

소수성 중공사 모듈에 의한 액-액 추출에 관한 연구

김 영 일 · 박 동 원

동아대학교 공과대학 화학공학과
(1995년 7월 31일 접수, 1995년 12월 5일 채택)

A Study on the Liquid-Liquid Extraction by Use of Hydrophobic Hollow Fiber Module

Young-II Kim, Dong-Won Park

Dept. of Chem. Eng. of Dong-A Univ., Pusan 604-714, Korea
(Received July 31, 1995, Accepted December 5, 1995)

요 약 : 미세공의 중공사 모듈을 이용한 액-액추출은 단위부피당 표면적이 크므로 기존 추출장치들에 비해 신속히 진행된다. 모듈내에서 추출제와 원료액은 빠른 속도로 접촉하며 두 흐름이 완전히 독립적이므로 부하나 편류현상이 일어나지 않는다. 본 연구에서는 소수성 중공사 모듈을 사용하여 수용액 중에 미량으로 존재하는 Fe(II)와 Ni(II)을 추출하기 위해 TOA 및 EHPNA를 추출제로 사용하여, 그 추출선택성을 고찰하였다. 또한, 중공사 모듈에서의 율속단계를 결정하기 위해 막 내·외부 유속의 영향을 검토하였다. 이로부터, 소수성 중공사 내에서 분배계수가 큰 계에 대한 추출조작의 경우는 막내부에서의 물질전달과정이 총괄물질전달을 지배함을 확인하였으며, 본 연구를 통한 K_w 와 소수성 중공사 내부유속 v_i 와 상관관계는 $K_w \frac{d}{D} = 6.22 \left(\frac{d^2 v_i}{LD} \right)^{1/3}$ 과 같았다. 반면, 분배계수가 낮은 계의 경우, 세공 내에서의 추출반응이 원활하지 못하기 때문에 막내부 저항의 영향이 막저항의 영향보다 작았다. 따라서, 분배계수가 큰 계에서는 소수성 막을 사용하는 것이 효과적임을 예측할 수 있었다.

Abstract: Liquid-liquid extractions by use of microporous hollow fiber modules are fast compared with conventional extraction equipment because of the large surface area per volume. In these modules, the extractant and feed can be contacted at high speed and two flows are completely independent, so there are no problems with loading and channeling. In this paper, it was investigated the extraction selectivities for liquid-liquid extraction of Fe(II) and Ni(II) from dilute aqueous solution into TOA (tri-n-octylamine) and EHPNA(bis(2-ethylhexyle)hydrogenphosphite) as organic extractants by using the hydrophobic hollow fiber module. To determine the rate controlling step for mass transfer in hollow fibers, we also examined the effect of inside and outside flow rates of the hollow fiber module. From these experiments, we identified for the extraction of system with high partition coefficient in hydrophobic hollow fibers, mass transfer in the inside aqueous feed dominated the overall mass transfer, and in this paper, correlation between K_w and v_i was obtained as $K_w \frac{d}{D} = 6.22 \left(\frac{d^2 v_i}{LD} \right)^{1/3}$. On the other hand, for the system with low partition coefficient, the resistance in the inside of hollow fibers was much less than membrane resistance because the extraction was not simple in the micropore. Thus, for systems with high partition coefficients, hydrophobic hollow fibers would be a better choice.

1. 서 론

수용액 중의 미량 중금속에 대한 분리조작은 여과, 침강, 흡착, 전기투석, 이온교환 등 이미 오래전부터 여러 가지 물리·화학적 방법으로 많은 연구가 시행되어 왔으며, 산업현장에서도 폐수처리나 유가금속의 회수 등에 실제로 다양하게 이용되고 있다. 그러나 이들 대부분이 장치비 및 운전비의 과다소요, 선별분리의 어려움 등 난점을 갖고 있으며, 이에 대한 개선책으로 최근 막을 이용한 분리기술의 연구가 활발히 진행되고 있다. 중공사를 이용한 막분리조작은 표면에 수많은 미세공을 가진 불활성 고분자를 막으로 채택함으로써, 상변화의 동반 없이 목적성분을 선택적으로 분리할 수 있고, 막의 물리적, 화학적 안정성이 크므로 막 내구성 면에서 기존의 액막법[1-3]에 비해 우수하다고 보고되고 있다. 또한, 조작이 간편하고 열변성 물질에 대한 상온조작이 가능할 뿐만 아니라, 특히 단위부피당 표면적이 매우 크므로 물질전달이 기존장치에 비해 수십배 신속히 진행되며 막내·외부의 흐름이 독립적이므로 부하, 편류 등의 현상이 일어나지 않는다[4-6]. 이러한 중공사막을 이용하여 여러 가지 기-액흡수에 관한 연구[7-10]를 비롯하여, 액-액 추출[11], 금속의 분리농축[12, 13] 및 모듈 내에서의 추출에 대한 상관관계식 고찰[14, 15] 등 다수의 연구가 보고된 바 있다.

