

기액 이상류시의 원심펌프특성에 관한 실험적 연구

김성윤† · 이상일* · 김유택**

(원고접수일 : 2006년 6월 2일, 심사완료일 : 2006년 7월 19일)

An Experimental Study on the Centrifugal Pump Characteristics in Air-Water Two-Phase Flow

Sung-Yoon Kim† · Sang-il Lee* and You-Taek Kim**

Abstract : In a general centrifugal pump, if it is operated in a two-phase flow the activity of the impeller usually degrades and occasionally losses its function. However, the effect of break down of centrifugal pump due to entrained air has not been clarified yet. This paper shows the air-water two-phase flow characteristics of closed type and semi-open type impellers. In a single-phase flow, closed-type impeller has higher efficiency and head. But in air-water two-phase flow, semi-open type impeller's rates of decreases of efficiency and head are decreased.

Key words : Air-water two-phase flow(기액 이상류), Pump characteristics(펌프특성), Closed-type(밀폐형), Semi-open type(반 개방형)

1. 서 론

최근, 펌프, 송풍기, 압축기, 수차 등 유체와 기계간의 상호 에너지 변환을 병행하는 유체기계는 인간 생활, 산업 활동에 있어서 필요 불가결한 존재이다. 선박에 있어서도 급수펌프, 순환수펌프, 냉각수펌프, 각종 압축기, 송풍기 등 중요한 보조 기계의 대부분을 차지하고 있다. 유체기계는 사용되는 플랜트에 있어서 유체기계의 정지는 전체 조업의 정지를 의미하는 경우가 많으며 그 때문에 고도의 신뢰성 확보가 매우 중요하다.[1],[2]

유체기계 중에서도 임펠러의 깃 작용을 이용한

터보기계는 고효율, 간편한 보수관리, 적은 소음 등의 장점이 있어, 그 대부분을 차지하고 있다. 원래 터보기계는 단상류 상태에서 사용되는 것으로서 기액 이상류 상태가 되면 임펠러의 작용이 악화되어 운전이 불가능하게 되는 경우가 많다. 따라서 이상류 상태에서의 사용은 피하도록 고려되어있다. 그러나, 흡입관 접합부의 불량에 의한 공기의 흡입, 보일러의 급수 등과 같이 증기포를 포함하는 경우, 펌프 흡입파이프에 생기는 공기흡입 와(air entraining vortex)에 의한 공기의 혼입뿐만 아니라, 유전체굴펌프, 빗물의 배수 등과 같이 흡입 상태가 원래부터 기체와 액체의 이상류가 되는 등

