

고속 선박의 몰수된 hydrofoil에서 수중 소음 계측

Underwater Noise Measurements on the Immersed Hydrofoil of High-Speed Vessel

박 지 용*, 이 근 화**, 성 우 제**

(Ji-Yong Park*, Keun-Hwa Lee**, Woo-Jae Seong**)

*한국해양연구원/해양시스템안전연구소, **서울대학교 공과대학 조선해양공학과
(접수일자: 2010년 6월 23일; 수정일자: 2010년 11월 25일; 채택일자: 2010년 12월 27일)

고속으로 운항하는 hydrofoil선박과 호흡을 위해 해수면으로 올라오는 해양 생물의 충돌이 빈번히 발생한다. 선박을 발견한 해양 생물이 피하기 전에 고속 선박이 접근하기 때문에 충돌을 막기 위하여 선박의 몰수된 hydrofoil 위치에 능동 소나를 설치하여 해양생물을 미리 인지하여 충돌을 회피하는 방법이 제시된다. 표적의 탐지를 위한 능동 소나의 성능은 수신된 신호에서 소음을 제거하고 표적 신호를 구별하는 능력에 좌우된다. 본 연구에서는 이러한 충돌 회피 능동 소나 개발을 위한 기반 연구로 실제 운항 중인 고속 선박의 hydrofoil에 청음기를 설치하여 소음을 계측했다. 계측을 위한 실험은 (1) 선박의 운항 및 기계 장치 작동 여부에 따른 소음 측정, (2) 선체 hydrofoil 표면에서 계측되는 위치에 따른 소음 측정, (3) 운항 속도 증가에 따른 속도 측정을 목적으로 수행하였다. 실험실 실험에서 발생하는 여러 요소들을 고려하기 위해 세 번에 걸쳐 수행하였으며 실험 결과의 타당성 검증 및 분석을 위해 다른 연구 결과와 비교하였다. 결과는 능동 소나 운용시 적용을 위해 주파수 분석을 수행하였으며, 소나를 운용할 고주파수 대역을 중점적으로 살펴 보았다. 실험 내용과 그 결과 분석을 통해 속도 변화에 따른 소음 변화와 소음원에 따른 영향을 확인하였다. 이를 통해 향후 능동 소나가 설치 되었을 때 발생하는 소음의 영향을 고찰 할 수 있으며, 실제 고래 탐지를 위한 소음과 표적 신호의 구별이 용이한 능동 소나를 설계할 수 있다.

핵심용어: Hydrofoil 선박, 고속 선박 소음, 능동 소나, 유동 소음

투고분야: 수중음향 분야 (5)

When a hydrofoil ship plies at high speed, there exist possibilities of collision with ocean mammals dwelling near the surface. An active sonar located within the immersed hydrofoil structure that provides the lift for the vessel, can be used for early warning of their presence. The proper functioning of the active sonar system depends on its ability to reject noise and pick up the target signal. In this article, we measured the noise on a hydrofoil of an operating ship with two flush-mounted hydrophones. The measurements were conducted for the purpose of (1) identifying the effect of operating state of machinery likes engine, cooler and generator (2) observing the change of noise depending on the measuring position (3) observing the change of noise with increasing ship speed. To verify our experiment, experiments were performed three times and the measured results are compared with other investigations and they show similarity to each other. The results are analyzed with frequency domain in order to apply to operating active sonar detecting system and focus on high frequency band within sonar's operating frequency region. Through these experiments and analysis, it is expected that we can identify the generated noise around hydrofoil where active sonar is installed and these results lead us to design active sonar that could distinguish target signal from noise more effectively.

Keywords: Hydrofoil ship, Fast ship noise, Active sonar, Flow noise

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5)

I. 서론

고속으로 운항하는 선박과 고래와의 충돌이 빈번히 일어나고 이로 인해 인명, 재산 피해가 발생하고 있다. 고래와의 충돌을 막기 위해 여러 시도가 있었으나 대부분 실패하고 능동 소나를 통해 직접 탐지하여 충돌을 회피하는 방법이 시도 되었다. 이러한 목적을 지닌 능동 소나의 표적 탐지 여부는 수신된 신호에서 소음을 제거하고 표적 신호를 구분하는 능력에 의해 좌우 된다. 기존의 연구 [1-4]에서는 주로 모형 시험을 통한 저속 상태에서의 소음 분석이 수행되었기에 고속 상태 실선에서 소음 분석 관련 연구는 고래 탐지를 위한 능동 소나 개발을 위해 반드시 필요하다.

고속선에 청음기를 설치하였을 때 계속되는 소음은 소음원에 따라 프로펠러, 엔진 등과 같은 선박 기계류에 의한 기계 소음, 선박 주변 유체의 흐름, 기포의 발생에 의한 유동 소음, 전기적 원인에 의한 청음기 자체 소음, 열 소음과 외부 환경 소음이 있다. 실제 운항하는 고속선의 Hydrofoil에 장착된 청음기에서는 위의 모든 소음이 계속되지만 선박에 설치된 기계에서 발생하는 기계 소음과 유동 소음이 주된 소음이 된다 [5].

