

경사 각도에 따른 전동기의 진동 및 고체소음 특성 분석

Effect of Inclination Angles on Motor Vibration and Structure-borne Noise Characteristics

정 호 연* · 구 회 모†
Hoyeon Jeong* and Heemo Goo†

(Received September 23, 2021 ; Revised November 1, 2021 ; Accepted November 3, 2021)

Key Words : Electric Motor(전동기), Inclination(경사), Angle(각도), Structure-borne Noise(고체소음), Rotor Vibration(회전체 진동)

ABSTRACT

If less noise radiates from vessels and submarines under water, it is less likely for enemy troops to detect them, which in turn improves the survivability and mission capability of their crews. The Korean Navy thoroughly assesses the structure-borne noise level as a special-performance evaluation item to reduce the underwater radiated noise before loading any equipment. The evaluation is performed at the manufacturing site or in an anechoic chamber, depending on the allowable horizontal support conditions. However, the pre-installation evaluation method does not take into account the influence of inclination conditions during the rolling, pitching, diving, and surfacing of vessels, which may cause its results to differ from the noise levels during an actual operation. This study tests and analyzes the effect a vessel's inclination angle on the structure-borne noise in an electric motor. The results show no major frequency movement, which confirms that the structure-borne noise in the rotational frequency component increases with the inclination angle. Therefore, the inclination angle is a factor to consider during the design, evaluation, and operation of a vessel.

1. 서 론

오늘날 잠수함을 비롯한 함정에서 발사할 수 있는 함대지 무기체계가 발전됨에 따라 해군력이 차지하는 비중은 갈수록 증가하고 있으며, 전 세계 각 국에서 해군력 증강을 위한 신형 구축함 및 잠수함 건조에 막대한 비용을 투자하고 있다. 최첨단 무기시스템을 탑재한 함정의

보호와 승조원의 생존성 및 작전능력을 높이기 위한 스텔스(stealth)화가 지속적으로 연구 중이며⁽¹⁻³⁾, 해군에서는 소음원인 장비에 대하여 함정에 탑재하기 전 고체소음(structure-borne noise), 공기소음(air-borne noise) 및 회전체 밸런싱을 확인하는 베어링 진동 측정 시험을 특수성능 시험으로 분류하여 철저하게 관리하고 있다.

위 항목의 특수성능 평가는 수평지지 조건에서 이루어지며, 허용 기준레벨 및 배경소음에 따라 제조 현

† Corresponding Author; Member, Korea Marine Equipment Research Institute(KOMERI), Principal Researcher / Department of Mechanical IT Convergence Engineering, Korea Maritime & Ocean University
E-mail : shiner1981@komeri.re.kr

* Member, Korea Marine Equipment Research Institute(KOMERI), Senior Researcher / Department of Mechanical IT Convergence Engineering, Korea Maritime & Ocean University

A part of this paper was presented at the KSNVE 2020 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Yong Hee Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

장 또는 반무향실에서 수행한다. 이는 실제 운용 환경에서 함체의 롤링, 피칭, 잠항 및 부상(surfacing)에 의한 경사 각도는 고려되지 않은 설치 전 평가 방법으로써, 운항 중 함정에서 발생하는 소음레벨과 차이가 발생한다. 또한 수직발사관을 탑재한 최신 잠수함의 경우 발사각 확보를 위해 필요시 함체의 경사 각도를 요구하고 있다. 이와 같은 이유로 함체의 경사 각도가 진동 및 고체소음 레벨에 어떠한 영향을 미치는지 진동기를 대상으로 실험적 연구를 진행하였다.

함정 특수성능 시험 항목 중 고체소음 시험은 탑재 전 평가 방법으로써, Fig. 1의 (a)와 같이 수평 상태의 반무향실 또는 제조 현장에서 진행한다. 그러나 실제 운용 환경에서 잠수함의 경우 Fig. 1의 (b)와 같이 잠항 및 부상 시 약 22°~25°의 각도를 가지며, 롤링 및 피칭에 의한 각도 변화가 발생할 경우 수평 조건 대비 소음 레벨의 차이가 발생할 수 있다.

