

질소 분리용 막을 이용한 매립가스내 메탄 회수 연구 Research on the Methane Recovery from Landfill Gas by Applying Nitrogen Gas Separator Membrane

천 승 규
Seung-Kyu Chun

수도권매립지관리공사
SUDOKWON Landfill Site Management Corporation

(2013년 8월 16일 접수, 2013년 8월 29일 채택)

Abstract : This experiment was performed to enhance CH₄ purity of landfill gas by applying gas separator membrane for purified nitrogen gas production. 1:6 area ratios of 1st to 2nd membrane module was suitable for CH₄ recovery. After separation membrane system was installed, 249 tries were performed. Average permeability for CH₄ was 28.4% and for CO₂ was 94.3%. This can explain nitrogen gas separator membrane can be applied to collect CH₄ from LFG. However, nitrogen permeability only reached up to 16.5%. Therefore, the final purified landfill gas concentration was rounded up to 69.7% for CH₄, 4.3% for CO₂ and 26.0% for N₂. For the high degree of CH₄ purity, N₂ should be kept at least under 2.0% by controlling air inflow to landfill.

Key Words : Gas Separator Membrane, Landfill Gas, Methane, Biogas, Air Inflow

요약 : 정제 질소가스 생산용 기체 분리막을 매립가스의 CH₄ 순도를 높이는데 활용하기 위한 연구를 수행하였다. 1단과 2단 분리막 모듈의 면적비는 1:6인 경우가 CH₄ 회수를 위해서 적절하였다. 분리막 장치 설치 후 총 249회에 걸쳐 실험을 하였으며, 투과율은 평균 CH₄ 28.4%, CO₂ 94.3%로서, 매립가스로부터 CH₄를 회수하는데 N₂ 분리막의 사용 가능성을 확인할 수 있었다. 다만, N₂ 투과율 역시 16.5%에 불과하였으며, 이에 따라 최종 정제된 LFG의 농도는 CH₄ 69.7%, CO₂ 4.3%, N₂ 26.0%이었다. 따라서 CH₄의 순도를 높이기 위해서는 매립장내 외기유입 억제를 통해 N₂ 농도를 적어도 2.0% 이내로 제한할 필요가 있었다.

주제어 : 기체 분리막, 매립가스, 메탄, 바이오가스, 외기유입

1. 서론

폐기물의 분해에 의해 발생하는 매립가스(LFG)의 주된 성분은 메탄(CH₄)과 이산화탄소(CO₂)이나 매립 경과시간이나 외기 유입 여부에 따라 질소(N₂)와 산소(O₂)를 포함할 수 있으며, 이외에도 황화수소, 암모니아, 실록산¹⁾ 및 기타 휘발성 유기화합물 등 다양한 미량 가스를 포함하고 있다. 이 가운데 CH₄는 음식물, 종이, 목질 등 바이오매스의 혐기성 생물분해에 의해 생성되며, 매립장의 복토층 등을 통해 발산²⁾될 경우 GWP 21의 대표적 지구온난화 원인물질이지만, 효과적으로 포집하여 활용할 경우 저위 발열량 약 8,560 kcal/Nm³인 바이오가스로서 주요한 신재생 에너지원이기도 하다.

CH₄가 함유된 매립가스는 다양한 에너지화 방식이 가능하지만, 아직까지는 전 세계적으로 전력생산 방식이 대부분을 차지하고 있다. 그러나 최근 정제기술의 발달로 매립가스를 고순도로 정제하여 자동차연료나 도시가스 배관망에 적용하는 방법이 점차 증가하고 있다. 매립가스를 포함한 바이오가스의 정제기술로는 흡착법, 흡수법, 막분리법,^{3,4)} 초저온 액화, 가스 하이드레이트 기술 등이 있다. 이 가운데 고분자 분리막을 이용한 기체분리 공정은 쉬운 작동성, 작은 규모, 낮은 에너지 소모량, 이동성, 신뢰성, 공간 효율성

등의 장점을 가지고 있다.

그러나 혼합기체중의 CO₂ 분리는 CO₂의 높은 용해도로 인한 고분자 분리막의 가스화 및 압밀화 현상으로 인해 지금까지 주로 흡수, 흡착법에 의존하고 있다.⁵⁾ 또한 막분리 방식은 매립가스보다는 혐기성 소화가스에 주로 이용되고 있는데, 이는 일반적으로 매립가스가 상대적으로 CH₄ 함량이 적고 분리막의 손상이나 성능저하를 유발하는 물질이 많기 때문이다. 따라서 매립가스 정제에 기체 분리막을 경제적으로 적용하기 위해서는 매립가스내 주요 성분인 CH₄와 CO₂에 대한 우수한 분리성능을 지니는 막 자체의 개발⁶⁾뿐 아니라, 기존에 개발된 막모듈의 현장적용을 위한 공정설계, N₂와 같은 정제 방해성분에 대한 제어문제 등을 함께 고려해야 할 것이다.