기계 소음은 엔진, 발전기, 냉각기, 추진기 등에 의한 소음이 있으며 선박 내에서 발생하기에 선체의 진동을 통해서나 선체 표면에서 방사되어 청음기에 전달된다. 기계 소음은 주로 모터에 의해 발생하기에 특정 주파수 성분이 크게 나타나며 스펙트럼을 분석하면 그림 1과 같이 넓은 주파수 대역에 소음이 분포하고 있고 작동하는 모터 회전수의 배수에 해당하는 주파수에 토날 형태로 나타난다.

유동 소음은 표적 탐지를 극대화하기 위해 소나 돔이

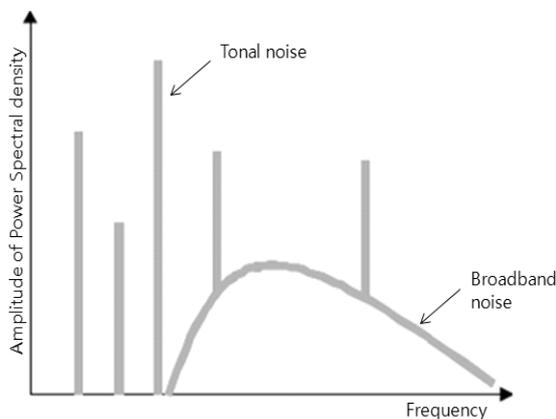


그림 1. 기계 소음
Fig. 1. Machinery noise spectra.

선체 표면에 노출되어 물과 직접적으로 만나기에 그 표면 경계층의 유동에 의해 발생한다. 유동은 안정적인 층류를 거쳐 선체 표면을 따라 흐르며 점차 불안정해지고 난류가 된다. 특정 유속을 기준으로 변동하는 난류의 특성에 의한 변동 압력이 청음기에 전달되어 유동 소음이 된다. 기존 연구는 평판에 대해 시작해 그것을 확장하여 3차원 형상에 적용하였다. 평판에 대한 대표적인 변동 압력 모델로는 Corcos 모델, Efimtsov 모델, Smol'yakov/Tkachenko 모델, Williams 모델, Chase 모델 등이 있다. Corcos 모델 [6]이 가장 기본이 되는 모델이며 Chase 모델이 대표적으로 많이 사용되는 난류 모델이며 나머지 모델들은 Corcos 모델 [7-8]의 향상 모델로 볼 수 있다.

선박의 hydrofoil은 3차원 형상으로 평판에서 유동 소음 연구를 확장하여 3차원 형상에서 유동 소음의 특성을 파악해야 한다. 3차원 형상의 유동 소음 특성은 간단한 수학적 모델로 표현하기는 힘들며 실험적인 방법을 이용해야 한다. 기존의 여러 연구 [1-4]에서 3차원 형상의 유동 소음에 관한 연구가 진행되었고, 특히 3차원 형상 중 수중 물체의 주된 형상인 축대칭 형상에 관한 연구가 주로 이루어졌다. 그림 2는 주로 연구된 3차원 물체의 단면 형상이다. 3차원 물체의 경우 물체가 유동과 만나며 선단 (stagnation point)에서 층류가 발생하고 표면을 따라 흐르면서 천이되어 난류가 발생한다. 기존 연구에서 Lauchle [1]는 수정된 타원체 형상의 물체에서 선단 부분부터 시작하여 유동이 난류의 형태를 보이는 구간까지 12개의 위치에서 유동 소음을 측정하였다. 천이가 일어나는 위치는 주변 유체의 속도 증가에 따라 점차 물체의 앞쪽으로 이동한다. 선단면에 위치한 청음기는 천이 영역과 난류 영역에서의 변동 압력을 유동 소음으로 수신하게 된다. 선단면에 보다 근접한 천이 경계층의 벽면 변동 압력의 경우 난류와 층류의 특징이 동시에 나타나기에 간헐도라는 개념을 통해 기존 연구 [9]에서 분석하였다. 유동 소음은 다른 소음원에 비해 넓은 주파수 대역에 존

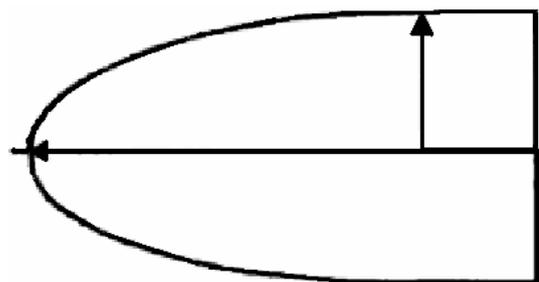


그림 2. 연구된 3차원 축대칭 형상의 단면 형태
Fig. 2. Investigated 3-dimensional axisymmetric shape.

재하며 유동 속도와 청음기의 위치에 영향을 받기에 이에 대한 충분한 고려가 이루어져야 한다 [10].

