

## 평판형 분리막 접촉기를 이용한 이산화황 흡수 분리

이 영 진 · 송 인 호 · 전 현 수 · 안 효 성 · 이 용 택<sup>†</sup> · 이 형 근\*

충남대학교 화학공학과, \*한국에너지기술연구원  
(2006년 7월 28일 접수, 2006년 9월 5일 채택)

### Absorptive Separation of Sulfur Dioxide using Flat Membrane Contactor

Youngjin Lee, Inho Song, Hyunsoo Jeon, Hyoseong Ahn, Yongtaek Lee<sup>†</sup>, and Hyung-Keun Lee\*

Department of Chemical Eng., Chungnam National University

\*Korea Institute of Energy Research

(Received July 28, 2006, Accepted September 5, 2006)

**요 약:** 산성비의 한 가지 원인으로 알려진 이산화황(SO<sub>2</sub>)을 포함한 대기 오염물질인 연도 기체의 배출 허용 기준이 엄격해지고 있다. 배연 탈황 기술의 효율을 획기적으로 높일 수 있는 분리막 접촉기의 개발에 필요한 기초 설계 자료를 제공하고자 평판형 분리막 접촉기 실험 장치를 설계 및 설치하여 이산화황 투과 특성 평가를 수행하였다. 평판형 분리막 접촉기를 이용한 이산화황의 제거에 미치는 흡수제 농도와 공급 기체 내의 이산화황 농도의 영향, 공급 기체 유량 및 분리막 재질에 따른 영향을 확인하고자 하였다. 흡수제 농도가 증가할수록 이산화황 제거 효율이 증가하였으며, 이산화황 농도가 증가할수록 제거 효율이 감소하였다. 또한 공급 기체 유량이 증가할수록 제거 효율이 감소하였으며 분리막 재질은 제거 효율에 큰 영향을 끼치지 않음을 확인할 수 있었다.

**Abstract:** A flue gas emission known to cause an acid rain, containing sulfur dioxide, is tightly controlled by a regulation. The membrane contactor could be one of the alternatives which might be useful technologies for better performance of desulfurization. The fundamental sulfur dioxide separation data were obtained by a flat membrane contactor so that they could be utilized for the full scale membrane contactor. The separation of sulfur dioxide was measured in terms of the concentration of NaOH absorbent, the concentration of sulfur dioxide, the feed flow rate and different membrane materials. As the concentration of absorbent increased, the removal efficiency increased. By increasing the concentration of sulfur dioxide, the removal efficiency decreased. As the feed flow rate increased, it was observed that the removal efficiency decreased. Finally, the effect of the membrane material on separation was found to be negligible.

**Keywords:** sulfur dioxide, flat membrane, contactor, absorptive separation

#### 1. 서 론

대기 오염의 주 원인물질로서 황산화물과 질산화물을 들 수 있으며, 황산화물은 화석 연료 중 황 성분을 포함한 석탄 및 석유의 연소 시 배출된다. 배출된 황산화물은 인간 및 환경에 유해한 영향을 주는 것으로 잘 알려져 있으며, 장치의 부식화를 유발하고 산성비 발생 원인이 된다. 이에 따라 지난 20여 년간 화력 발전소 등에서 배출되는 황산화물의 농도를 엄격히 규제하고

있다. 따라서 석탄 및 석유를 연소시키는 산업인 발전소, 제철소의 소각로나 연소로 등에는 추가적인 배연 탈황(FGD, flue gas desulfurization) 장치가 요구되고 있다[1-2].

배연 탈황의 습식법은 반응율이 높고 이산화황 및 먼지의 동시 제거가 가능하다는 장점과 함께 현재까지 가장 보편적으로 상용화되어 있는 공정이다. 그러나 장치가 매우 크고 따라서 보수 유지가 쉽지 않고, 또한 운전이 매우 복잡한 단점이 있다. 따라서 이러한 단점을 보완할 수 있는 소형화된 탈황 장치의 개발이 필요하다.

다공성 분리막(porous membrane)은 공급물 상(phase)

<sup>†</sup>주저자(e-mail : ytleee@cnu.ac.kr)

