

터보 펌프 인듀서의 성능 및 유동실험

강신형* · 염기태**

Performance and Flow Test of a Turbo Pump Inducer

Shin-Hyoung Kang*, Ki-Tae Yeom**

Key Words: Inducer(인듀서), Turbo Pump(터보 펌프), Cavitation(캐비테이션)

ABSTRACT

Variations of performance and NPSH of a turbo pump inducer were measured. The flows at the inlet and the outlet of the inducer were also experimentally investigated by measuring flow velocity and angle using a 3-hole Pitot tube. Performance and velocity profiles show a similarity for tested speeds, however not for efficiencies. Strong recirculating flows appears at the inlet of inducer even at the design condition. Cavitating flows were also visualized at several NPSH's.

1. 서 론

장거리 로켓의 액체 추진 모터에서는 액화된 연료와 산화제를 고압으로 분사하여 연소시키는 터보펌프가 핵심부품 중의 하나이다. 터보 펌프는 고속회전으로 입구 압력이 감소하기 때문에 캐비테이션이 발생하기 쉽다. 펌프에서 캐비테이션 현상이 발생하면 펌프의 성능이 급속히 저하되고 소음이 발생하며 비정상 진동이 발생한다. 캐비테이션에 따른 이러한 성능 저하를 막기 위한 장치로 펌프의 입구에 인듀서를 설치한다. 과거 인듀서의 성능과 캐비테이션 특성에 대하여 활발한 연구가 수행되었다. 이중 최근 Moore⁽¹⁾는 CFD기술을 이용하여 인듀서 입구의 이차 유동의 원인과 영향에 대하여 연구하였고, Tsujimoto⁽²⁾는 인듀서에서 발생하는 정상 및 비정상 캐비테이션의 발생에 대하여 연구하였다. Boccazzi⁽³⁾은 LDV방법을 사용하여

인듀서 내부와 출구에서 탈설계점 조건에서의 유동장을 계측하였다. 인듀서의 성능에 대해서는 Kamijo⁽⁴⁾의 논문 등이 있다. 그러나, 국내에서는 Lee et al.⁽⁵⁾의 실험을 제외하면 인듀서에 대한 실험이 거의 이루어지지 않아서 인듀서의 설계와 개발을 위해서는 다양한 데이터의 확보가 시급한 실정이다. 최근 국내에서도 소형 로켓추진용 터보펌프의 개발이 민군겸용과제로 추진되고 있으며 이 연구를 통해서 손동기 등⁽⁶⁾의 연구 결과가 발표된 바 있다. 본 연구에서는 기존 연구용 인듀서 모델을 이용하여 인듀서의 기본적인 성능과 입출구의 유동장 그리고, 캐비테이션 특성을 연구하였다.

2. 실험 장치, 실험 모델 및 실험 방법

2.1 실험장치

인듀서 성능시험은 Fig. 1에 나타낸 펌프 성능시험 장치를 이용하여 수행하였다. 실험장치는 2.5 m³ 용량의 물탱크 아래 부분에서 물을 흡입하여 위쪽으로 배출하게 되며 물탱크와 모든 배관의 재질은 스테인리스

* 서울대학교 기계항공공학부

** 서울대학교 대학원

Email : kangsh@snu.ac.kr

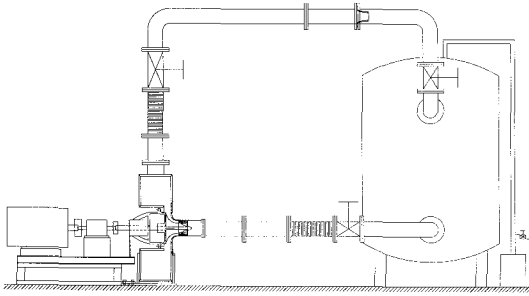


Fig. 1 Schematic of inducer test rig

이다. 또한 인듀서 입구, 출구의 이음 부분을 제외하고는 배관의 직경은 모두 150 mm이다. 유량은 장반경 노즐을 펌프 출구 파이프에서 탱크 직전에 설치하여 노즐 전후의 압력 차이로부터 측정하였다. 유량은 노즐 뒤쪽에 설치된 게이트 밸브로 조절하였다. 수두를 측정하기 위해 인듀서 입구와 출구에 압력계를 설치하였다. 축동력과 회전수는 토크미터와 타코미터로부터 측정하였으며, 인듀서 회전수는 모터에 연결된 인버터로 조절된다.

실험은 900 ~ 1800 rpm 범위에서 수행하였으며, 작동 유체는 물이다. 인듀서의 내부 유동과 캐비테이션 현상을 관측하기 위하여 인듀서 슈라우드는 투명 아크릴로 제작하였으며 내부 지름은 150.8 mm 이다. 그리고, 인듀서 출구에는 충분히 큰 컬렉터를 설치하여 인듀서 출구의 유동을 균일하게 하였다. 따라서, 인듀서와 임펠러의 상호작용을 무시하게 되었다.

