

함정 디젤엔진 진동규격 연구

Research of Vibration Criteria of Diesel Engines in Naval Craft

이경현†한형석* 박미유* 조흥기**

Kyoung-Hyun Lee, Hyung-Suk Han, Mi-You Park and Heung-Gi Cho

Key Words : Naval Craft(해군함정), Vibration Criteria(진동 규격), Diesel Engine(디젤엔진)

ABSTRACT

Vibration of diesel engines in naval vessels causes structure vibration which is significant under water radiating noise source under CIS (Cavitation Inception Speed). So managing the vibration level of diesel engine is important for survivability and also durability of naval vessels. Therefore, in this research, a vibration criterion which is applied for Korean naval vessels are reviewed. It is compared with the DNV, ABS and merchant ship's diesel engine criteria. And also vibration data of three Korean naval vessels are analyzed. As a result, reasonable criteria of diesel engine vibration and shipbuilding standards are suggested.

1. 서 론

해군함정의 디젤엔진 진동은 함정의 성능측면에서 매우 중요한 사항으로 명확하게 관리되어야 한다. 추진기관과 같은 장비의 진동은 선체진동을 야기시키며 CIS(Cavitation Inception Speed) 이전에 함정의 주요 수중방사 소음원이기 때문에 함정의 생존성과도 밀접한 관련이 있다. 또한 디젤엔진의 과도한 진동은 승조원의 근무 환경을 악화시킬 뿐만 아니라 장비 고장의 주요요인 중 하나로 함정의 내구성과도 밀접한 관련이 있다.

위와 같이 디젤엔진의 진동이 함정의 성능에 매우 중요한 요인임에도 불구하고 현재 건조되고 있는 함정이나 건조된 함정들의 경우 디젤엔진 진동 문제가 효율적으로 관리되지 못하고 있다. 차세대 유도탄 고속함 같은 경우 과도한 디젤엔진 진동으로 인하여 장비고장이 발생하여 현재 운용중인 함정이 작전을 수행하는데 있어서 큰 어려움을 겪고 있다. 그리고 건조중인 함정의 경우에도 수 차례 디젤엔진 진동으로 인한 문제가 시운전 중 발생하였다. 하지만 현재 대한민국 해군의 진동 규격으로는 함정에 탑재된 후에 디젤엔진 진동레벨을 규제할

수 있는 방법이 없는 것이 현실이다.

따라서 본 연구에서는 탑재장비 중 최근 진동 문제가 빈번하게 발생한 디젤엔진 진동 규격에 대해 중점적으로 검토하고 현 규격의 문제점을 분석하고자 한다. 이러한 분석을 바탕으로 앞으로 건조될 해군함정의 탑재장비 진동문제를 합리적으로 관리할 수 있는 새로운 진동규격을 제시하는 것이 본 연구의 목적이다.

2.1. 디젤엔진 진동기준 분석

현재 해군에서 건조되고 있는 왕복동기관 진동은 대한민국해군⁽¹⁾에 의해 관리되고 있다. 왕복동기관은 종류 및 용량별로 적용되는 기준이 다르며 발주 입찰 시 제작자에 의해 명시되어야 한다. 만약 발주 입찰 시 명시되지 않았다면 대형 저속 디젤기관의 진동은 주기관 앞쪽 상단에서 계측한 진동량 허용치 18mm/s RMS와 비교하여 평가 할 수 있다.

현재 해군 함정의 왕복동 기관은 주로 장비 제작사에 의해 명시되고 있으며 시운전평가가 아닌 공장수락시험만으로 엔진을 평가하고 있다. 함정의 왕복동기관에 진동문제가 발생했을 때에만 시운전 시 제작사 진동 규격과 비교하여 진동 측정을 수행하고 있다. 그러나 기준치가 매우 높고 측정위치에 대한 명확한 지시가 없어서 대부분의 함정이 기준치와 비교했을 때에는 문제가 발견되지 않고 있다.