본 논문에서는 고속으로 운항하는 선박의 hydrofoil 형상에 설치된 청음기를 통해 들어오는 소음을 분석하였다. 특히 고주파수인 30 kHz 주변에서 소나 운용 가능성을 살펴 보기 위해 고주파수 대역을 집중적으로 분석하였다. 이를 위해 실제 한일 고속선의 hydrofoil에 청음기를 장착하여 세 차례에 걸쳐 소음을 측정하는 실험을 수행하였다. 제 2장에서는 실험 방법과 내용, 각 실험의 목적에 대해 설명하였고 제 3장에서는 실험 결과를 통해 각종 소음원의 영향을 고려하고 속도 및 청음기 설치 위치에 따른 소음 변화를 분석하였으며, 제 4장에서 결론 및 향후 과제를 제시하였다.

II. 실험 내용

2.1. 실험 장치

본 논문에서는 한국의 부산과 일본의 후쿠오카를 운항하는 위터제트 고속 선박인 코비호에서 수행된 실험을 분석하였다. 코비호의 최고 속도는 45노트 (약 23 m/s)로 높은 속도를 얻기 위해 선체를 물위에 띄우므로써 물에 닿는 면적을 hydrofoil 부분으로 최소화 한다. 선박의 형상은 그림 3과 같다.

소음은 hydrofoil 전면의 nose 표면 두 점에서 측정하였다. Hydrofoil의 실제 형상과 청음기의 설치 위치는 그

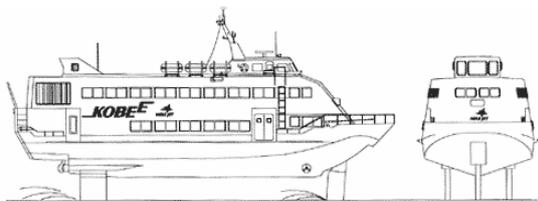


그림 3. 실험을 수행한 코비호의 정면도와 측면도
Fig. 3. Plan and profile of experimental ship Kobee.

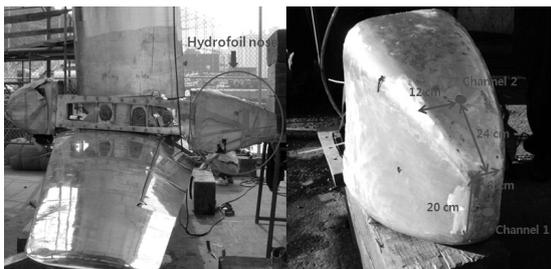


그림 4. 청음기가 설치된 하이드로포일과 설치 위치
Fig. 4. Ship's hydrofoil and locations of two flush-mounted hydrophones.

림 4에 제시하였다. 두 청음기의 위치의 경우 nose의 전면 선단부분에 채널 1을, 윗면에 채널 2를 배치하였다. 청음기 종류는 채널 1은 Reson사의 TC4013이 사용되었고 채널 2는 GRAS사의 10CS가 사용되었다. 청음기의 설치는 고속선박의 특성상 hydrofoil에 작용하는 수압이 세서 청음기를 고정 할 수 있는 장치를 만들어 청음기를 고정 시킨 후 hydrofoil에 구멍을 뚫어 부착하였다. 물이 유입 되는 것을 막기 위해 방수 처리를 하였으며 설치 과정에서 표면 상태와 설치에 따른 수신 감도의 변화를 확인하기 위해 설치 후 데이터 수신을 통해 차이가 결과 분석에 영향이 없음을 검증하였다. 그림 5와 같이 두 청음기의 감도와 수신 상태가 분석하는 주파수 대역에서 유사하였고 실험실 내 측정으로 감도의 일치를 확인하였기에 데이터 비교에 문제가 없다.

2.2. 실험 목적 및 과정

실험은 총 세 번에 걸쳐 수행하였다. 1차 실험은 기본적인 파악을 위해 수행한 실험으로 선 속과 선박의 운항 위치에 대한 기록 없이 소음을 측정하였다. 실험은 파고 0.5~2 m, 평균 기온 10 °C의 기상 조건에서 수신된 신호를 앰프를 통해 30 dB만큼 증폭하여 측정하였다.

2차 실험은 1차 실험의 단순 소음 측정에서 나아가 선박의 속도와 운항 위치를 비교하기 위해 실제 운항 과정을 영상으로 촬영하였으며 각 시간대별 속도의 변화를 기록했다. 또한 고주파수 대역에서 자체 소음을 집중적으로 확인하기 위해 cut-off frequency가 20 kHz High Pass 필터를 사용했고, 1차 실험에서 앰프에 의해 30 dB만큼 증폭한 결과 수중 소음을 측정하기에는 낮다고 판단

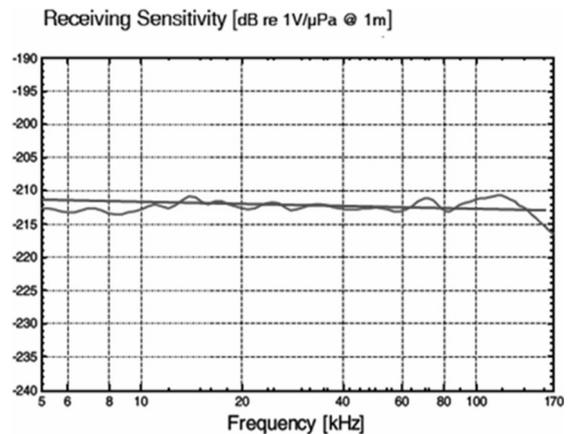


그림 5. 설치된 청음기의 감도 (파란색: Reson사의 TC4013, 붉은색: GRAS)
Fig. 5. Hydrophone receiving sensitivity (Blue: Reson TC4013, Red: GRAS).