인듀서의 성능을 구하기 위해 유량의 변화에 따른 수두를 측정하였다. 또 설치된 토크미터로 토크를 측정하고 각속도를 측정하여 축동력을 측정하였다. 유효 흡입수두 NPSH를 측정하기 위하여 입구 압력을 제어하였다. 물탱크 상부에서 압력을 낮출 수 있는 진공 펌프를 설치하여 운전 중에 시스템 전체의 압력 조절이 가능하게 하였다.

2.2 실험모델

본 연구에 사용된 인듀서는 일본 H-II 로켓의 LE-7 엔진에 사용되는 산화제 펌프에 부착된 인듀서와 유사한 모델로서 Tsujimoto⁽⁸⁾의 연구에서 설계 제작되어 연구용으로 사용하는 모델이다. LE-7 엔진에 사용되는 인듀서는 3장의 블레이드를 갖고 있는 반면 본 연구에 사용된 인듀서는 4장의 블레이드를 갖고 있다. 인듀서의 지름은 149.8 mm 이고 팁 간극은 0.5 mm 이다. 인

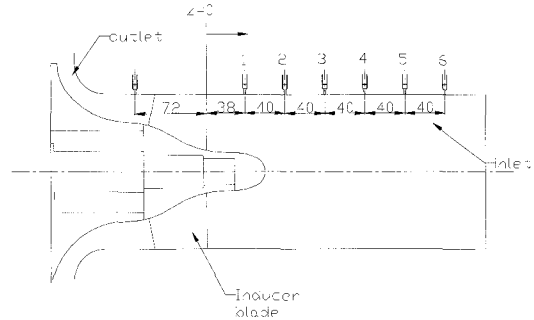


Fig. 2 Test section of inducer

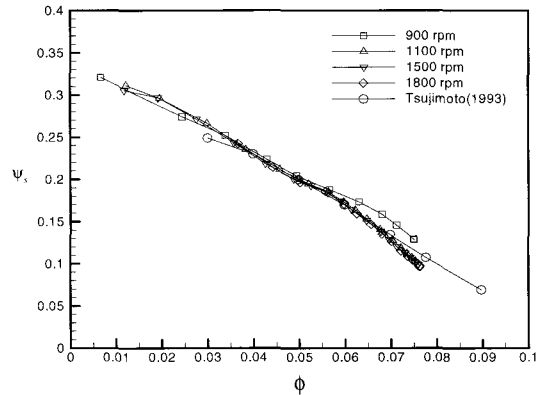


Fig. 3 Variation of pressure coefficient with flow rate

듀서의 베인 선단은 후향각 형식으로 베인의 각도는 선단에서부터 $r \tan \beta =$ 일정한 식을 따라 설계되었으며 자세한 형상은 Table 1에 나타내었다. 압력은 Fig. 2와 같이 입구 여섯 부분과 출구 한 부분에서 압력 탭을 통하여 측정하였으며 각각의 경우에 대하여 분석하였다.

3. 성능 실험

몇가지 회전수에 대하여 유량의 변화에 따른 인듀서의 수두와 효율을 구하고 무차원 수로 Fig. 3에서 나타내었다. 여기서 압력계수 ψ_s 와 유량계수 ϕ 는 다음과 같다.

$$\psi_s = (p_2 - p_{01}) / (\rho u_t^2) \quad (1)$$

$$\phi = C_m / u_t \quad (2)$$

여기서 u_t 는 인듀서 베인의 팁속도이다. 다소 낮은 회전수를 제외하고는 상사성이 잘 성립함을 나타내고 있으며, 실험 데이터의 객관성 확보를 위해 Tsujimoto^{(7),(8)}

