

폴리설펜 중공사막을 이용한 연소 배기가스 중 이산화탄소 분리에 관한 연구 Study on the Separation of CO₂ from Flue Gas Using Polysulfone Hollow Fiber Membrane

김성천 · 전정현 · 전영남[†]

Seongcheon Kim · Jeonghyeon Chun · Youngnam Chun[†]

조선대학교 환경공학부

Department of Environmental Engineering, Chosun University

(2013년 1월 12일 접수, 2014년 2월 13일 채택)

Abstract : In this research, polysulfone hollow fiber membrane was used to recover CO₂ which is one of greenhouse gases from flue gas stream being emitted after the combustion of fossil fuels. The prerequisite requirement is to design the membrane process producing high-purity CO₂ from flue gas. For separation of CO₂, a membrane module and flue gas containing 10% carbon dioxide was used. The effects of operating conditions such as pressure, temperature, feed gas composition and multi-stage membrane on separation performance were examined at various stage cuts. Higher operating pressure and temperature increased carbon dioxide concentration and recovery ratio in permeate. Recovery ratio and separation efficiency increased if a higher content of CO₂ injection gas composition. Three-stage membrane system was producing a 95% CO₂ with 90% recovery from flue gas. The separation efficiency of three-stage membrane system was higher than one-stage system.

Key Words : Carbon Dioxide, Flue Gas, Polysulfone Hollow Fiber Membrane, Separation

요약 : 본 연구에서는 폴리설펜 중공사막을 이용하여 화석연료 연소에서 배출되는 온실가스 중 CO₂의 회수에 관한 연구를 실시하였다. 고농도의 CO₂를 회수하기 위한 막분리 공정에 대한 선행연구이다. 혼합가스 분리거동 관찰을 위하여 이산화탄소가 10% 함유된 배기가스를 사용하였다. 압력, 온도, 주입가스 조성, 다단 막 변화를 주어 스테이지 컷에 따른 분리 성능을 조사하였다. 압력과 온도가 증가 할수록 투과측에 CO₂ 농도와 회수율이 증가하였다. 주입 가스 조성 변화 시 CO₂의 함량이 높을 경우 회수율 및 분리 효율이 높아졌다. 3단 분리막 시스템을 이용시 CO₂ 농도 95% 이상, 회수율 90% 이상 보였으며 1단 분리막 보다 분리율이 향상되었다.

주제어 : 이산화탄소, 배기가스, 폴리설펜 중공사막, 분리

1. 서론

화석에너지 과다 사용과 산업발달로 인한 작업공정의 다양화로 발생하는 지구온난화 원인물질에 대한 관심과 우려가 날로 증대되고 있다. 지구온난화에 대한 대책으로서 이미 1992년 6월 유엔환경개발회의에서 세계기후 변화협약이 채택되었고, 강제적 온난화가스 감축 프로그램인 교토 의정서를 1997년에 채택하여 2005년 2월 16일 발효된 이후 현재 일부 선진국에서 부분적으로 감축이 시행되고 있는 실정이다. 감축 대상 가스는 CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆로서 2008년부터 2012년까지 선진국 전체의 온난화가스 배출량을 1990년 수준의 5%이하로 감축할 것을 목표로 하고 있다.¹⁾

이러한 국제적 동향을 감안한다면 온실가스 배출량 세계 10위 규모의 우리나라도 지속적인 온실가스 감축노력이 이루어져야 할 것이다. 특히, 산업구조상 화석연료의 의존도가 높은 우리나라의 경우, 온실가스 배출량이 연평균 4%대의 증가율을 보이고 있으며 이중 50%가 고정 배출원으로 대량 방출하는 시멘트, 철강, 발전산업이 차지하였으며 배출

량이 증가하는 추세이다.²⁾

특히 화석연료 연소 및 각종의 산업공정에 의해 대기 중에 방출된 CO₂는 지구온난화의 주범임이 자명하다. 현재 온실가스인 CO₂ 방출에 대한 규제방안이 전세계적으로 논의되고 있다는 점에서 연소 배가스와 같은 배출원에서 CO₂의 효과적인 분리와 회수는 그 중요성이 부각되고 있다. CO₂의 회수를 위하여 흡수, 흡착, 막분리법 등이 사용되고 있다.

