



도시가스용 바이오가스 메탄농축공정 최적화

고상욱 · 이경진 · 문명환 · 백주홍 · †고재욱

광운대학교 화학공학과

(2017년 3월 13일 접수, 2017년 8월 17일 수정, 2017년 8월 18일 채택)

Optimization of Bio-Methane Gas Enrichment Process for City Gas Supply

Sang-Wook Ko · Kyung Jin Lee · Myong Hwan Moon · Ju Hong Baek · †Jae Wook Ko

Dept. of Chemical Engineering, KwangWoon University, Seoul 139-701, Korea

(Received March 13, 2017; Revised August 17, 2017; Accepted August 18, 2017)

요약

국내의 늘어나는 천연가스의 수요를 충족시키면서 지구온난화에 대한 대안으로 바이오가스를 도시가스로 활용하는 방안이 자연스럽게 주목받고 있다. 도시가스사업법의 개정을 통해 바이오가스의 생산 및 공급의 제도적인 기반을 구축했지만, 바이오가스내의 불순물을 제거하고 이산화탄소를 분리하여 고순도의 메탄을 제조하는 국내 기술이 부족하여 실질적인 활용이 어려운 상황이다. 따라서 본 연구에서는 고순도의 바이오메탄 농축을 위하여 멤브레인(Membrane)법, 물흡수법(Water absorption), 화학흡수법(Chemical absorption), 흡착법 4가지의 공법을 적용하여 각 시스템별 운전시나리오를 작성하고 비교하여 최적공법을 도출하였으며, 시스템별 케이스 연구를 통해 최적의 시스템을 구축할 수 있었다. 이를 이용하여 순도 97% 이상의 바이오메탄을 생산하여 도시가스로 이용하기에 충분하였으며, 회수율이 98%를 넘어 그간 경제성이 없어 버려지던 소량의 바이오가스도 회수하여 활용 할 수 있게 되었다.

Abstract - Biogas, combine with ever-increasing natural gas demand, has been on the center stage in South Korea for the early part of twenty first century in an effort to reduce the emission of global warming gases. With the passage of legal system of City Gas Business Law in 2014, the biogas has its place of production and distribution to consumers. However, it has a room for its technological improvements in terms of enrichment, by separating carbon dioxide and removing impurities efficiently. For these improvements, four different methane enrichment processes were tested in this study; membrane separation, water absorption, Chemical Absorption and Adsorption. A variety of operation scenarios were applied to the processes and the best practices were drawn out. The optimum process was selected based on case study results. Methane produced in this study showed 97% purity and 98% recovery rate, which meets the requirements of the City Gas quality standards.

Key words : bio-methane gas, enrichment process, biogas, membrane, bio-gas separation

1. 서 론

우리나라는 세계 2위의 천연가스(LNG) 수입국

으로서 에너지경제연구원에 따르면 2010년 석탄, 석유와 천연가스의 순수입량은 2009년 210,385 천 TOE보다 10.0% 증가한 231,426 천TOE를 기록하여 크게 증가하였다.

특히 2010년 우리나라가 수입한 천연가스는 총 42,384 천TOE로 33,568 천TOE인 2009년과 비교하여

†Corresponding author:jwko@kw.ac.kr

Copyright © 2017 by The Korean Institute of Gas

26.3%의 큰 폭으로 증가하였고, 지속적인 증가로 2013년에는 52,524 천TOE를 수입하였다[1].

증가하는 가스수요를 충족시키면서 지구온난화에 대한 대응방안으로 신재생에너지의 활용이 요구되고 있으며, 도시가스부문에서는 바이오가스의 활용은 천연가스의 대안으로 자연스럽게 주목받고 있으며, 2014년 7월 “도시가스사업법”의 개정을 통해 바이오가스를 생산 및 공급하는데 있어 제도적인 기반이 마련되었다.

그러나 현재 국내에서는 저열량의 바이오가스를 농축 없이 사용함으로써 단순 처리되어 버려지는 양이 약 15%~21%이고 자체소비량이 78.5%~87.6%로 대부분을 차지하고 있어, 자체소비 또는 전력생산 위주의 활용방식을 벗어나지 못하고 있다[1].

2014년 9월 개정된 천연가스 품질기준에서는 1 MPa 이하의 일반 도시가스 사업자에게 공급하기 위해서는 CO₂, O₂, N₂를 합하여 3.53%이하로 되어야 한다고 고시되어 있으며, 이는 메탄 농도를 최소 96.47%까지 농축하여야 한다는 것을 의미한다.