과 투과물 상의 접촉 계면을 제공하여 두 상이 상호 혼합되지 않도록 유지하는 역할로 사용된다. 이러한 계면을 통하여 공급물로부터 필요 성분을 투과물 상으로 흡수 분리할 수 있는 기술을 분리막 접촉기(membrane contactor) 기술이라 하며, 이 기술은 기존의 전통적 공정들인 기체 흡수, 기체 탈거, 용매 추출 기술들을 대체할 수 있는 신기술이라 할 수 있다. 초순수 제조를 위한 산소 탈거와 의학용 혈액 산소 공급 등의 산업화된 분리막 접촉 기술과 준공장 규모로서 증기 올레핀과 파라핀 혼합물로부터 올레핀 분리에 관한 분리막 접촉 기술에 대하여 이미 보고된 바 있다[3-5]. 분리막 접촉기는 기존 기체 흡수에 요구되었던 장치의 부피를 20배 이상, 액체 추출을 위해 요구되는 장비의 부피를 500배 이상 감소시킬 수 있을 만큼 경제적인 기술로 부상되었다[6]. 기존 기술과 비교하여 적은 유량으로 분리 목적을 달성할 수 있으며 분리막 접촉기의 양면에 공급하는 두 접촉상의 유량을 독립적으로 제어할 수 있기 때문에 기존 기술에서 나타날 수 있는 범람(flooding) 현상을 근본적으로 제거함으로써 운전의 용이성을 제공할 수 있다[7,8]. 따라서 제한된 경우에만 신뢰성이 확립되어 있지만 실제 산업에 적용할 때 나타날 수 있는 문제점들을 제거한다면 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 사료된다. 이처럼 많은 장점을 지닌 분리막 접촉 기술을 연도 기체의 탈황에 적용하여 배연 탈황 장치를 개선할 수 있을 것으로 사료된다.

분리막 접촉 기술에서 분리막은 물질 전달이 일어나는 두 상의 계면을 안정시키고 상을 분리하는 역할을 수행한다. 액체와 액체 또는 액체와 기체의 상이 접촉하여 물질 이동이 이루어지는 분리 공정에 적용될 수 있으며 접촉 분리막으로서 사용되는 분리막의 재질이 폴리불소비닐리덴(PVDF : polyvinylidene fluoride), 폴리프로필렌(PP : polypropylene), 테프론(PTFE : polytetrafluoroethylene)과 같은 소수성(hydrophobic) 고분자인 경우 액상이 수용액이면 분리막이 젖지 않으므로 분리막 기공은 자연스럽게 기상으로 채워진다. 기상이 분리막 기공을 채우고 분리막의 다른 한쪽 면은 수용액에 의해 차단되어 있어 기상의 기체나 휘발성 성분의 화학 포텐셜이 액상보다 높을 경우 흡수가 일어난다. 분리막 물질전달 저항은 기-액 접촉기에서 나타나는 특별한 저항이다. 막 기공 내에서의 대류는 무시할 수 있으므로, 막의 물질전달 저항은 기체나 액체로 채워진 막 기공 내에서의 용질의 확산에 의해서 전체적으로 결정된다.

막의 기공들이 액체로 채워질 경우에는 액체의 매우 낮은 막 물질전달계수로 인해 효율적인 확산이 이루어질 수 없다[9]. 따라서 기공에 채워진 기체가 액상으로 빠져나가는 현상을 방지하기 위하여 액상의 압력이 기상의 압력보다 높게 유지되어야 한다. 액상의 압력이 기상의 압력보다 Cantor 식에 의하여 얻을 수 있는 일정 수준까지 높아져도 액상은 소수성 고분자막의 기공으로 침투될 수 없다[10,11]. 이와 같은 원리에 의하여 기상과 액상은 접촉 분리막의 액상 측 기공 입구에서 계면을 형성하게 되며 이렇게 고정된 계면을 통하여 물질이 이동한다.

많은 논문에서 중공사막(hollow fiber membrane) 접촉기를 이용한 이산화탄소 및 이산화황의 흡수분리 성능 실험을 수행하여 발표하였다. 중공사막을 이용한 흡수 분리 실험은 중공사막의 길이에 따른 축방향의 각 지점에서의 공급 기체 농도와 흡수제의 농도가 변화하며 그 결과로서 플럭스(flux)가 달라진다. 하지만 각 지점에서의 농도 및 플럭스는 실험적으로 관찰할 수 없으며 중공사막의 끝 지점에서의 값인 중공사막 길이 전체에 대한 값만을 얻을 수 있다. 그러나 평판형 분리막 접촉기는 입구에서의 흡수제 또는 공급기체의 농도를 임의로 조절할 수 있기 때문에 평판형 분리막 접촉기를 이용한 분리 실험을 통하여 임의의 흡수제 및 공급기체 농도에 대한 흡수 분리 성능을 해석할 수 있는 장점이 있다. 또한 플럭스에 대한 이론적 해석을 수행함으로써 중공사막 접촉기에 대한 각 지점에서의 투과 특성 예측 및 실제 연도 기체 탈황을 위한 기-액 분리막 접촉기(gas-liquid membrane contactor)를 개발하는데 필요한 기초 설계 데이터를 확보할 수 있다.

