

유기성폐기물을 이용한 바이오가스 생산 및 활용기술

허남효*, 이승현, 김병기

Biogas Production and Utilization Technologies from Organic Waste

Namhyo Heo*, Seungheon Lee and Byeongki Kim

Abstract

Anaerobic digestion (AD) is the most promising method of treating and recycling of different organic wastes, such as OFMSW, household wastes, animal manure, agro-industrial wastes, industrial organic wastes and sewage sludge. During AD, i.e. degradation in the absence of oxygen, organic material is decomposed by anaerobes forming degestates such as an excellent fertilizer and biogas, a mixture of carbon dioxide and methane. AD has been one of the leading technologies that can make a large contribution to producing renewable energy and to reducing CO₂ and other GHG emission, it is becoming a key method for both waste treatment and recovery of a renewable fuel and other valuable co-products. A classification of the basic AD technologies for the production of biogas can be made according to the dry matter of biowaste and digestion temperature, which divide the AD process in wet and dry, mesophilic and thermophilic. The biogas produced from AD plant can be utilized as an alternative energy source, for lighting and cooking in case of small-scale, for CHP and vehicle fuel or fuel in industrials in case of large-scale. This paper provides an overview of the status of biogas production and utilization technologies.

Key words

Anaerobic digestion(혐기성소화), Biowaste(생분해성폐기물), Co-digestion(통합소화), Biogas(바이오가스), Renewable energy(재생에너지), CHP(열병합발전), Vehicle fuel(자동차연료)

(접수일 2008. 6. 10, 수정일 2008. 6. 15, 게재확정일 2008. 6. 19)

* 한국농촌공사 농어촌연구원 농촌자연환경연구소

■ E-mail : bionhheo@ekr.or.kr ■ Tel : (031)400-1825 ■ Fax : (031)400-1889

Subscrip

AD : anaerobic digestion
OFMSW : organic fraction of municipal solid waste
GHG : greenhouse gas
CHP : combined heat and power

1. 서론

21세기는 환경과 에너지 시대라고 표현해도 과언이 아닐 것이다. 세계는 환경(Environment), 에너지(Energy), 경제(Economy)를 동시에 고려해야 하는 3E 시대 도래로 에너지 및 자원 확보 경쟁이 한층 격화됨에 따라 자원민족주의가 대

두하게 되었고, 이에 대응하기 위해 국가 에너지 및 자원 정책의 패드라임을 과거의 “안정적 도입”에서 “자주개발”로 전환하는 추세이다.

특히, 교토의정서(Kyoto protocol) 발효 이후 온실가스 감축의무가 본격화되고 국제유가 폭등에 따른 국제 에너지시장 불안정이 한층 심화됨에 따라 세계는 자국의 환경규제 대응과 동시에 에너지 자립도를 높이기 위하여 청정 대체에너지 개발에 다각적인 노력을 기울이고 있으며, 그 일환으로 EU, 미국, 영국, 일본 등은 바이오매스 자원의 일부인 유기성폐기물(Organic waste)의 혐기성소화 방식을 통한 바이오가스 생산 및 활용 기술개발과 시설 보급화를 위한 다양한 신 에너지 정책을 제시하고 있다.

특히, 에너지의 해외 의존도 97%인 우리나라의 경우 최근 고유가에 따른 국가 경쟁력을 제고해야하는 현 시점에서 대체에너지 개발과 이용이 국가 에너지 정책의 중요한 목표 가운데 하나가 되어야 할 것이며, 이에 본고에서는 유기성폐기물의 혐기성소화 처리방식을 통한 다양한 바이오가스 생산 및 활용 기술을 제시하였다.

2. 혐기성소화기술 개요

2.1 기술 변천사

환경기술(environmental technology, ET)에 있어 혐기성소화공정은 유기물의 감량화 효과 뿐만아니라 무엇보다도 유용한 biogas를 얻을 수 있는 장점 때문에 각광을 받는 biotechnology 중의 하나다. 호기성공정(aerobic process)의 경우 처리과정에서 다량의 에너지를 소비하는 반면, 혐기성소화 공정은 에너지를 생산하며, 또한 최종 부산물(소화슬러지) 생성량도 호기성의 10%에 불과하다는 장점이 이를 뒷받침해 주고 있다.

1920년에 공학기술(engineering technology)의 개념이 도입된 최초의 혐기성소화 공법은 Immoff process로 하수처리장에 적용되었으며, 세계 2차 대전 이후 유럽에서 혐기성소화 공법을 이용한 농업폐기물로부터 바이오가스를 회수하여 에너지 생산에 이용하였으며, 특히 1970년대 전 세계적으로 에너지 위기를 겪은 이후 혐기성소화에 의한 바이오가스 생산 기술은 혁신적인 발전을 거듭하면서 기술적 타당성이

검증되었다.

1980년대부터 생분해성 유기물 함량이 많은 plant biomass 및 각종 농공산업 폐기물을 대상으로 대규모 biogas를 생산하는 상용화 plant에 대한 연구가 시작되면서 최대의 유기물 제거율과 메탄생성을 동시에 달성하기 위한 최적 반응조 설계가 주요 관심사였으며, 1990년대부터 이전의 활발한 기술 개발에 따른 상업화에도 커다란 진전을 보게 되었다. 혐기성소화의 시료로는 종래 하수슬러지로부터 생활폐기물, 농공산업폐기물, 축산폐기물, 임산폐기물, 축산분뇨에 이르기까지 다양하게 활용되어 왔으며, 특히 각 시료의 물리·화학적 특성, 시료의 전처리 유무, 슬러지처리 방법 등에 따라 서로 다른 형태의 소화반응조가 개발되어 왔다.