표 1. 차수별 실험 조건 및 실험 목적

Table 1. Experimental conditions and purposes.

실험 차수	실험 조건	실험 목적
1차	파고 : 0.5~2 m, 기온 : 10 °C, 30 dB 증폭	실험 환경 조사 및 소음 측정
2차	파고 : 0.5~1.5 m, 기온 : 20 ~22 °C, High Pass 필터 사용 60 dB 증폭	선 속의 변화에 따른 소음 측정, High Pass 필터를 통한 고주파수 영역 관찰
3차	파고 : 0.5~1.5 m, 기온 : 20 ~22 °C, 사용 60 dB 증폭	선 속의 변화에 따른 소음 측정, 각 소음원 분리하여 측정

하여 60 dB로 그 증폭량을 높여 측정하였다. 2차 실험의 기상 조건은 파고가 0.5에서 1.5 m이고 평균 기온은 20에서 22 °C 사이였다. 실험은 선박의 속도를 정지 상태에서부터 증가시키며 선체가 뜨는 과정과 뜨고 나서 최고 속도로 달리는 과정까지 연속적인 변화 과정을 관찰하였다.

3차 실험은 2차 실험과 거의 유사한 과정을 통해 진행하였다. 실험 장비 면에서 2차 실험과의 차이는 전 주파수 대역에서 유동 소음을 확인하고자 High Pass 필터를 사용하지 않았다는 점이다. 추가적으로 선박의 모든 기계 장치가 작동하지 않고 정박되어 있는 상태에서 데이터를 수집하여 장비 소음을 확인했고, 또한 출발하기 전 항구에서 선박이 정지한 상태로 기계 설비만 작동시켜 소음을 측정했다. 기상 조건은 2차 실험과 동일하였고 같은 과정으로 실험을 수행하였다. 전체 실험 조건 및 실험 목적은 표 1과 같이 정리 된다.

데이터 수신은 샘플링 주파수를 500 kHz로 하였으며 처리는 DC성분을 제거하기 위해 평균한 값을 결과에서 빼주고 해닝 윈도우를 씌웠다. 또한 주파수 분석 결과가 특정 값을 기준으로 변동하기 때문에 20초 간 수신된 데이터 60개를 평균해 줌으로써 스펙트럼 밀도의 평균값을 확인 할 수 있었다.

III. 실험 결과 및 분석

3.1. Spectrogram

2월, 5월, 6월의 총 3차 실험 결과의 측정 자료를 분석하여 Spectrogram을 그렸다. 데이터 처리는 계산량의 한계에 의해 시간을 나누어 스펙트로그램을 그린 후 그림 6, 7, 8과 같이 그래프 상에 연속적으로 나열하였다.

그림 6은 2월 실험 결과를 보여준다. 2월 실험에서는 실제 운항 속도를 측정하지 않았으나 대부분 선박의 주된 운항 속도인 40노트 (약 21 m/s)에서 측정된 것으로 시간 변화에 따라 주파수 성분이 채널 별로 크게 다르지 않고

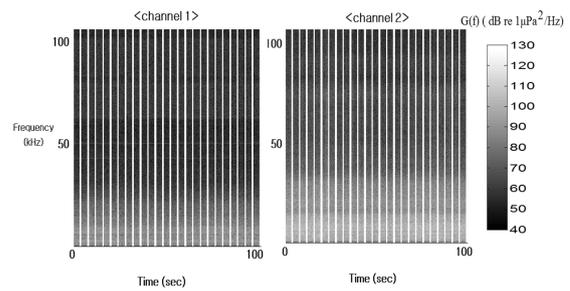


그림 6. 2월 실험 spectrogram
Fig. 6. Spectrogram of the February experiment.

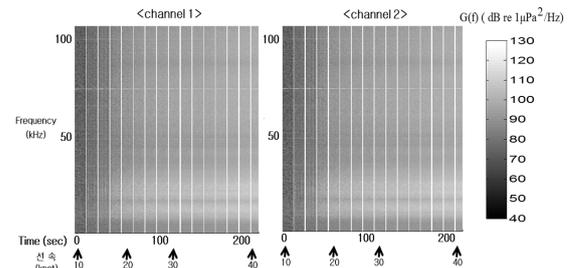


그림 7. 5월 실험 spectrogram
Fig. 7. Spectrogram of the May experiment.

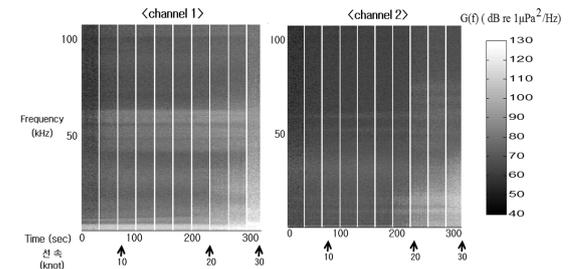


그림 8. 6월 실험 spectrogram
Fig. 8. Spectrogram of the June experiment.