이에 본 연구에서는 산성추출제인 EHPNA (bis(2-ethylhexyl)hydrogenphosphite)와 염기성 추출제인 TOA (tri-n-octylamine)를 사용하여 수용액 중의 미량으로 존재하는 Fe(II) 및 Ni(II)을 중공사 모듈을 통해 용제추출하여, 각 계의 추출거동과 선택추출능력을 조사하고 소수성 중공사막을 통한 액-액 추출에서의 율속단계를 결정하여 용제추출시 막선택의 기초자료로 제시하고자 하였다.

2. 이론적 배경

본 연구에 있어서 병류흐름에 대한 총괄물질전달계수는 식(1)과 같이 시간변화에 따른 원료 수용액 내의 농도감소비를 시간변화에 대해 도시하여 그 기울기로부터 구할 수 있다[16].

$$\ln \left\{ \frac{C_i \left(1 + \frac{V_t}{HV_s}\right) - C_s \frac{V_t}{HV_s} - \frac{C_s^\circ}{H}}{C_i^\circ - \frac{C_s^\circ}{H}} \right\} = -t \left[\frac{\frac{1}{v_t} + \frac{1}{HV_s}}{\frac{1}{Q_i} + \frac{1}{HQ_s}} \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{4K_w L}{HQ_s + Q_i} \frac{dv_t}{dt} \right) \right\} \right] \quad (1)$$

식(1)에서 K_w , H 는 각각 총괄물질전달계수와 평형에서의 분배계수를 나타내며, 첨자 t , s 는 각각 막내부 수용상과 외부 유기상을 나타낸다.

중공사 모듈에서의 물질전달과정은 (1) 막내부 수용액으로부터 막 내표면까지의 물질전달, (2) 막 세공내에서의 물질전달 및 (3) 막 외표면에서 외부 유기상으로의 물질전달의 세단계로 구분되며, 총괄물질전달계수는 이들 각 단계에서의 개별 물질전달계수의 합으로 표현가능하다. 또한, 모듈 내 물질전달저항은 물질전달계수의 역수로 표현할 수 있으므로 따라서, 총괄저항은 식(2)에서의와 같이 개별물질전달계수의 역수항의 합으로 나타내어진다[17].

$$\frac{1}{K_w} = \frac{1}{k_t} + \frac{1}{k_{mem}} + \frac{1}{k_s \cdot H} \quad (2)$$

식(2)에서 막저항은 다음과 같이 세공내에서의 확산계수와 평형 분배계수 및 막 특성치들로 나타낼 수 있으며,

$$\frac{1}{k_{mem}} = \frac{\delta}{D_{eff} \cdot H} = \frac{\tau \cdot \delta}{D_m \cdot \epsilon \cdot H} \quad (3)$$

k_t 와 k_s 는 식(4)와 같이 무차원수들의 상관관계식으로부터 그 값을 구할 수 있다.

$$\frac{k \cdot d}{D} = (A) \cdot \left(\frac{d \cdot v}{\nu} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{\nu}{D} \right)^\beta \cdot \left(\frac{d}{L} \right)^\gamma \quad (4)$$

여기서, 중공사 모듈의 세단계 물질전달과정 중 율속단계를 추정하기 위해, 먼저 막 내부에서의 물질전달이 전체물질전달을 지배한다고 가정하면, 본 연구조건이 $N_{Re} < 100$ 인 층류이므로 식(4)의 상수들은 식(5)에서의와 같이 나타낼 수 있으며[18],

$$\frac{1}{K_w} = \left(\frac{d}{1.86 \cdot D_i} \right) \cdot \left(\frac{L \cdot D_i}{d^2 \cdot v_t} \right)^{1/3} + \left(\frac{1}{k_{mem}} + \frac{1}{k_s \cdot H} \right) \quad (5)$$

반면 막외부의 물질전달이 전체를 지배한다면 식(6)

으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{K_w} = \left(\frac{d_c}{8.8 \cdot D_s \cdot H} \right) \cdot \left(\frac{L \cdot \nu}{d_c^2 \cdot v_s} \right) \cdot \left(\frac{D_s}{\nu} \right)^{1/3} + \left(\frac{1}{k_t} + \frac{1}{k_{mem}} \right) \quad (6)$$