2.2 유기물의 혐기성분해 반응

혐기성소화공정은 절대적으로 산소가 존재하지 않는 조건하에서 생분해성 유기물이 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 가수분해(hydrolysis), 산생성(acidogenesis), 아세트산생성(acetogenesis), 메탄생성(methanogenesis)의 다단계 생화학 반응을 거쳐 CH_4 와 CO_2 로 최종분해되는 과정으로 정의할 수 있다.⁽¹⁾

첫 번째 단계인 가수분해(hydrolysis)는 다당류, 지방, 단백질 같은 고분자 유기물질이 발효 미생물의 체외효소에 의해 단당류, 지방산, 아미노산 등의 용해성 유기물질로 분해되는 과정으로 혐기성 분해시 전체 소화공정을 지배하는 율속단계(rate-limiting step)로 알려져 있다.⁽²⁾ 두 번째 단계

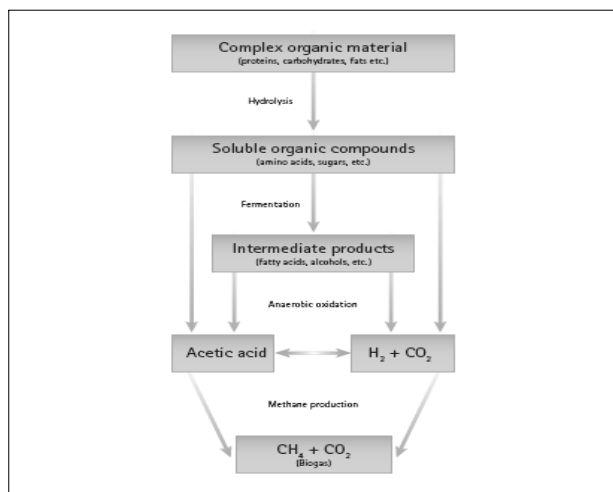


Fig. 1 Pathway for anaerobic digestion (Gujer and Zender, 1983).

는 가수분해에 의해 생성된 저분자 유기물은 다시 유기산 생성균(fermentative acidogenic bacteria)에 의해 유기산 및 알콜류, 케톤류 등으로 전환된다. 세 번째 단계는 아세트산 생성단계(acetogenesis)로써, 아세트산 생성균(acetogenic bacteria)이 지방산(propionate, butyrate 등)과 에탄올, 벤조에이트(benzoate) 등을 산화시켜 아세트산과 수소를 형성하며, 마지막으로 메탄생성 단계는 혐기성 분해반응의 최종 산물인 CH₄가 생성 단계로, 메탄의 70%는 아세트산 분해로부터, 나머지 30%는 수소 분해로부터 생성된다.

2.3 유기성폐기물의 자원순환 시스템

물질순환체계에 있어 인간이 사용하는 자원 중에서 가장 많은 양을 차지하는 것이 유기물이며, 화석연료를 제외한 생물 유래의 유기물은 바이오매스 자원이다. 바이오매스는 태양에너지를 이용하여 물과 이산화탄소로부터 생물의 광합성 작용을 통해 얻어지며, 태양에너지와 생명체가 존재하는 한 지속적으로 재생산 가능한 자원이다. 유기성폐기물은 인간의 생산·소비 활동으로부터 발생하는 부산물로서 생활폐기물, 인분 및 가축분뇨, 음식물쓰레기, 하수슬러지, 농공산업폐기물, 농산부산물, 식품가공 폐기물 등을 포함하며, 대부분의 경우 생물 유래의 바이오매스 자원이다.

Fig. 2에 인간의 생산·소비활동 과정에서 발생하는 유기성 폐기물의 혐기성소화 방식에 의한 자원순환시스템을 나타내었다.⁽³⁾ 유기성폐기물은 혐기성 미생물(anaerobes)에 의해

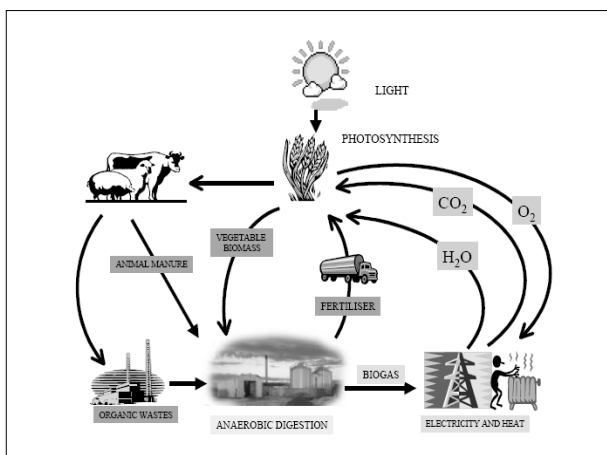


Fig. 2 Recycling system of organic wastes by anaerobic digestion (Seadi, 2002).

생물학적으로 분해되고, 부산물인 소화슬러지는 퇴비로 재이용되어 토양으로 환원되고, 에너지 생산과정에서 발생하는 이산화탄소는 생물의 성장과정에서 흡수한 것으로 대기중에 이산화탄소 양을 증가시키지 않는 “탄소 중립(carbon neutral)” 즉, CO₂ zero emission의 특징을 지닌다. 소화과정에서 생성되는 바이오가스는 열과 전력을 생성하는 에너지원으로 이용함에 따라 온실가스 감축에 기여 할 뿐만 아니라 화석연료를 대체함으로써 환경과 에너지 문제를 동시에 해결할 수 있다.

