

## 캐비테이션 터널에서의 수중청음기 설치 방법에 따른 유동소음 특성

안종우\*, 박영하\*, 김기섭\*, 이진태\*

### The Flow Noise Characteristics on Hydrophone Installation Method in the Cavitation Tunnel

J.-W. Ahn\*, Y.-H. Park\*, K.-S. Kim\* and J.-T. Lee\*

#### 요 약

기존의 소음계측 장치가 유동장 및 구조적 진동의 영향을 받을 수 있어 개선이 요구되었다. 새로이 설계된 2개의 Hydrophone Box에 수중청음기를 설치하여 성능을 검증하였으며, KRISO 캐비테이션 터널과 외국의 다른 캐비테이션 터널들과 배경소음 특성을 비교하였다. 현재의 실험결과로 미루어 프로펠러 캐비테이션 소음의 실선성능 예측이 가능하다고 사료되며, 저주파에서의 특성이 개선되었음을 알 수 있었다.

※Keywords : Background noise(배경소음), Hydrophone Box(소음시험장치), wall effect correction(벽면효과수정), SPL(음압수준)

#### Abstract

As the existing noise measuring device was affected the flow-field and structural vibration directly, new experimental device was required. Two Hydrophone Boxes are designed and their performances are investigated. 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. The present experimental results show the possibility of the full-scale prediction for propeller cavitation noise and the improvement of the measurement performance at the range of low-frequency.

---

접수일자: 2000년 8월 29일, 승인일자: 2002년 2월 5일

\* 정회원, 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 (E-mail: ajwprop@kriso.re.kr)

## 1. 서 언

최근 군사적인 목적의 선박이나 여객선의 경우 정숙성에 대한 요구가 날로 증대함에 따라 선체진동 및 수중방사 소음의 주요원인인 프로펠러 캐비테이션에 대한 관심이 고조되고 있다. 일부 선진국에서는 이미 막대한 예산을 들여 배경소음 특성이 우수한 대형 캐비테이션 터널을 건설하여, 수중방사소음의 중요한 소음원인 프로펠러 소음을 모형시험 단계에서 정도 높게 예측하려는 노력을 시도하고 있다 (Lydorf 1991, Abbot 1993, Boissinot 1991). 이런 터널들은 공통적으로 시험부에 선체가 직접 설치되며, 유동에 방해되는 부가물들이 설치되지 않았다는 특성을 가지고 있다. 이와같은 특성으로 인하여 자체 배경소음 특성이 매우 좋아졌지만 선체에 동력계 및 구동모터 등을 직접 설치해야 하므로 실험 수행이 간단하지 않는 단점이 있다.

KRISO 캐비테이션 터널(이후로 "KRISO 터널")에서는 최근 배경소음 특성을 향상시키기 위하여 반류계측장치 등과 같은 부가물을 제거하고 하류 Vane을 개선하였으며(안종우 등, 1999), 기존의 소음계측 방법의 문제를 파악하여 터널 외부에 설치되는 Hydrophone Box를 설계·제작하였다.

기존의 소음계측 방법은 고주파 영역에서 캐비테이션 소음 등에 상대적 수준을 비교하는 데에는 문제가 없었지만, 시험부에 직접 설치됨에 따라 유동장에 영향을 주어 저주파 영역에서 소음수준이 높아지고, 구조적 진동이 그대로 전달되는 단점이 있었다(안종우 등 1999). 이러한 단점을 개선하고자 새로이 설계제작된 2종의 Hydrophone Box는 각각 터널 상부 관측창과 측면 관측창에 부착하여 유동장에 영향을 주지 않도록 하였다. 결면은 구조적 강도를 유지하기 위하여 알루미늄판을 사용하였으며, 안쪽면은 음향의 반사를 최소화하는 특수구조로 설계하여 터널 내부로부터 전달된 음향신호만을 계측하도록 하였다. 또한 터널 구조물을 따라 전달되는 진동을 감쇄시키기 위하여 Hydrophone Box와 터널 관측창 사이에 감쇄장치도 설치하였다.

본 연구에서 설계·제작된 Hydrophone Box

들과 기존의 소음계측 장치에서 계측된 소음특성을 파악하였으며, 외국의 캐비테이션 터널들과의 배경소음 수준도 비교하였다. 또한 모형시험 결과로부터 실선성능을 예측하기 위하여 터널 시험부 벽면효과 수정을 위한 시험을 수행하였으며, 벽면효과의 수정결과 프로펠러 소음의 모형선-실선 상관관계 예측이 가능한 결과를 얻을 수 있었다.

