

# 수처리 교반기용 프로펠러의 3차원 유동 전산 해석 및 성능 특성 분석

배 옹 균, 김 대 한, 황 승 태, 문 영 준\*

고려대학교 기계공학과

## THREE-DIMENSIONAL FLOW COMPUTATION AND PERFORMANCE CHARACTERISTICS ANALYSIS OF PROPELLERS FOR WATER TREATMENT MIXER

Y.G. Bae, D.H. Kim, S.T. Hwang and Y.J. Moon\*

School of Mechanical Engineering, Korea Univ.

*In this study, the characteristics of water treatment mixer with various propeller profiles are numerically investigated. The computation was conducted by solving the incompressible Navier-Stokes equations on unstructured tetrahedral elements with  $k-\varepsilon$  turbulence model. It was found that the spreading angle and swirl magnitude of the jet are important factors for the mixer efficiency, since they clearly characterize the propeller and the frontal surface area of the propeller but not so much affected by the skew angle if it exceeds 30 degrees. The case1 and case2 models are found to show the best propeller efficiency. The case2 with low blade angle, however, requires the lowest power input for the same discharge capacity as the case1.*

**Key Words :** 전산유체역학(CFD), 프로펠러 전산유동 해석(Propeller computational fluid dynamics), 수처리 교반기(Water treatment mixer)

### 1. 서 론

물 산업은 급속한 인구 증가와 환경오염에 따른 물 부족 심화 등의 이유로 꾸준히 성장하여 왔으며 미래 유망산업으로 부상하고 있다. 그 중 수처리와 관련된 분야는 물 산업 가운데서 큰 비중을 차지하며 따라서 수처리 산업에 사용되는 장비에 대한 수요도 점차 증가하는 추세이다. 대표적인 수처리 장비인 펌프[1,2]는 활용 분야별로 특화된 여러 형태가 제작되고 있으며 작동 성능 향상 및 에너지 절감을 위한 개선안이 지속적으로 도출되고 있다[3-5]. 국내의 수처리 장비 업체들은 대부분 해외 유명 기업과의 기술 제휴를 통하여 펌프류 장치를 생산하고 있으며 그 중 일부 중소 업체들은 외국 업체 또는 국내 대기업 제품을 모방하여 생산, 판매하거나 해외 부품을 수입하여 조립 및 판매를 진행하는 실정이다[6]. 이는 국내 수처리용 펌프 산업에서 제품의 국산화를

조기에 실현한다는 성과를 달성하다는 이점이 있으나, 원천 기술 확보 또는 기술 개발 측면에서 한계를 초래하였다[7]. 에너지 절감이 전 산업 분야에 걸쳐 이슈화 됨에 따라서 수처리 산업에 사용되는 펌프류의 설계 요구 조건 또한 점차 고효율, 저소음, 내환경성, 그리고 높은 신뢰성 구축의 중요성이 강조되고 있다. 따라서 수처리용 펌프류의 원천 설계 기술 확보를 바탕으로 한 고부가가치의 제품 개발은 국내 펌프류 산업이 세계 시장으로 진출하기 위해 반드시 필요한 과정이기도 하다.

상기의 문제점들을 해결하기 위해서는 먼저 수처리용 교반기에 사용하는 프로펠러의 성능 특성을 분석할 필요성이 있다. 교반기 프로펠러는 동작 환경과 사용 목적에 따라 상당한 형상의 차이를 보이고, 세계 유수의 수처리용 교반기 생산업체마다 성능 특색이 각자 다르므로 이에 대한 교반기 성능 분석이 필수적이다.

본 연구에서는 해외 수처리 교반기용 프로펠러의 유동 특성 분석을 통해 다양한 형태의 프로펠러 성능 특성 파악을 진행하였고, 이를 토대로 프로펠러 성능을 결정하는 물리적 원인 고찰 및 프로펠러 설계 방향을 제시하는 것을 주목적으로 한다.

Received: February 9, 2015, Revised: March 6, 2015,

Accepted: March 6, 2015.