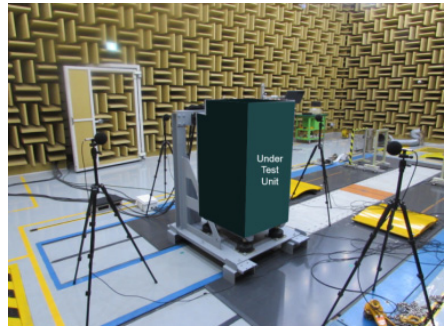
본 연구에서는 함체의 운용환경을 모사하여 진동기를 사용한 시험 장치를 구현하였다. 이를 통해 최대 ±30°의 경사각 조건과 수평 조건에서의 고체소음 레벨의 차이를 시험을 통해 비교 분석하여, 함체의 경사 각도가 수중방사소음 발생 요소들 중에 유의미한 불확도 요소가 될 수 있음을 확인하였다.

2. 함정 탑재장비 특수성능 평가

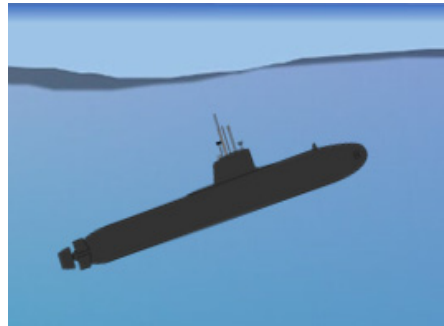
함정의 수중방사소음과 관련된 특수성능 평가 항목 중 고체소음(structure-borne noise) 및 공기소음(air-borne noise)의 전달 경로는 Fig. 2와 같다. 탑재 장비에서 발생하는 진동은 마운트 및 지지대를 통해 구조적으로 선체에 전달되며 이 구조전달소음을 고체소음이라 한다. 또한 공기를 매질로 하여 전파되는 음압에 의한 소음을 공기소음이라 부른다. 이 두 항목은 프로펠러 소음 및 유체소음과 더불어 수중방사소음을 일으키는 중요한 요소들이다.

고체소음 측정은 장비를 정상적으로 구동 후 장비 및 설비의 하부 탄성마운트 상단에서 평가한다. 측정 방향은 전후, 좌우, 상하 3축에 대하여 평가하며, 모든 측정 포인트의 고체소음 레벨이 승인 기준치를 초과하지 않을 경우 함정에 탑재될 수 있다.

측정 시 가속도계를 사용하여 측정하며 고체소음 진동 가속도 레벨 L_a 는 식 (1)에서 얻을 수 있다⁽⁴⁾.



(a) Horizontal condition



(b) Inclined condition

Fig. 1 Environment condition (test lab. vs underwater)

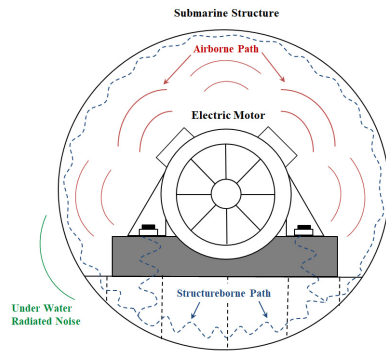


Fig. 2 Transfer paths of structure-borne & air-borne noise

$$L_a = 10\log_{10}\left(\frac{a^2}{a_{ref}^2}\right) = 20\log_{10}\left(\frac{a}{a_{ref}}\right) [dB] \quad (1)$$

$$a_{ref} = 10^{-5} [m/s^2]$$

3. 경사조건 고체소음 및 진동 평가




3.1 평가 방안

현재 함정 특수성능 분야에서 탑재장비에 대한 경사

Table 1 Inclination angle for the test

Trim	Test angle (°)
Diving angle	-30.0
	-27.5
	-25.0
	-22.5
	-15.0
	-7.5
Even	0.0
Surfacing angle	+7.5
	+15.0
	+22.5
	+25.0
	+27.5
	+30.0