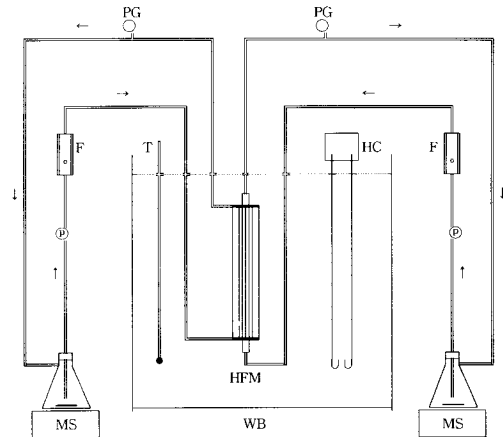
따라서, 식(5)와 식(6)을 이용하여 중공사 내부유속(v_i) 및 외부유속(sheal측 유속, v_s)을 변화시켜 이들이 물질전달계수에 미치는 영향을 분석하면 본 연구에서의 유효단계를 추정할 수가 있다. 이를 위해, 식(2)와 식(5), (6)을 이용하여 각 유속의 역수 변화에 대해 총괄물질전달계수의 역수인 총괄저항을 도시하여 그 영향을 검토하였다.

3. 실험장치 및 방법

Table 1에 그 물성치를 나타낸 소수성 중공사 200가닥을 내경 10cm의 유리용기 내에 25cm 길이로 절단 후 고정시켜 모듈을 제작하고, Fig. 1과 같이 25℃ 항온조에 설치하였다. 추출용질인 중금속은 증류수에 일정농도로 용해시켜 pH를 조절하고 유량계로 적당한 유속을 결정한 후, 미량펌프를 이용하여 중공사 내부로 이송시켰으며, 추출제는 용제로 희석하여 유속 결정 후, 중금속 수용액과 병류로 이송시켰다. 중공사가 소수성이므로 막세공을 통해 수용상으로 추출제가 침투되는 것을 방지하고자 중공사 내·외부에 적당한 압력차를 두어 두 상의 접촉계면을 안정화시켰다. 열교환기와 유사한 방식으로 중공사 세공을 통해 접촉한 원료 수용액과 추출제는 저장용기로 배출된 후 재순환되며, 추출평형에 이르기까지 수용액 저장용기 내의 중금속 잔류농도를 시간별로 취하여 희석 후 원자흡광분광기로 분석하였다.

Table 1. Characteristics of Hollow Fiber for Liquid-Liquid Extraction

Characteristic	Specification
Material	Polyethylene
Inside diameter	200 μ m
Wall thickness	40 μ m
Porosity	55%
Average pore size	0.3 μ m
Property	Hydrophobic



F : Flow Meter	MS : Magnetic Stirrer
P : Peristaltic Pump	PG : Pressure Gauge
T : Thermometer	WB : Water Bath
HC : Heat Controller	HFM : Hollow Fiber Membrane

Fig. 1. Schematic diagram for liquid-liquid extraction apparatus by hollow fiber module.

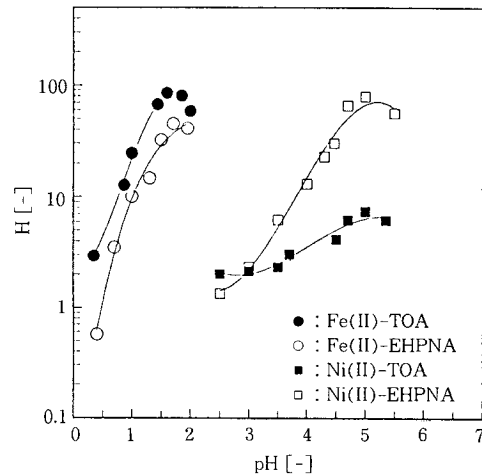


Fig. 2. Effect of pH on partition coefficients for extraction of Fe(II) and Ni(II) into extractants.

