45 ° Pitched Paddle 형 교반기 내부 유동 해석

Flow Simulation of a 45 ° Pitched Paddle Type Mixer

○장재원[1], 허남건[2]
J. Chang, N. Hur

Mechanical agitation is widely used in industrial process engineering. In the present study, performed was a numerical simulation on flows in a 45 ° Pitched Paddle Type mixer. Through a CFD technique, effects of the position of the impeller on resultant flow pattern was studied. Results of computed torque on impeller to maintain the flow are also compared to the experimental data, and showed good qualitative agreements.

1. 서론

산업용 교반기는 산업전반에 걸쳐 널리 쓰이는 기계로 단일 혹은 두 개 이상의 물질을 혼합하여 사용자가 원하는 물질을 만들어 주는 장치 말한다.

교반기의 좋은 성능을 위해서는 교반기 내에 유동의 정체점이 없이 모든 영역에서 원활히 혼합될 수 있도록 설계하는 것이 중요하다. 교반기는 전동기, 축, Impeller, Baffle, Vessel등의 부품으로 구성되어 있으며, 교반기의 구성에 대해 그림 1에 나타내었다. 제작자는 사용자가 제시하는 Vessel과 혼합을 하고자 하는 물질의 특성에 맞추어서 최적의 제품을 구성해 주고 있다. 교반기에 적용되는 혼합현상은 유체의 유동에 근본을 둔 현상으로써, 이러한 유체의 유동에 영향을 주는 요소로는 Impeller 크기 및 형태, Vessel의 크기 및 형태, 전동기의 회전수 등이 있으며 제품의 선정 및 설계에 있어서 이러한 요인에 대한 수식적인 관계식을 이용한다. 하지만 기존에 가지고 있는 유동에 관련된 수식들은 기초적인 간단한 형상에서의 경험식에 기초를 두고 있기에 실제 현상과는 차이를 가지고 있어서 정확한 제품 설계에는 문제가 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 모델 실험 장치를 제작하여 유동현상에 대한 가시화를 수행하여 설계된 교반

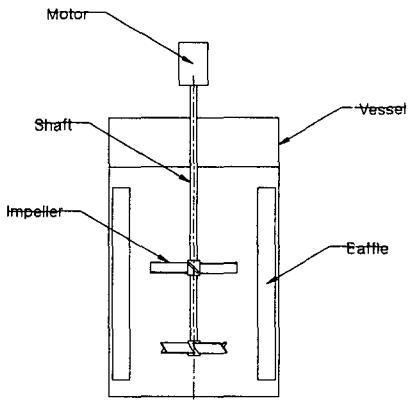


Fig. 1 Schematic Diagram of an industrial mixer

1) 서강대학교 기계공학과 대학원
2) 서강대학교 기계공학과

기의 성능을 예측하고 있으나, 모델의 제작에 따르는 비용과 시간이 큰 문제점으로 남아있다. 그러므로 최근의 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics) 기술을 적용한다면, 설계된 교반기 내부의 유동현상을 해석하여 각각의 설계요소의 영향을 파악하고 최적 설계를 도출할 수 있을 것이다.

이제까지의 연구들은 보통 하나의 임펠라를 사용하여 실험이나 해석을 하였으나 본 연구에서는 Impeller가 2개일 때의 교반기에 대해 해석을 하였다.

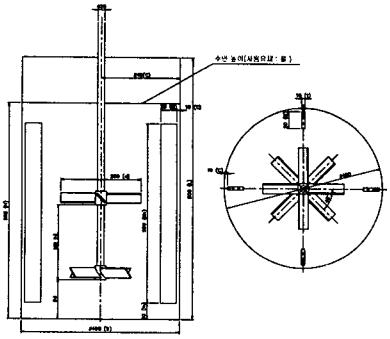


Fig. 2 A design of industrial mixer

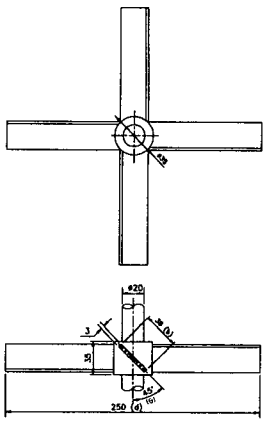


Fig. 3 A drawing of a pitched paddle

2. 수치 해석

2.1 지배 방정식

질량보존법칙(Continuity equation)과 운동량보존법칙(Navier - Stokes equation)을 지배방정식으로 하며 이동하는 좌표계에서의 텐서형태로 표기하면 다음과 같다.

