

# 날개형상이 프로펠러형 수중믹서의 성능에 미치는 영향에 관한 수치적 연구

최영석\* · 이재환\*\* · 김상일\*\*\*

## A Numerical Study on the Effect of Blade Shapes on the Performance of the Propeller-type Submersible Mixers

Y. S. Choi\*, J. H. Lee\*\*, S. I. Kim\*\*\*

*Key Words: Submersible Mixer(수중 믹서), Blade Shape(날개 형상), Performance Prediction(성능 예측), Commercial Code(상용 코드)*

### ABSTRACT

In this research, the performance predictions of the submersible mixer were investigated. The variation of the performance characteristics by changing the impeller design parameters were discussed through the flow calculation results by using a commercial program, FLUENT.

The performance of the submersible mixers is related to the velocity diffusion profiles downstream of the impeller and also the required input motor power to mix the fluid. In this study, the various design parameters such as the number of blade, the hub and tip diameters, the impeller blade profiles and revolution speed of the blades were taken for the fixed values. The blade sweep direction, the chord length distribution along with the radius of the blade and the inlet blade angle were changed to make different testing models. The flow calculation results show the effect of the changed design parameters on the performance of the submersible mixers and also give some helpful information for designing more efficient submersible mixers.

### 1. 서 론

터보기계에서의 전산유체역학(CFD)을 이용한 연구는 최근 10여 년 동안 컴퓨터의 급속한 향상으로 인해 눈부신 속도로 발전하였으며 각종 난류모델 뿐만 아니라 LES(Large Eddy Simulation)나 DNS(Direct Numerical

Simulation)등의 새로운 기법을 이용한 다양한 연구가 국내외적으로 진행되고 있어 제품설계의 응용성이 더욱 확대되고 있는 추세이다.

국내외에서도 다양한 유동해석 기법을 통하여 유체 기계의 성능 및 소음을 예측하기 위한 방법이 제시되었고 응용 가능한 결과를 나타내주고 있다. 유동해석을 통한 터보기계의 성능예측 및 설계에의 기여도는 더욱 증가할 것으로 기대되고 있다.<sup>(1)</sup>

현재 많이 사용되고 있는 상용 유동해석 프로그램들도 특수한 분야의 전문적인 유동특성을 해석하기 위한 전용 프로그램과 일반적인 유동특성을 전반적으로 모두

\* 한국생산기술연구원 냉동공조연구팀  
\*\* 인하대학교 대학원, 한국생산기술연구원  
\*\*\* 금정공업주식회사 기술연구소  
E-mail : yschoi@kitech.re.kr

해석하기 위한 범용해석 프로그램으로 양분화 되면서 나 름대로의 영역을 구축하고 있으며, 실제 제품 설계나 성능평가에 그 활용도가 더욱 증가되고 있는 추세이다.<sup>(2)</sup>

본 연구에서는 탈질·탈인 등 혐기 처리를 위해 사용되는 프로펠러형 임펠러(impeller)를 가진 수중믹서의 유동해석을 통하여 임펠러의 설계에 있어서 중요한 변수들의 특성을 파악하고자 한다.

본 연구의 계산대상인 수중 믹서는 물탱크에서 저속으로 회전하면서 축류 및 반경 방향으로 유체를 확산시키는 역할을 한다. 이 수중믹서는 환경산업분야에서 미생물을 이용한 오수 처리, 특히 탈질·탈인 등 혐기 처리에 중요한 장치로써 사용되고 있다. 수중믹서에서 임펠러 성능은 기계 성능과 직결되는 만큼 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 프로펠러형 임펠러를 가진 수중믹서의 유동특성을 상용 프로그램인 FLUENT를 사용하여 해석하였으며, 임펠러의 중요한 설계 변수의 변화가 유동특성에 미치는 영향을 고찰하여 이를 바탕으로 설계변수와 성능간의 관계를 도출하였다.