또한 발주 입찰 시 명시되지 않았을 경우의 비교 평가 기준인 대형저속 디젤기관에 대한 18mm/s

† 교신저자; 정희원, 국방기술품질원

E-mail : sam1717@snu.ac.kr

Tel : 051-750-2536, Fax :051-758-3992

* 정희원, 국방기술품질원

** 국방기술품질원

Table 1 Main propulsion system of vessel1

Engine Model	Specification
DE: 20V956TB82	DE: 3865kW, 5256PS, @1500RPM
DG: 12V396TE54	DG: 1035kW, 1408PS, @1800RPM

Table 2 Main propulsion system of vessel2

Engine Model	Specification
DE: 12V1163TB83	DE: 3600kW, 4896PS, @1250RPM
DG: 8V396TE54	DG: 790kW, 1074PS, @1800RPM

Table 3 Main propulsion system of vessel3

Engine Model	Specification
Engine Model	DE: 16V1163TB96
Specification	DE: 5920kW, 8051PS, @1300RPM

Table 4 ISO 10816-6 : Vibration severity grades

Vibration Severity	Overall value (r.m.s)		
	Displacement (μm)	Velocity (mm/s)	Acceleration (mm/s ²)
1.1	≤ 17.8	≤ 1.12	≤ 1.76
1.8	≤ 28.3	≤ 1.78	≤ 2.79
2.8	≤ 44.8	≤ 2.82	≤ 4.42
4.5	≤ 71.0	≤ 4.46	≤ 7.01
7.1	≤ 113	≤ 7.07	≤ 11.1
11	≤ 178	≤ 11.2	≤ 17.6
18	≤ 283	≤ 17.8	≤ 27.9
28	≤ 448	≤ 28.2	≤ 44.2
45	≤ 710	≤ 44.6	≤ 70.1
71	≤ 1125	≤ 70.7	≤ 111
112	≤ 1784	≤ 112	≤ 176
180	> 1784	> 112	> 176

RMS도 주파수 대역에 대한 기준이 제시되지 않았으며 진동시험 해군 함정의 디젤기관이 대부분 고속임을 고려했을 때 비교 평가 기준으로 사용하는 것은 합리적이지 않다.

디젤엔진을 주기관으로 사용하고 있는 최근 건조된 함정은 Table 1~Table 3과 같은 디젤엔진을 사용하고 있다. Table 1~Table 3의 디젤엔진은 모두 MTU사에서 공급하고 있으며 MTU사에서 제시하는 진동 기준치는 함정의 종류 및 엔진의 종류와 관계없이 ISO 10816-6⁽²⁾(Table 4)의 진동심각도 레벨 45의 속도 기준을 사용하고 있다. 이 기준은 디젤엔진 진동 문제가 매우 심각한 함정3의 경우에도 이 기준에 의하면 진동치가 허용범위 안에 있다.

상선의 경우도 선급 규정에 의해 엔진의 진동이 관리되기도 하지만 장비 제작사에서 제시하는 기준에 의해 엔진 진동이 관리된다. 일반적인 상선에서 사용되는 디젤기관의 진동 기준치는 Table 5와 같다. 상선에서는 주로 2행정 저속기관이 사용되며 함정에서는 주로 4행정 고속기관이 사용된다. 일반적으로 2행정 기관의 진동이 4행정 기관보다 진동 값

Table 5 Diesel engine vibration criteria for merchant ships

Engine maker	velocity(mm/s)
B&W	25mm/s peak
Wartsila	28mm/s r.m.s

Table 6 Diesel engine vibration criteria for merchant ships(DNV)

Diesel engines < 200rpm		
	Displacement	Velocity
Vertical	1mm	10mm/s
Longitudinal	1mm	10mm/s
Transverse	1.5mm	25mm/s

To be measured at the top of the A- frame

Diesel engines > 200rpm		
Velocity		
Firmly mounted	Resiliently mounted	
15mm/s	25mm/s	

To be measured at the engine block top and bottom.

Table 7 Diesel engine vibration criteria for Naval vessels(DNV)

Diesel engines < 200rpm		
	Displacement (1~2.4Hz)	Velocity (2.4~100Hz)
Vertical or Longitudinal	10.5mm	8mm/s
Transverse	1mm	15mm/s

To be measured at the top of the A- frame

Diesel engines > 200rpm		
Displacement (1~4.8Hz)	Velocity (4.8~100Hz)	
0.5mm	15mm/s	

To be measured at the engine block top and bottom.