Table 2 Test equipment

Equipment	Specification & type	
	Test RPM	1 200 r/min
	Diameter (L)	100 mm
	Diameter (H)	80 mm
	Power	25 W
	Max. inclination	±35°
	Table size	2 000 mm × 2 000 mm
	Pay load	1 500 kg
	Control parameter	Frequency, Time, Velocity
	Signal analyzer	LMS / SCM201
	Accelerometer	MMF / S943B100, Kistler / 8776A50
	Vibration calibrator	Kistler / 394C06

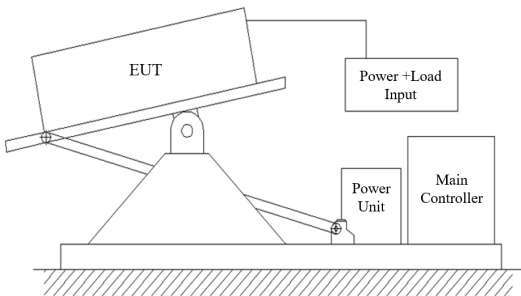


Fig. 3 Inclination test diagram

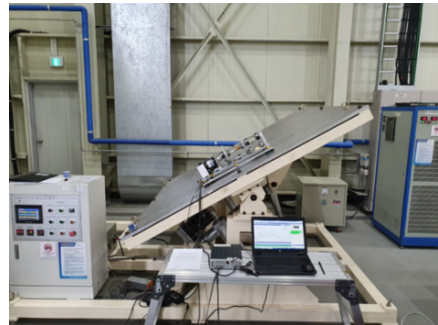
시험을 강제적으로 요구하고 있지 않으며, 해상 및 해저 상황에 따라 함정에 경사가 발생할 경우 탑재 장비의 베어링 진동, 공기소음 및 고체소음에 영향을 미칠 수 있는 상황을 배제하고 있다.

이 연구에서는 경사 각도에 따른 고체소음에 미치는 영향을 실험을 바탕으로 확인하기 위해 IEC 및 미국연방규정집(CFR)의 경사 시험 규격^(5,6)을 참고하여 Table 1과 같이 경사 조건을 수립하였으며, 이때 고체소음 레벨 및 베어링 진동을 측정하고 분석하였다.

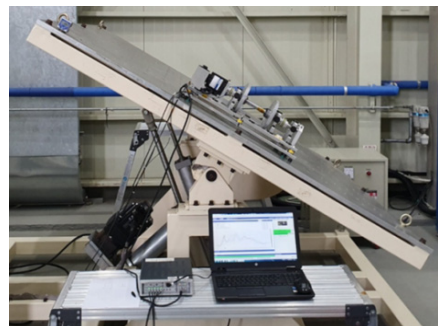
3.2 장비 구성

현재 산업 전반적인 분야에서 추진 시스템이 전기 시스템으로 급속도로 바뀌고 있으며, 함정 및 잠수함 추진체계도 과거의 기계식, 하이브리드 추진체계에서 전기추진체계를 적용하고 있는 추세이다. 전기추진체계는 연료 효율이 우수하며 소음 진동을 최소화할 수 있어 생존성 및 대잠능력을 향상시킬 수 있다.

이와 같은 이유로 시험 대상을 전동기로 선정하였으며, 축소 모델에 사용된 전동기는 잠수함에 사용되는 2.85 kW급 추진전동기와 비교했을 시 출력은 1:114이며, Diameter는 약 1:25의 모델이다. 전동기



(a) Test angle -30°



(b) Test angle +30°

Fig. 4 Inclination angle for the test

에 경사를 주기 위한 시험 장비의 구성 및 장비사양은 Table 2와 Fig. 3에서 보여준다.