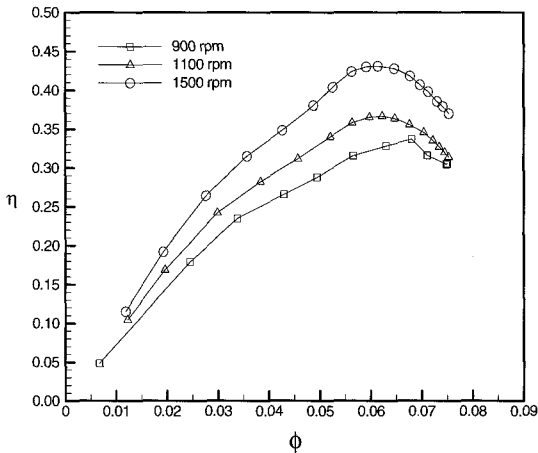


Fig. 4 Non-dimensional inducer efficiency

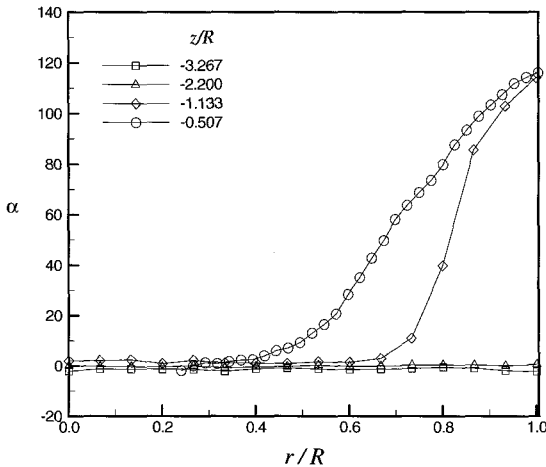


Fig. 5 Distributions of inlet flow angle at $\phi=0.05$

의 자료와 비교하여 전체 유량에서 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 4는 인듀서의 효율을 나타내고 있다. 일정한 유량계수 0.065 근처에서 최대 효율을 보이며 회전수가 증가할수록 효율이 증가하였다. 여기서 그림으로 나타내지는 않았으나 인듀서 입구 압력의 변화는 상사성을 나타내지 않으며, 그 이유는 유량계수에 따라서 재순환 유동의 구조가 상당히 다르기 때문이다. 유량이 작을 때 인듀서 블레이드에 가까이 갈수록 유체가 블레이드 회전에 영향을 받아 미리 회전을 시작하는 이차 유동이 발생하므로 전체 유동의 축방향 속도가 감소하게 된다. 그리고 원주방향 속도가 증가함에 따라 원심력이 작용하여 허브에 비하여 슈라우드에서 상대적으로 정압은 증가하게 되고 입구 압력이 실제보다 높게 측정되므로 수두는 낮아지게 된다.

Table 1 Dimensions of Inducer

Number of blades	4
Tip diameter	149.8 mm
Inlet tip blade angle	7.5 °
Outlet tip blade angle	9.0 °
Hub/tip ratio at inlet	0.25
Hub/tip ratio at outlet	0.51
Tip clearance	0.5 mm
Blade thickness at tip	2 mm
Leading edge radius	0.2 mm
Solidity at tip	2.44
Sweep	47.3 °
Design flow coefficient	0.078

4. 입구와 출구에서 속도 분포

입구 유동과 출구 유동을 측정하기 위해 3공 피토티브를 사용하였다. 입구 유동 측정은 인듀서 선단에서 상류로 $z/R = -3.267, -2.200, -1.133, -0.507$ 에서 실시하였다. 측정 회전수는 1000 rpm으로 유량 계수 0.05, 0.058, 0.066, 0.07 에 해당되는 유량에 대해 실험을 수행하였다. 출구 유동 측정은 인듀서의 선단에서 하류로 $z/R = 0.96$ 떨어진 지점에서 회전수 1000 rpm, 유량 계수 0.048, 0.055, 0.062일 때 측정하였다. 인듀서의 입출구 유동은 정확하게 측정하기가 매우 어려우나 설계 및 성능예측모델의 개발이나 수치해석 결과를 비교하기 위해서 중요한 자료이다.

4.1 입구 유동장

인듀서는 점선방향에 대한 배인의 각도가 작기 때문에 회전방향의 토크를 상류에 전달하여 흡입유동을 회전시킨다. 이러한 회전에 따라서 반경방향의 압력구배를 형성하고 흡입구 케이싱 부근에서 유동을 역류시킨다. 이에 따라서 비교적 큰 재순환 유동을 형성시키는 경우가 많다. 이러한 재순환 유동은 인듀서 배인 입구 팁 근처의 유동을 심하게 교란하여 캐비테이션 성능을 저하시키고 또 효율도 감소시킨다고 알려져 있다. 특히 이 재순환 유동은 캐비테이션이 발생할 때에도 강한 혼합효과를 나타내기 때문에 그 영향은 아직도 잘 알려져 있지 않아서 연구의 대상이 된다. 측정된 속도의 분포는 지면상 여기서 나타내지는 않았으나 Figs. 5, 6, 7에는 각각 유량 계수 0.05와 최대 효율이 나오는

