



실습선 나라호의 선박고유소음 특성 연구 - 발전기 터보차저 소음을 중심으로 -

정봉규 · 이준호[†]

부경대학교(주무관) · [†]부경대학교(조교수)

A Study on Specific Noise Characteristics of a T/S NARA

Bong-Kyu JUNG · Jun-Ho LEE[†]

Pukyong National University(assistant director) · [†]Pukyong National University(professor)

Abstract

This study aimed to estimate which kind of frequency would be occurred by the generator (with turbocharger) in the air and underwater. In addition, it also aimed to analyze frequency trends and characteristics of generator with noise related experiments. The major conclusion is as follows: The noise level was decreased with increasing depth 5m in the low frequency region of station no. 1 and no. 2. Noise levels were relatively higher in station no. 1, which operated 2 generators. A 300Hz harmonic frequency was identified on the graph. Since the main frequency of turbocharge of the activated generator was estimated to be 300Hz, it could be assumed that the harmonic frequencies would be occurred accordingly. In addition to the 300Hz harmonic, we have identified a harmonic with narrower spacing, guessing that a harmonic due to the main vibration frequency of the diesel engine has occurred. And the vibration frequency of the cylinder firing rate & crankshaft were found to be mostly in the range of 0 to 5,000 Hz and the range of average power spectral density was from 80 to 125dB re $1 \mu Pa^2/Hz$.

Key words : Noise level, Harmonic phenomenon, Vibration frequency, Generator's turbocharger noise, Electric vessel

I. 서론

2015년 6월부터 새롭게 운항중인 전기추진기선 이자 해양탐사 실습선인 나라호를 부경대학교에서 맡아 운영 중에 있다. 여기에는 실습선으로는 처음으로 설치한 동적위치제어시스템(Dynamic position system), 다중음향측심기(Multi-beam echo sounder), 과학어군탐지기(Scientific fish finder), 해저지층탐사기(Sub-bottom profiler) 등 최신형의 해양탐사장비를 갖추고 있으며, 연구원 및 승선실습 학생들의 다양한 목적으로 이루어지는 조사 및 실험을 지원하고 있다. 이렇게 다양하고 많은

종류의 실험들 중에는 선박에 탑재된 음향탐지기를 이용한 연구와 해상 및 수중에서의 음향학적 인 연구를 위해서 선박의 소음으로 인한 간섭을 최소화하기 위해 보통 해당선박의 주기관(main engine)과 불필요한 보조기기를 끄고 연구를 진행하는 것이 일반적이다. 그리고 선박소음은 정상 속도로 항주할 때 음압레벨의 변화가 적고 거의 일정하게 유지되므로 선박소음 평가에 평균음압레벨[dB]이 이용되기도 한다(Kim et al., 2010).

그러나 실습선 나라호는 전기추진기선이기 때문에 4대의 발전기를 이용하여 주추진기 및 선수추진기의 추력을 얻으며, 그 외 선체전반에 필요

[†] Corresponding author : 011-592-0308, leejh@pknu.ac.kr

한 필수적인 항해 및 관측 장비에 전력공급을 위해 최소한 발전기 1대를 항시 운전하여야만 하는 특성을 가진다.

이러한 특수성을 가지고 있는 전기추진기 실습선 나라호에서 음향학적, 진동학적 등의 정확하고 안정된 실험을 이행하기 위해서는 먼저, 선박에서 발생하는 고유의 진동특성이나 자체소음을 조사하여 수치화가 되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 선박 건조 후 동해에서 실험 측정된 전기추진기선 나라호의 수중에서의 기관소음에 대한 주파수 특성 분석 및 발전기 운용 수에 따른 주파수 특성 변화를 비교하였다.

