

메탄/이산화탄소 2단 중공사 분리막 분리공정 전산모사

차 경 환 · 김 정 훈* · 이 용 택[†]

충남대학교 응용화학공학과, *한국화학연구원 탄소자원화연구소 온실가스분리회수연구그룹
(2016년 9월 12일 접수, 2016년 10월 6일 수정, 2016년 10월 7일 채택)

Simulation of CH₄/CO₂ Separation Process Using 2-Stage Hollow Fiber Membrane Modules

Gyoung Hwan Cha, Joeng Hoon Kim*, and Yongtaek Lee[†]

Dept. of Chem. Eng., College of Eng., Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea

*Greenhouse Gas Separation and Recovery Group, Carbon Resource Institute, Korea Research Institute of Chemical Technology, Daejeon 34114, Korea

(Received September 12, 2016, Revised October 6, 2016, Accepted October 7, 2016)

요 약: 메탄을 순도 95% 이상으로 분리, 회수하기 위하여 메탄에 대한 분리특성이 우수한 폴리설폰 중공사 분리막 모듈을 2단으로 연결하고 재순환 흐름을 이용하여 회수율을 90% 이상으로 유지할 수 있도록 공정을 설계하였다. 이렇게 설계된 2단 공정을 통한 메탄 분리 거동 특성을 이론적으로 예측하기 위하여 Compaq Visual Fortran 6.6 소프트웨어를 이용하여 수치 해석하였다. 개발한 프로그램을 사용하여 수치 해석을 수행한 결과 공정 변수에 따라 최종 메탄의 농도 변화에 미치는 영향을 고찰할 수 있었다. 공급 기체 압력과 분리막 길이와 공급측 메탄 농도 증가, 유량이 감소함에 따라 최종 생산물 내 메탄 농도 증가를 관찰할 수 있었으며, 메탄의 회수율은 감소함을 알 수 있었다.

Abstract: A numerical analysis was performed for a separation of carbon dioxide and methane using 2-staged, membrane process where two polysulfone hollow fiber membrane modules were connected to provide both the methane concentration richer than 95% and the recovery higher than 90% using the recycled flows. The Compaq Visual Fortran 6.6 software was utilized for the numerical simulation. Both the methane concentration and the recovery % of methane could be successfully predicted as the function of the operating conditions. As the feed pressure, the methane concentration, and the flow rate increase, the methane concentration in a product is also found to increase and the recovery of methane is found to decrease.

Keywords: numerical analysis, methane, 2-stage, hollow fiber membrane

1. 서 론

현재 국·내외적으로 이슈가 되고 있는 온실가스 감축에 대하여 정부에서 2010년 4월 “저탄소 녹색성장 기본법 시행령”을 제정한 바 있다. 선진국을 대상으로 온실가스 감축을 강제로 규정하는 교토의정서의 내용에 대하여 CBDR (Common But Differentiated Responsibilities) 원칙 즉 개도국도 선진국과 마찬가지로 온실가스 감축에 대한 차별화된 공동의 책임을 갖고 있다는

원칙에 의거 녹색성장 추진전략과 국가 중장기 온실가스 감축목표 수립 및 녹색성장기본법과 시행령 등을 마련하고 온실가스 감축을 통한 새로운 국가 성장 동력 추진을 위한 정책을 시행하고 있다[1,2].

이와 같은 정책의 대상이 되는 온실기체 중에서 이산화탄소와 메탄에 주목할 필요가 있다. 이산화탄소는 다른 온실기체에 비해 대기의 성분 중에 차지하는 절대량이 많으며, 메탄은 최근 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 이산화탄소와 비교하였을 때

[†]Corresponding author(e-mail: ytleec@cnu.ac.kr, <http://orcid.org/0000-0001-7614-5503>)

지구 온난화 지수(global warming potential, GWP)가 34배에 이르는 주요 온실가스라고 발표되었다. 이는 메탄이 방출된 후 100년 동안 동일한 배출량의 이산화탄소와 비교했을 때 34배의 온실효과를 나타낼 수 있다는 것을 의미한다[3].

매립지는 최종 폐기물 처리로써 에너지 생산이 가능한 시설로 대두되고 있고 매립지에서 필연적으로 발생하는 메탄가스는 기후변화적 측면에서도 무시할 수 없다[4].

이에 따라 최근 매립지에서 발생하는 메탄의 재사용을 위한 연구들이 진행되고 있다. 매립지에서 발생하는 가스로부터 이산화탄소, 질소, 산소 등을 제거함으로써 높은 열량을 갖는 가스로 전환시킬 수 있다. 이렇게 만들어진 고열량 가스는 기존의 천연 가스 파이프라인으로 보내지거나 압축천연가스(compressed natural gas, CNG) 혹은 액체천연가스(liquid natural gas, LNG) 형태로 변환된다. 대기환경보전법 시행규칙이 마련됨에 따라 메탄의 순도가 95% 이상일 경우 CNG나 LNG 트럭이나 장비에 연료 또는 상업적으로 판매할 수 있고 도시가스사업법 시행령에 따라 추후 난방연료에 혼입하여 사용이 가능하다[5-7].

