

축류펌프 입구 절대 유동각이 저유량 영역의 성능곡선 기울기와 불안정 유동 현상에 미치는 영향

손용진^{*,**} · 김용인^{***} · 양현모^{****} · 이경용^{*} · 윤준용^{**} · 최영석^{*,*****†}

Effect of Absolute Flow Angle at the Inlet of Axial Pump on the Slopes of Performance Curve and Unstable Flow Phenomena in Low Flow Rates

Yong-Jin Son^{*,**}, Yong-In Kim^{***}, Hyeon-Mo Yang^{****},
Kyoung-Yong Lee^{*}, Joon Yong Yoon^{**}, Young-Seok Choi^{*,*****†}

Key Words : Axial pump(축류펌프); Inlet guide vane(입구 안내깃); Saddle(새들); Surge(서지)

ABSTRACT

In this study, a numerical analysis was performed by assigning an absolute flow angle to the pump inlet to predict the rotational flow of the variable inlet guide vane trailing edge. The effect of the absolute flow angle of the pump inlet on the slope of the performance curve and the unstable flow phenomenon at the low flow rate was analyzed. Further, the finite volume method based on the three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes equations was employed to discretize the governing equations. It was confirmed from the results of the internal flow field analysis that an unstable flow phenomenon occurred regardless of the change in the flow angle of the pump inlet. Through analysis of the fast fourier transform results. It was confirmed that as the inlet flow angle increased from 0° to 45°, the pump could be operated more stably at low flow rates compared to 0°.

1. 서론

펌프는 터보기계중 하나이며, 펌프의 한 종류인 축류펌프는 입구 안내깃(inlet guide vane), 벨 마우스(bell mouth) 형태의 흡입형 케이싱, 프로펠러 깃 형태의 임펠러(impeller) 및 출구 안내깃(diffuser vane; DV) 등으로 구성되어있다. 축류펌프의 구성품 중 하나인 입구 안내깃은 펌프 내부로 유입되는 유동의 각도를 변경하여 입사각에 영향을 미치고, 이는 펌프의 성능 특성에 변화를 주어 수요 변화에 대응할 수

있는 제어를 이룬다.

Kaya⁽¹⁾는 축류펌프의 입구 안내깃 설치 유무가 성능특성에 미치는 영향을 실험적인 방법으로 분석하여 입구 안내깃을 설치하는 경우 펌프의 성능이 향상되는 것을 확인하였고, 입구 안내깃의 두께가 펌프의 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 입구 안내깃의 설치 위치에 따라 펌프 내부 유동 패턴 및 성능 특성이 변화하는 것에 대해 분석을 진행하였고, 입구 안내깃의 설치 위치 및 각도 등이 성능 곡선 및 최고 효율점 변화에 미치는 영향에 대해 고찰하였다.⁽²⁻⁵⁾ Tang 등⁽⁶⁾은 축

* 한국생산기술연구원 지속가능기술연구소 산업에너지연구부(Industrial Energy R&D Department, Research Institute of Sustainable Development Technology, Korea Institute of Industrial Technology)

** 한양대학교 기계설계공학과(Department of Mechanical Engineering, Hanyang University)

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

**** 한국기술교육대학교 기계공학과(Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education)

***** 과학기술연합대학원대학교 융합제조시스템공학(Convergence Manufacturing System Engineering, University of Science and Technology)

† 교신저자, E-mail : yschoi@kitech.re.kr

2023 한국유체기계학회 동계학술대회 발표 논문, 2023년 11월 29일~12월 1일, 제주 ICC

The KSFJ Journal of Fluid Machinery: Vol. 27, No. 2, April 2024, pp.7~14(Received 13 December, 2023; revised 11 January, 2024; accepted for publication 21 January, 2024)

한국유체기계학회 논문집: 제27권, 제2호, pp.7~14, 2024(논문접수일자: 2023.12.13, 논문수정일자: 2024.01.11, 심사완료일자: 2024.01.21)

류펌프 내부에 가변형 입구 안내깃 설치후, 내부 유동 특성 분석을 진행하여 가변형 입구 안내깃을 설치하는 경우 기존에 비해 약 10%의 효율이 향상된다고 분석하였다.

이와 같이 선행 연구 결과들에 따르면 축류펌프 내부 입구 안내깃으로 인한 절대 유동각 변경은 입사각에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.^(7,8) Qian 등⁽⁹⁾은 실험적 방법으로 축류펌프 내부 가변형 입구 안내깃의 각도 변경이 탈 설계점 상태에서 성능 특성에 미치는 영향을 분석하였고, 최적의 각도 변경을 통해 펌프 효율이 최대 2.16% 향상되고 안정적인 운전영역이 확장되는 것을 확인하였다. Xu 등⁽¹⁰⁾은 펌프 내부에 가변형 입구 안내깃이 설치된 경우 수치적 및 실험적 방법으로 안내깃의 각도를 변경하여 저유량 및 고유량 영역에서 에너지 성능 및 운전영역 변화를 분석하였다.