본 연구를 통해 국내에서 개발된 기체분리막중 N₂와 O₂ 분리용 막⁷⁾을 이용하여 매립가스내 CH₄ 정제용으로서의 활용 가능성을 타진하고자 하였다. 이를 위해 막모듈의 효과적인 2단 방식의 공정설계안을 마련하고, CH₄, CO₂ 및 N₂의 매립가스내 함량비에 따른 분리성능을 평가하였다. 또한, 매립장의 실 현장 모니터링 결과를 분석하여 향후 기체 분리막 방식의 매립가스 정제를 위해서는 매립장 복토 및 포집시스템의 적정 운영과 함께, 분리막 이후의 N₂ 저감공정에 대한 추가연구가 필요함을 확인하였다.

† Corresponding author E-mail: tocsk@naver.com Tel: 032-560-9570 Fax: 032-560-9649

2. 실험방법

2.1. 매립가스 및 전처리

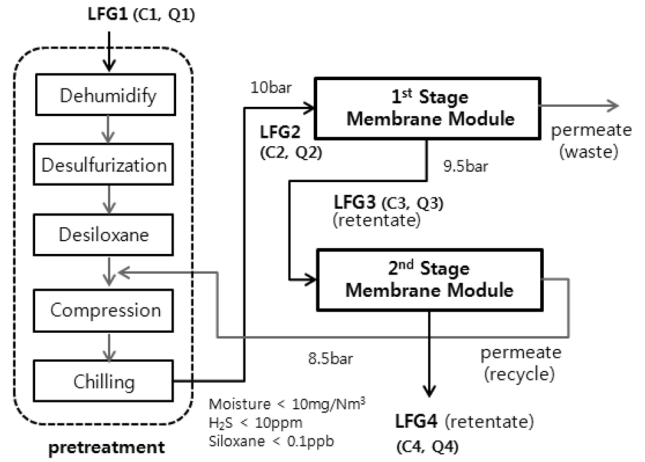
막분리 실험에 사용할 매립가스 확보를 위해 수도권매립지 제2매립장의 총 25개 블럭중 2D블럭(300 m × 300 m)에 별도의 포집관을 설치하였다. 2D블럭에서 발생하는 전체 매립가스량은 5~8 Nm³/min이며, 이중 연구시설로 평균 761 L/min를 인발하여 사용하였다.

매립가스 중에는 CH₄와 CO₂ 외에 불순물이 다량 함유되어 있다. 특히 수분, 황화수소, 실록산은 분리막의 직접적 손상과 정제시설의 부식, 정제효율 저하 등의 원인이 되므로⁸⁾ 전처리 공정을 통해 제거해야한다. 전처리 시설은 제습, 건식탈황, 탈실록산 공정의 순서로 구성하였다. 제습 이후 1단계 산화철(FeO₃)조, 2단계 침착활성탄조와 3단계 실리카겔조를 순차적으로 거치도록 하여 탈황 및 탈실록산 처리를 하였으며, 이를 통해 수분 10 mg/Nm³, 황화수소 10 ppm, 실록산 0.1 ppb 이하로 처리한 후 분리막 실험장치로 공급하였다.

2.2. 실험장치 구성

분리막은 Fig. 1과 같은 국내에서 제조된 폴리술폰계 고분자 중공사막 모듈(Airrane사, 4060A, 3032A)을 이용하였다. 동 분리막은 고순도 N₂를 제조하기 위한 것으로, O₂는 분리막을 투과시켜 제거하고 N₂는 막에 의해 저지되도록 하여 N₂농도를 높이는 방식이다. N₂ 정제용 기체 분리막을 적용하기로 한 이유는 N₂와 CH₄는 다른 소재의 막에 비하여 폴리술폰계 고분자 막의 선택도 및 투과도에 있어서 비교적 유사한 특성을 가지고 있기 때문이다.⁹⁾ 동 분리막을 이용하여 투과도가 높은 CO₂는 분리막을 투과시켜 제거하고 투과도가 낮은 CH₄는 막을 통해 저지시켜 두 가스를 분리하고자 하였다.