† 책임저자(한국화재보험협회 방재시험연구원), E-mail: sukim@kfpa.or.kr, Tel: 031)884-8101

* 한국해양대학교 운항훈련원

** 한국해양대학교 기관시스템공학부

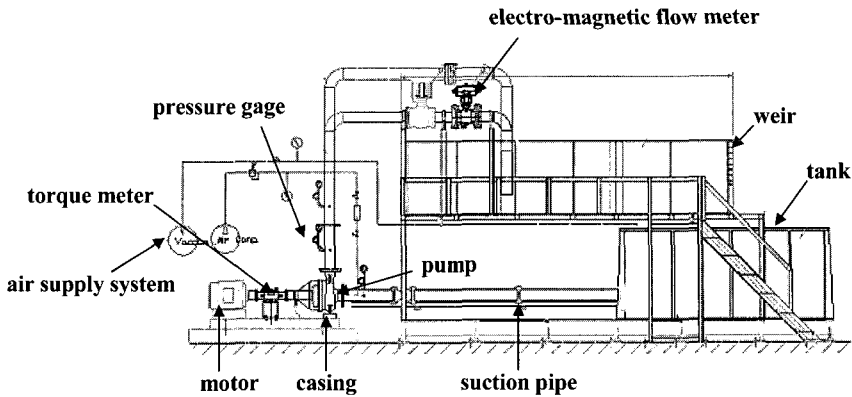


Fig. 1 Schematic view of air-water two phase flow experimental apparatus

의 문제와 관련해서 펌프를 기액 이상류 상태에서 작동시킬 필요성이 강하게 부각되었으며, 선박에 있어서도 고성능화·저비용화라는 상반된 요구를 충족하기 위해 소형화·고속화가 추진되면서 펌프의 흡입압력 저하에 의한 공기흡입 및 캐비테이션 발생 가능성의 증가로 인하여 이 방면에서의 연구도 활기를 띠기 시작했다.^[3]

그러나, 이러한 터보기계 내의 이상류는 직관내 이상류와 비교하여 유속이 빠르고, 압력구배가 크며 유동이 정지계에서 회전계, 다시 정지계로 이동하는 복잡한 좌표계와 관계된다. 또한 코리올리력에 의해 유동과 직각방향에 커다란 힘이 작용하는 등의 회전계 고유의 문제도 있어 직관내 이상류의 성과를 그대로 적용할 경우 만족할만한 성과를 얻지 못한다. 이 때문에 많은 연구가 행해지고 있지만 펌프성능이 저하되는 손실부분을 정량화하지 못하여 원인을 명확히 규명하는데 어려움이 있다. 이상류 상태에서의 펌프성능이 저하되는 원인을 정량화하기 위해서는 임펠러간극, 보이드율, 케이싱 내의 유동패턴, 유속, 압력구배, 기포경 등 다양한 변수가 단상류, 이상류시 펌프특성에 정성적·정량적으로 어떠한 영향을 미치는지 파악하여야 한다.^{[4]~[6]} 본 논문에서는 우선적으로 기액 이상류 실험장치를 구축하여 실험장비의 신뢰성을 검증하고, 펌프의 성능이 저하되는 손실부분을 정량화하기 위한 기초 자료를 확보하고자 밀폐형과 반 개방형 임

펠러의 2종류의 임펠러를 대상으로 단상류시의 펌프의 특성을 파악하였으며, 기액 이상류시 보이드율을 변수로 펌프의 특성을 파악하였다.

2. 실험장치의 구성

2.1 실험장치

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 실험 장치를 이용하여 실험을 수행하였다. 저수탱크에 저장된 청수는 흡입관, 전자유량계를 지나 펌프 내에 유입된다. 펌프 내에서 승압된 청수는 토출관, 유량조절밸브를 경유하여 다시 탱크 내로 재순환된 수는 흡입관, 전자유량계를 지나 펌프 내에 유입된다. 펌프 내에서 승압된 청수는 토출관, 유량조절밸브를 경유하여 다시 탱크 내로 재순환된다. 저수탱크는 청수가 흡입되는 과정에서 자연스럽게 발생하는 공기를 제거하기 위해서 공기 분리판을 중앙에 설치하였다. 단단 밀폐형 원심펌프 소형(유량 : $0.35\text{m}^3/\text{min}$, 양정 : 15m), 대형(유량 : $2.5\text{m}^3/\text{min}$, 양정 : 18m)을 설치하여 두 펌프의 상사치를 비교할 수 있도록 하였다. KS 규격의 펌프실험장치에는 전자유량계를 토출측에 설치하도록 되어 있으나 이상류 상태에서는 공기의유입으로 인하여 토출측에서 유량을 정확히 측정할 수 없으므로 토출유량을 정확히 측정하기 위해서 흡입측과 토출측에 각각 전자유량계를 설치하였다.^{[7],[8]}

