

교반조에서 경사 및 2단 Impeller의 교반소요동력에 관한 연구

이 영 세 · 김 문 갑* · 김 증 식**

영남전문대학 화학공업과, *상주산업대학교 화학공학과

**계명대학교 화학공학과

(1995년 6월 2일 접수, 1995년 12월 1일 채택)

Power Input of Pitched and Double-Stage Paddle Impeller in a Agitated Vessel

Young-Sei Lee, Moon-Kap Kim*, and Jong-Shik Kim**

Dept. of Chem. Eng., Yeungnam Junior College, Taegu, 705-037, Korea

*Dept. of Chem. Eng., Sangju Sanup Univ., Sangju, 742-170, Korea

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

(Received June 2, 1995, Accepted December 1, 1995)

요 약 : 교반소요동력은 장치의 설계상 중요할 뿐만 아니라 교반 프로세스를 평가, 검토하는 데 매우 중요하다. 특히 실험실 레벨에서 플랜트로의 스케일업은 주로 동력기준으로 행해지기 때문에 장치형상의 선택과 동력의 설정이 교반효과를 결정한다. 따라서 본 연구에서는 난류역 완전방해판 조건하에서 경사 임펠러 및 2단 패들 임펠러의 적절한 동력상관식을 제시한다.

$$Np_{(pitch)} = (\theta/90^\circ) Np_{(90^\circ)}$$

또한 임펠러 사이의 거리에 따른 동력수의 추산식을 제시한다.

$$Np = 7.09(n_p)^{0.7} \left(\frac{b_{(double)}}{d}\right) \left(\frac{H}{D}\right)^{0.18}, n_p^{0.7} \left(\frac{b_{(double)}}{d}\right) < 2 \quad Np = 8.73 \left\{ (n_p)^{0.7} \left(\frac{b_{(double)}}{d}\right) \right\}^{0.7} \left(\frac{H}{D}\right)^{0.18}, n_p^{0.7} \left(\frac{b_{(double)}}{d}\right) > 2$$

Abstract: Power input in stirred vessel is especially important in the design of mixers, as well as the evaluation of mixing processes. A type of baffles in mechanically agitated vessels and power employed are major factors that determine the stirring efficiency in a large scale, multi-step processes. 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: $Np_{(pitch)} = (\theta/90^\circ) Np_{(90^\circ)}$

Power number correlation was dependent upon the distance of among the impeller in the agitated vessels, as follows:

$$Np = 7.09(n_p)^{0.7} \left(\frac{b_{(double)}}{d}\right) \left(\frac{H}{D}\right)^{0.18}, n_p^{0.7} \left(\frac{b_{(double)}}{d}\right) < 2 \quad Np = 8.73 \left\{ (n_p)^{0.7} \left(\frac{b_{(double)}}{d}\right) \right\}^{0.7} \left(\frac{H}{D}\right)^{0.18}, n_p^{0.7} \left(\frac{b_{(double)}}{d}\right) > 2$$

1. 서 론

화학공업 뿐만 아니라 많은 분야에서 교반조작을 이용하고 있으며 교반조는 혼합기, 반응기 등으로서

널리 사용되어 왔으며 공정조작에서 유체의 효과적 교반이 그 공정자체의 성공 여부를 좌우할 경우가 많다. 따라서 교반조에서의 혼합특성, 동력특성 및 물질 이동특성 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다

[1-5].

교반조에서의 교반소요동력을 파악하는 것은 기계의 설계상 매우 중요할 뿐만 아니라 교반 프로세스를 평가, 검토하며 이외에도 유용한 것이 많다. 특히 실험실 레벨에서 플랜트로의 스케일 업은 주로 동력기준으로 행해지기 때문에 장치형상의 선정과 동력의 설정이 교반효과를 결정하기 때문에 대단히 중요한 의미를 가진다고 해도 과언이 아니다.

그 때문에 소요동력특성에 관한 연구는 실험, 수치계산으로 다수 행해지고 있으며 동력상관식도 여러 가지 형태의 교반 impeller에 대해 제출되고 있다 [6-8].

