

원통 및 구형교반조에서의 2단 Paddle 임펠러에 대한 소요동력 Power Consumption for Double-Stage Paddle Impeller in Cylindrical and Spherical Agitated Vessels

이영세*, 최현국**, 仕田裕貴***
Young-Sei Lee*, Hyun-Kuk Choi**, Hirotaka Shida***

<Abstract>

Power consumption for double-stage 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 which was applied to both spherical and cylindrical vessel, when the apparent diameter of the spherical vessel was equal to the diameter of the cylindrical vessel which had a height equal to its diameter and had the same volume as the spherical vessel. The power consumption for the double-stage impeller was dependent upon the distance of among the impeller in the agitated vessels, as follows:

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

Keywords : *Agitated vessel, Critical Reynolds number, Power correlation, Paddle impeller, Characterizing transition coefficient*

1. 서론

교반 조작은 화학공업에서 가장 잘 이용되어 지는 단위조작의 한 분야이다. 그리고 동력특성, 혼합특성, 이상간의 물질이동특성 등 교반조에서의 여러 특성에 관한 연구도 많이 이루어져 왔다. 그 중에서도 교반 소요 동력을 파악하는 것은 단지 기계의 설계상 중요할 뿐만 아니라, 특히 실험실 레벨에서 플랜트로의 스케일업은 주로 동력기준으로 행하여지 때문에 장치

형상의 선정과 동력의 설정이 교반 효과를 결정한다고 말해도 과언이 아니다. 그 때문에 소요동력 특성에 관한 연구는 여러 가지 형태의 교반 임펠러에 대해서 제출되고 있다[1-14]. 그러나 이들 연구의 대부분은 원통 교반조를 대상으로 한 것이고, 그 외의 형상의 교반조에 관해서는 각형 교반조를 이용한 연구[1, 12]가 보고되고 있는 정도이고 구형 교반을 대상으로 한 보고는 거의 없다. 그럼에도 불구하고 구형 교반조는 현재 플랜트 등에서 사용되기 시작하

* 상주대학교 응용화학공학부, 부교수, 工博
(주저자: E-mail: yslee@sangju.ac.kr)
** 상주대학교 응용화학공학부, 교수, 工博
*** 일본 나고야공업대학 응용화학과

* School of Applied Chem, Eng., Sangju National University
To whom correspondence should be addressed
E-mail: yslee@sangju.ac.kr

고 있고, 또 실험단계에서는 둥근 플라스크를 사용, 그것을 파일럿 플랜트로 스케일 업 하는 것이 많기 때문에 구형조에 관한 연구 특히 원통 교반조와의 관계를 명확히 하는 것이 요구되고 있다. 특히 교반조 중에서도 2단 혹은 다단 임펠러를 장치한 교반조에서는 각각의 임펠러의 상호작용 때문에 흐름의 기구는 대단히 복잡하다. 그러므로 교반조 내의 유동특성 등 아직 해명되고 있지 않은 것이 많다. 그럼에도 불구하고 2단 혹은 다단 임펠러는 혼합, 열이동, 물질이동 등의 촉진을 위해 또는 공장에서 장치가 차지하는 면적의 감소 등의 여러 가지 목적으로 이용되고 있다.

따라서 본 연구에서는 2단 패들 임펠러에 대해 원통 교반조와 구형교반조의 소요동력 특성의 차이에 대해서 연구한다. 특히 동력상관식에 대해서는 지금까지 Nagata 식을 임펠러 날폭을 2배로 적용하는 정도로 임펠러간 거리가 소요동력에 미치게 하는 영향 등은 고려되고 있지 않기 때문에 본 연구에서는 이들을 고려한 동력상관식을 제출 하는 것을 목적으로 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용한 실험 장치는 2단 패들 임펠러를 장치한 교반조의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

교반조는 내경 190 mm의 구형조 및 내경 170, 145, 130 mm의 방해판 없는 원통조를 사용하고, 교반임펠러는 Table 1에 나타낸바와 같이 상하가 같은 패들 임펠러를 5종류 이용하였으며 또한 임펠러 날폭이 상하의 패들 임펠러의 2배인 하나의 임펠러를 이용하였다.

