

SO₂ 제거를 위한 중공사막 기-액 접촉기의 모사 및 분리막 물질 전달 계수 추정

김용국 · 송희열 · 이형근* · 김인원†

건국대학교 화학공학과
143-701 서울시 광진구 화양동 1
*한국에너지기술연구원
305-343 대전시 유성구 장동 71-2
(2006년 11월 15일 접수, 2007년 1월 4일 채택)

The Computer Simulation and Estimation of Membrane Mass Transfer Coefficients of Hollow Fiber Membrane G-L Contactors for SO₂ Removal

Yong Kuk Kim, Hee Ouel Song, Hyung Keun Lee* and In-Won Kim†

Department of Chemical Engineering, Konkuk University, 1 Hwayang-dong, Gwangjin-gu, Seoul 143-701, Korea

*Korea Institute of Energy Research, 71-2 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

(Received 15 November 2006; accepted 4 January 2007)

요 약

산업 시설에서 발생하는 SO₂를 제거하기 위해 중공사막 기-액 접촉기를 사용하고 있다. 본 연구에서는 기-액 접촉기 내의 중공사막에서의 SO₂ 흡수거동 대하여 수학적으로 모델링하고, 그 모델을 유한 요소 분석법을 이용하여 모사하였다. SO₂의 분리에 영향을 주는 변수인 기체 유량, 분리막의 물질 전달 계수 및 접촉기의 물리적 특성에 따른 SO₂의 분리 효율 및 물질 전달 특성을 알아보았다. 기체의 유속 변화에 따른 중공사막을 통한 SO₂ 제거 효율 실험값으로부터 분리막의 물질 전달 계수를 추정하였다. 또한 중공사막 설계에 도움이 되는 자료를 계산할 수 있는 방법을 제시하였다.

Abstract – Hollow fiber membrane G-L contactors are widely used to remove SO₂ emitted from industrial facilities. In this work, the mathematical modeling and computer simulation for hollow membrane G-L contactors is carried out to analyze SO₂ absorption behavior in hollow fiber membranes. The model is solved with the finite element method using a commercial software. Investigated is the dependency of SO₂ removal efficiency and mass transfer characteristics on gas velocities, membrane mass transfer coefficients and physical properties of contactors. The membrane mass transfer coefficients are estimated by fitting the experimental data with the simulated SO₂ removal efficiencies. In addition, a design methodology of membrane contactors is suggested.

Key words: SO₂ Removal, Membrane Contactors, Hollow-fiber Membrane, Membrane Mass Transfer Coefficient

1. 서 론

석유의 정제시나 중유가 연소할 때 원유에 함유되어 있는 황이 산화되어 공중에 방출되는데, 최근 에너지원이 석유로 전환됨에 따라 SO₂의 대기 중 농도가 증가하여, 산성비를 야기시키는 등과 같이 대기오염물질 중에서 큰 비중을 차지하게 되었다. 이러한 환경 오염의 문제를 해결하기 위한 오염 기체의 흡수 및 분리 공정들이 중요하게 생각되어 왔고, 여러 가지 많은 공정들이 개발되어 왔다. 기존의 기체 흡수법은 기체의 분산을 기반으로 하는 방법으로 기체를 액상에 분산시킴으로써 물질 전달 속도를 증가시키고, 기-액 간의 접촉 면적을 최대한으로 크게 하려는 의도의 방법이었다. 이러

한 방법을 사용한 흡수 장치에는 충전탑(packed tower), 분무탑(spray tower), 벤츄리 스크러버(venturi scrubber), 기포탑(bubble column)이 있고, 지금까지 많이 사용 되어 왔다. 그러나 기존의 흡수 장치들은 기-액 간의 접촉 면적을 정확하게 계산할 수 없으므로 장치가 필요 이상으로 크게 설계될 수가 있고, 액체의 범람(flooding), 방울저 떨어짐(weeping), 부하(loading)와 같은 현상이 일어나 액체나 기체의 유량에 제한을 주는 기술적인 단점을 가지고 있다[1].

이러한 단점들을 개선하고자 새로이 관심을 갖게 된 공정 중 하나가 다공성의 소수성 고분자 분리막(microporous hydrophobic polymeric membrane)을 이용하는 방법으로서, 아황산가스가 포함된 혼합기체와 수용성 흡수제를 소수성 고분자 분리막을 통해서 인위적으로 접촉시켜 제거하고자 하는 아황산가스를 흡수체에 흡수시켜 분리하는 방법을 중공사막 접촉기(hollow fiber membrane contactor) 방식

† To whom correspondence should be addressed.
E-mail: inwon@konkuk.ac.kr

이라 할 수 있다[1-2].

이런 중공사막 접촉기와 같이 분리막을 사용하는 기체 분리는 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

- 1) 접촉기는 단위 부피당 높은 표면적을 가진다. 기체와 액체의 흐름을 독립적으로 조절 가능하여 범람(flooding), 부하(load)를 방지한다.
- 2) 비교적 작은 크기를 가진다.
- 3) 기·액의 접촉 면적을 알 수 있다.
- 4) 모듈(module)화가 쉽고, 스케일(scale)의 업(up), 다운(down)이 용이하다[3].
- 5) 기체 혹은 액체의 유량에 관계없이 분리막의 전표 면적에서의 접촉이 가능하다.