4. 결과 및 고찰

4. 1. 분배계수

pH를 조절한 $1.8 \times 10^{-2} \text{ mol/l}$ Fe(II)수용액과 $1.7 \times 10^{-2} \text{ mol/l}$ Ni(II)수용액 각 100ml에 o-xylene으로 희석시킨 $5.0 \times 10^{-2} \text{ mol/l}$ TOA를 가하고, 동일

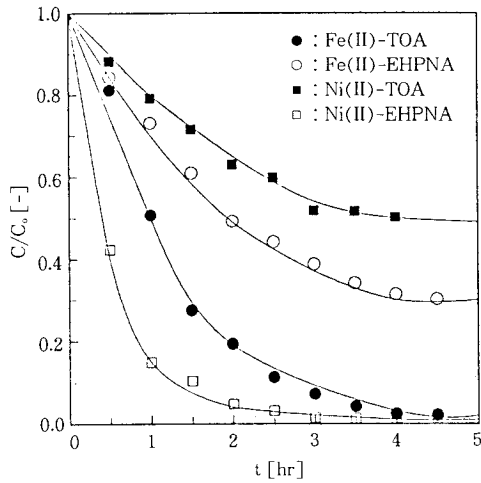


Fig. 3. $\ln(C/C_0)$ vs. time at optimum pH for extraction of Fe(II) and Ni(II) into extractants.

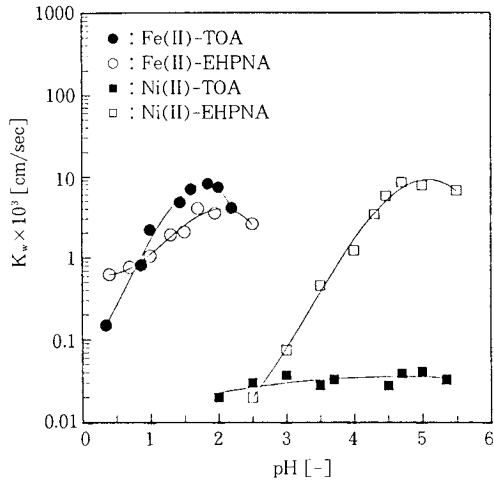


Fig. 4. Effect of pH on overall mass transfer coefficients for extraction of Fe(II) and Ni(II) into extractants.

농도의 수용액 각 100ml에 n-heptane으로 희석시킨 $5.0 \times 10^{-2} \text{ mol/l}$ EHPNA를 가하여, 25°C 로 수시간 충분히 교반시킨 후 평형상태의 수용액층 내의 중금속 잔류농도를 측정하여 각 계에서의 분배계수를 구하였다. 그 결과 Fig. 2에서와 같이 Fe(II)은 pH 1.5~2의 영역에서 TOA 및 EHPNA에 양호하게 분배되었으며, Ni(II)은 pH 4.5~5.5의 영역에서 EHPNA에 높은 분배율을 나타내었으나 TOA에는 거의 분배되지 않았다.

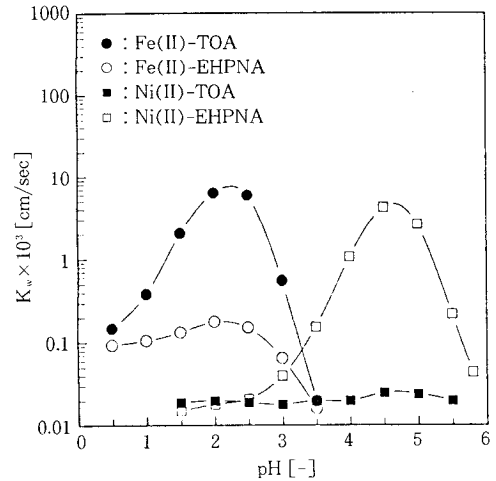


Fig. 5. Overall mass transfer coefficients vs. pH for extraction of Fe(II) and Ni(II) mixture feed solutions.

4. 2. 추출제 선택성

총괄물질전달계수를 통해 추출제들의 선택추출능을 조사하기 위하여, 먼저 한 종류의 중금속에 대해 추출제를 변화시켰을 때의 평형분배율 및 물질전달계수의 결과와, 중금속 혼재시의 결과를 비교·검토하였다. 각 계에 대한 분배특성 결과를 바탕으로 수용액 pH를 동일한 영역으로 조절하여, Fe(II)와 Ni(II)의 농도가 각각 $1.8 \times 10^{-3} \text{ mol/l}$, $1.7 \times 10^{-3} \text{ mol/l}$ 인 중금속 수용액 200ml와 $5.0 \times 10^{-3} \text{ mol/l}$ 의 TOA/o-xylene 및 EHPNA/n-heptane 추출제 200ml에 대해 추출실험을 행하여, 대표적으로 가장 양호한 추출 성능을 보이는 초기 pH에서의, 시간변화에 대한 중금속 잔류농도를 측정하여 Fig. 3에서와 같이 Fe(II)-TOA, Ni(II)-EHPNA계의 경우 2시간 이내에 추출율 80% 이상으로 빠른 추출속도를 보였다. 또한, 이러한 자료들과 분배계수 및 식(1)을 이용하여 총괄물질전달계수를 구하여, pH변화에 따라 도시한 Fig. 4에서는 Fe(II)-TOA, Ni(II)-EHPNA계에서는 분배특성과 유사한 경향을 보이고 있으나 Fe(II)-EHPNA 및 Ni(II)-TOA계의 경우는 분배율의 경향과 다소 상이한 결과를 보였다. 또한 Fig. 5는 Fe(II)와 Ni(II)를 혼재시킨 수용액과 TOA 및 EHPNA에 대한 추출실험의 결과로서 Fe(II)-TOA계와 Ni(II)-EHPNA계의 경우 우수한 경향을 보이고 있으며, 다른 두 계는 상대적으로 저조한 결과를

