

# 터보펌프 인듀서의 비정상 캐비테이션에 관한 실험적 연구

홍순삼\* · 김진선\* · 최창호\* · 김진한\*

## Experimental Study on the Unsteady Cavitation of Turbopump Inducer

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

Key Words : Turbopump(터보펌프), Inducer(인듀서), Cavitation(캐비테이션), Rotating cavitation(회전 캐비테이션)

### ABSTRACT

Steady and unsteady cavitation characteristics of turbopump inducer were investigated in this paper. To see the effect of blade angle on the inducer performance, three inducers with inlet tip blade angle of 7.8°, 7.0°, 6.1°, respectively, were tested. For 7.8°, 7.0° inducers in the non-cavitating condition, head decreased linearly with flow rate, but head-flow rate curve had a dip at the flow coefficient  $\phi=0.065$  for 6.1° inducer. Rotating cavitation and cavitation surge were found in the 7.8°, 7.0° inducers in the cavitation tests. During the rotating cavitation one cell rotated at the same rotational speed as that of the inducer. The cavitation surge did not rotate and the oscillating frequency was 7~20 Hz. From the curve of the critical cavitation number versus flow rate, it was found that the steady cavitation performance of 6.1° inducer was much lower than that of 7.8°, 7.0° inducers.

## 1. 서론

액체로켓에서는 연료와 산화제를 연소실에 공급하기 위하여 터보펌프를 사용한다. 높은 양정과 많은 유량을 요구하는 액체로켓의 펌프 시스템에서는 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<sup>(1)~(7)</sup>가 있어 왔는데 캐비테이션에 관한 연구는 해석 및 예측이 어렵기 때문에 실험에 많이 의존하고 있다. 특히 최근에는 비정상 캐비테이션에 대한 연구<sup>(1)~(4)</sup>가 활발히 진행되고 있다.

홍순삼 등<sup>(6)</sup>은 인듀서 솔리디티를, 김진선 등<sup>(7)</sup>은 인듀서 날개각을 형상파라미터로 하여 인듀서 성능특성을 살펴보았는데 주로 정상상태의 성능특성을 다루었다. 본 연구에서는 터보펌프 인듀서에서 발생하는 회전 캐비테이션, 캐비테이션 서지 등의 비정상 캐비테이션에 대하여 고찰하였고 인듀서 날개각이 인듀서의 캐비테이션 성능에 미치는 영향을 조사하였다.

## 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

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

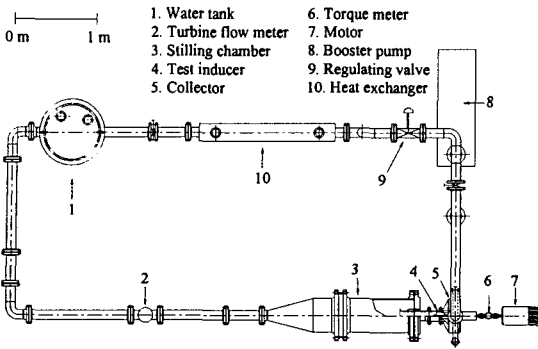
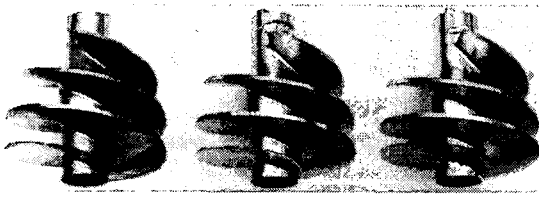


Fig. 1 Plane view of test loop



(a)  $\beta_{bit} = 7.8^\circ$  (b)  $\beta_{bit} = 7.0^\circ$  (c)  $\beta_{bit} = 6.1^\circ$   
Fig. 2 Tested three inducers

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 이용하여 10,000 rpm까지 회전수가 연속적으로 조절된다.

