

수중소음 계측을 위한 KRISO 캐비테이션 터널의 음향학적 특성

안종우*, 김기섭*, 이진태*, 김재승**, 김상열**

The Acoustic Characteristics of the KRISO Cavitation Tunnel for Measurement of Underwater Noise

by

J. W. Ahn*, K. S. Kim*, J. T. Lee*, J. S Kim** and S. Y. Kim**

요 약

수중소음 계측의 가능성을 파악하기 위하여 KRISO 캐비테이션 터널의 음향학적 특성을 조사하였다. 유속과 압력을 변화시키면서 배경소음을 100kHz까지 계측하였으며, 소음계측을 수행하기 위하여 건설된 캐비테이션 터널(HYKAT(독일), GTH(프랑스)등)들의 배경소음과 비교하였다. 배경소음원을 조사하기 위하여 B&K 3550 FFT 분석기를 이용하여 구조물의 진동과 소음과의 상관도를 해석하였다. 실험결과로부터 소음계측 가능성을 파악할 수 있었으며, 소음환경의 개선방안도 도출할 수 있었다.

Abstract

In the KRISO cavitation tunnel, the acoustic characteristics for the measurement of underwater noise are investigated. The background noise is measured and analyzed up to 100kHz at various test conditions. The noise level of the KRISO cavitation tunnel is compared with those of the other cavitation tunnels which have been designed for the noise study [HYKAT(Germany), GTH(France), etc.]. In order to investigate the background noise source, the coherence between structural vibration and noise level is analyzed using the B&K 3550 FFT analyzer. The experimental results show the possibility of the noise study and suggest the improvement plan.

접수일자: 1999년 5월 25, 재접수일자: 1999년 8월 26일

* 정회원, 한국해양연구소 선박해양공학분소

** 정회원, 한국기계연구원 구조시스템연구부

1. 서 언

최근 군사적인 목적에서 선박이나 추진체의 정속성에 대한 요구가 날로 증대함에 따라 수중방사소음의 주요원인인 프로펠러 캐비테이션에 의하여 발생하는 소음에 대한 관심이 고조되고 있다. 일부 선진국에서는 이미 막대한 예산을 들여 배경소음 특성이 우수한 캐비테이션 터널을 건설하였으며, 수중방사소음의 중요한 소음원인 프로펠러 소음을 예측하려는 노력을 시도하고 있다. 이를 위한 대표적인 사례는 독일의 HYKAT[1], 미국의 LCC[2] 및 프랑스의 GTH[3]를 들 수 있다. 이런 터널들의 공통적인 특성은 시험부의 크기가 대형이어서 선체가 직접 터널 시험부에 설치되며, 자체의 배경소음을 줄이기 위하여 유동에 방해되는 모든 부가물들을 제거하였다. 이와같은 특성으로 인하여 소음 특성이 매우 좋아졌지만 선체에 동력계 및 구동모터 등을 직접 설치해야 하므로 실험 수행이 간단하지 않는 단점이 있다.

KRISO 캐비테이션 터널(이후로 "KRISO 터널")은 당초에 소음연구를 위해 설계되기 보다는 프로펠러의 캐비테이션 발생 거동을 용이하게 관찰할 수 있도록 설계되었다고 볼 수 있다. 프로펠러 축, 반류계측 장치의 축 및 이들의 지지대등이 터널내에 설치되어 있어 단기간에 캐비테이션 시험을 수행할 수 있는 반면에 이러한 부가물들이 배경소음을 높이는 원인이 될 수 있다. 그러나 터널 내부의 개선을 통하여 소음을 계측할 수 있다면 실험이 대형터널에 비하여 간단하게 수행될 수 있는 장점이 있다. 그러므로 본 연구에서는 KRISO 터널의 음향학적 특성을 파악하여 소음 관련 시험의 수행 가능성을 알아보고 앞으로의 개선방안을 수립하고자 한다.