II. 재료 및 방법

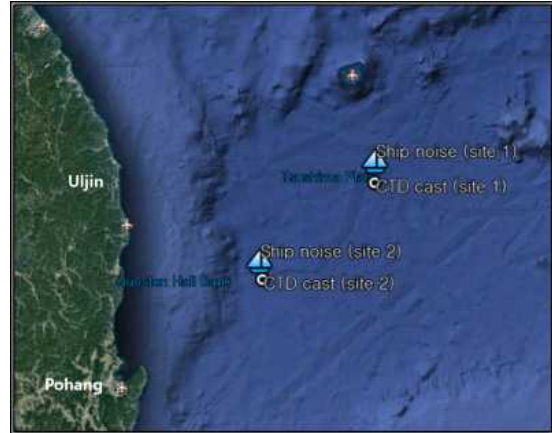
수중에서의 음향학적 특성 분석을 위한 실험을 수행하기 위해서는 먼저 나라호의 기관소음에 대한 음향학 및 진동학적 특성을 분석하여 간섭을 최소화하는 것이 중요하다.

이를 위한 선행연구로 선체 각 위치별 진동에 관한 것으로 1,500톤급 전기추진기 탐사선(나라호)의 진동에 관한 연구(Bae et al., 2014), 선체 각 장소별 선내 소음에 관한 것으로 실습선 가야호의 항해 중 선내 소음에 대한 승선환경에 관한 연구(Kim et al., 2010) 및 선박과 수중사이의 방사소음 관계에 관한 것으로 공기 중 선박방사소음이 수중방사소음에 미치는 영향에 관한 연구(Kim et al., 2011)를 살펴보았다.

본 연구는 수중에서의 실습선 나라호에 대한 선박고유소음을 실험하고 측정하기 위해 2017년 5월 9~10일에 [Fig. 1]과 같이 동해 포항, 울진 해역의 두 정점의 위치에서 실험을 실시하였다.

실험 위치의 수심은 Site 1에서 약 2,200m, Site 2에서 약 2,093m 이었으며, 본 선 주위로 반경 7마일 내에 어로작업중이거나 정류중이거나 항행 중인 선박이 없는 시간대로 정하여 실시하였는데, 정점 Site 1에서는 발전기 2대, 정점 Site 2에

서는 발전기 1대를 각각 운용하여 그 때 선박에서 수중으로 방사되어 나온 최소한의 선박고유소음을 측정하였다.



[Fig. 1] The CTD casting points and experimental sites.

이렇게 실험에 이용된 본선의 발전기엔진은 현대 힘센 엔진의 H17/28¹⁾ 모델로, 4대의 주발전기엔진 및 1대의 정박용 발전기엔진을 운용하고 있다. 발전기(Engine) 및 터보차저(Turbocharger)²⁾의 기본적인 특징은 아래의 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Specification of Eng. & Turbocharger

Particulars	Description
Eng. No.	BA5198-1~4
Type	7H17/28
Power × rpm	798kW × 900rpm
Firing Order	1-2-4-6-7-5-3
Type	TPS48-F32
Max. rpm & Temp.	58,920 rpm, 620℃
Maker	ABB
Model	TPS44-61-F
Ser. No.	HT539680~3

(Source: HYUNDAI HEAVY INDUSTRIES CO., LTD. 4-STROKE DIESEL ENGINE INSTRUCTION BOOK VOL. 3)

- 1) 4-stroke, vertical, direct injection single acting and trunk piston type with turbocharger and inter-cooler.
- 2) Turbocharger: 과급기라고 하며, 발전기의 한 부분으로 압축공기를 연소실에 넣어주는 역할을 한다.

선박의 소음을 측정하기 위해 사용한 수중청음기(Hydrophone)는 RESON사의 TC-4014와 TC-4032를 사용하였고, 수신기의 수심은 5m에 위치시켰다. 이 때 소음 측정에 사용된 수중청음기의 수신감도(Receiving Voltage Sensitivity, RVS)는 $-186 \text{ dB re } 1\text{V}/\mu\text{Pa}$ 이며, 사용가능한 주파수 범위는 15Hz~480kHz이다.

실험을 위한 소음 측정시간은 1분 단위로 총 15분 동안 측정하였으며, 샘플링 주파수(Sampling frequency)는 100kHz로 설정하였다.

