

## 공동현상을 고려한 펌프 인듀서 설계

정근화\* · 안광운\*\* · 이승배\* · 김진화\*\*\* · 강신형\*\*\*

### Design of Cavitation-Resistive Pump Inducer

Keun-Hwa Jung\*, Kwang-Woon Ahn\*\*, Seungbae Lee\*, Jin-Hwa Kim\*\*\*,  
Shin-Hyoung Kang\*\*\*

*Key Words: Cavitation(공동현상), NPSH(순흡입양정),  $N_s$ (비속도), Velocity Diagram(속도 삼각형),  $D_{90}$ (확산계수)*

#### ABSTRACT

The cavitation causes suction performance and efficiency of the high-speed pump to be reduced significantly. To diminish these effects, the inducer has been used. Most of the inducer is designed at a maximum efficiency point of the pump, therefore suction performance drop due to effects of flow separation and inlet inverse flow is often observed at off-design point. The objective of this study is to find out the cavitation modes at various conditions by applying event detection technique and to design an inducer reducing cavitation. The pressure fluctuations at each cavitating condition were measured at inducer inlet and outlet locations using pressure transducers, which were located 90 degrees apart from each other to identify the cavitation modes. The time-frequency characteristics were analyzed by using Choi-williams distribution. In the second part of this paper, the inducer design method which uses nominal performance characteristic and onset condition of cavitation is introduced and applied to real situation.

#### 1. 서 론

최근에 유체기계는 고속화 및 소형화되어 물을 작동유체로 취급하는 펌프의 경우 이에 따른 공동현상을 피할 수 없다. 이러한 공동현상은 국부적으로 정압이 유체의 증기압 이하로 낮아질 때 기포가 발생하는 현상<sup>(1)</sup>으로, 이렇게 발생한 기포는 하나의 군집을 이루어 장애물의 역할을 함으로써 유로를 막고 그로 인해 국부적으로 속도를 증가시켜 결국은 양정 및 효율의 감소를 초래한다. 또한, 소음진동이 발생하고 장시간 운전시에는 침식에 의한 임펠러나 케이싱등 재료의 손상을 동반하기도 한다. 이러한 공동현상의 영향은 종류

에 따라 다르다는 점에서 최근에는 공동현상의 발달에 따른 모드의 종류와 그 시작점을 찾기 위한 연구가 활발히 진행중이다.

공동현상을 줄이기 위해 많은 방법들이 제시되고 있지만, 현재로써는 우주로켓의 연료 공급용으로 개발된 인듀서가 유효함이 입증되어 널리 사용 및 연구되어지고 있다. 인듀서는 펌프 임펠러 직전에 설치되는 축류 임펠러의 일종으로 큰 현절비에 비해 짧은 축방향 길이를 가지며 양정의 상승은 그리 크지 않은 것을 특징으로 한다.<sup>(2)</sup> 또한, 펌프의 흡입성능을 향상시켜 임펠러의 넓은 작동 범위를 제공하며 일반적으로 공동현상이 발생하는 흡입비속도를 높게 된다. 따라서 본 연구에서는 섭동하는 압력 신호에 대한 주파수 특성을 통하여 공동현상의 모드와 이벤트의 지속시간 및 기포군집의 개수를 파악하고자 하였으며, 주어진 운전

\* 인하대학교 기계공학과

\*\* (주) 에어로네트

\*\*\* 서울대학교 기계항공공학부

상태를 만족시키는 최적의 인듀서 및 공동현상의 발생 시의 설계방법을 시도하여 인듀서를 통한 펌프의 고효율화를 목적으로 하였다.

## 2. 실험장치 및 결과

### 2.1. 실험장치

Figure 1은 본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도이다. 작동유체는 물로써 2.5m<sup>3</sup>의 용량을 가진 압력탱크부터 흡입관을 통해 인듀서로 유입되었다. 유량은 노즐 전후의 압력 차이로부터 구하였으며 뒤쪽에 설치된 게이트 밸브로 조절하였다. 양정은 입구와 출구에 위치한 압력계를 통해 측정하였으며 내부의 유동을 관찰하기 위해 케이스는 투명아크릴로 제작하였다. 또한, 인듀서를 빠져나간 유동의 균일화를 위해 컬렉터를 사용하였으며, 공동현상의 발달과정을 관찰하기 위해 압력탱크 상단부에 압력을 낮출 수 있는 진공펌프를 설치하여 입구 압력을 제어하였다.