동력을 추산하려면 동력을 계의 다른 변수와 연관시킬 필요가 있는데 이러한 동력상관관계는 용기 및 impeller의 기본치수, 날 매수, 액높이, impeller 부착 위치, 방해판의 수, impeller의 형상 및 수 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있다 [9-12].

이미 본 연구에 앞서 난류역에서의 교반소요동력을 방해판이 부착된 단단 impeller에서 여러 가지 인자들이 동력수에 어떠한 영향을 미치는가를 추정하여 보고한 바 있다 [13].

따라서 본 연구에서는 방해판이 4매 부착된 평저원통조에서 경사 impeller 및 2단 paddle impeller에서의 양호한 동력상관식 도출과 단단 impeller에서 impeller 사이의 거리가 동력수에 미치는 영향을 추정했다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 실험에 사용한 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 교반용기는 내경 170mm의 glass제 평저원통조를 사용하였으며 용기직경의 1/10의 폭을 가진 stainless제 방해판 4매를 장치하였다. Impeller 중앙에서 액 자유표면 및 용기바닥까지의 거리를 각각 H_1 , H_2 라 하였다. 실험에 이용한 교반 impeller는 직경(d), 날폭(b), 날매수(n_p)가 다른 여러 가지 paddle 및 pitched paddle impeller를 사용하였다. Table 1에 사용한 impeller의 조건을 나타내었다.

실험에 사용한 교반액으로는 이온교환수를 사용하였다.

실험은 우선 교반조에 교반액을 넣어 액온을 30℃로 유지하여 교반을 개시한다. 회전수를 점차 변화시켜 그때의 축 torque를 torque meter로 측정하여 re-

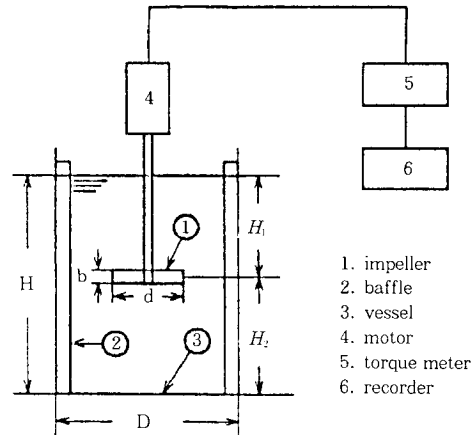


Fig. 1. Experimental apparatus.

Table 1. Impeller Dimensions

	Paddle impeller	Pitched paddle impeller
b/d	0.07-0.8	0.2
d	70mm	70mm
n_p	2,4,6,8	2,4,6
D	170mm	170mm
θ		45°, 60°

corde에 기록한다.

Torque Meter는 Satake Chemical Equipment MFG. LTD.사의 것을 사용하였으며 회전수의 측정은 Ono Sokki사 Digital Tachometer HT-446을 사용하여 측정하였다. 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 동력수라 부르고 다음식으로 정의된다.

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

층류역에서의 동력수 N_p 는 점도에 비례하므로 다음의 무차원식을 만족한다.

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

Re수가 300이하로 작을 경우에는 동력수는 방해판이 있든 없든 같아진다. 특히 Re수가 10이하인 영역에서는 흐름이 층류이고 밀도는 더 이상 영향인자가

되지 않는다. 그러나 Re수가 큰 영역에서는 방해판이 없는 경우에는 일반적으로 피하는 영역인데 이것은 와류가 생기고 Froude수가 영향을 미치기 때문이다. 이 경우에는 Np값에 Fr수를 곱하여야 한다.

식(3)에서 Re는 임펠러의 지름 및 주변속도로 계산한 Reynolds수에 비례하므로 교반 Reynold수라 부르고 다음식으로 나타낼 수 있다.

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

그러나 점도가 낮고 충분히 혼란이 발달한 흐름(완전난류상태)에서는 점도에의 의존성이 약해지고 동력수 Np는 방해판이 부착된 경우 Re수의 영향을 받지 않고 점도는 영향인자가 되지 않는다. 따라서 impeller 형상과 impeller 조건에 따라서 정해지는 장치정수 B로 일정하게 된다. 이것은 Nagata[1], Oldshue[14], Chudacek[15] 및 Hiraoka 등[16]에 의해 이미 잘 알려져 있다.

$$Np = B \quad (\text{난류역}) \quad (5)$$

본 실험에서의 용기내의 흐름은 방해판이 부착된 완전 발달된 난류역($Re > 10^4$)이므로 동력수 Np는 Re수의 영향을 받지 않는 일정값으로 취급했다.

