

바이오에너지를 정의하는 지표들에 대한 고찰

소진영¹ · 김현종² · 이재성³ · 오경석^{3,†}

¹에너지경제연구원, 경기도 의왕시 내순순환로 132

²한국생산기술연구원, 인천광역시 연수구 송도동 7-47

³인하공업전문대학 화공환경과, 인천광역시 남구 인하로 100

(2013년 8월 23일 접수; 2013년 9월 21일 수정; 2013년 9월 21일 채택)

Index Evaluation to Define the Bioenergy as a Renewable Energy Resource

Jin-Young Soh¹ · Hyun-Jong Kim² · Jae-Sung Lee³ · Kyeong-Seok Oh^{3,†}

¹*New and Renewable Energy Division, Korea Energy Economics Institute,
132 Naesonsunhwan-ro, Uiwang-si, Kyeonggi-do 437-713, Republic of Korea*

²*Surface Technology Center, Korea Institute of Industrial Technology,
Incheon 406-840, Republic of Korea*

³*Department of Chemical and Environmental Technology, Inha Technical College,
100 Inha-Ro, Incheon 402-752, Republic of Korea*

(Received August 23, 2013 ; Revised September 21, 2013 ; Accepted September 21, 2013)

Abstract : Bioenergy is classified to one of the renewable energy resources such as solar, wind, hydro and tidal energies. It should be noted that all the renewable energies contribute to the reduction of greenhouse gases emission. In some cases, energy from wastes was also categorized as a renewable energy in our country even though it has only negligible effect on the emission reduction. In this paper, we tried to identify the bioenergy in order to follow the global indices of the renewable energy. The indices evaluated here were whether a resource is renewable, biogenic, biodegradable, combustible and organic. Biogenic and combustible were selected as the indices to identify the bioenergy. It was also suggested that combustible as an index can be exchangeable to organic.

Keywords : renewable energy, bioenergy evaluation index, biogenic, combustible, organic

[†]Corresponding author
(E-mail : kyeongseok.oh@inhatc.ac.kr)

1. 서론

IEA(International Energy Agency)의 재생에너지 특별위원회(Renewable Energy Working Party)에서는 재생에너지를 ‘지속적으로 보충되는 자연 과정을 통해 생산되는 (derived from natural processes that are replenished constantly) 에너지’로 정의하고 있다 [1,2]. 통계 작성을 위해 재생에너지를 분류하면, 수력발전, 지열, 태양광, 태양열, 조력, 파력, 해양, 풍력, 고체 바이오연료, 바이오가스, 액체 바이오연료, 재생가능 도시폐기물로 분류하게 된다. 여기서, 고체 바이오연료, 바이오가스, 액체 바이오연료, 재생가능 도시폐기물은 묶어서 바이오연료 및 재생가능 폐기물로 재분류한다 [3]. 표1에 재생에너지와 비재생에너지에 대한 분류를 나타내었다.

그러나, 산업폐기물, 비재생 도시폐기물, 폐열, 지열 히트펌프로부터 생산된 순열량, 양수발전은 재생에너지에 포함되지 않는다. 우리나라를 포함한 일부 OECD 국가에서는 재생에너지에 포함되지 않는 산업폐기물과 비재생 도시폐기물에 대해서도 재생에너지원에 포함시키기도 하지만 많은 국가들은 생분해성(biodegradable) 특성을 갖지 않는 경우 재생에너지에 포함시키지 않는다 [4,5].

바이오에너지는 다른 재생에너지와 다르게 수송용 연료로 사용이 가능하다. 바이오디젤과 같이 경유를 대체할 수 있는 연료, 에탄올 같이 휘발유를 대체할 수 있는 연료, 정제되어 CNG (compressed natural gas)의 형태로 이용 가능한 바이오가스 등을 예로 들 수 있다. 또한 그림 1에서 보듯이, 바이오매스 기반의 바이오공정은 에너지뿐만 아니라 기존 석유화학산업의 영역이었던 연료와 화학제품까지 바이오 기원 제품으로 대체할 수 있는 잠재력이 있다 [4-6].

