

〈논 문〉

원추형 오리피스에 유출계수와 캐비테이션에 관한 실험적 연구

김병찬* · 윤병욱** · 박복춘* · 조남오*** · 지대성*** · 정백순**** · 박경암*****
(1997년 2월 15일 접수)

Experimental Study on the Discharge Coefficients and Cavitation of Conical Orifices

Byeong-Chan Kim, Byung-Ok Yoon, Bock-Choon Pak, Nam-Ho Cho,
Bag-Soon Chung and Kyung-Am Park

Key Words : Conical Orifice (원추형 오리피스), Discharge Coefficients (유출계수) Cavitation (캐비테이션), Noise (소음)

Abstract

The high pressure drop is frequently required in the by-pass line of the pump or of the heat exchanger in power plants. However, cavitation produced by a high pressure drop could damage the pipe and pump blades. Conical orifices are adopted to reduce cavitation due to high pressure drop. The discharge coefficients of conical orifice plates were measured by weighing method in the standard water flow system. The discharge coefficients were larger when the ratios of thickness of orifice edge to throat diameter were larger. The noise generated from a conical orifice due to cavitation was measured with a sound level meter and a hydrophone. With increasing the bore diameter of the orifice, the sound pressure level or the noise level due to cavitation became higher. The noise level was suddenly increased at the inception of cavitation.

1. 서 론

원자력 발전소나 화력 발전소에서는 펌프의 바이패스측이나 열교환기 앞에서 차압을 크게 유지하는 압력제어 기능과 유동률을 측정하는 장치가 1기당 약 300대가 필요하다. 산업체나 연구실에서 사용하는 유량 측정용 오리피스는 압력 강하를 고려하여 오리피스 조임비(beta ratio, d/D , 여기서 d =

오리피스 구멍 직경, D =관 직경)가 일반적으로 0.2이상의 것을 사용한다. 따라서 차압이 1 kg/cm^2 보다 작으며, 가능하면 차압이 작게 설계되어 있다. 따라서 차압을 크게 하려면 오리피스 구멍을 작게하여 조임비를 작게할 수 밖에 없는데 이 경우 오리피스에서 분출되는 축류부의 압력이 증기압보다 작아서 기포가 발생하는 캐비테이션 현상이 일어난다.

이 기포가 펌프에 유입되어 급격히 붕괴(collapse)할 때 발생하는 압력이 펌프의 날개를 손상시키고 열교환기의 곡면부나 배관에서 진동, 소음 등이 발생하여 배관을 손상시킬 수 있다. 오리피스를 통한 압력제어에서 발생하는 캐비테이션을 감소

*전북대학교 기계설계과

**회원, 대구 효성카톨릭대학교 자동차공학부

***Hi:rol 주식회사 부설연구소

****회원, 전력연구원 원자력발전연구실

*****회원, 한국표준과학연구원 유체유동그룹

시키기 위한 연구는 주로 다단 오리피스(multi-stage orifice)와 다공 오리피스(multi-hole orifice) 등에서 이루어졌으며, 현재는 원추형 오리피스(conical orifice)가 그 주류를 이루고 있다.

원추형 오리피스는 안전에 관련된 Q등급에(원자력 발전소에서 사용하는 장비나 부품은 안전에 관련된 것과 안전에 관련이 없는 것으로 구분이 되며 등급은 Q, T, S로 구분) 속한다. 안전에 관련된 Q등급의 부품이나 장비는 원자력 발전소의 핵심부인 dome 내부에 사용되므로 조달 규격이 엄격하고 고가이다. Q등급의 장비나 부품을 만들기 위해 사용한 재질, 열처리, 비파괴 검사등 장비나 부품의 제작 과정을 철저히 기록해야 한다.⁽¹⁾

Simpson⁽²⁾은 선박의 열 교환기에 들어오는 해수의 압력을 낮추기 위해 오리피스 크기에 따른 캐비테이션 발생에 관한 비교 실험을 하였다. 목이 작고 긴 오리피스에서 캐비테이션 실험을 Kamiyama와 Yamasaki⁽³⁾는 여러가지 유체에서 수행하였다. 오리피스 목에서의 유속이 빨라지면 캐비테이션 수가 작아지며 이는 예측 치와 일치하였다.

Ramamurthy와 Bhaskran⁽⁴⁾는 캐비테이션과 음압(sound pressure)에 의해 일어나는 부식의 정도는 기포의 수, 크기, 배관 형상 그리고 내파율(implosion rate)에 의해서 결정되며, 최대 부식 지점에서 최대 소음과 캐비테이션수는 매우 좋은 상관 관계를 가진다고 발표하였다. Oba⁽⁵⁾ 등은 오리피스 구멍이 매우 작을 때(직경이 1 mm 이하) 광학적인 방법과 소음을 측정하여 캐비테이션 발생을 감지하였으며 구멍이 작으면 캐비테이션수가 크게 감소함을 보고 하였다. Adachi⁽⁶⁾ 등은 노즐 종류에 따라 캐비테이션으로 발생한 기포가 붕괴되면서 발생하는 초음파와 노이즈의 성분을 분석하였다. 압력이 크면 노이즈의 최대지점은 저 주파수 측으로 이동하였으며 기포에서 발생하는 주파수도 감소하였다.

