



Received: 2022/01/07  
Revised: 2022/02/17  
Accepted: 2022/03/24  
Published: 2022/03/31

**\*Corresponding Author:**

**Sang Gu Lee**

1, Chungjang-ro, Jinhae-gu, Changwon-si,  
Gyeongsangnam-do, Republic of Korea

Tel: +82-55-549-1918

E-mail: god239@mnd.go.kr

# 디젤엔진 동력전달계통의 이상진동 특성에 대한 원인분석 연구

## A Cause Analysis Study on the Abnormal Vibration Characteristics of Diesel Engine Power Transmission System

이상구<sup>1\*</sup>, 김성웅<sup>2</sup>, 이재영<sup>3</sup>, 정현주<sup>4</sup>, 강동훈<sup>5</sup>

<sup>1</sup>해군군수사령부 함정기술연구소 소음진동선임연구원

<sup>2</sup>해군 중령/해군군수사령부 함정기술연구소 기관연구과장

<sup>3</sup>해군군수사령부 함정기술연구소 밸런싱연구원

<sup>4</sup>해군군수사령부 함정기술연구소 진동분석측정연구원

<sup>5</sup>해군군수사령부 함정기술연구소 가스터빈연구원

**Sang Gu Lee<sup>1\*</sup>, Sung Woong Kim<sup>2</sup>, Jae Young Lee<sup>3</sup>, Hyeon Ju Jeong<sup>4</sup>, Dong Hun Kang<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Noise & Vibration Senior Researcher, Naval Technology Research Institute, Naval Logistics Command

<sup>2</sup>Command, ROK Navy/Chief of Engineering Research Department, Naval Technology Research Institute, Naval Logistics Command

<sup>3</sup>Balancing Researcher, Naval Technology Research Institute, Naval Logistics Command

<sup>4</sup>Vibration Analysis Measure Researcher, Naval Technology Research Institute, Naval Logistics Command

<sup>5</sup>Gas Turbine Researcher, Naval Technology Research Institute, Naval Logistics Command

### 1. 서론

함정 운항을 위한 추진기관 및 축계와 추진기관의 보조계통을 추진시스템(propulsion system)이라고 하며, 축계(shafting)는 추진기관에서 발생한 동력을 추진기로 전달하여 함정의 추력을 발생하는 장비를 말한다[1]. 이러한 추진시스템은 엔진 탄성마운트 선정 및 배치 적절성 검토, 주 추진축구조 강성 및 진동의 해석 또는 시험을 통한 각 기준의 만족 여부로 안정성을 검증한다.

최근 이러한 검증이 완료되어 인도된 차기상륙함에서 디젤엔진 동력 전달계통에 손상이 발생하였으며, 이에, 동형함정을 대상으로 실시한 전 수조사에서 유사한 형태의 손상이 식별되었다. 이러한 동력전달계통 손상에 대한 원인분석 및 재발방지를 위해 추진계통 배치 및 진동관점에서 의 연구를 수행하였다.

### Abstract

함정의 기동은 추진축계시스템에 의한 동력전달로 이루어지며, 추진축계 정렬 확인 및 진동시험 등을 통해 기준만족 여부를 판단하고, 디젤엔진 등의 탄성마운트는 배치 및 하중의 적절성을 해석적으로 검증한다. 하지만 엔진에서 감속기로 전달되는 엔진 동력전달 축인 복합샤프트(composite shaft)의 진동 측면 검증은 다소 부족하며 그 중요성 또한 크게 부각되지 않았다. 이는 고장 빈도율이 낮고 추진축에 비해 짧은 길이와 적용할 기준 부재 등의 원인이 있다. 최근 차기상륙함 디젤엔진 동력전달계통에 문제가 발생하였으며, 동형 함정의 전반적인 문제로 식별되었다. 이러한 문제의 해결을 위해 진동측정을 실시하고 이상진동 특성에 따른 원인분석과 설치 적절성에 대한 문제점 및 재발방지를 위한 연구를 수행하였다.

The operation of naval ship consists of power transmission by the propulsion shaft system, and it is determined whether the standard is satisfied through confirmation of the alignment of the propulsion shaft and vibration test. Resilient mounts such as diesel engines analytically verify the appropriateness of placement and load. However, vibration verification of the composite shaft, the engine power transmission shaft delivered from the engine to the reducer, is insufficient, and its importance is not much known. This has a frequency of breakdown, a shorter length than the main propulsion shaft and no standard to applied. Recently, a problem occurred in the power transmission system of the new LST diesel engine, and it was identified as an overall problem of the same vessel. To solve this problem, vibration measurement was performed, cause analysis according to abnormal vibration characteristics, and research was conducted to prevent recurrence and problems with the appropriateness of installation.

### Keywords

추진 시스템(Propulsion System), 진동(Vibration), 멤브레인 어셈블리(Membrane Assembly), 유연성 고무(Flexible Rubber), 볼칸 커플링(Vulkan Coupling), 복합 샤프트(Composite Shaft), 오정렬(Misalignment)

### Acknowledgement

이 논문은 2021년도 한국해군과학기술학회 동계학술대회 발표 논문임.