시험에 사용된 인듀서는 모두 세 가지인데 홍순삼 등<sup>(6)</sup>이 성능측정을 수행한 인듀서 (Inducer A)를 기본으로 하였으며 이 때 인듀서 입구팁 날개각  $\beta_{bit}$ 는  $7.8^\circ$ 이다. 인듀서 입구팁 날개각을 감소시킨 형상이 나머지 두 인듀서이며 입구팁 날개각은 각각  $7.0^\circ$ 와  $6.1^\circ$ 이다. Fig. 2에는 세 가지 인듀서의 사진을, Table 1 에는 그 제원을 나타내었다. Fig. 3에는 인듀서 입구에서

Table 1 Inducer geometry and operating condition

Inlet tip blade angle, $\beta_{bit}$ [°]	7.8	7.0	6.1
Inlet tip diameter [mm]	106		
Outlet tip diameter [mm]	78		
Outlet tip blade angle [°]	13.2	16.7	21.5
Blade number	2		
Tip solidity	2.7		
Axial length of blade on the hub [mm]	88		
Rotational speed [rpm]	6,000		
Clearance between inducer tip and casing [mm]	1.0		

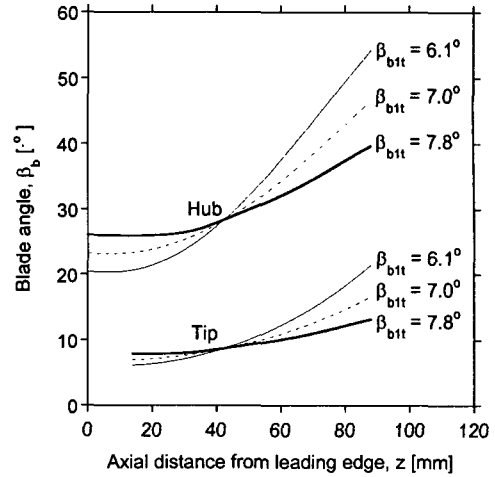


Fig. 3 Blade angle distribution

출구까지 허브와 팁에서의 인듀서 날개각 분포를 나타내었다. 세 인듀서의 팁솔리디티는 2.7로서 모두 동일하다.

인듀서 입구의 압력 섭동을 측정하기 위하여 Fig. 4와 같이 인듀서 상류 33 mm 지점에서 원주 방향으로  $90^\circ$  간격을 두고 4 개의 압력센서 (Kulite ETM-375 모델)를 설치했으며 그 압력센서 신호들을 동시에 획득하였다. 시험은 모두 6,000 rpm에서 수행되었으며 이 때 인듀서 팁과 케이싱간의 간격이 1 mm가 되도록 설치하였다.

### 3. 시험결과 및 고찰

콜렉터에서 측정된 인듀서의 성능을 Fig. 5에 무차원 형식 무차원 형식으로 표시하였는데 유량계수  $\Phi$ 와 양정계수  $\Psi$ 는 다음과 같이 정의된다.

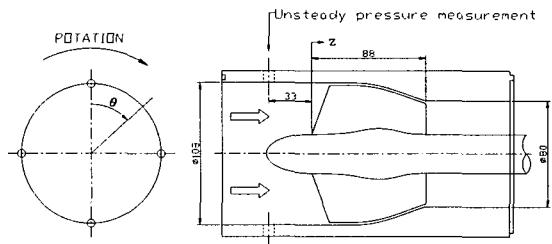


Fig. 4 Inducer test section and unsteady pressure measurement location

$$\phi = Q / (A_1 U_{1t}) \quad (1)$$

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

여기서  $Q$ 는 유량,  $A_1$ 은 인듀서 입구 단면적,  $U_{1t}$ 는 날개 입구팁 속도,  $H$ 는 콜렉터 출구에서 측정된 전압정을 나타낸다. 양정계수는 대체적으로 유량계수에 대하여 직선적으로 감소하는 경향을 보인다.  $\beta_{bit} = 7.8^\circ$ ,  $7.0^\circ$  인듀서의 경우는 양정계수 분포가 서로 비슷하다. 하지만  $\beta_{bit} = 6.1^\circ$ 에서는 양정계수 분포가 위 두 경우와 상당히 다르다. 유량계수  $\phi=0.065$ 까지는 양정계수가 급격히 감소하다가 그 이후 유량계수가 증가하면 다시 양정계수가 증가하는 형상을 보인다.  $\beta_{bit} = 6.1^\circ$  인듀서에서 이와 같이 특이한 양정계수 특성을 보이는 이유는 보충 실험과 CFD 등을 통하여 차후 더 검토할 필요가 있다. 하지만 현재까지는 Fig. 3에 표시한 바와 같이 인듀서 입구에서 출구로 가면서 날개각이 급격히 증가하기 때문인 것으로 추정된다.