우리나라에서는 태양에 의한 에너지, 풍력, 조력 등 흔히 말하는 자연에너지를 이용한 에너지와 석탄가스화 같은 신기술이 추가된 에너지 기술을 포함하여 신재생에너지라고 하고 있다. 그런데, 현재 재생에너지 분류체계에서는 바이오에너지의 영역이 불분명한 경우가 있어, 재생에너지로서 바이오에너지의 영역을 어디까지 정하는 것이 바람직한가에 대해서 현시점에서 다시 한 번 점검할 필요성이 대두되고 있다. 본 연구에서는 온실가스 감축 효과를 주된 대전제로 재생에너지로 분류할 수 있는 바이오에너지원을 정의함에 있어

지표로 활용할 수 있는 사항에 대해서 평가를 시도하였다. 지표에 사용되는 항목으로는 온실가스 감축 효과, 재생가능성, 생물기원과 생분해성, 가연성 물질과 탄소기인 물질을 다루었다.

2. 재생에너지 관점의 바이오에너지

2.1. 재생에너지를 정의하는 지속가능성

바이오매스로 대표되는 바이오에너지의 범위를 이해하기 위해서는 생물학적인 개념뿐만 아니라, 원론적으로 재생에너지에 대한 이해가 중요하다 [1,2]. 재생에너지에 대한 이해를 통해서 보다 단순화된 바이오에너지의 분류가 이루어질 수 있다고 여겨진다. 재생에너지란 무엇인가를 이해하기 위해서는 에너지에 대한 개념이 필요하다. 에너지는 여러 가지 형태 즉, 열에너지, 화학에너지, 전기에너지, 운동에너지 등으로 존재하며, 또한 형태를 바꿀 수 있다. 먼저, 열역학 1, 2법칙으로부터 재생에너지에 대하여 설명해 보도록 하겠다. 열역학 법칙들은 어떤 계(system)에서의 에너지 흐름과 연관되며 간략하게 아래에 나타내었다.

열역학 제1법칙: 에너지보존법칙으로, 다르게 표현하면, ‘계’의 총 에너지는 언제나 일정하다.

열역학 제2법칙: 에너지의 방향성을 제시해주는 법칙으로서 에너지 사용으로 인하여 엔트로피가 증가한다. 다르게 접근하면, 에너지의 흐름은 인간의 입장에서 사용 가능한 에너지에서 사용 불가능하지 않은 에너지로 이동하고 있다고 할 수 있다.

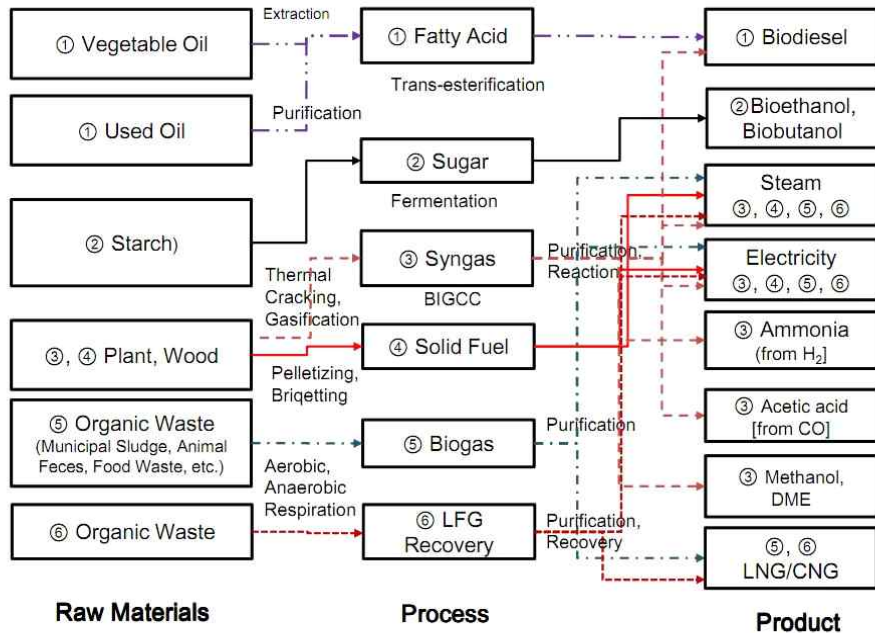
위의 두 법칙의 적용을 태양계에 적용하여 설명한다면, 태양계내의 에너지는 위의 열역학 제1, 2법칙을 따르게 된다. 즉, 태양계내의 에너지는 새로 창조되지도 않을 것이며, 에너지는 계속 사용되어 가용하기 어려운 에너지의 형태로 전환되어 궁극적으로는 가용에너지가 없어지게 될 것이다. IEA에서는 재생에너지를 ‘지속적으로 보충되는 자연과정을 통해 생산되는 에너지’라고 정의하고 있다 [1,6]. 재생에너지에는 태양으로부터 비롯되는 에너지(태양광, 태양열, 풍력, 바이오에너지), 달의 중력 작용에 의해 발생하는 에너지(조력), 그리고 지구 중심부의 열에 의한 에너지(지열)가 있다. 즉, 재생가능 에너지의 관점에서 보면 ‘계’는 우리가 살고 있는 지구 지표면의 중력이 미치는 영역인 ‘지구계’로 국한될 수 있으며, 태양기원 및 중력에 의한 에너지는 지구계가 아

