

해군 함정의 운용시간을 고려한 마스트 구조물 진동 허용 기준 검토

김혜진^{*.1)} · 한형석²⁾ · 전수홍¹⁾

¹⁾ 국방기술품질원 신뢰성시험분석팀

²⁾ 국방기술품질원 함정개발품질팀

A Study on the Mast Structure Vibration Limits considering the Operating Time of Naval Ships

Hyejin Kim^{*.1)} · Hyungsuk Han²⁾ · Soohong Jeon¹⁾

¹⁾ Defense Agency for Technology and Quality, Reliability Test Analysis Team, Korea

²⁾ Defense Agency for Technology and Quality, Naval Systems Team, Korea

(Received 4 June 2024 / Revised 30 July 2024 / Accepted 6 August 2024)

Abstract

The mast structure of a naval ship has a lot of expensive equipment attached and is easily exposed to strong vibration due to its structural characteristics, so it is necessary to manage vibrations well to prevent equipment failure and increase operating time. Since September 2015, the Navy has been managing the vibration of the ship's mast structure with a separate tolerance standard from the local vibration, but this standard is set at 1/2 of the vibration limits for mast-mounted equipment without any engineering basis. So the establishment of new vibration limits based on the operating conditions of naval ships is required. In this study, the mast structure vibration limits were reviewed considering the actual operating time of naval ships, and the results were compared with the standards of major overseas classification societies and the actual measurements of a ship that had mast structure vibration problems.

Key Words : Vibration Limits(진동허용값), Mast Structure(마스트 구조물), Operating Time(운용시간)

1. 서론

해군 함정의 마스트 구조물은 고가의 장비들이 많

이 부착되어 있고 구조적인 특수성으로 인해 강한 진동에 쉽게 노출되므로 장비 고장을 예방하고 가동시간을 늘리기 위해 진동값을 잘 관리할 필요가 있다. 이에 따라 해군은 '15. 9월부터 함정의 마스트 구조물에 대한 진동을 선체 국부진동과는 다른 별도의 허용기준으로 관리하고 있다. 하지만 이 기준값은 마스트

* Corresponding author, E-mail: kimhj7670@dtaq.re.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

탑재장비에 대한 환경시험 진동 기준의 1/2 값을 일률적으로 적용한 값으로 허용 기준을 강화한 이후에도 장비고장 등의 마스트 진동으로 인한 문제가 지속적으로 발생하고 있어, 해외 주요 선급의 기준, 실제 해군 함정의 운용시간 등을 전반적으로 고려하여 공학적 기반의 진동 허용 기준을 수립할 필요가 있다.

해군 함정의 마스트와 관련하여 Lee 등은 축소 모델을 활용한 통합마스트의 구조건정성 검증 방안을 연구하였고^[1], Shin 등은 함정용 통합 마스트의 레이더 단면적을 분석하였는데^[2], 기존의 논문들은 주로 함정 마스트 구조물의 개발 및 설계 측면에서 연구가 수행되었다.

본 논문에서는 마스트 구조물의 내구성 향상을 위한 마스트의 진동 시험 평가 기준을 검토하였으며, 2장에서는 현재 해군에서 사용하고 있는 마스트 구조물에 대한 진동 허용 기준과 해외 주요 선급의 마스트 구조물 진동 허용 기준을 소개하고 기준값을 비교해보았다. 3장에서는 2가지 경우의 함정 운용시간(a. 연간 1만 5천시간 운용, b. 연간 4만 시간 운용)에 대하여 주파수별 진동 허용 기준을 산출하고, 이 기준값을 마스트 진동 문제가 발생한 실제 함정의 측정값에 적용하여 결과를 확인하였으며, 새로운 기준값을 적용하였을 때 마스트에서 기준값을 초과하는 과도한 진동이 발생하고 있음을 확인하였다.

2. 현행 마스트 구조물 진동 허용 기준

2.1 한국 해군의 진동 허용 기준

해군에서는 함정의 마스트 구조물에 대해 별도의 진동 허용 기준 없이 마스트 탑재장비의 환경시험 진동 기준을 동일하게 적용해왔다. 해군에서 사용하고 있는 마스트 탑재장비의 환경시험 진동 기준은 MIL-STD-167-1A의 마스트 탑재장비에 대한 환경시험 진동 변위(Displacement)^[3]를 mm단위로 변환한 값으로 Table 1과 같다^[4].

