

끝틈새가 터보펌프 인듀서의 성능에 미치는 영향

홍순삼* · 김진선* · 최창호* · 김진한*

Effect of Tip Clearance on the Performance of a Turbopump Inducer

Soon-Sam Hong*, Jin-Sun Kim*, Chang-Ho Choi*, Jinhan Kim*

Key Words : Tip clearance(끝틈새), Turbopump(터보펌프), Inducer(인듀서), Cavitation(캐비테이션)

ABSTRACT

Experiments were performed to see the effect of radial tip clearance on a turbopump inducer, which has two blades with inlet tip blade angle of 7.8 degree and tip solidity of 2.7. Hydraulic and cavitation tests were done for three cases of tip clearance ratio, that is, 0.026, 0.053, and 0.079. With increase in the tip clearance, inducer head and pressure on the inducer tip decreased. Attached cavitation and cavitation surge were found in the cavitation tests. In the attached cavitation one cell rotated at the same rotational speed as that of the inducer. Cavitation performance deteriorated with increase in the tip clearance. The level of casing vibration increased in the cavitation condition and the level was very high when the attached cavitation appeared.

1. 서론

터보펌프는 액체로켓에서 연료와 산화제를 연소실에 공급하기 위하여 사용된다. 높은 양정과 많은 유량을 요구하는 터보펌프에서는 주 임펠러 전방에 인듀서를 장착함으로써 정압상승을 통하여 캐비테이션 현상을 억제한다. 따라서 액체로켓에 사용되는 터보펌프의 성능을 증가시키기 위한 노력의 일환으로 인듀서의 캐비테이션 특성에 관한 많은 연구^{(1)~(7)}가 있어 왔는데 캐비테이션에 관한 연구는 해석 및 예측이 어렵기 때문에 실험에 많이 의존하고 있다. 특히 최근에는 비정상 캐비테이션에 대한 연구^{(1)~(4)}가 활발히 진행되고 있다.

Tsujimoto 등⁽²⁾은 3개의 날개를 가진 인듀서에 대

한 시험을 통하여 몇 가지의 비정상 캐비테이션 현상에 대하여 고찰하였는데 회전 캐비테이션, 부착 캐비테이션, 캐비테이션 서지 등이 이에 해당되며 회전 캐비테이션의 회전 속도는 인듀서의 1.1~1.3배로서 인듀서보다 더 빨리 회전하고 부착 캐비테이션은 인듀서와 동일한 속도로 회전한다고 하였다. 보통 회전 캐비테이션은 날개수가 홀수인 경우에, 부착 캐비테이션은 날개수가 짝수인 경우에 발생한다고 알려져 있다.

한국항공우주연구원에서는 몇 가지 인듀서 형상 파라미터에 대한 연구가 진행되어 왔는데 홍순삼 등⁽⁵⁾은 인듀서의 현절비를, 김진선 등⁽⁶⁾은 인듀서 날개각을 형상파라미터로 하여 인듀서 성능특성을 살펴보았는데 주로 정상상태의 성능특성을 다루었다. 홍순삼 등⁽⁴⁾은 인듀서 날개각 변화에 따른 비정상 캐비테이션 현상의 변화에 대한 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 인듀서의 끝틈새를 형상 파라미터로 설정하고 정상상태 성능 및 비정상 캐비테이션 특성에 대하여 고찰하였다.