음향자료 분석은 분석 프로그램인 MATLAB(Mathworks, USA)을 이용하였고, 시간과 주파수에 따른 에너지를 분석하는 방법인 스펙트로그램(Spectrogram)과 주파수에 대한 에너지를 1초로 정규화 하여 분석하는 방법인 전력 스펙트럼 밀도(Power Spectral Density, PSD), 1/3 옥타브밴드(Octave band) 분석을 이용하여 실험을 실시하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

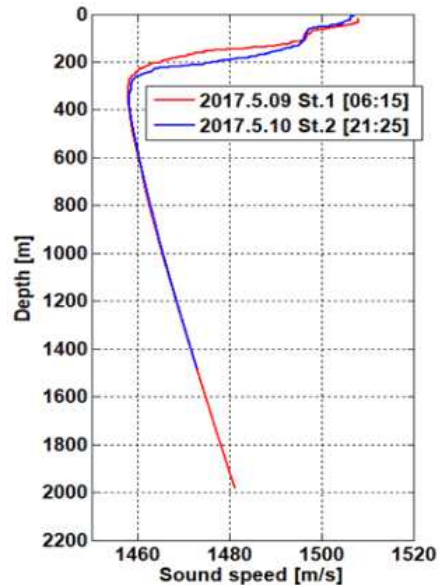
선박의 고유소음을 측정하고자 할 때, 그 선박의 정류(停留)나 정박(碇泊)은 물론이고 선내의 모든 장비 및 기기들을 멈추어서 소음원이 될 수 있는 것을 원천적으로 제거하고, 선외의 기상 및 해상상태가 아주 조용한 것이 가장 최적이나 현실적으로 그렇지 못한 경우가 해상에서는 대부분이다.

또한 선박의 디젤엔진은 축 회전수를 조절하기 위해 감속기어를 필요로 하는데 이런 감속기어는 선박의 수중방사소음 발생의 주요한 원인이 되고, 전기추진기선에서는 발전기엔진의 진동주파수가 주요 원인이 됨을 알 수 있는데 이처럼 기타 보조기기의 진동주파수 또한 그와 비슷한 역할을 한다.

그래서 선박의 하부에 있는 즉, 수면 하에 있는 기관실의 발전기 공기소음은 두 가지 경로로

수중에 음파를 발생시키는데, 먼저 공기 중에서 발생한 선박의 기관소음이 선체 외판을 진동시켜 고체소음을 발생하고, 진동된 외판은 수중에 음파를 방사하는 경우와 공기소음이 선체 외판을 통과하여 수중에 전파되는 경우가 있다(Kim et al., 2011).

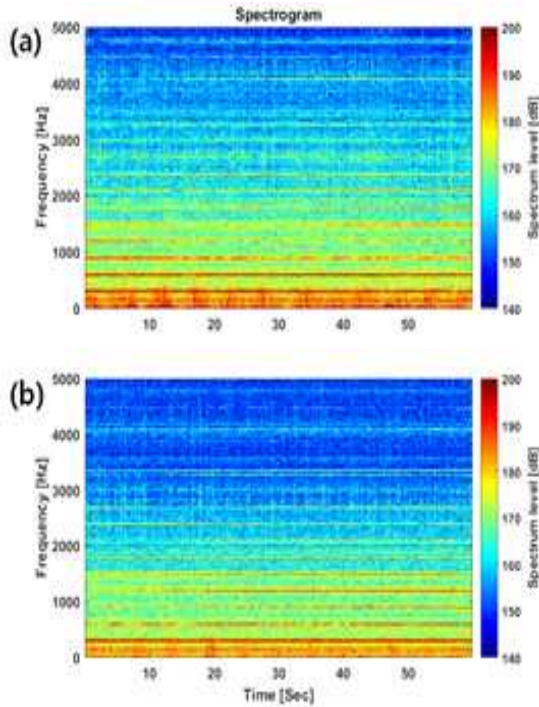
그리고 공기와 수중에서의 차이를 가지는 지배 주파수를 음원들의 영향으로 원인을 찾을 수 있고, 같은 음원을 사용하더라도 지배주파수가 다르기에 기관실의 발전기엔진이 공기와 수중에서 어떤 주파수를 발생시키고 그 차이는 어느 정도 인지도 알 수 있을 것이다(Gloza, 2008).



[Fig. 2] Sound speed profiles during experiments.