KRISO 터널의 음향학적 특성을 파악하기 위하여 주요 소음원인 배관 등에 포함되어 있는 공기를 제거하고 배경소음을 계측하였으며, 배경소음원을 파악하기 위하여 가속도계들을 설치하여 구조물의 진동과 소음과의 상관관계를 파악하였다. 실험결과로부터 소음연구 가능성과 소음원의 개선방안을 파악할 수 있었다.

2. 배경소음의 계측

배경소음의 계측은 Fig.1에 나타난 기존의 방법으로 수중청음기(Hydrophone)를 설치하여 수행하였다[4]. 계측된 신호는 전하형(charge type) 증폭기에서 증폭된다. 장비의 동적영역의 제한(80dB) 때문에 발생하는 고주파 성분의 증가 현상을 개선하고자 KH3364(Krohn-Hite model 3364) 필터를 사용하여 500Hz 이하의 신호는 cut-off 시켰다. 100kHz까지의 소음신호를 분석하기 위하여 B&K 3550 FFT 분석기에 100kHz 입력 모듈을 설치하여 1/3-octave band로 해석을 수행하였다.

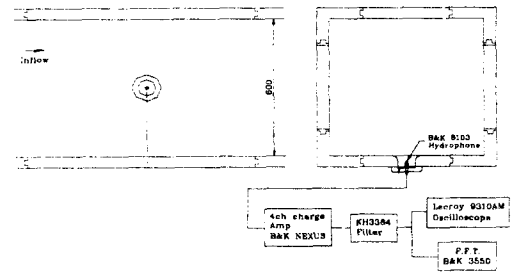


Fig.1 Experimental set-up

소음을 계측하기 전에 우선적으로 수행하여야 할 사항은 터널의 주요 배경소음원인 터널 천장이나 배관등에 남아 있는 공기를 제거하는 것이다. KRISO 터널은 상류에서 시험부까지 정사각형 형태로 수축되어 높이의 차가 존재하는데 반해 소음

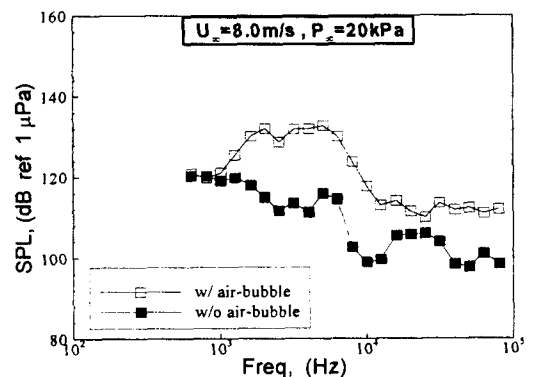


Fig.2 Effect of air-bubble (20 kPa, 8.0m/s)

계측을 위하여 건설된 터널은 천장의 높이가 일정하게 유지되면서 수축되는 형태를 가지고 있다 [1,2] 이런 이유로 KRISO 터널은 청수(fresh water)를 채울 때 천장에 공기등이 포함될 가능성이 매우 높다. 이와같은 공기는 진공펌프 등을 이용하여 제거하는 방법을 본 연구에서 개발하였다. Fig.2는 유속 8.0%, 내부압력이 20kPa인 경우에 터널내부에 포함된 공기의 영향을 보여주는데, 공기가 제거되기 전에 계측된 소음수준이 10~20dB 정도 높음을 알 수 있다.

