

바이오매스를 이용한 신/재생 에너지 개발

민태진, 노선아, 윤진한, 김우현 | 한국기계연구원

1. 서 론

에너지 소비대국인 미국은 올해 초 미대통령의 교두연설^[1]에서 확인된 바와 같이 2017년까지 재생/대체에너지로 350억 갤런 상당의 에너지 소비를 의무화시켰는데 이는 2012년 목표치의 다섯배에 해당하는 수치로 이로 인해 미국내의 석유 소비량을 지금보다 15%를 삭감할 계획이다. 여기에 덧붙여서 효율을 높임으로서 현재 석유 소비량의 5%를 추가로 감소시키며 향후 10년 이내에 자동차에서 배출되는 CO₂ 배출성장을 0으로 억제하는 환경적인 문제도 포함되어 있다.

높아지는 석유 및 천연가스 가격으로 인해 에너지원의 다양화에 대한 연구가 필요한 시점이며 각국에서 막대한 기초연구 및 실용화연구가 다양한 에너지원을 대상으로 이루어지고 있다. 같은 화석연료이면서도 자원의 편중성이 비교적 덜한 석탄을 시초로, 현재까지는 폐기물이라고 간주되어 매립 또는 소각 등의 형태로 버려진 미사용 고체물질을 에너지원화 하는 연구도 다양하게 시도되고 있다. 에너지 문제뿐 아니라 에너지의 대량소비로 인한 환경 문제도 심각성이 크게 대두되고 있는 실정이다. 환경적인 측면으로는 에너지 소비로 인한 환경파괴 뿐 아니라 그에 기인하는 대량소비 활동으로 인한 폐기물처리 문제 또한 큰 이슈가 되고 있다.

위에서 서술한 바와 같이 최근 폐기물에 대한 관점이 단순처리에서 환경·에너지 문제에 대한 관점으로 옮겨가고 있는 것이다. 청정환경 확보에 주안점을 갖고 진행되어온 폐기물처리의 개념이 이제는 에너지원으로 인식이 전환되고 있으며 청정환경의 확보와 안정적 폐기물처리 기반은 공정상 당연히 얻어지는 부가적 이익으로 바뀌어가고 있다. 적절한 처리방법의 부재로 인하여 그동안 매립 또는 방치되어 오던 난분해성 폐기물을 안정적으로 처리하는 기술을 확보함으로써 폐기물의 에너지화에 대한 부정적 인식으로 부터 탈피시키고 난분해성 폐기물이 포함된 대규모 폐기물에너지를 청정자원화 할 수 있는 기반기술의 확립 및 고부가 수소가스화로 변환으로 향후 다양한 에너지원으로 활용할 수 있는 핵심기술의 확보가 중요하다. 에너지 활용성 측면에서 볼 때, 폐기물이나 석탄은 가스나 액상에 비해 열적 측면이나 이용성이 떨어지는 면이 있다. 그러나 최소 단위, 즉, 기준 화학성분 형태의 물질로 분리하면 에너지 및 자원 활용성 측면 그리고 환경적 측면에서 타 에너지원과 동일한 위치를 가질 수 있으며 이를 위한 기반기술 확립은 매우 중요하다.

본고에서는 폐기물 등 현재까지는 버려져왔던 미활용 고체물질을 중심으로 한 재생에너지 개발기술에 대해 간략히 살펴보고자 한다.

2. 가스화 관련 연구의 기본 흐름

그림 1은 지금까지 활용되지 않았던 고체물질, 특히 바이오매스에 대한 가스화, 유화 등의 에너지 재활용 뿐 아니라 물질 재활용에 대한 연구의 전반적인 흐름을 나타낸 그림이다. 그림 1에서 굵은 선으로 나타낸 것은 연구성과가 나타나고 있는 것들이며 가는 실선이 현재 많은 연구가 이루어지고 있는 분야이며 점선은 향후 연구가 이루어지리라 예상하는 방향이다.

