

MOERI 캐비테이션 터널의 음향특성 분석 및 추진기 BPF 소음 계측에 관한 연구

설한신^{†*}, 박철수*, 김기섭*, 조용진*

한국해양연구원 해양시스템안전연구소*

Background Noise Analysis of the MOERI Cavitation Tunnel & Propeller BPF Noise Measurement

Hanshin Seol^{†*}, Cheolsoo Park*, Ki-Sup Kim* and Yong-Jin Cho*

Maritime and Ocean Engineering Research Institute (MOERI)/ KORDI*

Abstract

This paper summarizes an experimental study on the marine propeller BPF noise. The main objective of this study is to show the worthiness of the noise measurement at the MOERI middle size cavitation tunnel and to acquire useful propeller noise data. Background noise of MOERI(Maritime and Ocean Engineering Research Institute) cavitation tunnel is experimentally analyzed. Experiment carried out in the MOERI cavitation tunnel with wake screen or dummy body, which is simulated the wake. Propeller BPF noise is measured under various operating conditions. In order to secure the reliance of measured propeller noise data, background noise of each operating conditions are measured and analyzed. The noise characteristics are analyzed according to the operating condition.

※Keywords: Propeller noise(추진기 소음), Non-cavitating noise(비공동 소음), Cavitation noise(공동 소음), Cavitation tunnel(캐비테이션 터널)

1. 서 론

수중 추진기의 소음은 군사적으로 매우 중요하게 여겨져 왔으며 최근 거주부의 안락함이 요구되는 크루즈선 개발과 함께 그 중요성이 더욱 커지고 있다. 추진기 소음은 소음 강도도 다른 소음원

에 비하여 클 뿐 아니라 함정의 식별 수단으로 사용되는 등 매우 중요하나 선체 내부에 존재하여 차폐가 가능한 기계류등의 소음원과는 달리 소음원 자체가 선미 외부에 위치하기 때문에 소음의 전달과정에서 제어하기는 매우 어렵다. 따라서 소음원 자체를 저소음화 하여야 한다.

저소음 추진기의 개발은 앞서 말한 바와 같이 군사적 측면에서 중요하여 선진국들은 이에 대한 연구에 많은 인력과 자원을 투자하여 왔다. 하지

접수일: 2007년 4월 19일, 승인일: 2007년 6월 28일

† 교신저자: hssseol@moeri.re.kr, 042-868-7695

만 이에 대한 기술 이전이나 자료의 공개는 거의 이루어지지 않고 있다. 그러므로 추진기 소음의 측정과 예측에 관한 기술을 획득하는 것은 군사적 면에서 그리고 최근 크루즈선 개발과 관련하여 산업계에서 관심이 높아지고 있는 긴요한 문제라고 할 수 있을 것이다.

추진기 소음은 넓은 주파수 대역에서 소음원이 복합적으로 작용하는 특성을 가지고 있다. 다양한 형태의 캐비테이션이 동시에 발생하며 그 발생 형태에 따라 영향을 미치는 주파수 대역 및 소음 특성 또한 다르기 때문에 캐비테이션의 발생 및 여러 현상에 대한 원인의 구명 및 해석방법에 많은 한계를 나타내고 있다. 지금까지는 대체로 소음 예측 시에는 실험 자료를 바탕으로 만들어진 경험식을 사용하는 것이 일반적이었다. 하지만 캐비테이션의 발생 및 특성에 대한 물리적 접근이 어렵다는 단점이 있다. 반면, 이론적, 수치적 접근은 추진기에서 발생하는 캐비테이션 형태에 따른 물리적 접근이 용이하다는 장점이 있는 반면 소음원 모델링에 있어 많은 가정을 포함하고 있기에 실제와 오차를 포함하는 단점이 있다. 따라서 추진기 소음 연구에 있어서 실험적 접근과 이론적, 수치적 접근이 상호보완적으로 이루어져야 한다.