또 그림에 나타낸바와 같이 상단 임펠러와 하단 임펠러의 교차 각도는 0으로 하고 교반조 중앙으로부터 거리가 각각 같게 되도록 상하에 임펠러를 설치하였다. 여기서 임펠러 사이의 거리 L은 임펠러 중앙에서부터 임펠러 중앙까지의 거리로 했다.

3. 결과 및 고찰

3-1 층류역의 동력특성

층류 영역에서의 패들 임펠러의 소요동력은 $N_p \cdot Red = A$ 라는 형태로 나타낼 수 있고 A

에 대해 다음과 같은 상관식 (1)을 제출했다.

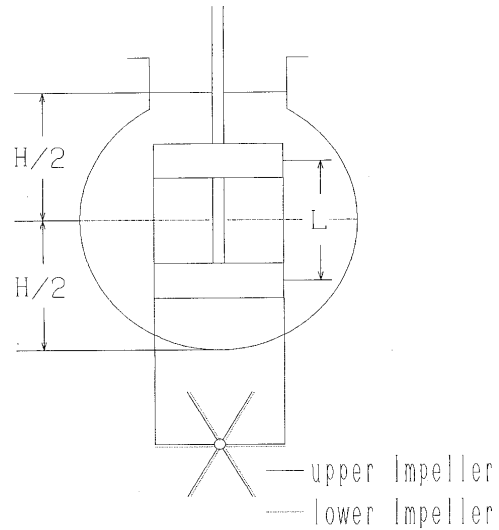


Fig. 1. Spherical vessel with double-stage paddle impeller used in experiment.

Table 1. Dimension of impeller.

No.	D=0.170m		D=0.145m		D=0.130m		d [mm]	b [mm]	n _p
	d/D	b/D	d/D	b/D	d/D	b/D			
1	0.335	0.112	0.393	0.131	0.438	0.146	57	19	6
2	0.447	0.112	0.524	0.131	0.585	0.146	76	19	6
3	0.559	0.112	0.655	0.131	0.731	0.146	95	19	6
4	-	-	0.524	0.193	0.585	0.215	76	28	6
5	0.447	0.224	-	-	-	-	76	38	6
6	0.447	0.112	0.524	0.131	0.585	0.146	76	19	2
7	0.335	0.224	-	-	-	-	57	38	6
8	0.559	0.224	-	-	-	-	95	38	6
9	0.447	0.224	-	-	-	-	76	38	2
10	0.447	0.447	-	-	-	-	76	76	6

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

지금까지 2단 패들 임펠러의 소요 동력은 임펠러 날폭 b를 2배하는 것으로 단단 패들 임펠러의 동력상관식을 이용하여 상관할 수 있다고 알려져 왔다. 따라서 이 방법을 이용하여 식(1) 중의 임펠러 날폭 b를 b'=2b로 하여 얻은 계산값과 실험값과의 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 그럼으로부터 Type I에서 Type V로 갈수록, 즉 임펠러 사이의 거리가 커질수록 실험값은

계산값 보다 크게 나타남을 알았다. 따라서 임펠러 날폭을 2배로 하는 것뿐만 아니라 임펠러 사이의 거리에 대한 영향을 고려할 필요가 있는 것을 알았다.