Fig. 2는 실험을 위해 구성한 매립가스의 전처리와 분리막 실험장치 그리고 각 단계별 CO₂ 등의 분리막 투과율 분석 방법이다. 사전 실험결과, 분리막 모듈 구성에 있어서 단단 방식의 경우는 CO₂의 제거율이 낮아 본 연구에는 2단 방식을 적용하기로 하였다. 그리고 2단 방식의 경우도 1단과 2단 모듈간 분리막의 상대적인 면적비에 따라 CH₄ 투과율이



$$P_T = \left(1 - \frac{C_4 Q_4}{C_1 Q_1}\right) \times 100 \text{ (Total permeability on the basis of LFG1)}$$

$$P_{S1} = \left(1 - \frac{C_3 Q_3}{C_2 Q_2}\right) \times 100 \text{ (Permeability of 1st stage membrane module)}$$

$$P_{S2} = \left(1 - \frac{C_4 Q_4}{C_3 Q_3}\right) \times 100 \text{ (Permeability of 2nd stage membrane module)}$$

$$P_{S3} = \left(1 - \frac{C_4 Q_4}{C_3 Q_3}\right) \times 100 \text{ (Total permeability on the basis of LFG2)}$$

Fig. 2. The experiment process of membrane refinement for LFG.

다를 수 있다. 따라서 1단과 2단 모듈로의 매립가스 유입밸브 개폐조작을 통해 1단과 2단 분리막 모듈을 복수의 면적비로 하여 시험하였고, 상대적으로 CH₄의 막 저지율이 우수하면서 CO₂ 투과율을 높일 수 있는 구성비를 찾아 본 실험에 적용하였다.

실험은 약 3개월간(2012.2.13~5.18) 진행하였으며, 전처리된 매립가스는 압축공정을 통해서 10 bar로 1단으로 유입하였고, 2단의 유입압력은 9.5 bar, 2단 토출압력은 8.5 bar가 유지되도록 하였다. 아울러 CH₄의 회수율 향상을 위하여 2단을 투과한 매립가스는 압축 및 냉각 단계로 재순환하도록 하였다. 동 실험장치를 이용하여 연구기간중 총 249회에 걸쳐 최초 공급 매립가스(LFG1)에서부터 최종 생산(LFG4)까지 각 단계별로 매립가스내 CH₄ 등 가스 조성별 분리막 투과율 등을 분석하였다.

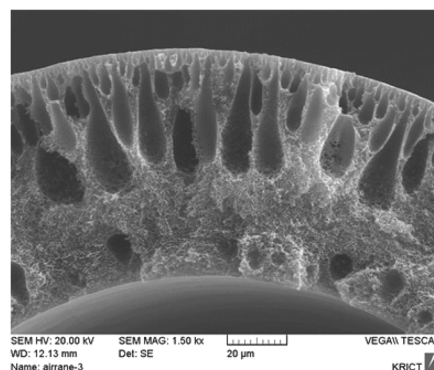
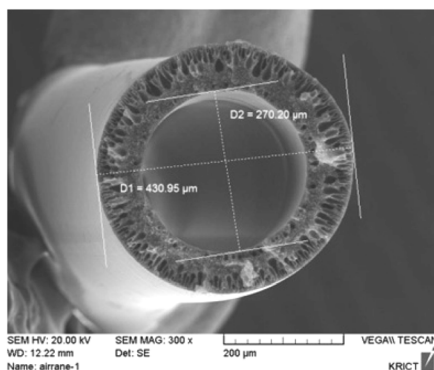


Fig. 1. Cross section of nitrogen separator hollow fiber membrane by an electron microscope.

2.3. 제2매립장 외기유입율 분석

매립장내 외기 유입에 따른 CH₄ 절대량의 감소와 N₂ 농도의 증가는 결국, 매립가스의 분리막 정제에 있어 CH₄ 회수량의 감소와 정제 후 생산된 바이오가스의 CH₄ 순도저하 문제를 유발한다. 제2매립장은 수직가스포집정을 이용하여 LFG를 능동포집하고 있으며, MS (Manifold Station)에서 유입밸브의 개도를 조절을 통해 포집량을 조정하고 있다. 매립가스내 외기유입량을 파악하기 위해 44개 MS에서 측정된 699개 수직가스포집정별 매립가스 측정자료를 활용하였다. 동 측정자료에서 N₂를 외기 유입지표¹⁰⁾로 사용하여 외기유입현황과 외기유입시 함께 유입되는 O₂가 CH₄의 함량에 미치는 영향을 분석하였다. 아울러 2002년부터 2012까지 제2매립장에 대한 외기 유입추이와 이에 따른 매립가스 조성변화를 함께 고찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 매립가스 조성

연구기간 중 2D블럭에서 공급된 매립가스내 CH₄의 평균 농도는 46.6%, CO₂ 38.3% 그리고 외기유입에 의한 N₂ 14.9%이었다. O₂의 경우는 N₂와 함께 유입되므로 N₂량 기준으로는 약 4.0%가 되어야 하지만, 생화학적 반응에 의하여 대부분 소모되므로 평균 0.16%로 매우 작았다.

