

여러 가지 교반조에서 Paddle 임펠러의 교반소요동력 특성

이영세[†] · 加藤禎人^{*}

상주대학교 응용화학공학부, *일본 나고야공업대학 생명물질공학과
(2005년 7월 11일 접수, 2005년 8월 4일 채택)

Characteristic of Power Consumption for Paddle Impeller in Various Agitated Vessels

Young Sei Lee[†] and Yoshihito Kato^{*}

School of Applied Chemical Engineering, Sangju National University, Sangju 742-711, Korea

*Department of Life & Material Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya 466-8555, Japan

(Received July 11, 2005; accepted August 4, 2005)

구형교반조 및 원통교반조에서 paddle 임펠러의 교반소요동력을 넓은 범위의 레이놀즈수 영역에서 측정하였다. 구형교반조는 교반조 높이가 직경과 같고, 구형교반조의 체적과 같은 원통교반조의 겉보기 직경을 이용하여 구형교반조 및 원통교반조 모두에 적용할 수 있는 교반소요동력 상관식을 구했다. 이 상관식은 Nagata 등 및 Hixson 등의 실험결과에도 양호하게 상관되었다. 또한 임계레이놀즈수는 본 상관식에서 얻은 층류영역에서 난류영역으로의 전이에 관한 계수 C_r 에 잘 상관되었다.

Power consumption for paddle impeller in spherical and cylindrical agitated vessel was measured over a wide range of Reynolds number from laminar to turbulent flow regions. The power correlation was obtained for both spherical and cylindrical vessels, where the apparent diameter of the spherical vessel was equal to the diameter of the cylindrical vessel (height equal to its diameter and had the same volume as the spherical vessel). The power consumption well correlated with the experimental results of Nagata, *et al.* and Hixson-Baum. Also the critical Reynolds number was directly related to the transition coefficient C_r characterizing the transition from a laminar to a turbulent flow region in the correlation proposed here.

Keywords: agitated vessel, critical reynolds number, power correlation, paddle impeller, characterizing transition coefficient

1. 서 론

교반조작에서 교반소요동력은 기계적 설계상 중요할 뿐만 아니라 교반장치의 성능을 평가, 검토하는데 있어 매우 중요한 인자이다. 특히 paddle 임펠러는 가장 일반적인 교반 임펠러 중의 하나이고, 오래 전부터 많은 연구가 이루어져 왔고 동력상관식에 관한 연구도 많이 제출되고 있다[1-6]. 그러나 이들의 대부분이 원통교반조내의 paddle 임펠러에 대한 것이고 구형교반조에 관한 보고는 전무하다. 또한 원통교반조에서의 paddle 임펠러에 대해 제출되고 있는 동력상관식도 완전방해관 조건 하[7,8]의 것이 많고, 방해관이 없는 조건에서는 2단 paddle 임펠러에 대한 Nagata[9]의 식과 Hiraoka 등[10,11]의 층류영역 및 난류영역에서의 상관식을 제출하고 있는 정도이다. 그러나 이들의 식은 날매수가 다른 임펠러에 적용하면 상당한 오차가 생긴다. 또한 전이영역에서는 적용할 수 없는 등 여러 가지의 문제점이 있다.

따라서 본 연구에서는 구형교반조에서의 paddle 임펠러의 소요동력

을, 층류영역에서 난류영역까지 넓은 범위에 걸쳐 측정하고, 동시에 원통교반조에서의 결과와 비교, 검토하여 양자의 정량적인 관계를 명확히 하고 paddle 임펠러의 소요동력을 광범위한 레이놀즈수 범위 및 임펠러 형상에 따른 동력상관식을 얻는데 목적이 있다.

2. 실험장치 및 실험방법

실험에 사용한 실험장치도를 Figure 1에 나타내었다.

교반조는 내경 190, 163 mm의 구형교반조 및 내경 170, 145 및 130 mm의 방해관 없는 원통교반조를 사용하고, 교반액으로는 이온교환수 및 글리세린수용액을 이용하였다. 또 액의 높이는 각각 내경과 같게 했다. 교반 임펠러는 임펠러 직경, 날폭, 날매수가 다른 여러 가지 paddle 임펠러를 교반조 중앙에 설치하여 실험했다. 교반액의 물성 및 교반 임펠러의 치수를 Table 1 및 2에 나타내었다.

실험은 우선 교반조에 교반액을 넣고, 액의 온도를 30 °C로 유지하여 교반을 하며 임펠러 회전수를 점진 변화시킨다. 그 때 마다 축 토크를 토크미터(MIXING TORQUE ST-1000, Satake화학공업(주)제)를

† 주 저자(e-mail: yslee@sangju.ac.kr)

Table 1. Physical Properties of Agitated Liquid (30°C)

Agitated liquid	Density × 10 ³ [kg/m ³]	Viscosity [pa·s]
water	0.996	0.798 × 10 ⁻³
35 wt% glycerol aq. solution	1.08	2.23 × 10 ⁻³
50 wt% glycerol aq. solution	1.12	4.23 × 10 ⁻³
70 wt% glycerol aq. solution	1.18	1.41 × 10 ⁻²
90 wt% glycerol aq. solution	1.23	1.10 × 10 ⁻¹
pure glycerol	1.25	5.31 × 10 ⁻¹
87 wt% millet jelly aq. solu.	1.36	1.04
91 wt% millet jelly aq. solu.	1.38	3.21