최근 국내에서도 수중 추진기 소음의 예측과 예측에 관한 연구가 많이 진행되고 있으나 추진기의 BPF 소음 (Blade Passage Frequency Noise) 예측과 같은 정밀한 소음 예측에 관한 연구는 찾아 보기 힘들다. (설한신 등 2004, 서종수 등 2004) 캐비테이션 터널에서 정확하게 소음을 예측하는 것은 터널 관측부의 공간적, 물리적 제약으로 인해 매우 어려운 작업이라 할 수 있다. 해상과 물리적 특성이 많이 다를 뿐 아니라 터널 벽면에 의한 음의 반사등이 존재하며, 관측부 크기의 공간적 제약으로 인해 소음원 근처에서 예측이 이루어지기 때문에 근접장 효과가 예측결과에 포함되어 있다. 이러한 터널의 물리적 제약 뿐 아니라 예측 시스템 또한 정확한 측정을 위해서는 중요한 문제라 할 수 있다. 수중 청음기에 의한 유동 소음, 즉 수중 청음기에 의한 캐비테이션과 난류는 예측 되는 배경소음을 크게 하여 소음원에서 방사하는 정확한 소음의 측정을 어렵게 한다. 하지만

Bark and Berlekom(1978)의 실험결과에 의하면 캐비테이션 터널에서 추진기 소음 예측 시에 추진기에 의한 소음이 매우 지배적이기 때문에 적절히 배치된 수중 청음기에 의해 예측된 결과는 모델 테스트와 물리적 접근을 하는데 있어서 신뢰할 수 있는 결과를 제시해 준다고 하였다. 따라서 수중 청음기의 위치 및 배치 방법은 캐비테이션 터널에서 소음 예측에 있어 중요한 연구대상이라 할 수 있다. 미국의 LCC(Large Cavitation Channel)등과 같은 대형 캐비테이션 터널은 Acoustic Trough와 같은 소음 예측을 위한 장비를 갖추고 있지만 MOERI 중형 캐비테이션 터널은 소음 예측을 위해 설계 되었다기 보다는 추진기 캐비테이션 발생 거동을 용이하게 관찰할 수 있도록 설계되었다. 그러므로 본 연구에서는 추진기 소음예측에 앞서 MOERI 캐비테이션 터널의 배경 소음을 예측하여 추진기 소음 예측 가능성을 검토하고 추진기의 형상 및 운용 정보를 담고 있는 추진기 BPF 소음의 측정법과 측정 결과를 분석하였다. 이러한 추진기 소음 예측은 소음 해석 기법 개발의 기초 자료로서 활용 할 수 있을 것이며 향후 MOERI에서 보유히게 될 저소음 대형 캐비테이션 터널의 추진기 소음 예측법의 기초로서도 활용 될 수 있을 것이다.

2. 본 론

추진기 소음 예측법은 터널 운용 상태에 따라서 크게 세 가지 방법을 적용하였다. 첫 번째는 일반적인 추진기 실험에 사용되는 반류 스크린(wake screen)을 장착하였을 경우에 터널 벽면에 유동에 수직하게 수중 청음기를 부착하는 방법, 두 번째는 선체와 같은 바디(body)를 부착하고 추진기 시험을 하는 경우는 바디 뒷 부분에 유동에 평행하게 수중 청음기를 장착하였으며 세 번째는 소음원 위치 파악을 위하여 추진기 하류 방향에 수중의 형태의 예측 시스템을 제작하여 소음을 예측하였다.

터널의 음향학적 특성을 파악한 후, 각 경우 예측된 추진기 소음 값의 신뢰성을 확보하기 위하여 배경소음을 예측 하였다. 추진기 소음은 반류 스

크린과 더미 바디를 이용하여 반류를 생성하여 비균일 유입류하에서 추진기 소음 예측 가능성 여부와 캐비테이션 생성과 그에 따른 소음 특성을 고찰 하였다.

소음 측정은 수중 청음기(B&K 8103)를 사용하였으며 측정된 신호는 B&K NEXUS2692모델을 이용하여 증폭되어 LABVIEW 프로그램을 통해 소음 신호를 획득하였다. 전기적인 노이즈를 제거하기 위하여 NEXUS를 포함한 모든 장비들은 접지 상태로 계측하였다.

