

자동차용 연료로서 바이오가스의 현황 고찰

이진휘[†] · 황원준 · 김재곤^{*}

서울과학기술대학교 화공생명공학과
한국석유관리원 석유기술연구소^{*}

(2013년 12월 17일 접수; 2013년 12월 30일 수정; 2013년 12월 30일 채택)

Current Situation on Biogas as a fuel for Vehicles

Jin-Hui Lee[†] · Won-Jun Hwang · Jae-Kon Kim^{*}

[†]*Department of Chemical Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
Seoul, 139-743, Korea*

^{*}*Research Institute of Petroleum Technology, Korea Petroleum Quality & Distribution Authority,
Chungcheongbuk-do, 363-883, Korea*

(Received December 17, 2013 ; Revised December 30, 2013 ; Accepted December 30, 2013)

Abstract : It is valuable research area regarding to developing manufacturing process of biogas from organic wastes take a side view of alternative for fossil energy and to improve the environmental atmosphere leads to decrease the greenhouse gas be discharged. The regulation which is prepared by environmental department shows that biogas as a transportation fuel is required to purity of above 95%, while it of natural gas is above 88%. However, in this situation it is necessary to prepare the regulation which is distributed by department of transportation as for the fuel be connected to vehicles as well in order to take step forward, and it is suggest to develop the technics of biogas this country's own original one, not be the technics imported from foreign countries, and also to turn to higher practical use of biogas for transportation area, since it shows far much less ratio have compared to other application areas.

Keywords : biogas, organic waste, regulation, transportation, bioenergy, vehicle

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 대두되었고, 이에 대응하기 위해 국가 에너지 및 자원 정책의 패러다임을 과거의 “안정적 도입”에서 “자주개발”로 전환하는 추세이다[1].

우리나라와 같이 에너지 공급의 해외의존도가 높은 나라에서는 에너지 공급의 불안정에 대한 대비책으로 국내에서 생산되는 신재생에너지의 개발이 상당히 필요한 상황이므로 정부에서는 신

[†]Corresponding author
(E-mail: jinhui@seoultech.ac.kr)

재생에너지의 개발에 힘을 쏟고 있다. 현재 국제적으로 폐기물의 에너지화가 온실가스 감축과 함께 신재생에너지의 유력한 수단으로 등장하고 있다[2-3]. 이런 측면에서 바이오가스는 자원의 순환과정에서 만들어지는 메탄가스로서 천연가스와 같이 청정한 연료로 사용될 수 있는 에너지원이며, 자원순환형이라는 관점에서 최근 국제적인 관심이 더욱 커지고 있는 에너지 자원이다.

바이오가스에 대한 인식 및 사용은 기원전으로 알려져 있지만, 실질적으로 1900년대 초 혐기성 소화공법을 통해 바이오가스 생산에 대한 연구가 시작되었다. 1930년대 생물학적 반응조 형태로 발전하였지만, 그 당시만 하여도 바이오가스에 대한 경제적 가치는 크게 주목받지 못하였다. 하지만 2차례의 오일쇼크로 인한 오일파동으로 인해 에너지 안보에 대한 중요성이 부각되면서 1970년대부터 본격적으로 에너지원으로서 바이오가스 공정연구가 진행되었으며, 1980년대 고효율 혐기성 소화 연구, 2000년대부터는 고유가 상황과 온실가스에 의한 지구온난화 및 폐기물 해양투기 금지 등으로 인해 유기성 폐기물로부터 에너지화 방안으로 발전되었다[3]. 국내 바이오연료 중 현재 보급 중인 바이오디젤은 지속적인 국내 원료 활용량 증대에도 불구하고, 전체적인 원료 수입 의존도는 크게 개선되지 않아 문제점으로 지적되고 있는 반면에, 바이오가스는 국내 폐기자원을 100% 에너지화하여 수송용 연료로 사용 가능하여 원료수급에 매우 안정적인 바이오연료로 평가받고 있다. 국제적으로 해양배출에 대해 한층 강화된 규제를 요구하는 '런던협약 96 의정서'에 따라 2012년부터 유기성 폐기물 등의 해양투기가 금지됨에 따라 이러한 유기성 폐기물의 에너지화에 따른 수송용 바이오메탄의 활용이 더욱 부각되고 있는 실정이다[4].

수많은 기술개발로 혐기성 소화에 의해 생성된 바이오가스는 CH_4 55~65%, CO_2 35~45%이며, 1% 이내의 Trace gas로 구성되어 있다는 것이 밝혀졌으며, Trace gas는 NH_3 와 H_2S , 실록세인 등으로 이루어져 있으며, 바이오가스의 활용시 심각한 문제를 야기시킬 수 있다. 메탄은 95% 이하일 경우 자동차 연료로 활용이 불가능하여 가스의 정제가 반드시 필요하며, NH_3 와 H_2S 는 강산으로 전화되어 기계장치에 치명적인 손상을 일으킬 수 있다[5]. 우리나라에서 발생하는 대표적 유기성 폐자원은 음식물쓰레기, 축산분뇨, 하수 슬러지이다. 지금까지 음식물쓰레기와

축산분뇨는 90% 이상이 사료화 또는 퇴비화 방식으로 처리되었고, 하수슬러지는 해양투기에 크게 의존하는 상황이다[6].

현재 화석연료사용의 급증으로 인한 지구온난화와 자원고갈의 문제가 전세계적으로 크게 대두되어지면서, 이를 해결하기 위해 세계적으로 재생 가능한 바이오가스의 개발에 관심을 기울이고 있다. 현재 기업에서도 고농도 유기성 폐기물 처리의 최선의 방안으로 혐기성소화를 통한 바이오가스 활용방안에 대해 기술검증 및 실증플랜트가 급속도로 확대되고 있으며, 혐기성 소화공정도 기존의 재래식 혐기성 소화에서 향상된 이상 소화, 고속 고온 발효 등 각종 변형 혐기성 소화 기술들이 설치되고 있다.

본 논문에서는 바이오가스에 대한 전반적인 현황, 바이오가스 제조방법을 단계적으로 세부내용을 조사하였다. 제조공정 다음단계로 전처리과정을 소개하고 전처리 후 정제과정을 상세히 소개하여 완제품을 생산하기까지의 핵심내용을 다루었다. 이와 같은 내용을 바탕으로 자동차용 바이오가스를 포함한 국내외 바이오가스 관련 생산현황 및 연구현황, 정부정책을 파악하여 바이오가스와 관련하여 전반적인 정책을 수립하는 데 참고 자료로 활용할 수 있도록 하였다.