막분리법은 기존의 흡수법이나 흡착법보다 설치비용 및 운전비용이 저렴하며 CO₂ 분리 시 상변화를 동반하지 않아 기본적으로 에너지 효율이 높고 유해물질 배출이나 폐수처리 등의 문제가 없는 환경친화형 청정 공정이다.³⁾

이산화탄소 분리에 뛰어난 선택도와 투과도를 가진 고분자 소재를 개발하려는 연구가 미국, 일본을 중심으로 매우 활발하게 진행되었으며, 현재까지 개발된 CO₂ 분리용 고분자막 소재는 CO₂/N₂의 분리 특성이 탁월한 polysulfone, polyimide, cardo type polyimide, cellulose acetate가 가장 적합한 것으로 알려져 있다. 특히 polysulfone은 내화학적, 기계적 물성과 투과성능이 우수하며 경제적 비용이 적어 막 소재로 사용되고 있으며 이미 산업화용 가스 분리 공정에 많이

[†] Corresponding author E-mail: ynchun@chosun.ac.kr Tel: 062-230-7156 Fax: 062-230-7872

적용하고 있다.⁴⁻⁸⁾

본 연구에서는 폴리설피론 막분리 공정을 이용하여 연소 배기가스 중 이산화탄소 분리에 관한 연구를 실시하였다. 이산화탄소와 질소로 구성된 배기가스를 대상으로 질소를 분리하여 고농도 이산화탄소를 회수하는 연구를 수행하였다. 중공사막을 이용하여 단일기체 투과 및 혼합가스 분리를 실시하였다. 압력, 온도, 주입가스 조성, 다단공정에 따른 혼합가스 분리 시험을 통하여 이산화탄소 농도와 회수율 변화를 확인하여 최적의 운전 조건 인자를 도출하여 현장 적용 시 적절한 설계인자로 제공함이 목적이다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험장치

본 연구에서 사용된 혼합 분리장치 구성은 Fig. 1에 나타내었다. 실험실에서는 (주)에어레인 사의 유리상 고분자인 폴리설피론 중공사막(55 mm (φ) × 365 mm (L), MC-1512A)을 모듈화하여 실험에 사용하였다. 가스는 각각 CO₂ 99.999%, N₂ 99.999% 고순도 가스를 사용하였다. 실험 중 배기가스의 조성인 혼합가스를 적절히 유지하기 위해 가스 레귤레이터 후단에 가스량 조절기인 MFC (F201AC-FAC-22-V, Bronkhost)를 각각 설치하여 혼합가스 비율을 조절하였으며, 가스혼합기를 이용하여 가스를 균질화 하였다. 혼합가스 조성비를 확인하기 위해 3방향 밸브를 통해 GC-TCD (CP-4900, Verian)를 이용하여 성분비를 측정하였다. 투과측과 잔류측의 유량 측정을 위해 습식가스미터(W-MK-10-ST, Shinagawa) 및 농도 측정을 위해 GC-TCD를 이용하였다. 막에 일정 압력 공급 및 유지를 위하여 유량조절 밸브(Metering valve), 투과측 감압하기 위한 진공펌프(N-820.3FT 18, KNF)로 구성되었다. 온도변화에 따른 혼합가스 분리 효율을 알아보기 위해 분리막 외부에 온도조절기를 이용 히팅 테이프로 일정한 온도를 유지하였다.

2.2. 실험방법

혼합가스 분리에 앞서 중공사막에 대한 CO₂와 N₂의 단일기체 투과도를 측정하였다. 투과된 기체의 투과도는 식 (1)을 이용하여 나타냈다.

$$P = \frac{V(STP)}{A(\Delta p)t} \quad (1)$$

P : permeance [GPU] (10⁻⁶ cm³ (STP)/cm²·sec·cmHg)

Δp : pressure difference (cmHg)

V : calibrated permeate volume (cm³)

A : effective area (cm²)

t : permeate time (sec)

투과된 기체의 선택도(α)는 분리막에 단일 기체를 통과시켜 측정한 각 기체의 투과도의 비를 의미하며 기체 B에 대한 기체 A의 투과도는 식 (2)와 같이 정의한다.

$$\alpha_{A/B} = \frac{P_A}{P_B} \quad (2)$$

혼합가스 분리 시험은 연소 배기가스 조성인 CO₂/N₂ (10 vol.% : 90 vol.%) 혼합가스를 사용했으며, 이때 압력, 온도,

Table 1. Experimental conditions for mixture gas separation

Experimental conditions	
Feed pressure	2, 3, 4, 5 kg/cm ²
Permeate pressure	1, 0.4 kg/cm ²
Operating temperature	20, 40 °C
Membrane stage	1 st , 2 nd , 3 rd
Flue gas composition	
CO ₂	10, 26 vol.%
N ₂	90, 74 vol.%