Table 2. Dimension of Impellers

D=0.170 m		D=0.145 m		D=0.130 m		d [mm]	b [mm]	n _p
d/D	b/D	d/D	b/D	d/D	b/D			
0.335	0.112	0.393	0.131	0.438	0.146	57	19	6
0.447	0.112	0.534	0.131	0.585	0.146	76	19	6
0.559	0.112	0.655	0.131	0.731	0.146	95	19	6
0.447	0.165	0.524	0.193	0.585	0.215	76	28	6
0.447	0.224	0.524	0.262	0.585	0.292	76	38	6
0.447	0.112	0.524	0.131	0.585	0.146	76	19	2
0.447	0.112	0.524	0.131	0.585	0.146	76	19	4
0.447	0.112	0.524	0.131	0.585	0.146	76	19	8

이용하여 측정하였다. 이 조작을 모든 교반액, 교반 임펠러에 대해 실험하였다. 교반소요동력은 축 토크의 측정값으로부터 다음 식에 의해서 얻었다.

$$P = 2\pi NT \text{ [W]} \quad (1)$$

또 교반조의 동력특성은 아래에 나타난 것과 같이 2개의 무차원수를 이용하면 구할 수 있다.

$$N_p = \frac{P}{\rho N^2 d^5} \text{ [-]} \quad (2)$$

$$Re_d = \frac{d^2 N \rho}{\mu} \text{ [-]} \quad (3)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 층류영역의 동력특성

일반적으로 층류영역에서의 동력은 점도에 비례하고, 다음 관계가 성립한다.

$$N_p \cdot Re_d = A \quad (4)$$

$$P = A \cdot \mu N^2 d^3 \quad (5)$$

여기서, A는 임펠러 형상과 치수에 의해 결정되는 장치상수이고, 원통교반조의 paddle 임펠러에 관해서는 지금까지 Nagata[9]가 식

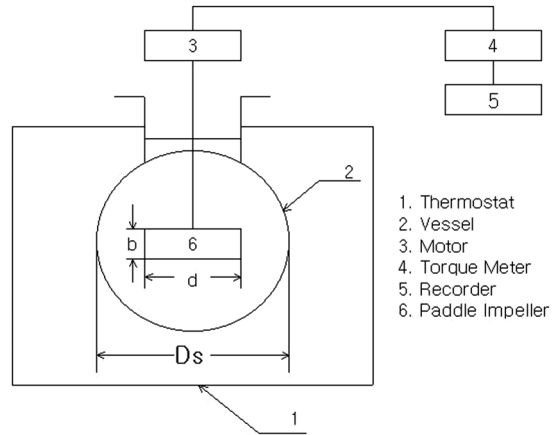


Figure 1. Schematic experimental apparatus.

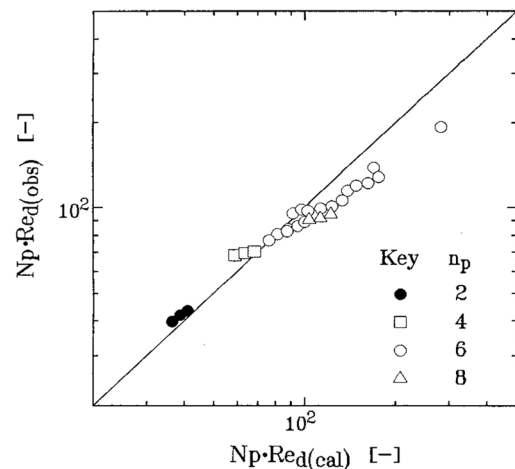


Figure 2. Comparison of power input calculated with Eq. (6), $N_p \cdot Re_d(cal)$, to observed one, $N_p \cdot Re_d(obs)$, for paddle impeller in cylindrical vessel.

(6)을, Hiraoka 등[10,11]이 식 (7) 및 식 (8)을 제출하였다.

$$A = 14 + \frac{6}{D} \{670(d/D - 0.6)^2 + 185\}; n_p = 2 \quad (6)$$

$$A = 13 + 34 \left(\frac{n_p b}{D} \right) \left\{ \frac{(D/d)^2}{D/d - d/D} \right\} \quad (7)$$

$$A = \left\{ 13 + \frac{34}{\eta} \left(\frac{n_p b}{D} \right) \frac{(D/d)^2}{D/d - d/D} \right\} \left(\frac{n_p}{2} \right)^{1/3} \quad (8)$$

$$\eta = 1 + \exp\{-10(D/d - 1)\}$$

식 (6)에서 날매수 $n_p=2$ 이외의 경우에는 날 폭 $b'=(n_p \cdot b)/2$ 를 가진 2매 날 paddle 임펠러를 이용하였다. 또 식 (8)에서의 η 는 임펠러의 d/D 가 클 때의 보정계수로 본 실험범위에서는 대략 1이다.

Figure 2, 3 및 Figure 4에 식 (6), (7) 및 식 (8)로부터 각각 얻은 $N_p \cdot Re_d$ 의 값과 본 실험에 의한 $N_p \cdot Re_d$ 의 값을 나타내었다.

Figure 2 및 Figure 3은 날 매수가 2개인 경우에는 거의 계산값과 실험값이 일치하지만 n_p 가 증가하면 계산값이 크게 되는 경향이 있다.