본 연구에서 분리막 접촉 기술을 연도 기체의 탈황에 적용하기 위해 필요한 기초 설계 데이터를 제공하고자 평판형 분리막 접촉기를 제작하고, 제작된 평판형 접촉기를 이용하여 이산화황의 분리 제거에 대한 기초 자료를 확보하고자 하였다. 또한 다양한 다공성 고분자 막을 이용하여 이산화황 투과 특성 평가를 수행하고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 실험장치

본 실험에 사용한 평판형 분리막 접촉기의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 평판형 분리막 접촉기는 테프론

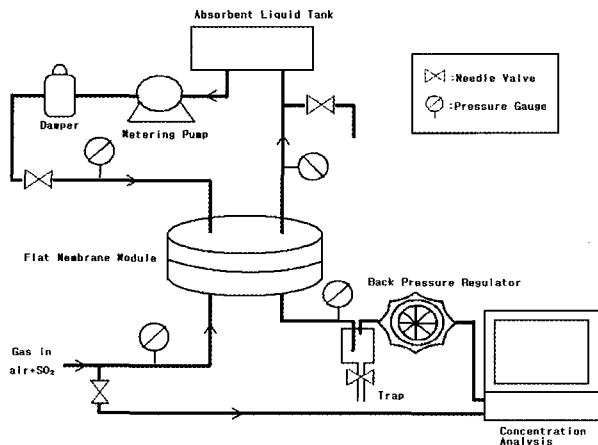


Fig. 1. Experimental apparatus for SO<sub>2</sub> separation with gas-liquid membrane contactor.

Table 1. Specification of flat membrane module.

Volume of each cell (mL)	250
Contacting area of membrane (cm <sup>2</sup> )	11.34
Material	main body : PTFE flange : aluminium

(PTFE) 재질의 두 몸체와 알루미늄으로 제작된 플랜지 (flange)와 고분자 평판막을 받쳐줄 다공성 스테인리스 스틸 지지체로 이루어져 있으며 이러한 형태는 플랜지와 몸체의 분리가 가능하기 때문에 막을 설치한 다음 고정 상태와 누수 여부를 정밀하게 확인할 수 있는 장점이 있다. 몸체의 상부 측에는 3개의 외부 연결구를 통하여 흡수액의 공급 및 채취 등을 수행할 수 있도록 하였으며 하부 측에도 3개의 외부 연결구를 통하여 기상의 시료의 공급흐름이 연속적으로 이루어질 수 있도록 하였다. 액체의 흐름 유속 및 압력을 조절하기 위해서 정량펌프(metering pump)를 조절하는 조절기(controller)와 니들밸브(needle valve)를 설치했으며, 기체의 흐름 유속과 압력 조절을 위해서 기체 유속 조절기(gas flow rate controller)와 압력 조절기(back pressure regulator)를 사용하였다. 또한 기상의 분석을 위해서 기체의 공급과 수거 라인을 기체 크로마토그래프(gas chromatograph) 분석기로 연결하였다. 평판형 분리막 접촉기의 규격은 Table 1과 같다.

2.2. 실험방법

이산화황의 흡수 분리에 미치는 분리막의 영향을 평가하기 위해서 본 실험에 사용한 다공성 분리막들의 특성

Table 2. Flat porous membranes

Membrane	PP		PVDF		PTFE	
Pore size (μm)	0.2	0.45	0.22	0.45	0.2	0.45
Porosity (%)	70	82	60	66	80	60
Diameter (mm)	47	47	47	47	47	47
Manufacture company	Whatman		Millipore		Sartorius	

Table 3. Conditions of separation experiment

Absorbent (M NaOH)	0.05 ~ 0.2
Gas flow rate (cc/min, STP)	20 ~ 200
Liquid flow rate (cc/min)	2.5
Liquid pressure (bar)	1.0
Gas pressure (bar)	0.5
SO <sub>2</sub> inlet concentration (ppm)	700 ~ 2,450
Temperature (°C)	25

을 Table 2에 나타내었다. 기공 크기와 분리막 지름은 제품 카탈로그에서 인용하였으며, 분리막의 형상(morphology)과 두께(thickness)는 주사전자현미경(SEM: scanning electron microscope, S-2350, Hitach (Japan)) 분석을 통하여 측정하였다. 또한 분리막의 기공율(porosity)은 시약 1,3,5-Triisopropylbenzene (Aldrich)을 분리막의 기공에 흡수시켜 흡수된 시약의 무게와 밀도로부터 환산하여 구하였다. 본 실험에서는 소수성 평판형 분리막을 사용하여 이산화황 제거 성능을 측정하였다. 이산화황의 농도가 ppm 농도로서 비교적 낮기 때문에 H<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, NaHSO<sub>3</sub> 등 가역 반응 흡수제로서는 흡수 분리가 불완전할 수 있다. 이에 따라 비가역 흡수제인 NaOH를 사용함으로써 낮은 농도의 이산화황을 완전하게 흡수 분리할 수 있다고 판단되어 흡수제로서 NaOH 수용액을 선정하여 사용하였다. 흡수제 NaOH 농도를 변화하면서 실험을 수행하였다. 공급기체 농도의 영향을 평가하기 위하여 700~2,450 ppm 농도의 표준 공급기체를 사용하였다. 공급기체가 분리막의 기공을 통해 기상이 액상과 계면에서 접촉했을 때 NaOH와 이산화황의 비가역 반응 속도가 충분히 빠르기 때문에 액체 유량의 변화에 따른 영향은 크지 않을 것으로 사료되며 이에 따라 액체의 유속을 고정하여 실험을 수행하였다. 액체의 유속은 기상으로 공급된 소량의 이산화황이 주어진 NaOH 농도에서 충분히 반응할 수 있는 유속인