단점으로는 막 자체로 인한 물질 전달 저항의 증가와 침적물 등으로 인한 막오염(fouling), 그리고 고정층 칼럼에 비해 상대적으로 높은 압력 강하와 비싼 설치비 등이다[3-4]. 이러한 단점을 극복하고자 중공사막 접촉기의 분리 효율을 증가시키기 위한 연구가 이루어지고 있다.

이러한 많은 장점을 가진 중공사막 접촉기를 사용하여 SO_2 를 흡수 제거하는 공정에서 SO_2 제거율은 기체의 유속, 중공사막 접촉기의 크기, 흡수제의 영향 그리고 분리막을 통한 기체의 물질 전달 특성 등에 따라 결정된다[1, 4-5].

본 연구에서는 에너지기술연구원서 SO_2 제거를 목적으로 제작된 중공사막 접촉기의 중공사막에서의 SO_2 농도에 대하여 수학적으로 모델링하고, 그 모델을 유한 요소분석법을 이용하여 모사하여 그 결과를 실험 결과와 비교 분석함으로써 모델을 검증하고, SO_2 분리에 영향을 주는 변수인 기체의 유량, 분리막의 물질 전달 계수 및 접촉기의 물리적 특성에 따른 SO_2 분리 효율 및 물질 전달 특성을 알아보았다. 기체의 유속 변화에 따른 중공사막을 통한 SO_2 제거 효율 실험값으로부터 분리막 물질 전달 계수를 추정하였다. 또한 중공사막 설계에 도움이 되는 자료를 계산할 수 있는 방법을 제시하였다.

2. 이론적 고찰

2-1. 중공사막 접촉기에서의 기·액간의 물질 전달

중공사막 접촉기에서의 기체(SO_2)와 액체(수용성 흡수제)간의 물질 전달은 중공사막, 즉 다공성 고분자 분리막을 통한 용액 확산 메커니즘(solution diffusion mechanism)에 의해서 이루어진다. 본 연구에서처럼 소수성 분리막을 사용하는 경우에는 Fig. 1과 같이 분리막의 물리적 특성상 액체에 의해서 젖지 않고 소수성 분리막의 기공이 기체로 채워지게 되고(non-wetted model), 이 분리막을 사이에 두고 한 쪽에서는 기체가 다른 한 쪽에는 액체가 연속적으로 흐르게 된다. 혼합기체가 주입이 되면 분리막의 고압 쪽에서 분리막을 통해서 기체가 확산되며, 저압 쪽에서 흡수제와의 반응을 통해서 흡수된다[1-2].

Fig. 1에서의 P_g , P_M 그리고 P_L 는 각각 기상, 분리막, 경계면에서의 분압을 나타내고, C_g , C_L 는 각각 경계면과 기상의 농도를 나타낸다. K_L 은 액상(흡수제) 쪽의 물질 전달 계수를 나타내고, 기체와 액체가 접촉될 때 반응에 의해서 기체가 액체 쪽으로 흡수, 즉 기체가 반응에 의해서 제거 되므로 이 반응이 매우 빠르게 일어나거나 순간 반응(instantaneous reaction)일 경우에는 흡수제의 액상에서의 K_L

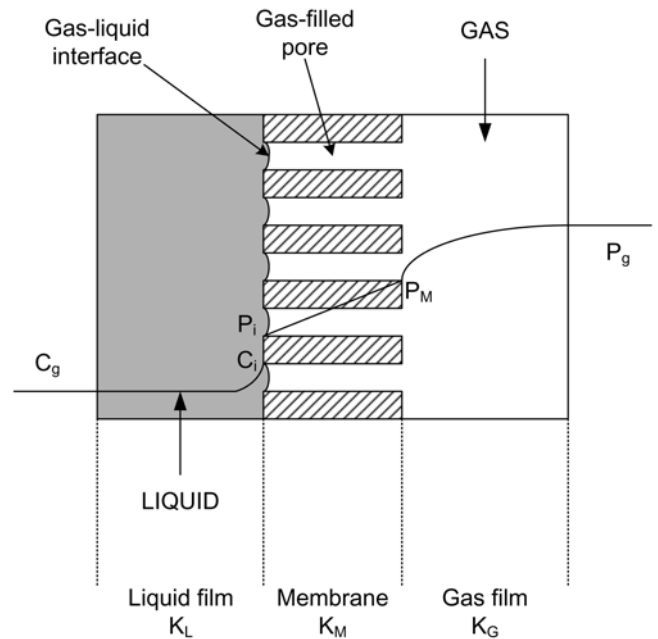


Fig. 1. Non-wetted mode of hydrophobic.

의 값은 무시할 수 있다[1, 5]. K_G 는 기상 쪽의 물질 전달 계수를 나타내고, 이 K_G 는 혼합 기체에서의 두 기체(아황산가스, 질소) 사이의 분자 확산(molecular diffusion)으로 설명할 수 있다. K_M 은 분리막의 물질 전달 계수를 나타내고 있다. 이 K_M 은 분리막의 구조적인 특성, 다시 말해서 기공도(porosity), 분리막의 두께(thickness), 기공의 굴곡도(tortuosity)와 분리막에서의 확산도(diffusivity in membrane)에 의해서 결정된다.

