

## 8자 진동교반에 의한 교반조내 유동상태 및 물질전달 특성

이영세<sup>†</sup> · 加藤禎人<sup>\*</sup>

경북대학교 나노소재공학부  
742-711 경북 상주시 가창동 386  
<sup>\*</sup>日本 名古屋工業大學 生命物質工學科  
466-8555 名古屋市 昭和區 御器所町

(2014년 9월 4일 접수, 2014년 12월 10일 수정본 접수, 2014년 12월 21일 채택)

## Characteristics of Flow Pattern and Mass Transfer in a Shaking Vessel with Figure-Eight Circulating Motion

Young Sei Lee<sup>†</sup> and Yoshihito Kato<sup>\*</sup>

School of Nano & Materials Science and Engineering, Kyungpook National University, 386 Gajang-dong, Sangju, Kyungpook 742-711, Korea

<sup>\*</sup>Department of Life and Materials Engineering, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi 466-8555, Japan

(Received 4 September 2014; Received in revised form 10 December 2014; accepted 21 December 2014)

### 요 약

8자 진동교반조에 대해 실험적으로 유동상태를 관찰하여 혼합 가시화, 소요동력, 고-액 및 기-액 물질이동에 대한 여러 가지의 특성을 측정하였다. 진동수가 증가하면 유동상태, 혼합시간 소요동력 및 물질이동계수는 규칙적으로 변하지 않으므로 조작조건의 선정이 중요하다. 어떤 진동수에서라도  $Fr = 0.095$  이상에서는 실험적으로 명확하게 되었다. 이때 교반조내 유체는 선회류형으로 되어 혼합에 적합한 상태가 되고, 8자 진동교반에서의 최적 조작범위는 왕복 진동교반보다도 넓었다. 8자 진동교반과 기존의 선회진동교반내의 고-액간 물질이동계수는 완전히 같은 식으로 상관되었다. 또한 기-액간 물질이동용량계수도 기존의 선회진동교반에서의 식과 같은 형태의 상관식으로 나타났다.

**Abstract** – The flow pattern and the solid-liquid mass transfer coefficient in figure-eight shaking vessels were observed by experimental method. The flow patterns, mixing time, power consumption and mass transfer coefficient in the figure-eight shaking vessels changed irregularly with increase in the shaking frequency. Any frequency, even in the  $Fr = 0.095$  or more became clear experimentally. The region of the optimum operating condition of the figure-eight shaking was larger than that of the reciprocal shaking. The solid-liquid mass transfer coefficient was correlated with the same correlation as that of the rotary shaking vessel of existing. The gas-liquid mass transfer coefficient of the figure-eight shaking vessel was also correlated with the same type of correlation as that of the rotary shaking vessel of existing.

Key words: Mixing, Mass Transfer Coefficient, Figure-Eight Shaking, Agitation

### 1. 서 론

진동교반조작은 생물을 취급하는 실험실에서 스크리닝이나 배양에서 사용되고 있는 조작인데 그 조작조건을 선정할 때 근거가 되는 데이터나 이론은 바이오 분야의 일부 문헌에 나타나 있고 교반기의 조작은 경험적으로 이루어지고 있을 뿐이다. 배양분야의 문헌을 살펴보면 오래전에 Smith와 Johnson[1]의 이론으로 250 rpm의 로타리 교반기를 이용하여 세균을 배양하고 그 수율을 산소흡수속도와 관

련지어 보고했다. Roth 등은[2] 99 rpm의 왕복요동을 박테리아의 배양에 이용하였고 산소흡수속도를 아황산산화법에 의해 측정하였다. 이들의 보고로부터 각종 배양조작에서는 어떻게 산소흡수속도를 증가시킬까를 검토한 예가 많다. 특히 Rhodes와 Garden Jr.[3]나 Auro 등[4]의 논문은 공학적 견지로부터 산소흡수속도를 측정하였다. Garden Jr.[5]는 방해판이 달린 유리제 삼각플라스크를 고안하여 그 성능을 평가했다. 또 일본에서는 입구가 비탈진 바닥이 둥근 플라스크의 목 부분을 수평으로 하여 액류가 비산하여 산소흡수속도를 증가시키도록 하는 플라스크를 고안하였다.

그 후 Hara[6,7]가 로타리 교반기에 부착한 원통형 플라스크 내에 액흐름을 측정하여 이론적 고찰을 하였다. 또한 Brandl 등[8]은 페니실린의 제조에 필요한 곰팡이의 배양에 진동기를 이용하여 일 반 삼각플라스크와 방해판이 달린 플라스크와의 비교 배양을 하였

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

E-mail: ysl@knu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

는데 방해판이 달린 플라스크가 산소흡수속도가 크게 나타났다. Sumino 등[9,10]은 로타리 진동기에 부착한 삼각플라스크의 소요동력을 처음으로 온도법으로 측정하였다. 이때 동시에 벽면의 전열계수도 측정하였고 유리 플라스크를 이용한 경우 기상 측의 전열계수가 지배적으로 나타남을 알았다.

Gardner와 Tatterson[11]은 로타리 진동기에 부착한 비이커 내의 액체 혼합시간을 측정하였다. 그러나 교반조에 이용하는 무차원 혼합시간과 레이놀즈수로 정리를 하는데 데이터의 흐트러짐이 커서 정량적인 데이터를 얻지 못하였다. Fujita 등[12]은 흥미로운 데이터를 보고하였다. 먼저 나타난 Sumino 등[9]이 측정한 동력으로부터 단위체적당 소요동력을 계산하여 교반조 내의 평균전단속도  $G_{\text{값}} (= (P/\mu)0.5)$ 을 산출하여 곰팡이 입자 생성량이 교반조내의 전단응력에 의존하고 있는 것을 처음으로 정량적으로 나타내었다.

Kato 등은 교반소요동력과 혼합시간[13], 기-액간 물질이동용량계수의 상관[14], 고-액간 물질이동계수의 상관[15] 등 선회 진동교반에 관한 연구를 해왔으며 특히 이들의 데이터를 모아 개발한 정류봉[16,17]은 저회전수에서도 교반조내의 유동을 선회류로 바꾸어 혼합이나 입자부유를 개선하였다.

Büchs 등[18-20]도 공학적인 관점으로부터 진동 플라스크에 관한 연구를 하였다. Büchs 등은 교반소요동력의 중요성을 충분히 인식하여 방대한 동력측정을 하여 삼각플라스크에 관한 동력상관식을 제안하였다. 또 Kato와 Tanaka[21]는 플라스크내의 통기성이 우수한 신행 플라스크를 제안하여 양호한 배양 결과를 얻었다.