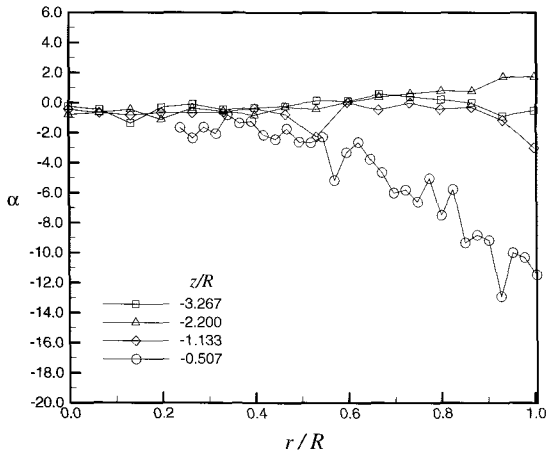


Fig. 6 Distributions of inlet flow angle at $\phi = 0.064$

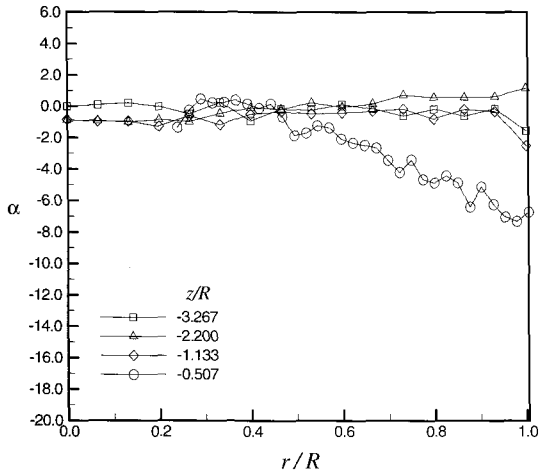


Fig. 7 Distributions of inlet flow angle at $\phi = 0.07$

유량 부근인 0.064, 그리고 0.07일 때의 입구에서의 유동 각도를 나타낸 것이다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 유량계수가 0.05인 경우 재순환 영역은 상당히 크게 형성되고 있음을 알 수 있다. z/R 이 -1.133인 경우 슈라우드 근처에서 이미 유동각은 110° 정도임을 봐서 인듀서 입구에서의 주 유동방향과 반대방향의 유동이 들어오고 있음을 알 수 있다. 이 유동은 슈라우드를 타고 나선형으로 상류를 향해 역류하는 유동이라 할 수 있으며 상류로 갈수록 이차 유동은 소멸되어 간다. 유량 계수 0.064에서는 유량 계수 0.07과 유동은 비슷하지만 z/R 이 -0.507 까지도 아직 역류는 관찰되지 않고 있다. 그러나 실제로 이후 재순환 유동이 나타난다. 실제 유동은 약한 비정상유동이며 이를 3공 피토투브로 정확히 평가함은 어렵다. 계측의 신뢰도를 확인

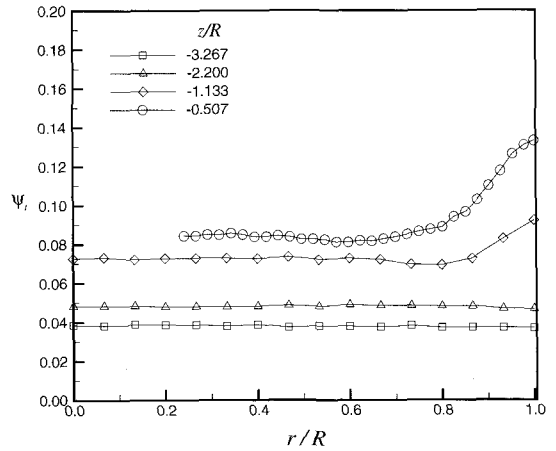


Fig. 8 Distributions of non-dimensional inlet total pressure at $\phi = 0.05$

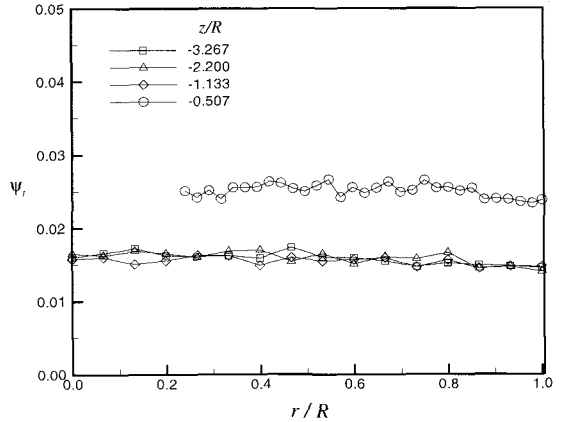


Fig. 9 Distributions of non-dimensional inlet total pressure at $\phi = 0.064$

하기 위해서 계측된 축방향 속도 성분을 적분하여 유량을 산정하고 이를 유량계로 계측된 유량과 비교하여 보는 것은 의미가 있다. $z/R = -0.507$ 에서 축방향 속도에 면적을 곱해 적분하여 보면 유량 계수 0.05는 $0.429 \text{ m}^3/\text{min}$, 유량 계수 0.064는 $0.489 \text{ m}^3/\text{min}$ 이다. 참고로 유량 계수 0.05인 경우에 유량은 $0.439 \text{ m}^3/\text{min}$ 이고 유량 계수 0.064인 경우에는 $0.537 \text{ m}^3/\text{min}$ 이다. 각 각의 오차는 2.8% 와 9%이다. Figs. 8, 9, 10에는 유량 계수에 따른 전압 분포를 나타내었다. Fig. 8에서 충분히 상류에서는 균일한 분포를 보이다가 역류가 심해지는 구역에서는 케이싱 방향으로 전압이 증가한다. 그러나 Fig. 9 및 10에서 전압은 반경방향으로 거의 균일하다.