중공사막 접촉기의 경우에는 중공사막이 관(tube)의 모양을 가지고 있으므로, 이때의 분리막 물질 전달 계수는 다음의 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$K_M = \frac{D_M \cdot \epsilon}{\tau_M} \cdot \frac{1}{R_1 \ln(R_2/R_1)} \quad (1)$$

식 (1)에서 D_M 은 분리막의 확산계수, ϵ 는 기공도, δ 는 분리막의 두께, τ_M 은 굴곡도를 나타낸다. R_1 은 분리막의 안쪽의 반경, R_2 는 분리막 바깥쪽까지의 반경이다[6].

2-2. 시스템 지배 방정식

Fig. 2는 중공사막이 여러 개 설치된 중공사막 접촉기의 단면을 나타내고 있다. R_1 은 중공사막의 내부 반지름이고 R_2 은 중공사막의 외부 반지름이다. R_3 를 정의하기 위해서 그림에서와 같이 중공사막 접촉기 안의 중공사막의 외부를 육각형의 단위 셀(cell)로 근사한다. 그리고 그림에서 나타나는 점선으로 표현된 육각형의 단위 셀과 같은 면적을 가지는 임의의 원을 가정하여 그 가상의 반지름을 R_3 로 정한다. 이 R_3 은 중공사막과 중공사막 사이의 거리의 반이 되고, 이 가상의 반지름에서의 유속은 최대값을 가지며 또한 R_3 을 기준으로 대칭이 된다.

SO_2 와 질소의 혼합 기체는 중공사막의 외부(shell side)로 주입되고, 액상의 흡수제는 중공사막의 내부(lumen side)로 주입된다. 중공

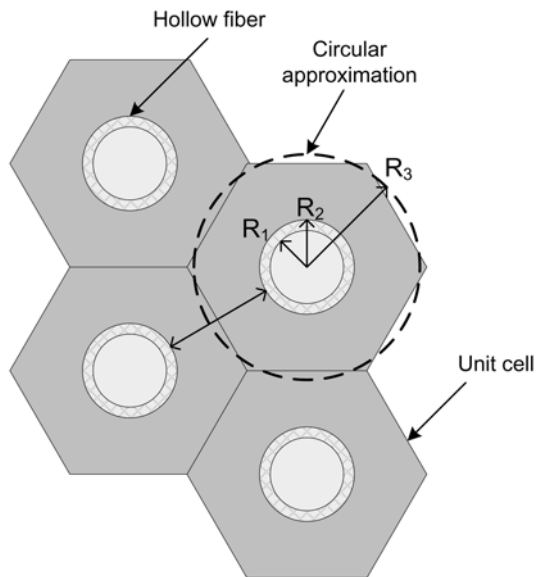


Fig. 2. Hexagonal shaped unit cell of the fiber assembly.

사막 안쪽의 SO₂ 기체와 흡수제와의 반응은 순간 반응(instantaneous reaction)이므로 중공사막의 안쪽의 아황산가스 농도는 무시한다. 중공사막 외부에서 기체의 흐름은 완전 발달된(fully developed) 층류 흐름(laminar flow)으로 가정한다. 각각의 중공사막의 성능은 동일하다고 가정하여 한 개의 중공사막에 대하여 고려한다.

이와 같은 중공사막에서 SO₂ 기체의 농도 변화에 대한 지배 방정식을 세우면, 농도 분포는 반경 방향의 확산(diffusive flow)과 축(axial) 방향에 따른 대류 전달(convective flow)에 의한 다음의 물질 수지 미분관계식으로 표현된다.

$$v_z \frac{\partial C}{\partial z} = D_G \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

여기에서 D_G 는 SO₂의 확산도를 나타낸다. v_z 는 중공사막에 흐르는 기체와 액체의 흐름에 따른 속도 구배를 나타낸다[7-8].

유속분포 v_z 는 중공사막 내부와 중공사막 외부의 유속 분포는 두 가지의 경우로 나누어서 생각할 수 있다.

중공사막의 내부의 유속 분포는 다음과 같은 식 (3)에 의해서 구할 수 있다.

$$v_r = 2 \langle v_r \rangle \left[1 - \left(\frac{r}{R_1} \right)^2 \right] \quad (3)$$

위 식의 R_1 은 중공사막의 내부의 반지름을 의미한다.