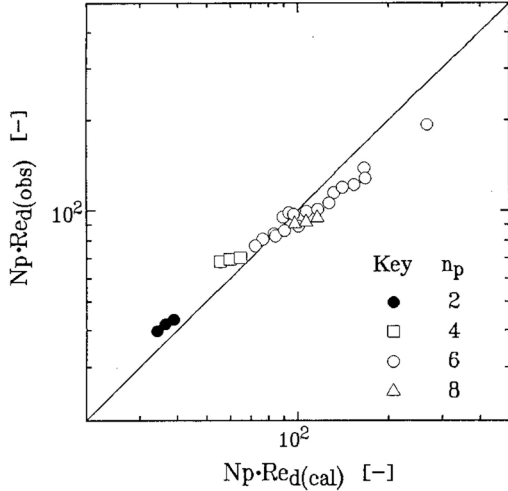


Figure 3. Comparison of power input calculated with Eq. (7), $N_p \cdot Re_d(cal)$, to observed one, $N_p \cdot Re_d(obs)$, for paddle impeller in cylindrical vessel.

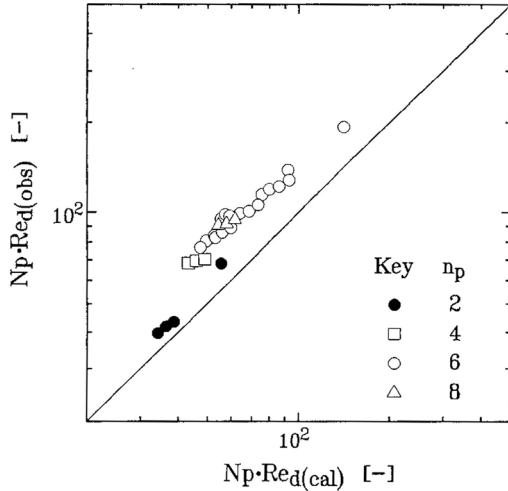


Figure 4. Comparison of power input calculated with Eq. (8), $N_p \cdot Re_d(cal)$, to observed one, $N_p \cdot Re_d(obs)$, for paddle impeller in cylindrical vessel.

또 같은 날 매수에서도($n_p=6$ 의 경우) $N_p \cdot Re_d$ 의 값이 크게 뒀에 따라 계산값과 실험값의 차이가 크게 나타났다. 이것은 식 (6) 및 식 (7)의 제 2항에 대한 n_p 의 기여가 너무 크기 때문이라고 생각된다. Figure 4에서는 $n_p=2$ 이외에는 계산값이 상당히 작는데 그 차이의 정도는 같은 날 매수에서는($n_p=6$ 의 경우), d/D , b/D 에 관계없이 일정하다고 생각할 수 있다. 이것으로부터 제 2항에 대한 n_p 의 기여는 없고, 제 1항에 대한 기여가 작다는 것을 알았다. 따라서 제 1항의 n_p 의존성을 명확히 하기 위하여 날 매수에 따른 $N_p \cdot Re_d(obs) - A2$ 에 대한 관계를 Figure 5에 나타내었다.

$N_p \cdot Re_d(obs)$ 는 날 매수가 다른 paddle 임펠러의 실험값을 이용했다. 이 결과로부터 제 1항의 n_p 의존성을 고려하여 다음과 같은 상관식 (9)를 제출하였다.

$$A = 14 \left\{ 1 + 2.5 \ln \left(\frac{n_p}{2} \right) \right\} + \frac{34}{\eta} \left(\frac{2b}{D} \right) \frac{(D/d)^2}{D/d - d/D} \left(\frac{n_p}{2} \right)^{1/3} \quad (9)$$

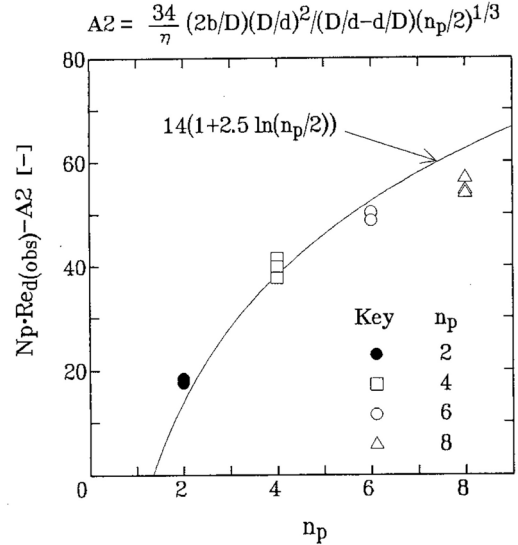


Figure 5. Correlation of the first term in Eq. (8) with number of impeller blade.

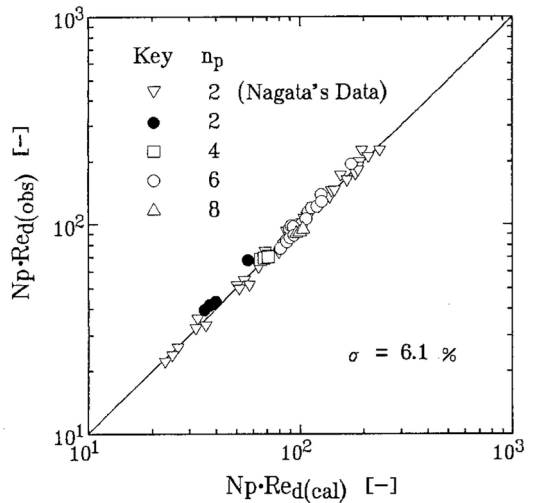


Figure 6. Comparison of power input calculated with Eq. (9), $N_p \cdot Re_d(cal)$, to observed one, $N_p \cdot Re_d(obs)$, for paddle impeller in cylindrical vessel.