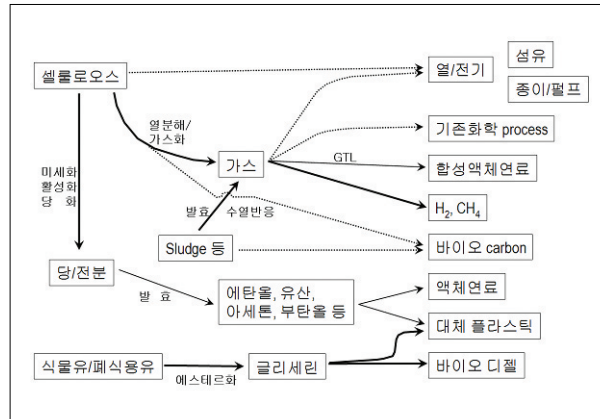


그림 1. 미활용 고체시료로부터의 에너지/물질 recycle 흐름도

바이오매스(Biomass)는 태양에너지를 받은 식물과 미생물의 광합성에 의해 생성되는 식물체, 균체와 이를 먹고 살아가는 동물체를 포함하는 생물 유기체를 일컫는 총칭으로 곡물류를 포함한 전분질계 자원과 초본, 임목, 볏짚, 왕겨와 같은 농수산물을 포함하는 셀룰로오스계 자원, 사탕수수과 같은 당질계 자원 및 가축의 분뇨, 사체, 미생물 균체를 포함하는 단백질계 자원을 모두 일컫는다. 또한 이들 자원에서 파생되는 종이, 음식찌꺼기 등의 유기성 폐기물까지 포함하는 매우 방대한 대상에 대한 총칭^[2]이다.

그림 1에 도시한 바와 같이 셀룰로오스계 자원이 분해하기가 가장 어려운데 이는 주로 셀룰로오스계 자원을 먹이로 하는 초식동물이 되새김질을 하며 위장의 개수도 여러개인 점을 보아도 충분히 이해가 될 것이다. 현재 가장 분해가 어려운 셀룰로오스계 자원의 에너지화, 대체물질화에 대한 연구가 시도되고 있는데 이는 다른 전분질계 및 당질계 자원은 식용작물이 되며 분해가 용이한 까닭에 관련 기술이 확립되어 있는 데 반해 셀룰로오스계는 식용작물이 아니며 분해가 어렵기 때문이다.

바이오매스로 생산한 재생에너지를 바이오에너지라고 부르는데 이는 화석연료와는 달리 자원이 풍부하며 흔히 carbon neutral이라고 불리는 점에서 환경 친화적인 시스템으로 인식되고 있지만, 자원이 산재해 있어 수집 및 이송이 번거롭고 자원의 다양성으로 거기에 맞는 시스템이 다르다는 점과 이에 따른 설비투자 등에서 많은 단점이 있는 것도 사실이다. 또한 유기성 폐기물까지 범위를 확장시킬 경우 대부분 함수율이 커서 이용시 상당한 제약이 따르게 된다.

바이오에너지의 활용에 대한 연구는 표1에 도시한 것과 같이 열적전환 뿐 아니라 화학적 처리와 생물학적 처리

표 1. 바이오에너지 기술의 분류

대분류	중분류	내용
바이오 액체연료 생산기술	연료용 바이오 에탄올 생산기술	당질계, 전분질계, 셀룰로오스계
	바이오디젤 생산기술	바이오디젤 전환 및 엔진적용 기술
	바이오매스 액화기술 (열적전환)	바이오매스 액화, 연소, 엔진 이용기술
바이오 액체연료 생산기술	혐기소화에 의한 메탄가스화 기술	유기성 폐수의 메탄가스화 기술 및 매립지 가스 이용 기술 (LFG; LnadFill Gas)
	바이오매스 가스화 기술 (열적전환)	바이오매스 열분해, 가스화, 가스화발전 기술
	바이오 수소 생산기술	생물학적 바이오 수소 생산기술
바이오 액체연료 생산기술	에너지 작물 기술	에너지 작물 재배, 육종, 수집, 운반, 가공 기술
	생물학적 CO ₂ 고정화 기술	바이오매스 재배, 산림녹화, 미세조류 배양기술
	바이오 고형연료 생산, 이용기술	바이오 고형연료 생산 및 이용기술 (왕겨탄, 칩, RDF(폐기물연료) 등)

를 병용할 때에 더욱 활용도가 높아지게 되며 이와 같은 시점에서 볼 때 복합적이고 융합적인 연구가 필요하다 하겠다.