따라서 바이오가스를 고순도의 바이오메탄으로 제조하는 메탄 농축기술의 개발이 필요한 시점이며, 본 연구에서는 바이오가스를 고질화하여 연료전지, 수송용 및 도시가스용으로 활용할 수 있는 바이오메탄의 농축 시스템을 개발 및 최적화하였다.

II. 이론 및 기술분석

메탄 농축기술은 Fig.1에서 표시된 바와 같이 정제된 바이오가스에서 메탄을 농축하는 공정이다. 정제된 바이오가스의 주성분은 메탄과 이산화탄소이며 본 공정에서는 메탄을 97%이상 농축하고 이산화탄소는 분리하여 off-gas로 배출하게 된다.

메탄농축 기술로는 멤브레인, 흡착, 흡수 및 심냉법이 있으며, 본장에서는 각각의 특성을 조사하였다.

2.1. 멤브레인(Membrane)공법

멤브레인(Membrane)을 투과하는 투과도의 차이는 멤브레인의 전·후단의 부분압 차이에 의해 결정된다. 이 공법의 장점은 폐수나 폐화학물의 발생이 적다는 점, 압축기 외에 에너지 사용이 없어 동력비가 적다는 점, 초기 압력을 잃지 않고 분리되어 도시가스로 공급하기 위해 별도의 압축이 필요 없다는 점이고, 단점으로는 충분한 부분압 차이를 유지하기 위해서 약 40 bar수준의 높은 운영압력이 필요하다는 것과 멤브레인의 가격이 비싸다는 점이다.

최근에는 멤브레인 제조기술의 발달로 이러한 단점을 상당한 수준으로 해소하였고 10 bar이하에서도 충분한 분리특성을 나타내고 있다. 이러한 멤브레인은 이산화탄소와 메탄사이의 선택도와 투과도의 차이가 크다는 특징을 가지고 있다[2~ 4].

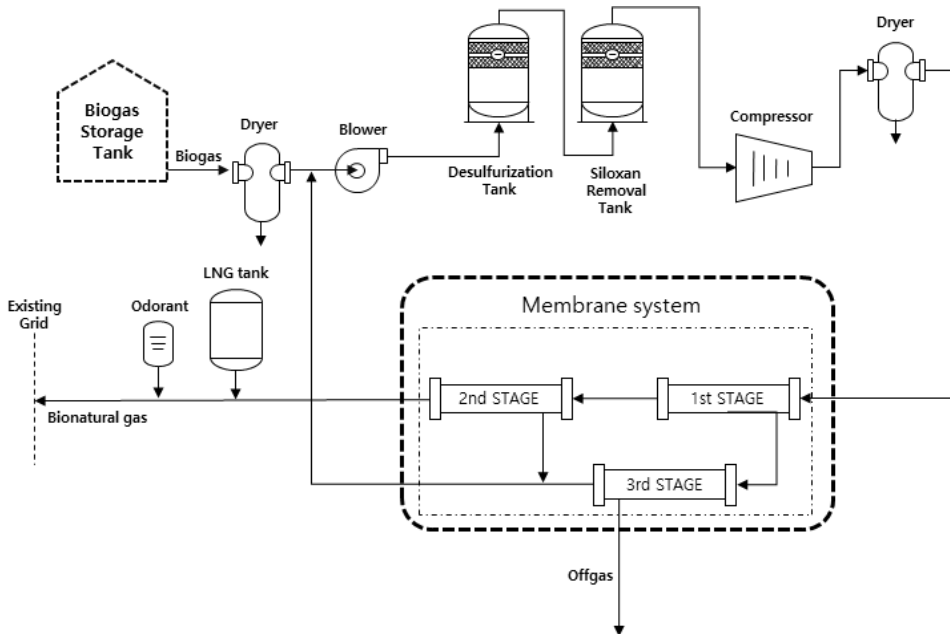


Fig. 1. Flowchart of Methane Enriching System.

2.2. 흡착공법(adsorption)

유체 내에 흡착질(adsorbate)과 흡착제(adsorbent)의 표면사이의 물리적, 화학적인 결합력에 의한 현상을 이용하여 특정 성분을 분리하는 방법이다.

흡착타워에서 기체를 가압하면 흡착제에 기체가 흡착되고, 압력을 감소시키면 흡착제로부터 기체가 탈착되어 나오는 현상을 이용한 것이다.