실험에 사용된 인듀서는 일본 H-2 로켓의 LE-7 엔진에 사용되는 산화제 펌프에 부착된 것과 유사한 모델이며 실제 로켓에 사용된 임펠러는 3장인데 반해 본 인듀서는 4장의 임펠러를 가지고 있다. 후향으로 스위핑된 인듀서의 임펠러 각은 끝단으로부터  $r \tan \beta = \text{const}$ 의 식을 따라 설계되었으며, 자세한 형상계수는 Table 1에 나타나있다.<sup>(3)</sup>

공동현상의 발생시의 압력신호를 측정하기 위해 1/2" 압력 센서(Trans-metrics, P037D) 2개를 인듀서 상류와 하류에 10mm 간격으로 플러시 마운트하여 설치하였다. 또한, 회전하는 공동현상의 신호분석을 위해 90° 간격으로 센서를 설치하여 섭동하는 압력을 측정하였다. 데이터는 각 채널당 30kHz의 획득시간으로 A/D 보드를 통해 노트북에 저장, Labview® 프로그램으로 분석하였다.

### 2.2. 실험결과

Figure 2과 Fig. 3은 유량에 따른 양정과 효율의 변화를 나타내는 그래프이다. 최고 효율점에서의 유량계수는  $\phi=0.15$ 이다.

Figure 4는 유량계수가 일정한 상태에서 NPSH<sub>a</sub>를 저하시켜 나갈 때 양정의 변화를 나타내는 그래프이다. NPSH<sub>a</sub>는 입구에서의 전체 양정과 증기압 양정의 차이

를 나타내는 물리량으로 공동현상의 발생가능성을 나타낸다.

$$NPSH_a = \frac{P_{in}}{\rho g} + \frac{C_m^2}{2g} - \frac{P_{vap}}{\rho g} \quad (1)$$

이 그래프에서 일정하게 양정이 유지되다 3% 양정이 감소하는 점을 일반 산업체에서는 공동현상의 시작점으로 보고 있다. Fig. 5는 이러한 공동현상의 시작점인 NPSH<sub>a</sub>를 나타낸 그래프이다. 보는 봐와 같이 최고 효율점에서 NPSH<sub>a</sub>이 최소값을 가지는 것을 알 수 있다. 이는 설계점에서 공동현상이 일어날 가능성이 가장 적음을 말해준다.

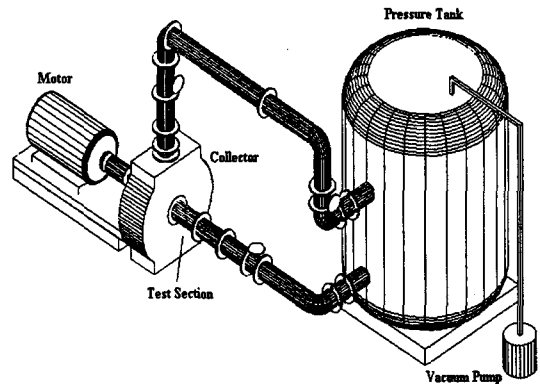


Fig. 1 Schematic of inducer test facility

Table 1 Specification of Inducer

Number of blades	4 ea
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
Blade thickness at inlet hub	6 mm
Leading edge radius	0.2 mm
Solidity at tip	2.97