채널 2의 결과가 채널 1보다 저주파수 대역에서 보다 큰 소음 레벨이 나오는 것을 알 수 있다.

그림 7은 5월 실험 결과를 보여준다. 그림에서 Spectrogram의 가로 축은 10노트 (약 5 m/s)에서 40노트 (약 21 m/s) 구간까지의 변화 과정을 나타낸 것이다. 전체적으로 속도의 증가에 따라 주파수 별 소음 레벨의 증가가 나타나지만 그 변화가 크지 않다. 50 kHz 이상에서는 tonal 형태의 고주파 소음이 관측되었다. 30 kHz 주변 주파수 영역에서는 tonal 소음은 관찰되지 않았다. 또한, 5월 실험에서는 High Pass Filter를 사용하였기에 20 kHz이하 성분은 필터링 되어 나타나지 않는 것을 확인 할 수 있다. 추가적인 실험으로 5월 실험에서는 선박을 35노트 (약 18 m/s)의 등속도로 일정시간 운항하며 소음 레벨을 측정하여 속도간 비교가 가능하도록 했다. 다음절의 속도에 따른 결과 분석에서 비교 될 것이다.

그림 8은 6월 실험 결과를 보여준다. 5월 실험에 비해 속도의 증가에 따른 소음 레벨의 증가가 확연하게 나타난다. 이것은 필터링 하지 않았기에 속도에 따라 변화하는 소음원이 저주파수에 존재하는 것으로 볼 수 있다.

위의 3차례의 실험을 종합적으로 분석할 때 6월 실험 결과가 가장 합리적이라고 판단되어 다음절부터 서술할 상세한 소음 분석에는 6월 실험 자료를 이용했다. 또한, 6월 관측 소음 레벨은 2월, 5월의 소음 레벨보다 평균적으로 높기 때문에 극한 값을 택해 설계에 반영하는 의미도 있다.

3.2. 청음기 자체 소음과 출발 직전 소음 비교

본 절에서는 선박이 완전 정지하여 모든 기계 장비가 작동하지 않을 때 소음 레벨을 측정한 결과와 선박은 정지해 있고 기계 장비는 작동할 때의 측정 결과를 비교했다. 선박과 기계장치가 완전히 정지한 상태의 소음을 전기 및 열 등의 원인에 의해 생성되는 소음이라 판단했다.

그림 9의 완전 정지 시 그래프는 항구에 정박중인 선박의 모든 기계 장치가 작동하지 않는 상태에서 측정된 청음기 자체 소음을 나타낸다. 물론, 이 측정값에는 정지시에 해양에서 발생하는 기본적인 배경소음이 섞여 있을 것이다. 그림 9의 출발 직전 그래프는 선박이 출발하기 직전 운항시 작동하는 모든 기계가 작동하는 상황에서 측정된 결과이다. 정지 상태이기에 유동 소음은 없다고 생각할 수 있다.

두 그래프를 비교함으로써 기계 소음에 의한 토널 성분과 넓은 대역에서 소음 레벨의 증가를 관찰할 수 있었다. 소나를 운용시 사용하게 될 설계 주파수 대역인 30 kHz 근처에서는 청음기 자체 소음은 채널 별로 유사하게 관측되었다. 완전 정지시 그래프를 보면 스펙트럼 밀도 값이 주파수에 따라 크게 변화하는 형태를 보이는데 주파수를 고려하면 교류 주파수의 배수 위치로 판단되어 접지를

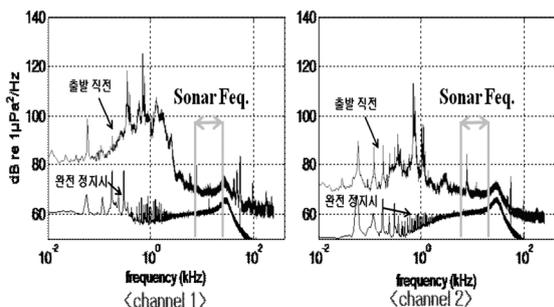


그림 9. 완전 정지시와 출발 직전 결과 비교
Fig. 9. Noise spectrum comparison between the stopped ship and the machine operating ship before departure.

하였으나 완벽하게 제거 되지 못하고 전기 노이즈가 들어 온 것으로 보인다.

이외에 소음의 주파수 성분 중 특징적인 부분은 345 Hz의 배수가 되는 주파수에서 순간적으로 높은 신호가 관찰 된다. 뒤에 선박의 운항시에 측정 과정에서는 관찰 되지 않은 것으로 보아 공회전 및 기계 장치에 의한 소음으로 판단 된다.

3.3. 출발 직전 소음과 고속 항행 소음 비교

본 절에서는 출발 직전 모든 기계장비가 작동하고 선박이 정지한 상태와 선박이 40노트 (약 21 m/s)의 속력으로 달릴 때의 결과를 비교했다 (그림 10). 두 그래프를 비교 하면 정지 상태로 유동 소음이 존재하지 않는 상태에서 40노트 (약 21 m/s) 운항 상태가 되면 유동 소음이 발생한다. 또한, 속력의 증가에 따라 프로펠러 및 엔진 소음이 변화한다. 그러한 변화에 의한 소음 레벨의 증가를 그림 10에서 확인 할 수 있다.