여기서, 제 1항에서의 14 및 2.5는 본 실험의 결과 및 Nagata[9]의 data를 이용하여 최소 자승법으로 구했다.

Figure 6에 식 (9)로부터 구한 계산값과 실험값의 관계를 나타내었다. 여기서 그림중의 σ 는 다음 식으로 표시되는 평균자승 편차이다.

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{N_p \cdot Re_d(obs) - N_p \cdot Re_d(cal)}{N_p \cdot Re_d(obs)} \right)^2 / (n-1)} \times 100 \quad (10)$$

Figure 6으로부터 식 (9)가 Nagata[9]의 data를 포함하여 어떠한 날 매수에서도 실험값을 양호하게 상관하고 있는 것을 알았다.

Figure 7에 식 (9)로부터 구한 계산값과 구형교반조에서의 실험값을 plot 하였다. 여기서 식 (9) 중의 교반조 직경 D 는 구형교반조의 실제 직경 D_s 와 겉보기 원통교반조 직경 D_a , 2가지를 고려했다. 구형교반조의 직경은 식 (11)과 같이 교반조 체적이 구형교반조 체적과 같은

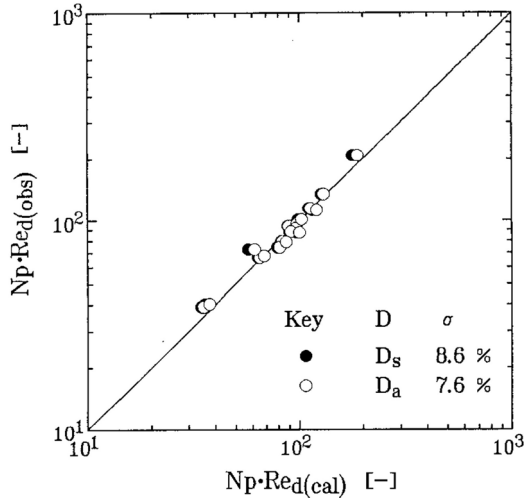


Figure 7. Comparison of power input calculated with Eq. (9), $N_p \cdot Re_d(\text{cal})$, to observed one, $N_p \cdot Re_d(\text{obs})$, for paddle impeller in spherical vessel.

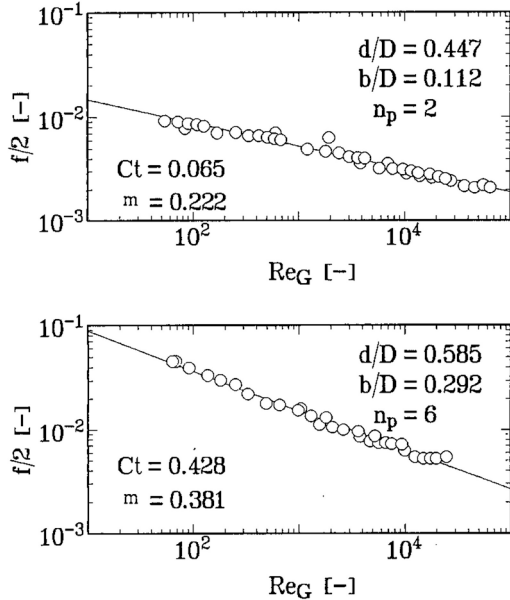


Figure 8. Correlation of friction factor with modified Reynolds number for paddle impeller in cylindrical vessel.

원통교반조의 결보기 직경 Da 를 이용하였다.

$$Da = (4V/\pi)^{1/3} \approx (2/3)^{1/3} D_s \quad (11)$$

Figure 7로부터 원통교반조에 대한 상관식인 식 (9)를 이용하면, 구형교반조에서의 결과도 양호하게 상관되는 것을 알았다. 또 앞으로 구형교반조의 조경 D 는 다음과 같은 이유로 Da 를 이용하기로 한다.

첫째, Figure 7에 나타난 것과 같이 D_s 를 이용하는 것보다, Da 를 이용하는 것이 편차가 작아서 상관이 양호하고 둘째, 교반조의 scale-up은 단위체적당 소요동력을 일정하게 취급하는 것이 많아 체적기준의 교반조 직경인 Da 를 이용하면 원통교반조와 같이 scale-up을 할 수 있기 때문에 편리하므로 Da 를 이용한다.