전술한 바와 같이 우리나라는 바이오매스의 특성상 분포가 넓게 퍼져 있어서 수집 및 이송이 번거롭고 인건비가 비싼 탓에 지금 당장은 폐기물을 이용한 에너지 생산이 적합할 것으로 사료된다. 하지만 폐기물은 함수율이 높을 뿐 아니라 보유하고 있는 열량이 낮아 폐기물 자체의 에너지원화 보다는 기존의 화석연료와의 혼합에 의한 에너지 원화가 바람직하다고 생각한다. 특히 요즘과 같이 석유값이 급등을 하면서 석탄이 에너지원의 한 축으로 재등장하고 있는 시점에서 석탄과의 혼합연료화는 석탄에 의한 다량의 CO₂ 생성을 억제하며 폐기물의 자원화를 비교적 손쉽게 이룰 수 있다는 점에서 이점이 크다. 폐기물은 수집 시스템 인프라가 잘 갖추어져 있고 처리비용을 받아가며 에너지원화 시킬 수 있다는 점에서 이점으로 들 수 있다. 석탄과의 혼합 연료화를 위해서는 가스화 기술이 가장 타당해 보이는데, 가스화란 저농도의 산소 또는 무산소 상태에서 고체시료를 열분해하여 H₂, CO, CH₄ 등 가연성분의 가스를 발생시키는 과정을 말한다. 생성된 가스는 엔진발전기나 가스터빈, 보일러 등에서 전기나 열 에너지로 변환시킨다. 즉 무산소 상태에서 열을 가하면, 고체시료는 환원성 분위기에서 분해되어 기체, 액체로 분해되어 증발하고 분해되지 않는 물질은 고체(잔사)로 남게 된다. 이들 생성물의 수율은 원료의 화학구조 형상 열분해 속도에 의존한다.

가스화는 가스화로의 형태에 따라 투입되는 시료의 성상과 반응거동이 달라지게 되는데 가스화로의 방식으로 나누면 크게 세가지로 나눌 수 있다.

- 고정상 가스화로
- 유동상 가스화로
- 분류상 가스화로

표 2.에 개념도를 첨부하여 세가지 반응기의 분류를 정리하였다. 고정상 가스화로는 숯가마와 비슷한 형태로 연료의 입자가 큰 상태로 파쇄하여 공급하며 운전이 비교적 용이하나 생성가스의 발열량이 약 900~1,400kcal/m³

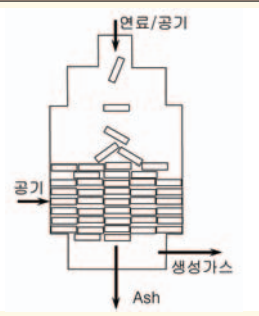
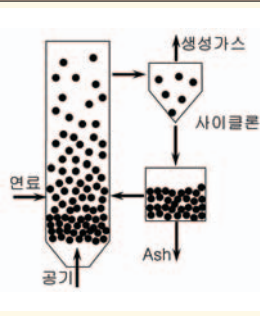
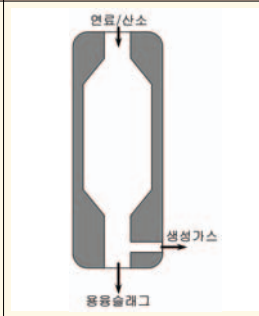
로 낮고 가스에 포함되는 타르분이 비교적 많아 반응기 후단에 개질기나 정제시스템이 추가로 필요하다는 단점이 있다. 그에 비해 유동상 가스화로는 내부에 유동매체를 충전시켜 여기에 유동을 부여하여 유동매체와 시료의 접촉을 단시간에 많게 하여 반응을 촉진시키는 시스템이며 시료가 고정상 가스화화에 비해 고온 입자로 만들어 유동이 용이하게 할 수 있도록 해야 한다. 형태에 따라서는 내부순환 형식도 있으며 미연탄소분을 연소로의 연료로 사용하여 그 회수열을 가스화 반응에 이용하므로써 가스화 효율을 높이게 하는 특징이 있다. 타르분이 고정상 가스화화에 비해 적으며 가스의 발열량도 1,300~3,500kcal/m³ 정도로 높다. 이에 비해 분류상 가스화로는 고온의 가스화제와 고체시료를 반대방향에서 서로 맞부딪히게 하여 고체시료를 급속히 반응시키게 하는 형태로 고온에서 급속히 반응하는 탓에 타르분이 없고 가스의 발열량이 2,500~3,500kcal/m³으로 높다는 특징이 있다. 하지만 시료를 미세하게 파쇄하여야 하는 단점이 있다. 소형일수록 고정상 가스화화가 적합하여 대형으로 갈수록 유동상, 분류상 가스화화가 적합하다는 특징이 있다.