닌 외부(surrounding)로부터 에너지가 유입되어 들어온 것으로 볼 수 있다. 결과적으로 지구계의 총 엔트로피의 감소를 가져온다. 따라서, 지구계의 입장에서 볼 때에 가용한 에너지 고갈과는 반대로 새로운 에너지가 지구로 유입된 것이라 할 수 있다. 또한 그 양이 앞으로도 지속적으로 들어오기에 무한한 에너지자원이라고 할 수 있다. 따라서, 재생에너지라는 것은 현재 지구계에서 사용하고 있는 화석연료로 대표되는 에너지 자원의 고갈을 극복하기 위한 개념에 바탕을 두고 있다고 할 수 있다.

2.2. 바이오에너지와 폐기물에너지간 분류기준의 불명확성

바이오에너지는 폐기물에너지와 겹침에 있으므로 바이오에너지의 기준 및 범위 산정에 있어 폐기물에너지와 분리하여 논의하기가 어려우며, 특히 이 두 가지 에너지원간 분류 기준의 차원에서의 접근이 필요하다. 현행법 체계는 일부 생물기원 물질을 바이오에너지와 폐기물에너지 중 어느

것으로 분류할지 구분하는데 명확한 지표를 제시하지 못하고 있다 [4,5]. 특히, 생물기원 폐기물은 ‘생물유기체’인 동시에 법적으로 폐기물로 분류되어 있고, 현행법의 기준과 범위에서 이를 구분할 수 있는 명확한 지표나 방법이 명시되지 않아 앞으로도 신규에너지원의 분류에 어려움이 있다. 어떤 경우에는 생물기원에너지원이지만 폐기물로 분류되기도 한다. 예를 들어, 임지잔재물, 폐목재, 가축분뇨, 매립지의 유기성폐기물 등은 폐기물관리법의 폐기물로 분류되어 있다 [4,5]. 물론, 바이오에너지와 폐기물에너지의 기준과 범위를 평가할 수 있는 평가지표들이 여러 가지 있다. 신재생에너지법에는 ‘생물유기체’와 ‘재생가능’, ‘바이오매스’, 그리고 ‘폐기물’이라는 키워드가 기준과 범위를 평가할 수 있는 근거가 되고 있다. 그러나, 평가지표인 생물유기체와 바이오매스는 바이오에너지와 연관된 키워드이며, 폐기물은 폐기물에너지와 연관된 용어이고, 재생가능은 모든 신재생에너지원에 적용되는 지표다. 경우에 따라서는, 바이오에너지와 연관된 지표와 폐기물에너지와



① : Biodiesel, ② : Bioalcohols, ③ : BIGCC (Biomass Integrated Gasification and Combined Cycle), ④ : Solid Fuel, ⑤ : Biogas, ⑥ : LFG(Landfill gas) Recovery

Fig. 1. Overall bioenergy application from raw materials to final products.

연관된 지표가 상호배타적인 개념이 아니라 교집합이 되는 영역을 지니고 있어 합리적인 분류를 위한 지표라 할 수 없다. 또한, 이를 통해 범위의 평가가 가능한지에 대해서도 전문가 간의 의견이 일치되지 않고 있다 [4-6]. 분류기준의 불명확성은 RPS (renewable portfolio standard, 신재생에너지 공급의무화 제도를 말하며 500MW 이상의 발전설비용량을 보유한 발전사업자에게 신재생에너지 발전량을 제외한 발전량의 일정 비중을 신재생에너지로 공급하도록 의무화한 제도로, 그 비중은 2012년 2%에서 매년 0.5%씩 상향시켜 2016년에 4%까지 늘리고, 이후 매년 1%씩 상향시켜 10%까지 늘리도록 계획되어 있다.) 등 국가 제도 운영상 높은 행정비용 발생 및 대국민 서비스의 혼란이 예상되기도 한다. 바이오·폐기물에너지 분야는 응용되는 원료가 다양하며 급격한 기술 개발로 인해 향후에도 다양하게 신규에너지원이 개발이 예상되는데 반해, RPS의 가중치 적용에는 사례별로 검토하여 유권해석을 해야 하는 경우가 많아 높은 행정비용과 많은 시간의 소요가 발생할 것으로 추정된다.