중공사막의 외부의 유속의 경우 R_3 을 우선 정의해야 된다. R_3 은 중공사막과 중공사막 사이의 거리의 반이 되고, 이 가상의 반지름에서의 유속은 최대값을 가지며 또한 R_3 을 기준으로 대칭이 된다. 평균속도 $\langle v_g \rangle$ 는 식 (4)과 같다.

$$\langle v_g \rangle = - \frac{\Delta P R_3^2}{4 \mu l (R_3^2 - R_2^2)} \left[3 R_3^2 - \frac{R_2^4}{R_3^2} - 4 R_2^2 + 4 R_3^2 \ln \frac{R_2}{R_3} \right] \quad (4)$$

중공사막 외부의 속도 분포는 평균 속도를 이용하여 식 (5)로 표현할 수 있다[1].

$$v_g = 2 \cdot \langle v_g \rangle \cdot \left[1 - \left(\frac{R_2}{R_3} \right)^2 \right] \cdot \left[\frac{\left(\frac{r}{R_3} \right)^2 - \left(\frac{R_2}{R_3} \right)^2 + 2 \ln \frac{R_2}{R_3}}{3 + \left(\frac{R_2}{R_3} \right)^4 - 4 \left(\frac{R_2}{R_3} \right)^2 + 4 \ln \frac{R_2}{R_3}} \right] \quad (5)$$

2-3. 경계 조건 설정

이 시스템 지배 방정식의 경계 조건(boundary condition)은 다음과 같다.

- 1) $r = R_1$, $0 \leq z \leq L$ 에서 $C = 0$
- 2) $r = R_2$, $0 \leq z \leq L$ 에서 $D_G \frac{\partial C}{\partial r} = -K_M \cdot C$
- 3) $r = R_3$, $0 \leq z \leq L$ 에서 $\frac{\partial C}{\partial r} = 0$
- 4) $z = 0$, $R_2 \leq r \leq R_3$ 에서 $C = C_0$
- 5) $z = L$, $R_2 \leq r \leq R_3$ 에서 $\frac{\partial C}{\partial z} = 0$

첫 번째 경계 조건은 중공사막 내부에서 SO₂는 흡수제와 순간적으로 반응(instantaneous reaction) 한다는 가정에 의한 것이다. 두 번째 경계 조건은 분리막 표면을 통해 기체가 흡수되는 속도를 나타내고 있고, 세 번째 경계 조건은 분리막 중앙에서의 농도의 대칭을 나타낸다. 네 번째 경계 조건은 주입되는 SO₂ 농도를 나타내고, 다섯 번째 경계 조건은 분리막 출구에서의 convective flux를 나타낸다.

2-4. 확산계수 결정

컴퓨터 모사를 위한 기체의 확산계수는 중공사막 외부의 SO₂와 질소의 혼합기체의 확산계수와 중공사막을 투과 하는 기체의 확산계수 두 가지로 나누어 볼 수 있다.

중공사막 접촉기에 주입되는 SO₂와 질소의 혼합 기체 중 SO₂의 확산계수는 Chapman-Enskog 식에 의해서 계산하였다[9].

중공사막의 분리막과 같이 다공성의 기공이 존재할 경우, 기체가 확산될 때 분자량이 작은 성분일수록 확산 속도가 빠르므로 막을 잘 통과하고, 막의 기공이 기체의 평균 자유 행로(mean free path)보다 작으면 기체는 Knudsen 확산에 의해서 독립적으로 확산된다. Knudsen 확산계수는 다음의 식(6)과 같이 정의된다[9].

$$D_K = 9700 \cdot r_{pore} \left(\frac{T}{M_A} \right)^{0.5} \quad (6)$$

여기서 D_K 는 Knudsen 확산계수[cm²/s], r_{pore} 는 분리막 기공의 반지름(cm), T 는 절대온도[K] 그리고 M_A 는 분리막을 통과하는 기체의 분자량[g/mol]을 나타낸다.

Knudsen 확산을 고려하면 중공사막 분리막 안의 확산계수는 다음의 식 (7)과 같이 기체의 확산계수와 Knudsen 확산계수의 관계식으로 정의된다[7, 9].

$$\frac{1}{D_M} = \frac{1}{D_{AB}} + \frac{1}{D_K} \quad (7)$$

여기에서 D_{M^*} 는 중공사막 분리막 안 기체의 확산계수[cm²/s], D_{AB} 는 Chapman-Enskog 식에 의해서 계산된 기상의 확산계수[cm²/s]를 의미하고 D_K 는 Knudsen 확산계수[cm²/s]를 나타낸다.

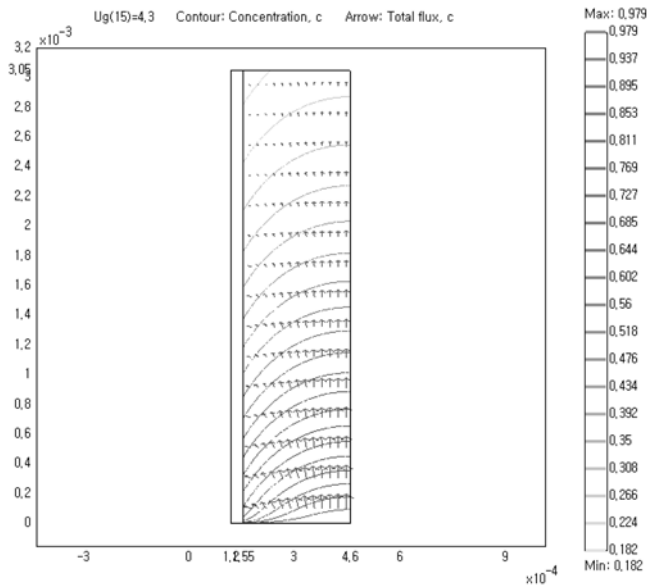


Fig. 3. Concentration contour and total flux profiles in hollow membrane shell side ($K_M = 0.0345$ m/s, $v_g = 4.3$ m/s).

