

수송용 대체연료로서 바이오메탄의 잠재적 타당성 연구

김재곤*, 이돈민, 박천규, 임의순, 정충섭, 김기동, 오영삼

Study on Potential Feasibility of Biomethane as a Transport Fuel in Korea

Jae-Kon Kim*, Donmin Lee, Chunkyu Park, Eui Soon Yim, Choong-sub Jung, Ki-dong Kim and Youngsam Oh

Abstract

Biogas production and utilization are an emerging alternative energy technology. Biogas is produced from the biological breakdown of organic matter through anaerobic digestion. Biogas can be utilized for various energy sectors such as space heating, electricity generation and vehicle fuel. Especially, to be utilized as vehicle fuel, raw biogas needs to be upgraded that is mainly the removal of carbon dioxide to increase the methane content up to more than 95 ~ 97 vol% in some cases, similar to the composition of fossil-based natural gas. Usage of Biogas as a fuel of vehicles have an effect of reducing CO₂ emission compared to fossil fuels. Biomethane which is produced by upgrading of biogas is regarded as a good alternative energy and usage of clean energy is encouraged to deal with air pollution and waste management as well as production of clean energy. Recently, biogas projects for vehicle fuel are newly being launched and Korea government have also announced a plan for investment to develop biogas as a transport fuel. In this study, it is aimed to examine the potential feasibility of biomethane as a transport fuel. As a results, the status of biomethane, quality standard, quality characteristics, and upgrading technology of biogas were investigated to evaluate of biogas as a vehicle fuel of transportation.

Key words

Biomethane(바이오메탄), Biogas(바이오가스), Transport Fuel(수송용 연료), Greenhouse Gas(온실가스), Sustainability criteria(지속가능성 기준)

(접수일 2011. 8. 9, 수정일 2011. 8. 31, 게재확정일 2011. 8. 31)

* 한국석유관리원 녹색기술연구소

■ E-mail : jkkim@kpetro.or.kr ■ Tel : (043)240-7919 ■ Fax : (043)240-7949

Subscript

IEA : international energy agency
GHG : greenhouse gas
LCA : life cycle assessment
EU : europe union

CI : carbon Intensity
LFG : landfill gas
AD : anaerobic digester gas
CHP : combined heating and power

PSA : pressure swing adsorption
 CNG : compressed natural gas
 LNG : liquified natural gas
 CBM : compressed biomethane
 LBM : liquified biomethane
 TOE : tonne of energy
 GC : gas chromatography

TCD : thermal conductivity detector
 PFPD : pulsed flame photometric detector
 D₄ : octamethyl cyclotetrasiloxane
 D₅ : decamethyl cyclopentasiloxane
 RPS : renewable portfolio standard
 TOE : ton of oil equivalent

1. 서론

IEA의 세계 에너지 전망에 따르면 수송부문은 전 세계적으로 화석연료에 의해 96% 이상 의존하고 있는 현실이다.⁽¹⁾ 그러나 고유가, 에너지 안보에 대한 관심사의 증대, 대기질 문제 그리고 기후변화 대응에 따른 온실가스(GHG) 감축 등의 수단으로 수송분야에서 대체연료로서 바이오연료의 사용이 증가하고 있는 실정이다.⁽²⁾ 특히, 국제사회는 온실가스 감축을 위한 수단으로 수송부문에 규제적 정책인 신재생연료 의무혼합제도를 도입하여 바이오연료를 확대하고 있다.⁽³⁾

한편, 수송부문의 석유 수입의존도가 높은 우리나라에서는 에너지안보 측면에서 지속가능한 바이오연료 보급의 확대가 매우 절실한 상황이다. 이러한 배경에서 정부는 국가에너지 기본계획을 통하여 2030년까지 탈 화석에너지화를 위해 석유 의존도 33%, 신·재생에너지 보급률 11% 목표를 수립하고 이를 달성하기 위한 에너지 정책을 추진하고 있다.⁽⁴⁾ 이러한 신·재생에너지 중 바이오매스로부터 생산되는 바이오연료는 타 신·재생에너지의 적용이 불가능한 수송부문에 직접 적용 가능하여 석유 에너지의 직접 대체 효과가 높다는 장점이 있다. 이러한 석유대체 가능한 바이오연료에는 바이오디젤, 바이오에탄올, 바이오가스 등이 현재 전 세계적으로 상용화되어 사용되어지고 있다.⁽⁵⁾⁻⁽⁶⁾

이러한 바이오연료 중 바이오가스는 음식물쓰레기, 축산분뇨 등 유기성폐기물과 매립지로부터 생성된 메탄과 이산화탄소가 주요 구성성분이다. 최근에 바이오가스는 유기성폐기물 뿐만 아니라 나무, 지푸라기 등의 목질계와 밀, 보리 등의 곡물계 등을 가스화장치로 기체화 시켜 분리공정을 통해서 제조할 수도 있다.⁽⁷⁾ 이러한 바이오가스로부터 이산화탄소와 불순물 등을 분리하여 순수한 메탄 성분만을 바이오메탄이라고 부르고 있다.⁽⁸⁾

바이오가스는 자원의 순환과정에서 순수하게 만들어지는 메탄가스로 천연가스와 같이 청정한 연료로 사용될 수 있는 에너지원이며 자원 순환형이라는 관점에서 최근 국제적인 관심이 더욱 커지고 있는 에너지자원이다(Fig. 1).⁽⁹⁾

이러한 바이오가스는 생산과 공급측면에서 볼 때 바이오디젤, 바이오에탄올 등의 다른 바이오연료보다 여러 측면에서 장점을 가지고 있는데, 특히 국내 폐기자원을 활용하여 생성할 수 있다는 장점과 기존의 천연가스 자동차 및 도시가스 배관망을 사용할 수 있다는 점에서 공급체계의 이점을 가지고 있다.

한편, 국내 바이오연료 중 현재 보급 중인 바이오디젤은 지속적인 국내 원료 활용량 증대에도 불구하고 전제적인 원료 수입 의존도는 크게 개선되지 않아 문제점으로 지적되고 있다. 그러나, 바이오가스는 국내 폐기자원을 100% 에너지화하여 수송용 연료로 사용 가능하여 원료수급에 매우 안정적인 바이오연료 평가받고 있다. 국제적으로 해양배출에 대해 한층 강화된 규제를 요구하는 ‘런던협약 96 의정서’에 따라

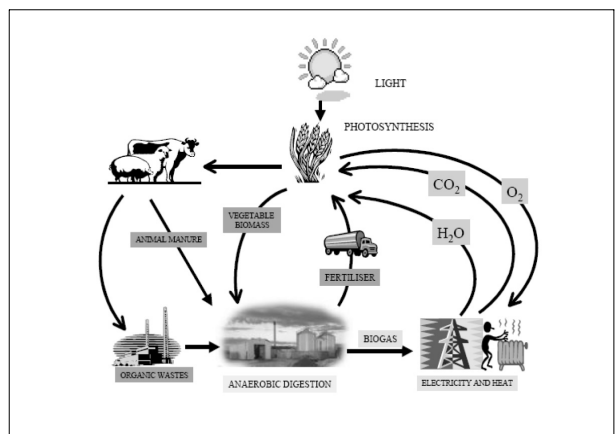


Fig. 1 Resource recycling system of biogas.