2.1 관측부 배경 소음의 계측

관측부에서의 배경 소음을 계측하기 위하여 수중 청음기를 터널 윗 벽면 관측부에서 475mm 뒤쪽, 추진기가 장착되었다고 가정하였을 때 추진기 회전면의 125mm 상류지점에 부착하고 터널 유속을 정지 상태에서 7.0m/s까지 변화시키며 소음을 계측하였다. 이전 연구 결과(안종우 등 2000)에 의하면 터널 내부 압력에 따른 배경소음의 변화는 없었기에 터널 내부 압력은 100kPa로 일정하게 유지하였다. 유속에 따라 계측된 관측부 배경소음을 $\Delta f = 1\text{Hz}$ 간격의 로그 스케일로 전 주파수 대역에 대한 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

유속이 빨라질수록 전 주파수 대역에서 소음 수준이 증가함을 볼 수 있다. 터널을 구동시키는 임펠러 소음이 관측부 배경소음에 미치는 영향을 알아보기 위하여 100Hz이내의 저주파 협대역에서 소음수준을 Fig. 2에 도시하였고 임펠러의 회전속도 및 날개통과 주파수(BPF)를 Table 1에 나타내었다.

Fig. 2의 결과에서 보듯 유속이 낮은 경우는 임펠러의 Table 1에서 나타낸 1차 BPF와 그의 하모닉 주파수에서 소음수준의 피크가 관측되나 유속이 증가함에 따라 임펠러의 BPF 소음이 전체적으로 증가한 유동 소음에 묻혀 버림을 볼 수 있다. 이는 유속이 빨라지면서 터널 하부에서 구동중인 임펠러 소음 보다는 관측부와 가까운 터널 내부 벽면의 난류 소음과 굴곡부에서의 박리등의 유동 소음이 지배적인 소음원이 되어 감을 알 수 있다. 유속이 빨라 질 수록 전 주파수 대역에서 소음 수준이 증가하며 관측부 유속이 높은 경우는 배경

소음이 추진기 소음 수준에 근접할 정도로 커져 추진기 소음 계측이 어려울 것으로 여겨지나 유속이 낮은 경우에는 계측이 가능 할 것으로 판단된다.

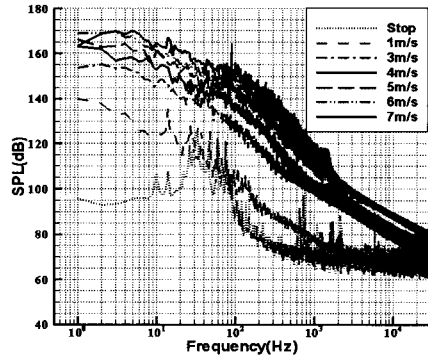


Fig. 1 Background noise

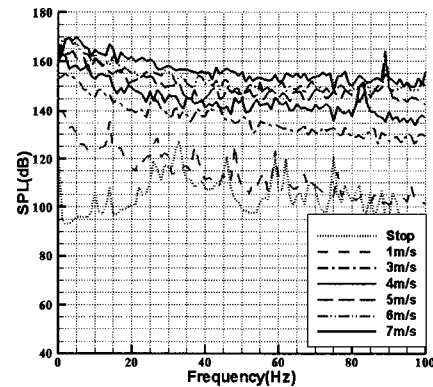


Fig. 2 Background noise - low frequency

Table 1 Impeller RPM & BPF frequency

| 터널 유속 | 임펠러 RPM | 1st BPF |
|-------|---------|---------|
| 1m/s | 101 | 6.7Hz |
| 3m/s | 315 | 21Hz |
| 4m/s | 418 | 27.8Hz |
| 5m/s | 522 | 34.8Hz |
| 6m/s | 628 | 41.8Hz |
| 7m/s | 730 | 48.7Hz |

2.2 추진기 소음 계측

2.2.1 반류 스크린(wake screen) 사용시의 소음 계측

MOERI 캐비테이션 터널은 모형선 전체를 관측 부에 설치하여 실험을 할 수 없기에 일반적으로 반류 스크린을 이용하여 선체 반류를 모사하여 캐비테이션 형상과 변동 압력 계측과 같은 실험을 수행한다. 이 경우의 소음 계측 실험 장비 구성을 Fig. 3에 나타내었다.

반류 스크린을 사용하는 경우, 하류 방향의 하이드로포일 형태의 계측 시스템은 하이드로포일 주변에서 붕괴되는 버블과 난류에 의한 소음이 계측되어 추진기 소음을 계측할 수 없었기에 터널 관측부 윗 벽면의 청음기를 통해 소음을 계측 하였다. 수중 청음기의 위치는 추진기 회전면에서 125mm 앞쪽에 위치하게 하였다. 추진기 소음 계측 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 반류 스크린 동력계에 의하여 발생하는 소음을 추진기 소음 계측 조건에서 계측하였다.