매립가스 조성은 같은 블럭에서 공급했음에도 Table 1과 같이 변동이 있었는데, 이는 매립가스 능동포집을 실시함에 따라 MS에서의 매립가스 유입밸브에 개도를 조정 등에 따른 포집부압의 변화가 매립장내 외기 유입율에 변화를 일으키고, 또한 기온과 강우량 등이 복합적으로 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다.

3.2. 막 분리 효율

3.2.1. 분리막 면적비별 분리 효율

1단과 2단 막모듈의 면적비를 다양하게 하여 실험한 결과는 Fig. 3과 같았다. 1단 모듈면적이 2단보다 큰 4:3의 경우는 CH₄의 막 투과율이 43.5%로 지나치게 컸으며, 2:5의 경우는 CO₂의 투과율 99.4%로 가장 우수했으나, 선택도도 그만큼 떨어져 CH₄ 투과율 역시 47.9%로서 가장 컸다. 또

Table 1. The concentration range of LFG components of 2D block

Components	Concentration
CH ₄ (%)	43.1 ~ 50.2
CO ₂ (%)	35.2 ~ 41.5
N ₂ (%)	10.5 ~ 19.7
O ₂ (%)	0 ~ 0.9
H ₂ S (ppm)	6,000 ~ 16,000
Siloxane (ppm)	0 ~ 3.6
Moisture (mg/Nm ³)	1,500 ~3,000

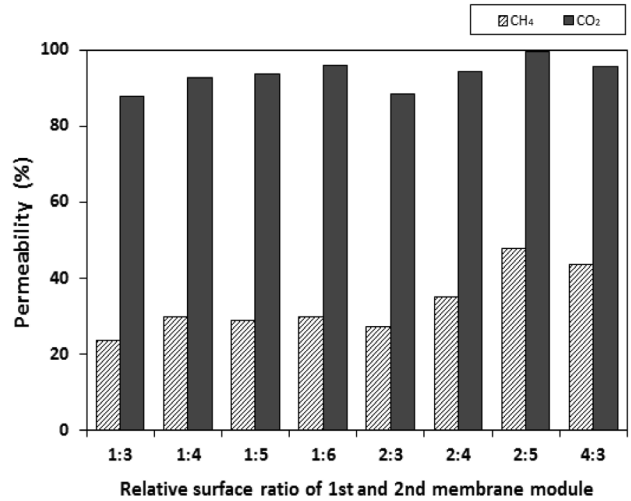


Fig. 3. Permeability of CH₄ and CO₂ in each relative surface ratio of 1st and 2nd membrane module.

한 2:3의 경우는 CO₂ 투과율이 88.4%로 가장 저조했다. 1단과 2단의 면적비 1:4에서 1:6까지의 CH₄ 투과율은 28.7~30.0%로 거의 유사했고, CO₂ 투과율은 1:6이 95.9%로 가장 우수했다. 1:7 이상으로 비율을 조절하는 것은 현실적으로 시설구성이나 운영상 어려움이 많아 1:6이 최적 비율로 판단되었다.

3.2.2. 매립가스 주요 성분별 막분리 효율

Table 2는 1단과 2단 분리막 모듈을 막 면적비 1:6으로 구성한 후, CH₄, N₂, CO₂에 대한 총 249회 분리효율 실험 평균값이다. 각 단계별 분리효율 모두 N₂ 보다는 CH₄가 막에 대한 투과도가 다소 높았으나, 모듈의 배치와 재순환 방식 적용 등 공정설계를 합리적으로 할 경우 N₂ 분리막을 CH₄ 분리막으로도 충분히 사용할 수 있음을 알 수 있었다. 즉, 최초 공급 매립가스인 LFG1에 대한 1, 2단 분리막의 최종적인 투과율에 있어서 N₂는 16.5%, CH₄는 28.4%이었다. 반면, CO₂는 1, 2단을 거치면서 대부분 막을 투과하여 제거되었고, 투과율은 94.3%이었다. 한편, 1단의 분리효율만을 보면 CH₄의 회수율은 82.3%로 높으나, CO₂ 잔류율도 49.0%에 달했다. 이는, 당초 단단분리막의 적용을 포기한 이유이기도 하다. LFG2를 기준으로 할 경우 총괄 투과율(P_{S3})은 CH₄의 경우 50%를 넘는 문제가 있었다. 그러나 Fig. 1과 같이 LFG4를 재순환하기 때문에 LFG1을 기준으로 할 때의 총괄 투과율(P_T)은 28.4%로 낮출 수 있었다.

