

추진기 캐비테이션 유기 수중 음향의 측정 및 분석

서종수, 한재문, 이경준, 정재권

삼성중공업(주) 조선해양 연구소, 대덕 선박연구센터

Analysis and Measurement techniques for Propeller Cavitation induced Underwater Acoustic Signature

Jongsoo SEO, Jaemoon Han, Kyungjun Lee & Jaekwon Jung

Samsung Heavy Industries Co. Ltd. Marine Research Institute

103-28, Munji-Dong, Yusung-Gu, Daejeon, Korea 305-380

jongsoo.seo@samsung.com/ jaemoon.han@samsung.com/ kj4747.lee@samsung.com/ jaekwon.jung@samsung.com

요약

추진기에 의한 소음은 선형 특성에 의한 반류 분포, 추진기 재질 및 유체 연동 등 다양한 주변 인자들에 의해 발생하여, 민수용 선박의 경우는 과도한 추진기 수중 방사 소음으로 해양 생태계 교란 및 선박 거주구역 내 과대 소음 형성의 주요인이 된다. 더구나, 군사용 함정의 경우에는 추진기 유기 소음은 수중 방사소음의 형태로 전파되어 함정/무기 자체에 탑재된 음향센서의 기능을 저하시키는 영향을 줄 뿐 아니라, 원거리까지 전파되는 수중소음으로 인해 치명적인 자기 노출이 되어 적 함정에 의한 피탐 거리 증대라는 전술적 취약점을 초래하는 중요한 요소이다.

본 발표는 삼성 공동수조(SCAT)에서 이루어지는 추진기 유기 소음 측정에 대한 기술적 사항과 모형선-추진기 수조 시험을 통해 구해진 추진기 유기음향과 이론 및 경험식을 토대로 계산된 추진기 소음의 정량/정성적 비교를 통해, 추진기 설계 단계에서 소음수준 예측 도구로의 활용 가능성을 제시하였다.

1. 서론

선박에서 3대 주요 소음원이라면, 통상적으로 추진기, 추진기관 및 보조기관을 들 수가 있다. 이 중에서, 추진기는 그 수준의 예측이 가장 어려운 요소[1], [2]

로서, 선박의 소음 예측의 정도에 중요한 영향을 미치는 것이라 할 수 있다.

민수용 선박의 경우에 있어, 80년도 초반 이후 추진기 캐비테이션에 의한 소음 수준 증가가 선박 건조 관계자들에게 지대한 관심을 끌기 시작하였다. 이는 추진기 소음이 여객선, 고속 컨테이너선 및 대형 유조선과 같은 고급 선종의 소음저감 대책에 중요 고려 사항으로 대두되었기 때문이다. 군사용 함정의 경우, 추진기에 의한 수중 음향이 날개끝 보오텍스(vortex) 캐비테이션 발생 시점부터 심각한 수준으로 발전된다고 알려져 있다. 또한, 이전에는 미처 파악하지 못한 사실로서, 고마력 추진 여객선에서의 추진기 날개끝 보오텍스 캐비테이션에 의한 소음이 선내로 전파되는 수준이 선내의 기계류에 의한 소음 보다 더 중요한 요소가 된다는 것을 경험적으로 인지하게 되었다.

2. 추진기 소음 측정

1996년에 완성된 삼성중공업(주)의 공동수조(Samsung Cavitation Tunnel, SCAT)는 국내 최초로 모형선을 설치하여 추진기 성능을 시험할 수 있는 설비로서 8년여에 걸쳐 추진기 변동 압력 측정, CIS 성능 시험, 공동 관찰 등과 같은 추진기 성능 시험과 아울러 추진기 캐비테이션 유기 소음, 소나 시스템 음향 특성 시험 등 다양한 수중음향 관련 시험 업무를 수행하여 오고 있다.