* 한국항공우주연구원 터보펌프개발그룹
E-mail : sshong@kari.re.kr

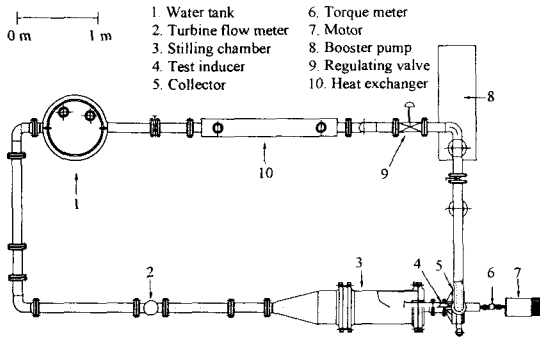


Fig. 1 Plane view of test loop

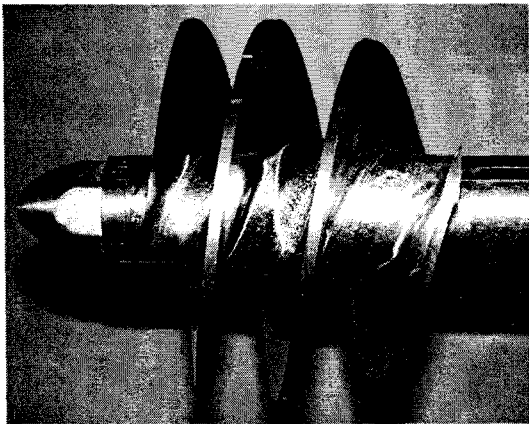


Fig. 2 Test inducer

캐비테이션 시험 중 인듀서 상류에 고응답 압력센서를 원주방향으로 설치하여 캐비테이션의 비정상 특성을 고찰할 수 있도록 하고 또한 베어링 캐리어에 가속도계를 설치하여 진동 특성도 파악하도록 하였다.

2. 시험장치

인듀서 시험기는 폐쇄형으로 Fig. 1과 같이 구성되어 있다. 0.9톤 용량의 탱크에 저장된 물이 순환되며 진공 펌프 및 압축 공기를 이용하여 탱크 내부 압력을 조절함으로써 인듀서 입구 압력이 조절된다. 탱크 상류에 수냉식 열교환기를 설치하여 실험하는 동안에 온도상승 효과를 최소화하였다. 양정이 작은 인듀서를 단독 실험할 때는 관로손실에 의하여 운용 가능한 유량에 제약이 있으므로 부스터 펌프를 콜렉터 하류에 설치하여 운용 유량을 증가시켰다. 인듀서는 전기모터로 구동되는데 모터는 37 kW 출력이며 인버터를 이용

Table 1 Inducer geometry and operating condition

Radial clearance, c [mm]	1.0	2.0	3.0
Inlet blade height, H [mm]	38		
Clearance ratio, c/H	0.026	0.053	0.079
Inlet tip diameter [mm]	106		
Outlet tip diameter [mm]	78		
Inlet tip blade angle [°]	7.8		
Outlet tip blade angle [°]	13.2		
Blade number	2		
Tip solidity	2.7		
Axial length of blade on the hub [mm]	88		
Test rotational speed [rpm]	6,000		
Nominal flow rate Q_n at 6,000 rpm [L/s]	20.5		
Inlet flow coefficient at nominal flow rate	0.073	0.070	0.067

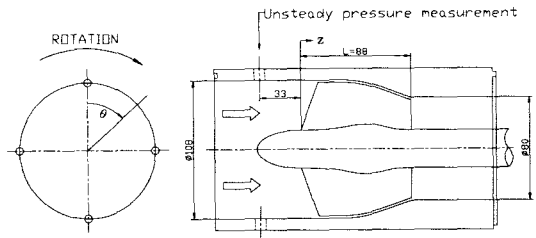


Fig. 3 Inducer test section and unsteady pressure measurement location

하여 10,000 rpm까지 회전수가 연속적으로 조절된다.

시험에 사용된 인듀서는 홍순삼 등⁽⁷⁾이 유동 및 성능 측정을 수행한 인듀서와 동일하고 날개수는 2개, 입구 끝날개각은 7.8°이다. Fig. 2에는 시험된 인듀서의 사진을, Table 1 에는 그 제원을 나타내었다. 인듀서 끝과 케이싱 사이의 반경방향 끝틈새는 세 종류가 시험되었는데, 동일한 인듀서에 대하여 내부 직경이 다른 케이싱을 조립함으로써 끝틈새를 변화시켰다. 끝틈새 비 c/H 에서 c 는 끝틈새이고 H 는 인듀서 끝반경에서 회전축반경을 뺀 길이이다. 유량계수는 인듀서 입구에서 축방향 평균 유속과 날개 끝속도의 비이다. 유량 측정에는 터빈 유량계가 이용되었으며 모든 시험에서 인듀서 축회전수는 6000 rpm으로 고정하였다. 측정된 인듀서의 양정은 컬렉터 출구 압력과 입구 안정실 압력의 차이이다.