가스화 공정은 가스화 온도와 체류시간, 사용시료의 조성 및 가스화로의 형태, 산소의 주입 유무 등에 따라 생성물의 조성과 가스의 발생량에 큰 차이를 보인다. 하지만 공통적인 경향으로는 가스화 온도가 높고, 체류시간이 길어짐에 따라 가스의 생성량이 증가하며 그와 반비례하여 타르분과 char의 생성량은 감소한다.

가스화 공정은 가스화 반응이 흡열반응인 경우가 대부분으로 가스화로 내에서 반응이 유지되기 위해서는 열원의 공급이 필수적이다. 보통 소각 및 완전연소에 있어서는 충분한 산소 주입으로 시료의 자체 발생열에 의해 온도를 올릴 수 있으나 가스화의 경우는 산소의 공급이 작거나 없는 상태이므로 가열방식이 매우 중요해진다. 보통 가열방식으로는 무산소 상태의 열풍을 가스화화에 직접 주입하거나 가스화로 내의 시료의 부분연소 방법, 그리고 이의 혼용 등으로 가열을 하고 있다. 부분연소법이란 가스화로 내에 보조연료를 별도로 공급하지 않고 소량의 공기 또는 산소를 공급하여 가스화로 하부에서 시료의 일부를 연소시키면서 그 열로 상부의 시료를 열분해/가스화 시키는 방법이다. 유동상 가스화화에서는 별도로 연소로를 설치하여 미연탄소 등을 연소시켜 그 열로 유동매체를 가열하여 가스화화에 순환시키는 방법도 있다.

하지만 가스화는 시료의 함수율이 최고 20% 미만으로 비교적 건조한 시료를 사용해야 효율이 좋으며 함수율이

표 2. 가스화로의 분류

	고정상 가스화로	유동상 가스화로	분류상 가스화로
개 념 도			
특 징	연료를 크게 파쇄하여 공급. 오랜시간 가스화.	연료를 잘게 파쇄하여 공급. 유동장에서 가스화.	액체연료, 미분시료, 탄화물을 순식간에 가스화.
생성가스 성상 (dry)	900~1,400 kcal/m ³ 타르분 많음	1,300~3,500 kcal/m ³ 타르분 적음	액체연료, 미분시료, 탄화물을 순식간에 가스화.

높아질수록 건조에 필요한 에너지가 불필요하게 낭비되므로 가스화 효율이 떨어진다. 따라서 함수율이 높은 시료는 사전에 건조과정 등을 통해 함수율을 낮출 필요가 있다.

3. 수분함량이 많은 고체시료의 전처리

하수슬러지를 비롯한 함수량이 많은 바이오매스를 연료로 가스화할 경우 높은 함수율로 인해 유효발열량이 낮다는 데 있다. 하지만 이들 폐기물은 건조상태에서는 단위중량당 발열량이 목질계 바이오매스보다 높으며 바이오매스계 자원의 단점인 수집과 이송에 번거로움이 따른다는 문제점이 하수슬러지 수집 인프라는 정비되어 있어서 단점이 크게 줄어든다.