\* Corresponding author, E-mail: yjmoon@korea.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/ksce.2015.20.1.010>

© KSCFE 2015

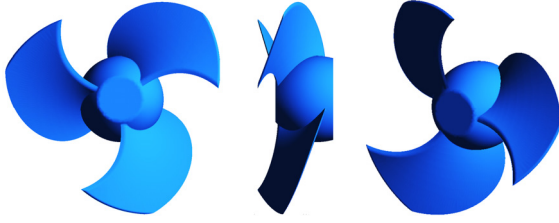


Fig. 1 Mixer propeller profiles

2. 연구내용 및 방법

본 연구에서는 다양한 수치리용 프로펠러의 특성 분석 및 성능 비교를 위하여 전산유동해석 시뮬레이션을 사용하였다. 작동유체로는 25°C 물을 사용하였으며, 난류 모델은 standard k-ε 모델을 적용하였다[8]. 사용한 연속 방정식과 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot (U_j) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) & \\ = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_{Mrot} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $\mu_{eff}$ 는 난류 점성 항이며  $S_{Mrot}$ 은 회전 좌표계로 인한 source 항으로서 다음과 같이 구성된다.

$$\mu_{eff} = \mu + C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2)$$

$$S_{Mrot} = -2\rho\omega \times \vec{U} - \rho\omega(\omega \times \vec{r}) \quad (3)$$

전산해석 계산의 수렴성 판단 기준은 연속 방정식과 모멘텀 방정식 각각의 요소에 대하여 잔차의 평균 제곱근(Root mean square of residual)이  $10^{-6}$  이하의 값으로 수렴하는 것으로 선택하였다. 각 케이스 별로 프로펠러의 작동 성능을 비교하기 위하여 교반기 프로펠러 효율( $\eta_p$ )의 개념을 사용하였으며, 본 연구에서 사용한 작동 효율( $\eta_p$ )은 다음과 같다.

$$\eta_p = \frac{F \cdot V}{2\pi \cdot RPS \cdot T} \quad (4)$$

식 (4)에서 F는 유동 토크 방향으로 작용하는 추력(thrust), V는 프로펠러 평균 유속, RPS는 프로펠러의 초당 회전 수, T

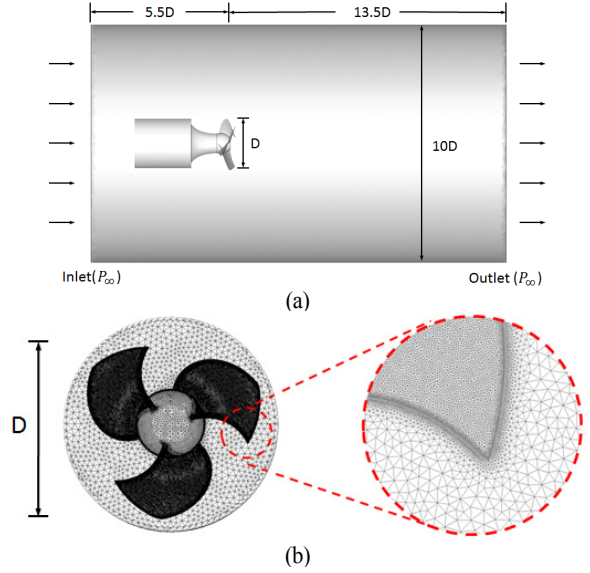


Fig. 2 (a) Schematic of computational domain and (b) grid with detailed view

는 유동 방향을 기준으로 프로펠러에 작용하는 토크(torque)이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전산 해석 격자 및 경계조건

Fig. 1의 프로펠러를 사용하여 직경 0.8D(D = 프로펠러의 직경)의 유선형의 모터가 포함된 수치리 교반기를 구성하였다. 낮은 수위에서 작동하는 교반기이기 때문에 중력에 의한 깊이 효과는 고려하지 않은 상태에서 진행하였다. Fig. 2(a)에는 본 연구에 사용된 실린더 형태의 전산해석 도메인에 대한 개념도를 나타내었다. 유동 상류 방향으로 프로펠러 지름 대비 5.5D 만큼의 유동 공간을, 유동 하류 방향으로 13.5D 만큼의 유동 공간을 확보하였다. 사용한 경계조건은 벽과 입·출구를 포함한 모든 경계면에 개방 경계조건(opening boundary condition)을 사용하여 무한한 크기의 수조 속에 잠겨 있는 수치리 교반기를 모델링하였다. 개방 경계조건은 압력 조건의 한 종류로서(P = P<sub>spec</sub>) 경계면 상에서 유동의 유·출입을 허용하여 내부에 형성되는 압력장에 의해 유동장이 형성 된다. 유입되는 유동에 대해서는 전압(total pressure)을, 유출되는 유동에 대해서는 정압(static pressure)을 적용하여 계산을 수행한다. 경계면에서의 난류 강도는 5%를 사용하였고 벽면에서의 난류 방정식은 scalable wall function을 사용하였다. 계산 도메인은 프로펠러를 감싸고 있는 회전 도메인과