2012년부터 유기성폐기물 등의 해양배출이 금지됨에 따라 이러한 유기성폐기물의 에너지 화에 따른 수송용 바이오메탄의 활용이 더욱 더 부각되고 있는 실정이다.⁽¹⁰⁾

따라서, 본 연구에서는 수송용 바이오연료 중 국내 원료수급이 가능한 대체연료로 평가받고 있는 바이오메탄의 국내·외 현황 분석, 품질특성, 고질화 기술개발과 국내 기술개발 중인 바이오메탄의 품질특성 현황을 파악하여 국내 도입 잠재적 타당성을 논하고자 한다.

2. 본 론

2.1 국외 바이오메탄 현황 분석

2.1.1 바이오메탄의 온실가스 감축 기여도

교토의정서(kyoto protocol)에 따라 지구 온실가스 배출은 1990-1912년까지 5.2%를 감축해야 하는데,⁽¹¹⁾ Table 1에 의하면, 6종류의 온실가스 중 메탄은 이산화탄소에 비해 지구 온난화 지수가 21배이다.⁽⁸⁾ 따라서 바이오메탄은 폐자원에서 발생하는 메탄가스를 연료화 하여 사용함으로써 메탄가스 배출을 상당히 줄일 수 있어 월등한 온실가스 감축 효과가 있음을 알 수 있다(Table 1).

바이오연료의 보급 및 확대를 위한 바이오연료의 원료작물 생산을 위해 토지용도를 간접적 전환함에 따라 산림파괴 및 식량문제 유발 등의 문제점이 발생함으로 신재생연료의 지속가능성 기준(sustainability criteria) 필요성이 제기되어 세계 각국은 도입 또는 검토 중에 있다.⁽¹²⁾ 특히, 유럽연합은 바이오연료의 전주기 분석(LCA)에 의한 온실가스 배출량을 산정하여 온실가스 감축 기여가 큰 바이오연료 사용을 권고 하고 있다. Table 2는 재생에너지 원료로부터 바이오연료 사용 확대

Table 1. The greenhouse gas listed in Kyoto protocol

온실가스	분자량	지구온난화지수
CO ₂	44	1
CH ₄	16	21
N ₂ O	44	310
HFCs	34-252	140-11,700
PFCs	88-338	65,000-92,000
SF ₆	146	23,900

Table 2. Typical greenhouse gas emission saving in EU⁽¹³⁾

바이오연료 생산경로	온실가스 배출 저감률
밀 바이오에탄올	32%
사탕수수 바이오에탄올	71%
유채유 바이오디젤	45%
대두유 바이오디젤	40%
팜유 바이오디젤	36%
유기성폐기물 바이오가스	80%
습식소화 바이오가스	84%
건식소화 바이오가스	86%

Table 3. Carbon intensity of transport fuel⁽¹⁴⁾

수송용 연료	탄소집약도(CI, gCO ₂ e/MJ)
바이오메탄	2.7
경유	94.7
휘발유	95.8
복미 천연가스	68.0

를 규정하고 있는 EU 지령 중 바이오연료의 생산경로에 따른 온실가스 배출 저감률을 보여주고 있다. 바이오가스의 온실가스 배출 저감률은 80~86%으로 바이오에탄올(32~71%), 바이오디젤(36~45%)에 비해 우수한 것으로 나타나고 있다.⁽¹³⁾

또한 캘리포니아주 에너지 위원회의 '대체·재생 연료 및 자동차 기술에 대한 투자 계획' 의회 최종 보고서(2009)⁽¹⁴⁾에 따르면 천연가스를 자동차연료로 사용하였을 때 가솔린이나 경유에 비해 온실가스 배출을 30% 감축 할 수 있고, 바이오메탄을 사용하면 97% 감축 할 수 있다고 보고하고 있다. 아울러 수송용 연료 종류에 따른 탄소 집약도(CI)는 바이오메탄이 기존 화석연료인 경유, 디젤 및 천연가스에 비해 월등히 낮았다(Table 3).

2.1.2 국외 바이오메탄의 고질화 공정

바이오가스는 음식물쓰레기, 하수슬러지 및 매립지 쓰레기 등과 같은 유기성폐기물인 바이오매스를 혐기성 미생물에 의해 혐기성 소화반응으로 메탄 발효시킴으로써 얻을 수 있다. 일반적으로 바이오가스의 주성분은 메탄(45~70%)과 이산화탄소(30~45%)이며, 황화수소(H₂S)를 비롯한 암모니아(NH₃), 수소(H₂), 질소(N₂), 그리고 일산화탄소(CO) 등 미량가스를 포함한다(Table 4).⁽¹⁵⁾ 소화되는 동안 사용되는 원료물질의 상태와 공정조건에 따라 바이오가스의 화학적 조성은 크게

Table 4. Content of the biogas produced at different of plants

성분	AD plant	Sewage waste station	Landfill
CH ₄ (vol.%)	60 ~70	55 ~ 65	45 ~ 55
CO ₂ (vol.%)	30 ~ 40	35 ~45	30 ~ 40
N ₂ (vol.%)	< 1	< 1	5 ~ 15
H ₂ S(ppm)	10 ~ 2,000	10 ~ 40	50 ~ 300

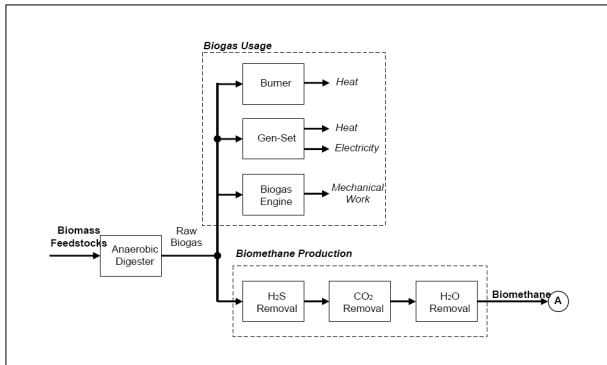


Fig. 2 Application and production process of biomethane.