(1) 연속 방정식

$$\frac{1}{\sqrt{(g)}}\frac{\partial}{\partial t}(\sqrt{g}\rho) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

(2) 운동량 방정식

$$\frac{1}{\sqrt{(g)}}\frac{\partial}{\partial t}(\sqrt{g}\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_j u_i + \tau_{ij}) = \frac{\partial p}{\partial t}+S_i \quad (2)$$

여기서 사용된 변수는 다음과 같다.

t = 시간

x_i = 직교 좌표(i=1, 2, 3)

u_i = i 방향의 속력

u_j = 유체와 u_{cj}의 속도로 회전화는 좌표계 사이의 상대 속도값

p = 계기압력 ($p_s + \rho_0 g_m x_m$)

ρ = 밀도

τ_{ij} = 스트레스 텐서 성분

S_{ij} = 운동량 생성항 성분

$\sqrt{g}$ = 텐서의 디터미넌트

2.2 수치계산 방법 및 내용

본 연구에서는 산업용 교반기의 유동현상에 대한 가시화를 수행하기 위해

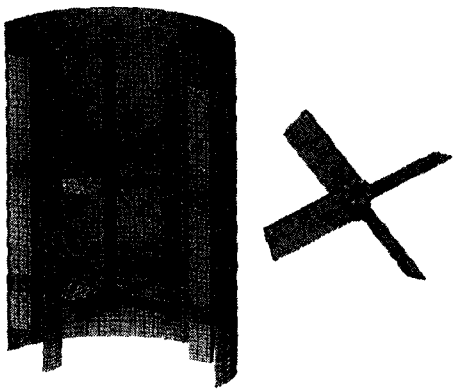


Fig. 4 Computational Mesh

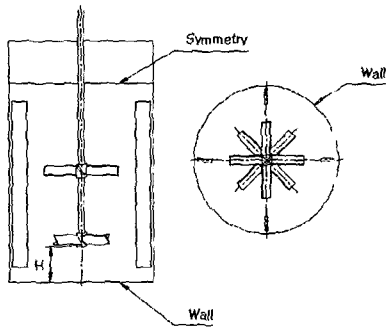


Fig. 5 Boundary Conditicns

실험 모델로 제작한 교반기를 기초로 하여 해석을 수행하였다. 실험 모델의 설계도면은 그림 2에 나타내었다.

이 실험 모델은 상하 각각 4개 총 8개의 Blade가 위치하도록 설계되어 있으며, Vessel 내부에는 4개의 Baffle이 설치되어 있다. Pitched Paddel 형은 저속형의 표준으로 장방형의 판 Blade로 이루어져 있으며, 각도를 주는 것에 의하여 복류와 축류을 형성시키며, 구조가 간단해서 조작이 용이하다. 용량 5,000m^3이하, 점도 20,000cp(20ps · s)이하, 회전수는 10~1,200rpm에서 사용된다. 임펠라의 설계도는 그림 3에 나타내었다. 하나의 임펠라에는 4개의 Blade가 설치되어 있으며, 임펠라의 총 직경은 250mm, Pitched각은 45 °, RPM은 270RPM으로 회전하도록 설계되었다. 위의 설계를 바탕으로 Mesh를 제작하였으며, 그림 4에 Mesh의 그림을 나타내었다.

경계조건으로는 Vessel과 작동유체의 경계는 Wall 경계조건을 사용했으며, 작동유체와 공기의 경계는 Shear Force가 다른 면에 비교해 작고, 입·출입이 없으므로 Symmetry 경계조건을 사용했다. 전체적인 경계조건에 대하여 그림 5에 나타내었다.

교반기 내부 유동은 여러 가지 설계변수에 의해 결정되는데, 본 연구에서는 모터의 회전수를 약 270RPM으로 고정한 후 임펠라의 설치 위치를 Vessel의 밑에서부터의 높이를 50mm, 75mm, 100mm, 125mm 4개의 Case에 대해 해석을 수행하였다. 작업 유체는 295K의 물을 사용하였다.

또한 실험모델에서 측정된 토크와 비교하기 위하여 임펠라 표면의 Total Force을 계산하고, 이것을 이용하여 다시 토크 값을 계산하여 실험 결과와 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 내부유동의 변화

본 절에서는 임펠라의 위치에 따른 유동 변화에 대해 해석하였다. 본 연구에서 각 case에 대해서 Star-CD를 사용하여 3차원으로 수치해석을 수행하였으며, 계산 격자의 수는 595,200개이며, 계산 시간은 SGI Indigo2에서 약 25시간이 소요되었다.

Vessel의 전체 영역에서 보면 임펠라의 회전 방향으로의 유동과 임펠라로 유입된 유체가 분출됨에 따라 Bulk Flow가 나타난다.