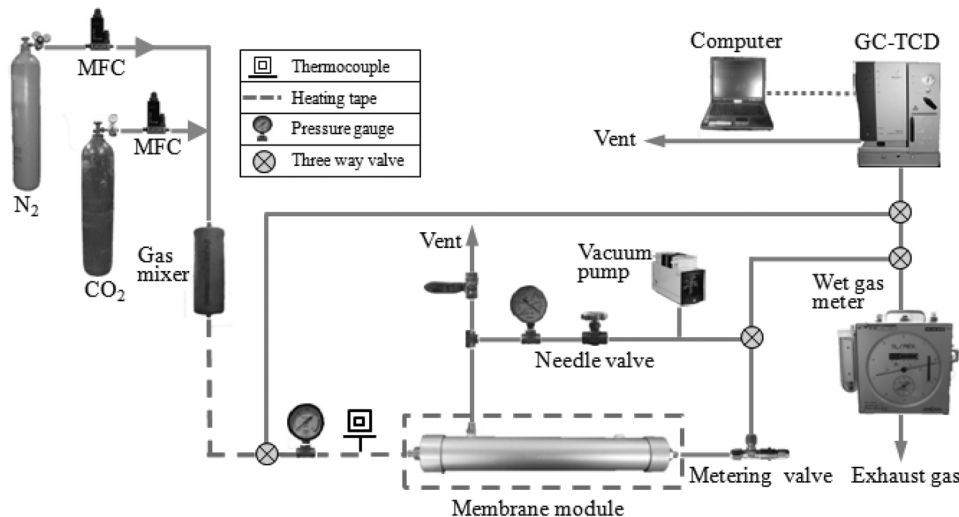


Fig. 1. Schematic diagram of experimental equipment.

주입가스 조성, 단수 변화에 따른 투과측과 잔류측의 농도, 회수율 등의 분리 거동을 관찰하였다. 본 연구의 운전 조건은 Table 1에 나타냈다.

분리막의 성능을 평가하기 위하여 사용되어진 스테이지 컷(stage cut), 분리계수(separation factor)와 회수율(recovery ratio)은 다음과 같이 정의한다. 스테이지 컷은 혼합가스 분리 시 분리 성능을 결정하는 중요한 인자로서 투과유량과 공급유량의 비로 식 (3)으로 나타내었다.

$$\text{Stage cut} = \frac{\text{Permeate side flowrate (}\ell/\text{min)}}{\text{Feed side flowrate (}\ell/\text{min)}} \quad (3)$$

분리계수는 공급측(feed side)과 투과측(permeate side)에서 각 기체의 농도 변화로 식 (4)로 정의된다.

$$\text{Separation factor} = \frac{[\text{CO}_2]/[\text{N}_2]_{\text{permeate}}}{[\text{CO}_2]/[\text{N}_2]_{\text{feed}}} \quad (4)$$

CO₂는 N₂보다 투과도가 높은 기체로 투과부에서 회수되어진다. 시험을 통하여 운전 조건에 따른 CO₂ 회수율을 식 (5)로 정의하였다.

$$\text{Recovery ratio}(\%) = \frac{[\text{flow rate} \times \text{CO}_2 \text{ conc.}]_{\text{permeate}}}{[\text{flow rate} \times \text{CO}_2 \text{ conc.}]_{\text{feed}}} \times 100 \quad (5)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 단일기체 투과 특성

제조된 중공사막 모듈은 외경이 55 mm인 알루미늄 케이스에 365 mm의 유효 막 길이를 갖으며 유효 막 면적이 약 1.3m² 정도이다. Table 2는 폴리설피론 중공사막의 단일기체 투과도를 나타내었다. CO₂, N₂ 투과도는 각각 113.1, 3.0 GPU로 나타났으며, 투과선택도($\alpha_{\text{CO}_2/\text{N}_2}$)는 37.7이었다. 이는 Powell 등의 연구에서 폴리설피론 유리상고분자의 CO₂/N₂ 선택도는 9~40 정도로 본 실험한 결과와 비슷하였다.⁹⁾ 폴리설피론은 이미 산업용 가스분리 공정에 많이 이용되고 있으며 CO₂/N₂ 선택도 높아 CO₂를 회수하는데 적합한 것으로 알려져 있다.