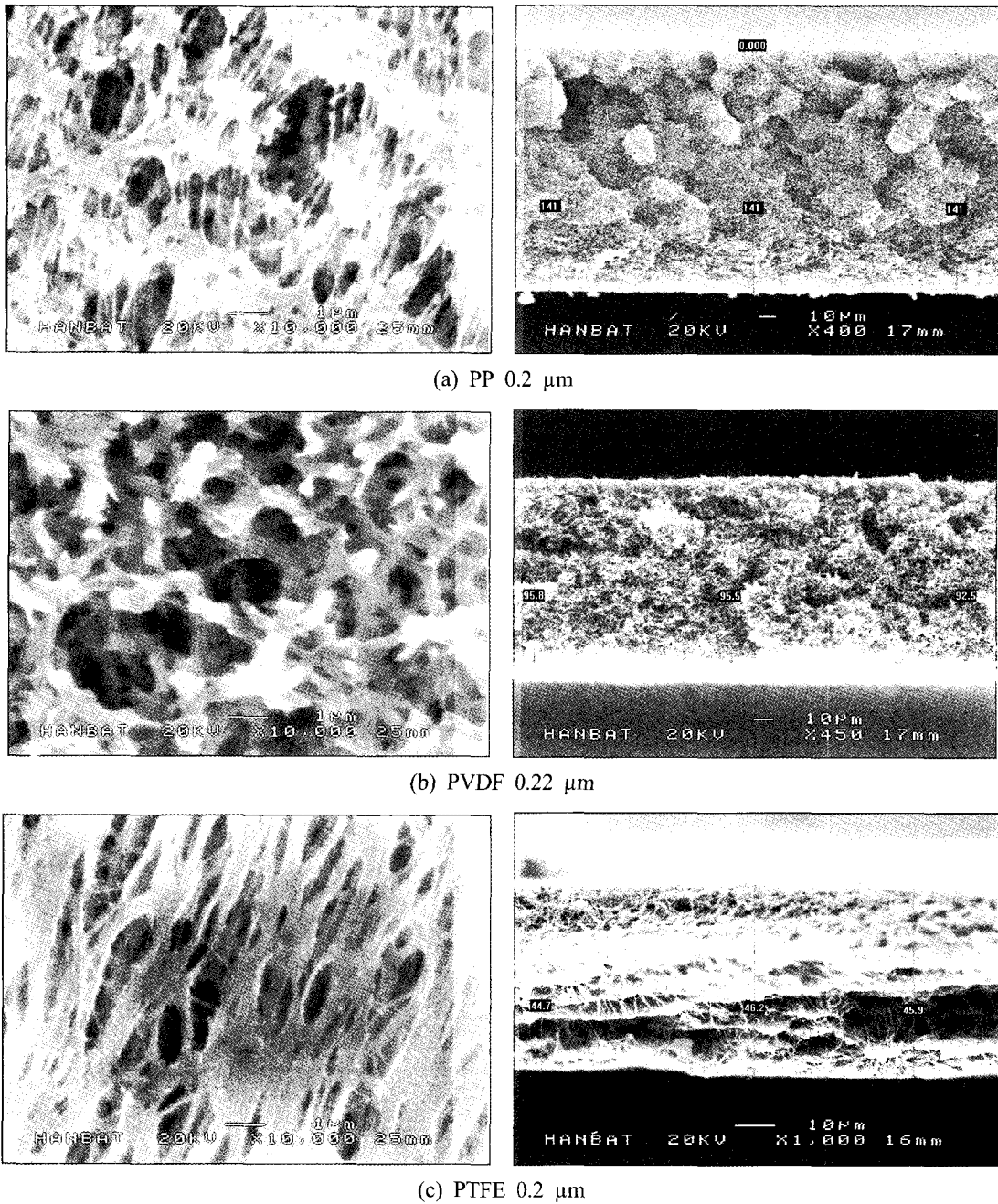


Fig. 2. Surface morphology and thickness of typical porous membranes.

2.5 cc/min으로 고정하여 실험을 수행하였다. 본 실험에서의 흡수 분리 실험 조건을 Table 3에 나타내었다.

기체의 공급 농도와 배출 농도는 기체 크로마토그래피(Agilent technologies 6890N, YoungLin, Korea)를 사용하여 분석하였으며 TCD 검출기를 사용하였다. 이동상으로서 헬륨 기체를 사용하였으며 유속을 100 cc/min

으로 사용하고, 40 psi의 압력으로 공급하였다. 오븐의 온도는 최초 100°C에서 10°C씩 15분간 상승시켜 250°C까지 올린 후 3분간 유지하도록 프로그램하여 사용하였다. 주입기의 온도는 200°C, 검출기의 온도는 250°C로 고정하여 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 분리막의 영향

주사전자현미경을 통한 분리막의 표면 이미지와 단면을 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 분리막 재질에 따라 기공 형상이 매우 다양함을 알 수 있다. 또한 단면의 두께를 사용하여 공극률을 산출하였다.