[Fig. 2]는 선박에서 발생하는 소음의 수중에서 수심에 따른 음속의 변화를 나타낸 것이다. 이것은 5월 9일 새벽시간과 10일 밤 시간에 Site 1, 2에서 CTD를 이용하여 측정된 수심에 따른 음속 구조를 나타내는 그래프이며, 비슷하게도 수심 약 300m 부근에서 최소음속 층을 보이고 음향채널(Sound Channel)이 존재함을 알 수 있는데, 이 음향채널은 성층이 된 매체에서 음파가 굴절 또

는 반사에 의하여 수직방향으로 확산되지 못하고 수평방향으로만 전파되는 층이다. 그래서 선박소음에 관한 연구를 함에 있어서 음속의 정도나 음향채널의 존재가 실험에 많은 영향을 미치기 때문에 이러한 관측이 필요한 것이다.



[Fig. 3] Spectrogram (a) St. No.1, (b) St. No.2.

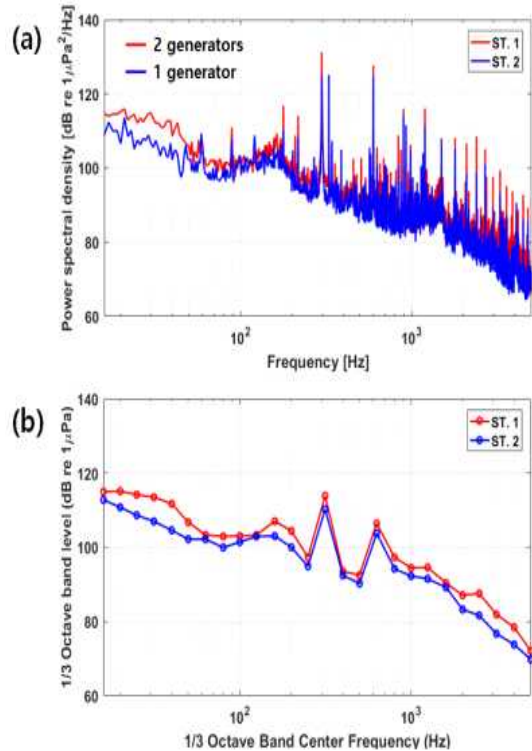
[Fig. 3]은 Site 1과 2에서 측정된 소음 중 1분 동안의 데이터를 스펙트로그램 방법으로 분석한 결과인데, 이 방법은 소음을 주파수 영역에서 몇 개의 대역으로 구분하여 분석하고, 각 대역에 대한 출력의 시간적 변화를 세로축에 주파수를 설정하고, 가로축에 시간으로 설정하여 그 스펙트럼 성분의 세기를 도형의 농담으로 나타낸 것으로, 주파수 분석을 위해서는 기본적으로 녹음된 소음의 스펙트럼 분석을 함께 나타내어야 하므로 [Fig. 3]을 첨부하였다.

여기 두 Site 모두 약 300Hz를 기본주파수로 하는 하모닉(Harmonic) 성분을 보였으며 시간에

따라 일정하게 나타남을 볼 수 있다.

이와 관련하여 연구된 논문에 의하면 대형 디젤엔진선박의 소음 중 배경소음에 영향을 주는 원거리 전파가 가능한 저주파대역(~300Hz)의 소음성분이고(Ross, 1976), 1960년대 중반 이후 40년 동안 특정지역의 수중소음이 주요한 원인으로 주목되는 저주파대역(~300Hz)에서 10년에 약 두 배씩 증가하였다고 한다(Andrew et al., 2003, McDonald et al., 2006).

[Fig. 4]는 1분 단위 소음측정값의 전력 스펙트럼 밀도(a)와 1/3 옥타브밴드 분석 결과(b)를 총 15분 동안 측정된 값에 대한 평균치 결과이다.

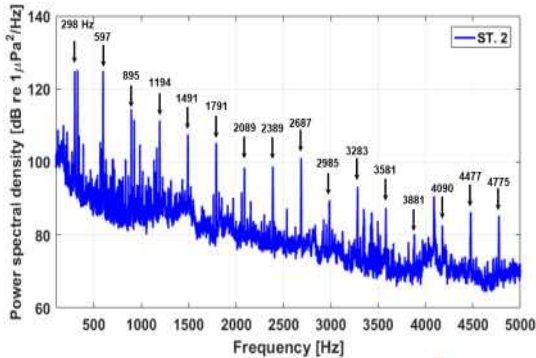


[Fig. 4] (a) Power Spectral Density, (b) 1/3 Octave band analysis.