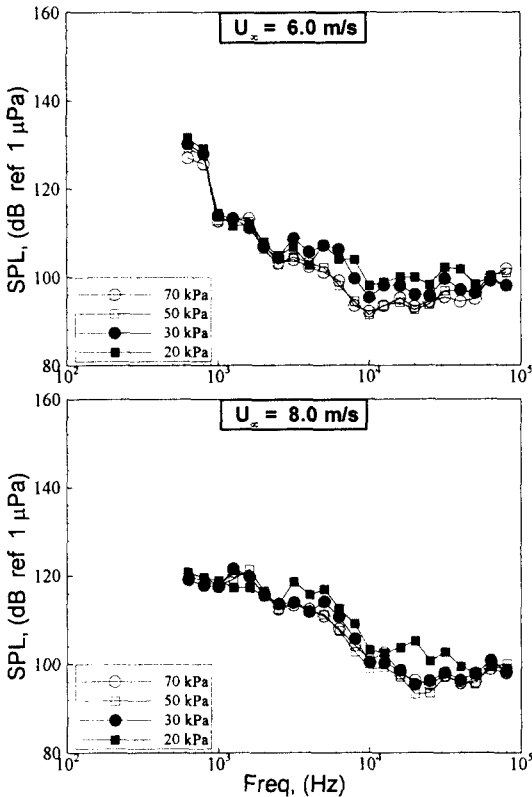


Fig.3 Background noise

Fig.3은 유속 6.0%, 8.0%에서 내부압력의 변화에 따른 배경소음의 변화를 보여준다. 내부압력 변화에 따라 소음수준의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. Fig.4는 내부압력이 50kPa과 30kPa에서 유속변화에 따른 소음수준의 변화를 보여준다. 50 kPa까지는 유속변화에 따라 거의 유사한 형태를 유

지하면서 소음수준이 증가된다. 30kPa에서는 9.0%까지 유사한 증가 형태를 보여주지만 10.0%부터 소음수준이 급격히 증가됨을 볼 수 있다.

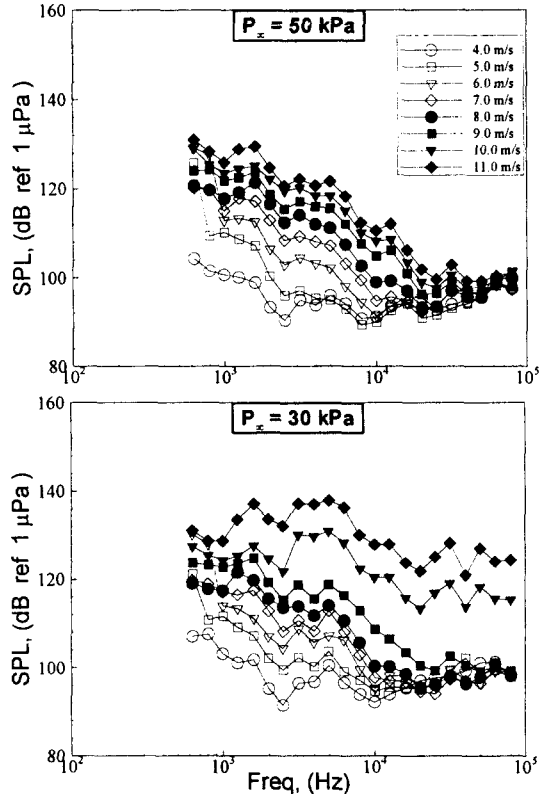


Fig.4 Background noise at constant pressure

압력이 낮아지고 유속이 높아진다는 것은 캐비테이션 수가 낮아져 캐비테이션 터널의 틈새 등 유동이 매끄럽지 못한 영역에서 캐비테이션이 발생할 가능성이 높다는 것을 의미한다. 터널 본체와 관측창 사이의 틈새에서 육안으로 겨우 관찰될 정도의 매우 적은 캐비테이션이 발생되어도 소음수준이 급격히 증가하는 현상이 나타난다. 관찰이 가능한 영역에서는 실리콘 등의 재료를 이용하여 유동이 매끄럽지 못한 영역을 수정하였지만 관찰이 불가능한 영역에서는 이와같은 작업이 할 수 없어 터널 내부압력이 30kPa, 유속 10%이상에서 발생한 소음증가는 터널내부 어디에선가 발생한

캐비테이션의 영향으로 볼 수 있다. 수중청음기가 설치된 중형 축대칭체 주위에서는 캐비테이션이 관찰되지 않았다.