세 인듀서의 캐비테이션 성능 곡선을 Fig. 6에 나타내었는데 유량계수는  $\phi=0.058, 0.073, 0.087$ 의 세 가지이다. 여기에는 회전 캐비테이션 (rotating cavitation)과 캐비테이션 서지 (cavitation surge)가 발생하는 점을 같이 표시하였다. 이 비정상 (unsteady) 캐비테이션 현상을 자세히 고찰하기 위해 입구에서 측정된 압력을 푸리에 변환하여서 Fig. 7에 나타내었는데 이는 입구팁 날개각  $\beta_{bit}=7.8^\circ$  인듀서에 대하여 유량계수  $\phi=0.073$ 에서의 측정 결과이다. 여기서 종축은 압력섭동계수인 데 압력섭동 ( $\bar{p}$ )을 인듀서 입구팁 속도를 이용하여

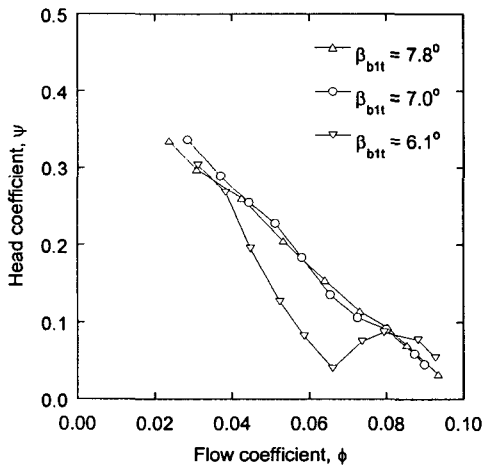
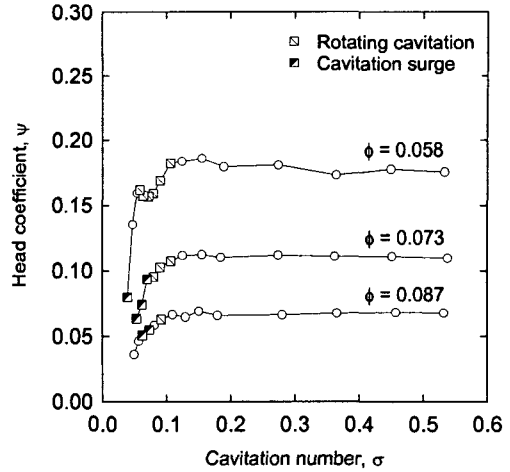
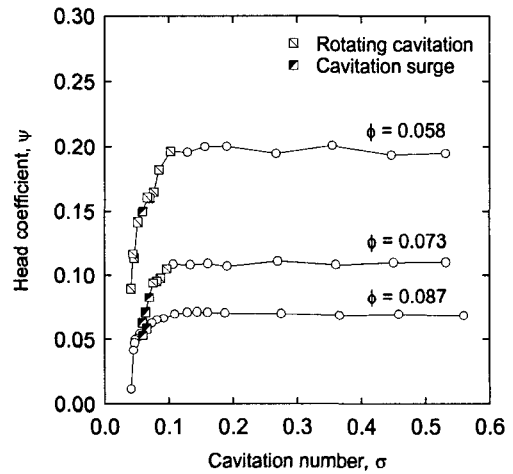