## 2. Hydrophone Box의 설계

기존의 수중청음기(Hydrophone) 설치방법인 종형축대칭형(Bell type)는 고주파 쪽에 측정감도가 매우 좋은 장점이 있었다(안종우 등 2000). 그러나, 터널시험부 내부에 오목하게 직접 설치됨에 따라 유동장에 영향을 주어 자체적인 소음이 유발되는 문제가 있었으며, 터널 자체에서 발생하는 구조적 진동이 그대로 전달될 수 있는 단점이 있었다. 또한 고주파에서 측정된 신호도 상대적인 비교에 큰 문제가 없었으나, 프로펠러 실선소음을 예측하기 어려운 분포로 나타났기 때문에 수중청음기 설치방법에 개선이 요구되었다.

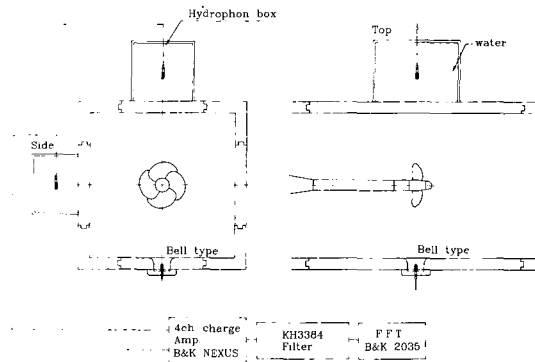


Fig.1 Experimental set-up

본 연구에서 새로이 설계·제작되는 실험장치인 Hydrophone Box들은 상자형으로 만들어졌으며, 기존의 실험장치의 문제점을 해결하기 위하여 터널 상부 및 측면 관측창에 부착하여 (Fig.1 참조), 유동장에 영향을 주지 않도록 하였다. 결면은 구조적인 강도를 유지하기 위하여

여 알루미늄을 사용하였으며, 안쪽면은 음향의 반사를 방지하기 위한 구조로 설계하여 터널 내부로부터 전달된 신호만을 계측하도록 하였다. 또한 터널 구조물을 따라 전달되는 진동을 감쇄시키기 위하여 Hydrophone Box와 터널 관측창 사이에 감쇄장치도 설치하였다.

Hydrophone Box를 설계함에 있어서 계측범위에 따른 흡음재의 배열방법을 우선적으로 고려하였다. 또한 Box 내부에 물이 가득 채워지므로 방수문제도 고려하였다. 반사음의 흡수를 위한 흡음재의 선택 및 배열방법은 기존의 자료를 참고하여 결정하였다(Richardson 1957, Wendlandt 1995).

Hydrophone Box를 이용하여 소음계측을 수행하기 위하여 Box 내부에 물을 가득 채우고, Hydrophone을 천장에서 매달아 놓은 형태로 설치한다(Fig.1 참조). Box내의 물은 용존산소의 영향을 최소화하기 위하여 끓인 물을 사용하거나 약 45% 정도의 용존산소를 함유한 물을 사용한다.

### 3. 배경소음의 계측

배경소음의 계측은 Fig.1에 나타난 기존의 방법 (이후로 "Bell Type"), 터널 상부 (이후로 "Top Box")와 측면 (이후로 "Side Box") Hydrophone Box에 수중청음기(Hydrophone)를 설치하여 수행하였다. Hydrophone에서 계측된 신호는 전하형(charge type) 증폭기에서 증

폭된다. 장비의 동적영역의 제한(80dB) 때문에 발생하는 고주파 성분의 증가 현상을 개선하고자 KH3364 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.2는 유속 8.0m/s에서 내부압력의 변화에 따른 3가지 실험장치의 배경소음의 변화를 보여준다. 3가지 실험장치 모두 내부압력 변화에 따라 소음수준의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. Side Box와 Top Box의 경우 1.0kHz 부근의 저주파 영역에서 유동장 및 구조적 진동이 영향이 적어 Bell type 보다 소음수준이 급격히 감소되었음을 볼 수 있다. Bell type의 경우에 저주파에서 배경소음이 증가되는 것은 당연하지만, 현재의 실험장치의 경우 설계 특성상 3.0kHz 이하의 저주파에서 신호가 필터링될 가능성이 있으므로 주의를 요한다. 10kHz이상의 고주파 영역에서는 3가지 실험장치의 소음 계측 특성이 비슷하게 나타났다.

