2004 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 43~48
인하대학교 정석학술정보관 및 2북호관 2004. 12. 3~4

공기 유입시의 터보펌프 특성

김유택* • 남청도* • 강호근** • 이영호***

Air Influx Characteristics of Turbo Pumps

You-Taek Kim*, Cheong-Do Nam*, Ho-Keun Kang**, Young-Ho Lee***

Key Words : Air-water two-phase flow(기액이상류), Pump characteristics(펌프특성), Flow Pattern(유동양식), Tip clearance(임펠러 간극)

ABSTRACT

A screw-type centrifugal pump was manufactured to carry solids primarily and its impeller has a wide flow passage. However, the effect of flow passage shape on delay of the choke due to entrained air has not been clarified yet. Moreover, because its impeller has a particular shape, only few studies have tried to clarify the pump performance and details of internal flow pattern of that pump. For that reason, we carried out the pump performance experiment under air-water two-phase flow condition with different impeller tip clearances, pump rotational speeds and void fractions by using a small screw-type centrifugal pump designed to acquire basic data. In a general centrifugal pump, it was reported that loss of pump head from single-phase flow to the choke due to air entrainment near the best efficiency point was large. However, the loss near the best efficient point in a screw-type centrifugal pump became less than that in a general centrifugal pump.

1. 서 론

펌프의 용도가 확대됨과 더불어 이송되는 유체도 다종류에 이르러, 지금은 천연가스・오일흡인펌프, 하수용 펌프 등 이상류(two-phase flow) 상태에서의 펌프 운전도 드물지 않게 되었다. 뿐만 아니라, 단상류(single-phase flow) 상태에서의 운전중 캐비테이션(cavitation) 발생에 의해 이상류 상태가 되는 등 다양한 흡입조건하에서의 운전도 불가피하게 되었다[1].

종래의 일반적인 원심펌프의 경우에는 공기흡입시의 펌프성능에 관한 연구가 비교적 활발하게 진행되었다. Kaneko 등은 Fig. 1에 보이는 바와 같이 입축 원심펌프[2]를, Minemura 등은 Fig. 2에 보이는 바와 같이 사류펌프[3]를, Murakami 등은 Fig. 3에 보이는 바와 같이 축류펌프[4]를 대상으로 기액(air-water)이상류시의 성능실험을 행하여 기액이상류시의 펌프성능은 불연속적으로 변하는 것을 보고한 바 있다. 또한, 그들의 결과에 의하면, 일반적인 터보펌프는 최고 효율점 부근에서 성능저하의 비율이 크게 되는 것이 알려져 있다.

한편, 스크류식(screw-type) 원심펌프[5]는 논클로그(non-clog) 펌프의 일종으로, 유럽에서 어류의 유체수송 목적으로 개발되었다. 현재는 고형물의 수송뿐만 아니라, 슬러리(slurry), 고형물이 함유된 액체, 흙탕물을 양수하는 등 산업의 여러 분야에서 사용되고 있다. 이 펌프의 임펠러는 고형물의 수송이라는 목적에 맞게 임펠러 유로가 폐쇄되지 않도록 넓은 유로[6]를 갖는 것이 특징이다. 최근 스크류식 원심펌프에 대해 기액

* 한국해양대학교 기관시스템공학부
** 경상대학교 기계항공공학부
*** 한국해양대학교 기계・정보공학부
E-mail : kimyt@hhu.ac.kr