2. 이론

2.1. 제조 이론

혐기성조건하에서 유기물이 메탄으로 분해된다는 사실은 1776년 이태리 물리학자 A.Volta가 식물체가 부식하는 늪지에서는 많은 양의 가연성 기체가 발생한다는 사실을 관찰한 이래 꾸준히 연구가 되어 왔으며, 1868년 Bechamp는 메탄생산이 미생물의 작용이라는 사실을 밝혔다. 메탄발효에 관여하는 모든 미생물은 산소에 대하여 민감한 절대 혐기성균(strict anaerobe)이기 때문에 메탄발효에 관여하는 미생물을 순수 분리하여 연구가 되기 시작된 것은 극히 최근의 일이다. 유기물의 농도가 높고 산소의 공급이 제한되어 있는 생태계에는 거의 모두 메탄이 생성되고 있다. 담수나 해수의 침전물 층, 동물의 내장, 혐기성 소화조, 쓰레기의 매립장 등에서 메탄발효가 일어나고 있는 것은 잘 알려진 사실이며, 살아있는 나무, tundra, 온천지 등 다양한 환경에서도 메탄발효가 이루어지고 있다. 다당류를 비롯한 당류,

단백질, 지방 등 모든 유기물이 포함된 폐기물이 메탄발효의 기질로서 이용된다. 메탄 생산균은 초산, methanol, formate, methylamine, 일산화탄소, 수소 및 이산화탄소 만을 기질로 이용할 수 있기 때문에 상기한 유기물이 메탄으로 발효될 때까지는 최소한 3종류 이상의 미생물군이 작용한다[7].

혐기성소화는 유기물을 여러 미생물의 분해작용에 의하여 메탄으로 전환하는 일련의 프로세스이고, Fig. 1과 같이 나타내진다. 그림에서 고품질의 유기물을 액상화하고, 가수분해하는 과정, 식초산, 프로피온산, 부틸산을 생성하는 저급지방산(휘발성유기산, VFA)을 생성하는 과정, 이들을 식초산 및 H₂가스로 분해하는 과정, 이들 산물을 이용하여 메탄을 생성하는 과정이다. 예전에는 부틸산 및 에탄올로부터 메탄을 생성하는 미생물이 알려져 있었으나, 이들은 하나의 균이 작용하는 것이 아니고, 공생미생물에 의한 것으로 밝혀졌다. 실제로는 하나의 반응조내에서 미생물군이 공생계를 만들고, 연계된 반응, 메탄발효가 진행된다[2,6,9]. 원료의 소화효율을 높이기 위한 전처리기술, 메탄의 순도를 높이기 위한 정제기술, 체류시간을 줄이기 위한 기술, 부산물로 발생하는 액비 생산기술 등의 관련 기술이 지속적으로 연구되고 있고 기술개발 규모도 점차 늘려가며, 실증 연구 규모의 설계기술을 확보하고, 상용화를 위한 기술개발을 진행하고 있다. 기술개발에서 실증 단계로 이어진 대표적인 사례로는 한국과학기술연구원과 대우건설의 혐기소화 실증 플랜트가 있다[8].

2.2. 제조방법

혐기성소화란 산소 부재상태에서 유기물을 분해하기 위해 미생물을 이용하는 생물학적 공정이 다.

Fig. 2는 혐기성소화의 단계적 설명이다[8]. 이 그림은 혐기성 소화를 5단계로 나눠 설명한 것으로, 혐기성 소화조 내에서의 유기물 소화는 밀폐공간인 반응조 내에서 일어난다. 또한, 가스발생량과 폐기물 분해속도를 극대화하기 위해서는 반응조 내의 수분함량, 온도, pH와 같은 환경조건들이 중요하다. 혐기성소화는 다양한 유기물을 분해, 안정화시키는 데 필요한 가수분해단계, 산생성단계, 메탄생성단계로 구성된다[9-10].

2.2.1. 가수분해단계

1차로 지질(Fats)은 세포의 효소인 Lipase에 의하여 가수분해 되는데, 단순지질의 경우 1몰의 중성지질로부터 1몰의 글리세롤과 3몰의 고급지방산이 생성된다. 글리세롤은 알코올의 분해경로에 따라서 더 분해되며, 고급지방산은 보다 저급의 지방산을 거쳐 아세트산과 수소로 분해된다. 그러나 조건에 따라서 프로피온산과 브티르산으로 될 때도 있다. Cellulose의 경우 주로 섬유소, 반섬유소성분 등의 복합고분자의 형태로 유입되며 이러한 고분자물질이 세포에 의하여 최종적으로 대사되려면 먼저 물에 용해되어 저분자로 분해되어야 한다. 따라서 그러한 기질에 대한 혐기성반응의 선행단계는 가수분해이며, 그러한 가수분해는 여러 세균으로부터 각각 특이하게 분비되는 세포외 효소에 의하여 연쇄적으로 수행된다.

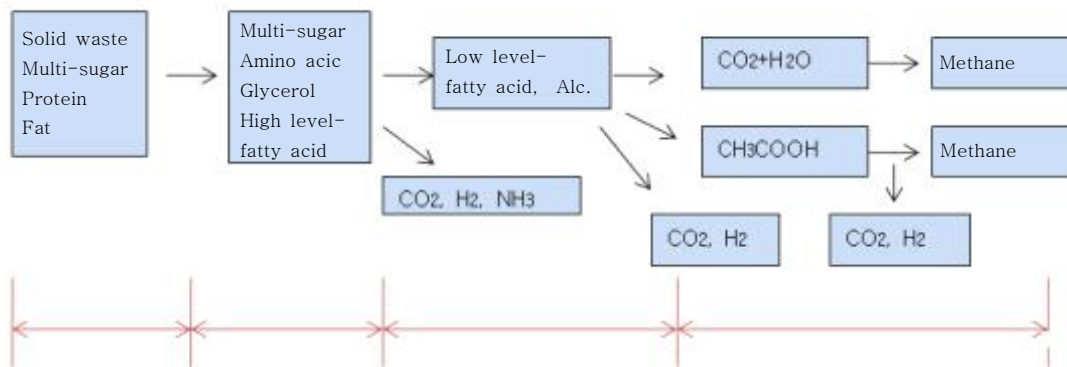


Fig. 1. Decomposition phase of organism by anaerobic digestion.

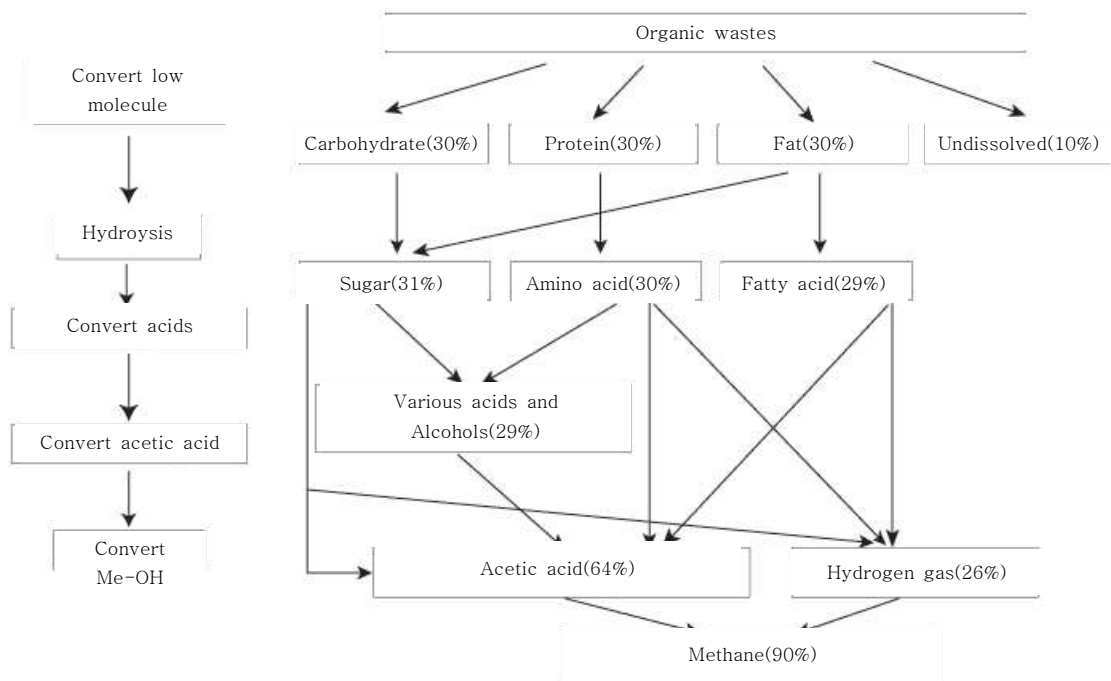


Fig. 2. Stages of biogas production from organic wastes.