이 공법의 장점은 폐수발생이 없다는 것이고, 단점으로는 시스템 구성상 여러 개의 흡착타워가 필요하며 시스템이 복잡한 점, 끊임없는 밸브의 운전이 필요하여 유지관리 포인트가 많다는 점이 있다 [5~7].

흡착공법을 사용할 경우 메탄의 순도가 수송용 CNG(Compressed Natural Gas)에서는 81~98%이고 도시가스로 공급할 시에는 96~98%사이로 나타낼 수 있으며, 특히 국내에 설치된 CNG용 플랜트의 순도가 81%로 비교적 낮은 성능을 나타내고 있는 것을 알 수 있다[14].

2.3. 물흡수법(Water absorption)

이 공법은 물을 흡수액(Absorber)으로 사용하여 극성인 이산화탄소와 비극성인 메탄을 분리하는 기술이다. 물 흡수법은 이산화탄소가 물에 잘 녹는다는 점을 이용한 것으로 이산화탄소는 메탄에 비해 약 75배 이상의 높은 용해도를 보이고 있다. 이산화탄소는 압력이 높을수록, 온도가 낮을수록 물에 더 용해되는 물리적 특성이 있어 가압수를 사용하고 여름에는 냉각 에너지가 필요하다 [2~4, [8].

물 흡수법의 장점으로는 고압의 메탄이 생산되어 도시가스로 공급하기 위한 별도의 가압과정이

필요 없다는 것이며, 단점으로는 폐수가 발생하며 물의소모가 많다는 점, 고순도의 메탄을 얻기 위해서는 회수율이 떨어질 수밖에 없다는 점, 국내 계절의 특성상 여름과 겨울철에 각각 냉각과 보온 및 가열 공정이 필요하다는 점이다.

Fig.2는 물에 대한 이산화탄소와 메탄의 용해도를 나타낸 것으로 온도가 상승함에 따라 용해도가 떨어지는 것을 알 수 있으며, 20℃에서 이산화탄소의 용해도는 메탄에 비해 약 74배 높은 것을 알 수 있다 [9].

2.4. 화학흡수법(Chemical absorption)

이 흡수법은 이산화탄소와 화학적 결합력이 높은 화학제를 물에 용해하여 이산화탄소와 메탄을 분리하는 방법이다. 물 흡수법과의 차이로는 단순히 용해되는 것이 아니라 화학제와 결합한다는 점이며, 화학제로는 monoethanolamine(MEA)가 주로 사용된다. 아민의 화학흡수법(Chemical absorption)에서는 바이오가스 중 황화수소가 아민과 반응하여 흡수액을 열화 시키게 되므로 메탄 농축공정 전에 황화수소를 제거하는 공정이 필요하다[2], [10], [11].

이 흡수법의 장점은 고순도의 메탄을 높은 회수율로 분리해 낼 수 있다는 것이며, 단점으로는 고가의 화학제 재생을 위해 막대한 재생에너지가 필요하다는 점이다. 이산화탄소를 제거하는 반응식은 다음과 같다.

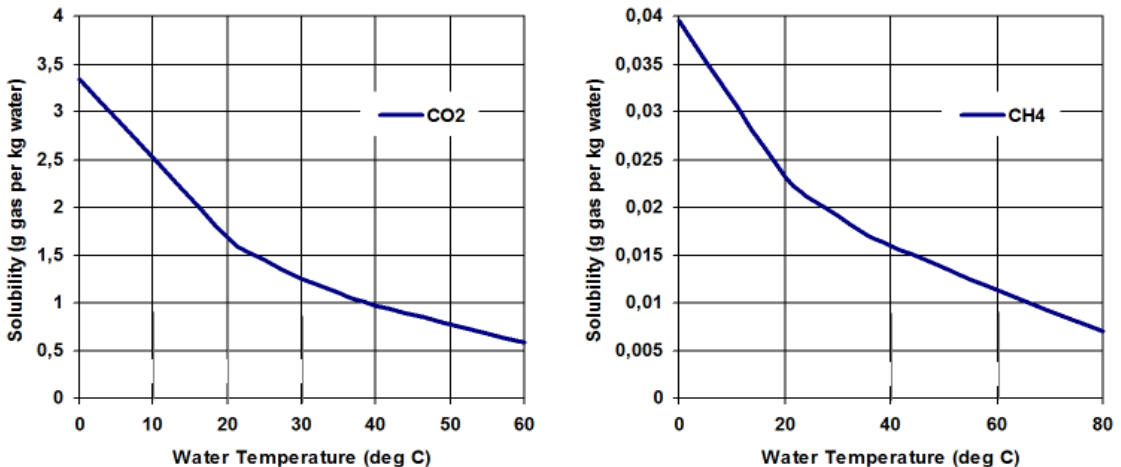


Fig. 2. Solubility of CO2 and CH4 in Water [9].