이와 같은 진동교반에 관한 연구는 이전에 비해서 활발하게 이루어지고 있지만 대부분이 회전교반기에 의한 것으로 왕복 진동교반기나 8자 진동교반기에 관한 것은 없었다. Kato 등[22,23]은 왕복 진동교반기에 대한 여러 가지 검토를 하여 회전 진동교반기와는 전혀 다른 현상에 대해 발표하였다. 왕복 진동조작에서는 저 진동수에서 서서히 진동수를 증가시키면 교반조내에 발생하는 파의 진폭이 크게 되어 혼합시간이 감소하였다. 어떤 진동수에 도달하면 파의 진폭이 폭발적으로 크게 되어 혼합시간이 최소가 되었다. 그 진동수를 넘어가면 교반조내 유체는 회전운동을 하였다.

그러나 이때 교반조내 유체는 선회류의 방향을 불규칙하게 반전시키는 불안정한 거동을 나타내기 때문에 진동수의 증가에 따른 혼합시간은 서서히 증가하는데 어떤 진동수에 도달하면 교반조내의 유체는 안정한 회전운동을 하고 진동수가 증가함에 따라서 선회류는 강하게 되어 혼합시간이 감소되었고 어떤 진동수를 넘으면 선회류는 소실되어 다시 혼합시간은 증가하였다. 교반조내 유체의 운동이 변화하는 기점이 되는 진동수는 Fr 수와 Re 수로 정리할 수 있고 그 진동수는 교반조의 고유 진동수와 밀접한 관계가 있다고 발표하였다.

최근 고체입자의 교반에 대해서 Malik 등[24]은 부채꼴 형태의 용기에 입자를 넣어 왕복운동을 시키면 어떤 진동수의 범위에서는 잘 혼합되는데 그 이외의 진동수에서는 혼합시킬 수 없는 왕복진동기와 매우 닮은 흥미로운 결과를 얻었다.

기-액, 액-액 및 고-액계 간의 혼합의 촉진은 가스의 분산과 입자의 부유분산이 동시에 일어나는 것이라 할 수 있다. 보통의 조건하에서는 입자의 부유화가 달성된 시점에서 가스분산이 충분하게 되므로 완전부유화한계속도가 혼합의 촉진을 주도하게 된다. 많은 생물반응기는 통기하에서 조작되고 있고 그 효율을 결정하는 것은 기포로부터 배양액으로의 산소이동속도, 배양액으로부터 균체 혹은

각종 세포로의 산소나 영양분의 이동속도 및 전단속도에 의해서 결정되어진다. 이러한 혼합의 촉진은 시간,  $Re_d$ 의 변화, 교반소요동력, 흡입 시 동력 및 임펠러간 거리의 변화에 따라 혼합의 촉진이 달라지므로 이에 대한 연구가 더 필요하다.

또한 8자 진동교반에 관한 보고는 거의 없는 실정이므로 본 연구에서는 기존의 회전 진동교반과 왕복 진동교반에 관한 알려진 여러 가지 방법 및 상관식[13,22]을 8자 진동교반에 적용하여 유동상태, 혼합시간 소요동력 및 물질이동계수를 측정하여 보다 고기능성의 진동교반 조작을 목적으로 혼합과정의 가시화에 의한 최적조작조건, 교반소요동력, 고-액간 물질이동계수 및 기-액간 물질이동용량계수에 대해 검토 하였다.

## 2. 실험방법

실험에 이용한 8자 진동교반의 운동 및 조작조건을 Fig. 1 및 Table 1에 나타내었다. 8자 진동교반기는 TAITEC사의 NR-80을 이용하였다. 교반용기는 투명한 아크릴제 평저원통조를 사용하였으며 교반액은 이온교환수 혹은 여러 가지 점도를 가진 CMC 용액 및 글리세린을 이용하였다. 액 높이는 교반조 직경과 같게 하였다.

### 2-1. 혼합과정의 가시화

교반조의 기능을 평가하는 가장 일반적인 지표는 혼합시간의 측정인데 8자 진동교반의 혼합시간은 왕복 진동교반과 마찬가지로 상당히 복잡한 변화를 나타내기 때문에 본 연구에서는 혼합과정의 가시화로 한정하였다. 혼합과정의 가시화는 교반조에서 극히 일반적으로 이용하는 요드와 치오황산나트륨의 반응에 의한 탈색법을 이용하였다.

### 2-2. 교반소요동력

교반소요동력은 교반조내에서 일어나는 현상을 이동현상론 적으로 정리하기 위한 가장 중요한 지표이다. 진동 교반소요동력은 임펠러를 갖춘 교반조의 소요동력과 같이 회전우력으로부터 측정하는 것이

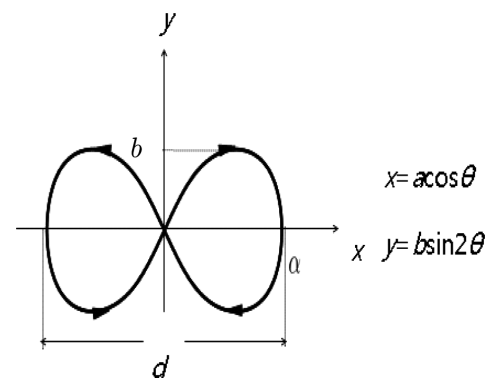


Fig. 1. Figure-eight motion of shaking vessel.

Table 1. Experimental Conditions

D [m]	0.10, 0.12, 0.14, 0.15, 0.17, 0.21
d [m]	0.01, 0.02, 0.03, 0.04
b [m]	0.005, 0.01, 0.015, 0.02
N [s <sup>-1</sup> ]	1.33 ~ 3.33
n [m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	1.01×10 <sup>-5</sup> ~6.31×10 <sup>-4</sup>

불가능하기 때문에 실질 소비동력으로부터 측정했다. 소비동력 측정은 전력측정기(닛치전기 digital power hight test 3183)를 이용하였다. 전력강하의 외란을 최소한으로 억제하기 위해 안정기(YAMABISHI ELECTRIC(주) S-130-15)를 사용하였다.