3. 바이오가스 생산 기술

3.1 대상폐기물 및 메탄생성량

혐기성소화 처리공정은 시료의 물리·화학적 특성 중 총고형물(total solid, TS) 함량에 좌우되며, Table 1에 나타난 바와 같이, TS 2~5%를 함유한 고형물을 Low solid, TS 6~15% 범위를 Medium solid, 그리고 TS 20% 이상인 경우 High solid로 구분된다.⁽⁴⁾

Low solid의 경우 높은 수분함량 때문에 폐기물 취급이 용이하고 기계적으로 연속 운전이 가능하며, 반응조의 형태는 완전혼합(continuously stirred tank reactor, CSTR)으로 소화조 교반은 기계적, pumping 혹은 biogas 주입에 의해서 수행된다. Medium solid에 속하는 시료는 고형물함량 범위가 다양하여 그 만큼 소화시스템에 유통성이 있어 보이고 고형물함량 10% 이상의 경우 자연적인 고액분리가 불가능하므로 최적 소화시스템을 선정하는데 있어 어려움이 다소 따른

Table 1 Types of substrate for anaerobic digestion (Heo, 2005)

TS content	Substrate type	Wastewater (WW) & waste
<5%	Low solid	Paper mill WW Alcohol WW Food industrial WW Agro-industrial WW etc.
6~15%	Medium solid	Manure Slaughterhouse waste Sewage sludge Agro-industrial waste
>20%	High solid	Municipal solid waste Plant biomass Crop residues Household waste etc.

Table 2. Methane yields of different organic wastes estimated by batch BMP test (Heo, 2004)

Waste types	Methane yield (m ³ CH ₄ /kg VS _{added})
Livestock manures	
- Cattle slurry	0,252~0,323
- Pig slurry	0,210~0,348
- Poultry slurry	0,250~0,390
Agro-industrial wastes	
- Tomato & orange	0,320~0,330
- Sorghum & sugarbeet	0,260~0,390
- Brewer's grain	0,310
- Straw	0,105~0,250
- Whey	0,250~0,460
Organic fractions of MSW	
- Garden wastes	0,140~0,350
- Municipal garbage	0,564
- Fruit wastes	0,175~0,350
- Sewage sludge	0,120~0,210
- European food waste	0,321~0,540
- Korean food waste	0,356~0,471

다. High solid 소화시스템은 전처리 없이 시료를 직접 사용할 수 있고 혹은 시료에 소량의 물을 첨가하여 반응조가 요구하는 고형물함량으로 조절할 수 있으며, 부피가 작은 반응조에 높은 유기물 부하량을 유지할 수 있기 때문에 대량의 메탄 생성이 가능하다는 장점을 지닌다.

Table 2에 다양한 유기성 폐기물의 메탄수율에 대한 다양한 연구결과 나타내었다(Heo, 2004).⁽⁵⁾ 특히, 국내·외에서 발생하는 음식물쓰레기의 메탄수율은 축산분뇨와 농공산업 폐기물에 비하여 월등히 높은 반면, 하수슬러지의 경우 다른 폐기물에 비하여 상당히 낮은 메탄수율을 나타내고 있다.

3.2 혐기성소화 공정 및 운전조건

유기성폐기물의 혐기성소화 공정의 분류는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 고형물함량에 따라 습식(6-10% TS)과 건식(25-40% TS)공정으로 구분되며, 이어 반응조로 기질 투입방식에 따라 회분식(batch) 혹은 연속식(CSTR)으로 구분되고, 반응기 배열형태에 따라 단상(one-stage) 혹은 이상(two-stage) 시스템으로 분류되며, 최종적으로 반응온도에 따라 중온(33-38℃)과 고온(52-58℃) 혐기성소화공정으로 구분되어 진다.⁽⁴⁾

Table 3에 상용화에 성공한 건식과 습식 혐기성소화 기술을 나타내었다.⁽⁶⁾ 원천기술의 대부분은 유럽에서 개발되었

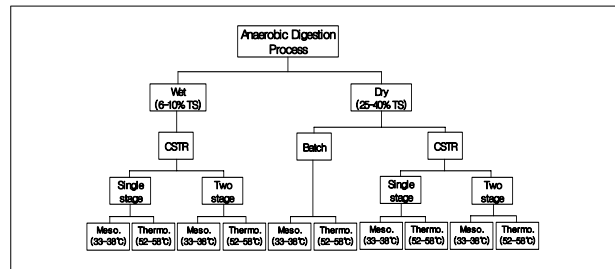


Fig. 3 A classification of AD process (Heo, 2005).