3. 결과 및 고찰

COMSOL사의 FEMLAB[10]을 통해 해석된 중공사막 접촉기를 통해 제거되는 SO_2 거동은 기체의 유속, 분리막의 물질 전달 계수 등의 여러 가지 조건에 따라서 다른 양상을 보이고, 이 조건들에 따른 SO_2 농도 변화를 고찰하였다.

3-1. 아황산가스 농도 변화

축대칭의 이차원 면으로 모사된 중공사막에서의 SO_2 농도 등고선 그래프(contour plot)와 전체 흐름(total flux)을 Fig. 3에 도시하였다. 기체의 유속 $v_g = 4.3$ m/s로 설정하고 분리막의 물질 전달 계수 $K_M = 0.0345$ m/s 일 경우의 중공사막 외부의 SO_2 농도를 나타내고 있다. 사각형의 왼쪽 면은 중공사막의 바깥쪽 면(R_2)을 나타내고 오른쪽 면은 중공사막 들과의 중간지점인 앞서 설정한 가상의 반지름(R_3)을 나타낸다. 그래프 왼쪽의 범례는 SO_2 의 무차원(non-dimensional) 농도를 나타낸다.

아래쪽에서 주입된 SO_2 가 왼쪽 면의 분리막을 통해서 확산되어 중공사막의 내부로 기체가 전달되고 흡수체와의 반응에 의해서 제거되게 된다. 따라서 기체가 출구 쪽으로 진행됨에 따라 기체의 농도가 낮아짐을 볼 수 있다. 또한 중공사막의 같은 높이에서 왼쪽 면이 오른쪽 면보다 SO_2 농도가 낮은 것을 볼 수 있는데 이는 중공사막의 외부의 SO_2 농도차에 따른 확산에 의해서 중공사막 내부로 전달되어짐을 보여준다. Fig. 4는 중공사막의 출구에서 중공사막과 중공사막의 사이에서의 농도 구배를 기체의 유속에 따라서 나타낸 것으로 보여주고 있다. 기체의 유속이 커짐에 따라서 SO_2 농도 차에 의해서 양쪽의 분리막으로 전달되는 농도 구배가 큼을 보여주고 있다.

3-2. 분리막 물질 전달 계수에 따른 SO_2 제거율

에너지기술연구소에서 실험한 분리막을 통한 SO_2 제거율 실험 데이터에 대해 분리막의 물질 전달 계수(K_M)를 추정하였고 기체 유속에 따른 제거율 변화를 관찰하였다. 실험에 사용한 중공사막의 물

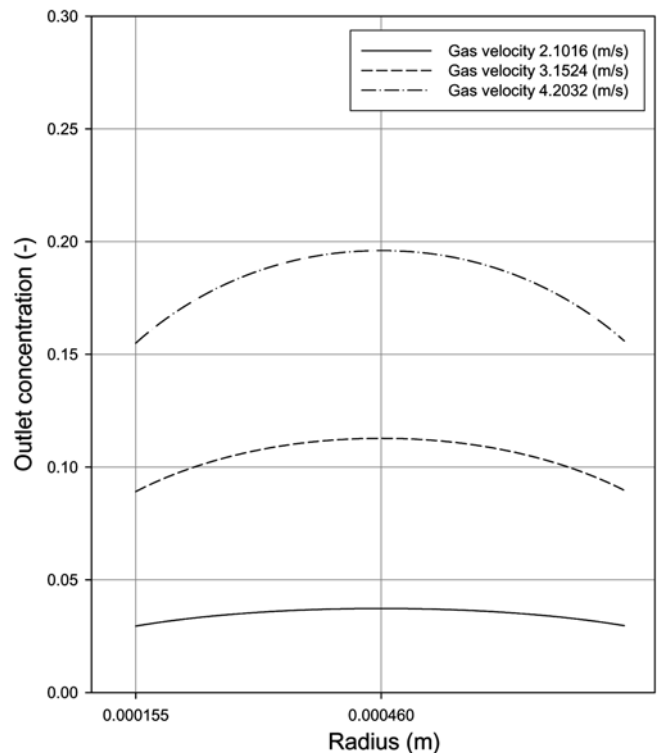


Fig. 4. Outlet concentration profile with gas velocity ($K_M = 0.0345$ m/s).

