

MEA 수용액으로부터 PDMS-PE 복합막 접촉기를 이용한 이산화탄소 감압탈거

김정훈^{*,**} · 안효성^{*} · 김정훈^{*,†}

*한국화학연구원 환경자원연구센터 자원분리회수그룹, **과학기술연합대학원대학교 청정화학 및 생물학
(2011년 11월 24일 접수, 2011년 12월 28일 수정, 2012년 2월 28일 채택)

Vacuum Stripping of CO₂ from Aqueous MEA Solutions Using PDMS-PE Composite Membrane Contactor

Jeonghoon Kim^{*,**}, Hyoseong Ahn^{*}, and Jeong-Hoon Kim^{*,†}

*Resources Separation & Recovery Research Group (RSRRG), Korea Research Institute of Chemical Technology, Daejeon 305-343, Korea

**Green Chemistry and Environmental Biotechnology, University of Science and Technology, Daejeon 305-333, Korea

(Received November 24, 2011, Revised December 28, 2011, Accepted February 28, 2012)

요약: 본 연구에서는 석탄 화력발전소의 연소 후 CO₂ 회수 기술인 알칸올 아민 수용액을 이용한 아민흡수법에서 전체 운전비의 80% 가량을 차지하는 탈거에너지의 저감을 위해 새로운 탈거기술인 분리막을 이용한 감압탈거 기술을 제시하고자 한다. 막의 소재로는 소수성막인 PE (polyethylene)를 지지체로 하고 5 μm 두께의 PDMS (polydimethylsiloxane)를 코팅한 복합막을 제조하여 적용하였으며, 흡수액으로 MEA (monoethanolamine) 30 wt% 수용액을 사용하였다. 온도의 변화에 따른 영향을 알아보기 위하여 흡수액 온도를 25~80°C로 변화시켜 이산화탄소의 탈거특성을 살펴보았으며, 흡수용액의 CO₂ 함량(CO₂ loading)에 따른 영향을 고찰하기 위하여 CO₂ 함량을 변화시켰다. 또한 감압탈거 시 탈거측 압력을 60~360 mmHg(abs.)로 변화시켜 진공도에 따른 탈거특성을 연구하였다. 아민수용액의 온도가 증가할수록, 이산화탄소 부하량이 증가할수록 이산화탄소의 탈거량은 증가하는 경향을 보이고 있으며, 감압이 감소함에 따라 이산화탄소의 탈거량 역시 증가하고 있는 것을 확인하였다. 막의 안정성 실험 결과 PTFE 단일막에 비하여 PDMS-PE 복합막의 경우 감압탈거 막공정에 적용하기 안정한 막이라고 판단된다.

Abstract: Low-temperature carbon dioxide stripping by a vacuum membrane stripping technology was studied as a substitute for the stripping process in a conventional aqueous amine process. Composite membranes with 5 μm thickness of PDMS (polydimethylsiloxane) dense layer on a PE (polyethylene) support layer were prepared by a casting method and used as a membrane contactor for CO₂ stripping. Aqueous amine solutions of 30 wt% MEA (monoethanolamine) were used as absorbents. CO₂ flux was examined under various operating conditions by varying the vacuum pressure (60~360 mmHg (abs.)), stripping temperature (25~80°C), CO₂ loading (0.5~0.7). CO₂ stripping flux increased with increasing temperature and CO₂ loading as well as decreasing vacuum pressure. PDMS-PE composite membrane has stability for vacuum stripping process compared with PTFE porous membrane.

Keywords: CO₂ stripping, composite membrane, amine absorption, vacuum stripping

1. 서론

화력 발전소에서 발생하는 이산화탄소를 처리하는 가장 일반적인 방법으로 습식 아민 흡수법이 적용되고

있다. 습식 아민 흡수법은 대규모의 이산화탄소를 제거함에 있어 지속적 운전이 가능하고 선행연구 역시 많이 이루어져 있어 공정 설계가 용이하고 안정적인 운전이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 아민 흡수법은 배가스로부터 이산화탄소를 흡수하기 위한 흡수공정과 이산화탄소를 흡수한 아민 수용액으로부터 이산화탄소를

[†]교신저자(e-mail: jhoonkim@kriect.re.kr)