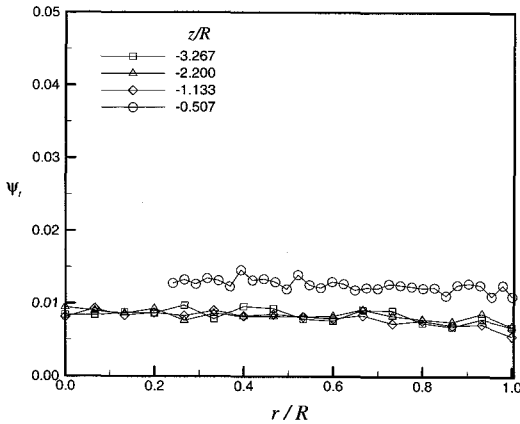


Fig. 10 Distributions of non-dimensional inlet total pressure at $\phi = 0.07$

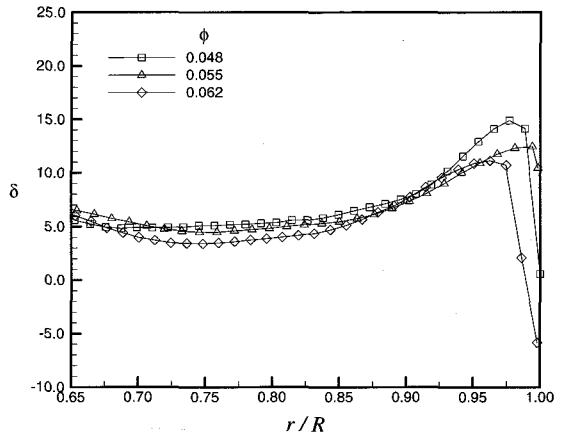


Fig. 12 Variations of outlet deviation angle at $z/R = 0.96$

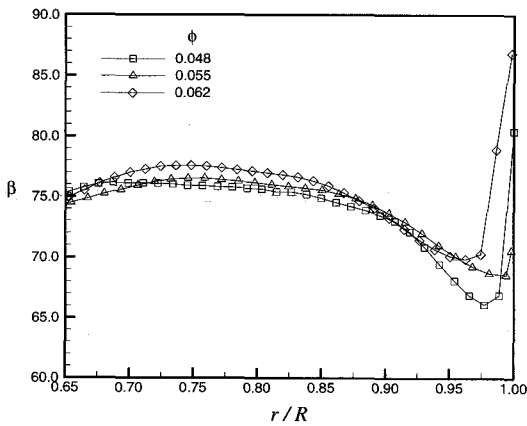


Fig. 11 Variations of outlet relative angle at $z/R = 0.96$

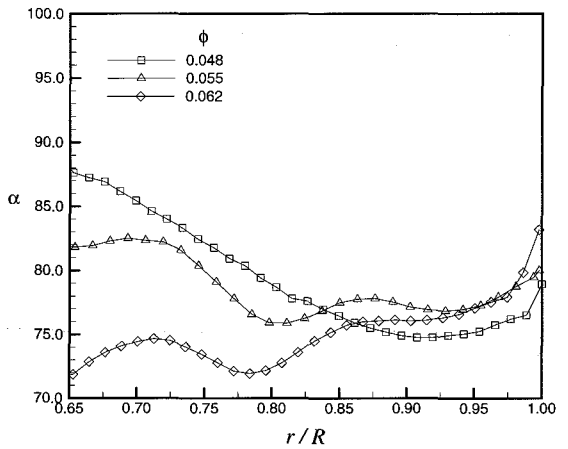


Fig. 13 Variations of outlet absolute angle at $z/R = 0.96$

4.2 출구 유동장

인듀서의 출구에서 유동을 3공 피토투브로 계측하였다. 여기서도 반경방향의 속도성분은 매우 작으므로 무시하였다. 이러한 출구에서의 속도성분은 다양한 유동해석 방법을 이용하여 수치해석한 결과를 비교하는데 활용할 수 있고, 또 1차원 성능예측이나 설계 방법의 개발을 위해서 필요한 데이터이다. Fig. 11 - 16은 인듀서 출구에서의 편향각, 절대유동각, 상대유동각, 절대속도, 축방향 속도 및 전압의 분포를 3가지 유량계수에 대하여 나타낸 것이다.