결정된다. 바이오가스(raw biogas)는 일반적으로 보일러 열원 혹은 열병합발전(CHP)을 통한 열과 전력을 생산하는데 이용해 왔다.⁽¹⁶⁾ 그러나 바이오가스의 열량을 증가 시키고, 이용의 안정성을 높이기 위해서는 CO₂, H₂S, 실록산(siloxanes)을 비롯한 기타 불순물을 제거해야 한다.⁽¹⁷⁾ 흔히 고질화 전 바이오가스에 포함되어 기기의 부식을 유발하는 수분, 황화수소(H₂S) 및 할로젠화합물을 제거하는 것을 정제과정이라 한다. 연료로써 사용하기 위한 천연가스 수준의 열량을 확보하기 위해 CO₂를 분리하여 메탄농도를 최소 95~97vol.% 이상 까지 함량을 높이는 것을 고질화(upgrading) 공정이라고 한다(Fig. 2).⁽¹⁷⁾

특히, 유럽 각국에서 사용하고 있는 바이오가스의 고질화 목적은 천연가스 배관망과 차량용 등의 연료로써 사용되기 위해서 미량 불순물을 제거하는 것과 웨버지수(Wobbe Index)의 기준에 맞추기 위해서 발열량과 밀도 등의 조절을 위해 이산화탄소를 제거 하는 것이다.⁽¹⁷⁾

Table 5에서 보는 바와 같이 바이오가스는 수분, 먼지, 황화수소, 이산화탄소, 실록산류, 암모니아, 염화이온, 플루오르이온 등의 미정제 불순물로 인하여 천연가스 배관망과 차량 엔진 등에 영향을 줄 수도 있다(Table 4).⁽¹⁸⁾

수송용 자동차 연료로 사용하기 위해서 바이오메탄은 천연가스 품질수준으로 생산되어야 하는데 이는 바이오가스의 다

Table 5. Biogas impurities and their consequences

불순물	영향
물	- 황화수소, 암모니아 및 이산화탄소가 포름산과 반응하여 압축기, 가스 저장 탱크 및 엔진 등의 부식 유발 - 가스 파이프에 물의 축적으로 인한 부식유발 - 고압으로 인한 응축 및 결빙
먼지	- 압축기, 가스 저장탱크 안에서 퇴적으로 인한 막힘 현상
황화수소	- 압축기, 가스 저장탱크 및 엔진의 부식 - 연소 시 물과 함께 부식성이 더 크고, 황화수소 보다 독성이 높은 이산화황, 삼산화황 형성
이산화탄소	- 낮은 발열량 유발
실록산류	- 연소 시 이산화규소와 미정질 석영 형성 - 스파크 플러그, 밸브 및 실린더 헤드에 퇴적
탄화수소류	- 연소 시 엔진의 부식 유발
암모니아	- 물에 용해될 때 부식 유발
산소/공기	- 바이오가스에 고농도 산소로 인해 폭발성 물질 형성
염화이온/플루오르이온	- 연소 엔진의 부식유발

Table 6. Advantages and disadvantages of techniques for removal of CO₂

공법	원리	장점	단점
물 흡수	가스 용해도 차이	상용화 실적 다수	높은 메탄 손실
화학적 흡수	흡수제 이용	낮은 메탄 손실	열 손실
PSA	가스 상 물질 흡착특성 차이	에너지 소비량 낮음	높은 메탄 손실
막 분리	분자 극성차이	고순도 메탄 분리	높은 메탄 손실
극저온법	액도온도 차이	낮은 메탄 손실	에너지 소모량 높음

단계 고질화 공정을 통해서 가능하다.⁽¹⁹⁾ 수분, 황화수소, 실록산, 탄화수소 화합물 및 암모니아의 제거 후, 이산화탄소의 제거는 웨버지수에 만족한 품질을 얻기 위해 필요하다. 즉, 바이오가스의 고질화 과정에서 이산화탄소가 제거됨에 따라서 웨버지수는 증가하고, 이로 인해 밀도는 감소되어 발열량은 증가된다. 일반적으로 바이오가스로부터 이산화탄소를 제거하는 고질화 공법에는 Table 6에서는 보는 바와 같이 물 흡수, 화학적 이산화탄소 흡수, PSA, 막 분리, 극저온 분리 등이 있다(Table 6).⁽¹⁸⁾

이러한 고질화된 바이오메탄은 각각 CNG와 LNG에 CBM과 LBM 형태로 혼합하여 천연가스(NG) 배관망 주입과 CNG, LNG 수송용 연료로 사용 할 수 있다.⁽¹⁹⁾ 현재 수송용 바이오메탄은 경제성 때문에 CBM 형태로 CNG 차량에 적용되고 있다.

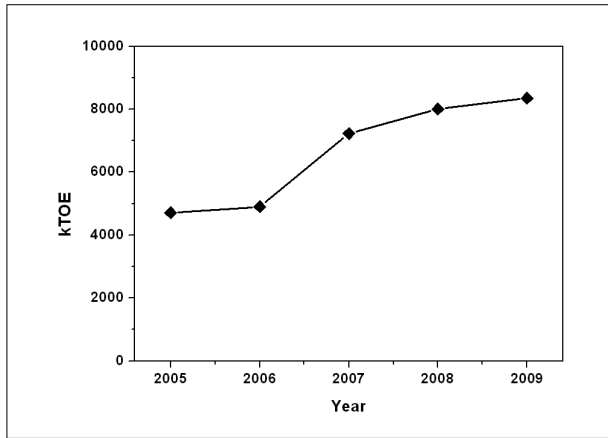


Fig. 3 Production amount of biogas in EU

Table 7. The status of upgrading plants of biogas(2010)

국가	바이오가스 고질화 플랜트 수(개)
독일	56
스웨덴	52
미국	28
스위스	18
네덜란드	7
오스트리아	5
기타 유럽국가	14
일본	4
캐나다	2
총	161

2.1.3 국외 바이오메탄 생산 현황

국외의 바이오가스 에너지화는 유럽을 중심으로 기술개발 및 사업화가 진행되고 있다. 유럽 국가의 바이오가스 발생량 현황을 보면, 2009년에는 약 8,346kTOE에 바이오가스가 발생하였다. 연도별 바이오가스 발생 현황을 보면, 2007년 바이오가스 발생량이 2006년 대비 47%가 증가하여 꾸준히 증가하는 추세에 있다(Fig. 3).⁽²⁰⁾