탈거하여 흡수액을 재생시키는 탈거 공정으로 크게 나눌 수 있는데 이러한 각 공정에서도 해결해야 할 문제점이 존재한다. 먼저 기존의 흡수탑에 충전되는 충전물의 종류에 따라 기-액 접촉면적의 차이를 보이며, flooding, foaming, channeling 등과 같은 흡수공정 운전상의 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하고자 넓은 기-액 접촉면적을 제공하고 장치를 최소화 할 수 있으며 공정운전 상 문제점이 발생하였을 때 유동적으로 장치를 변화 시킬 수 있는 장점을 가지고 있는 막 접촉기를 흡수탑에 적용시키는 연구가 진행되어 왔다. 특히 소수성 재질의 다공성 고분자 막 소재를 이용한 막 접촉기의 연구는 활발히 이루어져 있다. 다양한 고분자 소재 중 polypropylene (PP), polyethylene (PE) 그리고 polytetrafluoroethylene (PTFE)은 강한 소수성을 가지고 용매에 내화학성이 강하다는 이유로 이산화탄소를 흡수하기 위한 막 접촉기에 도입되어 연구되었다. PP 소재는 MEA와 AMP (2-amino-2methyl-1-propanol)를 흡수액으로 사용하여 이산화탄소를 흡수하는 소재로 연구되었으며[1], PE와 PTFE 역시 MEA 수용액으로부터 이산화탄소를 흡수하는 막 접촉기로 응용되어 연구되었다[2]. 이산화탄소 흡수뿐만 아니라 황화수소와 같은 산성가스의 흡수를 위한 막 접촉기 연구에서는 polysulfone (PS)과 polyethersulfone (PES), Polyvinylidene fluoride (PVDF), PTFE와 같은 소재도 함께 연구되었다[3-9].

흡수탑에서 흡수액과 이산화탄소의 접촉면적을 넓혀주기 위한 막 접촉기 적용 연구는 활발히 진행되어진 반면 전체 습식아민 흡수 공정 에너지 소비의 60~70%를 차지하며 120°C 이상의 운전 조건으로 높은 운전비용의 주요 원인이 되고 있는 탈거측의 단점을 보완하기 위한 분리막 연구는 거의 진행되고 있지 않은 실정이다. 세라믹 막 접촉기를 이용하여 질소가스를 stripping 가스로 사용한 이산화탄소 탈거막 연구[10]와 일본 Research institute of Innovative Technology for the Earth (RITE) 의 flash process[11]를 제외하고는 탈거측의 에너지 저감을 위해 막 접촉기 공정을 도입하는 연구는 드문 실정이다.

다공성 고분자 막을 막 접촉기에 적용함에 있어 가장 큰 문제점으로 여겨지는 부분은 소재의 안정성이다. 아민 수용액이나 다른 용매에 대한 화학적 안정성 역시 중요한 변수가 되지만 특히 공정운전상 막 젖음 문제나 기공의 파괴와 관련된 물리적 안정성이 막 소재를 선택

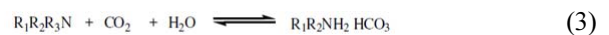
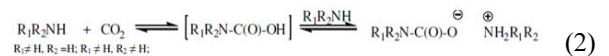
하는데 있어 가장 중요한 변수로 작용한다. 여러 고분자 막 중에서 우수한 성능을 보이는 단 하나의 소수성 막소재로 PTFE가 언급된바 있다[12]. 하지만 PTFE 역시 수 시간 연속운전 시 젖음 문제로 막 성능이 급격히 저하된다.

따라서 본 연구에서는 이와 같은 분리막 소재문제를 해결하고자 소수성이며 기계적 강도가 우수한 PE를 지지체로 하고 이산화탄소의 투과도가 높은 PDMS 소재를 선택층으로 코팅한 복합막을 제조하여 감압식 막 접촉기에 적용하였다. 다양한 흡수액 온도와 진공 압력, 그리고 CO₂ 함량변화에 따른 이산화탄소 탈거 특성을 연구하였다. 여기서 CO₂ 함량은 아민수용액상에 용해되어 있는 이산화탄소의 양을 나타낸 값으로 다음과 같이 나타낸다.

$$CO_2 \text{ 함량 (loading)} = \frac{\text{moles of } CO_2 \text{ absorbed}}{\text{moles of absorbent}} \quad (1)$$

2. 이 론

알칸올아민이란 수산기(OH)와 아민기(NH_x)를 동시에 가지고 있는 물질로 치환된 치환기의 수에 따라 1차, 2차, 3차 아민으로 구분된다. 본 실험에 사용되어진 MEA는 흡수공정에 사용되어지는 대표적인 1차 아민으로 다음과 같은 반응식에 따라 이산화탄소를 흡수하여 평형상태를 이루고 있다.



