

고-액계 진동교반에서 입자의 부유화 한계조건 Critical Suspension Condition of Particles in a Shaking Vessel of Solid-Liquid System

이 영 세*, 김 문 갑**, 加藤禎人***

Young-Sei Lee*, Moon-Gab Kim**, Yoshihito Kato***

<Abstract>

Shake mixing has been widely used in cell culture. The mixing performance for shake mixing, however, has not been reported quantitatively. The critical circulating frequency and the power consumption for complete suspension of particles, based on the definition of Zwietering, were measured in a shaking vessel containing a solid-liquid system. The critical suspension frequency was correlated by the equation from Baldi's particle suspension model modified with the physical properties of the particles. Critical suspension frequency was correlated as following ;

$$N_{JS} = \frac{0.58 d_p^{0.06} (g\Delta\rho/\rho_L)^{0.04} X^{0.03}}{D^{0.35} d^{0.17} \nu^{0.04}}$$

The power consumption at the critical suspension condition in the shaking vessel was less than that in an agitated vessel with impeller.

Key Words : *Critical Suspension Condition, Critical circulating frequency, Complete suspension, Agitation, Mixing, Solid-Liquid System*

1. 서론

혼합, 교반조작은 화학프로세스에서 필연적으로 행하여지고 있는 중요한 기본조작의 하나이고 그 조작의 좋고 나쁨이 화학장치의 성능 및 제조된 제품의 품질을 직접 지배하는 경우가 많다. 특히 최근에는 다품종 소량생산을 지향한 회분식 반응이 많이 행하여지고 있다. 일반적으로 액체를 균일하게 혼합하기 위해서는 교반조내에서 임펠러를 회전시켜 액체를 교

반하는데 여러 가지 임펠러를 이용한 교반조작에서 부유상태 및 혼합특성의 예측에 대한 검토 [1-7]는 지금까지 많이 이루어져 왔지만 임펠러를 이용하지 않는 교반조작에서는 static mixer, jet식 혼합조[8-12]에 대한 정량적 보고가 있을 뿐 이는 실험실에서 아주 드물게 이용되고 있다. 임펠러를 이용하지 않는 교반조작 중의 하나인 진동교반은 용기전체를 흔들어서 액체를 교반하는 방법으로 여러 가지 실험조작에서 많이 이용되고 있지만 그 정량적인 보고는 아직

* 경북 상주시 가장동 386, 상주대학교 화학공학과, 공학박사, (0582)530-5334, yslee@samback.sangju.ac.kr

<현 일본학술진흥회 외국인특별연구원, 나고야공업대학 응용화학과, yslee@ach.nitech.ac.jp>

** 경북 상주시 가장동 386, 상주대학교 화학공학과, 공학박사

*** 日本 名古屋市 昭和區 御器所町 466-8555, 國立名古屋工業大學 應用化學科, 工學博士

되고 있지 않다. 특히 진동교반은 국소적인 강한 전단영역이 발생하지 않아 동,식물세포의 배양에 잘 이용되고 있다. 또한 교반조의 기하형상이 단순하므로 세정이 간단하여 다품종 소량생산이 가능하다는 점이다.

고-액계를 대상으로 한 교반조작은 입자의 현탁, 결정화 등에서 자주볼 수 있는 조작이며 진동교반시에는 동식물세포 혹은 전단에 약한 물질을 교반하는 경우가 대부분이므로 주된 목적은 고-액간(세포-액) 물질이동의 촉진에 있다. 이 경우 전고체입자의 표면과 액체의 접촉이 필요하므로 고체입자의 부유상태가 큰 문제가 된다. 입자 부유상태를 검토하는데 가장 중요한 파라미터는 완전부유화 한계회전수 N_{JS} 이다[13-19]. 완전부유상태라는 것은 전입자가 장치내를 움직이고 있는 상태를 말한다. 일반적으로 물질이동계수 k 와 임펠러 회전수 N 의 관계는 N_{JS} 미만의 회전수에서는 고체입자와 액과의 접촉면적이 증가하기 때문에 k 는 회전수 N 의 의존성이 높다. 그러나 고체입자와 액체사이의 접촉면적을 최대로 하기 위한 N_{JS} 이상의 회전수에서는 오히려 물질이동계수 k 는 회전수 N 의 의존성이 낮아진다. 더욱 회전수가 증가하고 액자유표면으로부터 기포를 불어 넣으면 물질이동계수 k 는 회전수에 의존하지 않게 된다. 따라서 고-액간의 물질이동에 관한 최적 조작조건은 N_{JS} 에서 기포를 불어넣기 직전의 회전수가 된다. 일반적으로 고-액 교반에서 N_{JS} 에서의 물질이동계수 k_{JS} 는 장치의 형상에 무관하게 일정하다고 알려져 있으므로[20] 고-액 교반에서 완전부유화 한계회전수가 중요한 파라미터가 된다. 따라서 진동교반에서도 완전부유화 한계회전수에 대해서 검토할 필요가 있다. 본 연구에서는 고-액계 진동교반조내에서 입자의 부유상태를 실험적으로 관찰하여 임펠러 교반에서의 Baldi등의 부유화이론[13]에 기초를 둔 완전부유화 한계회전수의 상관식을 도출하고 완전부유에 필요한 교반동력, 즉 부유화 한계동력을 측정하여 임펠러를 이용한 교반과 비교, 검토를 목적으로 했다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 실험장치 및 조건

실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험에 사용한 교반장치는 시판 진동기로 Taitec(주)제 NR-80을 이용하였다. 또 교반조 바닥 부분을 정지시킨 상태로 관찰하기 위해 교반조와 같이 회전하는 비디오 카메라(CCD-TR105, Sony)로 교반조 바닥을 촬영하고 이것을 비디오 보드(GV-98, I.O. DATA機器(株))를 장착한 컴퓨터에 부유상태를 모니터 했다. 완전부유화 한계회전수 N_{JS} 에서의 교반소요동력 즉 부유화 한계동력은 일반적으로 임펠러를 이용한 교반조의 동력측정과 같이 회전우력(torque)으로부터 측정하는 것이 불가능하므로 약간 정밀도는 떨어지지만 소비전력으로부터 측정했다. 소비전력 측정은 전력측정기(DIGITAL POWER HITEST 3183, 日置電機(株))을 이용하였고 전압강하의 외란을 최소한으로 억제하기 위하여 안정기(AC-POWER SUPPLY ACR-1001, 日本 STABILIZER)를 사용했다.

