

방해판이 부착된 교반조의 교반소요동력의 추정

이영세[†] · 이수각^{*} · 김종식

계명대학교 화학공학과

^{*}경북산업대학교 화학공학과

(1994년 5월 23일 접수, 1994년 11월 10일 채택)

Estimation of Power Input in a Baffled Agitated Vessel

Young-Sei Lee[†], Soo-Kag Lee^{*} and Jong-Shik Kim

Dept. of Chem. Eng., Keimyung Univ., Taegu, 704-701, Korea

^{}Dept. of Chem. Eng., Kyungpook Sanup Univ., Taegu, Korea*

(Received 23 May 1994; accepted 10 November 1994)

요 약

본 연구에서는 난류역 완전방해판 조건하의 교반소요동력을 기왕의 연구자의 결과와 본 실험결과와의 비교, 검토를 행하였으며 양호한 동력상관식을 제시한다.

$$\begin{aligned} N_p &= 7.09(n_p)^{0.7}(b/d)(H/D)^{0.18} & n_p^{0.7}(b/d) < 1 \\ N_p &= 7.09\{(n_p)^{0.7}(b/d)\}^{0.7}(H/D)^{0.18} & n_p^{0.7}(b/d) \geq 1 \end{aligned}$$

또한 교반 impeller 부착위치에 따른 동력수의 추산식을 제시한다.

$$\begin{aligned} N_{p(min)} &= N_{p(max)} - 2.47n_p^{1.32}(b/d)^{1.71} & n_p^{1.32}(b/d)^{1.71} \leq 2.87 \\ N_{p(min)} &= N_{p(max)} - 7.06 & n_p^{1.32}(b/d)^{1.71} > 2.87 \end{aligned}$$

Abstract—In the present study, power input in the totally baffled agitated vessels was compared systematically in connection with several previous studies and adequate power input correlation was found to be:

$$\begin{aligned} N_p &= 7.09(n_p)^{0.7}(b/d)(H/D)^{0.18} & \text{for } n_p^{0.7}(b/d) < 1 \\ N_p &= 7.09\{(n_p)^{0.7}(b/d)\}^{0.7}(H/D)^{0.18} & \text{for } n_p^{0.7}(b/d) \geq 1 \end{aligned}$$

Power number correlation was also formulated experimentally, which was dependent upon the position of the impeller in the stirred vessels, as follows:

$$\begin{aligned} N_{p(min)} &= N_{p(max)} - 2.47n_p^{1.32}(b/d)^{1.71} & \text{for } n_p^{1.32}(b/d)^{1.71} \leq 2.87 \\ N_{p(min)} &= N_{p(max)} - 7.06 & \text{for } n_p^{1.32}(b/d)^{1.71} > 2.87 \end{aligned}$$

1. 서 론

교반조작은 화학공업뿐만 아니라 많은 분야에서 혼

합기, 반응기 등으로써 넓게 이용되어 왔으며 동력특성, 혼합특성 및 물질이동특성 등 교반조에서의 여러 특성에 대한 연구[1-5]도 진행되어 왔다.

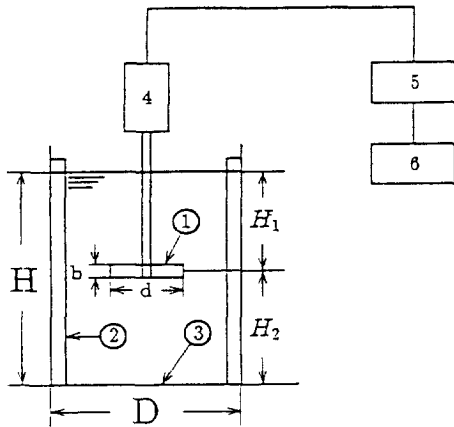


Fig. 1. Experimental apparatus.

- | | |
|-------------|-----------------|
| 1. Impeller | 4. Motor |
| 2. Baffle | 5. Torque meter |
| 3. Vessel | 6. Recorder |

그 중에서도 교반소요동력을 파악하는 것은 매우 중요하다. 교반동력은 단지 기계설계상 필요할 뿐만 아니라 교반공정을 평가, 검토하는 일은 대단히 중요한 의미를 가진다. 특히 실험실 레벨에서 플랜트로의 scale up은 주로 동력기준으로 정해지기 때문에 장치형상의 선정과 동력의 선정이 교반효과를 결정한다고 말해도 과언이 아니다.

동력상관관계의 형태는 용기 및 impeller의 기본치수, 용기 바닥면과 impeller의 거리, 액 깊이 및 방해판의 치수 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있다[6-9].

이러한 관점에서 교반소요동력 특성에 관한 연구는 실험 및 수치해석 등으로 많이 행하여지고 동력상관식도 여러 가지 형태의 교반 impeller에 대해서 제출되고 있다[10-12].

본 연구에서는 방해판을 4매 부착한 평저원통조를 이용하여 난류역에서의 교반소요동력을 여러 가지 형상인자를 가진 paddle impeller에 대하여 측정하고 다른 연구자의 보고와 비교, 검토하는 것에 의해서 본 실험 결과의 건전성을 검증하고 더욱 더 정밀도 높은 교반 소요동력 상관식의 제출을 목적으로 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용한 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 교반조는 내경 140, 170, 240 mm의 glass제 평저원통조를 이용, 용기 내에는 용기직경의 1/10의 폭을 가진 stainless제 방해판을 4매 장치하였다. 교반 impeller는 impeller 직경 d, 날폭(impeller blade width)

Table 1. Impeller dimension

Paddle
b/d=0.07-0.8
d=70 mm
$n_p=2, 3, 4, 6, 8$
D=140, 170, 240 mm

b, 날매수(impeller blade number) n_p 가 다른 여러 가지 paddle impeller를 용기중앙에 설치했다. 사용한 impeller의 조건을 Table 1에 나타내었다. 또 교반액으로는 이온교환수를 이용했다.

