

## 유동층전극반응기내 물질전달

전해수

고려대학교 공과대학 화공과  
(1984년 8월 18일 접수, 1984년 9월 22일 채택)

## Mass Transfer in Fluidized-Bed Electrode Reactors

Hai-Soo Chun

Dept. of Chem. Eng., Korea University, Seoul 132, Korea

(Received 18 August 1984; accepted 22 September 1984)

### 요 약

산성구리용액으로 전도성입자(구리입자) 그리고 비전도성입자(유리구)를 유동화시키며 음극 고정 측정단자와 자유로이 움직이는 측정단자에 의하여 유동층반응기내 입자-유체간 물질전달속도를 측정하였다. 그 결과:

- 1) 전도성입자 유동층전극반응기에서 물질전달 상관식은

$$j_{M\epsilon} = 0.78 \left( \frac{Re_{\epsilon,p}}{1-\epsilon} \right)^{-0.50} \left( \frac{d_p}{d_H} \right)^{-0.50}$$

이때 실험범위는  $38 < \frac{Re_{\epsilon,p}}{1-\epsilon} < 380$  이었고  $Re_{\epsilon,p}$ 는 입자경을 기준한 Reynolds number이다.

- 2) 비전도성입자 유동층반응기에서 물질전달 상관식은

$$j_{M\epsilon} = 0.71 \left( \frac{Re_{\epsilon,p}}{1-\epsilon} \right)^{-0.41} \left( \frac{d_p}{d_H} \right)^{-0.41}$$

이때 실험범위는  $17 < \frac{Re_{\epsilon,p}}{1-\epsilon} < 210$ 이다.

**Abstract** — Mass transfer rates between particles and electrolyte have been determined by means of the fixed or moving electrodes in the beds of conducting copper particles and of nonconducting glass beads which were fluidized by acidified copper solution. The experiment have been carried out with the variation of bed expansion, particle size, and bed height.

- 1) Mass transfer data with the active fluidized bed of conducting copper particles in the range

$$38 < \frac{Re_{\epsilon,p}}{1-\epsilon} < 380 \text{ were correlated by the equation}$$

$$j_{M\epsilon} = 0.78 \left( \frac{Re_{\epsilon,p}}{1-\epsilon} \right)^{-0.50} \left( \frac{d_p}{d_H} \right)^{-0.50}$$

the Reynolds number ( $Re_{\epsilon,p}$ ) is based on the particle diameter.

- 2) Mass transfer data within the fluidized bed of inert glass particles in the range  $17 < \left( \frac{Re_{\epsilon,p}}{1-\epsilon} \right) < 210$  were correlated by the equation

$$j_{M\epsilon} = 0.71 \left( \frac{Re_{\epsilon,p}}{1-\epsilon} \right)^{-0.41} \left( \frac{d_p}{d_H} \right)^{-0.41}$$

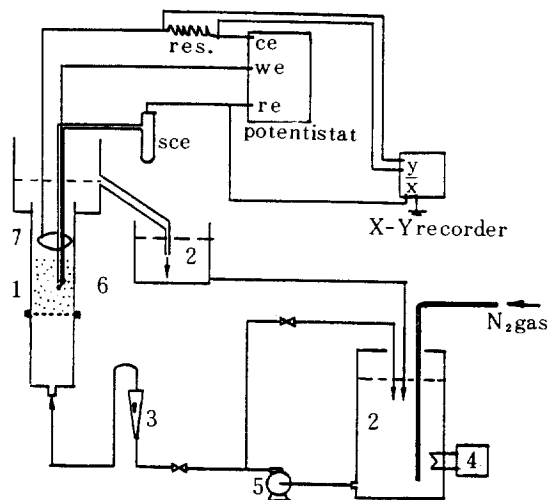
the  $d_H$  is the mean hydraulic diameter.

## 1. 서 론

광석의 산추출액으로 부터 유효금속을 취득하거나 그리고 폐액으로 부터 유효금속의 회수나 공해문제를 해결하기 위하여 회박용액을 처리해야 할 경우가 많다. 이와 같이 유효금속농도가 회박함으로써 인하여 종래의 평면전극 처리로서는 경제적으로 불가능하거나 원하는 저농도까지 전혀 낮출 수 없는 경우가 많다. 그러나 유동층전극반응기는 그 반응비표면적이 월등히 큰 장점을 지니고 있으므로 회박용액을 처리할 수 있을뿐만 아니라 반응속도가 느린 물질(즉 고활성화에너지가 필요한 반응물질)의 전해에도 이용될 수 있어 그 특성 및 이력에 대한 연구가 바람직하다.

Backhurst[1]의 유동층 전극에 대한 기초실험으로 부터 시작하여 Flett[2]의 회박용액 처리가능성실험, Wilkinson & Haines[3]의 대형반응기 운전시도, 반응기의 이론적 연구[4-7], 그리고 Walker & Wragg[25]의 회분식 순환유동층 전극반응기의 이력에 대한 연구가 발표된 바 있다.