Fig.3은 내부압력이 30kPa에서 유속변화에 따른 소음수준의 변화를 보여준다. 3가지 실험장치 모두 50kPa까지 11.0m/s까지 유속변화에 따라 급격한 변화없이 거의 유사한 형태를 유지하면서 소음수준이 증가된다. 그러나, 30kPa에서는 속도변화에 따라 급격히 소음수준이 증가하는 영역이 나타난다. Bell Type의 경우 9.0m/s까지 유사한 증가 형태를 보여주지만, 10.0m/s부터 소음수준이 급격히 증가한다.

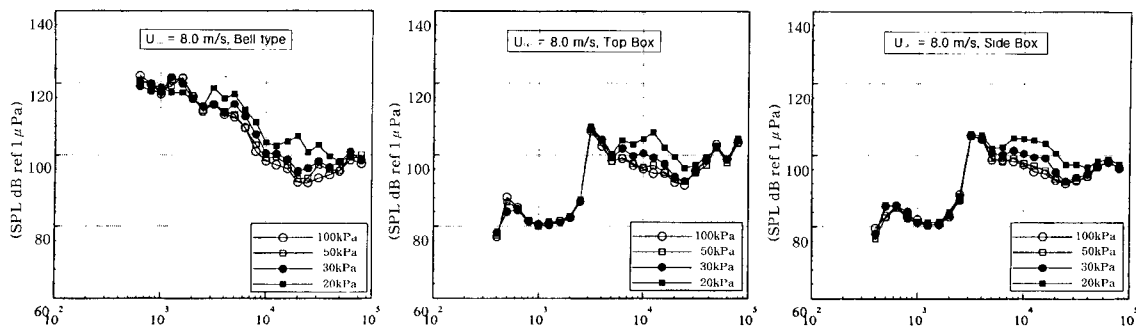


Fig.2 Background noise ( $V_{\infty}=8.0\text{m/s}$ )

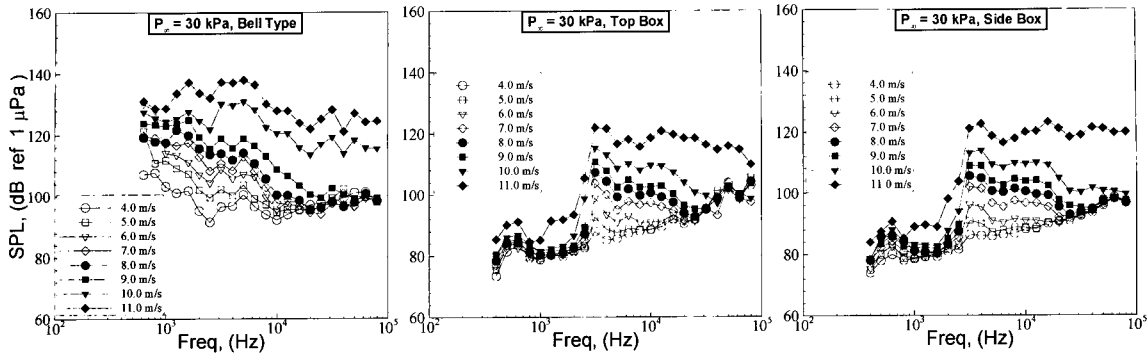


Fig.3 Background noise at constant pressure ( $P_{\infty}=30\text{kPa}$ )

Side Box 및 Top Box의 경우는 10.0%까지 유사한 증가 형태를 보여주며, 11.0%에서 고주파의 소음수준이 급격히 변화함을 볼 수 있다. 유동장에 영향을 주지 않는 현재의 Hydrophone Box들의 경우 터널 내부압력 30kPa에서 10.0%까지 소음실험이 가능함을 알 수 있다.

Fig.4는 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 6.0%이며, 대기압 상태로 동일하지만, 측정방법에는 차이가 있다. KRISO의 경우는 Bell Type과 Side Box의 배경소음 측정 결과를 동시에 비교하였다. 독일에 HYKAT 및 K16은 Acoustic Chamber에 수중 청음기를 설치하는 방법을, 프랑스의 GTH는 종형 축대청체에 수중청음기를 설치하고 빈공간에 물과 비슷한 고형물질을 채워넣는 방법을 사용하였다. 타기관의 실험방법은 본 연구에서의 Hydrophone Box와 같이 유동장에 직접 영향을 받지 않는 구조로 설계되어 있다.