Table 2. Permeability in each stage of separator membrane experiment

	N ₂ (%)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)
P _{S1}	13.66	17.73	51.02
P _{S2}	23.60	41.39	94.18
P _{S3}	39.47	51.63	97.06
P _T	16.46	28.37	94.34

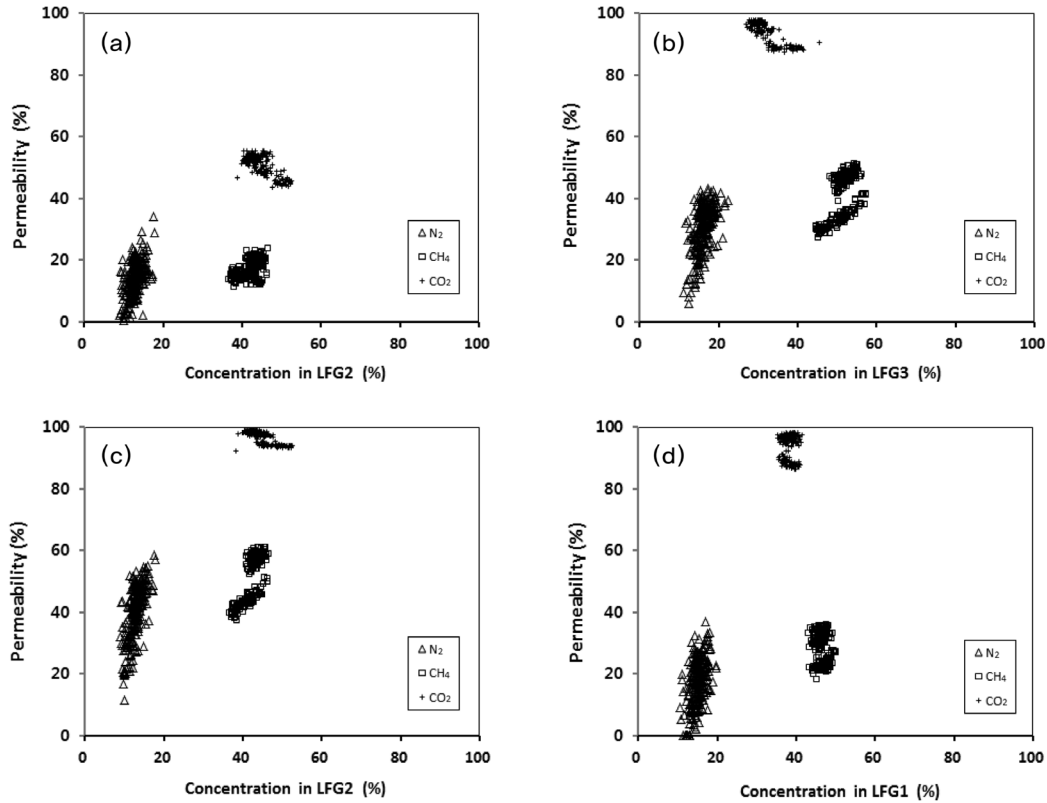


Fig. 4. Distribution of permeability (a) P_{S1} (b) P_{S2} (c) P_{S3} (d) P_T.

Fig. 4(a)~(d)는 249회 운영결과를 모두 나타낸 것이다. 각 실험마다 일정부분의 편차가 존재하기는 하지만, CH₄, CO₂, N₂ 각 경우의 투과율은 일관된 경향을 보이고 있었다. CH₄와 N₂의 경우 전반적으로 CH₄의 투과율이 컸으나 서로 비슷한 경향을 보이고 있고, CO₂의 경우 모든 경우에 있어 투과율이 훨씬 높게 나타났다. N₂의 경우는 상대적으로 소량이고, 또한 CH₄와 CO₂ 그리고 O₂의 측정치를 100%에서 제외하여 얻은 값이므로 편차가 컸다.

