

방진고무를 이용한 대용량 엔진마운트의 제작 및 성능시험

○ 유준화 * 김충식 * 박상규 *

(Design and Performance Test of Rubber Engine Mount for Isolation Large Structures)

(Chun-Hwa Ryu, Choung-Sik Kim, Sang-Kyu Park)

1. 서 론

방진고무는 진동을 방지하여 다른구조물의 진동전달 차단은 물론, 장비의 수명연장 및 효율을 증가시키기 위한 목적으로 사용되는데 이러한 방진고무의 동적특성을 일반화하는 것은 어렵기 때문에 방진고무 시편의 동특성 해석시험 결과치를 기준으로 원하는 성능에 부합하도록 방진고무의 재질을 선정하고 사양에 의한 엔진마운트를 설계 제작하여야 한다.

이번에 제작한 UEM 엔진마운트는 해상용, 육상용 설비에 적용 가능하며, 특히 해상용에 적용하고 외부 환경에 의한 부식으로 부터 방진고무 및 기저재를 보호하기 위하여 하우징을 특수재질로 제작하였고, 수직 수평력을 고려하여 큰하중에 견딜 수 있도록 원추형 형상설계와 강성을 보강하였다. 특히, 원추형 형상으로 제작하여 하중을 일정하게 분산시키고, 사용 가능한 선형영역을 확대 시켰으며, Buffer(Steel Bar)를 이용하여 높은 파고 등에 의한 외부 충격량에 따른 큰 변위의 발생으로 부터 설비를 보호할 수 있다.

본 논문에서는 물리적 특성이 같은 방진고무를 사용하고, 적층 수만 다르도록 두가지 모델 UEM-155 와 UEM-255를 설계 제작하여 수직 수평방향의 정적시험, 동적시험, 현장 장착시험 등을 수행함으로써 기업에서 요구한 사양에 적합한가를 고찰하였다.

2. 이론 Modeling

그림 1. 과 같이 엔진마운트를 설치하여 System을 구성하고 다음과 같이 1자유도로 Modeling(그림 2.)하였다.

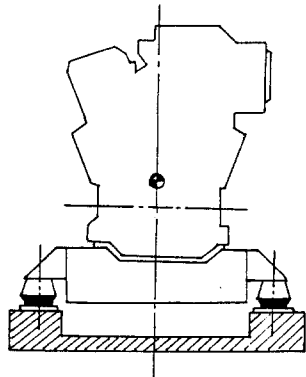


그림 1. 엔진마운트 System

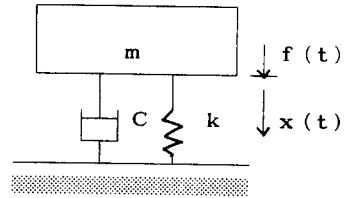


그림 2. 1자유도 Modeling System

그림 2.와같이 1자유도 Modeling System의 운동방정식을 Newton의 제 2법칙으로 표시하면 다음식(1)과 같아진다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (1)$$

여기서, m = 질량
 c = 감쇠계수
 k = 엔진마운트의 스프링 상수

\ddot{x} = 가속도

\dot{x} = 속도

x = 변위

$f(t)$ = 외력의 가진함수

이 System의 고유진동수(Natural Frequency, f_n)는 다음과 같다.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{k_d}{m} \right]^{1/2} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{k_d \cdot g}{W} \right]^{1/2} \quad (2)$$

완충재의 정적 스프링상수 k_s 에 대한 동적스프링상수 k_d 의 비인 동배율 α 는 다음 식(3)로 나타낼수 있으므로,

$$\alpha = \frac{k_d}{k_s} \quad (3)$$

식(2)와 (3)에 의해 고유진동수 f_n 는 다음 식(4)와 같이 정리된다.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\alpha \cdot g}{\delta_{st}} \right]^{1/2} \approx 4.98 \left[\frac{\alpha}{\delta_{st}} \right]^{1/2} \quad (4)$$

여기서 δ_{st} 의 단위는 cm이며, 정적 스프링상수 k_s 는 하중 대 처짐의 비로서 다음식과 같이 정의된다.