하지만 마스트 구조물은 강한 진동에 노출되기 쉬우므로 보다 강화된 기준을 적용할 필요가 있다는 의견이 지속적으로 제기되어 「함정 설계/건조 기준」 3차 개정(조함(수)-기-0-002(3)) 시 Table 2와 같이 마스트 구조물(받침대)에 대한 진동 허용 기준을 별도로 설정하여 적용하기 시작하였다^[5]. 이러한 마스트 구조물에 대한 새로운 기준은 Table 1에 나와있는 마스트 탑재

장비에 대한 환경시험 진동 기준의 1/2 값을 일률적으로 적용한 수치이다.

Table 1. Vibratory displacement of environmental vibration for mast mounted equipment

Frequency Range (Hz)	Table Single Amplitude (mm)
4 to 10	2.540 ± 0.2540
11 to 15	0.762 ± 0.1524
16 to 25	0.508 ± 0.1016
26 to 33	0.254 ± 0.0508

Table 2. Vibration limits for mast foundations

Frequency Range (Hz)	Vibration Limits (mm)
4 ~ 10	1.270 ± 0.1270
11 ~ 15	0.381 ± 0.0762
16 ~ 25	0.254 ± 0.0508
26 ~ 33	0.127 ± 0.0254

Table 1의 Table Single Amplitude 값은 시험실에서 가속수명시험을 할 때 사용되는 수치로, 4 ~ 33 Hz의 주파수 범위에서 공진주파수를 찾아내고 해당 공진주파수에서 2시간 동안 탑재장비에 대한 진동 가진시험을 할 때 사용되는 진동변위이다^[3]. 이와 달리 마스트 구조물에 대한 진동 측정은 실제 함정의 마스트 받침대 상단에서 일정 시간동안 4 ~ 33 Hz 전체 주파수에 대한 진동을 측정하여 각 주파수 영역별 진동변위 값이 Table 2의 허용 기준(Vibration Limits) 이내에 들어오는지 확인하고 있어^[5], 시험 방법 및 절차가 다른 환경시험 진동변위의 1/2값을 마스트 받침대의 진동 허용 기준으로 사용하고 있음을 알 수 있다.

MIL-STD 810H 514.8 Vibration에서는 함정에 탑재된 상태에서 진동의 영향을 받는 장비의 가동시간과 시험실에서 실제 진동 대비 진동레벨을 증가시켜 시험을 수행하는 가속시험의 가속팩터를 식 (1)과 같이 정의하고 있다.

$$\frac{t_2}{t_1} = \left[\frac{W(f)_1}{W(f)_2} \right]^{\frac{m}{2}} \tag{1}$$

식 (1)에서 t_1 과 t_2 는 시험시간과 실제 가동시간, $W(f)_1$ 과 $W(f)_2$ 는 시험환경과 실제 운용환경에서의 가속도 스펙트럼 밀도(Acceleration Spectral Density, g^2/Hz)이다. m 은 S-N 곡선 상의 기울기 값을 나타낸다[6].

식 (1)에 환경시험 기준인 Table 1과 실제 운용환경에서의 허용 기준인 Table 2의 값을 적용하였을 때 마스트 받침대의 진동 허용 기준은 마스트 탑재장비 환경시험 기준의 1/2이고, 정현파 진동 환경에서 m 은 일반적으로 6을 사용[6]하므로 시험시간의 비(t_2/t_1)는 2⁶인 64배가 된다. 또한, 시험환경에서의 시험시간(t_1)은 2시간이므로 실제 가동시간(t_2) 약 128시간을 보증하는 형태가 된다. 이는 약 20년간 운용하는 함정의 수명을 고려하였을 때 연간 6시간을 운용할 수 있는 수치로 함정의 실제 운용시간 대비 매우 낮은 수치이다. 따라서 함정의 실제 운용시간을 보증할 수 있도록 진동 허용 기준을 산정할 필요가 있다.

