

## 축류펌프 입구 안내깃 각도에 따른 흡입 성능 특성 연구

백종민\* · 최원철\*\*† · 유일수\*\* · 김수원\*\* · 임영철\*\* · 김병재\*

### A Study on the Cavitation Performance Characteristics of Axial Flow Pumps as a Function of Inlet Guide Vane Angle

Jongmin Baek\*, Wonchul Choi\*\*†, Ilsu Yoo\*\*, Suwon Kim\*\*, Youngchul Lim\*\*, ByoungJae Kim\*

Key Words : Axial-flow pump(축류펌프), Experiments(실험), Inlet guide vane(입구 안내 깃), Cavitation(공동현상)

#### ABSTRACT

Axial-flow pumps are widely used to transport large volumes of fluids in drainage pumping stations or water and sewage treatment plants. In general, pumps are designed to operate with high efficiency under constant rated flow conditions, so waste power occurs due to reduced efficiency under operating conditions that deviate from the design flow rate. Accordingly, the concept of a variable inlet guide vanes(IGV) that can change the installation angle is being introduced as a method to improve operating efficiency in response to frequent changes in the operating flow rate. This study investigated the effects of IGV angle adjustments on the performance of an axial flow pump with a specific speed of 1200-class. The IGV angle was systematically varied in 10° increments within a range of -20° to +20°. Hydraulic performance and cavitation tests were conducted across various flow rates for each angle configuration. The experimental results revealed a significant correlation between IGV angle adjustments and pump performance parameters. As the IGV angle was adjusted toward positive values, a corresponding increase in the total head of the axial pump was observed. Conversely, adjustments towards negative angles resulted in a decrease in total head. Furthermore, the study demonstrated that IGV angle modifications also influenced suction performance. When the IGV angle was adjusted to positive, a general decrease in suction performance was noted across the entire flow rate range. In contrast, negative IGV angle adjustments led to improved suction performance. However, it is noteworthy that this improvement in suction performance became less pronounced as the flow rate increased. These findings highlight the significant influence of IGV angle on axial pump performance, offering the potential for performance optimization in different operational scenarios.

#### 1. 서 론

축류펌프는 배수펌프장 또는 상하수처리장 등에서 대유량의 유체를 이송하는 목적으로 널리 사용되고 있다. 이러한 시설에서는 시설 특성상 계절과 시간에 따라 강우량 및 상하수 사용량 등이 변동되면서 펌프의 운전 유량을 조절해야 하는 경우가 있다. 일반적으로 펌프는 일정한 정격 유량 조건에서 높은 효율로 운전되도록 설계가 되기 때문에, 설계 유량에서 벗어난 운전 조건에서는 효율 감소로 인한 전력 소모가 발생한다. 이를 극복하기 위하여 기존 설비에서는 펌프를

병렬 설치하여 운전 대수를 조절하거나 유입 및 토출 밸브를 제어하는 방식이 적용되고 있지만, 정밀한 유량 조절이 어렵고 밸브에서 추가적인 저항 손실이 발생하는 한계가 여전히 존재한다. 최근에는 인버터 제어 설비를 이용하여 펌프의 회전 속도를 조절하는 방식이 도입되고 있으나 고가의 부속 설비가 요구되어 초기 설치비용이 높은 실정이다.

또 다른 방법으로는 펌프의 흡입 측에 설치되는 안내깃의 형상 또는 각도를 조절하여 펌프의 효율적 운전 범위를 조절하는 방식이 고려될 수 있다. 일반적으로 입구 안내깃(Inlet Guide Vane; IGV)은 펌프의 흡입부, 즉 회전차인 임펠러의

\* 충남대학교 기계공학과(Chungnam National University, Department of Mechanical Engineering)

\*\* 한국기계연구원 에너지저장연구실(Korea Institute of Machinery and Materials, Department of Energy Storage Systems)

† 교신저자, E-mail : wonchul@kimm.re.kr

2024 한국유체기계학회 동계학술대회 발표 논문, 2024년 12월 4일~12월 7일, 제주 휘닉스

The KSFM Journal of Fluid Machinery: Vol. 28, No. 2, April 2025, pp.79~85(Received 23 Dec. 2024; revised 15 Jan. 2025; accepted for publication 21 Jan. 2025)

한국유체기계학회 논문집: 제28권, 제2호, pp.79~85, 2025(논문접수일자: 2024.12.23, 논문수정일자: 2025.01.15, 심사완료일자: 2025.01.21)

전단에서 임펠러로 유입되는 유동이 원활하게 발달될 수 있도록 하고 선회 유동을 방지하는 목적으로 설치된다. 주로 펌프의 회전축과 평행한 방향으로 유체를 이송하는 축류펌프에서 형상 및 각도가 고정된 날개의 형태로 적용되는 경우가 대부분이다. 입구 안내깃이 펌프의 성능에 미치는 영향에 대해서는 유동 해석과 실험을 통해 부분적으로 연구가 수행되고 있으며, 그 결과를 토대로 최근에는 운전 효율 개선을 위한 방안으로 설치 각도를 변경할 수 있는 가변형 IGV의 개념이 도입되고 있다.