이산화탄소를 흡수한 흡수액의 온도를 상승시키면 역반응이 진행되어 흡수액 중 이산화탄소가 가스 상태로 존재하게 되며, 이산화탄소의 분압으로 측정된다. 이러한 아민 흡수제의 종류, 온도 및 농도에 따른 분압의 변화에 대해서는 연구자 Haghtalab et al. (2010), J. David Lawson (1976), Ming-Der Cheng (2010)에게서 잘 연구되어 있다[13-15]. 이 연구결과에 따르면 아민 흡수제의 로딩몰수가 높아질수록, 흡수액의 온도가 높아질수록, 그리고 아민이 MEA에서 DEA, TEA로 갈수록

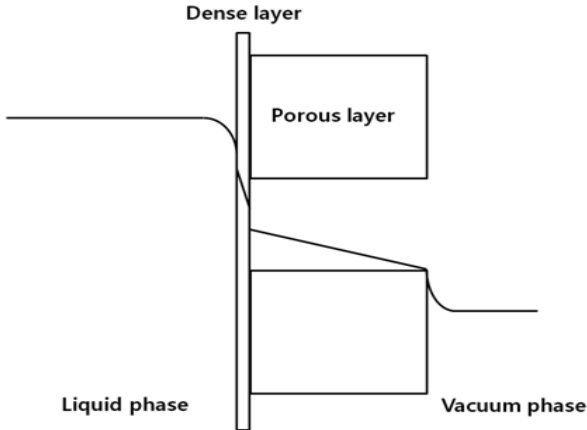


Fig. 1. Concentration profile for the transport of the CO₂ from the liquid phase towards the vacuum phase through a composite membrane.

이산화탄소의 분압은 크게 증가하는 것으로 보고되었다. 따라서 PDMS-PE 복합막의 PDMS 측(공급 측)으로 이산화탄소를 흡수한 아민계 흡수제가 흐르고 다른 한쪽(투과 측)에 감압시켜주는 감압탈거공정을 이용하면 분리막을 통해 이산화탄소를 탈거하게 된다. 즉 공급측 아민수용액의 이산화탄소의 분압보다 낮은 진공압력을 투과측에 걸어주면 투과증발과정처럼 막의 내부에 분압차가 발생하여 Fig. 1과 같이 이산화탄소 농도구배가 발생하여 투과현상이 일어난다.

이 때 공급측의 이산화탄소는 복합막 내의 비다공성 PDMS 막표면에 Henry의 법칙에 의해 이산화탄소의 분압에 연결되어 용해된 뒤 감압하의 투과측의 이산화탄소의 분압의 차이를 구동력으로 확산되어 막을 통과한 후 다시 감압되어 탈 용해되는 과정으로 막을 투과하게 된다. 여기에서 다공성 PE지지체의 투과저항은 비다공성막인 PDMS 박막층에 비해 아주 작으므로(투과증발막이나 기체투과막에서 복합막을 사용하는 통상 투과저항은 전체 투과저항에서 5% 이하로 되어 무시하고 투과실험을 수행), 본 연구의 이산화탄소의 Flux는 다음 식 (6)과 같이 표현될 수 있다.

$$J_A = \frac{P}{L} (p_{l,CO_2}^* - p_{v,CO_2}) = \frac{N_A}{A \cdot t} \quad (6)$$

J_A : CO₂ flux (mol/m² · hr)

P : permeability (mol · cm/m² · hr · Pa)

L : membrane thickness (cm)

p_{l,CO_2}^* : equilibrium CO₂ partial pressure with liquid phase CO₂ loading (Pa)

p_{v,CO_2} : CO₂ pressure at the vacuum phase (Pa)

N_A : CO₂ stripped (mol)

A : membrane area (m²)

t : time (hr)

3. 실험

3.1. PDMS-PE 복합막 제조

PDMS 코팅용액은 주재인 A제(Sylgard 184, Silicon elastomer base, DOW CORNING)와 경화제인 B제(Sylgard 184, Silicon elastomer curing agent, DOW CORNING)를 혼합하여 제조하였다. 주재인 A제 50 g을 용매로 사용된 헥산 50 g에 녹여 준비하고, 경화제인 B제 50 g을 헥산 50 g에 녹여 각각 준비한다. PDMS 코팅용액은 준비된 A제 용액과 B제 용액을 혼합한 후 magnetic stirrer를 사용하여 1시간 동안 혼합하여 제조하였다.

PDMS 코팅은 doctor knife를 이용하여 일정한 두께로 코팅하였다. 지지체로 사용된 다공성 PE (polyethylene) 평막을 270 mm × 270 mm의 크기로 준비하고, doctor knife 위의 유리판에 조심스럽게 각 모서리를 고정하였다. Doctor knife의 roller bar 쪽에 고정된 PE 평막 위에 준비된 코팅용액 10 mL를 주사기를 이용하여 고르게 뿌려준 후 roller bar를 1 mm/sec의 속도로 이동시키며 코팅용액이 PE 평막의 위에 고르게 코팅시킨다. 코팅된 PE 평막은 전기 오븐에서 12시간 동안 80°C를 유지하여 경화시켜 사용하였다. 제조된 PDMS-PE 복합막을 직경 4.7 cm의 원형으로 잘라 탈거실험에 사용하였다.