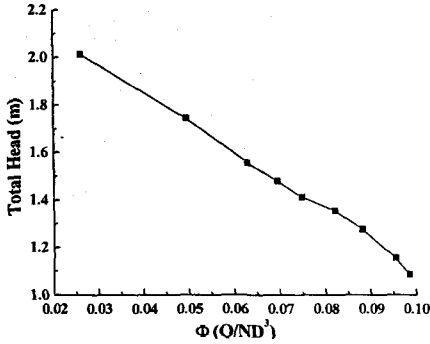


Fig. 2 Total head variation with flow coefficient

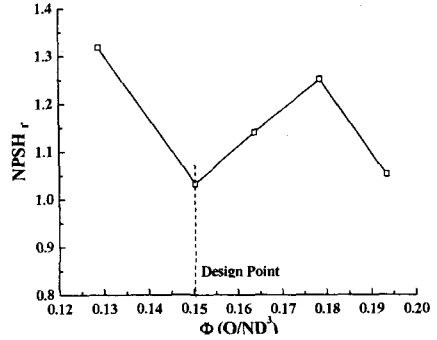


Fig. 5 NPSH required as 3% head reduction

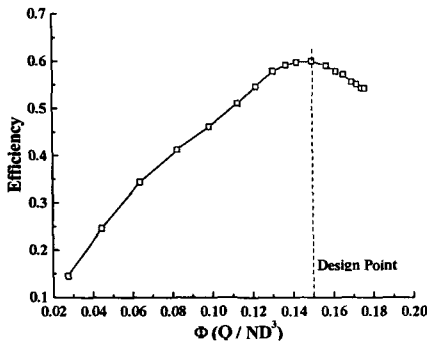


Fig. 3 Efficiency as flow coefficient

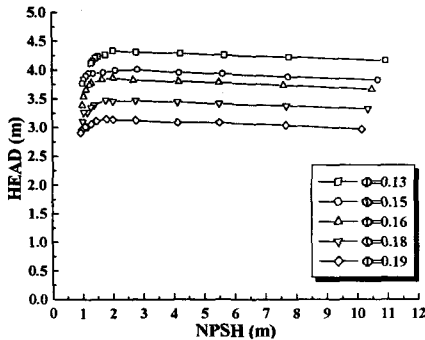


Fig. 4 Head variation with respect to NPSHs

### 3. 신호분석 방법 및 결과

#### 3.1. 신호분석 방법

상호스펙트럼밀도함수에서 스트롤수  $St$ 에 대한 위상각을  $\phi$ 라고 하면 공동현상 모드의 주파수는 다음 식으로 정의할 수 있다.

$$\omega_m = \frac{\phi \times 2\pi}{\Delta t \times 360} = 2\pi f_m, \quad \Delta t = \frac{1}{St \times BPF} \quad (2)$$

위의 식을 다시 정리하면,

$$f_m = \frac{\phi \times St \times BPF}{360} \quad (3)$$

이다. 또한, 기포군집의 개수는 계측기 사이의 각  $\theta$ 와 위상각  $\phi$ 에 대해 다음 식으로 정의할 수 있다.<sup>(4)</sup>

$$m = \frac{\phi}{\Delta\theta} \quad (4)$$

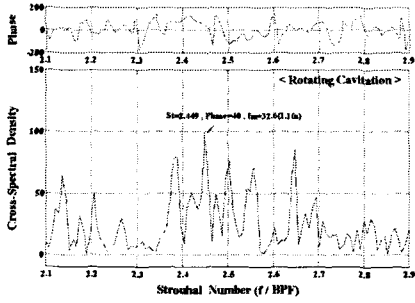
Yoshida et al.<sup>(5)</sup>은 축회전주파수  $f_n$ (rps)에 대해  $2f_n$  성분은 동일길이 공동현상,  $f_n$ 은 교호 공동현상,  $1.1 \sim 1.5f_n$ 는 회전 공동현상, 그리고  $5 \sim 10\text{Hz}$ 사이의 값에서는 공동현상 서지가 발생함을 실험으로 확인했다. 본 논문에서는 입구에서의 상호스펙트럼밀도함수로 얻은 주파수의 성분과 전술한 공동현상의 주파수 특성을 비교하여 기포군집의 개수를 계산하였으며, 출구에서는 시간-주파수 특성을 확인하는 Choi-Williams 분포를 통해 이벤트의 주파수 성분과 지속시간을 알아보았다.

#### 3.2. 신호분석 결과

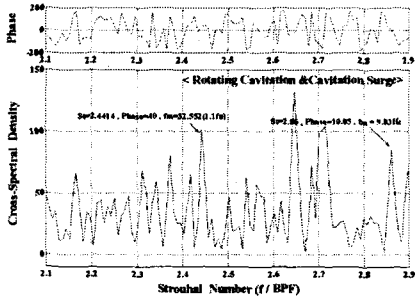
Figure 6은 유량계수  $\Phi=0.15$ 에서 공동현상의 발달에 따른 입구에서의 상호스펙트럼밀도함수를 도시한 그림으로  $NPSH_a=1.5\text{m}$ 일 때는 끝단 외에 의한 회전 공동현상이 발생하며, 입구의 압력을 더 낮추면 회전하는 공동현상과 더불어 공동현상 서지도 일어남을 확인할 수 있다. Fig. 7은 출구에서의 이벤트 분포를 나타내는 그림으로 입구에서 발생한 기포군집이 후류에서의 압력상승에 의해 내파되면서 고주파의 이벤트가