Fig. 11에서 보면 유량 계수에 따른 상대유동각의 분포를 보면 허브에서 반경방향으로 약간 증가하다가 급히 감소한 후 다시 케이싱에서 증가함을 알 수가 있다. 이러한 변화는 유량계수에 따라서 큰 변화는 없었다. 인듀서 출구에서의 블레이드 각도는 접선에 대하

여 9°이며, 축방향에 대해서는 81°이다. 여기에 대하여 유동각을 빼면 편향각을 구할 수 있다. Fig. 12에서 편 유량 계수가 증가함에 따라 중간 부근에서의 유동 각도는 감소하며 유량 계수 0.055, 0.062 일 때는 $r/R = 0.055$ 부근에서 유동 각도가 최소값을 가지며 슈라우드로 가면서 다시 증가하는 것을 알 수 있다. 슈라향 각은 허브 측에서 개략 4~6°이나 베인의 팁 근처에서 급히 증가하여 14°정도이고 이후 벽 주변에서 음의 값을 보인다.

우드에서 유동 각도는 유량이 증가할수록 감소하는 경향을 보인다. Fig. 13은 출구에서의 절대 각도를 나타내고 있다. 유량 계수 0.048일 때는 허브에서 축방향에 대해 89°의 유동이 생기지만 유량이 증가할수록 유동 각도는 감소하여 유량 계수 0.062 에서는 72°로 떨어지고 있다. 축방향 속도는 유량 계수가 0.048 일 때

브에서 0 의 값을 갖고 슈라우드로 가면서 계속 증가하는 경향을 보이지만 유량 계수 0.055, 0.062 일 때는

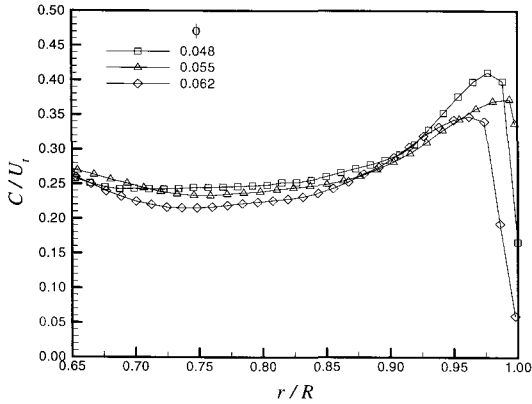


Fig. 14 Distributions of non-dimensional outlet absolute velocity at $z/R=0.96$

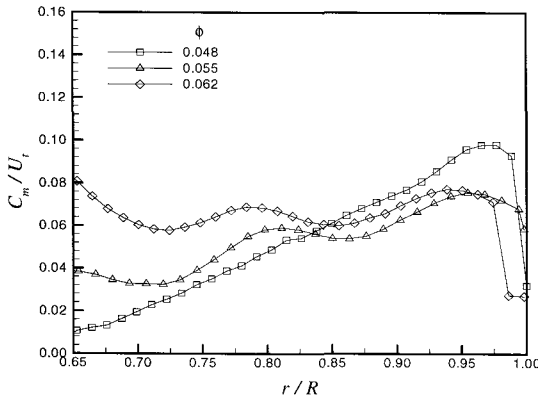


Fig. 15 Distributions of non-dimensional outlet meridional velocity at $z/R=0.96$

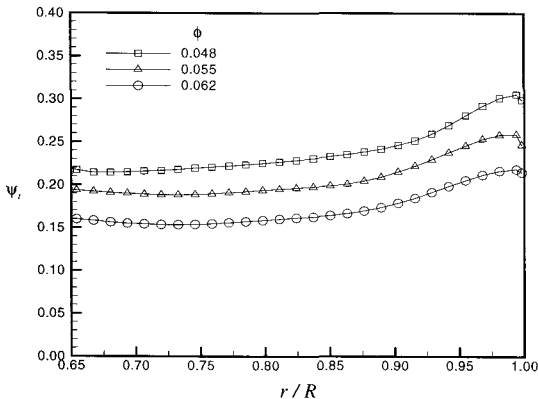


Fig. 16 Distributions of non-dimensional outlet total pressure at $z/R=0.96$

$r/R = 0.725$ 와 0.85 일 때 최소값을 한 번씩 갖으면서 증가하는 경향을 보인다. 전압은 허브보다 슈라우드에서 상대적으로 높으며 일정한 기울기를 갖고 증가함을 알 수 있다. 허브에서 슈라우드로 갈수록 속도는 약간 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보인다.