3.2. 이산화탄소 감압 탈거 특성 평가

충분한 CO₂ 공급 상태를 유지하기 위하여 99% CO₂ 기체를 상온에서 흡수 챔버에 2~6시간 공급하여 원하는 CO₂ 흡수량(loading)으로 조절하였으며 흡수 챔버에서 CO₂를 흡수한 흡수액은 500 mL/min의 속도로 2개의 항온조로 유입되어 원하는 탈거온도로 조절된 후 17.35 cm² (직경 4.7 cm)의 막면적을 갖는 분리막 모듈을 통과하며 CO₂를 감압 측으로 배출한 흡수액은 실온의 냉각수가 흐르는 열교환기를 거쳐 실온 근처까지 냉

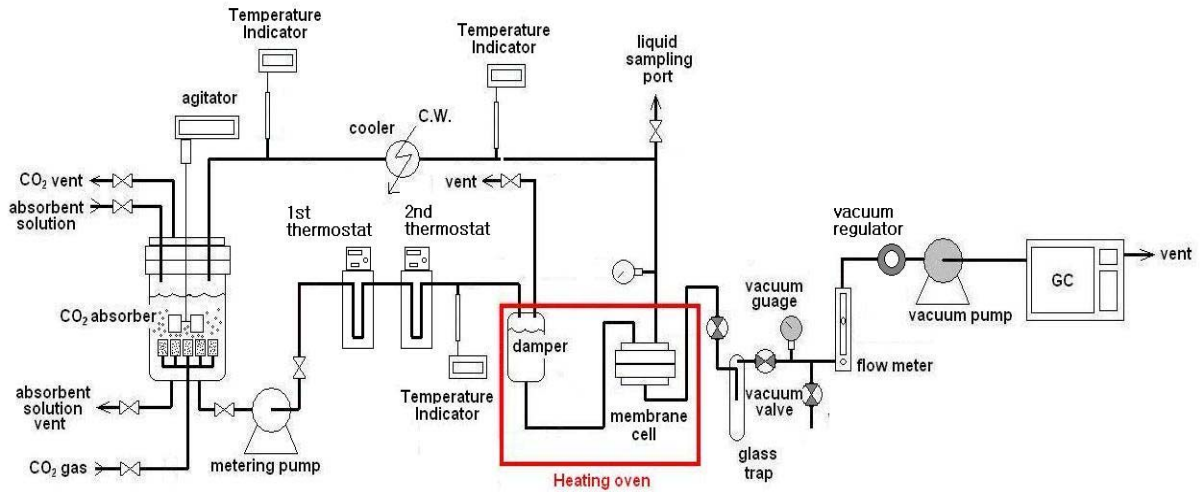


Fig. 2. A schematic diagram of experimental apparatus.

Table 1. Materials and experimental conditions

Absorbent	30 wt% MEA
Membrane	PDMS-PE compositet membrane PDMS dense layer : 4~5 μm, PE support layer pore size : 0.2 μm porosity : 35%
Temperature	Absorption : 25°C Desorption : 25, 40, 60, 80°C
Pressure	Desorption : 60, 160, 260, 360 mmHg(abs)

각된 후 다시 흡수 챔버로 공급되도록 하였다. 분리막 모듈의 감압 측으로 통과된 CO₂는 0°C로 유지되는 트랩을 통과하며 함유된 물을 제거한 후 유량계를 통과해 탈거되는 CO₂의 유량을 확인한 뒤 GC를 통해 분석되었다. 감압 측의 진공도는 상부 공급측의 이산화탄소의 분압을 고려하여 진공조절기를 사용하여 투과가 일어나는 충분히 낮은 압력으로 조절 되었다.

CO₂ 흡수량(CO₂ loading)은 자동적정기(848 titrimplus, Metrohm, USA)를 사용하여 적정법으로 측정되었으며, 다음의 식을 사용하여 계산되었다.

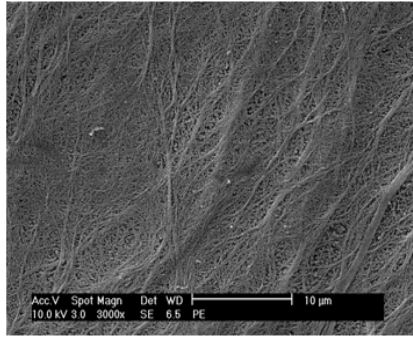
$$E_{q,CO_2} = V_{NaOH} \times N_{NaOH} / V_{sample} \quad (7)$$