Cellulose는 가수분해에 의하여 포도당으로 분해되며, 이렇게 분해된 저분자물질은 세포에 의하여 섭취된 후 이화 및 동화된다[11].

2.2.2. 산생성 단계

산생성 단계에서는 산생성균에 의해 가수분해 산물이 프로피온산, 부틸산, 아세트산, 기타 저분자 유기산 및 수소, 이산화탄소로 전환된다. 가수분해 단계에서 생성된 용존성 저분자 유기물을 프로피온산, 부틸산으로 분해시키는 미생물은 산생성균이고, 이들 미생물에 의해 생성된 유기산을 아세트산으로 분해하는 미생물은 아세트산 생성균이다. 산생성균은 메탄생성균에 비해 증식속도와 기질 이용속도가 빠르고 환경변화에 더욱 안정적인 특성을 지니고 있다. 산생성단계는 가수분해되어 생성된 단당들이 프로피온산이나 부틸산까지 분해되는 단계와 프로피온산 등을 이용하여 최종적으로 아세트산으로 분해되는 acetogenic 단계로 나누어지는데, 이 단계에서는 기질이 분해되어 메탄형성의 기질인 아세트산, 수소가스, 이산화탄소가 만들어진다[10].

2.2.3. 메탄생성단계

혐기성소화의 마지막단계로 수소를 기질로 이용하여 메탄을 생성하는 미생물군인 Hydrogenotrophic Methanogens와 아세트산을 기질로 이용하는 미생물군인 Acetoclastic Methanogens에 기인한다. 두 종류의 미생물군은 절대 혐기성균이며 기질이용과 동력학적 특성에 있어서 상이한 특성을 가지고 있으며, 메탄생성균은 산생성균에 비해 pH, 온도, 독성물질 등 환경변화에 매우 민감하고, 증식속도나 기질 이용률이 낮다. 따라서 혐기성 소화조의 효율을 향상시키기 위해서는 운영관리상 여러가지 환경조건을 적절하게 관리하여야 한다. 특히 가수분해단계가 전체공정의 율속단계로 작용하고 있기 때문에 혐기성 소화공정에 있어서 가수분해를 촉진시키기 위한 기술의 도입은 전체 혐기성 소화공정의 소화효율 및 바이오가스의 생산을 향상시키는 데 있어서 가장 중요하다고 할 수 있다[9-10].

2.3. 바이오가스의 전처리 기술

일반적으로 메탄액화과정에서 요구되는 바이오가스 성상의 기준은 H₂S와 무기물질의 농도가

20 ppm이하, VOCs 농도 20 ppm 이하, 수분의 이슬점(dew point)이 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이하, 압력이 8 bar 이상의 조건이 되어야 한다. 이러한 조건과 CH_4 농도가 97 % 이상인 고순도의 LNG(Liquefied Natural Gas)를 생산하기 위해서는 다양한 성상을 가지는 바이오가스의 전처리과정이 필수적이다. 전처리과정은 크게 탈황설비, 생물학적처리, 실록세인 제거방법 등이 있다. 혐기성소화 과정을 통해 생성된 바이오가스는 탈황설비에서 NaOH 세정법으로 고농도 황화수소를 처리한 후 액화공정에 필요한 압력을 공급하는 압축설비를 거친다. 압축된 가스는 열교환기를 통한 냉각제습으로 대부분의 수분을 제거한 후 활성탄흡착법으로 VOCs, Siloxanes과 전 공정에서 제거되지 않은 H_2S 를 제거하는 흡착설비를 거친 후 TSA 공법의 흡착제습설비로 이슬점까지 수분을 완전히 제거시켜 전처리과정을 완료한다[11].

2.3.1. 탈황기술

H_2S 는 가스배관용 파이프나 가스미터 기타 사용기기의 부식작용을 초래하는 원인으로 작용하기 때문에 대부분의 혐기성 소화공정은 H_2S 제거시스템이 포함되어 있다. Table 1은 바이오가스 중 포함된 황화수소(악취물질)를 제거하기 위한 방법을 크게 물리적, 화학적, 생물학적 처리방법으로 나눈 것이며[4], Table 2은 세부적으로 건식, 습식으로 나눈 표이다[5]. 표에서 건식탈황의 장점으로는 초기투자비가 적으며 비교적 소규모 설치가 용이하나, 단점으로는 일정한 효율을 얻기 어려우며, 탈황제 교체주기가 짧아 유지비용이 많이 드는 점이다. 습식탈황의 기본원리는 세정수에 의한 흡수세정처리에 의한 것이며, 장점으로는 유지비가 적으며 일정한 제거율을 갖는다는 것이나, 단점으로는 초기투자비가 많이 들며 폐수 재생시 황화수소 발생이 가능하다는 것이다[5,11].

2.3.2. 생물학적 처리방법

생물학적 처리방법은 미생물의 대사 작용을 이용한 것으로 반응기의 담체를 통과한 가스내의 황화수소는 담체에 부착된 미생물에 의해 생물학적으로 산화, 분해되어 제거된다. 생물학적 황화수소 제거 공정은 상온, 상압하에서 진행되므로 장치가 간단하여 투자비가 적게 소요되며, 공해물질의 발생을 최소화 할수 있는 장점이 있어 관심이 증가하고 있다. 그러나 미생물을 이용하는 바이오필터의 경우에는 고농도 황화수소 처리시 장치크기가 매우 크며, 제거효율을 보증하기 어려운 문제점이 있다[11].

2.3.3. 실록세인 제거기술

이론적으로 실록세인 가스의 액체 흡수는 thin film theory에 따른다. 물질 전달은 실록세인 가스의 액상으로의 확산속도, 물질전달 표면적, 기상과 액상의 실록세인의 농도차에 의존한다. 상업적으로 생산된 polypropylene glycol 용액, 순수 메탄올은 실험실 impinger 실험에서 효과적인 흡수제로 확인을 받았다. 그러나 물로 희석된 50:50 메탄올 용액은 순수 메탄올 용액에 비해 6%의 제거효율을 보였다. 더욱이 고농도의 메탄올은 폭발성 등의 심각한 안정성 문제 및 독성 때문에 상용화가 어려운 흡수제이다. 주변 필름까지 실록세인의 벌크 확산과 필름, 고체의 미세공극까지의 확산에 의존한다. 실록세인 같은 높은 분자량은 미세공극 지름이 $10\sim 100\text{ \AA}$ 가 적당하다. 흑연에 기초한 활성탄, 코코넛 셸에 기초한 활성탄을 사용한 365 psig 흡착탑에서 소화조 가스로부터 실록세인 흡착실험을 위한 파이롯 플랜트를 건설한 바 있다[3-4,10].