3. 결과 및 고찰

3. 1. 경사 impeller의 동력상관

Pitched Paddle, Propeller로 대표되는 경사 impeller는 비교적 저동력으로 조내 전체를 대류시켜 비교적 빠르게 혼합을 촉진시키기 때문에 실용적으로 많이 사용되고 있다.

경사 impeller의 교반소요동력을 분명히 하기 위해서는 우선 경사각 θ 의 영향을 평가할 필요가 있다. Bates 등[2]의 측정결과에 의하면 경사각 θ 와 동력수 Np의 관계는 다음식으로 표현된다.

$$Np_{(pitch)} = Np_{(90^\circ)} (\sin\theta)^{2.5} \quad (6)$$

여기서 $Np_{(90^\circ)}$ 는 경사 impeller와 같은 형상의 paddle impeller에서의 동력수이다.

Fig. 2에 날매수 2,4,6의 pitched paddle impeller에서의 경사각도 θ 와 동력수 Np의 관계를 나타내었다. 약간의 흠어짐을 보이기는 하였지만 O'Connell[17]의 경사각도에 관한 보고(경사각도가 2° 다르면

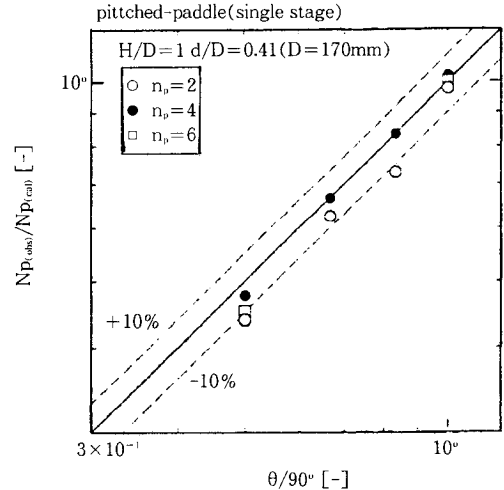


Fig. 2. Effect of blade angle on power number.

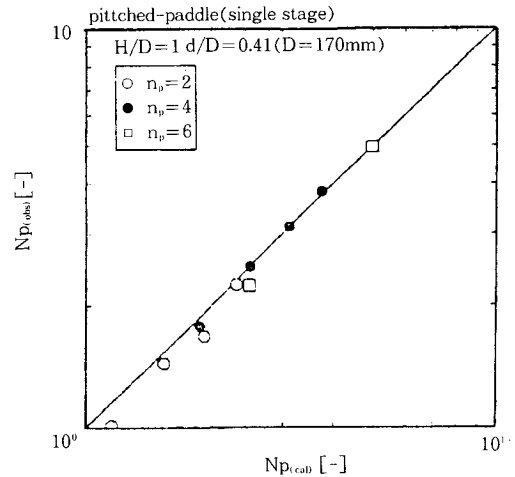


Fig. 3. Comparison of observed Np with calculated one for pitched blade paddle.

동력수 Np는 약 11%의 오차가 발생한다.) 등을 고려하면 동력수는 경사각도 θ 에 비례 한다고 할 수 있다. 따라서 경사각 θ 와 동력수 Np의 관계식으로써 다음식을 얻었다.

$$Np_{(pitch)} = (\theta/90^\circ) Np_{(90^\circ)} \quad (7)$$

Pitched paddle impeller의 동력수 Np의 계산치 $Np_{(cal)}$ 와 실측치 $Np_{(obs)}$ 의 관계를 Fig. 3에 나타내었다. 이때 동력수의 계산은 Lee 등[13]이 제안한 상관식을 이용 하였다. 이들의 사이에는 양호한 관계를

볼 수 있으며 경사각도의 보정은 식(7)에 의해서 충분하게 이루어지고 있다고 생각된다. Bates 등[2]이 제안한 식은 동력수 상관식에서 b/d 에 대한 지수가 날매수 n_p 에 따라서 변하고 액높이 및 impeller 사이의 거리에 의한 영향도 크게 받기 때문에 이 경우에는 문제가 있는 것으로 사료된다.