$$\alpha_{CO_2} = (E_{q,CO_2} \times MW / 10) / Wt_{MEA} \quad (8)$$

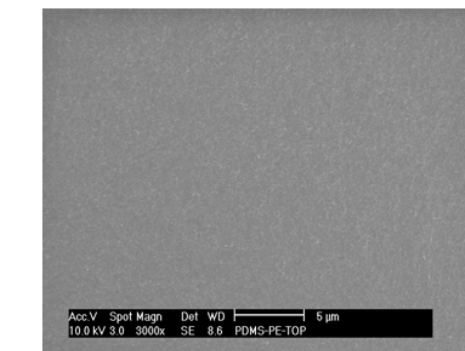
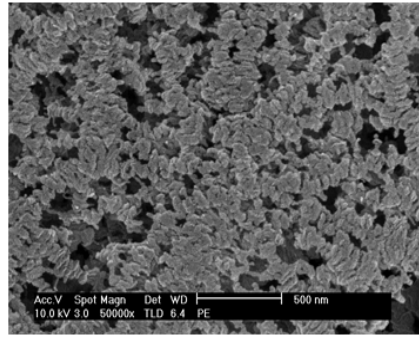
E_{q,CO_2} : 용액 리터당 평형 CO₂량

- V_{NaOH} : 적정에 사용된 NaOH 수용액의 부피[mL]
- N_{NaOH} : 적정에 사용된 NaOH 수용액의 노르말 농도
- V_{sample} : 샘플 용액의 부피[mL]
- α_{CO_2} : 이산화탄소 함량(CO₂ loading)
- MW : MEA 분자량
- Wt_{MEA} : 수용액 중 MEA 함량[%]

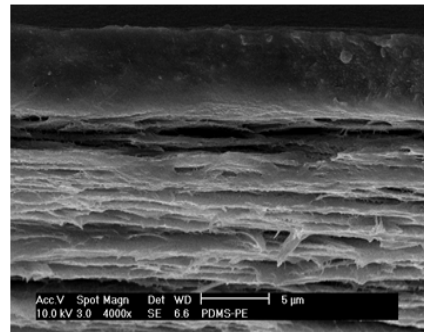
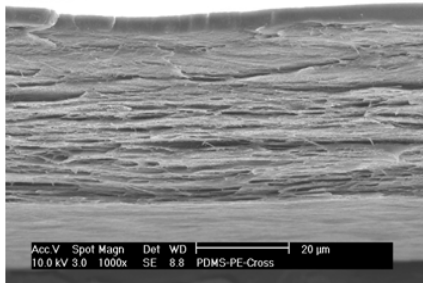
Table 1에 이산화탄소 감압 탈거 특성 평가를 위한 실험 변수를 나타내었다. 흡수액으로 MEA 30 wt% 수용액을 사용하였으며 탈거 온도는 25, 40, 60, 80°C로 변화시켜 온도변화에 따른 이산화탄소 감압 탈거 특성을 살펴보고 투과측 압력을 360, 260, 160, 60 mmHg(abs)로 변화시켜 감압에 따른 이산화탄소 탈거 특성도 살펴보고자 CO₂ 함량을 0.5에서 0.7로 변화시켜 실험을 진행하였다. 식 (2)~(5)에서 알 수 있듯이 MEA의 최대부하는 화학양론적 제한에 의해 0.5를 넘지 못한다. 그러나 수용액 상에서 물에 이산화탄소가 용해되어 HCO₃⁻가 생성될 수 있기 때문에 [R-NH₃]⁺[HCO₃]⁻로 1 mol의 CO₂가 MEA 1 mole에 흡수되어 bicarbonate가 형성된다. 따라서 MEA 수용액에 총 흡수되는 이산화탄소의 양은 0.5 × (carbamate 농도) + 1 × (bicarbonate 농도) ≃ 0.7이 이루어질 수 있다. Haghtalab, Lawson, Der Cheng 등의 발표에서도 0.5 이상의 CO₂ 함량에 관한 이산화탄소 부분압의 실험적 내용을 확인할 수 있다[13-16].



(a) Surface SEM image of PE support layer



(b) Surface SEM image of PDMS dense layer



(c) Cross-sectional SEM image of PDMS-PE composite membrane

Fig. 3. SEM images of PDMS-PE composite membrane.

4. 결과 및 토론

4.1. PDMS-PE 복합막 제조 결과

Fig. 3(a)에 지지체로 사용되어진 PE막의 표면 SEM 사진을 나타내었고 Fig. 3(b)에서는 표면에 코팅을 한 후 비다공성 PDMS의 표면 SEM 사진을 나타내었으며, 다공성 PE막의 표면에 비다공성 PDMS막이 균일하게 코팅되어진 것을 확인할 수 있다. 코팅되어진 PDMS-PE막의 단면을 Fig. 3(c)에 나타내었으며, 선택층의 두

께가 4~5 μm 정도로 균일하게 코팅층이 형성되었음을 확인하였다. 또한 PE층에 PDMS가 스며들어난 부분 없이 균일한 두께로 성공적으로 코팅이 된 것을 확인하였다.