Fig. 5는 공급된 매립가스(LFG1)내 CH₄/CO₂ 비와 P_T 및 LFG4의 CH₄/CO₂ 비와의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 5에서

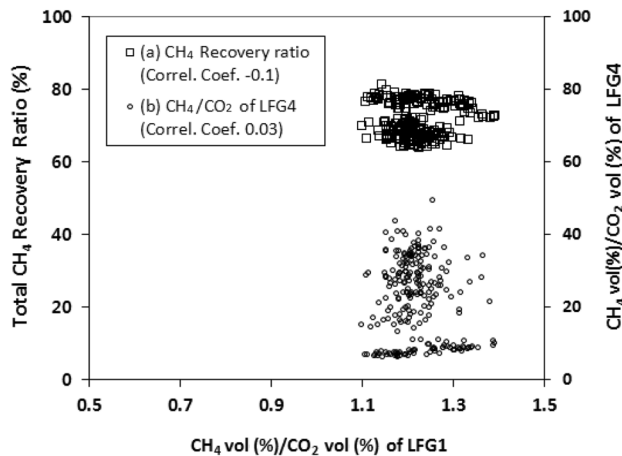


Fig. 5. Total recovered CH₄ ratio and CH₄/CO₂ ratio of LFG4 according to CH₄/CO₂ ratio of LFG1.

볼 수 있듯, LFG1의 CH₄/CO₂ 비는 P_T나 LFG4의 CH₄/CO₂ 비와 상관성이 거의 없다. 이는 CO₂의 1, 2단 총괄 막 투과율이 CH₄ 보다 훨씬 크고, 분리막이 비교적 CH₄와 CO₂에 대하여 일관된 투과율을 보이기 때문이다. 즉, 매립장의 경과연수와 매립폐기물의 종류 그리고 매립장 관리방식에 따라 CH₄와 CO₂의 비율은 달라지고, CH₄의 상대적 비율이 크면 경제성측면에서 좋은 것은 당연하나, CH₄ 자체의 회수율이나 순도에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 6(a)는 249회 측정값에 대하여 LFG1의 농도별 LFG4의 농도를 나타낸 것으로, 압력조건을 일정하게 유지하였기 때문에 LFG4의 농도는 대체로 성분별로 일정한 범위를 보이고 있었다. Fig. 6(b)는 최초 공급 매립가스인 LFG1이 전처리 및 1, 2단 분리막을 거치는 동안 CH₄, CO₂, N₂ 조성의 변화 및 최종 CH₄ 회수율의 평균값을 나타낸 것이다. CH₄와 N₂는 초기 46.6%, 14.9%에서 농축을 거쳐 69.7%, 26.0%로 증가하고, CO₂는 38.3%에서 4.3%로 감소하였다. 그러나 이 과정에서 CH₄는 28.4%가 손실되어 결국 CH₄의 회수율은 71.6%로 나타났다. 또한, 정제된 매립가스의 CH₄ 순도는 69.7%로서 N₂를 제외하면 94.2%에 해당하였다. 향후, N₂ 분리막을 매립가스 정제에 사용하는데 있어서 CH₄의 회수율을 좀 더 높일 수 있는 연구가 필요할 것으로 판단되었다. 또한, N₂의 농축이 함께 일어나고 N₂의 막 저지율이 CH₄ 보다 다소 높기 때문에 정제대상 매립가스내 N₂의 함량은 동방식의 적용여부를 결정짓는 가장 중요한 요소였다.

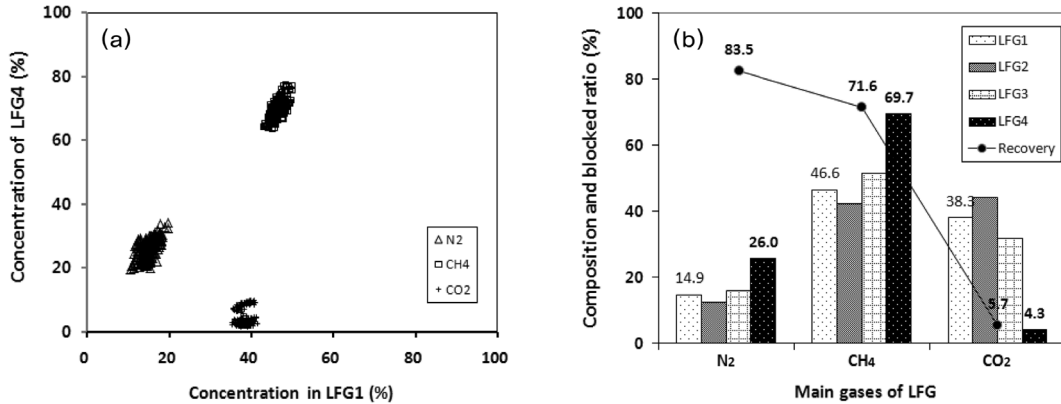


Fig. 6. (a) Distribution of concentrations (LFG1 vs. LFG4) (b) Composition of LFG1-LFG4 and total blocked (recovery) ratio.