10 kHz 이상 주파수 대역에서 두 채널이 유사한 형태로 스펙트럼 밀도가 변화하며 1 kHz 부근에서 앞 절의 청음기 자체 소음 측정 결과와 유사하게 채널 2보다 채널 1에서 스펙트럼 밀도 값이 큰 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 유동 소음은 난류 경계층에 가까운 채널 2에서 크게 나타나고 기계 소음의 경우 선체를 통해 전달 되는 경로가 일치하므로 두 채널에서 유사한 크기로 측정 되기에 전체 레벨이 채널 2가 크게 나와야 하는데 그렇지 않은 것으로 보아 다른 원인이 있으리라 판단된다. 원인으로 생각할 수 있는 것은 채널 1이 전면에 위치하여 선체에서 발생한 방사 소음의 영향이 채널 2 보다 크고 채널 1의 설치 과정에서 저주파수 진동이 전달이 잘 되게 설치 된 것으로 판단할 수 있다.

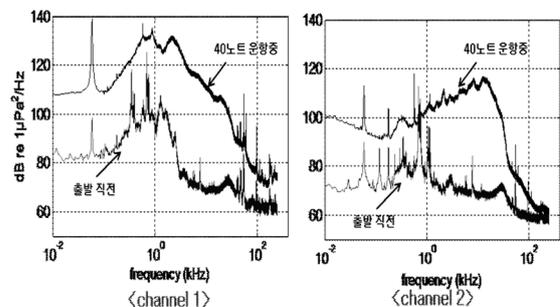


그림 10. 출발 직전과 40노트 (약 20 m/s) 운항 중 결과 비교
Fig. 10. Noise spectrum comparison between the machine operating ship before departure and the ship flying to 40 knots.

3.4. 채널에 따른 비교

본 논문에서 관심을 가지고 있는 10 kHz이상의 고주파수 대역에서 14노트(약 7 m/s) 구간과 40노트(약 21 m/s) 구간의 채널에 따른 소음 레벨의 변화를 관찰했다. 다른 속도 영역에 대한 비교는 본 실험을 수행한 선박이 물위에 뜬 상태로 운항하는 선박이기에 출발 후 뜨기 까지 속도를 연속적으로 증가시켜야 한다는 제약에 의해 수행할 수 없었다.

그림 11에서 14노트(약 7 m/s) 구간은 채널 1의 소음 레벨이 전반적으로 채널 2보다 높고, 40노트(약 21 m/s) 구간에서는 10~20 kHz에서 채널 2가, 20 kHz 이상에서는 채널 1이 높게 나온다. 수행한 실험에서 선박이 수직 방향의 진동 없이 수평 방향으로 안정적으로 운항하고 있다고 하면 기존연구 [1]를 고려하였을 때 채널 1에는 층류 경계층이 형성되고 채널 2에는 난류 경계층이 형성되어 유동 소음이 채널 2에서 크게 수신 된다. 이렇게 난류 경계층에 있을 것으로 보이는 채널 2가 채널 1보다 고주파수 영역에서 낮게 나오는 것으로 보아 높은 주파수에서 그만큼 유동 소음의 영향이 작다고 볼 수 있고 고주파수에서 소나 운용시 유동 소음의 영향을 줄일 수 있다. 그러나 이러한 고주파수의 운용 주파수 선택시 추가적으로 고려해야 할 요소가 청음기의 단면 크기와 형상이다. 본 실험에 사용된 청음기의 크기와 선 속을 통해 가용 주파수 대역을 고려하면 60 kHz이내에서 분석이 타당하고 보다 높은 주파수에서 청음기의 측정면에 의한 필터링 효과가 생기기에 이에 대한 보정이 필요하다. 따라서 고주파수의 운용 주파수 선택과 청음기 단면 크기 변화시 추가적인 실험과 이를 통한 보정이 필요하다.

3.5. 선 속에 따른 비교 및 경험 모델의 정립

본 절에서는 채널에 따라 6 m/s, 16 m/s, 21 m/s의 속도 구간에서 관측된 소음 레벨을 Lauchle의 실험 결과 [1]와 비교했다. Lauchle의 실험 결과는 회류 수조에서

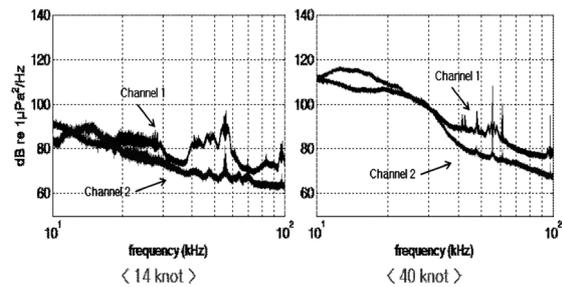


그림 11. Ch1과 Ch2 결과 비교
Fig. 11. Noise spectrum comparison of the effects of location.