유량측정에 사용하는 오리피스의 규격은 KSA0612, ISO 5167, AGA 보고서 3에 주어져 있다. KS, ISO 규격서에는 조임비가 0.2 이상인 오리피스만 유출계수가 주어져 있지만 AGA 규격서에는 조임비가 0.1 이상 오리피스에 대한 유출계수가 주어져 있다.^(7~9) 오리피스 구멍의 크기는 ISO 규격에서는 12.5 mm 이상, AGA 규격에서는 11.4 mm 이상을 추천하고 있다. 이들 규격에서는 모따

기 각도를(bevel angle) 45°를 제안한다. 차압이 크고 캐비테이션 문제가 있는 원추형 오리피스에서는 구멍이 작고 판이 두꺼우며 모따기 각도가 0°이다. 이와 같이 구멍 크기, 오리피스판 두께, 모따기 각도가 규격과 다른 경우에 유출계수에 대한 자료는 얻기가 어렵다.

이제까지의 연구결과로부터 원추형 오리피스의 유출계수와 캐비테이션에 관한 연구결과는 그리 흔치 않다. 따라서 본 연구에서는 원추형 오리피스의 구멍크기와 개수가 유출계수에 미치는 영향, 캐비테이션의 발생시기, 소음을 측정하여 설계자료를 축적하는데 그 목적이 있다.

2. 실험장치 및 실험방법

유동실험장치는 10 Hp 원심펌프(유량 55 m³/h, 양정 20 m, 1800 rpm) 2대와 40 Hp 원심펌프(유량 270 m³/h, 양정 30 m, 1750 rpm) 1대와 저장조, 실험관로를 흐른 물의 중량과 수집시간을 측정할 수 있는 장치로 구성되어 있으며 개략도는 Fig. 1과 같다. 펌프에서 발생할 수 있는 맥동이나 기포가 오리피스에 유입되지 않도록 펌프를 선정하여 실험하였다.

저장탱크의 용량은 60 m³이며 흡입 수두의 변화가 펌프 토출량에 영향을 주지 않을 정도로 단면적이 넓게 제작되었다. 원추형 오리피스 설치 지점으로부터 상류측 관로안의 유동 분포를 안정화시키기 위해 원추형 오리피스 상류에 약 65D에 (D: 관직경) 해당하는 직관부(straight pipe)를 설치하였다.

수집탱크의 용량은 8 ton(체적 8.8 m³)과 1 ton(체적 1.1 m³) 두 가지로 유량에 따라 적절한 수집 탱크를 사용한다. 수집한 물의 중량은 3개의 인장형 로드셀(load cell)로 측정하였다. 로드셀의 분해능은 8 ton일 경우 500 g, 1 ton일 경우 20 g이다. 시험에서 수집한 물의 중량측정 오차는 ± 0.01% 이내이다.

시험부는 캐비테이션을 관찰할 수 있게 아크릴로 제작하였으며, 개략도는 Fig. 2와 같다. 관 직경은 100 mm이며 전체 길이는 1330 mm이며, 전단은 475 mm 후단은 855 mm이다. 시험부에는 캐비테이션 음파를 감지하기 위한 수중마이크 탭(hydrophone tap), 차압을 측정하기 위한 플렌지 탭(flange tap) 그리고 후단의 압력을 측정하기 위한