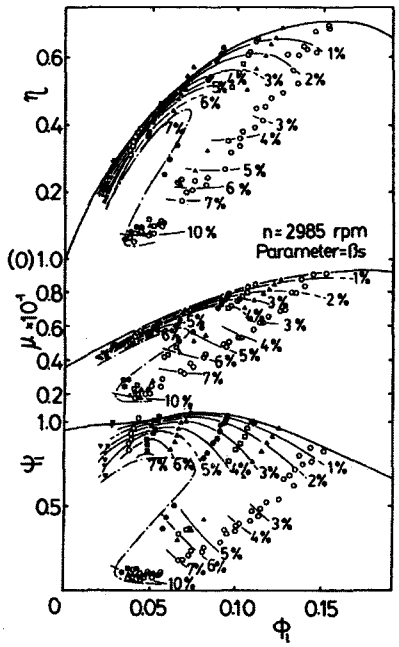


Fig. 1 General centrifugal pump characteristics

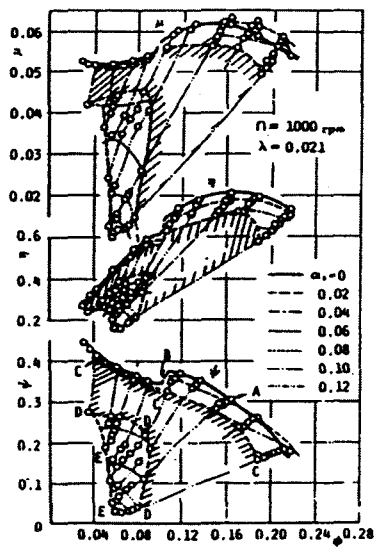


Fig. 2 Mixed flow pump characteristics

이상류에의 응용 가능성도 검토되고 있지만, 3차원 나선형으로 된 특수한 형상으로 되어 있기 때문에 기액

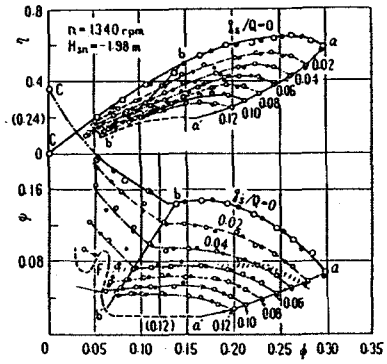
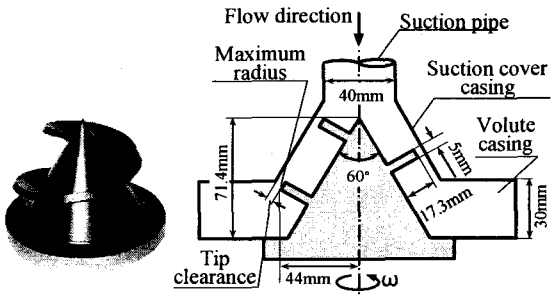


Fig. 3 Axial flow pump characteristics



(a) Photograph (b) Cross-section

Fig. 4 Test impeller

이상류시의 펌프특성, 내부 유동양식 등은 거의 연구되어 있지 않은 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 스크류식 원심펌프의 기액 이상류에서의 사용 가능성을 검토할 목적으로, 소형 스크류식 원심펌프에 있어서 임펠러 간극, 펌프회전수 및 보이드율을 파라미터로 기액 이상류시의 펌프성능 실험 및 가시화 실험을 행하였다.

2. 실험장치 및 측정방법

2.1. 실험장치

본 연구에서 선정한 임펠러는 Fig. 4에 보인 바와 같다. 임펠러는 60°원추상의 허브에 3차원 나선상의 깃 1매가 1.5회전 부가된 형상을 하고 있다. 최대반경(임펠러 선단으로부터 400°에 위치)은 44 mm이고 재질은 알루미늄이다. 임펠러 깃과 케이싱 사이의 틈인 임펠

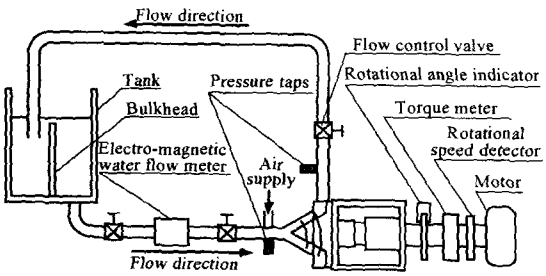


Fig. 5 Schematic view of the experimental apparatus

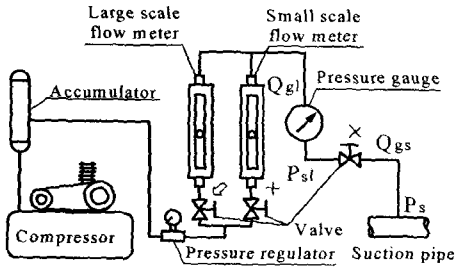


Fig. 6 Air supply system

러간극 T_c=0.2 mm와 1.0 mm의 2종류에 있어서 실험을 행하였다. 깃 높이에 대한 임펠러 간극비는 각각 0.012와 0.058이다.