### 2-3. 고-액간 물질이동계수

진동교반의 적용대상으로서 생물배양을 생각할 수 있는데 본 연구에서는 생물과 배지는 고-액계의 의미를 가진다. 일반적으로 고-액계 교반의 주목적은 입자와 유체간의 물질이동 촉진이고 배양계를 생각해도 세포나 미생물과 배지 사이의 물질이동 속도를 아는 것은 적당한 조작조건의 검토를 위해서도 유용한 지표가 된다.

본 연구에서는 Kato 등[15]의 이온교환법에 의해 물질이동계수를 측정했다. 교반액은 이온교환수를 사용하였으며, 고체입자는 이온교환수지(AMBERLITE® IR-118, 밀도: 1210 kg/m<sup>3</sup>, 입경: 750 mm)를 교반액 중의 고체입자량은 1.0 wt%로 하였다. 교반액 중의 NaOH의 초기농도는 1.0 mol·m<sup>-3</sup>으로 하였다. 이온교환에 의한 전기전도도를 시간에 따른 변화로 측정하여 물질이동계수를 구하였다.

### 2-4. 기-액간 물질이동용량계수

생물배양에서는 용존산소량이 성장속도를 지배하는 주요인인 하나이다. 필요한 용존산소량을 유지하기 위해서는 배양생물의 산소소비 속도를 상회하는 산소공급 속도가 필요하다. 실험은 액 중으로 통기하지 않고 자유표면만을 통하여 공기중으로부터 교반액으로 산소이동에 대한 물질이동용량계수를 측정하였다. 기-액 계면의 물질이동용량계수는 용존산소농도계(DKK사 DOL-10)를 이용하여 측정하였다[15].

교반액은 이온교환수를 이용하였고 실험은 전처리로서 질소를 통기하여 탈산소화하고 교반액중 시간에 따른 용존산소량의 변화를 용존산소농도계로 측정하였다. 데이터 수집 시스템(KEYENCE사 NR-2000)을 이용하여 데이터를 컴퓨터에 저장하였다. 시간에 따른 변화 데이터로부터 물질이동용량계수  $K_{La}$ 를 산출하였다. 셀은 교반조 상부로부터 삽입할 때 흐름에 미치는 영향이 작도록 교반조 벽면 아래로 삽입하여 측정했다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3-1. 혼합과정의 가시화에 의한 최적조작조건

혼합과정의 가시화로 8자 진동교반은 선회진동교반과는 다르고 왕복진동교반에서 일어나는 현상과 매우 유사하였다.

Fig. 2에 8자 진동교반으로 저 진동수에서 서서히 진동수를 높여갈 때 교반조내에 발생하는 유동현상을 나타내었다.

진동수를 증가시키면 교반조내에 진행파가 발생하고 그때 발생하는 파의 모드는 하나이고 점점 파고가 커져 갔다( $N < N_{tr1}$ ).

더욱 진동수를 크게 하여 어떤 진동수에 도달하면 파고가 폭발적으로 크게 되었다( $N = N_{tr1}$ ). 그때 교반조내에는 선회류가 발생하는데 안정하지 않고 좌우에 반대로 회전하고 있는 현상이 생긴다( $N_{tr1} < N < N_{tr2}$ ). 그 진동수를 넘으면 액 표면은 안정화되고 교반조내의 선회류는 안정되었다( $N_{tr2} < N < N_{tr3}$ ). 그리고 어떤 진동수에 도달하면 교반조내의 선회류는 소멸되어 다시 파의 운동으로 되돌아간다. 그러나 이때의 파의 모드는 하나가 아니라 복수로 나타났다( $N_{tr3} < N$ ).

8자 진동에서 교반조내의 유체의 유동이 변화하는 기점이 되는 대

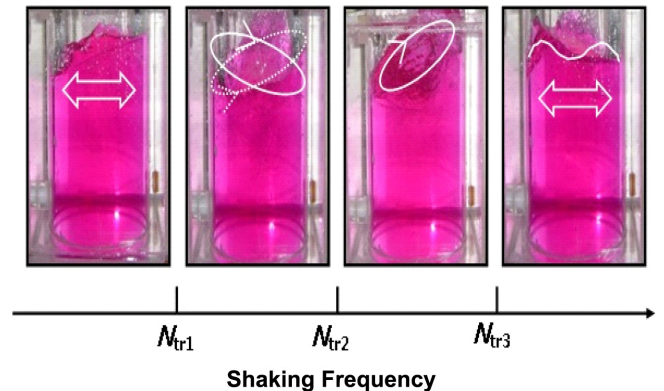


Fig. 2. Behavior of free surface of liquid in shaking vessel with figure-eight motion.

표적인 진동수( $N_{tr1}$ ,  $N_{tr2}$ ,  $N_{tr3}$ )는 각각 식 (1)~(3)으로 나타나는 Re 수( $=Nd^2\rho/\mu$ )와 Fr 수( $=N^2D/g$ )의 함수로 나타낼 수 있다[22]. 여기서 Re의 범위는  $1 < Re < 3000$ 로 하였다. 특히  $N_{tr2}$ 는 Fr 수( $=0.095$ )가 기존의 왕복 진동교반[22]과 같은 결과를 나타내었다. 기존의 왕복 진동교반[22]과 선회 진동교반[13]에서 얻은 상관도 식 (4)~(8)에 나타내었다.

8자 진동교반

$$Fr_{tr1} = 0.095Re^{-0.113} \quad (1)$$

$$Fr_{tr2} = 0.095 \quad (2)$$

$$Fr_{tr3} = 0.095Re^{0.110} \quad (3)$$

왕복 진동교반[22]

$$Fr_{tr1} = 0.095Re^{-0.073} \quad (4)$$

$$Fr_{tr2} = 0.095 \quad (5)$$

$$Fr_{tr3} = 0.095Re^{0.078} \quad (6)$$

선회 진동교반[13]

$$Fr_{max,p} = 0.135(Re_{max,p})^{0.166} \quad (7)$$

$$Fr_c = 0.135(Re_c)^{-0.176} \quad (8)$$

진동교반에서 혼합에 적합한 조건은 선회류가 발생하는 영역이라는 것은 이미 보고되었다[13,22]. 대표적인 유동상태의 사진을 Fig. 3에 나타내었다. 유동상태가 변화하는 진동수의 추산이 가능하므로 선회류가 발생하는 조건식에서 상호의 영역을 선택하면 양호한 액 혼합이 가능하다. 8자 진동교반을 이용하여 양호한 혼합을 얻기 위한 그림을 Fig. 4에 나타내었다.  $Fr_{tr}$  수 = 0.095 이상이 되도록 조작조건을 설정 하면 양호한 액 혼합이 가능하다.