Chan 등<sup>(1)</sup>은 수치해석을 통해 원심펌프에서 IGV의 적용 유무 및 IGV의 입구각, 수량에 따라 임펠러 내부 압력분포와 전단응력에 미치는 영향에 관해 연구하였다. Kim 등<sup>(2)</sup>은 수치해석을 통해 임펠러의 피치 각과 IGV 뒷전 각도가 축류펌프의 수력 특성에 미치는 영향을 연구하였다. 임펠러 피치 각도가 커질수록 펌프의 양정이 증가하고, 최고효율점이 고유량쪽으로 이동하였다. 또한 IGV 뒷전 각도가 커질수록 펌프의 양정이 증가하였으나, 최고효율점은 이동 없이 고유량 운전점에서 효율이 증가하는 것을 확인하였다. Yang 등<sup>(3)</sup>은 수치해석을 통해 IGV를 회전시킨 각도에 대하여 축류펌프의 성능 변화를 계산하였고, IGV를 임펠러의 회전 반대방향으로 회전시킬수록 최적 운전점이 저유량 구간으로 이동하는 것을 보였다. Nguyen 등<sup>(4)</sup>은 축류펌프로 유입되는 유동의 선회 각도(pre-swirl)와 IGV의 설치 각도 조건을 변경하고, 그에 따른 펌프의 수력 성능 변화를 수치 해석을 통해 예측하였다. 이와 같이 입구 안내깃의 각도가 펌프의 수력 성능에 미치는 영향에 대해서 수치해석을 통한 연구가 주로 수행 되어왔으나 실험을 통한 검증은 상대적으로 미비한 수준이다.

한편 펌프에서는 캐비테이션 특성에 의해 결정되는 흡입 성능이 중요한 평가 지표인데, 캐비테이션은 유체의 정압력이 증기압보다 낮아질 때, 끓어오르는 상변화가 일어나며 기포가 발생하는 현상이다. 일반적으로 펌프에서는 임펠러의 앞전에서 임펠러의 빠른 회전에 의해 유체의 속도가 빨라짐에 따라 국부적으로 유체의 정압력이 감소하는데, 이때 포화증기압 이하로 감소하는 경우 캐비테이션 현상이 발생한다. 캐비테이션에 의해 형성된 기포는 펌프 내부 유로를 진행하면서 임펠러로부터 전달받은 에너지로 인해 유체의 정압력이 증기압 이상으로 다시 상승하면서 순간간에 붕괴하고 액상으로 돌아간다. 이 과정에서 임펠러 표면에서는 국부적인 부식 또는 침식이 발생하기도 하고, 진동과 소음이 유발될 뿐만 아니라 펌프의 정상적인 운전 성능도 발휘하지 못하게 된다. 이러한 이유로 펌프의 캐비테이션 특성은 펌프의 안정적인 운전을 위한 흡입 유동의 조건을 제시하는 중요한 지표로 평가가 이루어진다. Farrell<sup>(5)</sup>은 축류펌프에서 팁 간극 유동에 의해 발생하는 캐비테이션에 관하여 연구를 수행하고, 팁 간극 크기에 따른 캐비테이션 계수 변화를 경험식으로 도출하였다. Guo<sup>(6)</sup>는 설계 유량점 대비 저유량 운전점에서 IGV

각도에 따른 축류펌프의 흡입성능 변화를 실험과 해석을 통해 확인하였다.

이처럼 IGV의 설치 각도는 펌프의 수력 특성에 영향을 미치는데, 이에 대한 구체적인 정량적 실험 데이터는 여전히 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 축류펌프의 IGV 각도를 조절하면서 성능 실험을 수행하고, 특히 캐비테이션 실험을 통해 IGV 각도에 따른 흡입성능의 변화를 평가하였다.

## 2. 연구 방법

본 연구에서 실험한 축류펌프는 비속도 1200급으로 Fig. 1에서와 같이 임펠러의 전단과 후단에 각각 IGV와 디퓨저가 구비되어 있는 형태를 갖는다. 축류펌프 구성품의 제원과 설계 운전점에 대한 정보는 Table 1에 정리하였다. 실험 펌프는 한국기계연구원의 수력 성능 실험설비에 장착하였으며, Fig. 2는 실험 장치 구성의 개략도이다. 한국기계연구원의 실험설비에는 실험 펌프의 흡입압력을 조절할 수 있는 10 ton급 고압 밀폐 저수조가 구비되어 있으며, 실험 펌프의 입구 및 출구를 배관으로 연결하여 폐루프로 구성하였다. 축류펌프는 수평형으로 제작되었으며, 회전축은 축동력을 측정하기 위한 토크미터를 사이에 두고 전동기 축과 커플링으로 연결하여 구동하였다. 축류펌프의 특성상 회전축의 길이가 길어지고, 여기에 토크미터 및 전동기와 커플링 연결을 하기 때문에 펌프의 안정적인 운전을 위해서는 축정렬이 매우 중요하다. 본 연구에서는 커플링 체결 시 발생하는 축 편심을 PR FTECHNIK 社の 정밀 레이저 축 정렬 장비를 사용하여 축 정렬 오차를 수직과 수평 방향으로 최대 0.02~0.04mm 범위 안으로 교정하여 회전 안정성을 확보하였다. 펌프의 작동유량은 펌프의 후단 배관에 자동 제어 밸브를 장착하여 조절하였으며, 밸브 앞단에 터빈 유량계를 설치하여 유량을 측정하였다. 펌프의 전양정은 입구 및 출구 배관에 각각 정압계와 차압계를 설치하여 측정하였다. Table 2는 펌프의 성능을 측정하는데 사용한 계측기의 제원을 나타낸 것이다. 각 계측기에서 출력된 아날로그 전기 신호를 디지털 신호로 변환 후 수집하기 위하여 National Instruments 社の compact DAQ 사시 및 모듈로 DAS(Data Acquisition System)를 구성하였다. DAS는 DasyLab 소프트웨어로 작성한 HMI(Human-Machine Interface) 프로그램으로 실시간 데이터를 관리하고 제어하였다. 축류펌프의 성능실험은 KS B 6301<sup>(7)</sup>에 기술된 절차 및 방법을 준수하여 수행하였다.