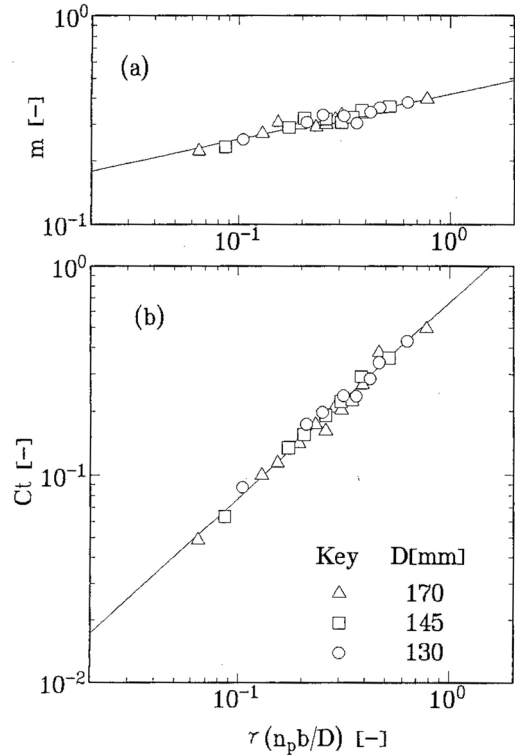


Figure 9. Correlation of the exponent m (a) and the coefficient C_t in Eq. (12) with the similarity condition parameter for paddle impellers in cylindrical vessel.

3.2. 난류영역의 동력특성

난류영역에서 paddle 임펠러의 동력상관은 방해판이 없는 경우 다음과 같은 식 (12)로 나타난다. 식 중의 C_t , m 은 식 (13)에 나타나는 임펠러 파라메타와 관계있다고 Hiraoka 등[11]이 보고하였다.

$$f = C_t (Re_G)^{-m} \quad (12)$$

$$\gamma(n_p \cdot b/D) = \left\{ (d/D)^5 \ln(D/d) / \beta^5 \right\}^{1/3} \left(\frac{n_p b}{D} \right) \quad (13)$$

$$\beta = 2 \ln(D/d) / (D/d - d/D)$$

여기서, f 는 마찰계수, Re_G 는 수정 Reynolds수이고 각각 동력수, 임펠러 Reynolds수로 다음의 식 (14) 및 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f/2 = N_p \frac{4(d^2/D^2H)}{\pi^4 \beta^2 (1 + \alpha)} \quad (14)$$

$$Re_G = Re_d \frac{\pi n}{4} \left(\frac{\beta D}{d} \right) \ln \left(\frac{D}{d} \right) \quad (15)$$

α 는 교반조 바닥으로 움직이는 토크와 측면으로 움직이는 토크의 비이다.

실험에 이용한 원통교반조에서의 결과를 식 (12)의 f 와 Re_G 에 대해 상관한 그림을 Figure 8에 나타내었다. 여기서 그림 중의 C_t 및 m 값은 $Re_G \geq 50$ 에서의 데이터를 최소제곱법으로 구하였다. Figure 8로부터 난류영역의 동력특성은 식 (12)의 형태로 충분히 나타낼 수 있었다.

또한 최소제곱법을 모든 임펠러에 대해 행하여 얻은 C_t 및 m 을 $\gamma(n_p b/D)$ 에 대해 plot 한 것을 Figure 9(a) 및 9(b)에 나타내었다. 여기

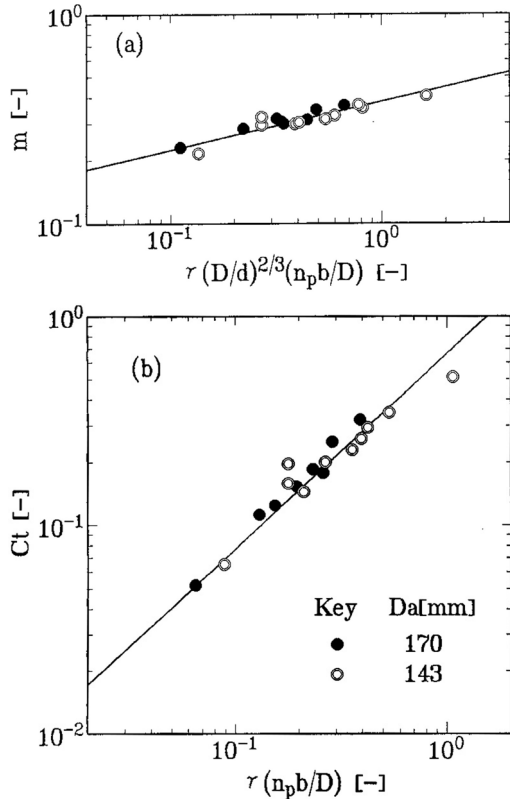


Figure 10. Correlation of (a) m in Eq. (12) with $\gamma (D/d)^{2/3}(n_p b/D)$ and (b) C_t in Eq. (12) with $\gamma (n_p b/D)$ for paddle impellers in spherical vessel.

서 그림 중의 실선은 각각 최소제곱법으로 구한 것이다.

이 그림으로부터 C_t 와 m 모두 $\gamma (n_p b/D)$ 에 양호하게 상관되고 있는 것 같이 보이지만 m 에 대해서는 Figure 9(a)의 y축 스케일을 크게 하면 약간의 흐트러짐이 생긴다. 이를 해소하기 위해 x축을 $\gamma (D/d)^{2/3}(n_p b/D)$ 로 수정하면 흐트러짐이 해소되는 것을 알았다. 이로부터 C_t 및 m 에 대한 상관식으로 아래의 식 (16) 및 식 (17)을 제안하였다.

$$C_t = 0.663\{\gamma(n_p b/D)\}^{0.584} \tag{16}$$

$$m = 0.382\{\gamma(D/d)^{2/3}(n_p b/D)\}^{0.230} \tag{17}$$

구형교반조에 대해서도 식 (12)의 형태로 결과를 정리하여, C_t 및 m 을 각각 $\gamma (D/d)^{2/3}(n_p b/D)$, $\gamma (n_p b/D)$ 로 상관한 그림을 Figure 10(a) 및 10(b)에 나타내었다.