III. 메탄농축시스템 설계

3. 1. 각 공법별 설계주요인자

바이오가스를 도시가스로 공급하기 위해서는 바이오가스내의 이산화탄소를 제거하여 메탄의 순도를 도시가스품질기준 96.47 % 이상으로 농축하는 공정이 필요하다.

본 연구에서는 메탄 농축공정의 설계 주요인자로서 ①메탄의 순도와 ②순도를 맞추기 위한 메탄의 손실이 얼마인지 확인하기 위한 메탄의 회수율, ③ 바이오가스를 생산하기 위해 필요한 에너지 소비량을 설계 주요인자로 본다. 그리고 메탄 농축공정 자체의 에너지 사용량뿐만 아니라 시스템 운영을 위한 가열·냉각 열 및 도시가스로 공급하기 위한 가스 압축 에너지 등을 종합적으로 검토하여 정확한 비교평가를 통한 최적의 설계를 수행할 수 있었다.

3.1.1 멤브레인(Membrane) 공법

멤브레인(Membrane) 공법의 순도는 96.5% 이상이며, 에너지 소모량은 공급되는 바이오가스 당 0.21 kW/Nm³로 나타나고 있다.

Table 1. 은 각 회사별 멤브레인(Membrane)공법을 이용한 주요 설계인자를 나타낸 것이며, 특히, 최근 2012년에 사용화 된 EnviTec Biogas는 순도 98%, 회수율 98%이상을 나타내고 있다.

3.1.2. 흡착 공법

흡착 공법에서는 순도 81%에서 99%, 회수율은 최대 98%를 나타내고 있으나, 이는 각각 최대치만을 나타낸 것으로 97%순도로 생산시의 회수율은 나타내고 있지 않다. 최근에 국내에 수송용으로 설치된 A사의 제품의 경우 순도 97%, 회수율 92% 내외를 보이는 것으로 알려져 있다. 에너지 소모량은 공급되는 바이오가스 당 0.2 kW/Nm³로 나타나고 있으며, 생산되는 압력이 4~7 bar 혹은 그보다 낮은 상황으로 중압이상의 도시가스 배관으로 공급하기 위해 가압설비가 필요하다[13], [14].

3.1.3. 물 흡수법

물 흡수법에서는 최대 순도는 97%이상, 최대 회수율은 98%이며 실제 운영되는 국내외 물 흡수법 플랜트에서는 순도 97%, 회수율 90%수준을 보이고 있다. 에너지 소모량은 공급되는 바이오가스 당 0.4-0.5 kW/Nm³로 비교적 높다. 국내에서는 여름철에는 흡수 용액을 냉각하여야 하고, 겨울철에는 동결을 방지하기 위해 가열이 필요하여 추가 에너지 소모가 필연적이다. 압력은 6~10 bar 사이로 별도의 가압 없이

Table 1. Biogas yield and purity by individual process

Company	capacity	recovery	purity	power
Air Liquide	100~1500 Nm ³ /h	>98%	96.5~99%	
EnviTec Biogas		98 ~ 99.9%	> 98%	0.21 kWh/Nm ³
Mainsite Technologies			> 97%	
Memfoat	50~2500 Nm ³ /h			
prodeval	50~880 Nm ³ /h			
Arol Energy	100~1000 Nm ³ /h		98%	

Table 2. Biogas yield and putiry by water absorption

Company	recovery	purity	pressure	power (kwh/Nm ³)
DMT	98%	>97%	8~10 bar	0.4~0.5
Econet			6~10 bar	
Greenland Biogas	99%	>97%		
Malmberg water	98-99%	>97%		

Table 3. Biogas yield and purity by chemical absorption

Company	recovery	purity	pressure	power (kwh/Nm ³)
Arol Energy	99.9%	>98%		
BIS E.M.S. GmbH	99.95%			
Hera				0.3
MT-Biomethan	99.9%	99%		0.11
Puran Puregas	99.9%		3~7 bar	0.23~0.26

도시가스공급이 가능하다 [3], [10], [14].