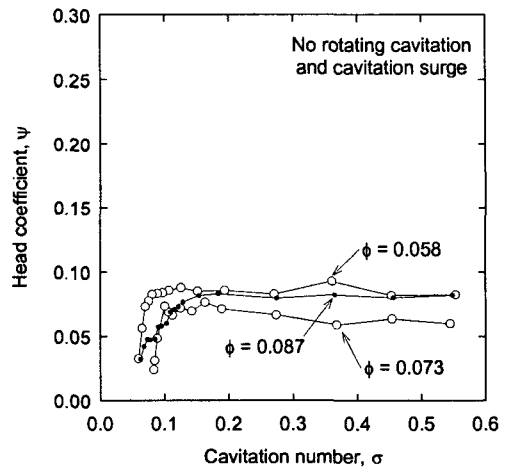
Fig. 5 Head characteristics of three inducers



(a)  $\beta_{bit} = 7.8^\circ$



(b)  $\beta_{bit} = 7.0^\circ$



(c)  $\beta_{bit} = 6.1^\circ$

Fig. 6 Cavitation performance curve of three inducers

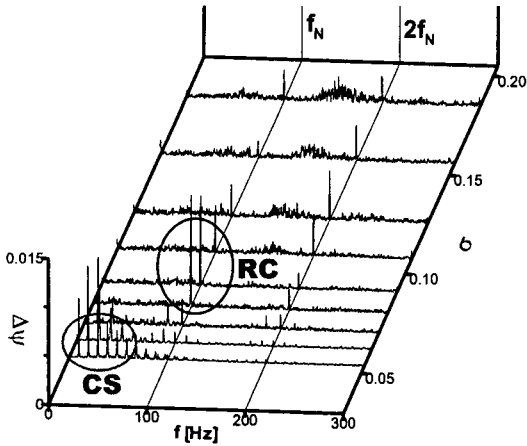
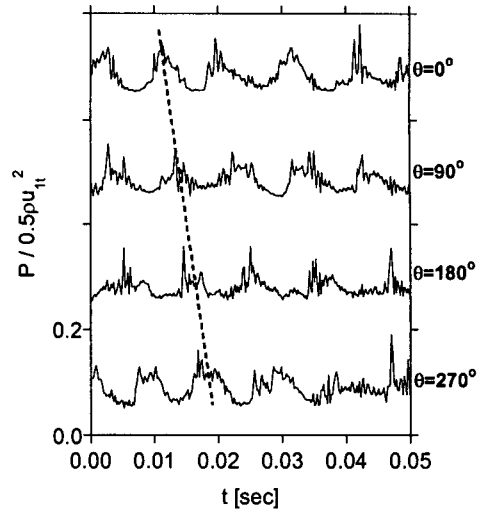


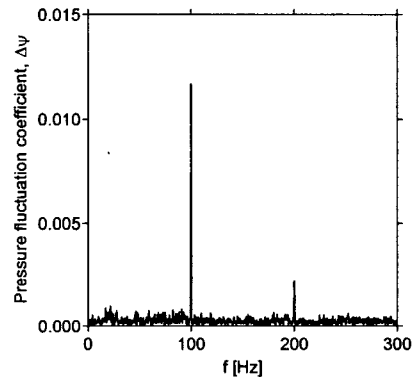
Fig. 7 Spectral analysis of inlet pressure fluctuation for  $\beta_{bl} = 7.8^\circ$  inducer at  $\phi=0.073$ : RC is rotating cavitation, CS is cavitation surge

무차원화한 값 ( $\bar{p}/(0.5\rho U_{tip}^2)$ )이다.  $f_N$ 은 인듀서의 회전 속도인 100 Hz이며 Fig. 6(a)에서 캐비테이션수  $\sigma$ 가 0.2 이하인 영역만 도시 하였다. 캐비테이션수  $\sigma$ 를 감소시켜가며 시험할 때  $\sigma=0.107$ 에서부터 회전 캐비테이션 (rotating cavitation)이 발생하였다. 그리고  $\sigma=0.070$ 에 이르면 인듀서뿐만 아니라 배관 시스템 전체가 진동하는 캐비테이션 서지 (cavitation surge)가 발생하였고 더 낮은  $\sigma$ 에서도 캐비테이션 서지가 존재하였으며 그 진동 주파수는 10~15 Hz 이었다.