3.3 경사 각도에 따른 진동 측정

진동 측정 시험은 고체소음 시험과 동시에 수행하며 전동기의 베어링 하우징에 가속도계를 부착하여 운전 중 발생하는 진동을 측정하고 주파수 분석을 통해 각도별 변화를 확인한다.

측정 방법은 MIL-STD-167-1A:2005 규격의 Type II 진동 측정 절차에 따르며(7), 장비를 정상 구동 후

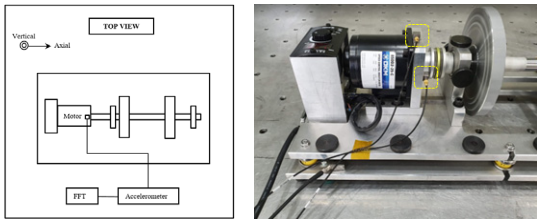
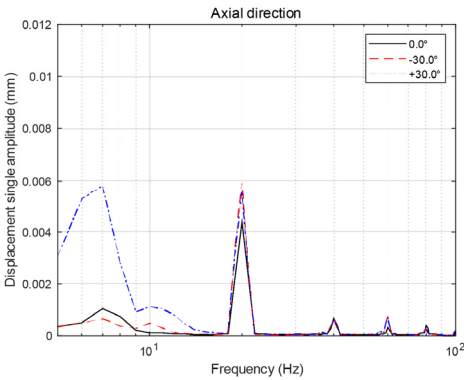
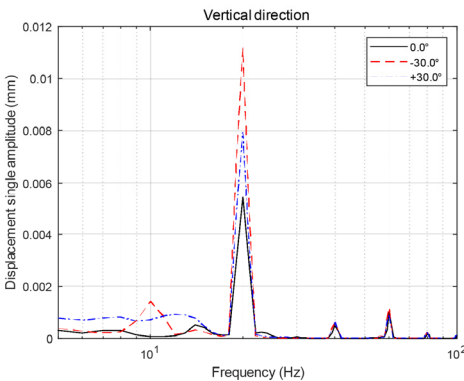


Fig. 5 Test setup for the vibration test



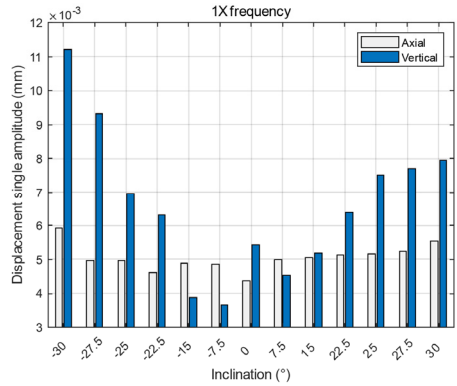
(a) Vibration levels of axial direction



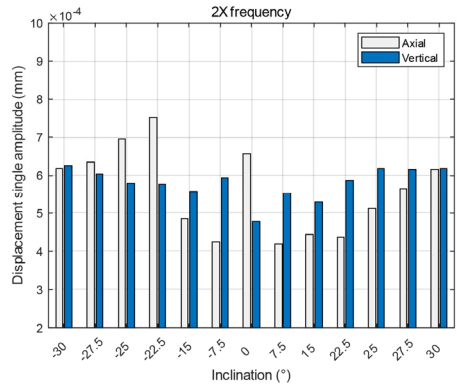
(b) Vibration levels of vertical direction