매립지에서의 CH₄ 발생량 감소에는 여러 요인이 영향을 미칠 수 있으나,¹¹⁾ 외기가 유입될 경우, O₂에 의하여 CH₄의 생산 저하와 산화 등으로 CH₄ 함량 자체가 감소한다. 매립장내부로의 외기 유입은 수직정의 구조와 포집방식, 복토층의 투과성 등 여러 요소에 의해 달라지며,¹²⁾ 결국 매립장의 운영방식과 밀접한 관련이 있다. 또한 외기 유입으로 인한 N₂는 CH₄와 함께 분리막에 의해 저지되어 최종 정제된 매립가스내 CH₄의 순도를 떨어뜨리게 된다. 정제된 매립가스를 자동차연료 등으로 활용하기 위해서는 현행 관련법상 CH₄ 95% 이상의 순도가 필요하다. 연구결과, 추가적인 공정설계와 운영노하우가 축적된다면 CO₂를 3% 이하로 감축하는 것이 충분히 가능할 것으로 판단되지만, N₂의 경우 분리막 저지율이 83.5%에 달하므로 초기 매립가스의 N₂농도는 적어도 2%이내로 관리되어야 할 필요가 있었다.

3.3. 매립장내 외기 유입 및 영향 분석

수도권매립지 제2매립장의 699개 수직가스포집정에서의 5일간의 매립가스 조성분석 데이터를 분석한 결과, 전체 측정 데이터 중 외기유입이 있는 경우는 73.6%이었다. 이 가운데 외기유입율이 10% 이상인 경우는 48.1%, 20% 이상인 경우도 25.6%에 달했다. N₂농도 2% 이내는 전체 데이터의 32.3%이었고, 유량기준으로는 전체 유량의 45.5%이었다.

699개의 수직가스포집정에서 포집되는 유량은 중앙에서 통합되므로 2% 이내 유량 총합이 가지는 의미는 현실적으로 크지는 않으나, 향후 매립장 외기 유입관리와 관련하여 시사하는 바는 적지 않다.

Fig. 7(a)는 699개 수직가스포집정의 외기 유입을 대비 CO₂/CH₄ 비를 나타낸 것이다. 편차가 크기는 하지만 외기 유입에 따라 CO₂의 상대적인 비율이 증가하는 것은 분명히 확인할 수 있었다. Fig. 7(b)는 제2매립장의 매립가스를 포집하기 시작한 이후의 매립가스 조성의 변화추이이다. 연평균 분석치를 보면 2010년부터 급격히 증가하기 시작한 외기 유입으로 인해 매립가스내 N₂ 함량은 2012년도에 이미 13.3%에 달하고 있다. 또한, N₂ 농도 증가에 따른 희석효과가 포함된 함량임에도 CO₂의 경우와는 달리 CH₄의 농도감소 현상은 분명하다.

따라서 향후 제2매립장의 매립가스를 기체 분리막을 이용하여 정제·연료화하기 위해서는 매립장의 외기유입을 줄일 수 있는 방안을 강구하거나, 분리막 정제이후 N₂를 제거할 수 있는 후처리 공정의 검토가 필요하다. 경우에 따라서는 일부 블럭들을 대상으로 외기유입에 따른 N₂ 함량을 최소한 2% 이내로 관리하면서 해당 구간에서 포집된 매립가스를 대상으로 기체 분리막 방식 적용을 검토할 수 있을 것으로 판단된다.

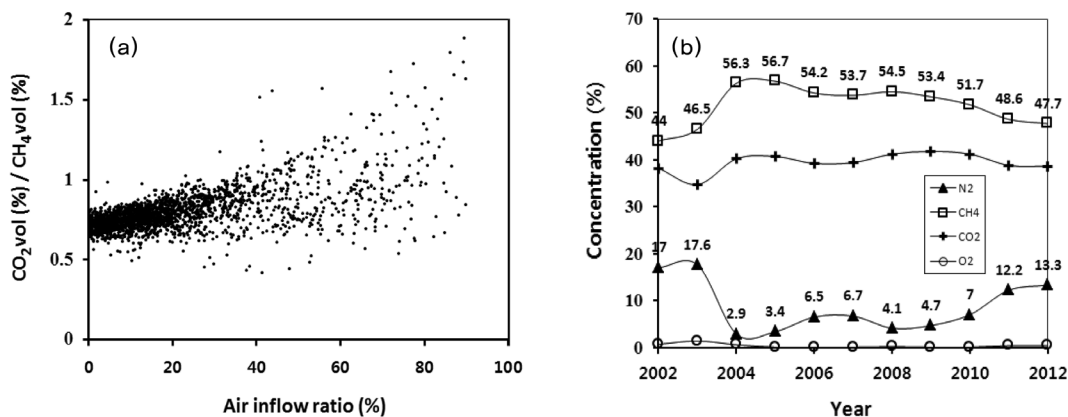


Fig. 7. Increasing tendency of relative CO₂ ratio by air inflow in vertical LFG collecting well(a) and increasing trends of nitrogen ratio in LFG of 2nd landfill by air inflow(b).