2.1 대형 공동 수조

추진기 성능 시험을 위한 대형 공동수조는 총 길이 36m, 높이 13.3m 의 규모로서, 두가지의 시험 단면부를 보유하고 있으며, 이들은 중 저속이면서 대형 모형체를 설치할 수 있는 길이×폭×높이가 12.0m ×3.0m×1.4m인 대형 시험부(No. 2 section)와 6.0m×1.2m×1.2m의 제원을 갖는 소형/고속 시험부(No. 1 section)로 나뉘어 진다. 참고로, 그림 1에 공동수조의 모습을 보인다.

2.2 표면 캐비테이션 소음 계산

추진기 날개 표면 캐비테이션(sheet cavitation)에 의한 소음 수준 예측 경험식은 Brown 식[3]을 이용한다.

$$S = 163 + 10 \log(\pi^3 D^4 Z / f) + 10 \log(A_c / A_o) \quad (1)$$

S : 소음원의 수준 (dB ref. 1μPa/Hz^{0.5})

Z : 날개수

f : 주파수 (Hz)

A_c: 표면 캐비티의 면적 (m²)

A_o: 추진기 날개 원판 면적 (m²)

표면 캐비테이션의 면적을 계산하기 위하여 추진기의 설계단계에서 그림 2에 보인 것과 같이 캐비티의 체적 계산 프로그램 (CavProp)의 결과를 이용한다.

2.3 날개끝 보오텍스 캐비테이션 소음 계산

경험식에 의한 날개끝 보오텍스 소음 수준 계산[4], [5] 절차는 아래와 같다.

단계 1 : 날개끝 보오텍스 두께 계산
Prandtl and Tietjens [6] 에 의해 날개끝 보오텍스의 직경 D_o 을 구하는 식은;

$$D_o = \left\{ \rho / (\Delta p \pi) \right\}^{0.5} \cdot \Gamma \quad (2)$$

D_o : 날개끝 보오텍스의 직경

ρ : 유체 밀도

Δp : 보오텍스 내 압력차 (= P - P_∞)

Γ : 추진기 날개끝의 순환

여기서, 날개끝에서의 순환 Γ 는;

$$\Gamma \propto (k_{tbl} \cdot k_{tip}) n \cdot D^2 \quad (3)$$

D : 추진기 날개 직경

n : 추진기 회전수 (cps)

k_{tbl} : 추진기 날개당 추력 계수 = T / ρn²D⁴ / Z

T : 추력 (Newton)

k_{tip} : 추진기 날개끝 부하 보정계수가 된다.

단계 2 : 날개끝 보오텍스에 의한 음압 계산
추진기 날개의 직경을 기본 단위로 취한 일정 비례 거리에 있는 음압 수준은;

$$p_a = C_1 \cdot TVI \cdot n^2 D^2 \quad (4)$$

이 되며,

날개끝 보오텍스 지수(Tip Vortex Index, TVI)는 무차원화 된 음압수준으로 정의되며, 비례 상수 C₁ 은 수조의 특성에 따라 정해지는 배율 계수[6] 이다.

$$TVI = (k_{tbl} k_{tip})^2 Z^{0.5} / \sigma_n \quad (5)$$

단계 3 : TVI를 이용한 소음 수준 계산

추진기 날개끝 부하 보정계수 k_{tip} 는 대체로 0.5 에서 1.1 의 범위를 가지고 있으며, 소음수준은 아래의 식으로 계산된다.

$$dB_{ref} = 20 \log(\sigma_n n^2 D^2) + 20 \log C_1 \quad (6)$$

단계 4 : 캐비티 붕괴 주파수 계산

날개끝 보오텍스 캐비티의 붕괴로 발생하는 소음의 주요 주파수의 계산은 Ross [7]의 식으로 주어지며;

$$f_b = (1/D_o)(\Delta p / \rho)^{0.5} \quad (7)$$

와 같이 계산된다. 반경방향 추진기 하중 분포 계산 결과와 날개에서의 캐비테이션 분포 예측치가 그림 3 및 4에서 각각 나타내어 진다.