Fig. 6 Test results of the vibration by inclination

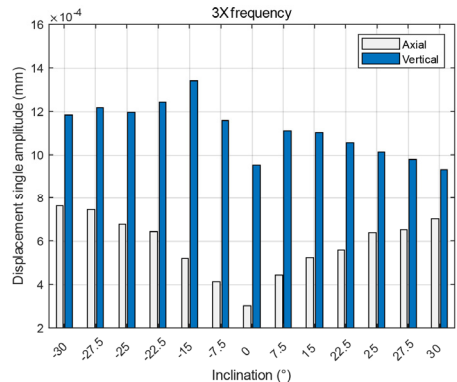
Fig. 4와 같이 최대 $\pm 30^\circ$ 의 정적 경사를 구현하여 측정하였다. 설치 시 잠수함의 잠항 및 부상 각도를 고려하여 전동기의 축방향으로 경사를 주었으며, 각도를 설정한 후 약 1분간의 안정화된 상태에서 30초간 linear 평균값으로 측정하였다. 측정 방향은 Fig. 5와 같이 전동기의 베어링 하우징 부에 축방향과 수직하



(a) 1X frequency, 20 Hz



(b) 2X frequency, 40 Hz



(c) 3X frequency, 60 Hz

Fig. 7 Test results of the vibration by harmonic frequency

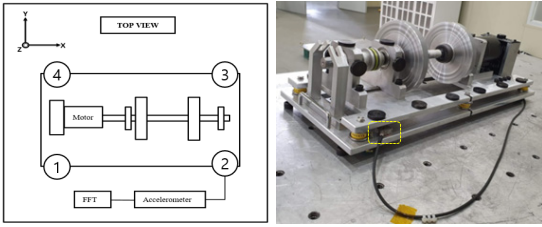


Fig. 8 Test setup for the structure-borne noise level

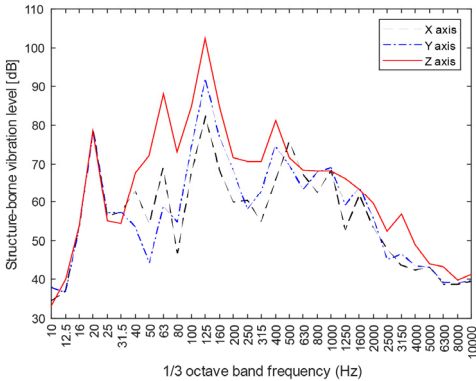


Fig. 9 Test results of structure-borne noise by frequency (0.0°, Point 1)

는 방향으로 단축 가속도계 2개를 부착하였다. 측정 주파수 범위는 회전주파수 1X 성분인 20 Hz를 포함한 2 Hz ~ 1 kHz이며, 경사각에 따른 주파수 성분 변화와 변위 레벨의 변화를 관찰하였다.

3.4 경사 각도에 따른 진동 시험 결과

진동 스펙트럼 분석 결과, 전동기의 정상운전 회전수 1200 r/min의 1차 회전주파수 성분인 20 Hz에서 가장 큰 변위값을 가지며 그 뒤에 배수성분이 고조파(harmonic) 형태로 나타났다. Fig. 6의 (a)는 축방향(axial)에서 수평 조건과 ±30° 경사를 주었을 경우의 진동 레벨을 비교한 그래프이다.

0° 기준으로 경사가 주어졌을 때 회전 주파수 1X 성분의 경우 최대 변위가 약 1.5 배 상승함을 보이고 있으며, 4 Hz의 저주파수 진동이 나타났지만 수직방향(vertical) 진동과 비교했을 시 전체적인 진동에 큰 영향을 주는 수준은 아니었다. Fig. 6의 (b)는 수직방향의 그래프로써, ±30° 경사가 주어졌을 시 수평일 때보다 2배의 진동 증폭이 발생하였다.

측정 결과 가장 높은 변위값을 가지는 1X 주파수

(20 Hz)를 비롯하여 배수 성분인 2X 주파수, 3X 주파수에서의 경사 각도별 진동 진폭은 Fig. 7의 그래프에서 확인할 수 있다. 경사 각도가 증가할수록 1X 주파수에서 수직방향 진동이 두드러지게 상승함을 확인하였다. 2X 주파수에서는 상대적으로 낮은 변위값을 보이며 각도별 선형적 변화는 관찰되지 않았다. 3X 주파수는 축방향 진동이 수직 방향 진동보다 크지 않지만 경사에 따라 선형적으로 증가함을 보여준다.