본 연구에서는 Fig. 3과 같이 IGV의 각도를 조절하기 위해 링크-기어형 제어 장치를 자체적으로 설계/제작하여 설치하였다. 총 5매의 IGV는 임펠러 전단에 72° 간격으로 배치하고, 각 날개는 링크로 연결하여 하나의 기어로 동시에 일정한 각도로 조절되도록 설계하였다. IGV의 날개는 회전 시 케이싱과 간섭이 일어나는 부분을 고려하여 최대 -25°~

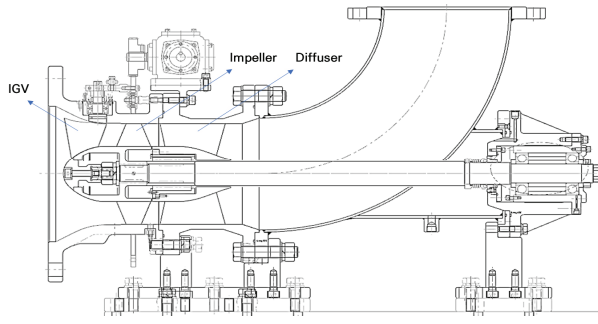


Fig. 1 A layout design of the axial pump for experiments

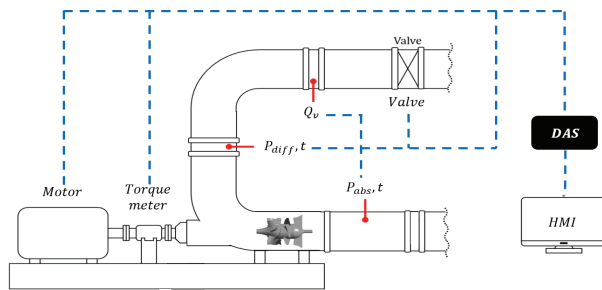


Fig. 2 A schematic diagram of the pump test facility

Table 1 Design specifications of axial pump model

| Parameter                                       | Value |
|-------------------------------------------------|-------|
| Number of inlet guide vanes                     | 5     |
| Number of impeller blades                       | 4     |
| Number of diffuser vanes                        | 7     |
| Specific speed[rpm · m <sup>3</sup> /min · m]   | 1200  |
| Designed flow rate, $Q_d$ [m <sup>3</sup> /min] | 7     |

Table 2 Measuring devices index

| Item                | Range                      | Maker       | Uncertainty |
|---------------------|----------------------------|-------------|-------------|
| Pressure transducer | 0~5[Bar](Abs)              | Sensys      | ± 0.035 %   |
| Pressure transducer | 0~7[Bar](Dif)              | Sensys      | ± 0.035 %   |
| Torque meter        | 0~100[Nm]                  | Magtrol     | ± 0.095 %   |
| Turbine flow meter  | 0~1150[m <sup>3</sup> /hr] | Flowmetrics | ± 0.112 %   |

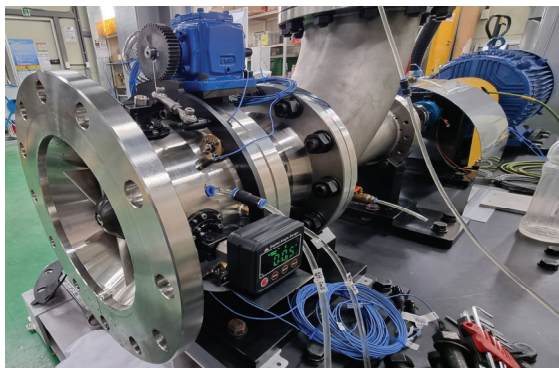


Fig. 3 The test pump with variable inlet guide vanes

25°의 제한된 범위에서 회전할 수 있도록 설계되었다.

IGV의 회전 각도는 Fig. 4와 같이 펌프의 축 방향으로 설치된 각도(0°)를 기준으로 임펠러 날개의 설치 각도 방향과 같은 경우를 양의 방향으로 정의하였다. 동일한 운전조건에서 IGV 각도를 0° 기준으로 양의 각도 및 음의 각도로 조절했을 때 임펠러 전단에서 형성되는 속도 삼각형을 Fig. 4에 나타내었다. 여기서  $c$ 는 임펠러 입구로 유입되는 유체의 절대속도로 축방향( $c_m$ ) 및 회전방향( $c_u$ ) 성분으로 분리할 수 있고,  $w$ 는 상대속도,  $u$ 는 임펠러의 회전속도를 의미한다.

$$\text{전양정} : H_t = \frac{\Delta p_s + \frac{1}{2} \rho Q \left( \frac{1}{A_o} - \frac{1}{A_i} \right)}{\rho g} \quad (1)$$

$$\text{수력 효율} : \eta = \frac{\rho g Q H_t}{T \omega} \times 100 [\%] \quad (2)$$

$$\text{유효흡입수두} : NPSH = \frac{p_{s,1} + p_{d,1} - p_v}{\rho g} \quad (3)$$

펌프의 전양정과 수력 효율, 유효흡입수두는 식 (1)~(3)으로 정의한 식으로 산출하였다.  $\rho$ ,  $g$ ,  $Q$ ,  $\omega$ ,  $T$ ,  $A_i$ ,  $A_o$ 는 각각 작동유체의 밀도[kg/m<sup>3</sup>], 중력가속도[m/s<sup>2</sup>], 유량[m<sup>3</sup>/s], 회전수[rad/s], 토크[Nm], 입구 및 출구배관 단면적[m<sup>2</sup>]이다.  $\Delta p_s$ ,  $p_{s,1}$ ,  $p_{d,1}$ ,  $p_v$ 는 펌프의 입·출구 차압, 펌프 입구 정압, 펌프 입구 동압, 작동유체의 포화증기압이다. 최종적으로 펌프의 수력 성능은 임펠러 직경( $D$ )와 회전수( $\omega$ )를 이용해 식 (4)~(7)에서 정의한 무차원 계수로 환산하여 평가하였다.