2.2 해외 주요 선급의 진동 허용 기준

한국 해군에서 사용하고 있는 마스트 구조물의 진동 허용 기준을 해외 주요 선급의 기준과 비교해보기 위하여 세계 최대 선급협회인 DNV사와 미국 선급협회인 ABS사에서 제시하고 있는 마스트 구조물에 대한 진동 허용 기준을 조사하였다.

DNV사에서 제시하는 기준에는 마스트 구조물에 대한 별도의 구조진동 한계값을 관리하고 있지는 않지만 Section 2. Vibration Criteria에서 Table 3과 같이 마스트 탑재장비에 대한 진동한계치를 명시하고 있다. 마스트 탑재장비에 대한 진동은 실제 장비가 탑재된 받침대에서 계측한다고 제시되어 있다[7].

Table 3. Vibration limits for mast-mounted equipments of DNV

Frequency (Hz)	Velocity (mm/s)
4 ~ 200	20
To be measured on the foundation of the actual equipment	

ABS사에서 제시하는 기준에서는 국부구조물 진동 한계값을 Fig. 1과 같이 5 Hz 이하의 진동변위로 관리하고 5 Hz 이상은 진동속도로 관리하고 있다. 1 ~ 5

Hz까지는 각 방향(종진동, 횡진동, 수직진동)에 대해 진동변위를 1.0 mm 이하로 관리할 것을 추천하고 있고 2.0 mm 이상의 경우 피로파괴의 가능성을 제시한다. 5 Hz 이상에서는 30 mm/s 이하의 진동속도로 관리할 것을 추천하고 있고 60 mm/s 이상의 경우 피로파괴의 가능성을 제시하고 있다[8].

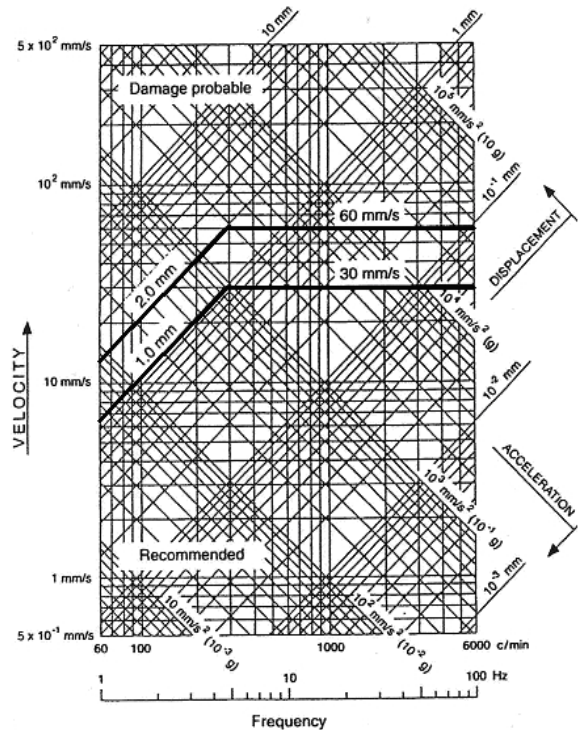


Fig. 1. Vibration limits for local structure of ABS[8]

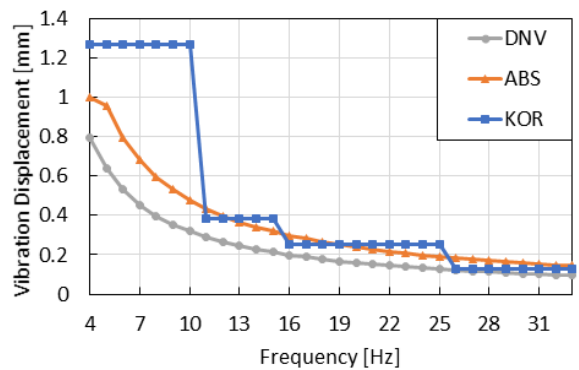


Fig. 2. Comparison with vibration limits of ABS and DNV

한국 해군의 마스트 구조물 진동 허용 기준인 Table 2의 값을 DNV, ABS사의 기준인 Table 3 및 Fig. 1의 수치와 비교한 결과는 Fig. 2와 같다. 진동속도 값은 식 (2)에 따라 진동변위로 변환하여 비교하였으며, 낮은 주파수대역(4 ~ 10 Hz)에서의 진동 허용 기준이 해외 주요 선급의 기준값 대비 한국 해군에서 특히 완화된 수치를 적용하고 있음을 알 수 있다.