* 유니슨산업(주) 유니슨기술연구소, 경희원

$$k_s = \frac{\Delta P}{\Delta x} \quad (5)$$

여기서 ΔP 는 정하중, Δx 는 처짐량 그리고 k_s 는 정적스프링상수이다. 따라서,

$$\alpha = \left[\frac{f_n}{4.98} \right]^2 \cdot \delta_{st} \quad (6)$$

이며, 동배율을 알면 식(3)를 이용하여 동적스프링상수를 계산할 수 있다.

3. 엔진마운트의 제작

방진고무를 이용한 엔진마운트(그림 3.)의 제작에 있어서 특히 고려되어야 할 사항은 다음과 같다. 설계, 제작하고자 하는 엔진마운트는 큰하중에 의한 내구성과 8mm이상의 선형성이 보장되어야 하고, 큰 파고에 의한 충격으로부터 엔진을 보호해야 되며, 종방향 및 횡방향의 엔진거동에선도 안정성이 있어야 한다. 또한 내유성, 내열성, 내염성 등 환경변화에도 적용해야 한다. 국내의 S중공업에서 요구한 설계기준 및 성능 사양은 표 1.과 같고, 그림 4.과 같이 원추형 방진고무의 중간부분에 적층용철판(그림4. (7))의 유무에 따라 2가지 모델로 구분하여 제작하였다.

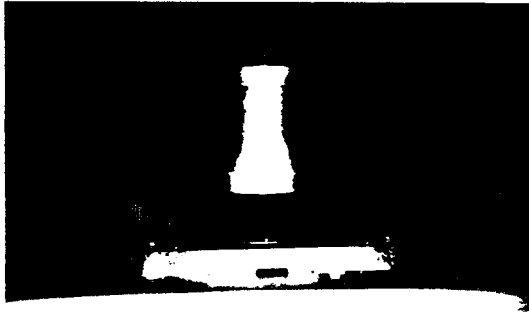


그림 3. UEM 엔진마운트

표 1. 설계기준 및 성능사양

항 목	내 역
정적스프링 상수(k_s)	280 kg/mm - 560 kg/mm
최대변위 (선형영역)	8 mm - 10 mm
동배율	1.3 - 1.45
선박 진동레벨 허용기준 (ISO/DIS 6954)	5 Hz - 100 Hz 9 mm/sec 이하 (Overall)

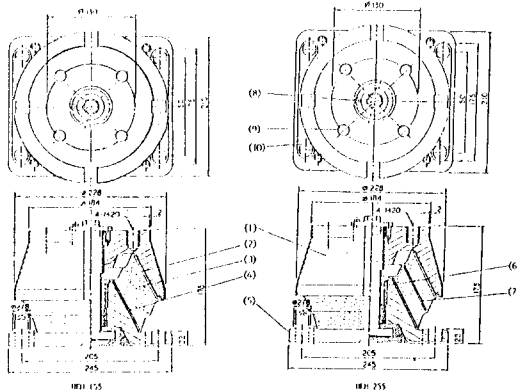


그림 4. 엔진마운트의 조립도

4. 성능시험

UEM 엔진마운트 제작에 사용된 고무시편의 재료시험 및 제품의 성능시험에 사용된 주요 시험장비의 제원은 표 2.와 같다.