2.4 추진기 소음측정

추진기 캐비테이션 발생 전, 후의 소음특성 변화를 살펴보기 위하여 두 종류의 추진기를 설계하여 소음을 측정하였다. 두 추진기의 기하학적 형상은 유사하고 동일한 추력을 보유하도록 설계되었으며, 첫번째 추진기는 날개끝 보오텍스 발생이 억제되도록 설계되었고, 두번째 추진기는 날개끝 보오텍스가 쉽게 발생하도록 설계되었다. 대기압 상태와 캐비테이션 수를 변화시키면서 캐비테이션 패턴을 살펴본 결과 그림 5에서와 같이 두번째 추진기에서 캐비테이션이 많이 발생하는 것을 알 수 있다.

캐비테이션 수(σ)의 변화에 따른 첫번째 추진기의 소음특성 변화를 그림 6에 나타내었다. 압력이 감소함에 따라 (σ 감소) 소음이 증가하는 현상을 나타내고 있다. 초기에는 날개끝 보오텍스가 발생하는데, 500Hz-2kHz 사이의 소음이 크게 증가하고, 고주파수 영역으로 감에 따라 전반적으로 소음이 증가하고 있다. 500Hz-2kHz 사이의 소음을 살펴보면, 1kHz 이하의 소음이 지배적인 것을 알 수 있는데, 이는 날개끝 보오텍스가 성장하여 표면 캐비테이션이 발생하며, 이러한 표면 캐비테이션

의 영향인 것으로 판단된다. 수 kHz 이상의 고주파수 소음은 허브 주위의 먼지 같은 캐비테이션이 발생하면서 소음이 크게 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이처럼 미세한 캐비테이션 또한 고주파수 영역의 소음에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

대기압에서 날개끝 보오텍스가 발생한 두번째 추진기의 σ 변화에 따른 소음특성 변화를 그림 7에 나타내었다. 대기압에서 날개끝 보오텍스가 이미 발생하였지만, 소음의 경향 변화는 첫번째 추진기와 유사하다. 캐비테이션 수가 높은 경우에는 첫번째 추진기보다 큰 소음이 발생하고 있지만, 캐비테이션이 완전 성장한 경우는 첫번째 추진기와 유사한 소음수준을 나타내고 있다. σ 가 1.5인 경우에는 표면 캐비테이션이 크게 성장하였고, 허브에서도 큰 기포가 발생한 것을 볼 수 있고 먼지와 같은 미세한 기포가 허브 주위에서 발생하는 것을 볼 수 있고, 보오텍스의 윗부분이 허물어지는 현상이 나타나고 있다. 이 경우의 소음 특성을 살펴보면, 1kHz 이하의 주파수 영역에서 소음은 증가하고, 1kHz-2kHz 사이의 소음은 감소하며, 그 이상의 수 kHz 영역의 소음은 증가하는 것을 볼 수 있다. 날개 회전 1차 성분(first blade passing frequency)에 가까운 158Hz 주위의 소음도 크게 증가한 것을 볼 수 있다.

2.5 추진기 소음측정 결과

앞 절의 식(4)에서 주어진 수조의 특성에 따라 정해지는 배율 계수 C_v 는 공동수조 내 모형 시험에서 추진기 소음의 절대값을 결정하는 중요한 역할을 한다. 이 값은 따라서 각 시험 수조마다 약간의 차이를 가지게 되며, 표준 음원을 이용하여 그 값의 정확한 설정이 요구된다.

앞 절의 이론 계산 및 실제 공동수조 시험에서 하이드로폰 어레이(hydrophone array)를 통해 실제로 측정한 추진기 소음수준의 비교를 그림 8에 보인다.

3. 고찰 및 결론

모형선 추진기 공동수조 시험 결과로부터 1kHz 이하의 저주파수 영역에서의 소음은 표면 캐비테이션의 영향이 지배적이고, 1kHz - 3kHz 사이의 주파수 영역에서는 날개끝 보오텍스의 영향이 지배적이며, 그 이상의 고주파수 영역은 미세한 기포의 영향이 지배적인 것으로

판단된다. 이론 예측과 실험을 통한 추진기 소음 수준의 비교를 통해 추진기 설계단계에서 개략적인 추진기 유기소음의 영향을 파악할 수 있음을 확인하였다. 실제로는 날개끝 뿐 아니라 추진기 허브(hub) 및 날개 뿌리(root) 캐비테이션의 영향도 고려되어야 하나, 현 단계에서 가장 기여가 큰 날개끝 캐비테이션의 소음수준만을 고려하였다. 이후 다양한 추진기 캐비테이션의 기여를 고려한 정량적인 소음수준 계산이 이어질 전망이다.