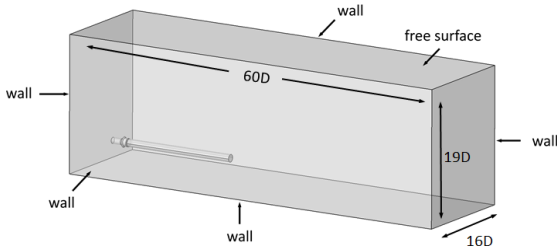


Fig. 3 Schematic of water tank with a mixer immersed

그 외의 부분인 정지 도메인으로 구성된다. 회전 도메인은 프로펠러 형상에 의한 유동 특성 파악을 위해 높은 해상도가 요구되며 약 400만개의 조밀한 격자를 사용하였다. 정지 도메인에서 유동 하류 쪽의 격자는 상대적으로 조밀한 형태를 띠고 있고, 외부로 갈수록 성긴 격자를 사용함으로써 높은 계산 효율을 확보하였다. Fig. 2(b)는 프로펠러 주변에 사용된 조밀한 격자의 상세 구조를 나타낸다. 전체 도메인에 대해 사면체 격자를 사용하였으나, 벽 주변 영역에 대해서는 전단 응력에 의해 발생하는 유동을 포착하기 위해 정밀도를 높인 프리즘 격자(Prism grid) 구조를 사용하였다. 프리즘 격자는 0.3 mm의 최소 격자가 8개의 층으로 이루어져 있으며 1.2의 성장률(growth rate)로 적용되어 있다.

### 3.2 프로펠러 3차원 유동 전산 해석의 신뢰성 검증

단일 프로펠러의 전산 해석 과정을 진행하기에 앞서 도메인 크기에 따른 해석 결과 차이 여부를 조사하였다. 테스트 도메인은 사방이 벽으로 막혀 있는 수조 도메인과 무한한 크기를 가지는 원형 도메인으로 구성하였다. Fig. 3는 상부면을 제외한 나머지 경계면들이 모두 벽으로 막혀있는 사각 수조 도메인이다. 이 때 유동 방향으로 충분한 길이가 확보되지 않으면 벽에 부딪혀 반사되는 유동이 상류에 영향을 끼칠 수 있으므로 충분히 긴 길이의 도메인을 확보하였다. 모든 경계면에 개방 경계조건을 사용하여 무한한 크기의 수조 속에 잠겨 있는 수처리 교반기를 위한 도메인은 Fig. 2(a)에 도시되어 있고, 두 도메인에서 동일한 수처리 교반기에 대해 성능 분석을 수행 하였다.

Table 1 Domain dependency test

Type	RPM	Torque (N*M)	Thrust (N)	Discharge Capacity (m <sup>3</sup> /min)	P <sub>m</sub> (W)	η <sub>p</sub>
Water tank	1750	5.7	166.8	3.42	1040.2	46.6%
Opening cylinder	1750	5.6	156.5	3.42	1032.9	43.7%