유럽에서는 주로 열병합 발전(CHP)을 통해 바이오가스를 에너지화 하고 있으며, 2009년 기준으로 총 25,167GWh의 전기를 생산하였다. 2000년 이후 신·재생에너지 보급비율 목표 달성과 신·재생에너지 의무보급과 고유가로 인하여 바이오가스를 고질화하여 수송연료 또는 천연가스 배관망에 연계하여 사용하는 기술의 개발 및 사업화가 진행되고 있다. 2010년까지 총 186개소의 바이오가스 고질화플랜트가 설치되어 운영되고 있는 실정이다(Table 7).⁽²⁰⁾ 국가별 바이오가

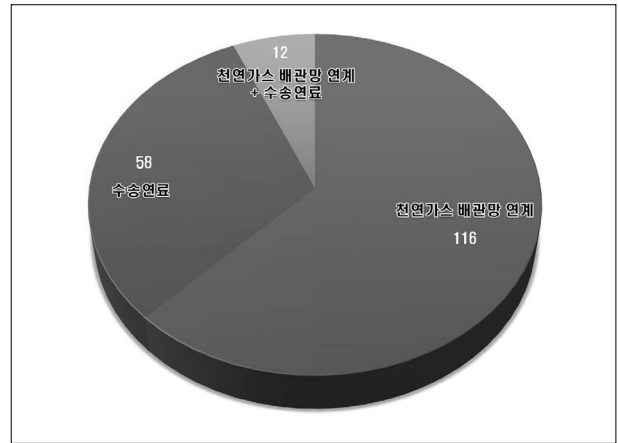


Fig. 4 The application of biomethane from upgrading plants of biogas.

스 고질화 플랜트 설치 현황을 보면 독일(56개)과 스웨덴(52개)이 가장 많은 고질화 플랜트가 설치되어 운영 중에 있으며, 특히 스웨덴은 바이오가스를 고질화하는 기술의 핵심기술인 이산화탄소/메탄 분리기술을 보유하고 있는 업체가 다수이며, 스웨덴 이외의 국가로 사업영역을 넓히고 있는 상황에 있다.

전 세계적으로 바이오가스 고질화 플랜트 설치현황을 보면 2000년 이후부터 본격적으로 플랜트가 설치되기 시작하였으며, 2006년부터 플랜트수가 급속도로 증가 하였다. 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.

바이오가스 고질화 플랜트를 통해 생산된 바이오메탄은 압축/액화를 통해 수송연료로서 사용하거나 천연가스 배관망에 연계를 통해 천연가스와 혼합하여 사용하고 있는데, 바이오가스 고질화플랜트 현황을 보면 총 186개소 중 116개소가 천연가스 배관망에 연계하여 바이오메탄을 공급하고 있고, 58개소는 수송연료로 사용하고 있다. 그리고 12개소는 천연가스 배관망 연계와 수송연료로 병행하여 사용하고 있는 실정에 있다(Fig. 4).⁽²⁰⁾

2.1.4 국외 바이오메탄의 품질특성

수송용 바이오메탄은 유럽을 중심으로 연료화가 가장 활발하게 진행되고 있으며, 품질기준 등도 유럽지역에서만 기준

Table 8. Properties of swedish biogas for as a transport fuel

Property	Unit	Biogas type A	Biogas type B
Wobbe index	MJ/Nm ³	44,7~46,4	43,9~47,3
Methane Content	Vol%	97±1	97±2
Water Dew Point	°C	t-5	t-5
Water Content, max	mg/Nm ³	32	32
CO ₂ + O ₂ + N ₂ , max	Vol%	4,0	5,0
O ₂ , max	Vol%	1,0	1,0
Total Sulfur, max	mg/Nm ³	23	23
Nitrogen compounds	mg/Nm ³	20	20
Maximum size of particles	µm	1	1

을 설정하여 운용하고 있다.

세계에서 유일하게 수송용 바이오메탄 품질기준을 설정하여 운용하고 있는 국가는 스웨덴으로서 1999년 자동차 제조업체의 요청에 의해서 자동차연료로 공급, 사용하는 바이오가스 품질기준(Swedish Standard SS155438, Motorbranslen)을 설정하여 운용하고 있다. 아울러 천연가스 배관망에 연계할 수 있는 연료의 품질기준을 규정하고 있다(Table 8).⁽²¹⁾ 수송용 바이오메탄의 사용하기 위한 메탄의 함량은 97±1% 이상을 요구하고 있다. Table 8에서 바이오가스 A type의 경우는 트럭 및 버스와 같은 heavy-duty 차량에서 사용되는 린번엔진에서 산소센서가 장착되지 않은 엔진에 적용된다. Type B는 이론공연비 제어에 사용되는 산소센서(람다센서)가 장착된 승용차량에 적용되는 기준으로서, 최근의 차량에는 람다센서가 대부분 장착되어 생산되고 있다.

독일의 경우는 독일바이오가스협회(German Biogas Association)과 독일 물 및 가스협회(German Water and Gas Association)에서 공동으로 제정한 바이오가스 품질기준(G262)을 제정하여 운용하고 있으며, 천연가스 품질기준(DVGW G260)을 기초로 하고 있다.⁽²²⁾ 품질기준은 제한적 주입과 무제한 주입기준의 두가지로 설정되어 있으며 고압 배관망(H-gas grid) 주입되는 정제된 바이오가스의 무제한 주입의 경우 품질기준에 적합한 연료를 주입하도록 규정하고 있다. 또한, 동 기준을 만족시키는 경우 배관망 주입 및 수송용 연료로 사용이 가능하도록 설정하고 있다. 한편, 프랑스가스협회(Gaz de France)에서 2004년에 천연가스 배관망 주입을 위한 바이오가스 품질기준을 제정하였다.⁽²²⁾ 다른 국가와는

다르게 산소 및 할로겐, 중금속에 대한 기준을 강화한 것이 특징이라 할 수 있다.

2.2 국내 바이오메탄 현황 분석

2.2.1 국내 바이오메탄 생산 및 기술현황

최근 국제적인 기후변화 협약의 가시화 및 유가의 급상승과 국내적으로 유기성폐자원의 매립 및 해양투기 금지됨에 따라 정부에서는 유기성폐자원의 자원화와 육상처리 대안으로 혐기성소화를 통한 감량화 및 에너지회수 기술 개발에 대하여 적극적인 관심을 보이고 있다.⁽⁶⁾ 국내 신·재생에너지 중에서도 바이오매스의 이용은 가용 잠재량 및 경제성을 고려할 때, 가장 중요한 대체 에너지원으로 인식되고 있으며, 그 중 유기성폐기물의 에너지화는 그 보급과 성장이 가장 빠르게 실현될 것으로 여겨지고 있다.⁽¹⁰⁾

2009년 정부의 신·재생에너지 원별 공급비중을 보면 폐기물은 74.89%로 수력(9.97%), 바이오(9.5%)보다 월등히 높음을 알 수 있으며, 2000년 이후 지속적으로 증가 추세에 있다(Fig. 5).⁽²³⁾