매립지 가스에서 이산화탄소를 제거하는 방법은 일반적으로 막분리, 분자채 흡착, 아민수용액을 이용한 포집 등 세 가지 방법이 있다. 산소와 질소는 주로 압력차에 의해서 외부에서 매립지 안으로 침투하여 매립지 가스에 포함되기 때문에 매립지를 적절하게 설계하고 운영함으로써 그 양을 제어할 수 있다[8].

그중 선택투과성 분리막(permeable membrane)을 이용하여 혼합물을 분리하는 기술은 혼합물 각 성분의 분리막에 대한 용해도 및 확산도의 차이에 따라 투과계수가 달라지는 성질을 이용한 방법으로 증류(distillation), 흡수(absorption), 흡착(adsorption), 추출(extraction), 심냉법(cryogenic) 등과 같은 분리 기술보다 에너지 소모가 적고 분리공정이 단순하고 높은 분리효율을 갖는 등의 장점을 갖고 있다. Kyle 등은 가교된 PDMS (dimethylsiloxane) 막에 대하여 CO₂, N₂, CH₄의 기체투과를 실험하였다. 선택적이고 저비용으로 기체 분리가 가능할 것으로 보고한 바 있다[9].

기체를 분리하기 위한 분리막 모듈 내의 흐름 방식 조작에 따라 병류 흐름(cocurrent flow)과 향류 흐름(countercurrent flow)으로 구분할 수 있다. 병류 흐름은 공급 기체와 투과 기체가 같은 방향으로 흐르고 향류 흐름은 반대 방향으로 흐른다. 병류 흐름에서는 초기

Table 1. Specification of Hollow Fiber Membrane Module

| Membrane material | polysulfone |
|--|-------------|
| Hollow fiber O. D. (μm) | 400 |
| Hollow fiber I. D. (μm) | 200 |
| Effective thickness (μm) | 0.1 |
| Number of hollow fibers (ea) | 3,800 |
| Effective length (m) | 0.36 |
| Effective membrane area (m^2) | 1.71 |

농도구배가 향류 흐름보다 더 크지만 분리가 진행될수록 빠르게 감소하여 전달되는 물질의 양이 대폭 감소한다. 그러나 향류 흐름의 경우 입구 부분이나 출구 부분에서의 농도구배 값이 비교적 균일하게 유지되기 때문에 투과되는 양이 일정하게 유지될 수 있다. 이러한 특성 때문에 분리막을 이용한 분리 공정의 경우 향류 흐름을 많이 선택하여 공정설계가 이루어진다[10].

중공사막 폴리설폰(polysulfone, PSf)분리막 모듈 내부의 공정 변수에 따른 메탄 분리 특성을 예측할 수 있는 컴퓨터 전산모사 프로그램을 본 연구팀이 개발한 적이 있고, 이로부터 얻어진 예측 값과 실제 모듈의 실험 값을 비교함으로써 수치해석의 정확도를 분석하였고, 매우 정확하게 예측할 수 있음을 보여준 바 있다[11].

본 연구에서는 공급되는 혼합기체 농도, 유량, 압력 등을 바꾸어 가면서 설계된 2단 막분리 공정에서 최종 농축된 메탄의 순도, 회수율 등을 분석함으로써 메탄 농도 95% 이상, 메탄 회수율 90% 이상을 얻을 수 있는 공정 조건들을 예측하고자 하였다.

2. 전산모사

Compaq Visual Fortran 6.6 프로그램을 사용하여 전산 모사를 수행하였다. Table 1에 전산 모사에 사용된 폴리설폰 중공사 분리막 모듈에 대한 기본적인 특성들을 나타내었다. 기체 투과 거동 프로그램에서 사용한 메탄과 이산화탄소의 투과도는 혼합 기체 투과 실험으로부터 얻은 결과를 사용하였다. 이산화탄소의 투과도와 선택도를 혼합기체 내의 이산화탄소 분압의 함수로 나타내었으며, 주어진 이산화탄소 분압에서 얻어진 이산화탄소 투과도와 선택도로부터 메탄의 투과도를 산출하여 전산모사에 사용하였다. 이러한 투과도를 사용한 단위 모듈에 대한 전산모사는 본 연구 그룹에서 발

