

# 터보펌프 인듀서의 성능 실험

강신형\*·염기태\*\*

## Performance Test of a Turbo Pump Inducer

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

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

### Abstract

Performance and cavitation characteristics of a turbo pump inducer which is designed for oxygen pump is experimentally investigated. It is found that the static performance of inducer is dependent on the location of inlet pressure measurement and that enough distance from inducer is ensured for accurate evaluation of performance. With the increase of flow rate, NPSH tends to decrease as opposed to pump characteristics, which seems to be due to the cavitation region.

#### 기호설명

$$L = T\omega$$

$$L_w = \rho gQH$$

$$N = \text{회전수}$$

$$NPSH = \text{유효흡입수두}$$

$$p_{in} = \text{입구 압력}$$

$$P_{01} = \text{입구 1에서의 전압}$$

$$P_{01}' = \text{입구 2에서의 전압}$$

$$P_2 = \text{출구에서의 정압}$$

$$T = \text{토크 (Nm)}$$

$$u_t = \text{블레이드 끝단속도}$$

$$v_{in} = \text{입구 속도}$$

그리스 문자

$$\beta = \text{블레이드 각}$$

$$\psi_s = (P_2 - P_{01}) / (\rho u_t^2)$$

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

$$\eta_s = L_w / L = (\rho gQH) / (T\omega)$$

$$\rho = \text{밀도}$$

$$\omega = \text{각속도}$$

### 1. 서론

로켓 터보 펌프는 속도가 빠르기 때문에 캐비테이션 현상이 발생하기 쉽다. 펌프에서 캐비테이션 현상이 발생하면 펌프의 성능이 급속히 저하된다. 이러한 성능 저하를 막기 위한 장치의 하나로 인듀서를 들 수 있다. 해외에서는 일찍부터 인듀서의 성능과 캐비테이션 특성에 대하여 활발한 연구가 수행되었다. Kamiyo<sup>(1)</sup>, Tsujimoto<sup>(2)</sup>, Huang<sup>(3)</sup>, Brennen<sup>(4)</sup>은 인듀서에서 발생하는 캐비테이션에 대해서 연구하였다. 그리

\* 서울대학교 기계항공공학부

kangsh@snu.ac.kr

\*\* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

ericsson@turbo.snu.ac.kr

고 Young<sup>(6)</sup>은 인듀서의 캐비테이션 서지에 대하여 연구하였으며, 인듀서의 성능에 대해서는 Kamijo<sup>(6)</sup>의 논문등이 있다. 그러나, 국내에서는 Lee<sup>(7)</sup>의 실험을 제외하면 인듀서에 대한 실험이 거의 이루어지지 않아서 이에 대한 고급 데이터 확보가 시급한 실정이다. 따라서, 고급 유체 기계 개발을 위해서는 반드시 필요한 각종 유체 기계에 대한 기본적인 성능 특성을 비롯한 여러 가지 기초 자료의 확보가 필수라고 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 연구 협력 관계에 있는 일본 오사카 대학의 인듀서 모델을 기초로 터보 펌프의 캐비테이션 현상을 억제할 수 있는 필수 메커니즘인 인듀서의 기본적인 성능과 캐비테이션 특성을 연구하였다.

## 2. 실험장치

### 2.1 실험장치

인듀서 성능시험은 Fig. 1과 같은 성능시험장치를 이용하여 수행하였다. 실험장치는 2.5 m<sup>3</sup> 용량의 물탱크 아래 부분에서 물을 흡입하여 위쪽으로 배출하게 되며 물탱크와 모든 배관의 재질은 스테인레스이다. 또한 인듀서 입구, 출구의 이음 부분을 제외하고는 배관의 직경은 모두 6 인치이다. 유량은 노즐 전후의 압력 차이로부터 구하였고 노즐은 장반경 노즐을 사용하였으며 유량은 노즐 뒤쪽에 설치된 게이트 밸브로 조절하였다. 수두를 측정 위해 인듀서 입구와 출구에 압력계를 설치하였다. 축동력은 토크미터와 타코미터로부터 측정하였으며, 인듀서 회전수는 모터에 연결된 인버터로 조절된다.