Table 3. Some of commercial AD technologies (Mata-Alvarez, 2003)

Process	Technology	Owner (Country)
Dry	BRV	LINDE (Germany)
	DRANCO	OWS (Belgium)
	KOMPOGAS	KOMPOGAS (Switzerland)
	VALORGA	HESE (Germany)
	SEBAC	Uni, Florida (America)
Wet	BIOSTAB	ROS ROCA (Spain)
	BTA	BTA (Germany)
	KCA	LINDE (Germany)
	WAASA	CYTEC (Finland)
	HKV	? (Denmark)

Table 4. Operational conditions of AD process (Mata-Alvarez, 2003)

AD processes		Operational conditions
Dry	Mesophilic	HRT: 17~30d OLR: 2.6~4.0 kgTVS/m ³ ·d
	Thermophilic	HRT: 12~20d OLR: 4.0~15.0 kgTVS/m ³ ·d
Semidry	Mesophilic	HRT: 12~20d OLR: 3.0~8.0 kgTVS/m ³ ·d
	Thermophilic	HRT: 12~15d OLR: 6.0~12.0 kgTVS/m ³ ·d
Wet	Mesophilic	HRT: 14~30d OLR: 1.0~4.0 kgTVS/m ³ ·d
	Thermophilic	HRT: 12~20d OLR: 2.0~8.0 kgTVS/m ³ ·d

고, 상용화 기술은 유럽 전역 뿐만아니라 북미, 아시아 등에 보급되어 성공적으로 운영 중에 있다. 유럽의 생분해성 도시 고형폐기물(Organic fraction of Municipal solid waste, OFMSW)의 대부분은 High solid 특성을 지니기 때문에 Dranco, Valorga, Kompogas와 같은 건식소화 공법이 적용되며, 특히 국내 음식물쓰레기 처리를 위해 Dranco 공법이 도입되어 운영되고 있다.

건식, 반건식 그리고 습식소화 공법의 중온과 고온소화 조

건에서 소화공정의 주요 운전인자인 수리체류시간(hydraulic retention time, HRT)과 유기물부하율(organic loading rate, OLR)의 운전범위를 Table 4에 나타내고 있다.⁽⁶⁾ 각 소화공법에서 고온소화는 중온보다 짧은 HRT 조건에서 높은 유기물 부하율을 나타내는데 이는 유기물을 분해하는 소화미생물의 활성도가 중온보다 고온에서 월등히 높기 때문이다.

3.3 유기성폐기물 통합소화

3.3.1 통합소화 개요

유기성폐기물의 혐기성 통합소화(Anaerobic co-digestion, ACD)는 Fig. 4에 제시된 바와 같이 물리·화학적 성상이 각각 다른 둘 이상의 유기성 폐기물을 혼합하여 단일 소화조에서 일괄적으로 처리하는 소화공정으로 정의되며, Table 5에 장점을 나타내었다.⁽⁷⁾

통합소화의 효과로써, Fig. 5에 나타낸 바와 같이 하수슬러지(SS)와 축산분뇨(LW)의 경우 생분해성 도시고형폐기물(OFMSW)에 비하여 C/N비, 생분해성 유기물 그리고 고형물 함량이 낮은 반면, 혐기성소화에서 소화균의 성장과 신진대사에 필요로 하는 영양성분 및 미량원소 함량은 상대적으로 높다. 따라서 SS 혹은 LW와 OFMSW 혹은 농산폐기물의 혼

합은 영양성분의 균형과 C/N비 향상 효과로 인하여 소화공정의 안정성을 증가시켜 줄 뿐만아니라 생분해 가능한 유기성분의 증가에 따른 메탄가스의 발생량 증가와 같은 긍정적인 효과를 얻을 수 있다.⁽⁵⁻⁷⁾

3.3.2 통합소화 현황 및 경제성 비교

상용화 통합소화 공정은 크게 소규모의 농가보급형(farm-scale co-digestion)과 대규모 시설의 집중형(large-scale centralised co-digestion)으로 구분되며, 습식소화(<15% TS) 시스템이 적용되는 것이 일반적이다. 농가형 통합소화는 대부분의 경우 주 원료인 가축분뇨와 함께 에너지작물을 비롯한 다양한 농산부산물의 혼합방식을 적용하며, 집중형의 경우 기존 하수처리장 소화조를 활용하는 방식 혹은 대규모 혐기성소화 시설을 계획하여 다양한 유기성폐기물(가축분뇨, 농산부산물, 음식물쓰레기, 농공산업 폐기물 등)을 처리하는 방식이 적용되고 있다.^(8,9)

IEA 보고에 따르면 2005년말 현재 중국의 경우 17백만기, 네팔의 경우 50천기의 소규모 농가형(family-sized farm scale)이 보급된 것으로 추산하며, 개발도상국(developing country)의 경우 생성 바이오가스 대부분을 취사(cooking) 혹은 조명(lighting)에 필요한 에너지원으로 이용하고 있다.^(8,10) 한편, 유럽 전역에 보급된 농가형 바이오가스 플랜트는 개발도상국의 재래식 시스템에 비하여 폐기물의 처리효율 개선 뿐만아니라 바이오가스의 생산성을 향상시키기 위해 기술 집약적으로 시스템화하였다. 2007년 현재 독일 3,500기, 오스트리아 350기, 스위스 81기, 네덜란드 64기, 덴마크 60

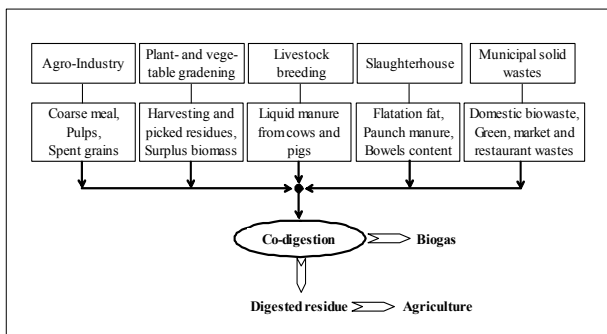


Fig. 4 Basic concept of ACD system (Heo, 2005).