3.1.4. 화학흡수법

화학흡수법(Chemical absorption)에서의 순도는 98%이상, 회수율은 99.9%이다. 에너지 소모량은 공급되는 바이오가스 당 0.11~0.3 kW/Nm³로 비교적 낮게 나타나고 있으나 흡수제로 사용되는 화학제(주로 아민)의 재생공정에서 바이오가스 당 0.65 kW/Nm³의 막대한 에너지가 추가로 소모된다.

3.2. 운전 시나리오 작성

메탄 농축공정의 운전 시나리오는 약 200 mmAq의 바이오가스를 받아서 바이오가스 농축시스템별 각각의 회수율로 메탄 농도97%이상의 바이오메탄을 생산해 내고 이를 8 bar로 운영되는 도시가스 배관에 공급하는 시나리오를 적용하였다. 시나리오를 바탕으로 농축과정에 필요한 에너지 소모량과 시스템 운영에 필요한 에너지 소모량, 각 시스템 별 가압에 필요한 에너지를 고려한 총 필요에너지를 산출하였다.

Table 4 는 바이오가스를 농축할 때의 각 공법별 소요에너지와 최대 수율, 최대 순도를 나타내고 있다. 각 공법별 순도에 따른 회수율은 화학흡수법이

98% 에서 90% 회수율, 물흡수법이 98%순도에서 94%회수율, 흡착법은 98% 회수율에서 91%회수율을 보이고 있으며, 과거 멤브레인 공법은 89.5%순도에서 78%의 수율을 보이고 있다.[14]

3.3. 비용편의 계산

실제 투자를 결정하기 위해서 수입과 지출을 비교하게 되지만 수입과 지출이 발생하는 시기가 달라 현금의 미래가치를 현재의 가치로 환산하여 계산하는 것을 고려하였고, 이를 위해 본 연구에서는 정확한 분석을 위해 할인현금수지 분석법(DCF, discount cash flow)를 사용하였다.

비용편의 분석의 주요 분석지표로는 투자회수기간법(Payback period), 내부수익률법(IRR, internal rate of return), 순현재가치(NRV, net present value) 등이 있다. 투자회수기간법은 투자비를 몇 년 안에 회수가 가능한가 하는 지표로 이해하기는 간단한 반면 수익률 또는 사업의 크기를 판단하기 어려운 단점이 있으며, 내부수익률(IRR)은 현금흐름과 순자산가치의 합을 "0"으로 만들어주는 할인율을 의미한다. 다시 말하면 현재 가치로 환산한 수익과 지출이 같아지는 수익률(또는 할인율)이며, 이 할인율을 산출하여 기대수익율과 비교하여 투자를 결정하게 된다.

Table 4. Energy Consumption [14]

Technique		Product		Energy Demand (kW/Nm ³ ,biogas)			
		Yield	Purity	Upgrading	Cool & Heat	Compressor	sum
Membrane	Conventional	78%	90%	0.21	0.08	-	0.29
	New	98%	98%	0.21	0.08	-	0.29
Pressure swing absorption		91%	98%	0.21	0.27	0.04	0.52
Water Absorbtion		94%	98%	0.15	0.30	-	0.45
Chemical absorbtion		90%	98%	0.11	0.67	0.07	0.85

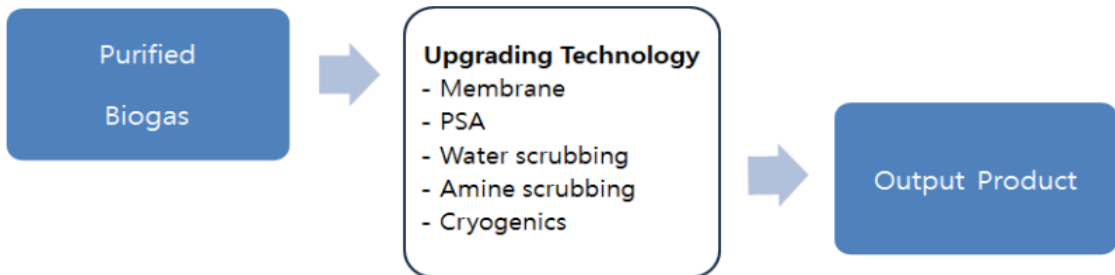


Fig. 3. Methane Enrichment Process.

$$\left(\frac{C_1}{(1+IRR)} + \frac{C_2}{(1+IRR)^2} + \dots + \frac{C_n}{(1+IRR)^n} \right) - C_0 = 0 \quad (1)$$

여기서 C_n 은 n 시점에서의 현금흐름이며, C_0 는 최초 투자비, n 은 내용연수이다.