Table 2. Partition Coefficients and Overall Mass Transfer Coefficients for Each Systems

Metal ions	pH	H		$K_w \times 10^3$		$K_w \times 10^3$ (for mixture)	
		TOA	EHPNA	TOA	EHPNA	TOA	EHPNA
Fe(II)	0.35	2.97	-	0.15	-	-	-
	0.40	-	0.57	-	0.63	-	-
	0.50	-	-	-	-	0.15	0.09
	0.70	-	3.50	-	0.77	-	-
	0.87	12.66	-	0.82	-	-	-
	1.00	24.56	10.02	2.18	1.05	0.39	0.11
	1.30	-	14.68	-	1.91	-	-
	1.44	67.33	-	4.88	-	-	-
	1.50	-	32.14	-	2.06	2.06	0.13
	1.60	85.08	-	7.05	-	-	-
	1.70	-	45.08	-	4.06	-	-
	1.85	80.39	-	8.23	-	-	-
	1.96	-	40.99	-	3.55	6.39	0.18
	2.00	58.94	-	7.42	-	-	-
	2.50	-	-	-	-	5.98	0.15
	3.00	-	-	-	-	0.56	0.07
3.50	-	-	-	-	0.02	0.02	
Ni(II)	1.50	-	-	-	-	0.02	0.02
	2.00	-	-	-	-	0.02	0.02
	2.50	2.02	1.35	0.03	0.02	0.02	0.02
	3.00	2.15	2.35	0.04	0.08	0.02	0.04
	3.50	2.34	6.241	0.03	0.46	0.02	0.15
	3.70	3.07	-	0.03	-	-	-0.04
	4.00	-	13.02	-	1.23	0.02	1.06
	4.30	-	22.83	-	3.44	-	-
	4.47	-	30.08	-	5.82	-	-
	4.50	4.16	-	0.03	-	0.03	4.23
	4.70	6.23	65.66	0.04	8.57	-	-
5.00	7.42	79.33	0.04	7.86	0.02	2.63	
5.35	6.18	-	0.03	-	-	-	
5.50	-	56.18	-	6.77	0.02	0.22	

나타내었다. 또 Table 2에 각 추출제와 단일 중금속에 대한 물질전달계수 및 중금속 혼재시의 물질전달계수를 나타내었으며 전반적으로 분배계수의 증가에 따라 총괄물질전달계수도 증가하고 있으나, 중금속 혼재시의 결과치가 단일 중금속에 대한 것에 비해 낮은 것은, 혼재된 상태에서 중금속들간의 경쟁적인 추출반응과 원료 수용액 내의 전체 중금속 농도증가에 따라 추출제 농도의 상대적인 감소에 그 원인이 있다고 생각되어 진다. 위의 실험으로부터 TOA는 Fe(II)에 대해, EHPNA는 Ni(II)에 대해 각각 양호한 추출능력을 가지고 있으며, 아울러 Fe(II)와 Ni(II)

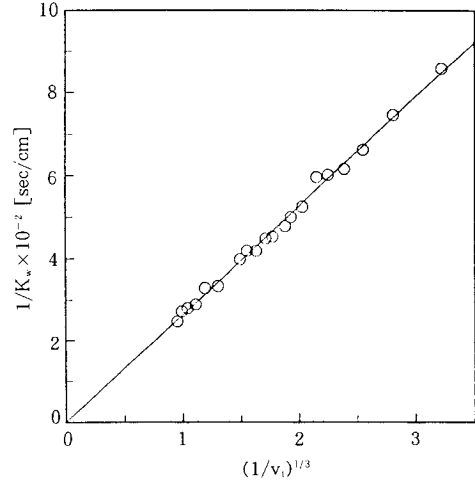


Fig. 6. Effect of inside resistance of hydrophobic hollow fiber on overall resistance for extraction of Ni(II) into EHPNA.