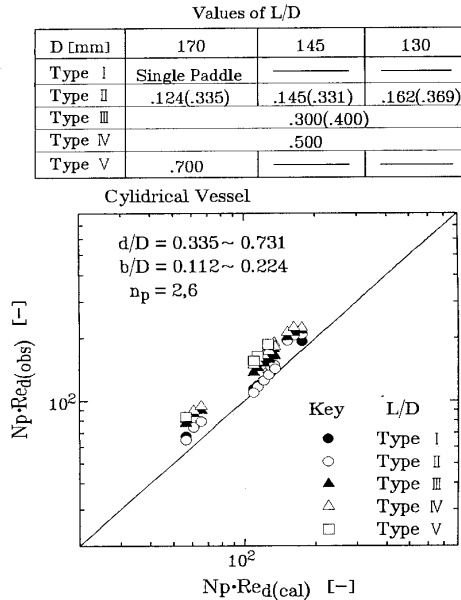


Fig. 2. Comparison of power input calculated with Eq. (1), $N_p \cdot Red(cal)$, to observed one, $N_p \cdot Red(obs)$, for double-stage paddle impellers in cylindrical vessel.

Fig. 3에 임펠러 사이의 거리에 대한 영향을 나타내었다.

여기서 종축의 $(N_p \cdot Red)_2$ 는 2단 임펠러에서의 실험값, $(N_p \cdot Red)_1$ 은 단단 임펠러에서의 실험값을 나타낸 것이다. 또, 임펠러 날폭이 2배인 단단 임펠러는 $L/D = b/D$, 즉 임펠러와 임펠러 사이의 틈이 없는 2단 임펠러로 간주한다. 이 그림으로부터 임펠러 사이의 거리가 작은 곳에서는 임펠러 날폭이 2배인 단단 임펠러와 거의 같은 값을 나타내었고 $L/D = 0.5$ 부근에서 단단 임펠러의 2배의 값을 나타내었다. 그 이하는 거의 변동이 없는 경향인 것을 알 수 있다. 또 원통 교반조와 구형교반조의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 그래서 이들을 고려한 식(1)에 식(2)의 밑줄 친 부분에 나타낸 것 같이 임펠러 사이의 거리에 대한 보정을 하여 2단 임펠러에도 적용 가능하도록 확장했다.

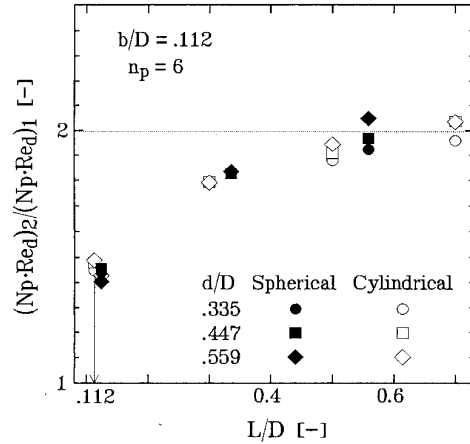


Fig. 3. Correlation of power input ratio of double to single-stages, $(N_p \cdot Red)_2 / (N_p \cdot Red)_1$ with distance between two impellers, L/D , for double-stage paddle impellers.

$$A = 14 \left\{ 1 + 2.5 \ln \left(\frac{n_p}{2} \right) \right\} \left\{ 2 - \left(\frac{L/D - 0.5}{b'/2D - 0.5} \right)^2 \right\} + \frac{34}{n} \left(\frac{2b'}{D} \right) \frac{(D/d)^2}{D/d - d/D} \left(\frac{n_p}{2} \right)^{1/3} \quad (L/D \leq 0.5)$$

$$A = 2 \times 14 \left\{ 1 + 2.5 \ln \left(\frac{n_p}{2} \right) \right\} + \frac{34}{n} \left(\frac{2b'}{D} \right) \frac{(D/d)^2}{D/d - d/D} \left(\frac{n_p}{2} \right)^{1/3} \quad (L/D > 0.5) \quad (2)$$