보다 크지만 상선의 2행정 디젤기관의 진동 한계치가 현재 함정의 4행정 디젤기관의 진동 기준치보다 더 작게 관리되고 있다. 물론 최근 건조되는 해군함정은 복잡한 추진시스템으로 인하여 디젤엔진 진동 또한 여러 시스템의 복합적인 영향을 받고 있음을 고려 하더라도 진동 기준치가 다소 높은 수준임을 알 수 있다.

또한 각종 선급에서 제시하고 있는 디젤엔진 진동에 대한 기준들과 비교해 보더라도 해군함정의 진동기준이 상당히 높게 설정되어 있음을 알 수 있다. DNV^{(3),(4)}의 경우 2행정 저속기관이 많은 상선과 4행정 고속기관이 많은 함정에 대해 각각 다른 진동 기준을 제시하고 있다. 상선에 대해서는 Table 6. 그리고 해군함정에 대해서는 Table 7과 같은

Table 8 Diesel engine vibration criteria(ABS)

Propulsion machinery	Limits(rms)
Diesel Engine at Bearing	13mm/s
Slow & Medium Speed Diesel Engine on Engine Top(over 1000Hp)	18mm/s
High Speed Diesel Engine on Engine Top (less 1000 Hp)	13mm/s

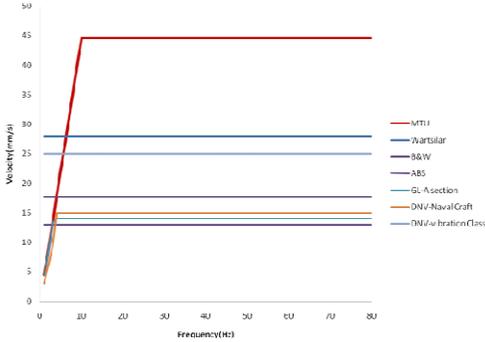


Fig. 1 Comparisons between vibration criteria

기준을 제시하고 있다. 또한 ABS, DNV와 같은 선급협회들의 진동 규격을 살펴보면 모두 측정위치를 명확하게 엔진 실린더 상단으로 명시하고 있다. 현재 해군함정의 경우 디젤엔진에 문제가 있을 경우 마운트 하단에서 엔진 진동값을 측정하고 있는데 이는 ISO 10816-6 규정에서 명시된 측정위치와 다를 뿐만 아니라 진동값이 실린더상단과 비교하였을 때 낮기 때문에 엔진의 과진동을 효과적으로 관리할 수가 없다. 또한 DNV 기준인 Table 6, Table 7을 살펴보면 해군함정 디젤엔진이 상선 디젤엔진에 비해 낮은 진동값으로 관리되고 있음을 알 수 있다. ABS에서는 디젤엔진을 중저속기관과 고속기관으로 분류하여 진동 기준치를 관리하고 있으며 Table 8과 같다. ABS⁽⁴⁾ 규격도 DNV와 마찬가지로 고속함의 경우 중저속 기관에 비해 낮은 진동값으로 관리되고 있다.

MTU에서 해군에 제시하는 진동 규격과 타 규격을 비교해 보면 아래 Fig.1과 같다. Fig.1을 검토하면 MTU에서 한국 해군에 납품하고 있는 디젤엔진이 4행정 고속기관임을 고려 했을 때 45mm/s의 진동 기준은 선급협회에서 제안하는 디젤엔진 진동 기준뿐만 아니라 2행정 기관을 주로 납품하는 B&W나 Wartsilar의 제작사 규격에 비해서도 매우 높은 수준임을 알 수 있다. 디젤엔진 진동을 효과적으로 관리하기 위해서는 4행정기관의 특성을 고려하여 지금보다 낮은 진동 기준치를 설정하고 측정 위치를 명확하게 제시해야 한다. 또한 디