3차원의 축 대칭 형상의 유동 소음을 측정하는 것이다. 그림 12에서 Lauchle의 Background로 표시한 것은 유동이 흐르지 않는 상태에서 실험실 내의 배경소음을 측정하는 것이고, 9.14 m/s라 표시한 것은 9.14 m/s의 유속에서 측정된 결과를 나타낸다.

그림 12에서 소음 레벨은 속도가 증가함에 따라 같이 증가하며 이러한 경향성은 Lauchle의 실험 결과에서도 관찰된다. 전체적으로 고주파수 영역에서 40노트(약 21 m/s)로 항행할 때 소음 레벨은 80 dB ~ 100 dB로 관찰되었다.

한편, 선 속에 따른 소음 레벨의 변화를 주파수와 선 속의 변화 관점에서 살펴보면 그림 13과 같은 그래프를 얻을 수 있다. 그림 13에서는 대표적인 주파수 5, 10, 20, 30 kHz에 대해 밴드 폭 1 Hz로 채널 1에서의 결과를 선 속에 따라 나타냈다. 선박 속도에 대해 5에서 6승에 비례하는 경향을 보인다. 실제 기존의 이론적 연구 [3]에서 유동 소음의 유동 속도와의 관계는 7.5승에 비례한다고 확인하였다. 본 실험 결과는 이러한 이론에 의해 얻어진

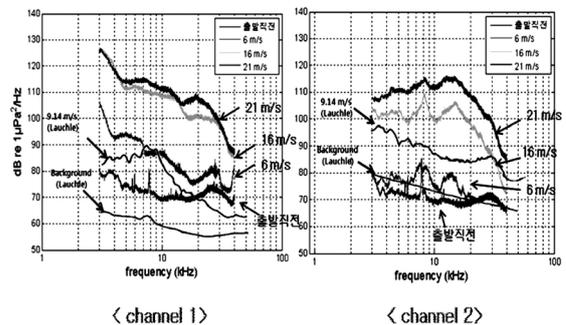


그림 12. 선 속의 변화에 따른 스펙트럼과 Lauchle의 결과와의 비교
Fig. 12. Noise spectra measured for ship velocities 0 m/s, 6 m/s, 16 m/s and 21 m/s compared to Lauchle's results.

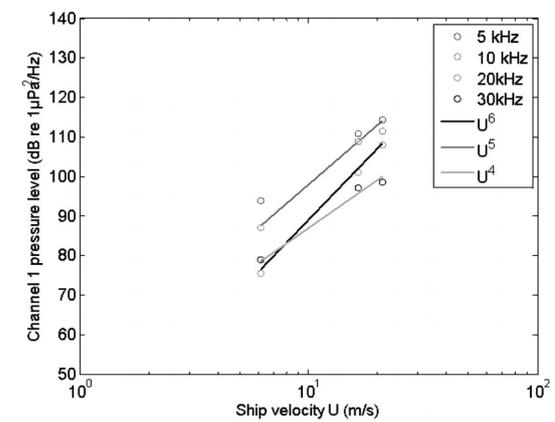
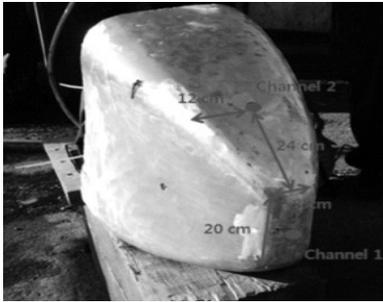
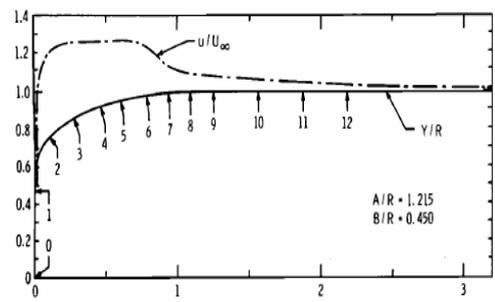


그림 13. 선 속의 변화에 따른 주파수별 소음 레벨 변화
Fig. 13. Noise spectra dependence on ship's velocity.

표 2. Lauchle [7] 실험과 비교
Table 2. Comparison of experimental conditions with Lauchle [7].

	Our Experiment	Lauchle Experiment (Noise generated by axisymmetric turbulent boundary-layer flow, 1976 [7])
사진		
직경	20~34 cm	32.4 cm
속도	0~21 m/s	6.71~9.14 m/s
장소	해상 운행 선박	Water tunnel
추진	Self-propulsion	Fixed in the tunnel
형상	Modified ellipsoidal, non-axisymmetric	axisymmetric

지수 관계 보다 낮은 지수 승이 나왔다. 이에 대한 원인은 크게 두 가지로 볼 수 있는데, 첫째 우리의 측정 실험은 해상에서 직접 측정한 것으로 유동 소음 이외의 기계 및 배경 소음과 기포에 의한 캐비테이션 소음 등이 섞여 있기에 유동 소음의 변화량이 전체 소음에 미치는 영향이 줄어들기 때문이다. 두 번째는 3차원 물체의 형상 및 청음기의 위치에 따른 차이로 볼 수 있다. 난류 경계층에서는 지역적으로 벽면 변동 압력이 발생하고 이러한 벽면 변동 압력과 표면에서 난류의 불안정성이 상호 작용하여 경계층에 국한 되는 nearfield noise와 함께 전파 되는 radiation-field noise 변동 압력이 있는데, 본 실험에 사용된 비대칭 형상이 Lauchle의 형상에 비해 radiation-field noise 변동 압력의 선단면으로 전달이 어려운 것이다.