여기서 b' 는 겉보기 임펠러 날폭이고 $b' = 2b$ 이다. 이 식은 L/D 가 $b'/2D$ 와 같을 때, 결국 임펠러와 임펠러의 틈이 없는 때는 임펠러 날폭이 2배인 단단 임펠러와 같게 되고 L/D 의 증가에 따라 2차 함수적으로 증가하고 $L/D = 0.5$ 에서 단단 임펠러의 2배의 값으로 된다. 또 $L/D > 0.5$ 에서는 2배의 값으로 일정하게 된다. Fig. 4에 식(2)로부터 얻은 계산 값과 원통교반조에서 얻은 실험값과의 관계를 나타내었다. 임펠러 사이의 거리 보정을 함으로써 흐트러짐이 없게 되고, 어떠한 임펠러 사이의 거리에서도 계산 값과 실험값이 거의 일치하고 있는 것을 알았다.

Fig. 5에 식(2)로부터 얻은 계산 값과 구형교반조에서의 실험값의 관계를 나타냈다.

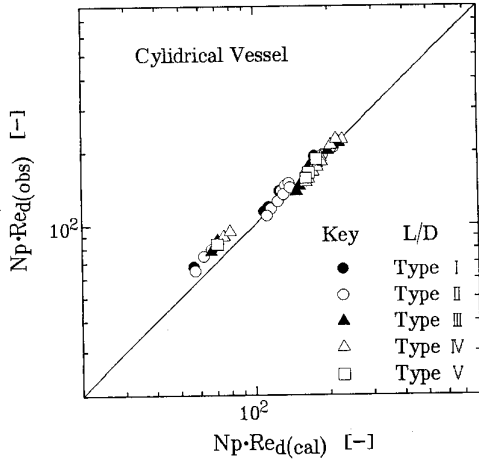


Figure 4. Comparison of power input calculated with Eq. (2), $N_p \cdot Red(cal)$, to observed one, $N_p \cdot Red(obs)$ for double-stage paddle impellers in cylindrical vessel.

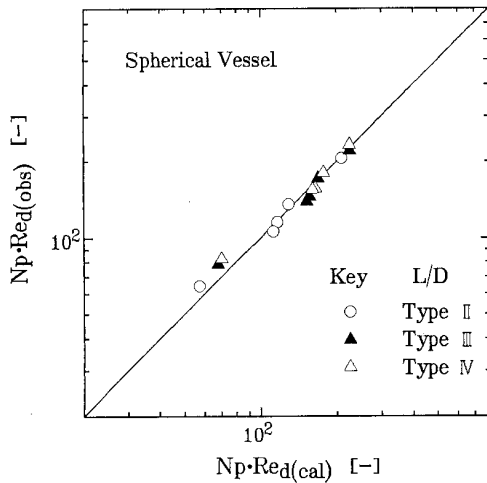


Fig. 5. Comparison of power input calculated with Eq. (2), $N_p \cdot Red(cal)$, to observed one, $N_p \cdot Red(obs)$, for double-stage paddle impellers in spherical vessel.

여기서 구형교반조의 직경은 겉보기 원통교반조 직경 Da 를 이용했다. 그림으로부터 구형교반조에서의 2단 패들 임펠러의 $N_p \cdot Red$ 값도 겉보기 원통교반조 직경을 이용함으로써 원통교반조와 같은 모양의 보정식으로 나타낼 수 있다는 것을 알았다.

3-2. 난류영역 및 전이영역의 동력특성

난류영역에서의 매개변수 m 및 C_t 에 대해서도 층류영역과 같이 임펠러 사이의 거리에 대한 영향을 명백하게 하기 위한 그림을 Fig. 6

및 7에 나타내었다.