막의 화학적 재질과 기공 크기 등의 물리적 특성이 이산화황의 제거에 미치는 영향을 평가하기 위해 0.05 M NaOH(aq) 흡수제와 2,450 ppm 이산화황 농도의 공급 기체에 대해 실험하였다. Fig. 3에서 이산화황의 제거 효율을 나타내었고, Fig. 4에서 이산화황의 투과 플럭스를 나타내었다. 평판형 분리막을 통해 흡수된 이산화황의 흡수량과 투과 플럭스는 입구 이산화황의 농도와 출구 이산화황의 농도를 기체크로마토그래피로 분석한 자료를 통해 다음과 같은 방법으로 계산할 수 있으며, 이 자료를 바탕으로 이산화황의 제거에 미치는 변수들의 영향을 평가하였다. 이산화황의 흡수량을 식 (1)에 의하여 구하였으며, 이산화황의 투과 플럭스는 식 (2)로 구하였다.

$$\dot{N} = \dot{n}(\Delta C) \tag{1}$$

$$J = \frac{\dot{N}}{A} \tag{2}$$

여기에서  $\dot{N}$ 은 이산화황의 시간당 흡수량,  $\dot{n}$ 은 공급 기체의 시간당 몰 수,  $\Delta C$ 는 입구와 출구의 농도차,  $A$ 는 접촉 면적이다.

Fig. 3에서 보듯이 기체 유속이 증가함에 따라 이산화황의 제거 효율이 감소하였는데, 이는 기체 유속이 증가함에 따라 기상의 이산화황과 흡수제와 접촉하여 반응 할 수 있는 체류시간이 상대적으로 줄어들었기 때문인 것으로 생각된다.

기체 유속이 20 cc/min에서는 모든 막에 대하여 100%의 제거 효율을 나타냈으며, 기체 유속이 200 cc/min에서는 PP (0.45  $\mu\text{m}$ ) 막이 43%로 가장 높은 제거 효율을 나타내고 PVDF (0.22  $\mu\text{m}$ ) 막이 37%로 가장 낮은 제거 효율을 나타내었다. 각 막에 대한 제거 효율이 37~43% 범위 내에서 약간씩 차이를 나타내고 있지만, 막 자체가 이산화황에 대한 선택성을 가진 막이 아니기 때문에 막의 재질에 따른 영향이 없는 것으로 생각되며

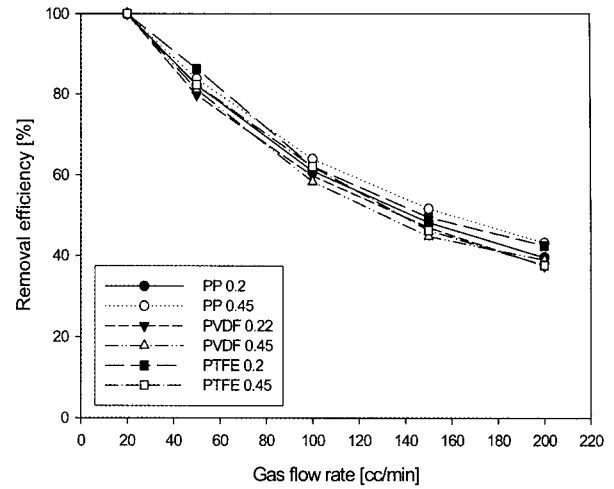


Fig. 3. Removal efficiency as a function of gas flow rate for various membranes : 0.05 M NaOH aqueous solution, SO<sub>2</sub> feed concentration = 2,450 ppm.

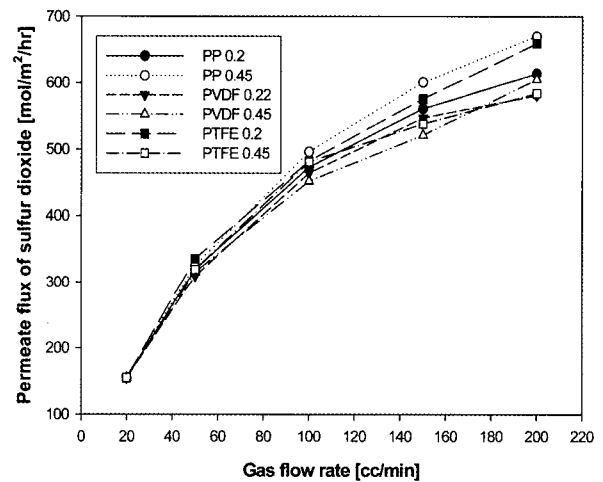
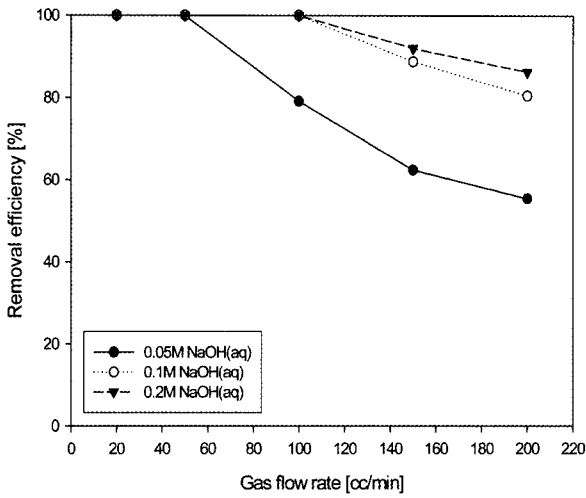