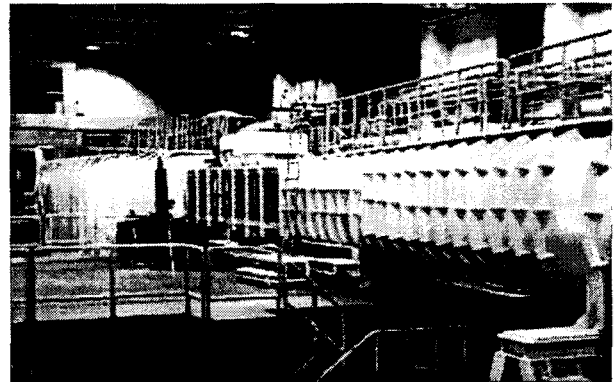


그림 1. 삼성 공동수조의 전경

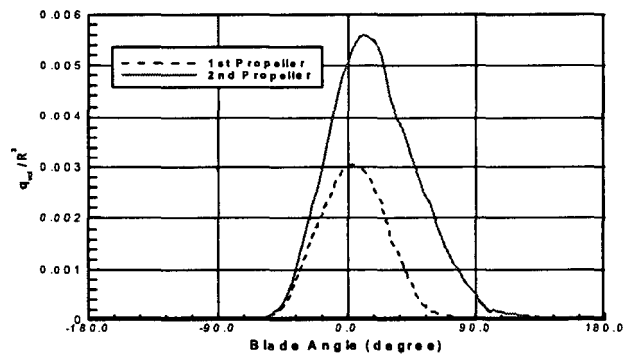


그림 2. Variation of sheet cavity volume for 2 designed propellers along with the blade angle behind ship

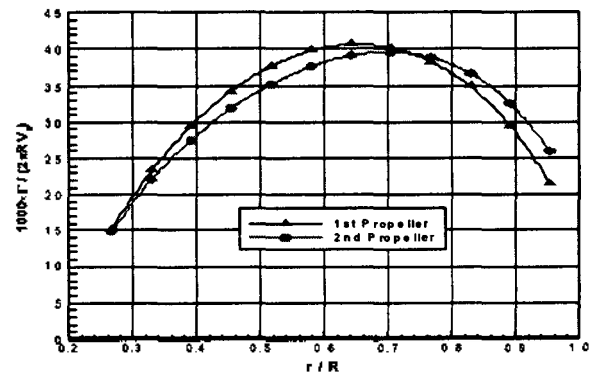


그림 3. Circulation variation of propellers in span-wise direction

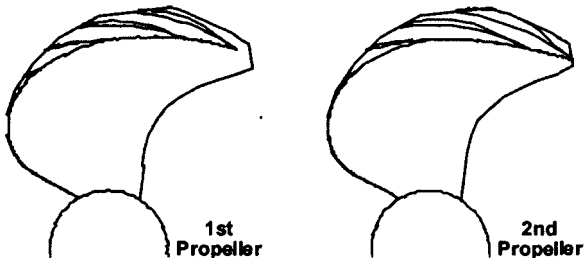


그림 4. Calculated characteristics of cavitation performance of 2 different propellers