$$\text{유량계수} : \phi = \frac{Q}{\omega D^3} \quad (4)$$

$$\text{양정계수} : \psi = \frac{g H_t}{\omega^2 D^2} \quad (5)$$

$$\text{동력계수} : \lambda = \frac{T \omega}{\rho \omega^3 D^5} \quad (6)$$

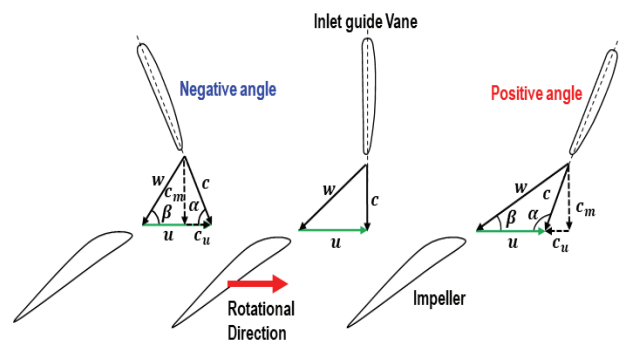


Fig. 4 Definition of IGV's angle

$$\text{캐비테이션 계수} : \sigma = \frac{gNPSH}{\omega^2 D^2} \quad (7)$$

### 3. 연구 결과

#### 3.1 수력성능실험

본 연구에서는 구조적으로 제한된 범위 내에서 IGV의 설치 각도를 변화시키며, 이에 따른 축류펌프의 성능 변화를 체계적으로 분석하였다. 이에 고정된 정격 회전수 조건에서 IGV의 각도를  $-20^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ 로 조정하고, 각 각도 조건에 대하여 최대 유량점부터 체절운전점까지 유량을 조절하면서 실험을 수행하였다.

Fig. 5, 6, 7은 각각의 IGV 각도에서 실험한 유량별 전압정, 축동력, 효율 곡선을 나타낸 것이다. 전압정 및 축동력 곡선은 전형적인 축류펌프의 성능곡선 형태를 보였다. 설계 유량점인  $\phi_d = 0.075$ 에서 저유량 구간으로 갈수록 전압정이

증가하다가,  $0.042 < \phi < 0.064$  유량구간에서 유량-양정 곡선의 기울기가 양의 값을 갖게 된다.  $\phi$ 가 0.042 이하부터 체절점(shut-off;  $\phi=0$ )까지는 다시 유량이 감소할수록 전압정이 증가하는 형태를 가지면서, Fig. 5에 표시한 hump<sup>(8)</sup> 또는 saddle zone<sup>(4)</sup>이라 일컫는 축류펌프의 불안정한 운전 영역이 존재하는 것을 확인할 수 있다.

IGV의 각도 변경에 대하여 전압정 및 축동력 곡선의 형태는 크게 변화하지 않았으나,  $0^\circ$ 의 IGV 각도 기준에서 양각으로 조절할수록 축류펌프의 전압정과 축동력은 증가하고, 음각으로 조절할수록 감소하였다. IGV가 임펠러의 회전방향과 반대로 설치되는 각도인 양각으로 조절될수록 임펠러 전단으로 흡입되는 유동의 절대속도 성분이 회전방향과 반대로 형성되면서 임펠러에서의 일이 증가하는 것으로 생각할 수 있다. 즉, IGV가 양각이 되면, 임펠러 전단에서의 상대속도 성분이 증가하게 되면서 임펠러 날개의 하중이 커지는 것으로 이해된다<sup>(9)</sup>. 정격점 이상의 고유량 구간에서는 IGV의 각도를 양각으로 조절하는 경우, 음각인 경우에 비해 상대적으로 성능 변화의 폭이 크게 나타났다. 반면, saddle zone에서는 IGV 각도에 따른 성능 변화의 폭이 크게 감소하면서, 음각으로 조절할수록 펌프의 불안정구간에서 성능 변화 기울기가 감소한다.

한편 IGV의 각도에 따른 축류펌프 효율 곡선의 변화는 Fig. 7에서와 같이 크게 두드러지지 않았다. 설계 유량점 근방에서 최고효율을 보였는데, IGV의 각도가 음각이나 양각으로 과도하게 전환될 때, 효율이 감소하는 것으로 나타났다. IGV의 각도를  $\pm 20^\circ$ 로 조절하는 경우, 최고효율 기준으로  $0^\circ$  대비 약 1.5~2% 감소하였다. IGV의 각도 조절은 임펠러에서의 유동 유입 각도 변화를 일으킴에 의해 축동력을 변화시킴과 동시에, IGV 및 디퓨저에서도 유동장의 변화가 생기며 추가적인 유동 손실이 유발되는 데에 그 원인이 있다고 해석된다.