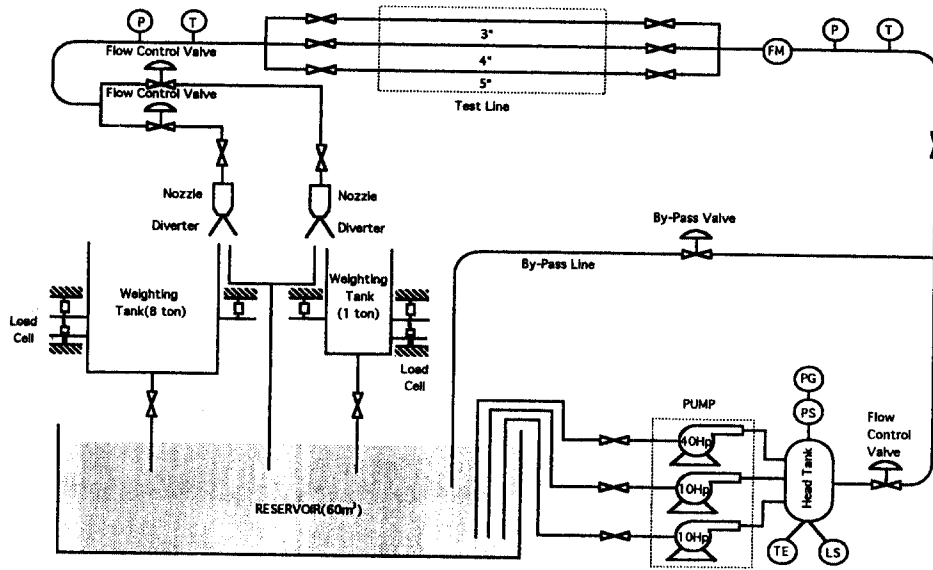


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

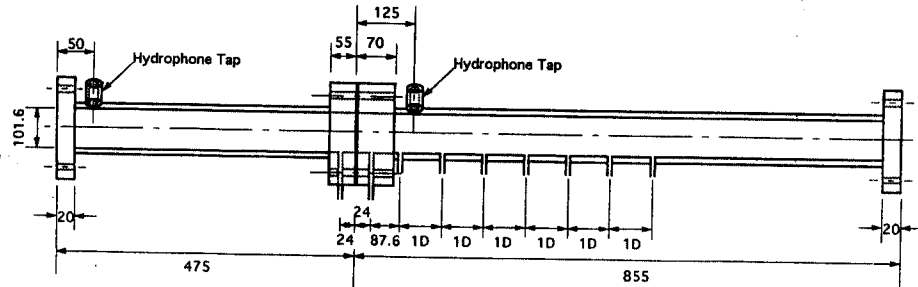


Fig. 2 Schematic diagram of test section

압력 탭 (pressure tap)이 설치되어 있다.

원추형 오리피스는 Fig. 3과 같이 원추각이 90°인 원추 주위에 작은 구멍들이 원추 벽면에 수직으로 뚫여 있다. 구멍의 개수가 작을 때는 1열로 배열하고 개수가 많을 때는 2열로 배열한다. Fig. 3은 조임비가 약 0.3이고 직경 10.6 mm인 구멍이 7개에 직경 11.9 mm인 구멍이 한 개이다. 한 개의 크기가 다른 구멍은 나머지 구멍의 총면적에 10%에 해당하는 크기로 작은 구멍들로 만들면서 설계 안전계수에 상당하는 면적이다. 실험한 접속구경은 100 mm 원추형 오리피스스의 구멍의 개수와 크기는 Table 1과 같다.

Table 1에서 구멍이 1개인 (n=1) 경우는 원추형 오리피스가 아니고 평판 오리피스이다. 오리피스 구멍의 후단은 규격에서 모따기 각도가 (bevel

angle) 45°이지만 여기서 실험한 오리피스는 모따기 각도가 0°이며 두께는 원자력 발전소에서 많이 사용되는 차압과 지진을 견딜 수 있게 설계된 4 mm이다.

유동률을 산정하기 위해서 수집탱크에 물을 수집한 시간을 측정해야 한다. 저장조와 수집탱크 사이에 물의 흐름 방향을 바꾸어주는 것이 유동 변환 장치이다. 이 장치는 유동률이 일정하게 유지되는 정상상태에서 물의 흐르는 방향을 순간적으로 바꾸어 수집 탱크로 물이 유입되도록 하며, 그 순간 시간 측정장치가 작동되도록 되어 있다. 수집 탱크에 적당량의 물이 채워지면 전환 장치를 조작하여 물이 저장조로 흐르도록 하며 그 순간 시간 측정장치도 정지하여 수집시간을 측정한다. 시간 측정장치의 오차와 유동방향 전환 장치의 수집시간 측정오