Fig. 4. Permeate fluxes of sulfur dioxide versus gas flow rate through various membranes : 0.05 M NaOH aqueous solution, SO<sub>2</sub> feed concentration = 2,450 ppm.

막의 기공 크기 또한 이산화황 분자 크기의 수십 배 이상이므로 막 기공의 형상과 크기에 대한 영향도 무시할 만하다고 판단된다. 다만 각 막에 대한 제거 효율의 차이가 조금씩 나타나는 것은 기공율의 차이에서 비롯되는 것으로 생각된다. 따라서, 본 실험에 사용된 막의 재질이나 형상 및 기공의 크기가 이산화황의 제거에 거의 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다. Fig. 4에서 보듯이 20 cc/min의 기체 유속에서 모든 막에 대해서 155 mol/m<sup>2</sup>/hr의 이산화황 투과 플럭스를 나타냈으며, 기체 유속이 증가함에 따라 투과 플럭스가 증가하여 200 cc/

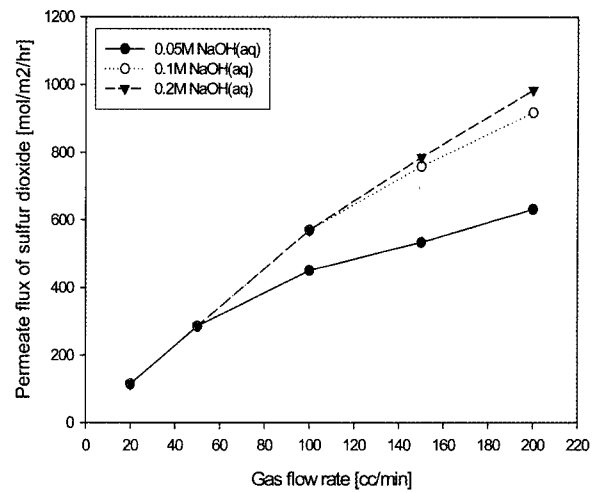


**Fig. 5.** Comparison of sulfur dioxide removal efficiency obtained with a different absorbent concentration : PP membrane ( $\phi = 0.45 \mu\text{m}$ ),  $\text{SO}_2$  feed concentration = 1,800 ppm.

min의 기체 유속에서 PP ( $0.45 \mu\text{m}$ ) 막이  $670 \text{ mol/m}^2/\text{hr}$ 로 가장 높았고 PVDF ( $0.22 \mu\text{m}$ ) 막이  $581 \text{ mol/m}^2/\text{hr}$ 로 가장 낮았다. 이산화황의 투과 플럭스도 제거 효율과 마찬가지로 막의 재질이나 형상 및 기공 크기에 크게 영향을 받지 않음을 확인할 수 있었으며, 약간의 차이는 기공율의 차이에 의한 영향으로 판단된다. 기체 유속의 증가에 따라 투과 플럭스가 증가하는 이유는 첫째, 기상의 이산화황이 흡수제와 접촉하여 반응하는 체류 시간이 짧아지지만 공급측의 이산화황의 농도가 계속 높게 유지되므로 투과측으로 물질전달이 이루어지는 구동력인 농도구배가 높기 때문이며 둘째, 낮은 기체 유속에서는 이산화황의 양이 한정되어 공급되기 때문에 100% 투과되더라도 그 공급 양이 적고 이로 인하여 투과 플럭스가 낮은 값으로 한정되기 때문으로 생각된다.