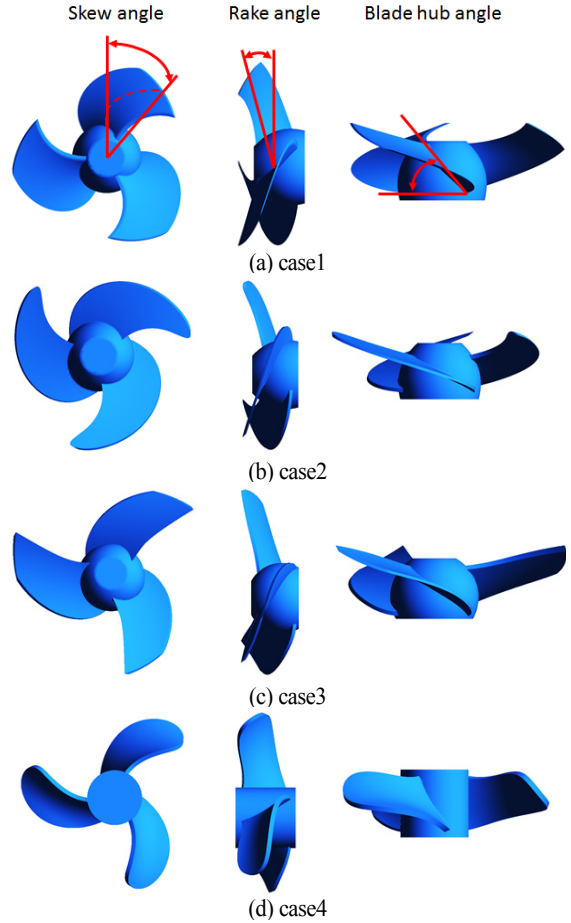


Fig. 4 Types of propellers

각 도메인에 대한 프로펠러 회전 속도(RPM), 토크(torque), 추력(thrust), 토출량(discharge capacity), 소요 동력(P<sub>m</sub>), 프로펠러 효율(η<sub>p</sub>)의 항목을 Table 1에 정리하였다. Table 1에 의하면 모든 항목에 대해 사각 수조 도메인과 원형 도메인의 성능 측정 결과 차이가 미미함을 확인할 수 있다. Fig. 3에 도시된 사각 수조의 경우 유동 방향으로 충분히 긴 도메인을 가져야 하기 때문에 유동 하류방향으로 발달된 유동을 확보하기까지 원형 도메인에 비해 5배 이상의 시간이 소요되었다. 따라서 효율적인 전산 해석을 진행하기 위해 본 연구에서는 개방 경계 조건을 사용한 원형 도메인을 이용하였다.

### 3.3 수처리 교반기 프로펠러의 전산 유동 해석

#### 3.3.1 프로펠러의 형상 및 성능 평가

본 연구에서 사용한 수처리 교반기용 프로펠러의 3차원 형상을 Fig. 4에 도시하였고 각 프로펠러의 사양은 Table 2에

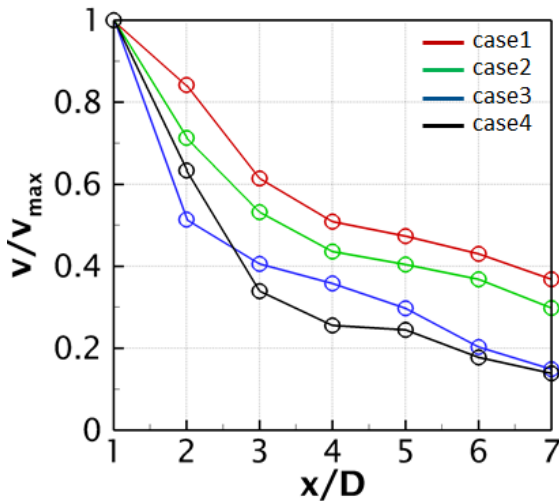


Fig. 5 Axial velocity reduction along the centerline

정리하였다. 또한, 프로펠러의 3차원 형상 특성을 표현하기 위해 스쿠 각(skew angle), 레이크 각(rake angle), 허브 쪽 날개 각(blade hub angle)은 Definition of propeller geometry[9-11]를 이용하여 측정하였다. Table 2에 정리된 형상 특성 중 프로펠러 면적 비는 직경 면적 대비 프로펠러의 면적을 나타낸다.

각 프로펠러의 상대적인 성능 비교를 위해 유동 방향으로의 거리(x축)는 프로펠러 직경으로 무차원하여 1D에서 7D까지 나타내었고, 축 방향 속도(y축)는 case별로 최대 속도를 가지는 1D에서 속도 값으로 무차원 하여 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에 의하면 case1에서 형성된 유동은 토출 방향으로 진행함에 따라 가장 낮은 속도 감소량을 나타내는 반면, case4는 가장 높은 속도 감소량을 보인다.

유동이 반경 방향으로 확산되지 않는다면, 전단류에 의한 마찰 손실로만 감소되기 때문에 초기 속도의 상당 부분이 유지될 것이라고 예상할 수 있다. 즉, 하류 방향의 높은 속도 감소량은 유동이 반경 방향으로 확산되고, 직진성이 충분히 확보되지 못하였음을 의미한다. 이러한 직진성을 강화하기 위해 유동 방향으로 기울어져 있는 프로펠러 형상을 이용한

다. 프로펠러의 레이크 각이 클수록 축 방향 속도 성분이 강화되기 때문에 유동의 직진성을 향상 시키게 된다. 이는 Fig. 5에서 레이크 각의 크기와 속도 감소율의 크기가 동일한 순서를 나타내는 것을 통해 확인 할 수 있다.