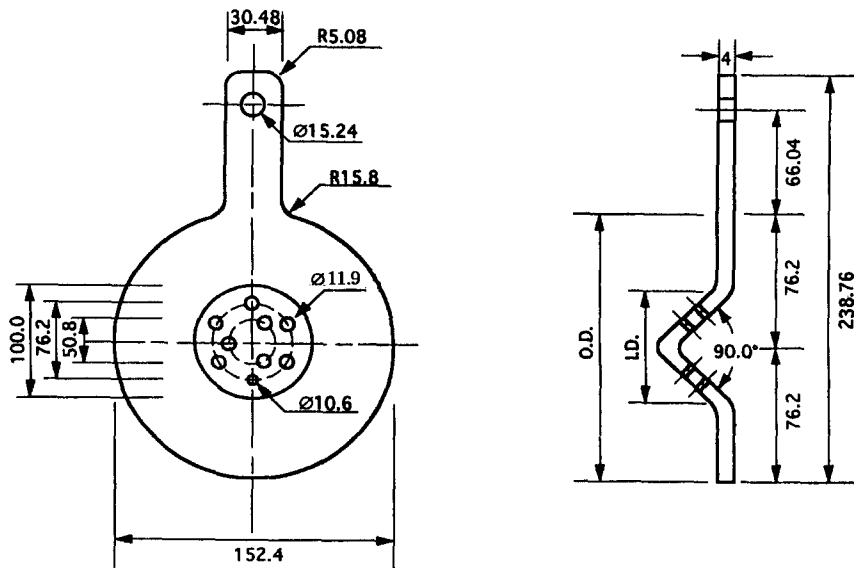
Fig. 3 Conical orifice of $d/D=0.3$

Table 1 Size of flat and conical orifices

Beta ratio	Diameter of major holes (mm)	Diameter of single hole (mm)	Number of major holes (n)
0.1	10.2	-	1
0.1	4.56	3.23	5
0.1	3.61	3.23	8
0.1	3.08	3.23	11
0.2	20.3	-	1
0.2	9.08	6.42	5
0.2	7.18	6.42	8
0.2	6.12	6.42	11
0.34	33.6	-	1
0.34	15.03	10.63	5
0.34	11.88	10.63	8
0.34	10.13	10.63	11

차는 0.1% 이다. 압축계수, 밀도의 산정오차는 매우 작으며 원추형 오리피스 구멍의 단면적 측정 오차는 $\pm 0.1\%$, 차압 측정오차는 $\pm 0.2\%$ 이내이다. 이들 오차로부터 계산된 원추형 오리피스의 유출계수 오차는 $\pm 0.25\%$ 이내이다.

아크릴 관에서 기포를 육안으로 관찰하였으며 기포가 터질 때 발생하는 음파는 관 내(수중) 및 관 밖에서 소음을 측정하여 캐비테이션 발생을 다음과

같이 감지하였다.

원추형 오리피스 하단에서 물 줄기들이 서로 충돌하여 기포가 붕괴될 때 발생하는 음파를 수중마이크로 감지된 신호를 증폭기(charge amplifier)로 증폭하여 실시간 F. F. T. 분석기(spectrum analyzer)를 통하여 음파를 분석하였다. 펌프와 측정 장치의 소음과 미소 유동률에서 발생하는 소음의 주파수 선도는 원추형 오리피스 50 mm 앞에 수중마이크를 설치하여 얻었다.

캐비테이션에 의한 관 외부에서의 소음 정도를 알기 위해 $1200 \times 2200 \times 1200$ mm 직사각형의 간이 무향실을 제작하여, 원추형 오리피스와 평행한 높이에 수직으로 900 mm 떨어진 거리에서(원전 규격에서 제시한 거리⁽¹¹⁾) 마이크를 설치하여 소음의 크기를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

조임비가 0.1인 경우 유출계수를 레이놀즈수의 함수로 도시한것이 Fig. 4 이다. 구멍이 한 개인($n=1$) 경우는 평판 오리피스 테이터로 원추형 오리피스와 비교하기위해 실험을 하였다. 규격에서 제안하는 평판 오리피스의 유출계수에대한 Stoltz 식의^(7,8) 유출계수는 그림에 도시한 것과 같이 약 0.6 이다. 구멍이 한 개인($n=1$) 유출계수는 레이놀즈

수가 5000 이상에서는 약 0.67로 규격에서 제시하는 값보다 10% 이상 크다. 이것은 오리피스 판의 두께, 구멍크기, 모따기 각도의 영향에 기인한 것 같다.

조임비 0.1인 원추형 오리피스스의 구멍이 5개인 경우 유출계수는 약 0.74, 8개인 경우 약 0.79, 11개인 경우 0.87으로 구멍의 크기가 작으면 유출계수는 증가한다. 이것은 구멍이 작으면 압력 손실이 빨리 회복되기 때문인 것 같다. 캐비테이션이 강하게 일어날 때 평판 오리피스와 구멍이 5, 8개인 원추형 오리피스의 유출계수는 떨어지며 구멍이 11개인 경우에는 실험한 영역에서는 유출계수가 떨어지는 현상은 없었다.

조임비가 0.2인 경우 데이터는 Fig. 5와 같다. 평판 오리피스스의 유출계수는 규격에서 제시하는 값과 비슷하다. 원추형 오리피스스의 구멍이 5개인 경우 유출계수는 약 0.64, 구멍이 8개인 경우 0.68, 구멍이 11개인 경우 0.65 이다. 구멍이 8개인 경우의 유출계수가 구멍이 11개인 경우보다 크지만 구

멍이 작으면 유출계수는 커지는 경향이다. 구멍이 5, 8개인 경우에 캐비테이션이 강하게 일어날 때 유출계수가 떨어지지만 조임비 0.1인 경우보다는 유출계수의 감소율이 작다.

조임비가 0.34일 때 데이터는 Fig. 6과 같으며 평판 오리피스스의 데이터는 규격에서 제시한 데이터와 비슷하다. 원추형 오리피스와 평판 오리피스스의 유출계수에 차이가 크지 않으며 구멍이 11개인 경우보다 구멍이 8개인 경우의 유출계수가 약간 크다. 구멍 크기의 영향은 조임비가 0.2인 경우와 유사하다.