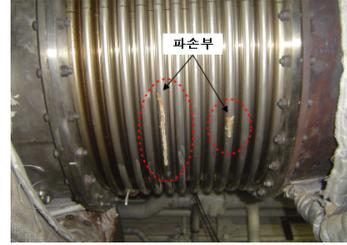


Fig. 2 Fatigue failure of bellows (Naval Vessel 3)

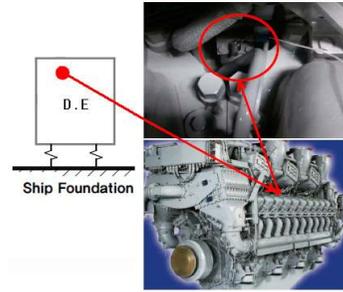


Fig. 3 Measurement point of diesel engine

젤엔진 진동이 여러 장비의 복합적 운용으로 인해 생김을 고려하였을 때 탑재시운전 시 계측에 대한 조항이 규정에 추가되어야 한다.

2.2. 실제 함정의 디젤엔진 진동 분석

현재 건조된 함정 중 디젤엔진 진동이 심각해 벨로우즈가 파손되거나 볼트가 손상되는 등 디젤엔진 진동 문제가 많이 발생되었던 함정3의 3번함과 4번함의 엔진 진동을 측정하였으며, 또한 상대적으로 엔진 진동값이 낮아 진동문제가 대두되지 않았던 함정1의 디젤엔진 진동을 측정하여 함정3의 측정값과 비교하였다. 디젤엔진의 측정위치와 방법은 ISO 10816-6을 참고하였다.

2.2.1 함정 3의 디젤엔진 진동

1) 3번함

함정3의 3번함의 경우 디젤엔진의 과진동으로 인하여 시운전 중 아래 Fig. 2와 같이 엔진 상부에 부착된 벨로우즈의 피로 파괴가 짧은 주기로 반복적으로 발생하였다. 그리고 운영중인 함정의 경우 디젤엔진 진동으로 인하여 볼트가 파손되는 등 과진동으로 인해 작전수행에 큰 문제가 발생되고 있다.

계측장비로는 주파수 분석기 B&K Type 3560,

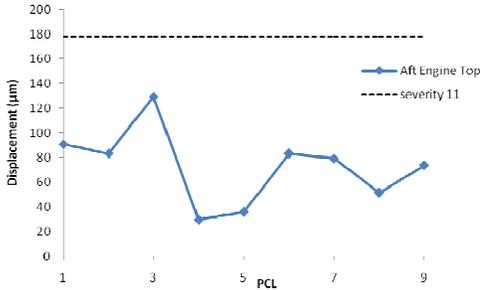


Fig. 4 Diesel engine vibration displacement μm (straight sailing, Naval Vessel 3 no.3)

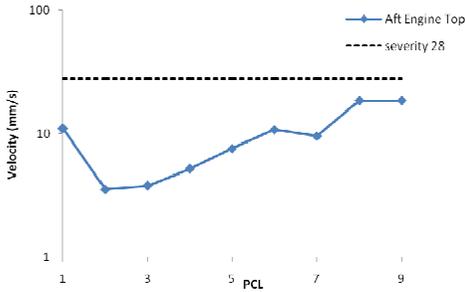


Fig. 5 Diesel engine vibration velocity mm/s (straight sailing, Naval Vessel 3 no.3)

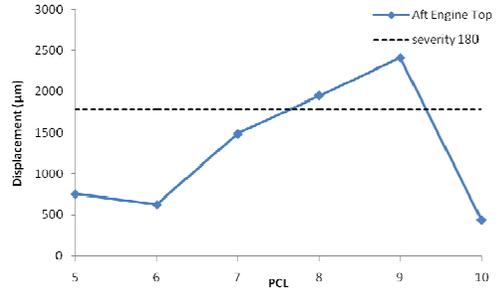


Fig. 6 Diesel engine vibration displacement μm (circle sailing, Naval Vessel 3 no.3)