$$d = v / (2\pi f) \tag{2}$$

식 (2)에서 d 는 진동변위(mm), v 는 진동속도(mm/s), f 는 주파수(Hz)이며, 진동속도를 적분하여 진동변위를 구하였다.

3. 함정 운용시간을 고려한 허용 기준 검토

3.1 함정 운용시간을 고려한 진동 허용 기준 산정

함정의 실제 운용시간을 고려한 마스트 구조물의 진동 허용 기준을 검토하기 위해 식 (1)에 함정의 운용시간을 적용하여 결과값을 산출하였다. 함정의 운용시간은 각 함정마다 다르므로 아래의 2가지 경우를 기준으로 비교하였다.

- a. 매월 7일간 주간(9시간)에만 운용하였을 경우(연간 약 750시간)
- b. 매월 7일간 24시간을 운용하였을 경우(연간 약 2천 시간)

함정의 수명을 20년이라고 했을 때 a의 경우는 약 1만5천시간, b의 경우는 약 4만 시간을 운용하게 된다. 이 값을 식 (1)에 적용하였을 때 주파수 영역별 진동변위는 Table 4와 같다. 해군에서 사용중인 기준값과의 비교 결과를 그래프로 나타내면 Fig. 3과 같으며, 해군의 기준값이 함정의 실제 운용시간을 고려한 수치 대비 상당히 높게 설정되어 있음을 알 수 있다.

진동변위로 변환한 해외 주요 선급의 진동 허용 기준과 해군 함정의 운용시간을 고려한 Table 4의 결과값을 비교하면 Fig. 4와 같다. 일부 주파수(9 ~ 10 Hz)를 제외하고는 전반적으로 해외 선급의 기준값 이내에 들어오고 있음을 알 수 있다.

Table 4. Vibration limits for mast foundation considering the operating time of naval ships

Frequency (Hz)	Displacement (mm)		
	Vibratin Limits	750 hours per year	2,000 hours per year
4 ~ 10	1.270 ± 0.1270	0.577	0.487
11 ~ 15	0.381 ± 0.0762	0.172	0.146
16 ~ 25	0.254 ± 0.0508	0.115	0.097
26 ~ 33	0.127 ± 0.0254	0.057	0.049

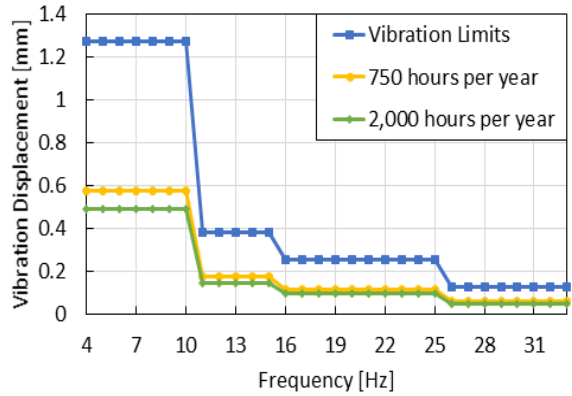


Fig. 3. Comparison with vibration limits considering the operating time of naval ships