표 2. 성능시험 주요장비의 제원

시험항목	시험기자재명	제 작 사	Type	용 도	
정하중시험	수직	만능재료 시험기	대경공업	VTM	30톤압축시험용
	수평	대용량 압축시험기	유 니 슨 산업(주)	UNS-TM001	압축전단시험 압축(3000톤) 전단(300톤)
동 하 중 시험	주파수분석기 FFT(2ch)	B & K	2034	주파수 및 진동 소음레벨 분석	
	Piezo-Type Accelerometer	B & K	4370	진동측정센서	
	Force Transducer	B & K	8201	힘 측정센서	
	Impact Hammer	유니슨기술연구소	-	충격가진 가진력: 16000 N	
현 장 장 착 시험	Tape Recorder	B & K	7005	기록 및 재생용	
	Vibration Analyzer	B & K	2515	주파수 및 진동 레벨 분석	
	발전기엔진	쌍용중공업(주)	-	선박용발전	

4.1. 방진고무 시편의 물리적 특성

KSM 6518 - 91 KS규격에 따른 시편제작 및 재료의 물리적 시험을 공인기관에 의뢰하여 표 3.과 같은 결과를 얻었다.

표 3. 엔진마운트 방진고무시편의 물리적 특성표(KSM 6518-91)

시 험 항 목	기 준 치	시 험 결 과 치	
경도 (HS)	55 ± 5	57	
인장강도 (Kg/cm ²)	175 이상	243	
신장율 (%)	450 이상	620	
노화시험 (100±1°C × 70hrs)	경도 변화율	+15 이하	2
	인장강도 변화율(%)	-15 이상	-11.7
	신장율 변화율(%)	-40 이상	-16.5
압축영구줄임율(%, 100±1°C×22hrs)	40 이하	28	
오존균열시험 (농도: 50pphm, 온도: 40°C, 신장: 20%, 시간: 72hrs)	균열없을것	균열없음	

4.2 정하중시험

4.2.1 수직방향의 정하중 시험

그림 5.와 같이 압축시험기를 이용하여 엔진마운트의 수직방향으로 개당 0.5톤씩 7.5톤까지 증가시켜가며 변위를 측정하였고, 선형하중 - 변위선도에서 식(5)를 이용하여 정적스프링 상수 k_s 를 정하였다.



그림 5. 수직방향의 정하중시험

4.2.2 수평방향의 정적시험

그림 6.과 같이 JIG를 제작하여 대용량 압축시험기(수직 3000톤, 수평300톤)로 수직방향의 일정한 하중 (개당 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8톤)을 가압한 상태에서, 수평방향으로 개당 0.5톤씩 8톤까지 증가시켜가며, 변위를 측정하였다. 선형하중-변위선도에서 식(5)를 이용하여 수직하중변위에 따른 X, Y축의 정적스프링 상수 k_s 를 정하였다.

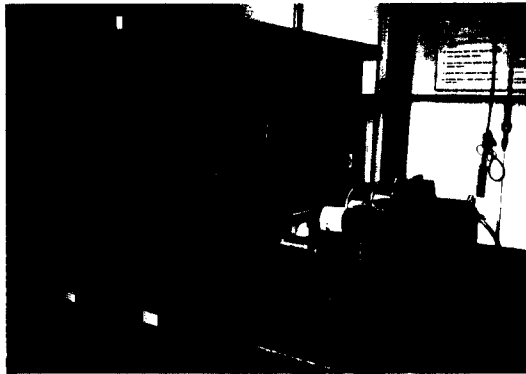
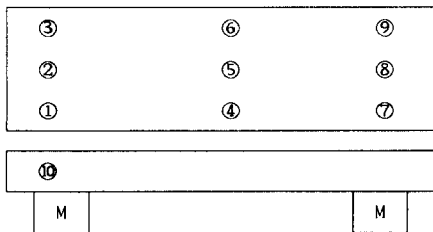


그림 6. 수평방향 정적시험용 JIG와 대용량 압축시험기

4.3 동하중시험

그림 7.과 같이 엔진마운트 4개를 장착한 System을 구성하여 Fixture에 가속도계를 부착하고 각 위치점(9 Point)에서 충격을 가하여 가속도와 충격하중을 동시에 측정, 모우드해석 프로그램인 SMS (Structure Measurement System)를 이용하여 이 System의 고유진동수와 Damping계수를 구하였다.