오리피스 판의 두께에 대한 직경의 비와 유출계수의 관계를 Fig. 4, 5, 6와 본 연구 중에서 얻은 시험 데이터(판 직경 150, 200 mm, 오리피스판 두께 4, 5.5, 7 mm) 포함하여 도시한 것이 Fig. 7이다. Fig. 7의 유출계수는 레이놀즈 수의 변화가 유출계수에 미치는 영향이 작은 영역의 평균 값이다. 구멍 직경이 15 mm보다 크면 유출계수는 t/d의 비에 영향을 거의 받지 않으며 구멍 직경이 10 mm 이하인 경우에는 t/d의 비가 유출계수에 미치는 영향이 매우 크다. 유출계수를 t/d의 함수로 표

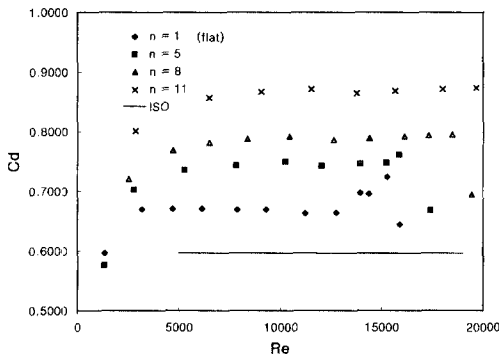


Fig. 4 Discharge coefficients of conical and flat orifices ($\beta=0.1$)

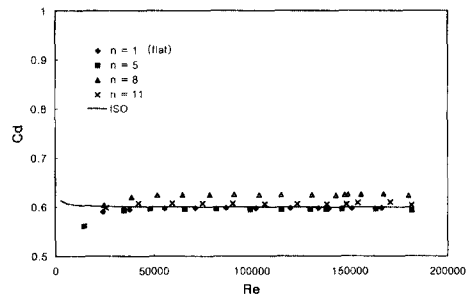


Fig. 6 Discharge coefficients of conical and flat orifices ($\beta=0.34$)

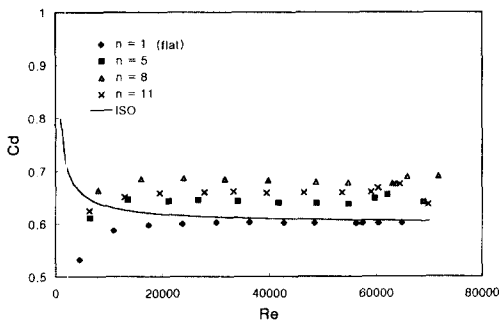


Fig. 5 Discharge coefficients of conical and flat orifices ($\beta=0.2$)

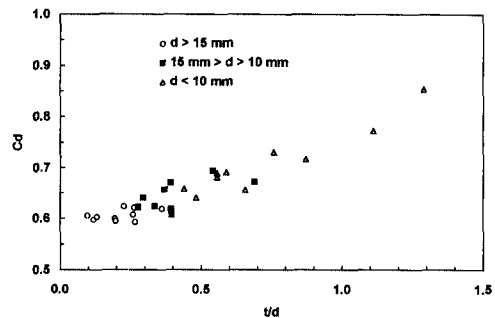


Fig. 7 Relation between Cd and t/d

시하려면 더 많은 데이터가 축적되어야 한다.

조임비가 0.1인 경우 소음(dBA)을 레이놀즈수의 함수로 도시한 것이 Fig. 8이다. 구멍이 1개인

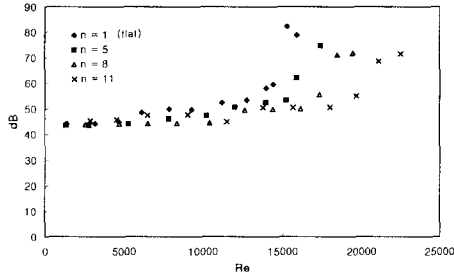


Fig. 8 Noise level of conical and flat orifices ($\beta=0.1$)

평판 오리피스의 경우 소음은 44에서 84 dBA까지 변화하고 레이놀즈수가 15,000 부근에서 소음이 급격히 증가한다. 구멍이 8개 및 11개인 원추형 오리피스의 경우 소음은 44에서 74 dBA 까지 평판 오리피스에 비해 낮은 소음값을 갖고 변화하였고 레이놀즈수 17,000 및 20,000 부근에서 급격한 소음의 증가한다. 구멍이 작으면(구멍 수가 증가하면) 캐비테이션이 발생하는 레이놀즈수는 증가한다.