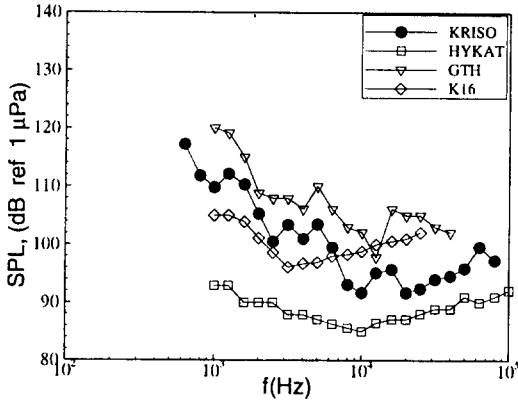


Fig.5 Comparison of background noise level

Fig.5는 KRISO 터널과 프랑스의 대형터널(GTH, 1986), 당소와 비슷한 크기를 가지고 있는 독일의 터널(K16, 1960) 및 독일의 대형 터널(HYKAT, 1990)과의 배경소음의 비교를 보여준다. 측정조건은 모두 유속 6.0m/s이며, 대기압 상태로 동일하다. 그러나, 측정방법에는 차이가 있다. 본 연구에서 사용한 방법은 스웨덴의 SSPA에서 배경소음 성능을 검증한 바 있는 중형 축대칭체에 수중 청음기를 설치하는 형태이다[5]. 독일에 HYKAT 및 K16은 Acoustic Chamber에 수중청음기를 설치하는 방법을[1], 프랑스의 GTH는 중형 축대칭체에 수중청음기를 설치하고 빈공간에 물과 비슷한 고형물질을 채워넣는 방법을 사용하였다[3]. 타기관의 설치방법은 수중청음기가 유동장의 영향을 직접 받지 않기 때문에 유동관련 소음이 줄어들 수 있는 반면에 본 연구에서의 방법은 매우 작은 캐비테이션의 발생도 감지할 정도로 측정감도가 매우 우수한 것으로 판단된다. 앞으로 타기관에서 사용한 방법들의 조사가 이루어지면 명백한 평가를 내릴 수 있지만, 현재의 결과를 가지고 다음과 같은 평가를 내릴 수 있다. KRISO 터널의 배경소음 성능은 GTH와 K16보다 우수한 것으로 나타난다. 소음의 관심영역인 8.0kHz 이상에서 KRISO 터널의 배경소음

은 GTH보다는 5~10dB가 낮으며, HYKAT보다는 6~10dB가 높다. GTH와 K16의 배경소음은 HYKAT의 그것보다 높지만 캐비테이션 소음 뿐만 아니라 프로펠러 날개형상에 따라 유발되는 유체역학적 소음도 측정할 수 있다고 알려져 있다. 이런 점으로 미루어 보아 KRISO 터널도 캐비테이션 소음 뿐만 아니라 유체역학적인 소음을 충분히 측정할 수 있다고 생각된다.

3. 배경소음원의 조사

배경소음원을 조사하기 위하여 터널 외판의 3 지점에 가속도계(accelerometer)를 부착하여, 수중청음기 및 가속도계 신호의 상관도(Coherence)와 각각의 소음 및 진동을 측정하였다. 수중청음기와 가속도계들의 설치 위치는 Fig.6에 나타난 것과 같이 수중청음기는 터널 시험부 밀면 관측창에 설치된 지그에 부착되어 있으며, 가속도계들은 수중청음기가 설치된 지그 밀면, 터널 시험부의 북쪽 벽부 및 임펠러 근처 외판에 설치되어 있다. 가속도계의 측정 주파수 한계는 20kHz 근처이므로 2채널 FFT 분석기를 8채널 분석기(B&K 3550)로 교체하였으며, 해석의 한계는 25.6kHz이다. 배경소음과는 달리 Δf가 32Hz인 일정한 band 영역에서 FFT 분석을 수행하였다.