따라서 정부는 저탄소에너지 생산·보급을 위한 '폐자원 및 바이오매스 에너지 대책' 실행계획을 발표하였다(2009.7).⁽¹⁰⁾ 이 계획에 의하면 저탄소 녹색마을 조성과 가축분뇨 자원화, 목재펠릿 및 해조류 이용바이오매스 에너지화 등을 통해 현재 국내 에너지 총 공급량 중 2.37%에 불과한 신·재생에너지 비율을 2013년까지 3.78%로 늘리기로 목표를 설정한 바 있다. 아울러 2020년에는 신·재생에너지 보급비율 6.08% 중 4.16%를 폐자원 및 바이오매스를 활용하여 달성할 것을 계획

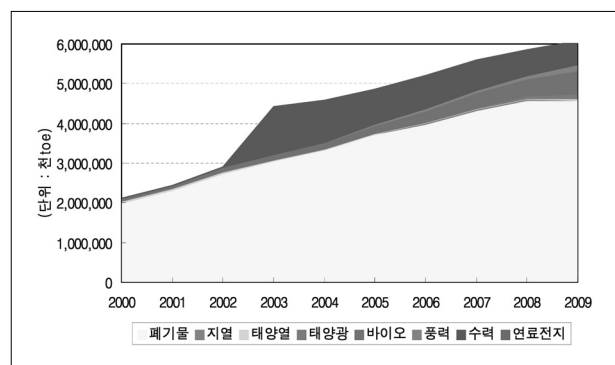


Fig. 5 The status of renewable energy supply in Korea(2000-2009).

Table 9. The status of biogas plants in Korea(2009)

구분	시설수(개소수)	시설용량(톤/일)
음식쓰레기	2	298
음식물 폐수	5	1,633
가축분뇨	9	590
하수슬러지	20	22,468
병합	13	12,905
계	49	37,894

Table 10. The status of production and consumption from biogas plant in Korea(2008~2009)

구분	BG 생산량	용도별 이용량				단순 처리량
		계	발전	가스판매	자체이용	
2008	127,677	108,622	8,811	4,653	95,158	19,055
2009	139,799	109,934	18,794	4,798	86,342	29,865

하고 있다.

국내에서 설치 및 운영 중인 바이오가스 시설은 총 49개(2009년 말 기준)로 하수슬러지 소화조가 20개소로 가장 많으며, 13개 시설은 병합시설로 설치·운영되고 있다. 바이오가스 시설(49개) 중 38개 시설이 2008년 이전에 설치되었으며, 2009년에는 11개 시설이 설치되어 매년 증가하는 추세에 있다(Table 9).⁽²⁴⁾

국내 바이오가스 시설로부터 바이오가스의 연간 생산량은 2009년 기준 127,677천 Sm³으로 이 중 109,934천 Sm³는 발전, 가스판매, 자체이용 등에 활용하였고 29,865천 Sm³(21.4%)은 소각 등 단순처리 하였다(Table 10).⁽²⁴⁾ 2009년 바이오가스 연간 생산량은 2008년 대비 9.5%(12,122천 Sm³/년) 증가하였는데, 이는 고유가 및 기후변화 대응을 위한 폐자원 에너지화 정책 추진효과가 반영된 것으로 분석된다. 앞으로 바이오가스의 효율적인 생산을 위해서는 국내 유기성폐기

물의 수급 활성화를 위한 수거체계, 처리단가 등이 원별로 상이하므로 원별로 효율적인 수급 전략 수립이 무엇보다도 중요할 것이다.

최근에 국내에서도 바이오가스의 고질화 공정에 의해 수송용 자동차 연료와 천연가스 배관망 주입을 위해 외국기술을 도입하여 바이오메탄을 생산하여 시범운영하고 있다(Table 11).

이 중에서 에코에너지홀딩스사는 스웨덴 업체인 Flotech 사로부터 물 흡수 방식의 이산화탄소/메탄 분리기술을 도입하여 서울시 서남물재생센터의 혐기성소화조에서 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.

또한 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 1만 m³/일)를 정제하여 충전소에서 CNG와 바이오메탄(약 6,500 m³/일)을 77:23 비율로 혼합하여 자동차연료로 공급할 예정이다.

한편, 바이오가스의 고질화 공정을 외국기술에 의존하는 것에서 벗어나 국산화시키는 노력도 최근에 한국가스공사와 현대건설을 중심으로 진행되고 있다.

2.2.2 국내 바이오메탄 품질특성

국내에서 바이오메탄이 수송용 연료로 사용되기 위해서는 연료 품질기준을 설정하여야 한다. 바이오가스는 석유 및 석유대체연료 사업법 시행령 제5조의 석유대체연료로서 분류되어 있다(2009.4). 최근에 정부는 기존 LNG, LPG+Air 이

Table 11. The status of project for development of biomethane in Korea(2010)

시공사	최종 생산물	BG 사용량 (Nm ³ /hr)	설치지역	분리 공정	진행사항	수요처
한솔이엠(주)	LBM	300	수도권 매립지	PSA	시운전중	R & D
스칸디나비아바이오가스	CBM	600	울산시 용연하수 처리장	심냉법	시공중	SK케미칼 공급
한라산업개발	CBM	600	수도권 매립지	PSA	운전 중	CNG버스 천연가스 배관 연결
에코에너지홀딩스	CBM	210	서울 서남하수 처리장	물 흡수	운전중	CNG 버스
한국화학연구원	CBM	6	-	막 분리	운전중	R & D

Table 12. Quality standard of Biogas as a transport fuel in clean air conservation act in Korea

항목	제조기준
메탄(부피%)	95 이상
수분(mg/Nm ³)	32 이하
황분(ppm)	10 이하
불활성가스(CO ₂ , N ₂ 등)(부피%)	5.0이하

Table 13. Quality standard of natural gas in clean air conservation act in Korea

항목	제조기준
메탄(부피%)	88.0 이상
에탄(부피%)	7.0 이하
C ₃ 이상의 탄화수소(부피%)	5.0 이하
C ₆ 이상의 탄화수소(부피%)	0.2 이하
황분(ppm)	40 이하
불활성가스(CO ₂ , N ₂ 등)(부피%)	4.5 이하

외에 바이오가스, 나프타 부생가스 등을 도시가스의 범주에 새롭게 포함시키는 내용으로 도시가스사업법을 개정(2009.3)하여 대체천연가스의 효율적 활용을 도모할 계획에 있다. 또한 바이오가스의 경우는 천연가스 차량의 구조변경 없이 그대로 적용이 가능한 연료이기 때문에 바이오가스의 자동차 연료화를 위해서는 수송용 연료로의 활용을 고려하여 제조기준을 제시할 필요가 있어 대기환경보전법 시행규칙(별표 33)에서 품질기준을 설정하였다(2011.3)(Table 12). 이는 바이오메탄은 수송용 CNG 또는 LNG에 혼합하여 사용할 수 있기 때문에 국내 바이오메탄의 품질은 대기환경보전법 시행규칙 제115조 관련 천연가스 제조기준(Table 13)을 참고하였다. Table 12에서 보는 바와 같이 바이오가스의 자동차 연료 제조기준을 신설하였는데 바이오가스의 메탄 함량을 95부피% 이상으로 설정하고 있다.