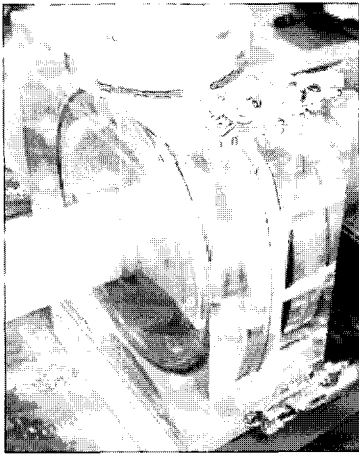
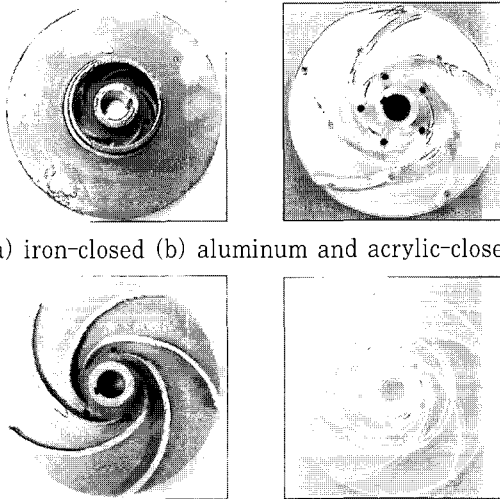


Fig. 2 Front view of the suction cover casing



(a) iron-closed (b) aluminum and acrylic-closed

(c) iron-semi-open (d) acrylic-semi-open

Fig. 3 Pictures of tested impeller

2.2 임펠러와 케이싱

Fig. 2와 Fig. 3은 소형원심펌프의 케이싱과 임펠러를 나타낸 것이다. 임펠러는 Fig. 3(a), (b), (c), (d)와 같이 밀폐형과 반 개방형 두 가지 종류를 사용하였다. (a)는 모두 철을 사용한 임펠러이며, (b)는 가시화를 위하여 앞면을 아크릴 재질을 사용하여 제작하고 뒷면과 날개는 알루미늄으로 제작하였으며, (c)는 (a)의 철 임펠러의 앞면만을 제거한 반 개방형이고, (d)는 임펠러 내부 유동장, 속도계측을 위하여 (c)를 아크릴을 이용하여 제작

하였다. 임펠러의 재질은 철(밀폐형:2.0kg, 반 개방형:1.4kg), 알루미늄(반 개방형:1.0kg), 아크릴(반 개방형:0.6kg)의 3종류를 사용하였다. 임펠러의 지름은 18cm, 폭은 0.8cm의 3차원 유선형이며, 날개의 갯 수는 5개이다^[9].

2.3 공기공급장치의 구성

Fig. 4는 이상류 실험시 공기공급장치 및 공기의 양과 압력을 조절하는 장치이다. 공기공급 장치는 압축기, 공기저장탱크, 압력조절기, 2개의 아날로그 공기유량계와 1개의 디지털 공기유량계, 압력계로 구성되어있다. 공기압축기에서 공기를 생성하고, 생성된 공기는 안정적인 공급을 위하여 공기저장탱크에 저장된다. 유량계의 범위는 각각 10 l/min, 1 l/min이며, 이것은 좀 더 정확한 공기량을 조절하기 위해서 범위가 다른 것을 하나씩 설치하였다. 공기를 공급하는 위치는 케이싱에서 200mm 상류측 흡입관에 설치하였다. 또한 공기를 투입하는 압력은 압력조절기를 이용하여 흡입압력과 비슷한 압력을 유지하였다.

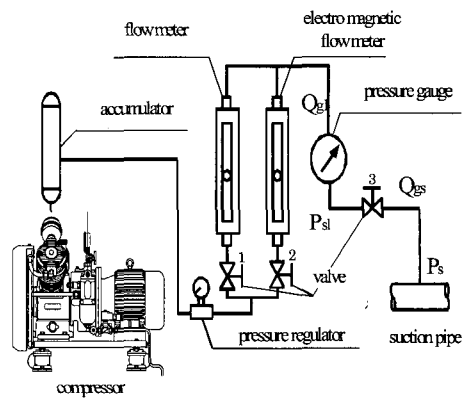


Fig. 4 Air supply system

2.4 측정계

측정계는 Fig. 5에 도시한 바와 같다. 액상의 유량은 흡입관에 설치된 전자유량계에서 측정하였다. 펌프의 흡입압력과 토출압력은 압력측정공과 반도체 압력변환기를 거쳐 전압치로 변환되어 앰프, A/D보드를 거쳐 컴퓨터에 기록된다. 펌프회전수