3. 2. 2단 paddle impeller의 동력상관

실제의 화학공정에서 반응용기는 전열면적의 증대나 설치 공간의 축소를 위해서 세로길이의 반응용기가 많이 사용되고 있다. 그러나 세로길이 반응기에 단단의 impeller를 사용한 경우 흐름은 반응용기내 전체에 미치지 못하여 사공간이 생기는 문제를 초래하는 경우가 있다. 종래의 2단 impeller 상관식에서는 단단 impeller의 날폭 b 에 대해 2단 impeller의 관 날폭 $b(\text{double})=2b$ 로 하여 날폭 2배의 단단 impeller로서 동력의 추산을 해왔다. 따라서 종래의 상관법에 따르면, 예를들면, $b/d=0.3$ 의 2단 impeller의 동력수 $Np(\text{double})$ 과 $b/d=0.6$ 의 단단 impeller의 동력수 $Np(\text{single})$ 은 같은 값을 가질것인데 실제는 양자의 사이에 큰 차이가 발생하는 것을 알 수 있다.

즉 $n_p=6$ 일때

$$Np_{(\text{double})} = 16.51 Np_{(\text{single})} = 14.49$$

$n_p=4$ 일때

$$Np_{(\text{double})} = 12.86 Np_{(\text{single})} = 11.89$$

이들의 차이는 유효날면적에 의한 것으로 $b/d=0.3$ 의 2단 impeller는 각각의 날 전면이 동력전달에 사용되고 있는 데 비해 $b/d=0.6$ 의 단단 impeller는 날 중앙에 저동력 전달부가 존재하기 때문에 동력저하가 일어나고 있다고 생각할 수 있다.

2단 paddle impeller의 소요동력에 관해서 유효날폭의 개념[1]을 고려한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 그림중의 실선은 다음식으로 나타낼 수 있으며 이 식을 2단 impeller의 동력상관식으로 제출한다. 그림중의 점선은 (8)식으로 계산했을 때의 연장선을 나타낸 것이다.

$$Np = 7.09(n_p)^{0.7} \left(\frac{b_{(\text{double})}}{d}\right) \left(\frac{H}{D}\right)^{0.18} \text{ for } n_p^{0.7} \left(\frac{b_{(\text{double})}}{d}\right) < 2 \tag{8}$$

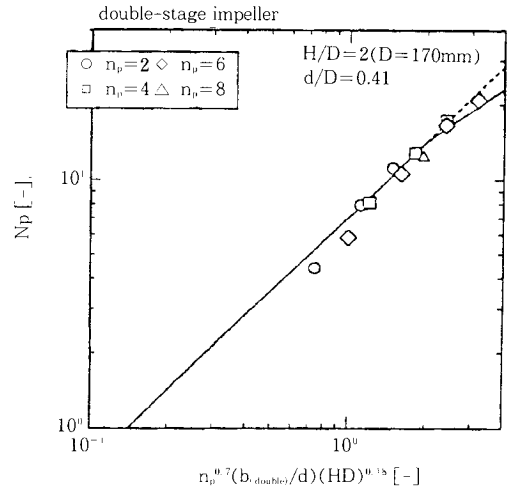


Fig. 4. Correlation of Np for double-stage paddle impeller.

$$Np = 8.73 \left\{ (n_p)^{0.7} \left(\frac{b_{(\text{double})}}{d}\right) \right\}^{0.7} \left(\frac{H}{D}\right)^{0.18} \text{ for } n_p^{0.7} \left(\frac{b_{(\text{double})}}{d}\right) > 2 \tag{9}$$

여기서 $b_{(\text{double})}$ 는 2단 impeller의 외관 날폭을 가리킨다.

3. 3. Impeller 사이의 거리가 동력수 Np 에 미치는 영향

단단 impeller는 적은 교반동력으로 교반효과를 높이거나 용기내 사공간을 해소하기 위해 이용되고 있는데 impeller의 배치법, 특히 impeller 사이의 거리가 용기내 flow pattern에 큰 영향을 미친다. 따라서 2단 paddle impeller의 impeller 사이의 거리 및 2단 pitched paddle impeller의 impeller 사이의 거리가 동력수 Np 에 주는 영향에 대해서 고찰한다.