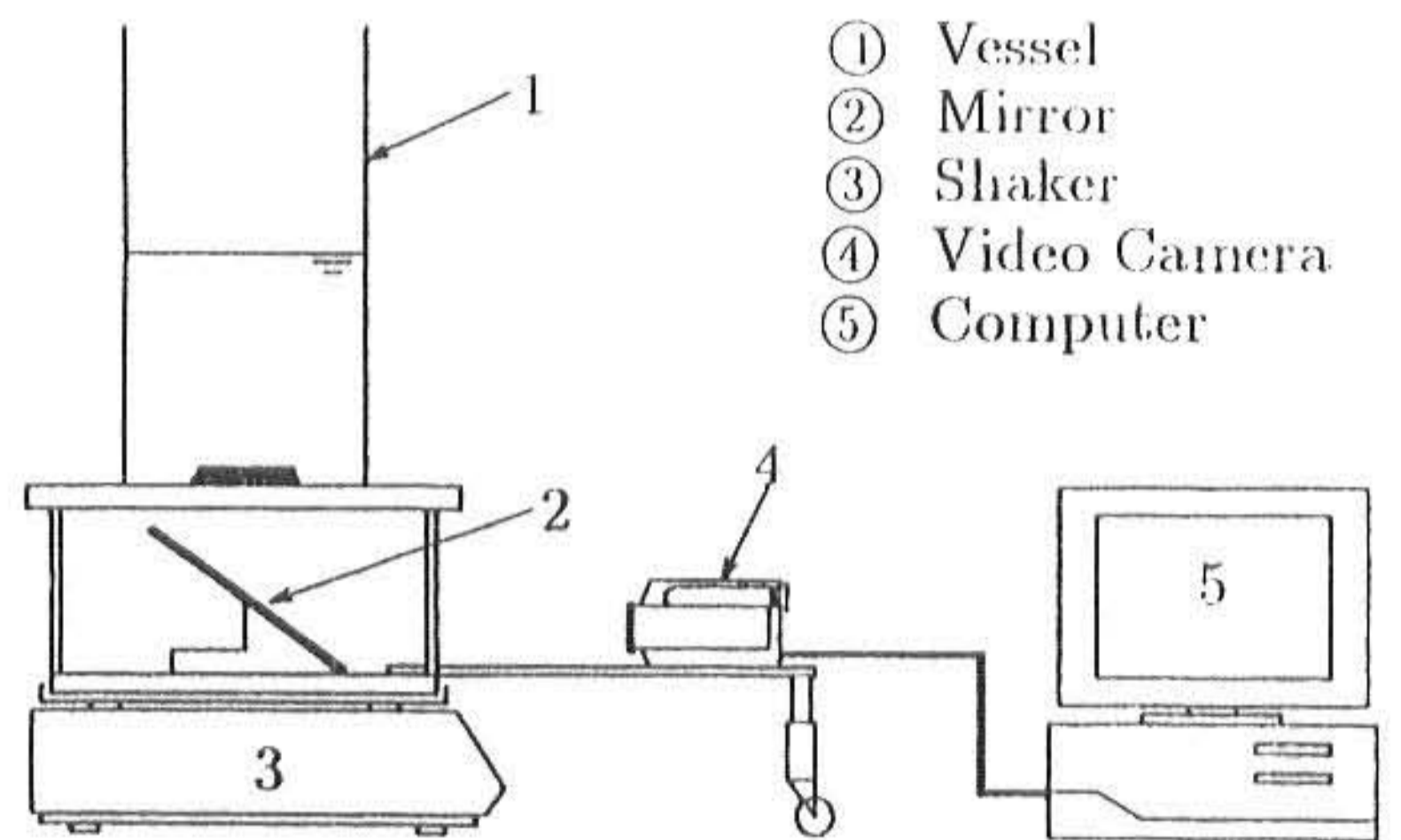


Fig. 1. Experimental apparatus for particle suspension behavior.

실험에 사용한 교반조는 아크릴 수지제 평저원통조로서 내경 D 가 0.140, 0.170 및 0.206m의

3종류를 이용하였으며 액의 깊이 H는 조경과 같이(H/D=1) 했다. 교반액은 수도물, 글리세린 수용액, 50% 인산수소나트륨 수용액을 이용하였으며 입자는 각각 밀도가 다른 유리조각(2,485kg/m³), 이온교환수지(1,510kg/m³), 나일론 구(1,140kg/m³)의 3종류를 이용했다.

N_{JS}에 영향을 미치는 인자로는 입자 및 액체의 물성, 조작조건, 장치의 기하형상 등이 있으므로 이들의 인자를 변화시켜 가며 실험을 했으며 실험조건을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Experimental Conditions

	This Work	Zwietering
D[m]	0.140~0.206	0.154~0.60
d[m]	0.01~0.04*	0.05~0.224**
ν [m ² -s ⁻¹]	$0.9 \times 10^{-6} \sim 6.6 \times 10^{-5}$	$0.39 \times 10^{-6} \sim 1.11 \times 10^{-5}$
ρ_L [kg-m ⁻³]	997~1260	790~1600
ρ_p [kg-m ⁻³]	1140~2490	2160~2600
d _p [μm]	460~3760	125~8500
X [wt%]	0.1~20	0.5~20

* : Circulating diameter ** : Impeller diameter

또 Zwietering의 실험조건[18]도 함께 나타내었는데 본 실험은 교반조 직경 및 입자 직경의 범위가 약간 좁지만 Zwietering의 실험범위는 거의 망라하도록 고려했다.

2-2. 실험방법

본 연구에서 완전부유화 한계회전수 N_{JS}의 정의는 가장 일반적인 Zwietering의 “교반조 바닥에 1초 이상 정지하고 있는 입자가 존재하지 않게 되는 상태”로 했다[18]. 이것은 눈으로 보아서 측정하는 방법으로 다소 개인차가 있지만 ±5% 정도의 오차 범위에서는 재현성이 있다고 할 수 있다[15,18,21]. 진동교반의 경우는 Zwietering의 정의에 의하면 임펠러 교반의 경우와 비교해 보면 교반조 내부의 입자 농도 분포가 다르고 구르는 입자가 많게 된다. 이것은 진동교반에서는 최초 입자는 부유하지 않고 교반조 바닥을 구르기 시작하므로 이때의 회전수

를 N_{JS}로서 구한다.

2-2-1. 완전부유상태 관찰 및 N_{JS}의 측정

실험은 우선 교반조에 용액과 입자를 넣어 액의 온도를 측정한 후 입자농도에 따라서 다소 다르지만 교반조 바닥의 중앙부에 입자가 모이는 혼합한계회전수(N_C), 즉 완전혼합을 달성하기 위해 필요한 최소한의 회전수 부근까지 회전수를 올려 30초 정도 교반조 바닥을 관찰하고 회전수를 10rpm 올려 다시 30초 정도 관찰한다. 이와 같은 조작을 되풀이하여 N_{JS}에 접근해 오면 이번에는 회전수를 1~2rpm 올려 교반조 바닥을 관찰해 가면서 정상상태가 되기를 기다린다. Zwietering이 정의한 N_{JS}가 되기까지 이 조작을 반복하여 N_{JS}라고 인정할 수 있는 회전수가 되었다면 부유화 한계동력을 소비전력으로부터 구한다.