축류펌프는 저유량 영역에서 양정곡선 기울기 변화로 기인되는 서징(surging)현상으로 인해 수력학적 성능이 불안정한 운전영역이 발생한다. Tan 등^(11,12)은 펌프 내부에 설치되는 가변형 입구 안내깃을 통한 선회유동(rotating flow) 조절이 내부 공동현상 성능 및 비정상 유동 특성에 미치는 영향에 대해 수치 및 실험적 방법으로 분석하였고, 이를 바탕으로 새로운 설계 방법을 제안하였다. Watanabe 등⁽¹³⁾은 실험적 방법을 통해 축류펌프의 저유량 영역에서 운전하여 서징현상이 발생하는 경우 내부 유동 분석 및 임펠러 성능 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

앞서 서술한바와 같이 현재 진행되고 있는 선행연구들은 모두 펌프 내부에 입구 안내깃이 실제 설치된 후의 시점을 기준으로 수행하였다. 입구 안내깃이 설치된 이후 안내깃을 통한 성능향상 및 저유량 영역에서의 불안정 유동 분석을 통한 운전영역 분석 등을 위해서는 설계 변경 및 생산 공정 과정을 반복하는 문제점으로 인해 경제 및 시간상 손해가 발생할 가능성이 존재한다. 입구 안내깃이 내부 성능 특성에 미치는 영향을 예측하고, 그 결과를 바탕으로 추후 안내깃 설계 단계에서 도움이 될 만한 연구는 미비하다.

본 연구에서는 입구 안내깃 후단에 발생하는 선회유동의 수치적 모사를 통해 펌프 입구부에 절대 유동각을 부여하여 성능 예측 및 저유량 영역에서의 불안정 유동 현상에 대해 분석하였다. 이를 통해 축류펌프 내부 성능 및 유동장 분석을 통한 안내깃 효과를 예측하였고, 입구부 절대 유동각이 저유량 영역에서의 성능특성 및 불안정 유동 현상에 미치는 영향을 분석하여 실제 가변형 입구 안내깃이 설치되는 경우 저유량 영역에서 발생하는 현상을 예측하였다.

2. 연구대상

2.1 축류펌프

본 연구의 대상인 축류펌프 모델은 와류 방지판(de-swirler),

임펠러 및 출구 안내깃으로 구성되어 있다. 와류 방지판은 입구 케이싱을 지지하며 임펠러 내부로 유입되는 불순물을 차단하는 역할을 한다. 임펠러는 입구로부터 유입되는 유체의 압력을 상승시켜주고, 출구 안내깃은 유동의 정압을 회복시켜준다. 본 연구 대상의 자오면 시점 및 3차원 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 축류펌프의 자세한 설계사양은 Table 1에 나타나있고, 비속도는 식 (1)을 통해 계산하였다. 유량 및 전양정은 식 (2) 및 (3)을 기반으로 무차원화 하였다.

$$N_s = \frac{\omega \sqrt{Q}}{(gH)^{3/4}} \quad (1)$$

$$\Phi = \frac{C_{m2}}{u_2} \quad (2)$$

$$\Psi = \frac{2gH}{u_2^2} \quad (3)$$

여기서 Q , H 는 유량 및 전양정을 의미하며 단위는 각각 m^3/s 및 m 이다. ω , g , C_{m2} , u_2 는 각각 각속도, 중력가속도, 임펠러 출구부 절대속도의 자오면 성분, 임펠러 출구부 회전속도를 나타내며 단위는 각각 rad/s , m/s^2 , m/s 및 m/s 이다.

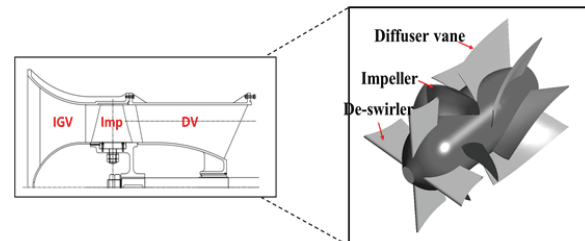


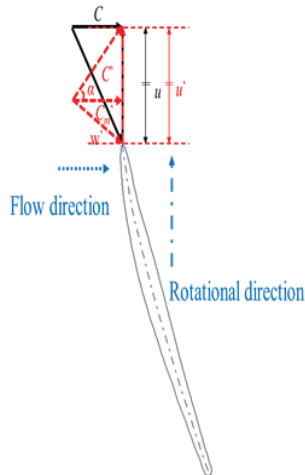
Fig. 1 Meridional plane and 3d modelling of axial flow pump

Table 1 Specification of axial flow pump model

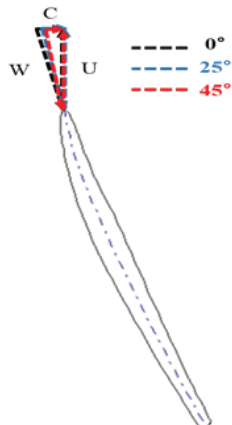
Specification	Value
Specific speed (N_s)	2.94
Flow coefficient (Φ)	0.25
Head coefficient (Ψ)	0.24
Rotational speed [rpm]	2,560
Impeller diameter [mm]	185
Number of de-swirlers	4
Number of impeller blades	4
Number of diffuser vanes	7

2.2 입구 절대 유동각

축류펌프 구성 요소중 하나인 가변 구조의 입구 안내깃은 입구로부터 유입되는 유동의 절대 유동각을 변경함으로써 임펠러에 유입될 유동의 입사각에 영향을 미치고, 이는 펌프 성능 특성에 변화를 준다. Fig. 2는 임펠러 입구 영역에서의 속도 삼각형 개략도 및 입구 유동각 변화에 따른 슈라우드 영역의 속도 삼각형을 나타내었다. 각 벡터에 대하여 c , u 및 w 는 절대속도, 회전속도 및 상대속도를 나타낸다. 유량과 회전수가 동일한 조건에서 입구 안내깃이 적용되지 않는 경우를 검정(실선)으로, 입구 안내깃이 적용되는 경우는 빨간(점선)으로 표기되었다. 임펠러 회전방향을 기준으로 각각 0, 25 및 45°의 유동각을 부여하였다. 유동각은 절대 유동각 (α)이며 축방향 기준이다. 절대 유동각은 본 연구 대상의 수치해석 영역 입구부에 부여되었다. Fig. 2 (b)에서 볼 수 있듯이 입구에 적용되는 절대 유동각이 변화되면 유량점과 입사각의 변화로 인해 양정 및 효율이 변화하게 되는 것을 알 수 있고, 이를 통해 입구에 적용되는 절대 유동각이 변화에 따라 성능특성이 변하는 것을 알 수 있다.