2.4. 정제기술

바이오가스란 슬러지류 및 유기성 폐자원(음식

Table 1. Physical, chemical and biological desulfurization methods

Classification	Treatment
Physical methods	Wash, Liquefaction, Adsorption, Dilution
Chemical methods	Oxidation: Direct, Indirect Chemical treatment: acid/alkali wash, neutralization, melting by catalysis
Biological methods	Active sludge, Biofilter, Separation by soil

Table 2. Comparison of hydrogen sulfide removal technology

Classification	Desulfurization by dry method	Desulfurization by wet method
Basic theory	Adsorption by desulfurizing agent	Adsorption by washing water
Methods	Pellet of Iron Oxide(II) in the adsorption tower	Solvation by mixing of water(1m ³) and Hydrogen sulfide(2.8m ³) at 20°C, 1atm
process	Below than 90%, decreased by the time passed and so after saturation point abruptly	- about 60% when use water only - 85-99% when add chemicals of alkalis
Advantage	Early investment is small and easy to establish in case of small size	Maintenance fee is small and constant removal ratio
Disadvantage	- Difficult to get constant efficiency - Maintenance fee is large because of short-term period of changing - Should be paid treatment fee by indicated method of waste	- Early investment is large - Possibility of releasing hydrogen sulfide when renewal of waste water
Facilities	Adsorption tower	Absorption tower, Circulation pump, Pump for chemicals supply, Control pannel, Chemicals storage tank
Special mention	- Should be consignment treatment for waste of desulfurizing agent waste - When exceed the capability of desulfurization, increase the concentration of H ₂ S abruptly	- Can be treat waste water in the own facility which is the place of waste water treatment

물쓰레기, 가축분뇨 등)이 미생물에 의해 분해되면서 생성되는 메탄과 이산화탄소등이 포함된 바이오가스 중에서 이산화탄소를 제거한 순수한 가스를 말하며, 천연가스와 같이 청정하면서 연료로 사용되고 있는 에너지원이다. 바이오가스의 경우 함유된 메탄조성이 60~80% 수준인데 반해, 운송용 연료인 CNG나 도시가스 등은 대체로 메탄의 구성비가 91%이다. 천연가스와 비슷한 발열량을 맞추기 위해 대략 바이오가스의 메탄함량을 96% 이상으로 향상시키고, 생성된 바이오가스는 천연가스와 같은 공급 설비를 통해서 공급할 수 있도록 한다. 이렇게 메탄함량을 향상시키기 위한 고질화 방법을 정제기술이라고 하며, 흡수법, 흡착법, PSA의 원리, 막분리법, 침냉법을 이용하여 바이오가스 중에 메탄 다음으로 많은 이산화탄소등을 제거함으로써 메탄의 순도를 향상시킬 수 있다[11].

2.4.1. 흡수법

액체상태의 용매에 혼합물 형태의 바이오가스를 통과시킴으로써 용매에 잘 용해되는 물질을 제거하는 고질화 기술 중의 하나이다. 일반적으로 흡수액으로는 물과 아민(amine)을 많이 사용하며, 물리흡수기술은 용매인 물에 용질인 이산화탄소가 용해되는 메커니즘을 보이는 반면, 화학흡수기술은 용질이 용매에 용해 및 화학반응을 통해 제거되는 메커니즘을 보인다. 고압수 흡수법(water scrubbing)은 실제 공정에서 많이 사용되는 흡수법으로써 바이오가스의 압력을 높여 흡수액인 물과 효과적으로 접촉시킴으로써 바이오가스 내 이산화탄소를 제거하는 기술이다[3,11].

화학흡수법에 의한 이산화탄소 분리기술은 오래 전부터 개발되어 1930년대에 처음 흡수제로 TEA(triethanol amine)를 사용한 것을 비롯하여 분리효율을 높이기 위해 현재까지 MEA, DEA 그리고 MDEA 등 여러 가지 알카놀아민류가 개

발되었다[3,5,11].

2.4.2. 흡착법

황화수소를 제거하는 물리적 방법 중 흡착법은 흡착제에 악취물질을 통과시키는 과정에서 악취물질이 흡착제와 공극사이에 흡착되는 특성을 이용하여 악취물질을 제거하는 방법이다. 흡착제는 활성탄, 제올라이트, 합성제올라이트, 분자체탄소, 실리카겔 등 종류가 다양한데 현재 활성탄이 가장 많이 사용되고 있다. 활성탄으로 효과적으로 제거 가능한 것은 지방산류, 메르캅탄류, 페놀류, 탄화수소류(지방족 및 방향족), 유기염소화합물, 알콜류(메탄올 제외), 케톤류, 알데히드류(포름알데히드 제외), 에스테르류 등이다. 어느 정도 제거되는 것은 황화수소, 아황산가스, 염소, 포름알데히드, 아민류 등이고, 거의 효과가 없는 것은 암모니아, 메탄올, 메탄, 에탄 등이다. 흡착법의 장점은 건식조작으로서 습식조작과 달리 배수나 배액을 처리할 필요가 없으며 설비가 비교적 싸고 유지관리가 쉬우며 광범위한 악취가스 제거에 효과적이다. 단점으로는 활성탄 등의 흡착제 재생 문제로서 유지관리비용, 적절한 흡착제의 주기적 교체가 필요하다[5,11].

2.4.3. PSA의 원리

PSA(Pressure Swing adsorption)는 압력순환공정이라고 하며, 어떤 흡착제와 혼합가스로 이루어

진 계내에서 압력순환에 의해서 생기는 흡착 평형량의 차이를 이용하여 혼합가스 중 특정성분을 선택적으로 분리하는 가스분리기술이다. PSA의 조작방법은 크게 평형분리법과 속도분리형으로 구분된다. PSA조작은 대부분 평형분리형이며 속도분리형은 흡착제에 있어서 각 가스성분의 흡착 속도의 차이를 이용하는 것으로 대표적인 흡착제로는 Molecular Sieve Carbon을 사용한다. Fig. 3은 PSA 탑 내 가스흡착원리를 도식적으로 나타낸 그림이다. 그림은 이산화탄소를 잘 흡착시키는 활성탄이나 제올라이트 계열의 다공물질을 충전한 Vessel에 바이오가스를 통과시켜 이산화탄소를 흡착분리시키며 다공물질에 이산화탄소가 가득 충전되면 다른 새로운 Vessel에 통과시키는 것으로 2개의 이산화탄소 흡착라인을 만들어 교대로 이산화탄소 흡착과 다공물질을 재생시키는 방법이다[4]. Fig.4는 운전 스텝 각 공정에서의 탑 내 압력, 흡착제, 흡착베드의 상태를 도식적으로 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 일반적으로 PSA 공정에서는 비흡착성 가스를 배출하는 측과 흡착성 가스를 배출하는 측이 분리되어 있어 가스의 순도를 높게 유지시키고 있다. 흡착제의 유동화 방지나 가스유속을 고려하여 일반적으로 공급가스는 흡착제의 하부에서 상부로 공급되고 퍼지가스는 상부에서 하부로 공급된다. 흡착조작은 높은 압력에서 행해지며 흡착제가 흡착가스로 포화되기 전에 공급가스의 흐름을 별도의 흡착탑으로