Table 1. Specification of the hollow fiber membranes

Properties		Philos 08-200	Cel 03-200
Module	Diameter (m)	0.01	0.01
	Length (m)	0.15	0.15
	Volumes (cm^3)	11.8	11.8
Fiber	Material	Polypropylene	Polypropylene
	I.D (μm)	240	240
	O.D (μm)	310	300
	Pore size (μm)	0.1	0.003
	Porosity (%)	-	30
	Packing density	0.19	0.180
	Number of fiber	200	200

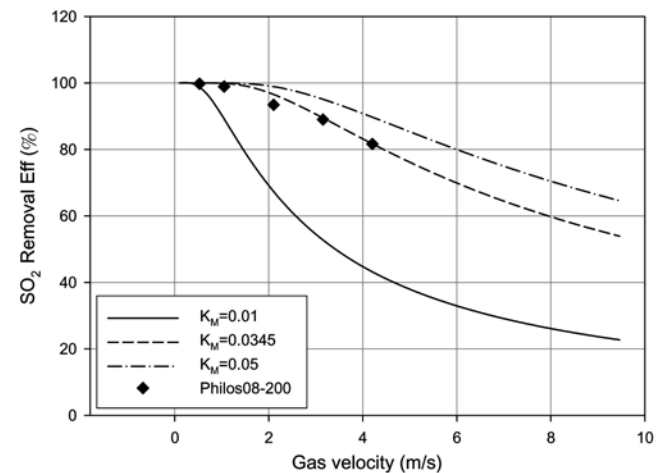


Fig. 5. Experimental (Philos08-200) & calculated results of SO_2 removal efficiency.

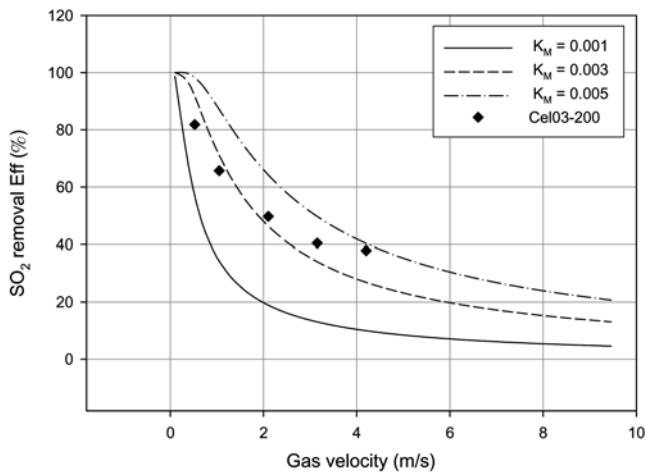


Fig. 6. Experimental (cel03-200) & calculated results of SO₂ removal efficiency.

리적 특성은 Table 1에 나타내었다[11]. Philos08-200은 Philos사의 Philosep 제품이고 200개의 중공사막이 들어있는 접촉기이고, Cel03-200은 Celgard사의 Liqui-cel 제품이 200가닥 들어있는 접촉기이다.

Fig. 5와 Fig. 6은 분리막 물질 전달 계수의 변화에 따른 SO₂ 제거 효율을 나타낸다. 기체 유속의 증가에 따른 SO₂ 제거 효율은 유속이 증가함에 따라서 제거율이 작아짐을 알 수 있다. 또한 각각의 K_M 에 따라서 SO₂ 제거율의 변화가 각기 다른 양상을 보인다. 즉 K_M 이 큰 값을 가질수록 제거율이 크고, 기체 평균 유속이 커짐에 따른 제거율의 변화폭이 작음을 보여 주고 있다. 이를 통해서 K_M 이 커질수록 아황산가스의 제거에 대한 기체 유속의 영향이 적어짐을 알 수 있다.

Fig. 5에서 점선들은 서로 다른 K_M 값을 이용하여 컴퓨터 모사를 하여 얻은 제거 효율을 도시한 것이다. 심볼 (◆)은 중공사막 접촉기 (Philos08-200)의 실험을 통한 SO₂ 제거율이다. K_M 이 0.0345 m/s에서 실험값과 모사를 통하여 계산한 값이 거의 같음을 알 수 있다. 따라서 이 Philos08-200의 중공사막의 물질 전달 계수 K_M 은 0.0345 m/s에 가깝다는 것을 알 수 있다. K_M 은 본래 분리막의 물리적 특성에 의해서 결정되고, 기공도와 굴곡도를 알 경우에는 수식에 의해서 계산할 수도 있으나 본 연구에서의 중공사막은 이 값을 제공하지 않았기 때문에 실제의 실험값인 SO₂ 제거율과 컴퓨터 모사에서 K_M 값을 변화시키면서 계산된 SO₂ 제거율을 비교하여 매개변수 추정을 하였다.

Fig. 6은 Cel03-200에 대하여 같은 방법으로 실험에서 얻은 SO₂ 제거율과 모사를 통해 얻은 SO₂ 제거율을 비교한 것이다. 모사를 통하여 추정된 K_M 을 0.003 m/s이다. Cel03-200의 경우에는 Philos08-200의 경우에 비해서 같은 유속에서 SO₂ 제거율이 낮고, 실험값과 모사를 통해 얻은 제거율이 많은 차이를 보이고 있다. 이는 K_M 이 비교적 작은 값을 가지는 경우에 제거율이 낮고 기체 유속에 따른 제거율의 변화가 크기 때문이라고 생각된다. Philos08-200에서는 기체유속이 4 m/s까지 20%의 제거율의 변화를 보이고, Cel03-200의 경우에는 약 60% 이상의 제거율의 변화를 보인다.

