

RANS 기반 CFD 활용 사류 펌프 내부 유동 및 공동 현상 수치해석적 분석

안현준* · 김용인** · 정재호*†

Numerical Analysis of Internal Flow and Cavitation Phenomenon for a Mixed-Flow Pump with RANS-based CFD Methodology

Hyun-jun An*, Yong-in Kim**, Jae-ho Jeong*†

Key Words : Computational fluid dynamics(전산유체 역학), Mixed-flow pump(사류 펌프), Cavitation(공동 현상), Vortex identification(와류 구조 가시화)

ABSTRACT

Computational fluid dynamics were widely used to analyze the hydrodynamic behavior of the mixed-flow pump, and reliability and accuracy were validated by comparing the results with the experimental data. In this study, complicated cavitation phenomena has been implemented by the RPE model. As a result, it has been found that the overall error was 6.8% through comparison with the performance curve of the analysis value and the experimental data. Recirculation occurred near the shroud at the impeller inlet when the flow rate was 6 m³/min. In addition it was found that non-uniform pressure drop occurred at the impeller outlet when the flow rate was 9 m³/min. Through vortex visualization technique, the onset position of the tip leakage vortex captured at the blade tip region of suction surface. By comparing with vortex structure and cavitation region, it was found that tip leakage vortex suppresses cavitation phenomenon at the blade tip region of suction surface.

1. 서 론

사류펌프는 현대 산업 분야에서 널리 사용되는 유체 기계 시스템 중 하나이다. 이는 유체를 효과적으로 이송하고 압력을 증가시키는 기능을 수행한다. 그러나 사류펌프의 설계와 운영에는 여러 가지 복잡한 유동 현상이 나타난다. 이중 공동 현상은 유체의 속도 변화에 의한 압력 차이로 인해 유체 내에 공동이 발생하는 현상을 뜻한다. 이는 임펠러의 급격한 충격을 주어 유체의 흐름, 압력, 온도 등에 영향을 미치며 사류 펌프의 성능과 안정성에 중요한 영향을 미칠 수 있다. 따라서 이러한 현상들을 정확히 이해하고 모델링하여 예측하기 위해서는 전산유체역학 분석이 필요하다. 전산유체역학은 사류 펌프의 내부 유체 흐름을 시뮬레이션하고, 공동 현상의 발생과 영향을 예측하는 데에 사용된다.

최근에는 전산유체역학 기술이 크게 발전하면서, 사류 펌프

의 설계 및 운영에 있어서도 이를 활용한 수치해석이 활발히 이루어지고 있다. 하지만, 이러한 수치해석 결과의 신뢰성과 정확도를 보장하기 위해서는 이를 실험 데이터와 비교하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 전산유체역학을 통해 얻은 해석결과와 실험 데이터를 활용하여 사류 펌프의 유체 역학적 특성을 비교하였다. 또한 전산유체역학 결과를 활용하여 와류 가시화를 진행하였다. 이를 통해 임펠러의 팁에서 발생하는 팁 누설 와류를 확인하였고 와류 구조의 유동 특성을 파악했다. 이후 와류 구조와 공동 현상 분석을 통해 와류가 임펠러의 흡입부에서 공동현상에 미치는 영향을 확인했다.

이러한 연구는 사류 펌프를 비롯한 다양한 유체 기계 시스템의 안정성과 성능 향상을 위한 중요한 연구 방향을 제시할 것으로 도모된다. 또한 사류 펌프를 포함한 다른 산업 분야에서의 공동 현상에 대한 이해를 통해 효율적인 설계와 운영

* 가천대학교 기계공학과(Gachon University, Department of Mechanical Engineering)

** 국방과학연구소 항공기술연구원(Aerospace Technology Research Institute, Agency for Defense Development)

† 교신저자, E-mail : jaeho.jeong@gachon.ac.kr

2023 한국유체기계학회 하계학술대회 발표 논문, 2023년 7월 5일~7월 7일, 평창 알펜시아

The KSFJ Journal of Fluid Machinery: Vol. 26, No. 5, October 2023, pp.20~26(Received 18 Jul. 2023; revised 14 Aug. 2023, 24 Aug. 2023; accepted for publication 27 Aug. 2023)

을 이끌어낼 수 있다. 또한, 유체 역학 분야에서의 이론과 실험의 상호보완성을 강화하고, 실제 시스템에서의 동작을 정확히 예측할 수 있는 신뢰성 있는 모델을 발전시킬 수 있다.