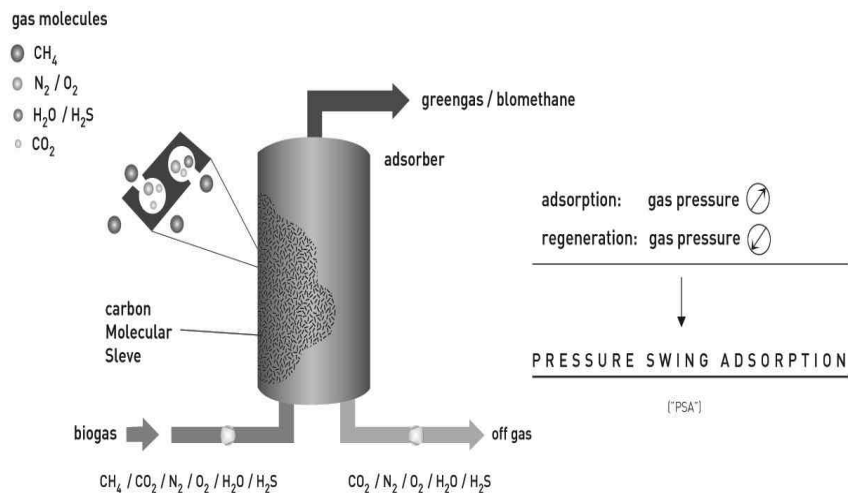


Fig. 3. Adsorption principle of PSA.

교체한다. 감압탈착 공정에서는 흡착성가스를 공급가스 입구방향으로 뽑아낸다. 단 탑 내 정상부분에 잔류하는 고순도 비흡착성가스를 회수하여 분리효율(회수효율)을 올리려고 할 경우에는 비흡착성가스 부분은 흡착성가스와 반대방향으로 회수한다. 압력을 내린 만큼 재생이 충분하지 않은 경우에는 감압조작으로 회수하거나 또는 흡착조작에서 얻어지는 비흡착성가스 일부를 흡착베드의 상부로부터 하부방향으로 흘러보내 재생효율을 높인다[5,11].

2.4.4. 막분리법

막분리법은 분리막을 사용하여 특정한 성분을 선택적으로 투과하여 가스를 분리하는 방법으로 세라믹막, 고분자막, 금속막 등이 있으나, 바이오가스 중의 이산화탄소 제거에는 고분자막이 사용된다. 분리막에서 가스분리는 용해 및 확산과정을 거쳐 기체를 분리한다. 소용량의 기체분리에 적합하며, 상변화를 동반하지 않으므로 에너지절감과 설치면적이 적게 소요된다. 그러나 불순물에 의한 막의 폐쇄와 바이오가스의 승압이 필요하고 별도의 실록산, 황화수소 제거장치가 필요하다. 또한 고가이고 재사용이 어려워 설치비 및 운전비가 높다[3,11].

2.4.5. 심냉법

심냉법은 바이오가스 중의 이산화탄소를 압축

냉각공정을 거쳐 액체상태로 변화시켜 제거하는 방법으로 이산화탄소는 $-78.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이하에서 액체상태로 존재하며 메탄은 온도가 $-161\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이하일 때 액체로 전환된다. 실록산, 수분의 동시제거도 가능하나, 바이오가스 중의 이산화탄소 농도 변화가 클 경우 분리효율이 감소하며, 설치비가 고가이고 운전시 많은 에너지를 필요로 한다. 대용량의 바이오가스 정제공정에 적합하다[3-4,10].

3. 현황

3.1. 이용현황

혐기성 소화가스를 이용한 바이오가스 이용방안은 3세대로 구분할 수 있다. 제1세대는 메탄가스를 소화조 가온 및 난방에만 제한적으로 사용하는 것으로 우리나라 대부분의 하수처리장이 이에 해당한다. 제2세대에서는 발전과 열회수가 동시에 가능한 열병합발전으로, 발전된 전기는 펌프 및 기계용 동력 등의 소내전력으로 사용되고, 폐열은 소화조 가온 및 난방에 사용된다. 최근 적용되고 있는 제3세대 시스템은 연료전지를 이용한 발전으로 메탄으로부터 수소를 추출하여 전기를 생산하고 폐열을 난방으로 이용하는 방법이다. Fig.5는 국내 하수슬러지의 혐기성소화에 의해 발생하는 바이오가스의 자원화 현황을 나타낸 그림이다[8]. 그림에서 소화가스 중 대부분인 약 80%

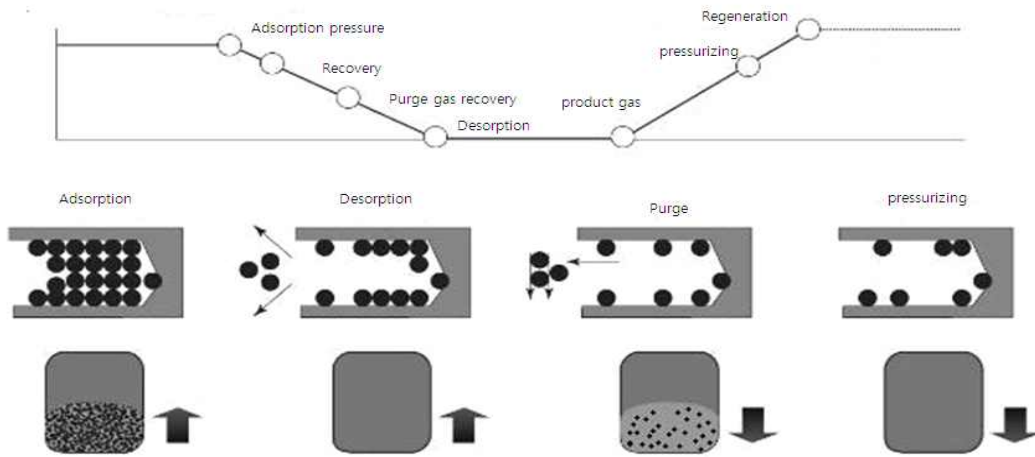


Fig. 4. The stages of adsorption, desorption and regeneration in the PSA.

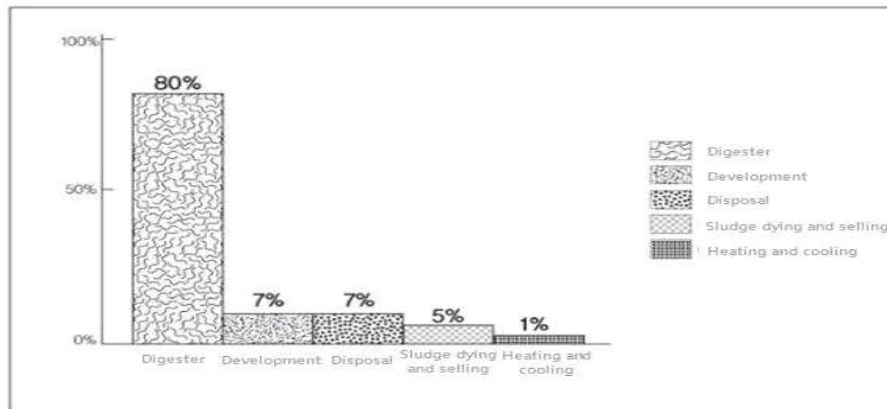


Fig. 5. Domestic Biogas Utilization.