2.3. 비생물기원 물질의 취급방향

국제에너지기구와 타국가들의 경우 재생에너지의 범주가 친환경성과 재생가능성에 초점이 맞추어져 있고, 재생에너지에 대한 정의를 ‘자연현상에서 발생하는 에너지로서 지속적으로 보충이 가능한 것’이라고 규정하고 있으며[1,5], 생물기원이나 생분해성 등과 같은 지표를 같이 명시하고 있어 원칙적으로 비생물기원의 물질은 재생에너지의 범주에 포함이 되지 않는다. 특이하게도, 우리나라는 신재생에너지의 법적요건 중 하나인 ‘재생가능성’에서 ‘재생’이라는 용어에 대한 법의 취지가 ‘재활용(recycling)’이 아니라 ‘재생(renewable 혹은 replenish)’임에도 불구하고, 사전적의미로 재생이란 단어의 뜻인 ‘낡거나 못쓰게 된 물건을 가공하여 다시 쓰게 함’이라는 ‘재활용’의 의미를 가지고 있어 혼동의 여지가 있다. 특히 폐기물에너지의 경우 생물기원이나 생분해성과 같은 추가적인 지표가 명시되어 있지 않아 비생물기원 물질을 폐기물에너지 범주에 포함하는 경우가 있게 된다. 하지만, 국제적으로 재생에너지의 보급과 이용의 주목적이 온실가스감축을 통한 기후변화 대응이며, 우리나라 신재생에너지법 제1조(목적)에서도 온실가스배출의 감소를 특별히 강조하고 있는 점을 감안하여 각각의 신재

생에너지원에 대한 정의를 온실가스배출 저감 효과 측면에서 재검토할 필요가 있다. 동법 제1조(목적)은 ‘이 법은 신에너지 및 재생에너지의 기술개발 및 이용·보급 촉진과 신에너지 및 재생에너지 산업의 활성화를 통하여 에너지를 다양화하고, 에너지의 안정적인 공급, 에너지 구조의 환경친화적 전환 및 온실가스배출의 감소를 추진함으로써 환경의 보전, 국가 경제의 건전하고 지속적인 발전 및 국민 복지의 증진에 이바지함을 목적으로 함’으로 되어 있다. 특별한 경우를 제외하고는, 비생물기원 물질을 에너지로 활용할 경우 온실가스 저감효과가 거의 없기 때문에 신재생에너지의 범주에 이를 포함 할 경우 법의 목적에 위배되는 상황이 발생할 것으로 예상된다. 만약, 현행의 법체계에서 온실가스 감축효과가 없는 비생물기원 물질을 신재생에너지의 범주 안에 포함하고자 한다면 동법의 목적을 개정해야 할 것으로 보인다. 그러함에도 불구하고, 우리나라는 폐기물에너지 중 비생물기원 부분이 차지하는 비중이 높기 때문에 현재의 상태로 이를 폐기물에너지에서 제외할지 여부는 정책의 연착륙과 정책의 연속성 차원에서 고려가 또한 필요할 것이다. 결과적으로 현시점에서는, 단기적으로는 폐기물의 생물기원과 비생물기원의 비중에 대한 기준을 명확히 정립하고, 중장기적으로는 비생물기원 폐기물은 처리와 재활용의 개념, 생물기원 폐기물은 재생에너지의 개념으로 구분하여 폐기물에너지를 바이오에너지에 통합하는 방안이 고려될 수 있다고 사료된다.

3. 바이오에너지의 평가 지표

3.1. 재생가능성

재생가능성은 신재생에너지, 특히 재생에너지라면 모두 만족해야 하는 기준이기 때문에 바이오에너지만 국한되지 않고 모든 신재생에너지원에 적용될 수 있도록 다소 보편적인 정의가 필요하다. 우리나라에서는 재생가능성의 의미가 상황에 따라 몇 가지 다른 관점에서 해석되어 이용되고 있다. 재생에너지 측면에서 재생가능성에 대한 국제적으로 가장 보편적인 관점은 자연상태에 일정한 속도로 에너지를 다시 채울 수 있는 (replenish) 가능성, 즉 자연상태에서의 보충능력 (ability to replenish)으로 보는 견해이다 [6,7]. IEA에서도 재생에너지를 ‘소비되는 것 보다 더