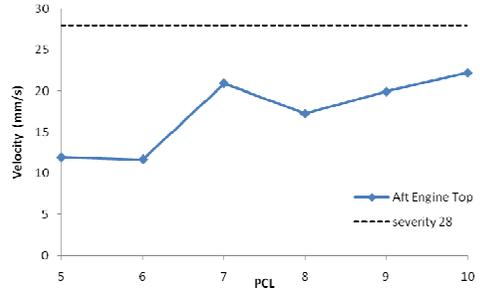


Fig. 7 Diesel engine vibration velocity mm/s (circle sailing, Naval Vessel 3 no.3)

17ch Pulse Data Acquisition Unit를 사용하였으며 가속도 센서는 Dytran Type 3184E를 사용하였다. 계측조건은 직진주행에 대해서 PCL 1~10까지 속력을 1단계씩 증가시키며 단계별 진동을 계측하였으며 선회시험에 대해서는 5~10까지 선회각도 약 20도로 속력을 1단계씩 증가하면서 각 단계별 진동을 계측하였다. 계측 위치는 Fig.3에서와 같이 디젤엔진 실린더 상단에서 진동값을 계측하였으며 longitudinal, vertical, transverse 방향을 계측하였다.

조합단 규격에는 진동속도만 제시하고 있지만 진동변위의 계측도 필요하다고 판단되어 이에 대한 분석도 동시에 수행하였다.

Fig.4, Fig.5는 각각 디젤엔진 진동 변위와 진동속도 계측 값이다. 이를 살펴보면 직진운전의 경우 모든 PCL 레벨에서 ISO 10816-6의 진동심각도 28 이하 수준임을 알 수 있다.

함의 선회는 지그재그 운전을 통해 약 20도 범위 내에서 수행하였으며 진동계측은 벨로우즈의 파손이 발생한 좌현 엔진에 대해서만 수행하였다. 진동계측 결과 PCL 5~9에서 선회 시 디젤 엔진 폐기구가 수면 하로 들어갈 때 엔진 진동이 과도하게 커짐을 알 수 있었다. PCL 10의 경우 함 안전으로 인해 선회를 크게 할 수 없었으며 이 때문에 폐기구가 수면 하로 잠기지 않아 과도한 진동 변위 및 진동

속도가 계측되지 않았다.

10~250Hz 주파수 대역의 진동속도는 ISO 10816-6의 severity 28이하 이지만 1~10Hz 진동변위의 경우 폐기구가 수면에 잠겼을 때 발생한 과진동으로 인하여 severity 180을 초과하는 수준의 진동이 발생하였다. 이를 통해 진동속도뿐만 아니라 진동변위에 의해 문제가 발생될 수 있기 때문에 이에 대한 관리가 필요함을 알 수 있다.

함선회 시 폐기관 출구가 수면하로 잠길 경우 엔진의 배기 압력이 상승하여(경고치인 50mBar를 초과) 엔진에 과진동이 발생된다. 계측 결과 이때의 진동은 ISO 10816-6에서 규정하고 있는 최대 진동심각도 등급인 severity 180을 초과하므로 이러한 현상 반복 발생 시 엔진의 신뢰성에 영향을 미칠 수 있다.

2) 4번함

함정3의 4번함 역시 디젤엔진 진동으로 인하여 벨로우즈가 파손되는 문제가 발생하였다. 3번함과 동일한 측정점에서 Transverse 방향의 진동만 측정하였으며 해상상태가 좋지 않은 관계로 직진시험만 수행하였다. 3번함 실험 때 보다 높은 파도로 인하여 4번함은 직진 항해 시에도 폐기구에 물이 차는 현상이 발생하였고 3번함 직진시험에 비해 훨씬 높은 진동변위 값을 계측할 수 있었다.