그림 6에 해석 결과를 2차원으로 나타내었다. Blade 위쪽에서 유입된 유체가 아래쪽으로 분출되고 있으며 변동이 크게 일어나고, 또한 Blade 팁으로부터 반경방향 아래쪽에 Bulk Flow가 발생하고 있으며, 아래쪽 임펠라에 의해 발생된 Bulk Flow가 크기가 크게 나타나고 있다. 또한 임펠라의 설치 위치가 낮아지면 아래쪽 Bulk Flow의 크기가 작아 지고 있다. 다른 임펠라의 형상인 Flat Turbine 형 에서는 보통 임펠라의 위쪽과 아래쪽에서 유입된 유체가 반경방향으로 분출되어 임펠라의 설치 위치를 기준으로 위쪽과 아래쪽에 2개의 Bulk Flow를 발생시키지만, 본 연구에서 사용된 Pitched Paddle 형의 임펠라를 2개 설치시 반경방향 아래쪽에 하나의 Bulk Flow를 형성하고 있다.

교반기 내에 유동은 정체점이 없이 모든 영역에서 원활히 혼합될 수 있어야 한다. 그림 6에서 보면 Shaft의 아래쪽으로 정체점이 나타나고 있으며, 임펠라의 설치 위치가 감소함에 따라 Shaft의 아래쪽 정체점이 감소하고 있다. 하지만 이런 임펠라의 설치 위치 감소는 Pitched Paddle 형의 임펠라의 유동 특성상 반대로 작업 유체와 공기의 경계부분 근처에 정체점이 형성되는 원인으로 작용할 수 있다.

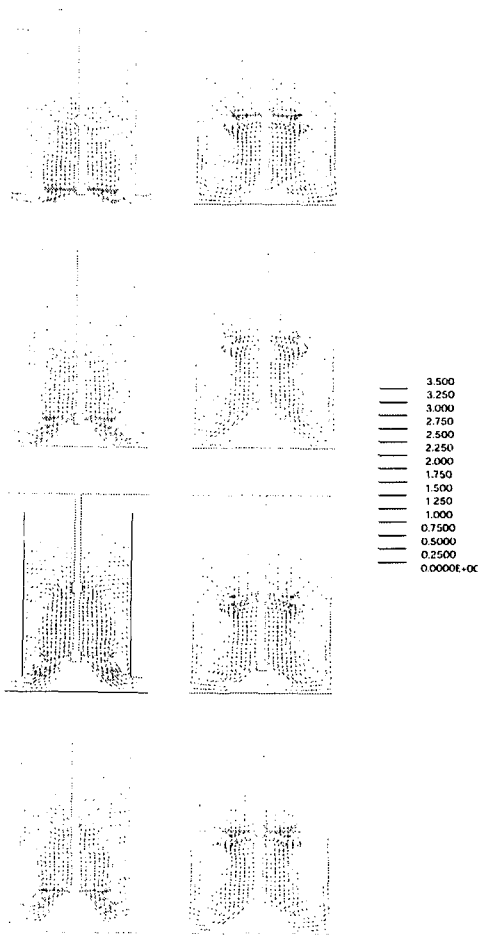


Fig. 6 Velocity Vector plot around the Impeller

3.2 토크의 실험과 계산결과 비교

유체 속 임펠라에 작용하는 힘은 다음과 같이 Shear Force와 Pressure Force의 합으로 나타난다. 이것을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

(1) Shear Force

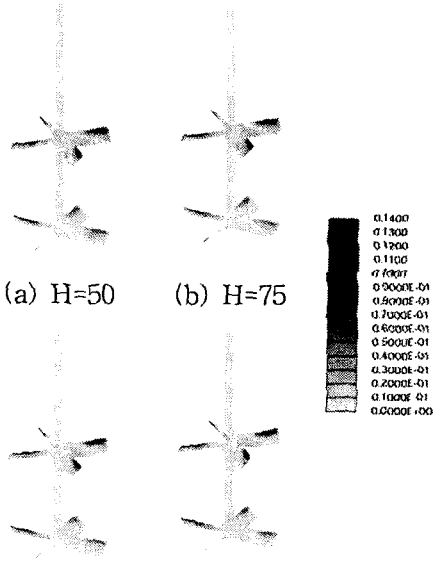
$$\overline{F_s} = -\tau_w A_b \frac{\overline{v_{par}}}{|\overline{v_{par}}|} \quad (3)$$

(2) Pressure Force

$$\overline{F_p} = P_b A_b \overline{n_b} \quad (4)$$

(3) Total Force

$$\overline{F_t} = \overline{F_s} + \overline{F_p} \quad (5)$$



(a) H=50 (b) H=75

(c) H=100 (d) H=125

Fig. 7 Total Force of Impeller Surface

여기서 사용된 변수는 다음과 같다.