본 연구의 목적은 설계변수를 변화시켜 설계변수와 성능간의 관계를 알아보고 이를 토대로 좀더 향상된 프로펠러형 임펠러를 제작하는데 있어 기초 데이터를 제공하고자 함에 있다.

## 2. 해석방법 및 설계변수

임펠러 내부유동 같은 회전체 해석문제에서는 좌표계의 변환을 통하여 유동 불안정성이 발생되지 않는 한 비정상 계산을 정상계산으로 구할 수 있다. 압축성 유체의 운동을 지배하는 질량보존 및 운동량 방정식을 이용하여 일정한 각속도로 회전하는 좌표계의 지배방정식을 구하면 다음과 같이 변환된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}_r) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{V}_r) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}_r \mathbf{V}_r) + 2\Omega \times \mathbf{V}_r + \Omega \times \Omega \times \mathbf{r} = -\nabla p + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (2)$$

식 (2)에서  $\Omega$ 를 수반하는 추가 항들은 첫 번째는 Coriolis force이고 두 번째는 원심력이고,  $\tau_{ij}$ 는 응력텐서이다. 식 (2)는 계산영역의 유체가 대부분 회전할 때 주로 쓰인다.<sup>(3)</sup>

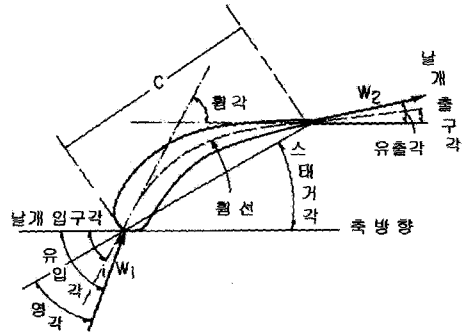


Fig. 1 Blade nomenclature

임펠러 내부유동은 대부분 난류로 존재하며 이를 위해 난류모형이 도입된다. 그러나 난류유동의 정확한 모사를 위한 난류모델은 알려진 바가 없으며, 본 연구에서는 가장 보편적인  $k-\epsilon$  난류모형을 사용하였다.

프로펠러형 임펠러의 설계는 작동점에서 필요한 성능을 발휘하도록 성능과 형상에 관련된 변수들을 조합해야 하나, 많은 수의 변수로 인해 각 변수들의 성능에 대한 독립적 영향의 평가는 매우 어렵다.

일반적으로 프로펠러형 임펠러의 성능과 관련된 변수 중 형상관련 변수는 스택각, 코드길이, 영각, 휩각, 투영면적비, 날개수 등이 있으며, 유속관련 변수로는 평균 축방향 속도, 유입 스윙속도, 유출 스윙속도 등이 있다.<sup>(4)</sup> 본 연구에서는 이들 중 코드길이, 날개 입구각, 방향각(sweep angle)에 대한 영향을 설계변수로 설정하였다. 익형 형상은 Fig. 1에 정의하여 나타내었다.

## 3. 계산 모델 및 방법

### 3.1 계산 모델

계산에 사용된 임펠러의 기본형은 회전수가 35 rpm이며 허브직경이 0.3m 팁직경은 2.3m이고, 날개수가 3개인 프로펠러형 임펠러이다. Table 1에 주어진 임펠러 설계변수들을 이용하여 반경에 따른 휩선을 구한 후, 휩각 10°이고 코드길이의 10% 두께의 C4 날개형상<sup>(4)</sup>으로 임펠러를 생성하였다. 또한, 날개 입구각은 유량 210[m<sup>3</sup>/min]을 만족하여 입사각이 없게 설계되었다.