실험은 우선 교반조에 교반액을 넣고 액온을 30℃로 유지시키며 교반하였다. 회전수를 점차 변화시켜 그 때의 축 torque를 torque meter로 측정하고 recorder에 기록했다.

또한 impeller부착 위치가 동력수 N_p 에 미치는 영향에 대한 실험을 위의 조건하에서 행하였다. Impeller부착 위치는 Fig. 1과 같이 impeller 중앙에서 액 자유표면 및 용기 바닥까지의 거리를 각각 H_1 , H_2 로 하고 이 거리를 변화시켜서 N_p 값을 측정했다. 또, 액높이($H/D=0.75-2$)도 변화시키며 측정했다.

교반소요동력 $P[W]$ 는 교반축 torque $T[N\cdot m]$ 및 회전수 $n[s^{-1}]$ 에 의해 다음 식으로 구할 수 있다.

$$P=2\pi nT \quad [W] \quad (1)$$

또 교반소요동력에 관한 무차원수 N_p 는 동력수라고 부르고 다음 식으로 정의된다.

$$N_p=\frac{P}{\rho n^3 d^5} \quad [-] \quad (2)$$

충류역에서의 동력수 N_p 는 점도에 비례하므로 다음의 무차원식을 만족한다.

$$N_p \cdot Re = A(\text{충류역}) \quad (3)$$

식 (3)에서 Re 는 교반 Reynolds수라 부르고 다음 식으로 정의된다.

$$Re=\frac{nd^2\rho}{\mu} \quad [-] \quad (4)$$

그러나 점도가 낮고 충분히 혼란이 발달한 흐름에서는 점도에의 의존성이 약해지고 동력수 N_p 는 Re 수의 영향을 받지 않고, impeller형상과 impeller조건에 따라서 정해지는 장치정수 B 로 일정하게 된다.

$$N_p=B(\text{난류역}) \quad (5)$$

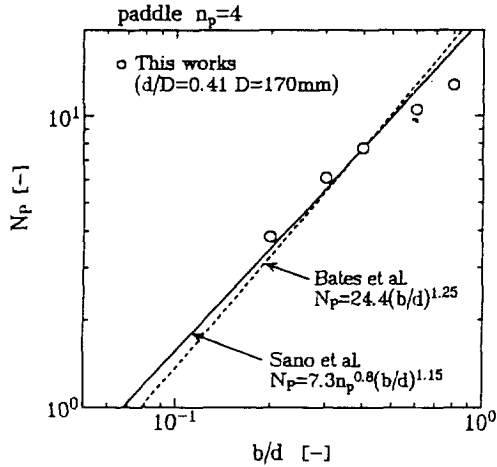


Fig. 2. Comparison of correlation equations of power number for 4-blade paddle impeller.

본 실험에서 용기 내의 흐름이 발달한 난류역($Re > 10^4$)이므로 동력수 N_p 는 Re 수의 영향을 받지 않는 일정값을 취했다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 單段 Paddle Impeller의 동력상관

3-1-1. b/d 가 동력수 N_p 에 미치는 영향

난류역 완전방해판 조건하에서의 동력수 N_p 의 상관은 지금까지 많은 연구자에 의해서 연구되어 왔다[1, 2, 10]. 그 중 몇 개를 다음에 나타낸다.

$$\text{Nagata}[1] \quad N_p = 17(b/d)^{1.23} \quad (n_p=2) \quad (6)$$

$$\text{Bates 등}[2] \quad N_p = 24.4(b/d)^{1.25} \quad (n_p=4) \quad (7)$$

$$N_p = 21.0(b/d) \quad (n_p=6) \quad (8)$$

$$\text{Sano 등}[10] \quad N_p = 7.3n_p^{0.8}(b/d)^{1.15} \quad (n_p=2-8, b/d=0.05-0.4) \quad (9)$$

위 연구자는 모두 동력수 N_p 를 날폭 b 와 impeller 직경 d 의 비(b/d)의 함수로서 상관하고 있는데 (b/d)의 지수는 연구자에 따라서 여러 가지로 나타나는 것을 알 수 있다.

본 실험에서 4매, 8매 날 paddle impeller를 이용하여 얻은 N_p 와 b/d 의 관계를 Fig. 2, 3에 나타내었다.

산업계에서는 난류역에서의 교반소요동력의 산출에 Nagata식이 이용되고 $n_p=2$ 이외의 impeller에 대해서는 상당날폭 $b_c=(n_p/2)b$ 의 2매 날 paddle impeller로서 교반소요동력을 구하여 왔다. 그러나 Nagata식[1]에서

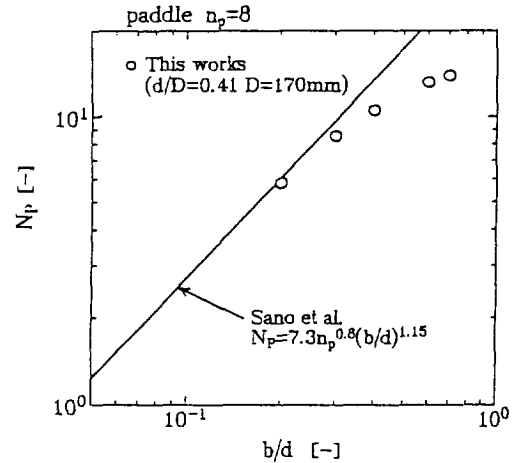


Fig. 3. Comparison of correlation equations of power number for 8-blade paddle impeller.

는 날폭이 큰 impeller를 이용한 동력수 N_p 의 상관에는 불충분하다는 것이 지적되고 있다.

본 실험결과에서도 b/d 가 큰 impeller에서의 동력수 N_p 는 Nagata[1], Bates 등[2], Sano 등[10]의 상관선으로부터 어긋남이 생기는 것을 알았다. 이들의 경향은 Nagata의 유효날면적의 개념으로부터 설명할 수 있다.