빠른 속도로 지속적으로 다시 채워지는 (replenished) 자연적인 과정을 통해 생산되는 에너지'로 정의함으로써 자연상태에서의 보충 능력에 초점을 두고 있다 [6-8]. 이러한 보충성이 있는 자원을 이용하기 위해서는 화석연료가 투입되기도 하는데, 기술 관점에서는 보충되는 에너지를 이용하기 위해서 투입되는 에너지보다 생산되는 에너지가 많아야, 즉 에너지 수지가 타당성을 갖추고 있어야 재생에너지로서 가치가 있다는 점도 고려의 대상이 된다고 하겠다. 우리나라에서는 재생가능성을 온실가스, 특히 CO₂순환(재생) 가능성의 측면에서 접근함으로써 대기 중의 온실가스를 실질적으로 감축하는 재생에너지의 목적을 강조하는 해석이 존재한다. 이러한 접근은 탄소의 순환기능이 있는 바이오에너지와 폐기물에너지 분야에서 주로 시도되고 있으며, 정량적 지표로는 앞에서 정리한 '신재생에너지의 온실가스 감축 효과'가 있다 [7,8]. 에너지를 소비했다는 것은 CO₂를 발생시켰다는 것을 의미하기 때문에 온실가스 감축의 관점은 에너지수지의 관점과 어느 정도 일맥상통하지만, 온실가스 감축은 에너지뿐만 아니라 그 외에 투입 산출되는 모든 물질과 부산물 및 폐기물까지 모두 고려하기 때문에 좀 더 포괄

적인 개념이라고 할 수 있다. 폐기물 관리 패러다임의 측면에서는 재생가능성을 재활용(recycle)의 관점으로 해석하는 경우도 있다. 우리나라 폐기물 관리의 패러다임에 따르면, 발생억제(reduce) → 재이용(reuse) → 재활용(recycle) → 에너지회수(recovery) → 안전처리(landfill)의 순서로 폐기물 활용을 합리화하는 것으로 권장하고 있는데, 이러한 패러다임의 연장선상에서 에너지 생산을 재활용의 일부로 보고 있다 [7,8]. 이상 살펴 본 바와 같이, 우리나라에서는 재생가능성이라는 용어가 분야별로 조금 다른 의미로 사용되고 있으며, 특히 폐기물의 일부를 재생에너지로 활용함에 따라 재생에너지 측면의 해석과 폐기물 처리 패러다임 측면의 해석이 혼재되어 혼동을 야기하고 있다. 하지만, 재생에너지의 일부로서 바이오에너지의 범위를 설정하기 위해서는 재생에너지의 목적과 특성을 고려한 해석에 초점을 둘 필요가 있으며, 이 때문에 재생가능성에는 자연상태에서의 보충가능성과 그 보충의 속도를 나타내는 재생주기의 개념이 포함되어 있어야 하겠다. CO₂의 재생 개념은 재생가능성의 개념에서 분리하여 재생에너지 보급 목적인 온실가스 감축의 개념으로 별도로 취급하여 혼동을 최소화 할

Table 1. IEA classification of renewable and non-renewable energy resources

| Renewable and Non-renewable Energy | | Application | | |
|------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|----------------------------|------|
| Renewable Energy | Hydro | 1MW, 1-10 MW, 10+ MW | | |
| | Geothermal | Electricity, Direct Heat | | |
| | Solar | Photovoltaic | | |
| | | Solar Thermal | | |
| | Tide/Wave, Ocean | Electricity | | |
| | Wind | Electricity | | |
| | Biofuel and Renewable Waste | Municipal Waste | Municipal Waste, renewable | |
| | | | Wood and Solid | Wood |
| | | Wood Waste | | |
| | | Other Solid Waste | | |
| | | Biogases | Charcoal | |
| | | | Landfill Gas; LFG | |
| | | | Sewage Sludge Gas | |
| Other Biogas | | | | |
| Liquid Biofuels | | Biogasoline | | |
| | | Biodiesels | | |
| | Other Liquid Biofuels | | | |
| Non-Renewable Energy | Non-Renewable Waste | Industrial Waste | | |
| | | Municipal Waste, Non-renewable | | |