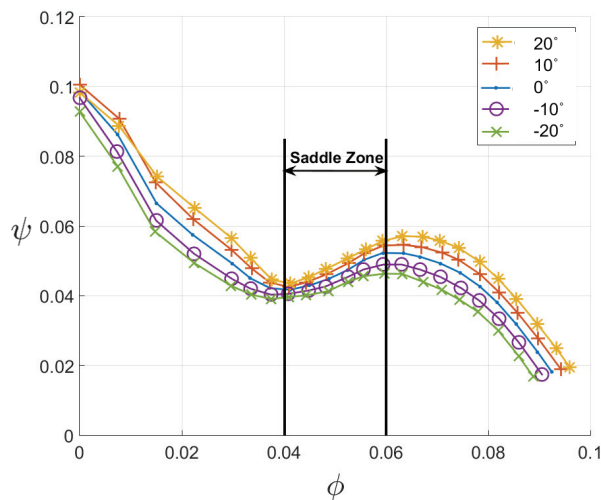


Fig. 5 Head curves with different IGV angles

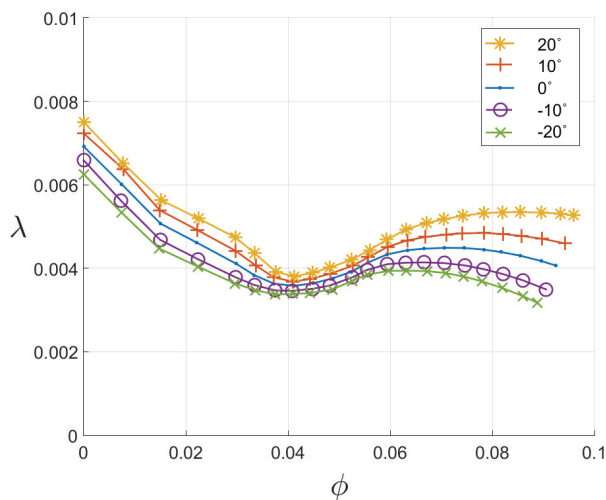


Fig. 6 Power curves with different IGV angles

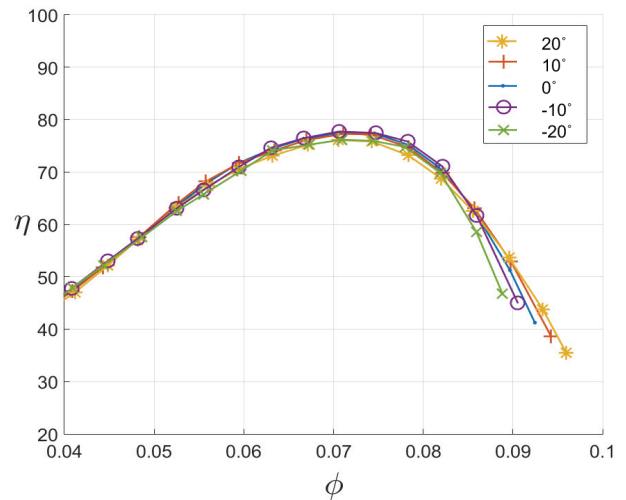


Fig. 7 Efficiency curves with different IGV angles



### 3.2 흡입성능실험

유효흡입수두(NPSH)는 펌프의 흡입 성능을 평가하는 지표로 식 (3)으로 산출한다. 필요흡입수두(NPSH<sub>r</sub>; required NPSH)는 캐비테이션 발생으로 인해 펌프 성능에 영향을 미치기 시작하는 시점을 의미하는 것으로, 통상 펌프 전양정의 3% 감소 시점을 기준으로 정의한다<sup>(6)</sup>. 본 연구에서는 필요흡입수두를 식 (7)을 기반으로 무차원하여 캐비테이션 계수인  $\sigma_3$ 로 정의하여 산출하였다.

흡입성능실험은 펌프의 회전수 및 작동유량을 고정한 상태에서 펌프의 흡입 측 압력을 감소시키면서 펌프의 성능 변화를 관찰하는 방법으로 수행된다. 본 연구에서는 충분히 높은 흡입수두인  $\sigma \sim 0.125$  조건부터 시작하여, 진공펌프를 이용해 펌프의 흡입 측에 연결된 저수조의 압력을 서서히 감압시킴으로써 NPSH를 낮추어 가며 펌프의 성능 변화를 확인하였다. IGV의 각도는 수력성능실험 조건과 동일한 조건에서 최대유량점부터 정격유량점 기준으로 유량비 115%, 100%, 80%, 60%인 유량점에서 캐비테이션 실험을 수행하였다.

Fig. 8은 설계 유량점인  $\phi_d=0.075$ 에서 5개의 IGV각도에 대하여 흡입압력에 따른 전양정의 변화를  $\sigma-\psi$  그래프로 나타낸 것이다. 흡입수두가  $\sigma \sim 0.125$ 인 조건에서 감소할수록 즉, 입구 압력이 낮아짐에 따라 펌프의 전양정은 다음과 같은 특징을 보인다. 처음 일정 구간까지는 전양정이 변하지 않고 일정하게 유지되고, 어느 시점에서 증가했다가 빠르게 하락하는 형태를 보인다. 초기 흡입압력이 감소하기 시작하는 시점에서 전양정이 일정하게 유지되는 구간에서는 캐비테이션 발생 유무를 확인할 수 없으나, 캐비테이션이 발생하더라도 펌프의 성능에는 영향을 미치지 않는 수준이다. 이후 전양정이 급격히 하락하기 전에 상승하는 현상이 나타났는데, 이 구간에서는 임펠러 전단에 형성된 기포가 임펠러 내부의 유로를 국부적으로 좁히면서 유동 속도가 증가시킨 결과로 임펠러 하중이 일시적으로 증가한 것으로 이해된다<sup>(9)</sup>.

