

바이오에너지의 극대활용방안

Utilizing method for Bioenergy



글 / 秦秀雄

(Jin, Soo Ung)
지하자원개발기술사, (주)한자엔지니어링
기술사사무소 대표이사, 본회 홍보위원
E-mail : hanja@hanjaco.co.kr

The terminology of bioenergy means the biomass.

The urge to make biomass more quantitative has led to the wide spread inclusion of plants, grains and all organic substances. Biomass for nonelectrical uses in the our country accounts for approximately 2~3% of the total energy consumption in 1999.

Biomass also generally produces lower gas pollutant emission than fossil energies and to attractive because it's a renewable energy source.

1. 서 언

‘바이오에너지’ (Bioenergy)란 태양광, 풍력, 식량, 목재, 펄프 등 ‘바이오매스’ (Biomass)를 에너지원으로 하는 모든 생체에너지를 뜻한다.

따라서 ‘바이오매스’는 ‘바이오에너지’와 같은 뜻으로 음식찌꺼기, 폐지, 생활쓰레기 등도 바이오매스의 일종으로 바이오에너지원이 된다.

바이오매스는 복잡한 다양성 때문에 물성에 따른 체계적 분류를 통하여 에너지량을 산정해 낼 수 있다.

특히 바이오매스는 토지의 이용목적(삼림, 경작지, 목초지, 저수지 등), 생산물의 최종용도(식품, 음료, 원자재, 난방 등), 가공법 등에 따라 분류된다.

모든 바이오매스는 탄산가스와 물이 태양광에 의한 광합성 작용에 의해 만들어지며 다시 에너지를

를 발생시킨다.

즉 광합성의 부산물로 생성된 산소에 의해 바이오매스는 산화, 소화, 부식, 연소되면서 에너지를 발생시키고 다시 탄산가스와 물로 분리되어 순환을 반복한다.

이와 같이 바이오매스는 태양에너지를 매체로 하여 순환을 반복하는데 자연에너지로서 바이오매스의 특징은 삼림자원과 같은 형태로 어느 정도 저장 가능하다는 점이다.

바이오매스를 에너지로 환산한 자산적 가치(Flow)는 바이오매스형태를 유지하고 있는 것만으로도 년간에너지량기준 약 2,600EJ(Extra-joule : 10¹⁸줄)로 세계인류가 소비하는 에너지총량의 7배나 된다.

그러나 실제 삼림형태로 육상에 저장돼 있는 ‘바이오매스’는 세계인류가 연간 소비하는 에너지총량의 약 10배나 되기 때문에 결국 인류가 쓸

기술이식

수 있는 바이오에너지는 대략 70년분이 지구상에 저장돼 있다.

이와 같은 막대한 양의 에너지원인 바이오매스를 단순한 환경적 물질이나 산업폐기물 또는 생활쓰레기로 생각할 수 있기 때문에 바이오매스는 곧 에너지자원이라 생각하는 의식전환이 필요하다.

2. 바이오매스와 관련된 용어 및 단위

바이오매스란 지구상에 생존하는 생물체의 실증량 또는 에너지로 환산한 증량을 뜻하며 국제식량농업기구(Food and Agriculture Organization)에서 정의된 '바이오에너지'란 용어는 '바이오매스에너지'(Biomass energy)를 뜻한다.

바이오에너지는 이용형태에 따라 재래형 바이오에너지(Traditional bioenergy)와 근대형 바이오에너지(Modern bioenergy)로 양분되고 사용목적에 따라 에너지작물(Energy crops)이란 용어를 쓸 때는 에너지를 발생시킬 목적으로 재배하는 작물을 뜻하며, 에너지농장(Energy plantation) 또는 조림이란 용어를 쓸 때는 에너지작물을 생산하기 위한 농장 또는 인공조림을 뜻한다.

바이오에너지 종류를 논할 때도 흔히 흑액(Black liquor : 원액), 배거스(Bagasse : 원액을 짜낸 찌꺼기), 배르보쥬(Barbojo) 등의 용어를 쓰는데 이는 사탕수수 농장에서 쓰던 용어를 그대로 쓰기 때문이다.

바이오매스 생산과 관련해서는 순1차 생산(Net primary production)이란 용어를 쓰는데 이는 식물의 광합성시 햇빛이 전혀 없을 때 일어나는 암(暗)반응과 햇빛이 있을 때 일어나는 명(明)반응과의 소요에너지 차를 뜻한다.