레이크 각 뿐만 아니라 프로펠러 면적 비 역시 유체의 직진성 강화에 영향을 미치는 요소이다. 이는 프로펠러 면적 비가 크면 더 넓은 유효 면적에서 유체에 직진성을 부여하기 때문이다. 실제로 case1과 case2는 case3과 case4에 비해 약 30% 이상의 유효 면적을 가지고 있는데, 속도 감소량에서도 동일한 순서를 나타내고 있다.

Table 3에서는 프로펠러 3차원 유동 해석 결과를 정리하였다. 각 프로펠러의 형상 차이로 인해 토크와 추력의 개별 비교는 불가하나, 프로펠러 효율은 형상 효과를 표준화하였기 때문에 일원화된 기준으로 비교할 수 있다. 여기서 프로펠러 효율( $\eta_p$ )이 앞서 확인한 축 방향 속도 감소량과 동일한 경향을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 점들로부터 축 방향 속도 감소량이 작을수록 높은 추진 성능을 보유했을 수 있다는 것을 알 수 있다.

Table 3에 의하면 토출량 역시 프로펠러의 형상에 영향을 받는다. 각 프로펠러의 유입부 형상에 근거하여 속도 삼각형을 그렸을 때 유동의 축방향 속도와 유량은 비례 관계를 가질 것이라고 예상할 수 있다. Table 2의 프로펠러 사양 중 허브 쪽 날개 각이 유입되는 축방향의 속도 성분을 결정하기 때문에 토출량과 밀접한 연관성이 있다고 판단된다. Table 2와 Table 3를 통해 토출량이 많은 프로펠러는 큰 허브 쪽 날개 각을 보유하고 있음을 확인 할 수 있다. 다만, 높은 축방향 속도로 인해 많은 토출량이 확보 되지만, 상당한 토크가 발생하게 되어 다소 높은 소모 동력과 낮은 효율을 보인다는 단점이 존재한다.

3.3.2 프로펠러의 유동 특성 분석

본 절에서는 교반기용 프로펠러의 성능 차이를 규명하기 위해 유동의 확산성과 직진성에 관한 분석을 진행하였다. 우선, 유동 하류 방향으로 0.4D의 위치에서 프로펠러 직경과 동일한 크기를 가지는 평면상의 스윌을 측정하였다. 이는 스윌이 유동의 원주 속도를 의미하고 유동의 확산성을 가늠할

Table 2 Propeller specifications

Type	Diameter (mm)	Propeller area ratio	Skew angle(°)	Rake angle(°)	Blade hub angle(°)
Case1	190	0.42	40	16	50
Case2	183	0.44	77	13	28
Case3	228	0.33	35	9	36
Case4	222	0.29	38	5	60

Table 3 Performance of various types of propeller

Type	RPM	Torque (N*M)	Thrust (N)	Discharge Capacity (m <sup>3</sup> /min)	P <sub>in</sub> (W)	$\eta_p$
Case1	1750	10.9	356.6	3.0	2047.9	43.4%
Case2	1750	7.5	261.2	2.8	1367.1	42.5%
Case3	1750	43.2	1011.0	3.8	7921.6	40.4%
Case4	1750	77.5	1206.0	4.9	14203.1	37.6%

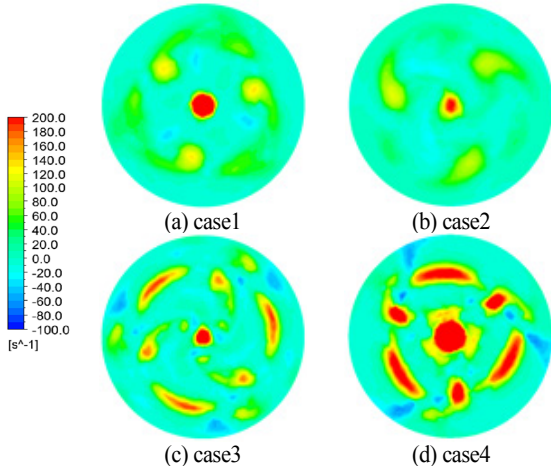


Fig. 6 Swirl contours

수 있는 척도가 되기 때문이다.