2-2-2. 부유화 한계동력의 측정

완전부유화 한계회전수에서의 교반소요동력, 즉 부유화 한계동력은 교반조내의 유체에 넣은 입자의 에너지로 정의했다. 부유화 한계동력의 측정은 장치를 움직이게 하기위한 소비전력도 있으므로 전체의 소비전력과 교반조에 두경을 덮어 자유표면을 없앤 밀폐조로서 조작했을 때의 소비전력과의 차이로 부터 구했다. 본 실험에서는 편의상 교반액 대신에 그것과 같은 질량을 가진 점토를 조내에 넣어 측정하는 Kato 등의 방법[22]을 이용했다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 입자의 부유상태

진동교반조내 입자의 부유상태를 나타낸 사진을 Fig. 2에 나타내었고, 회전수 N의 증가에 따른 입자의 부유상태의 관계를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 2, 3에서 저회전수(A)의 경우 입자는 교반조 바닥 전체에 분산되어 있고 부유도 하지 않고 있다. 또 회전수가 증가함에 따라 교반조 바닥 중심으로 모여든다. 회전수를 좀더 증가시키면(B) 교반조 바닥 중앙에 모인 입자는 원추상의 형태를 하고 그 선단 부근에서 약간의 입자가 부유하기 시작한다. 회전수를 더욱 증가시켜(C) Zwietering의 정의에 의한 완전부유화 한계회전수(N_{JS})를 넘게 되면 원추상 덩어리의

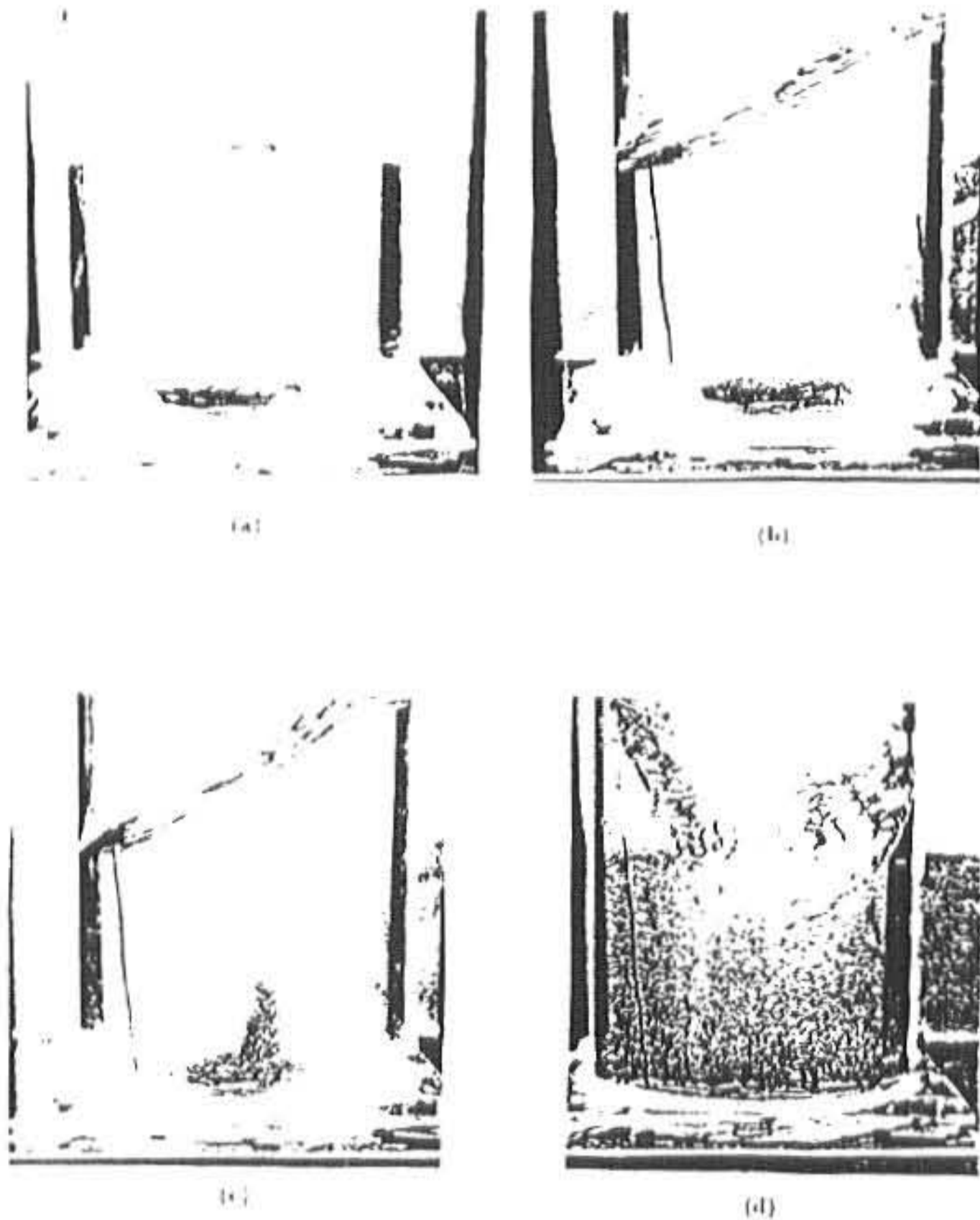


Fig. 2. Photograph of particle suspension state.