조임비가 0.2일 때의 소음 데이터는 Fig 9이며 구멍 크기의 영향이 조임비 0.1인 경우보다 작지만 캐비테이션이 강하게 일어나는 레이놀즈 수는 구멍이 여러 개인 경우가 크다. 조임비가 0.34일 때의 소음 데이터는 Fig. 10과 같으며 Fig. 8, 9에서의 마찬가지로 원추형 오리피스에서의 급격한 소음 증가

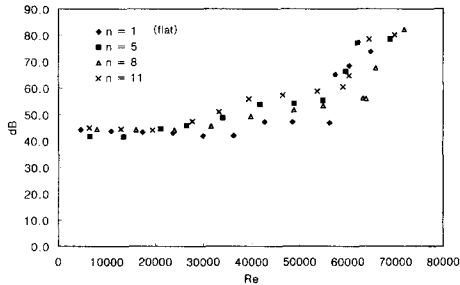


Fig. 9 Noise level of conical and flat orifices ($\beta=0.2$)

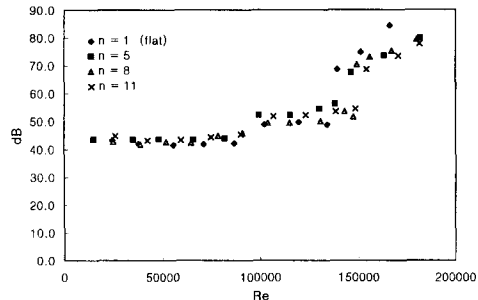


Fig. 10 Noise level of conical and flat orifices ($\beta=0.34$)

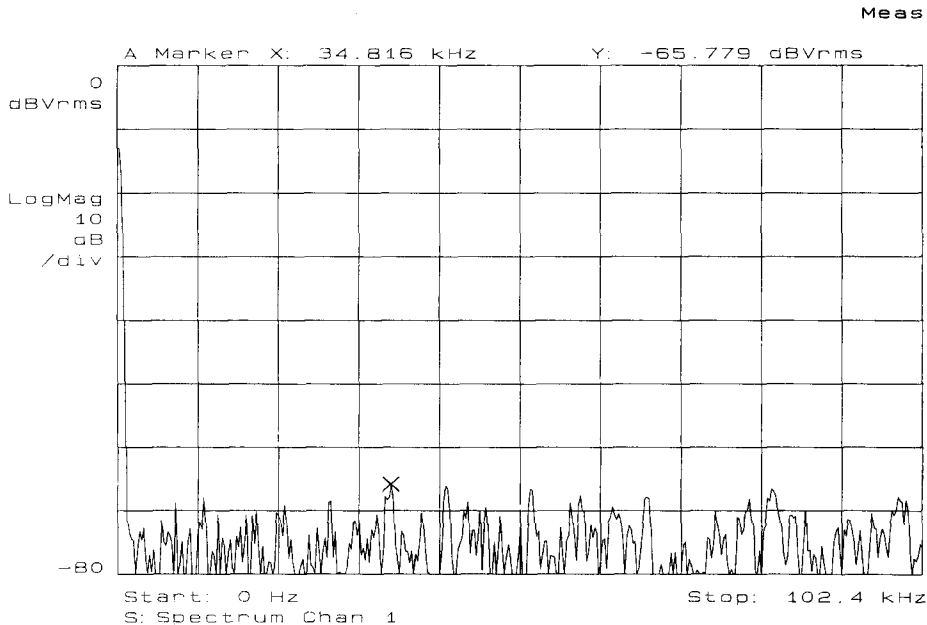


Fig. 11 Hydrophone spectrum from conical orifice ($\beta=0.34, n=8, Re=18,000$, no cavitation)

는 평판 오리피스의 경우에 비해 더 높은 레이놀즈 수에서 이루어지며, 즉 원추형 오리피스에서의 캐비테이션 발생이 지연된다.

Fig. 11에서 Fig. 14까지는 조임비가 0.34이고 구멍이 8개인 경우 수중 마이크에서 측정된 신호를

주파수 분석한 결과이다. Fig. 11은 최소 유동율인 레이놀즈수 18, 000에서 주파수 분석기의 (spectrum analyser) 신호로 시스템과 장비의 소음으로 생각되며 이때 관 밖에서 소음기로 측정된 소음레벨은 43 dBA이다. Fig. 12은 캐비테이션이 발생하기 않