반류 스크린과 동력계에 의한 배경소음 측정시, 비공동 조건의 경우 터널 내부 압력을 160kPa로 고정한 상태에서 관측부 유속을 3.0m/s, 동력계를 10rps에서 17rps까지 변화시키며 계측하였고 공동 조건의 경우 동력계 회전속을 20rps로 고정하고 터널 압력을 150kPa에서 30kPa까지 낮추어 가며 배경소음을 계측하였으며 그 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다.

결과 그림에서 보듯 비공동, 공동 조건 모두

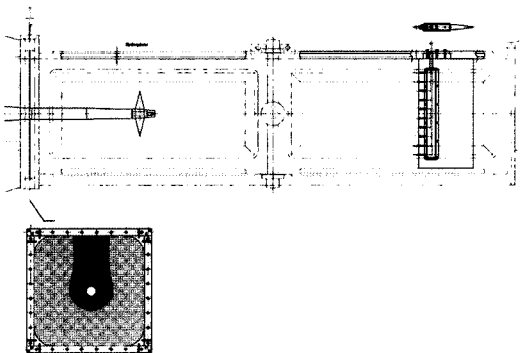


Fig. 3 Experiment set-up(wake screen case)

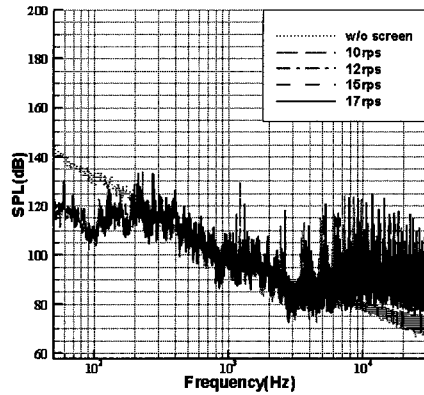


Fig. 4 Background noise of wake screen (Non-cavitation condition)

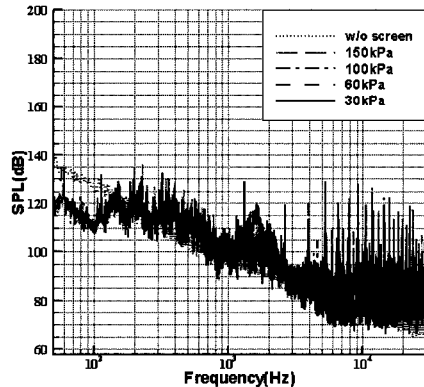


Fig. 5 Background noise of wake screen (Cavitation condition)

100Hz 이하대역에서는 반류 스크린이 없을 때 보다 소음이 감소했음을 알 수 있다. 이는 반류 스크린이 캐비테이션 터널의 배경소음을 줄이기 위해 설치되는 벌집 모양 유동 정류 장치(honeycomb)과 같은 역할을 하여 유동의 교란 주기를 작게 만들어 저주파 대역에서 소음을 낮춘 것으로 판단된다. 하지만 고주파 대역에서는 전체적으로 소음이 증가하였고 4kHz 부근에서 소음 피크가 주파수에 연속적으로 계측 되었다. 이는 반류 스크린을 구성하고 있는 wire mesh에 의해 작은 버블(캐비테이션)의 발생과 wire 주변에서의 유동 박리 그리고 wire의 진동에 의하여 나타난

Table 2 Non-cavitating condition

| RPS | 터널 압력 | σ_n | K_T |
|-----|--------|------------|--------|
| 10 | 160kPa | 47.34 | 0.1540 |
| 12 | 160kPa | 32.83 | 0.2024 |
| 15 | 160kPa | 21.00 | 0.2504 |
| 17 | 160kPa | 16.30 | 0.2725 |

Table 3 Cavitating condition

| RPS | 터널 압력 | σ_n | K_T |
|-----|--------|------------|--------|
| 20 | 150kPa | 11.78 | 0.2984 |
| 20 | 100kPa | 7.78 | |
| 20 | 60kPa | 4.55 | |
| 20 | 30kPa | 2.17 | |