본 논문에서 실험 측정 결과를 바탕으로 아래와 같은 실험 모델을 구성했다.

$$G_p(f) = G_m(f) + 10 \cdot (N) \log_{10}(U/U_0) \quad (1)$$

여기서, $G_m(f)$ 은 reference 스펙트럼, U_0 는 reference 속도이며, 이 두 값은 실험을 통해 결정된다. $G_p(f)$ 는 예측된 소음 스펙트럼을 나타내며 U 는 선 속, N 은 5~6사이의 값으로 fitting 계수이다.

IV. 결론

본 연구에서는 고속으로 운항하는 실제 선박의 hydrofoil

전면에 청음기에서 수신되는 소음원에 대해 분석하고 실제 설치를 통해 정박 중일 때와 기계 장치만 작동할 때, 그리고 운항시 속도를 변화시키며 소음을 예측하였다. 이러한 실험 결과를 분석하여 속도 및 청음기 설치 위치에 따른 소음의 차이를 분석하였고 속도 변화에 대해 선속의 5~6승에 비례하여 소음 레벨이 증가함을 확인하였다.

소나를 운용하게 될 30 kHz 주파수 대역에서 소음 레벨은 약 80~100 dB가 나오며 저주파수 영역에서 채널간의 소음 레벨 차이가 크고 고주파수 영역으로 갈수록 절대적인 소음 레벨도 낮아지며 채널간 소음 레벨의 크기와 스펙트럼 형상이 유사하게 나옴을 확인하였다. 이를 통해 고속 선박의 hydrofoil에 소나를 설치하여 운용시 주파수 대역을 고주파수로 설정함으로써 각종 기계 및 유동 소음의 영향을 줄이도록 제안하였다.

지금까지의 분석의 보완을 위해 다음과 같은 추가 연구가 필요하다. 우선 실제 선박 주변의 유동을 관찰 할 수 있는 시스템을 통해 물이 입사하는 방향과 층류와 난류의 형성 위치를 파악해야겠다. 또한 고속으로 운항하는 선박이기에 표면에 cavity가 발생해 이것이 소음원으로 작용할 수 있으므로 그 발생 여부를 확인해야 하며 유동 소음과 기계 소음의 영향을 각각 분리하여 분석하기 위해 기계 소음의 개별적인 측정이 필요할 것이다. 이러한 연구를 통해 고속 선박에서 속도 및 청음기 위치에 따른 소음 레벨 예측과 각 소음원에 따른 분석이 가능하다.

참고 문헌

1. Gerald C. Lauchle, "Noise generated by axisymmetric turbulent boundary-layer flow," *J. Acoust. Soc. Am.*, 61, 694-703, 1977.
2. V. H. Arakeri, S. G. Satyanarayana, K. Mani, and S. D. Sharma, "Studies on scaling of flow noise received at the stagnation point of an axisymmetric body," *J. of Sound and Vibration* vol. 146, pp. 449-462, 1991.
3. Gerald C. Lauchle, "Flow noise scaling at the stagnation point of an axisymmetric body," *J. of Sound and Vibration* vol. 154, pp. 568-572, 1992.
4. R. Y. Nishi, "Measurement of noise on an underwater towed body," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 48, pp. 753-758, 1970.
5. Collier, R. D., "Ship and platform noise, propeller noise," in *Handbook of Acoustics*, edited by M. J. Crocker, John Wiley & Sons, 1998.
6. G. M. Corcos, "The structure of the turbulent pressure field in boundary-layer flows," *Journal of Fluid Mechanics* vol. 18, pp. 353-378, 1964.
7. D. M. Chase, "Modeling the wavevector-frequency spectrum of turbulent boundary layer wall pressure," *J. of Sound and Vibration* vol. 70, pp. 29-67, 1980.
8. D. M. Chase, "The character of the turbulent wall pressure spectrum at subconvective wavenumbers and a suggested comprehensive model," *J. of Sound and Vibration* vol. 112, pp. 125-147, 1987.
9. Sewon Park, Gerald C. Lauchle, "Wall pressure fluctuation spectra due to boundary-layer transition," *J. of Sound and Vibration* vol. 319, pp. 1067-1082, 2009.
10. G. P. Haddle and E. J. Skudrzyk, "The physics of flow noise," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 46, pp. 130-157, 1969.

저자 약력

●박 지 용 (Ji-Yong Park)

2008년: 서울대학교 조선공학과 (학사)
2010년: 서울대학교 산업조선공학과 (석사)
현재: 한국해양연구원 연구원
※ 관심분야: 유동 소음, 해양 에너지, 수치 모델링

●이 근 화 (Keun-Hwa Lee)

한국음향학회지 제25권 1호 참조

●성 우 제 (Woo-Jae Seong)

한국음향학회지 제27권 3호 참조