인듀서 입구의 압력 섭동을 측정하기 위하여 Fig. 3과 같이 인듀서 상류 33 mm 지점에서 원주 방향으로 90° 간격을 두고 4 개의 고응답 압력센서를 설치하였

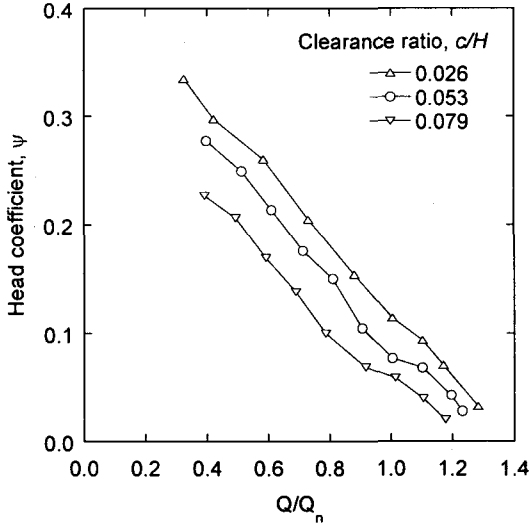


Fig. 4 Variation of inducer head with tip clearance

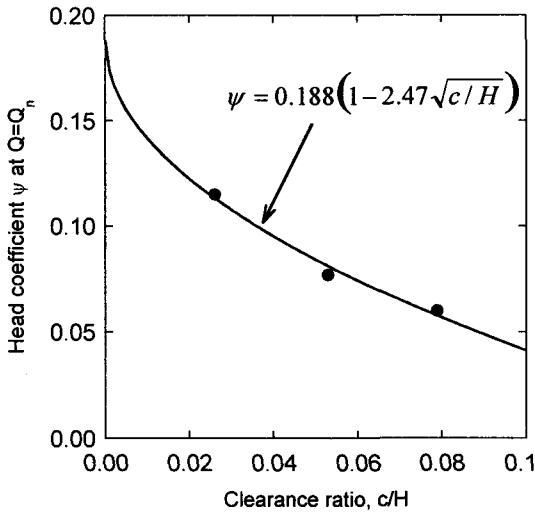


Fig. 5 Head versus tip clearance at nominal flow rate

으며 그 압력센서 신호들을 동시에 획득하였다.

3. 시험결과 및 고찰

측정된 인두서의 성능을 Fig. 4에 제시하였는데 양정계수 ψ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\psi = H / (U_{1t}^2 / 2g) \quad (1)$$