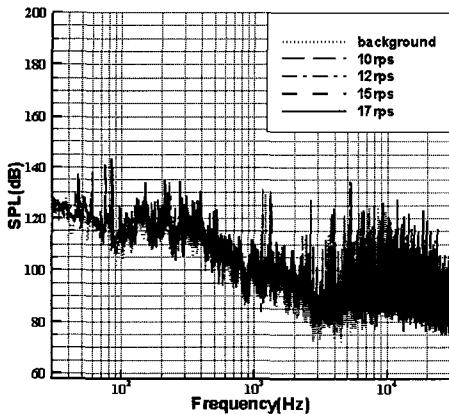


Fig. 6 Non-cavitating noise spectrum

결과로 판단된다. 이러한 반류 스크린을 이용한 실험에서 추진기 고주파 대역의 소음을 계측하여 분석하기는 어려울 것으로 판단되어 진다. 하지만 추진기 와 추진기 운용상태 정보를 담고 있으며 가장 큰 소음수준을 나타내는 추진기 BPF 소음은 1kHz 이하의 저주파 대역에서 잘 나타나기에 이는 계측이 가능 할 것으로 판단되었다.

유속을 3.0m/s 인 상태에서 비공동 조건, 즉 관측부 내부 압력을 160kPa로 고정한 상태에서 추진기 회전 속도를 10rps에서 17rps까지 상승시

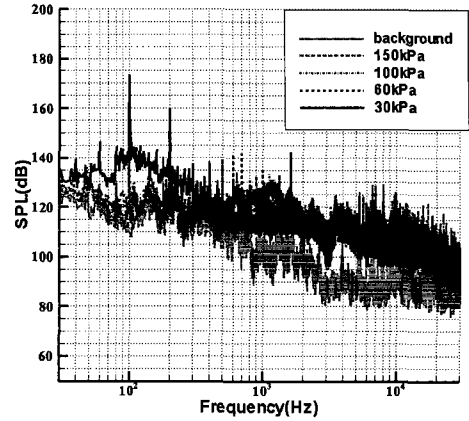


Fig. 7 Cavitating noise spectrum

키며 소음 특성의 변화를 고찰하였으며 공동 조건의 경우 추진기 회전수를 고정하고 터널 내부 압력을 조절하여 캐비테이션 수를 낮추어가면서 소음을 측정하였다. 각각의 경우 실험조건을 Table 2와 Table 3에 계측된 소음의 주파수 대역에서의 결과를 Fig. 6 과 Fig. 7에 나타내었다. 고속카메라로 촬영한 캐비테이션 형태를 Fig. 8에 나타내었다. 고주파 대역에서는 반류 스크린에 의해 발생하는 소음 때문에 추진기 소음 특성을 알 수 없었으나 저주파 대역에서는 추진기 블레이드의 주기적 회전(비공동 조건)과 블레이드 표면의 얇은 층 캐비테이션 체적의 변화(공동조건)에 의해 생성되는 BPF 소음이 잘 계측되었음을 볼 수 있다.

비공동일 경우 회전수가 높아짐에 따라 추력계수(K_T)가 증가하고 그에 따라 BPF 소음도가 증가함을 볼 수 있으며 공동이 발생한 경우에는 캐비테이션 수(σ_n)가 작아짐에 따라서 BPF 소음이 매우 크게 증가함을 볼 수 있다.

2.2.2 더미 바디(dummy body) 사용시의 소음 계측

2.2.1 결과에서 보듯 반류 스크린을 사용하여 반류를 생성하는 경우 캐비테이션 수가 낮아지면 반류 스크린에서 발생하는 캐비테이션과 유동에 의한 소음으로 고주파 대역에서 추진기 소음 계측이 어려웠다. 본 절에서는 추진기 회전면에서 반류를 만들어 줄 수 있는 더미 바디를 제작하여

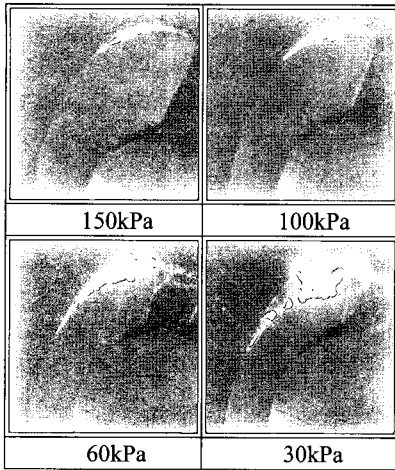


Fig. 8 Cavitation Pattern

반류를 생성, 추진기 소음을 계속하였다. 더미 바디는 바디 자체에서 캐비테이션이 발생하지 않도록 유선형 형태로 모델링 하여 배경 소음을 최소화하려 하였다.

