

공기흡입에 의한 스크류식 원심펌프의 양수불능 특성에 관한 연구

김 유 택*

A Study on the Break-down Characteristics of a Screw-type Centrifugal Pump due to Air Entrainment

You-Taek Kim*

Key Words: Break-down (양수불능), Pumping Recovery (운전회복), Pump Characteristics (펌프특성), Screw-type Centrifugal Pump (스크류식 원심펌프), Air-Water Two-phase Flow (기액 이상류), Flow Pattern (유동양식)

ABSTRACT

The performance of turbo pump drops rapidly and it gets into break-down when the void fraction reaches above the threshold value because the impeller flow passage is choked up with air bubbles. Phenomenological understanding of break-down and pumping recovery mechanisms under air-water two-phase flow conditions are therefore important for pump designers and essential assignment for researchers. In this paper, we investigated the characteristics of break-down and pumping recovery due to entrained air occurring inside a screw-type centrifugal pump which has a wide flow passage mainly through the findings of suction and discharge pressures, rotational speed, flow rate measurements and visualization.

1. 서 론

임펠러 유로가 폐쇄되지 않도록 넓은 유로를 갖는 스크류식 원심펌프⁽¹⁾는 일반적인 원심펌프에 비해 최고 효율점 부근에서 기액 이상류시의 기공율 (void fraction)의 상승에 의한 유로폐쇄까지의 성능저하의 비율이 낮음이 보고 되고 있다⁽²⁾. 이에 저자는 기포의 체류와 그에 의한 유로폐쇄에 임펠러 형상이 미치는 영향 및 기액 이상류시에 있어서 펌프성능과 내부유동의 관계를 조사하였다⁽³⁾. 또한, 기액이상류시의 임펠러내의 압력분포를 측정하여, 유동패턴과 양수불능과의 관계를 명확

히 하였다⁽⁴⁾.

터보펌프에 있어서 무엇보다도 해결하여야 할 과제의 하나는 정상 토출량을 넘는 공기량의 펌프내의 유입에 의한 유로폐쇄와 양수불능 (break-down)의 미세니즘 (mechanism)을 들 수 있다. 기존의 연구^(5,6)에서는 유로폐쇄가 발생할 때 기포가 체류해 있는 양상에 대한 보고는 있지만 그 체류역의 성장과정이나 그 때의 펌프특성의 변동에 관한 보고는 없는 실정이다.

스크류식 원심펌프는 넓은 유로를 갖고 있기 때문에 일반적인 원심펌프에 비해 유로폐쇄를 관찰하기 쉽고 판단된다⁽⁷⁾. 따라서 본 연구에서는 공기흡입에 의한 양수불능의 미세니즘을 명확히 하기 위하여 스크류식 원심펌프에 있어서 유로폐쇄 발생시의 펌프흡입압력, 토출압력, 액상유량, 축토크, 펌프회전수 등의 펌프특성

* 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부
책임저자 E-mail : kimyt@mail.hhu.ac.kr