비용편익에서 매출은 도시가스로 판매하는 것이며, 제조원가에는 원료비, 전기료, 열량조절용 LPG 구매비, 유지보수비, 인건비, 세금, 기타 수도광열비 (Utilities expenses) 등이 있다. 매출의 추정은 해당 도시가스의 평균 도매요금 단가를 적용하였으며, 이는 LNG 공급단가의 평균과 같으며, 제조원가 구성의 총합이 바이오가스 제조원가가 된다.

* 물 흡수법의 투자비 X 와 순현재가 Y를 각 항목의 기준가로 함

* 경제성 분석의 주요가정

- 사업기간 : 15년
- 법인세율 : 22%
- 현금할인율 : 5%
- 메탄순도 : 97.1%
- 바이오가스 중 메탄함량 : 60%
- 메탄회수율 : 각 시스템별 회수율 적용
- 가스판매단가 : 2014년 9월 가스공사 평균도매요금 적용
- 전기요금 : 2014년 9월 산업용 전력 고압 A 선택 II 적용
- LPG요금 : 2014년 9월 소매단가 적용
- 기타 : 시스템별 특성에 따른 적용

상기 결과에서 보면 물 흡수법이 투자비가 가장 적었으나 비용편익은 회수율이 높은 멤브레인(Membrane)이 가장 우수한 것으로 나타났다. 이는 투자비 뿐만 아니라 메탄의 회수율이 중요한 변수임을 알려주는 결과이다. 화학흡수법(Chemical absorption)은 높은 회수율에도 불구하고 화학약품 재생에 에너지 소모가 크고 투자비도 커서 사업성이 좋지 않은 것으로 나타났다. 흡착법의 경우 투자비가 비교적 높고 회수율이 낮아 비교적 경제성이 좋지 않았다.

3.4 최적시스템개발

메탄 농축시스템별로 경제성 차이가 많아 적용하고자 하는 프로젝트의 성격에 맞는 시스템 선정이 매우 중요한 것을 알 수 있으며, 본 연구에서는 가장 좋은 경제성을 보여주었던 멤브레인 방식을 이용하여 최적화 설계를 진행하였다.

멤브레인 방식은 투자비가 비교적 적은 2단 농축 방식과 투자비는 높으나 메탄회수율이 높은 3단 농축방식이 있으며, 이 두 가지 방식을 비교하여 최적

의 시스템을 구성하고자 한다.

두 시스템별 주요 설계인자는 멤브레인 설치 숫자에 따른 투자비 변동과 메탄 순도에서의 회수율의 차이이다. Table 5 는 멤브레인 시스템의 농축단별 주요인자를 나타낸 것이며 이를 기반으로 분석한 비용편익 계산의 결과는 Table 6 과 같다.

Table 5. Main factor of 2 different membrane systems

Remark	Investment cost	Yield	Purity	Methane slip
3-stage	relatively high	98.5%	97.1%	very low
2-stage	relatively low	92.8%	97.1%	low

Table 6. Benefit cost analysis results of the membrane systems

Results	3 stage	2 stage		
		price 1	price 2	price 3
Investment cost (100million₩)	X	X - 9.4	X - 7.3	X - 6.4
IRR	15.42%	15.42%	14.83%	14.58%
NPV (100million₩)	Y	Y - 6.6	Y - 8.3	Y - 9.0
Payback period (year)	7.8	7.8	8.1	8.2

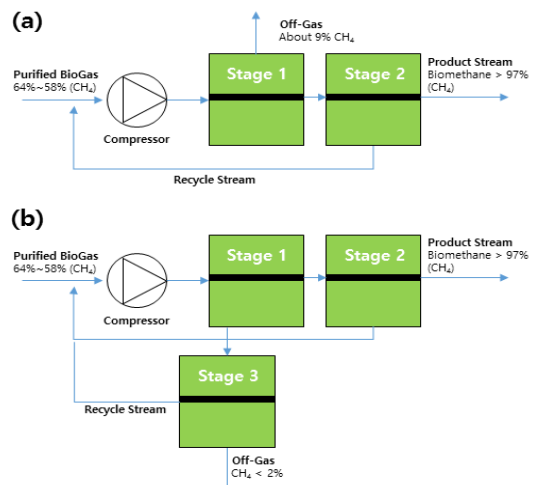


Fig. 4. Schematic diagrams of 2 different membrane systems.