① - ⑨ : 가진력 위치 ⑩ : 질량(부가베이스)
⑤ : 가속도계 M : 엔진마운트

그림 7. 동하중 시험 System

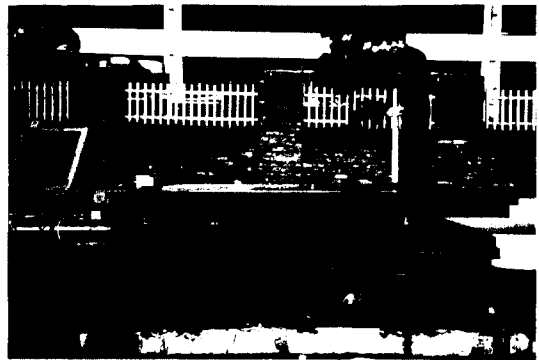


그림 8. 동하중 시험

4.4 엔진장착시험

엔진마운트의 성능을 평가하기 위하여 그림 9.와 같이 엔진 운전시 엔진에 마운트를 장착하고, 그림 10.과 같이 진동 측정위치를 설정하였으며, 각 측정점에 대하여 가속도계 (B&K 4370)를 부착하여 3축 (X, Y, Z)방향의 진동레벨을 측정, 4Ch Tape Recorder (B&K 7005)에 녹음하여 Lab에서 2Ch FFT분석기 (B&K 2034)로 진동레벨을 분석하였다. 엔진가동시 X, Y, Z축의 진동레벨 측정 및 분석범위는 다음과 같고, 진동측정 및 분석시스템은 그림 11.과 같다.

- 1) 방진된 엔진 System의 Base 및 바닥구조물의 진동측정 및 분석평가
- 2) 엔진, 축, 발전기의 진동레벨 측정 및 분석
- 3) 110 % Over Load상태에서의 엔진, 축, 발전기의 진동레벨 측정 및 분석