본고에서 에너지 단위는 열량단위 J(Joule, 1Joule = 1Nm = 1kgm²/s² = 10⁷erg.)와 석유환산

톤 TOE(Tonnage oil equivalent)인데 1TOE는 10⁷kcal로 4,186 × 10¹⁰J이다.

J는 TOE에 비해 아주 적은 에너지단위이기 때문에 J앞에 K(Kilo 10³), M(Mega 10⁶), G(Giga 10⁹), T(Tera 10¹²), P(Peta 10¹⁵), E(Exa 10¹⁸), Z(Zetta 10²¹), Y(Yotta 10²⁴)등 접두어를 쓴다.

3. 바이오매스의 기본특성

에너지자원으로서 바이오매스의 기본특성은 함수율, 비중, 발열량, 탄소함유율을 들 수 있다.

함수율과 관련해서는 절대건조(BD : Bone-dry)와 공기건조(AD : Air-dry)로 구별하며 절대건조의 경우는 함수율이 영(0)을 뜻하고 공기건조의 경우는 주변습도에 따라 어느 정도는 수분을 함유하고 있음을 뜻한다.

예를 들면 FAO가 규정한 공기건조의 수분함량 허용기준치는 20%-수분이고 일본이나 우리나라의 경우는 40%-수분까지도 허용하고 있다.

바이오매스의 단위용적당 증량(편이상 용적중이라 표현)은 바이오매스의 종류와 함수율에 따라 다르며 목재의 경우 캐나다산 칩엽수의 칩(Chip : 분쇄된 목재)은 0.40BD-t/m³ 인데 반해 말레이산 광엽수 칩은 0.80-BD-t/m³ 으로 칩엽수보다 광엽수가 배나 더 무겁다.

우리나라에서 펄프제조용으로 수입되는 미국산 칩엽수의 칩은 대체로 0.43BD-t/m³ 이고 광엽수 칩은 0.50BD-t/m³인데 FAO에서 규정한 함수율 20%를 감안 칩엽수의 경우는 0.65AD-t/m³, 광엽수의 경우는 0.75AD-t/m³을 기준으로 한다.

발열량에 있어서는 연소 후 배기 중 함유된 수분을 일반기체로 취급하는 저위발열량(LHV)을 일반적으로 기준하는데 고위발열량(HHV)보다는

수분에 포함된 열량이 적다.

바이오매스발열량은 바이오매스 종류와 함수율에 따라 다르며 목재바이오매스의 경우 석유발열량의 약 30%, 석탄발열량의 50% 정도다.

탄수화물이나 단백질인 경우 발열량은 17~18GJ/BD-t 인데 반해 지방 등 지질의 발열량은 33~34GJ/BD-t로 지질이 탄수화물이나 단백질보다 2배나 열량이 크다.

탄소함유율은 탄산가스발생과 관계가 있지만 식물의 주성분인 셀룰로-스(Cellulose, C₆H₁₀O₅)의 경우 탄소함유율은 0.44C/-BD로 목질소(木質素, Lignin)의 탄소함유율인 0.7t-C/BD의 60% 정도다.

따라서 단위 목재발열량(15GJ/AD-t)에 대한 탄산가스 배출량은 0.027t-C/CJ로 석유환산톤으로 계산하면 1.16t-C/TOE에 해당되 석탄(1.0t-C/TOE)보다는 더 크다.

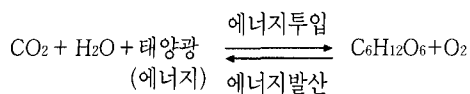
그러나 바이오매스의 탄산가스 배출량은 광합성시 대기 중에 이미 축적(고정)된 탄산가스가 연소할 때 다시 배출되는 것이기 때문에 별도 탄산가스 발생량은 없다.

4. 바이오매스의 생산과 소비성향

광합성에서 나타나는 최종산물은 생물의 생존 에너지원이 되는 포도당(Glucose : C₆H₁₂O₆)이다.

바이오매스는 탄산가스와 물이 광합성하여 만들어지며 이때 부산물로 산소도 함께 만들어진다.

이와 같이 광합성에 의해 생성된 바이오매스는 소화, 부식, 산화, 연소를 통한 화학반응에 의해 산소와 다시 결합해 물과 탄산가스로 분해된다.



위 화학식에서 보듯이 화학적으로 반응하여 발생하는 열에너지는 생물의 생체활동을 할 수 있도록 하는 바이오에너지로서 생물의 번식과 사멸을 도와 생물계의 윤회를 가능케 한다.