(a) Schematic of velocity triangle



(b) Velocity triangle of shroud at 0°, 25° and 45° flow angle

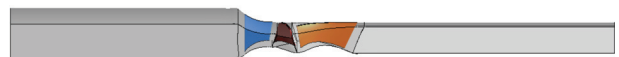
Fig. 2 Velocity triangle at the impeller inlet

3. 수치해석 방법

3.1 수치해석 모델 및 해석 기법

본 연구의 수치해석 모델은 기본 모델 및 단순화 모델로 구분된다. Fig. 3을 통해 알 수 있듯이 기존 모델은 좌에서부터 우로 유동방향에 따라 벨 마우스 형태의 입구부, 와류 방지판, 임펠러, 출구 안내깃 및 출구부로 구성되어있고, 회전부는 임펠러 영역만 해당이 된다. 추후 입구 안내깃은 와류 방지판 위치에 설치될 가능성이 높고, 수치해석 진행시 입구에 부여되는 절대 유동각이 와류 방지판으로 인해 임펠러로 유입되는 유동 각도에 영향을 미칠 가능성이 존재하기 때문에 와류 방지판에 해당하는 형상을 제외하여 수치해석 영역을 단순화하였다. 단순화 모델은 벨 마우스 형태의 입구부를 임펠러 입구와 동일한 직경으로 유로를 연장하였고, 수치해석 영역의 전체 축방향 길이는 기존 모델과 동일하게 유지하였다.

수치해석에 사용된 격자계는 Fig. 4에 나타나있고, 육면체의 격자계로 구성되어있다. 격자계는 선행연구⁽¹⁴⁾에서 제시한 Grid Convergence Index(GCI) 방법으로 검증하였다. Fig. 5는 Fig. 3 (a)의 기본 모델에 대한 격자계 검증 결과이고, 상세한 결과는 Table 2에 나타나있다. 설계 유량점에서 총 3개의 관찰된 격자에 대한 효율 및 전양정의 수치해석상 이산화 오류를 비교하였다. 이때 효율은 N1에 해당하는 격자계로부터 수행된 수치해석 값으로 표준화하였다. 약 2.7×10^6 의 수를 갖는 최적 격자계(N1)에 대한 GCI_{fine}^{21} 값은 약



(a) Reference model (de-swirler + impeller + diffuser vane)



(b) Simplified model (impeller + diffuser vane)

Fig. 3 Computational domain

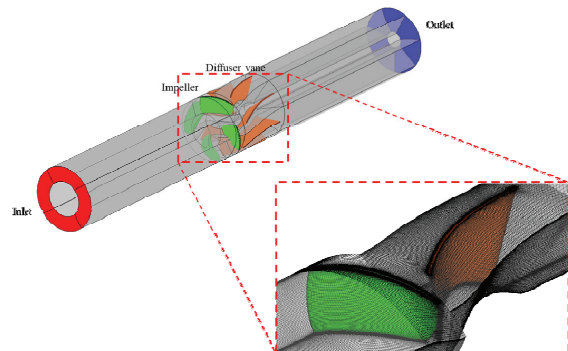


Fig. 4 Geometry and grid system

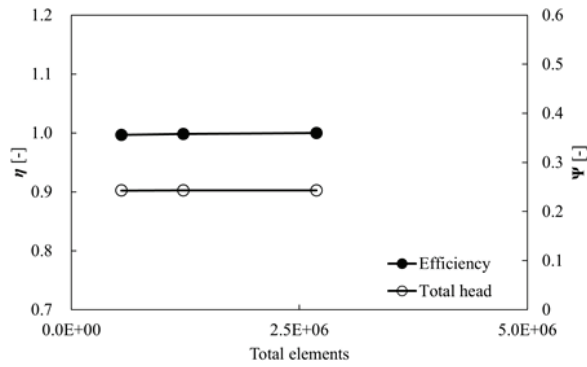


Fig. 5 GCI results at reference model grid system

Table 2 Calculation of discretization error for the reference model

	$\eta = \text{efficiency}$	$\psi = \text{total head}$
N_1, N_2, N_3	$2.7 \times 10^6, 1.2 \times 10^6, 5.5 \times 10^5$	
r_{21}	1.30	
r_{32}	1.30	
η_1	1	1
η_2	0.9982	0.9993
η_3	0.9969	0.9991
GCI_{fine}^{21}	0.0043	0.0028

0.0043이고, 이 수치는 선행연구⁽¹⁴⁾가 제시하는 수렴기준을 충족하기 때문에 N1에 해당하는 격자계를 적용하였고, 단순화 모델도 동일한 격자계를 사용하였다.