여기서 임펠러 직경은 앞서 기술한 것과 같이 Da 를 이용했다. 그림 중의 실선은 식 (16) 및 식 (17)을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 난류영역에서도 구형교반조의 동력특성은 겉보기 원통교반조 직경 Da 를 이용하여 원통교반조에서의와 같은 상관식으로 나타낼 수 있다는 것을 알았다.

3.3. 전이영역의 동력특성

전이영역에서 paddle 임펠러의 동력특성에 대해서는 지금까지 명확하게 발표된 것은 없고, 소요동력의 추산에 대해서도 식 (18)에 나타난 것과 같은 $n_p = 2$ 의 패들 임펠러를 방해관이 없는 조건에서 나타난 Nagata식[9]을 전이영역에 적용하는 것 이외에 유용한 방법은 없다.

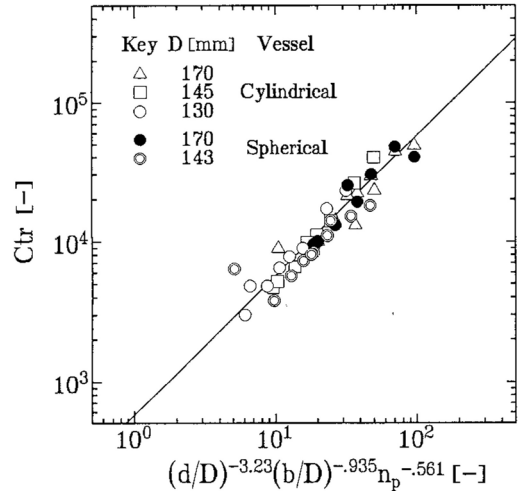


Figure 11. Correlation C_{tr} with the function of exponential from of dimensionless numbers.

$$N_p = \frac{A}{Re_d} + B \left(\frac{10^3 + 1.2 Re_d^{0.66}}{10^3 + 3.2 Re_d^{0.66}} \right)^P \left(\frac{H}{D} \right)^{0.35 + b/D} \tag{18}$$

$$A = 14 + \frac{b}{D} \{670(d/D - 0.6)^2 + 185\}$$

$$B = 10^{1.3 - 4(b/D - 0.5)^2 - 1.14(d/D)}$$

$$P = 1.1 + 4(b/D) - 2.5(d/D - 0.5)^2 - (b/D)^4$$

그러나 Nagata식은 어디까지나 $n_p = 2$ 에 대한 식으로 이 식을 날 배수가 2배 이외의 임펠러에 적용하는 것은 상당히 무리가 있다. 따라서 본 연구에서는 층류 및 난류에서의 동력상관식을 결합하여, 식 (19)와 같은 형태로 상관하는 것으로 생각했다.

$$f/2 = \frac{C_L}{Re_G} + \frac{C_t}{2} \left(\frac{C_{tr}}{Re_G} + Re_G \right)^{-m} \tag{19}$$

여기서 C_L 는 마찰계수와 수정 Reynolds 수의 곱으로 나타나는 층류 영역의 장치상수이고, 식 (20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_L = f/2 \cdot Re_G = A \cdot \frac{\eta(d^2/DH) \ln(D/d)}{\pi^2 \beta(1+a)} \tag{20}$$

그리고 C_{tr} 은 전이영역에 관계하는 인자로 이것을 이용하여 전이영역에서의 원통교반조와 구형교반조의 동력특성을 비교하였다. 실험결과를 식 (19)의 형태로 정리하고, 이 오차가 최소가 되도록 결정한 C_{tr} 을 (d/D) , (b/D) 및 n_p 에 대해 plot 한 것을 Figure 11에 나타내었다.

황축에서의 각 변수의 지수는 원통교반조에서의 결과를 최소제곱법에 의하여 구했다. 또 그림 중의 실선도 원통교반조에서의 결과를 최소제곱 하여 구한 것으로 식 (21)에 나타내었다.

$$C_{tr} = 576(d/D)^{-3.23}(b/D)^{-0.935}n_p^{-0.561} \tag{21}$$

Figure 11로부터 원통교반조에서 전이영역의 파라메타 C_{tr} 은 식 (21)로 양호하게 상관되었고, 또 구형교반조의 결과도 원통교반조에서의 동일한 상관식으로 양호하게 상관되는 것을 알았다.

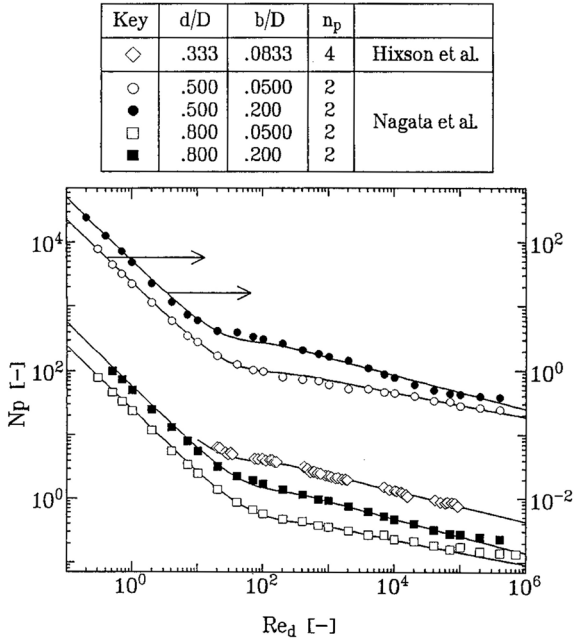


Figure 12. Comparison of Eq. (22) to experimental data observed by Hixson et al. and Nagata et al. in power correlation diagram.