모델 1은 후향날개각(backward sweep)형이며 모든 모델의 기본이 된다. 이를 바탕으로 모델 2는 전향날개각(forward sweep)형, 모델 3은 직선(straight)형이다. 모델별 전·후향각(sweep angle)은 Table 1에 주어져 있다. 모델 4는 날개팁에서 코드길이를 모델 1에 비해

Table 1 Design parameters of the model impellers

Model No.	Blade angle		Chord length		Sweep angle
	hub	tip	hub	tip	
Model 1 (backward)	57.32	11.49	0.26	0.1	-54
Model 2 (forward)	57.32	11.49	0.26	0.1	54
Model 3 (straight)	57.32	11.49	0.26	0.1	0
Model 4 (wide chord)	57.32	11.49	0.26	0.80	54
Model 5 (angle)	65.82	16.2	0.26	0.1	54

매우 크게 하였으며, 이를 통해 코드길이에 대한 영향을 보았다. 모델 5는 모델 1의 날개 입구각을 유량 300[m<sup>3</sup>/min]으로 만족하게 굵 날개각을 변화시켰다. 각각에 대한 모델 형상은 Fig. 2.에 나타나 있다.

### 3.2 계산 방법

본 연구에서는 3차원 피라미드 격자를 이용하였다. 비틀림이 심한 임펠러에 정렬격자를 생성한다는 것은 많은 시간과 노력이 요구되며 양질의 격자를 보장할 수 없다. 그에 반해 비정렬 격자는 복잡한 형상에 잘 적용된다. 일례로 대부분의 유동해석 프로그램들이 solver에 대한 향상은 더 이상 없는 반면에 비정렬 격자 solver에 대한 개선에만 주력하는 것을 볼 때 비정렬 격자는 응용성이 크다. 본 연구에 사용된 임펠러 사면체는 6770개이며, 전체 격자점수는 43,974개이다.

본 연구에서 제안된 모델들을 반경 24 m이고 길이 34m인 원형 덕트에 넣었다. 이때 경계 조건으로 유입 유량 210[m<sup>3</sup>/min]을 균일한 속도분포로 가정하여 주었으며, 출구에서는 구배가 없는 경계조건을 주었다. 믹

서는 35 rpm의 동일한 회전수로 회전한다. 모델 1, 2, 3은 임펠러 날개각 방향에 따른 영향을 보기 위함이고, 모델 4는 코드길이 변화에 따른 영향을, 모델 5는 입사각에 따른 영향을 보기 위하여 선정하였다. 각 모델에 대한 유동해석을 수행하여 그 결과를 비교 분석하였다. 난류 모델은 k-ε을 사용하였으며, 기본 벽법칙을 이용하였다. 수렴 조건은 모든 변수의 잔류량이 5×10<sup>-4</sup> 이하가 되도록 주었다.

### 4. 계산 결과 및 고찰

각 모델별로 계산된 결과를 정리하여 각 모델에 따른 임펠러에 작용하는 모멘트, 축 방향 작용힘, 소요동력, 유량, 입사각(incidence angle), 효율 등을 Table 2에 나타내었다.

유량 및 효율은 임펠러를 둘러싼 가상 원통형의 제어체적을 설정하고, 이를 통과하는 속도 및 압력을 유량평균하여 구한 값으로 나타내었다. 제어체적 내의 날개의 표면에 작용하는 압력 및 전단응력을 적분하면 날개에 작용하는 모멘트를 얻을 수 있고 이 모멘트와

Table 2 Calculated results

	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
Moment [N·m]	338.67	384.71	347.54	791.53	588.73
Power [W]	1241.3	1410	1273.8	2901.1	2157.8
Force [N]	1210.2	897.5	1259.7	1915.5	1589.8
Flow-rate [m <sup>3</sup> /min]	139.22	115.38	132.56	178.18	162.32
Angle of incidence [Deg]	5.21	7.01	5.71	2.31	9.73
Efficiency (%)	40	28.1	46	31.7	36.8