본 연구에서의 수치해석은 상용 CFD 해석 프로그램인 ANSYS CFX-19.2를 사용하여 진행하였다⁽¹⁵⁾. 난류해석을 위해 RANS 방정식은 유한 체적 기법을 기반으로 이산화하였다. 시간 변화 항은 과도해석에서 각 지배방정식에 추가되었다. 난류 모델은 유동 박리(separation)현상을 정밀하게 파악하기 위해 SST 모델⁽¹⁶⁾을 적용하였다. 수렴성 측면에서 입구 및 출구부에 각각 압력 및 질량유량의 조건을 부여하는 것이 유리하지만, 본 연구에서는 입구부에 절대 유동각 부여 및 균일한 유동 각도 분포를 위해 입구 및 출구부에는 질량 유량 및 압력 조건을 부여하였다. 과도상태 해석시 펌프의 1 회전에 해당하는 시간은 0.023초였으며, 세부적인 정보를 위해 3°마다 데이터를 수집하였다. 수치해석에는 32코어 듀얼 프로세서 Xeon(2.8 Ghz) 중앙 처리장치를 사용하였고, 정상상태의 단일 통로(one passage) 해석의 처리시간은 약 5시간, 전체 통로(full passage)의 정상상태 및 과도상태 해석을 위한 해석시간은 약 11시간 및 10일 정도 소요되었다.

3.2 수치해석 모델 검증

기본 모델에 대한 실험적 방법 및 수치해석 결과와 단순화 모델의 수치해석 결과에 대한 성능곡선은 Fig. 6에 나타나있

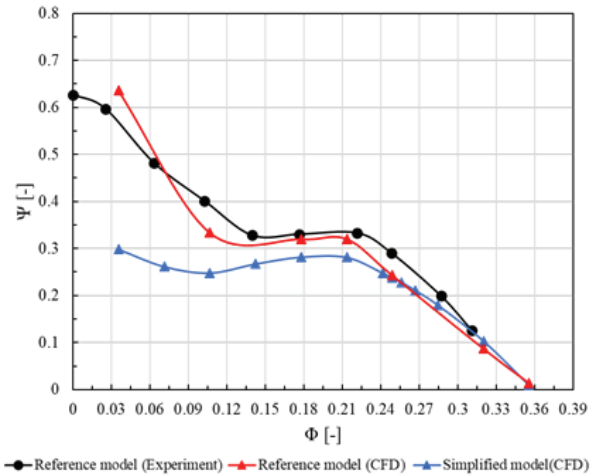


Fig. 6 Comparison of simulation and experimental results

다. 기본 모델은 실험결과 및 수치해석결과가 전체적으로 유사한 경향을 보이고, 유량 계수 약 0.10 및 0.21 에서 성능곡선상 변곡점이 공통적으로 확인되는 것을 알 수 있다. 하지만 기본 및 단순화 모델의 수치해석 결과는 설계유량점을 시작으로 고유량점에서는 유사한 예측을 하는 것이 확인되나, 저유량 영역에서는 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 특히 성능곡선상 유량계수 약 0.2 이하에서 두드러지게 나타나는 것을 확인 할 수 있고, 이는 와류방지판이 저유량 영역에서 성능에 영향을 미치고 있다고 판단할 수 있다. 성능곡선상 저유량 영역에서 발생하는 서징현상에 기인하여 유동 입사 각이 증가하고, 이로인해 발생하는 유동 박리 및 선회실속(rotating stall) 등의 불안정 유동 현상이 펌프의 성능을 저하시키는 것으로 판단된다.

본 연구의 가변형 입구 안내깃 모사에 따른 성능 특성 분석은 Fig. 3 (b)에 나타난 단순화 모델을 기준으로 진행되었으므로 후술되는 결과가 포함된 성능곡선상 서징현상이 나타나는 저유량 영역에서 다소 낮은 예측을 보일 수 있다. 하지만 유량계수 약 0.21 지점의 변곡점 및 고유량 영역에서의 예측은 대체로 일치하며 서징현상이 발생하는 영역은 실제 펌프를 운용하는 경우 고려되어지는 영역이 아니므로, 단순화 모델을 기준으로 분석을 수행하여도 무리가 없을 것으로 판단된다⁽¹⁷⁾.

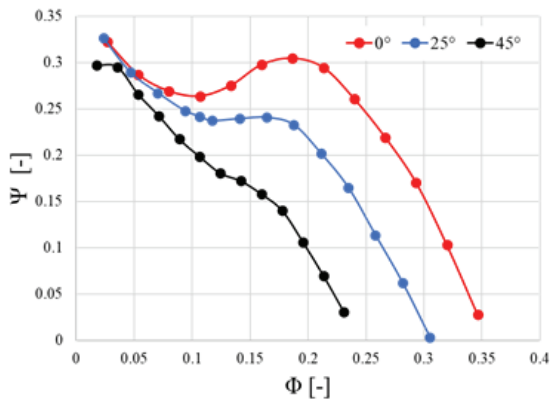
4. 결 과

4.1 성능 특성 및 저유량 영역 성능곡선 기울기

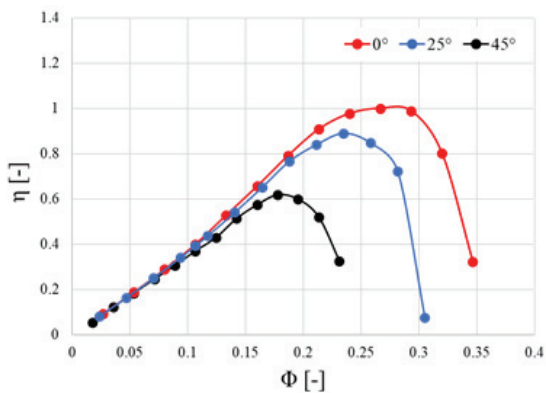
본 연구의 해석대상인 단순화 모델을 기준으로 입구부 절대 유동각이 0, 25 및 45°에서의 성능곡선을 Fig. 7에 나타내었고, 입구부 절대 유동각에 따른 (a)전양정 및 (b)효율에 대한 성능곡선이다. 전양정의 성능곡선으로부터 절대 유동각이 45°로 증가함에 따라 전체 유량영역에서 성능이 감소하

는 것을 확인할 수 있다. 설계 유량점 기준으로 입구 유동각이 0°의 경우 입사각 증가에 기인하는 양의 기울기는 유량계수 약 0.2이하부터 확인되었고, 입구 유동각이 45°로 증가함에 따라 더 이상 관찰되지 않는 것을 확인할 수 있다. 절대 유동각이 증가함에 따라 최고효율점에 해당하는 유량점이 감소하는 것을 확인할 수 있고, 최고효율점에 해당하는 효율의 절대값 역시 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 선행 연구⁽¹⁸⁾로부터 상세히 분석된 바가 있다.