Fig. 6으로부터 m 은 임펠러 사이의 거리에 의한 차이는 거의 보이지 않고 또 원통교반조와 구형교반조의 차이도 거의 보이지 않는 것을 알았다. 또한 Fig. 7은 C_t 에 대해서는 약간 흐트러짐을 볼 수 있는 임펠러가 있는데 그것은 C_t 가 m 에 상당히 강한 영향을 미치기 때문이다.

d/D	b/D	n_p	Spherical	Cylindrical
.335	.112	6	●	○
.447	.112	6	■	□
.559	.112	6	◆	◇
.447	.112	2	▲	△
.447	.224	6	▼	▽

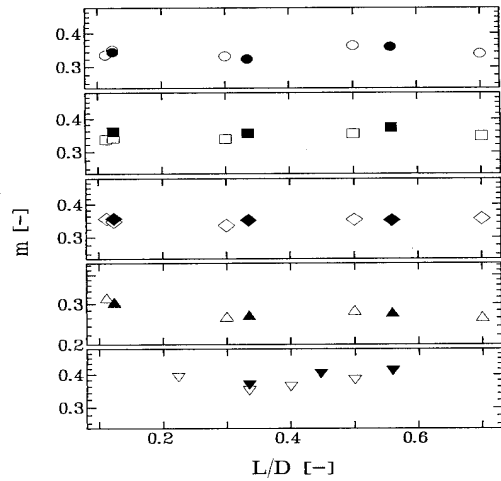


Fig. 6. Comparison of exponent m with L/D for double-stage paddle impellers.

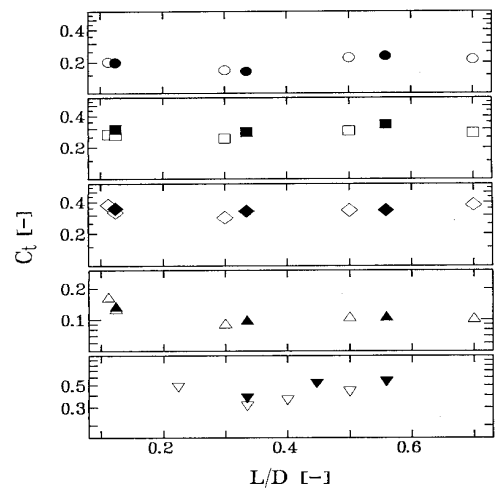


Fig. 7. Correlation of the coefficient C_t with for double-stage paddle impellers.(The keys are referred Fig. 6)

그래서 이 영향을 없애기 위해 m 을 임펠러

날폭이 2배인 단단 임펠러에 대한 값으로 고정하여 구하여 고친 C_t 와 L/D 와의 관계를 Fig. 8에 나타내었다.

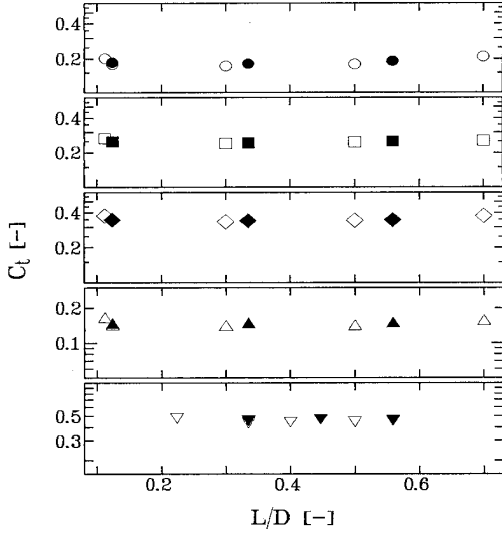


Fig. 8. Colleration of the coefficient C_t with L/D , when m is fixed, for double-stage paddle impellers. (The keys are referred Fig. 6)

이 그림으로부터 C_t 도 임펠러 사이의 거리에 의한 차이는 거의 볼 수 없었다. 또 교반조의 형상에 따른 차이도 없는 것을 알았다.

Fig. 9에 m 을 $r(D/d)^{2/3}(n_p b'/D)$ 에 대해(a), C_t 를 $r(n_p b'/D)$ 에 대하여 plot 한 것을 나타내었다. 여기서, 그림 중의 실선은 각각 다음 식 (3) 이용하였다.