## 2. 동력전달계통 배치

### 2.1 계통 구조

합정용 디젤엔진은 부하변동에 따라 가버너로 제어되며, 이때 디젤엔진 크랭크축에서 비틀림 진동의 변화가 급격하게 발생한다.

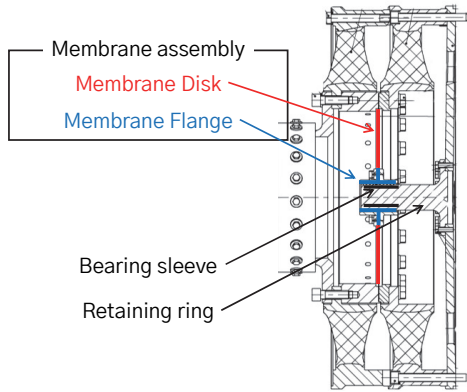


Fig. 1. 볼칸 커플링 도면

이때 크랭크축의 비틀림 진동으로 인한 피로파괴가 발생될 수 있기 때문에 엔진과 축을 연결하는 부분에 축정렬 보정, 토크 전달의 목적으로 유연 연결커플링(flexible coupling)을 사용한다. 동력전달을 위해 출력축 토크에서 발생하는 비틀림 진동을 감쇄하기 위한 유연 커플링의 종류에는 압축고무 커플링, 전단고무 커플링, 판스프링 커플링 등이 있다. 차기상륙함에 적용된 볼칸 커플링은 연결된 축의 반경방향, 축방향 및 샤프트 변위를 보상하기 위해 비틀림에 유연한 고무 커플링을 적용하였고 토크는 전단 하중을 받는 요소에 의해 전달된다. 사용 가능한 다양한 비틀림 강성 및 감쇠계수는 구동 시스템의 비틀림 진동을 허용범위 내에서 조정할 수 있다. 축 방향 변위를 흡수하는 membrane assembly는 진동 감쇄 및 축 정렬 보상 역할을 하며, disk와 flange로 구성되어 있다.

### 2.2 탄성마운트 배치

장비 지지용 탄성마운트들은 어떤 위치에서라도 과도한 힘이 걸리지 않도록 배치되어야 한다. 장비 무게 중심 위치를 잘못 추정할 경우 불균일한 하중의 분배가 발생하고, 상대적 과도 처짐이 발생한다. 이러한 경우 탄성마운트에는 고유 기능과 내구성에 심각한 저하가 생기며 축과 연동될 경우, misalignment가 발생된다. 항해 중 선박은

롤링(rolling)과 피칭(pitching)을 하게 되며 선체에 고정 지지된 장비는 선박과 동일한 동역학적 부하를 받으나, 탄성지지된 장비는 선체와 상대적으로 움직이므로 탄성마운트는 장비의 무게에 의해 발생하는 변형보다 더 큰 변형을 일으키게 된다.

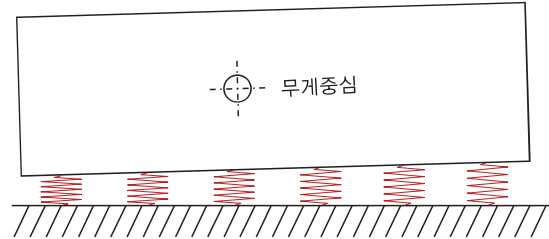


Fig. 2. 탄성마운트 정렬 오류의 예시

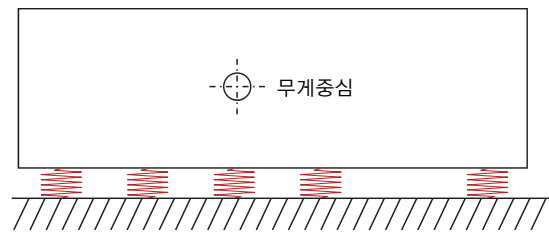


Fig. 3. 정상적 탄성마운트 배열 예시

따라서, 고정지지와 탄성지지된 장비 간 축으로 연결되는 연동시스템의 안정성 확보를 위해 탄성받침에 작용하는 부가적 하중을 평가하고 동시에 탄성커플링 등에서 예상되는 상대운동에 의한 손상이 발생되지 않도록 검토가 필요하다.

## 3. 차기상륙함 손상 식별

디젤엔진 출력단과 감속기 입력단 사이에 동력전달을 위한 composite shaft가 배치되고 상호 기관의 축 정렬 불일치 값 보상을 위한 볼칸 커플링(Vulcan coupling)이 엔진 출력단에 설치된다.