가 소화조에서 가온에 사용되고 있다. 그리고 나머지 20 %는 슬러지 건조 및 판매에 5 %, 발전에 7%, 처리장 냉난방 등에 1%가 이용되고, 7 %는 소각 등으로 폐기되고 있다. 국내에서는 쓰레기 매립지의 LFG(Landfill Gas)가스를 이용한 열병합 발전은 상용화 단계에 있으나 가축분뇨, 하수처리장 슬러지, 음식물류 폐기물 등의 유기성 폐기물로부터의 바이오가스화에 따른 열병합발전은 아직 연구·실증화 단계에 있다[9,12, 13-15].

유럽연합(EU)의 2011년도 바이오가스 이용량은 전년도에 비해 약간 감소하였지만 이는 주요 생산국인 독일이 통계방식을 바꾸었기 때문이며, 바이오가스 전력 및 열 생산량은 모두 약간씩 증가하였다. EU 전체의 일차에너지 소비량은 감소하였지만 바이오가스 전력과 열 생산량이 증가하였고 이것은 새로운 시장이 개발되고 있기 때문이다. EU는 2020년까지 일차에너지 수요 중 20%를 재생에너지로 공급하기 위한 재생에너지 실행계획을 수립하였으며 여기에는 바이오가스 이용 확대정책도 포함되어 있다. EU의 2010년도 바이오가스 전력 이용량 목표치는 28.7×10^{12} Wh이었으나 실제로는 30.3×10^{12} Wh를 달성하여 목표를 초과하였다. 2011년도 전력 생산량은 35.856×10^{12} Wh이며 이러한 증가추세에서는 2020년까지 65×10^{12} Wh를 달성하여 목표치인 63.972×10^{12} Wh를 초과할 전망이다. 바이오가스 열 판매량은 2010년도 목표치가 $6,718 \times 10^9$ Wh이었는데 실제로는 $6,705 \times 10^9$ Wh를 생산하여 목표를 거의 달성하였다. 2011년도 판매량은 $8,632 \times 10^9$ Wh이며 이러한 증가추세에서는

2020년까지의 목표인 $20,345 \times 10^9$ Wh를 초과하여 $20,455 \times 10^9$ Wh를 달성할 것으로 전망되고 있다. EU가 2020년까지의 목표를 달성하기 위해서는 재생에너지 증가량의 절반 이상을 차지하는 바이오매스 에너지 이용량 목표치를 달성해야 한다. 바이오가스 목표치를 달성하기 위해서는 바이오가스 생산시설의 효율을 개선하는 것이 가장 시급하다. 또한 지금과 같이 바이오가스 전력 생산에만 집중할 것이 아니라 바이오메탄의 생산량 확대와 천연가스 네트워크 공급량을 늘려나갈 것이다[19].

3.2. 국내의 생산현황

바이오가스 생산은 정부에서 추진하고 있는 저탄소 녹색성장으로 인해 더욱 그 가치의 중요성이 부각되고 있다. 우리나라는 스웨덴 SBF(Scandinavian Biogas Fuel)사의 바이오가스 생산 기술을 이용함으로써 소화효율을 개선하고 바이오가스 발생량을 극대화하였다. 전국 403개 공공하수처리시설 중 소화조가 설치된 처리시설은 65개소이며 이중 57개소에서 총 64개 소화조를 운영 중이다. 하지만 국내 소화조의 효율은 유입수질 저하, 운영, 관리 미숙으로 인해 선진국의 1/4 수준으로 에너지 이용률이 미미한 편이다. 우리나라의 경우, 2011년에 대기환경보전법을 통해 자동차연료로서 바이오가스 제조기준이 마련되어 대기환경을 위한 황함량(10 % 이하)을 규제하고 메탄가스의 순도 및 불순물로서 이산화탄소, 산소, 질소 및 수분의 함량을 규제하고 있다[3,18]. 국내에서는 매립가스의 경우 예상에 못 미치는

가스 배출량, 잦은 설비 트러블 등으로 낮은 설비 이용률(60 %)과 이에 따른 수익성 악화가 문제가 되고 있으며, 발전차액 지원도 낮은 수준이다. 유기폐기물을 이용한 바이오가스 시설의 경우는 가스 및 전기 판매, 폐기물 재처리, 퇴비 판매 등의 수익 모델 및 향후 탄소배출권 사업을 추진하고 있으나 발전용량이 큰 대규모 사업장과 비교적 소규모 사업장은 정부지원이 절실하나 대규모 사업장도 극소수에 불과하고 발전차액지원제도가 없을 경우 수익성이 큰 폭으로 감소했다. 전반적으로 과도한 투자비와 이로 인한 금융비용이 큰 부담으로 작용하고 있다[19].

3.3. 수송용 바이오가스의 국내외 현황

국내에서 바이오메탄이 수송용 연료로 사용되기 위해서는 현재 제정되어 있는 대기환경보전법 시행규칙 품질기준에서 한발 더 나아가서, 수송부문을 담당하고 있는 정부 부처에서도 또한 연료 품질기준 및 제조기준을 설정하여야 한다. 바이오가스는 석유 및 석유대체연료 사업법 시행령 제5조의 석유대체연료로서 분류되어 있다(2009.4). 최근에 정부는 기존 LNG, LPG+Air 이외에 바이오가스, 나프타 부생가스 등을 도시가스의 범주에 새롭게 포함시키는 내용으로 도시가스사업법을 개정(2009.3)하여 대체천연가스의 효율적 활용을 도모할 계획에 있다. Table 3은 자동차용 연료로서의 바이오가스 대기환경보전법 시행규칙 품질기준이다. 바이오가스의 경우는 천연가스 차량의 구조변경 없이 그대로 적용이 가능한 연료이기 때문에 바이오가스의 자동차 연료화를 위해서는 수송용 연료로의 활용을 고려하여 제조기준을 제시할 필요가 있다. 표에서 바이오가스의 자동차 연료 제조기준을 신설하였는데, 바이오가스의 메탄 함량을 95부피% 이상으로 설정하고 있다[4]. Table 4는 국내 바이오메탄의 대기환경보전법 시행규칙 제115조 관련 천연가스 제조기준이다. 표와 같은 품질로 바이오메탄은 수송용 CNG 또는 LNG에 혼합하여 사용할 수 있다.

Table 5는 국내 바이오메탄 개발 현황이다. 표와 같이 최근에는 국내에서도 바이오가스의 고질화 공정에 의해 수송용 자동차 연료와 천연가스 배관망 주입을 위해 외국기술을 도입하여 바이오메탄을 생산하여 시범운영하고 있다[4]. 표 중에서 에코에너지홀딩스사는 스웨덴 업체인 Flotech 사로부터 물 흡수 방식의 이산화탄소/메탄 분리 기술을 도입하여 서울시 서남물재생센터의 혐기

성소화조에서 발생하는 바이오가스를 2,940 m³/일 수준으로 정제하는 플랜트를 2009년에 완공하여 바이오메탄을 생산하고 있다. 생산되는 바이오메탄은 초기에 마을버스에 공급하여 시범운영하다가 최근에는 영업용 택시에 공급 중에 있다.