(a)와 (b)의 그림에서 빨간색 그래프(위)는 발전기를 2대 운용하였을 때, 파란색 그래프(아래)는 발전기를 1대 운용하였을 때이며, 두 그래프의

경향은 비슷하나 발전기 2대를 운용할 때 에너지가 얼마나 크게 나타났는지를 비교하여 볼 수 있는데, 특히 주파수 300Hz에서의 전력 스펙트럼 밀도는 약 15dB re1 $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ 정도, 1/3 옥타브밴드는 약 2dB re1 μPa 정도 높았다.

또한 [Fig. 3]과 같이 약 300Hz 부근에서 가장 큰 에너지를 가졌으며, 그 뒤를 따라 하모닉 성분이 나타났다.



[Fig. 5] Power Spectral Density (Site 2, 100~5,000Hz).

[Fig. 5]는 [Fig. 4](a) Site 2의 한 부분인 100Hz부터 5,000Hz까지의 구간을 확대한 그래프이다. 그래프 분석 결과, 메인 주파수인 298Hz를 시작으로 약 300Hz 간격으로 하모닉 성분을 보였으며, 그 외 많은 주파수 성분의 에너지에 의해 다양한 하모닉 성분이 존재함을 알 수 있다.

여기에서 나타난 주파수 약 300Hz가 실습선 나라호 발전기엔진의 주요 주파수로, 이것은 발전기를 운용하기 위한 터보차저의 주파수라는 것을 쉽게 예측할 수 있다.

그 이유는 실험에 있어 정확한 선박소음을 측정하기 위해 진동 및 주파수 간섭을 최소화 하여야 하는데, 그렇게 하기 위해서는 선박에 탑재된 모든 항해, 관측 및 기관 장비를 끄거나 정지한 상태에서 실행하여야 하지만, 전기추진기선박의 특성상 어쩔 수 없이 최소한의 필요 장비를 작동시키기 위해 발전기엔진을 가동하였다.

특히, 기관실에서는 해수 냉각 펌프, 청수 냉각 펌프 및 연료 공급 펌프와 1, 2번 기관실 송풍기만 운용하는 상황이었으며, 이 중 각종 펌프 장비는 모두 1,800rpm으로 운전되었고, 송풍기는 1,720rpm으로 운전되었다. 즉, 이들 장비는 모두 주파수 60Hz 이하에서 운용되었다.

그리고 본선의 발전기엔진의 터보차저는 특성상 최대 58,920rpm으로 운전이 가능하나, 실험 중에는 당시 최대 부하의 10%인 60kW로 조절하여 운전되었으며, 그 때 발전기엔진 터보차저의 운용 상태는 18,000rpm으로 운전 중 이었고, 작동주파수는 300Hz를 나타내고 있었다.

<Table 2> Table of main vibration frequencies of a diesel engine

Vibration frequencies	Cause of vibrations
$f_{cfr} = \frac{k \cdot n_s}{2.60}$	Cylinder firing rate
$f_c = \frac{k \cdot n_s}{60}$	Crankshaft
$f_v = \frac{k \cdot z_p \cdot n_s \cdot z_z}{m \cdot 60}$	Engine valves
$f_{ps} = \frac{k \cdot z_p \cdot n_s}{60}$	Piston slap
$f_{pr} = \frac{k \cdot b \cdot z_p \cdot n_s}{60}$	Piston rings

where k is the number of the harmonic, ns is the rotational speed of the engine in rpm, zp is the number of pistons in the engine, zz is the number of valves for one piston, b is the number of piston rings for one piston, m indicates if the motor is a two or four-stroke engine.