Pitched paddle impeller를 2단으로 했을 경우 impeller 위치에 대해서는 상단 impeller를 용기 중앙과 액표면 중간, 하단 impeller를 용기 중앙과 용기바닥의 중간에 각각 대칭으로 배치하여 이를 2단 impeller의 표준배치로 했으며, 상단 impeller에는 상방토출 impeller를, 하단 impeller에는 하방토출 impeller를 이용했다. 이에 대한 pitched paddle impeller의 기하형상을 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 6에 액높이가 다른 3종류의 교반용기에서, 4매 날을 가진 2단 pitched paddle impeller를 이용하

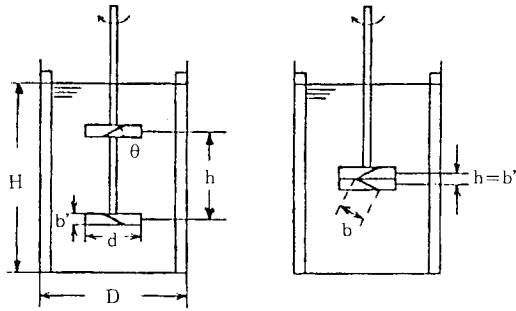


Fig. 5. Dimension of double-stage pitched blade paddle.

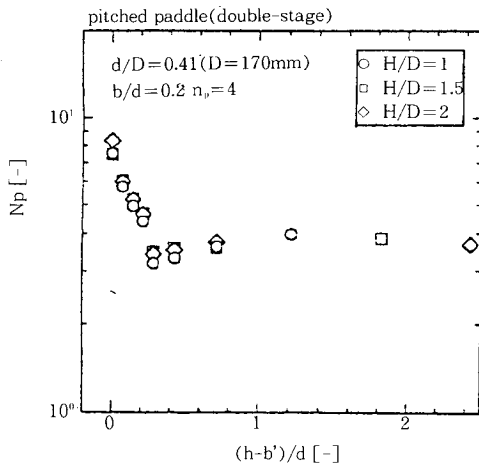


Fig. 6. Power number vs. impeller clearance.

여 impeller 사이의 거리를 변화시킬 때의 동력수 N_p 를 나타내었다.

2단 Pitched paddle impeller의 동력수는 액높이에 영향을 받지 않고 impeller 사이의 거리에 영향을 받고 있으며, $(h-b')/d=0.286$ ($h=0.5d$)에서 impeller 사이의 거리를 좁히면 동력수는 급격한 상승을 일으키는 것이 확인 되었다.

교반 impeller로 paddle impeller(방사류 impeller)를 사용한 경우 동력수 N_p 는 액높이의 영향을 받므로 동력수 상관식에 $(H/D)^{0.18}$ 의 보정을 할 필요가 있다[13]. 그러나 pitched paddle impeller(축류 impeller)를 사용한 경우, 동력수 N_p 는 액높이에 의한 영향을 받지않고 식 (7)과 같이 상관되는 것을 알았다.

동력수 N_p 의 실측치 $N_{p(obs)}$ 와 식(7)로 표현된 N_p 의 계산값 $N_{p(cal)}$ 의 비를 종축에 취하고 impeller 사이의 거리에 따른 영향을 plot하여 Fig. 7, 8, 9에 나

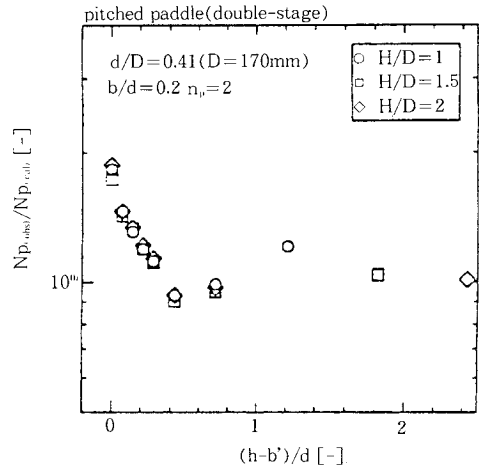


Fig. 7. Effect of impeller clearance on power number for 2-blade pitched paddle.