Table 3. Quality standard of Biogas as a transportation fuel in clean air conservation act in Korea

Item	Specification
Methane(vol. %)	Above 95
Water(mg/Nm ³)	Below 32
Sulfur(ppm)	Below 10
Inert gas(CO ₂ , N ₂ etc.)(Vol. %)	Below 5.0

Table 4. Quality standard of natural gas in clean air conservation act in Korea

Item	Specification
Methane(vol. %)	Above 88.0
Ethane(vol. %)	Below 7.0
Hydrocarbon more than C ₃ (vol. %)	Below 5.0
Hydrocarbon more than C ₆ (vol. %)	Below 0.2
Sulfur(ppm)	Below 40
Inert gas(CO ₂ , N ₂ etc.)(Vol. %)	Below 4.5

한라산업개발은 현재 수도권매립지에 캐나다 업체인 Xebec사의 흡착공정인 PSA 기술을 도입하여 음식물 폐수에서 생산되는 바이오가스를 고질화하여 바이오메탄을 생산하는 플랜트를 2011년 6월 완공하였다. 하루 약 800톤의 음식물 폐수에서 생산된 바이오가스(약 10,000 m³/일)을 정제하여 충전소에서 CNG와 바이오메탄(약 6,500 m³/일)을 77:23 비율로 혼합하여 자동차 연료로 공급할 예정이다. 한편, 바이오가스의 고질화 공정을 외국기술에 의존하는 것에서 벗어나 국산화시키는 노력도 최근에 한국가스공사와 현대건설을 중심으로 원주 하수처리장에서 PSA 분

Table 5. The status of project for development of biomethane in Korea

Operator	Final Product	Amount of BG (Nm ³ /hr)	Facility site	Separation process	Status	Consumer
Hansol EME	LBM	300	Sudokwon Landfill Site	PSA	Trial run	R & D
Scandinavian Biogas	CBM	600	Yongyon, Ulsan City	Cryogenic method	On Construction	SK Chemical
Halla Energy and Environment	CBM	600	Sudokwon Landfill Site	PSA	On Operation	CNG Bus, Plumbing BG
ECO Energy	CBM	210	Sunam, Seoul	Absorb Water	On Operation	CNG Bus
KRICT	CBM	6	-	Membrane separation	On Operation	R & D
Hyundai Eng. & Con.	CBM	250	Wonju	PSA	Trial run	CNG Taxi Co.

리공정으로 자동차용 개발하여 CNG 택시에 적용할 예정에 있다[4].

유럽 바이오가스 생산 잠재력은 천연가스 소비의 12 %에서 20 %까지 대체할 수 있다. 그러나 높은 투자비용과 거대한 기반구축으로 인해 단지 바이오가스 생산의 15 %만 정제되고 있으며, 천연가스 대체는 외견상으로 미미하다. 매년 2×10^9 W에 상당하는 시간당 약 130,000 m³의 정제되지 않는 바이오가스가 유럽 내에서 정제되고 있다. 바이오가스의 가장 큰 잠재력은 전체 약 80 %가 나오는 농업에 있다. 밀집된 가스 배관망을 가진 대부분의 유럽나라들에게는 가스배관망에 대한 바이오가스 주입에 있어 매우 좋은 기회이다. Fig. 6은 유럽에서의 바이오가스의 사용처를 나타낸 그림이다[19]. 그림에서 바이오가스의 사용처는 내부 연소(28 %)를 위한 열원, 기존 땅에 전기/가스의 주입(19 %), 열병합 발전의 원재료로 정제된 가스(3 %), 자동차 바이오가스 연료(1 %)이다.

자동차 연료로 생산되는 바이오가스의 대부분은 지방자치단체의 분뇨와 오폐수, 그리고 50,000명 규모에서 나오는 재생 불가능한 쓰레기에서 발생한다. 바이오가스 연료가 약 20,000명을 헤아리는 도시로부터 생산 가능하다고도 하지만, 이는 그 도시의 대규모 산업 활동에 의한 것이다.

현재 바이오가스 자동차를 운행하는 유럽 도시는 약 12개이며, 주의 정책과 환경위원회에서 이들 프로젝트를 지원하고 있다. 바이오가스 연료

사용에 있어서 가장 진보된 나라는 스웨덴과 스위스이다. 독일은 시장의 변화에 부응하기 위해 바이오가스 기기 제조업체들이 7.5×10^4 W 이하의 소형 혐기성 소화기를 개발하고 있고 슬러리를 원료로 메탄가스를 생산하는 기술을 사용하여 새로운 공정을 개발하고 있다.

미국은 정부주도의 상용화 기술개발과 보급을 추진하고 있으며, 2017년까지 바이오연료를 1.32×10^8 m³ (전체 수송용 에너지의 15 %)까지 끌어올린다는 목표를 설정하였다. 미국의 GE, Shell, Primenergy, Community power 등의 기업들이 석탄 가스화기를 목질계 바이오매스 가스화 공정에 적용하여 바이오에너지로 상용화 단계에 있다.

영국의 2011년도 바이오가스 이용량은 $8,022 \times 10^9$ Wh이며 유럽 2위이다. 바이오가스 이용의 대부분은 매립지 메탄가스이며, 2011년도 매립가스 이용량은 $6,738 \times 10^9$ Wh이다. 2011년의 신규 혐기성 소화기 설치개수는 78기(총발전 용량 7.5×10^7 W)이다[19].

이탈리아는 바이오가스 장려정책을 실시하고 있지만 독일과 마찬가지로 재정 부담 때문에 인센티브를 점차 감소시키고 있다. 2013년부터 유기물을 원료로 생산된 1×10^6 W 이하의 바이오가스 발전시설에 대한 고정우대 가격을 1/2 정도로 낮추어 1.4×10^{-4} 유로/Wh를 적용하고 있다. 또한 유기물 부산물이 원료인 경우는 36.4 %가 낮아진 1.78×10^{-4} 유로/Wh, 폐기물이 원료인 경우는 20 %가 낮아진 2.16×10^{-4} 유로/Wh가 적

용된다[20].

핀란드는 자국의 풍부한 바이오매스자원의 효율적인 이용차원에서 바이오매스 가스화 공정에 매우 많은 관심을 기울이고 있다. 핀란드 국가연구소인 VTT(Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus)에서는 기존의 바이오매스의 가스화 공정 효율을 높일 수 있는 새로운 방식의 가스화 반응기 개발 및 기존 반응기의 개선 또는 여러 유형의 바이오매스 자원의 효율적 가스화를 위한 R&D에 많은 투자를 하고 있다.