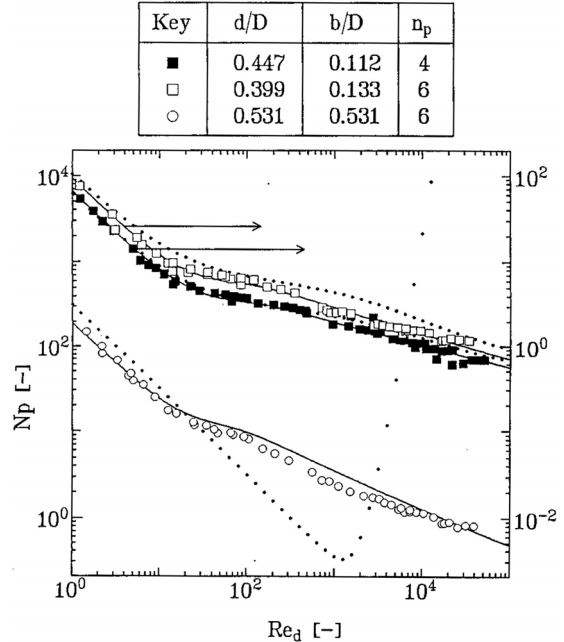


Figure 14. Comparison of Eq. (22) and Nagata's Eq. to experimental data for paddle impellers in spherical vessel.

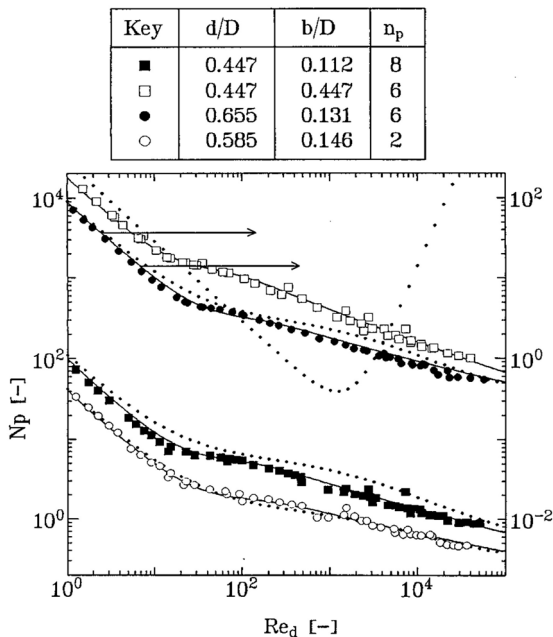


Figure 13. Comparison of Eq. (22) and Nagata's Eq. to experimental data for paddle impellers in cylindrical vessel.

3.4. 동력상관식의 유도

제출한 동력상관식을 정리하여 본 실험결과 및 다른 연구자의 실험 결과에 적용하였다.

앞절에서 나타난 바와 같이 원통교반조 및 구형교반조에서의 패들 임펠러의 동력상관식은 아래와 같은 식 (22)로 나타난다.

$$\frac{f}{2} = \frac{C_L}{Re_G} + \frac{C_t}{2} \left(\frac{Ctr}{Re_G} + Re_G \right)^{-m} \quad (22)$$

$$\frac{f}{2} = N_p \frac{4(d^2/D^2H)}{\pi^4 \beta^2 (1+a)}$$

$$Re_G = Re_d \frac{\pi \eta}{4} \left(\frac{\beta D}{4} \right) \ln \left(\frac{D}{d} \right)$$

$$C_L = \frac{\eta(d^2/DH) \ln(D/d)}{\pi^2 \beta (1+a)} (N_p \cdot Re_d)$$

$$N_p \cdot Re_d = 14 \left[1 + 2.5 \ln \left(\frac{n_p}{2} \right) \right] + \frac{34}{\eta} \left(\frac{2b}{D} \right) \frac{(D/d)^2}{D/d - d/D} \left(\frac{n_p}{2} \right)^{1/3}$$

$$Ct = 0.663 \{ \gamma (n_p b/D) \}^{0.934}$$

$$m = 0.382 \{ \gamma (D/d)^{2/3} (n_p b/D) \}^{0.230}$$

$$Ctr = 576 (d/D)^{-3.23} (b/D)^{-0.935} n_p^{-0.531}$$

Hixson 등[13] 및 Nagata[9]의 원통교반조에서의 실험결과를 Figure 12에 나타내었다. 그림 중의 실선은 식 (22)를 각각의 임펠러에 대해 적용한 것이다. 유도한 상관식 (22)는 임펠러 직경, 날 폭, 날 매수에 상관없이 넓은 범위에서 실험 데이터를 양호하게 상관하였다.