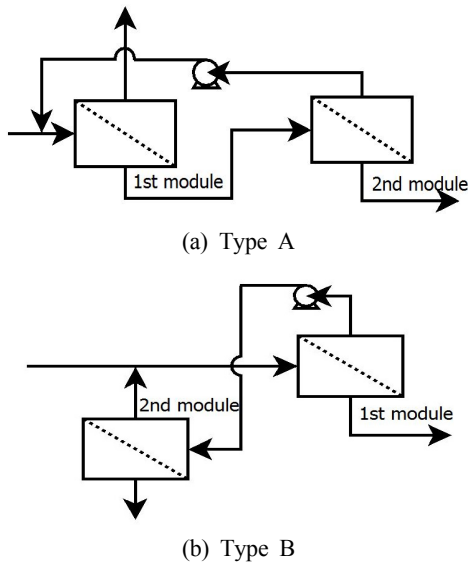


Fig. 1. Schematic diagram of two stage cascade membrane processes.

표한 전산모사 방법에 따라 수행하였다[11,12].

2단 분리막 공정설계로서 Fig. 1에 Type A와 Type B 두개의 2단 분리막 공정을 나타내었다. Type A 공정의 경우 1단 분리막 잔류 기체는 2단 분리막의 공급기체로 사용되며, 2단 잔류기체를 메탄이 농축된 생산물로서 얻고 2단 투과기체를 1단 공급기체로 환류시켜 원료 공급 기체와 함께 1단 분리막 모듈에 공급한다.

Fig. 2에 Type A와 Type B에 대한 컴퓨터 프로그램 흐름순서도를 나타내었다. Type A에 대한 구체적인 흐름도에 대한 설명은 다음과 같다. 순서도에 표기된 IIISTEP은 반복 계산 횟수, SYH(2,1)은 2단 공급 유량, SYH(2,2)는 2단 투과 유량, SYH(2,4)는 2단 공급 농도, SYH(2,5)는 2단 투과 농도, SYH(2,6)은 2단 잔류 농도를 나타낸다. 또한 SYH(1,1)은 1단 공급 유량, SYH(1,3)은 1단 잔류 유량, SYH(1,4)는 1단 공급 농도, SYH(1,6)은 1단 잔류 농도를 의미한다. 그리고 LFM0는 1단 순수 원료 공급 농도를 나타낸다, 또한 CSYH(2,1)은 반복계산시 오차 계산을 위해 지정되는 2단 공급 유량의 직전 계산값을 의미한다. 2단 공급 유량을 기준으로 오차값으로 계산된 (전계산값 - 현재계산값) / (전계산값)이 10^{-4} 보다 크면 현재 계산된 2단 투과 유량 SYH(2,2)를 사용하여, 순수 원료 공급 유량인 LFM0와 합하여 새로운 1단 공급 유량 SYH(1,1)을 산출하고 이 값을 사용하여 반복 계산한다. 이때 1단 공급 농도도 다시 산출된 SYH(1,4)를 사용하여 반복 계산한다. 2단

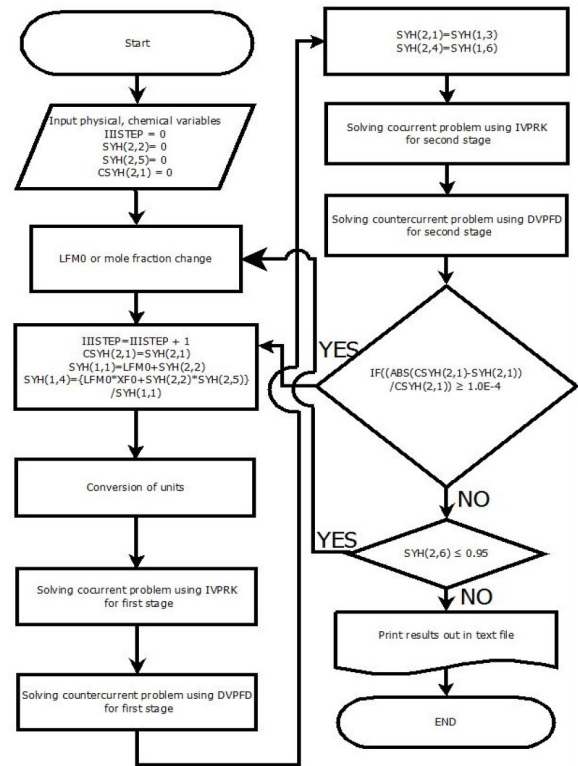


Fig. 2. Computer program flow chart of two stage process for Type A.

공급 유량에 대한 오차값이 10^{-4} 보다 작으면 반복계산을 멈춘 다음 2단 잔류 농도 SYH(2,6) 값이 물 분율 0.95보다 크면 모든 계산을 종료하고 결과 값들을 프린트한다. Type B에 대한 흐름 순서도도 Type A와 유사하나 1단 잔류 흐름이 생산물이 되며, 1단 투과 흐름이 2단 공급 흐름으로 구성된다. 또한 2단 투과 흐름은 순수 원료 공급 흐름과 합하여 1단 공급 흐름으로 구성된다. 계산 순서도는 Type A와 유사하다.