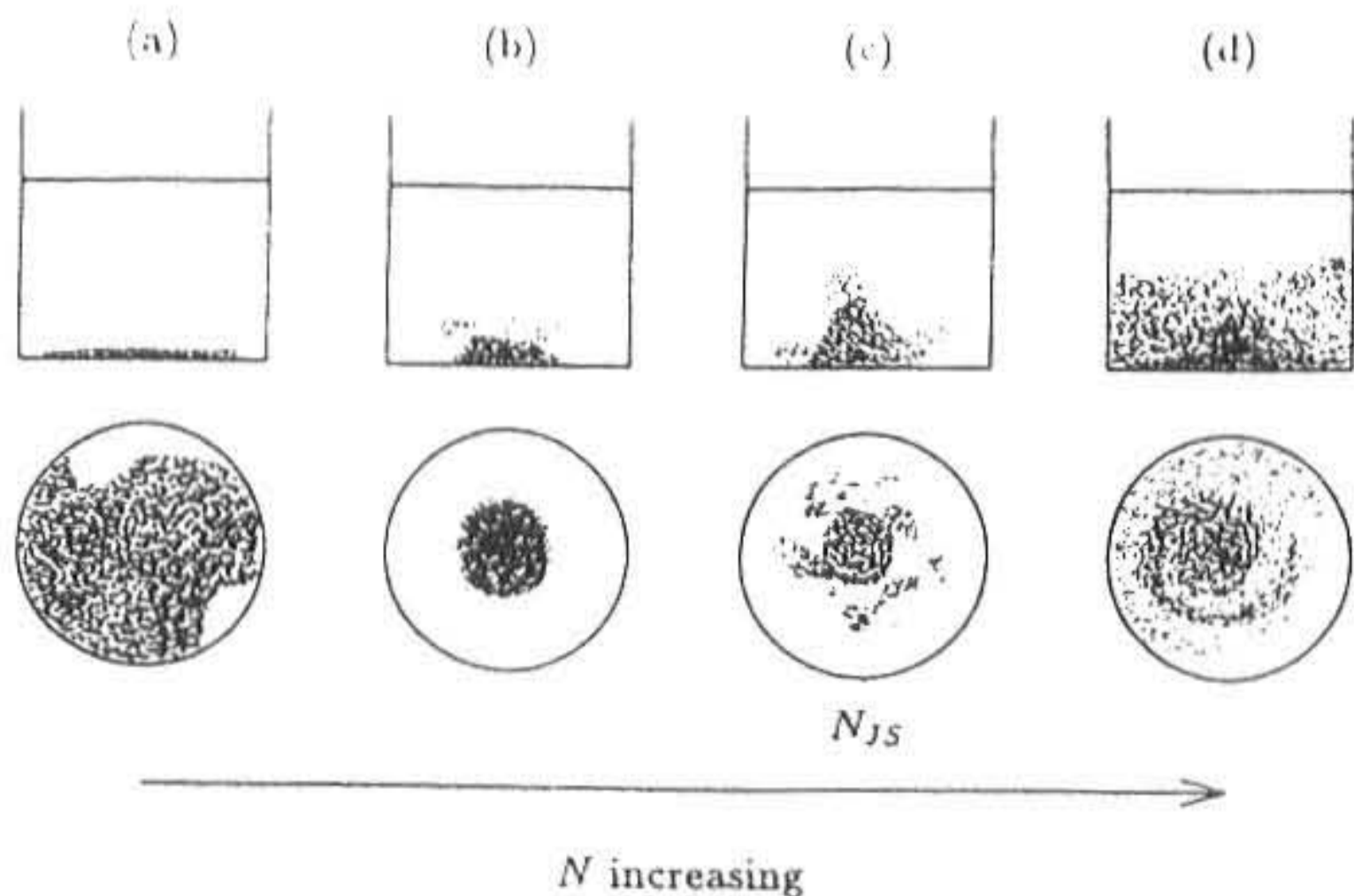


Fig. 3. Sketch of particle suspension patterns.

선단 부분에서 입자가 감겨 올라가기 시작하고 소용돌이의 모양으로 입자 전체가 움직이기 시작한다. 이때 입자와 용액의 밀도차가 적을수록 감겨 올라가는 양이 많아진다. 이와 같이 진동 교반의 경우는 교반조가 움직이고 있으므로 Zwietering 정의에 의해 주어진 N_{JS} 는 교반조 바닥에 치우친 입자의 농도분포를 나타낸다. 결국 임펠러 교반에서는 많은 고체 입자들이 순환류에 실리어 교반조 바닥으로부터 크게 떨어져 부유하지만 진동교반의 N_{JS} 에서의 입자의 거동은 조내에서 부유한다라고 하기 보다는 대부분의 입자가 용기 바닥을 구르고 있는 상태에 가깝다. 이는 임펠러 교반에서의 N_{JS} 의 상태와 비교해서 “부유”라는 관점에서 보면 불완전한 부유상태를 나타낸다. 더욱 회전수를 증가시키면(D) 거의 모든 입자는 부유하고 임펠러 교반시 완전부유화 한계회전수에서의 부유상태에 가까워짐을 알 수 있다.

3-2. Baldi등의 입자부유모델에 의한 N_{JS}

임펠러를 이용한 교반에서의 N_{JS} 에 대한 상관식을 Zwietering[18]는 식(1)로 나타내었다.

$$N_{JS} = \frac{S \nu^{0.1} d_p^{0.2} (g\Delta\rho/\rho_L)^{0.45} X^{0.13}}{d_{imp}^{0.85}} \tag{1}$$

여기서 ν [m^2/s]는 액의 동점도, d_p [m]는 고체의 입자직경, g [m/s^2]는 중력가속도, $\Delta\rho = \rho_s - \rho_L$ [kg/m^3]는 고체 입자와 액의 밀도차, X [wt%]는 고체 입자의 농도, d [m]는 임펠러 직경, S 는 계수로서 임펠러의 위치, 크기 및 종류에 따라 달라진다.

Baldi등의 입자부유모델[13]로 부터 임펠러 교반에서의 상관식은 다음과 같이 구할 수 있다. Baldi등의 모델은 입자와 같은 크기의 임계 소용돌이를 가진 난류에너지 $\rho_L(\epsilon d_p)^{2/3}$ 과 입자를 어떤 높이까지 들어 올리는데 필요한 에너지 $d_p \Delta\rho g$ 가 평형관계에 있다고 가정하는

것이다. 즉 식(2)가 성립한다고 가정한다.

$$\rho_L (\varepsilon d_p)^{2/3} \propto d_p \Delta \rho g \quad (2)$$

위 식을 변형하면 다음식으로 된다.

$$\varepsilon \propto d_p^{1/2} (\Delta \rho g / \rho_L)^{3/2} \quad (3)$$

따라서 N_{JS} 에 관하여 정리하면 다음과 같은 식(4)가 도출된다.(부록A참조)

$$N_{JS} = \frac{1}{Z N_P^{1/3}} \frac{d_p^{0.17} (g \Delta \rho / \rho_L)^{0.5} D}{d_{imp}^{1.67}} \quad (4)$$

Baldi 등의 입자부유모델[13]로부터 도출한 임펠러 교반에서의 상관식(4)는 Zwietering의 상관식[18]인 식(1)과 어느 정도 일치하고 있으므로 진동교반의 완전부유화한계회전수도 Baldi 등의 모델에 의하여 상관식의 도출을 시도했다. 본 실험범위내에서 고-액계의 교반소요동력은 균상계의 교반소요동력과 차이가 없었으므로 [22] 위에서 가정한 식(2)와 진동교반에서의 동력상관식으로 부터 완전부유화 한계회전수 N_{JS} 에 관한 식을 도출할 수 있다. 보통 진동교반의 동력상관식은 동력수 N_p , F_r 수, Re 수 및 d/D 로 상관되며 차원해석에 의해 다음식으로 주어진다[22].