5. 캐비테이션 성능

Fig. 17에서는 유량에 따른 NPSH와 수두의 관계를 나타내었다. 유량이 일정할 때 흡입구의 압력을 감소시켜 NPSH를 감소시키면 평균수두가 약간 증가하다가 이후 급격히 감소한다. 평균 수두가 정상 수두에 대하여 3% 감소하는 지점을 캐비테이션이 발생하는 지점이라 가정하고 여기서의 NPSH와 유량의 상관 관계를 나타낸 것이 Fig. 18이다. Fig. 18에서 본 인듀서에서는 유량이 증가할수록 NPSH가 감소하는 특성을 나타내었다. 한편 NPSH를 예측하는 계수로서 다음과 같은 무차원수인 λ 에 대한 크기와 변화를 검토하였다.

$$\lambda = (2gNPSH - c_1^2) / w_1^2 \quad (3)$$

λ 는 블레이드의 형상에 따른 함수로서 블레이드가 얇고 블레이드 끝이 뾰족할수록 감소하는 경향이 있다. λ 는 보통 0.15~0.4 의 값을 갖는데, 유량 계수가 변화하면 λ 값도 달라지므로 설계치에서는 λ 가 최소가 되고 그 외에서는 λ 가 증가하는 경향을 나타낸다. Fig. 19에서 보면 유량 계수 0.05에서 0.4정도의 극소값을 갖고 유량 계수 0.65에서 0.3의 최소값을 갖는 것을 알 수 있다.

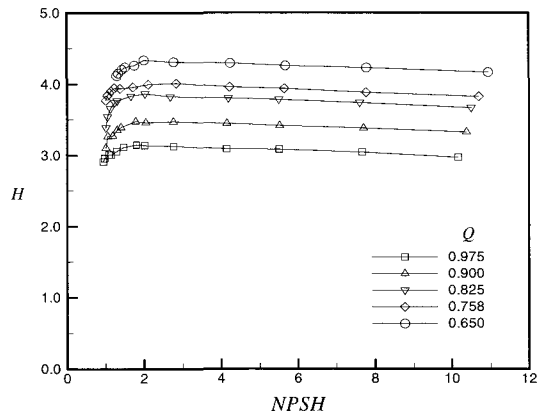


Fig. 17 NPSH versus head (1800rpm)

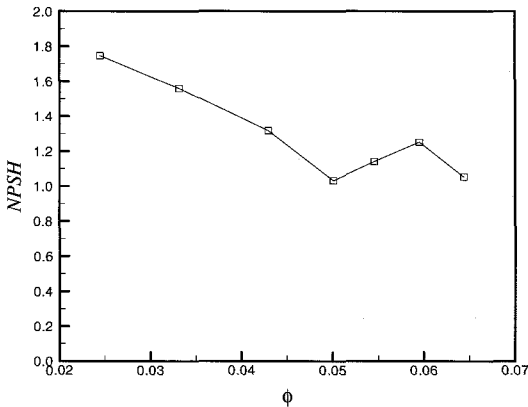


Fig. 18 NPSH versus flow rate (1800rpm)

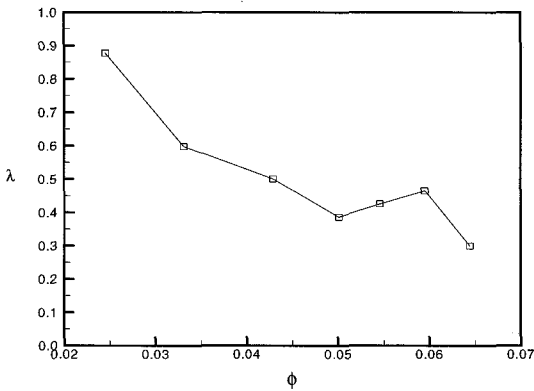


Fig. 19 λ versus flow rate (1800rpm)

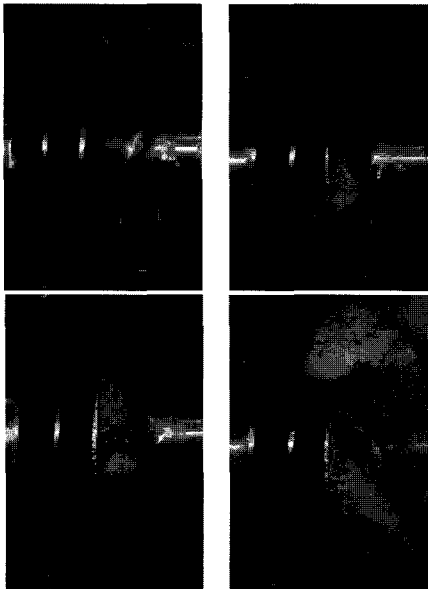


Fig. 20 Photograph of cavitation condition at $\phi=0.057$

Fig. 20은 유량계수가 0.057일 때 인듀서에서 캐비테이션이 발생했을 때의 현상을 찍은 사진이다. 왼쪽 위부터 NPSH가 감소하고 있다.

Fig. 20에서 NPSH/H는 1.85, 1.18, 0.45, 0.13이다. 특히 인듀서 팁에서 발생한 캐비테이션은 입구 역류에 의해서 상류로 역류하면서 재순환 유동 내에서 구름형상의 캐비테이션이 형성되고 인듀서를 들어가면서 사라지는 과정을 관찰할 수 있다. NPSH에 따른 캐비테이션의 거동과 특히 비정상 특성이 흥미로운 연구의 대상이나 보다 신중한 계측이 요구되기에 수행하지 못하였다.