또한 런던협약에 의해 한국도 2005년 현재 천만톤 가까이 되는 해양투기량을 2011년까지 4백만톤으로 감소시킨다는 시행규칙을 2006년 2월 결정하였다.^[3] 또한 해양투기가 가능한 폐기물의 종류도 현재의 14종에서 2011년까지 9종으로 줄어들게 된다. 따라서 현재 대부분 해양투기 되고 있는 하수슬러지를 에너지원화 시킬 수 있다면 엄격해지는 환경규제에 맞출 수 있을 뿐 아니라 그에 상응하는 에너지를 절약할 수 있게 된다. 현재 한국내에서 버려지는 유기 폐기물을 전부 에너지로 전환시킬 수 있다면 약 4백만 TOE 상당의 원유를 절약할 수 있는데 이는 2천9백만 배럴에 상당하는 양이다.^[4]



그림 2. 해양투기로 인한 오염

사용 가능 잠재성이 높은 하수슬러지의 유효이용을 위해서는 건조(탈수)기술의 고효율화가 필수적인 해결책이라 할 수 있다. 건조의 고효율화에서 가장 큰 문제가 되는 것이 물의 증발잠열이다. 건조방식의 고효율화 기술을 위해서 현재 초음계 수산화 등 잠열분 에너지투입량을 저감시키는 연구가 진행되고 있다.^[5] 건조(탈수)공정의 고효율화를 위해 최근 연구되는 것 중 하나가 중온중압수로 건조속도가 낮은 물질을 건조속도가 빠른 물질로 처리하여 그 결과 건조특성을 향상시키는 방법이다. 이 방법을 사용할 경우 자연건조에 필요한 시간이 기존의 건조시간



그림 3. 유기폐기물의 건조(탈수)를 위한 pilot plant



그림 4. 처리후 회수한 고체생성물

보다 현저히 줄어들 뿐만 아니라 여기에 투입하는 에너지도 기존의 단순 건조시에 드는 에너지의 반 이하로 줄어들게 되어 간단히 건조(탈수)시킬 수 있게 된다. 또한 이 과정에서 멸균·탈취도 동시에 해결되어 운반도 용이하게 된다는 특징을 갖게 된다.

이 방법이 실용화될 수 있다면 하수슬러지 자체의 가스화로 인한 에너지 생산 뿐 아니라 경우에 따라서는 혼합 시료를 만들어 가스화 효율을 높일 수 있는 복합시스템도 고려할 수 있을 것이다. 이렇게 된다면 폐기물을 생산한 그 지역에서 타 지역으로의 배출 및 이동이 없으며 지속가능한 재생에너지 사용에 큰 역할을 담당할 수 있을 것으로 보인다.

그림 3.⁶⁾은 건조(탈수)를 위한 중온중압 처리 장치의 파일럿 규모의 장치를 나타낸다. 장치는 batch 투입형태로서 함수율 약 80%의 하수슬러지를 한번에 300kg을 처리할 수 있는 용량이다. 반응기내 수증기 온도는 200℃로서 처리시간은 5분이다.

200℃의 포화수증기로 가열혼합 처리를 한 후, 수증기를 외부에 방출시켜 고체생성물을 반응기로부터 회수하는 단순한 공정이다. 처리시간을 5분으로 짧게 하는 이유는 유기물의 가용화(solubility)율을 낮추고 고체생성물 회수량을 늘리기 위해서인데 통상 처리시간이 길어질수록 가용화율이 높아지며 그에 따라 고체생성물의 회수량은 감소한다. 이런 실험 조건으로 투입시료 내의 탄소가 고체생성물에 잔존하는 비율이 90% 이상으로 대부분 고체생성물 내에 남아있게 된다. 처리후 고체생성물의 함수율은 약 60% 정도로 높은 상태이나 분쇄·혼합 효과를 나타내며 악취가 저감되고 자연 건조속도가 현저히 향상된다. 실제 하수슬러지를 어떠한 처리도 하지 않고 자연건조시킬 경우 72시간 후에는 함수율이 80%에서 60%로 감소하지만, 수열처리를 할 경우에는 처리 즉시 함수율이 60%로 감소하고 72시간이 경과하면 10% 정도로 낮아져서 가스화 시료로 사용할 수 있을 정도가 된다. 악취도 수열처리로 인해 현저히 감소하게 되는데 수증기에 의한 가용화로 인해 고체시료에서 악취원이 분리·배출되기 때문으로 판단되며 악취발생기구 중 하나인 단백질의 혐기성 분해도 멸균에 의해 사라지기 때문으로 판단된다.