필요가 있다. 바이오매스는 자연상태에서 태양에너지의 흐름(flux)에 의해서 보충되는 에너지를 저장하는 역할을 하며, 재생주기는 자연상태에서 에너지를 저장하는데 소요되는 기간이라고 할 수 있다. 화석에너지는 에너지저장의 관점에서 볼 때 재생주기가 '상당히' 길며, 인간의 사용에 의한 고갈과 비교하여 보충되는 되는 비율이 '0'이거나 거의 '0'에 가깝다고 할 수 있다. 이를 역으로 재생가능성에 적용해 보면 바이오에너지는 자연 상태에서 보충되는 속도가 인간의 사용에 의해 고갈되는 속도와 같거나 아니면 이보다 빨라야 함을 알 수 있으며, 실제로 IEA는 재생주기를 '소비되는 것 보다 더 빠른 속도'로 정하여 다소 강한 기준을 적용하고 있다. 우리나라에서도 재생주기에 대해서 많은 논의가 있었으며, 한 세대를 기준으로 하는 30년이 적합하다는 의견과 한세대를 기준으로 하는 100년이 적합하다는 의견 등 두 가지 견해가 우세하였으나 아직 전문가들간 합의점에는 이르지 못하였다 [7-9]. 하지만, 바이오매스가 다양한 만큼 그 특성도 다양하기 때문에 바이오에너지의 재생주기를 단일의 기간으로 제시하는 것은 큰 의미가 없으며, IEA와 같이 소비되는 속도와 보충되는 속도를 기준으로 단순화하여 제시하는 것이 합리적인 것으로 평가된다. 다만, 바이오매스 자원 잠재량이 그리 높지 않은 우리나라의 상황을 고려할 때, 보급과 이용을 확대하기 위해서는 다소 완화된 기준의 적용이 필요할 것으로 판단되며, 따라서 재생주기를 '소비(또는 고갈)되는 속도보다 늦지 않게 보충' 되는 것으로 정하는 것이 타당할 것으로 보인다 [8,9].

3.2. 생물기원과 생분해성

생물기원(biogenic) 또는 생물기인 탄소는 식물이 태양에너지를 이용하여 광합성과정을 통해 합성한 유기물질을 일컫는다. 지구계의 관점에서 태양에너지는 외부에서 에너지가 유입되는 것이며, 식물은 광합성이라는 과정을 통해서 전환된 에너지인 유기물질을 합성하여 태양에너지를 저장한다. 식물은 광합성을 통해서 글리세르알데히드-3-인산(glyceraldehyde-3-phosphate)이라고 하는 물질을 합성하며, 글리세르알데히드-3-인산이라는 물질은 핵심유도체로서, 분자크기가 더 큰 지질, 당류, 그리고 단백질까지 만들 수 있다 [10]. 식물과 비교하여, 동물은 에너지에서 종속적이며, 식물이나 또 다른 동물의 섭취를 통해 에너지를 얻는다. 식물은 필요에 의해 유기물질을 만들지만, 인간은 여기서 유기물질을 통해서 에너지를 얻을 수 있는 것이다. 바이오매스란, 살아있거나 최근까지 살아있었던 동식물과 미생물들을 말하며, 재생에너지의 관점에서 바이오매스는 동식물, 미생물을 구성하는 물질 중에서 당연히 유기물질만이 해당된다 [1,2]. 반면, 인간에 의해 생산된, 즉 인간기인(anthropogenic) 탄소는 플라스틱, 합성수지등과 같이, 화석에너지나 그 밖의 생물기원이 아닌 물질로부터 생산된 탄소를 의미한다. 바이오에너지를 구분하는 지표로 거론되고 있는 생물기원성(biogenic)과 생분해성(biodegradability) 간 관계를 이해하고, 바이오에너지의 기준으로서 어느 것이 더 적합한지는 알아보기 위해 이 지표들을 바이오 플라스틱(bio-plastic)에 적용하면 아래와 같다. 바이오 플라스틱에서 '바이오'는 미생물이나 효소를 의미하기도하며, 바이

Table 2. Evaluation of the indices if selected plastic materials are biogenic and/or biodegradable based on the illustration shown in the reference [11]

| Plastics | Index | |
|---------------------------|----------|---------------|
| | Biogenic | Biodegradable |
| Polyethylene (PE) | O | X |
| Nylon 11 | O | X |
| Acetyl cellulose | O | X |
| Polyhydroxybutyrate (PHB) | O | O |
| Poly lactide (PLA) | O | O |
| Starch blends | O | O |
| Polycaprolactone | X | O |
| Polybutylene succinate | X | O |