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

$$C_t = 0.663 \{ r(n_p b'/D) \}^{0.934} \quad (4)$$

약간 흠여짐이 있지만 거의 단단 임펠러의 상관식에 상관되고 있음을 알았다.

또 임펠러 사이의 거리에 대한 명확한 의존성은 볼 수 없다. 이로부터 동력상관식에서 난류 영역의 매개변수에 대해서는 임펠러 사이의 거리에 대한 보정은 필요 없고 임펠러 날폭 b 를 2배로 하는 것만으로 양호하다 것을 알았다.

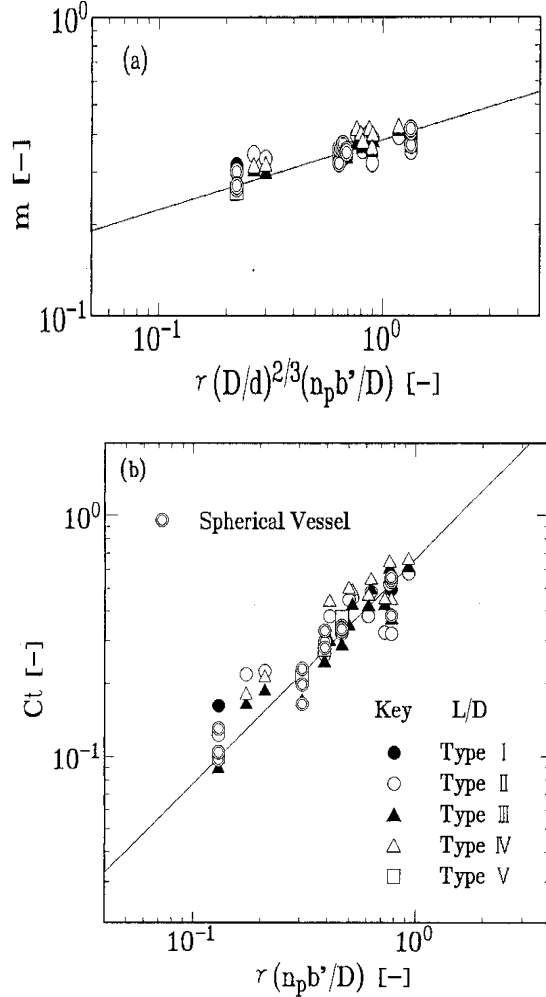


Fig. 9. Correlation of m and C_t with $r(n_p b'/D)$ for double-stage paddle impellers.

Fig. 10에 전이역의 매개변수 C_{tr} 의 플롯을 나타내었다. 여기에서도 임펠러 사이의 거리에 대한 보정은 하지 않고 임펠러 날폭이 2배인 단단 임펠러로 나타내었다. 그림 중의 실선은 식 (5)를 이용하였다.

$$C_{tr} = 576 (d/D)^{-3.23} (b/D)^{-0.935} n_p^{-0.561} \quad (5)$$

Fig. 10으로부터 구형교반조와 원통교반조의 차이는 그리 없다는 것을 알았다. 또 상관식에 대해서는 상당히 흠여짐을 볼 수 있는데 임펠러 사이의 거리에 대한 명확한 C_{tr} 의 의존성은 볼 수 없었다. 동력상관식에서도 그다지 흠여짐은 볼 수 없었다. 따라서 전이영역의 매개변수에 대해서도 임펠러 사이의 거리에 대한 보정은 하지 않는 것으로 한다.