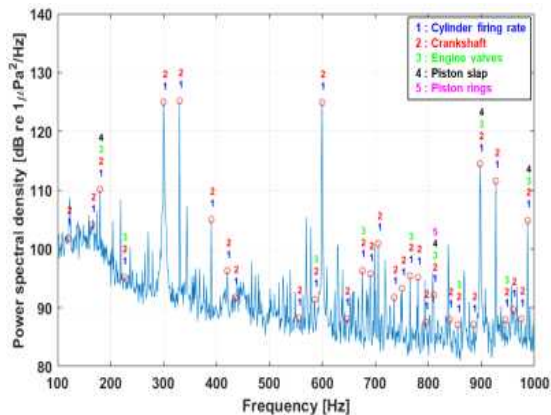
(source: Ignacy Gloza, Vibration and radiated noise of a small ship, 2008)

<Table 2>는 디젤 발전기엔진의 주요 진동원인 과 진동주파수를 구하는 식을 나타낸 표이다. 여기에는 실린더 연소율, 크랭크샤프트, 엔진 밸브, 피스톤 타격, 피스톤 링에 대한 계산식을 나타내고 있다.

선박에서 사용하는 엔진을 크게 두 가지로 구

분하면 가솔린엔진과 디젤엔진으로 나뉘고, 디젤엔진은 다시 디젤 메인엔진, 디젤 발전기엔진 등으로 나눌 수 있는데, <Table 2>에 사용된 계산식은 가솔린엔진을 제외한 디젤을 사용하는 모든 엔진에 대한 넓은 범위의 디젤엔진 공식이다. 그러므로 전기추진기선인 나라호에 탑재된 발전기엔진 또한 디젤엔진에 포함되므로 <Table 2>의 공식을 본 연구에서 사용할 수 있는 것이다.

그리고 전기추진기선인 실습선 나라호 발전기엔진을 구성하는 주요 특징을 살펴보면, 발전기엔진 회전속도 n_s 은 900rpm, 발전기엔진의 실린더 수 z_p 는 7, 실린더 당 밸브 수 z_v 는 4, 피스톤 당 피스톤 링의 수 b 는 3, 발전기엔진 행정 수 m 은 4이다.



[Fig. 6] Vibration frequencies (Site 2, 100~1,000Hz).

[Fig. 6]은 Site 2의 평균 전력 스펙트럼 밀도 결과를 이용하여 나라호 발전기엔진 성분에 의한 진동주파수 성분을 분류한 그래프이다. 그래프의 피크 부분에 적힌 숫자는 앞서 산출된 진동주파수 공식을 이용하여 각 진동주파수의 하모닉 성분을 표시한 것이다.

진동주파수 공식을 이용하여 계산하면, 1은 실린더 연소율: $(7.5*k)Hz$, 2는 크랭크샤프트: $(15*k)Hz$, 3은 엔진 밸브: $(22.5*k)Hz$, 4는 피스톤 타격: $(90*k)Hz$, 5는 피스톤 링: $(270*k)Hz$ 에 의한 하모닉 성분들이다.

위의 [Fig. 6]에서 하모닉 주파수 300Hz와 600Hz에서는 실린더 연소율과 크랭크샤프트의 진동주파수가 강하게 나타났고, 평균 전력 스펙트럼 밀도는 125dB re $1 \mu Pa^2/Hz$ 이었으며, 900Hz에서는 실린더 연소율, 크랭크샤프트, 엔진 밸브 및 피스톤 타격의 진동주파수가 함께 나타났고, 평균 전력 스펙트럼 밀도는 115dB re $1 \mu Pa^2/Hz$ 이었다.

그 외 주파수에서도 주로 실린더 연소율과 크랭크샤프트의 진동주파수가 대부분 나타났고, 평균 전력 스펙트럼 밀도의 범위는 87~112dB re $1 \mu Pa^2/Hz$ 이었다.

약 300Hz 간격의 하모닉 성분뿐 만 아니라 디젤 발전기엔진과 같은 주파수 간격이 더 좁은 주요 진동주파수에 의한 하모닉 성분들이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

이것은 정점 Site 2에서 발전기 1대를 운용하였을 때이며, 주파수 100~1,000Hz 사이에서 복잡한 하모닉 성분을 확인하였다.

IV. 결론

현재의 국제사회는 해양생태계 위협의 한 원인으로 선박소음을 주장하고 있고, 이에 각 국들은 여러 방향으로 다양한 규제 방안을 제정하고 기술적인 방법을 연구하고 있는 실정이다.