유동층전극반응기의 이력을 파악하기 위하여는 먼저 전기화학 반응속도를 알아야 되는데, 이 전기화학반응은 한계전류하에서 조작될 때는 물질전달율속[9] 이므로 물질전달계수만으로 해석이 가능하지만 활성화상태하에서 조작될 때는 정-역반응속도상수를 알든가 전극전위분포를 알아야만 그 해석이 가능하다. 그런데 유동층전극반응기내의 실상을 보면 feeder(유동층에 전류를 공급하기 위해 삽입된 전극)와 유동화입자 사이에는 전하손실이 아주 큰 관계로 feeder에는 한계전류가 공급된다 해도 그로부터 다소 떨어진 영역내의 유동입자는 한계전류에 달하지 못하고 활성화상태에 있게 된다. 즉 한 반응기내에서 물질전달율속상태와 활성화상태가 공존되는 관계로 반응기에 대한 물질수지식해석에 어려움이 따르게 된다. 이와같이 두 상태의 반응이 동시에 병행될때의 관계는 지금까지 규명된 바 없고 물질전달 율속하의 관계마저도 몇편의 연구[8, 10]가 있을 뿐이다. 그런데 이들 자료를 본 연구자의 순환유동층 전극반응기내에 적용하여 보았으나 실측치로부터 다소 벗어나는 실정이다. 따라서 본 연구는 유동층전극 반응기내 물질전달계수 상관식을 얻고자 함이 목적이다.



1: fluidized bed, id 3.9/5.0cm

2: reservoir, 18/27l

3: rotameter

4: heat controller

5: magnetic drive pump

6: working cathode probe

7: anode

res: resistance, 30.6/100 Ohm

ce, we, re: counter, working, & reference electrode

sce: saturated calomel electrode

Fig. 1. Schematic diagram of the fluidized bed.

## 2. 실험

### 2-1. 실험장치

#### 2-1-1. 실험장치 A

유동층반응기는 투명아크릴 원통형(내경 3.9 cm, 길이 20cm)이고, 분산판은 스텐레스망(100mesh)위에 나일론천을 밀착시켜 사용하였고, 그림 1과 같이 전극은 병행류 구조(전류-전해액 흐름방향이 병행)로 배열되었다. 음극은 동선(외경 0.11cm)으로서 끝부분을 반구형(유효 표면적 0.02cm<sup>2</sup>)으로 만들어 반응기내 일정지점에 고정시키고 이것을 feeder 겸 감지단자로 사용하였다. 양극은 나선형으로 감은 동선(외경 0.16cm, 길이 8cm)을 유동층 상단에 위치시켰다. 음극 feeder와 양극과의 간격은 15cm로 일정히 유지시켰다. 용액전위를 측정하기 위한 Luggin모세관은 음극단자옆에 밀착시켜 음극단자와 평행위치(분산판에 대하여)에 놓이도록 하였고 또한 이것은 포화캐로멜전극(SCE)에 연결시켰다. 이들의 연결회로는 그림 1과 같다.

유동화입자는 전도성 구리입자를 체로 쳐서 평균

입자경 0.05, 0.07 및 0.10cm의 것을 각각 사용하였다. X-Y기록계의 횡축에서 전류변화를 측정하기 위한 분류기 저항은 30.6 $\Omega$ 의 것을 사용하였다.

## 2-1-2. 실험장치 B

반응기 배열방법은 실험장치 A와 동일하고, 반응기 내경은 5.0cm, 분산판은 다공성 (평균기공 120  $\mu$ m) Vyon(Porvair사 제품)을 사용하였다. 양극은 나선형의 백금선(외경 0.12cm, 길이 10cm)이고, 음극 겸 feeder는 백금구(외경 0.0775cm, 유효표면적 0.0188cm<sup>2</sup>)를 가는 백금선(외경 0.0080cm, 길이 6cm)으로 용접하여 자유로이 층내를 움직일 수 있도록 제작하였다.(이를 moving probe라 칭함). 이 때 가는 백금선은 Lacomit(Canning사 제품)로 피복시켜 절연시켰고 이의 상세한 제작법은 참고문헌[23]에 설명되어 있다. 이 백금선의 한 끝은 반응기 중심에 고정시킨 지지선(외경 0.15cm 동선)에 연결시켰고 이 지지선은 열 응축성 절연관(R. S. Components사 제품)으로 절연시켰다. 그리고 장치 A와 같이 음극 feeder를 고정

시켜 실험할 때는 백금구를 지지선끝에 잡아매어 원하는 위치에 고정시켰다.