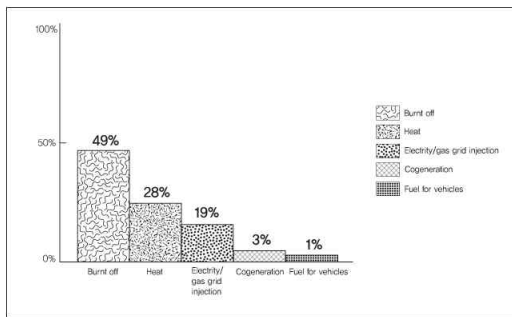


Fig. 6. Use of biogas in Europe.

Table 6. The status of upgrading plants of biogas(2010)

Countries	The numbers of plant for BG
Germany	56
Sweden	52
U.S.A.	28
Swiss	18
Netherland	7
Austria	5
Other Europe Countries	14
Japan	4
Canada	2
Total	186

네덜란드는 현재 옥수수나 곡물의 발효공정으로 생산되는 1세대 바이오연료(바이오에탄올/바이오디젤)를 합성가스를 화학적 또는 생물학적으로 변환시켜 액상의 바이오연료(합성디젤/가솔린)를 생산하는 2세대 바이오연료화 기술개발을 목표로 다양한 바이오매스를 활용할 수 있는 가스

화 공정 개발에 주력하고 있다. 현재 Buggenum에 위치한 Willem-Alexander Central shell IGCC 가스화 공장에서는 연간 185,000ton의 여러 유형의 바이오매스, 즉 하수슬러지, 계분과 목질바이오매스 등을 활용하고 있다[20].

Table 6은 세계적인 바이오가스 고질화 플랜트 설치현황이다. 2000년 이후부터 본격적으로 플랜트가 설치되기 시작하였으며, 2006년부터 플랜트 수가 급속도로 증가하였다. 바이오가스 고질화 기술은 크게 이산화탄소/메탄 분리기술로 분류할 수 있는데 흡착법(47개)과 물 흡수법 방식(69개)을 많이 적용하여 고질화 플랜트가 설치되었다. 막 분리법은 2006년부터 본격적으로 설치되기 시작하였다[4].

4. 결론

자동차용 연료를 중심으로 바이오가스의 전반적인 현황을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 바이오가스를 생산하여 수송용연료 및 에너지 자원으로 활용하는 것은 폐기물의 처리에 의하여 화석연료 사용의 절감과 지구온난화 감소효과를 가져오는 등 환경친화적이며 자원을 재활용하는 측면에서 인류가 지향하여야 하는 매우 중요한 분야이다.
2. 바이오가스 생산 기술은 원료의 소화효율을 높이기 위한 전처리기술, 메탄의 순도를 높이기 위한 정제기술, 체류시간을 줄이기 위한 기술, 부산물로 발생되는 액비 생산기술 등 관련 기술을 지속적으로 연구하여 효율향상을 기해야 하는 과제를 안고 있다.
3. 바이오가스의 메탄 함량 품질기준을 환경부문에서 정한 규정에 의하면 95부피% 이상으로 천연가스의 메탄 함량인 88부피%보다 높다. 바이오가스의 경우는 천연가스 차량의 구조변경 없이 그대로 적용이 가능한 연료이기 때문에 바이오가스의 자동차 연료화를 위해서는 수송용 연료로 활용을 고려한 제조기준을 제시할 필요가 있다.
4. 최근 국내에서도 바이오가스의 고질화 공정에

의해 수송용 자동차 연료와 천연가스 배관망 주입을 위해 외국기술을 도입하여 바이오메탄을 생산하여 시범운영하고 있고, 생산되는 바이오메탄은 초기에 마을버스에 공급하여 시범 운영하다가 최근에는 영업용 택시에 공급 중에 있으며, 장차 외국기술에 의존하지 않는 순수 우리의 기술 확보에 주력하여야 한다.

5. 또한 바이오가스의 활용도는 농업분야, 내부 연소를 위한 열원, 전기생산 및 가스의 주입분야의 순서로이며, 자동차용 연료로 활용되는 비율은 미미한 실정이므로 이 분야에 대한 활용도를 높여 자원의 효율적인 사용 및 대기환경 측면에서 우위를 확보하여야 한다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 일반과제 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1. N. H. Heo, *Korea Institute of Renewable Energy*, 4(2), 21 (2008)
2. J. J. Kim, Study on the desulfurization pretreatment optimization by liquefaction process of biogas, Master's Thesis, 13 (2011)
3. Y. G. Im, J. M. Lee, C. S. Jeong, *Korea Society of Industrial and Engineering Chemistry Industrial Chemistry*, 23(2), 125 (2012)
4. J. K. Kim, D. Lee, C. K. Park, E. S. Yim, C. S. Jung, K. D. Kim, Y. S. OH, *New & Renewable Energy*, 9(7) (2011)
5. E. S. Kim, A study on Purifying technology of Biogas and their applications, Master's Thesis, (2009)
6. S. W. Kim, Bio-organic waste gasification project evaluation, 2 (2012)
7. Food Agriculture Forestry and Fisheries, 20kWh Class Biogas & Diesel Cogeneration Engine Development and Livestock Industry Used Commonly Technology Development, 22 (2008)
8. J. Y. Jung, *Korea Institute of Science and Technology Environmental Technology Research Center*, 11(3), 3 (2008)
9. S. G. Ha, Study on Efficiency of CHP Technology using Co-Digestion of Organic Wastes and Biogas, Master's Thesis, 25 (2009)
10. N. C. Gimn, G. Y. Yu, J. W. An, Y. J. Kim, G. Heo, Y. G. Jeong, J. E. Bae, By the process of anaerobic digestion technology, principles and applications of bio-gasification, *Korea Institute of organic waste Editorial Board*, 25 (2009)
11. Y. J. Kim, Y. T. Gang, Study on purification process of biogas, *SAREK Winter Conference symposium*, 694 (2009)
12. J. G. Kim, Domestic natural gas alternative bio-energy technology research and development at home and abroad Analysis, *Korea National Oil Management Service Petroleum Technology Research*, (2012)
13. P. Weiland, Biogas Production : Current and Perspectives, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85, 849 (2010)
14. N. M. Power, J. D. Murphy, Which is the Preferable Transport Fuel on a Greenhouse Gas Basis : Biomethane or Ethanol, *Biomass and Bioenergy*, 33, 1403 (2009)
15. G. S. Oh, G. H. Jang, G. S. Yi, G. D. Gim, J. D. Jung, *Journal of Mechanical Science*, 50(9), 41 (2010)
16. N. H. Heo, Biogas production and utilization of developed countries Technology, *Korea Rural Community Corporation*, 64 (2008)
17. E. S. Yul, S. H. Hong, D. Y. Kim, H. S. Jeon, Biogas production using organic waste, *Korea Institute of Renewable Energy*, (2011)
18. S. S. Gwon, S. S. Choi, M. S. Yun, S. I. Kim, Waste resources biorefinery technology trends, *Environmental Technology Trends Report*, 34 (2011)
16. O. B. Gwon, Biogas as Vehicle Fuel, *Korea Gas Corporation R&D Center*, 5

- (2003)
19. Y. C. Kim, European status and future prospects of the bio-gas industry, *Korea Institute of Science and Technology (Industry Trends)*, (2013)
20. J. H. Seo, Status and Challenges of Bio-Based Fuel and Chemical Industry, *The Korean Academy of Science and Technology*, 31 (2008)