Table 5. The Merits of anaerobic co-digestion (Braun and Wellinger, 2003)

- Improved nutrient balance for optimal digestion and fertiliser quality.
- Homogenisation of particulate, floating or settling wastes through mixing with animal manures and sewage sludge.
- Increased, steady, biogas production through the seasons.
- Higher income from gate fees for different waste treatment.
- Renewable biomass production for digestion as a potential new income for agriculture.

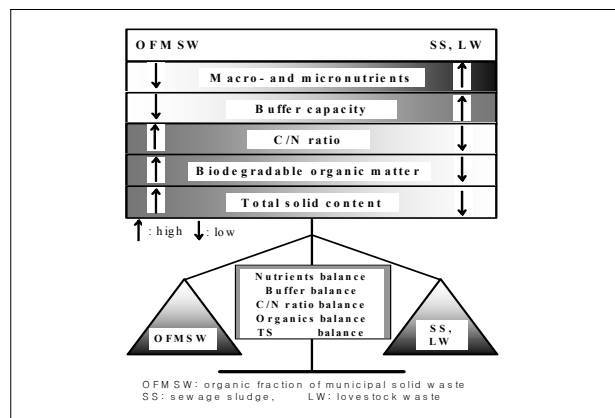


Fig. 5 The characteristics of different organic wastes (Mata-Alvarez, 2003).

기, 스웨덴 8기, 폴란드 6기를 포함하여 유럽 전역에 약 4,000기가 가동 중에 있는 것으로 보고하고 있으며, 가축분뇨 처리와 동시에 대량의 바이오가스를 생산하기 위하여 가축분뇨와 함께 사료용 옥수수, 호밀, plant biomass 등을 혼합하여 처리하고 있다.⁽¹¹⁾

대규모 집중형 통합소화에 투입되는 혼합 폐기물의 고형물 함량은 8~15%이며, 덴마크의 17개소 대규모 통합소화 플랜트 운영 결과 소화조 용적이 4,500~6,000m³일 때 투자비

Table 6. Economic evaluation of the farm-scale plant (Braun and Wellinger, 2003)

Economic evaluation of a typical farm scale energy crop co-digestion plant	
PARAMETER	
DIGESTER VOLUME (m ³)	700
MAIN SUBSTRATE	Corn silage
CO-SUBSTRATE	manure
INVESTMENT COSTS (Euro)	250,000
SUBSIDIES (Euro)	50,000
NET ENERGY (kWh/a)	750,000
ELECTRICITY RATES (Euro cents/kWh)	10,23
RUNNING COSTS (Euro/a)	58,200
Labour	9,000
Maintenance	750
Various	48,450
INCOME (Energy, Euro/a)	78,225
INCOME (Co - substrates)	0
TOTAL INCOME (Euro/a)	78,225
NET MARGIN (Euro/a)	20,025

Table 7. Economic evaluation of the large-scale plant (Braun and Wellinger, 2003)

Economic evaluation of a large scale, centralised co-digestion plant	
PARAMETER	
DIGESTER VOLUME (m ³)	6,600
MAIN SUBSTRATE	Piggery manure
CO-SUBSTRATE	Industrial waste (20%)
INVESTMENT COSTS (Euro)	5,493,300
SUBSIDIES (Euro)	0
NET ENERGY (kWh/a)	23,203,000
ELECTRICITY RATES (Euro cents/kWh)	8-8,7
RUNNING COSTS (Euro/a)	452,132
Labour	164,666
Maintenance	124,000
Various	163,466
INCOME (Energy, Euro/a)	905,200
INCOME (Co - substrates)	146,000
TOTAL INCOME (Euro/a)	1,051,200
NET MARGIN (Euro/a)	599,068

회수 기간은 3~10년이 소요되는 것으로 보고하고 있으며,^(7,8) Table 6과 7에서 볼 수 있듯이 농가형과 집중형 통합 소화 플랜트의 경제성 측면에서 수익성(net margin)을 비교해 볼 때, 집중형은 농가형에 비하여 약 30배 높음을 알 수 있다.⁽⁷⁾ 2007년 현재 독일 15기, 덴마크 20기, 스웨덴 14기, 오스트리아 15기, 폴란드 4기의 집중형 통합소화 플랜트가 가동 중에 있으며, 공정 부산물인 소화슬러지는 최종적으로 퇴·액비화에 의해 재활용되고 생성 바이오가스 대부분은 전처리 후 열병합발전 혹은 지역 에너지원으로 활용되거나 천연가스 자동차(natural gas vehicle, NGV)를 위한 수송연료로 활용되고 있다.^(8,10)

4. 바이오가스 활용 기술

혐기성소화 플랜트로부터 생성된 바이오가스의 주성분은 메탄(53-70%)과 이산화탄소(30-47%)이며, 황화수소(H₂S)를 비롯한 암모니아(NH₃), 수소(H₂), 질소(N₂), 그리고 일산화탄소(CO) 등 미량가스(trace gas)를 포함한다. 바이오가스 활용 기술은 Fig. 6에 나타낸 바와 같이, 보일러 열원 혹은 열병합발전(combined heat & power, CHP) 및 연료전지(fuel cell)에 의한 열과 전력 생산하는데 이용하거나, 정제 후 자동차 연료(vehicle fuel) 혹은 천연가스 배관망(gas grid)에 직접 주입하여 천연가스(natural gas)를 대신하여 이용 할 수 있다.