3.2. 혼합가스의 분리 특성

3.2.1. 압력변화의 영향

공급 혼합가스의 조성이 CO₂ 10%인 화석연료(석탄, 천연가스 등)연소시 발생하는 배가스를 대상으로 투과측의 압력을 대기압으로 유지하고 공급압력의 변화가 회수율과 농도에 미치는 영향을 조사한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 스테이지 컷은 공급유량의 변화를 통하여 조절하였으며, 스테이지 컷이 0.2~0.4 범위에서 공급측의 압력이 증가할수록 보다 높은 회수율을 얻을 수 있었다. 공급압력이 2 kg/cm² 정도의 낮은 압력에서는 스테이지 컷 0.34에서 막을 통과하여 투과측으로 배출되는 CO₂의 농도와 회수율은 각각 19%, 75%인 것으로 확인할 수 있다. 공급압력이 5 kg/cm²인 경우 투과측의 CO₂ 농도와 회수율은 각각 26%, 90%까지 증가하는 것을 알 수 있다. 압력이 상승에 따라 투과되는 유량은 농도차에 비례하고 농도는 헨리상수와 분압의 곱이므로 분압의 상승에 따라 농도차가 커지므로 투과측으로 더 많은 CO₂가 투과되어 농도와 회수율이 상승한다. 하지만 스테이지 컷 0.4 이상에서는 회수율이 거의 비슷하거나 역전되는 경향을 보였다. 공급되는 가스 유량이 적어지므로 압력을 증가하더라도 투과되는 CO₂ 양이 적으므로 농도가 감소되는 것으로 판단되어진다.

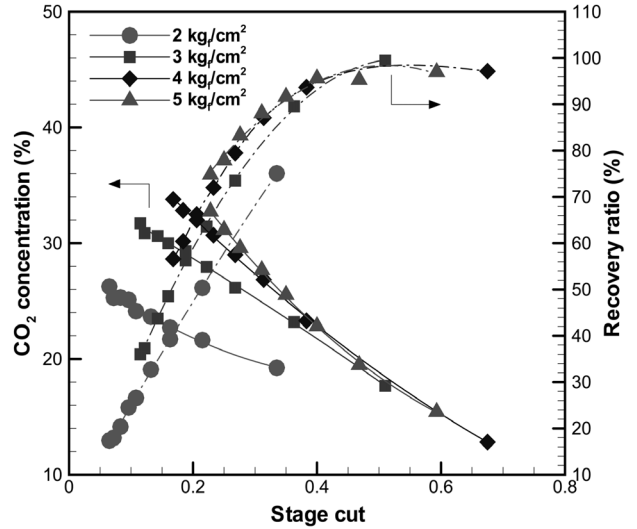


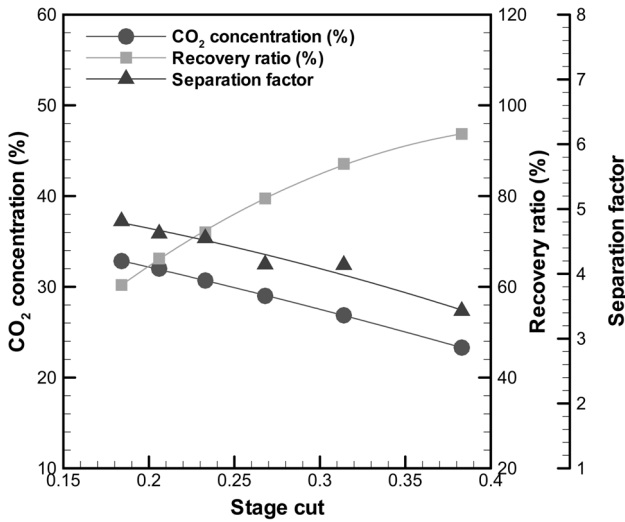
Fig. 2. The effects of pressure differences on the CO₂ concentration and recovery ratio as function of stage cut at 20°C.

공급측 압력은 생성물의 순도와 유량을 결정할 수 있는 중요한 변수로서 압력이 클수록 분리 효율을 높일 수 있지만, 대부분의 분리막은 재질과 구조에 따라 한계 압력이 존재하고 압력증가에 따른 운전 비용이 늘어나므로 경제성을 고려해야 한다.^{10,11)}