3.5 경사 각도에 따른 고체소음 측정

고체소음 측정 시 경사각도 및 측정 시간 등 환경 조건을 동일하게 맞추기 위해 진동 측정 시험과 동시에 진행하였다. MIL-STD-740-2(SH):1986 규격에서 제시하는 방법에 따라 측정 시스템의 현장 교정을 수행하였으며, Fig. 8과 같이 시료를 기준으로 좌우(X), 전후(Y), 상하(Z) 방향으로 측정하였다. 측정 위치는 하부 마운트 4개와 연결되는 지지부 상단(point 1~4)에 3축 가속도계를 부착하였다. 주파수 밴드는 1/3 octave band로 10 Hz ~ 10 kHz 대역이며, 배경 소음의 영향을 최소화하기 위하여 주요 회전 주파수의 고체소음 수준보다 10 dB 이하인 배경 소음 환경에서 시험을 진행하였다. 최대 ±30°의 정적 경사를 주었을 때 고체소음 레벨의 변화를 관찰하였으며, 3축 방향에 따른 고체소음 특성과 주파수 이동이 발생하는지를 확인하였다.

3.6 경사 각도에 따른 고체소음 시험 결과

일반적인 시험 방법인 수평 조건에서의 고체소음 레벨 측정 결과는 Fig. 9와 같다. 정상운전 상태인 1200 r/min의 회전 주파수 성분 20 Hz 및 배수 주파수 성분을 포함한 63 Hz, 125 Hz 밴드 대역에서 두드러진 응답 특성을 보이며, 3축 방향 중 상하방향(Z-axis)으로 가장 큰 고체소음을 발생시키고 있다. 이는 베어링 진동 측정 시 확인한 수직방향 진동이 하부 구조물을 통해 전달되어 고체소음에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

최대 ±30.0°의 경사를 주었을 경우 가장 큰 진동 변위값 및 변화율을 보인 Point 1의 주요 Harmonic 주파수 성분의 각도별 변화를 확인하여 Fig. 10에 나타내었다. 1X 주파수 수직방향에서 -30° 각도일 경우 8.2 dB 상승으로 가장 큰 변화를 보였으며, 125 Hz 주파수 대역의 경우 2.5 dB 증가함을 볼 수 있다. 경사에 따른 특정 주파수의 이동은 나타나지 않았으며, 진폭의 크기에 따라 고체소음 레벨의 증가만 나타났다.

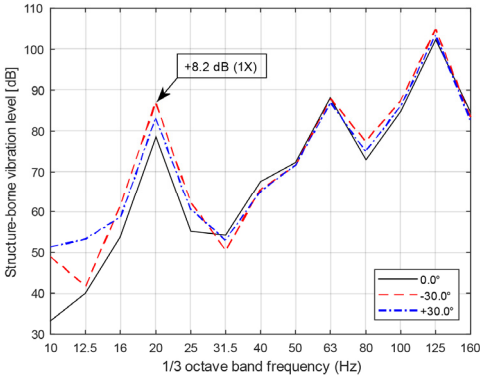


Fig. 10 Changes of structure-borne noise levels by inclination (Z-axis)

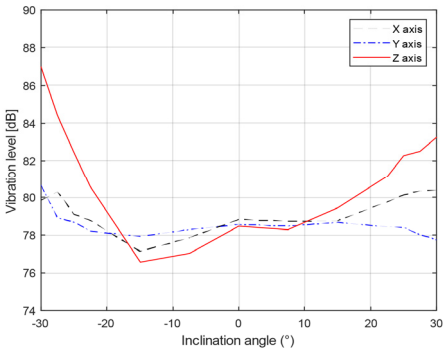


Fig. 11 Changes of the structure-borne noise by inclination (X, Y, Z-axis)