따라서 불필요한 선박소음을 제거하거나 현저히 줄일 수 있는 기술적 방안 및 제도적 마련이 필요하고, 해상에서도 가능한 한 저진동, 저소음 장비를 설치하여 선박의 고유소음을 줄인 수중음향 및 진동에 대한 정확하고 실질적이고 기초적인 연구 자료를 얻고자 하는데 그 목적이 있다.

본 연구에서는 전기추진기선인 실습선 나라호의 발전기엔진 터보차저의 소음 특성에 의한 고유선박소음을 분석한 결과로 첫째, St. 1과 St. 2에서 발전기를 각각 2대, 1대씩 운용하였고, 소음 준위는 발전기 2대를 가동한 St. 1에서 특히, 주

파수 300Hz에서의 전력 스펙트럼 밀도는 약 15dB re1 μ Pa²/Hz정도, 1/3 옥타브밴드는 약 2dB re1 μ Pa 정도 더 높았다. 둘째, 그래프를 통해 300Hz 하모닉을 확인하였고, 이것은 가동한 발전기엔진 터보차저의 주요 주파수가 300Hz이기 때문에 그에 따른 하모닉이 발생한 것이다. 셋째, 300Hz 하모닉 이외에 간격이 더 좁은 하모닉을 확인하였고, 이것은 디젤 발전기엔진의 주요 진동주파수에 의한 하모닉이 발생한 것으로 확인하였고, 평균 전력 스펙트럼 밀도의 범위는 80~125dB re 1 μ Pa²/Hz 이었다.

추후 본 연구와 같은 방법으로 동급 디젤엔진 선박의 발전기엔진과 주기관의 소음 크기 및 주파수 정도를 비교·분석하고, 나아가 하이브리드 선박과도 비교, 연구할 필요성이 충분히 있을 것으로 판단된다.

References

Andrew RK, Howe BM and Mercer JA(2002). Ocean ambient sound: comparing the 1960s with the 1990s for a receiver off the California coast. *Acoustics Research Letters Online*. Vol. 3, 65~70. <http://doi.org/10.1121/1.1461915>

Bae DM, Bo CAO and CHEN TH(2014). Vibration analysis of a DWT 1,000ton ocean-research vessel with electric propulsion, *Journal of the Korean Society of Fisheries Technology*, 50(1), 75~82. <http://dx.doi.org/10.3796/KSFT.2014.50.1.075>

HI AIR KOREA, Instruction manual for air condition system and ventilation fan, 235~237.

HYUNDAI HEAVY INDUSTRIES CO., LTD.

4-Stroke diesel engine instruction book Vol. 3, 1~22.

Ignacy Gloza(2008). Vibration and Radiated noise of a small ship. *Hydro acoustics annual Journal* Vol. 11, 87~96.

Kim HS, Kim JS, Kim BK, Kim SR and Lee SH(2011). Effect of Airborne Noise from Ship Machinery on Underwater Noise, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(6), 569~574. <http://doi.org/10.3744/snak.2011.48.6.569>

Kim MS, Shin HO, Kim MS and Hwang BK(2010). Boarding Environment of Training Ship KAYA to the Noise during the Voyage, *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education*, Vol. 22(2), 218~230.

Lee PH, Yoon JR(2005). Ship Radiated Noise Measurement Methods and Accuracy Analysis, *Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 15(6), 738~748. <http://doi.org/10.5050/ksnvn.2005.15.6.738>

McDonald MA, Hidebrand JA and Wiggins SM(2006). Increases in deep ocean ambient noise in the Northeast Pacific west of San Nicolas Island, California. *Journal Acoustical society of America*. Vol. 120(2), 711~718. <http://doi.org/10.1121/1.2216565>

Ross D(1976). *Mechanics of underwater noise* (Pergamon Press, New York). <http://doi.org/10.1016/c2013-0-02819-8>

Shinshin machinery CO., LTD, Specification of pumps for final drawing, 24~38.

-
- Received : 22 March, 2018
 - Revised : 22 August, 2018
 - Accepted : 01 September, 2018