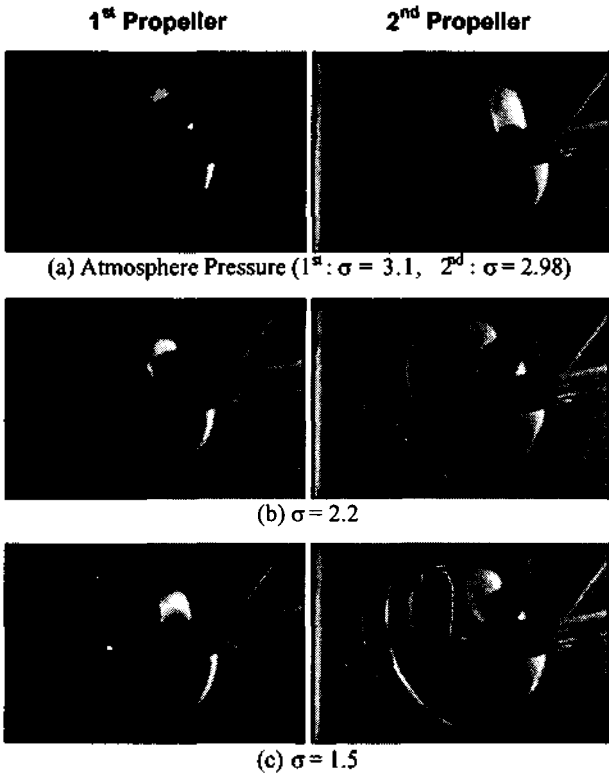


그림 5. Comparison of cavitation patterns

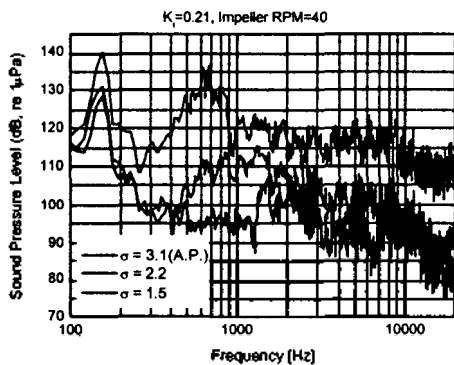


그림 6. Variation of 1st propeller noise according to cavitation number

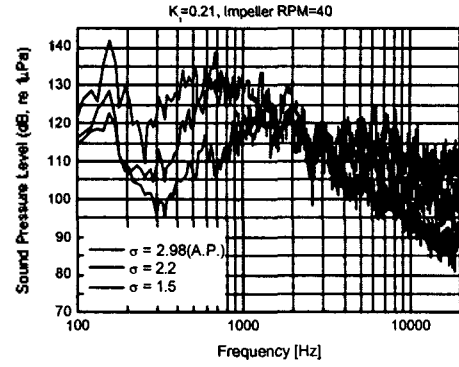


그림 7. Variation of 2nd propeller noise according to cavitation number

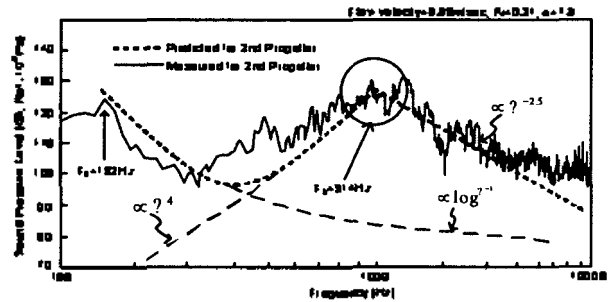


그림 8. Verification of noise prediction

참고문헌

- [1] William K. Blake, Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration, Academic Press, Inc., 1986.
- [2] A.C. Nilsson, B. Persson and N.P. Tyvand, Det Norske Veritas, Høvik, Norway, "Propeller Induced Noise in Ships", The Society of Naval Architects and Marine Engineers, No. 17, 1981.
- [3] N. Brown, "Cavitation Noise Problems and Solutions", in Proceedings of the International Symposium on Shipboard Acoustics 1976, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1977.
- [4] A. C. Nilsson and N. P. Tyvand, "Noise Sources in Ships (I: Propellers)", NORDFORSK, 1981
- [5] Yu. L. Levkovskii, "Modelling of cavitation noise", Sov. Phys. Ac. Vol. 13, 1968.
- [6] A. E. Raestad, "Tip vortex index - an engineering approach to propeller noise prediction", The Naval Architect, Jul/August, 1996.
- [7] D. Ross, Mechanics of underwater noise, New York, Pergamon Press, 1976.