A_b = 격자 면의 면적

$\overline{v_{par}}$ = 격자 면에 평행한 속도 벡터

$\overline{n_b}$ = 격자 면의 단위 방향 벡터

임펠라 표면에 작용하는 힘의 크기 분포는 그림 7에 나타내었다.

본 절에서는 토크의 실험 모델에서의 측정값과 계산 결과를 비교하였다. 토크의 계산은 앞에서 구한 임펠라의 Blade와 Shaft등에 표면의 Total Force를 이용하였다. 먼저 Shaft의 중심으로부터 각 고체 표면 격자 중심까지의 벡터 r_i를 계산하였으며, r_i벡터와 Total Force 벡터를 외적을 하여 각각의 격자 표면에 의해 나타나는 토크를 구해 전체 총합을 하였다. 그림 8에는 토크

Fig. 8 Calculation of Torque

의 계산방법에 대해 나타내었다. 이것을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$T = \sum_i r_i \times F_{ti} \qquad (6)$$

측정된 토크와 위의 계산 방법으로 계산된 토크에 대해 표 1과 그림 9에 비교하여 나타내었다. 임펠라의 높이가 감소하면 먼저 임펠라 표면에 작용하는 압력의 증가로 토크 또한 증가 할 것이다. 표 1과 그림 9에서 보는 것과 같이 임펠라의 높이가 감소함에 따라 필요한 토크가 증가하는 것을 볼 수 있다. 하지만 측정값과 계산 값 사이에는 약 28%의 오차가 발생하고 있는데, 오차의 원인으로는 먼저 실험모델에서 토크의 측정위치와 측정 방법을 생각할 수 있다. 본 연구에서 계산 결과는 임펠라에 작용하는 힘만을 가지고 계산을 수행하였지만, 실험모델에서 측정위치와 측정 방법에 따라 계산 결과와 오차가 발생할 수 있다. 또한 본 연구에서는 k - ε 난류모델을 사용하여 난류를 계산하였는데, 이것 또한 오차의 원인으로 생각할 수 있다.

4. 결론

Table 1 Torque on Impeller

	Computation	Experiment
125mm	39.83kg · cm	55.1kg · cm
100mm	40.02kg · cm	56.0kg · cm
75mm	40.39kg · cm	
50mm	41.54kg · cm	

본 연구에서는 산업용 교반기의 저속형의 표준인 Pitched Paddle 형의 임펠라를 가지는 교반기의 내부 유동에 대해 임펠라의 설치 위치에 따른 유동 변화와 토크의 변화에 대해 해석하였다. Pitched Paddle 형 임펠라의 유동 특성은 Flat Turbine 형과 비교하여 Bulk Flow의 발생 위치와 개수에 차이점을 보이는데, Pitched Paddle 형의 경우는 임펠라의 반경방향 아래에 하나의 Vortex가 나타난다. 또한 임펠라의 설치 위치가 낮아짐에 따라 Bulk Flow의 크기가 작아 지며, 교반기의 성능을 결정하는 정체점에 대해 아래쪽 정체점의 크기가 작아지는 것을 볼 수 있었다. 반면 Pitched Paddle 형의 임펠라의 특성상 위쪽의 정체점의 크기는 증가할 수 있다.

임펠라의 설치 위치가 감소함에 따라 토크의 크기는 증가하며 실험 모델에서 측정한 값과 계산에 의한 값의 오차는 있으나 경향성이 일치하였다.

교반기는 작업유체의 선택에 따라 많은 유동 변화가 예상된다. 본 연구에서는 Newtonian 유체인 물에 대해서만 해석을 하였다. 향후 Non-Newtonian 유체에 대해서도 해석을 수행 할 계획이다.

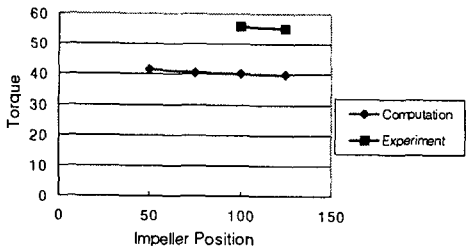


Fig. 9 Torque variation for various impeller position

후기

본 연구는 연구개발정보센터의 슈퍼컴퓨팅응용기술 사업의 일환으로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

[1] 山本一夫, 西野 宏, "攪拌技術", (1992).

[2] Kresta, S.M. & Wood, P.E, "The mean flow field produced by a 45 ° pitched blade turbine." The Canadian Journal of Chemical Engineering, (1993), pp.42-53.

[3] 김경천, 김상기 "회전교반기 내부의 유동특성", 대한기계학회 2000년도 유체공학부문 학술강연회 강연집, 부산대학교 (2000), pp.80-90.

[4] Torrez, C & Andre,C. "Simulation of a Rushton Turbine Mixing Yield Stress Fluids." Chem. Eng. Technol. (1999), pp.701-706.