$$N_p = 934 F_r^{3/2} Re^{-1/4} (d/D)^{3/2} \quad (5)$$

$(0.05 < F_r < 0.2, 1 < Re < 0.2)$

여기서 동력수 $N_p(P/\rho N^3 D^5)$, F_r 수의 대표길이로서 조정 D 를 이용하며 Re 수의 대표길이로서 회전직경 d 를 이용한다. 식(5)에 N_p , F_r 및 Re 의 정의를 대입하면 다음식을 얻을 수 있다.

$$P/\rho N^3 D^5 = 934 \frac{(N^2 D)^{3/2}}{(g)^{3/2}}$$

$$\times \frac{(N d^2)^{-1/4}}{(\nu)^{-1/4}} \times \frac{(d)^{3/2}}{(D)^{3/2}} \quad (6)$$

이때 교반시 액의 깊이와 조경을 같게 하여 ($H/D=1$) 실험한 경우 $P_V(\propto P/D^3)$ 에 대하여 풀면 다음과 같은 식으로 된다.

$$P_V \propto N^{23/4} D^2 d \nu^{1/4} \rho \quad (7)$$

따라서 다음 식(8)로 부터

$$\varepsilon \propto P_{VJS} / \rho_L \propto N_{JS}^{23/4} D^2 d \nu^{1/4} \quad (8)$$

정리하면 식(9)가 된다.

$$N_{JS}^{23/4} D^2 d \nu^{1/4} \propto d_p^{1/2} (\Delta \rho g / \rho_L)^{3/2} \quad (9)$$

따라서 식(9)를 N_{JS} 에 관해 정리하면 식(10)이 도출된다.

$$N_{JS} \propto \frac{d_p^{0.09} (\Delta \rho g / \rho_L)^{0.26} D}{D^{0.35} d^{0.17} \nu^{0.04}} \quad (10)$$

식(10)을 이용하여 실험 데이터를 정리한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 이 그림에서 입자의 종류가 일정하면 거의 비례하나 오차가 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서 보정을 위해 식(10)에 입자의 중량분율 X 의 항을 고려해 넣고 입자밀도 $\Delta \rho g / \rho_L$ 와 입자직경 d_p 에 관한 지수와 비례정수를 중회귀분석으로 구하여 식(11)과 같은 N_{JS} 상관식을 얻었다.

$$N_{JS} = \frac{0.58 d_p^{0.06} (g \Delta \rho / \rho_L)^{0.04} X^{0.03}}{D^{0.35} d^{0.17} \nu^{0.04}} \quad (11)$$

여기서 식(10)과 식(11)을 비교하면 입자직경 d_p 에 관한 지수는 0.09에서 0.06으로 거의 변화하지 않지만 밀도차 $g\Delta\rho/\rho_L$ 에 관한 지수가 0.26에서 0.04로 상당히 작아졌다. 이것은 N_{JS} 에서의 입자의 거동은 부유하기 보다는 용기바닥을 구르고 있는 것이 많으므로 밀도차의 상관성이 작기 때문이다. 식(11)은 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 약 $\pm 10\%$ 의 오차 범위에서 실험결과를 상관하였다.

3-3. 완전부유화 한계동력

진동교반에서의 부유화 한계동력과 임펠러 교반에서의 부유화 한계동력의 비교를 Fig. 6, 7에 나타내었다. Fig. 6은 부유화 한계회전수에

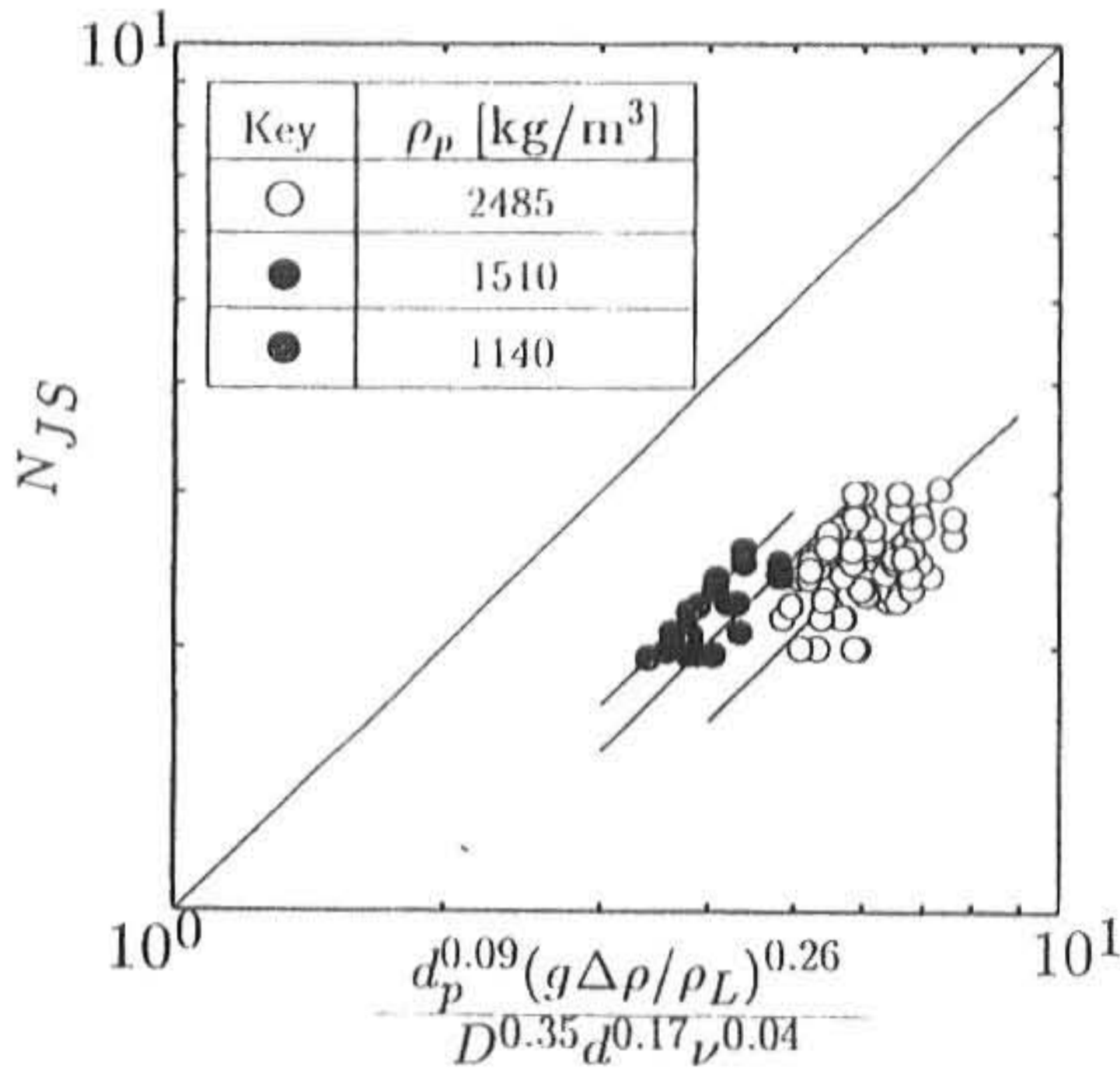


Fig. 4. Correlation of N_{JS} based on the Baldi's model.