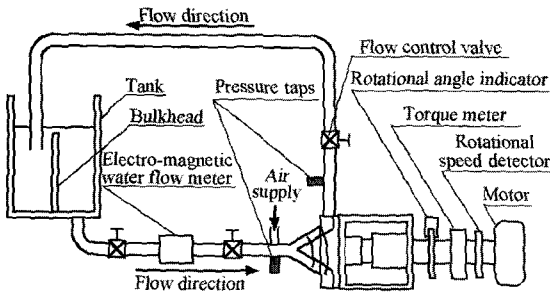


Fig. 1 Schematic view of the experimental

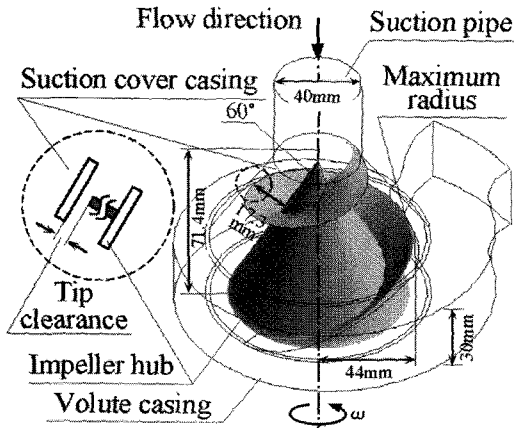


Fig. 2 Test impeller

을 측정하고, 단상류 및 기공율의 변화에 따른 펌프 특성과 비교하였다. 또한, 그 때의 펌프내부의 가시화 실험과 비교하여 유로폐쇄, 양수불능 및 운전회복시의 특성을 조사하였다.

2. 실험장치 및 측정방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 실험 장치를 이용하여 실험을 수행하였다. 저수탱크 (직경 700mm, 높이 600mm)에 저장된 청수는 흡입관, 전자유량계를 지나 펌프 내에 유입한다. 펌프 내에서 승압된 청수는 토출관, 유량조절밸브를 경유하여 다시 탱크 내로 재순환된다. 기액 이상류시의 실험에 있어서는 저수탱크 내에 격벽을 설치하여 이상유체중의 공기를 분리시켰다.

2.2 임펠러

본 연구에서 선정한 임펠러는 Fig. 2에 제시한 바와

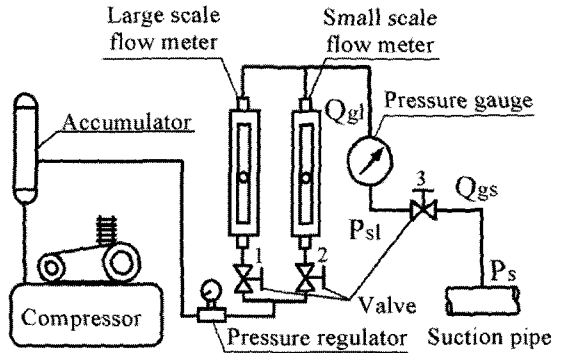


Fig. 3 Air supply system

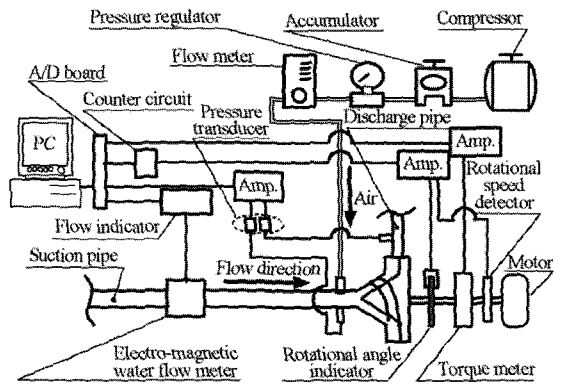


Fig. 4 Measurement system

같다. 임펠러는 60° 원추상의 허브에 3차원 나선상의 깃 1매가 1.5회전 부가된 형상을 하고 있다. 최대반경 (임펠러 선단으로부터 400°에 위치)은 44mm이고 재질은 알루미늄이다.

2.3 공기공급계

공기 공급계는 압축기, 정압탱크, 압력조절밸브, 공기 유량계로 구성되어 있으며 Fig. 3에 도시한 바와 같다. 넓은 범위의 공기 유량을 보다 정확히 조정할 목적으로 대유량계와 소유량계의 2개로 구성하였다. 공기는 흡입관 상부 80mm 상류에서 펌프 흡입압력 p_s 와 거의 같은 압력으로 주입하였다. 또한, 기공율 β 는 다음과 같이 정의하였다.

$$\beta = Q_{gl} / (Q + Q_{gl}) \quad (1)$$

여기서, Q_{gl} , Q 는 각각 공기의 체적유량과 액상유량을 의미한다.