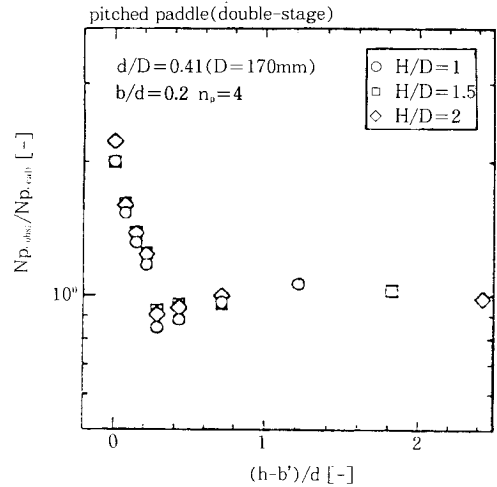


Fig. 8. Effect of impeller clearance on power number for 4-blade pitched paddle.

타내었다.

Pitched paddle impeller($\theta=45^\circ$)날 매수를 2매, 4매, 6매로 변화시켜도 동력수의 변동의 경향은 보이지 않고, $h=0.5d$ 까지는 impeller 사이의 거리에 따른 영향을 받지않아 동력수는 거의 일정한 값을 가진다. 그러나 impeller 사이의 거리를 줄여가면 급격한 동력수의 상승을 볼 수 있다. 또 impeller 사이의 거리를 0으로 한 경우 동력수는 2단 pitched paddle impeller를 표준배치 하였을 때의 동력수의 약 2배까지 상승하는 것을 알 수 있다.

이들의 현상에 대해 다음과 같은 고찰을 하였다.

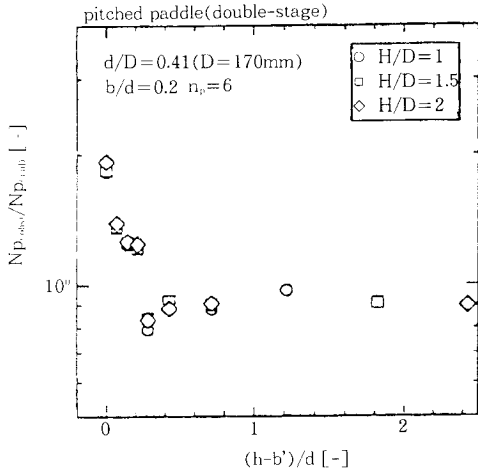


Fig. 9. Effect of impeller clearance on power number for 6-blade pitched paddle.

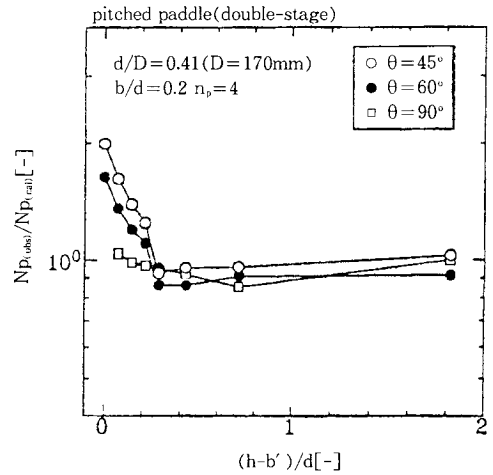


Fig. 11. Effect of impeller clearance on power number for 4-blade pitched paddle with different blade angle.

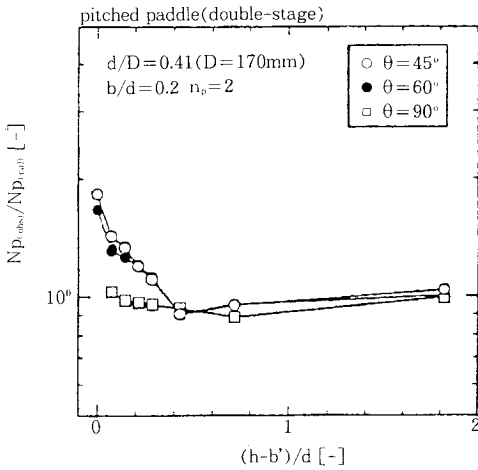


Fig. 10. Effect of impeller clearance on power number for 2-blade pitched paddle with different blade angle.