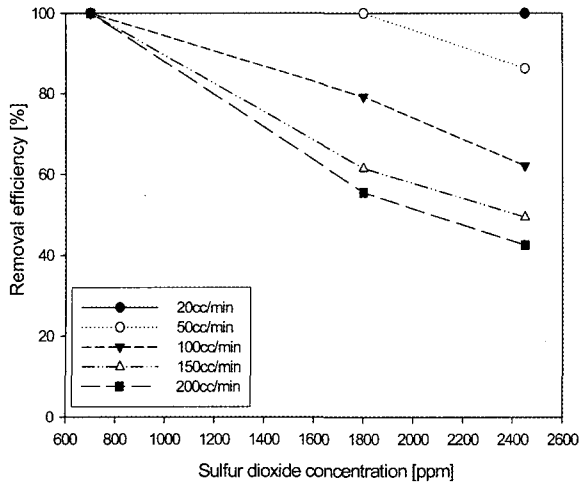
### 3.2. 흡수제 농도의 영향

PP ( $0.45 \mu\text{m}$ ) 분리막을 이용한 경우의 화학적 흡수제 NaOH (aq)의 농도의 영향을 조사하여 Fig. 5와 6에 각각 이산화황의 제거 효율과 투과 플럭스를 나타내었다. 공급 기체는 1,800 ppm 농도의 이산화황을 포함한 공기 혼합 기체를 사용하였다. Fig. 5에서 보듯이 20~50 cc/min의 기체 유속에서는 0.05~0.2 M NaOH (aq) 모두에 대해서 100% 제거 효율을 나타냈으며, 100 cc/min에서는 0.05 M NaOH (aq)에 대해 79%의 제거 효



**Fig. 6.** Comparison of permeate flux of sulfur dioxide obtained with a different absorbent concentration : PP membrane ( $\phi = 0.45 \mu\text{m}$ ),  $\text{SO}_2$  feed concentration = 1,800 ppm.

율을 그리고 0.1 M과 0.2 M NaOH (aq)에 대해서는 100% 제거 효율을 나타내었다. 200 cc/min에서 0.05 M NaOH (aq)는 55%, 0.1 M NaOH (aq)는 81% 그리고 0.2 M NaOH (aq)는 86%의 제거 효율을 나타내었다. 흡수제의 농도가 높을수록 높은 기체 유속에서도 높은 제거 효율을 나타냄을 알 수 있었다. 0.05 M 농도와 0.1 M 농도의 제거 효율 차이는 컸지만 0.1 M 농도와 0.2 M 농도의 제거 효율 차이는 크지 않음을 볼 수 있는데, 이는 어느 이상의 흡수제 농도에서는 흡수제가 이산화황과 충분히 반응하기 때문에 그 차이를 확인하기가 쉽지 않음을 알 수 있었다. 즉 이산화황과 반응할 화학적 흡수제의 양이 충분할 경우 잉여 흡수제는 이산화황의 제거에 영향을 거의 미치지 않으며, 화학적 흡수제에 의한 반응 속도 보다 이산화황이 전달되는 물질전달속도가 이산화황 제거 속도 결정 단계로 작용하는 것으로 사료된다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 이산화황의 투과 플럭스는 흡수제의 농도가 증가함에 따라 증가하였다. 기체 유속이 20 cc/min과 같이 낮은 경우 공급되는 이산화황의 절대량이 작기 때문에 낮은 흡수제 농도에서도 대부분 반응하므로 흡수 투과량이 높은 흡수제 농도와 비교할 경우 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나 기체 유속이 증가하면 공급되는 이산화황의 절대량이 증가하기 때문에 흡수제 농도가 큰 경우가 충분히 반응하기 때문에 흡수 투과량이 증가하는 것으로 사료된다. 그러나 앞에서 서술한 바와 같이 어느 이상 흡수제 농



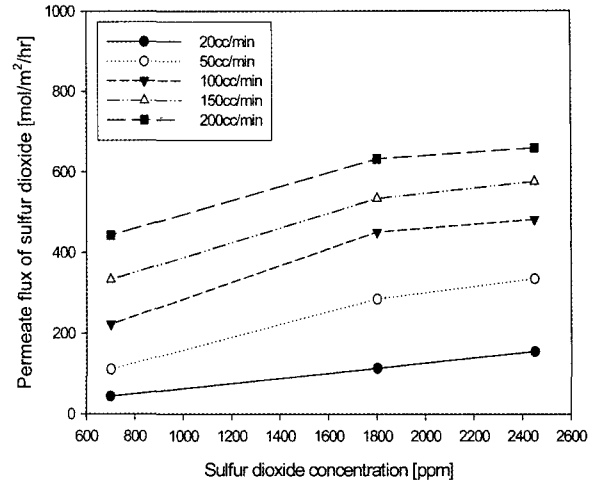
**Fig. 7.** Effect of feed sulfur dioxide concentration on removal efficiency : 0.05 M NaOH aqueous solution, PP membrane ( $\delta = 0.45 \mu\text{m}$ ).

도가 증가하면 그 효과가 크지 않음을 알 수 있다.

### 3.3. 공급 기체 이산화황 농도의 영향

공급 기체 내 이산화황의 농도가 이산화황 제거에 미치는 영향을 0.05 M NaOH (aq) 흡수제와 PP (0.45  $\mu\text{m}$ ) 분리막에 대해 조사하여 Fig. 7과 8에 나타내었다. Fig. 7에서 보듯이 동일한 기체 유속에 대해서 공급 기체 내의 이산화황의 농도가 높아질수록 낮은 제거 효율을 나타내었다. 또한 공급 기체 2,450 ppm과 1,800 ppm 농도에 대해서는 공급 기체 유속이 클수록 제거 효율이 감소하였으나 700 ppm에 대해서는 20~200 cc/min 범위의 기체 유속에 대해서 모두 100% 제거 효율을 나타내었다. 이는 700 ppm 농도의 이산화황을 포함한 공급 기체에 대해서는 공급 기체 유속이 20~200 cc/min 범위에서 0.05 M NaOH (aq)인 흡수제 2.5 cc/min의 유속으로도 충분히 제거할 수 있는 능력을 가지고 있으며, 1,800~2,450 ppm 농도에서는 공급 기체 유속의 증가에 의한 이산화황의 증가량이 0.05 M NaOH (aq)인 흡수제 2.5 cc/min의 유속으로 제거 가능한 한계를 초과하기 때문으로 사료된다.