4. 결론

정제 질소가스 생산에 활용되는 기체 분리막 모듈은 단단 방식보다 2단 방식으로 구성하는 것이 CH₄ 회수율 면에서 바람직했다. 또한, 2단 방식의 경우 1단과 2단의 면적비 1:4 에서 1:6까지의 CH₄ 투과율은 29.7~30.0%로 유사했으나, CO₂ 투과율은 1:6이 95.9%로 가장 높아 적절한 면적비로 판단 되었다.

CH₄, CO₂, N₂에 대한 분리효율 실험 결과, 1, 2단 분리막 을 거친 후의 최종적인 투과율은 CH₄ 28.4%, CO₂ 94.3%, N₂ 16.5%로서, 공정설계와 운영방식을 최적화하면 N₂ 분리 막을 CH₄와 CO₂ 분리용 막으로 사용할 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 최종 정제 매립가스의 농도는 평균 CH₄ 69.7%, CO₂ 4.3%, N₂ 26.0%로, CH₄와 CO₂의 분리성능에도 불구하고 N₂의 농축문제 해소가 필요하였다.

수도권매립지 제2매립장의 699개의 수직가스포집정에서의 매립가스 조성분석 결과, 외기유입율이 10% 이상인 경우는 48.1%이었고, 2010년부터 급격한 외기유입으로 인해 매립가스내 N₂ 함량이 크게 증가하고 있었다. 따라서 매립가스를 정제하여 자동차 연료 등으로 사용하기 위해서는 외기 유입율을 최소화하여 N₂ 농도를 최소한 2% 이하로 관리하거나, 분리막 정제 이후 질소제거를 위한 추가 공정의 도입이 필요한 것으로 판단되었다.

KSEE

참고문헌

- Martin, S. and Reinhard, N., "Determination of Siloxanes and VOC in Landfill Gas and Sewage Gas by Canister Sampling and GC-MS/AES Analysis," *Environ. Sci. Technol.*, **33** (20), 3680~3685(1999).
- Chun, S. K. and Bae, Y. S., "An impact analysis of landfill for waste disposal on climate change: Case study of 'Sudokwon Landfill Site 2nd Landfill' in Korea," *Korean J. Chem. Eng.*, **29**(11), 1549~1555(2011).
- Scholes, C. A., Stevens, G. W. and Kentish, S. E., "Membrane gas separation applications in natural gas processing," *Fuel*, **96**, 15~16(2012).
- Malykh, O. V., Golub, A. Y. and Teplyakov, V. V., "Polymeric membrane materials : New aspects of empirical approaches to prediction of gas permeability parameters in relation to permanent gases, linear lower hydrocarbons and some toxic gases," *Adv. Colloid Interface Sci.*, **164**, 95~98(2011).
- Han, S. H., Park, H. B. and Lee, Y. M., "Recent Technology Trends of Polymeric Gas Separation Membranes," *Polym. Sci. Technol.*, **19**(4), 290(2008).
- Lin, H. and Freeman, B. D., "Materials selection guidelines for membranes that remove CO₂ from gas mixtures," *J. Mol. Struct.*, **739**, 57(2005).
- Kim, T. H., Jeong, J. C., Park, J. M. and Woo, C. H., "A Numerical Analysis of Direct contact Membrane Distillation for Hollow Fiber Membrane," *Membr. J.*, **20**(4), 269~270 (2010).
- Kim, N. J., Choi, J. M. and Ji, E. J., "Solvent Section for the Detection of Siloxanes in Landfill Gas," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **29**(8), 915~916(2007).
- Robeson, L. M., "Polymer membranes for gas separation," *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, **4**, 549(1999).
- Kim, H. J., Yoshida, H., Matsuo, T., Tojo, Y. and Matsuo, T., "Air and landfill gas movement through passive gas vents installed in closed landfills," *Waste Manag.*, **30**, 465~472 (2010).
- He, R., Shen, D. S., Wang, J. Q., He, Y. H. and Zhu, Y. M., "Biological degradation of MSW in a methanogenic reactor using treated leachate recirculation," *Process Biochem.*, **40**, 3660~3666(2005).
- Yu, L., Batlle, F., Carrera, J. and Lloret, A., "Gas flow to a vertical gas extraction well in deformable MSW landfills," *J. Hazard. Mater.*, **168**, 1404~1416(2009).