평면에서 측정된 스월은 Fig. 6에 도시하였다. 상대적으로 case1과 case2는 스월의 세기가 작은 반면, case3과 case4는 스월의 세기가 크다는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 5의 속도 감소량과 Table 3의 효율 순서와도 일치하는 결과로써 프로펠러 형상 특성에 의한 스월의 차이는 분명하다는 것을 확인할 수 있다.

즉, 프로펠러의 형상에 의한 스월 차이로 인해 유동의 직진성이 결정된다. 프로펠러를 통과한 유동이 하류 방향으로 이동할 때, 큰 스월을 가진 유동은 통과 경로 상에서 더 많은 유체와의 상호 작용을 통해 전단류에 의한 손실이 크게 발생한다. 이러한 손실로 인해 유동의 직진성이 감소되어 반경 방향으로 유동이 확산된다. 이에 반해 작은 스월을 가진 유동은 전단류에 의한 손실이 크게 발생하지 않기 때문에 이와 반대의 양상을 나타낸다. 따라서 스월과 유동의 직진성은 서로 음의 상관관계를 가진다는 것을 확인하였다.

Fig. 7은 유동의 직진성 차이를 확인하기 위해 유입된 유동의 실제 거동을 가시화한 유선(streamline)이다. 표현된 유선의 개수는 약 300개이며 프로펠러 직경과 동일한 크기의 유입부에서부터 후류 끝까지 이어지고 있다. 작은 스월과 속도 감소량을 가지고 있는 case1과 case2의 경우 Fig. 7(a),(b)에서 확인할 수 있듯이 유동이 반경 방향으로 확산되지 않고 높은 직진성을 가진다. 이에 반해, case3과 case4는 큰 스월과 속도 감소량을 가지고 있기 때문에 Fig. 7(c),(d)와 같이 낮은 직진성을 가지며 유동이 반경 방향으로 확산되는 양상을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 유동의 확산 각도에 대한 개념도이다. 프로펠러에서 형성되어 하류로 흘러가는 유동이 초기 속도 값의 10%의

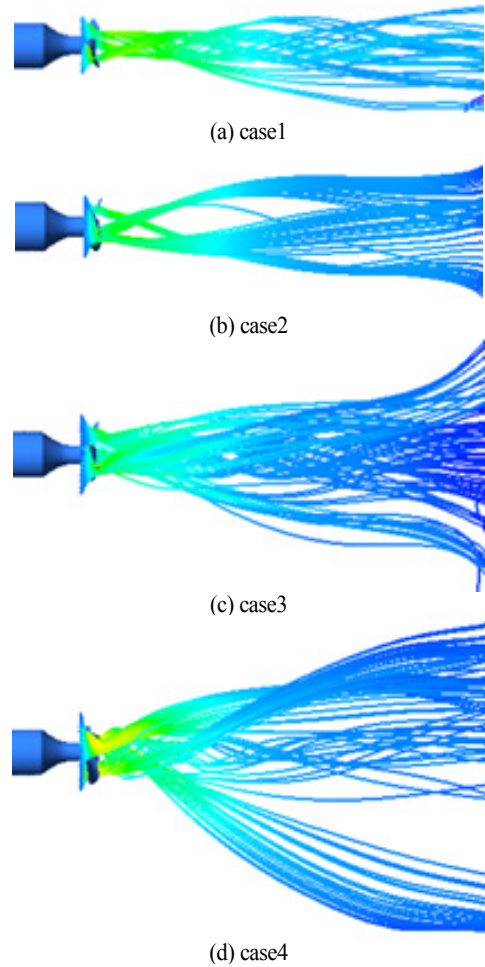


Fig. 7 Streamlines

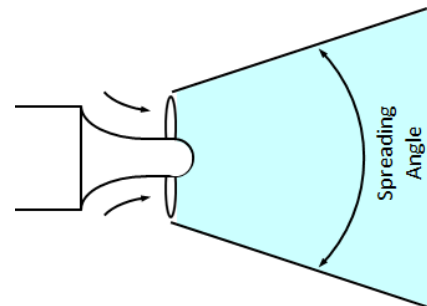


Fig. 8. Definition of jet spreading angle

크기로 확산 될 때의 각도와 7D에서의 축 방향 속도 감소량을 Table 4에 정리하였다. Table 4에 나타난 확산 각도의 값은 유동의 스월 세기 및 축 방향 속도 감소량으로 설명한 유

동의 직진성과 동일한 경향을 나타낸다.