2. 본 론

2.1 분석 방법론

2.1.1 수치해석 기법 및 설정

난류 유동장의 수치해석적 기법은 DNS(Direct Numerical Simulation), LES(Large Eddy Simulation), RANS (Reynolds Averaged Navier–Stokes simulation)으로 나뉜다. 난류 유동장에서는 크고 작은 다양한 크기의 와류가 혼재하기 때문에 전체 와류의 정확한 계산을 위해 계산 격자 크기를 와류 구조의 공간 스케일(scale) 이하로 하면서 시간 간격을 와류 변동의 시간 스케일 이하로 해야 한다. 그러나 DNS와 LES는 와류를 해상하기 위해 큰 계산시간과 자원이 필요하므로 실용적으로 적용하기 어려움이 있다.

이에 비해, RANS는 시간적으로 평균화된 Navier–Stokes 방정식을 계산하여 난류의 영향을 모두 모델화한다. RANS는 DNS나 LES에 비해 유동장의 해상도도는 낮지만 고해상도의 계산 격자를 필요로 하지 않기에 실용적으로 적용할 수 있어 본 논문에서 사용하였다. 난류 모델은 SST(Shear Stress Transport)를 활용해 Ansys CFX를 이용하여 분석하였다.

사류 펌프 형상은 Fig. 1에 도시하였다. 본 해석에 사용 된 펌프의 설계 유량은 8 m³/min 이고 수두는 약 13 m 이다. 해석을 위한 경계 조건은 Table 1에 작성하였다. 비회전 영역과 회전영역 사이에는 프로즌 로터 인터페이스를 사용하였다. 이는 인터페이스 면에서 넘어가는 데이터를 평균화 없이 전송하는 방법이다. 입구 출구 조건은 각각 압력과 유량을 입력 하여 해석을 진행하였다. 유량은 6~9 m³/min으로 총 5가지 케이스를 해석하였다. 질량과 에너지의 불균형 값은 각각 1.0×10⁻⁵ 과 1.0×10⁻⁴ 까지 수렴하도록 해석을 진행하였다.

펌프의 성능을 나타내는 무차원 수는 유량 계수(Φ), 수두 계수(Ψ), 축동력 계수(λ), 총효율(η)이 있다. 각 계수는 식 (1)~(4)로 계산된다.

$$\phi = \frac{C_{m2}}{U_2} \tag{1}$$

$$\psi = \frac{2gH}{U_2^2} \tag{2}$$

$$\lambda = \frac{L}{\frac{\rho}{2} A_2 U_2^3} \tag{3}$$

Table 1 Boundary conditions for numerical analysis

Boundary conditions	
Interface	Frozen-rotor
Inlet	Total pressure
Outlet	Mass flow rate
Turbulence model	SST
Cavitation model	RPE
Working Fluids	Water and vapor (25°C)

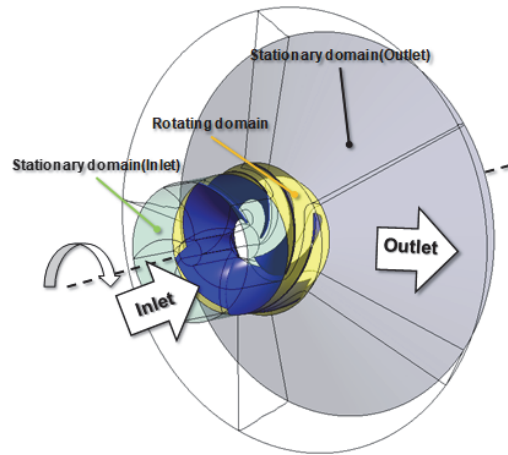


Fig. 1 3D geometry of mixed-pump

$$\eta = \frac{\rho g H Q}{T_w} \tag{4}$$

여기서 C_{m2} 는 임펠러 출구에서 절대 속도의 자오면 성분, U_2 는 임펠러 출구에서의 회전 속도, g 는 중력가속도, H 는 총수두, L 은 축동력, ρ 는 물의 밀도, A_2 는 출구 넓이, T 는 임펠러와 허브의 토크, ω 는 각속도를 의미한다.