Table 1 Experimental conditions

T_c [mm]	0.2
n [rpm]	3000
ψ	0.025
β	0
	0.01
	0.022
	0.03
	0.04
	0.05
	0.06
0.061(break down)	

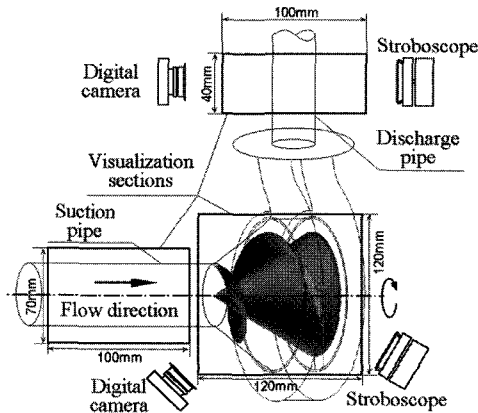


Fig. 5 Locations of the visualization sections

2.4 펌프특성 측정시스템

측정계는 Fig. 4에 도시한 바와 같다. 액상의 유량은 흡입관에 설치된 전자유량계에서 측정하였다. 펌프의 흡입압력과 토출압력은 압력측정공과 반도체 압력 변환기를 거쳐 전압치로 변환되어 앰프, A/D보드를 거쳐 컴퓨터에 기록된다. 펌프회전수는 치차와 전자 픽업의 조합에 의해 검출하였고, 축토크 검출에는 토크 검출기를 이용하였다.

2.5 가시화실험

유로폐쇄 부근의 유동상태를 관찰하기 위하여 투명 아크릴제의 케이싱을 사용하였다. 유로폐쇄 전후에 있어서 흡입케이싱, 벌류트케이싱, 흡입관 및 토출관의 유동패턴이 어떻게 변하는가를 관찰하기 위하여, 흡입케이싱과 벌류트케이싱의 종120 mm×횡120 mm, 흡입관 종 70 mm×횡100 mm, 토출관 종40 mm×횡100 mm의 부분을 스트로보 조명으로 조사하여 디지털카메라로 촬영하였다.

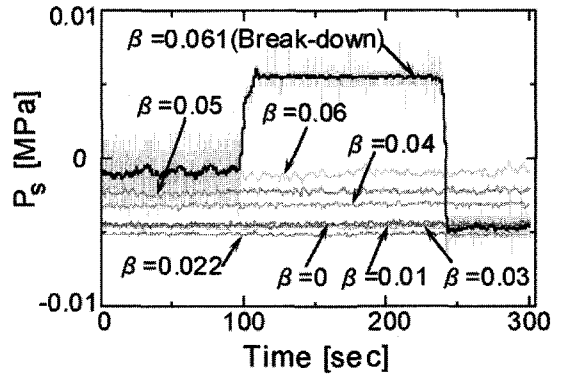


Fig. 6 Suction pressure fluctuations during 5 minutes with different void fraction from single phase flow to break-down

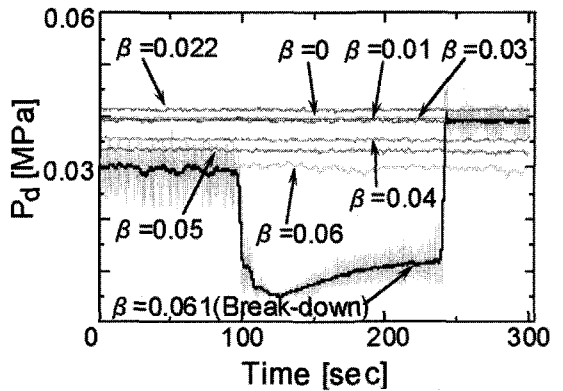


Fig. 7 Discharge pressure fluctuations during 5 minutes with different void fraction from single phase flow to break-down

스트로보 조명의 발광주파수를 펌프회전 주파수와 동기시켜서 임펠러는 정지된 상태처럼 관찰 가능하다. 촬영부분의 개략도를 Fig. 5에 보인다.