인듀서의 지름은 149.8mm이고 틱 간극은 0.5mm이다. 실험은 900 rpm ~ 1800 rpm에서 수행하였으며, 작동 유체는 물이다. 인듀서의 내부 유동과 캐비테이션 현상을 관측하기 위하여 인듀서 쉬라우드는 투명 아크릴로 제작하였으며 내부 지름은 150.8mm 이다. 그리고, 인듀서 출구에는 컬렉터를 장비 하여 인듀서 출구의 유동을 균일하게 하였다. 따라서, 인듀서를 빠져 나온 유체의 영향을 최소화하였다.

캐비테이션 실험을 수행하기 위하여 입구 압력

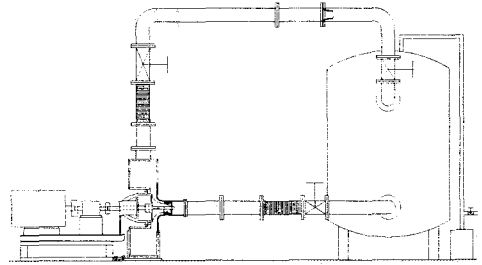


Fig. 1 Schematic of inducer test rig

을 제어하였다. 물탱크 상부에서 압력을 낮출 수 있는 진공 펌프를 설치하여 운전 중에 시스템 전체의 압력 조절이 가능하게 하였다.

### 2.2. 실험모델

본 이번 연구에 사용된 인듀서는 일본 H-2 로켓의 LE-7 엔진에 사용되는 산화제 펌프에 부착된 인듀서와 유사한 모델이다. LE-7 엔진에 사용되는 인듀서는 3장의 블레이드를 갖고 있는 반면 본 연구에 사용된 인듀서는 네 장의 블레이드를 갖고 있다. backward swept 인듀서의 블레이드 각은 선단에서부터  $r \tan \beta = \text{constant}$ 의 식을 따라 설계되었으며 자세한 형상은 Table 1에 나타내었다.

압력은 Fig. 2와 같이 입구 여섯 부분과 출구 한 부분에서 압력탭을 통하여 측정하였으며 각각의 경우에 대하여 분석하였다.

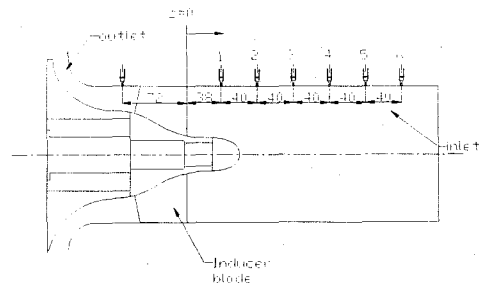


Fig. 2 Test section of inducer

### 2.3 실험방법

인듀서의 성능을 구하기 위해 수두(Head), 축동력을 측정하였다. 이들은 작동 유체의 물성치에 따라 변한다. 가장 중요한 지표인 수두(H)는 식 (1)과 같이 표시된다.

$$H = \left( \frac{p_{out}}{\rho g} + \frac{v_{out}^2}{2g} + z_{out} \right) - \left( \frac{p_{in}}{\rho g} + \frac{v_{in}^2}{2g} + z_{in} \right) \quad (1)$$

여기서 하첨자 *in* 은 인듀서의 흡입구, *out* 은 토출구를 나타낸다. 정압  $p_{in}$ ,  $p_{out}$ 은 압력계로부터 계측하였고, 속도는 계측된 유량( $Q$ )을 단면적으로 나눈 평균속도 개념으로 계산하였다.

캐비테이션과 가장 관계가 큰 변수는 NPSH로, 이는 캐비테이션을 막기 위해 인듀서의 입구에서 요구되는 최소 수두를 의미한다. NPSH의 정의는 식 (2)과 같다.

$$NPSH = \frac{p_{in}}{\rho g} + \frac{v_{in}^2}{2g} - \frac{p_v}{\rho g} \quad (2)$$

여기서 하첨자 *in*은 인듀서의 흡입구를 뜻하며  $p_v$ 는 작동 유체의 증기압을 의미한다.