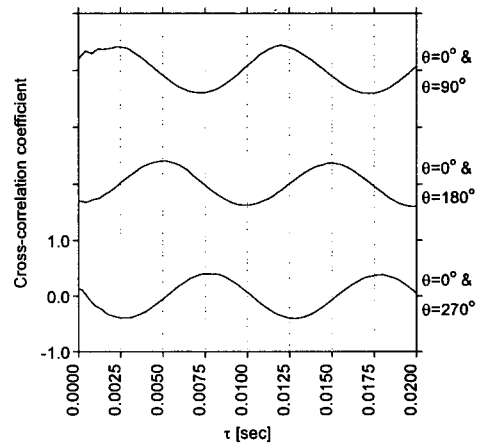
인듀서 입구에 원주방향으로 설치된 4 개 비정상 압력센서 신호의 상호상관계수 (cross-correlation coefficient)를 분석하여 캐비테이션이 회전하는지 고정된 것인지를 판별하였다. 이 방법의 예를 Fig. 8에 나타내었는데 이 그림은  $\beta_{bl}=7.8^\circ$  인듀서에 대하여 유량계수  $\phi=0.073$ , 캐비테이션수  $\sigma=0.080$ 의 경우에 대한 것이다. Fig. 8(a)에는 4 개 압력센서 신호를 시간에 대하여 나타내었는데 종축은 측정된 절대압력을 인듀서 입구팁 속도를 이용하여 무차원화한 압력계수이다. 인접한 신호끼리 일정한 시간차가 있는 것이 관찰되며 이로부터 캐비테이션 셀이 회전한다는 것을 알 수 있다. Fig. 8(a)의  $\theta=0^\circ$ 에서의 신호를 푸리에 변환하여 표시한 그림이 Fig. 8(b)인데 100 Hz 성분이 지배적이었다.  $\theta=0^\circ$ 의 신호를 기준으로 하여  $\theta=90^\circ$ ,  $\theta=180^\circ$ ,  $\theta=270^\circ$ 의 신호와 각각 상호상관계수를 계산하여 Fig. 8(c)에 나타내었다.  $\Delta\theta$ 만큼 떨어져 있는 두 신호로부터 회전하는 셀의 개수 및 속도를 다음과 같이 계산하였다 (Frigne 등<sup>(8)</sup>).



(a) Pressure signal at four circumferential locations



(b) Spectrum of inlet pressure fluctuation at  $\theta=0^\circ$



(c) Cross-correlation coefficients

Fig. 8 Inlet pressure at rotating cavitation for  $\beta_{bl}=7.8^\circ$  inducer at  $\sigma=0.080$ ,  $\phi=0.073$