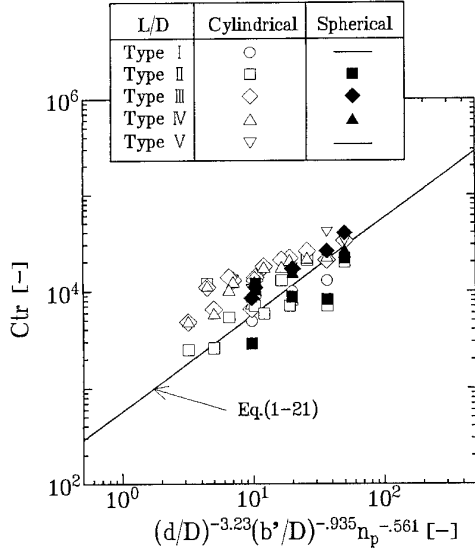


Fig. 10. Correlation of Ctr the function of exponential form of dimensionless number for double-stage paddle impellers.

3-3. 2단 임펠러에서의 동력상관식

2단 임펠러에 대한 동력상관식은 식(6)으로 나타낼 수 있다. 우선 단단 임펠러의 임펠러 날폭 b 에 대해, 2단 임펠러의 겹보기 임펠러 날폭을 $b' = 2b$ 라고 두면 단단 임펠러의 상관식과 같은 모양의 상관식으로 나타나게 된다.

$$f/2 = \frac{C_L}{Re_G} + \frac{Ct}{2} \left(\frac{Ctr}{Re_G} + Re_G \right)^{-m} \quad (6)$$

$$C_L = \frac{n(d^2/DH) \ln(D/d)}{\pi^2 \beta (1+a)} N_P \cdot Red$$

$$N_P \cdot Red = 14 \left\{ 1 + 2.5 \ln \left(\frac{n_b}{2} \right) \right\} \times \left\{ 2 - \left(\frac{L/D - 0.5}{b'/2D - 0.5} \right)^2 \right\} + \frac{34}{n} \left(\frac{2b'}{D} \right) \frac{(D/d)^2}{D/d - d/D} \left(\frac{n_P}{2} \right)^{1/3} \quad (L/D \leq 0.5)$$

$$N_P \cdot Red = 2 \times 14 \left\{ 1 + 2.5 \ln \left(\frac{n_P}{2} \right) \right\} + \frac{34}{n} \left(\frac{2b'}{D} \right) \frac{(D/d)^2}{D/d - d/D} \left(\frac{n_P}{2} \right)^{1/3} \quad (L/D > 0.05)$$

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

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

$$Ctr = 576 (d/D)^{-3.23} (b/D)^{-0.935} n_p^{-0.561}$$

여기서 2단 임펠러와 단단 임펠러의 서로 다른 점은 밑줄 친 부분으로 나타난다. 결국 단단 임펠러에 대한 동력상관식 중에서 층류영역의 매개변수와 C_L 만 임펠러 사이의 거리를 보정하고 나머지 매개변수에 대해서는 임펠러 날폭을 2배하는 것으로 2단 임펠러에 적용 가능한 것으로 하였다.

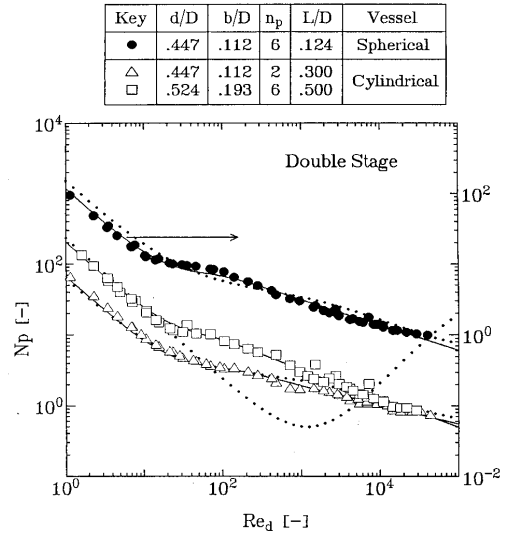


Fig. 11. Correlation of Eq. (2-3) and Nagata's Eq. to experimental data for double-stage paddle impellers.