또한 왕복진동교반과 같은 모양으로 8자 진동교반에서도 고점도 영역에서는  $N_{tr1}$ 는 확인되지 않고 진행파로부터 안정한 선회류로 직접 이행하는 현상이 관찰되었다. Re 수가 1 이하의 경우에는 교반조내 유체의 혼합은 한도에 접근해 더 이상 혼합이 곤란하다고 사료된다. 또 8자 진동교반을 이용하여 진폭 b를 변화시켜  $N_{tr1}$ ,  $N_{tr2}$ ,  $N_{tr3}$ 를 관찰한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 현저한 b의 영향은 볼 수 없었지만 왕복진동보다 혼합에 적합한 영역이 넓다는 것을 알았다. 따라서 Fig. 4, 5에 나타난 대로 식 (1), (3)은 8자 진동교반, 식 (4), (6)은 왕복 진동교반에서의 Fr 수와 Re 수의 관계식을 나타낸 바 그림에서

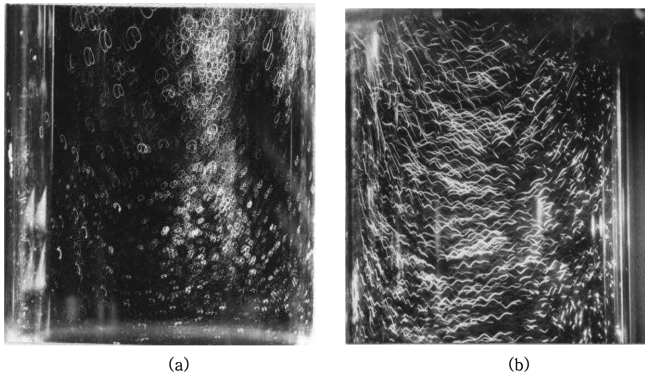


Fig. 3. Photographs of typical flow patterns for shaking vessel ( $D=12$  cm,  $d=4$  cm). (a) Progressive wave type, Figure-eight: ( $N < N_{r1}$  or  $N > N_{r3}$ ), Reciprocal [22]: ( $N < N_{r1}$  or  $N > N_{r3}$ ), Rotary [13]: ( $N < N_c$  or  $N > N_{max,p}$ ), (b) Rotational flow type, Figure-eight: ( $N_{r1} < N < N_{r3}$ ), Reciprocal [22]: ( $N_{r1} < N < N_{r3}$ ), Rotary[13]: ( $N < N_c$  or  $N > N_{max,p}$ ).

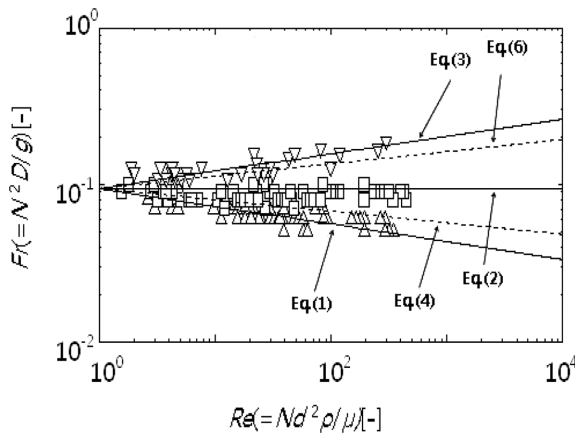


Fig. 4. Region of Re and Fr number for complete mixing of figure-eight shaking vessel ( $N_{r1}$ :  $\triangle$ ,  $N_{r2}$ :  $\square$ ,  $N_{r3}$ :  $\nabla$ , Eq. (4), (6) [22]).

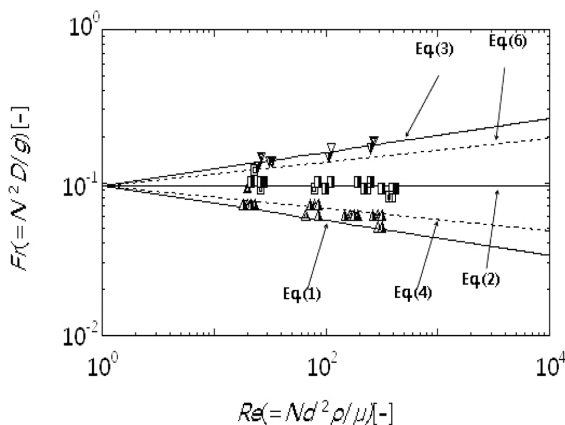


Fig. 5. Effect of shaking width  $b$  on Re-Fr map (Eq. (4), (6) [22]).  $N_{r1}$  ( $b=0.5$  cm):  $\triangle$ ,  $N_{r2}$  ( $b=0.5$  cm):  $\square$ ,  $N_{r3}$  ( $b=0.5$  cm):  $\nabla$ ,  $N_{r1}$  ( $b=1.0$  cm):  $\triangle$ ,  $N_{r2}$  ( $b=1.0$  cm):  $\square$ ,  $N_{r3}$  ( $b=1.0$  cm):  $\nabla$ ,  $N_{r1}$  ( $b=1.5$  cm):  $\triangle$ ,  $N_{r2}$  ( $b=1.5$  cm):  $\square$ ,  $N_{r3}$  ( $b=1.5$  cm):  $\nabla$ .

보듯이 8자 진동교반이 왕복 진동교반보다 혼합에 적합한 범위가 넓음을 알 수 있었다.

교반조내 선회류가 발생하고 있는 조건하에서 선회, 왕복 및 8자

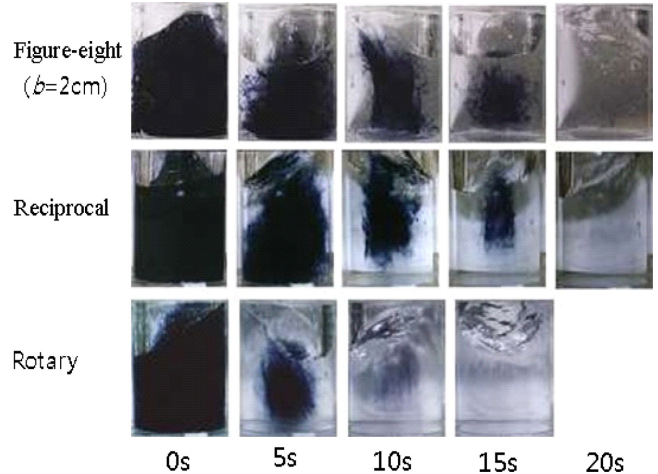


Fig. 6. Photographs of the mixing process ( $D=15$  cm,  $d=2$  cm,  $N=2.57$  s $^{-1}$ ).