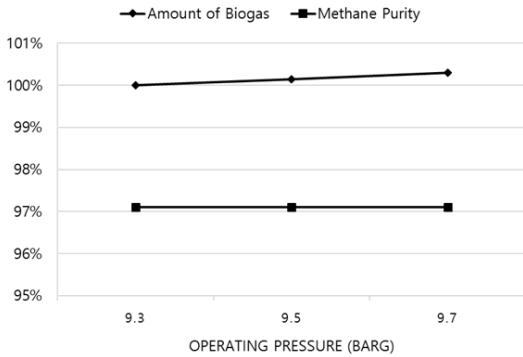


Fig. 5. Expected biogas introduced with respect to operating pressure.

본 연구 결과에서는 멤브레인 가격당 약 10백만원/대를 넘는 경우 2단 농축시스템과 3단 농축시스템의 비용편익이 IRR기준으로 비슷한 결과를 보였다. 그러나 NPV의 경우는 3단 농축법이 더 높은 것을 알 수 있다.

2단 농축의 경우 농축 후 이산화탄소 분위기의 배출가스 내의 메탄 함량이 약 9% 수준이어서 농축 후 배출하게 되는 가스를 연소해야 하는 경우가 발생할 수 있으며, 이에 따른 투자비용 증가와 운영비용 증가가 발생할 수 있어 경제적으로나 환경적으로도 3단 농축시스템이 우수함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 3단 농축 멤브레인 시스템으로 최적 설계를 진행하였다.

IV. 시스템 적용

운전 예측 데이터는 멤브레인에 공급되는 압력과 바이오가스의 품질 두 가지 변수를 가지고 산출하였다. 이에 따른 운영 값과 운전 모드 별로 예측한 결과 데이터와 개발된 플랜트의 운전 모드별 예상 운전 결과는 다음과 같다.

Fig.5 는 인입되는 바이오가스에서의 메탄 순도가 60%이고 약 97.1%의 바이오메탄을 생산할 때 운전 압력에 따른 바이오가스 처리량을 예측한 결과이다. 멤브레인으로 인입되는 운전압력이 높아짐에 따라 처리량이 증가하는 경향을 보이고 있어 멤브레인의 특성을 잘 나타내고 있다.

Fig. 6은 메탄순도 약 97.1%에서 조절되는 플랜트에서 멤브레인의 인입압력이 증가함에 따라 바이오메탄 생산량이 증가하는 것을 보여주고 있다. 인입 바이오가스의 메탄 농도가 약 66%에서의 운전 결과 값을 기록하였다. 바이오가스 인입량과 생산량은 예측된 값을 기준으로 백분율로 나타내었다.

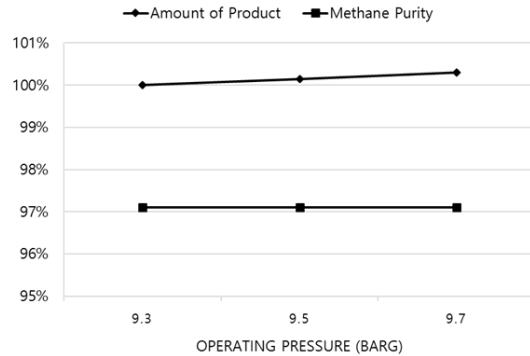


Fig. 6. Expected biogas yields with respect to operating pressure.

Table 7. Operation results

remark	estimated result	operation results	
		same operation condition	same methane purity of product
Amount of input biogas	100.00%	99.72%	100.16%
Methane purity at input biogas	66.00%	65.96%	65.96%
Amount of product gas	100.00%	99.11%	99.96%
Methane purity at product gas	97.10%	97.49%	97.10%
Recovery rate	98.78%	98.57%	98.58%
Methane loss	1.22%	1.43%	1.42%

Table 7 는 예측결과와 같은 운전조건의 경우와 생산된 바이오메탄의 순도를 97.1%로 고정된 경우의 조건에서의 결과 값이다.