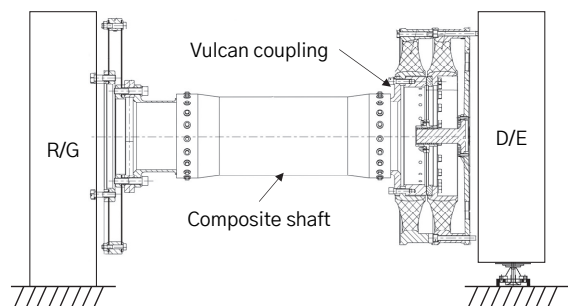


Fig. 4. 디젤엔진 추진(동력전달) 시스템 도면

2020년에 3번함 불칸 커플링 손상이 발생하였으며, 이를 토대로 동형 함정 불칸 커플링의 전수조사를 수행하였다. 전수조사 결과, 대부분 동형함정에서 총 3가지 형태의 불칸 커플링 손상이 식별되었다.

첫 번째 손상 형태는 불칸 커플링 내부 membrane disk 파손이며, 파단면 분석 결과 진동에 의한 피로파괴(fatigue failure)로 추정된다.



Fig. 5. 멤브레인 디스크 손상 사례

두 번째 손상 형태는 고무단(flexible rubber)의 찢어짐이다. 고무 재질을 천연고무계열로 사용하여 금속과의 접착성, 항장력과 반발 탄력성을 높였으나, 고무와 금속 간(間) 연결단에서 균열이 발생하였다. 엔진의 운용에 따라 creep 현상<sup>1)</sup>으로 시작된 균열로 인해 파열저항이 감소한 것으로 판단된다.

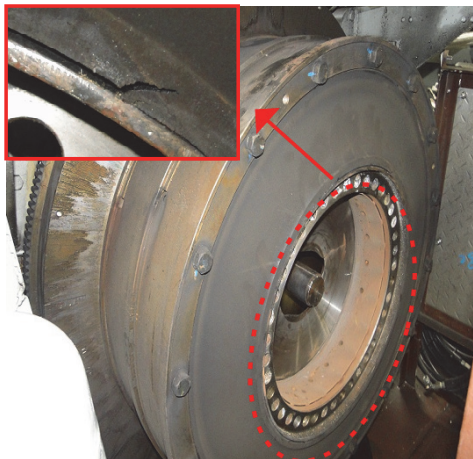


Fig. 6. 고무단 손상 사례

마지막 손상 형태는 bearing sleeve 이탈이다. 엔진 동력전달 축과 membrane flange 사이에 설치되는 bearing sleeve가 정위치를 이탈하는 현상이 발생하였으나, 이로 인한 주변 구조물의 추가적인 손상은 확인되지 않았다. 상대적으로 전력화 시점이 짧은 4번함을 제외한 나머지 동

1) 허용응력 이내의 힘(하중)이라도 장시간 하중을 받으면 응력이 약해져 균열이 발생하는 현상

형 함정에서 불칸 커플링의 손상이 식별되었다.

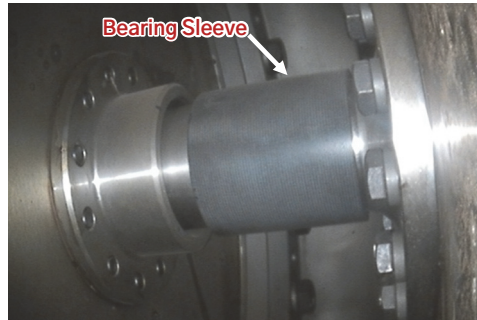


Fig. 7. 베어링 슬리브 손상 사례

## 4. 원인 분석

### 4.1 정렬 특성 검토

불칸 커플링의 손상원인을 추정하기 위해 디젤엔진 탄성마운트 처짐량을 측정하였다. 그 결과, 건조단계 대비 현 상태가 최대 16.6 mm 추가 처짐을 확인하였으며, 이로 인해 composite shaft와 불칸 커플링간 gap-sag는 최대 20 mm misalignment가 발생하였다.

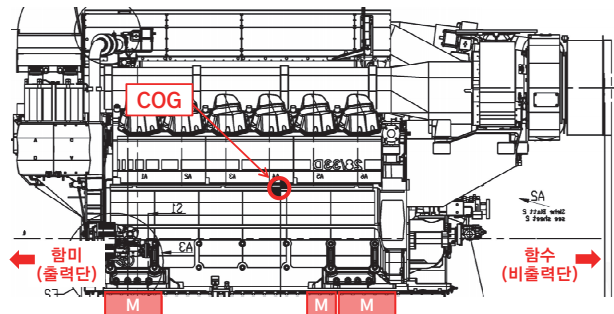


Fig. 8. 디젤엔진 탄성 마운트 배열

고중량 탄성마운트는 일정한 하중을 받게 되면 초기 탄성변형과 시간에 따른 영구변형에 따라 결정되는 조합적 변형을 보인다. 마운트 제작사(Vulkan) 자료에 따르면 고무요소 처짐을 평가하기 위한 단계 중 장비 장착(loaded) 조건에서 7~10일 후 TB(top-bottom) 치수 확인을 요구하고 있다. 해당 시점에서 탄성마운트 처짐 확인은 최소 7일 이후에 영구변형 처짐이 안정화됨을 추측할 수 있으나, 건조 조선소 보고서에 따르면 최소 48시간 이상 load를 가해 탄성마운트를 수축시킨 후 정렬토록 하고 있다. 이는 탄성마운트 제작사 처짐 확인 대비 약 20% - 35% 수준의 loading 기간에 해당한다.