는 치차와 전자 픽업의 조합에 의해 검출하였고, 축 토크 검출에는 토크검출기를 이용하였다. 또한, 측정치는 초당 100개의 데이터를 평균하여 산출하였다. 유량계수, 양정계수, 축동력계수 및 보이드울의 계산식은 각각 식 (1), (2), (3), (4)와 같다.

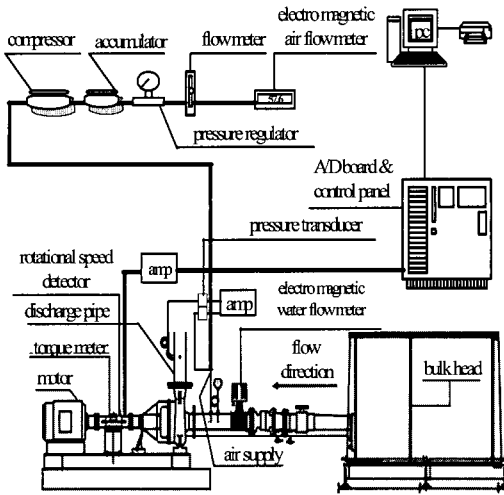


Fig. 5 Schematic illustration of pump characteristics measurement system

$$\phi = \frac{Q}{AU} \quad (1)$$

$$\psi = \frac{H}{U^2/2g} \quad (2)$$

$$\tau = \frac{L_s}{A\gamma U^3/2g} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{Q_{air}}{Q_w + Q_{air}} \quad (4)$$

여기서, ϕ 는 유량계수, ψ 는 양정계수, τ 는 축동력계수, β 는 보이드울을 나타낸다. 또한 A는 임펠러의 단면적(m^2), U는 원주 속도(m/sec), Q는 유량(m^3/sec), H는 양정(m), g는 중력가속도(m/sec^2), γ 는 비중량(kgf/m^3), L_s 는 축 동력(kW), Q_w 는 물의 량(l/min), Q_{air} 는 공기의 량(l/min)을 의미한다.

3. 실험결과 비교

3.1 성능실험결과의 재현성 및 신뢰성 검증

Fig. 6은 아크릴 임펠러와 알루미늄 임펠러를 이용하여 4일 동안 물의온도, 흡입양정 등 동일한 실험조건에서 4번의 실험을 한 것이다. 그 결과 값이 동일하여 실험장치의 재현성을 확인할 수 있었다.