Figure 13에 본 실험에서의 원통교반조의 결과를 나타내었다. 그림 중의 실선은 식 (22), 점선은 Nagata 식을 각각의 임펠러에 적용시킨 것이다.

Figure 13으로부터 식 (22)가 임펠러 형상에 상관없이 양호하게 실험결과를 상관하고 있음을 알 수 있었다.

또 날 매수 2매 임펠러에서도 Nagata식과 실험값과 일치하고 있고, 더구나 Nagata식에서는 상관되지 않는 임펠러(key : □)에서도 양호하게 상관을 하고 있는 것으로부터 식 (22)가 원통교반조에서의 패들 임펠러의 동력상관식으로 충분히 유용하다는 것을 알았다.

구형교반조에서의 실험결과를 Figure 14에 나타내었다. 그림 아래 쪽에 나타난 임펠러(key : ○)는 본 실험 결과 중에서 가장 오차가 큰 것으로 이것은 원통조의 실험범위를 넘는 대형 임펠러(b/D=0.531, d/D=0.531)로 상관에 무리가 있다고 사료된다.

그러나 큰 벗어남은 없고 또 다른 임펠러는 양호하게 상관하고 있

으므로 구형교반조에서의 패들 임펠러의 소요동력도 식 (22)로 나타낼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 원통교반조와 구형교반조에서 패들 임펠러의 소요 동력을 층류영역에서 난류영역까지 넓은 범위에 걸쳐서 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 구형교반조의 직경 D 대신에 겉보기 원통교반조의 직경 Da를 이용해도 층류, 난류 및 전이영역 어느 범위에서도 원통교반조와 같은 동력 특성을 나타내었고, 또한 동일한 상관식으로 상관 된다는 것을 알았다.

(2) 원통교반조에서의 결과를 기초로 층류영역에서 난류영역까지 넓은 범위에 적용 가능한 동력상관식을 유도하였다.

$$\frac{f}{2} = \frac{C_L}{Re_G} + \frac{C_t}{2} \left(\frac{C_{tr}}{Re_G} + Re_G \right)^{-m}$$

이 상관식은 다른 연구자들의 실험결과와 비교한 결과 본 연구에서 유도한 상관식의 유용성이 확인되었다.

사 용 기 호

A	: value of $N_p \cdot Re_d$ in laminar flow	[-]
B	: parameter in Eq. (1-18)	[-]
b	: impeller width	[m]
b'	: apparent impeller width for double-stage paddle impeller (=2b)	[m]
C_L	: value of $f/2 \cdot Re_G$ in laminar flow defined by Eq. (1-20)	[-]
C_t	: coefficient in Eq. (12)	[-]
C_{tr}	: parameter in Eq. (19) for transient Reynolds number from laminar to turbulent flow	[-]
D	: vessel diameter	[m]
d	: impeller diameter	[m]
Da	: apparent vessel diameter for spherical vessel defined by Eq. (11)	[m]
Ds	: spherical vessel diameter	[m]
f	: friction factor	[-]
H	: liquid height	[m]

L	: distance between two impellers for double-stage impeller	[m]
m	: exponent in Eq. (12)	[-]
N	: rotational speed	[s ⁻¹]
N_p	: power number	[-]
n_p	: number of impeller blade	[-]
P	: power input	[W]
p	: exponent in Eq. (18)	[-]
Re_d	: impeller Reynolds number	[-]
Re_G	: modified Reynolds number	[-]
T	: torque	[N·m]
α	: ratio of torque at bottom wall to that at side	[-]
β	: correction factor defined by Eq. (13)	[-]
γ	: parameter defined by Eq. (13)	[-]
η	: correction factor defined by Eq. (8)	[-]
μ	: fluid viscosity	[Pa·s]
ρ	: fluid density	[kg·m ⁻³]
σ	: standard deviation defined by Eq. (10)	[%]

참 고 문 헌

1. R. D. Biggs, *AIChE J.*, **9**, 636 (1963).
2. A. B. Metzner and J. S. Taylor, *AIChE J.*, **6**, 109 (1960).
3. J. Gardner and G. Tatterson, *Biotech. Bioeng.*, **39**, 794 (1992).
4. R. P. Rhodes and Jr. R. P. Garden, *Ind. Eng. Chem.*, **49**, 1233 (1957).
5. M. Kamiwano, K. Yamamoto, and S. Nagata, *Kagaku Kogaku*, **31**, 365 (1967).
6. Y. Sano and H. Usui, *J. Chem. Eng. Japan*, **18**, 47 (1985).
7. Y. S. Lee, M. G. Kim, and Y. Kato, *HWAHAK KONGHAK*, **39**, 5, 536 (2001).
8. Y. S. Lee, M. G. Kim, and J. S. Kim, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **7**, 1, 18 (1996).
9. S. Nagata, *Mixing, Principles and Applications*, Kodansha, A Halsted Press Book (1975).
10. S. Hiraoka, I. Yamada, and K. Mizoguchi, *J. Chem. Eng. Japan*, **11**, 487 (1978).
11. S. Hiraoka, Y. Yamada, and K. Mizoguchi, *J. Chem. Eng. Japan*, **12**, 56 (1979).
12. J. L. Beckner and J. M. Smith, *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, **44**, 224 (1966).
13. A. W. Hixson and S. J. Baum, *Ind. Eng. Chem.*, **34**, 194 (1942).