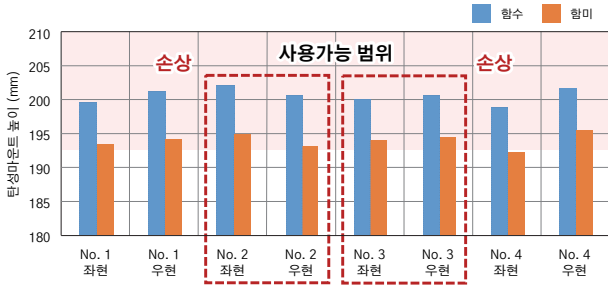


Fig. 9. 탄성마운트 높이 측정 데이터 (LOO-II 1)

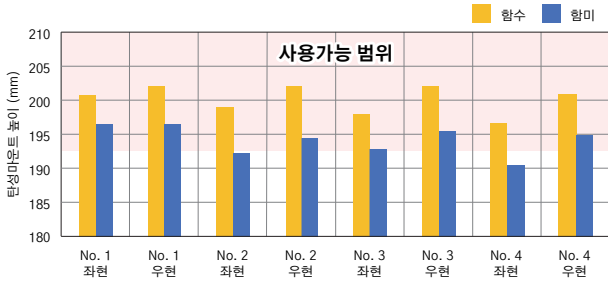


Fig. 10. 탄성마운트 높이 측정 데이터 (LOO-II 2)

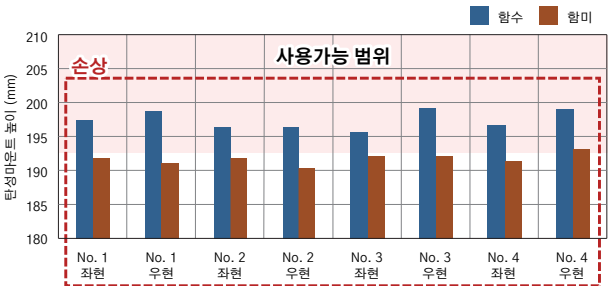


Fig. 11. 탄성마운트 높이 측정 데이터 (LOO-II 3)

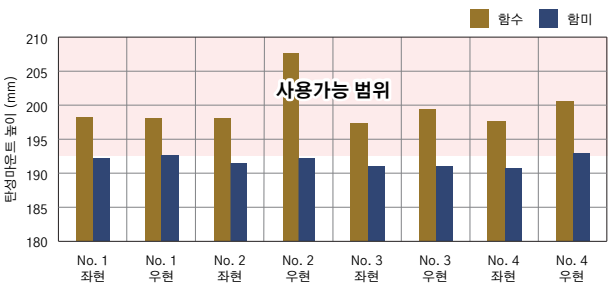


Fig. 12. 탄성마운트 높이 측정 데이터 (LOO-II 4)

이는 시간에 따른 영구변형을 완전히 구현하기에는 다소 부족할 수 있으며, 탄성마운트의 추가적인 변형 발생과 이로 인한 측정결 불량이 발생할 가능성을 내포하고 있다. 3번함 현장 확인결과, 디젤엔진 함미(출력단) 탄성마운트 높이는 설치 초기보다 최대 16.6 mm 처짐이 발생하였다. 조선소에서 제시한 짧은 loading 시간으로 인해 영구변형이 덜 이루어진 상태에서 엔진 정렬이 수행된 것으로 추

정된다. 함정 설계/건조 기준에서는 탄성지지 설계시 ‘탄성마운트별 작용 하중 계산서’를 요구하고 있으나, 차기 상륙함은 디젤엔진의 총 중량(윤활유 중량 포함)과 탄성마운트 수량을 단순 분배한 계산서만 있으며, 커플링과 composite shaft에 대한 추가하중 언급은 없다.

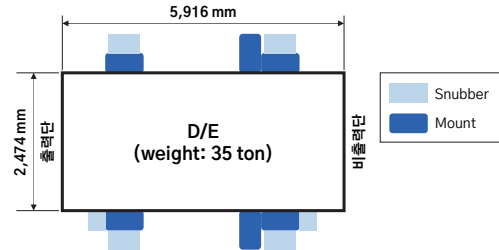


Fig. 13. LOO-II 함정 탄성마운트 배치

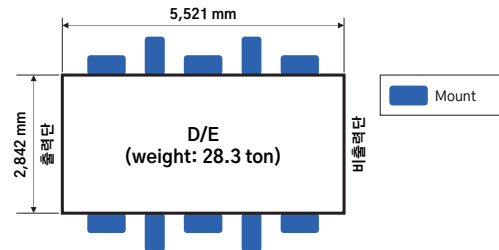


Fig. 14. FOO 함정 탄성마운트 배치

현장조사 결과, 모든 함정에서 일률적으로 함수(비출력단)보다 커플링 및 composite shaft가 위치한 함미(출력단)방향 탄성마운트가 더 많은 처짐을 보이므로 마운트 배치에 대한 적절성 재검토가 필요하다.