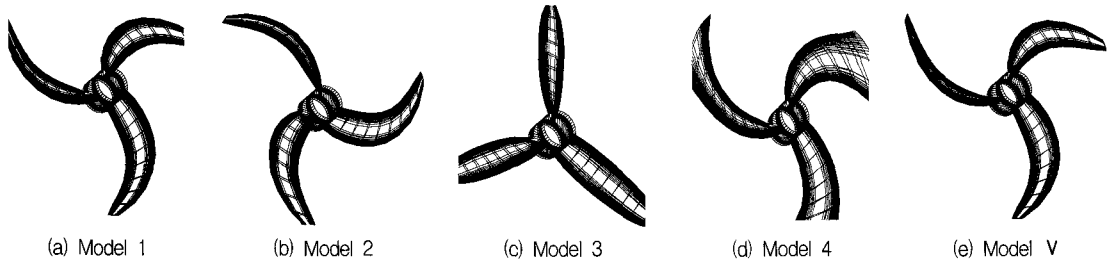


Fig. 2 Geometric configuration of the model impellers

회전수를 곱하면 날개에 작용하는 일량(Power)을 구할 수 있다. 이는 임펠러에 작용한 일량 즉 입력일량이고, 이 양과 제어체적을 통과하면서 유체가 얻은 에너지와의 비를 효율로 정의하였다. 입사각은 날개 입구각과 유입각의 차이를 나타낸다.<sup>(5)</sup>

먼저 유량면에서 살펴보면, 날개의 방향각의 경우는 전향각(forward) 보다는 후향각(backward)이나 방향각이 없는 경우가 유량이 크게 나타났다. 즉, 모델 1, 3이 모델 2보다 크게 나타났다. 날개 입구각의 경우는, 날개 입구각을 증가시킨 모델 5의 경우 모델 1보다 유량이 증가하나 날개 입구각의 증가만큼 유량이 증가하지 않았다. 팁에서의 코드길이를 크게 준 모델 4의 경우는 유량이 크게 증가하였다. 소요 동력면에서 살펴보면, 날개팁에서 코드길이를 크게 준 모델 4의 경우가 소요동력이 가장 컸으며, 날개 입구각을 크게 준 모델 5도 상대적으로 크게 나타났다. 방향각의 경우는 전향각의 경우인 모델 2가 모델 1, 3에 비하여 소요동력이 크게 나타났다.

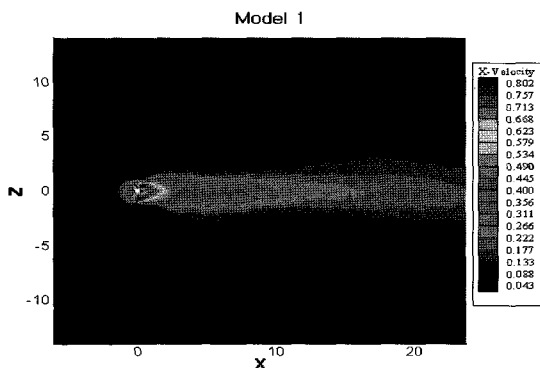


Fig. 3 Axial velocity contours (Model 1)

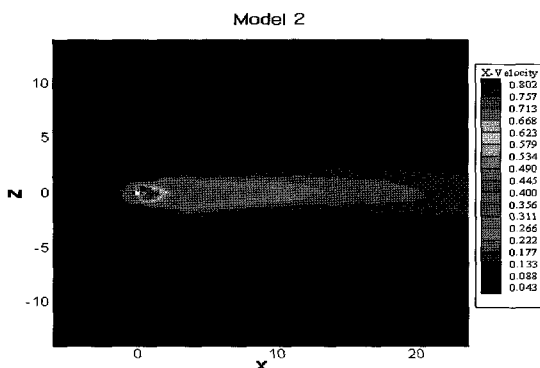


Fig. 4 Axial velocity contours (Model 2)

효율의 경우는 모델 3이 가장 크게 나타났으며 후향각인 모델 1이 전향각인 모델 2보다 크고 팁에서의 코드길이를 증가시킨 모델 4의 경우는 모델 1보다 낮았다. 입구날개각을 증가시킨 모델 5의 경우는 모델 1의 경우보다 효율이 낮게 나타났으며 이때의 입사각은 모델 1보다 컸다. 따라서 최적 효율점을 나타내는 적정 입사각이 존재할 것으로 판단된다.