이와 같은 물질과의 에너지균형은 탄산가스 1몰(mol)이 환원할 때 약 447KJ(114kcal)의 에너지를 축적시키기 위해서는 이론상 8몰의 광양자(光量子)가 필요하다는 계산이다.

가시광선영역에 있어 1몰의 광양자에너지 함량을 평균 209KJ(50kcal)이라 가정할 때 광합성에너지의 전환효율 E_c = 447/(209×8) = 0.285이다.

광합성을 위한 태양광이 지표까지 와 닿을 수 있는 비율인 전입사광의 광합성유효방사량(PAR : Photosynthesis available radiation amount)은 50% 정도로 정글과 같은 식물군락지에서는 PAR의 90%까지도 광합성으로 흡수할 수 있어 이때 PAR의 비율은 45%나 된다.

그러나 실제 식물의 호흡으로 인한 손실은 암반응(암호흡)때 C₃ 식물은 21%, C₄ 식물은 32% 정도로 명반응(광호흡)때 C₃ 식물은 29%이나 되지만, C₄ 식물은 호흡손실이 거의 없다.

따라서 식물의 전입사광에 대한 순1차광합성생산효율의 이론치(E_u)는

$$\text{C}_3 \text{ 식물의 경우 : } E_u = 0.5 \times 0.9 \times 0.285 \times (1 - 0.21 - 0.29) = 0.064,$$

$$\text{C}_4 \text{ 식물의 경우 : } E_u = 0.5 \times 0.9 \times 0.285 \times (1 - 0.32) = 0.087 \text{ 이다.}$$

실지 실측결과는 최대효율일 때에도 C₃ 식물은 4.4%, C₄ 식물은 4.6%로 실측되는데 이는 이론 효율치의 53~68%에 해당되는 수치로 평균 순1차 광합성생산효율은 60% 정도다.

그러나 기후 등 여러 제약조건 때문에 지표 전체를 기준으로 할 때 실제효율은 0.1%, 육지만을 기준으로 할 때 0.2%, 바다와 같은 수권만을 기준으로 할 때는 0.05%에 불과하다.

5. 지구상 바이오매스 자원부존현황

바이오매스자원은 삼림 등으로 그간 축적된 바이오매스 자원과 식물의 광합성으로 계속 생성되는 자산적 가치(Flow) 바이오매스 자원으로 구분해 생각할 수 있다.

바이오매스 자원은 광합성으로 계속 만들어지지만 바이오매스의 호흡, 고사(枯死), 인류에 의한 산화와 분해 등으로 탄산가스나 토양 유기물로 변하면서 계속 줄어들고 있다.

결국 지구상 바이오매스의 주체는 식물이며 약 90%가 육상식물로 육상바이오매스 총량은 약 2.4 조BD-t으로 추정된다.

이를 에너지로 환산하면 24,000EJ(바이오매스 발열량 20GJ/BD-t로 환산)로 세계 연간 1차 에너지 소비량인 330EJ/년의 약 70배나 된다.

바다에도 대략 36억BD-t(72EJ)이 부존되어 있지만 육상부존량에 비하면 1/300수준에 불과하다.

토양에 섞여있는 유기물의 부존량은 토탄(土炭) 등은 제외하더라도 1.2조t-C로 육상식물 부존량의 약 2배나 된다.

그러나 자연에서 바이오매스 생성속도보다 인간이 자연을 파괴함으로써 줄어드는 바이오매스의 감소속도가 빨라지기 때문에 바이오매스 자원의 부존량을 현상유지하기 위해서는 바이오매스 후로우의 조정이 필요하다.

탄소동화작용에 의해 만들어지는 바이오매스 후로우는 지구가 태양으로부터 받아들이는 에너지 총량이 약 5,400,000EJ/년(170,000TW)인데 반해 이중 50% 정도가 지표에 도달하고 다시 절반 정도만 광합성유효방사량(PAR)으로 작용하기 때문에 실용적인 PAR은 약 1,300,000EJ/년(43,000 TW)정도다.

지구표면적은 510억 헥타이고 육지면적은 28.6%에 해당하는 146억 헥타로 나머지는 모두

수권이다.

특히 육지면적 중 삼림은 39억 헥타, 목초지가 34억 헥타, 경작지가 14억 헥타, 나머지 59억 헥타는 사막, 만년설, 인공구조물 등이 차지하기 때문에 육지면적의 40%는 광합성의 불모지나 다름없다.