Composite shaft에서 오정렬이 발생될 경우, 커플링 membrane disk와 고무단에서 정렬을 보상하지만 일부 함정에서 고무단 찢어짐과 membrane disk 파손이 식별되었다. Membrane disk는 약 1 mm의 얇은 금속 격막 구조이며, 진동 감쇄 및 측정결 보상 역할을 한다. Fig. 15은 함정별 함수 대비 함미 엔진 탄성마운트 처짐량을 비교한 결과로, membrane disk 손상 여부와 처짐량 수준이 규칙적이지 않음을 확인할 수 있다.

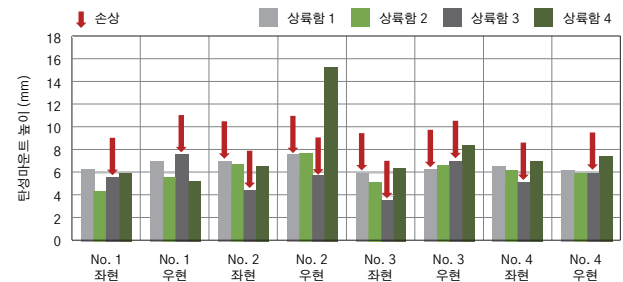


Fig. 15. 디젤엔진 위치별 탄성마운트 차이(LOO-II 1 ~ LOO-II 4)

엔진별 운용시간 비교시 1번함 No. 2, No. 3 디젤엔진의 경우, 유사 함정대비 월등히 많은 수준이므로 축 오정렬 상태로 장시간 운용된 점을 감안하면 membrane disk 손상이 발생할 수 있다. 그러나, 1번함 No. 4 디젤엔진보다 운용시간이 적지만 membrane disk가 손상된 함정이 있는 점을 감안하면 단순히 운용시간과 misalignment 수준만으로는 membrane disk 손상 가능성을 판단하기에는 다소 무리가 있다.

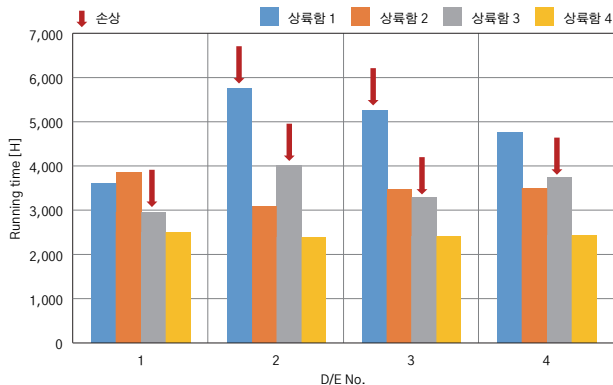


Fig. 16. 함정별 운용시간 비교 (LOO-II 1 - LOO-II 4)

한편, 볼칸 커플링 내 membrane disk는 단순 평판으로 제작되어 디젤엔진이 정상조건일 때 진동감쇄 및 일정 수준의 축 정렬 보상 역할을 할 수 있으나, 3번함과 같이 축의 처짐값이 변하면 1mm 평판으로 구성된 membrane disk는 원호방향의 변형이 생기므로써 강도 측면에서 취약한 형태가 된다. 탄성마운트 처짐에 의한 수직방향 하중은 membrane disk와 flange 연결부에 응력집중으로 인한 피로파괴 (fatigue failure)가 발생할 수 있다. 이 또한 misalignment 수준과는 규칙성을 보이지 않으므로 볼칸 커플링 설계시 membrane disk 구조강도에 대한 임계하중이 부적절할 수도 있다. 실제 1번함의 경우, 탄성마운트의 변위는 모두 허용범위 이내지만 결과적으로 볼칸 커플링은 손상되었다. 이는 탄성마운트와 볼칸 커플링 간 상호 다른 하중으로 설계되었을 가능성도 있으며, 그럴 경우 커플링의 손상은 제작사의 설계적 결함사항이 될 수 있다.

4.2 진동 특성 검토

동력전달계통 (Vulcan coupling 등)에서 동일손상이 지속 발생함에 따라 원인분석을 위한 진동측정을 수행하였으며, 진동 가속도 센서는 엔진과 감속기의 비 회전부에 L(axial) 및 T(radial) 방향으로 부착하였다.

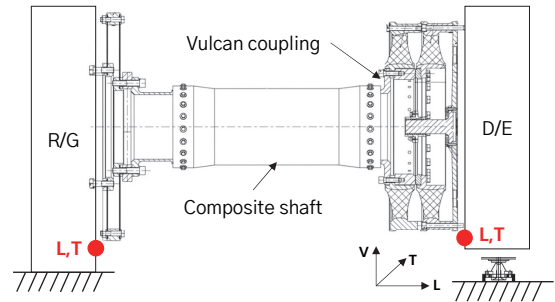


Fig. 17. 디젤엔진 측정 포인트

정상상태의 회전체 장비는 회전주파수(1차)와 조화성분이 3차까지 식별되며, 2차 조화성분 이상은 1차 성분보다 약 30% 이하의 진폭을 가진다.