## 3. 성능실험 결과

### 3.1 성능실험 결과

회전수의 변화에 따른 인듀서의 수두를 Fig. 3과 4에서 나타내었다. x축은 유량을 무차원화 하였고, y축은 수두를 무차원화 한 것을 나타낸다.

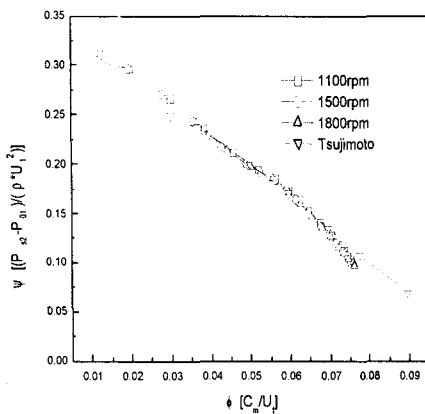


Fig. 3 Non-dimensionalized performance map (Reference inlet pressure : No. 4)

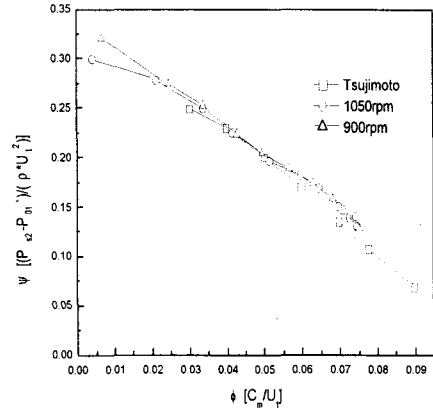


Fig. 4 Non-dimensionalized performance map (Reference inlet pressure : No. 1)

Fig. 3과 Fig. 4에서 보면 유량이 증가할수록 수두는 감소함을 알 수 있다. 그리고 본 연구에서는 실험 데이터의 객관성 확보를 위해 Tsujimoto<sup>(8), (9)</sup>의 자료와 비교하였으며, 전체 유량에서 잘 일치하였다. Fig. 4에서 다만 입구 압력을 No. 1에서 측정하는 경우 유량이 커지면 No. 4에 비해 No. 1의 성능이 증가하였다. 이는 인듀서와 가까운 위치에 있는 No. 1이 이차유동의 영향을 받기 때문으로 생각된다.

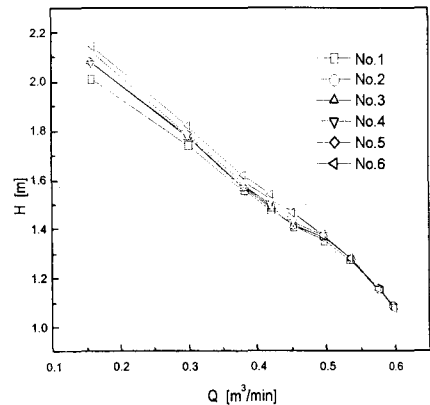


Fig. 5 Performance curve of inducer

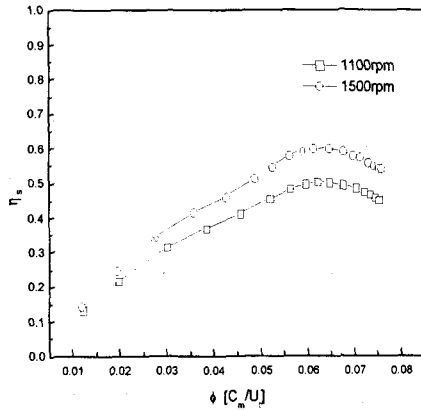


Fig. 6 Efficiency curve of inducer

Fig. 5에서 이 사실을 확인할 수 있다. 인듀서에서 가까운 쪽일수록 저유량에서는 수두가 떨어지며 중유량 이상이 되어야 각각의 압력 계측 위치와 상관없이 결과들이 일치하고 있다.