계산에 사용된 중요한 공정 변수들은 다음과 같다. 1.71 m²(중공사막 개수 = 3,800개)의 막 면적의 모듈에 투과 측 압력을 대기압으로 고정하고 공급 측 압력을 5~20 atm으로, 공정 온도는 298.15 K이고 메탄의 물 분율이 0.5~0.7인 혼합 가스 50~100 L/min를 분리막 모듈에 공급한다. 부피 유속은 공정의 온도와 압력에 따라 이상기체 상태방정식을 이용하여 물 유속으로 전환되며, 분리 특성에 영향을 줄 수 있는 공정 변수를 변화시켜서 이산화탄소 분리, 메탄 농축 특성을 해석하였다.

메탄 회수율은 순수 원료 공급 기체 중의 메탄 몰 수 대비 최종 생산물 내의 메탄 몰 수 비율로 구하였다.

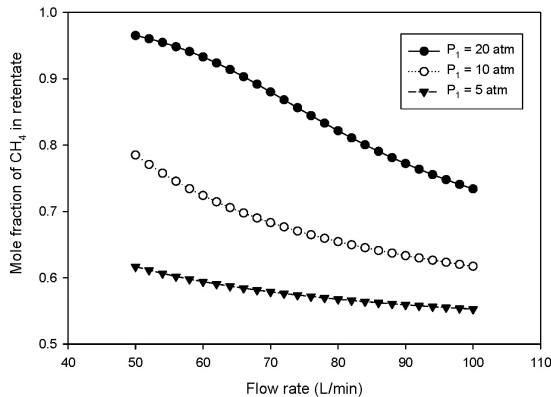


Fig. 3. Effect of feed pressure on mole fraction of CH_4 in retentate with different flow rate in process (Type A) $x_f = 0.5$, $T = 298.15 \text{ K}$, $A = 1.71 \text{ m}^2$, $P_2 = 1 \text{ atm}$.

3. 결과 및 고찰

3.1. 공급 압력에 따른 잔류 측 메탄 분리거동

공급 압력을 변화시키면서 유량변화에 따른 메탄 농도 및 회수량을 전산 모사함으로써 최종 메탄 생성물의 순도가 95% 이상이고 회수율이 90%를 만족하는 조건의 공정을 설계하고자 하였다.

Fig. 3과 Fig. 4에 각각 2단 공정 Type A에 대한 공정모사 수행 결과들인 생성물의 메탄 몰 분율과 메탄의 회수율을 공급 유량의 함수로 나타내었으며, 공급 압력을 변수로 도식화하였다. 2단 분리막 공정에 사용된 각 분리막 모듈은 1.71 m^2 로 고정하였다. 공급 기체의 메탄 몰 분율은 0.5, 온도는 298.15 K , 투과 측 압력은 1 atm 으로 유지하였다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 공급 유량이 50 L/min 에서 100 L/min 으로 증가할수록 생성물 메탄 몰 분율이 서서히 감소함을 알 수 있다. 공급 압력이 5 atm 인 경우 주어진 조건에서 0.62 에서 0.55 로 감소하였다. 이는 공급된 혼합 기체의 모듈 내 체류시간이 유속이 증가하면 감소하게 되고 결과적으로 폴리설폰막에 대하여 투과계수가 높아 잘 투과되는 이산화탄소의 투과량이 작고 잔류 측 이산화탄소량이 상대적으로 커 최종 메탄 몰 농도가 감소하는 것으로 판단된다. 동일한 공급 유속인 50 L/min 의 경우 공급 측 압력이 5 atm 에서 20 atm 으로 증가하면 잔류 측 최종 메탄 몰 농도가 0.62 에서 0.97 로 크게 증가함을 알 수 있다. 이는 압력이 높을수록 잘 투과하는 이산화탄소의 공급 측 분압이 커지게 되고, 따라서 투과구동력이 대폭 증가하여 투과량이 급속히 증가하는 것으로 예상된다. 결

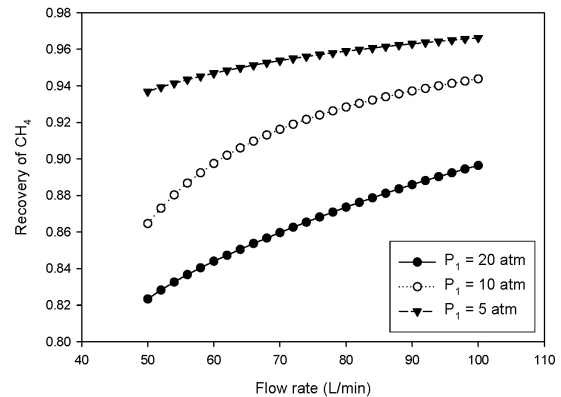


Fig. 4. Effect of feed pressure on recovery of CH_4 with different flow rate in process (Type A) $x_f = 0.5$, $T = 298.15 \text{ K}$, $A = 1.71 \text{ m}^2$, $P_2 = 1 \text{ atm}$.