Fig. 11에서는 경사에 따른 X, Y, Z 각 축의 고체소음 레벨 변화량을 비교하였다. X축의 고체소음 변화량은 수평 대비 경사각에 따라 최대 +1.5 dB, Y축은 최대 +2.0 dB 변화하며, Z축의 +8.2 dB의 변화량과 비교했을 때 상대적으로 낮은 변화량을 보여준다. 또한 기울임에 따라 수직이었던 하중의 방향이 변화할 시, 각 축의 고체소음 레벨은 상호 상쇄되거나 줄어들지 않았으며 탄성마운트를 통한 에너지 전달량은 전체적으로 증가하였음을 확인할 수 있다.

4개의 point에서 수직방향, 1X 주파수 성분의 고체소음 레벨 변화는 Fig. 12 및 Table 3에서 볼 수 있다. 각도가 증가함에 따라 고체소음 레벨도 증가함을 보여주고 있으며 구조 및 하중 분포에 따라 고체소음 상승 정도의 차이가 발생하였다. 각 지점의 측정 결과 값을 보면 15° 경사를 넘어갈 경우 상대적으로 가파르게 증가하는 경향을 보인다.

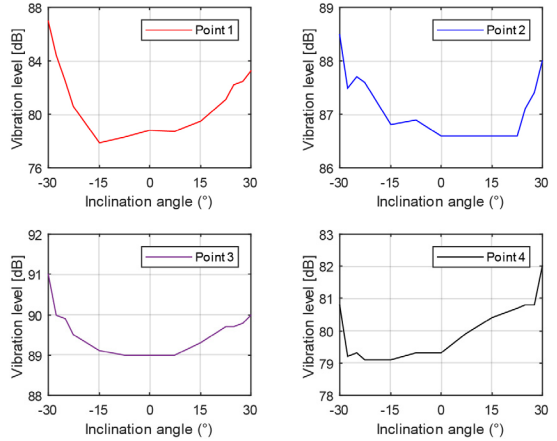


Fig. 12 Changes of the structure-borne noise by inclination (1X frequency)

Table 3 Structure-borne noise levels by inclination (1X frequency, Z-axis)

Inclination (°)	Structure-borne noise levels (dB)			
	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
-30.0	87.0	88.5	91.0	80.8
-27.5	84.4	87.5	90.0	79.2
-25.0	82.5	87.7	89.9	79.3
-22.5	80.6	87.6	89.5	79.1
-15.0	77.9	86.8	89.1	79.1
-7.5	78.3	86.9	89.0	79.3
0.0	78.8	86.6	89.0	79.3
+7.5	78.7	86.6	89.0	79.9
+15.0	79.5	86.6	89.3	80.4
+22.5	81.1	86.6	89.7	80.7
+25.0	82.2	87.1	89.7	80.8
+27.5	82.5	87.4	89.8	80.8
+30.0	83.2	88.0	90.0	82.0

4. 결 론

이 연구에서는 고체소음 평가 방법과 경사 상태에서 시의 성능평가 시험 조건을 결합하여 복합적인 평가 방법을 제시하였다. 전기 추진시스템으로 전환되는 추세를 고려하여 전동기를 시험 대상으로 선정하였으며 함정에서 발생할 수 있는 경사각도 ±30°를 구현시켜 고체소음에 미치는 영향을 연구하였다.

수평 및 경사 조건에서 측정된 고체소음의 경우 수직 방향에서 가장 큰 값을 나타내었으며, 각도별 가장 큰 변화율을 가진 주파수는 회전주파수 1X 성분으로 나타났다. 고체소음 레벨은 경사각이 커짐에 따라

수평조건 대비 회전주파수 1X 성분에서 최대 8.2 dB 증가하는 결과를 보였다.