수중 청음기는 Fig. 9에서 보듯이 더미 바디 뒷부분 회전면 근처에 장착하였다. 앞서 언급한 바와 같이 캐비테이션 터널은 수중과는 달리 벽면으로 막혀 있어 추진기에서 발생한 소음이 벽면의 의해 반사되어 정확한 계측 값을 얻기 어렵다. 하지만 추진기 소음 자체가 매우 지배적이므로 추진기와 가까운 위치에서 측정이 이루어진다면 반사, 회절되어 들어오는 소음보다 추진기에 의해 생성되어 계측되는 소음이 지배적이게 되기 때문이다. 하지만 추진기 근처에서는 근접장 효과가 지배적으로 존재하기 때문에 이를 원지장에서 값으로 예측하기 위한 해석 수단이 필요할 것으로 보인다.

더미 바디(dummy body)가 설치된 추진기의 소음을 계측하기에 앞서 더미 바디를 설치한 상태에서의 배경소음을 계측하였다. 더미 바디를 장착하고 동력계 축을 20rps, 유속을 3m/s로 고정 한 후 터널 내부 압력을 160kPa에서 30kPa까지 낮추어가며 배경소음을 계측하여 Fig. 10에 나타내었다.

100Hz 이후 대역에서 더미 바디 주위의 유동으로 인해 약간의 소음 증가를 보였으나 주위 압력 변화에 따른 소음 변화가 없는 것으로 보아 더미 바디에서 캐비테이션이 생성되지 않음을 유추할

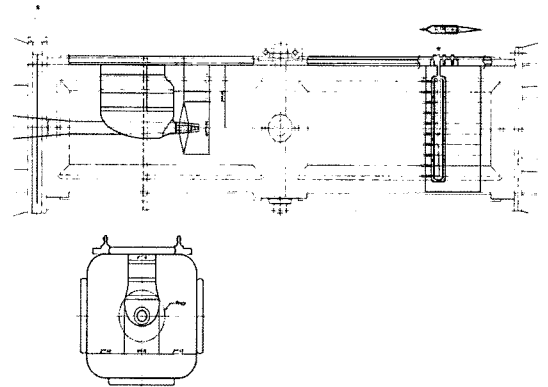
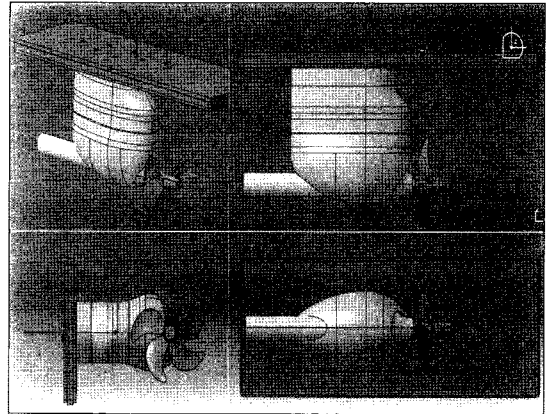


Fig. 9 Experiment set-up(dummy body case)

수 있다.

비공동 상태와 공동 조건에서의 실험 조건을 Table 4와 Table 5에 정리하여 나타내었다. 비공동 상태에서 추진기 소음을 계측하기 위하여 압력을 160kPa을 유지한 상태에서 추진기 회전 속도를 14rps에서 20rps로 변화시키며 소음을 계측하여 Fig. 11에 나타내었다. 결과에서 보듯 100Hz 이하 대역에서 BPF 소음 피크가 보이지만 이후 배경 소음과 유사한 소음도를 보임을 볼 수 있다. 공동 상태의 경우 계측 결과와 캐비테이션 형태를 Fig. 12와 Fig. 13에 나타내었다. 추진기 회전수와 유속을 20rps, 3.3m/s인 상태에서 터널 압력을 조절하여 캐비테이션 수를 바꾸어가며 소음을 계측하였다. 터널 압력이 80kPa인 경우는 캐비테이션이 거의 발생하지 않아 비공동 소음과 유사