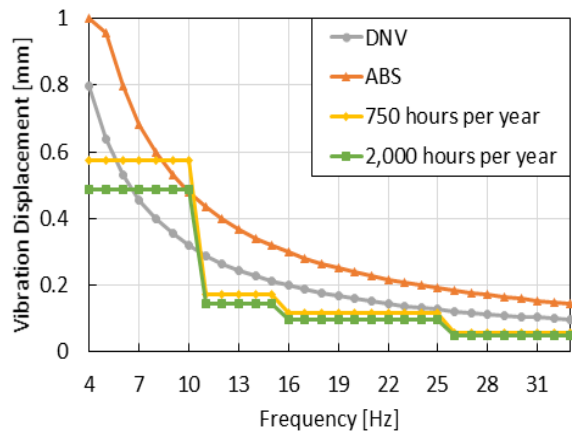


Fig. 4. Comparison the vibration limits of ABS and DNV with table 4

3.2 실험정의 측정값과 비교 결과

2003년에 취역한 해군함정 OO함의 경우 고속기동 시 마스트를 비롯한 상부 구조물에서 발생하는 과도한 진동으로 인해 장비고장 등의 문제가 지속적으로 발생하여, 2022년 7월에 마스트 구조물에 대한 진동을 측정한다. 3축 가속도 센서를 Fig. 5와 같이 마스트 상부구조(중양)에 설치하여 진동값을 측정하였으며, x축 방향(함수-함미), y축 방향(좌현-우현), z축 방향(수직)에서 마스트 진동을 각각 측정된 결과는 Fig. 6~8과 같다. 진동 가속도 측정은 PCB Piezotronics사의 3축 가속도 센서(356A02)와 B&K사의 데이터 수집장치(TYPE 3053-B-12/0)를 사용하였다.

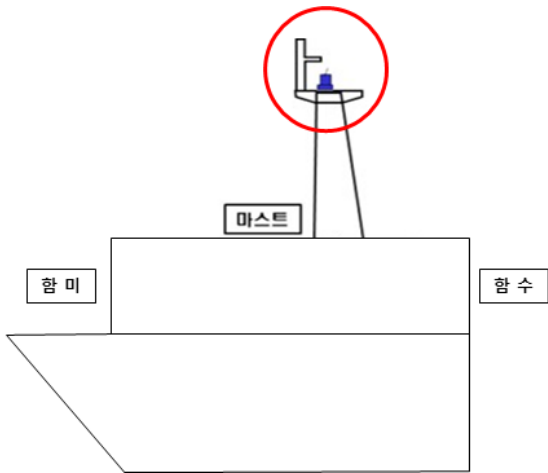


Fig. 5. Installation location of acceleration sensor

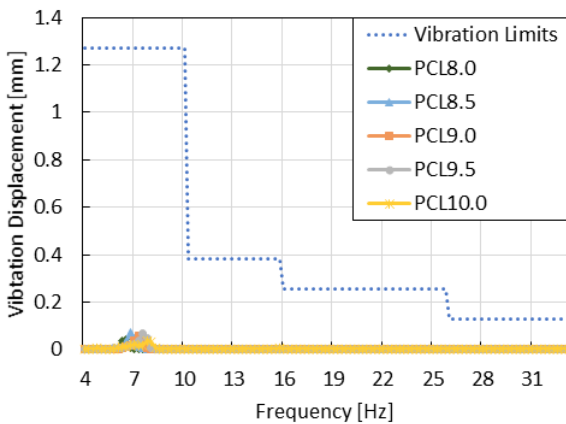


Fig. 6. Vibration displacement of the mast structure in the x-axis direction(bow-stern)

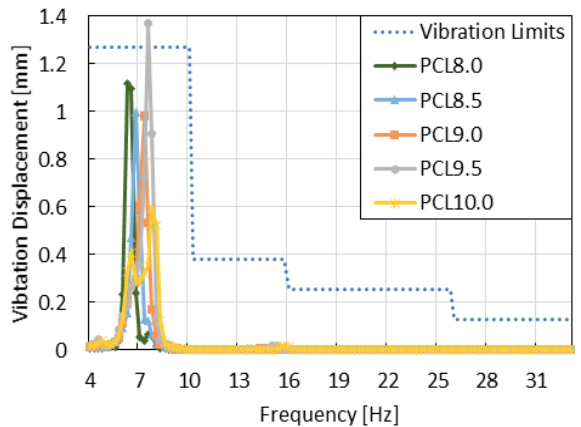


Fig. 7. Vibration displacement of the mast structure in the y-axis direction(port-starboard)