6. 결론

본 연구에서는 터보 펌프 인듀서의 기본적인 성능 특성과 입출구 유동장 측정 그리고 캐비테이션 특성에 대하여 살펴보았다. 그리고 다음과 같은 결론을 얻었다.

인듀서의 성능 계측을 수행함으로써 캐비테이션 성능향상을 위한 그 기능을 확인하였고 성능시험 방법이 정당하게 이루어졌음을 확인하였다. 실험된 회전수 범위 내에서 압력상승 성능은 상사성을 보이거나 효율에는 점성 효과가 상당히 크다.

인듀서 입구에는 저유량일 때 상대적으로 큰 역류가 발생하며 고유량에서는 상대적으로 약한 역류가 형성된다. 이러한 역류는 인듀서 팁에서 발생한 캐비테이션을 상류로 보내면서 캐비테이션 구름을 형성하게 한다.

인듀서 출구에서의 유동장의 경우 허브에서보다 슈라우드로 갈수록 속도와 압력이 증가함을 알 수 있었다. 상대유동각은 유량의 변화에 따라서 크게 변하지 않았다.

임계 NPSH는 유량의 증가에 따라서 감소하였다. 이는 저유량에서 유동의 영각이 증가하고 역류가 왕성해 지는 결과라고 생각한다.

인듀서의 기초 자료를 확보함으로써 향후 터보 펌프개발에 있어 인듀서 설계기술 정립을 위한 기반 자료로 사용될 수 있을 것이다.

후기

본 연구는 과학기술처가 지원하고 현대모비스가 주관으로 수행하는 민군겸용 연구사업에 의해 지원되었다. 관계자 여러분에게 감사드리는 바이다. 또 연구용 모델의 사용을 허락해준 일본 오사카 대학의 Tsujimoto

교수의 우정에 감사드린다.

참고문헌

- (1) Moore, J., Doan, A., Moore, J., 1995, "Performance Evaluation of Rocket Pump Inducers Using A Navier-Stokes Flow Code," ASME Paper FED-Vol. 227, pp. 83~91.
- (2) Tsujimoto, Y., Kamijo, K., and Yoshida, Y., 1993, "A Theoretical Analysis of Rotating Cavitation Inducers," Journal of Fluid Engineering, March 1993, Vol. 115, pp. 135~141.
- (3) Boccazzi, A., Perdichizzi, A., Tabacco, U., 1990, "Flow Field Investigation in a Low-Solidity Inducer by Laser-Doppler Velocimetry," Journal of Turbomachinery, January 1990, Vol. 112, pp. 91~97.
- (4) Kamijo, K., Yoshida, M., and Tsujimoto, Y., 1993, "Hydraulic and Mechanical Performance of LE-7 LOX Pump Inducer," Journal of Propulsion and Power, Vol. 9, No. 6, Nov.-Dec., pp. 819~826.
- (5) Lee, S., Jung, K.-H., Kim, K.-H., and Bae, I.-S., 2001, "Analysis of Cavitation and Design of High-Pressure Pump Inducer," ASME paper, FEDSM 2001-18161
- (6) 손동기, 구현철, 차봉준, 양수석, 이대성, 2002, "터보펌프 인듀서의 흡입성능에 대한 직경과 회전속도의 영향," 유체기계저널, 제5권, 제1호, pp. 27~32.
- (7) Yokota, K., Kurahara, K., Kataoka, D., Tsujimoto, Y., and Acosta, A., 1999, "A Study of Swirling Backflow and Vortex Structure at the Inlet of an Inducer," JSME International Journal, Vol. 42, No. 3, pp. 451~459.
- (8) Yoshida, Y., Tsujimoto, Y., Kataoka, D., Horiguchi, H., and Wahl, F., 2000, "Effects of Alternate Leading Edge Cutback on Unsteady Cavitation in 4-Bladed Inducers," ASME paper, FEDSM 2000-11034.
- (9) 홍순삼, 2001, *디퓨저의 비균일 차폐가 원심펌프 임펠러의 출구유동에 미치는 영향*, 서울대학교 공학박사 학위논문.
- (10) 강신형, 심창열, 염기태, 2001, *고압 터보 펌프의 설계 평가*, Technical Report, No. TML-TR36, School of Mechanical and Aerospace Engineering Seoul N. university.
- (11) Lee, S., Jung, K.-H., Kim, J.-H., Kang, S.-H., "Caritation Mode Analysis of Pump Inducer," KSME Int'l J., Vol. 16, No. 11, pp. 1497~1510.
- (12) 강신형, 염기태, 2000, "터보펌프 인듀서의 성능 실험," 대한기계학회 춘계학술대회논문집 E, pp. 637~641.