바이오가스의 주 발생원은 Table 8에서와 같이 매립지와 혐기성소화 플랜트이며, 발열량을 기준으로 볼 때 에너지원로서 효용 가치는 매립가스(landfill gas, LFG)보다 혐기성 소화 플랜트에서 생성된 바이오가스가 훨씬 우수하다. 바이

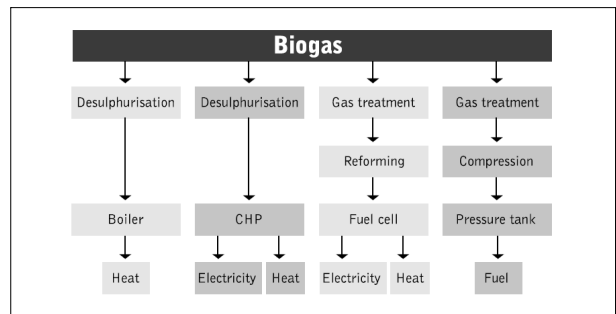


Fig. 6 Four basic ways in biogas utilization (IEA, 2005).

Table 8. General characteristics of LFG and biogas (IEA, 2007)

Parameter	unit	Compositions	
		LFG	Biogas
Caloric value	MJ/Nm ³	16	23
Density	kg/Nm ³	1.3	1.2
Wobbe index	MJ/Nm ³	18	27
Methane	vol-%	45(35-65)	65(60-70)
Hydrogen	vol-%	0-3	0
Carbon dioxide	vol-%	40(15-50)	35(30-40)
Nitrogen	vol-%	15(5-40)	0.2(-)
Oxygen	vol-%	1(0-5)	0 (-)
Hydrogen sulphide	ppm	<100 (0-500)	<500 (0-4,000)
Ammonia	ppm	5	100
Chlorine as Cl ⁻	ppm	20-200	0-5

Table 9. Requirements to remove gaseous components depending on the biogas utilisation (IEA, 2005)

Application	H ₂ S	CO ₂	H ₂ O
Gas heater (Boiler)	<1,000ppm	No	No
Kitchen stove	Yes	No	No
CHP	<1,000ppm	No	Recommended
Vehicle fuel	Yes	Yes	Yes
Natural gas grid	Yes	Yes	Yes

오가스를 화석연료를 대신하여 에너지원으로 이용할 경우 Table 9에 나타난 바와 같이 활용 용도에 따라 제거해야 할 가스상 물질 종류 및 농도는 각각 다르며, 특히 바이오가스를 자동차 연료로 사용 혹은 천연가스 배관망에 연결 할 경우 수분제거와 함께 가스 정제가 필수적으로 선행되어야 한다. 본 고에서는 주로 열병합발전과 자동차 연료에 대한 내용을 제시하고자 한다.

4.1 보일러 열원(Heating)

바이오가스를 보일러 열원으로 사용 할 경우, 가스압력은 거의 8~25mbar, 황화수소(H₂S) 농도 1,000ppm 이하를 유지하는 것이 일반적이다. 중국, 네팔 등의 개발도상국의 경우 농가형 플랜트로부터 발생된 바이오가스는 가정용 난방 보일러 혹은 소화조 가운 보일러의 에너지원으로 이용하며, 선진국의 경우 생성 바이오가스의 대부분을 열병합발전과 지역 난방원으로 이용하고 있다.⁽⁸⁾

Table 10. Comparison of different biogas engines (IEA 2005)

Feature	Diesel engine (jet ignition)	Diesel engine (SI)	Micro turbine
Effi. (%)	30-38	35-42	26-29
Maintenance cost	high	medium	low
Investment cost	high	medium	high
Power (kW)	30-200	>200	<100
Lifespan	medium	high	high

4.2 열병합발전(CHP)

바이오가스를 CHP 원료로 이용 할 경우 엔진의 성능과 수명을 최대한 보장하기 위해서 바이오가스내 포함하는 황화수소와 수분을 제거해야 한다. 특히 황화수소는 내연기관의 부식을 초래하는 물질이며, 수분과 결합시 황산(H₂SO₄) 형태로 존재하기 때문에 가능한 바이오가스내 포함하는 수분을 응축수 형태로 회수해야 한다.

Table 10에 CHP 엔진의 특징을 나타내었다.⁽¹⁰⁾ 바이오가스의 엔진은 발전용량에 따라 전소(spark ignition, SI) 혹은 혼소(duel fuel) 엔진을 이용한다. 혼소엔진의 경우 발전용량 200kW 이하인 농가보급형 혐기성소화 플랜트에 적용되는 반면, 전소엔진은 대규모 하수처리장, 매립장 그리고 집중형 바이오가스 플랜트에 적용되고 있으며 엔진의 발전효율은 혼소 30-38% 전소 35~43% 범위이다. 최근에는 발전용량 25~100kW 범위의 Micro-turbine이 산업분야에 적용되고 있으며, 비록 발전효율은 낮지만(<30%) 시설규모가 적고 유지관리 비용이 낮은 장점이 있다.