2.1.2 공동 현상 모델 설정

공동 현상을 모의하기 위하여 다상 모델 중 RPE (Rayleigh–Plesset equation)를 사용하였다. 열에 의한 항을 무시한 RPE는 식 (5)와 같이 구성된다.

$$R_b \frac{d^2 R_b}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR_b}{dt} \right)^2 + \frac{2S}{\rho_l R_b} = \frac{P_v - P}{\rho_l} \tag{5}$$

여기서 R_b 는 액적의 반경, S 는 액적의 표면장력, ρ_l 는 액체의 밀도, P_v 는 포화 압력이다. 식 (5)에서 가속에 대한 항을 무시하면 식 (6)과 같이 쓰여진다. 단위 부피당 공동의 수 (N_b)는 기화에 의한 식 (7)과 응축에 의한 식 (8)에 의해 계산된다.

$$\frac{dR_b}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P_v - P}{\rho_l}} \quad (6)$$

$$N_b = (1 - \alpha_v) \frac{3\alpha_{vc}}{4\pi R^3} \quad (7)$$

$$N_b = \frac{3\alpha_v}{4\pi R^3} \quad (8)$$

여기서 α_v 와 α_{vc} 는 각각 증기 부피 분율(vapor volume fraction), 핵 사이트 부피 분율(nucleation site volume fraction, preferred $\alpha_{vc} = 5 \times 10^{-4}$)이다. 총 물질전달률(\dot{m})은 식 (9)와 같이 계산된다. 기화에 의한 정의(\dot{m}^+)는 식 (10), 응축에 의한 정의(\dot{m}^-)는 식 (11)이다.

$$\dot{m} = N_b \frac{d(\rho_v 4\pi R^3 / 3)}{dt} = 4\pi N_b \rho_v R^2 \frac{dR}{dt} \quad (9)$$

$$\dot{m}^+ = C_c \frac{3\rho_v (1 - \alpha_v) \alpha_{nuc}}{R_b} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P_v - P}{\rho_l}} (P \leq P_v) \quad (10)$$

$$\dot{m}^- = C_c \frac{3\rho_v \alpha_v}{R_b} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P - P_v}{\rho_l}} (P \geq P_v) \quad (11)$$

여기서 C_e 와 C_c 는 상변화에서의 실험 계수이다. 실제로 기화와 응축은 각각 다른 시간 척도를 가지며, 응축이 일반적으로 더 느리다. 실험 계수는 이러한 제약 조건을 허용하기 위해 사용된다. 일반적으로 기화에 대한 $C_e = 50$ 이고 응축에 대한 C_c 는 0.01이다.^(2,3,4)

물과 증기의 온도는 25 °C이고 포화 압력은 3173 Pa로 설정하였다. 다른 조건들은 이전과 동일하게 진행하였다.

2.1.3 격자 구성

ANSYS Turbogrid를 활용하여 약 1,100,000 개의 정렬 격자를 구성하였고 Fig. 2에 도시화 하였다. 임펠러의 y^+ 는 20이하로 설정하였다. 실제 SST 모델에서 y^+ 는 1 이하로 설정하는 것이 해석 정확도가 높으나 본 해석에서는 총형비를 맞추기 위해 20 이하로 설정하였다. 임펠러 표면에서의 y^+ 는 Fig. 3에 표현하였다.

Fig. 4에 격자 민감도 분석 진행 결과를 도시화 하였다. 최소 격자수는 약 310,000 개 이고 최대 격자수는 약 2,030,000 개 이다. Fig. 4에서 계산된 총효율은 최대 총효율(η_{max})로 나누어진 무차원화된 값이다.