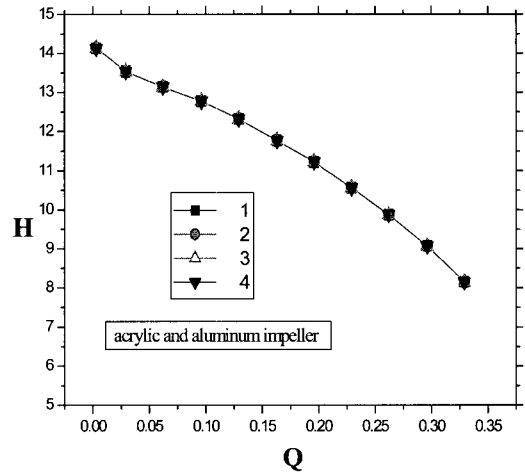


Fig. 6 Reappearance of single-stage centrifugal pump in single-phase flow

Fig. 7은 구입한 철 케이싱과 철 밀폐형 임펠러와 제작한 아크릴 케이싱과 구입한 철 밀폐형 임펠러를 이용하여 실험한 결과를 실 유량을 기준으로 양정과 축동력 및 효율 데이터를 나타낸 것이다. 아크릴 케이싱과 철 케이싱은 최고양정이 14.99m와 14.57m, 최고효율은 유량이 $0.262m^3/min$ 에서 67.24%, $0.257m^3/min$ 에서 66.34%, 최대유량은 각각 $0.332m^3/min$ 와 $0.331m^3/min$ 으로, 두 실험치의 차이는 최고양정이 2.8%, 최고효율이 1.3%, 최대유량이 0.3%이었다. 실험에서 사용한 케이싱의 재질이 펌프의 특성에 미치는 영향이 거의 없음을 알 수 있었으며 아크릴 케이싱의 가공이 적절하게 되었음을 알 수 있었다.

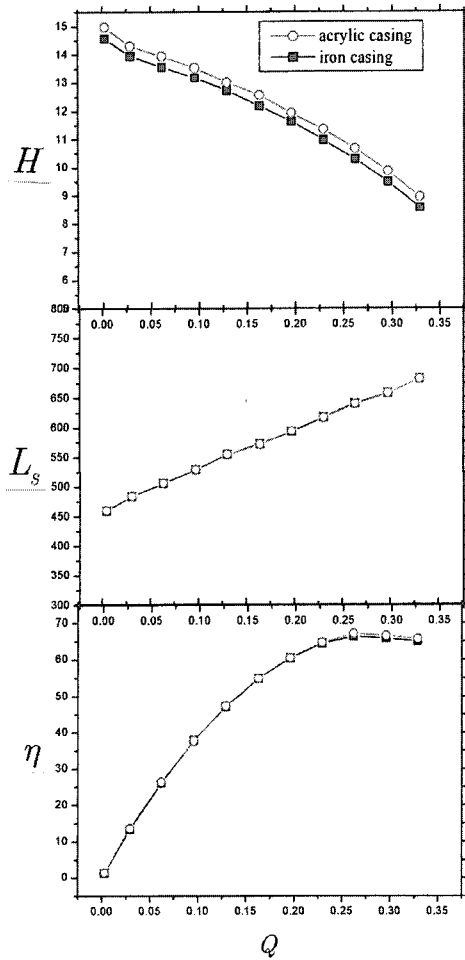


Fig. 7 Performance of single stage centrifugal pump in single-phase flow according to casing

3.2 단상류시 임펠러 형상에 따른 특성

Fig. 8은 임펠러 형상에 따른 단단 원심펌프의 성능실험 결과를 나타낸 그래프이다. 본 실험에서 사용한 밀폐형 임펠러는 최고효율이 67.24%일 때 유량계수는 0.030이며, 반 개방형 임펠러는 최고 효율이 60.08%일 때 유량계수는 0.0225이다. 축 동력계수는 거의 변화가 없었으나 양정계수는 누설 손실 등의 영향으로 각각의 유량계수에서 양정계수의 차이를 평균한 값은 0.063이며 유량이 증가할수록 그 차이는 더욱 증가함을 알 수 있었다. 이러한 손실은 추후 속도계측, 압력계측 등의 실험을 추가하여 정량화하고자 한다.