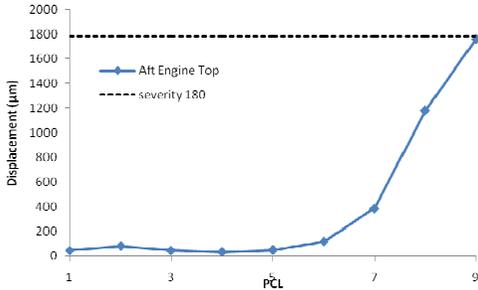


Fig. 8 Diesel engine vibration displacement μm (straight sailing, Naval Vessel 3 no.4)

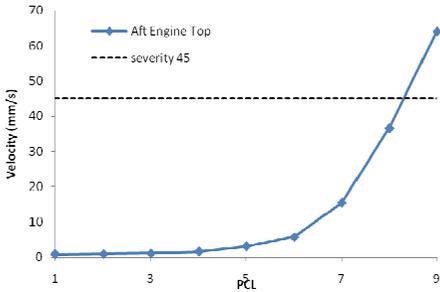


Fig. 9 Diesel engine vibration velocity mm/s (straight sailing, Naval Vessel 3 no.4)

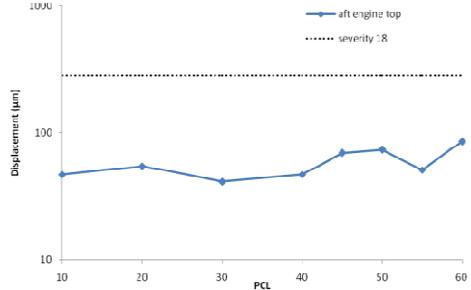


Fig. 10 Diesel engine vibration displacement μm (straight sailing, Naval Vessel 1)

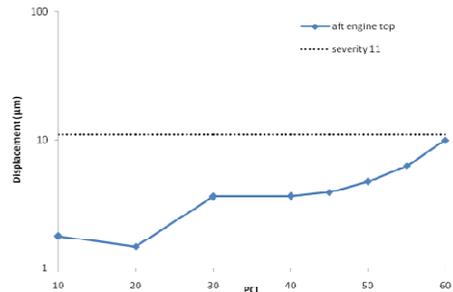


Fig. 11 Diesel engine vibration velocity mm/s (straight sailing, Naval Vessel 1)

진동변위와 진동속도 계측 값인 Fig.8 과 Fig.9을 살펴보면 4번함 역시 진동속도는 진동심각도 45수준으로 나타났으나 진동변위의 경우 진동심각도 180에 육박하는 매우 높은 값을 얻을 수 있었으며 이 저주파대역에서 과도한 진동변위가 진동문제를 야기시켰음을 알 수 있다. 함정 3의 디젤엔진 계측을 통해 진동문제는 진동속도뿐만 아니라 저주파대역에서 진동변위를 규제해야 한다는 것을 알 수 있다.

2.2.2 함정 1의 디젤엔진 진동

함정 1의 경우 디젤엔진 진동이 문제가 되지 않았던 함정으로 함정 3의 디젤엔진 진동과 비교하기 위하여 측정을 수행하였다.

계측장비로는 주파수 분석기 B&K Type 3560, 17ch Pulse Data Acquisition Unit과 가속도 센서는 PCB Type 352C03을 사용하였다. 측정 위치는 함정 3과 동일하다.

계측조건은 함정 1의 경우 선회 시 디젤엔진 진동이 증가하는 문제가 발생하지 않기 때문에 직진 시험만 수행하였으며 PCL 10~40까지 레벨을 10씩 증가하면서 각 단계별 진동 계측, PCL 40~60까지 레벨 5씩 증가하면서 각 단계별 진동을 계측하였다.

Table 13과 Table 14는 함정1에서 측정한 진동 변위와 진동속도 값이다. 이 값들을 살펴보면 디젤 엔진 진동문제가 발생하지 않은 함정1에서는 진동 변위와 속도 모두 ISO 10816-6의 진동심각도 18 이하로 관리되고 있음을 알 수 있다.

2.2.3 함정 1과 함정 3의 디젤엔진 진동 비교

계측조건이 동일하게 직진시험만 수행한 함정 1과 함정3의 4번함의 디젤엔진 진동 계측값을 비교하였다. 함정의 PCL level에 대한 함속과 엔진 rpm이 다르지만 두 함정의 함속이 증가할 때 디젤엔진 진동 경향을 비교하기 위해 power level을 크기 순으로 8단계로 나누었다.