본 연구에서는 Fig. 5와 같은 실험장치를 이용하여 실험을 수행하였다. 저수탱크(직경 700 mm, 높이 600 mm)에 저장된 청수는 흡입관, 전자유량계를 지나 펌프내에 유입한다. 펌프내에서 승압된 청수는 토출관, 유량조절밸브를 경유하여 다시 탱크 내로 재순환된다. 기액 이상류시의 실험에 있어서는 저수탱크 내에 격벽을 설치하여 이상유체중의 공기를 분리시켰다.

2.2. 공기공급계 및 측정계

공기 공급계는 압축기, 정압탱크, 압력조절밸브, 공기유량계로 구성되어 있으며 Fig. 6에 도시한 바와 같다. 넓은 범위의 공기 유량을 보다 정확히 조정할 목적으로 대유량계와 소유량계의 2개로 구성하였다. 공기는 흡입관 상부 80 mm 상류에서 펌프 흡입압력 p_s와 거의 같은 압력으로 주입하였다.

측정계는 Fig. 7에 도시한 바와 같다. 액상의 유량은 흡입관에 설치된 전자유량계에서 측정하였다. 펌프의 흡입압력과 토출압력은 압력측정공과 반도체 압력변환기를 거쳐 전압치로 변환되어 앰프, A/D보드를 거쳐 컴퓨터에 기록된다. 펌프회전수는 치차와 전자 픽업의

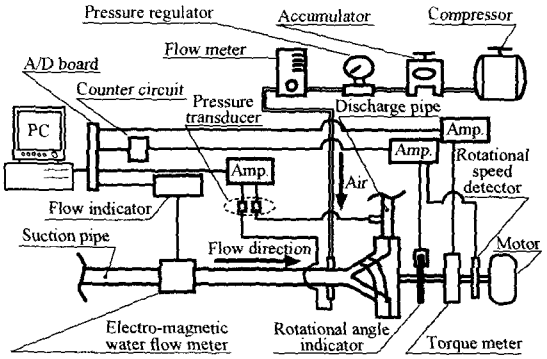


Fig. 7 Measurement system

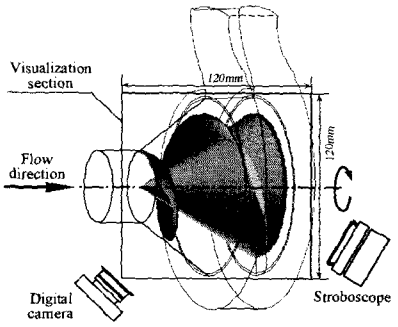


Fig. 8 Cross-sectional view for flow pattern visualization

조합에 의해 검출하였고, 축토크 검출에는 토크 검출기를 이용하였다. 또한, 측정치는 임펠러 2,000회전분의 측정 데이터를 평균하여 산출하였다.

2.3. 가시화

펌프내의 유동상태를 관찰하기 위하여 투명 아크릴제의 케이싱을 사용하였다. Fig. 8에 도시한 바와 같이 120×120 mm의 부분을 스트로보 조명으로 조사하여 디지털카메라로 촬영하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 펌프특성 평가 방법 및 실험조건

성능평가에 사용한 무차원변수인 유량계수 ϕ, 양정계수 ψ, 축동력계수 τ, 효율 η를 다음과 같이 정의하였다.

$$\phi = \frac{Q}{60\pi b_2 d_{max} u_2} \quad (1)$$

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

Table 1 Experimental conditions

	φ	T_c	β	rpm
Single-phase flow	Flow rate is divided into 16 parts from 0 to Q_{max}	0.2	0	1500 2000 2500 3000
Two-phase flow	0.01 0.015 0.02 0.025 max.	0.2 1.0	0.01 0.02 0.03 0.04 0.05 0.06 0.07 max.	3000