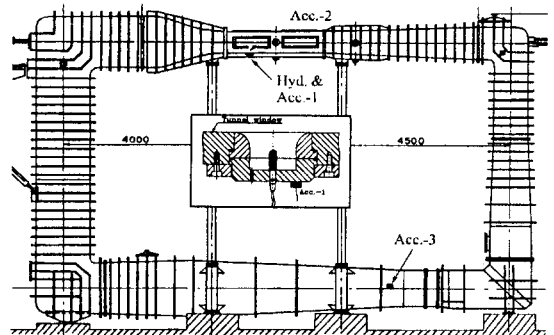


Fig.6 Position of a hydrophone and 3 accelerometers

Fig.7은 유속 8.0m/s에서 내부압력 20kPa에서 수중청음기와 각각의 가속도계에서 측정된 신호 사이에 상관도를 보여준다. XY1은 수중청음기와

가속도계 #1(acc.-1)의 상관도를, XY2는 가속도계 #2(acc.-2)와의 상관도를, XY3는 가속도계 #3 (acc.-3)와의 상관도를 각각 보여준다. 이 결과로부터 임펠러 주위의 진동은 저주파 영역을 제외하고는 수중청음기에서 계측된 배경소음과 큰 연관성이 없는 것으로 보여진다. 이는 다른 한편으로 임펠러에서 캐비테이션이 발생하지 않았다고 생각할 수 있다. 임펠러에 의하여 발생한 유체역학적 소음은 주로 저주파에서 나타난다. 캐비테이션에 의하여 유기된 소음은 고주파까지 수준이 매우 높게 나타나기 때문에 만약 임펠러에서 캐비테이션이 발생했다면 고주파에서 신호간에 상관도가 매우 높아졌을 것이다.

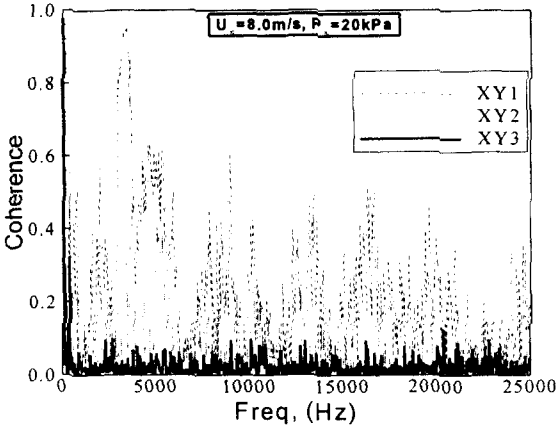


Fig.7 Coherence between noise and vibration

가속도계 #1의 진동은 2~3kHz 이하 영역에서 배경소음과 큰 연관성을 보여주는데, 이는 수중청음기에서 계측된 배경소음에는 설치 방법에 의한 영향[5] 및 터널이 가지고 있는 고유 공진의 영향[6] 등으로 나타난 현상이라고 생각된다.

배경소음원의 조사를 목적으로 특정 주파수에서 유속 변화와 배경소음 또는 진동수준과의 관계를 알아보는 것이 매우 중요하다. 이때 유속의 변화는 대수척도(logarithmic scale)로서 표시한다. Fig.8은 주파수 20.0kHz에서 유속변화에 따른 배경소음 수준의 변화를 보여준다. 비슷한 분석을 임펠러 근처에 설치된 가속도계에서 계측된 진동 계측결과를 이용하여 수행하였다. Fig.9는 주파수 8.0kHz에서 유속변화에 따른 임펠러 근처의 진

동의 변화를 보여준다. Fig.8과 Fig.9에 나타난 점선은 $SPL \sim V^m$ 의 공식에서 기울기 m 의 변화를 나타내며, 유속의 함수로서 소음 또는 진동수준의 변화의 원인을 알아볼 수 있다. 기계적인 (mechanical) 소음은 $m=0$ 또는 $m=1$ 의 기울기를 가지고 변하며, 임펠러 날개끝이나 정류격자 등에서 유발되는 유체역학적인(Hydrodynamic) 소음은 $m=2.5 \sim 3.0$ 의 기울기를 가지고 변화된다. 끝으로 캐비테이션에 의한 소음은 매우 높은 기울기($m \geq 6$)로 변화된다고 알려져 있다.[7,8]