Fig.12 와 Fig.13을 살펴보면 함정1의 경우 최대속력까지 진동속도와 진동변위가 모두 진동심각도 28 수준이다. 하지만 함정3은 속도가 올라갈수록 진동변위뿐만 아니라 진동속도가 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 진동변위는 ISO 10816-6의 최고 수준인 진동심각도 117까지 상승하지만 진동속도 같은 경우는 MTU에서 제시하는 45mm/s를 최고속도에서만 초과하는 수준이다. 함정 3의 경우 계측을 수행한 3번함과 4번함 뿐만 아니라 현재 운용중인 함정도 과도한 디젤엔진 진동 문제로 불트가 풀리는 문제가 발생하여 작전수행에 어려움을

후기

이 논문은 해군 함정기술 용역과제의 지원으로 실시된 것으로 국방기술품질원 자체 검토결과 군사 보안상 문제가 없음을 확인함.

참고 문헌

- (1) Republic of Korea Navy, 2009, Criteria for Ship Vibration
- (2) Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on nonrotating parts - Part 6: Reciprocating machines with power ratings above 100 kW, 1995, ISO
- (3) Rules for classification of high speed, light craft and naval surface craft – noise and vibration, 2011, DNV
- (4) Ships- new buildings – vibration class, 2011, DNV
- (5) Guidance notes on ship vibration, 2006, ABS

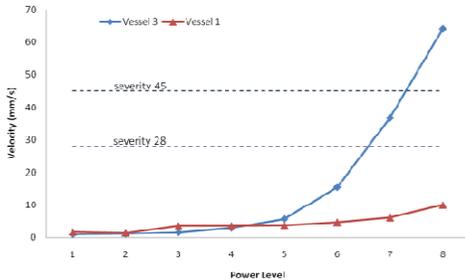


Fig. 12 Diesel engine vibration displacement μm (straight sailing, Naval Vessel 1,3)

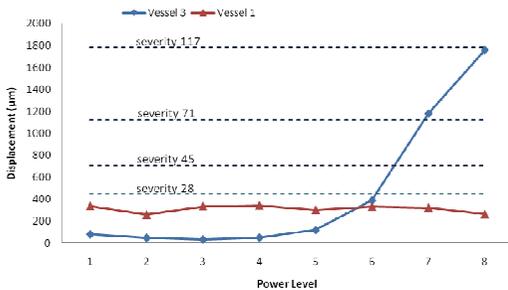


Fig. 13 Diesel engine vibration velocity mm/s (straight sailing, Naval Vessel 1,3)

주고 있다. 이러한 함정 3의 문제점들을 고려하였을 때 단순히 진동속도만으로 함정의 디젤엔진을 규제하기 보다는 진동변위를 추가적으로 기준에 추가해야 하며 함정탑재시험을 필수적으로 수행해야 한다.

3. 결 론

함정의 디젤엔진 진동은 수중방사소음 저감, 승조원원의 쾌적한 환경조성 뿐만 아니라 함정의 내구성 측면에서 매우 중요하다. 하지만 현재 해군 함정에 적용되고 있는 디젤엔진 진동 기준인 45mm/s rms 는 그 수준이 높으며 측정위치, 주파수 대역에 대한 정의가 없어서 디젤엔진의 진동을 합리적으로 규제하지 못한다. 또한 함정탑재시험에 대한 규정이 없어서 디젤엔진 진동 문제가 발생하였을 때만 함정에서 디젤엔진 진동 평가를 수행하고 있다.

해군 함정 디젤엔진 진동을 합리적으로 관리하기 위해서는 함정 1의 진동 수준인 진동심각도 28수준으로 ISO 10816-6의 평가방법으로 진동변위와 진동속도를 모두 관리해야 한다고 생각한다. 그리고 공작수락시험으로 그치는 것이 아니라 함정 탑재시험에 대한 규정을 추가하여 함정에 탑재되는 추진 시스템 진동을 복합적으로 관리해야지 최근에 빈번하게 발생되었던 디젤엔진 진동으로 인한 문제들을 예방할 수 있다.