바이오매스의 순1차 생산량은 육지에서 1,580 EJ/년(50.2TW, 791억BD-t/년), 수권에서 1,010EJ/년(32.2TW, 507억BD-t)로 순1차생산 효율은 지표 전체기준 0.19%, 육지기준 0.4%, 수권기준 0.11%에 지나지 않는다.

우리가 실제 이용하고 있는 바이오매스 후로우를 에너지단위로 요약하면 우리가 소비하는 최종 바이오매스의 연간소비량은 음식물로 21.3EJ, 원재료로 11.3EJ, 에너지로 55.8EJ, 합계88.4EJ(2.8TW)로 추정된다.

즉, 태양(5,400,000 EJ/년)→지표입사(2,700,000EJ/년)→광합성유효입사(1,350,000 EJ/년)→광합성유효이용(18,100EJ/년, 1.34%)→바이오매스생산량(5,160EJ/년, 2.85%)→순1차생산량(2,580EJ/년, 50%)→간접이용바이오매스(807EJ/년, 31.3%)→간접소비바이오매스(211.5EJ/년, 26.2%)→직접소비바이오매스(88.4EJ/년)로 집계된다.

따라서 바이오매스의 이용실태를 분석해보면 다음과 같은 공식이 성립된다.

$$F = (F/UD) \times (UD/UI) \times (UI/NPP) \times (NPP)$$

F : 바이오매스 직접소비량

UD : 바이오매스 간접소비량(순1차생산량환산)

UI : 바이오매스 간접이용량(순1차생산량환산)

NPP : 순1차생산량

6. 바이오에너지와 타 에너지의 비교

바이오에너지는 토지이용과 밀접한 관계를 갖

고 있는데, 세계적인 토지이용변화를 보면 매년 삼림과 초지는 줄어들고 경작지와 도시면적은 계속 늘어나고 있다.

다만 과학기술의 발달로 단위면적당 곡물생산량과 목재생산량은 다소 늘어나는 추세다.

1980년도까지 FAO가 집계한 자료에 의하면 1850년보다 삼림은 5,053Mha, 초지는 6,788Mha가 줄어든 반면 경작지나 주거지는 1,501Mha나 늘어났다.

바이오에너지 생산을 위해 브라질은 온난한 넓은 국토를 이용, 사탕수수 재배를 국책사업으로 하여 '에탄올' (Ethanol, C₂H₅OH)을 생산해 내는 Pro-alcohol Project를 추진, 1989년도부터는 12,000,000m³/년(0.25EJ/년)을 생산해 브라질 자동차연료소비의 약 20%를 충당한다.

미국과 영국의 경우도 바이오매스의 가스화화 이를 이용하는 복합발전 프로젝트에 의해 에너지

작물 생산을 장려하고 있다.

이에 따라 바이오에너지 이용기술도 눈부시게 발전하여 직접연소방법이나 열화학적분해방법이 개발되었고 미생물에 의한 생화학적 열분해방법까지 개발되어 발전에 실용하고 있다.

다만 아직까지는 비교적 싼값으로 얻어지는 석탄보다 생산비가 다소 높은 것이 흠이지만 멀지 않은 시일 내 경제적인 크린에너지로 각광을 받게 될 것이다.

위 표에서 보듯이 아직까지는 석탄과 핵연료자원이 있기 때문에 당분간 화석연료(석유, 천연가스, 석탄)와 핵연료의 혼용이 에너지 소비를 주도하겠지만 지구환경문제를 고려할 때 미래 에너지는 핵연료와 Methane hydrate, 바이오에너지 등이 주종을 이루게 될 것이다.

우리나라의 경우 1999년도 기준 국내에너지소비에서 바이오에너지가 차지하는 비중은 걸보기로는 1%내외로 나타나지만 실제로는 2~3% 정도로 추계 된다.

에너지자원의 부존이 빈약한 우리나라로서는 에너지의 해외 의존도가 97%나 되기 때문에 더욱 에너지절약과 대체에너지개발이 시급하다.