서의 교반소요동력, 즉 부유화 한계동력에서 진동교반과 임펠러 교반의 입자 분산상태를 나타낸 사진이다. 같은 크기의 교반조, 유체에 같은 입자를 부유화 시켰을 때 진동교반에서의 입자 분산, 즉 농도분포는 임펠러 교반에서의 농도분포와는 크게 다르게 나타났다. Fig. 7은 진동교반과 임펠러 교반에서의 부유화 한계동력을

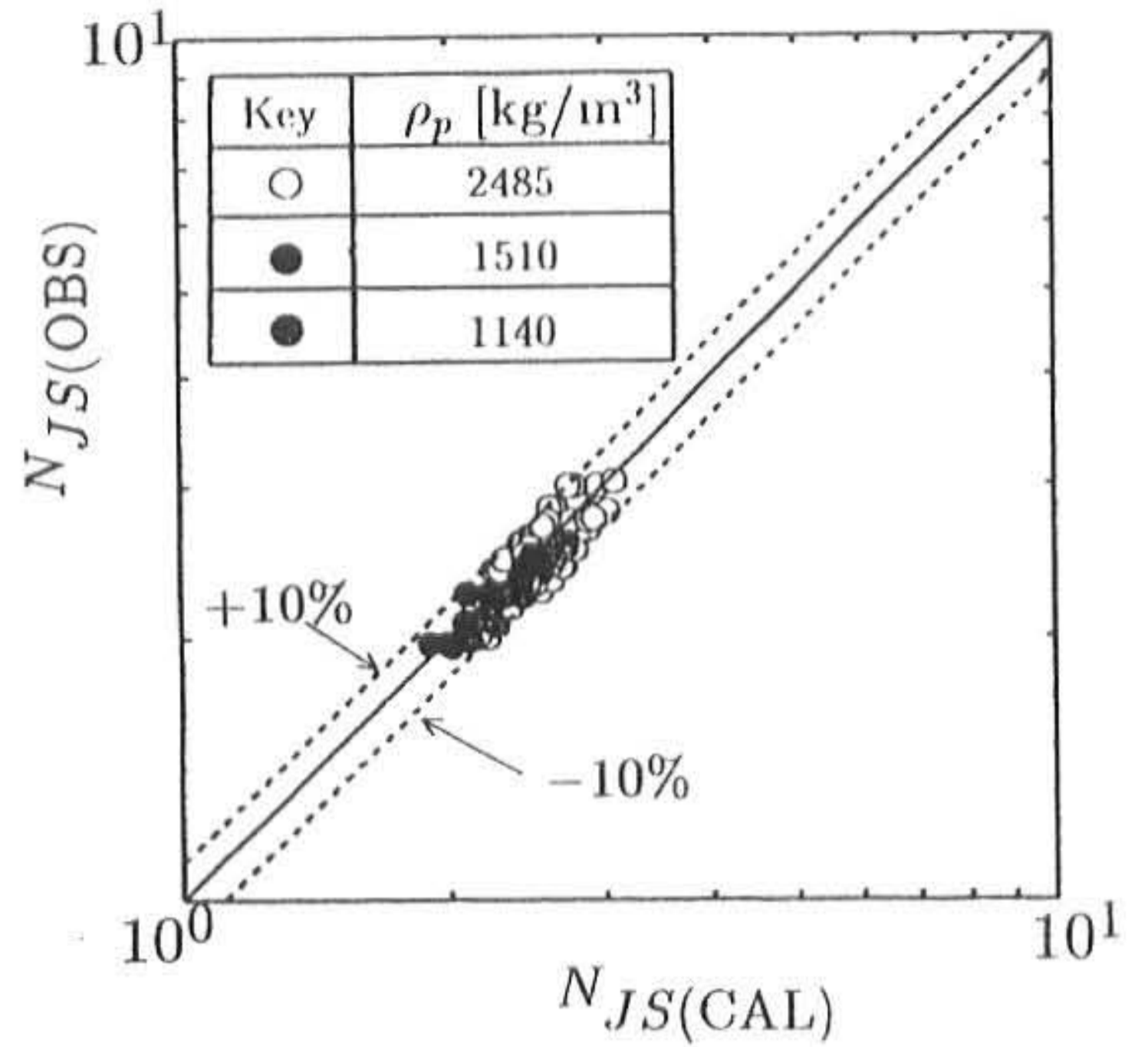


Fig. 5. Correlation of N_{JS} from the modified equation.

비교한 것이다. 비교에 이용한 교-액계 및 교반 임펠러의 조건을 Table 2에 나타내었다. 임펠러 교반에서의 부유화 한계회전수는 Zwietering의 식으로 부터 산출하고 부유화 한계동력은 Kamei 등[23]의 상관식으로 부터 산출했다. 또 실험조건은 다소 다르지만 Chudacek의 실험값[14]도 함께 나타내었다.



Fig. 6. Photographs of the particle dispersion at P_{VJS} .