측정장치 연결방법은 장치 A와 동일하고 X-Y기록계(Bryans 25,000)의 횡축에는 100 $\Omega$  저항을 사용하였다. 이 장치에 사용한 유동화 입자는 평균직경 0.0767 및 0.108cm 구리입자와 0.0775 및 0.145cm의 유리구(Jencons 회사 제품)등이다.

## 2-2. 실험조작

### 2-2-1. 장치 A

전해액(2.500ppm Cu+0.1M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 18ℓ를 25  $\pm$  2 $^{\circ}$ C로 유지하며 유동층내 입자를 유동화시키기 위하여 저장조를 통하여 순환시켰다. 유체유속은 층팽창율(20, 30, 40 및 50%)에 따라 조정하였고 유동층고는 4 및 3cm가 되도록 유지하였다. 음극측정단자는 유동층 중앙표면 1cm 밑에 고정시켰다. 그 다음 어느 주어진 유동화조건에서 전류를 공급하여 전류-전압곡선(vs. SCE)을 얻고 이로 부터 해당 한계전류값을 구하였으며

Table 1. Experimental conditions and physical properties of electrolytes.

### Fluidized bed voidages( $\epsilon$ )

bed expansion (%)	diameter of copper particles (mm)										diameter of glass beads (mm)			
	1.0		0.70		0.50		1.08		0.767		0.775		1.45	
	$\epsilon$	$u_s$	$\epsilon$	$u_s$	$\epsilon$	$u_s$	$\epsilon$	$u_s$	$\epsilon$	$u_s$	$\epsilon$	$u_s$	$\epsilon$	$u_s$
17											0.468	1.12	0.474	2.35
20	0.567	6.00	0.538	5.78	0.637	3.55	0.529	6.07	0.541	5.81				
30	0.567	7.55	0.573	6.62	0.611	4.21	0.565	7.58	0.576	5.78	0.522	1.40	0.527	3.01
40	0.598	8.38	0.604	7.38	0.582	4.79	0.596	8.56	0.606	7.48	0.556	1.71	0.561	3.45
50	0.625	9.14	0.630	7.90	0.547	5.78	0.623	9.36	0.633	8.10	0.586	1.98	0.590	3.80
70							0.668	10.7	0.676	8.75	0.634	2.49	0.638	4.81
static bed voidage	0.438		0.445		0.456		0.435		0.449		0.378		0.385	

$u_s$ : superficial fluid velocity, cm/s

### Electrolytes

2.500ppm copper + 0.1M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

density = 1.012 g/cm<sup>3</sup>

viscosity = 0.00927 poise

molecular diffusivity =  $6.73 \times 10^{-6}$  cm<sup>2</sup>/s (for experim. A)

$6.89 \times 10^{-6}$  cm<sup>2</sup>/s (for experim. B)

Schmidt number = 1,359 (for experim. A)

1,345 (for experim. B)

또한 이 값으로 부터 물질전달계수 값을 산출 [9] 해 냈다. 전류-전압곡선을 얻을 때 전압 상승율은 3.3mV/s로 유지하였다. 상세한 사항은 문헌 [25]에 기술되어 있다.

전해액의 점도는 Ostwald점도계를 사용하여 측정하였고 확산계수는 Wragg & Ross [11]식을 이용하였다. 실험자료와 물성치는 표 1과 같다.

### 2-2-2. 장치 B

전해액 농도와 온도는 장치 A와 동일하고, 전해액량은 27ℓ, 그리고 유동층 팽창율은 17, 30, 40, 50 및 70%로 유지하였다. 음극극정단자를 고정시켜 자료를 얻을 경우는 유동층 중앙표면 1 cm 밑에 위치시켰고 moving probe로 자료를 얻을 경우는 지지선 끝(백금선이 연결된 점)이 유동층표면 0.5cm 밑에 오도록 하였고 Luggin모세관은 층표면 2 cm 밑 기벽에 위치시켰다. 기타 조작법은 장치 A와 같다.

## 3. 결과 및 고찰

한계전류하의 전극반응은 물질전달속이 된다. 그러므로 각 실험조건에서 해당되는 전류-전압곡선을 플롯트하고 그로부터 한계전류값을 얻게 되면 물질전달계수 값을 산출할 수 있다. 물질전달계수를 구하기 위한 한계전류기법의 화학공학 응용 [9, 11]에 대해선 많이 기술되어 있다. 참고문헌 [9]에 기술된 방법에 따라 전류-전압곡선에서 수평부분의 기점에 해당되는 전위 값을 택하고 이로부터 분류기 저항값에 의해 한계전류값을 얻었다. 그리고 실험자료들은 주어진 유동층고와 입자크기에서 층팽창율에 따라, 주어진 유동층고와 층팽창율에서 입자크기에 따라, 그리고 전도성입자와 비전도성입자에 따라 각각 10-20개씩을 얻어 분석하였다.

