이오매스 自體가 充分치 못한 나라에서는 量的인 면에서 비교적 풍부한 林産資源을 利用하기 위해 山地 및 國土의

効率的인 利用 계획이 수립되어야 한다. 한편으로는 농산폐기물, 도시폐기물, 분뇨등을 이용한 메탄가스의 생산이나 바이오에너지源으로 使用가능한 海洋植物의 생산에 主力하면서 에너지作物이 풍부한 東南亞 등지의 개발도상국과 協力하여 現地農場의 개척에 참여함으로써 바이오매스를 안정되게 확보할 수 있는 길을 모색해야 할 것이다. 이와 並行해서 간단하고 노동집약적이며, 에너지 收支가 맞는 新技術開發을 적극적으로 펴 나가는 것이 바람직 하다.

6 結 論

바이오매스로 부터의 바이오에너지 생산은 그 범위가 광범위하여 生物工學, 微生物學, 生化學, 遺傳工學, 化學工學, 農學, 林學, 環境土木工學등 多樣한 學門分野의 複合的이고 유기적인 協力を 통해서만 成功할 수 있다. 주지하는 바와 같이 바이오에너지의 利用展望이 무척 밝음에도 불구하고 파이프릿트 플랜트 단계 혹은 실용화 단계에 도달한 몇가지 工程을 제외하고는 국제적인 수준에서도 아직 이 분야의 많은 부분이 實用化되지 못한 状態 혹은 實驗室的 規模에 머물러 있는 형편이다. 그 理由로서는 바이오매스의 전환기술 중 셀룰로오스의 당화법, 前處理法, 알코홀 발효공정, 알코홀의 分離 및 脫水, 太陽에너지 轉換의 效率性등 해결되어야 할 많은 難題가 남아 있기 때문이다. 따라서 앞으로의 이 分野에 대한 研究方向은 最近 첨단기술의 하나로서 각광받고 있는 遺傳工學技術을 利用하여 셀룰로오스 분해균주의 개량, 셀룰레이즈 酵素의 클로닝(cloning) 우수한 알코홀 생산균주의 확보, 섬유소 분해능과 알코홀 발효능을 동시에 갖는 새로운 菌株의 개발등에 집중될 展望이며 이와 함께 바이오매스의 增産수단으로 速性林木의 育種, 光合成産物의 合成 메카니즘, 窒素固定 메카니즘에 대한 研究가 結實을 맺게 됨으로써 궁극적으로 에너지 問題가 해결될 것으로 思料된다.

參考文獻

- 1) Slessor, M and L. Lewis, "Biological Energy Resources", E & FN Spon Ltd.(1979)
- 2) "Microbial Processes : Promising Technologies for Developing Countries", Report of an Ad Hoc Panel of the Advisory Committee on Technology Innovation, National Acad-
(p.140에 계속)