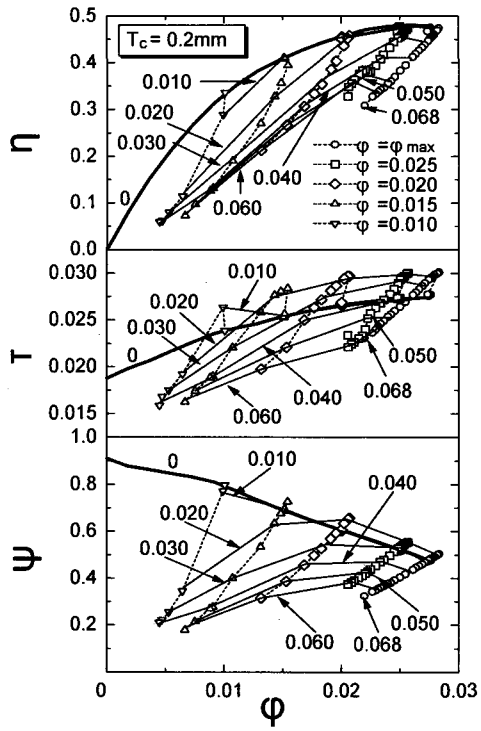


Fig. 9 Screw-type centrifugal pump characteristics at T_c=0.2mm and n=3000rpm

$$\tau = \frac{2P_w}{\rho\pi\, d_{max}\, b_2\, u_2^3} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{L_w}{P_w} = \frac{\phi\,\psi}{\tau} \quad (4)$$

여기서, Q, b_2, d_{max}, u_2, g, P_w, ρ, L_w는 각각

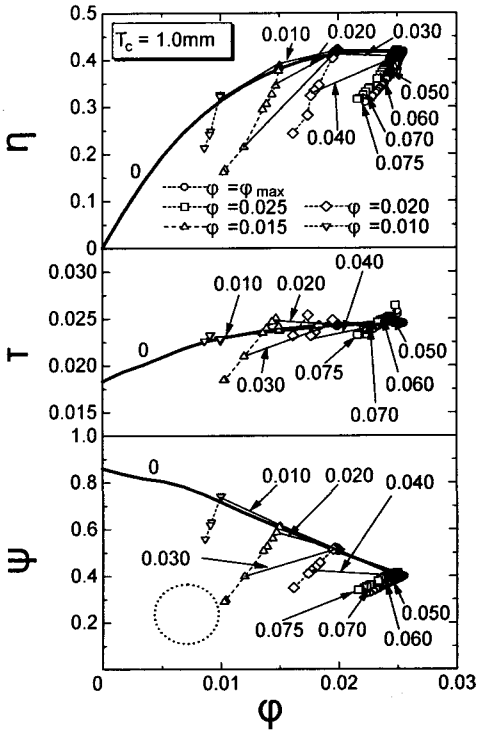


Fig. 10 Screw-type centrifugal pump characteristics at T_c=1.0mm and n=3000rpm

액상유량(m^3/min), 벌류트 케이싱 폭, 임펠러 최대직경, d_{max}에서의 주속도, 중력가속도, 축동력, 사용유체밀도, 수동력을 의미한다.

또한, 양정 H 및 보이드율(void fraction) β는 다음과 같이 정의하였다.

$$H = (p_d - p_s)/\rho g + Z_d + (V_d^2 - V_s^2)/2g \quad (5)$$

$$\beta = Q_{gl}/(Q + Q_{gl}) \quad (6)$$

여기서, p_d, p_s, Z_d, V_d, V_s, Q_{gl} 은 각각 출구압력, 입구압력, 펌프 축에서 측정공까지의 거리, 출구속도, 입구속도, 공기의 체적유량을 의미한다.

Table 1은 단상류 및 기액 이상류시의 펌프특성 실험조건을 보여준다.