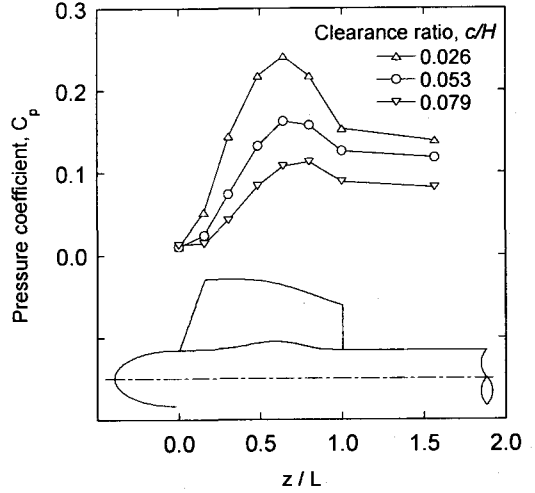


Fig. 6 Pressure distribution on inducer tip at $Q=Q_n$

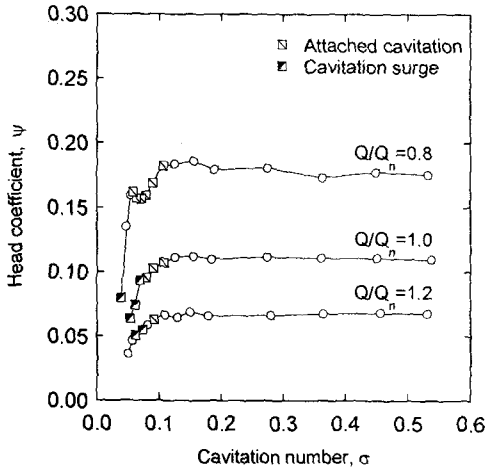
여기서 U_{1t} 는 날개 입구 끝 속도, H 는 콜렉터 출구에서 측정된 전양정을 나타낸다. Q_n 은 설계유량계수에 해당하는 유량이다. 세 가지 끝틈새의 경우에 모두 유량이 증가하면서 양정은 직선적으로 감소하는 경향을 보인다. 그리고 동일 유량에서는 끝틈새가 증가하면 양정은 감소하였다. Jakobsen⁽⁸⁾은 인두서 양정과 끝틈새 사이의 경험식을 다음과 같이 제시하였다.

$$\psi = \psi_0 (1 - k\sqrt{c/H}) \quad (2)$$

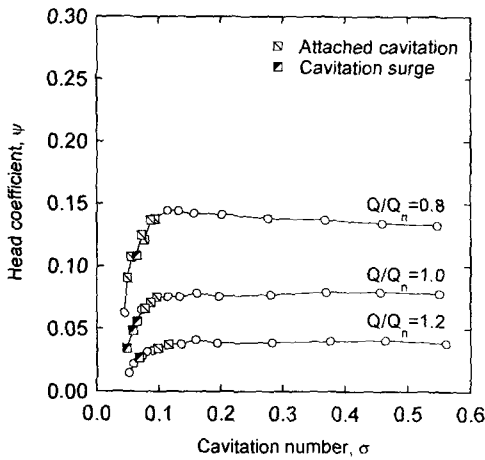
본 시험 결과로부터 구해진 계수는 $\psi_0=0.188$, $k=2.47$ 이었으며 이 결과를 Fig. 5에 제시하였다.

인두서 케이싱에서 인두서끝을 따라 측정된 압력 분포를 Fig. 6에 제시하였는데 유량조건은 $Q/Q_n = 1.0$ 이다. 이는 Fig. 4의 성능곡선에서 $Q/Q_n = 1.0$ 에 해당되는 것으로서, 성능곡선에서와 마찬가지로 끝틈새가 커질수록 압력이 낮다. $c/H=0.026$ 에서는 $z/L=0.64$ 에서 압력이 가장 높고 $c/H=0.079$ 에서는 $z/L=0.80$ 에서 압력이 가장 높다. 즉, 끝틈새가 증가할수록 압력 최고점은 인두서 후방으로 이동하고 있다. 압력 최고값은 끝틈새간에 차이가 크지만 인두서 후방으로 가면서 -인두서 출구 ($z/L=1.0$) 및 인두서 하류 ($z/L=1.57$)- 끝틈새간의 압력 차이는 감소한다.

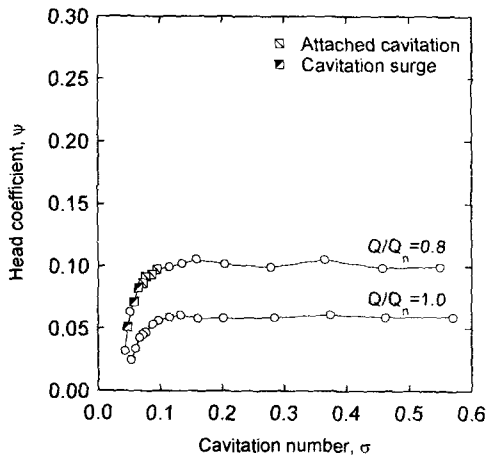
세 가지 끝틈새의 경우에 대하여 측정된 인두서의 캐비테이션 성능을 Fig. 7에 나타내었는데 유량은 $Q/Q_n = 0.8, 1.0, 1.2$ 의 세 가지이다. $c/H=0.079$ 에서