2.1.4 와류 가시화 방법론

임펠러 내부의 와류 구조를 특이점 이론, 와류 구조의 확

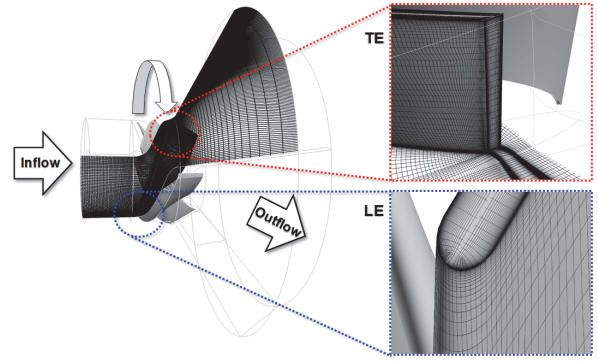


Fig. 2 Hexahedral grid system for numerical analysis

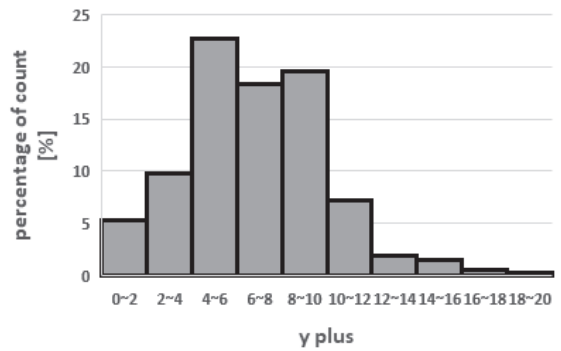


Fig. 3 Distribution of y^+ on impeller surface

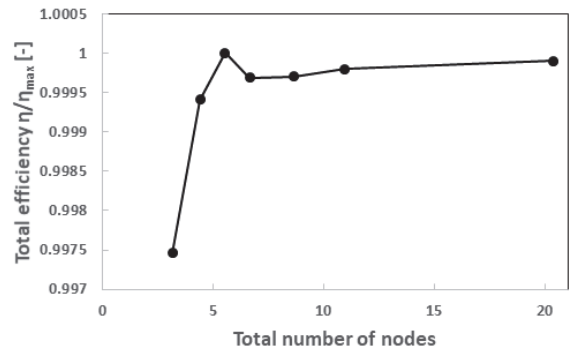


Fig. 4 Results of grid dependency test

률적 정의 및 전산유체해석 결과를 활용하여 시각화하였다. 가시화된 와류 코어는 와류의 회전 방향을 시각화하기 위해 정규화된 나선도로 채색하였다. 정규화된 나선도(H_n)는 식 (12)에 의해 정의된다.

$$H_n = \vec{\zeta} \cdot \vec{\omega} / (|\vec{\zeta}| \cdot |\vec{\omega}|) \quad (12)$$

여기서 ζ 는 절대 와도 벡터(absolute vorticity vector)이고 ω 는 상대 속도 벡터(relative velocity vector)이다. Fig. 5는 정규화된 나선도 변화에 따른 회전 방향을 보여준다. H_n 은 다음과 같은 물리적 의미를 갖는다. $H_n > 0$ 이면 와류가

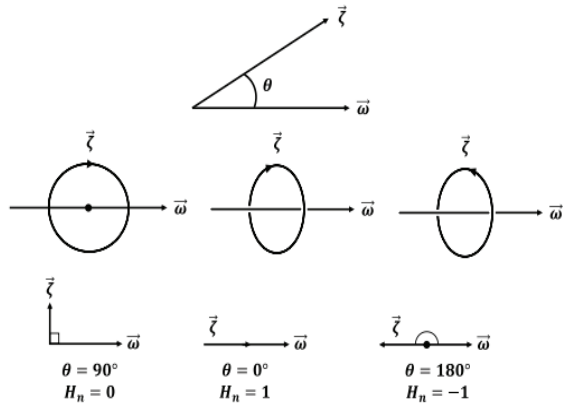


Fig. 5 Rotation direction according to normalized helicity

오른손 법칙에 따라 축방향으로 회전 및 이동하고, $H_n = 0$ 이면 와류가 정체 및 회전 상태임을 의미하며, $H_n < 0$ 이면 와류가 오른손 법칙의 반대 방향으로 회전하며 축방향으로 이동한다는 의미이다.

2.2 해석 결과

2.2.1 CFD 해석 결과 검증

전산유체해석 결과는 한국생산기술연구원에서 진행한 실험 데이터를 바탕으로 검증되었다. 펌프의 성능 곡선을 통해 검증한 결과는 Fig. 6에 나타났다. 유량 계수(Φ)는 0.14, 0.17, 0.18, 0.19, 0.22이며 각각 유량이 6, 7, 7.5, 8, 9 m^3/min 일 때를 나타낸다. 유량이 7.5 m^3/min 일 때 실험값의 효율은 80.8 % 이고 해석값의 효율은 78.5 %로 BEP(Best Efficient Point)가 동일한 유량에서 발생함을 확인했다. 그러나 수두값이 유량 9 m^3/min 일 때 최대 오차 17.7%가 발생하였다. 이에 따라 유량이 9 m^3/min 일 때 효율 값이 실험과 차이가 있음을 확인했다. 전체적으로 오차는 약 6.8 %로 유량에 따른 수두와 축동력의 경향성은 실험과 유사함을 확인했다.