V. 결론

바이오메탄의 순도는 97% 이상으로 잘 유지되고 있으나 회수율이 예측한 값보다는 다소 낮게 나타나고 있다. 이는 실제 운전 시 가스성분의 분석 시점과 유량발생 시기의 차이와 분석용 바이오가스 사용 등의 영향으로 분석된다. 그러나 그 차이는 매우 미미하며 순도 97%이상의 바이오메탄을 98.5%의 회수율로 생산해내고 있어 이제까지 상용화된 바이오가스 메탄 농축시스템에 비해 가장 높은 수준의 성능을 보이고 있고 최적의 설계가 완료되었

음을 잘 보여주고 있다.

메탄 농축시스템의 개발을 위하여 기존의 상용화된 메탄 농축시스템을 조사하여 멤브레인(Membrane)법, 물흡수법(Water absorption), 화학흡수법(Chemical absorption), 흡착법 4가지 공법을 대상으로 선정하고 각각의 시스템별 운전시나리오를 작성하여 주요 비교 데이터를 산출하였고 비교평가를 통해 최적공법을 도출하였다. 이후 시스템 적용을 통하여 최적단수 설정 후 실제 운전결과와의 비교를 통한 검증은 완료하였으며, Amount of input bio gas, Methane purity at input biogas, Amount of product gas, Methane purity at product gas, Recovery rate, Methane loss 항목들에서 예측 값과 운전결과가 ±0.5%의 오차를 보여주었다.

본 연구에서는 멤브레인(Membrane) 공법이 가장 우수하였고, 최적의 멤브레인 공법 개발을 위한 시스템별 케이스연구를 통해 최적의 시스템을 구축하였다. 개발 시스템은 여러 가지 변수에 대해 97%이상의 높은 메탄순도에서 메탄회수율이 98.8%이상이었으며 실제 운전결과에서도 비슷한 결과를 나타내었다.

개발이 완료된 시스템은 실제 사례에서도 도시가스로 이용하기에 충분한 순도 97%이상의 바이오메탄을 안정적으로 생산하고 있고, 이러한 고순도의 메탄을 생산하면서도 회수율이 98%를 넘어 고효율의 제품개발로 그간 경제성이 없어 버려지던 소량의 바이오가스도 회수하여 활용할 수 있게 되었으며 향후, 도시가스뿐만 아니라 수송용, 연료전지, 화학공정 등에 광범위하게 활용되기를 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 광운대학교 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

REFERENCES

- [1] "2011 Reported from Ministry of Environment", 2014 Statistic Korea, (2014)
- [2] Biogas upgrading and utilization, "Task 24-Energy from biological conversion of organic wastes", IEA Bioenergy, (1999)
- [3] Persson M, "Evaluation of upgrading techniques for biogas", Swedish Gas Center, Report SGC 142, (2003)
- [4] J. de Hullu, J.I.W. Maassen, P.A. van Meel, S.Shazad, J.M.P, "Comparing different biogas upgrading techniques", Eindhoven University of Technology, Vaessen, (2008)
- [5] Petersson A., Wellinger A., Biogas upgrading technologies-developments and innovations, (2009)
- [6] Dr. Arthur Wellinger, "Standardization of biomethane", Green Gas Grid, (2014)
- [7] "Upgrading plant for producing grid quality gas from landfill gas using Pressure Swing Adsorption", CADDET renewable energy, (2002)
- [8] Saikkonen K. A., "Technical and economic feasibility of upgrading dairy manure-derived biogas for natural gas pipeline", Master's thesis, Cornell University, (2006)
- [9] Swanson C., "Process Modeling of a Water Scrubbing System for Upgrading of Biogas to Grid Injection Standards - Model Development and Process Optimization"., Lund University, (2011)
- [10] "Feasibility Study - Biogas upgrading and grid injection" in the Fraser Valley, British Columbia 62Prepared by: Electrigaz Technologies Inc Final Report June, (2008)
- [11] Persson M, Jonsson O, Wellinger A, "Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection.", IEA Bioenergy, Task 37-Energy from Biogas and Landfill Gas, (2006)
- [12] Fredric Bauer Christian Hultheberg, Persson T., Tamm D., "Biogas upgrading-Review of commercial technology", Swedish Gas Center, Report SGC 270, (2013)
- [13] Saikkonen K. A., "Technical and economic feasibility of upgrading dairy manure-derived biogas for natural gas pipeline", Master's thesis, Cornell University, (2006)
- [14] Persson M., Wellinger A., Rebnlund R., Rabm L., "Report on technological applicability of existing biogas upgrading processes", (2007)