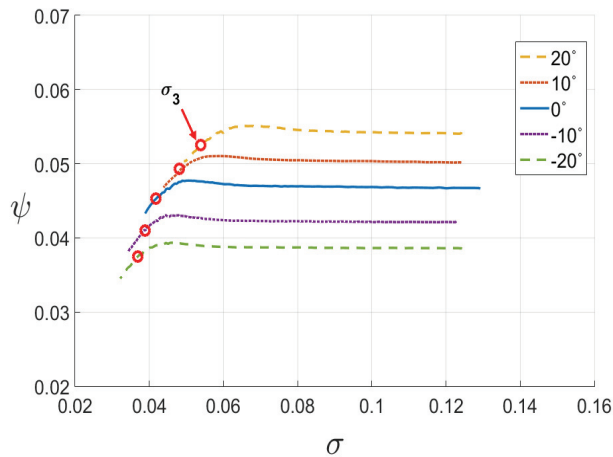


Fig. 8  $\sigma-\psi$  curves at  $\phi_d=0.075$

이 상태에서 흡입압력이 더욱 하강하여 캐비테이션이 심화되는 경우 임펠러 내 기포가 급격히 증가하여 결국, 대부분의 유로를 뒤덮게 된다. 이로 인해 임펠러가 제 역할을 하지 못하면서 정상적인 유로가 형성되지 않고, 급기야 펌프의 성능은 급격히 하락한다<sup>(10)</sup>.

설계 유량점인  $\phi_d=0.075$ 에서는 흡입수두에 따른 전양정의 하락 곡선 형태가 Fig. 8에서와 같이 모든 IGV 각도에서 유사한 패턴을 보였다. IGV 각도를  $0^\circ$  기준에서 음각으로 전환할수록, 성능 하락을 의미하는 흡입수두 감소가 나타나고, 양각으로 전환할수록 흡입수두가 높아지는 것을 볼 수 있다. 이는 곧, IGV를 양각으로 전환할수록 펌프의 흡입성능이 감소하는 것을 의미한다.

Fig. 9는 설계 유량점 기준 115% 유량비인  $\phi=0.086$  조건에서 IGV 각도에 따른 캐비테이션 곡선이다. Fig. 8과 다르게 전양정이 하락하기 직전 약간 상승하는 구간은 IGV 각도가 양각인 경우에만 작게 존재할 뿐, 성능이 하락하는 기울기가 상대적으로 완만해졌다.

반면, 유량비가 80%인  $\phi=0.06$  조건에서의 실험 결과는 Fig. 10에서와 같이 일시적으로 전양정이 상승했다가 하락하

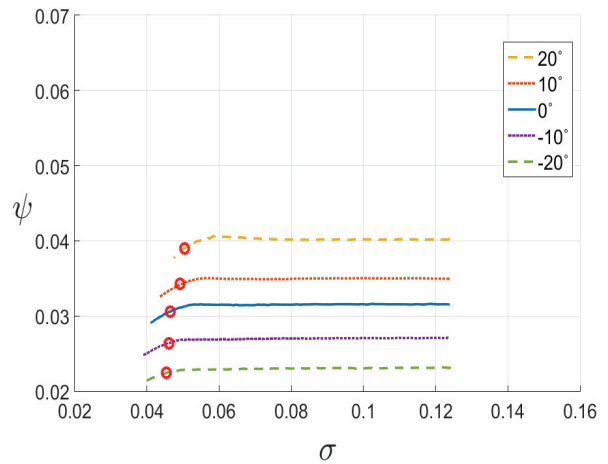


Fig. 9  $\sigma-\psi$  curves at  $\phi=0.086$

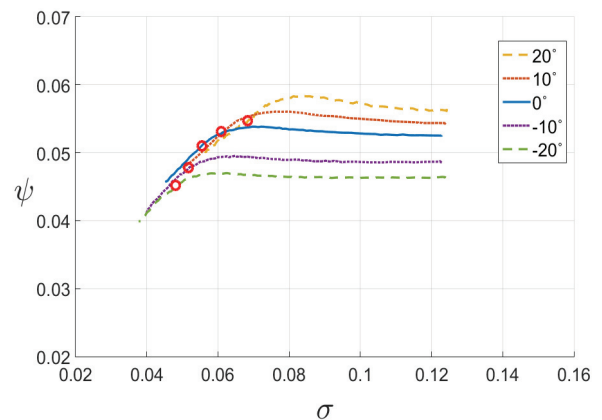


Fig. 10  $\sigma-\psi$  curves at  $\phi=0.06$

는 구간이 상대적으로 뚜렷하게 나타났다. 특히, IGV 각도가 양각으로 전환될수록 양정의 변화는 높은 흡입수두에서 일어나기 시작하고, 20°의 IGV 각도에서는  $\sigma \sim 0.11$  이하부터 양정 변화가 나타났다. 이는 저유량 구간에서 특히 유량-양정 곡선의 기울기가 양으로 바뀌는 불안정한 운전 영역이 시작된 시점에서는 IGV가 양각으로 전환될수록 캐비테이션의 발달 시점이 앞당겨지면서 흡입성능을 감소시킨 것으로 해석된다.

Fig 11은 saddle zone에 해당하는 60%의 유량비 운전점인  $\phi=0.044$ 에서의 결과이다. 해당 유량점에서는 모든 IGV 각도에 대하여 일시적으로 양정이 상승하는 구간이 보이지 않고, 입구 압력이 낮아짐에 따라 전양정이 서서히 감소하는 경향을 보였다. 성능이 하락하는 구간에서도 다른 유량점에 비해 상대적으로 그 기울기가 완만한 것을 볼 수 있다. 이 유량점에서는 모든 IGV 각도에 대하여 캐비테이션 발생과 발달이 연이어 일어나면서 그 영향이 성능 하락으로 직결되는 것으로 판단된다. 또한, 성능 하락의 시점도 IGV 각도에 따른 영향이 크지 않고 그 차이가 작게 나타났다.