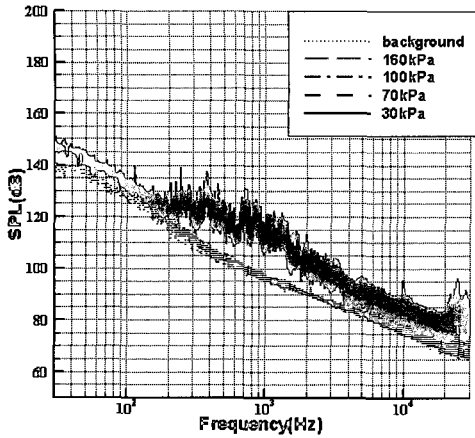


Fig. 10 Background noise of dummy body

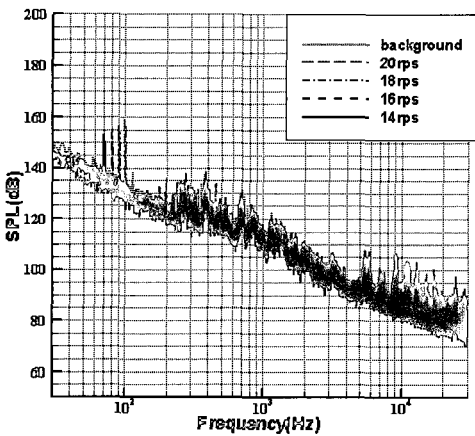


Fig. 11 Non-cavitating noise spectrum

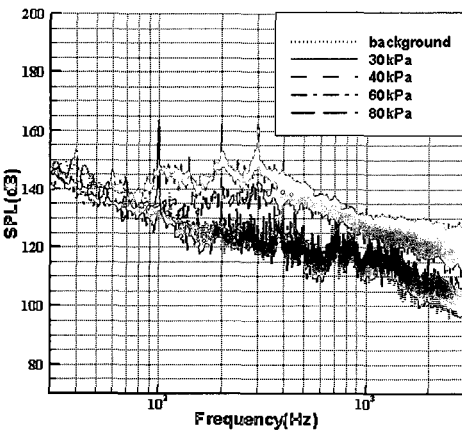


Fig. 12 Cavitating noise spectrum

Table 4 Non-cavitating condition

| RPS | 터널 압력 | σ_n | K_T |
|-----|--------|------------|--------|
| 14 | 160kPa | 25.70 | 0.1596 |
| 16 | 160kPa | 19.68 | 0.2023 |
| 18 | 160kPa | 15.53 | 0.2293 |
| 20 | 160kPa | 12.56 | 0.2512 |

Table 5 Cavitating condition

| RPS | 터널 압력 | σ_n | K_T |
|-----|-------|------------|--------|
| 20 | 80kPa | 6.19 | 0.2402 |
| 20 | 60kPa | 4.58 | |
| 20 | 40kPa | 2.97 | |
| 20 | 30kPa | 2.20 | |

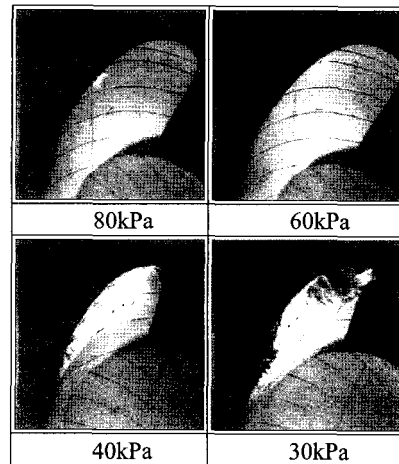


Fig. 13 Cavitation Pattern

한 패턴을 보였으나 압력이 낮아짐에 따라 100Hz의 저주파 대역부터 고주파 대역까지 모두 소음이 상승함을 볼 수 있다. 100Hz에서 1kHz 대역에서 소음 수준이 증가한 것은 블레이드 표면의 얇은 층 캐비티의 체적이 전체적으로 커져 하나의 거시적인 큰 진동하는 버블과 같은 거동을 보임으로서 이 대역의 소음이 증가하였으며 10kHz 대역의 고