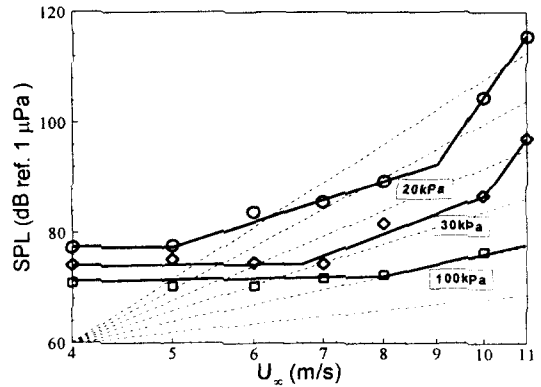


Fig.8 Dependence of noise level (f = 20.0 kHz)

Fig.8에서 보여지듯이 내부 압력이 100kPa인 경우 유속 8.0%까지 소음 수준의 변화가 거의 없으며, 8.0%이상에서는 $m=2.0$ 정도의 기울기를 따라가는 것으로 보인다. 30kPa인 경우 유속 7.0%까지 소음 수준의 변화가 거의 없지만, 7.0%에서 10% 사이에서 $m=3.0$ 정도의 기울기가 나타나 유체역학적인 소음원이 존재하는 것으로 보인다. 이런 유체역학적인 소음은 수중청음기를 설치한 중형 축대칭체가 터널 시험부와 그대로 통해져 있어서 나타날 수도 있다고 생각되는데, 가속도계와의 상관도로부터 이와같은 추정을 할 수 있다. 10%를 넘어가는 경우 기울기가 매우 증가하여 ($m > 6.0$) Fig.4에서 보여진 것과 같이 캐비테이션의 발생에 의한 소음이 발생되었다고 추정할 수 있다. 20kPa인 경우에는 5.0%부터 유체역학적인 소음원에 의한 소음이 계측되며, 9.0% 이상에서

는 캐비테이션 소음원이 존재하는 것으로 나타났
다.

Fig.9는 주파수 8.0kHz에서 유동 및 내부압력 변
화에 따른 임펠러 근처 진동 수준의 변화를 보여준
다. 수중청음기에서와 마찬가지로 내부 압력이
100kPa, 30kPa 및 20kPa인 경우에 조사를 수행하였
다. 100kPa의 경우에는 전 속도 영역에서 2.0보다
약간 큰 기울기($m \approx 2.2$)를 보여주며, 30kPa의 경
우에는 유속 8.0%까지 기울기 2.0과 2.5사이에
위치하며($2.0 \leq m \leq 2.5$), 8.0%이상에서 4.0이하
의 기울기를 보여준다. 20kPa의 경우에는 유속
7.0%까지 2.0보다 약간 작은 기울기를 보여주고
있으며($m \approx 1.9$), 7.0%이상에서 5.0 정도의 기
울기를 보여준다. 임펠러 근처의 진동의 변화가
캐비테이션 발생에 의한 변화($m \geq 6.0$)를 나타내
지 않은 것으로 보아 임펠러 날개면에서 캐비테이
션이 발생되지 않는다고 생각할 수 있다.

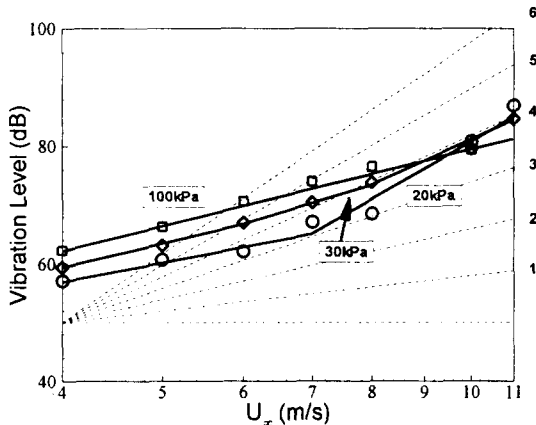


Fig.9 Dependence of vibration level
near the impeller ($f = 8.0$ kHz)