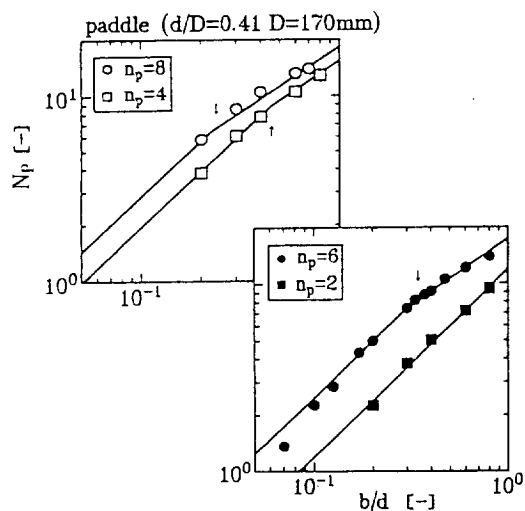
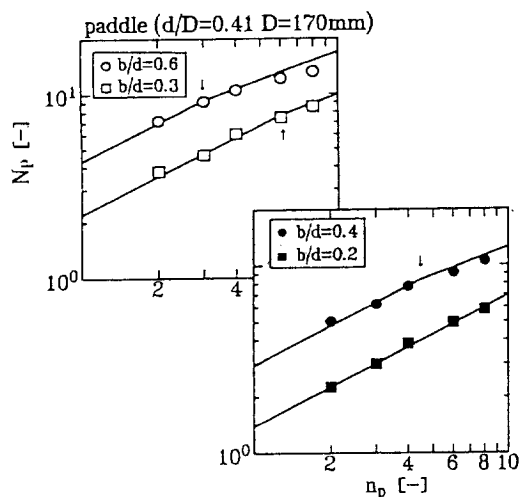
날폭이 좁은 impeller에서는 고동력전달부가 날 전면을 차지하고 있는데 날폭이 넓게 됨에 따라서 고동력전달부의 중앙에 발생한 저동력전달부가 넓어지기 시작하여 동력에 대하여 유효하게 작용하지 않는 부분이 존재한다.

그 결과 b/d 가 큰 impeller의 동력은 계산치 보다도 작은 값을 취하는 것이 된다. 그 때문에 날폭이 큰 impeller를 포함하는 동력의 상관에는 유효 날면적의 개념을 고려할 필요가 있다.

Mochizuki 등[13]은 날폭이 다른 6매 날 turbine impeller를 이용하여 교반소요동력을 측정할 결과 $b/d \leq 1/3$ 에서는 $N_p = 36.5(b/d)^{1.16}$ 으로 동력수를 상관하고 $b/d = 1/2$ (측정값: 11.9, 계산값: 16.3) 이상에서는 차차로 일정값에 접근한다고 보고하고 있다.

날폭이 다른 6매 paddle impeller를 이용한 본 실험 결과(Fig. 4)를 보면 동력수 N_p 는 $b/d < 1/3$ 에서는 Sano 등[10]의 상관식에 의해 잘 상관되고 있는데 $b/d \geq 1/3$ 에서의 동력수의 값은 상관선 보다도 약간 낮은 값을 취하는 모양이 된다.

그래서 $n_p(b/d) = 1.8$ ($n_p=6, b/d=0.3$)에서 용기중앙에 저동력전달부가 발생하는 것이라고 생각, 동력수 N_p 와 b/d 의 영향을 $n_p(b/d) < 1.8$ 과 $n_p(b/d) \geq 1.8$ 의 2개의


 Fig. 4. Effect of b/d on power number.

 Fig. 5. Effect of n_p on power number.

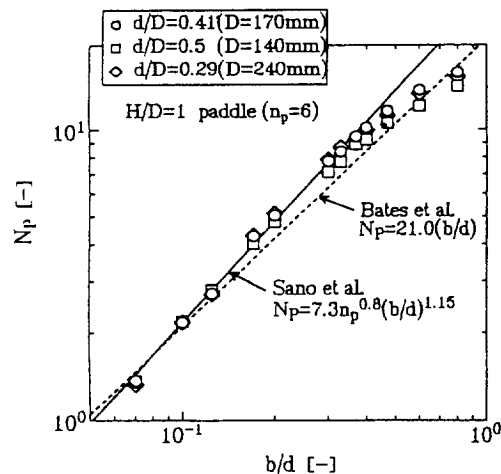
영역으로 나누어 생각하였다.

Fig. 4에 저동력전달부를 고려한 동력수 N_p 와 b/d 를 상관한 그림을 나타내었다. 유효날면적의 개념을 고려한 것에 의해서 날뚝이 큰 impeller를 이용한 때의 동력수 N_p 도 비교적 좋은 상관을 얻었다.

이상 동력수 N_p 와 b/d 는 다음 식과 같이 관계지을 수 있다.

$$N_p \propto (b/d) \quad \text{for } n_p(b/d) < 1.8 \quad (10)$$

$$N_p \propto (b/d)^{0.7} \quad \text{for } n_p(b/d) \geq 1.8 \quad (11)$$


 Fig. 6. Effect of d/D on power number.

3-1-2. n_p 가 동력수 N_p 에 미치는 영향

동력수 N_p 를 직접 날매수 n_p 의 함수로서 보고한 상관식은 적고 날매수가 다른 경우는 상당날뚝 b_r 를 이용하여 이들을 2매날의 상관식에 대입하는 것에 의해서 동력수 N_p 를 추산하여 왔다. 그 경우 날매수 n_p 가 동력수 N_p 에의 기여는 b/d 의 지수와 같게 된다고 생각하는 것이 가능한데 그 지수의 값도 보고자에 따라서 다소의 차이가 있다.

Paddle impeller를 이용하여 얻은 동력수 N_p 를 날매수 n_p 에 대해 plot한 그림이 Fig. 5이다. 이 그림에서도 유효날면적을 고려하여 상관을 행한 결과 아래와 같은 관계를 얻었다.