Side Box에서 측정된 KRISO 터널의 배경소음 성능은 3.0kHz이상에서 HYKAT의 배경소음 특성과 비슷한 성능을 보여준다. 5.0kHz부터는 평균 4.0dB정도 크게 나타났으며, 3.0kHz 미만에서는 평균 10.0dB정도 작게 나타났다. KRISO 터널은 GTH와 K16보다는 매우 우수한 배경소음 특성을 우수한 배경소음 특성을 보여주고 있으며, 특히

5.0kHz이상에서 배경소음이 GTH보다는 10~20 dB가 낮으며, K16보다는 약 10dB가 낮게 나타난다. Bell type의 경우 저주파의 좋지 않은 특성을 잘 보여준다. GTH와 K16의 배경소음은 HYKAT의 그것보다 높지만 캐비테이션 소음 뿐만 아니라 프로펠러 날개 형상에 따라 유발되는 유체역학적 소음도 측정할 수 있다고 알려져 있다. 이런 점으로 미루어 보아서 KRISO 터널에서도 현재의 Hydrophone Box를 이용해서 캐비테이션 소음 뿐만 아니라 유체역학적인 소음을 충분히 측정할 수 있다고 생각된다.

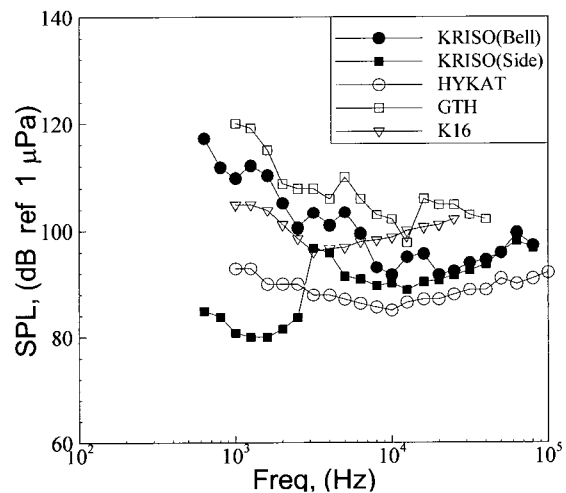


Fig.4 Comparison of background noise level

4. 벽면효과 수정

일반적으로 캐비테이션 터널에서 측정된 모형프로펠러 소음은 수정없이 실선소음으로 추정될 수 없다. 실선소음은 자유 음장에서 측정되는 반면에 캐비테이션 터널에서는 아크릴 창을 통과하여 소음을 측정함으로써 나타나는 벽면효과가 존재하게 된다. 벽면효과 수정은 자유음장에서 음향특성이 알려진 Projector를 터널내부에 설치하고 벽면을 통과하여 측정된 소음수준과의 비교를 통하여 알 수 있다(Fig.5 참조).

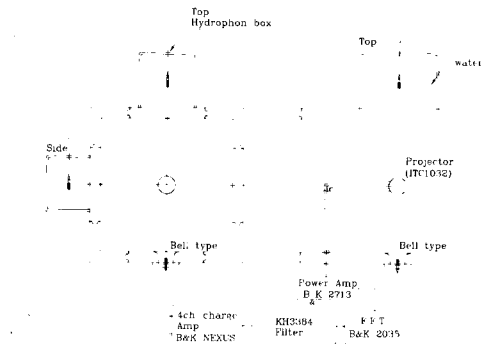


Fig.5 Projector installation for wall effect correction

본 연구에서 사용한 Projector는 ITC1032이며, 수중에서 방출되는 음향특성은 제작사에서 제공한 근사식을 이용하여 계산하였다.

$$\log P(w) = 1.93\log(f) + 4.48 \quad \text{for } f < 33\text{kHz}$$

$$\log P(w) = -2.06\log(f) + 10.61 \quad \text{for } f > 33\text{kHz} \quad (1)$$

Fig.5에 나타난 것과 같이 Projector를 터널 중심에 장치하고, B&K 2035 주파수 분석기에 장치된 Generator(Type 3016)에서 백색잡음(white noise)을 발생시키고 B&K 2713 증폭기에서 30dB를 증폭시켜 Projector에 입력시키고, 방출된 신호를 Top Box와 Side Box에 장치된 Hydrophone에서 측정하게 된다.