Fig. 12는 Fig. 8~11의 캐비테이션 곡선에서 성능이 급격히 하락하는 시점 즉, 전양정이 3% 하락한 시점을 표기한  $\sigma_3$

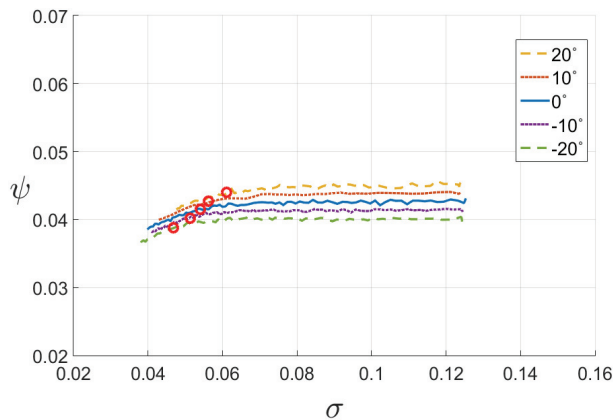


Fig. 11  $\sigma$ - $\psi$  curves at  $\phi=0.044$

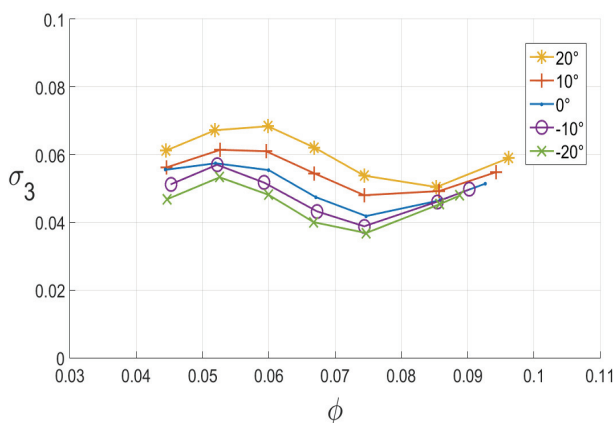


Fig. 12  $\phi$ - $\sigma_3$  curves with different IGV angles

값을 유량에 따라 5개의 IGV 각도 조건에 대하여 그래프로 나타낸 것이다. IGV 각도가 20°인 경우를 제외하고 모든 IGV 각도에서 설계 운전점인  $\phi_d=0.075$ 에서 가장 낮은  $\sigma_3$  값을 가졌고 즉, 흡입성능이 가장 높은 것으로 나타났다. 전반적으로 설계 유량점을 기준으로 유량이 증가하거나 감소하는 경우  $\sigma_3$ 은 증가하는 경향을 보였다. 그리고, saddle zone 영역에 해당하는  $\phi=0.052 \sim 0.06$  이하의 저유량 구간에서는  $\sigma_3$ 이 다시 감소한다.

대부분의 유량 구간에서 IGV 각도를 0° 기준에서 양각으로 조절할수록  $\sigma_3$ 은 증가하였고, 반대로 음각으로 조절한 경우에는 상대적으로 감소하였다. 즉, IGV를 양각으로 조절할수록 흡입성능이 감소하고, 음각으로 조절할수록 흡입성능이 향상되었다. 다만, 설계 유량점  $\phi_d=0.075$  기준에서 유량이 증가할수록 IGV의 각도 조절에 의한 흡입성능의 변동 영향이 감소하면서,  $\phi > 0.085$  유량 구간부터는 그 값이 모든 IGV 각도에 대하여 거의 차이가 없게 나타났다. 고유량 운전점에서는 IGV의 각도에 따른 임펠러 전단에서 상대속도의 변화보다는 유량에 의한 유동 속도의 영향이 더 지배적인 것을 알 수 있다.

IGV 각도를 음각으로 조절하는 경우, 임펠러 전단에서 흡입되는 유동의 상대속도를 감소시킬 수 있는데 이는 캐비테이션 발달 속도를 지연시킬 수 있어서 결과적으로 흡입성능이 향상되는 효과가 나타난 것으로 판단된다. 특히 저유량 구간에서는 음각의 IGV 각도가 임펠러 전단에서의 유동 입사각을 감소시킴으로써 캐비테이션 생성 및 발달이 늦어지면서 흡입성능의 향상으로 이어진 것을 시사한다. 그러나, 고유량 구간에서는 IGV의 음각 조절에 따른 유동의 입사각 조절에 비해 유동속도의 영향이 커지면서 그 효과가 미비해짐으로써 흡입성능이 IGV 각도 변화에 둔감해진다. 즉, 축류펌프의 IGV 각도를 음각으로 조절하는 것은 캐비테이션 성능을 향상시키는 것을 기대할 수 있으나, 유량이 증가할수록 그 효과가 제한적일 수 있음을 보여준다.

결과적으로 수력성능실험과 흡입성능실험에서 얻은 데이터를 바탕으로 설계 유량점  $\phi_d=0.075$ 을 기준, 115% 유량점( $\phi=0.086$ ) 및 80% 유량점( $\phi=0.06$ )에 대해 IGV 각도별 축류펌프의 성능지표 데이터를 Table 3~5에 각각 정리하였다.