(a) $c/H=0.026$



(b) $c/H=0.053$



(c) $c/H=0.079$

Fig. 7 Cavitation performance curve of inducer

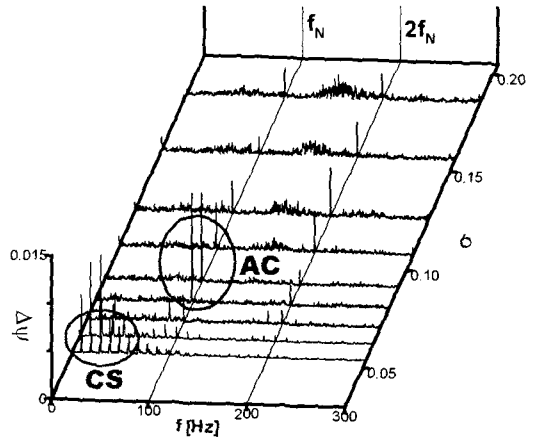


Fig. 8 Spectral analysis of inlet pressure fluctuation for $c/H=0.026$ at $Q=Q_n$: AC is attached cavitation, CS is cavitation surge

$Q/Q_n=1.2$ 인 조건은 배관 시스템 손실로 인하여 시험이 이루어지지 못 하였다. 캐비테이션 시험 중에 부착 캐비테이션 (attached cavitation)과 캐비테이션 서지 (cavitation surge) 등의 비정상 캐비테이션이 발생하였으며 Fig. 7에 그 발생 지점을 표시하였다. 캐비테이션수는 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma = NPSH / (U_{in}^2 / 2g) \quad (3)$$

비정상 (unsteady) 캐비테이션 현상을 자세히 고찰하기 위해 입구에서 측정된 압력을 푸리에 변환하였으며 그 결과를 Fig. 8에 나타내었는데 이는 $c/H=0.026$, $Q/Q_n=1.0$ 에서의 측정 결과이다. 여기서 종축은 압력섭동계수인데 압력섭동 (\bar{p})을 인두서 입구 끝 속도를 이용하여 무차원화한 값 ($\bar{p} / (0.5\rho U_{in}^2)$)이다. f_n 은 인두서의 회전 속도인 100 Hz이며 Fig. 7(a)에서 캐비테이션수 σ 가 0.2 이하인 영역만 도시 하였다. 캐비테이션수 σ 를 감소시켜가며 시험할 때 $\sigma=0.107$ 에서부터 부착 캐비테이션이 발생하였다. 그리고 $\sigma=0.070$ 에 이르면 인두서뿐만 아니라 배관 시스템 전체가 진동하는 캐비테이션 서지가 발생하였고 더 낮은 σ 에서도 캐비테이션 서지가 존재하였으며 그 진동 주파수는 10~15 Hz 이었다.

상호상관계수를 구하여 보면 모든 회전 캐비테이션은 쉘 개수가 1 개였고 회전 주파수는 100 Hz로서 인두서 회전수와 동일한 값을 보였으며 모든 캐비테이션 서지는 회전하지 않았다. 세 끝틈새에 대하여 캐비테

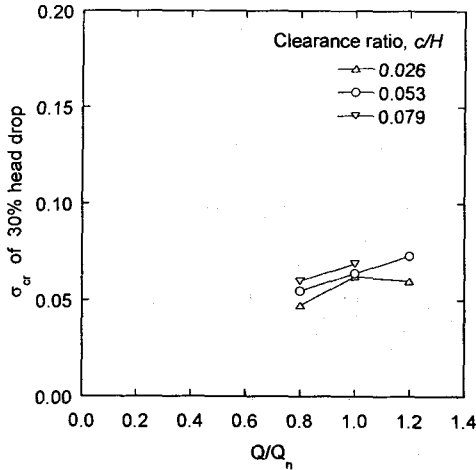


Fig. 9 Critical cavitation number versus flow rate

이선 서지의 유량에 따른 진동 주파수 변화를 Table 2에 제시하였다.