Fig. 11에 본 실험에서의 2단 임펠러의 결과와 식(6)과의 비교를 나타내었다. 여기서 실선이 식(6)에 의한 상관선이고 점선은 Nagata식[10]에 의한 상관선이다.

그림에서 식(6)이 어떤 임펠러 사이의 거리에서도 넓은 범위에서 실험값을 양호하게 상관하고 있다. 또 Nagata식에서는 상관되지 않는 임펠러에 대해서도 상관 되는 것을 알았다. 게다가 구형교반조에 대해서도 겹보기 원통교반조의 직경을 이용하여 식(6)에 양호하게 상관되는 것을 알았다.

4. 결론

본 연구에서는 원통교반조와 구형교반조등

형상이 다른 2개의 교반조에 대해서 2단 패들 임펠러의 소요 동력을 층류영역에서 난류영역 까지 넓은 범위에서 측정했다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 단단 임펠러의 경우와 같고, 구형교반조의 직경 D에 걸보기 원통교반조 직경 Da를 이용하는 것으로 원통교반조와 같은 동력특성을 나타내고, 동일한 상관식으로 상관되는 것을 확인하였다.

2. 소요 동력에 대한 임펠러 사이의 거리에 대한 영향은 층류영역에서만 인정되고 이것을 고려한 2단 임펠러에 대한 동력상관식을 제출하였다.

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

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. (1-12)	[-]
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	[-]
f = friction factor	[-]
H = liquid height	[m]
L = distance between two impellers for double-stage impeller	[m]
m = exponent in Eq.(1-12)	[-]
N = rotational speed	[s ⁻¹]
N_p = power number	[-]
n_p = number of impeller blade	[-]
P = power input	[W]
p = exponent in Eq.(1-18)	[-]
Re_d = impeller Reynolds number	[-]
Re = 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. (1-13)	[-]

n = correction factor defined by Eq.(13)	[-]
μ = fluid viscosity	[Pa · s]
ρ = fluid density	[kg/m ³]
σ = standard deviation defined by Eq.(10)	[%]

Subscripts

1 = value of single-stage paddle
2 = value of double-stage paddle
cal = calculated value
obs = observed value

참 고 문 헌

- 1) Bates, R. L., Fondy, P. L. and Corpstein R. R. : Ind. Eng. Chem. Process Design and Development, 2, 310(1963)
- 2) Beckner, J. L. and Smith J. M. : Trans. Inst. chem. Engrs., 44, 224(1966)
- 3) Hiraoka, S. et al : Bull. Nagoya Inst. of Tech., 26, 239(1974)
- 4) Hiraoka, S. et al : Bull. Nagoya inst. of Tech., 28, 159(1978)
- 5) Hiraoka, S., Yamada, I. and Mizoguchi K. : J. Chem. Eng. Japan, 11, 224(1988)
- 6) Hirose, T. and Murakami, Y. : J. Chem. Eng. Japan, 19, 568(1986)
- 7) Hixson, A. W. and Baum, S. J. : Ind. Eng. Chem., 34, 194(1942)
- 8) Kuriyama, M., Inomata, H., Aarai, K. and Saito, S. : AIChE, 28, 385(1982)
- 9) Miller, S. A. and Mann C. A. : Trans. Am. Inst. Chem. Engrs., 40, 709(1944)
- 10) Nagata, S. : Mixing, Halsted press book, Kodansha(1975)
- 11) Rushton, J. H., Costich, W. E. and Everret, H. J. : Chem. Eng. Progr., 46, 395(1950)
- 12) Sato, K. and Inoue, I. : Kagaku Kogaku Ronbunshu, 2, 160(1976)
- 13) Takahashi, K. et al : J. Chem. Eng. Japan, 13, 147(1980)
- 14) White, A. McL., Brenner, E., Phillips, G. A. and Morison, M. S. : Trans. Am. Inst. Chem. Engrs., 30, 570(1934)

(2006년 5월 20일 접수, 2006년 10월 20일 채택)