3-3. 모사를 통한 중공사막의 설계

본 연구의 중공사막의 모사를 통해서 중공사막 접촉기의 설계에 위한 척도를 제시 할 수 있는데, 그것은 Gz와 Sh를 출구 농도에 대

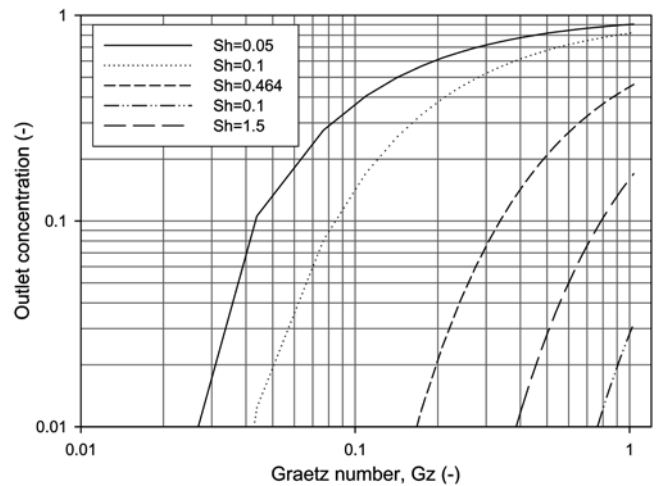


Fig. 7. Simulation results of effects of Graetz and Sherwood number in outlet concentration.

한 Fig. 7을 통해서 알 수 있다.

Fig. 7은 Gz(graetz number)에 따른 출구 농도를 각각의 Sh(herwood number)에 따라서 나타낸 것으로 여기서의 Gz와 Sh는 다음의 관계식에 의해서 계산을 한다.

$$Gz = \frac{v_g \cdot d^2}{D_G \cdot L}$$

$$Sh = \frac{K_M \cdot R}{D_G} \quad (7)$$

위 식에서 v_g 는 기체의 유속[m/s], d 는 중공사막 외부의 직경[m], D_G 는 아황산가스의 확산계수[m²/s], L 은 중공사막의 길이 그리고 R 은 중공사막 외부의 반경[m]이다.

이 그래프는 중공사막 접촉기의 설계의 척도로 사용될 수 있는데 그 방법은 다음의 순서에 의해서 이루어진다.

- 1) 분리막의 물리적 특징(기공 크기, 기공도, 굴곡도, 두께)을 통해서 분리막의 물질 전달 계수, K_M 을 계산하거나 실험을 통해서 K_M 을 측정한다.
- 2) K_M 값을 통해서 Sh를 계산한다.
- 3) Gz-Sh그래프를 이용해서 원하고자 하는 제거율의 기체 농도와 Sh를 연결하여 이에 해당하는 Gz 값을 찾는다.
- 4) Gz 값을 통해서 이미 알고 있는 기체 속도, 중공사막의 직경을 대입하여 적당한 중공사막의 길이를 추정할 수 있고, 이를 통해서 중공사막 접촉기를 설계 하기 위한 정보를 얻을 수 있다

예를 들어 Fig. 7을 이용하여 95%의 SO₂ 제거를 위한 200개의 중공사막을 가진 중공사막 접촉기의 설계를 위한 중공사막의 길이를 계산할 수 있다. K_M 은 Philos08-200과 같은 값인 0.0345 m/s로 가정하고, 계산을 통한 Sh는 0.464이다. SO₂ 제거율은 95% 이므로 SO₂ 농도는 0.05이 되고, Fig. 7에서 이 농도를 Sh와 연결하면 약 0.26의 Gz를 얻을 수 있다. 중공사막의 개수가 200개일 경우 유량을 16 L/min으로 가정한다면 유속은 4.2 m/s가 되고, SO₂ 확산계수가 $2.27 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 이므로 결국 이를 통해서 계산된 중공사막의 길이 L 은 0.265 m이다. 즉, 95% SO₂의 제거율은 위해서 중공사막의 개수가 200개로 할 경우 중공사막의 길이는 약 0.265 m가 되어야 함을 알 수 있다.

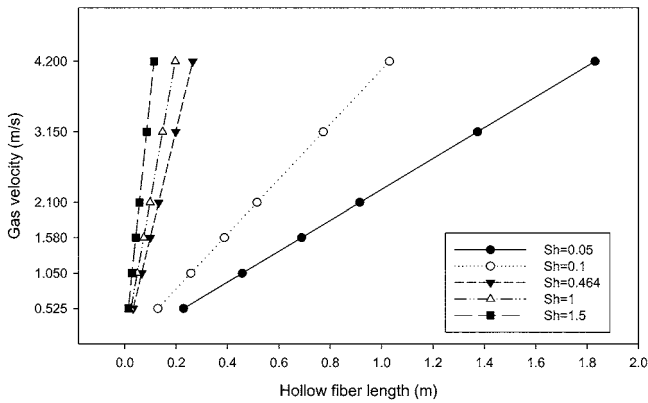


Fig. 8. Hollow fiber lengths of Gas velocity and Sh-number for 95 % SO_2 removal efficiency.