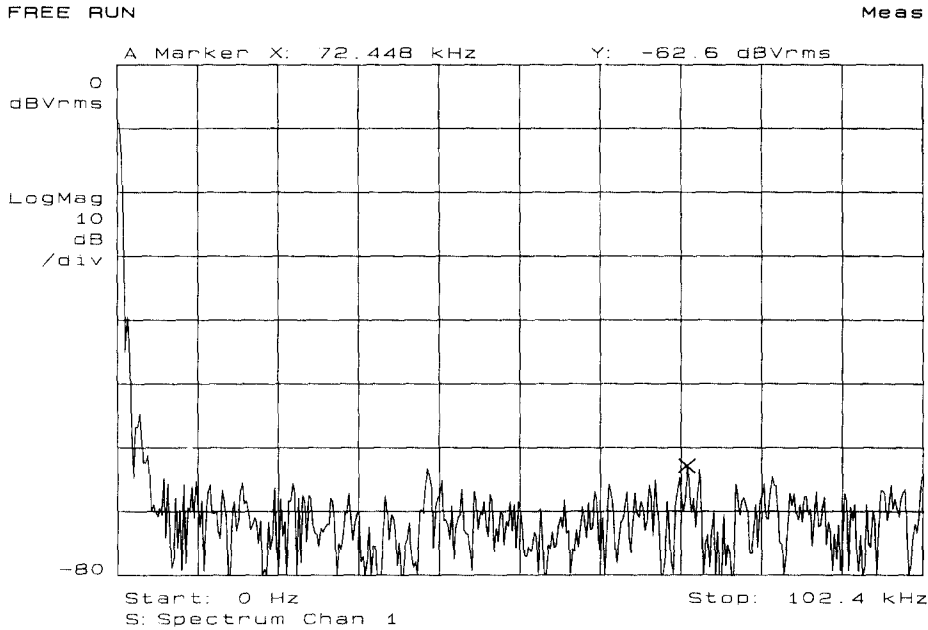


Fig. 12 Hydrophone spectrum from conical orifice ($\beta=0.34$, $n=8$, $Re=50,000$, before cavitation)

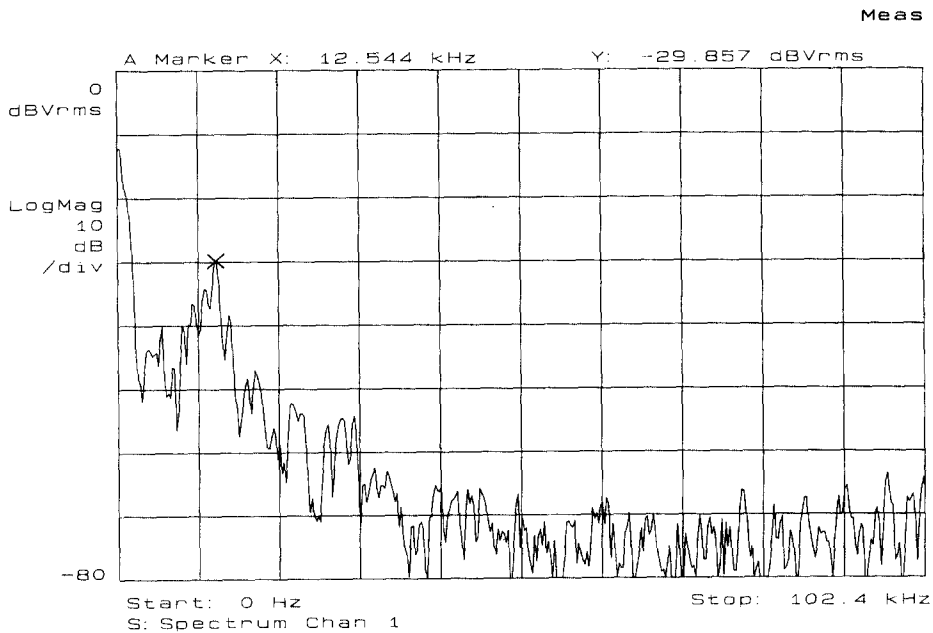


Fig. 13 Hydrophone spectrum from conical orifice ($\beta=0.34$, $n=8$, $Re=100,000$, cavitation inception)

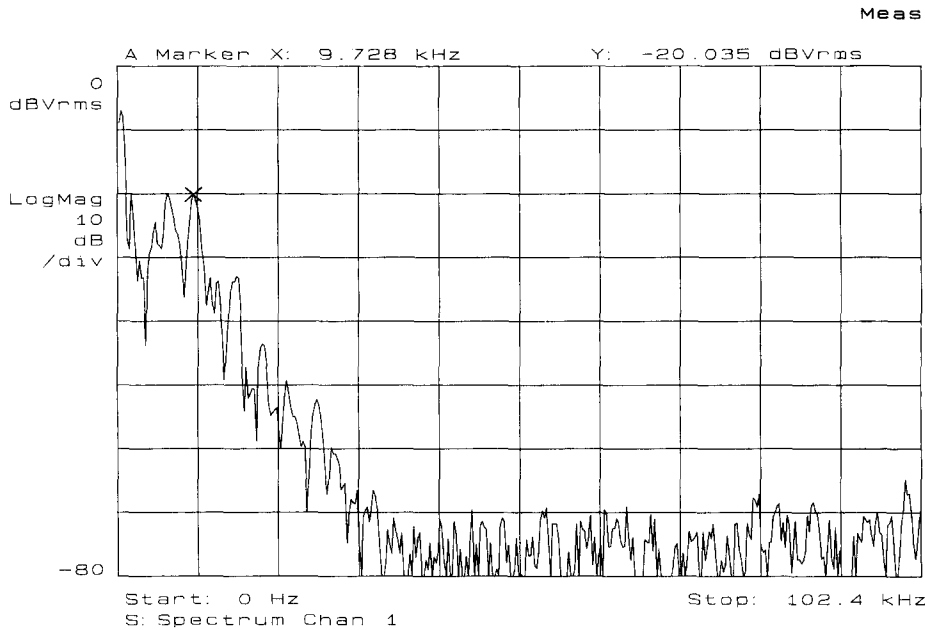


Fig. 14 Hydrophone spectrum from conical orifice ($\beta=0.34$, $n=8$, $Re=180,000$, strong cavitation)