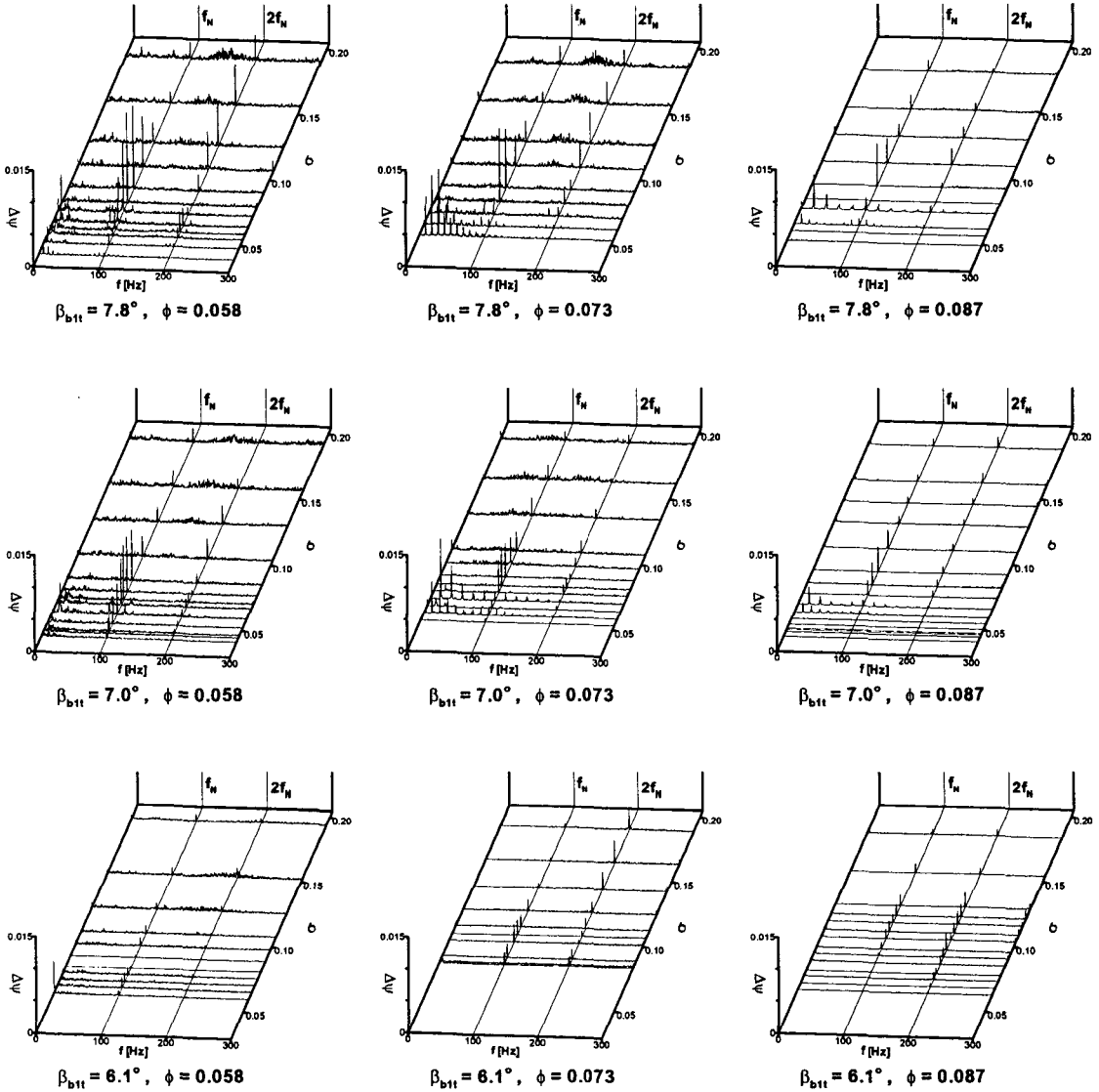


Fig. 9 Spectral analysis of inlet pressure fluctuations at three flow coefficients for three inducers

$$m = \frac{2\pi}{\Delta\theta} \cdot \frac{\tau_1}{\tau_2} \quad (3)$$

$$f_s = \frac{1}{m \tau_2} \quad (4)$$

여기서  $m$ 은 회전셀의 개수,  $\Delta\theta$  (rad/s)는 두 센서 사이각,  $\tau_1$ 은 두 신호간 시간차,  $\tau_2$ 는 주기적인 두 신호의 주기,  $f_s$ 는 회전셀이 전파되는 주파수이다. 위 식으로 계산하면 Fig. 8(c)의 경우 회전셀은 개수가 1 개이

고 그 전파 주파수는 100 Hz로서 인듀서 회전수인 6,000 rpm (=100 Hz)과 동일한 값을 가졌다. 그리고 위와 같은 방식으로 분석했을 때 Fig. 7의 캐비테이션 서지는 회전하지 않는다는 것을 알 수 있었다.