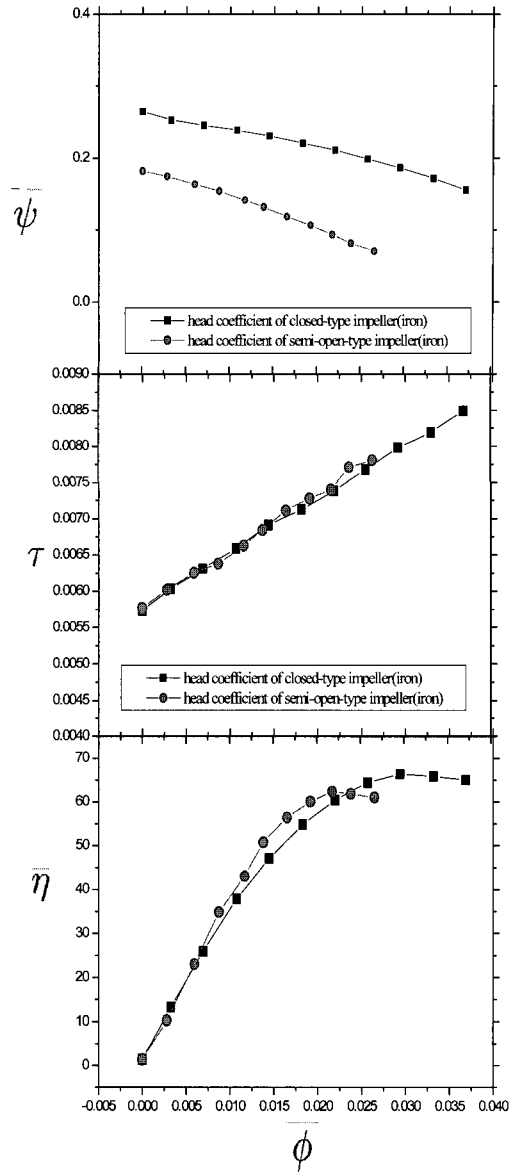
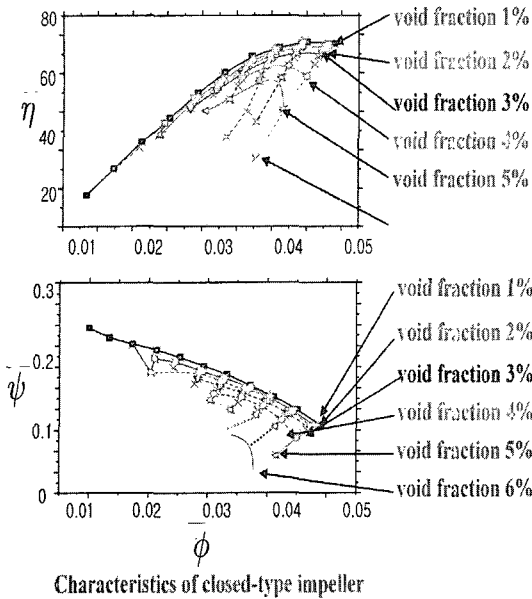


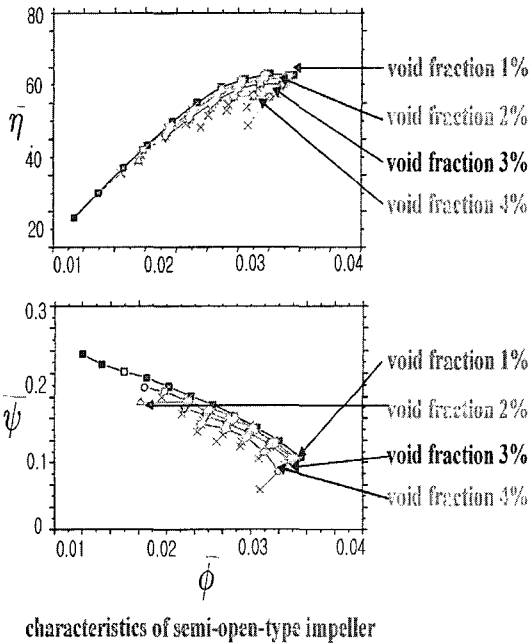
Fig. 8 Characteristics of single-stage centrifugal pump in single-phase flow according to shape of impeller

3.3 기액 이상류시 임펠러 형상에 따른 기액 이상류 특성

Fig. 9, 10은 기액 이상류시 밀폐형과 반 개방형의 임펠러 형상에 따른 단단 원심펌프의 성능실험 결과를 나타낸 그래프이다. 먼저 단상류시의 성능을 측정하고, 유량계수를 등 간격으로 10등분하