### 3-1. 전도성입자 유동층내 물질전달계수

#### 3-1-1. 고정극정단자로 얻은 결과

실험장치 A에서 음극극정단자를 전도성입자 유동층 중앙(표면으로 부터 1 cm 밑)에 고정시키고 전류-전압곡선을 얻을 경우 한계전류 영역에서는 요동이 나타나는데 이는 음극극정단자에 전도성입자가 접촉되는 순간 그 면적이 넓어지게 되고 따

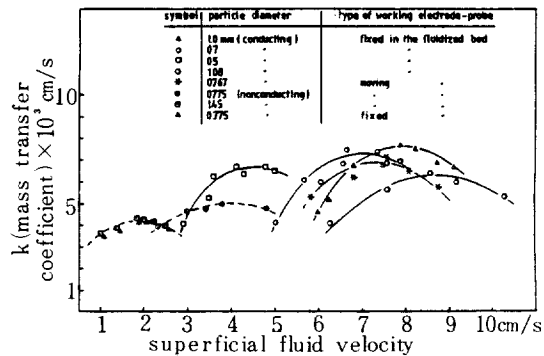


Fig. 2. Plot of mass transfer coefficient vs. superficial fluid velocity.

라서 전류흐름량이 커지기 때문이다. 이 요동은 어느 기준선으로 부터 뒷방향(전류흐름이 커지는 방향)으로 만 나타나게 된다. 본 실험에서는 이 기준선의 기점을 택하여 한계전류값으로 정하였다.

물질전달계수에 대한 유체유속(공탐속도)의 영향은 그림 2에 나타난 바와 같이 입자크기에 따라 서로 구분이 되고 있으며 또 최대점이 각각 나타나고 있다. 이들 자료를 무차원군으로 상관시킨 결과식은 다음과 같다.

$$j_m \epsilon = 0.74 \left( \frac{R_{e,p}}{1-\epsilon} \right)^{-0.49} \left( \frac{d_p}{d_H} \right)^{-0.49} \quad (1)$$

이때 상관계수(correlation coefficient) 값은 0.82 이다. 여기서

$$j_m = \frac{k}{u_t} S_c^{\frac{2}{3}} = \frac{k \epsilon}{u_s S_c^{\frac{2}{3}}}, \quad \frac{R_{e,p}}{1-\epsilon} = \frac{d_H u_t}{\nu} = \frac{d_p u_s}{(1-\epsilon) \nu}$$

mean hydraulic diameter( $d_H$ )와 interstitial fluid velocity( $u_t$ )를 기준으로 표시한 modified Reynolds number (그 범위는 38-270) 이고,  $d_p$ 는 입자직경,  $\epsilon$ 는 유동층 다공율이다. 이 관계를 플롯트한 그림 3에서 보는 바와같이 자료들이 다소 분산되는 경향이 나타난다. 특히 입자크기에 따라 최대점을 가지는 곡선들로 분별되고 있다. 이러한 최대점이 입자크기별로 또는 층팽창율별로 나타나기 때문에 총괄적인 플롯트에서 자료들이 다소 분산되고 있다. 이와같이 자료들의 분산은 일반유동층내 물질전달에 관한 Upadhyath & Tripathi의 결과 [13]나 또 전도성입자 유동층전극반응기에 대한 Walker & Wragg [8]의 결과에서도 모두 나타나고 있다.

유동층반응기에서 물질전달속도의 최대치가 나타나는 이유는 유체유속이 증가하게 되면 물질

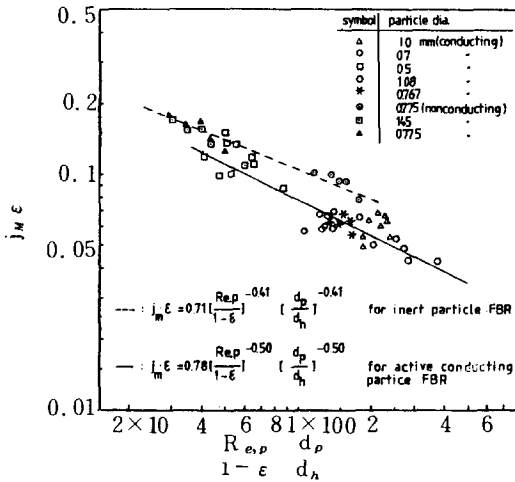


Fig. 3. Plot of  $j_M \epsilon$  vs.  $\left(\frac{R_{e,p}}{1-\epsilon}\right)^{0.41} \left(\frac{d_p}{d_h}\right)^{-0.50}$

전달속도는 증가하나 층단위체적당 입자수는 감소되기 때문이다. 그래서 어느 유체유속까지는 물질전달속도가 증가하다가 입자농도가 희박해지면 오히려 감소하게 되는 것이다. 이러한 현상은 유동층 열전달에서도 나타나며 이것은 Analogy 응용 [14]으로 설명이 가능한 것이다.