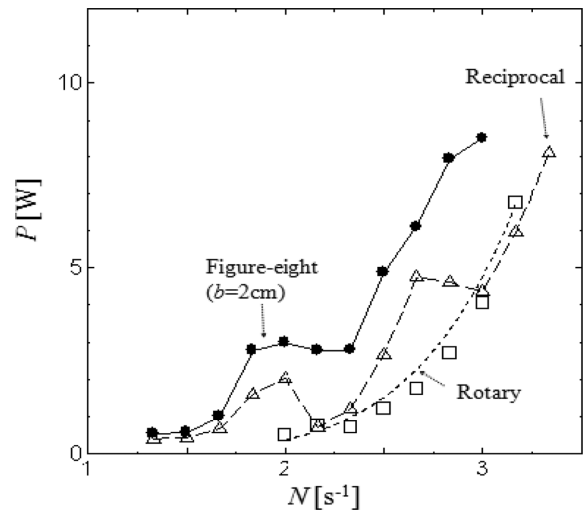


Fig. 7. Effect of shaking frequency on power consumption ( $D=17$  cm,  $d=4$  cm, Reciprocal [22], Rotary [14]).

진동교반을 이용하여 탈색법에 의한 혼합과정을 관찰하여 촬영한 사진을 Fig. 6에 나타내었다. 진동수  $N$ 은  $2.57$  s $^{-1}$  일 때 교반조내의 유동상태는 선회류로 안정하였다. 선회, 왕복 및 8자 진동교반 모두 청자색은 선회류에 의해 교반조 벽면으로부터 사라져가 약 20초에서 혼합이 완결되었다.

### 3-2. 교반소요동력

Fig. 7에 동일한 조건에서 8자 진동교반, 왕복 진동교반, 선회 진동교반의 교반소요동력을 나타내었다. 선회 진동교반에서는 진동수의 증가에 따라 소요동력은 단조롭게 증가하는데 8자 진동교반과 왕복 진동교반에서는 교반조내의 유동상태가 매우 격렬하기 때문에 선회 진동교반의 거동과는 상당히 다른 결과를 나타내었다. 또한 8자 진동교반에서는 모터를 2개 이용하고 있기 때문에 동일 진동수에 대하여 다른 방식과 비교하여 조작조건에 따라 흐트러짐이 있지만 약 2배의 동력을 나타내고 있음을 알았다.

### 3-3. 고-액간 물질이동계수

고-액간 물질이동계수를 측정한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 진



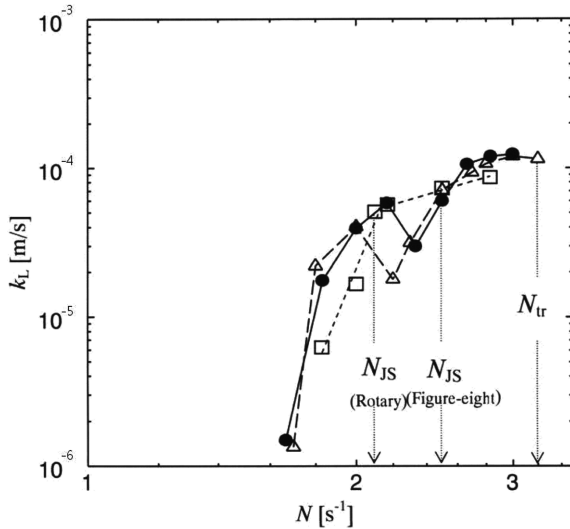


Fig. 8. Effect of shaking frequency on solid-liquid mass transfer coefficient ( $D=17$  cm,  $d=4$  cm). Figure-eight ( $b=2.0$  cm); ●, Reciprocal [22]; △, Rotary [14]; □.

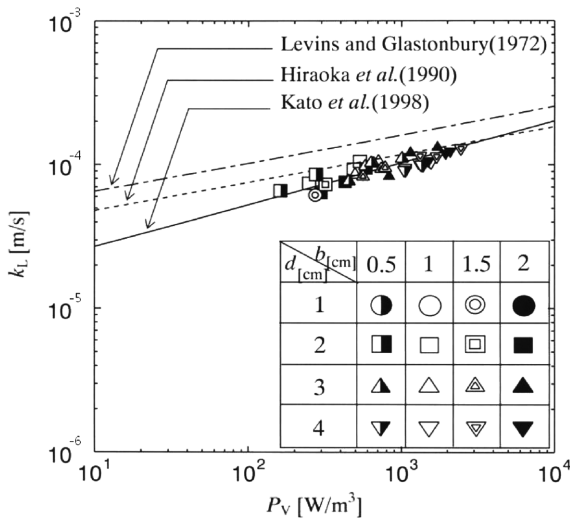


Fig. 9. Effect of power consumption per unit volume on solid-liquid mass transfer coefficient ( $N > N_{JS}$ ).

동수  $N$ 이  $N_{JS}$  이상에서는 진폭  $d$ 나  $b$  뿐만 아니라 진동방법에 의하지 않는 거의 동일한 레벨에 안정되어 있기 때문에 8자 진동교반은 선회 진동교반의 결과[15]나 왕복 진동교반의 결과[23]와 같이 고-액간 물질이동계수는 단위체적당 교반소요동력으로 상관된다고 할 수 있다. 여기서  $N_{JS}$ 는 완전부유화한계회전수로 Zwietering의 정의 “입자가 용기바닥에서 1~2초 이상 하나도 머무르지 않는 상태”로 눈으로 관찰하여 측정할 수 있다.

또한 Fig. 9에  $N > N_{JS}$ 에 있어서의 실험 데이터를 임펠러 교반에 대한 과거의 상관식과 비교했다.