Table 2 Signal Analysis Results at Inlet and Outlet

NPSH <sub>a</sub>	Inlet		Outlet	
	Mode	Cell No.	Frequency	Duration
1.5 m	Rotating	2	527,790	0.2msec
0.5 m	Surge	Entire	1320,1490	0.5msec

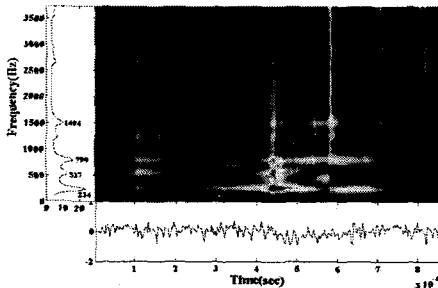


(a) NPSH<sub>a</sub> = 1.5 m

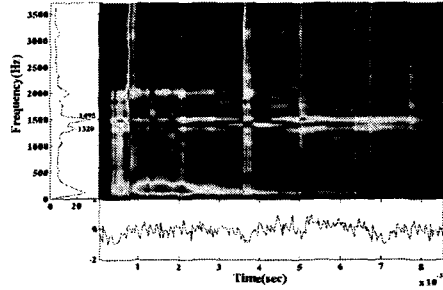


(a) NPSH<sub>a</sub> = 0.5 m

Fig. 6 Cross-spectral density at inlet ( $\phi=0.15$ )



(a) NPSH<sub>a</sub> = 1.5 m



(a) NPSH<sub>a</sub> = 0.5 m

Fig. 7 Choi-Williams distribution at outlet ( $\phi=0.15$ )

또한, 출구에서 1회전에 대해 NPSH<sub>a</sub>=1.5m 에 대해서는 4개의 이벤트가 발생했으며, NPSH<sub>a</sub>=0.5m에 대해서는 12개의 이벤트가 관찰되었다.

#### 4. 인듀서의 설계

설계에 필요한 변수는 유량(Q), 양정(H), 회전수(N), 끝단과 허브의 직경(D<sub>t</sub>, D<sub>h</sub>), 끝단에서의 현절비( $\sigma=C/S$ ), 입구에서의 압력(P<sub>in</sub>)과 온도(T)이다. 주어진 변수의 값을 만족하는 최적의 임펠러 설계를 수행한 후 임펠러 중앙유선부에서의 값을 통해 얻은 NPSH<sub>r</sub>의 값이 입구의 조건으로 구한 NPSH<sub>a</sub>보다 큰 경우에 공동 현상에 대한 설계를 수행하였다.

##### 4.1. 일반작동

본 설계에서 사용되어진 비속도는 식 (5)로 정의되며, 축류형인 경우 1200에서 2000사이의 값을 가진다. 이는 펌프의 종류 및 형태를 결정하는 매개변수로 사용되어진다.

$$N_s = \frac{N\sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad (5)$$

위의 식을 통해 얻은 값과 유량 및 효율의 관계식으로 펌프의 효율을 결정하고, 수력효율의 정의로부터 이론적인 양정(H<sub>th</sub>)을 구할 수 있다. Fig. 8은 임펠러 입구와 출구에서의 속도 삼각형으로 입구에서의 스윙은 없다고 가정하였다. 속도삼각형으로부터 허브에서 끝단까지의 회전속도(U)와 절대속도의 회전성분(C<sub>ω</sub>)을

발생한 것을 알 수 있다. Table 2는 입구에서의 출구에서의 신호분석 결과를 나타낸다.