Fig. 7의 캐비테이션 성능곡선으로부터 캐비테이션 임계점을 구하여 Fig. 9에 나타내었다. 여기서 캐비테이션 임계점은, 캐비테이션이 없을 때의 양정을 기준으로 양정이 30% 만큼 감소하는 점의 캐비테이션수를 의미한다. 이 그림에서 유량이 증가하면 대체로 캐비테이션 임계점은 증가하는 경향을 보였다. 그리고 끝틈새가 크면 캐비테이션 임계점이 높아져서 캐비테이션 성능이 저하되었다.

인듀서의 진동 특성을 살펴보기 위하여 Fig. 10에서와 같이 가속도계를 베어링 캐리어 표면에 부착하였다. 인듀서는 베어링 두 개로 지지되는데 가급적 인듀서에 가까운 베어링 위에 가속도계를 설치함으로써 인듀서 유동 특성으로 인한 진동 신호가 잘 전달되도록 하였다. 캐비테이션 시험 중에 측정된 진동신호의 RMS (root mean square) 값을 Fig. 11에 제시하였는데 이 결과는 $Q/Q_n=1.0$ 에서의 결과이다. $c/H=0.026, 0.053$ 의 경우 진동량은, 캐비테이션수 σ 가 작아지면서 조금씩 증가하며 $\sigma=0.15$ 근처부터는 급격히 증가하여 $\sigma=0.08$ 에서는 최대가 되고 σ 가 더 작아지면 값이 급격히 감소한다. 또한 Fig. 7에서 볼 때, 진동량이 최대가 되는 $\sigma=0.08$ 은 인듀서 양정이 약 15% 저하된 캐비테이션수에 해당되며 근처의 진동량이 큰 구간은 부착 캐비테이션이 발생하는 캐비테이션수 영역이다. $c/H=0.079$ 의 경우에도 부착 캐비테이션이 발생하는 영역에서 진동량이 크다. 그리고 캐비테이션이 발생하는 구간에서

Table 2 Oscillating frequency of cavitation surge

c/H	0.026	0.053	0.079
$Q/Q_n = 0.8$	7Hz	13Hz	8-12Hz
$Q/Q_n = 1.0$	10-15Hz	7-15Hz	13Hz
$Q/Q_n = 1.2$	12-20Hz	18Hz	

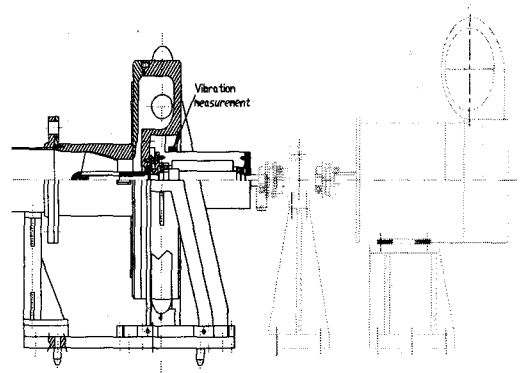


Fig. 10 Location of vibration measurement on bearing carrier

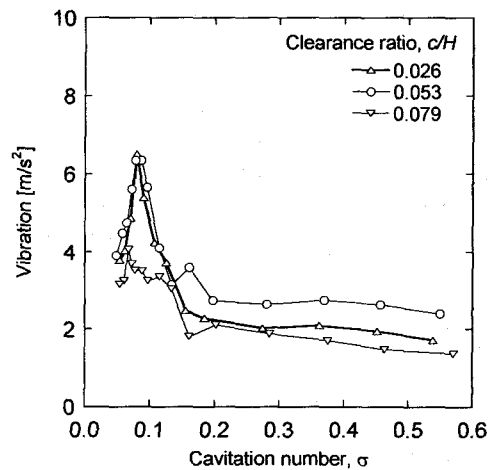


Fig. 11 RMS vibration level at Q/Q_n during cavitation test

볼 때 $c/H=0.026$ 과 0.053 의 경우는 진동량이 서로 비슷하지만 끝틈새가 더욱 커진 $c/H=0.079$ 의 경우에는 진동량이 많이 감소하여 진동 최대값이 $c/H=0.026, 0.053$ 인 경우의 약 65% 수준으로 된다.