3. 정상운전시의 양수불능시의 펌프특성의 비교

실험은 회전수 $n=3,000$, 임펠러간극 $T_c=0.2$, 최고효율점 부근의 유량계수 $\psi=0.025$ 에서 행하였다. 실험조건을 Table 1에 보인다. 정상운전시의 $\beta=0, 0.01, 0.022, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06$ 과 유로폐쇄 발생시 ($\beta=0.061$)의 펌프흡입압력 p_s , 펌프토출압력 p_d , 액상유량 Q , 축토크 T_r , 펌프회전수 n 의 300초간의 변동을 측정하여 그 결과를 각각 Fig. 6~10에 보인다. 운전중 유로폐쇄가 발생하면 공기가 흡입관내로 역류하기 때문에 흡입관의 1/2정도 공기로 충만 되었을 때에 공기 공급을 차단하였다. 그 후, 점차 펌프가 정상운전을 회복할 때 까

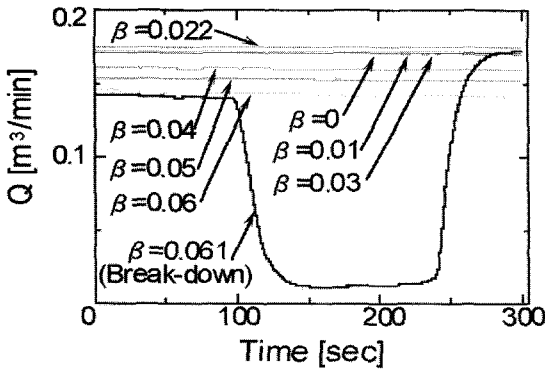


Fig. 8 Flow rate fluctuations during 5 minutes with different void fraction from single phase flow to break-down

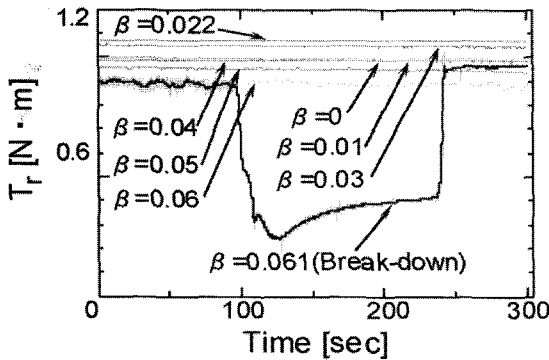


Fig. 9 Torque fluctuations during 5 minutes with different void fraction from single phase flow to break-down

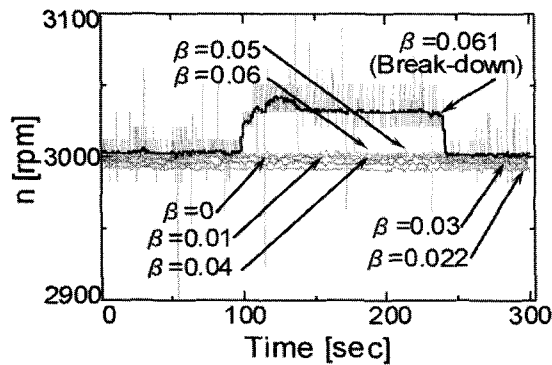


Fig. 10 Pump rotational speed fluctuations during 5 minutes with different void fraction from single phase flow to break-down

지의 각 파라미터의 변화도 측정하였다. 이 실험결과로 다음의 사항을 알 수 있었다.

- (1) 모든 변수는 기공율의 증가와 더불어 그 변동 폭이 크게 된다.