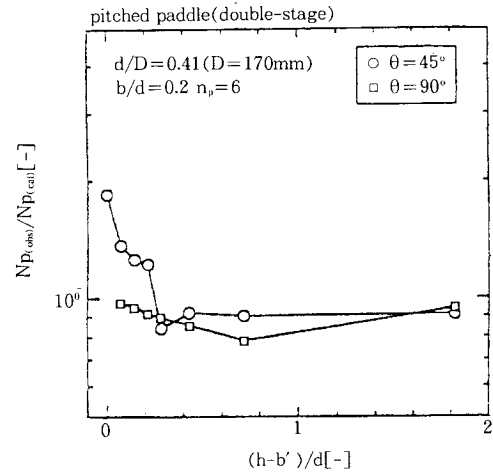


Fig. 12. Effect of impeller clearance on power number for 6-blade pitched paddle with different blade angle.

Tatterson[18]은 6매 날 pitched paddle impeller의 flow pattern을 가시화 하여 하방토출 pitched paddle impeller의 주된 흡입흐름은 액 측면으로부터는 없고 impeller 상부로부터 얻는 것을 확인했다.

Impeller사이의 거리가 벌어져 있을 때는 충분한 흡입흐름이 확보되고 그 흡입흐름은 축류형성에 이용된다. 그러나 본실험과 같이 상방토출 impeller를 상단에 하방토출 impeller를 하단에 배치하여 impeller 사이의 거리를 줄인 경우 상, 하단 impeller 모두 흡

입흐름의 확보가 어렵게 되고 충분한 축류가 형성되지 않는다.

특히 impeller 사이의 거리를 없애한 경우 flow pattern은 축류보다 오히려 방사류가 주된 흐름이 되고 pitched paddle impeller의 동력수는 경사각도 ($\theta=90^\circ$)의 보정이 필요 없어진다. 그 결과 $\theta=45^\circ$ 의 pitched paddle impeller의 동력은 impeller 표준배치 위치에서의 동력보다 약 2배의 값을 나타내고 impel-

ler 형상이 같은 paddle impeller의 동력수와 거의 같게 된다고 사료된다.

Pitched paddle impeller의 경사각도를 $\theta=45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ (paddle)로 변화시켜 impeller 사이의 거리가 동력에 미치는 영향을 날 매수마다 plot한 것을 그림을 Fig. 10, 11, 12에 나타내었다. Impeller 사이의 거리를 0으로 했을때 방사류가 주류가 되고 경사각도의 영향을 받지 않는다고 하면 $\theta=45^\circ, 60^\circ$ 의 pitched paddle impeller의 동력수 N_p 는 표준배치에서의 동력수 N_p 의 각각 2배, 1.5배까지 상승할 것이다. 본실험 결과에서도 거의 예상대로의 값이 얻어졌다.

Paddle impeller의 동력수 N_p 는 날 매수 n_p 에 의하지 않고 impeller 사이의 거리에 영향을 받으며, $h=0.9d$ 부근에서 최소치를 나타내는 것을 알았다. 더욱더 impeller 사이의 거리를 줄여가면 2단 paddle impeller는 날 폭 2배의 단단 paddle impeller로서의 작용을 하기 시작하여 동력수의 실측값과 계산값의 비 $N_{p(obs)}/N_{p(cal)}$ 는 1에 가까워지는 것이 확인되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 난류역 완전방해판 조건하에서 교반 소요동력을 경사 impeller에 대해서 측정하고, 또 2단 paddle impeller에서의 동력상관식 도출과 impeller 사이의 거리가 동력수에 미치는 영향에 대해서 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

경사 impeller에서 경사각 θ 와 동력수 N_p 의 관계식으로서 다음식을 제출했다.

$$N_{p(pitch)} = (\theta/90^\circ) N_{p(90^\circ)}$$

또 2단 paddle impeller의 소요동력에 관해서 유효 날폭의 개념을 고려하여 아래와 같은 적절한 동력상관식을 제출했다.