모델 1의 축방향 속도분포를 Fig. 3에 나타냈으며, Fig. 4에는 모델 2의 축방향 속도를 나타내었다. 여기서 x는 축방향좌표를 나타내고 z는 축방향과 직교인 좌표로서 실제로 반경방향 좌표를 나타낸다. Fig. 3, 4를 비교해 보면 모델 1이 반경방향으로 더 넓게 퍼져 있음을 알 수 있다. 이는 수중믹서의 성능 중 속도분포에 있어서는 모델 1이 유리함을 나타내고 있다.

Fig. 5는  $x/d=3$ 일 때, 즉 임펠러 외경(d)의 3배만큼 축방향으로 떨어진 후류 영역에서 각 모델의 속도크기가 반경방향으로 분포하고 있는 경향을 비교해서 나타내고 있다. 그림에서 x축은 반경방향의 거리를 무차원화해서

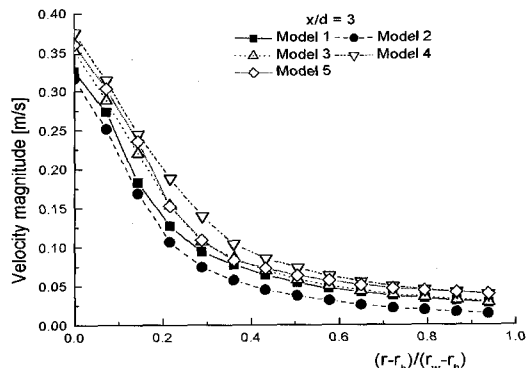


Fig. 5 Comparison of the velocity magnitude distribution

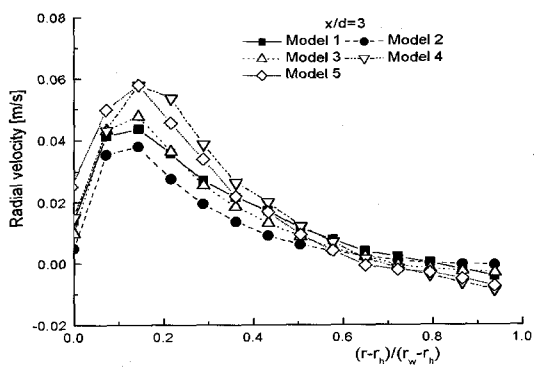


Fig. 6 Comparison of the radial velocity distributions

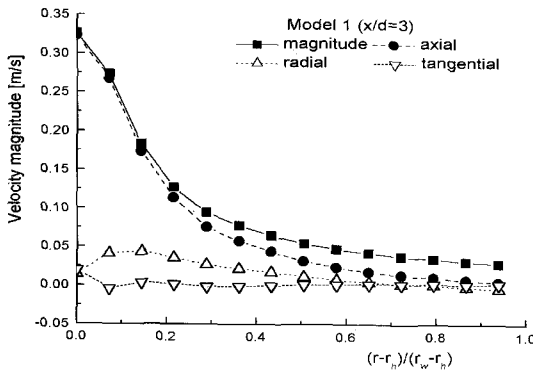


Fig. 7 Comparison of the velocity components (Model 1)

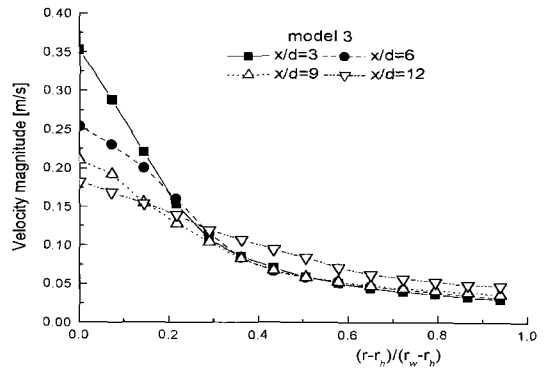


Fig. 8 Velocity distributions along the axial distance (Model 3)