오매스 또는 재생가능자원을 의미하기도 한다 [11]. 전자의 경우 미생물이나 효소에 의해 분해가 되는, 즉 생분해성이 있는 플라스틱을 일컫으며, 플라스틱의 특성 중 하나를 나타낸다. 후자의 경우는 생물기원, 즉 바이오매스나 재생 가능자원으로 만들어진 플라스틱이라는 뜻으로 원료의 종류가 강조된다. 바이오 플라스틱은 이 두 가지 의미를 모두 포함하여 다소 혼동되게 사용되고 있다. 표2에 선택된 플라스틱에 대해서 생분해성과 생물기원 중 해당되는 사항에 대해서 구분하여 나타내었다. 폴리카프로락톤(polycaprolactone, PCL)과 폴리부틸렌호박산염(polybutylene succinate, PBS)은 석유(petroleum) 기반 플라스틱이지만 미생물에 의해 분해될 수 있다. 두 가지 바이오 플라스틱의 교집합에 해당하는 폴리하이드록시부티레이트(polyhydroxybutyrate, PHB), 폴리락타이드(poly lactide, PLA), 전분혼합물(starch blends) 등은 바이오매스 또는 재생가능한 자원에서 기원한 플라스틱이며 생분해성이다. 반면, 폴리에틸렌(polyethylene, PE), 나일론 11(nylon 11, NY11)도 바이오매스 또는 재생가능한 자원에서 기원한 플라스틱임에도 불구하고 생분해성이 아니며, 아세틸셀룰로스(acetyl cellulose, AcC)는 아세틸화 정도가 높은 경우 생분해성이 아니다. 즉, 생물기원성이 생분해성을 의미하지 않으며, 고분자-분해성미생물(polymer-degrading microorganisms)의 출현으로 생분해성이 더 이상 생물기원성을 의미하지 않는다고 할 수 있다. 생분해성을 기준으로 할 경우 인간기인(석유계) 플라스틱이 포함될 가능성이 있기 때문에 바이오에너지의 범위를 설정하는 기준으로 적합하지 않은 것으로 평가된다. 즉, 석유계 플라스틱이 생분해성이 있다고 바이오에너지로 분류할 수는 없다. 생분해를 통해 합성가스를 생산할 수는 있지만, 그 원료인 석유가 재생에너지원이 아니기 때문이다. 생분해성과 생물기원성 두 기준을 동시에 적용할 경우는 에너지로 활용될 수 있는 바이오매스 기원인 플라스틱이 생분해성이 아니라는 이유로 바이오에너지에서 제외 될 가능성이 있기 때문에 이 역시 적합하지 않다. 생물기원성을 기준으로 할 경우는 생분해성이 있는 바이오매스와 생분해성은 없지만 에너지로 활용될 수 있는 바이오매스를 모두 포함하는 장점이 있는 반면 무기질 등 에너지로서 활용될 수 없는 부분까지 포함할 여지가 있다. 이러한 연유로, 생물기원성 기준과 더불어 그 중 에너지함량 부분만을

구별하여 포함시킬 수 있는 기준을 병행한다면 바이오에너지의 경계를 명확히 할 수 있을 것으로 평가되며, 다음은 그 기준 중 하나인 가연성 물질에 대해 알아 보고자 한다.

3.3. 가연성 물질과 탄소기인 물질

가연성 물질이란 산소가 공급되는 환경에서 연소되는 물질을 말하며, 연소를 통해서 물, 이산화탄소, 산화물 등을 결과물로 내놓는 물질을 말한다. 에너지의 측면에서 정의하는 바이오매스는 현 시점에서는 당연히 가연성 물질이어야 한다. 연소를 통해서 열량을 얻고 이를 열에너지, 전기에너지 또는 수송용 에너지로 이용된다는 점에서 가연성은 바이오매스가 에너지로서 갖추어야 할 필요 조건이라 할 수 있다. 재생에너지의 관점에서 탄소기인의 물질과 가연성물질은 동일한 개념으로 볼 수 있다. 바이오매스가 가연성이라는 것은 곧 탄소기인이라 말할 수 있기 때문이다. 바꾸어 정의한다고 하더라도, 바이오매스 중 산소와 화학적 반응을 통해 연소되는 부분은 탄소기인 물질이기 때문에 탄소기인물질과 가연성물질은 동일하다고 할 수 있다. 전술한 바와 같이 생물기원이라는 기준과 탄소기인(또는 가연성) 기준을 병행하면 생분해성 바이오매스와 생분해성은 아니지만 가연성이 있는 바이오매스는 범위에 포함하고 에너지 함량이 없는 부분은 제외할 수 있는 변별력이 있어 바이오에너지의 범위를 적절히 설정하기에 충분한 기준이 될 수 있다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 재생 가능한 바이오에너지 범위를 평가하는 구체적인 지표를 검토하였다. 우선, 바이오에너지를 평가하는 일반적인 지표로 신재생에너지법에 명시된 목적인 온실가스 감축 효과가 포함되어야 한다. 따라서, 온실가스 감축효과라는 대전제를 바탕으로 바이오에너지를 정의하는 지표로서 재생가능성, 생물기원과 생분해성, 가연성과 탄소기인에 대해서 순차적으로 평가하였다. 생물기원은 지표로 적합하다고 판단되지만 생분해성에 대해서는 부적합하다고 판단되었다. 만약 생분해성을 지표에 포함할 경우 생분해성은 없지만 가연성이 있는 바이오매스를 바이오에너지의 범위에서 제외할 가능성이 있기 때문이다. 또한, 생물기원 물질 중 무기질 등 에너지 함량이 없는