는 레이놀즈 수 50,000인 경우로 소음의 주파수 선도(frequency spectrum)가 Fig. 11과 비슷하며 소음레벨은 49 dBA이다. Fig. 11과 Fig. 12가 비슷한 것은 유동에 의한 소음의 영향이 장비의 소음에 비하여 작은 것 같다.

캐비테이션이 시작된 레이놀즈수 100,000 근처에서는 Fig. 13과 같이 12.5 kHz 부근에서 높은 신호가 나타난다. 유동률이 증가하면(최대 시험 유동률 70 m³/h) Fig 14와 같이 9.7 kHz 부근의 피크를 포함한 10 kHz 이내의 신호가 전체적으로 커지고 있다. 구멍이 1개인 평판 오리피스에서는 캐비테이션이 시작하면서 순간 11.52 kHz 부근에서 매우 높은 신호가 나타난다. 유동률이 증가하면 높은 신호가 나타나는 주파수가 작아지면서 소음이 커진다. 수중 마이크를 사용한 실험의 결과 캐비테이션의 발생에 따른 신호의 변화는 주로 가청 주파수 범위인 20 kHz 이내의 범위에서 발생한다. 주파수 선도에서 추정되는 캐비테이션이 시작하는 레이놀즈수와 소음계로 감지한 캐비테이션 시작점은 일치하며 주파수 선도에서 신호가 매우 높은 경우에는 소음계로 측정한 소음도 매우 크다.

4. 결 론

원추형 오리피스와 평판 오리피스의 조임비와 구멍 개수가 유출계수, 캐비테이션, 소음에 미치는 영향을 분석하였다.

(1) 평판 오리피스에서 조임비가 0.1인 경우에 유출계수는 약 0.67이며 이 값은 보통 오리 피스의 유출계수 0.6보다 약 10% 크지만 조임비가 0.2, 0.34인 경우는 유출계수가 약 0.6 이다.

(2) 원추형 오리피스의 조임비가 작으면 유출계수는 커진다. 조임비가 0.1일 때 유출계수는 0.87(구멍 11개), 조임비가 0.34일 때 유출계수는 약 0.62(구멍 11개)이며 구멍이 작아지면 유출계수는 커지는 경향이 있으며 구멍 크기가 10 mm 이하일 때 두께에

대한 구멍의 비가 크면 유출계수는 커지며 이에 대한 연구가 더 필요하다.

(3) 캐비테이션 발생에 따른 수중 마이크를 사용한 신호의 변화는 주로 가청 주파수 범위인 20 kHz 이내의 범위에서 발생하며 수중 마이크로 감지한 결과와 관 밖에서 소음계로 감지한 캐비테이션 결과는 일치한다. 조임비가 작은 경우에(조임비 0.1) 원추형 오리피스의 캐비테이션 발생은 동

일한 조임비를 갖는 평판 오리피스의 경우에 비해 지 연되는 경향이 있다.

참고문헌

- (1) Korea Electric Power Corporation, 1988, Procurement Specification : Flow Restriction Elements and Venturis, Younggwang 3&4.
- (2) Simpson, H. R., 1986, "Cavitation problems in Shipboard Seawater Cooling Systems," *Cavitation and Multiphase Flow Forum*, FED -Vol. 35, pp. 54~57.
- (3) Kamiyama S. and Yamasaki, T., 1986, "Critical Condition of Cavitation Occurance in Various Liquids," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 103, pp. 428~432.
- (4) Ramamurthy, A. S., Bhaskaran, P. 1979, "Velocity Exponent for Erosion and Noise Due to Cavitaton," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 101, pp 69~75.
- (5) Oba, R, Ikohagi, T. and Kim, K. T., 1982, "Cavitation in an Extremely Limited Flow Through Very Small Orifices," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 104, pp. 94~98.
- (6) Adachi, Y., Soyama, H., Yamauchi, Y., Sato, K., Ikohagi, T. and Oba, R. , 1994, "Cavitation Noise Characteristics Around High-Speed Submerged Water Jets," *Transactions of Japanese Society of Mechanical Engineers (B)*, Vol. 60, No. 571, pp. 730~735.
- (7) KSA 0612, 1992, 조임 기구에 의한 유량 측정 방법.
- (8) ISO 5167, 1991, Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices.
- (9) AGA Report No. 3, 1991, Orifice Metering of Natural Gas and Other Related-Hydrocarbon Fluids.