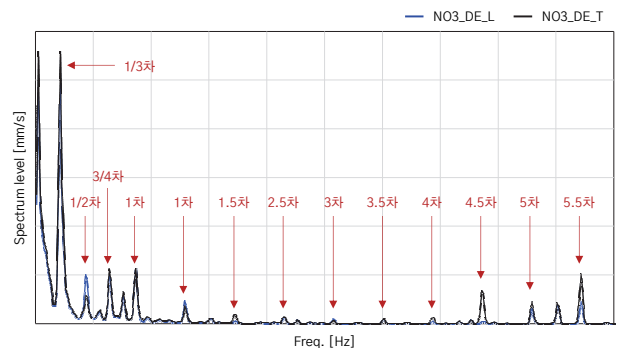


Fig. 18. 디젤엔진 진동측정 결과 (LOO-II 3)

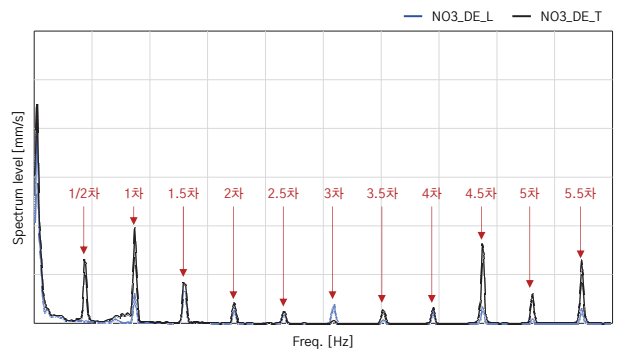


Fig. 19. 디젤엔진 진동측정 결과 (LOO-II 4)

3번함 진동측정 결과, 디젤엔진에서 축 회전주파수(1차)와 10차 이상의 조화성분이 식별되고, 분수 조화성분(1/3차 등)이 여러 개 발생하는 특징이 있다. 측정 대상이 4행정 디젤기관이라는 점을 감안할 경우, 흡입-압축과 폭발-배기의 2단계로 진행되므로 0.5차 조화성분이 전 주파수 대역에서 식별된다. 따라서, 3번함의 진동측정결과에 대한 주파수 분석을 할 때, 0.5차수 조화성분은 모두 4행정 디젤기관의 신호특성으로 배제하면 1/3차와 3/4차 성분만 남는다. 이러한 성분은 기계적 풀림 현상으로 판단할

수 있다. 3번함은 커플링 membrane disk 파손과 고무단 찢어지는 현상이 발생했으므로 composite shaft 고정이 불안정하여 기계적 풀림 현상의 진동 신호가 발생한 것으로 추정된다. 불칸 커플링 손상이 없는 4번함 진동 신호와 비교할 때, 3번함과 동일하게 회전주파수 0.5차가 고차 조화성분까지 식별되나, 1/3과 같은 분수 조화성분은 식별되지 않는다.

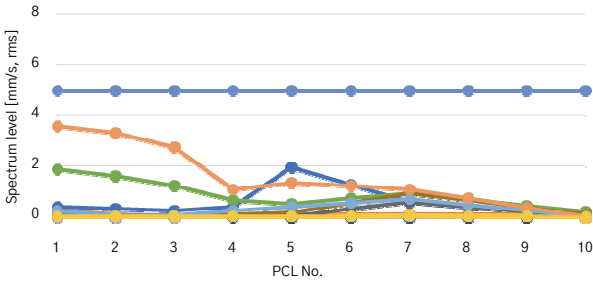


Fig. 20. 디젤엔진 진동과 DNV 규정 (LOO-II 2)

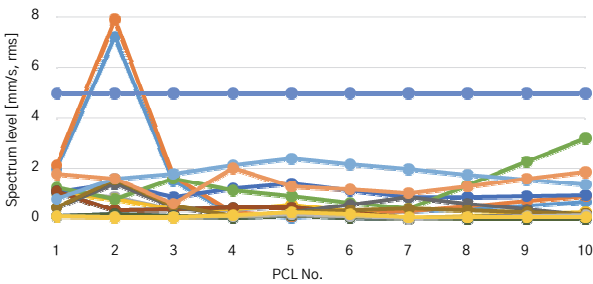


Fig. 21. 디젤엔진 진동과 DNV 규정 (LOO-II 3)

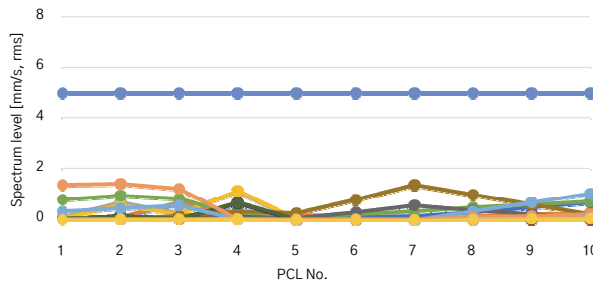


Fig. 22. 디젤엔진 진동과 DNV 규정 (LOO-II 4)