2.2.2 자오면 분석

자오면에서의 임펠러의 형상은 Fig. 7에 도시하였다. 유량이 6, 7.5, 9 m^3/min 에서의 압력과 절대 속도의 분포를 Fig. 8에 도시하였다. 유량 6, 7.5, 9 m^3/min 에서의 압력의 최대값은 각각 173 kPa, 142 kPa, 89 kPa이고 유속의 최대값은 각각 14.39 m/s, 10.14 m/s, 8.83 m/s이다. 유량이 6 m^3/min 일 때 임펠러 입구의 슈라우드 부근에서 재순환(recirculation)이 발생함을 확인하였다. 또한 유량이 9 m^3/min 일 때 임펠러 출구에서 균일하지 않은 압력강하가 발생함을 확인하였다. 이러한 원인으로 BEP는 설계 유량 근처에서 발생한다.

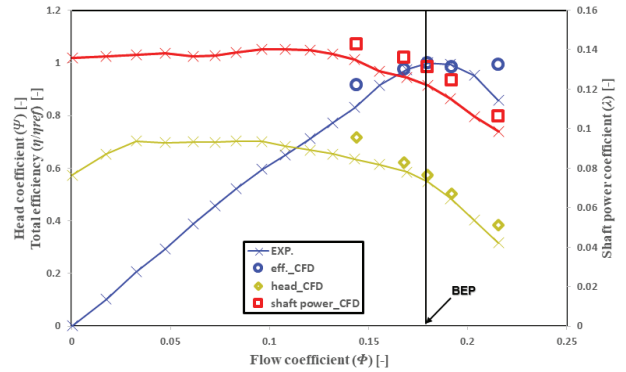


Fig. 6 Performance curve of experimental test and numerical analysis

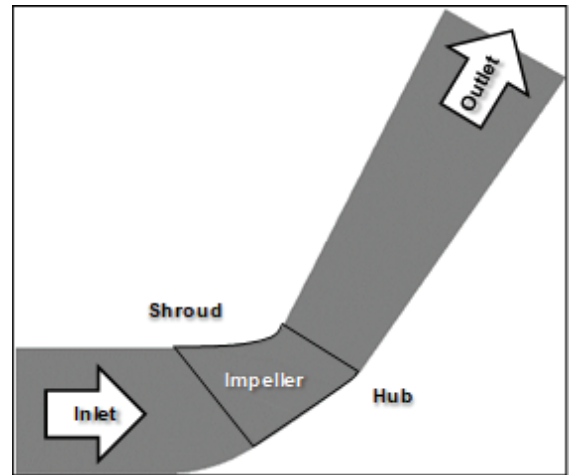


Fig. 7 Schematic of meridional view

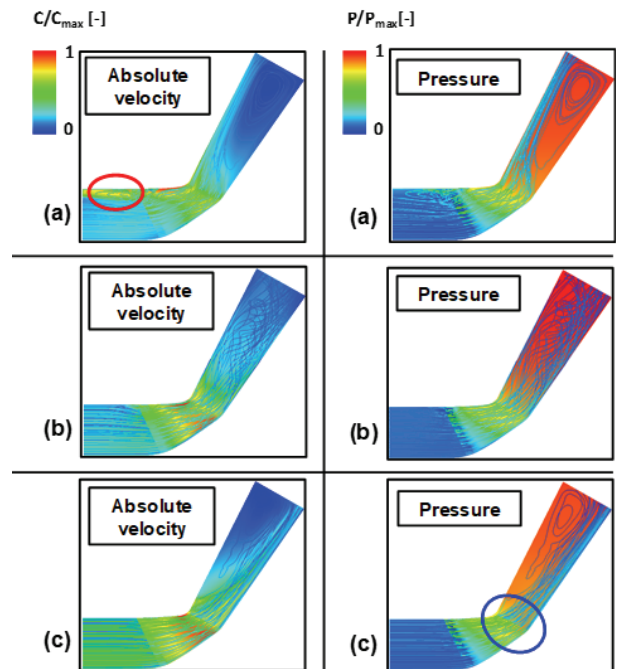


Fig. 8 Pressure and absolute velocity contour on the meridional plane at (a) $Q = 6 m^3/min$ (b) $Q = 7.5 m^3/min$ (c) $Q = 9 m^3/min$