국내에서 현재 생산되고 있는 수송용 바이오메탄의 품질특성을 파악하고자 3개 플랜트에서 생산된 바이오메탄에 대해 메탄 함량, 수소 함량, 불활성가스(CO₂+O₂+N₂), 황화수소 그리고 황 함량에 대해 품질평가를 하였다(Table 14). 바이오메탄 시료는 3회 채취하여 각각의 항목에 대해 품질평가를 하였다. 메탄 함량, 수소 함량, 불활성가스(CO₂+O₂+N₂)는 TCD를 가진 GC에 의해 각각 분석되었으며, 황화수소와 황 함량은 PFPD를 가진 GC에 의해 역시 분석하였다.

Fig. 6은 전형적인 바이오메탄의 GC에 의한 조성분석에

Table 14. Quality characteristics¹⁾ of biomethane samples

항목	A사	B사	C사
메탄(부피%) ²⁾	90.87	98.66	94.43
H ₂ (부피%) ²⁾	0.10이하	0.10이하	0.10이하
불활성가스(CO ₂ , N ₂ 등)(부피%) ²⁾	9.17	2.73	5.5
H ₂ S (ppm) ³⁾	n.d ⁴⁾	n.d	n.d
황함량(ppm) ³⁾	0.1	n.d	2.37

¹⁾ 3회 시료채취에 대한 3회 측정 평균값

²⁾ column : 4-valve, 6-column; inlet temp. : 300°C; detector : TCD; injection vol. : 1.0μm

³⁾ column : GS-gaschro 30.0m×320μm; inlet temp. : 250°C; detector : PFPD; injection vol. : 1.0μm

⁴⁾ n.d : not detected

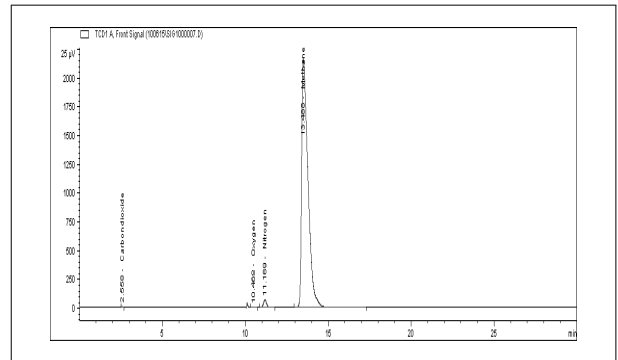


Fig. 6 The GC chromatogram of biomethane.

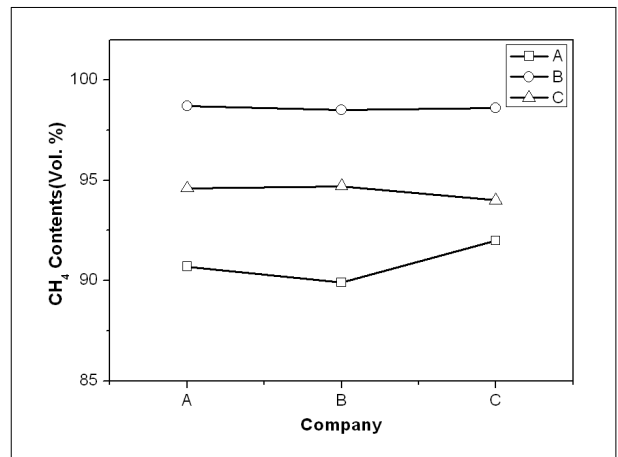


Fig. 7 The comparison of methane contents in biomethane.

따른 크로마토그램을 보여주고 있다. B사의 메탄함량은 98 부피%이상으로 분석되었으나, A사는 90~92부피% 그리고 C사 94% 수준이므로 대기환경보전법의 품질기준에 적합하기 위해서는 공정조건 등의 변경으로 메탄순도 향상에 대한 품

Table 15. Analysis of siloxanes and halogen compounds⁽²⁵⁾

유해물질	물 흡수(ppb)	PSA (ppb)
D4(ppm) ¹⁾	n,d ³⁾ (0,6) ⁴⁾	n,d(0,3)
D5(ppm) ²⁾	n,d(2,2)	n,d(n,d)
Freon 114	n,d(6821,2)	n,d(51857,7)
Vinyl chloride	n,d(7077,4)	n,d(188,9)
Freon 11	n,d(498,2)	n,d(950,9)
1,1-Dichloroethane	n,d(2666,8)	n,d(1723,4)
Dichloromethane	3,19(202,3)	48,4(128,5)
chloroform	n,d(155,2)	n,d(n,d)
1,1,1-Trichloroethane	n,d(79,2)	n,d(4,8)
1,2-Dichloropropane	n,d(15,1)	n,d(3,9)
Trichloroethylene	3,18(14,0)	3,2(53,3)
Chlorobenzene	n,d(176,8)	n,d(38,1)
m-Dichlorobenzene	n,d(371,6)	n,d(5,5)
o-Dichlorobenzene	n,d(1171,1)	2,39(3,26)

¹⁾ Octamethylcyclotetrasiloxane

²⁾ Decamethylcyclopentasiloxane

³⁾ n, d : not detected

⁴⁾ 괄호 안의 숫자는 고질화 전의 함량

질관리가 요구된다(Fig. 7). 바이오메탄 중의 수소는 0.1부피% 이하이었으며, 바이오가스의 고질화 후 바이오메탄에서 황화수소는 검출되지는 않았다. 또한 황분의 경우, 3개사 모두 3.7ppm 이하로 나타났다.

바이오가스의 주원료인 유기성폐기물 및 매립가스에는 다양한 오염물질이 존재하기 때문에 정밀분석을 통하여 유해물질을 분석할 필요가 있다. 따라서 차량과 천연가스 배관망에 주로 영향을 많 미칠 수 있는 실록산, 할로겐화합물에 대한 유해물질 분석을 고질화 전·후 분석하였다.