제조 되어진 PDMS-PE 복합막을 감압탈거공정에 적용할 시 안정성을 확인하기 위하여 탈거온도 80°C, 160 mmHg (abs.) 감압조건하에서 안정성 시험을 수행하였다. 대조군으로 PTFE 단일막을 사용하여 비 다공성 복합막과 다공성 단일막의 감압 탈거에 대한 안정성을 비

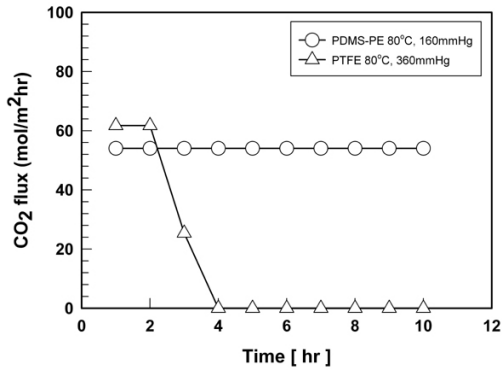


Fig. 4. Membrane stability of PDMS-PE composite membrane and PTFE porous membrane for CO₂ stripping (MEA : 30 wt%, CO₂ loading: 0.5, Temperature: 80°C, Vacuum pressure: 160, 360 mmHg(abs.)).

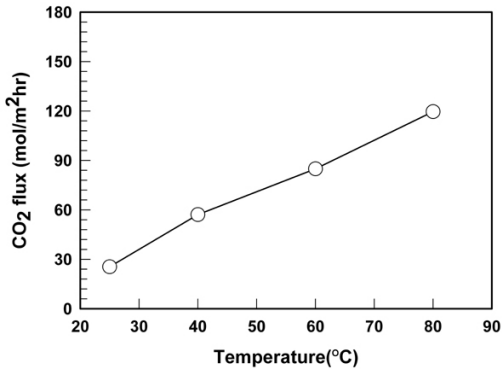


Fig. 5. CO₂ flux as a function of temperature (MEA 30 wt%, CO₂ loading: 0.7, Vacuum pressure: 60 mmHg(abs.)).

교하였다.

Fig. 4에서 나타난 것과 같이 PDMS-PE 복합막은 CO₂ loading 0.5, 탈거온도 80°C, 160 mmHg(abs.) 감압조건하에서 10시간동안 이산화탄소 투과량의 변화 없이 일정한 flux를 보이고 있는 반면 PTFE 단일막 (pore size: 0.45 μm, thickness: 80 μm)은 동일한 조건 하에서 심각한 젖음현상을 보이며 30분 안에 막이 파괴되어 이산화탄소 flux의 급격한 저하와 함께 아민 수용액이 새어나오는 결과를 보였다. 이에 160 mmHg(abs.) 보다 높은 감압조건인 360 mmHg(abs.) 하에서의 경향을 살펴본 결과 Fig. 4에서와 같이 2시간 동안 62 mol/m²hr의 이산화탄소 탈거 flux로 PDMS-PE 복합막에 비해 비교적 높은 탈거량을 보이고 있으나 3시간 이후 pore wetting 현상에 의해 절반 이하인 25 mol/m²hr로 flux가 급격히 떨어지는 것을 확인하였다. 4시간 후

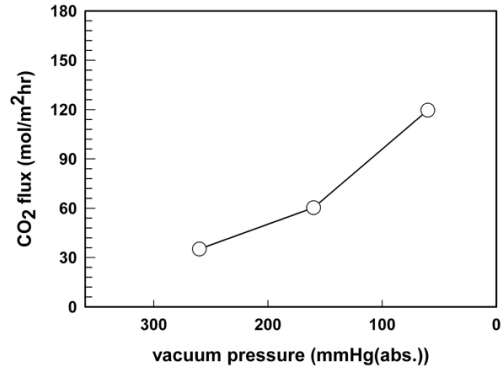


Fig. 6. CO₂ flux as a function of vacuum pressure (MEA: 30 wt%, CO₂ loading: 0.7, temperature: 80°C).

더 이상의 flux를 보이지 않았으며 막이 파괴되어 아민 수용액이 새어 나오는 것을 확인하였다. 이러한 결과로 볼 때 PDMS-PE 복합막은 MEA 30 wt% 수용액을 사용한 감압 탈거 공정에 안정성을 가지고 있으며 PTFE 단일막에 비하여 감압 탈거 공정에 적용하기 적합한 막이라 판단된다.