2.2.3 3D 유동 현상 분석

2.1.4절에서 기술한 유동 가시화 방법을 통해 유량이 7.5 m³/min일 때의 전산유체해석 결과를 분석하였다. Fig. 9는 임펠러의 흡입면에서의 와류의 시작점을 나타냈고 Fig. 10은 동일 위치에서의 유동 가시화를 표현하였다. 팁 간극에 의해 발생한 팁 누설 와류는 흡입면에서 고정된 토네이도 와류 ($H_n = 0$)로 형성되며 이는 흡입면의 경계층으로 구성된다. Fig. 11, Fig 12는 각각 팁 누설 와류의 크기와 임펠러 압력 면에서의 유선을 나타낸다. 압력면에서 형성된 경계층은 저 에너지 유체로 팁 간극에서 발생하는 압력차이로 인해 흡입면 쪽으로 이동한다. 이동한 유체는 토네이도 와류 구조에 흡입되며 와류 크기가 증가하고 종방향 와류($H_n = -1$)로 변이되며 하류로 이동한다. 하류로 이동함에 따라 압력면에서 발달한 경계층은 와류 구조에 흡입되지 않으며 와류의 크기는 점차 감소함을 확인할 수 있다.

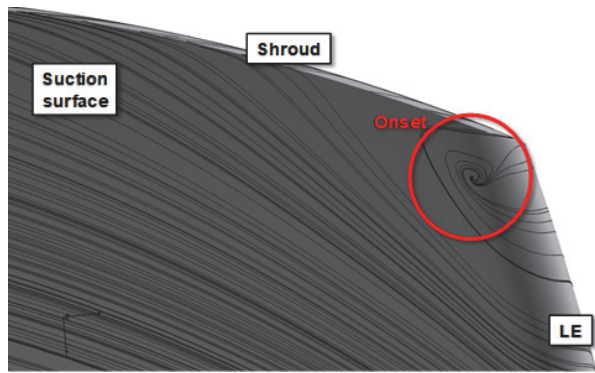


Fig. 9 Onset of vortex on suction surface of impeller

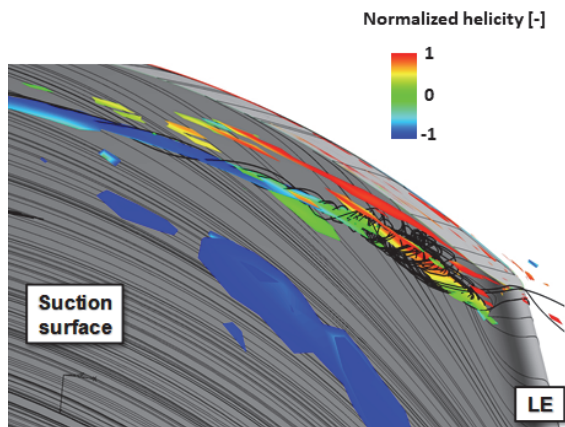


Fig. 10 Vorticity of tip leakage vortex (Q = 7.5 m³/min)

2.2.4 와류 구조와 공동 현상의 관계

이전에 설명하였던 RPE를 통해 유량이 7.5 m³/min일 때 공동 현상을 해석하였다. 그 결과를 Fig. 13, Fig. 14에 도시하였고 각각 임펠러 흡입면에서의 증기 파괴분율과 증기 파괴분율이 0.5 이상인 영역의 단면을 표현하였다. 임펠러의 슈라우드 부근으로 갈수록 팁 속도가 빨라져 압력은 점차 감소하는 양상을 띠어야 한다. 그러나 임펠러의 슈라우드 부근에서 오히려 공동 현상이 발생하지 않음을 Fig 14를 통해 확인했다. 이는 정규화된 나선도 값이 0인 와류에 의한 감소 효과가 더 크기 때문에 팁에서의 공동 현상을 억제하는 결과를 보여준다. Fig. 15는 와류 구조와 증기 파괴분율이 0.9 이상인 영역의 위치와 압력의 차이를 도시했다. 이를 통해 와류의 중심의 압력이 다른 위치보다 상대적으로 낮지만 공동 현상이 발생하는 위치의 압력이 더 낮음을 확인했다. Table 2는 각 축에 따른 편차이다.