고체소음 측정과 동시에 전동기 베어링 하우징에서 진동을 측정하여 상호 연관성을 분석하였으며, 경사각에 따른 고체소음 증가 원인은 전동기 베어링에서 발생하는 경사 하중에 의한 회전주파수 진동이 베어링 하우징 블록을 통해 하부 지지대까지 전달되는 것으로 확인하였다.

전동기의 베어링에 경사가 발생하는 경우 베어링 내부의 마찰과 발열이 증가하여 구름 접촉 피로 및 진동을 발생시킬 수 있다. 이를 방지하기 위해 장비 설계 시 수평 조건에서 사용하는 일반적인 베어링을 선정하는 것보다 경사에 따른 축이나 하우징의 힘이 있을 시 축심을 자동적으로 보정하는 기능을 갖는 자동 조심 롤러베어링 등의 사용을 고려할 수 있다. 또한 미끄럼 저널 베어링을 사용하는 저속 대형 추진 전동기의 경우 설계 시 유막의 두께, 압력 등을 고려하여 경사각에 따른 경계 마찰 진동을 최소화 시킬 수 있어야 한다.

이와 같이 함정 설계 단계에서부터 적합한 베어링 선정 및 경사에 의한 변수를 반영해야 하며, 고체소음의 허용 기준치 설정 시 경사 오차를 감안한 기준 레벨을 수립하는 것이 필요하다. 특히 잠수함과 같은 수중방사소음에 민감한 함정의 경우 잠항, 부상 및 수직발사에 따른 경사각 변화 시 고체소음이 증가할 수 있음을 인지하고 함정 운용 시 이러한 특성을 고려해야 할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2021년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행한 연구임(미주시장 사업확장을 위한 USCG 형식승인 기준 CO₂ 소화설비 SYSTEM 기술 개발).

References

(1) Han, H. S. and Lee, K. H., 2013, Estimation of the Underwater Radiated Noise of a Naval Vessel Using Hull Vibration, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, No. 5, pp. 394-400.
 (2) Yi, J. J., Kang, M. H., Han, S. J., Bae, S. R., Kim, J. H. and Jung, W. J., 2014, A Numerical

Analysis Study on the Estimation of the 3D Underwater Radiated Noise Pattern using the Hull Vibration Signals, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 24, No. 10, pp. 770~779.

(3) Kim, J. S., Kim, H. S. and Kim, S. Y., 2001, Transfer Function of Structure-Borne Noise to Underwater Radiated Noise, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 138~142.

(4) US Department of Defense, 1986, Structure-Borne Vibratory Acceleration Measurements and Acceptance Criteria of Shipboard Equipment, MIL-STD-740-2(SH), p. 3.

(5) IEC 60092-504 edition 4.0, 2016, Electrical Installations in Ship - Part 504 : Automation, Control and Instrumentation.

(6) United States Government, 2012, Testing Requirements for Ballast Water Management System(BWMS) Components - Fluctuation in Power Supply Test, 46 CFR 162.060-30.

(7) US Department of Defense, 2005, Mechanical Vibrations of Shipboard Equipment (TYPE-I Environmental and TYPE-II Internally Excited), MIL-STD-167-1A, pp. 11~15.



Hoyeon Jeong received a B.S. in Department of Marine Engineering from Mokpo National Maritime University in 2009, He then received M.S. degree in Weapon System Engineering from Pukyong National University in 2020. He is currently a Ph.D. candidate in the National Korea Maritime & Ocean University and a Senior Researcher in the field of sound, vibration and shock at Korea Marine Equipment Research Institute(KOMERI).



Heemo Goo received a B.S. and M.S. in department of Mechanical Engineering from National Korea Maritime & Ocean University in 2007 and 2013. He is currently a Ph.D. candidate in the National Korea Maritime & Ocean University and a Principal Researcher in the field of sound, vibration and shock at Korea Marine Equipment Research Institute(KOMERI).