4.2. 온도 변화에 따른 이산화탄소 탈거 특성

탈거온도가 이산화탄소 투과특성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 동일한 CO₂ 함량, 감압 조건하에서 흡수액 온도를 25, 40, 60, 80°C로 변화시켜 투과 특성을 살펴보았다. Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 온도가 증가함에 따라 이산화탄소의 투과량 역시 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 동일한 CO₂ 함량에서 온도가 증가함에 따라 아민 수용액의 이산화탄소 분압이 증가하기 때문으로 설명할 수 있다. CO₂ 함량 0.7에서 MEA 30 wt% 수용액의 40°C에서의 CO₂ 분압은 대략 1.97 atm[12]로 동일한 조건 하에서 25°C에서의 CO₂ 분압 0.98 atm[12]에 비하여 높은 분압을 가지고 있다. 이는 투과측의 감압 상태인 절대압 기준 60 mmHg (0.07 atm)과의 분압차이를 비교하여 볼 때 더 큰 분압 차이로 인하여 막을 투과하는 구동력 또한 증가하여 이러한 경향을 보이는 것으로 판단된다. 따라서 감압 막탈거 공정설계 시 온도는 매우 중요한 변수로 작용할 것으로 사료된다.

4.3. 진공압력에 따른 이산화탄소 탈거 특성

동일한 이산화탄소 함량과 온도 조건하에서 감압 조건의 변화에 따른 이산화탄소의 탈거 특성을 살펴보았

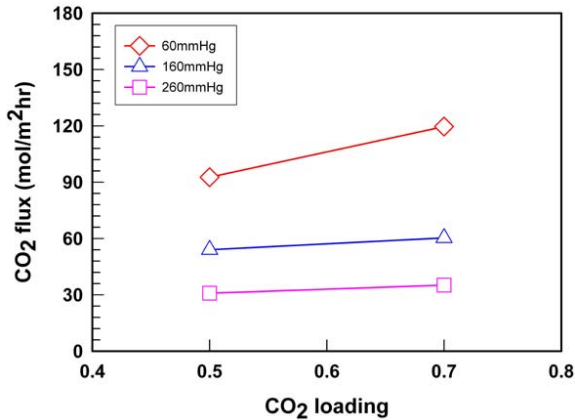


Fig. 7. CO₂ flux as a function of CO₂ loading (MEA : 30 wt%, temperature: 80°C).

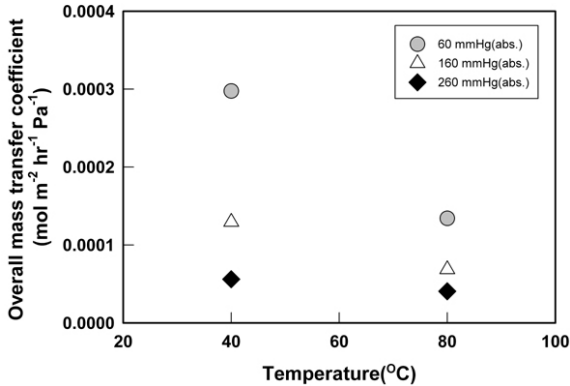


Fig. 8. Overall mass transfer coefficient at elevated vacuum pressure (MEA 30 wt%, CO₂ loading: 0.7).

다. 감압 조건은 260에서 60 mmHg(abs.)로 100 mmHg(abs.) 단위로 압력을 감압시키며 실험을 수행하였다. 감압조건이 낮아짐에 따라 이산화탄소의 투과량 역시 증가하는 경향을 보이며, 투과측의 이산화탄소의 농도가 95% 이상이 유지되는 것을 확인 하였다. 이는 공급측의 이산화탄소의 분압이 일정할 때 투과측의 감압 조건이 낮아짐에 따라 공급측과 투과측의 이산화탄소의 분압 차이가 커지게 되고 이에 따라 막을 투과하는 구동력이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

4.4. CO₂ 함량 변화에 따른 이산화탄소 탈거 특성

흡수제의 CO₂ 함량의 변화가 탈거 Flux에 미치는 영향을 알아보기 위하여 CO₂ 함량을 변화시켜 탈거량을 측정하였다.

Fig. 7에 흡수제로 MEA 30% 수용액을 사용하고

CO₂ 함량을 0.5와 0.7로 변화시켜 측정한 결과를 나타내었다. Fig. 7에서 보듯이 CO₂ 함량이 증가함에 따라 탈거량은 상당히 증가함을 확인 할 수 있다. 이는 CO₂ 함량이 증가할수록 정해진 탈거온도에서 역반응에 의해 벌크 액상의 CO₂ 농도가 증가하므로 물질 전달의 구동력이 커지게 되고 높은 이산화탄소 flux로 나타나게 되는 것으로 판단된다.

4.5 총괄물질 전달계수

감압조건 변화에 따른 총괄물질 전달계수를 Fig. 8에 나타내었다. 감압 조건의 변화에 따라 총괄물질 전달 계수는 증가하는 경향을 보이고 있는 반면 온도가 증가함에 따라 총괄물질 전달 계수는 감소하는 경향을 보였다. 이는 막을 투과하여 나오는 이산화탄소의 투과 flux 증가와 공급측의 이산화탄소 분압의 증가폭의 차이로 설명할 수 있다. Fig. 5에서와 같이 40°C에서 80°C로 증가함에 따라 이산화탄소의 투과량은 58 mol/m²·hr에서 120 mol/m²·hr로 약 2배 정도 증가하고 있는 반면 공급측의 이산화탄소 분압은 200 kPa에서 900 kPa로 4.5 배 증가하였다[12]. 분압의 증가폭에 비해 탈거되는 이산화탄소 flux의 증가폭이 작아 총괄물질 전달 계수는 온도 증가에 따라 감소하는 경향을 보였다.