과적으로 잔류 측에 남게 되는 이산화탄소 몰수가 대폭 감소하고, 상대적으로 투과 속도가 작은 메탄의 양은 거의 일정한 수준을 유지할 것으로 판단된다. 이로 인하여 잔류 측 메탄 몰 분율이 크게 증가한 것으로 사료된다.

Fig. 4는 Fig. 3과 동일 조건에서 얻은 메탄의 회수율을 보여준다. 공급 유량이 증가함에 따라 메탄의 회수율이 서서히 증가함을 알 수 있다. 전형적인 압력 조건인 5 atm 의 경우 공급 유량이 50 L/min 에서 100 L/min 으로 증가한 경우 메탄 회수율은 0.94 에서 0.96 으로 소폭 증가함을 알 수 있다. 공급 유량이 증가하면 잘 투과하지 못하는 메탄의 체류시간이 감소하고 이로 인하여 메탄 투과 유량도 감소한 것으로 판단된다. 따라서 결과적으로 잔류하는 메탄량이 증가하여 회수율이 증가하는 것으로 사료된다. 한편, 공급측 압력이 5 atm 에서 20 atm 으로 증가하면 동일 공급 유속 조건에서 메탄 회수율이 대폭 감소함을 알 수 있다. 이 또한 예상되는 결과로서 메탄의 투과 구동력이 현저히 커지게 되고 이로 인하여 투과 측으로 투과되는 메탄의 양도 크게 증가한 것으로 예측된다. 따라서 잔류 측에 남아 생성물로 얻게되는 메탄의 양도 감소할 것으로 예상되며 결과적으로 회수율이 감소하는 것으로 사료된다. Fig. 3과 Fig. 4로부터 주어진 운전 조건에서 목표로 하는 최종 생성물 메탄 몰 농도 0.95 와 메탄 회수율 90% 를 동시에 얻을 수 있는 조건을 찾기가 매우 어려움을 확인할 수 있었다.

Fig. 5에 Type A공정과 동일한 공정 조건을 Type B 공정에 적용하여 공정 모사한 결과를 나타내었다. 생성

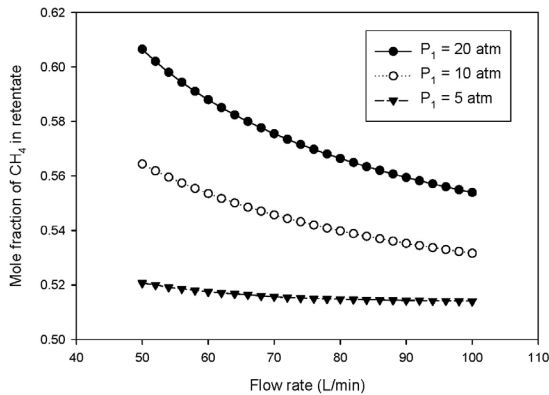


Fig. 5. Effect of feed pressure on mole fraction of CH₄ in retentate with different flow rate in process (Type B) $x_f = 0.5$, $T = 298.15$ K, $A = 1.71$ m², $P_2 = 1$ atm.

물 내의 메탄 물 분율을 공급 유속의 함수로 도식화하였다. 유속이 증가하면 Type A에서 설명한 바와 같이 체류시간의 감소에 따라 메탄 물 분율이 서서히 감소함을 알 수 있다. 다만, 1st 분리막 모듈에서 이산화탄소의 한정된 투과량으로 인하여 메탄의 농축률이 Type A 공정에 비하여 현저히 떨어짐을 확인할 수 있었다. 공급 압력이 20 atm인 경우 공급 유속 50 L/min에서 Type A 공정의 경우 메탄 물 분율이 0.97의 높은 값을 얻는데 반하여 Type B 공정의 경우는 0.61의 비교적 낮은 값을 얻게 됨을 알 수 있다. 이로써 Type B 공정을 주어진 동일 조건에 적용할 경우 메탄 물 분율은 0.95 이상 얻기가 어렵다고 판단된다.

3.2. 분리막 면적에 따른 잔류 측 메탄 분리 거동

분리막 면적을 변화시키면서 유량 변화에 따른 메탄 농도 및 회수율을 전산 모사함으로써 최종 메탄 생성물의 순도가 95% 이상이고 회수율이 90%를 만족하는 조건의 공정을 설계하고자 하였다.