점선은 Hiraoka 등[25]의 액-액계에 관한 식이고 일점쇄선은 Levins and Glastonbury[26]의 식이다. 실선은 Kato 등[15]의 선회 진동교반에서의 고-액간 물질이동계수에 관한 식이다. 8자 진동교반에서도 진동수  $N$ 가  $N_{JS}$  이상의 범위에서는 선회 진동교반에서의 상관식으로 잘 상관되는 것을 알았다.  $N_{JS}$  값이  $2.56$   $s^{-1}$ 로 이는 전술한

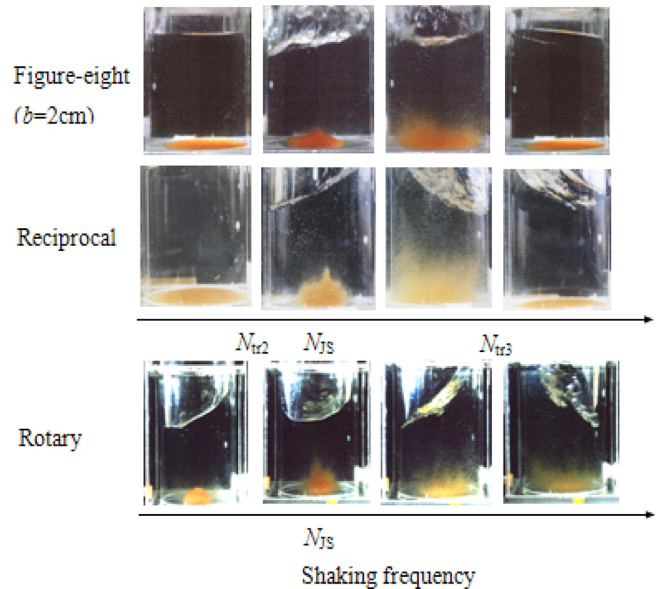


Fig. 10. Photographs of particle suspension in shaking vessel ( $D=15$  cm,  $d=2$  cm).

바와 같이 “진동수  $N$ 은  $2.57$   $s^{-1}$  일 때 교반조내의 유동상태는 선회류로 안정하였다”에 부합하였다. 식 (9)에 Kato 등[15,23]의 상관식을 8자 진동교반의 상관식으로 나타내었다.

$$k_L d_p / D' = 0.112 [d_p^4 P_V / (\rho v^3)]^{0.29} Sc^{1/3} (N_{JS} < N < N_{tr3}) \quad (9)$$

교반조 직경  $D=15$  cm, 진폭  $d=2$  cm에서 선회, 왕복 및 8자 진동교반을 이용하여 입자부유 상태를 촬영한 사진을 Fig. 10에 나타내었다. 8자 진동교반에서는 진동수가  $N_{tr3}$  이상이 되면 액 자유표면은 뒤섞여 있음에도 불구하고 입자는 교반조 바닥에 가라앉은 그대로 거의 움직임이 없었다. 이것은 왕복 진동교반의 결과와 같은 현상을 나타내었다.

### 3-4. 기-액간 물질이동용량계수

Fig. 11에 진동수와 기-액간 물질이동용량계수의 관계를 나타내었다. 거동은 왕복 진동교반의 데이터와 거의 같고 8자 진동교반에서는 복잡한 유동상태의 변화 때문에 기-액간 물질이동용량계수도 복잡하게 변동하는 것을 알았다. 게다가 같은 회전수에서는 선회 진동교반보다 큰  $K_L a$ 가 얻어지고 안정한 선회류가 발생하는 범위에서 ( $N_{tr2} < N < N_{tr3}$ ) 8자 진동교반의 기-액간 물질이동용량계수의 데이터는 선회 진동교반과 절편이 다를 뿐 거의 평행하였다.

$$\text{선회 진동교반 } K_L a = 6 \times 10^{-5} P_V^{0.4} D^{-0.25} H^{-0.6} \quad (10)$$

즉, 실험에서 얻은 선회진동교반의 물질이동용량계수 상관식 (10)의 정수항을 변경하여 Fig. 12에 나타낸바와 같이 8자 진동교반의 상관식 (11)을 얻었다.

$$\text{8자 진동교반 } K_L a = 1.05 \times 10^{-4} P_V^{0.4} D^{-0.25} H^{-0.6} (N_{tr2} < N < N_{tr3}) \quad (11)$$

또한 8자 진동교반의 진폭  $b$ 를 변화시켜도 기-액간 물질이동용량계수에는 그다지 영향을 미치지 않는 것을 알았다. 진동수가

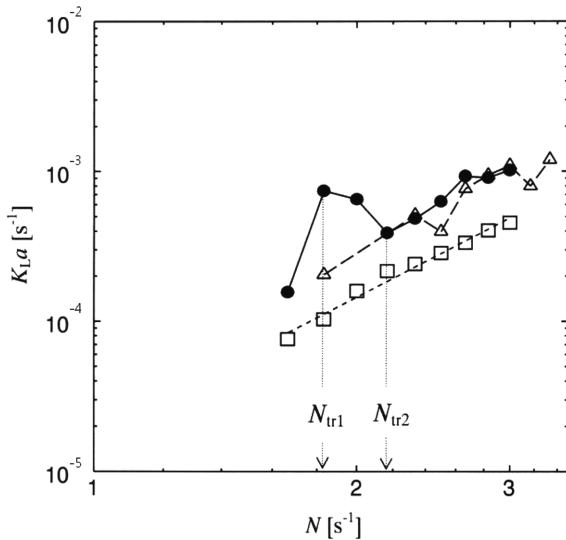


Fig. 11. Effect of shaking frequency on gas-liquid mass transfer volumetric coefficient ( $D=17$  cm,  $d=4$  cm). Figure-eight ( $b=2.0$  cm); ●, Reciprocal [22]; △, Rotary[14]; □.

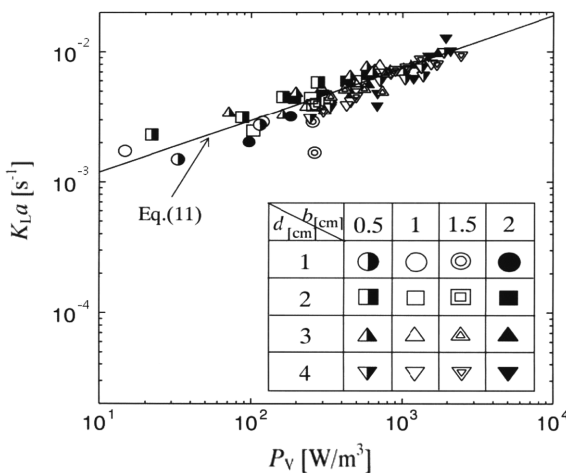


Fig. 12. Relationship between power consumption per unit volume and gas-liquid mass transfer volumetric coefficient ( $N_{tr2} < N < N_{tr3}$ ).