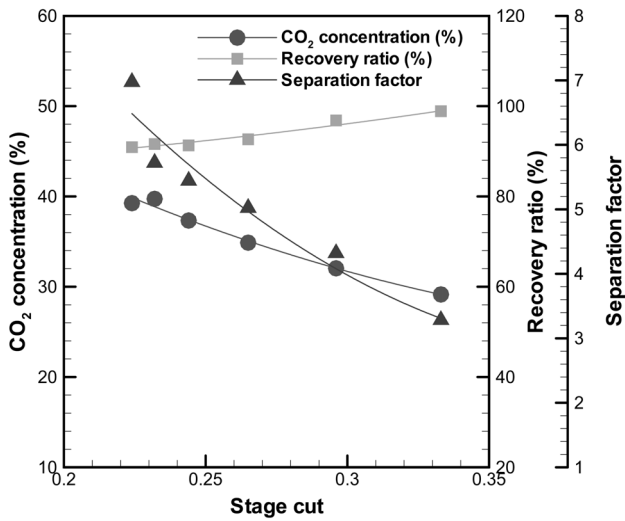
Fig. 3의 경우 일정한 공급압력 4 kg/cm²에서 투과측의 압력변화에 따른 막의 성능을 조사한 결과이다. Fig. 3에서 보는 것처럼 회수율 90%를 만족하는 경우 CO₂의 농도가 투과측 압력이 대기압인 경우 25%에 불과하던 CO₂의 농도가 투과측에 진공(0.4 kg/cm²)을 걸어줌으로써 약 40% 정도까지 증가하는 것을 확인할 수 있다. 투과측의 압력을 낮출수록 높은 농도의 이산화탄소 회수가 가능하였다. 또한 투과측 진공(0.4 kg/cm²)에서 대기압의 경우보다 동일 스테

Table 2. Gas permeation of polysulfone hollow fiber membrane (at 20°C, 1 kg/cm²)

Membrane	P _{N₂}	P _{CO₂}	P _{CO₂} /P _{N₂}
LPM (L/min)	0.19	7.1	37.7
Permeance (GPU)	3.0	113.1	



(a) permeate side pressure : 1 kg/cm²



(b) permeate side pressure : 0.4 kg/cm²

Fig. 3. Effect of permeate pressure on membrane performance (feed pressure : 4 kg/cm²).

이 지점에서 분리계수가 높게 나왔으며, 이는 혼합가스의 분리효율이 높다는 것을 의미한다.

Fig. 3에서 공급부 압력이 4 kg/cm²에서 투과측을 감압하는 것이 Fig. 2의 공급부 압력이 5 kg/cm²인 경우에 비하여 압력차가 낮음에도 불구하고 오히려 회수되는 CO₂의 농도는 높게 나타났다. 이는 투과측이 대기압 상태에서 공급부 압력이 증가하여도 가스 흐름이 유선을 따라 막에 투과되지만 투과측에 감압을 하면 가스흐름이 증공사막의 표면으로 강제 흡입되므로 단위 체적당 CO₂ 양을 증가시켜 5 kg/cm²인 경우보다 CO₂ 농도가 높게 나타낸 것으로 판단되어진다.

고분자 막의 기체 투과는 막 재료에 기체가 용해하여 확산하는 것에 의해 투과되며, 각 기체의 투과 속도 차이를 이용하여 분리한다. 기체의 막 분리는 막 양측에 압력차를 발생시켜 분리 대상 성분의 분압차에 의해 막을 투과하게 하

는 방법으로 처리 대상의 혼합가스를 가압하여 공급하면서 투과측은 감압하는 것이 분리에 효과적이다.¹²⁾

3.2.2. 온도 변화의 영향

Fig. 4는 온도와 공급 유량 변화에 따른 스테이지 컷 및 투과측 유량 변화를 나타내었다. 동일한 온도에서 공급유량 증가에 따라 투과측 유량이 증가되지만 증가폭이 공급유량의 증가폭의 상대적비가 감소되므로 스테이지 컷은 감소되고, 일정한 공급유량에서 온도가 20℃에서 40℃로 증가함에 따라 막의 확산계수가 높아지면서 투과도 값이 증가로 인한 투과되는 CO₂ 유량이 증가되어 스테이지 컷 비가 10~16% 높아졌다.

Fig. 5는 5 kg/cm²하에 20℃와 40℃에서 스테이지 컷의 변화에 따른 CO₂ 농도, 회수율을 각각 비교하여 나타내었

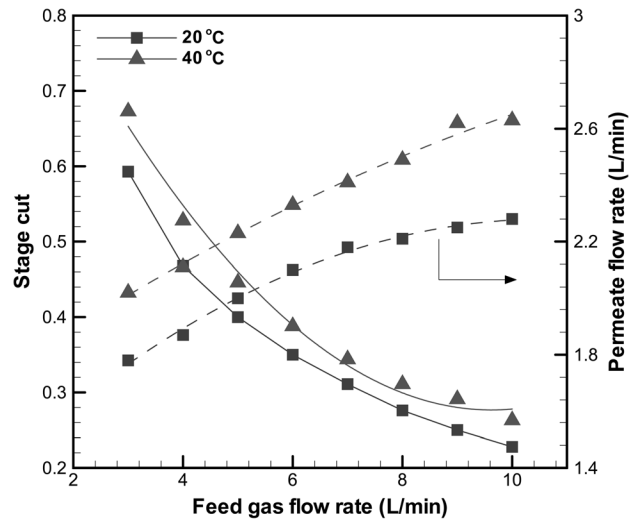


Fig. 4. Stage cut and permeate flow rate according to temperature and feed gas flow rate at 5 kg/cm².