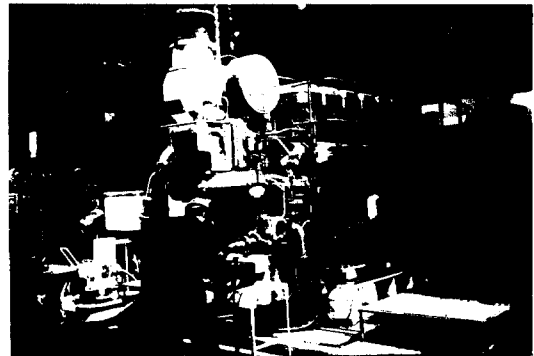


그림 9. 방진된 엔진시스템의 진동레벨 측정

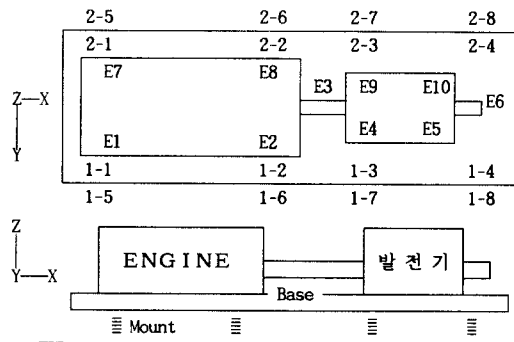


그림 10. 엔진 가동시 3축방향 진동레벨 측정점

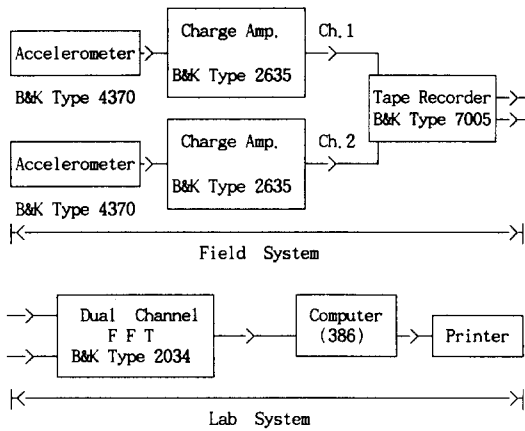


그림 11. 진동 측정 및 분석 시스템

5. 시험결과 및 고찰

5.1 정적시험결과

엔진마운트 UEM-155, UEM-255의 정적시험결과는 그림 12.에 나타내었고, 그림13.은 모델 UEM-255를 수직방향으로 개당 2톤의 가압상태에서 수평방향(X축)의 하중-변위선도로서 Hysteresis 곡선임을 알 수 있다. 또한, 수직·수평방향의 Stiffness는 그림14.에 표현하였다. 그림12.에서 나타난 바와 같이 사용가능하중은 UEM-155의 경우 1-4톤, UEM-255는 1-6톤임을 알 수 있다. 따라서 가장 적당한 하중용량은 선형영역의 중간지점인 2톤과 3톤으로 생각할 수 있다. 표4.에서 정리한 바와 같이 UEM-155, UEM-255의 최대선형변위는 12mm와 8.7mm이고 정적처짐량은 각각 7mm, 6mm정도이므로 표1.의 설계기준에 부합된다.

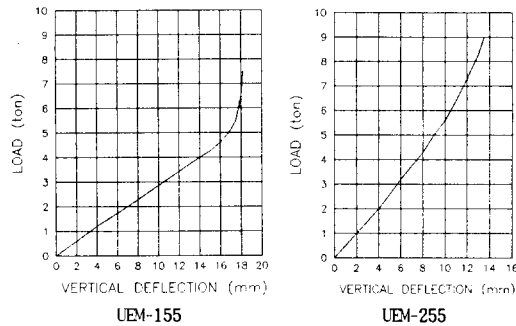


그림 12. 정적시험(수직방향)하중-변위 선도

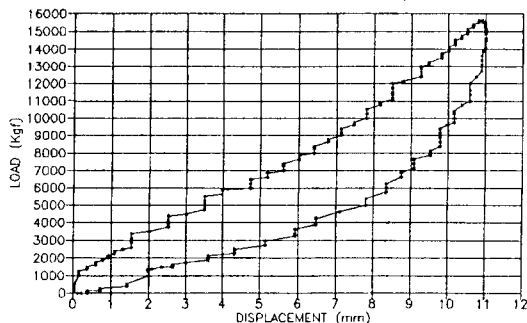


그림 13. 정적시험(수평방향)하중-변위 선도

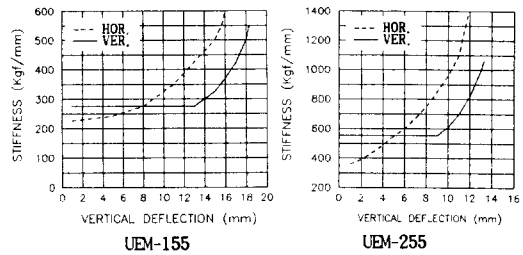


그림 14. 정적처짐에 따른 Stiffness선도 (수직·수평방향)

표 4. 모델별 엔진마운트의 정적시험 결과

내용	모델명	UEM-155	UEM-255
정적스프링상수 (k_s)		277.8(Kg/mm)	555.6(Kg/mm)
최대변위(선형영역)		12(mm)	8.7(mm)
최대변위(비선형영역)		18.3(mm)	13.5(mm)
Serviceability Load		2 (ton)	3 (ton)
Service. Load Range		1-4 (ton)	1-6 (ton)

5.2 동적시험 결과

충격시험에서 얻어진 주파수응답함수(Frequency Response Function)를 모우드해석하여 고유진동수와 Damping계수를 구하였고, 식(3)과 (6)을 이용하여 얻은 동적스프링 상수 k_d 는 표5.에 나타내었다.