Fig. 6과 Fig. 7에 각각 2단 공정 Type A에 대한 공정 모사 수행 결과들인 생성물의 메탄 물 분율과 메탄의 회수율을 공급 유량의 함수로 나타내었으며, 분리막 면적을 변수로 도식화하였다. 2단 분리막 공정에 사용된 공급 기체의 메탄 물 분율은 0.5, 온도는 298.15 K, 공급 압력은 10 atm, 투과 측 압력은 1 atm으로 유지하였다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 공급 유량이 50 L/min에서 100 L/min으로 증가할수록 생성물 메탄 물 분율이 서서히 감소함을 알 수 있다. 각 모듈의 분리막 면적이 1.71 m²인 경우 주어진 조건에서 0.78에서 0.62로 감소

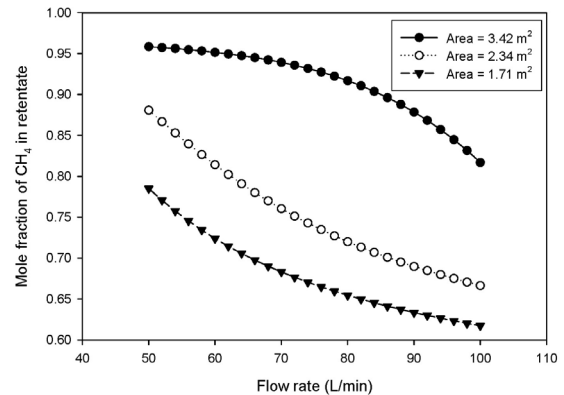


Fig. 6. Effect of membrane area on mole fraction of CH₄ in retentate with different flow rate in process (Type A) $x_f = 0.5$, $T = 298.15$ K, $P_1 = 10$ atm, $P_2 = 1$ atm.

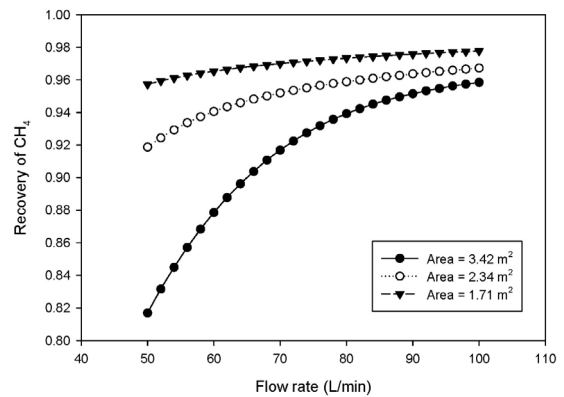


Fig. 7. Effect of membrane area on Recovery of CH₄ with different flow rate in process (Type A) $x_f = 0.5$, $T = 298.15$ K, $P_1 = 10$ atm, $P_2 = 1$ atm.

하였다. 이는 Fig. 3에서 설명한 바와 같은 이유로 해석할 수 있다. 동일한 공급 유속인 50 L/min의 경우 분리막 면적이 1.71 m²에서 3.42 m²로 증가하면 잔류 측 최종 메탄 물 농도가 0.78에서 0.96으로 크게 증가함을 알 수 있다. 동일한 투과 구동력이 주어지는 경우에도 투과도가 상대적으로 메탄보다 높은 이산화탄소의 투과량이 분리막 면적의 증가로 인하여 대폭 증가함에 따라 잔류 흐름에서 메탄 농축이 더 많이 일어나 분리막 면적이 증가함에 따라 최종 메탄 물 분율이 증가한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 Fig. 6과 동일 조건에서 얻은 메탄의 회수율을 보여준다. 공급 유량이 증가함에 따라 메탄의 회수율이 증가함을 알 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 4에 대한 해석과 같다고 할 수 있다. 한편, 분리막 면적이

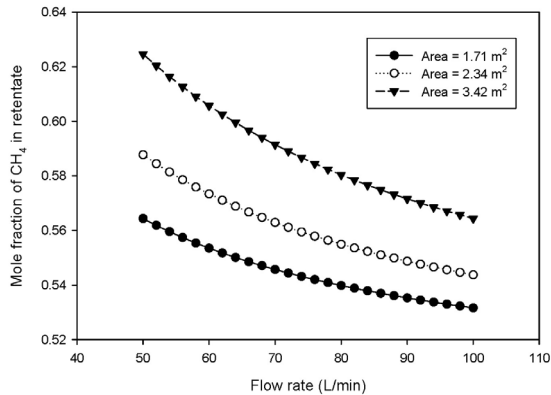


Fig. 8. Effect of membrane area on mole fraction of CH_4 in retentate with different flow rate in process (Type B) $x_f = 0.5$, $T = 298.15 \text{ K}$, $P_1 = 10 \text{ atm}$, $P_2 = 1 \text{ atm}$.