$N_{tr2} < N < N_{tr3}$ , 즉 안정한 선회류가 발생하고 있는 범위에서는 물질이 동용량계수는 동력의 0.4승에 비례하는 결과를 얻을 수 있고 선회 진동교반의 상관식의 정수항만을 변경하는 것으로 8자 진동교반의 기-액간 물질이동용량계수 상관식을 얻었다.

교반조내 기-액간 물질이동용량계수  $k_L a$ 의 상관식은 전 교반소요 동력을 이용하여 상관하는 방법과 임펠러의 교반소요동력과 기포 흡입 시 동력을 각각 변수로서 이용하는 상관법으로 나눌 수 있다.  $k_L a$ 을 계산 방법은 Lee 등[27,28]이 나타낸 방법을 이용하여 수정하여 계산하였다.

#### 4. 결 론

회전 진동교반과 왕복 진동교반에 관한 알려진 여러 가지 방법을 8자 진동교반에 적용하여 유동상태, 혼합시간 소요동력 및 물질이동계수를 측정하여 보다 고기능성의 진동교반 조작을 목적으로 여러

가지 검토 및 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

지금까지 보고된 적 없었던 8자 진동교반은 상당히 흥미로운 특성이 있다는 것을 알았다. 8자 진동교반을 이용하여 액체를 혼합할 때 진동수 대한 소요동력, 혼합시간, 물질이동계수는 규칙적으로 변화하지 않으므로 조작조건의 선정에 매우 신중해야 함을 알았다. 어떤 진동수에서라도 대략  $Fr = 0.095$  이상으로 되는 조건이 실험적으로 명확하게 되었다. 또 이때 교반조내 유체는 선회류형이 되고 혼합에 기여하는 흐름은 선회류인 것을 알았다. 게다가 액 혼합에 적합한 조작범위가 왕복 진동교반보다도 넓은 것을 알았다. 또한 8자 진동교반에서 고-액간 물질이동계수는 진동수  $N$ 가  $N_{JS}$  이상의 범위에서는 다음 상관식으로 잘 상관되었다.

$$k_L d_p / D' = 0.112 [d_p^4 P_v / (\rho v^3)]^{0.29} Sc^{1/3} \quad (N_{JS} < N < N_{tr3})$$

기-액간 물질이동용량계수도 정수항은 다르지만 선회 진동교반식과 같은 형태의 상관식으로 나타남을 알았다.

$$K_L a = 1.05 \times 10^{-4} P_v^{0.4} D^{-0.25} H^{-0.6} \quad (N_{tr2} < N < N_{tr3})$$

#### 감 사

이 논문은 2012학년도 경북대학교 학술연구비에 의하여 연구되었습니다.

#### Nomenclatures

- $a$  : gas-liquid interfacial area per unit volume [ $m^{-1}$ ]
- $D$  : vessel diameter [m]
- $D'$  : diffusivity [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]
- $d$  : shaking diameter [m]
- $d_p$  : particle diameter [m]
- $Fr$  : Froude number ( $=N^2 D/g$ ) [-]
- $Fr_c$  : Froude number ( $=N_c^2 D/g$ ) [-]
- $Fr_{max,p}$  : Froude number ( $=N_{max,p}^2 D/g$ ) [-]
- $Fr_{tr1}$  : Froude number at  $N_{tr1}$  ( $=N_{tr1}^2 D/g$ ) [-]
- $Fr_{tr2}$  : Froude number at  $N_{tr2}$  ( $=N_{tr2}^2 D/g$ ) [-]
- $Fr_{tr3}$  : Froude number at  $N_{tr3}$  ( $=N_{tr3}^2 D/g$ ) [-]
- $g$  : gravitational acceleration [ $m \cdot s^{-2}$ ]
- $H$  : liquid height [m]
- $K_L a$  : volumetric gas-liquid mass transfer coefficient [ $s^{-1}$ ]
- $k_L$  : solid-liquid mass transfer coefficient [ $m \cdot s^{-1}$ ]
- $N$  : shaking frequency [ $s^{-1}$ ]
- $N_c$  : critical circulating frequency for mixing [ $s^{-1}$ ]
- $N_{max,p}$  : circulating frequency for maximum power consumption [ $s^{-1}$ ]
- $N_{JS}$  : critical frequency for complete suspension [ $s^{-1}$ ]
- $N_{tr1}$  : frequency to generate a large wave [ $s^{-1}$ ]
- $N_{tr2}$  : frequency to generate a steady rotational [ $s^{-1}$ ]
- $N_{tr3}$  : frequency to disappear a steady rotational [ $s^{-1}$ ]
- $P$  : power consumption [W]
- $P_v$  : power consumption per unit volume [ $W \cdot m^{-3}$ ]
- $Re$  : Reynoldsnumber ( $=Nd^2/\nu$ ) [-]

- $Re_c$  : Reynolds number for critical circulating frequency for mixing  
 ( $=N_c d^2/\nu$ ) [-]  
 $Re_{max,p}$  : Reynolds number for critical circulating frequency for maximum  
 power consumption ( $=N_{max,p} d^2/\nu$ ) [-]  
 $Re_{ir1}$  : Reynolds number at  $N_{ir1}$  ( $=N_{ir1} d^2/\nu$ ) [-]  
 $Re_{ir2}$  : Reynolds number at  $N_{ir2}$  ( $=N_{ir2} d^2/\nu$ ) [-]  
 $Re_{ir3}$  : Reynolds number at  $N_{ir3}$  ( $=N_{ir3} d^2/\nu$ ) [-]  
 $Sc$  : Schmidt number ( $=\nu/D$ ) [-]  
 $V$  : liquid volume [ $m^3$ ]  
 $\mu$  : liquid viscosity [ $Pa \cdot s$ ]  
 $\rho$  : liquid density [ $kg \cdot m^{-3}$ ]  
 $\rho_p$  : particle density [ $kg \cdot m^{-3}$ ]  
 $\nu$  : kinematic viscosity of liquid [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]