Fig. 6은 각각의 회전수에 따라 인듀서의 효율을 나타낸 것이다. 전반적으로 1100rpm보다 1500rpm에서 2 ~ 10%가량 높은 효율이 측정되었다.

### 3.2 캐비테이션 성능실험 결과

Fig. 7에서는 유량에 따른 NPSH와 수두의 관계를 나타내었다. 유량이 커질수록 수두는 낮아지는 경향을 보인다. 여기서 입구 압력은 No. 1에서 측정한 데이터이다. No. 1과 No. 4의 차이는 Fig. 8에서 비교하였다. 위의 Fig. 3과 4의 차이와 같이 Fig. 8에서도 10%정도의 수두 차이를 보이며 이는 역시 이차 유동의 영향으로 생각된다. Fig. 7과 8에서 보이는 NPSH가 감소함에 따라 평균 수두가 3% 감소하는 지점을 캐비테이션이 발생하는 지점이라 가정하고 여기서의 수두와 유량의 상관 관계를 나타낸 것이 Fig. 9이다. Fig. 9에서는 일반적으로 펌프에서는 유량이 증가할수록 NPSH가 증가하지만, 본 인듀서에서는 유량이 증가할수록 NPSH가 감소하는 특성을 나타내었다. 이런 현상은 Lee<sup>(7)</sup>의 실험 결과에서도 나타났었다. 이는 캐비테이션이 발생하면 기포가

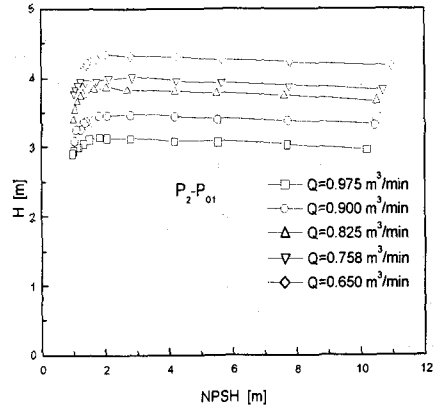


Fig. 7 NPSH versus head (1800 rpm)

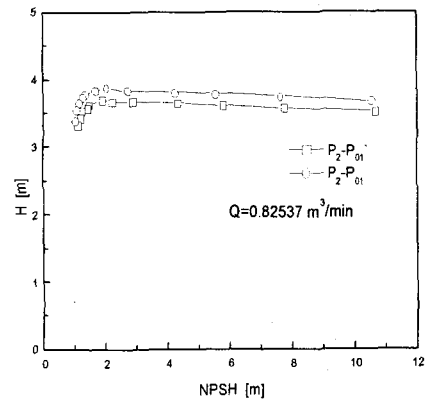


Fig. 8 NPSH versus head (1800 rpm)

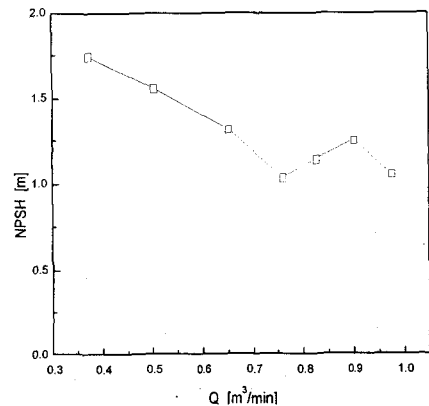


Fig. 9 Flow rate versus NPSH (1800 rpm)

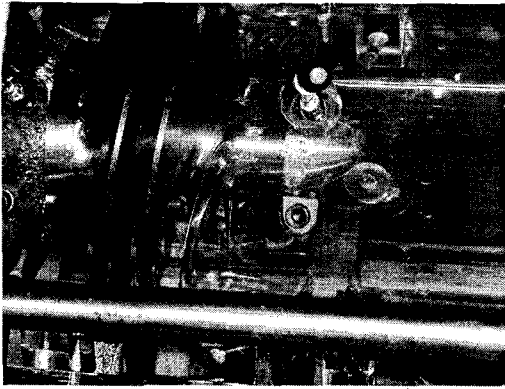


Fig. 10 Photograph of inducer at cavitation condition (NPSH = 2.5 m, 1800 rpm,  $\phi=0.07$ )

유로의 대부분을 막는 펌프와는 달리 인듀서는 흡입면의 입구 일부분과 hub 부분에서만 버블이 발생하므로 유로 잠식이 펌프에 비하여 크지 않고, 수두 또한 펌프에 비하여 작기 때문에 생각된다.