Fig. 8에서 보듯이 동일한 공급 기체 농도에 대해서 기체 유속이 증가함에 따라 이산화황의 투과 플럭스가 증가하였으며, 동일한 기체 유속에 대해서도 공급 기체 내 이산화황의 농도가 높을수록 더 큰 이산화황 투과 플럭스를 나타내었다. 이는 공급 기체 유속과 공급 기



**Fig. 8.** Effect of feed sulfur dioxide concentration on permeate flux : 0.05 M NaOH aqueous solution, PP membrane ( $\delta = 0.45 \mu\text{m}$ ).

체 내의 이산화황 농도의 증가로 인한 공급측 이산화황의 높은 농도 구배가 공급측에서 투과측으로의 이산화황 전달 속도를 촉진시키는 구동력으로 작용하며, 이산화황의 유량 자체도 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 한편 낮은 농도의 이산화황을 포함한 공급 기체에 대해서는 공급 기체 내 이산화황이 높은 효율로 제거되더라도 그 양 자체가 적기 때문에 낮은 플럭스를 나타내는 것으로 사료된다.

### 4. 결 론

평판형 분리막 접촉기를 이용하여 운전 변수들의 변화에 따른 이산화황 투과 특성 평가를 수행하였다. 평판형 분리막을 이용한 이산화황 제거 실험에서는 막 물질성이 이산화황에 대한 선택성을 가진 막이 아니기 때문에 막의 재질에 따른 영향이 없었음을 확인할 수 있었다. 흡수제의 농도가 높을수록 높은 기체 유속에서도 높은 제거 효율을 나타냈으며, 공급 기체의 유속이 증가함에 따라 제거 효율은 점점 감소함을 확인할 수 있었다. 또한 0.05 M 농도와 0.1 M 농도의 흡수제에서는 제거 효율의 차이가 컸지만, 0.1 M 농도와 0.2 M 농도의 흡수제에서는 제거 효율의 차이가 크지 않았다. 동일한 기체 유속에 대해서 공급 기체 내의 이산화황의 농도가 낮을수록 높은 제거 효율을 나타내었다.

## 감 사

본 연구는 산업자원부 전력산업연구개발사업의 연구비 지원으로 수행되었기에 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 조영환, 김희택, 류경옥, 이영수, "Water-hydrated Ca-based sorbent의 이산화황 제거에 관한 연구", 화학공학의 이론과 응용, **3(2)**, 2597 (1997).
2. 이철수 외 20명, "접촉막 소재제조 및 응용공정 기술확보를 위한 중장기 전략수립", 산업자원부, 고려대학교 (2002).
3. R. D. Noble and S. A. Stern, "Membrane Separations Technology: Principles and Applications", Elsevier Science B. V., Amsterdam, The Netherlands, 467 (1995).
4. P. H. M. Feron and A. E. Jansen, "CO<sub>2</sub> separation with polyolefin membrane contactors and dedicated absorptions liquids: performances and prospects", *Separation and Purification Tech.*, **27**, 231 (2002).
5. H. Kreulen, C. A. Smolders, G. F. Versteeg, and W. P. M. van Swaaij, "Determination of mass transfer rates in wetted and non-wetted microporous membranes", *Chem. Eng. Sci.*, **48**, 2093 (1993).
6. Z. Qi and E. L. Cussler, "Microporous hollow fibers for gas absorption: Mass transfer in the liquid", *J. Membr. Sci.*, **23**, 321 (1985).
7. 최승학, 김정훈, 김범식, 이수복, "폴리이서설폰 중공사모듈을 이용한 연소배가스로부터 이산화탄소 분리회수를 위한 다단계 막분리공정 연구", 멤브레인, **15(4)**, 310 (2005).
8. M. S. Chun and K.-H. Lee, "Separation Science and Technology", **32(15)**, 2445 (1997).
9. V. Y Dindore, D. W. F. Brilman, F. H. Geuzebroek, and G. F. Versteeg, "Membrane-solvent selection for CO<sub>2</sub> removal using membrane gas-liquid contactors", *Separation and Purification Tech.*, **40**, 133 (2004).
10. M. Mulder, "Basic principles of membrane echnology", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands (1996).
11. Y. Lee, J. Jeong, I. J. Youn, and W. H. Lee, "Modified liquid displacement method for determination of pore size distribution in porous membrane", *J. Membr. Sci.*, **130**, 149 (1997).