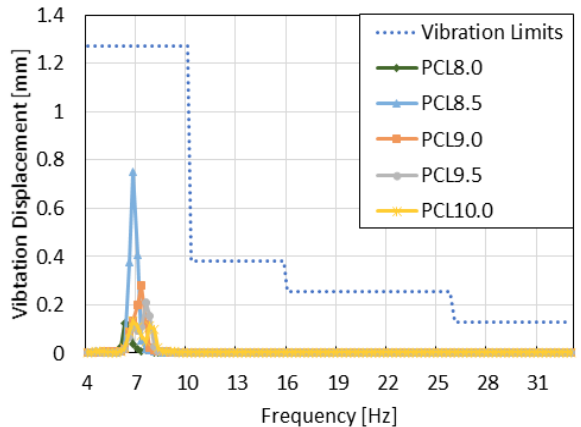


Fig. 8. Vibration displacement of the mast structure in the z-axis direction(vertical)

「함정 설계/건조 기준」 3차 개정(조함(수)-기-0-002(3)) 진동 허용 기준을 적용하였을 때 진동변위는 y축 방향의 7.5 Hz 측정값 이외에는 모두 허용기준 이내에 들어오고 있었고, y축 방향의 7.5 Hz에서도 초과하는 진동변위는 약 0.1 mm에 불과했다. 함정의 과도한 진동은 통상 낮은 주파수대역(4 ~ 10 Hz)에서 발생하는데 현재 사용하고 있는 진동 허용 기준이 특히 낮은 주파수대역에서 완화된 수치를 적용하고 있어 측정결과와 진동 허용 기준의 비교를 통해서도 실제 장비고장을 유발하는 수준의 진동이 발생하고 있음을 확인할 수 없었다.

반면에 Fig. 9~11과 같이 OO함의 마스트 진동 측정

값에 함정의 운용시간을 고려하여 산출한 Table 4의 값을 적용한 결과, y축 방향과 z축 방향에서 진동변위가 모두 기준값을 벗어나고 있다. 특히 y축 방향에서는 PCL 8.0 이상의 고속 주행 시 모든 속력에서 낮은 주파수 대역(4 ~ 10 Hz)의 진동변위가 기준값을 초과하고 있었고, 가장 크게 측정된 진동변위는 PCL 9.5의 7.5 Hz 측정값으로 연간 750시간 기준값(0.577 mm)의 2배 이상인 약 1.37 mm의 진동변위가 발생하고 있음을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과를 보았을 때, 함정의 마스트 구조물 진동에 대해 Table 4의 산출값을 적용하는 경우에는 장비의 손상을 유발시키는 수준의 진동에 대한 판별이 가능할 것으로 판단된다.

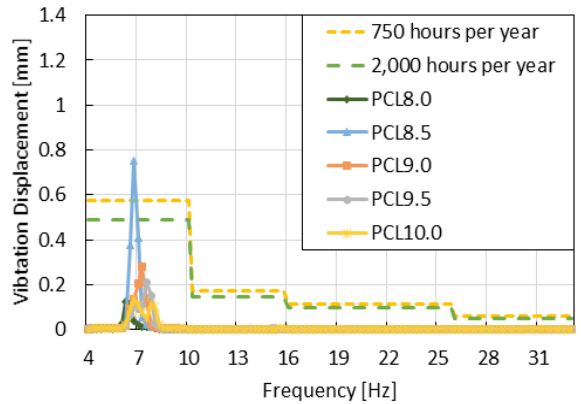


Fig. 11. Vibration displacement with table 4. in the z-axis direction(vertical)

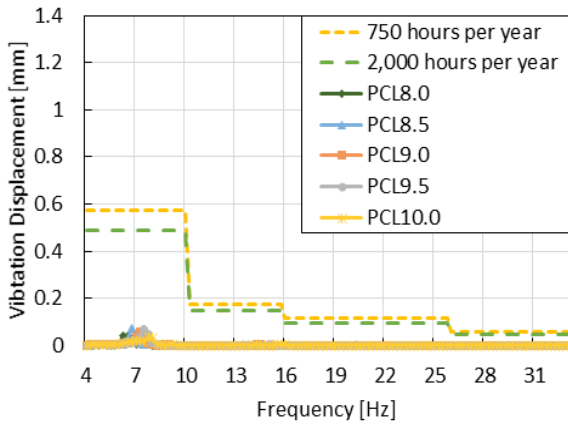


Fig. 9. Vibration displacement with table 4. in the x-axis direction(bow-stern)