세 가지 인듀서에서 유량에 따른 푸리에 변환 결과를 Fig. 9에 모두 나타내었는데 상대 비교를 위하여 Fig. 7에 제시된  $\beta_{b1t}=7.8^\circ$  인듀서에 대한  $\phi=0.073$ 에서의 결과도 포함시켰다. 입구팁 날개각  $\beta_{b1t}=7.8^\circ$  인듀서의 경우  $\phi=0.073$ 에서  $\phi=0.058$ 로 유량이 감소하면 회전 캐

Table 2 Cell number and propagation speed ratio

		Cell number, m			Rotational speed ratio, $f/mf_N$		
		7.8°	7.0°	6.1°	7.8°	7.0°	6.1°
Rotating	cavitation	1	1		1.0	1.0	
Cavitation surge	$\phi=0.058$	0	0		7Hz	12Hz	
	$\phi=0.073$				10~15Hz	12~17Hz	
	$\phi=0.087$				12~20Hz	12~17Hz	

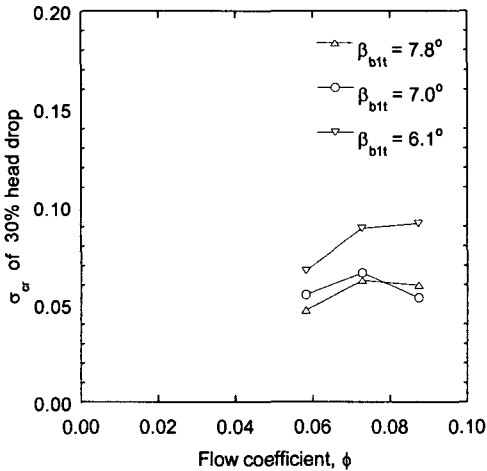


Fig. 10 Critical cavitation number versus flow coefficient

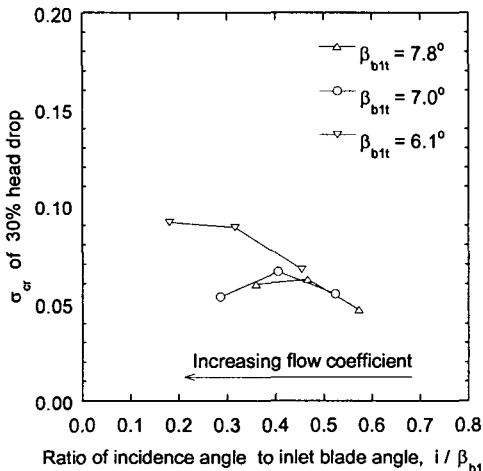


Fig. 11 Critical cavitation number versus ratio of incidence angle to inlet blade angle

비테이션의 압력섭동은 증가하였으며 캐비테이션 서지의 압력섭동은 감소하였다. 유량이  $\phi=0.087$ 로 증가하면 전체적으로 압력 섭동이 감소하였다. 입구팁 날개각이

작아진  $\beta_{bit}=7.0^\circ$  인듀서에서도 유량에 대한 압력섭동 크기의 경향이  $\beta_{bit}=7.8^\circ$  인듀서의 경우와 비슷한 양상을 보였다. 입구팁 날개각이 가장 작은  $\beta_{bit}=6.1^\circ$  인듀서에서는 캐비테이션 서지 및 회전 캐비테이션이 발생하지 않았으며 압력 섭동도 현저히 감소하였다. 상호상관계수를 구하여 보면 모든 회전 캐비테이션은 셀 개수가 1 개였고 회전 주파수는 100 Hz로서 인듀서 회전수와 동일한 값을 보였으며 모든 캐비테이션 서지는 회전하지 않았다. 세 인듀서에 대하여 회전 캐비테이션의 셀 개수와 전파 속도, 그리고 캐비테이션 서지의 진동 주파수 등을 요약하여 Table 2에 제시하였다.

Fig. 6의 캐비테이션 성능곡선으로부터 캐비테이션 임계점을 구하여 Fig. 10에 나타내었다. 여기서 캐비테이션 임계점은, 캐비테이션이 없을 때의 양정을 기준으로 양정이 30 % 만큼 감소하는 점의 캐비테이션수를 의미한다. 이 그림에서 유량계수에 따른 캐비테이션 임계점을 대체로 유량이 증가하면 캐비테이션 임계점은 증가하는 경향을 보였다. 또한 입구 날개각  $\beta_{bit}$ 가 7.8°, 7.0°일 때는 캐비테이션 성능이 서로 유사한데 입구 날개각이 6.1°으로 감소하면 캐비테이션 성능이 급격히 감소하는 것을 알 수 있다.