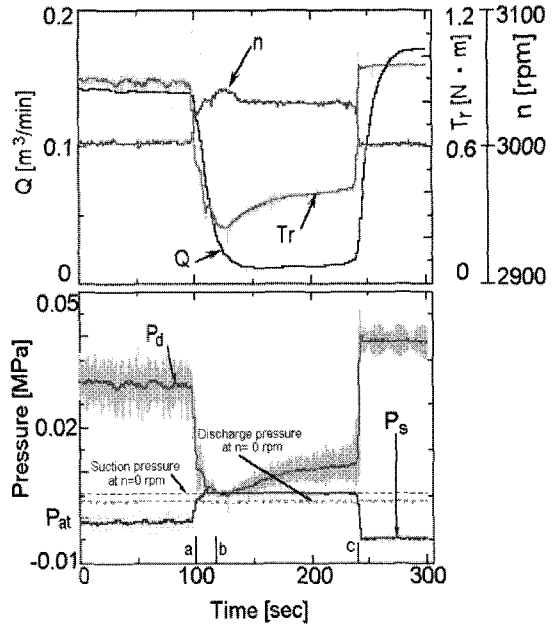


Fig. 11 Pump break-down characteristics during 5 minutes at $n=3000$, $\phi=0.025$, $T_c=0.2$

- (2) 유로폐쇄가 발생하기 직전의 변동 폭이 제일 크고, 그 진동의 어느 시점에 급격히 성능이 저하하고 양수불능으로 된다.
- (3) 성능실험결과⁽²⁾에서 양정이 상승한 $\beta=0.022$ 에 있어서 p_s 는 $\beta=0$ 일 때보다 낮게 되고, p_d 는 $\beta=0$ 일 때보다 높게 되는 것이 확인된다.

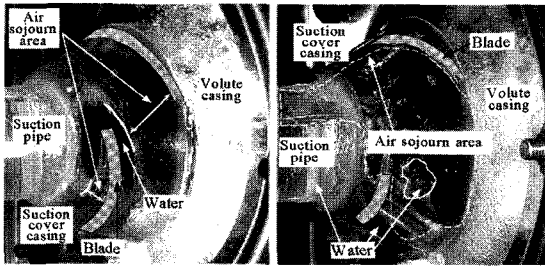
4. 유로폐쇄, 양수불능, 운전회복시의 특성

유로폐쇄, 양수불능, 운전회복시의 특성을 보다 알기 쉽게 하기 위하여, Figs. 6~10의 유로폐쇄를 발생하는 기공율 ($\beta=0.061$)만의 결과를 Fig. 11에 보인다. Fig. 11의 a, b, c는 각각 유로폐쇄발생시 (a:100 sec), 공기공급차단 (b:116 sec), 펌프정상 운전회복 (c:240 sec)의 시간을 의미한다.

또한, Fig. 11의 유로폐쇄 (a:100 sec) 직전과 직후의 펌프전체의 유동사진을 각각 Fig. 12(a), 12(b)에 보인다.

4.1 유로폐쇄 발생전과 발생

흡입압력은 진동하면서 흡입작용을 하고 있지만, 이 진동의 어느 시점 (이 경우는 100 sec)에 급상승하고, 펌프정지시의 p_s 까지 높게 되고, 흡입작용을 하지 못하게



(a) just before break-down (b) just after break-down
 Fig. 12 Flow patterns of (a) just before and (b) just after flow passage choking at $n=3000$, $\phi=0.025$, $T_c=0.2$, $\beta=0.061$

된다. 한편, 토출압력도 동시에 급감소한다. 그러나 토출압력은 펌프정지시의 p_d 까지는 낮아지지 않고 정지시의 p_s 까지 낮아지며, 토출작용을 할 수 없게 된다.

Fig. 12(a)에 보이는 유로폐쇄 직전의 흡입케이싱 내에서는 임펠러 부압면에 생성된 기포체류역이 압력면까지 성장하고, 유로의 대부분을 점유하게 된다. 그러나 공기층과 물은 거의 완전히 분리되어 있고, 좁지만 물의 유로가 확보되어 있다. 이 때, 흡입관 및 토출관에서는 정상적인 운전이 행해진다. 어느 순간 이러한 흡입케이싱 내의 기액 계면이 붕괴되고 펌프내부는 국소적으로 공기로 채워져 흡입케이싱내의 물의 유로가 없어지고 유로폐쇄가 된다.