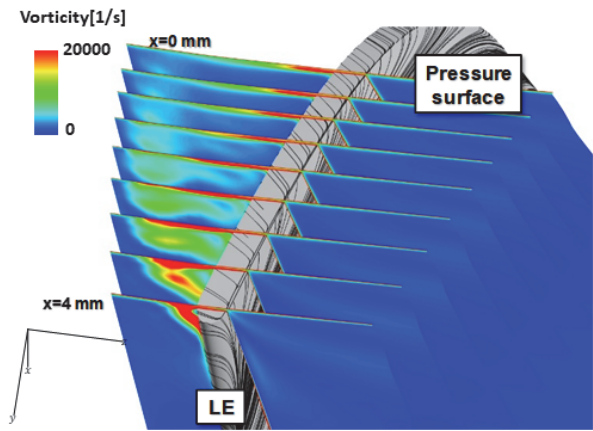


Fig. 11 Tip leakage vortex on suction surface of impeller (Q = 7.5 m³/min)

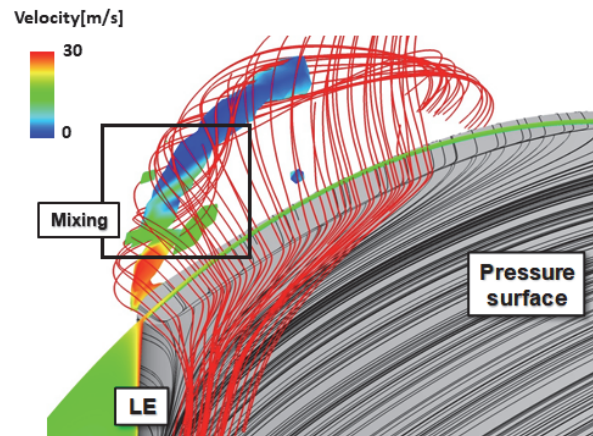


Fig. 12 Streamline over impeller velocity (Q = 7.5 m³/min)

Table 2 Axis deviation from each centroid

Deviation	
x-axis	0.026
y-axis	0.089
z-axis	0.056

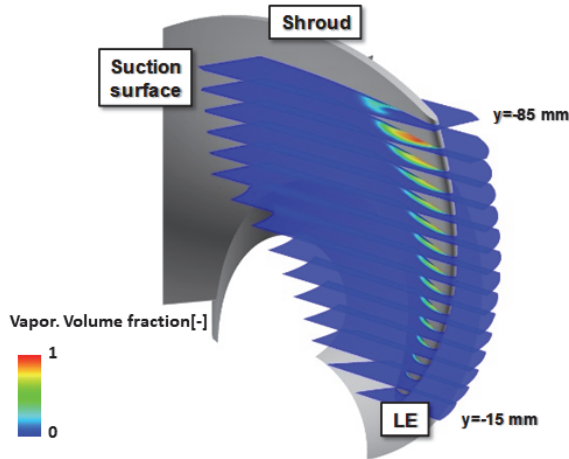


Fig. 13 Vapor, volume fraction on zx plane (Q = 7.5 m³/min)

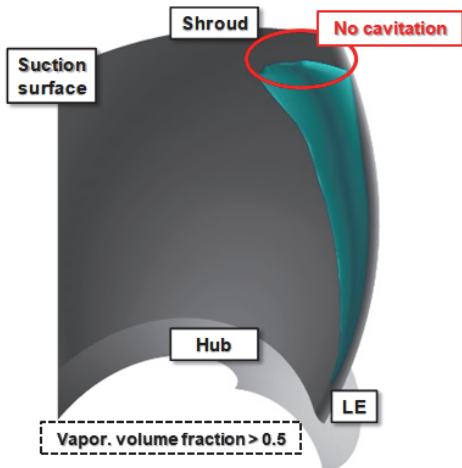


Fig. 14 Iso-surface of vapor, volume fraction (Q = 7.5 m³/min)