Table 3 Pump performance at  $\phi_d=0.075$

| Degree | $\psi$ | $\lambda$ | $\eta$ | $\sigma_3$ |
|--------|--------|-----------|--------|------------|
| 20°    | 0.0536 | 0.0053    | 75.82  | 0.05379    |
| 10°    | 0.0503 | 0.0048    | 77.16  | 0.04801    |
| 0°     | 0.0465 | 0.0045    | 77.74  | 0.04185    |
| -10°   | 0.0421 | 0.004     | 77.44  | 0.03883    |
| -20°   | 0.0388 | 0.0038    | 75.93  | 0.03684    |

Table 4 Pump performance at  $\phi=0.086$

| Degree | $\psi$ | $\lambda$ | $\eta$ | $\sigma_3$ |
|--------|--------|-----------|--------|------------|
| 20°    | 0.039  | 0.0053    | 62.54  | 0.05042    |
| 10°    | 0.0351 | 0.0047    | 63.06  | 0.04923    |
| 0°     | 0.0319 | 0.0043    | 63.34  | 0.04653    |
| -10°   | 0.0266 | 0.0037    | 61.65  | 0.04609    |
| -20°   | 0.0227 | 0.0033    | 58.52  | 0.04537    |

Table 5 Pump performance at  $\phi=0.06$

| Degree | $\psi$ | $\lambda$ | $\eta$ | $\sigma_3$ |
|--------|--------|-----------|--------|------------|
| 20°    | 0.0556 | 0.00468   | 70.48  | 0.06838    |
| 10°    | 0.0544 | 0.00451   | 71.71  | 0.061      |
| 0°     | 0.0523 | 0.00433   | 71.69  | 0.05542    |
| -10°   | 0.0489 | 0.004     | 70.96  | 0.05173    |
| -20°   | 0.0463 | 0.0039    | 70.2   | 0.04811    |

#### 4. 결 론

본 연구에서는 입구 안내깃을 구비한 비속도 1200급 축류 펌프를 대상으로, 입구 안내깃 각도에 따른 수력성능실험과 흡입성능실험을 수행하였다. IGV 각도는 -20°, -10°, 0°, 10°, 20°로 조정하였고, 각 각도에 대하여 유량에 따른 전양정, 동력, 효율, 그리고 유효흡입수두 곡선을 도출하였다. 실험 결과를 바탕으로 입구 안내깃의 각도가 펌프의 성능에 미치는 영향을 비교 분석하였으며, 그 결과를 정리하면 아래와 같다.

- 1) 축류펌프의 IGV 각도를 양각으로 조정할수록 전양정이 증가하고, 음각으로 조정할수록 감소한다. 축류펌프의 불안정한 운전 영역인 saddle zone에서는 IGV의 각도에 의한 성능 변화량이 감소한다. 효율은 IGV의 각도 조정에 따라 효율은 큰 변화폭을 보이지 않지만, 각도의 절대값이 커질수록 효율은 크게 감소한다.
- 2) IGV 각도 조정에 따라 캐비테이션에 의한 전양정 하락 곡선의 특성이 달라진다. IGV 각도를 양각으로 조절할수록 흡입수두가 낮아지면서 발생하는 펌프의 성능 변화 시점이 빨라지고, 급격히 하락하기 전에 일시적으로 전양정이 상승하는 특징이 두드러진다.
- 3) 축류펌프의 IGV 각도 조절이 흡입성능에 영향을 미친다는 것을 확인하였다. IGV 각도를 양각으로 조절하는 경우 전 유량 범위에서 전반적으로 흡입성능이 저하된다. 반면 음각으로 조절하는 경우 흡입성능이 향상되는데, 고유량 구간으로 갈수록 그 효과는 미비해진다.

#### 후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원의 “가변형 운전 중대형 펌프기술 개발” 과제(2021202080026A)의 지원을 받아 수행되었습니다.

#### References

- (1) Chan, W. K., Wong, Y. W., Yu, S. C. M., & Chua, L. P., 2002, “A computational study of the effects of inlet guide vanes on the performance of a centrifugal blood pump,” Artificial organs, Vol. 26, No. 6, pp. 534–542.
- (2) Kim Y-S, Shim H-S, Kim K-Y, 2021, “Effects of inlet guide vane and blade pitch angles on the performance of a submersible axial-flow pump,” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, Vol. 235, No. 4, pp. 718–732.
- (3) Yang, F., Hu, W., Li, C., Liu, C., Jin, Y. 2020, “Computational study on the performance improvement of axial-flow pump by inlet guide vanes at part loads,” Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 34, No. 12, pp. 4905–4915.
- (4) Nguyen, DA., Ma, SB., Kim, S. et al., 2023, “Influence of inflow directions and setting angle of inlet guide vane on hydraulic performance of an axial-flow pump,” Sci Rep 13, 3468.
- (5) Farrell, K. J., and Billet, M. L., 1994, “A Correlation of Leakage Vortex Cavitation in Axial-Flow Pumps,” ASME. J. Fluids Eng, September, Vol. 116, No. 3, pp. 551–557.
- (6) Guo, Z., Qian, Z., Ji, B., 2019, “Experimental and numerical analysis of the unsteady influence of the inlet guide vanes on cavitation performance of an axial pump,” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 233 No. 11, pp. 3816–3826.
- (7) Korean Industrial Standards, 2020, “Testing methods for centrifugal pumps, mixed flow pumps and axial flow pumps,” KS B 6301.
- (8) Shi, L., Zhang, D., Zhao, R., Shi, W., & ESCH., 2017, “Visualized observations of trajectory and dynamics of unsteady tip cloud cavitating vortices in axial flow pump,” Journal of Fluid Science and Technology, Vol.12, No.1, pp. 1–19.
- (9) Feng, W., Cheng, Q., Guo, Z., & Qian, Z., 2016, “Simulation of cavitation performance of an axial flow pump with inlet guide vanes,” Advances in Mechanical Engineering, 8(6), 1687814016651583.
- (10) Shi, L., Zhang, D., Jin, Y., Shi, W., & van Esch, B. B., 2017, “A study on tip leakage vortex dynamics and cavitation in axial-flow pump,” Fluid Dynamics Research, 49(3), 035504.