이 혼재된 상태에서의 선택분리는 추출제를 조절함으로써 가능함을 확인할 수 있었다.

4.3 유속의 영향과 율속단계의 결정

소수성 중공사 모듈을 이용한 액-액 추출에 있어서 율속단계를 결정하기 위해, K_w 에 미치는 막 내·외부 유속의 영향을 조사하였다. 분배효과가 뛰어난 Ni(II)-EHPNA계에 대해서, 식(5)로부터 중공사 내부 유속의 변화에 따른 총괄저항을 나타낸 Fig. 6에서는, 직선이 원점을 지나고 있으며 따라서, (막저항 + 막외부저항)의 값이 0으로 되어, 막내부 저항이 총괄저항을 지배한다고 가정했을 때 식(5)에서의 막저항 및 막외부 저항은 무시할 수가 있음을 알 수 있으며, 본 연구에서 총괄물질전달계수와 소수성 중공사 내부 수용액 유속과의 관계는 식(7)과 같다.

$$K_w \frac{d}{D} = 6.22 \left(\frac{d^2 v_i}{LD} \right)^{1/3} \quad (7)$$

또한, 막외부 저항이 지배적이라는 가정하에, 식(6)으로부터 막외부 유속이 총괄저항에 미치는 영향을 Fig. 7에 나타내었으며, 여기서 직선은 식(6)으로부터 산출된 이론치로서, 실험결과가 막외부 저항이 지배적이라는 가정에 크게 벗어남을 알 수 있으며, 총괄저항이 막외부 저항에 거의 무관함을 재확인 할 수 있었다. 따라서, Fig. 6과 Fig. 7로부터 본 연구에

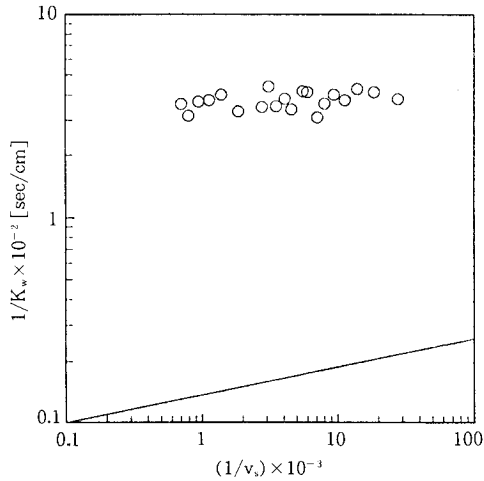


Fig. 7. Effect of outside resistance of hydrophobic hollow fiber on overall resistance for extraction of Ni(II) into EHPNA.

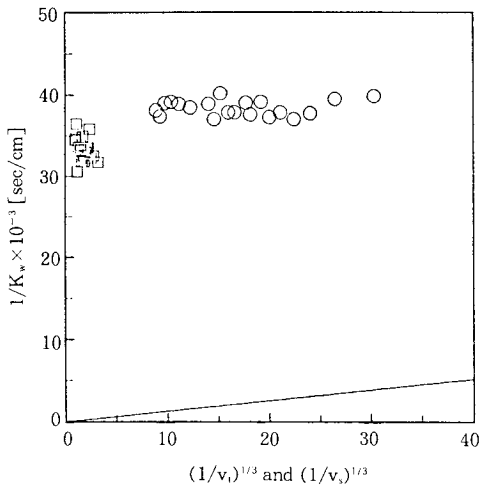


Fig. 8. Overall mass transfer coefficient vs. $(1/v_t)^{1/3}$ and $(1/v_s)^{1/3}$ for extraction of Ni(II) into TOA extractant.

서의 Ni(II)-EHPNA계에 대한 물질전달은 막내부의 물질전달 과정에 지배를 받고 있음을 추측할 수 있다.