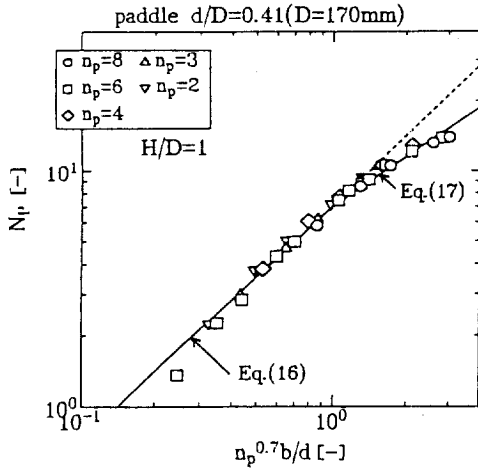
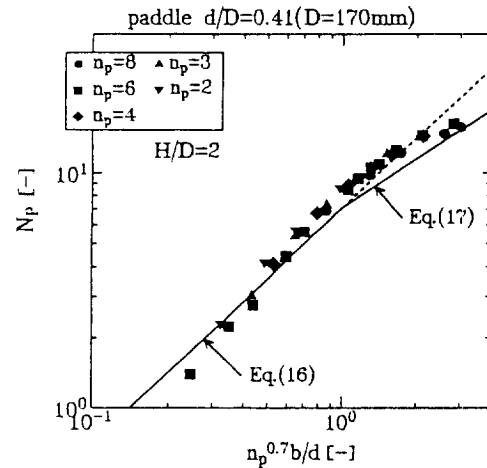
$$N_p \propto (b/d)^{0.7} \quad \text{for } n_p(b/d) < 1.8 \quad (12)$$

$$N_p \propto (b/d)^{0.5} \quad \text{for } n_p(b/d) \geq 1.8 \quad (13)$$

3-1-3. d/D 가 동력수 N_p 에 미치는 영향

일반적으로 paddle impeller의 flow pattern은 impeller 직경 d 와 용기직경 D 의 비(d/D)의 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있다. 만일 d/D 가 너무 작으면 순환류가 부족하기 때문에 용기 내에 사공간(dead space)을 발생하기 쉽다. 또 d/D 가 너무 크면 전단이 부족하므로 그 때문에 d/D 에 의한 전단특성(국소혼합)과 순환특성(전체혼합)의 balance의 control이 중요하게 된다.

Fig. 6에 용기직경이 다른 3종류의 교반조를 이용하여 d/D 를 0.29, 0.41, 0.5로 변화시킬 때의 동력수 N_p 와 b/d 의 상관을 나타내었다. 여기서 d/D 에 의한 동력수 N_p 의 차이는 거의 볼 수 없었다. 따라서 본 실험범위 내($d/D=0.29-0.5$)에서는 동력수 N_p 는 d/D 의 영향을

Fig. 7. Correlation of N_p using of vessel $H/D=1$.Fig. 8. Correlation of N_p using of vessel $H/D=2$.

받지 않는 것으로 생각된다.

3-1-4. 單段 impeller의 동력상관식의 제출

Impeller 형상, 교반조 형상 및 유효날 면적의 개념을 고려한 결과 동력수 N_p 에 대해 다음과 같은 관계를 얻었다.

$$N_p \propto (n_p)^{0.7}(b/d) \text{ for } n_p(b/d) < 1.8 \quad (14)$$

$$N_p \propto (n_p)^{0.5}(b/d)^{0.7} \approx [n_p^{0.7}(b/d)]^{0.7} \text{ for } n_p(b/d) \geq 1.8 \quad (15)$$

$n_p(b/d)=1.8$ 의 관계를 만족하는 impeller에서 $n_p^{0.7}(b/d)$ 가 최소가 되는 impeller 형상은 본 실험 범위 내에서는 $n_p=8$ 에서 $b/d=0.225$ 의 impeller이다. 따라서 $n_p^{0.7}(b/d)=0.96-1$ 이상에서는 유효날 면적의 개념을 고려하지 않으면 안된다. 그러므로 식 (15)를 적용할 필요가 있다.

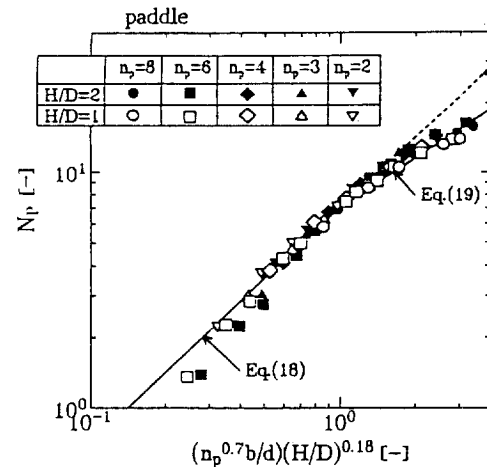
$n_p^{0.7}(b/d)=1$ 이 식 (14)부터 식 (15)에서의 변화점으로서 최소자승법에 의해 절편을 구해, 동력수 N_p 를 상관한 그림이 Fig. 7이다. 그림 중의 실선은 다음의 (16), (17)식을 나타내며 실험값과의 상관계수는 0.928로 계산되었다.

$$N_p \propto 7.09(n_p)^{0.7}(b/d) \text{ for } n_p^{0.7}(b/d) < 1 \quad (16)$$

$$N_p \propto 7.09[(n_p)^{0.7}(b/d)]^{0.7} \text{ for } n_p^{0.7}(b/d) \geq 1 \quad (17)$$

3-1-5. 액높이가 동력수 N_p 에 미치는 영향

실제 화학공정에 적용되는 반응용기는 단위체적당 전열면적을 크게 하거나 설치장소를 작게 하기 위해서 세로 길이의 용기를 사용하는 경우가 많다. 액높이 H 가 용기직경 D 의 2배인 교반조($H/D=2$)를 이용하여 얻은

Fig. 9. Correlation of N_p for single-stage paddle impeller.