4.2 양수불능 직후

흡입압력은 공기공급을 차단 (Fig. 11의 b:116 sec) 하여도 정지시의 p_s 인 채로 변화가 없으며 흡입작용이 불가능하다. 그러나 토출압력은 양수불능 후에도 정지시의 p_d 까지는 낮아지지 않고, $p_d = p_s$ 에서부터 서서히 상승한다.

Fig. 12(b)에 보이는 유로폐쇄 후의 상태가 되면, 임펠러 내의 물의 유로가 없어지고, 흡입케이싱 내는 공기공동이 형성되고, 공기는 흡입관 내로 역류하고, 흡입관 내의 유체는 기상과 액상으로 분단되고 양수불능이 된다. 벌류트케이싱내의 유동패턴은 유로폐쇄 전후에 있어서도 특징적인 변화는 보이지 않고 또한 공기층을 형성하지 않으며 기포로서 벌류트 내에 분산되어 있음을 알 수 있다.

4.3 운전회복

공기공급을 차단하면, 토출압력이 서서히 회복되어,

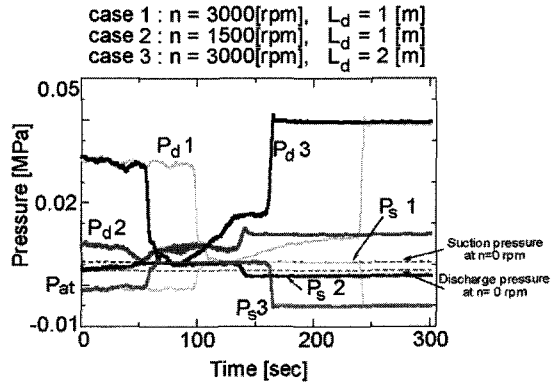


Fig. 13 Pump break-down characteristics during 5 minutes with different rotational speed and discharge pipe height at $n=3000$, $\phi=0.025$, $T_c=0.2$

순시에 단상류시의 p_d 까지 회복된다. 토출압력의 회복과 동시에 흡입압력도 순시에 단상류시의 p_s 까지 회복되고, 펌프는 단상류 정상운전이 된다. 펌프전체의 유동패턴도 Fig. 12(a)의 상태로 돌아가고, 물의 유로가 확보된 후, 단시간에 단상류시의 유동패턴이 된다.

4.4 유량, 축토크, 회전수의 변화

전반적으로 축토크는 토출압력의 변화와 정성적으로 동일하다. 또한, 액상유량의 변화는 전반적으로 흡입압력의 변화와 정성적으로 동일하지만, 유로폐쇄 및 운전회복시에 있어서 유체의 관성력에 의한 시간지연이 보인다. 펌프회전수는 $p_d = p_s$ 시에 최대가 되고, 3,040 rpm까지 급상승한다.

4.5 회전수 및 토출관 높이의 영향

유로폐쇄, 운전회복시의 p_s 와 p_d 에 미치는 회전수 및 토출관 높이 L_d 의 영향을 Fig. 13에 보인다. Fig. 13중의 case 1은 Fig. 11의 결과 ($n=3,000$, $L_d=1$ m), case 2는 $n=1,500$, $L_d=1$ m의 결과, case 3은 $n=3,000$, $L_d=2$ m의 결과이다. 또한, case 2와 3에 있어서는 흡입관의 약 1/3정도가 공기로 충전되었을 때에 공기공급을 차단하였다.