Fig. 10과 11은 1800rpm,  $\phi=0.07$ 일 때 캐비테이션을 촬영한 사진으로서 인듀서 블레이드의 캐비테이션 발전을 보여준다. Fig. 9에서는 블레이드 팁에만 약간의 캐비테이션 기포가 생긴 것을 볼 수 있으나 Fig. 10에서는 캐비테이션 기포가 많이 발전해서 유동에 심각한 장애를 초래하는 것

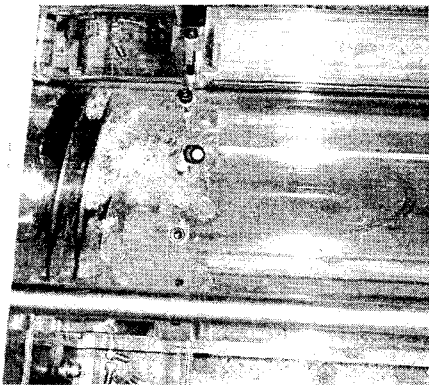


Fig. 11 Photograph of inducer at cavitation condition (NPSH = 1 m, 1800 rpm,  $\phi=0.07$ )

을 보여준다. 다만 Fig. 8에서 유량계수 0.07부터 0.09 사이에서 전체 경향과는 무관하게 NPSH가 증가하는 경향을 보이는 것은 시스템의 특성과 상관 있을 것으로 보여진다.

#### 4. 결론

터보 펌프에 사용되는 인듀서의 성능과 캐비테이션 특성을 실험적으로 연구하였으며 다음의 결론을 얻었다. 인듀서의 성능은 해외 논문과 비교할 때 비교적 결과가 잘 일치하고 있다. 여러 가지 입구 조건을 비교하였을 때 인듀서 블레이드로부터 어느 정도 일정한 거리가 떨어진 지점에서 입구 압력을 측정하는 것이 좀더 정확한 결과를 얻는데 도움이 된 것을 알 수 있었다. 캐비테이션 특성은 NPSH가 서서히 낮아지면 수두가 어느 정도 계속 증가하다가 NPSH가 매우 낮을 때 수두가 급격히 감소하는 것을 잘 나타내고 있으며 캐비테이션이 발생해서 수두가 감소했다고 가정하는 지점을 모으면 유량이 증가할수록 NPSH가 감소함을 잘 나타내고 있다.

#### 5. 후기

본 연구는 과학기술처가 지원하고 현대모비스가 주관하는 민군겸용 연구사업에 의해 지원되었다. 관계자 여러분에게 감사드리는 바이다.

#### 참고문헌

- (1) Kamijo, K., Shimura, T., Watanabe, M., 1977, "An Experimental Investigation of Cavitating Inducer Instability," ASME Paper No.77-WA/FW-14.
- (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) Huang, J. D., Aoki, M., and Zhang, J. T., 1998, "Alternative Blade Cavitation on

- Inducer," *JSME International Journal*, Vol. 41, No. 1, pp. 1~6.
- (4) Brennen, C. E., and Acosta, A. J., 1976, "The Dynamic Transfer Function for a Cavitating Inducer," *ASME Journal of Fluid Engineering*, pp. 182~191.
- (5) Young, W. E., et al., 1972, "Study of Cavitation Inducer Instabilities, Final Report," NASA-CR-123939.
- (6) 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.
- (7) 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, No. FEDSM 2001-18161.
- (8) 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.
- (9) 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, No. FEDSM 2000-11034.