한편, 막저항의 영향에 대한 분석으로서 Fig. 8은 아주 낮은 분배율을 나타낸 Ni(II)-TOA계에 대해 막내·외부 유속을 변화시켰을 때 총괄저항에 대한 영향을 나타낸 것으로서, Ni(II)-EHPNA계와는 달리 총괄저항은 막 내·외부 유속에 거의 무관함을 알 수 있으며, Fig. 7에서의 분석과 동일한 방식으로, Ni

Table 3. Overall Mass Transfer Coefficients for Each Systems

(1) Ni(II)-EHPNA

v_t [cm/s]	$(1/v_t)^{1/3}$ [s/cm]	$K_w \times 10^3$ [cm/s]	$v_s \times 10^4$ [cm/s]	$(1/v_s) \times 10^{-3}$ [s/cm]	$K_w \times 10^3$ [cm/s]
0.030	3.22	1.17	0.357	28.01	2.63
0.045	2.81	1.34	0.536	18.66	2.43
0.060	2.55	1.51	0.714	14.01	2.35
0.073	2.39	1.63	0.880	11.36	2.66
0.088	2.25	1.66	1.059	9.44	2.50
0.100	2.15	1.68	1.237	8.08	2.77
0.120	2.03	1.90	1.403	7.13	3.23
0.140	1.93	2.00	1.658	6.03	2.44
0.150	1.88	2.09	1.786	5.60	2.41
0.180	1.77	2.21	2.168	4.61	2.96
0.200	1.71	2.23	2.423	4.13	2.62
0.230	1.63	2.39	2.806	3.56	2.85
0.270	1.55	2.39	3.189	3.14	2.29
0.300	1.49	2.51	3.571	2.80	2.88
0.450	1.30	3.00	5.357	1.87	3.02
0.600	1.19	3.04	7.143	1.40	2.50
0.730	1.11	3.46	8.801	1.14	2.67
0.880	1.04	3.57	10.59	0.95	2.71
1.030	0.99	3.68	12.37	0.80	3.17
1.170	0.95	4.06	14.03	0.71	3.60

(2) Ni(II)-TOA

v_t [cm/s]	$(1/v_t)^{1/3}$ [s/cm]	$K_w \times 10^5$ [cm/s]	$v_s \times 10^4$ [cm/s]	$(1/v_s)^{1/3}$ [s/cm]	$K_w \times 10^3$ [cm/s]
0.030	3.22	3.15	0.357	30.37	2.51
0.045	2.81	3.07	0.536	26.52	2.53
0.060	2.55	3.10	0.714	24.10	2.65
0.073	2.39	2.79	0.880	22.48	2.70
0.088	2.25	2.98	1.059	21.14	2.64
0.100	2.15	2.98	1.237	20.07	2.68
0.120	2.03	3.03	1.403	19.24	2.55
0.140	1.93	3.00	1.658	18.20	2.66
0.150	1.88	3.14	1.786	17.76	2.56
0.180	1.77	3.07	2.168	16.65	2.64
0.200	1.71	2.86	2.423	16.04	2.64
0.230	1.63	3.14	2.806	15.27	2.49
0.270	1.55	3.01	3.189	14.64	2.70
0.300	1.49	2.96	3.571	14.10	2.57
0.450	1.30	2.97	5.357	12.31	2.60
0.600	1.19	3.27	7.143	11.19	2.57
0.730	1.11	2.74	8.801	10.43	2.55
0.880	1.04	2.87	10.59	9.81	2.56
1.030	0.99	2.90	12.37	9.32	2.68
1.170	0.95	2.89	14.03	8.93	2.62

(II)-TOA계의 경우는 막저항 만이 지배적임을 의미하며, Table 3에 막 내·외부 유속변화에 따른 총괄 물질전달계수를 나타내었다.

이는 본 연구에서와 같이 소수성 막을 사용했을 때 막세공이 추출제인 유기상으로 충전되므로 분배효과가 큰 계의 경우 막세공에서의 물질전달은 대단히 신속할 것으로 예측되며, 따라서 막내부에서 내표면까지의 물질전달이 율속단계가 될 것이다. 이에 반해 분배효과가 작은 계에서는 추출제와 용질간의 추출반응이 원활하지 못하므로 비록 막내부에서의 물질전달 과정이 느리다 하더라도 그로 인한 저항은 막세공에서의 전달저항에 비해 상대적으로 무시가능한 정도임을 추정할 수가 있다. 따라서 Fig. 6~Fig. 8과 같은 결과는 두 조건에서의 분배효과와 차이로 볼 수 있으며, 분배효과가 큰 계에 대해서는 추출능이 양호한 추출제와 소수성 막을 사용하는 것이 바람직하며, 이와 반대로 분배효과가 작은 계의 경우는 친수성막을 사용하여 막세공이 중공사 내부 수용액으로 충전되게 하여 세공에서의 확산속도를 증가시킴으로써 총괄물질전달 속도를 최대화할 수 있을 것으로 생각되어진다.