프로펠러의 형상 특성 중 스큐 각은 프로펠러가 고속 회전할 때 날개 끝단에서 발생하는 와류로 인한 캐비테이션을 감소시키거나 지연 시키는데 사용되는 요소이다. 하지만 프로펠러가 일정 각 이상의 스큐 각을 가지게 되면 캐비테이션 감소 효과가 더 이상 두드러지게 증가하지 않는다. 실제로 case1과 case2는 33° 이상의 스큐 각 차이가 존재하지만 날개 끝단 와류의 생성에는 큰 차이가 없다는 것을 확인할 수 있다. 즉, 프로펠러의 스큐는 프로펠러의 추진 성능에는 큰 영향을 미치는 요소가 아니라고 판단된다. 따라서 본 연구에서 고찰한 유동 해석을 통해 레이크 각과 축 방향 면적이 프로펠러의 추진 성능에 가장 밀접한 관련이 있는 요소임을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 수처리 교반기용 프로펠러의 3차원 유동 전산 해석 및 성능 특성 분석에 관한 연구를 수행하였다. 이를 통해 프로펠러 제트 유동의 확산성과 직진성에 대한 상관 관계를 규명하였다. 넓은 프로펠러 면적비와 큰 레이크 각은 유동의 직진성을 향상시킬 수 있는 형상임을 확인하였고, 프로펠러의 스큐각과 허브 쪽 날개각은 직진성에 크게 영향을 주지 않음을 알 수 있었다. 한편, 작은 허브 날개각을 사용하는 case2는 효율이 매우 좋으며 동일 유량 대비 가장 적은 전력 소모량을 필요로 하는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 환경산업기술사업의 환경산업선진화기술개발사업인 ‘외류핵 강화기술을 적용한 교반기 개발’ 과제의 연구

Table 4 Jet spreading

Type	Axial velocity reduction	Spreading angle (°)
Case1	-0.632	28
Case2	-0.702	37
Case3	-0.851	38
Case4	-0.861	48

비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

[1] 1990, Sayers, A.T., "Hydraulic and compressible flow turbomachines," *McGraw-Hill*.

[2] 2006, Yang, T.Y. and Ahn, B.S., "Medium and low speed agitators for sewage treatment," *Fluid machinery research and development conference*, pp.453-456.

[3] 2008, Oh, S.Y., "Improvement of water treatment processes and equipment," *Journal of Fluid Machinery*, Vol.11, No.3, pp.56-63.

[4] 2011, Cho, Y.M., You, S.J., Roh, J.S., Bin, J.H., Choe, K.J., Lee, K.U., Lee, G.B. and Lee, J.G., "Evaluation of Pressurized Water Diffusion in Water Treatment Process Using CFD," *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol.33, No.5, p359-367.

[5] 2005, Hong, S.S., Kim, D.J., Kim, J.S. and Kim, J.H., "Hydraulic Performance test of Turbopump," *The Korean Society of Propulsion Engineers*, pp.243-247.

[6] 2011, Kim, J.H. and Seo, S.H., "High Efficiency Pump Certification System & Cases of High Efficiency Pump Developments," *The Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol.4, p.161.

[7] 2004, Oh, S.Y., "Improving the reliability of the water treatment machine," *Journal of Fluid Machinery*, Vol.7, No.2, pp.50-56.

[8] 1999, Ferziger, J.H. and Peric, M., "Computational methods for fluid dynamics," *Springer, 2nd edition*.

[9] 2007, Lee, C.S., Suh, J.C., Hyun, B.S., Kim, M.C., Suh, S.B. and Moon, I.S., "Propeller design," *Munundang*.

[10] 1994, Charles, N.A. and Robert, H.L. "Design of optimum propellers," *Journal of Propulsion and Power* 10.5, pp.676-682.

[11] 1990, Nho, I., Lee, C. and Kim, M., "A Finite Element Dynamic Analysis of Marine Propeller Blades," *International Symposium on Practical Design of Ships and Mobile Units (PRADS)*, 4th.