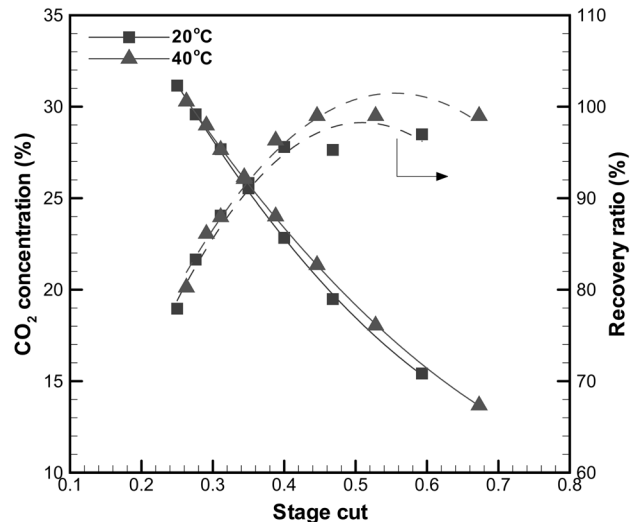


Fig. 5. The effects of temperature differences on the CO₂ concentration, recovery ratio and separation factor as function of stage cut at 5 kg/cm².

다. 공급온도가 20, 40℃ 모두 스테이지 컷이 감소함에 따라 투과측 CO₂의 농도는 증가하고, 회수율은 감소하는 것으로 나타났다. 스테이지 컷이 0.5일 경우 20℃에서 40℃로 온도가 상승함에 따라 CO₂의 농도는 18%에서 20%로, 회수율은 96%에서 99%로 높아졌다. 스테이지 컷이 0.35 이하일 때는 공급되는 가스유량이 많지하면서 막 내부에서 기체 체류 시간이 감소되어 온도에 영향을 적게 받아 온도 변화에 따른 CO₂ 농도와 회수율 값의 차이가 크지 않는 것으로 판단되어진다. 운전 온도가 높은 경우에 증가폭은 크지 않지만 더 높은 농도와 회수율을 얻을 수 있었다. 폴리설피론은 일반적으로 확산선택도를 향상시켜 기체분리 성능을 높이는 유리상 고분자로 분리막으로 온도의 상승에 따른 막에 대한 기체 용해도는 변화가 미비하나 확산도가 높아지는 것으로 투과측으로 투과되는 유량이 증가함에 따라 투과측 CO₂의 농도와 회수율이 높아지는 것으로 판단된다.

3.2.3. 주입조성 변화의 영향

Fig. 6에 공급 기체의 조성변화에 따른 투과측 CO₂의 농도와 회수율을 나타내었다. 온도 20℃, 공급압력 5 kgf/cm²에서 공급 혼합가스의 조성 CO₂ 10%, 26%를 대상으로 하여 스테이지 컷 변화시키며 CO₂의 농도와 회수율을 측정하였다. CO₂ 10% 조성을 갖은 혼합가스의 경우, 스테이지 컷이 증가함에 따라 CO₂의 농도는 33%에서 15% 감소하지만 회수율은 74%에서 91%로 증가하는 것으로 나타났다. CO₂ 26% 혼합가스인 경우에도 스테이지 컷 증가에 따라 CO₂ 농도는 70%에서 45% 감소하지만 회수율은 78%에서 99%로 증가하였다. 이산화탄소 농도는 CO₂ 10%의 혼합가스가 공급되는 경우 약 33%로, 26%가 공급되는 경우에는 약 70%로 농축되어 투과됨을 확인할 수 있다. 스테이지 컷 0.58에서 혼합가스 조성 CO₂ 10%, 26%의 회수율은 각각 91%, 92%로 공급되는 혼합가스의 CO₂의 함량이 높을 경우 회수율이 높아지는 것으로 나타났다.