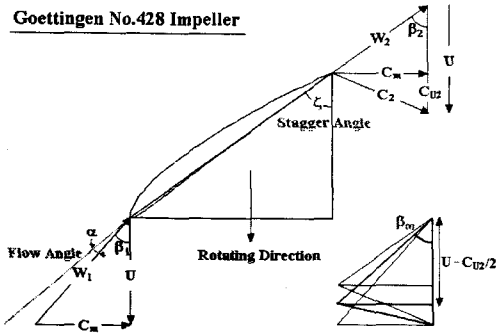


Fig. 8 Velocity Diagram at Inlet and Outlet

오일러 공식을 통해 얻을 수 있으며, 평균상대속도와 평균상대각도의 정의는 다음과 같다.

$$W_{\infty}^2 = C_m^2 + (U - C_{u2}/2)^2 \quad (6)$$

$$\beta_{\infty} = \tan^{-1}[C_m / (U - C_{u2}/2)] \quad (7)$$

양력과 항력간의 관계인  $\lambda$ 를  $1^\circ$ 로 가정하여 양력을 식 (8)를 사용하여 구하고 날개의 최대 두께와 코드와의 비( $Y_{\max}/C$ )를 중앙유선부에서 0.085로 가정하여 중앙유선부의 직경에 대한 각 직경의 비로 허브에서 끝단까지의 값을 구하였다.

$$C_L = \frac{2gH_{th}C_m \cos \lambda}{W_{\infty}^2 U \sin(\beta_{\infty} + \lambda)} \frac{1}{\sigma} \quad (8)$$

앞에서 가정한  $\lambda$ 를 식 (9)로 보정하여 위의 식 (8)을 다시 계산하였으며, 그 값으로 영각(attack angle)을 구하였다. 본 논문에서 사용한 임펠러의 형태는 Goettingen 428로 영각은 식 (10)으로 정의하였다.

$$\lambda = \tan^{-1}(0.012 + 0.06 Y_{\max}/C) \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{1}{0.092} \left\{ C_L - 4.8 \frac{Y_{\max}}{C} \right\} \quad (10)$$

설치각(stagger angle)은 속도삼각형에서와 같이 평균상대속도와 영각의 합으로, 실제 임펠러의 형상을 구현하는데 필요한 데이터는 코드길이와 설치각이다.

## 4.2. 공동현상

공동현상의 발생 유무를 결정하는 매개변수로 확산계수를 사용하였다. 임펠러의 확산계수의 정의는 식 (11)로 구했으며, 속도삼각형의 형상으로부터  $W_{\max}$ 와  $W_1$ 과의 관계를 식 (12)로 유도할 수 있다.

$$D_{eq} = \frac{W_{\max}}{W_2} = \frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_1} \{ 1.12 + 0.61(\sin^2 \beta_1 / \sigma) \times [\tan(90 - \beta_1) - \tan(90 - \beta_2)] \} \quad (11)$$

$$W_{\max} = W_1 \{ 1.12 + 0.61(\sin^2 \beta_1 / \sigma) [\tan(90 - \beta_1) - \tan(90 - \beta_2)] \} \quad (12)$$

임펠러상에서의 압력의 평형방정식은 식 (13)으로 정의하고, 입구에서의 압력이 증기압과 일치할 때 공동현상이 시작되며, 임펠러의 부압면에서  $W$ 는  $W_{\max}$ 라고 가정하면 식 (14)로  $NPSH_r$ 을 정의할 수 있다.<sup>(6)</sup>

$$\frac{W_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} - \frac{U_1^2}{2g} = \frac{W^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} - \frac{U^2}{2g} \quad (13)$$

$$NPSH_r = \frac{1}{2g} \left( W_{\max}^2 - W_1^2 + \frac{C_m^2}{2g} \right) \quad (14)$$

식 (14)에서 구한 값과 식 (1)을 통해 얻은 값을 비교하여  $NPSH_a$ 이  $NPSH_r$  값보다 작으면 공동현상이 일어난다고 가정하고,  $NPSH_r$ 을 낮추어 흡입비속도를 높일 수 있는 방향으로 설계를 수행했다. 이러한 설계를 위한 변수로 Thoma 매개변수를 이용하였으며, 그 정의는 다음과 같다.

$$\Gamma_v = \frac{NPSH_a}{H} \quad (15)$$

Shepherd와 Stepanoff는 실험 자료를 바탕으로 식 (16)과 같은  $N_s$ 와 Thoma 매개변수사이의 관계식을 유도했으며, 이는 주어진  $NPSH_a$ 에 대해 허용되는  $N_s$ 의 값으로 정의할 수 있다.<sup>(7)</sup>

$$N_s = 1191.115 \Gamma_v^{3/4} \quad (16)$$

이렇게 얻은  $N_s$  값으로 새로운 임펠러를 설계하였다.