임펠러에서 캐비테이션이 발생되지 않았다면,
수중청음기에서 측정된 캐비테이션 소음원에 의한
변화는 수중청음기를 설치한 종형 축대칭체 및 시
험부의 틈새 등에서 발생한 캐비테이션에 의한 영
향이라고 생각된다. 종형 축대칭체의 경우 캐비테
이션 터널 시험부와 직접 통하여 있는데, 유속
11.0%이고 내부압력이 30kPa 이하에서 캐비테이
션이 관찰되었을 뿐 다른 작동범위에서 육안으로
관찰할 수 없었다. 그러나 관측창과 시험부와의

틈새에서 발생하는 캐비테이션은 유속 10.0%이
며 내부압력이 30kPa 이하에서 발생되어, 이와같은
틈새를 잘 조절하면 유속 10.0%까지 캐비테이션
에 의한 소음 수준의 증가는 없을 것이라 사료된
다. 다만 종형 축대칭체 내부의 유동은 속도 변화
에 따라 다른 내부 유동장의 변화가 나타날 수 있
어 유체역학적인 소음원이 유발될 가능성이 높으
므로 유동 및 구조적 진동에 직접적인 영향이 없
도록 개선이 요구된다.

4. 결 언

KRISO 터널의 음향학적 특성이 조사되었으며
그 결과는 다음과 같이 정리될 수 있다.

- 1) KRISO 터널의 시험부에 나타나는 공기방
울은 배경소음을 10~20dB정도 높이는 소
음원 이다. 본 연구에서 공기방울의 제거방
법을 파악하여 소음 및 캐비테이션 실험 정
도를 향상시켰다.
- 2) KRISO 터널에서 측정된 배경소음 성능은
타기관과 비교해서 큰 문제는 없었다. 앞으
로 수중청음기 설치 방법 및 터널 내부가
개선되면 배경소음 성능이 향상될 것이다.
- 3) 강력한 소음원으로 생각되었던 임펠러 소음
은 저주파를 제외하고는 직접적으로 시험부
에 전달되지 않았으며, 임펠러 날개면에 캐
비테이션은 터널의 작동 범위에서는 발생되
지 않는 것으로 판명되었다.

후 기

본 연구는 '98년도 과학기술부에서 시행한
기관고유사업 연구 결과의 일부이다.

참 고 문 헌

[1] Lydorf, U. and Pollmann, U. "Results of
the Hydroacoustic Survey of the
HYKAT, the New Hydrodynamic and
Cavitation Tunnel of the Hamburg Ship

- Model Basin(HSVA)", NCA-Vol.10, Hydroacoustic Facilities, Instrumentation and Experimental techniques, ASME 1991.
- [2] Abbot, P. A., Celuzza, S. A. and Etter, R. J. "The Acoustic Characteristics of the Naval Surface Warfare Center's Large Cavitation Tunnel", FED-Vol. 168, Flow Noise Modeling, Measurement and Control, ASME 1993
- [3] Boissinot, P., Fournier, P. and Frechou, D., "Acoustic Characterization of France's New Large Cavitation Tunnel", NCA-Vol. 10, Hydroacoustic Facilities, Instrumentation, and Experimental Techniques, ASME 1991.
- [4] 안종우, 김은찬 외, "고부하 저소음 프로펠러 개발(1)", 한국기계연구원 보고서, 보고서 번호 UCN033-2059.D, 1997. 12.
- [5] Bark, G., "On the Mechanism of Propeller Cavitation Noise", Ph. D. Thesis, Chalmers University of Technology, Sweden, 1988.
- [6] Tamura, K., Kato, H., Yamaguchi, H. and Maeda, M., "Effect of Flow Velocity and Air Content in Water on Various Types of Cavitation Noise", FED-Vol. 176, Bubble Noise and Cavitation Erosion in Fluid Systems, ASME 1993.
- [7] Blake, W. K. "Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration", USA, Academic Press Inc., 1986.
- [8] ITTC87, "18TH ITTC Proceeding Report", Vol.1, pp183-190, Kobe, Japan, Oct. 1987.