Characteristics of closed-type impeller
Fig. 9 Characteristics of single-stage closed-type centrifugal pump in air-water two-phase flow according to void fraction



characteristics of semi-open-type impeller
Fig. 10 Characteristics of single-stage semi-open-type centrifugal pump in air-water two-phase flow according to void fraction

여 각각의 유량계수에서 공기를 1 l/min씩 증가시키면서 측정 한 결과를 세로점선으로 나타내었으며, 각각의 유량계수에서 보이드율이 같은 지점을 가로 실선으로 연결하였다. 임펠러 형상에 따라 우선 밀폐형 임펠러에서 보이드율이 6%를 초과했을 시 폐쇄가 일어난 반면 반 개방형은 4%를 초과했을 시 폐쇄가 일어났다.

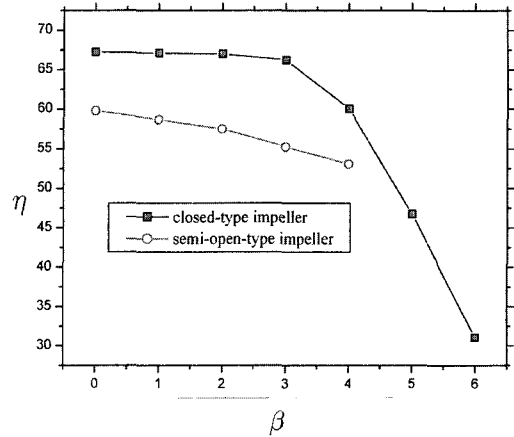


Fig. 11 Efficiency of single stage centrifugal pump in single-phase flow

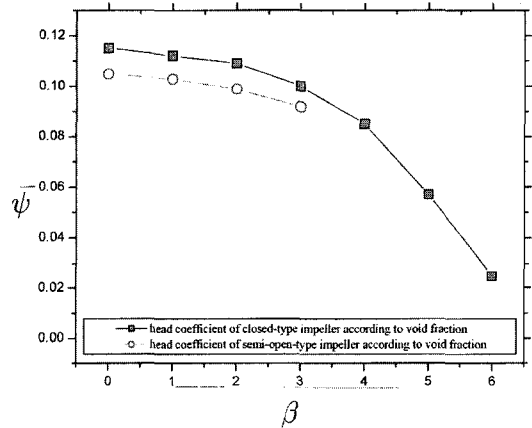


Fig. 12 Head coefficient of single stage centrifugal pump in single-phase flow

Fig. 11에서와 같이 밀폐형 임펠러는 반개방형에 비해 초기 보이드율(3%)이 증가할 경우에는 효율의 감소율이 1.6%로 매우 적지만, 반 개방형 임

펠러는 7.6%로 밀폐형 보다 감소율이 크다는 것을 알 수 있었다. 그러나 보이드율이 증가할수록 반 개방형 임펠러의 감소율은 밀폐형 임펠러의 감소율 보다 작아진다는 것을 알 수 있었다. 또한, Fig. 12에서와 같이 양정 역시 반 개방형이 보이드율의 증가에 따른 저하율이 적어짐을 알 수 있다. 본 실험에서 사용한 펌프가 적은 유량이어서 반 개방형의 임펠러의 폐쇄가 4%에서 이루어졌지만, 위 실험결과로 미루어 볼 때 보다 큰 유량을 가지는 펌프에서는 보이드율이 증가할수록 반 개방형 임펠러가 밀폐형 임펠러에 비하여 효율이 더 좋을 것이라고 예측할 수 있다.

4. 결 론

기액 이상류 실험장치를 구축하여 실험장치의 신뢰성을 검증하고, 펌프의 성능이 저하되는 손실부분을 정량화하기 위한 기초 자료를 확보하고자 임펠러 형상을 변수로 단상류시의 펌프의 특성을 파악하였으며, 이상류시 보이드율을 변수로 펌프의 특성을 파악하여 다음과 같은 결론을 알 수 있었다.