본 실험조건에서 최대물질전달속도를 주는 최적층다공율 ( $\epsilon_{opt}$ )은 0.59-0.62사이에 나타나고 있다. 이 값은 일반 유동층내 물질전달에 대한 값,  $\epsilon_{opt}=0.60 \pm 0.05$  [15]에 접근되고 있으며, 그리고 식(1)에 Richardson & Zaki 관계식 [16]을 대입하고  $\epsilon$ 로 미분하여 최적치 계산결과도 대략 이 범위에 들게 된다. 또한 본 실험기법인 한계전류법이 아니고 반응기 입출구의 농도차에 의한 방법으로 얻은 결과 [17]도  $\epsilon_{opt}=0.60$  값으로 나타났다.

식(1)을 일반유동층내 물질전달 상관식과 비교하기 위하여 다음 형태로도 표시된다.

$$j_M \epsilon = f(\epsilon) \left( \frac{u_s d_p}{(1-\epsilon) \nu} \right)^{-0.41} \quad (2)$$

$$f(\epsilon) = 0.74 \epsilon^{0.41}$$

이 식 형태로 표시한 Thones [15, 18]의 결과  $f(\epsilon) = 0.66 \epsilon^{0.5}$ 과 비교해 보면 본 실험결과가 약 12% (본 실험범위 내 평균 층다공율 0.58에서 비교된 것임) 크게 나타나고 있다.

그런데 지금까지 전도성입자 유동층전극반응기에 대한 물질전달 상관식은 모두  $j_M = \left( \frac{k}{u_s} S_c^{\frac{2}{3}} \right) =$

$a \left( \frac{R_{e,p}}{1-\epsilon} \right)^{-b}$ 의 형태로 발표 [8, 10]되었다. 즉  $j_M$ -factor 항은 공탑유속 ( $u_s$ )을 기준한 반면 Reynolds number 항은 interstitial velocity ( $u_i$ )를 기준하여 표시된 식이므로 바람직한 표현법이 아니다. 그러나 이미 발표된 관계식과 본 실험결과를 비교하기 위하여 이러한 형태로 표시하면 다음과 같이 된다.

$$j_M = 1.07 \left( \frac{R_{e,p}}{1-\epsilon} \right)^{-0.46} \quad (3)$$

이 때 상관계수 값은 0.80으로서 식(1) 또는 (2)의 형태로 표시하는 것보다 자료들이 더 분산되고 있다. 즉 반응입자 유동층제에 대해서는 입자직경을 기준하여  $R_e$ 를 표시함이 더 바람직함을 알 수 있다 [19]. 이미 발표된 결과와 식(3)을 표 2 및 그림 4에 비교하였다. 이 표에서 보는 바와같이 타 연구자들의 실험범위가  $2.6 < \frac{R_{e,p}}{1-\epsilon} < 30$ 인 반면 본 실험범위는 이보다 훨씬 큰  $38 < \frac{R_{e,p}}{1-\epsilon} < 270$ 이었다. 이같은 실험범위가 서로 다른 관계로 그 비교가 다소 어려우나 Walker & Wragg의 식을 본 실험범위까지 확장 적용하여 비교해 보면 본 실험결과에

Table 2. Typical experimental results of mass transfer correlations;  $j_M = a \left( \frac{R_{e,p}}{1-\epsilon} \right)^b$ .

Authors	curve	a	b	range of $\frac{R_{e,p}}{1-\epsilon}$	remarks
Picket [10]	1 on Fig. 4	1.52	0.50	3.5-20	conducting particle bed
Walker & Wragg [8]	2	1.55	0.49	2.6-30	
Chu et al. [24]	3	1.77	0.44	>30	
		5.7	0.78	<30	
Present work	4	1.13	0.47	38-380	
Smith & King [22]	(i)	0.32	0.38	0.7-1067	inert particle bed
Coeurt et al. [20]	(ii)	1.20	0.52	6-200	
Walker & Wragg [8]	(iii)	1.24	0.57	0.1-70	
Carbin & Gabe [19]	(iv)	0.60	0.39	0.94-67	
Present work	(v)	1.27	0.42	17-210	

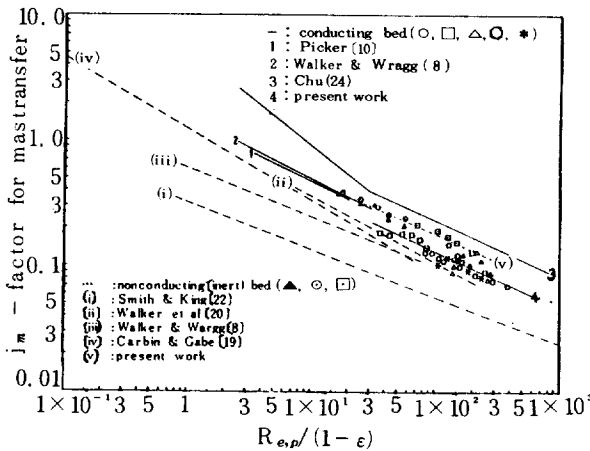


Fig. 4. Plot of  $j_M$  - factor vs. modified Reynolds number.