부분을 분리해 내기 위해 탄소기인 기준 또는 이와 같은 성격인 가연성 기준의 병행이 필요하다. 바이오매스는 유기질과 무기질을 동시에 포함하고 있는 경우가 많으며, 에너지의 관점에서는 가연성이 있는 유기성 물질, 즉 탄소기인의 물질만을 고려하고 있기 때문에 가연성 또는 탄소기인은 바이오에너지를 결정하는 지표로 포함되어야만 된다. 여기서 소개된 바이오에너지의 두 개 평가지표인 생물기원과 가연성 혹은 탄소기인은 액체, 기체 및 고체 바이오에너지의 모든 분야를 포괄하는 지표가 될 것으로 기대한다. 그렇지만, 본 연구에서는 각 부문별로 그 특성을 고려하여 지표를 탄력적으로 적용할 필요가 있다. 예를 들어, 순도가 높게 정제된 수송용 바이오에너지의 경우, 이미 가연성을 전제로 하고 있어 가연성을 지표의 적용하는 것은 의미가 없을 수 있다. 또한, 향후에는 바이오산업의 발전을 통해서 그 동안 생분해 되지 않는 플라스틱 재료의 분해가 가능해질 경우 그 범위가 점차적으로 늘어날 것으로 기대한다. 그렇지만, 신재생에너지의 한 분야로 앞으로 점차 비중이 늘어날 것으로 기대되는 바이오에너지에 대한 사용을 국제적 기준에 부합하는 지표에 의해 정의하는 것이 중요하다고 판단된다.

감사의 글

본 논문은 '바이오에너지 기준 및 범위 설정에 관한 연구' 보고서의 원고 일부를 발췌하여 작성하였으며, 이를 허락해 주신 블루이코노미 전략연구원의 김진오 원장님께 감사드린다.

REFERENCES

1. <http://www.iea.org/aboutus/faqs/renewableenergy/>
2. <http://www.eia.gov/renewable/>
3. IEA, "IEA Statistics: Renewable Information 2012," IEA (2012)
4. Soh, J. Y., "Industrial Development Strategy in Bioenergy and Waste-to-Energy," Korea Energy Economics Institute (2012, Korean)
5. Sung, H. J. "Current Status of Bio/Waste Refinery and Consideration for its Demonstration Plant," Proceedings in Issue Seminar of Korean Energy Economics Institute (2012, Korean)
6. Korea Energy Economics Institute, "Study on Development of the 3rd Basic Plan for R&D, Use and Deployment of New and Renewable Energy," Korea Energy Economics Institute (2012, Korean)
7. Korea Energy Economics Institute, "Realignment Measures for Statistics and Industrial Classification System for New and Renewable Energy," Korean Energy Economics Institute (2011, Korean)
8. Soh, J. Y., "Life Cycle Assessment of Bioenergy to Evaluate its Sustainability: Focused on Biogas," Korea Energy Economics Institute (2012, Korean)
9. Kim, J.G. "Current Status of Domestic and Global Bioenergy Deployment, Sustainability Criteria, and Technology R&D," K-Petro (2012, Korean)
10. Enger, E.D., Ross, F.C., and Bailey, D.B., Concepts in Biology, 14th ed., McGraw-Hill Companies (2013).
11. Tokiwa, Y., Calabia, B.P., Ugwu, C.U. and Aiba, S., "Biodegradability of Plastics," *Int. J. Mol. Sci.*, 10, 3722 (2009)