펌프 운용시 저유량 영역에서 운전하는 경우 유량과 압력이 주기적으로 변하여 불안정한 운전상태가 발생하는 서징 현상이 나타나고, 이로 인해 펌프 내부에 소음 및 진동을 발생시켜 수명 및 성능에 영향을 미친다. 입구 유동각이 0°인 경우 저유량 영역에서 양의 기울기 변화가 두드러지는 것을 확인할 수 있고, 이로부터 야기되는 가장 깊은 변곡점이 유량계수 약 0.1에서 관찰되었고, 유량계수 약 0.2 이상부터 양의 기울기가 사라지는 것을 확인할 수 있다. 입구 유동각이 25°로 변환에 따라 입구 유동각이 0°에서 발생하였던 양의 기울기가 확연히 감소하는 것을 관찰할 수 있고, 45°에서는 양의 기울기가 사라지는 것을 알 수 있다.



(a) Total head



(b) Total efficiency

Fig. 7 Performance curve of axial flow pumps by inflow angle

결과로부터, 불안정한 유동 현상을 야기시키는 양의 기울기는 입구 유동각이 45°로 변환에 따라 사라지는 것을 확인할 수 있다. 성능곡선상 입구 유동각이 커질수록 양의 기울기가 사라졌지만 이를 통해 저유량 영역에서 불안정한 유동 현상이 사라졌는지에 대한 여부를 명확하게 판단할 수 없다. 따라서 불안정한 유동 현상을 파악하기 위해 내부 유동 분석을 수행하였다.

4.2 정상상태 내부 유동장 분석

펌프의 저유량 영역에서의 양의 기울기는 입사각 증가에 기인하는 현상이고, 성능을 저하시킨다. 입사각의 증가는 날개 입구부의 슈라우드(shroud) 근처에 역류(reverse flow)를 유발한다. 이를 파악하기 위해 입구 유동 각도가 0°, 25° 및 45°에서 최고 효율점인 유량계수 약 0.27, 0.23 및 0.18 지점에서 축방향 유동 성분을 분석하였다. 축방향 유동 성분은 임펠러 깃 선단(leading edge)에서 측정하였고, Fig. 8에 상세한 측정 위치를 나타내었다. Fig. 9는 축방향 속도 성분

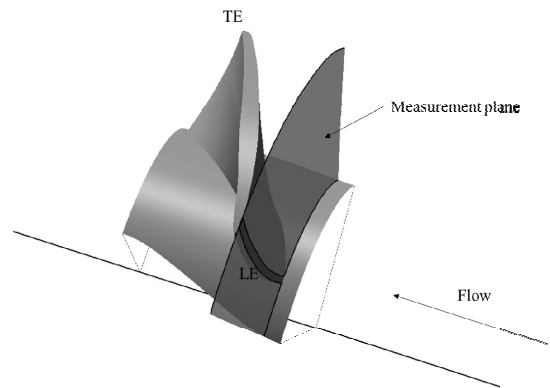


Fig. 8 Measurement position of axial velocity

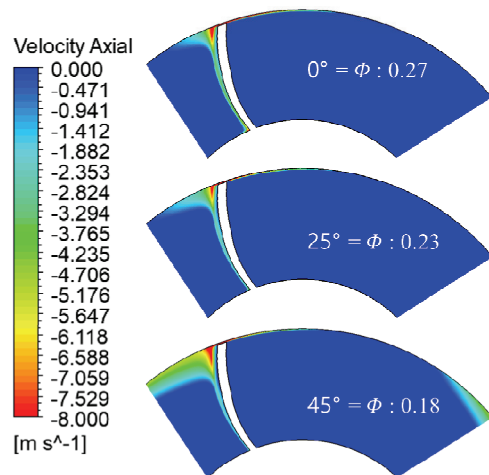


Fig. 9 Distribution of axial velocity field at BEP of 0°, 25° and 45°

분포이고, 음의 속도만 표현되어있다. 결과로부터 입구 유동 각도가 0°인 경우 임펠러 깃 선단 슈라우드 영역 및 흡입면 (suction surface)에서 음의 축방향 속도 성분이 관찰된다. 입구 유동 각도가 증가함에 따라 임펠러 깃 선단 슈라우드 영역에서 음의 축방향 속도 성분 분포가 증가하는 것을 확인할 수 있고, 입구 유동 각도가 45°인 경우 슈라우드 근처에서 음의 축방향 속도 성분 분포가 중간 스패(mid span) 영역으로 확연히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 입구 유동각 0°의 최고 효율점 슈라우드 깃 선단 영역에서 유동 역류 현상이 발생하는 것을 알 수 있고, 입구 유동각이 25° 및 45°로 증가함에 따라 중간 스패 영역으로 역류 현상 발생 영역이 확장되는 것을 확인할 수 있다. 펌프 입구에서 임펠러 선단까지의 재순환(recirculation) 유동을 관찰하기 위해 각 입구 유동 각도가 0°, 25° 및 45°의 최고 효율점($1.0\Phi_{d,0^\circ}$, $1.0\Phi_{d,25^\circ}$, $1.0\Phi_{d,45^\circ}$)부터 저유량 영역($0.2\Phi_{d,0^\circ}$, $0.2\Phi_{d,25^\circ}$, $0.2\Phi_{d,45^\circ}$)까지 내부 유선 분포를 분석하여 Fig. 11에 나타내었다. 측정 단면은 임펠러 깃 선단, 후단(trailing edge) 및 중심에서 측정하였고 상세한 측정 단면은 Fig. 10에 표시되어 있다.