3.2. 기액 이상류시의 펌프특성

기액 이상류시의 특성실험은 유량조절밸브에 의해 유량계수를 단상류시의 각각의 유량계수 $\phi=\phi_{max}$, 0.025, 0.020, 0.015, 0.010에 있어서 공기를 20ℓ/hr에서

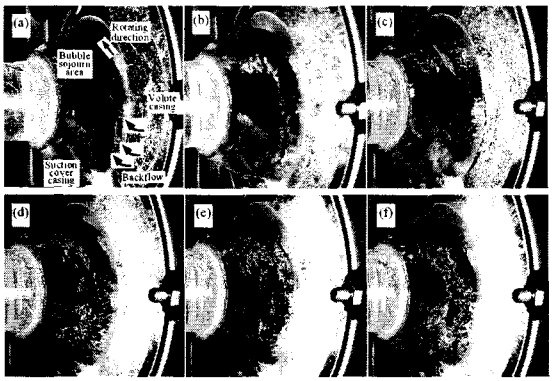


Fig. 11 Flow patterns at n=3000rpm, ϕ=0.025, T_c =0.2 mm; (a) β=0.01, (b) β=0.022, (c) β=0.03, (d) β=0.04, (e) β=0.05, (f) β=0.06

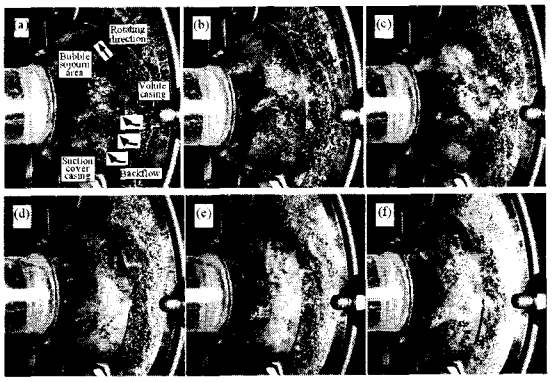


Fig. 12 Flow patterns at n=3000rpm, ϕ=0.025, T_c =1.0 mm; (a) β=0.01, (b) β=0.022, (c) β=0.03, (d) β=0.04, (e) β=0.05, (f) β=0.06

유로폐쇄까지 20ℓ/hr씩 증가시키면서 측정하였다.

이상류시의 성능특성을 평가하는 하나의 척도로서 식 (7)로 표기되는 공기 흡입에 의한 양정감소량 $\Delta\psi$로서 비교하였다.

$$\Delta\psi = \psi_0 - \psi_{choke} \tag{7}$$

여기서, ψ_0와 ψ_{choke}는 각각 단상류시의 양정계수와 양수가 불가능해지기 전의 양정계수를 의미한다.

펌프회전수 n=3000 rpm에 있어서 T_c=0.2 mm에 대한 무차원 성능특성을 Fig. 9에, T_c=1.0 mm에 대한 무차원 성능특성을 Fig. 10에 나타내었다. 그림중의 굵은 실선은 단상류 특성을 의미하며, 유량계수에 관계없이 보이드율이 같은 경우를 가는 실선으로 표시하였다. 일반적인 터보펌프와는 다르게, (1)스크류식 원심펌프는 최고효율점 부근에서 저유량 영역보다도 오히려 $\Delta\psi$가 작게 됨을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서 사용한 스크류식 원심펌프는 일반적인 터보펌프보다 기액 이상류의 양수에 적합함을 알 수 있다. 그러나, T_c=0.2 mm와 T_c=1.0 mm의 두 경우 모두 β=0.07 근방에서 양수가 불가능하게 된다. 따라서 넓은 유로를 갖는 임펠러 형상이 유로폐쇄 지연에의 효과는 크게 기대되지 않음을 알 수 있다. 또한, 임펠러 간극의 차이에 따른 펌프성능을 비교하면, (2) T_c=0.2 mm의 경우에는 최고효율점 부근의 β=0.02 근방에서 단상류시보다 이상류시의 양정 및 토크가 부분적으로 상승하는 현상이 발생한다. 상기의 두 현상의 원인을 규명하기 위하여 내부 유동양식을 관찰하였다.

3.3. 유동패턴

스트로보에 의한 유동양식 중에서 n=3000 rpm, ϕ=0.025, T_c=0.2mm에 대한 β=0.01부터 β=0.06의 유동사진을 각각 Fig. 11(a)~(f)에 나타내었다. 또한, n=3000 rpm, ϕ=0.025, T_c=1.0 mm에 대한 β=0.01부터 β=0.06의 유동사진을 각각 Fig. 12(a)~(f)에 나타내었다.