1.71 m^2 에서 3.42 m^2 로 증가하면 동일 공급 유속 조건에서 메탄 회수율이 대폭 감소함을 알 수 있다. 이는 막면적이 증가하면 낮은 유량에서 투과도가 낮은 메탄이라도 투과되는 시간이 증가하고 동시에 분리막 내에서 메탄이 농축되면서 메탄의 분압이 증가하여 메탄의 투과량이 증가하여 재순환 흐름으로 투과되는 메탄의 양이 많아지기 때문이다. 큰 유량에서 메탄의 회수율은 큰 차이가 없는데 이는 유량이 증가하면서 막면적이 증가하더라도 메탄이 재순환되는 흐름으로 투과되는 양이 작아 회수율이 비슷하게 나타나는 것으로 사료된다. Fig. 6과 Fig. 7로부터 주어진 운전 조건에서 목표로 하는 최종 생성물 메탄 몰 농도 0.95와 메탄 회수율 90%를 동시에 얻을 수 있는 조건을 찾기가 매우 어려움을 확인할 수 있었다.

Fig. 8에 Type A 공정과 동일한 공정 조건을 Type B 공정에 적용하여 공정 모사한 결과를 나타내었다. 생성물 내의 메탄 몰 분율을 공급 유속의 함수로 도식화하였다. 유속이 증가하면 Type A에서 설명한 바와 같이 체류시간의 감소에 따라 메탄 몰 분율이 서서히 감소함을 알 수 있다. 분리막 면적이 3.42 m^2 인 경우 공급 유속 50 L/min에서 Type A 공정의 경우 메탄 몰 분율이 0.96의 높은 값을 얻는 데 반하여 Type B 공정의 경우는 0.62의 비교적 낮은 값을 얻게 됨을 알 수 있는데 이는 1st 분리막 모듈에서 이산화탄소의 한정된 투과량과 투과도가 낮은 메탄이라도 투과되는 시간이 증가하고 분리막 내에서 메탄이 농축되면서 메탄의 분압이 증가하여 메탄의 투과도가 높아져 재순환 흐름으로 투과되는 메탄의 양이 많아지기 때문에 메탄의 농축률이

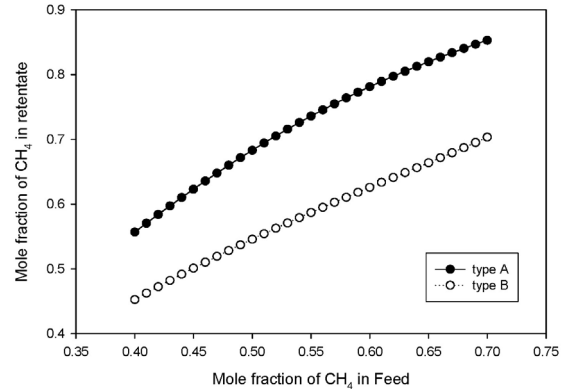


Fig. 9. Effect of mole fraction of CH_4 in feed flow on mole fraction of CH_4 in retentate with different process $x_f = 0.7$, $T = 298.15 \text{ K}$, $A = 1.71 \text{ m}^2$, $P_1 = 10 \text{ atm}$, $P_2 = 1 \text{ atm}$.

Type A 공정에 비하여 현저히 떨어짐을 확인할 수 있었다.

3.3. 공급 몰 분율에 따른 잔류 측 메탄 분리 거동

공급 몰 분율을 변화시키면서 유량 변화에 따른 메탄 농도 및 회수율을 전산 모사함으로써 최종 메탄 생성물의 순도가 95% 이상이고 회수율이 90%를 만족하는 조건의 공정을 설계하고자 하였다.

Fig. 9에 각각 2단 공정 Type A와 Type B에 대한 공정모사 수행 결과들인 생성물의 메탄 몰 분율을 공급 유량의 함수로 나타내었으며, 공정모델 Type A와 Type B를 변수로 도식화하였다. 2단 분리막 공정에 사용된 각 분리막 모듈은 1.71 m^2 로 고정하였다. 공급 기체의 메탄 몰 분율은 0.5, 온도는 298.15 K, 공급 측 압력은 10 atm, 투과 측 압력은 1 atm으로 유지하였다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 공급 농도가 0.4에서 0.7으로 증가할수록 생성물 메탄 몰 분율이 서서히 증가함을 알 수 있다. Type A 공정의 경우 주어진 조건에서 공급 몰 분율이 증가하면 최종 메탄 몰 분율이 공급 몰 분율에 비해 대폭 증가함을 알 수 있다. 이는 공급 기체의 메탄 몰 분율이 증가함에 따라 메탄 농축이 효과적으로 일어나는 것으로 사료된다. Type B 공정의 경우 공급 기체의 메탄 몰 분율이 증가하여도 첫째 단의 분리막 면적이 상대적으로 작아 메탄의 농축이 Type A에 비하여 크지 않음을 알 수 있다. 따라서 Type A 공정이 보다 더 효율적임을 알 수 있다.