주파 영역에서 소음이 증가한 것은 날개 끝 보오텍스 캐비테이션의 증가와 얇은 층 캐비테이션에서 떨어져 나온 작은 버블들에 의한 것으로 보인다. 비공동 소음의 경우 BPF 소음이 고차로 가면서 주위 배경소음에 묻혀버리지만 공동이 발생한 경우는 위 결과 그림에서 보듯 고차의 BPF에서도 감쇄되지 않고 매우 큰 소음 수준을 보임을 알 수 있다. 더미 바디를 장착하여 실험을 한 경우에서도 반류 스크린을 사용한 경우와 마찬가지로 비공동 상태에서는 블레이드 하중이 증가하여 추력계수가 증가함에 따라 소음 수준이 상승함을 볼 수 있다. 특히 Fig. 13의 30kPa 결과에서 보듯이 반류 스크린을 사용한 경우와는 달리 캐비테이션 거동이 매우 불안정하였고 이에 따라 소음수준도 2차, 3차 BPF에서도 감쇄되지 않고 1차 BPF 소음 수준과 비슷한 수준의 소음을 방사함을 볼 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 MOERI 캐비테이션 터널의 배경소음을 계측하여 소음 실험의 가능성을 검토하였다. 추진기 소음을 정확히 계측하기 위해서는 배경 소음을 최소화하여야 하며 이를 위해서는 수중 청음기의 배치가 중요함을 볼 수 있었다. 소음원 위치 파악을 위해 공간적 제약으로 추진기 하류 방향에 장착한 수중익 형태의 계측 시스템은 추진기 소음 보다 계측 시스템 주위에서의 유동교란과 캐비테이션에 의한 배경소음이 크게 계측되어 추진기 소음 계측이 불가능 하였으나 시험 조건에 맞게 수중 청음기가 잘 배치된 경우에는 중형 캐비테이션 터널에서 추진기 소음을 측정 할 수 있음을 보았다.

반류 스크린과 더미 바디를 사용하여 반류를 생성, 여러 계측 형태를 사용하여 추진기 비공동, 공동 소음을 계측하여 실험법에 따른 측정 한계를 파악하였으며 다양한 조건에서 추진기 소음 값을 계측하여 그 특성을 실험적으로 분석하였다. 비공동 소음의 경우 저주파 대역의 BPF 소음이 지배적이었으며 고주파 대역의 소음은 유동 소음과 비슷한 수준의 결과를 얻었다. 하지만 캐비테이션이

발생하여 완전히 성장 하였을 경우는 BPF 소음이 고차의 BPF 까지 큰 소음 수준을 방사함을 볼 수 있고 날개 끝 보오텍스 캐비테이션 및 얇은 층 캐비티가 작은 버블의 형태로 붕괴되어 고주파 대역에서도 전체적인 소음 수준의 증가를 보임을 실험 결과에서 볼 수 있었다.

이러한 연구 결과는 향후 추진기 소음 예측 기법 개발을 위한 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다. 또한 본 연구는 향후 MOERI에서 보유하게 될 저소음 대형 캐비테이션 터널의 운용 및 소음 실험법의 기초 연구로서도 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구결과는 한국해양연구원에서 수행한 “비공동/공동 추진기 소음 해석 기법 개선을 위한 기초 연구 (PE0115J),” “지능형 함정 스텔스 성능평가 기술개발 (PE0116C)”의 연구 성과 중 일부를 밝혀둔다.

참 고 문 헌

- 설한신, 이수갑, 표상우, 서정천, 2004, “수중 프로펠러의 소음 예측에 관한 연구(Part 1. 비공동 소음),” 대한조선학회 논문집, 제 41권, 제 2호, pp. 21-32.
- 설한신, 이수갑, 표상우, 서정천, 2004, “수중 프로펠러의 소음 예측에 관한 연구(Part 2. 공동 소음),” 대한조선학회 논문집, 제 41권, 제 2호, pp. 33-46.
- 안종우, 김기섭, 이진태, 김재승, 김상열, 2000 “수중 소음 계측을 위한 KRISO 캐비테이션 터널의 음향학적 특성,” 대한조선학회 논문집, 제 37권, 제 1호, pp. 111-117.
- 서중수, 한재문, 이경준, 정재권, 2004, “추진기 캐비테이션 수중 음향의 측정 및 분석,” 한국음향학회 학술발표대회, 제 23권, 제 2(s)호, pp. 443-446.
- Bark, G. and van Berlekom, E.B., 1978, “Experimental Investigation of Cavitation

Dynamics and Cavitation Noise," 12th
Symposium on Naval Hydrodynamics,
Washington D.C., pp. 470-493.



< 설 한 신 >



< 박 철 수 >



< 김 기 섭 >



< 조 용 진 >