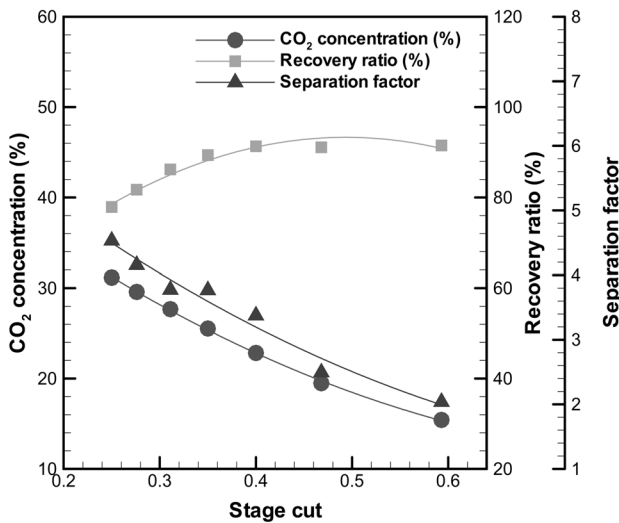
분리계수는 혼합가스를 주입할 경우에 활용되는 선택도로 공급부와 투과부에서 각 기체의 물분율로 혼합 가스의 분리 효율을 알 수 있는데 CO₂ 10%의 경우 2.0~4.5, CO₂ 26%는 2.7~10.5 범위를 보였다. 주입된 CO₂의 농도가 높을수록 혼합가스인 CO₂와 N₂의 분리효율이 증가됨을 알 수 있었다.

3.2.4. 막 단수 변화의 영향

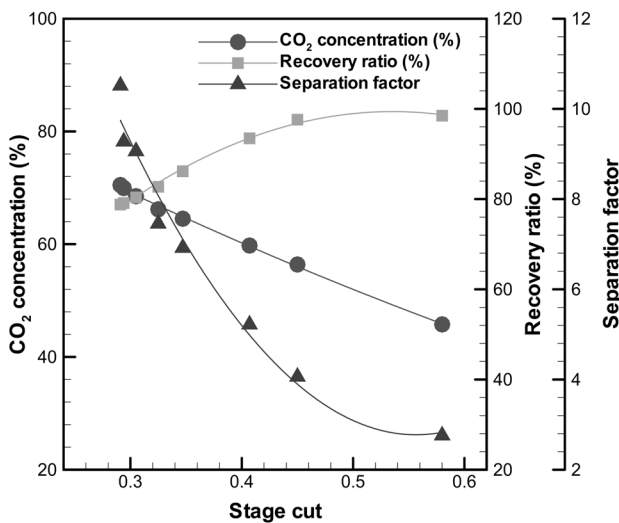
화석 연료의 연소시 발생하는 배기가스로부터 CO₂를 분리하는 경우, 상대적으로 공급 가스 압력이 낮고 CO₂가 저농도(5~25%)이며 저온에서 이뤄진다. 낮은 투과 압력과 저농도 CO₂는 막 분리에 있어 큰 단점이 될 수 있다. 다단의 막 공정 구조는 높은 투과율과 선택성이 있어 저농도 공급가스에서도 고 순도의 가스를 얻을 수 있다는 점에서 장점을 가진다.¹³⁾

본 연구에서는 하나의 모듈에서 투과측에 발생하는 혼합가스 조성을 공급가스로 보고 반복적으로 투과성능 실험을 수행하였으며, 이를 막 단수 변화를 주는 것으로 가정하였다.

Table 3은 막 단 변화에 따른 폴리설피론 중공사막의 혼합가스 분리 성능을 나타냈다. 1단의 경우 공급측 압력을 5 kgf/cm²에서 회수율이 90%를 만족하는 조건에서 스테이지 컷이 0.35일 때 투과측 CO₂의 농도는 약 26%로 농축되었다. 1단에서 투과된 CO₂ 26%를 2단으로 공급하였으며 공급압력은 1단에서와 같이 유지하고 스테이지 컷을 변화에



(a) feed composition : 10% CO₂



(b) feed composition : 26% CO₂

Fig. 6. The effect of feed composition on the CO₂ concentration and recovery ratio as function of stage cut at 5 kgf/cm².

Table 3. Mixture gas separation performance of polysulfone hollow fiber membrane by three-stage system

Stage	Pressure (kgf/cm ²)	[CO ₂] _{feed} (%)	[CO ₂] _P (%)	Stage cut	Recovery ratio (%)	[CO ₂] _R (%)
1 st	5.0	10	26	0.35	91	1.0
2 nd	5.0	26	70	0.29	79	10.4
3 rd	5.0	70	95	0.75	99	10.1