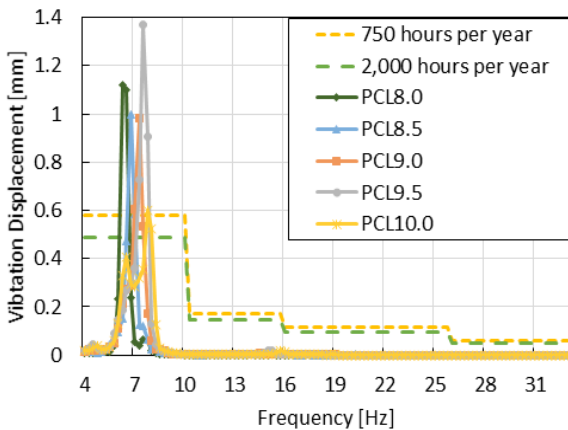


Fig. 10. Vibration displacement with table 4. in the y-axis direction(port-starboard)

4. 결론

해군에서는 '15. 9월부터 함정의 마스트 구조물에 대해 별도의 진동 허용 기준을 설정하여 관리하고 있지만 마스트 탑재장비에 대한 환경시험 진동 기준의 1/2 값을 일률적으로 적용하여 사용하고 있어, 해군 함정의 실제 운용시간 및 공학적 근거를 기반으로 한 기준값의 재설정이 요구되고 있다.

이에 따라 함정에 탑재된 상태에서 진동의 영향을 받는 장비의 가동시간과 시험실에서 실제 진동 대비 진동레벨을 증가시켜 시험을 수행하는 가속시험의 가속팩터인 식 (1)을 이용하여 새로운 기준값을 제시하였고, 마스트를 비롯한 상부 구조물에서 발생하는 과도한 진동으로 인해 장비고장 등의 문제가 지속적으로 발생한 함정에서 실제 측정된 마스트 진동값에 적용하여 타당성을 확인하였다.

하지만 식 (1)을 이용한 기준값은 정현파 진동 환경을 기준으로 산출된 값이며 일반적인 환경에서의 진동은 랜덤의 형태로 나타나고 있다. 따라서 향후 본 논문에서 산출된 기준값과 해외 주요 선급에서 사용하고 있는 진동 허용 기준, 함정의 실제 운용조건 등을 전반적으로 고려하고 검토하여 현재의 기준보다는 강화된 새로운 기준을 수립할 필요가 있다고 판단된다.

References

- [1] Jonghak Lee, Donghoon Son, Keonmin Lee, Dongjoon Kim, Sangwon Park and Nocheol Park, “A Method of Evaluating Structural Integrity of Integrated Mast with Scaled Model,” Trans. Korean Society Noise and Vibration Engineering, Vol. 30, No. 2, pp. 179-188, 2020.
- [2] Hokeun Shin, Seokgon Lee, Dongmin Park, Jinwoo Shin, Myungsoo Chung, Sanghyun Park and Yongbae Park, “Analysis of Radar Cross Section of the Integrated Mast Module for Battleship,” The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science 2017 Jul. pp. 584-587, 2017.
- [3] MIL-STD-167-1A(2 November 2005), p. 7, 2005.
- [4] Korean Navy, 2nd Revision of 「Naval Ship Design/Construction Standards」, p. 5, 2009.
- [5] Korean Navy, 3rd Revision of 「Naval Ship Design/Construction Standards」, p. 6, 2015.
- [6] MIL-STD-810H(w/Change 1), pp. 514.8A-3~5, 2022.
- [7] Det Norske Veritas, Rules for Classification of Ships (Part 6 Chapter 15), p. 9, 2011.
- [8] American Bureau of Shipping, Guidance Notes of Ship Vibration, pp. 70~71, 2021.
- [9] Defense Agency for Technology and Quality, “2022 Research Report on Supporting Technology for Noise and Vibration Inspection of Operational Naval Ships,” pp. 162~165, 2022.