의한  $j_M$  값이 약 20% ( $\frac{R_{e,p}}{1-\epsilon}=260$ 에서 비교된 것임) 낮게 나타난다. 이 이유는 사용한 실험계의 차이에 따른 것으로 본다.

그리고 층고를 3 cm와 4 cm로 유지하며 각각 실험한 결과 층고에 따른 영향은 나타나지 않았다.

### 3-1-2. Moving probe로 얻은 결과

실험장치에서 음극측정단자가 층내를 움직이는 조건에서 전류-전압곡선을 작성할 때 명확한 한계전류값을 찾기에 다소 어려움이 있었으나, 같은 조건에서 20회 이상 반복하여 자료를 얻었다. 이의 결과는 다음과 같다.

$$j_M \epsilon = 0.59 \left( \frac{R_{e,p}}{1-\epsilon} \right)^{-0.48} \left( \frac{d_p}{d_H} \right)^{-0.48} \quad (4)$$

이때 상관계수는 0.87이고 실험범위는  $100 < \frac{R_{e,p}}{1-\epsilon} < 380$ 이었다. 고정측정단자를 이용하여 얻은 식(1)과 비교해 보면 moving probe를 이용한 경우가 약간 낮은  $j_M$  값을 나타내고 있다. 이는 moving probe가 유체의 평균유속보다 좀 낮은 기벽이나 어느 사영역(dead zone)에 때로 머물게 됨으로서, 이 측정단자로 측정된 자료의 평균치가 고정 측정단자(층 중심부에 위치된)에 의한 값보다 좀 낮은 것으로 생각된다.

### 3-1-3. 고정측정단자와 moving probe로 얻은 자료의 종합 결과

고정측정단자로 얻은 자료와 moving probe로 얻은 자료를 모두 총괄하여  $j_M$ -factor 형태로 표시하면 다음과 같다.

$$j_M \epsilon = 0.78 \left( \frac{R_{e,p}}{1-\epsilon} \right)^{-0.50} \left( \frac{d_p}{d_H} \right)^{-0.50} \quad (5)$$

이 때 상관계수는 0.86이다. 이 식을 얻은 실험범위는  $38 < \frac{R_{e,p}}{1-\epsilon} < 380$ 이다. 측정단자별로 얻은 식(1)과(4)보다  $R_e$ 의 멱수 값이 약간 증가된 결과를 보인다. 다른 연구자의 결과와 비교하기 위하여 식(3) 형태로 표시하면

$$j_M = 1.13 \left( \frac{R_{e,p}}{1-\epsilon} \right)^{-0.47} \quad (6)$$

이 때 상관계수는 0.85이다. 이 결과는 앞 절(가)에서 설명된 바와 같이 Walker & Wragg [8] 그리고 Picket [10]의 결과보다 약간 작으나 그 실험범위가 서로 달라 그 비교가 어렵다. 이는 일반유동층에 대한 Chu [24]의 결과에서 판별할 수 있다. Chu의 결과를 보면  $\frac{R_{e,p}}{1-\epsilon} > 30$ 에서는  $j_M$ 이  $\frac{R_{e,p}}{1-\epsilon}$ 의 -0.78승에 비례하고,  $\frac{R_{e,p}}{1-\epsilon} < 30$ 에서는 -0.44승에 비례한다. 따라서 이것과 비교해보면 Walker & Wragg [8]나 Picket [10]의 실험범위가  $\frac{R_{e,p}}{1-\epsilon} < 30$  이하이므로 본 실험결과와 비교하기 어려운 영역임을 알 수 있다.

### 3-2. 비 전도성입자 유동층내 물질전달계수

비 전도성 유리구를 유동화시키며 전류-전압곡선을 프롯트 할 경우 전도성입자의 경우에 비하여 큰 요동없이 비교적 쉽게 얻을 수 있었다.