4. 결 론

메탄을 분리, 회수하고자 메탄에 대한 분리 특성이 우수한 폴리설폰 중공사 분리막 공정에 대하여 전산 모사를 통해 메탄 분리 거동 특성을 이론적으로 해석하고자 하였으며 Compaq Visual Fortran 6.6 소프트웨어를 이용하여 컴퓨터 프로그램을 개발하고자 하였다. 이렇게 개발한 프로그램을 통하여 각 공정 변수들이 생성물 내의 메탄 순도와 메탄 회수율에 미치는 영향을 예측하였다.

(1) Type A와 Type B 두 형태의 공정에 대한 공정 모사 결과 Type A 공정이 공급 기체에 대한 대부분의 공정 조건에서 생성물의 메탄 순도 95%, 회수율 90%에 근접한 모사 결과를 나타내었다.

(2) 공급 기체의 압력이 증가하면 이산화탄소 투과량이 메탄 투과량보다 상대적으로 매우 크기 때문에 이산화탄소의 투과 구동력이 높아져 잔류 측 메탄 물 분율이 증가함을 알 수 있었다.

(3) 공급 유량이 증가하면 막을 통해 투과될 수 있는 이산화탄소 투과량이 작아 잔류 측 메탄 물 분율이 감소함을 확인할 수 있었다.

(4) 분리막 길이가 증가하면 공급 기체가 투과될 시간이 증가하여 잔류 측 메탄 농도는 높아졌지만 메탄 또한 막을 통한 투과량이 증가하여 메탄의 회수율이 낮아짐을 알 수 있다.

(5) 공급기체의 메탄 물 분율의 증가에 따라 잔류 측 메탄 물 분율이 증가함을 알 수 있었지만, 주어진 공정 조건에서 목표값을 얻기가 어려웠다.

(6) 2단 공정에서의 메탄/이산화탄소 농축 수치 해석을 통하여 주어진 조건에서 생성물 내 메탄의 순도와 회수율에 대한 기초 자료를 확보할 수 있었다.

감 사

본 연구는 환경부 글로벌 탑 환경기술개발사업 중 Non-CO₂ 온실가스 저감기술개발 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

Reference

1. H. J. Hahm, "Overall equipment effectiveness as a

- methodology for green house gas emission reduction", *J. Korean Inst. Plant Eng.*, **19**, 3 (2014).
2. Act on Low Carbon Green Growth, Ministry of Environment, Korea (2010).
3. IPCC Fifth Assessment Report, Table 8.7, Chapter 8, pp. 8-58, 7 (2013).
4. I. A. Tolis, A. Rentizelas, K. Aravossis, and I. Tatsiopoulou, "Electricity and combined heat and power from municipal solid waste; theoretically optimal investment decision time and emissions trading implications", *Waste Manage. Res.*, **28**, 988 (2010)
5. M. Harasimowicz, P. Orluk, G. Zakrzewska, and A. Chmielewski, "Application of polyimide membranes for biogas purification", *J. Hazard. Mater.*, **44**, 698 (2007).
6. Clean Air Conservation Act, Ministry of Environment, Koera (2011).
7. Urban Gas Business Act, Ministry of Trade, Industry and Energy, Koera (2009).
8. U.S. Environmental Protection Agency, "Project technology option." LFG Energy Project Development Handbook. **9**, 26 (2009).
9. K. Berean, J. Z. Ou, M. Nour, K. Latham, C. Mcsweeney, D. Paull, A. Halim, S. Kentish, C. M. Doherty, A. J. Hill, and K. Kalantar-zadeh, "The effect of crosslinking temperature on the permeability of PDMS membranes : evidence of extraordinary CO₂ and CH₄ gas permeation", *Sep. Pur. Technol.*, **122**, 96 (2014).
10. http://en.wikipedia.org/wiki/Countercurrent_exchange, April 15 (2014).
11. S. M. Lee, Y. H. Seo, H. C. Kang, J. H. Kim, and Y. T. Lee, "Numerical analysis for separation of methane by hollow fiber membrane with cocurrent flow", *Korean Chem. Eng. Res.*, **53**, 295 (2015).
12. J. S. Kim, C. I. Kong, B. R. Park, and J. H. Kim, "Membrane process using polysulfone hollow fiber membranes for vehicle fuel production from bio-methane mixture", *Membr. J.*, **24**, 213 (2014).