Fig. 13으로부터, 모든 조건에 있어서, 유로폐쇄시의 p_s 와 p_d 의 변화보다 운전회복시의 p_s 와 p_d 의 변화가 빠르게 일어남을 알 수 있다. 또한 $n=1,500$ 시의 p_s 와 p_d 의 변화가 $n=3,000$ 시와 비교해서 완만함을 알 수 있

다. $L_d=1$ m와 $L_d=2$ m를 비교해 보면, 유로폐쇄 발생시의 p_s 와 p_d 의 변화는 정성적 및 정량적으로 일치하므로 유로폐쇄에 미치는 토출관의 높이의 영향은 없음을 알 수 있다. 또한, 운전회복시의 p_s 의 변화는 유로폐쇄 발생시와 마찬가지로 정성적 및 정량적으로 일치하지만, p_d 는 토출관의 높이가 높을수록 운전회복 직전의 p_d 가 높아짐을 알 수 있다.

5. 결론

공기흡입에 의한 양수불능 및 운전회복시의 미케니즘을 해명하기 위하여, 소형 스크류식 원심펌프에 있어서, 유로폐쇄 발생시의 펌프 흡입압력, 토출압력, 액상유량, 축토크, 회전수의 변화 등의 펌프특성 측정실험, 유동패턴의 가시화 실험을 행하여 다음의 사항을 알 수 있었다.

- 1) 흡입압력, 토출압력, 축토크, 회전수는 기공율의 증가와 더불어 변동 폭이 서서히 크게 되고, 유로폐쇄가 발생하기 직전의 전 파라미터의 변동 폭이 제일 크다.
- 2) 유로폐쇄 발생은 벌류트케이싱 내의 흐름의 영향은 적다. 유로폐쇄는 흡입케이싱 내에서 좁지만 확보되어 있던 물의 유로가 국소적으로 공기로 채워지면서 발생한다.
- 3) 양수불능 기간 중, 흡입압력은 공기공급을 차단해도 변화 없이 펌프정지시의 흡입압력의 상태인 채로 있지만, 토출압력은 공기공급을 차단하면 서서히 회복한다.
- 4) 유로폐쇄, 양수불능, 운전회복에 있어서 전반적으로 축토크는 토출압력의 변화와 정성적으로 일치한다. 또한, 액상유량의 변화는 전반적으로 흡입압력의 변화와 정성적으로 일치하지만, 유체의 관성력에 의한 시간지연이 보인다. 펌프회전수는 흡입압력과 토출

압력이 일치할 때 최대로 된다.

- 5) 유로폐쇄 발생시의 압력강하에 걸리는 시간보다 운전회복에 요하는 시간이 짧다.
- 6) 유로폐쇄에 미치는 토출관의 높이의 영향은 없다.

후 기

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2002-003-D00055)

참고문헌

- (1) Tanaka, K. and Matsumoto, Y., 1988, "Experimental Study of Radial Thrust on Screw Centrifugal Impeller," Annual Report of Engineering Research Institute, Faculty of Engineering, The University of Tokyo, pp. 185~192.
- (2) 김유탉, Tanaka, K., 이영호, Matsumoto, Y., 1999, "공기 흡입이 소형 스크류식 원심펌프의 특성에 미치는 영향," 유체기계저널, Vol. 2-3, pp. 37~44.
- (3) 김유탉, Tanaka, K., 이영호, 1999, "소형 스크류식 원심펌프의 기액이상류 특성," 유체기계저널, Vol. 2-4, pp. 9~15.
- (4) 김유탉, 최민진, 이영호, 2001, "기액 이상류시의 스크류식 원심펌프의 압력분포," 유체기계저널, Vol. 4-3, pp. 39~45.
- (5) Murakami, M. and Minemura, K., 1973, JSME (in Japanese) 39-328, pp. 3715~3724.
- (6) Furukawa, A., 1995, "Studies on Pumping Action of a Centrifugal Pump in Air-Water Two-Phase Flow," Torishima Review Vol. 95-1, pp. 12~21.
- (7) Ito, Y., Tani, K., Oba, R., Ito, T. and Hirata, Y., 1989, "Oil-Film Observation of Internal Flows in a Slurry Pump," JSME (in Japanese) 55-515, pp. 1911~1916.