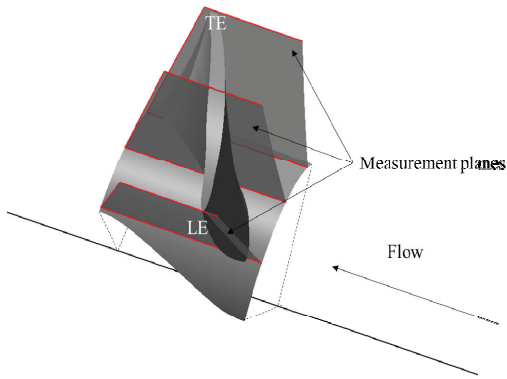


Fig. 10 Measurement position of streamline field

Fig. 11의 내부 유선 분포 결과로부터 각각의 최고 효율점에서는 입구 유동각 변화 유무에 관계없이 재순환 유동은 관찰되지 않는 것을 확인할 수 있다. 각각의 최고 효율점 유량이 감소함에 따라 재순환 유동이 관찰되는 것을 알 수 있고, 입구 유동각이 0°, 25° 및 45°의 $0.4\Phi_{d,0^\circ}$, $0.5\Phi_{d,25^\circ}$ 및 $0.7\Phi_{d,45^\circ}$ 에서부터 재순환 유동이 발생하는 것으로 확인된다. 저유량 영역인 $0.2\Phi_{d,0^\circ}$, 25° , 45° 지점에서 입구 유동 각도가 0°에서 45°로 변화에 따라 임펠러 깃 선단으로부터 약 1.2D 지점까지 발생하던 재순환 유동이 약 2.5D까지 증가하는 것을 확인할 수 있다. 특히 가장 깊은 변곡점인 유량계수 0.106 지점에 해당하는 영역인 $0.4\Phi_{d,0^\circ}$ 의 재순환 유동은 임펠러 깃 선단으로부터 약 0.5D지점까지 관찰된다. 동일한 유량계수 지점인 $0.45\Phi_{d,25^\circ}$, $0.6\Phi_{d,45^\circ}$ 에서도 재순환 유동이 나타나는 것으로 보아 입구 유동 각도가 0°에서 25° 및 45°로 증가함에도 여전히 임펠러 깃 선단 영역의 내부유동은 불안정한 것을 알 수 있다. 앞서 언급한 Fig. 7의 전양정 성능 곡선에서는 입구 유동각이 증가함에 따라 저유량 영역에서의 기울기가 사라졌음에도 불구하고 내부 유동장에서는 여전히 불안정한 유동 현상이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

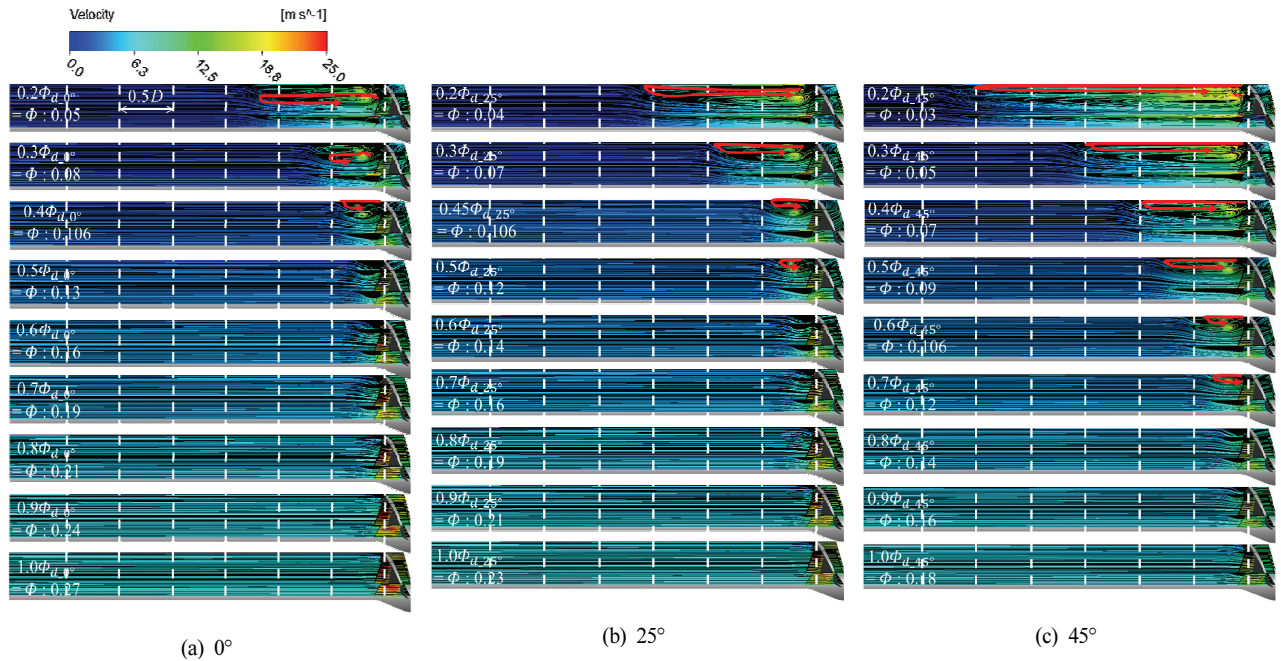


Fig. 11 Distributions of streamline field at each inflow angle: (a) 0° ; (b) 25° ; (c) 45°