5. 결 론

소수성 중공사를 사용하여 미량 중금속에 대한 액-액 추출실험 및 그 고찰을 통하여 Fe(II)은 TOA에, Ni(II)은 EHPNA에 양호한 분배율 및 추출성능을 보임을 알았으며, Fe(II)와 Ni(II)를 혼재한 상태에서의 추출시 추출제의 선택에 따라 선별분리가 가능함을 알 수 있었다. 또한, 소수성 막을 사용하여, 분배율이 큰 계에 대해 막내부를 수용상, 외부를 유기상으로 각각 이송시킬 경우의 전체물질전달은 막내부에서의 물질전달과정에 지배를 받으며, 이때 막저항과 막외부 저항은 무시할 수 있음을 알았으며, 본 연구에서 총괄물질전달계수와 소수성중공사 내부수용액 유속과의 관계는 $K_w \frac{d}{D} = 6.22 \left(\frac{d^2 v_1}{LD} \right)^{1/3}$ 과 같다.

이와 반대로 분배율이 낮은 계에 대해서는 막세공에서의 물질전달 영향에 비해 막 내·외부의 물질전달 영향은 미약했으며 이는 막세공에서의 추출반응이 용이하지 못하기 때문이라 생각된다.

감 사

본 연구는 1995년도 동아대학교 교내 학술연구조성비 공모과제 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

Nomenclatures

- C_i, C_s : solute concentrations
- C_i^0, C_s^0 : solute concentrations, at $t=0$
- d : fiber diameter
- d_e : equivalent diameter, $4 \times$ (cross section / wetted perimeter)
- D_m, D_u, D_s : diffusion coefficients
- D : effective diffusion coefficient
- H : partition coefficient
- k_i, k_{mem}, k_s : individual mass transfer coefficients, in the inner solution, in the membrane, and in the outer solution, respectively
- K_w : overall mass transfer coefficient
- L : fiber length
- Q_u, Q_s : flow rates
- t : time
- v_i, v_s : velocity
- V_u, V_s : reservoir volumes
- Greek letters
 - α, β, γ : exponents
 - δ : membrane thickness
 - ϵ : porosity of hollow fiber
 - ν : kinematic viscosity
 - τ : tortuosity of hollow fiber pore
- Sub Scripts
 - mem : membrane (pore) of hollow fiber
 - s : outside of hollow fiber
 - t : inside of hollow fiber

참 고 문 헌

1. P. R. Danesi and C. Cianetti, *J. Membrane Sci.*, **20**, 201(1984).
2. N. Tadaaki and R. G. Bautista, *AIChE J.*, **31**,

- 2093(1985).
3. M. Nakano, K. Takahashi, and H. Takeuchi, *J. Chem. Eng. JAPAN*, **20**, 326(1987).
 4. A. Kiani, R. R. Bhave, and K. K. Sirkar, *J. Membrane Sci.*, **20**, 125(1984).
 5. Q. Zhang and E. L. Cussler, *AIChE J.*, **31**, 1548 (1985).
 6. R. Prasad and K. K. Sirkar, *AIChE J.*, **33**, 1057 (1987).
 7. Q. Zhang and E. L. Cussler, *J. Membrane Sci.*, **23**, 321(1985a).
 8. C. Y. Pan, *AIChE J.*, **32**, 2020(1986).
 9. H. Sidhoum, A. Sengupta, and K. K. Sirkar, *AIChE J.*, **34**, 417(1988).
 10. S. Majumdar, A. A. Guha, and K. K. Sirkar, *AIChE J.*, **34**, 1135(1988).
 11. N. A. D'ella, L. Dahuron, and E. L. Cussler, *J. Membrane Sci.*, **29**, 309(1986).
 12. M. Matsumoto, H. Schimauchi, K. Kondo, and F. Nakashio, *Solvent Extraction and Exchange*, **5**, 301(1987).
 13. H. Tanigaki, Y. Hashiguchi, T. Shiode, Y. Mori, and W. Eguchi, *Solvent Extraction and Exchange*, **5**, 305(1987).
 14. M. C. Yang and E. L. Cussler, *AIChE J.*, **32**, 1910(1986).
 15. L. Dahuron and E. L. Cussler, *AIChE J.*, **34**, 130 (1988).
 16. E. L. Cussler, "Diffusion", Cambridge, London, (1984).
 17. R. E. Treybal, "Mass transfer operations", 3rd ed., McGraw-Hill, New York(1980).
 18. E. N. Sieder and G. E. Tate, *Ind. Eng. Chem.*, **28**, 1429(1936).