합정 설계/건조 기준에는 해당 동력전달계통에 대한 진동 요구사항이나 기준이 없으므로, 일반적인 상용 규격 중 DNV(Det Norske Veritas, 노르웨이 선급협회) Vibration Class의 추진축 베어링 적용 기준(5 mm/s, rms @ 1 Hz - 200 Hz)과 비교하였다. 불칸 커플링 bearing sleeve가 이 탈된 2번함은 일부 디젤엔진만 DNV 기준치에 근접하며, membrane disk 손상 또는 고무단 찢어짐이 발생한 3번함의 경우, 대부분 DNV 기준치에 근접 또는 초과한다. 반

면 불칸 커플링에 아무런 손상이 없는 4번함의 경우 전체적으로 낮은 진동수준을 보인다.

상기 진동결과를 토대로 DNV 기준치와 비교하여 정성적 진동수준을 추정하였다. Narrow spectrum(rms @ 1 Hz - 200 Hz) 평가시 2 mm/s 이하일 경우 정상으로 판단할 수 있으며, 2 mm/s - 4 mm/s 수준이면 관심 및 정비가 요구된다. 4 mm/s를 초과할 경우에는 내·외부 파손을 의심하여 운용 불가 및 긴급정비가 필요할 것으로 판단된다. 또한, 최종 판단을 위해서는 주파수 분석을 통한 1/3차 등의 분수 조화성분 발생 여부도 함께 검토되어야 할 것이다. 현재의 판단은 차기상륙함 디젤엔진 동력전달계통에 국한하며, 진동수준의 세부적 단계조정 등은 추후 지속적인 시험과 자료수집 및 주파수 분석 등을 통해 발전시킬 필요성이 있다.

4.3 분석결과

불칸 커플링 손상원인을 추정하면, 디젤엔진과 감속기 간(間) 정렬을 위해 탄성마운트 완전변형(처짐)을 갖는데 필요한 loading 시간이 부족하여 정렬 이후 추가적 마운트 처짐이 발생한 것으로 추정된다. 이에 composite shaft를 포함한 커플링과 디젤엔진에서 gap-sag 오정렬(최대 20 mm)이 발생하였다.

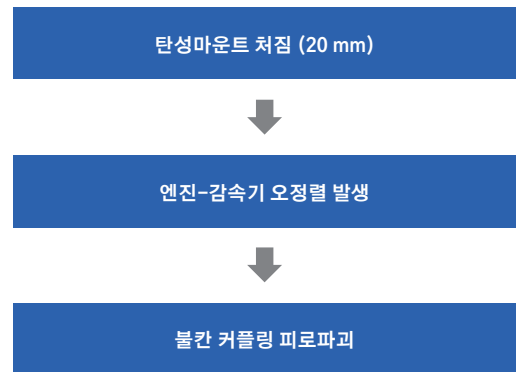


Fig. 23. 불칸 커플링 손상 흐름

이로 인해 불칸 커플링과 내부 membrane disk에 응력 집중에 의한 피로파괴가 발생하였다. 진동 분석결과 디젤 기관의 특성주파수인 0.5차의 고차수 조화성분 이외에 1/3차와 같은 분수 조화성분이 발생하므로 기계적 풀림 상으로 판단할 수 있다. 이는 membrane disk가 파손되거나, 고무단이 찢어지면서 지지단 조건(boundary condition)에 변화가 생겼기 때문이다.

## 5. 재발 방지 방안 제안

### 5.1 함정 설계/건조 단계

운용함정에서 발생하는 문제는 건조단계부터 진행되는 경우가 다수 있으며 차기상륙함 동력전달계통의 파손 또한 건조단계에서 디젤엔진 설치시 발생한 문제에서 시작되었다. 해당 장비는 관급이므로 조선소에서 기술적 검토에 제한이 있었다고 하더라도 설치나 연동성은 조선소의 업무 범위인 점을 감안할 때 탄성마운트 설치방법, gap-sag값의 적절성 등의 검증과 수행에서 개선이 필요하다.

첫 번째로 탄성마운트 배치의 적절성 추가검증이 필요하다. 엔진 및 발전기와 같은 대형 장비 기종이 결정되면 이를 토대로 기관장비와 연동장비에 대한 배치가 완료된다. 해당 장비 입고시 필수 제출문서 중 탄성마운트 선정에 대한 적절성 검토 보고서가 있으며, 그 내용은 탄성마운트의 배치 적절성과 각 마운트가 받는 하중 계산서<sup>2)</sup>를 포함해야 한다. 제작사에서는 주변 연동시스템에 대한 정보 부재로 해당 장비만을 고려한 적절성 검증이 이루어지며, 실제 본 함의 경우 디젤엔진 탄성마운트 사용 하중 범위 검토를 위해 장비 중량 이외에 유연 연결장치(flexible coupling) 및 부착된 장비(composite shaft 등)의 중량효과가 고려되지 않았다. 이러한 부가 중량으로 인해 장비의 무게 중심점은 변화하게 되며, 각 탄성마운트별 작용 하중은 틀어지게 된다. 설계 초기에 검증되지 않았더라도 장비 설치 이전에는 연동장비의 중량 등을 반영한 탄성마운트 적절성의 재검증이 이루어져야 할 것이다.