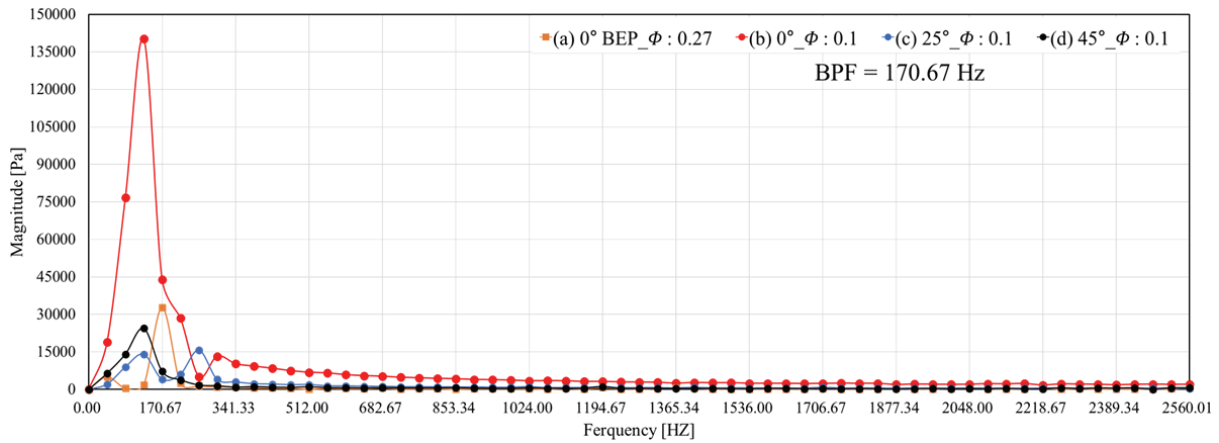


Fig. 12 FFT results for total pressure fluctuation on each inflow angle: (a) BEP of 0° φ:0.27; (b) 0° φ:0.1; (c) 25° φ:0.1; (d) 45° φ:0.1

4.3 과도상태 특성 분석

펌프의 입구 유동 각도가 변화하는 경우 저유량 영역에서의 압력맥동을 이용하여 수행한 고속 푸리에 변환(fast fourier transformation)을 이용하여 안정성을 평가하였다. Fig. 12는 입구 유동 각도 0°의 최고 효율점 및 가장 깊은 변곡점인 유량 계수 약 0.106 지점에서 비정상 상태의 해석을 진행하였고, 입구 유동 각도가 25° 및 45°인 경우에는 유량 계수 약 0.106 지점에서 비정상 상태 해석을 진행하여 고속 푸리에 변환 결과를 나타내었다. 본 연구의 블레이드 통과 주파수(blade passing frequency)는 170.67Hz이고, 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$BPF = \frac{ZN}{60} \quad (4)$$

식 (4)에서 Z 및 N 은 날개의 개수 및 회전속도를 나타낸다.

결과로부터, 입구 유동 각도 0°의 최고 효율점은 낮은 주파수인 42.67Hz에서 진폭이 약간 증가하지만 크기가 약하기 때문에 내부 유동 패턴에 영향을 미치는 요인으로 분류할 수 없을 것으로 판단된다. 크기가 가장 큰 피크 값은 블레이드 통과 주파수인 170.67Hz에서 나타나는 것을 확인할 수 있고, 이를 통해 내부 유동이 안정적인 것을 알 수 있다. 유량 계수가 약 0.106인 저유량 영역에서는 입구 유동 각도 0°, 25° 및 45° 모두 블레이드 통과 주파수 이전인 128Hz에서 피크 값이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 특히 입구 유동 각도가 0°인 경우 진폭의 크기가 매우 큰 것을 알 수 있고, 이를 통해 내부 유동이 매우 불안정한 것을 확인할 수 있다. 입구 유동 각도가 25° 및 45°에서도 낮은 주파수에서 피크 값이 나타나 불안정한 유동 패턴을 유발하는 것을 확인하였다. 이는 앞서 언급하였듯이 Fig. 11의 내부 유선 분포에서 재순

환 유동이 발생하는 것을 통해 확인할 수 있다.

하지만 입구 유동 각도가 0°인 경우에 비해 진폭이 현저히 작은 것을 알 수 있다. 이는 저유량 영역에서 입구 유동 각도가 증가함에 따라 내부 유동은 0°에 비하여 안정화되었다고 판단할 수 있다. 이는 Fig. 7의 전양정 곡선의 저유량 영역에서 입구 유동각 0°인 경우 관찰되었던 양의 기울기 변화로부터 야기되는 가장 깊은 변곡점이 45°로 유동각이 증가함에 따라 사라지는 것을 통해 확인할 수 있다. 따라서 저유량 영역에서 입구 유동 각도를 증가시키는 경우 0°에 비하여 안정적으로 펌프를 운용할 수 있는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 축류펌프의 입구 안내깃에 대한 실제 적용 전 입구 안내깃 후단에 발생하는 선회유동의 수치적 모사를 통해 펌프 입구부에 절대 유동각을 부여하였고, 이에 따른 성능 예측 및 저유량 영역에서의 불안정 유동 현상 분석을 수행하였다. 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) 성능곡선으로부터 입구 유동각이 증가할수록 작동유량 범위가 감소하고, 저유량 영역에서 관찰되었던 양의 기울기 변화가 사라지는 것을 확인할 수 있다.
- 2) 내부 유동장 분석결과 저유량 영역에서는 입구 유동각 변화에 상관없이 불안정한 유동 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있고, 유동각이 45°인 경우 임펠러 깃 선단으로부터 2.5D 지점까지 재순환 유동이 발생하는 것을 알 수 있다.
- 3) 과도상태 특성 분석 결과 입구 유동각 변화에 관계없이 블레이드 통과 주파수 지점 이전에 피크 값이 관찰되지만, 유동각 0°에 비하여 진폭의 크기가 현저히 작은 것으로 보아 입구 유동각이 증가함에 따라 0°에 비하여 저유량 영역에서도 안정적으로 펌프를 운용할 수 있는 것을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2021202080026D, AI/ICT 기반 가변형 유체기기 설계 · 상 태진단을 위한 기반 · 플랫폼 기술 및 운영관리 시스템 개발)