Fig.6은 근사식으로 계산된 Projector의 자유 음장에서의 음향특성과 3,15kHz 이상의 값이 도시된 제작사의 캘리브레이션 도표를 참조하여 3,15

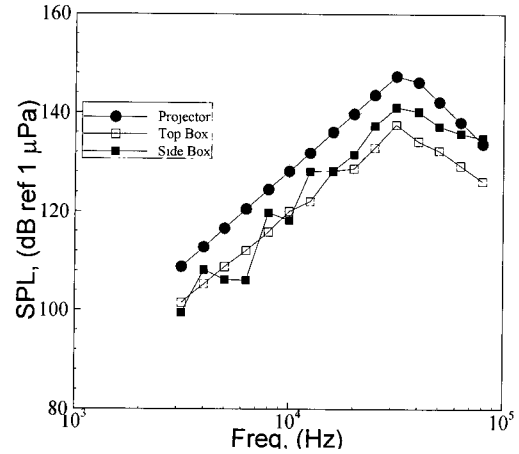


Fig.6 Characteristic for wall effect correction

kHz 이상에서의 값을 도시하였다. 측정후 Projector의 기준(dB ref 1 μPa m/V)에 따라 수정된 Top Box와 Side Box의 수치를 보여준다. 벽면효과 수정이란 각 주파수에서 Projector와 차이를 합산해 주는 것으로 일반적으로 벽면을 통과할 경우 Projector 음향보다 작게 나타난다. Projector에서 Top Box와 Side Box에 장치된 Hydrophone까지의 거리는 각각 0.586m와 0.553m였으며, Generator에서 1.0 Volt가 출력되고 B&K 2713에서 30dB가 증폭됨에 따라 Projector에는 31.6 Volt가 입력되게 된다.

Fig.7은 KP480 프로펠러에 대하여 Top Box와 Side Box에서 측정된 소음측정 결과를 보여준다. 프로펠러 제원 및 실험조건은 송인행 외(2000)에 정리되어 있으며, Dummy hub 상태의 소음수준을 점검한 후 측정을 수행하였다. 2가지 실험장치에서 얻어진 실험결과는 거의 일치하지만 2.5kHz 부근에 변곡점과 40kHz 이상에서 기울기의 차이가 나타나고 있다. 고주파에서의 기울기는 캐비테이션이 붕괴되는 영역이므로(Lovik 2000) 실험장치에 따라서 기울기의 차이가 나타날 수 없다. 이와같은 차이는 벽면이 존재함으로써 나타나는 현상이므로 벽면효과 수정이 요구된다. Fig.8는 벽면효과 수정 후에 결과를 보여주는데 2.5kHz 부근에 변곡점과 고주파 영역의 기울

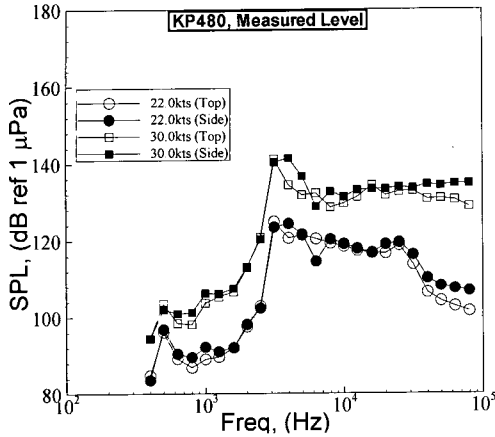


Fig.7 Noise characteristics of KP480  
(Before wall effect correction)

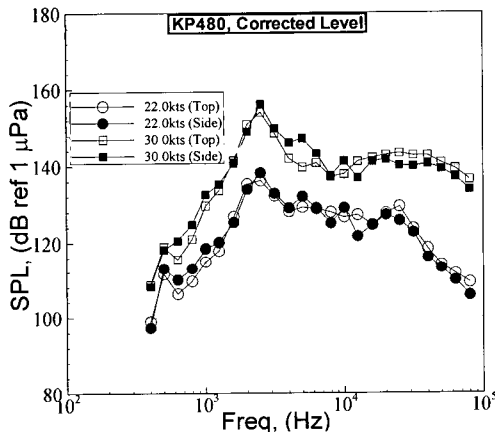


Fig.8 Noise characteristics of KP480  
(After wall effect correction)