Table 15에서 보는 바와 같이 고질화 전의 바이오가스는 실록산 화합물인 D₄와 D₅이 소량과 다양한 할로겐 화합물이 존재하는 것을 볼 수 있다. 하지만, 고질화 후 바이오가스에는 실록산 화합물과 할로겐화합물은 거의 제거됨을 볼 수 있다. 국내에서 사용되는 고질화 공정은 크게 물 흡수법과 PSA 방법이 사용되고 있다. 물을 이용한 흡수법은 실록산 및 황 화합물에 대한 용해도가 우수하고, PSA법은 대부분 제올라이트와 활성탄을 사용하나, 국내에서 흡착법이 적용된 공정에는 흡착탑 전단에 황화수소와 실록산 화합물 제거공정을 구비하고 있기 때문에 고질화 후에는 거의 검출되지 않는 것으로 판단할 수 있다.

국내에서 3곳에서 생산되고 있는 바이오메탄의 품질은 자

동차용 연료로 사용되기 위해서 메탄의 함량을 95부피%이상으로 품질관리 할 수 있도록 공정을 최적할 필요성이 제기된다. 실록산 화합물과 할로겐 화합물 등은 바이오가스의 고질화 후 거의 모두 제거되어 차량 영향을 거의 없을 것으로 판단된다.

2.3 대체연료로서 바이오메탄의 보급 전망

2008년 기준 국내 총 온실가스 배출량은 585.9백만 tCO₂e으로 2007년의 576.9백만 tCO₂e 대비 약 1.6% 증가한 것으로 파악되었다.⁽²⁶⁾ 이 중에서 국내 수송부문의 온실가스 배출량은 94.6백만 tCO₂e으로 18.2%를 차지하고 있는 상황에서 신·재생에너지 보급 확대와 국가 온실가스 감축목표 달성을 위해 수송부문에서 획기적인 정부의 정책전환이 필요한 실정이다. 무엇보다도 온실가스에 대한 저감 기여도가 높고, 국내에서 원료수급 가능한 바이오연료의 발굴이 절대적으로 요구되어진다. 앞서 언급했듯이 이런 의미에서 바이오메탄은 국내 실정에 가장 적합한 바이오연료 중 하나라고 할 수 있다.

바이오가스로부터 고질화된 바이오메탄은 저장성 및 이동성을 높일 수 있는 압축 및 액화 기술개발에 의해 수송용 연료로써 승용차, 버스, 철도 및 선박 등의 수요처에 적용될 수 있다(Table 16).

바이오가스가 대체연료로서 국내에 보급할 수 있는 여건은 바이오가스를 도시가스로 공급할 수 있는 규정을 신설함에 따라 가능하게 되었다. 최근에 바이오메탄은 수송용 연료로도 사용되고 있으나 아직은 미진한 상태이다. 앞으로 바이오메탄 연료 특성을 100% 살리기 위해서는 추가적인 수요처 개발이 필수적인데 자동차, 철도, 선박 등의 수송용 연료와 도시가스 연료에 적극적으로 활용이 필요한 실정이다.

또한, 혐기성 소화기술과 같은 1세대 바이오가스 기술은 현재 전 세계적으로 널리 상용화된 상태이지만 탈리액과 슬

Table 16. Applications of biomethane

형태	BM	CBM	LBM
상태	기체상태 압력-15bar 이하	기체상태 압력 - 200bar 이상	액체상태 압력 - 15bar 이하
수요처	천연가스 배관망	승용차, 시내버스	철도, 선박, 고속버스, 트럭
수요처 특성	안정적 수요, 저장/이동 어려움	단거리 운행, 연료소비량 작음	장거리 운행, 연료소비량 많음

러지 등의 2차적인 처리문제를 가지고 있다. 따라서 고체 바이오매스 가스화 방법인 열수가스화나 촉매 가스화 기술, 액화 바이오매스 가스화방법인 초임계 수 기술을 이용하여 얻는 2세대 바이오가스 기술이 개발 중에 있다.⁽²⁷⁾⁻⁽²⁸⁾ 2세대 바이오가스 기술은 아직 개발 초기단계이지만 바이오가스로의 에너지 전환율이 높고, 환경적인 2차 처리문제가 없다는 환경적인 장점을 지니고 있어 국내에서도 활발한 개발이 요구되어진다.

앞으로 바이오메탄은 정부가 현재 추진 중인 유기성폐자원 에너지화 계획과 연료전지 발전용 바이오가스 연료 그리고, 2012년 도입 예정인 전력부문의 신·재생에너지 공급의무제도(RPS)⁽²⁹⁾ 등으로 인하여 보다 더 확대될 것으로 전망된다.

3. 결론

전 세계적으로 고유가에 따른 에너지 안보와 기후변화 대응에 따른 온실가스 감축 등의 수단으로 수송분야에서 화석 연료를 감축하고 바이오연료의 사용을 확대하고 있는 실정이다. 이러한 바이오연료 중 바이오메탄은 폐자원에서 발생하는 메탄가스를 연료화 하여 사용함으로써 메탄가스 배출을 상당히 줄일 수 있어 실질적인 온실가스 감축 효과가 있으며, 다른 바이오연료(바이오디젤, 바이오에탄올)에 비해서도 온실가스 배출 저감률이 높다. 한편, 바이오연료 중 현재 국내 보급 중인 바이오디젤은 원료 수입 의존도가 크게 개선되지 않아 문제점으로 지적되고 있는 반면, 바이오가스는 국내 폐기자원을 100% 에너지화 하여 수송용 연료로 사용 가능하여 원료수급에 매우 안정적인 바이오연료 평가받고 있다.

따라서 바이오메탄은 유기성폐기물 등으로부터 생산된 바이오가스에서 메탄과 이산화탄소의 분리 및 미정제 불순물을 제거한 고질화 공정을 통하여 수송용 연료(자동차, 철도, 선박)과 천연가스 배관망 등에 연계할 수 있다. 국내에서 생산되고 있는 바이오메탄의 품질은 자동차용 연료로 사용되기 위해서 메탄의 함량을 95부피% 이상으로 품질관리 할 수 있도록 공정을 최적화할 필요성이 제기된다.

결론적으로 국내 바이오메탄은 기존의 천연가스 인프라를 최대한 활용할 수 있다는 장점을 지니고 있지만, 바이오메탄의 보급 확대를 위해서 수요처 개발과 고질화 공정의 국산화

기술개발 그리고 차량 기술개발 등에 정부의 적극적인 정책적 지원이 필요할 것으로 생각한다.