#### 3-2-1. 고정측정단자로 얻은 결과

실험장치 B에서 고정측정단자로 측정된 물질전달계수를  $j_M$ -factor로 표시하면 다음과 같다.

$$j_M \epsilon = 0.71 \left( \frac{R_{e,p}}{1-\epsilon} \right)^{-0.41} \left( \frac{d_p}{d_H} \right)^{-0.41} \quad (7)$$

이 때 상관계수는 0.97이고 실험범위는  $17 < \frac{R_{e,p}}{1-\epsilon} < 210$ 이었다. 본 실험과 동일한 방법으로 얻은 Walker & Wragg [8]의 결과는 다음과 같고

$$j_M \epsilon = 0.138 \left( \frac{R_{e,p}}{1-\epsilon} \right)^{-0.38} \left( \frac{d_p}{d_e} \right)^{-0.38}$$

이 결과는 본 실험결과와 거의 같다. 이 식에서  $d_e$ 는 상당직경이다. 본 실험자료를 상당직경 또는 반응기 내경으로 상관시키면 자료들이 더 분산되는

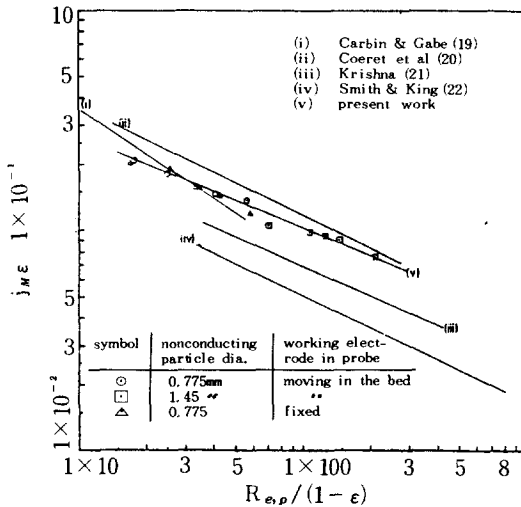


Fig. 5. Plot of  $j_M \epsilon$  vs. modified Reynolds number for the nonconducting particle bed.

경향이 있기때문에  $d_H$  (평균 수력학 직경)을 사용한 것이다.

### 3-2-2. Moving probe로 얻은 결과

실험장치 B에서 비전도성 유리구를 유동화시키며 moving probe를 이용하여 얻은 결과는, 같은 조건에서 고정측정단자로 얻은 식(7)과 동일하고 단지 자료의 분산이 좀 크게(상관계수 0.92) 나타났을 뿐이다. 이 결과는 본 실험과 동일한 moving probe로 실험한 Nassif[23]의 결과;

$$j_M \epsilon = 0.16 \left( \frac{R_{e,p}}{1-\epsilon} \right)^{-0.36} \left( \frac{d_p}{D} \right)^{-0.36}$$

보다  $R_{e,p}$ 의 영향을 더 크게 받고 있다. 그런데 Nassif의 실험은 potassium ferri- and ferro-cyanide 알칼리 용액에서 수행된 것이다.  $j_M$ 값을 비교해 보면 본 실험결과와 약 10% ( $\frac{R_{e,p}}{1-\epsilon} = 17$ 에서 비교된 것임) 크게 나타나고 있다. 뒷에서 D는 사용한 반응기 내경이다.

### 3-2-3. 고정측정단자와 moving probe로 얻은 자료의 종합결과

실험장치 B에서 비전도성 유리구 유동층에서 고정측정단자와 moving probe로 얻은 자료를 모두 총괄하여  $j_M$ -factor로 표시하면 다음과 같다.

$$j_M \epsilon = 0.71 \left( \frac{R_{e,p}}{1-\epsilon} \right)^{-0.41} \left( \frac{d_p}{d_H} \right)^{-0.41} \quad (8)$$

이 때 상관계수는 0.97이다. 이의 실험범위도  $17 <$

$\frac{R_{e,p}}{1-\epsilon} < 210$  이었다.

그리고 본 실험자료를 다음의 형태로 표시하면

$$j_M \epsilon = 0.52 \left( \frac{R_{e,p}}{1-\epsilon} \right)^{-0.38} \quad (9)$$

이때 상관계수는 0.95이다. 이 결과를 타 연구자의 결과와 함께 그림 5에 프롯트하였다. 이 그림에서 보는 바와 같이 본 실험결과는 Carbin [19] 및 Coeret [20]의 결과보다는 약간 낮고, Krishna [21], 및 King & Smith [22]의 결과보다도 약간 낮고, Krishna [21], 및 King & Smith [22]의 결과 보다는 약간 크게 나타나고 있다. 또한 그림 4 및 표 2에 식(3)의 형태로 본 실험자료를 표시하여 비교하였다. 비전도성의  $j_M$  값이 전도성 입자 유동층의 경우보다 약간 크게 나타나고 있다.

## 4. 결 론

유동층전극반응기의 이력을 파악하기 위하여 알아야 할 반응기내 물질전달계수를 구할 목적으로 전도성 입자와 비전도성 입자 유동층계에서 각각 실험을 수행하였다. 그 결과

1) 전도성 구리입자 유동층전극반응기 내에서 층팽창율 (또는 유체유속), 입자크기등을 실험변수로 택하여 얻은 물질전달계수 상관식은 다음과 같다.

$$j_M \epsilon = 0.78 \left( \frac{R_{e,p}}{1-\epsilon} \right)^{-0.50} \left( \frac{d_p}{d_H} \right)^{-0.50}$$

이 때 상관계수는 0.86이고 실험범위는  $38 < \frac{R_{e,p}}{1-\epsilon} < 380$ 이다.