따라 분리막의 투과성을 실험하였다. 잔류층의 흐름이 전단의 공급농도(CO₂: 10%)와 같은 조건에서 투과층의 CO₂의 농도가 약 70%로 농축되어 투과됨을 확인할 수 있다. 회수율이 79%로 1단의 경우보다 낮게 나왔다. 3단의 경우에도 2단을 통과한 CO₂ 70%에 대하여 전 단계 실험과 같이 투과층에 배출되는 CO₂의 농도를 측정하였다. 3단 공정에서 이산화탄소를 회수율 90%, 농도 95% 이상 분리하였다. 모듈의 반복적인 투과성능 실험을 통하여 연소 배기가스 중의 CO₂의 고 순도와 높은 회수율을 얻기 위해서는 다단의 막 공정 구조가 필요함을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 화석연료 연소시 배출되는 배기가스에서 CO₂를 선택적으로 분리 회수하기 위하여 폴리설폰 중공사막을 이용하여 공급측 및 투과측 압력, 운전 온도, 주입 조성, 단수 변화 등 운전 조건에 따른 분리 특성연구를 진행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 폴리설폰 중공사막의 단일 CO₂, N₂ 투과도는 각각 113.1, 3.0 GPU로 나타났으며, 투과선택도(α_{CO_2/N_2})는 37.7로 CO₂를 회수하는데 적합하다.
- 2) 공급 압력이 높을수록, 투과층을 감압하는 경우가 투과층으로 더 많은 CO₂가 투과되어 농도와 회수율이 증가하였다.
- 3) 주입 온도가 20℃에서 40℃로 증가함에 따라 투과층으로 투과된 CO₂의 유량이 10~16% 증가하였으며 혼합가스 분리에 유리한 조건임을 확인하였다.
- 4) 공급되는 혼합가스 조성변화로 CO₂의 함량이 높을 경우 회수율 및 분리 효율이 높아지는 것으로 나타났다.
- 5) 다단 막 시스템을 통해 1단 막에 공급된 CO₂ 10%가 26%, 2단 막에서는 70%, 3단 막의 투과층 CO₂ 농도 95% 이상 보였으며 높은 순도와 회수율을 얻기 위해서는 다단 막 구조가 필요하다.

사사

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2012 R1A1A2007144).

KSEE

Reference

1. United Nations Framework Convention on Climate Change, http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php(2012).
2. Greenhouse Gas Inventory & Research Center, <http://www.gir.go.kr>(2011).
3. Han, M. W., Kim, M. Y. and Kim, B. S., "Optimization of Membrane Separation System for Carbon Dioxide Recovery from Combustion Gases," *Kor. Chem. Eng. Res.*, **43**(2), 222~229(2005).
4. Maier, G., Wolf, M., Bleha, M. and Pientka, Z., "Gas Permeabilities of Polymers with Indan Groups in the Main Chain: 2. Polyimides," *J. Membr. Sci.*, **143**(1-2), 115~123 (1998).
5. Suzuki, H., Tanaka, H., Kita, H., Okamoto, K., Hoshino, T., Yoshinaga, T. and Kusuki, Y., "Preparation of composite hollow fiber membranes of poly(ethylene oxide)-containing polyimide and their CO₂/N₂ separation properties," *J. Membr. Sci.*, **146**(1), 31~37(1998).
6. Ismail, A. F. and Shilton, S. J., "Polysulfone Gas Separation Hollow Fiber Membranes with Enhanced Selectivity," *J. Membr. Sci.*, **139**(2), 285~286(1998).
7. Baker, R. W., "Future Directions of Membrane Gas Separation Technology," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **41**, 1393~1411(2002).
8. Koros, W. J., "Gas separation membranes: needs for combined materials science and processing approaches," *Macromol. Symp.*, **188**(1), 13~22(2002).
9. Powell, C. E. and Qiao, G. G. "Polymeric CO₂/N₂ gas separation membranes for the capture of carbon dioxide from power plant flue gases," *J. Membr. Sci.*, **279**(1-2), 1~49 (2006).
10. Zhao, L., Riensche, E., Menzer, R., Blum, L. and Stolten, D., "A Parametric Study of CO₂/N₂ Gas Separation Membrane Process for Post-Combustion Capture," *J. Membr. Sci.*, **325**(1), 284~294(2008).
11. Bounaceur, R., Lape, N., Roizard, D., Vallieres, C. and Favre, E., "Membrane Processes for Post-Combustion Carbon Dioxide Capture : A Parametric Study," *Energy*, **31**(14), 2556~2570(2006).
12. Kesting, R. E. and Fritzsche, A. K., "Polymeric gas separation membranes," John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 19~20(1993).
13. Brunetti, A., Scura, F., Barbieri, G. and Drioli, E., "Membrane technologies for CO₂ separation," *J. Membr. Sci.*, **359** (1-2), 115~125(2010).