4.3 자동차 연료(Vehicle fuel) & gas grid

LFG와 바이오가스를 자동차 연료 혹은 천연가스 대용으로 활용하기 위해서는 우선적으로 정제 과정을 통하여 천연가스와 동등한 수준까지 질적 개선이 요구된다. 2006년말 현재 전 세계에서 운행 중인 천연가스 자동차는 약 6.4백만대로 추산하고 있다. 정제 바이오가스를 자동차 연료나 천연가스를 대신하여 사용하는 주요 국가는 스웨덴, 스위스, 독일, 오스트리아, 프랑스 등이며, 국가별 바이오가스 정제기술 이용 현황을 Table 11에 정리하였다.⁽¹⁰⁾ CO₂ 제거에 적용된 기술은 PSA(pressure swing adsorption) 및 Membrane 분리 기술,

Table 11. Applied technologies for biogas upgrading in different countries (IEA, 2007)

Country	Gas utilisation	CH ₄ (%)	Removal technologies	
			CO ₂	H ₂ S
Austria	G.G. ^{a)}	97	PSA	Biofilter
Canada	G.G.	-	Membrane	A.C.
France	V.F. ^{b)}	97	W.S.	W.S.
Germany	V.F.	96	S.C. ^{c)}	S.C.
	G.G.	-	PSA	A.C.
Japan	V.F.	97	W.S.	W.S.
Sweden	G.G.	97	Chemical absorption	A.C.
	V.F.	97	PSA, W.S.	W.S., A.C.
Switzerland	G.G. & V.F.	96	PSA	A.C.
	V.F.	96	Membrane	A.C.
USA	G.G.	98	PSA, W.S.	A.C., W.S.

비고) ^{a)}G.G.: gas grid, ^{b)}V.F.: vehicle fuel, ^{c)}S.C.: selexol scrubbing

수용액 흡수법(water scrubbing, W.S.)이며, H₂S 제거의 경우 흡수법(water scrubbing, W.S.)과 활성탄(activated carbon, A.C.) 흡착 기술을 가장 많이 활용하고 있다. 정제 바이오가스의 메탄 함량은 96% 이상을 목표로 하고 있다.

4.4 스웨덴의 바이오가스 활용 현황

2008현재 스웨덴은 전 세계적으로 가장 많은 바이오가스 자동차(biogas vehicle, BGV)를 보유하고 있으며, 90년대 초반부터 바이오가스를 자동차 연료로 활용하였고, Table 12에 바이오가스를 자동차 연료 혹은 천연가스로 이용하기 위한 스웨덴의 표준화된 기준을 나타내었다.^(12,13) 2006년 기준 전체 바이오가스 발생량(1.3TWh)의 약 12%가 자동차 연료로 이용되었다.

2006년말 현재 스웨덴에서 운영 중인 15개소 바이오가스 정제시설의 설계 및 운영 자료에 근거하여 산출된 바이오가스 정제 시설용량 대비 초기 투자비용을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 투자비용은 시설용량에 거의 비례하며, 시간당 300Nm³의 바이오가스를 정제하기 위한 시설비용은 약 백만 유로(12.8억원)가 소요되며, 황화수소에 비하여 이산화탄소 정제 설비가 상대적으로 고가인 것으로 알려지고 있다. 정제시설의 운영비용은 다양한 변수에 의해 좌우되며, SGC(Swedish Gas Center)의 연구에 따르면 200m³/hr의 용량의 경우 20원/kWh이며, 운영비 또한 시설용량에 비

Table 12. Standard for biogas as vehicle fuel in Sweden (SGC, 2007)

Parameter	Unit	Demand in standard
Lower Wobbe index	MJ/Nm ³	43,9-47,3 (CH ₄ 95-99%)
MON (motor octane)	-	>130
Water dew point	°C	-5
CO ₂ +O ₂ +N ₂	vol-%	<5
O ₂	vol-%	<1
Total sulphur	mg/Nm ³	<23
NH ₃	mg/Nm ³	20

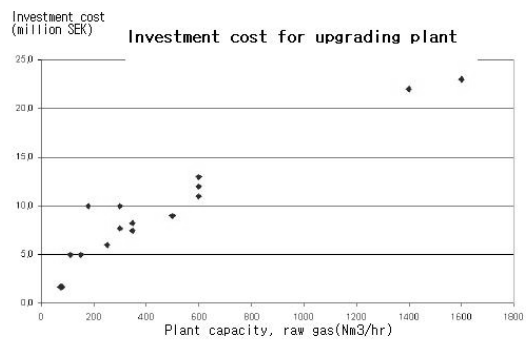


Fig. 7 Investment cost for upgrading plant of biogas (SGC, 2007).

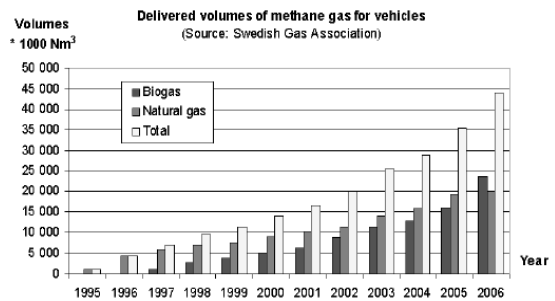


Fig. 8 Delivered volumes of biogas as vehicle fuel (SGC, 2007).

례하는 것으로 보고하고 있다.⁽¹³⁾

Fig. 8은 지난 10년 동안 스웨덴에서 자동차 연료로 이용된 천연가스와 바이오가스 판매량을 보여주고 있다. 2006년 기준 바이오가스 판매량은 24백만Nm³이며,⁽¹³⁾ 이는 전체 가스판매량의 54%로 천연가스 판매량(20백만Nm³)을 능가하였음을 볼 수 있는데, 이는 바이오가스 활용에 있어 스웨덴의 에너지 정책을 잘 반영하는 결과라 할 수 있다. 2006년말 현재 스웨덴 전역에 걸쳐 11,500대(자가용 10,400대, 버스 760대, 트럭 340대)의 바이오가스 자동차가 운행 중에 있으며,⁽¹²⁾ 2010년까지 약 500개소의 바이오가스 주유소 설치와 더불어 70,000대의 바이오가스 자동차 운영을 목표로 하고 있다.