〈표 1〉 세계 에너지자원별 부존량 (단위 : GTOE)

	확정가체매장량	잠재가체매장량	소 계	추기예상부존량
석 유				
재 래	150	145	295	
비재래	193	332	525	1,900
천연가스				
재 래	141	279	420	
비재래	192	258	450	400
methane hydrate				18,700
석 탄	606	2,794	3,400	3,000
〈소 계〉	1,282	3,808	5,090	24,000
핵 연 료				
경수로이용	57	203	260	150
FR 이용	3,390	12,150	15,540	8,900
〈소 계〉	3,447	12,353	15,800	9,050
합 계	4,729	16,161	20,890	33,050

※ 캠브리지대학신문. 1GTOE=41. 86EJ. 참고
 바이오매스부존량을 열량으로 환산시 570GTOE상당. 우리나라는 발전량을 1차에너지로 환산한 값. FR : Fusion Reactor

〈표 2〉 국내 1차 에너지원별 소비현황 (1999년 기준)

구 분	단 위	물 량	증가율(%)	구성비(%)	비 고
석 유	천Bbl.	712,180	-9.0	53.9	
LNG	천 톤	16,128	24.3	9.0	
무 연 탄	천 톤	4,621	16.9	1.3	
유 연 탄	"	54,320	4.5	20.1	
원 자 력	GWH	99,332	13.8	13.9	
수 력	"	5,935	-15.6	0.8	
기 타	천TOE	1,756	18.4	1.0	
계	천TOE	178,652	9.9	100.0	바이오에너지

자료 : 산업자원부

7. 바이오에너지 개발정책 현황

우리나라가 바이오에너지 개발에 대한 정책을 수립한 것은 1970년대 초부터이나 기술개발자금과 전문인력부족으로 효율적인 개발정책을 수행하지 못하고 Y2K를 맞았다.

1987년 12월에는 '대체에너지개발촉진법'을 제정하였고, 1991년말 기본계획을 수립, 1996년 말에 와서 제2단계 계획이 완료되었다.

1997년 12월에는 대체에너지보급확대를 위해 '대체에너지개발촉진법'을 기술개발위주로 '대체에너지개발 및 이용·보급촉진법'으로 개정하여 태양에너지, 바이오에너지, 폐기물에너지, 소수력, 풍력, 수소에너지, 해양에너지, 지열, 연료전지, 석탄이용 등 10개 분야를 대체에너지원으로 정하여 개발추진 중에 있다.

〈표 3〉 대체에너지분야별 연구비지원실적(1988~1999)
(단위 : 백만원)

분야	과제수	공공	민간	계	구성비(%)
태양열	42	7,300	1,898	9,198	6
태양광	48	11,346	10,247	21,593	14
바이오	70	13,446	7,769	21,215	14
폐기물	29	6,150	10,184	16,334	10
석탄이용	34	11,723	8,827	20,550	13
소수력	3	504	107	611	-
풍력	6	4,659	4,531	9,190	6
연료전지	33	22,405	23,118	45,523	29
해양	2	1,165	150	1,315	1
수소	13	1,904	156	2,060	1
지열	2	690	70	760	1
기타	18	6,934	-	6,934	4
학술진흥	27	750	-	750	1
계	327	88,976	67,057	156,033	100

자료 : 산업자원부

위 표에서 보듯이 대체에너지 개발을 위하여 277여 과제에 겨우 1,560억원을 10년에 걸쳐 정부가 지원한 것으로는 선진국에 비해 형식적이고 미온적인 바이오에너지 개발정책의 현주소다.

8. 바이오에너지의 보급확대방안(결론)

전국적으로 바이오에너지의 보급확대를 위하여 정부의 적극적인 홍보와 개발자금지원이 요망된다.

첫째로 직접적인 태양열이용을 위해 가정용 급탕시설이 전국적으로 500만기이상은 보급되어야 되고, 둘째로 산업체 및 농촌단위의 메탄가스 발생시설을 100만기 이상 보급하여 냉난방과 취사용으로 활용되도록 하여야 하며, 셋째로 도시쓰레기와 폐기물을 소각하여 소각열로 발전할 수 있는 열병합발전소의 지역별확대 정책이 필요하다.

아울러 국내 바이오에너지 기술개발을 위한 노력과 병행하여 선진 해외기술을 적극적으로 도입함으로써 기술의 자립을 조기에 달성할 수 있는 다각적인 방안을 수립하여 추진해야 한다.

우선 국제 다자간 협력을 위하여 기후변화협약 및 그린라운드 논의 등 에너지환경기술의 여건변화에 따라 국제에너지기구의 R&D 공동프로그램에 CADDET(Information Center for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies) 등과 기술정보 교류협력 사업을 강화해야될 것이다.

아울러 국내 부존자원에 대한 정확한 평가분석과 활용연구가 지속적으로 이루어져야 될 것임은 말할 나위 없다.

(원고 접수일 2001. 6. 5)