나타내었으며,  $r_h$ 는 날개 허브의 반경을  $r_w$ 는 계산 영역의 바깥 벽의 반경이다. Fig. 5에서 나타난 것처럼 각 모델의 속도크기는 Table 2에서 보여진 유량과 매우 밀접한 관계를 가지고 있다. 방향각의 영향을 보면 후향 (Model 1) 및 직선 날개각(Model 3)이 전향 날개각(Model 2) 보다 속도크기가 크고, 날개 팁에서의 코드길이가 큰 모델 4가 가장 큰 속도분포를 보이고 있다 하지만 모델 4의 경우 효율이 작아서 속도 분포만을 가지고 좋은 성능이라고 판단하기는 어렵다. 코드길이 변화의 영향, 즉 모델 4의 영향은 Fig. 6에 나타난 각 모델의 반경속도를 보면 더욱 잘 알 수 있다. 모델 4가 가장 큰 값을 나타내며 이는 팁에서의 코드길이의 증가로 인해 유체가 날개의 마찰로 인한 원심력의 영향을 다른 모델들 보다 크게 받기 때문이며, 그 결과로 반경속도성분이 상당히 커지는 것으로 판단된다.

$x/d=3$ 일 때 모델 1에서 각 속도 성분을 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 축 방향속도가 속도크기의 대부분을 차지하는 가장 지배적인 속도 성분이며, 상대적으로 반경속도가 접선속도보다 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 모델 3에 대하여 축 방향을 따른 임펠러의 하류 지점에서 속도분포의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 임펠러의 하류로 감에 따라 축 중심 근처의 높은 속도성분이 확산되어 반경방향으로 퍼져 감을 알 수 있다.

## 5. 결 론

상용 유동해석 코드인 FLUENT를 사용하여 프로펠러형 수중믹서에 대한 유동해석을 수행하였다. 임펠러의 형상과 관련된 중요 변수를 선정하여 이를 변화시

켜 임펠러의 형상에 따른 모델 5가지를 생성하였다. 각 모델의 계산결과를 분석하여 프로펠러형 수중믹서의 설계에 있어서 주요 형상변수가 어떻게 유동특성에 영향을 미쳐 결과적으로 수중믹서의 성능에 영향을 주는 지를 수치결과를 분석하여 살펴보았다.

먼저 기준 모델인 후향 경사각 임펠러가 전향 경사각 임펠러보다 유량이나 효율면에서 우수한 것으로 나타났다으며 경사각이 없는 모델과는 비슷한 성능특성을 나타내었다.

둘째로 날개팁 코드길이를 증가시킨 임펠러는 기준 모델에 비해 속도분포의 확산정도는 크나, 효율은 낮은 결과를 보이고 있다.

마지막으로 날개 입사각을 변경하면 유량이 달라지며 이때의 입사각도 달라지게 되었다. 날개입사각, 유량, 효율은 어떤 상관관계를 가질 것으로 판단되나, 현재로는 명확한 결론을 내릴 수는 없다.

## 참고문헌

- (1) B. Lakshiminarayana, 1996, "Fluid dynamics and heat transfer of turbomachinery," John Wiley & Sons, Inc.
- (2) ATES, 1999, "제4회 한국 Fluent user's group meeting".
- (3) 1997, "Fluent 4.4 : user's guide volume 2," Fluent Incorporated.
- (4) N. A. Cumpsty, 1989, "Compressor aerodynamics," Longman scientific & Technical.
- (5) S. L. Dixon, 1975, "Thermodynamics of turbomachinery," Pergamon press.