동력수 N_p 의 값을 Fig. 8에 나타내었다. 여기서 그림 중의 실선은 액높이 H 와 용기직경 D 가 같은 교반조($H/D=1$)에서 실험하여 얻은 동력상관식, 즉 (16), (17)식이다. Fig. 8에 나타난 실험값과의 상관관계는 0.898로 계산되었다. Nagata에 의하면 난류역에서의 교반소요 동력은 액높이 H 와 용기직경 D 의 비(H/D)의 보정이 필요하다고 하고 있다.

본 실험에서 얻은 동력수 N_p 도 액높이 H 의 영향을 받고 있어 H/D 에 대해서 보정을 하여 Fig. 9에 나타내었다. $n_p^{0.7}(b/d)$ 이 작은 impeller($n_p=6$ 에서 $b/d=0.07-0.125$)에서는 용기 내에 충분한 순환류가 형성되지 않고, 얻은 N_p 값은 상관선 보다는 약간 낮은 값을 취하는데 그 외의 영역에서는 액높이에 의하지 않는 대단히

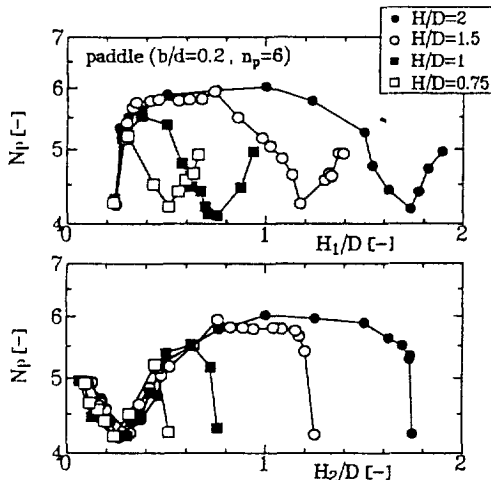


Fig. 10. Effect of liquid depth on power number.

좋은 상관이 얻어지고 있으므로 다음 식을 액높이의 영향을 고려한 單段 impeller 동력상관식으로 제출한다. 이 식과 Fig. 9에 나타난 실험값과의 상관계수는 0.993으로 계산되어 양호한 상관관계를 갖고 있음을 알 수 있다.

$$N_p = 7.09(n_p)^{0.7}(b/d)(H/D)^{0.18} \text{ for } n_p^{0.7}(b/d) < 1 \quad (18)$$

$$N_p = 7.09\{(n_p)^{0.7}(b/d)\}^{0.7}(H/D)^{0.18} \text{ for } n_p^{0.7}(b/d) \geq 1 \quad (19)$$

3-2. 교반 Impeller 부착위치가 동력수 N_p 에 미치는 영향

3-2-1. Impeller 위치의 변화에 의한 동력수 N_p 의 영향

전절에서 완전방해판 조건하의 동력수 N_p 는 액높이의 영향을 받는 것을 기술했다. 이것은 바꾸어 말하면 impeller로부터 액 자유표면 및 용기바닥까지의 거리의 변화가 동력수 N_p 에 영향을 준다고 말할 수 있다. Nagata [1]에 의한 교반소요동력의 보고에 의하면 난류역에서의 교반소요동력은 방해판의 유무에 상관없이 impeller 위치의 영향을 받지 않는다고 되어 있다. 그러나 이 기술에 반대하는 보고도 적지 않고 Takeda 등[7]은 방해판 부착 난류 교반조에서의 교반소요동력 및 flow pattern이 impeller 위치의 변화에 의해서 명확한 영향을 받는다고 보고하고 있다. Impeller 위치를 상하로 변화시킬 때의 동력수 N_p 의 변화를 Fig. 10에 나타내었다. 이들 그림으로부터 아래와 같은 고찰이 가능하게 된다. 여기서 impeller 위치를 표현하기 위해서 Fig. 1에 나타난 바와 같이 impeller로부터 자유표면까지의 거리를

H_1 , impeller로부터 용기바닥까지의 거리를 H_2 라고 정의한다.

· 동력수 N_p 는 impeller 부착 위치의 영향을 받아 변동한다.

· Impeller를 액자유표면 및 용기바닥에 가까이 했을 때 동력수가 변동하는 위치는 액높이에 의하지 않고 impeller로부터 액자유표면 및 용기바닥까지의 거리에 의해서 결정된다.

· Impeller를 용기바닥에 가까이 했을 때의 극소 N_p 값은 자유표면 부근에서의 저하로 N_p 값은 거의 같은 값을 나타낸다.

· 용기직경과 액높이가 같은 $H/D=1$ 의 용기를 이용한 경우 impeller를 용기중앙에 배치한 때에도 계속 액자유표면 및 용기바닥의 영향을 받고 있고 양면의 영향을 무시할 수 있는 최대 N_p 값($N_{p(max)}$)에 도달하고 있지 않다.

용기 내 액 흐름의 관찰도 동시에 행하여 다음과 같은 결과를 얻었다. Paddle impeller를 이용한 용기 내 흐름은 본래 반경방향의 토출류가 용기벽에 충돌하여 상하에 안정한 순환류를 형성한다. 그러나 impeller를 액표면에 가까이한 경우 impeller 상부에서의 순환류는 거의 존재하지 않고 impeller 하부로부터 거두어들인 혼합한 흐름을 그대로 상부에 토출하는 축류와 비슷한 흐름이 확인되었다. Impeller를 용기바닥에 가까이한 경우에도 같은 모양인 축류흐름이 인지되었다. 더욱더 impeller를 용기바닥에 가까이한 경우 impeller 하부에서의 축류흐름은 없게 되고 큰 상방향의 순환류의 존재가 확인되었다. Takeda 등[3], Komori 등[4]은 2단 paddle impeller를 이용하여 impeller 사이의 거리를 크게 하여 이와 같은 모양의 flow pattern을 실험에서 확인하였다.