2) 비 전도성 유리구 유동층반응기에서 얻은 물질전달계수 상관식은 다음과 같다.

$$j_M \epsilon = 0.71 \left( \frac{R_{e,p}}{1-\epsilon} \right)^{-0.41} \left( \frac{d_p}{d_H} \right)^{-0.41}$$

이 때 상관계수는 0.97이고 실험범위는  $17 < \frac{R_{e,p}}{1-\epsilon} < 210$ 이다.

## 감 사

본 연구의 일부(장치 A부분)는 한국과학재단 연구비(1981년도) 지원에 의하여 이루어졌습니다. 재단당국에 감사드립니다. 그리고 나머지 일부(장치 B부분)는 University of Newcastle(영국) 화공과 실험실에서 이루어졌습니다. 물심양면으로 지원해주신 Goodridge 교수께 감사드리며 이 실험이 이루어지도록 지원해준 문교부 당국에 감사드립니다.

## NOMENCLATURE

- a, b : constants  
 d : diameter of particle, or mean hydraulic (cm)  
 $\mathcal{D}$  : molecular diffusivity ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )  
 D : diameter of the reactor (cm)  
 $j_m$  : f-factor for mass transfer  
 $(\frac{k}{u_s} S_c^{\frac{2}{3}})$   
 k : mass transfer coefficient (cm/s)  
 $Re_p$  : modified (particle) Reynolds number  
 $(\frac{d_p u_s}{\nu})$   
 $S_c$  : Schmidt number  
 SCE : saturated calomel electrode  
 u : fluid velocity (cm/s)  
 $\rho$  : fluid density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )  
 $\mu$  : fluid viscosity ( $\text{g}/\text{cm.s}$ )  
 $\epsilon$  : bed porosity (—)  
 $\nu$  : kinematic viscosity ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

## Subscripts

- e : equivalent  
 H : hydraulic  
 i : interstitial velocity  
 M : mass transfer  
 opt : optimum  
 p : particle  
 s : superficial velocity

## REFERENCES

- Backhurst, J.R., et al. : J. Electrochem. Soc., **116**, 1600 (1969).
- Flett, D.S. : Chem. & Ind., 16 Dec., 1972, 982.
- Wilkinson, J.H.E. & Haines, K.P. : Trans. Instn. Min. Metallurgy, **81**, 157 (1972).
- Fleischmann, M. & Oldfield, J.W. : J. Electroanal. Chem., **29**, 128 (1971).
- Goodridge, F. et al. : Trans. Instn. Chem. Engrs, **49**, 128 (1971).
- Chun, H.S. & Kang, W.K. : J. KICChE, **19**, 177; 355 (1981).
- Chun, H.S. & Kang, W.K. : Intn. Chem. Eng., **23**, 121 (1983).
- Walker, A.T.S. & Wragg, A.A. : Electrochim. Acta., **25**, 323 (1980).
- Chun, H.S. & Lee, J.K. : J. KICChE, **17**, 217 (1979).
- Picket, D.J. : J. Appl. Electrochem, **5**, 101 (1975).
- Wragg, A.A. & Ross : Electrochem. Acta., **10**, 1093 (1965).
- Berger, F.P. & Ziai, A. : Chem. Eng. Res. Des., **61**, 377 (1983).
- Upadhyaty, S.N. & Tripathi, G. : J. Chem. Engg., **20**, 20 (1975).
- Hutin, D. & Storck, A. : J. Appl. Electrochem., **9**, 351 (1979).
- Davidson, J.F. & Harrison, D. : "Fluidization," Acad. Press, London (1971), pp 441.
- Richardson, J.F. & Zaki, W.N. : Trans. Inst. Chem. Eng, **32**, 35 (1954).
- Chun, H.S. : Report, Korean Science & Eng. Foundation (1984).
- Thones, D. : Ph.D. Thesis, Delft Univ. (1957).
- Carbin, D.C. & Gabe, D.R. : Electrochem. Acta, **19**, 645 (1974).
- Coeuret, F. & Le Goff : ibid., **21**, 195 (1976).
- Krishna, M.S., et al. : Periodica Polytech, **11**, 95 (1967).
- King, D.H. & Smith, J.W. : Can. J. Chem. Eng., **45**, 329 (1967).
- Nassif, D.V. : Ph.D. Thesis, Univ. of Newcastle (1980).
- Chu, J.C. : "Heat and Mass Transfers in FB", Edit. by Othmer (1965).
- Chang, J.H. : M.S. Thesis, Korea University (1981).
- Walker, A.T.S. & Wragg, A.A. : Chem. Eng. Sci., **35**, 405 (1980).