Fig. 11과 Fig.12의 유동사진에서 알 수 있는 바와 같이 스크류식 원심펌프는 임펠러 간극과 보이드율에 관계없이 유입한 공기는 임펠러의 회전에 의해 흡입케이싱내의 임펠러 부압면에 체류하면서 흘러감을 알 수 있다. 이러한 부압면에 생성된 기포체류역에 의해 주류의 절대속도의 주방향 성분이 증가하기 때문에 양정저하가 완화되어 종래의 원심펌프보다 최고효율점 부근의 $\Delta\psi$가 작게 된다.

또한, 일반적으로 스크류식 원심펌프에 있어서는 Fig. 11(a)와 같이 임펠러 출구 하류 영역에서 커다란 역류가 발생한다. 그러나 Fig. 11(b)에서는 임펠러 부압면측에 임펠러 출구 하류 영역까지 정연한 공기 밴드가 형성됨과 동시에 Fig. 11(a)와 같은 역류는 보이지 않는다. 즉, T_c=0.2 mm의 β=0.022에 있어서는, 임펠러 부압면측에 임펠러 출구 하류 영역까지 정연한 공기 밴드가 형성되어 역류를 방지하기 때문에 Fig. 9에 있어서 단상류시보다 이상류시의 양정과 토크가 상승함을 알 수 있다. 다시 공기량이 증가하면, Fig. 11(c)처럼 공기 밴드가 균열되어 다시 임펠러 출구 하류 영역에서 역류가 발생하므로 양정이 저하함을 알

수 있다.

한편, Fig. 12(b)에서 알 수 있는 바와 같이 T_c =1.0 mm, β=0.022의 경우에는 다량의 누설흐름에 의해 기포체류 영역이 균열되어 Fig. 11(b)와 같은 정연한 공기 밴드가 형성되지 못하므로 양정상승이 발생하지 않음을 알 수 있다.

4. 결론

스크류식 원심펌프의 n=3000 rpm에 있어서 기액 이상류시의 유동양식 및 무차원 펌프특성을 임펠러 간극, 회전수, 보이드율을 변수로 하여 실험적으로 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기액 이상류시에는 일반적인 원심펌프보다 최고효율점 부근에서 공기량 증가에 따른 성능저하가 완화되므로 기액 이상류의 양수에 적합하다.

(2) 넓은 유로를 갖는 임펠러 형상이 유로폐쇄의 지연에 미치는 영향은 적다.

(3) T_c=0.2 mm의 β=0.022에 있어서는, 단상류시보다 이상류시의 양정과 토크가 상승한다. 한편, T_c =1.0 mm의 경우에는 양정과 토크의 상승은 발생하지 않는다.

참고문헌

(1) Kim, J. H., Duffey, R. B., and Belloni, P., 1985, "On Centrifugal Pump Head Degradation in Two-Phase Flow", The ASCE/ASME Mechanics Conference Albuquerque New Mexico, pp. 9~15.

(2) M. Kaneko and H. Ohashi, 1981, "Self-Excited Oscillation of a Centrifugal Pump System under Air/Water Two-Phase Flow Condition", Proceedings of the 11th Symposium of IAHR, pp.36.1~36.14.

(3) K. Minemura, M. Murakami, I. Hayafuji, and W. Yoshida, 1986, "Performance of a Mixed-Flow Pump Handling Air-Water Two-Phase Mixtures", JSME (in Japanese) 52-478, pp. 2404~2411.

(4) M. Murakami and K. Minemura, 1978, JSME (in Japanese) 44-380, pp. 1292~1300.

(5) Tanaka, K. and Matsumoto, Y., 1988, "Experimental Study of Radial Thrust on Screw Centrifugal Impeller", Annual Report of The University of Tokyo, pp. 185~192.

(6) Kim, Y.T., Tanaka, K., and Matsumoto, Y., 1999, "Tip Clearance and Bubble Size of a Screw-type Centrifugal Pump Operating in Two-phase Flow," Proceedings of the 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, FEDSM99-7207.