인듀서의 캐비테이션 성능은 입구 날개각의 영향을 많이 받는데 입구 유동의 입사각 (incidence angle)  $i$ 는 날개의 봉쇄 (blockage) 영향이 최소화되도록 선정되어야 한다. 입사각과 입구 날개각의 비  $i/\beta_{bit}$ 가 0.35~0.50의 값이 되는 것이 인듀서 캐비테이션 관점에서 좋다고 경험적으로<sup>(9)</sup> 알려져 있다. Fig. 11은 Fig. 10을  $i/\beta_{bit}$ 에 대하여 그린 것인데 대체로  $i/\beta_{bit}$ 가 클수록 캐비테이션 임계점이 감소하는 경향을 보였다. 그리고  $i/\beta_{bit}<0.3$ 인 영역에서는 캐비테이션 임계점이 매우 큰 값을 보였다.

#### 4. 결론

터보펌프 인듀서의 정상 및 비정상 캐비테이션 특성을 살펴보았으며 인듀서 입구팁 날개각의 영향을 조사하기 위하여 틱솔리디티가 2.7로서 동일할 때 입구팁 날개각을 7.8°, 7.0°, 6.1°의 세 가지로 변화시키며 실험했는데 결과를 요약하면 다음과 같다.

캐비테이션이 없을 때 성능을 비교하면, 입구팁 날개각이 7.8°, 7.0°일 때는 양정이 유량에 대하여 선형적으로 감소하는데 입구팁 날개각이 6.1°인 경우는 양정이 유량계수  $\phi=0.065$ 까지는 감소하다가 그 이상의 유

량에서는 양정이 다시 증가하는 거동을 보였다. 이는 입구에서 출구까지 인두서 날개각이 급격히 증가했기 때문인 것으로 추정된다.

입구팁 날개각이 7.8°, 7.0°인 경우 캐비테이션으로 인하여 인두서 양정이 감소하면서 회전 캐비테이션과 캐비테이션 서지가 발생하는 것을 관찰할 수 있었는데 입구팁 날개각이 6.1°인 경우에는 회전 캐비테이션과 캐비테이션 서지가 발생되지 않았다. 회전 캐비테이션의 셀 개수는 1 개이고 회전 주파수는 인두서의 회전수와 동일한 100 Hz 이었다. 캐비테이션 서지는 회전하지 않았으며 그 진동 주파수는 7~20 Hz이었다.

캐비테이션 입계점의 유량에 대한 분포를 볼 때, 입구팁 날개각이 7.8°인 경우와 7.0°인 경우는 캐비테이션 성능이 서로 비슷하지만 입구팁 날개각이 더욱 작아진 6.1°의 경우에는 캐비테이션 성능이 현저히 저하되었다.

### 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) Yoshida, Y., Tsujimoto, Y., Kataoka, D., Horiguchi, H., Wahl, F., 2001, "Effect of Alternate Leading Edge Cutback on Unsteady Cavitation in 4-Bladed Inducers," ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 123, pp. 762~770.
- (5) 구현철, 홍순삼, 차봉준, 양수석, 2002, "터보펌프 인두서의 유동특성에 관한 연구," 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 41~46.
- (6) 홍순삼, 구현철, 최창호, 차봉준, 양수석, 2002, "터보펌프 인두서의 형상변화가 성능에 미치는 영향," 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 1997~2002.
- (7) 김진선, 홍순삼, 최창호, 김진한, 조광래, 2003, "날개각이 터보펌프 인두서의 성능에 미치는 영향," 한국항공우주학회 추계학술대회 논문집 (수록예정).
- (8) Frigne, P., Van Den Braembussche, R., 1984, "Distinction between Different Types of Impeller and Diffuser Rotating Stall in a Centrifugal Compressor with Vaneless Diffuser," ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 106, pp. 468~474.
- (9) Anon., 1971, "Liquid Rocket Engine Turbopump Inducers," Space Vehicle Design Criteria Monograph, NASA SP-8052.