용기 내 유동 관찰의 결과로부터 impeller 부착 위치의 변화에 따른 동력수의 변동은 flow pattern의 변화에 의한 것이라고 생각하여 아래의 실험을 행하였다.

실험. paddle impeller 부착 위치를 액자유표면에서의 동력저하를 볼 수 있는 거리($H/D=0.25$)로 일정하게 하여 impeller로부터 용기바닥까지의 거리 H_2 를 변화시킬 때의 동력수를 측정한다.

실험에서 얻은 동력수 N_p 의 변동을 Fig. 11에 나타내었다. Impeller가 이미 동력저하를 일으키는 위치($H_1/D=0.25$)에 두게 된 경우 impeller로부터 용기바닥까지의 거리 H_2 에 의하지 않고 동력수 N_p 는 거의 일정하게 되는 것을 알았다.

지금까지 impeller를 용기바닥에 가까이한 때에 일어나는 동력수의 증가에 대해 “용기바닥 방향으로 흐르는 상태라고 하는 토출류에 대한 유로저항의 증가가

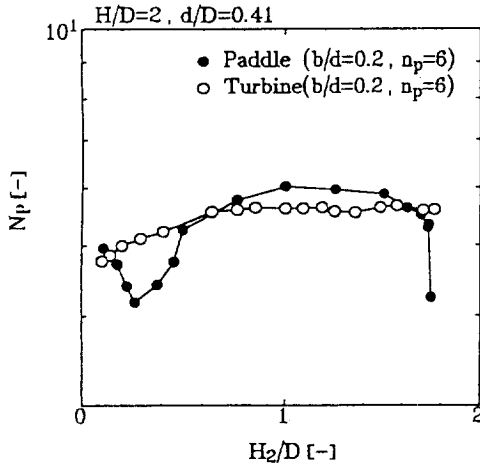


Fig. 11. Comparison of power number for paddle and power number for turbine.

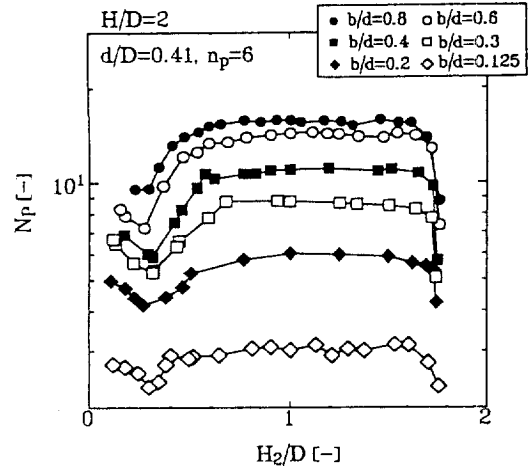


Fig. 13. Effect of blade width of impeller on power number.

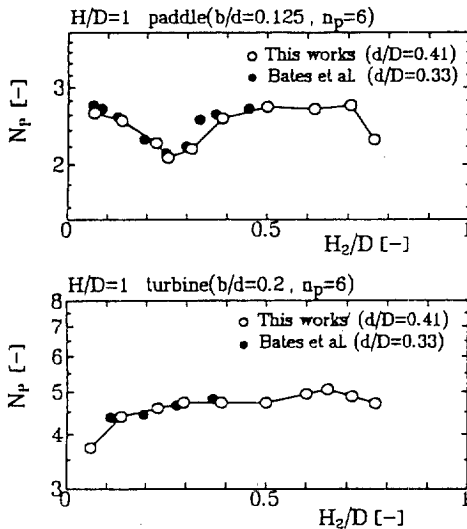


Fig. 12. Comparison of Bates's data.

원인이다.”라고 하는 고찰이 이루어져 왔다[2,14]. 그러나 본 실험으로부터는 그와 같은 경향은 볼 수 없고 impeller 부착 위치에 의한 동력수의 변동은 flow pattern의 변화에 의한 것이라고 설명할 수 있다. Flow pattern의 변화는 교반축과 같은 중심선의 회전을 날과 같은 속도로 회전하는 camera에 의해서 촬영하는 방식으로 측정하였다.

또 본 실험의 건전성을 확인하기 위해서 Bates 등[2]이 이용한 것과 같은 paddle impeller 및 turbine impeller를 이용하여 bottom clearance H_2 를 변화시켜 얻은

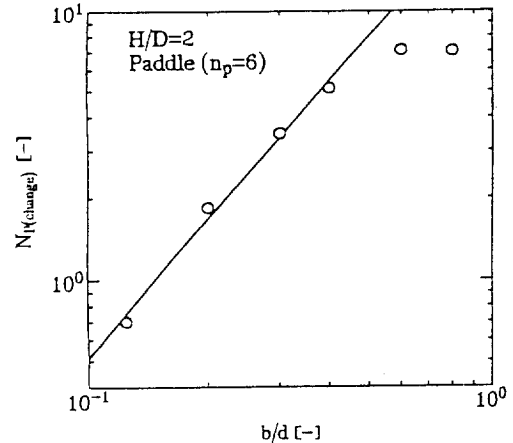


Fig. 14. $N_{p(change)}$ vs. for 6-blade paddle impeller.

동력수 N_p 를 측정하여 Bates 등의 결과와 비교한 것을 Fig. 12에 나타내었다. 이 그림으로부터 양자 사이에는 양호한 일치성을 볼 수 있어 본 실험의 건전성이 확인되었다.

3-2-2. Impeller 위치 변화에 의한 동력수 N_p 의 변동 pattern에 대한 b/d 의 영향

Fig. 13에 날폭이 다른 6종류의 paddle impeller에 대해 교반 impeller 위치를 변화시킬 때의 동력수 N_p 의 변동 결과를 나타내었다. 액자유표면에서의 동력저하 위치와 용기바닥 부근에서의 극소동력위치는 b/d 에 의한 변화는 볼 수 없고 각각 $H_1/D=0.25$ 와 $H_2/D=0.25$ 부근인 것을 알았다.