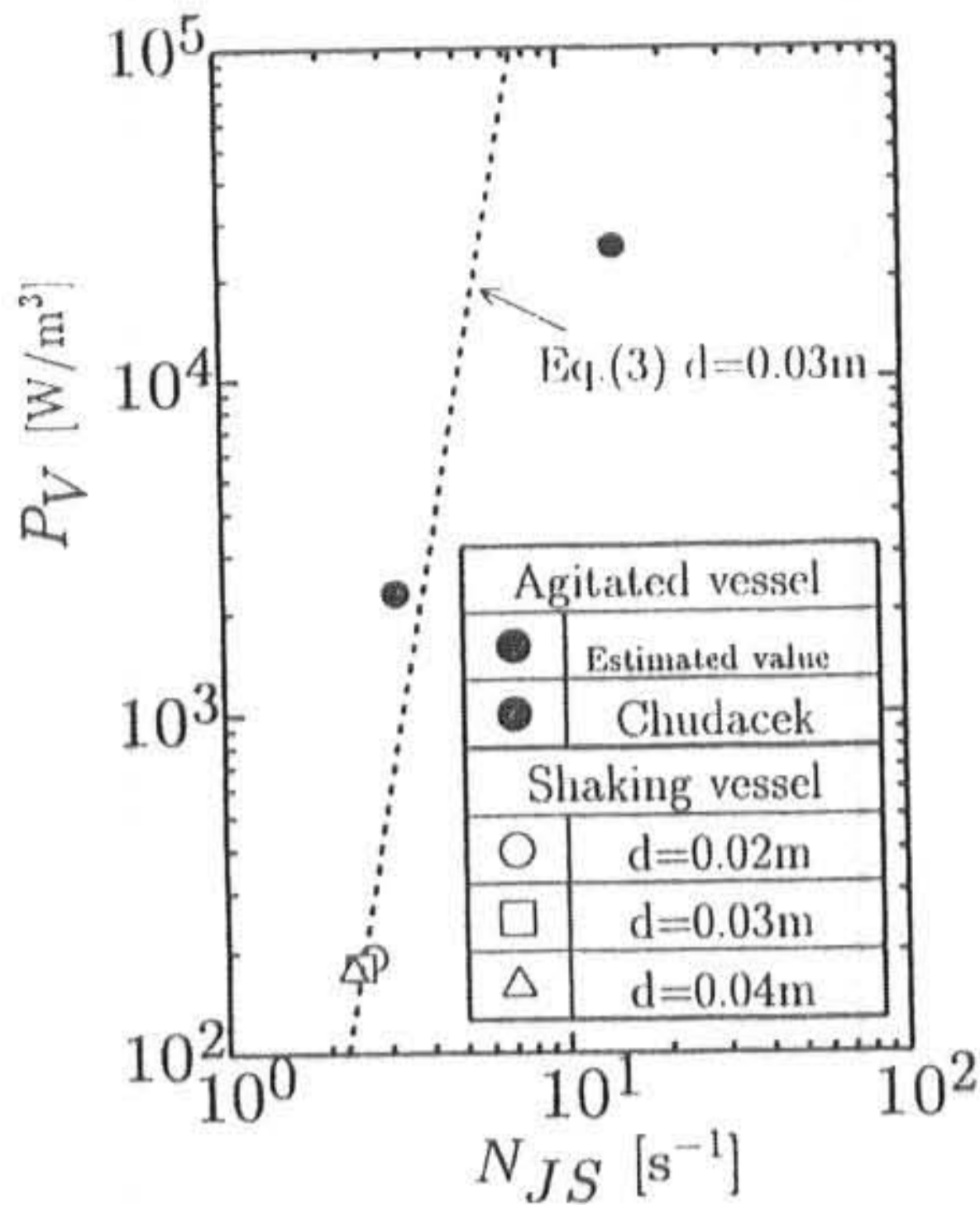


Fig. 7. Comparison of suspension power of shaking agitation with that of impeller agitation at critical suspension condition.

Table 2. Experimental Conditions

	Kamei et. al.	Chudacek
D[m]	0.173	1.0
d[m]	0.08	0.33
ν [m ² -s ⁻¹]	0.9×10^{-6}	0.9×10^{-6}
ρ_L [kg-m ⁻³]	1000	1000
ρ_p [kg-m ⁻³]	2845	2650
d_p [μ m]	460	290
X[wt%]	16	16

Fig. 7로 부터 같은 크기의 교반조 및 유체에 같은 입자를 부유화 시켰을 때 진동교반의 부유화 한계동력이 작음을 알 수 있다. 그러나 앞에서 이야기한 것처럼 임펠러 교반과 진동교반에서 입자의 부유상태가 다르므로 임펠러 교반과 같은 형태의 부유상태를 얻기 위해서는 N_{JS} 의 거의 1.5~2배의 회전수가 필요하다. 따라서 Fig. 7로 부터 살펴보면 임펠러 교반과 같은 형태의 부유상태를 얻기 위한 동력은 거의 같다고 생각된다. 따라서 진정한 성능비교를 위

해서는 고-액간의 물질이동특성을 비교, 검토할 필요가 있다.

4. 결론

본 연구에서 고-액계의 진동교반에서의 입자의 부유상태, 완전부유 한계회전수(N_{JS}) 및 부유화 한계동력에 대해서 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 완전부유화 한계회전수(N_{JS})를 Zwietering의 정의에 따라서 측정된 결과 진동교반에서의 입자부유상태는 임펠러 교반에서의 상태와 다르고 거의 모든 입자가 용기 바닥을 구르고 있음을 알 수 있다.
2. 완전부유화 한계회전수(N_{JS})의 실험값은 Baldi 등의 입자부유이론으로 부터 도출한 상관식에 간단한 입자 물성에 관한 보정을 하므로써 양호하게 상관되는 것을 알았다.
3. 진동교반과 임펠러 교반에서의 부유화한계동력을 비교한 결과 진동교반에서의 부유화한계동력이 작음을 알 수 있었다.

[감사] 본 연구를 수행할 수 있도록 파견근무를 허락해 주신 상주대학교 총장님께 감사드리며 또한 일본학술진흥회의 외국인 특별연구원으로서 받아준 Hiraoka Setsuro 선생에게 감사드립니다.

NOMENCLATURES

D : shaking vessel diameter	[m]
d : circulating diameter	[m]
d_{imp} : impeller diameter	[m]
d_p : particle diameter	[m]
F_r : Froude number(= N^2D/g)	[-]
g : gravitational acceleration	[m-s ⁻²]
H : liquid height	[m]

k : mass transfer coefficient	$[m \cdot s^{-1}]$
N : circulating frequency	$[s^{-1}]$
N_c : critical circulating frequency for mixing	$[s^{-1}]$
N_{JS} : critical circulating frequency for complete suspension	$[s^{-1}]$
N_p : power number ($=P/\rho N^3 D^5$)	$[-]$
P : power consumption	$[W]$
P_v : power consumption per unit volume of liquid ($=P/(\pi/4D^2H)$)	$[W \cdot m^{-3}]$
P_{VJS} : suspension power consumption per unit volume of liquid	$[W \cdot m^{-3}]$
Re : Reynolds number ($=Nd^2/\nu$)	$[-]$
X : particle weight percent	$[wt\%]$
$\Delta\rho$: density difference ($=\rho_p - \rho_L$)	$[kg \cdot m^{-3}]$
ϵ : dissipated power per unit mass of liquid	$[W \cdot kg^{-1}]$
ρ, ρ_L : liquid density	$[kg \cdot m^{-3}]$
ρ_p : particle density	$[kg \cdot m^{-3}]$
μ : viscosity	$[Pa \cdot s]$
ν : kinematic viscosity of liquid	$[m^2 \cdot s^{-1}]$