## References

- Smith, C. G. and Marvin, J. J., "Aeration Requirements for the Growth of Aerobic Microorganisms," *J. Bacteriol.*, **68**, 346-350 (1954).
- Roth, N. G., Lively, D. H. and Hodge, H. M., "Influence of Oxygen Uptake and Age of Culture on Sporulation of *Bacillus Anthracis* and *Bacillus Grogibii*," *J. Bacteriol.*, **69**, 455-459(1955).
- Rhodes, R. P. and Garden Jr, E. L., "Characterization of Agitation Effects in Shaken Flasks," *Ind. Eng. Chem.*, **49**, 1232-1236(1957).
- Auro, M. A., Howard, M. H. and Roth, N. G., "Oxygen Absorption Rates in Shaken Flasks," *Ind. Eng. Chem.*, **49**, 1237-1238(1957).
- Garden Jr, E. L., "Improved Shaken Flask Performance," *Biotech. Bioeng.*, **4**, 99-103(1962).
- Hara, M., "Free Surface Observations of Various Liquid in a Rotary Shaken Flask (I) Some Analysis and Experiment, Assuming Liquid as Ideal," *HakkouKogaku*, **43**, 590-596(1965a).
- Hara, M., "Free Surface Observations of Various Liquid in a Rotary Shaken Flask (II)Some Analysis of the Results of Experiments Using Newtonian Liquid," *HakkouKogaku*, **43**, 597-602 (1965b).
- Brandl, E. A. S. and Steiner, H., "Aeration in Submerged Fermentation," *Biotech. Bioeng.*, **8**, 297-313(1966).
- Sumino, Y., Akiyama, S. and Fukada, H., "Performance of the Shaking Flask (1) Power Consumption," *J. Ferment. Technol.*, **50**, 203-208(1972).
- Sumino, Y. and Akiyama, S., "Measurement of the Overall Volumetric Coefficient of Heat Transfer of a Shaking Flask," *J. Ferment. Technol.*, **65**, 285-289(1987).
- Gardner, J. and Tatterson, G., "Characterization of Mixing in Shaker Table Containers," *Biotechnol. Bioeng.*, **39**, 794-797(1992).
- Fujita, M., Iwahori, K., Tatsuta, S. and Yamakawa, K., "Analysis of Pellet Formation of *Aspergillusniger* Based on Shear Stress," *J. Ferm. Bioeng.*, **78**, 368-373(1994).
- Kato, Y., Hiraoka, S., Tada, Y., Koh, S. T. and Lee, Y. S., "Mixing Time and Power Consumption for a Liquid in a Vertical Cylindrical Vessel Shaken in a Horizontal Circle," *Trans. IChemE.*, **74**, 451-455(1996a).
- Kato, Y., Hiraoka, S., Tada, Y., Sato, K. and Ohishi, T., "Measurement of Mass Transfer Rate from Free Surface in Shaking Vessel Type Bioreactor," *J. Chem. Eng. Japan*, **30**, 362-365(1997a).
- Kato, Y., Hiraoka, S., Tada, Y. and Nomura, T., "Solid-Liquid Mass Transfer in a Shaking Vessel for a Bioreactor with Current Pole," *Canadian J. Chem. Eng.*, **76**, 441-445(1998).
- Kato, Y., Hiraoka, S., Tada, Y., Ue, T., Saito, T., and Nomura, T., "Improvement of Particle Dispersion in a Shaking Vessel with Current Pole," *J. Chem. Eng. Japan*, **29**, 697-701(1996b).
- Kato, Y., Honda, H., Hiraoka, S., Tada, Y., Kobayashi, T., Sato, K., Saito, T., Nomura, T. and Ohishi, T., "Performance of a Shaking Vessel Type Bioreactor with Current Pole," *J. Ferment. Bioeng.*, **84**, 65-69(1997b).
- Büchs, J., Maier, U., Milbradt, C. and Zoels, B., "Power Consumption in Shaking Flasks on Rotary Shaking Machines: I. Power Consumption Measurement in Unbaffled Flasks at Low Liquid Viscosity," *Biotech. Bioeng.*, **68**, 589-593(2000a).
- Büchs, J., Maier, U., Milbradt, C. and Zoels, B., "Power Consumption in Shaking Flasks on Rotary Shaking Machines: II. Non-dimensional Description of Specific Power Consumption and Flow Regimes in Unbaffled Flasks at Elevated Liquid Viscosity," *Biotech. Bioeng.*, **68**, 594-601(2000b).
- Büchs, J. and Zoels, B., "Evaluation of Maximum to Specific Power Consumption Ratio in Shaking Bioreactors," *J. Chem. Eng. Japan*, **34**, 647-653(2001).
- Kato, I. and Tanaka, H., "Development of a Novel Box-Shaped Shake Flask with Efficient Gas Exchange Capacity," *J. Ferm. Bioeng.*, **85**, 404-409(1998).
- Kato, Y., Hiraoka, S., Tada, Y., Hirose, K. and Büchs, J., "Mixing Performance of a Reciprocally Shaking Vessel," *J. Chem. Eng. Japan*, **36**, 663-667(2003a).
- Kato, Y., Hiraoka, S., Tada, Y., Watanabe, S. and Büchs, J., "Solid-Liquid Mass Transfer and Critical Frequency for Complete Suspension in a Reciprocally Shaking Vessel," *J. Chem. Eng. Japan*, **36**, 1410-1414(2003b).
- Malik, M., Mujumdar, A. S. and Dave, R., "Numerically-Simulated Characteristics of Granular Flow in an Oscillating Sectorial Container," *Powder Technol.*, **133**, 91-105(2003).
- Hiraoka, S., Tada, Y., Suzuki, H., Mori, H., Aragaki, T. and Yamada, I., "Correlation of Mass Transfer Volumetric Coefficient with Power Input in Stirred Liquid-Liquid Dispersions," *J. Chem. Eng. Japan*, **23**, 468-474(1990).
- Levins, B. E. and Glastonbury, J. R., "Particle-Liquid Hydrodynamic and Mass Transfer in a Stirred Vessel Part II - Mass Transfer," *Trans. IChemE*, **50**, 132-146(1972).
- Lee, Y. S., "Characteristic of Mass Transfer Volumetric Coefficient and Sauter Mean Diameter in a Liquid-Liquid Agitated Vessel," *Korean Chem. Eng. Res.*, **50**(5), 913-922(2012).
- Lee, Y. S., Kato, Y. and Suzuki, J., "Solid-Liquid Mass Transfer in Gas-Solid-Liquid 3-Phase System Agitated Vessel," *J. Korean Ind. Chem.*, **17**(5), 509-516(2006).