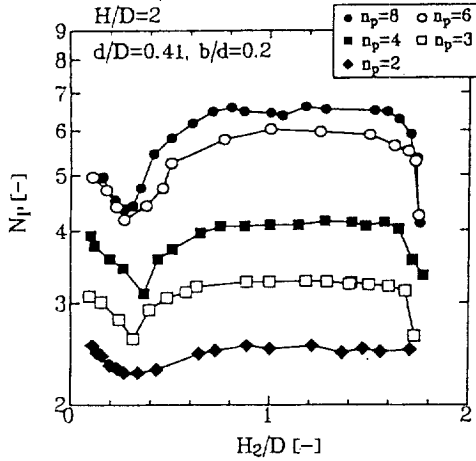
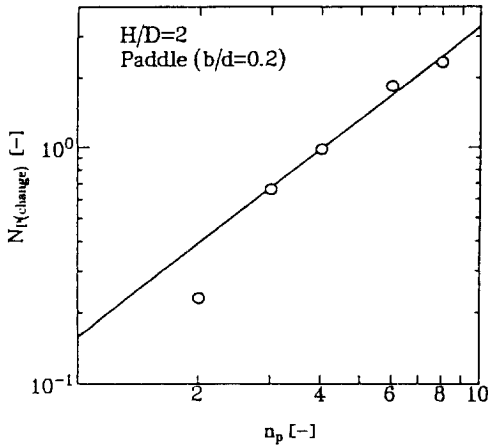


Fig. 15. Effect of blade number of impeller on power number.

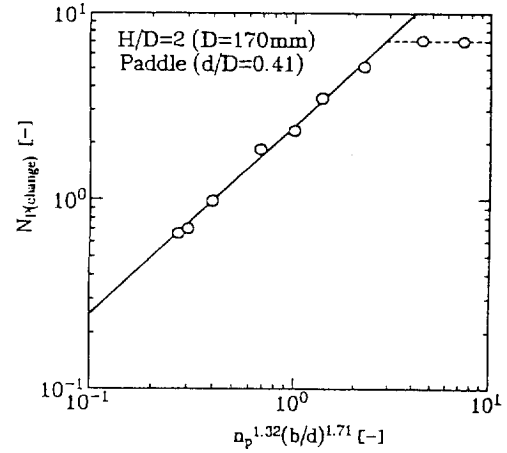

 Fig. 16. $N_{p(change)}$ vs. n_p for paddle impeller of $b/d=0.2$.

Impeller를 용기중앙($H_2/D=1$)에 배치하여 얻은 동력을 그 impeller의 최대동력수 $N_{p(max)}$, impeller를 용기바닥으로부터 $H_2/D=0.25$ 의 위치에서 얻은 극소동력수를 $N_{p(min)}$ 라고 하여 동력차 $N_{p(change)}$ 와 b/d 를 plot한 그림을 Fig. 14에 나타내었다. 그 동력차 $N_{p(change)}$ 는 다음 식으로 정의된다.

$$N_{p(change)} = N_{p(max)} - N_{p(min)} \quad (20)$$

동력차 $N_{p(change)}$ 는 b/d 의 증가와 함께 증가하고 날폭 b 가 큰 impeller($b/d=0.6, 0.8$)를 제거하면 다음 식으로 관계지을 수 있다.

$$N_{p(change)} \propto (b/d)^{1.71} \text{ for } (n_p=6) \quad (21)$$


 Fig. 17. Correlation of $N_{p(change)}$.

3-2-3. Impeller 부착 위치 변화에 의한 동력수 N_p 의 변동 pattern에 대한 n_p 의 영향

날매수가 다른 5종류의 paddle impeller를 이용 교반 impeller 위치를 변화시킬 때의 동력수의 변동결과를 Fig. 15에 나타내었다. Nagata[1]는 2매날 paddle impeller를 이용하여 impeller 위치를 변화시켜도 완전방해판 조건하에서 동력수 N_p 는 일정하다는 보고를 하고 있다.

본 실험에서도 Nagata의 보고와 거의 같은 모양인 결과를 얻었고 2매날 paddle impeller의 동력저하는 다른 impeller와 비교해서 몹시 작다는 것을 알았다. 2매날 이외의 impeller에 대해서는 어느 것이나 같은 경향을 나타내고 있고 $H_1/D=0.25$ 에서 자유표면저하 N_p 값을, $H_2/D=0.25$ 에서 용기바닥부 극소 N_p 값을 나타낸다. 이 결과에 관한 동력차 $N_{p(change)}$ 와 날매수 n_p 의 상관관계를 행한 그림을 Fig. 16에 나타내었다. 동력저하가 거의 일어나지 않는 2매날 paddle impeller를 제외하면 다음 식으로 관계지을 수 있다.

$$N_{p(change)} \propto n_p^{1.32} \text{ for } (b/d=0.2) \quad (22)$$

고액교반에서는 부유한계속도를 낮추기 위해서 교반 impeller를 용기바닥에 가깝게 하여 조작하는데 이 경우 동력수는 최대동력수 $N_{p(max)}$ 보다 어느 정도 저하되는 것을 생각할 수 있다.