5. 맺음말

1970년대 두 차례의 세계 석유파동(oil shock) 발생 당시, 국·내외적으로 재생 가능하고 환경오염 부담이 적은 에너지 및 제품 개발 필요성을 인식하였으나, 이후 화석연료의 안정적인 공급으로 대체에너지 개발에 대한 관심은 거의 사라져왔다. 그러나 2000년대 접어들어 고유가 상황과 온실가스에 의한 지구온난화가 가시화 되면서 재생 가능한 에너지 개발과 자원의 효과적인 이용을 통한 자원순환사회 구축, 나아가 환경적으로 건전한 사회구현이라는 목표를 실현하기 위해 폐기물 바이오매스(waste biomass)에 대한 관심이 집중 조명되고 있다.

국내에서 발생하는 고형폐기물 중 자원으로 재활용 가능한 유기성폐기물은 하수슬러지, 음식물류폐기물, 축산분뇨, 농산부산물 등을 대표 할 수 있다. 최근 국제환경 규제가 가시화되고 에너지 및 자원을 둘러싼 국제 정세가 다변화하면서 자원순환형 폐기물관리 시스템에 대한 관심이 증대됨에 따라 국내에서도 유기성폐기물을 폐기물이라는 관점에서 벗어나 생물자원(biomass)로 재인식하고 있다. 자원 재활용과 에너지 생산 측면에서 혐기성소화는 유기성폐기물의 효과적인 감량화, 재이용화, 안정화를 만족시키는 동시에 유용 에너지원인 메탄가스를 회수할 수 있는 바이오가스 전환기술로 최근에 전 세계적으로 주목을 받고 있으며, 현 시점에서 유기성폐기물의 혐기성소화 기술을 널리 보급하기 위해서는 요소기술 개발과 정부의 적극적인 정책적 지원 방안이 마련되어야 할 것이다.

우리나라는 소비에너지의 97%를 수입에 의존하고, 2013년부터 온실가스 의무감축 대상국으로 편입이 예상됨에 따라 에너지와 환경 문제를 동시에 해결해야 하는 난제에 직면하게 될 것이 자명하며, 이에 폐기물 바이오매스를 중시하지 않을 수 없음에도 불구하고 여전히 유기성폐기물에 대한 종합 전략 수립이 미흡한 실정이다. 따라서 폐기물 바이오매스의 이용 활성화를 위해서는 우선적으로 국민들의 유기성폐기물에 대한 이해 확산과 이용 확대를 위한 정책적인 지원이 그

무엇보다 중요하며, 특히 정부의 관련 부처는 국내 전반적인 제반 여건과 활용 가능성, 기술보급 실태, 관련제도에 대한 폭넓은 검토가 있어야 할 것으로 사료된다.

References

- [1] Gujer W. and Zender A.J.B., 1983, "Convesion process in anaerobic digestion", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 15, pp. 127-167.
- [2] Parkin, G. F. and Owen, W. F., 1986, "Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludge", *J. Environ. Eng.*, 112, pp. 867-920.
- [3] Seadi, T. Al. 2002, Good practice in Quality Management of AD residues from biogas production, IEA Bioenergy Task 24.
- [4] Heo, N. H., 2005, "Status and thechnologies for biogas production of organic waste", *J. of KSES*, Vol. 4, No. 2, pp. 9-25.
- [5] Heo, N. H., 2004, High-rate anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge for the recovery of biogas, Ph.D. thesis, Chungnam National University.
- [6] Mata-Alvarez, J., 2003, Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste, IWA Publishing.
- [7] Braun R., and Wellinger A., 2003, Potential of Co-digestion, IEA Bioenergy Task 37.
- [8] IEA, 2005, Biogas production and utilisation, IEA Bioenergy Task 37.
- [9] Seadi T. Al, 2000, Danish Centralised Biogas Plants – Plant descriptions, Bioenergy Department, University of Southern Denmark.
- [10] IEA, 2007, Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection, IEA Bioenergy Task 37.
- [11] IEA, 2008. Country Reports of IEA Member countries.
- [12] Swedish Gas Center, 2007, Biogas – a renewable fuel for the transport sector for the present and the future, IEA Bioenergy Task 37.
- [13] Swedish Gas Center, 2007, Basic data on Biogas-Sweden.

허남호



1996년 (국)충주대학교 환경공학과 공학사
1998년 (국)부산대학교 환경공학과 공학석사
2004년 (국)충남대학교 환경공학과 공학박사

현재 한국농촌공사 농어촌연구원 주임연구원
(E-mail : bionhhheo@ekr.or.kr)

이승헌



1995년 (국)서울대학교 농화학과 농학사
1997년 (국)서울대학교 농화학과 농학석사
2006년 (국)서울대학교 농화학과 농학박사

현재 한국농촌공사 농어촌연구원 책임연구원
(E-mail : shyi@ekr.or.kr)

김병기



1984년 인하대학교 화학공학과 공학사

현재 한국농촌공사 농어촌연구원 수석연구원
(E-mail : kimbk@ekr.or.kr)