5. 결 론

아민 흡수공정에서 탈거측에 감압 막분리 공정을 도입하여 이산화탄소의 탈거특성을 살펴 본 결과, 흡수액의 온도가 증가함에 따라 공급측의 이산화탄소 분압이 100 kPa에서 900 kPa로 증가하여 투과되는 이산화탄소 탈거 flux 역시 증가하고 있음을 확인 할 수 있었으며 또한, 이산화탄소 함량이 클수록 높은 탈거 성능을 보였으며 감압상태가 감소함에 따라 공급측의 이산화탄소의 분압과 감압 측의 이산화탄소의 분압 차이가 커짐에 따라 탈거 flux가 증가하는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. D. deMontigny, P. Tontiwachwuthikul, and A. Chakma, "Using polypropylene and polytetrafluoroethylene membranes in a membrane contactor for

- CO₂ absorption”, *J. Membr. Sci.*, **277**, 99 (2006).
2. N. Nishikawa, M. Ishibashi, H. Ohata, and N. Akutsu, “CO₂ removal by hollow fibers Gas-liquid contactor”, *Energy Convers. Manage.*, **36**, 415 (1995).
 3. A. Mansourizadeh and A. F. Ismail, “Hollow fiber gas-liquid membrane contactors for acid gas capture: A review”, *J. Hazardous Materials*, **171**, 38 (2009).
 4. K. Li and W. K. Teo, “Use of permeation and absorption methods for CO₂ removal in hollow fiber membrane modules”, *Sep. Purif. Technol.*, **13**, 79 (1998).
 5. J. Ren, R. Wang, H. Y. Zhang, Z. Li, D. T. Liang, and J. H. Tay, “Effect of PVDF dope rheology on the structure of hollow fiber membranes used for CO₂ capture”, *J. Membr. Sci.*, **281**, 334 (2006).
 6. D. Wang, W. K. Teo, and K. Li, “Removal of H₂S to ultra low concentrations using an asymmetric hollow fiber membrane module”, *Sep. Purif. Technol.*, **27**, 33 (2002).
 7. D. Wang, W. K. Teo, and K. Li, “Selective removal of trace H₂S from gas streams containing CO₂ using hollow fiber modules/contactors”, *Sep. Purif. Technol.*, **35**, 125 (2004).
 8. S. Atchariyawut, C. Feng, R. Wang, R. Jiraratanon, and D. T. Liang, “Effect of membrane structure on mass-transfer in the membrane gas-liquid contacting process using microporous PVDF hollow fiber”, *J. Membr. Sci.*, **285**, 272 (2006).
 9. H. Jeon, H. Ahn, I. Song, H.-K. Jeong, Y. Lee, and H.-K. Lee, “Separation of sulfur dioxide by circulatory porous polymer membrane contactor”, *Membrane Journal*, **17**, 302 (2007)
 10. S. Koonaphapdeelert, Z. Wu, and K. Li, “Carbon dioxide stripping in ceramic hollow fiber membrane contactors”, *Chem. Eng. Sci.*, **64**, 1 (2009).
 11. K. Okabe, H. Mano, and Y. Fujioka, “Separation and recovery of carbon by a membrane flash process”, *Int. J. Greenhouse Gas Contl.*, **2**, 485 (2008).
 12. O. Falk-Pederson and H. Dannstorm, “Separation of carbon dioxide from offshore gas turbine exhaust”, *Energy Conversion. Management*, **38**, 81 (1997).
 13. A. Haghtalab and A. Shojaeian, “Modeling solubility of acid gases in alkanolamines using the nonelectrolyte Wilson-nonrandom factor model”, *Equilibria*, **289**, 6 (2010).
 14. J. D. Lawson and A. W. Garst, “Gas sweetening data: Equilibrium solubility of hydrogen sulfide and carbon dioxide in aqueous amine and aqueous diethanolamine solutions”, *J. Chem. Eng. Data*, **21**, 20 (1976).
 15. M. D. Cheng, A. R. Caparanga, A. N. Soriano, and M. Li, “Solubility of CO₂ in the solvent system (water + monoethanolamine + triethanolamine)”, *J. Chem. Thermodynamics*, **42**, 342 (2010).
 16. J.-G. Shim, J.-H. Kim, K.-R. Jang, and H.-M. Eum, “Absorption characteristic of MEA with carbon dioxide from the real flue gas using a pilot plant”, *J. of KSEE*, **25**, 1557 (2003)