REFERENCES

- Biggs, R. D., "Mixing rates in stirred tanks", *AIChE J.*, **9**, 636-640(1963)
- Metzner, A. B. and Taylor, J. S., "Flow Patterns in Agitated Vessels", *AIChE J.*, **6**, 109-114(1960)
- Gardner, J. and Tatterson, G., "Characterization of Mixing in Shaker Table Containers", *Biotech. Bioeng.*, **39**, 794-797(1992)
- Rhodes, R. P. and Garden Jr., R. P., "Characterization of Agitation Effects in Shaken Flasks", *Ind. Eng. Chem.*, **49**, 1233-1236(1957)
- Kamiwano, M., Yamamoto, K. and Nagata, S., "Mixing Performance of various Agitators", *Kagaku Kogaku*, **31**, 365-372(1967)
- Sano, Y. and Usui, H., "Interrelations among Mixing Time, Power Number and Discharge Flow Rate Number in Baffled Mixing Vessels", *J. Chem. Eng. Japan*, **18**, 47-52(1985)
- 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)
- Koh, S. T., Hiraoka, S., Tada, Y., Aragaki, T., Hijikata, T. and Yamaguchi, T., "Visualization of Jet Flow in Mixing Vessel with a Nozzle Rotating Around the Vessel Axis", *J. Chem. Eng. Japan*, **24**, 760-766(1991)
- Koh, S. T., Hiraoka, S., Tada, Y., Takahashi, T. and Yamaguchi, T., "Heat Transfer Coefficient and Mixing Time in a Cylindrical Mixing Vessel with Axial Jet Nozzles", *J. Chem. Eng. Japan*, **24**, 506-511(1991)
- Koh, S. T., Hiraoka, S., Yamada, I., Tada, Y., Aragaki, T. and Takahashi, T., "Jet Mixing of Liquid in a Rotating Cylindrical Vessel", *J. Chem. Eng. Japan*, **22**, 611-615(1989)
- Maruyama, T., Kamishima, N. and Mizushima T., *J. Chem. Eng. Japan*, **17**, 120-126(1982)
- Maruyama, T., Ban, T. and Mizushima T., *J. Chem. Eng. Japan*, **15**, 342-348 (1980)
- Baldi, G., Conti, R. and Alaria, E., "Complete Suspension of Particles in Mechanically Agitated Vessels", *Chem. Eng. Sci.*, **33**, 21-25(1978).
- Chudacek, M. W., "Solid Suspension Behavior in Profiled Bottom and Flat Bottom Mixing Tank", *Chem. Eng. Sci.*, **40**, 385-392(1985)

15. Nienow, A. W. : "Suspending Solid Particles in Turbine Agitated Baffled Vessels", Chem. Eng. Sci., **23**, 1453-1459(1968)
16. Nienow, A. W. : "Dissolution Mass Transfer in a Turbine Agitated Baffled Vessel", Can. J. Chem. Eng., **47**, 248-258(1969)
17. Ohyama, Y. and Endo, K., " On the Rate of Solution of Particulate Solids in the Solid-Liquid Contacting Mixers", Kagaku Kogaku, **20**, 576-581(1956)
18. Zwietering, T. N. : Suspending of Solid Particles in Liquid by Agitators", Chem. Eng. Sci., **8**, 244-253(1958)
19. Musil, L. and Vlk, J., "Suspending Solid Particles in an Agitated Conical-Bottom Tank", Chem. Eng. Sci., **33**, 1123-1131 (1978)
20. Nienow, A. W. and Miles, D., "The Effect of Impeller/Tank Configurations on Fluid-Particle Mass Transfer", Chem. Eng. J., **15**, 13-24(1978)
21. Chapman, C. M., Nienow, A. W. and Middleton, J. C., "particle Suspension in a Gas Sparged Rushton-Turbine Agitated Vessel", Trans. Inst. Chem. Engrs., **59**, 134-137(1981)
22. Kato, Y., Hiraoka, S., Tada, Y., Seiji, S., Ue, T., Koh, S. T. and Yamaguchi, T., "Power Consumption of Horizontally Shaking Vessels with Circulating Motion", Kagaku Kogaku Ronbunshu, **21**, 2, 365-371(1995)
23. Kamei, N., Hiraoka, S., Kato, Y., Tada, Y., Shida, H., Lee, Y. S., Yamaguchi, T. and Koh, S. T., "Power Correlation for Paddle Impellers in Spherical and Cylindrical Agitated Vessels", Kagaku Kogaku Ronbunshu, **21**, 41-48(1995)

- 임펠러 교반에서 Baldi 등의 부유모델 에 의한 N_{JS} 의 상관식 유도 -

Baldi 등의 부유모델로부터 다음식이 성립한다고 가정한다.

$$d_p \Delta \rho g \propto \rho_L (\epsilon d_p)^{2/3} \quad (A-1)$$

위 식을 변형하면 다음식으로 된다.

$$\epsilon \propto d_p^{1/2} (\Delta \rho g / \rho_L)^{3/2} \quad (A-2)$$

보통 임펠러 교반에서의 동력수 N_P 는 다음식으로 주어진다.

$$N_P = \frac{P}{\rho N^3 d_{imp}^5} \quad (A-3)$$

여기서 $H=D$ 이므로 $P_V (\propto P/D^3)$ 에 대하여 풀면 다음식으로 된다.

$$P_V \propto \frac{N_P \rho N^3 d_{imp}^5}{D^3} \quad (A-4)$$

따라서 다음식(A-5)

$$\epsilon \propto P_{VJS} / \rho_L \propto \frac{N_P N_{JS}^3 d_{imp}^5}{D^3} \quad (A-5)$$

로부터 다음식(A-6)이 도출된다.

$$\frac{(\Delta \rho g)^{2/3}}{(\rho_L)^{2/3}} \frac{D^3 d_p^{1/2}}{N_P N_{JS}^3 d_{imp}^5} \quad (A-6)$$

= constant = Z

따라서 N_{JS} 에 관하여 정리하면 본문 중의 식(4)와 같은 식이 도출된다.

$$N_{JS} = \frac{1}{Z N_P^{1/3}} \frac{d_p^{0.17} (g \Delta \rho / \rho_L)^{0.5} D}{d_{imp}^{1.67}} \quad (4)$$

(1999년 5월15일 접수, 1999년 10월10일 채택)

APPENDIX A