$$N_p = 7.09(n_p)^{0.7} \left(\frac{b_{(double)}}{d}\right) \left(\frac{H}{D}\right)^{0.18}, n_p^{0.7} \left(\frac{b_{(double)}}{d}\right) < 2$$

$$N_p = 8.73\{(n_p)^{0.7} \left(\frac{b_{(double)}}{d}\right)\}^{0.7} \left(\frac{H}{D}\right)^{0.18}, n_p^{0.7} \left(\frac{b_{(double)}}{d}\right) > 2$$

동력수 N_p 는 날 매수 n_p 에 의하지 않고 impeller 사이의 거리에 영향을 받으며, 2단 pitched paddle impeller에서는 동력수가 $h=0.5d$ 까지는 impeller 사이의 거리에 영향을 받지 않으나 더욱 impeller 사이의 거리를 줄여가면 급격하게 동력수가 상승함을 알

수 있다. 또 2단 paddle impeller는 impeller 사이의 거리를 줄여가면 날 폭 2배의 단단 impeller로서의 작용을 하기 시작하여 동력수의 실측값과 계산값의 비 $N_{p(obs)}/N_{p(cal)}$ 는 1에 가까워지는 것이 확인 되었다.

사용 기호

b	blade width	[m]
b'	equivalent blade width	[m]
d	impeller diameter	[m]
D	vessel diameter	[m]
h	clearance between upper and lower impeller	[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]
n	revolution number	
n _p	number of impeller blade	[-]
N _p	power number	[-]
P	power input	[W]
Re	Reynolds number	[-]
T	torque	[N-m]
t	time	[s]
greek symbols		
ρ	density	[kg-m ³]
τ	shear stress	[N-m ⁻¹]
μ	viscosity	[kg-m ⁻¹ -s ⁻¹]
θ	angle	[°]

참고 문헌

1. S. Nagata, "Mixing Principles and Application", Koudansha LTD., Toyko(1975).
2. R. L. Bates, P. L. Fondy, and R. R. Corpstein, I & RC process Des. Develop., 2,310(1963).
3. K. Takeda, T. Hoshino, H. Taguchi, and T. Hujii, *kagaku kogaku*, **32**, 376(1968).
4. S. Komori and Y. Murakami, *J. AIChE*, **34**, 932 (1988).
5. M. Mochizuki and K. Sato, *kagaku kogaku Ronbunshu*, **10**, 49(1984).
6. N. Kamei, S. Hiraoka, T. Kato, Y. Tada, S.

- Kuwabara, Y. S. Lee, T. Tamaguchi, and S. T. Koh, *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **20**, 595(1994).
7. S. Hiraoka, I. Tamada, and K. Mizoguchi, *J. Chem. Eng. Japan*, **11**, 487(1978).
8. S. Hiraoka, I. Tamada, T. Aragaki, H. Nishiki, A. Sato and T. Tagaki, *J. Chem. Eng. Japan*, **21**, 79(1988).
9. Y. Sano and H. Usui, *J. Chem. Eng. Japan*, **18**, 47(1985).
10. T. Hirose and Y. Murakami, *J. Chem. Eng. Japan*, **19**, 568(1986).
11. J. H. Rushton, E. W. Costich, and H. J. Everett, *Chem. Eng. Prog.*, **46**, 394(1950).
12. J. H. Rushton, E. W. Costich, and H. J. Everett, *Chem. Eng. Prog.*, **46**, 467(1950).
13. Y. S. Lee, S. K. Lee, and J. S. Kim, *Hwahak Konghak*, **33**, 46(1995).
14. J. Y. Oldshue, "Fluid Mixing Technology", (a), 32, Chemical Engineering, McGraw-Hill, New York(1983)
15. M. W. Chudacek, *Ind. Eng. Chem. Fund.*, **35**, 391 (1986).
16. S. Hiraoka, I. Yamada and K. Mizoguchi, *J. Chem. Eng. Japan*, **11**, 224(1988).
17. F. P. O'Connell and D. E. Mack, *Chem. Eng. Prog.*, **46**, 358(1950).
18. G. B. Tatterson, A. M. Ali, H. H. Yuan, and D. S. Dickey, *Chem. Eng. Common.*, **10**, 205(1981).