4. 결론

터보펌프 인듀서에서 세 가지 끝틈새비 즉, $c/H=0.026, 0.053, 0.079$ 에 대하여 수력 성능 및 캐비테이션 성능을 측정하였으며 그 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

수력성능의 경우 끝틈새가 증가할수록 인듀서 양정은 감소하였으며, 양정계수와 끝틈새비 사이의 실험식을 얻을 수 있었다. 인듀서 케이싱에서 측정된 압력 분포를 볼 때, 양정 특성과 마찬가지로 끝틈새가 증가할수록 압력은 낮았으며 또한 끝틈새가 증가할수록 압력 최고점은 인듀서 후방으로 이동하는 경향을 보였다.

캐비테이션시험에서는 $c/H=0.026, 0.053$ 인 경우에 캐비테이션으로 인하여 인듀서 양정이 감소하면서 부착 캐비테이션과 캐비테이션 서지가 발생하는 것을 관찰할 수 있었는데 $c/H=0.079$ 인 경우에는 적은 유량 조건에서 위의 캐비테이션 현상이 발생하였다. 부착 캐비테이션의 셀 개수는 1개이고 그 회전 속도는 인듀서 회전 속도와 동일하였다. 캐비테이션 서지는 회전하지 않았으며 그 진동 주파수는 7~20 Hz이었다.

캐비테이션 임계점은 유량이 증가하면 대체로 증가하는 경향을 보였다. 그리고 끝틈새가 증가하면 캐비테이션 성능이 저하되었다.

캐비테이션 시험 중에 베어링 캐리어에서 진동량을 측정하였는데 끝틈새비 $c/H=0.026, 0.053$ 의 경우에, 캐비테이션이 진행되어 인듀서 양정이 약 15% 저하될 때 진동값이 최대가 되었으며 부착 캐비테이션이 발생하는 영역에서 진동량이 컸다

참고문헌

- (1) Lee, S., Jung, K., Kim, J., Kang, S., 2002, "Cavitation Mode Analysis of Pump Inducer," *KSME International Journal*, Vol. 16, pp. 1497~1510.
- (2) Tsujimoto, Y., Yoshida, Y., Maekawa, Y., Watanabe, S., Hashimoto, T., 1997, "Observations of Oscillating Cavitation of an Inducer," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 119, pp. 775~781.
- (3) Furukawa, A., Ishizaka, K., Watanabe, S., 2002, "Experimental Study of Cavitation Induced Oscillation in Two Bladed Inducers," 4th International Conference on Launcher Technology, Space Launcher Liquid Propulsion, Liege, Belgium, 3~6 December.
- (4) 홍순삼, 김진선, 최창호, 김진한, 2003, "터보펌프 인듀서의 비정상 캐비테이션에 관한 실험적 연구," 2003 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 333~339.
- (5) 홍순삼, 최창호, 김진한, 2004, "현절비가 터보펌프 인듀서의 성능에 미치는 영향," *대한기계학회논문집 B권*, 제28권, 제4호, pp. 382~388.
- (6) 김진선, 홍순삼, 최창호, 김진한, 조광래, 2003, "날개각이 터보펌프 인듀서의 성능에 미치는 영향," *한국항공우주학회 추계학술대회 논문집*, pp. 1059~1062.
- (7) 홍순삼, 구현철, 차봉준, 김진한, 2003, "터보펌프 인듀서의 출구 유동 및 성능 특성," *유체기계저널*, 제6권, 제4호, pp. 38~44.
- (8) Jakobsen, J. K., 1971, "Liquid Rocket Engine Turbopump Inducers," *NASA SP-8052*.