중공사막의 수는 200개 이고 SO_2 제거율이 95%일 때 Sh(0.05, 0.1, 0.0464, 1, 1.5)와 유속(0.525, 1.05, 1.58, 2.1, 3.15, 4.2)에 따른 중공사막 길이의 관계를 그래프로 나타내면 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다.

4. 결 론

중공사막 접촉기를 통한 SO_2 흡수 제거 거동을 고찰하기 위하여 중공사막 외부로 일정한 유속으로 주입되는 SO_2 농도에 대한 지배 방정식을 세우고 유속, 분리막의 물질 전달 계수(K_M) 등의 변수에 따른 SO_2 농도의 거동에 대하여 해석하였다. 실제의 SO_2 제거율 실험값과 모사를 통하여 계산된 제거율과 비교하여 중공사막에 사용되는 분리막의 물질 전달 계수를 추정하였다. 또한 추정된 분리막의 물질 전달 계수를 이용하여 중공사막 접촉기의 제작에 필요한 중공사막의 개수, 길이, 기체 유속 등의 설계 자료를 계산할 수 있는 방법을 제시하였다.

이와 같은 연구를 통하여 중공사막의 분리막 물질 전달 계수를 추정하고, 물질 전달 특성을 분석하여, SO_2 제거에 가장 적합한 중공사막 접촉기를 제작하는 설계 자료를 제공할 수 있다.

사용기호

C	: dimensionless concentration of SO_2 [-]
C_0	: dimensionless initial concentration of SO_2 [-]
d	: inner hollow diameter [m]
D_G	: gas diffusion coefficient [m^2/s]
D_K	: Kundsén diffusion coefficient [cm^2/s]
D_M	: diffusion coefficient of a gas in s membrane pore [cm^2/s]
Gz	: Graetz number ($= v_g d^2 / D_G L$) [-]
K_G	: feed gas mass transfer coefficient [m/s]
K_L	: Liquid absorbent mass transfer coefficient [m/s]
K_M	: membrane mass transfer coefficient [m/s]
L	: membrane length [m]
M	: gas molecular weight [g/mol]
P	: pressure [atm]

r	: radius of hollow fiber [m]
R_1	: inside radius of hollow fiber [m]
R_2	: outside radius of hollow fiber [m]
R_3	: free surface radius of hollow fiber [m]
Sh	: Sherwood number ($= K_M R / D_G$) [-]
T	: temperature [K]
v_g	: gas velocity [m/s]
$\langle v_g \rangle$: average gas velocity [m/s]
z	: axial coordinate on the hollow fiber

그리스 문자

ΔP	: Pressure difference along hollow fiber [atm]
τ_M	: tortuosity of membrane [-]
ε	: porosity of membrane [-]
μ	: viscosity of gas [kg · m/s]

참고문헌

1. Karoor, S., "Gas Absorption Studies in Microporous Hollow Fiber Membrane," Stevens Institute of Technology, Ph.D. Dissertation, Stevens Institute of Technology, USA(1992).
2. Karoor, S. and Sirkar, K. K., "Gas Absorption Studies in Microporous Hollow Fiber Membrane Modules," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **32**(4), 674-684(1993).
3. Zhang, Q. and Cussler, E. L., "Microporous Hollow Fibers for Gas Absorption: I. Mass Transfer in the Liquid," *J. Memb. Sci.*, **23**(3), 321-332(1985).
4. Zhang, Q. and Cussler, E. L., "Microporous Hollow Fibers for Gas Absorption: I. Mass Transfer in Across the Membrane," *J. Memb. Sci.*, **23**(3), 333-345(1985).
5. Kreulen, H., Smolders, C. A., Versteeg, G. F. and Swaaij, W. P. M. van, "Microporous Hollow Fibers Membranes as Gas-liquid Contactors: Part 2. Mass Transfer with Chemical Reaction," *J. Memb. Sci.*, **78**(3), 217-238(1993).
6. Wang, S., Xu, S. and Qin, Y., "Mass Transfer in Membrane Absorption-desorption of Ammonia from Water," *Chinese J. Chem. Eng.*, **1**(3), 160-170(1993).
7. Qin, Y., Joaquim M. S. Cabal and Shichang Wang, "Hollow-fiber gas Membrane Process for Removal of NH_3 from Solution of NH_3 and CO_2 ," *AIChE*, **42**(7), 1945-1956(1996).
8. Li, K., Wang, D., Koe, C. C. and Teo, W. K., "Use of Asymmetric Hollow Fibre Modules for Elimination of H_2S from Gas Streams Via a Membrane Absorption Method," *Chem. Eng. Sci.*, **53**(6), 1111-1119(1998).
9. Warren, L. M., Smith, J. C. and Peter Harriott, *Unit Oper. Chem. Eng.*, 6th Edition, McGraw-Hill(2001).
10. "FEMLAB User's Guide," COMSOLAB(2004).
11. Kim, I. W., Park, H. H., Lim, C. W., Jo, H. D., Song, H. O. and Lee, H. K., "Effect of Membrane Material and Absorbent Type on SO_2 Removal Using Microporous Hollow-fiber Membrane G-L Contactors," *KIGAS*, **10**(2), 14-21(2006).