용기바닥부($H_2/D=0.25$)에서 극소 N_p 값을 산출하기 위해서 식 (21)과 (22)를 이용하여 $N_{p(change)}$ 를 plot한 그림이 Fig. 17이다. 날폭 b 가 큰 impeller와 $n_p=2$ 의 impeller를 제외하면 동력의 저하율은 다음 식으로 관계지을 수 있다.

$$N_{p(change)} = 2.47 n_p^{1.32} (b/d)^{1.71} \quad (23)$$

횡측의 값이 2.87이 넘는 impeller에서의 동력차는 식 (23)에 의하지 않고 $N_{p(change)} = 7.06$ 으로 일정하게 되는 것을 알았다. Impeller를 용기바닥에 배치한 때의 극소 동력수 N_p 의 추산식으로서 다음과 같은 식 (24)와 (25)를 제안할 수 있으며 이들 식과 Fig. 17에 나타난 실험 값과의 상관계수는 0.998로 계산되어 대단히 좋은 상관관계를 갖고 있음을 알 수 있다. 단, 아래의 식들은 동력저하를 볼 수 없는 2매날 paddle impeller에 적용할 수 없다.

$$N_{p(min)} = N_{p(max)} - 2.47 n_p^{1.32} (b/d)^{1.71} \quad \text{for} \quad n_p^{1.32} (b/d)^{1.71} \leq 2.87 \quad (24)$$

$$N_{p(min)} = N_{p(max)} - 7.06 \quad \text{for} \quad n_p^{1.32} (b/d)^{1.71} > 2.87 \quad (25)$$

4. 결 론

본 연구에서는 난류역 완전방해판 조건하에서 교반 소요동력에 미치는 여러 인자에 대해서 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

b/d가 큰 impeller의 동력수는 계산치 보다 낮은 값을 가지며 n_p 가 동력수에 미치는 기여는 b/d의 지수와 같게 된다고 생각하는 것이 가능해지며 d/D에 의한 동력수의 차이는 찾아볼 수 없었다. 한편 액높이에 의한 영향은 $n_p^{0.7} (b/d)$ 이 작은 impeller에서는 용기 내에 충분한 순환류가 형성되지 않고 얻은 N_p 값은 상관선 보다도 약간 낮은 값을 취하는데 그 이외의 영역에서는 액높이에 의하지 않은 좋은 상관식을 얻었다.

기왕의 연구자의 결과와 본 실험결과와의 비교 검토를 행하여 paddle impeller에 관한 양호한 동력수 상관식을 제출했다.

$$N_p = 7.09 (n_p)^{0.7} (b/d) (H/D)^{0.18} \quad \text{for} \quad n_p^{0.7} (b/d) < 1$$

$$N_p = 7.09 \{ (n_p)^{0.7} (b/d) \}^{0.7} (H/D)^{0.18} \quad \text{for} \quad n_p^{0.7} (b/d) \geq 1$$

또 교반 impeller 부착위치가 동력수에 미치는 영향에 대해서도 고찰을 했다.

· Impeller를 액자유표면 및 용기바닥면에 가까이 했을 때 동력수가 변동하는 위치는 액높이에 의하지 않고 impeller로부터 액자유표면 및 용기바닥까지의 거리에 의해서 결정된다.

· Impeller를 용기바닥에 가까이 했을 때 극소 N_p 값은 자유표면부근에서의 N_p 값은 거의 같은 값을 나타낸다.

· 2매날 paddle impeller의 동력저하는 다른 impeller와 비교해서 몹시 작다는 것을 알 수 있었고, 2매날

이외의 것은 어느 것이나 같은 모양의 경향을 나타내는 것을 알았다.

동력수 추산식으로서 다음 식을 제출했다(2매날 제외).

$$N_{p(min)} = N_{p(max)} - 2.47 n_p^{1.32} (b/d)^{1.71} \quad \text{for} \quad n_p^{1.32} (b/d)^{1.71} \leq 2.87$$

$$N_{p(min)} = N_{p(max)} - 7.06 \quad \text{for} \quad n_p^{1.32} (b/d)^{1.71} > 2.87$$

사용기호

b	: blade width [m]
b _e	: equivalent blade width [m]
d	: impeller diameter [m]
D	: vessel diameter [m]
H	: liquid depth [m]
H ₁	: clearance of the impeller from the liquid surface [m]
H ₂	: clearance of the impeller from the tank bottom [m]
h	: clearance between upper and lower impeller [m]
K	: dimensionless parameter [-]
n	: stirred speed of impeller [s ⁻¹]
n _p	: number of impeller blade [-]
N _p	: power number [-]
P	: power input [W]
Re	: Reynolds number [-]
S	: standard deviation [-]
T	: torque [N·m]
t	: time [s]
ρ	: density [kg·m ⁻³]
τ	: shear stress [N·m ⁻¹]
μ	: viscosity [kg·m ⁻¹ s ⁻¹]

참고문헌

1. Nagata, S.: "Mixing Principles and Applications", Koudansha Ltd.(1975).
2. Bates, R. L., Fondy, P. L. and Corpstein, R. R.: *I & EC Process Des. Devel.*, **2**, 310(1963).
3. Takeda, K., Hoshino, T., Taguchi, H. and Hujii, T.: *Kagaku Kogaku*, **32**, 376(1968).
4. Komori, S. and Murakami, Y.: *AIChE J.*, **34**, 932 (1988).
5. Rushton, J. H., Costich, E. W. and Everett, H. J.: *Chem. Eng. Progr.*, **46**, 394(1950).
6. Takeda, K., Hoshino, K., Shimizu, S. and Nishihata,

- T.: *Kagaku Kogaku*, **32**, 369(1968).
7. Nishigawa, M., Hashimoto, S. and Hashimoto, K.: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **5**, 59(1979).
8. Mochizuki, M. and Sato, K.: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **10**, 49(1984).
9. Sasakura, H., Kato, A., Tamamura, S. and Ooi, S.: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **4**, 595(1978).
10. Sano, Y. and Usui, H.: *J. Chem. Eng. Japan*, **18**, 47(1985).
11. Nonaka, H. and Kayama, T.: "攪拌翼 と Flow Pattern", 關西・東海地區 第2回 ミキシングサロン, Satake Chem. Equip. MGF., Ltd.(1991. 11. 28.).
12. Murakami, Y., Hisayoshi, I. and Kazutaka, T.: 神鋼パンラツク技報, **35**, 1(1991).
13. Mochizuki, M.: "攪拌・混合技術", (株)アイピーシ-, 118(1988).
14. Bates, R. L.: *Ind. Eng. Chem.*, **5**, 1245(1959).