두 번째로 진동시험을 통한 성능검증이 필요하다. 현재 불칸 커플링의 진동시험은 수행되지 않고 있으며, 이에 대한 시험절차서 및 기준값 또한 마련되지 않은 상태이다. 진동시험을 수행할 경우, 설치의 적절성 및 연동성 문제가 발생할 경우, 일부는 사전 식별 가능할 것으로 판단된다. 이에 진동측정을 통해 0.5차 조화성분 이외에 1/3차와 같은 분수 조화성분 여부를 확인함으로써 불칸 커플링의 상태를 추정해야 한다. 또한, 해군 기준이 없더라도 상용 규격(ISO, DNV 등)의 기준과 비교하여 복합적인 판단결과를 도출할 필요가 있다.

세 번째로 원제작사 검토의견 제출을 조선소에 요구해야 한다. 장비, 시스템의 설치 절차서 및 정렬 확인결과 등

에 대해 연동장비를 포함한 해당 장비 원제작사 검토의견을 목적문건 제출시 첨부토록 조선소에 요구해야 한다. 그럴 경우, 원제작사 관점의 적합여부 판단이 가능하며, 이견 발생시 사전조치가 가능하기 때문이다.

### 5.2 함정 운용단계

장비의 안정적 운용을 위해 주기적인 탄성마운트 상태 확인 및 문제발생시 진동측정을 통한 관리가 필요하다.

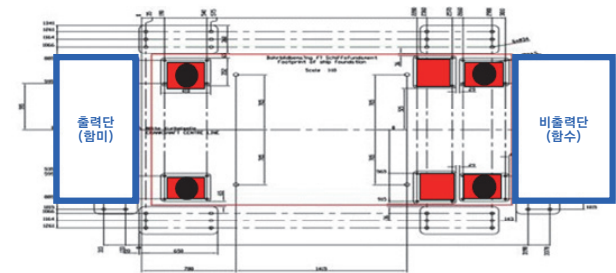


Fig. 24. 탄성마운트 높이 측정 위치

첫 번째로 정기적 탄성마운트 검사가 필요하다. 탄성마운트의 경우 분기 또는 반기별 마운트 처짐 수준을 측정하고 축척된 자료를 통해 misalignment 발생 가능성 등을 사전 추정해야 한다. 이때 모든 탄성마운트를 측정하는 것보다는 장비 양 끝단부 마운트(4개소)만 측정해서 관리하는 방법도 가능할 것이다.

두 번째로 진동측정 및 진폭 변화의 확인이 필요하다. 탄성마운트 및 커플링의 상태에 따라 진동측정을 수행하여 분수 조화성분 발생 유무 확인, PCL별 진동 패턴과 기준치와 비교를 통한 점검이 필요하다.

## 6. 결론

최근에 발생한 차기상륙함 디젤엔진 동력전달계통 손상에 대해 탄성마운트 선정과 이상진동에 대한 주파수 분석 관점에서 원인을 추정하였다. 건조단계에서 디젤엔진 탄성마운트의 배치 및 작용하중 적절성 검증이 미흡한 상태에서 설치되어 허용범위를 초과하는 마운트 처짐 및 불칸 커플링 손상이 발생하였다. 진동측정 결과, 커플링의 손상이 없는 함정에서는 약 2 mm/s 이하 수준인 반면, 손상이 발생한 함정에서는 5 mm/s에 근접 또는 초과하는 진동수준을 보였다. 또한 주파수 영역에서는 1/3차와 같은 분수 조화성분이 발생하는 특성을 확인하였다.

<sup>2)</sup> 함정 설계/건조 기준 『함정용 탄성마운트 적용 및 설치지침, 조함(수)-실-1-027(1)』

재발 방지를 위해 함정 건조시 탄성마운트의 배치 및 안정성에 대해 연동장비 배치가 완료된 시점에서 적절성에 대한 추가검증이 필요하다. 또한, 설치 절차서 및 정렬 결과에 대한 원제작사 검토의견이 포함된 목적문건 제출을 요구해야 한다. 함정의 운용단계에서는 탄성마운트 처짐과 불칸 커플링의 진동변화수준 확인 등의 지속적 관리가 필요할 것이다.

## 참고문헌

- [1] Terms and Definitions for Naval Ship Design & Construction, Republic of Korea Navy, 2019.
- [2] John Piotrowski, Shaft Alignment Handbook, Third Edition, CRC Press, New York, 2007, pp. 137-178.
- [3] Special Equipment and Systems Additional Class, DNV Vibration Class part 6 chapter 15, 2011, pp. 5.
- [4] Hannu Tienhaara, Guidelines to Engine Dynamics and Vibration, Marine News 25, Wärtsilä, 2004.
- [5] Guideline of Adapting & Installation for Navy Resilient Mount, Republic of Korea Navy, 2019.