## 4.3. 설계의 결과

Figure 9은 공동현상이 일어나는 경우에 대해 일반

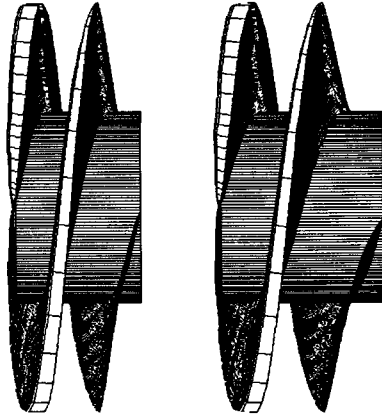


Fig. 9 Designed impeller shapes

성능방법과 공동현상의 방법으로 얻은 임펠러의 형상을 도시한 그림이다. 설계조건은 유량  $30 \text{ m}^3/\text{min}$ , 양정 6 m, 회전수 1300 rpm, 날개의 수는 2장이며, 끝단에서의 현절비는 1.5 이고 입구에서의 압력은 400 mmHg이다. 일반성능의 방법을 통해 설계한 왼쪽의 임펠러는  $NPSH_a$ 가 8.42m일 때  $NPSH_r$ 는 10.8 m로 왼쪽의 임펠러는 공동현상이 발생한다. 하지만 공동현상에 대한 설계를 통해 다시 구한  $NPSH_r$ 은 7.8m로써  $N_s$ 가 줄어드는 방향으로 설계가 되었으며 Fig. 9 에서와 같이 임펠러 축방향으로의 길이가 더 길어지고 통로가 확대되었음을 알 수 있다.

## 5. 결과

3% 양정 감소 지점에 의한  $NPSH_r$ 의 값이 설계점에서 가장 적게 나왔으며, 이는 설계점이 가장 넓은 작동범위를 제공함을 나타낸다. 공동현상이 발생에 대한 신호분석으로  $NPSH_a$ 의 저하에 따른 입구에서의 공동현상 모드의 발달과 그 개수를 알 수 있었고, 출구에서의 Choi-Williams 분포를 통해 이벤트의 주파수 특성과 지속시간을 확인할 수 있었으며 그 결과는 다음과 같다.

$NPSH_a$	Inlet		Outlet	
	Mode	Cell No.	Frequency	Duration
1.5 m	Rotating	2	527,790	0.2msec
0.5 m	Surge	Entire	1320,1490	0.5msec

또한, 출구에서의 이벤트 개수는 임펠러 1회전 시  $NPSH_a=1.5\text{m}$ 에 대해서는 4번이며, 0.5m에서는 12번임을 Choi-Williams 분포를 통해 확인하였다.

주어진 작동 변수에 대해 일반작동상태와 공동현상이 발생하는 경우로 나누어 설계를 수행했으며, 주어진 작동상태에서 공동현상이 일어난 경우  $NPSH_r$  값이  $NPSH_a$  값 이하로 되도록  $N_s$ 값을 보정하였고, 그 결과 흡입비속도를 높이는 방법으로 축방향 임펠러의 길이를 늘이거나 통로를 확대시키는 것임을 알 수 있었다.

## 참고 문헌

- (1) Lakshminarayana, B., *Fluid Dynamics and Heat Transfer of Turbomachinery*, John Wiley & Sons (1996), pp. 136-142
- (2) 이선기, 정진도, "인두서 입구각이 캐비테이션 유동과 흡입성능에 미치는 영향," 대한기계학회 논문집 (B) 제20권 제3호 (1996), pp. 1074~1082
- (3) 강신형, 염기태, "터보펌프 인두서의 성능 실험," 대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집 E pp. 637~642
- (4) M.H. Krane., P.H. Bent., D.A. Quinlan., 1995, "Rotating Instability Waves as a Noise Source in a Ducted Axial Fan," Proceedings of the ASME Noise Control and Acoustics Division, pp. 25~26
- (5) 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 2000 Fluids Engineering Division Summer Meeting
- (6) Takuji TSUGAWA, "Prediction of Cavitation Performance by Diffusion Factor and Optimum Impeller Design of Meridian Profile," Proceedings of the 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference
- (7) Terry Wright, *Fluid Machinery*, CRC Press, pp. 83~84