후 기

본 연구는 2011년도 한국가스공사에서 지원한 ‘수송용 바이오메탄 연료화 기술개발 연구’의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] IEA. 2009, “World Energy Outlook”, International Energy Agency. OECD/Paris.
- [2] S.N. Naik, Vaibhav V. Goud, Prasant K. Rout, Ajay K. Dalai, 2010, “Production of First and Second Generation Biofuels : A Comprehensive Review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, pp. 578-597.
- [3] 지식경제부, 한국석유관리원, “신재생연료 의무혼합제도 도입방안 마련연구”, 2010.
- [4] 지식경제부, “제1차 국가에너지기본계획”, 2008.
- [5] 지식경제부, 에너지관리공단 신재생에너지센터 “신·재생에너지 RD&D 전략 2030(수송용 바이오)”, 2007.
- [6] 지식경제부, 에너지관리공단 신재생에너지센터, “신·재생에너지 RD&D 전략 2030(유기성폐자원 바이오에너지분야)”, 2007.
- [7] P. Weiland, 2010, “Biogas Production : Current and Perspectives”, Appl Microbiol Biotechnol, Vol. 85, pp. 849-860.
- [8] M. Åhman, 2010, “Biomethane in the Transport Sector—An Appraisal of the Forgotten Option”, Energy Policy, Vol. 38, pp. 208-217.
- [9] C. Jury, E. Benetto, D. Koster, B. Schmitt, J. Welfring, 2010, “Life Cycle Assessment of Biogas Production by Monofermentation of Energy Crops and Injection into the Natural Gas Grid”, Biomass and Bioenergy, Vol. 34, pp. 54-66.
- [10] 교육과학기술부, 행정안전부, 농림수산식품부, 지식경제부, 환경부, 국토해양부, 산림청, “폐자원 및 바이오매스 에너지 대책 실행계획”, 2009.
- [11] N. M. Power, J. D. Murphy, 2009, “Which is the Preferable Transport Fuel on a Greenhouse Gas Basis : Biomethane or Ethanol”, Biomass and Bioenergy, Vol. 33, pp. 1403-1412.
- [12] 지식경제부, 한국석유관리원, “신재생연료의 지속가능성 기

- 준 국내 도입 타당성 연구”, 2010.
- [13] European Parliament, 2009, “Directive 2009/28/EC On the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing”, The European Parliament and Council of the European Union.
- [14] California Energy Commission, “Investment Plan for the Alternative and Renewable Fuel and Vehicle Technology Program”, CEC-600-2009-008-CTF, 2009.
- [15] S. Rasi, A. Veijanen, J. Rintala, 2007, “Trace Compounds of Biogas from Different Biogas Production Plant”, Energy, Vol.32(8), pp. 1375-1380.
- [16] NSCA, 2006, “Biogas as a Road Transport Fuel-An Assessment of the Potential Role of Biogas as Renewable Transport Fuel”.
- [17] E. Ryckebosch, M. Drouillon, H. Vervaeren, 2011, “Techniques for Transformation of Biogas to Biomethane”, Vol. 35, pp. 1633-1645.
- [18] M. Hagen, E. Polman, J. Jensen, A. Myken, O. Jönsson, A. Dahl. “Adding gas from biomass to the gas grid”. 144, Sweden: Swedish Gas Center; 2001 July. pp. Report SCG 118.
- [19] M. Persson, A. Wellinger, “Biogas Upgrading to Vehicle Fuel Standards and Grid Injection”, IEA Bioenergy : 2006.
- [20] EurObserver, 2010, “Biogas Barometer”.
- [21] 한국석유관리원, “대체천연가스 산업용 및 수송용 안정성 연구”, 2010.
- [22] 환경부, “유기성폐기물을 이용한 에너지 제품의 품질기준 설정 방안 연구”, 2008.
- [23] 에너지관리공단 신재생에너지센터, “신·재생에너지 보급 통계”, 2010.
- [24] 환경부, “유기성폐기물 에너지 활용시설 현황”, 2010.
- [25] 포항산업과학연구원, “대체천연가스 성분분석 및 유해성 평가 연구”, 2010.
- [26] www.mke.go.kr, 보도자료, 2010.10.28.
- [27] M. Pöschl, S. Ward, P. Owende, 2010, “Evaluation of Energy Efficiency of Various Biogas Production and Utilization Pathways”, Applied Energy, Vol. 87, pp. 3305-3321.
- [28] CCEM.CH, “2nd Generation Biogas-New Pathways to Efficient Use of Biomass”, A Collaborative Project in the Framework of CCEM, Competence Center for Energy and Mobility of the ETH Domain, 2010.
- [29] 지식경제부, 한국전기연구원, “신·재생에너지 의무할당제 국내 운영방안 연구”, 2009.

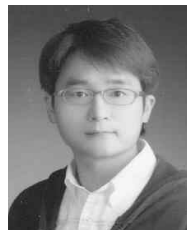
김재곤



2003년 부산대학교 화학과 이학박사
2004년 한국과학기술원 화학과 박사 후 연구원
2006년 University of Pittsburgh 화학과 박사 후 연구원

현재 한국석유관리원 녹색기술연구소 선임연구원
(E-mail : jkkim@kpetro.or.kr)

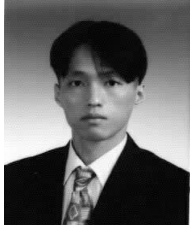
이돈민



2003년 인하대학교 화학공학과 공학사
2010년 충북대학교 화학공학과 공학석사

현재 한국석유관리원 녹색기술연구소 선임연구원
(E-mail : donmin@kpetro.or.kr)

박 천 규



1999년 인하대학교 화학공학과 공학사
2001년 인하대학교 화학공학과 공학석사
2010년 충북대학교 화학공학과 공학박사 수료

현재 한국석유관리원 녹색기술연구소 책임연구원
(E-mail : kpqi1176@kpetro.or.kr)

임 의 순



1993년 충남대학교 화학과 이학사
1996년 충남대학교 화학과 이학석사
2009년 충남대학교 화학과 이학박사

현재 한국석유관리원 녹색기술연구소 청정연료팀장
(E-mail : esyim@kpetro.or.kr)

정 충 섭



1988년 전남대학교 화학공학과 공학사
2000년 서울시립대학 화학공학과 공학석사
2007년 서울시립대학 환경공학과 공학박사

현재 한국석유관리원 녹색기술연구소 연구소장
(E-mail : csjung@kpetro.or.kr)

김 기 동



2002년 한양대학교 화학공학과 공학사
2004년 포항공과대학교 화학공학과 공학석사

현재 한국가스공사 연구개발원 책임연구원
(E-mail : kidong@kogas.or.kr)

오 영 삼



1990년 아주대학교 화학공학과 공학사
1992년 아주대학교 에너지학과 석사
1999년 아주대학교 에너지학과 박사

현재 한국가스공사 연구개발원 책임연구원
(E-mail : ysoh@kogas.re.kr)