하수슬러지 등 함수율이 높은 바이오매스계 자원에 대해서는 수열처리가 가스화 연료 사용을 위한 하나의 대안이 될 수가 있으며 수열처리는 함수율 저감 뿐 아니라 고체시료의 혼합을 통한 균일화에도 역할을 할 수 있다. 이런 의미에서 포괄적인 바이오매스의 자원화 공정으로 기능을 충분히 발휘할 수 있다고 판단되며 기존의 파쇄기에서는 처리가 불충분·곤란한 섬유질 물질(머리카락, 나일론 이외의 의류)의 분쇄에도 충분히 효과가 있을 것이다.

다만, 수열처리에서 나오는 폐수에 가용화한 탄소분이 수천 ppm 정도 잔류하는 것으로 보고되고 있다. 가용화는 고체연료 관점에서는 발열량의 저감을 뜻하므로 되도록 이를 억제하여야 하며 폐수의 처리 역시 문제점이 될 수 있다.

4. 맺음말

바이오매스의 자원화는 에너지 문제 뿐 아니라 점점 심각해지는 온실가스 등 환경문제를 동시에 해결할 수 있는 대안 중 하나가 될 수 있다. 에너지 전환을 위한 기술도 살펴본 바와 같이 여러방법이 있을 수 있으며, 각각 또는 조합하여 복합적인 시스템을 꾸릴 수 있다. 전체적인 큰 그림에서는 원료가 되는 바이오매스의 종류의 선정부터 목표가 되는 에너지원의 형태를 어떠한 공정을 거쳐 생산할 지를 해당 지역의 여건에 맞추어 지속 가능하고 유기체

적인 시스템을 구축해 나아가야 한다.

당장 도래할지 모르는 고유가의 고착에 따른 석탄사용 증가에 맞추어 석탄과 폐기물 또는 바이오매스계 연료와의 혼합연료도 재생에너지의 한 축에 넣을 수 있다고 생각하며 이를 위해서는 가스화가 다른 전환기술보다 타당하다고 판단된다. 또한 함수율이 많은 바이오매스 등의 처리를 위한 수열처리 과정을 알아보았으며 실제로 수열처리 과정을 조합하여 거기에서 배출되는 고체생성물과 석탄과의 혼합 가스화 공정이 충분히 타당하다고 생각된다.

또한 수열처리 과정에서 나오는 폐수도 중금속 등의 배출거동을 확인한 후에 문제가 없다고 판단될 때는 비료 등의 원료로 사용할 수 있다고 생각되며 향후 기술 개발을 통해 그와 같은 시스템이 가능하게 된다면 바이오매스계 폐기물을 사용하여 가스화공정을 통해 전기에너지 또는 열 에너지를 공급받으며 그로 인해 폐기물 처리가 해소되고 거기서 부산물로 나오는 폐수도 비료화 시킬 수 있는 에너지 자급 사회를 꿈꿀 수도 있으리라 사료된다.

다만 이를 위해서는 해당 지역의 특성을 잘 파악하고 그에 맞춘 시스템개발을 위해 학문분야의 경계를 가리지 않는 협조체제의 구축도 필요하다고 본다.

❖ 참고 문헌

- [1] <http://www.whitehouse.gov/news/releases/2007/01/print/20070123-2.html>
- [2] Donald L. Klass, "Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals", Academic Press, 1998
- [3] 환경백서 2006, 환경부
- [4] <http://www.cnews.co.kr/>
- [5] K. Yoshikawa, H. Moritsuka, "Advanced Technologies for Biomass Power Generation", CMC, 2006



민 태 진

- 한국기계연구원 환경기계연구본부 열환경기계 연구팀 선임연구원
- 관심분야 : 바이오매스 가스화
- E-mail : tmin@kimm.re.kr



노 선 아

- 한국기계연구원 환경기계연구본부 열환경기계 연구팀 선임연구원
- 관심분야 : 바이오매스 개질
- E-mail : sos@kimm.re.kr



윤 진 한

- 한국기계연구원 환경기계연구본부 열환경기계 연구팀 선임연구원
- 관심분야 : 바이오매스 가스화
- E-mail : jhyun@kimm.re.kr



김 우 현

- 한국기계연구원 환경기계연구본부 열환경기계 연구팀 책임연구원
- 관심분야 : 소각로, 가스화로 시스템 전반
- E-mail : kwh0788@kimm.re.kr