(1) 기액 이상류시 펌프의 특성 실험장치를 구축하고 실험장치가 신뢰성 및 재현성을 만족함을 확인하였다.

(2) 본 실험에서 사용한 밀폐형 임펠러와 반 개방형 임펠러의 경우 축동력계수는 거의 변화가 없으나 각각의 유량계수에서의 양정계수의 차의 평균은 0.063이며, 양정계수의 차이는 유량이 증가할수록 증가한다.

(3) 단상류시 밀폐형 임펠러가 반 개방형 임펠러에 비해서 양정 및 효율은 우수하다. 그러나 기액 이상류시에는 반 개방형 임펠러가 밀폐형 임펠러에 비하여 보이드율의 증가에 따른 양정 및 효율의 감소율은 줄어든다.

참고문헌

- [1] You-Taek KIM, Kazuhiro Tanaka, Yoichiro Matsumoto, "Tip Clearance and Bubble Size of a Screw-type Centrifugal Pump Operating in Two-phase Flow", PROCEEDINGS of The Third ASME-JSME Joint Fluids Engineering Conference, pp.1-8, (ASME), (JSME), 1999
- [2] You-Taek KIM, Kazuhiro Tanaka, Yoichiro Matsumoto, Young-Ho LEE, "Flow Pattern and Pressure Distribution due to Air Entrainment in a Screw-type Centrifugal Pump", PROCEEDINGS of ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting 2000, pp.1-7, (ASME), 2000
- [3] You-Taek KIM, Kazuhiro TANAKA, and Young-Ho LEE, "Characteristics of a Small Screw-type Centrifugal Pump Operating in Air-Water Two-Phase Flow, Journal of Fluid Machinery(in Korean)", Vol.2-4(1999), pp. 9-15.
- [4] Kim, J.H., Duffey R.B., and Belloni P., 1985, "On Centrifugal pump Head Degradation in Two-Phase Flow," Design Methods for Two-Phase Flow in Turbomachinery, The ASCE/ASME Mechanics Conference Albuquerque New Mexico, pp. 9-15.
- [5] 김유택, "공기유입에 의한 스크류식 원심펌프의 양수불능 특성에 관한 연구", 유체기계저널 pp.58-63, 2003.
- [6] 김유택, 이영호, "터보펌프의 氣液二相流 特性", 한국마린엔지니어링학회지 25권 5호, pp.957-962, 2001.
- [7] 원심펌프, 사류펌프 및 축류펌프의 시험 및 검사 방법(KS B 6301), 한국표준협회, 2001.
- [8] 펌프 토출량 측정방법(KS B 6032), 한국표준협회, 2001.
- [9] 김성윤 "기액이상류시의 펌프특성실험에 관한 기초연구"한국해양대학교 대학원 석사논문, 2006.

저 자 소 개



김유택 (金由澤)

1963년 2월생, 1990년 한국해양대학교 기관공학과 졸업(공학사), 1996년 한국해양대학교 대학원 졸업(공학석사), 2000년 일본 큐슈공업대학 대학원 졸업(공학박사), 1990년~1993년 SK해운 엔지니어, 2000년~2001년 일본 큐슈공업대학 SVBL 강사, 2001년~현재 한국해양대학교 재직(해사대학, 기관시스템공학부), 당학회 종신회원 · 편집간사



이상일 (李相一)

1969년 06월생, 1990년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 2006년 한국해양대학교 대학원 기관시스템학과 수료, 1990~2005년 해운회사 근무, 현재 한국해양대학교 운항훈련원 전임강사



김성윤 (金成潤)

1977년 05월생, 2004년 한국해양대학교 해양경찰학과(기관과정) 졸업, 2006년 02월 한국해양대학교 기관시스템공학과 대학원 석사 졸업, 2006년 03월 - 현재 (한국화재보험협회 부설 방재시험연구원 소화연소팀 연구원 재직)