References

- (1) Kaya, D., 2003, "Experimental study on regaining the tangential velocity energy of axial flow pump," *Energy Conv. Manag.*, Vol. 44, No. 11, pp. 1817-1829.
- (2) Hu, J., Huang, S., and Wang, P. S., 2008, "Research on hydrodynamic characteristics of axial waterjet pump with guide vane," *J. Hydrol. Eng.*, Vol. 2, pp. 32-36.
- (3) Junaidi MD, A. R., Laksmikumari, N. B., Samad, M. A., and Sayedahmed, G. M., 2015, "CFD simulation to enhance the efficiency of centrifugal pump by application of inner guide vanes," *ICMPC2015*.
- (4) Yang, H. M., Kim, Y. I., Son, Y. J., Lee, K. Y., and Choi, Y. S., 2022, "Analysis of energy consumption of the axial-flow pump applying operational scenario," *Summer Conference of The Korea Society of Fluid Machinery*.
- (5) Ahmed, S. A., Muiz, A., Mubashir, M., and W., 2016, "Efficiency enhancement of centrifugal water pump by using inlet guided vanes," *European J. Adv. Eng. Technol.*, Vol. 3, pp. 1-4.
- (6) Tang, F. P., and Wang, G. Q., 2006, "Influence of outlet guide vanes upon performances of water jet axial-flow pump," *J. Sh. Res.*, Vol. 10, No. 6, pp. 19-26.
- (7) Chan W. K., Wong, Y. W., Yu, S. C., and Chua, L. P., 2002, "A computational study of the effects of inlet guide vanes on the performance of a centrifugal blood pump," *International Society for Artificial Organs*, Vol. 26, No. 6, pp. 534-542.
- (8) Li, Y. J., and Wang, F. J., 2007, "Numerical investigation of performance of an axial-flow pump with inducer," *J. Hydrodyn.*, Vol. 19, No. 6, pp. 705-711.
- (9) Qian, Z., Wang, Z., and Zhou, W., 2013, "Experimental study on hydraulic performance of saddle zone in axial-flow pump with adjustable guide vane," *Journal of Drainage and Irrigation Machinery*, Vol. 31, No. 6, pp. 461-465.
- (10) Liu, Y., Tan, L., Liu, M., Hao, Y., and Xu, Y., 2017, "Influence of prewhirl angle and axial distance on energy performance and pressure fluctuation for a centrifugal pump with inlet guide vanes," *Energies*, Vol. 10, No. 5, pp. 695.
- (11) Tan, L., Cao, S., and Gui, S., 2010, "Hydraulic design and prewhirl regulation law of inlet guide vane for centrifugal pump," *Sxi. China Technol. Sci.*, Vol. 53, No. 8, pp. 2142-2151.
- (12) Tan L., Zhu, B., Cao, S., Bing, H., and Wang, Y., 2014, "Influence of blade wrap angle on centrifugal pump performance by numerical and experimental study," *Chin. J. Mech. Eng.*, Vol. 27, No. 1, pp. 171-177.
- (13) Watanabe, T., Sato, H., Henmi, Y., Horiguchi, H., Kawata, Y., and Tsujimoto, Y., 2009, "Rotating choke and choked surge in an axial pump impeller," *International Journal of Fluid Machinery and System*, Vol. 2, No. 3, pp. 232-238.
- (14) Celik, B. I., Ghia, U., Roache, P. J., Freitas, C. J., oleman, H., and Rad, P. E., 2008, "Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD application," *J. Fluids Eng.*, Vol. 130, No. 7.
- (15) ANSYS, CFX-19.2., 2018, "ANSYS CFX-solver theory guide & ANSYS CFX-training", ANSYS Inc.
- (16) Brown, G. J., Fletcher, D. F., Leggoe, J. W., and Whyte, D. S., 2018, "Investigation of turbulence model selection on the predicted flow behaviour in an industrial crystalliser-RANS and URANS approaches," *Chem. Eng. Res. Des.*, Vol. 140, pp. 205-220.
- (17) Son, Y. J., Kim, Y. I., Yang, H. M., Lee, K. Y., Yoon, J. Y., Choi, Y. S., 2023, "Numerical study on the hydrodynamic performance and internal flow of an axial-flow pump with various inlet flow angles." *Scientific Reports*, Vol. 13, pp. 1-16.
- (18) Son, Y. J., Kim, Y. I., Yang, H. M., Lee, K. Y., Yoon, J. Y., Choi, Y. S., 2022, "A numerical study on performance and internal flow field of an axial flow pump with the artificial application of inlet guide vane," *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol. 25, No. 6, pp. 11-18.