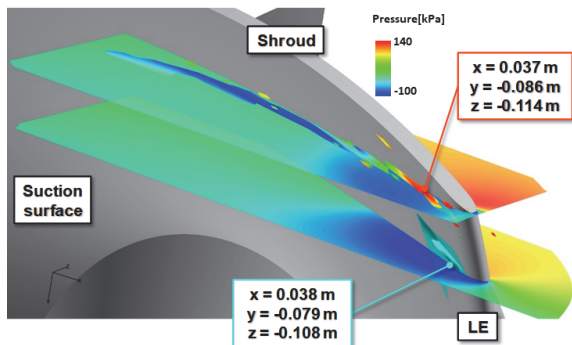


Fig. 15 Comparison between vortex structure and cavitation behavior (Q = 7.5 m³/min and Vapor, volume Fraction > 0.9)

3. 결론

본 연구에서는 사류펌프를 대상으로 RANS 기반의 3차원 CFD 해석을 수행하였으며, 그 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 전산유체해석을 통하여 사류 펌프를 유량 6~9 m³/min 범위에서 계산하였다. 해석값과 실험값의 성능 곡선과 비교를 통해 설계 유량에서 4.0% 이하로 일치함을 확인하였다.
- 2) 자오면 분석을 통해 설계 유량(7.5 m³/min)과 유량이 각각 6 m³/min과 9 m³/min 일 때의 압력과 속도장을 비교 분석하였다. 그 결과 유량이 6 m³/min인 경우 임펠러 입구의 슈라우드 부근에서 재순환이 발생하였다. 또한 유량이 9 m³/min인 경우 임펠러 출구에서 균일하지 않은 압력 강하가 발생함을 확인하였다.
- 3) 와류 가시화 기법을 통해 와류의 생성점 위치를 임펠러 흡입부 팁 근방에서 확인하였다. 또한 3차원 유동 해석을 통해 와류 거동을 파악하며 와도 크기 감소 및 회전 방향 변이 원인을 도출했다.
- 4) RPE를 활용하여 사류 펌프에서 발생하는 공동 현상을 모의하였다. 와류 구조와 비교 분석하여 팁 누설 와류는 블레이드 팁 흡입면 영역에서 공동 현상을 억제함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 연구한 과제입니다. (No. 2021202080023B)

본 연구 수행에 도움을 준 한국생산기술연구원에 깊은 감사를 표합니다.

References

- (1) Yong-In Kim, Sung Kim, Hyeon-Mo Yang, Kyoung-Yong Lee and Young-Seok Choi, 2019, "Analysis of internal flow and cavitation characteristics for a mixed-flow pump with various blade thickness effects", Journal of Mechanical Science and Technology, 33.
- (2) Kim, Y. I., Yang, H. M., Suh, J. W., Kim, S., Lee, K. Y., & Choi, Y. S., 2020, "Numerical study on the cavitation phenomenon for the head drop and unsteady bubble patterns with a difference in the incidence angle of a mixed-flow pump", Advances in Mechanical Engineering, 12(4).
- (3) Kim Y-I, Kim S, Lee K-Y and Choi Y-S, 2020, "Effect of incidence angle on cavity blockage and flow stability in

- the net positive suction head drop of mixed-flow pumps”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science.
- (4) Kim, Y. I., Kim, S., Lee, K. Y., & Choi, Y. S., 2021, “Effect of incidence angle on cavity blockage and flow stability in the net positive suction head drop of mixed-flow pumps”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 235(19), pp. 3900~3922.
- (5) Hong, S., Mugabi, J., & Jeong, J. H., 2022, “Numerical Study on Vortical Flow Structure and Performance Enhancement of Centrifugal Compressor Impeller”, Applied Sciences, 12(15), 7755.
- (6) Mostefa, B., Kaddour, R., Embarek, D., & Amar, K., 2021, “Analysis and Optimization of the Performances of the Centrifugal Compressor Using the CFD”, Journal homepage: <http://iicta.org/journals/ijht>, 39(1), pp. 107~120.
- (7) Ding, H., Visser, F. C., Jiang, Y., & Furmanczyk, M., 2009, “Demonstration and validation of a 3D CFD simulation tool predicting pump performance and cavitation for industrial applications”, In Fluids Engineering Division Summer Meeting, Vol. 43727, pp. 277~293.
- (8) Sedlar, M., Sputa, O., & Komarek, M., 2012, “CFD analysis of cavitation phenomena in mixed-flow pump”, International journal of fluid machinery and systems, 5(1), pp. 18~29.