기가 서로 일치됨을 볼 수 있다. 선속이 22.0kts 조건에서는 캐비테이션이 발생하지 않았지만, 30.0kts에서는 캐비테이션이 발생하는 영역이다 (송인행 외 2000). Fig.8에 나타난 30.0kts의 수정 결과를 살펴보면 캐비테이션이 발생하는 프로펠러의 일반적인 소음 스펙트럼의 형태를 볼 수가 있다. 전형적인 프로펠러 캐비테이션의 소음 스펙트럼의 경우 저주파 영역에서 octave당 4dB 정도의 증가량을 보여주며(Region I), 최대값을 지나면서 octave당 2.5dB 정도의 감소량을 보여

준다(Region II). 캐비테이션이 붕괴되기 시작하는 주파수는 고주파 영역에서 나타나는데 octave당 2dB 정도의 감소량을 보여준다(Region IV) (Lovik 1980). Fig.8에 나타난 선속 30.0kts의 벽면수정 결과에서 살펴볼 때 2.5kHz까지의 저주파에서 octave당 4.3dB 정도의 증가량을 볼 수 있었으며(Region I), 2.5kHz에서 10kHz까지 octave당 2.7dB 정도의 감소량을 보여준다(Region II). 40kHz 이상의 고주파 영역에서는 octave당 2.3dB 정도의 감소량을 보여준다. 이런 결과로 미루어 보아 KRISO 캐비테이션 터널에서 계측된 프로펠러 캐비테이션 소음은 실선소음 성능을 예측하는데 활용할 수 있다고 생각된다.

## 5. 결 언

KRISO 캐비테이션 터널에서 수중청음기 설치 방법에 따른 유동소음 특성을 살펴보았으며, 장단점 및 차이점을 조사하였다. 또한 벽면효과 수정을 통하여 실선소음 예측에 가능성을 살펴보았다. 그 결과는 다음과 같이 정리될 수 있다.

- 1) Hydrophon Box로 계측된 배경소음 특성은 기존에 Bell Type에 비하여 10kHz이하의 저주파에서 특성이 향상되었으며, 10kHz이상의 고주파에서는 큰 차이를 보여주지 않았다. 그러나, 유속 10%, 압력 30kPa까지 소음수준에 급격한 증가가 없어 Bell type보다 실험가능 한계가 향상되었다.
- 2) 터널 내부를 개선한 후에 Hydrophone Box로 계측된 배경소음은 타기관과 비교해서 매우 좋은 특성을 보여주었다.
- 3) 계측된 프로펠러 소음결과를 가지고 벽면효과를 수정한 후에 나타난 스펙트럼의 형태는 전형적으로 알려진 프로펠러 캐비테이션 소음 스펙트럼의 형태와 비슷하게 나타났다. 앞으로 모형시험 결과로부터 실선소음을 예측이 가능 하리라 생각된다.

후 기

본 연구는 '99년도 과학기술부에서 시행한 기관  
고유사업 연구 결과의 일부이다.

참 고 문 헌

- 안중우 외 1999 "고부하 저소음 프로펠러 개발 (III)," 한국해양연구원 보고서, 보고서 번호 UCE999163-2205.
- 안중우 외 2000 "수중소음 계측을 위한 KRISO 캐비테이션 터널의 음향학적 특성," 대한조선학회 논문집 제 37권 제 1호.
- 송인행, 안중우, 김기섭, 문일성 2000 "고속 프로펠러의 캐비테이션 소음 특성," 대한조선학회 논문집 제 37권 제 2호, 2000. 5.
- Lydorf, U. and Pollmann, U. 1991 "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.
- Abbot, P. A., Celuzza, S. A. and Etter, R. J. 1993 "The Acoustic Characteristics of the Naval Surface Warfare Center's Large Cavitation Tunnel," FED-Vol. 168, Flow Noise Modeling, Measurement and Control, ASME.
- Boissinot, P., Fournier, P. and Frechou, D. 1991 "Acoustic Characterization of France's New Large Cavitation Tunnel," NCA-Vol. 10, Hydroacoustic Facilities, Instrumentation, and Experimental Techniques, ASME.
- Technical Aspects of Sound(Vol. II), Edited by E. G. Richardson 1957 "Ultrasonics Range, Underwater Acoustics," Elsevir Publishing Company, 1957.
- Wendlandt, B.C.H. 1995 "Scatter, Radiation and Attenuation of Acoustic Waves in Discontinuous structures," Design Engineering Technical Conferences, ASME.
- Lovik, A. 1980 "Scaling of Propeller Cavitation Noise," ELAB Report STF 44 A80123, Univ. of Trondheim, Norway.