표 5. 모델별 엔진마운트의 동적시험 결과

내용	모델명	UEM-155	UEM-255
동배율(α)		1.46	1.31
Damping Factor		5.886(%)	5.459(%)
동적 스프링상수 (k_d)		405.6(Kg/mm)	727.8(Kg/mm)

5.3 엔진장착시험의 진동레벨 측정결과

UEM 마운트를 발전기엔진에 장착하여 정지상태에서 충격시험을 수행하려 하였으나 여러가지 여건으로 인해 실시하지 못하였다. 다만 가동중에 진동응답을 측정하였으며 분석한 결과는 다음과 같다.

표 6.은 엔진 System 방진 Base에서 측정위치에 따른 진동레벨(Peak값)를 나타내고, 그림 15.는 그중 측정 위치점 1-2 위치에서 수직진동레벨(rms값)을 보여준다. 주된 주파수는 12 Hz와 42 Hz성분임을 알 수 있으며, 이는 엔진회전부의 회전수인 720rpm과 발전기의 회전수인 2520rpm에 기인하리라고 생각된다.

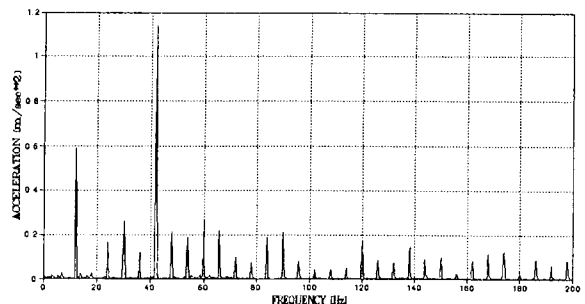


그림 15. 엔진 System 방진 Base에서의 진동레벨 (rms)

표 6. 엔진 System 방진 Base에서의 진동레벨

측 정 위치점	진동레벨 주파수(HZ)	가속도[m/sec ²] _{Peak}			변 위 [mm] _{P-P}		
		X	Y	Z	X	Y	Z
1-1	12	0.366	0.49	0.85	0.129	0.172	0.3
	42	0.484	2.18	1.4	0.014	0.063	0.04
1-2	12	0.358	0.09	0.84	0.126	0.032	0.294
	42	0.464	0.445	1.61	0.013	0.013	0.046
2-3	12	0.387	0.076	0.86	0.136	0.027	0.3
	42	0.325	0.851	1.95	0.009	0.025	0.056
2-4	12	0.42	0.24	0.76	0.147	0.084	0.266
	42	0.49	1.91	0.91	0.014	0.055	0.026

표 7.은 방진 Base 밑, 바다 구조물에서 측정위치에 따른 진동레벨(Peak 값)을 나타내고 그림 16.은 그중 측정 위치점 1-6 위치에서 수직진동레벨(rms 값)을 보여준다. 주된 주파수는 12Hz 와 42Hz 성분임을 알 수 있으며 12Hz 와 42Hz의 진동레벨은 각각 13배, 26배 정도 차이가 있음을 알 수 있다.

표 7. 바다 구조물에서의 진동레벨

측 정 위치점	진동레벨 주파수(HZ)	가속도[m/sec ²] _{PEAK}			변 위 [mm] _{P-P}		
		X	Y	Z	X	Y	Z
1-5	12	0.019	0.088	0.087	0.007	0.031	0.03
	42	0.048	0.75	0.342	0.001	0.022	0.01
1-6	12	0.013	0.012	0.066	0.005	0.004	0.023
	42	0.014	0.216	0.06	0.0004	0.006	0.002
2-7	12	0.017	0.012	0.062	0.006	0.004	0.022
	42	0.012	0.276	0.14	0.003	0.008	0.004
2-8	12	0.02	0.045	0.09	0.007	0.016	0.032
	42	0.02	0.525	0.305	0.0006	0.015	0.009

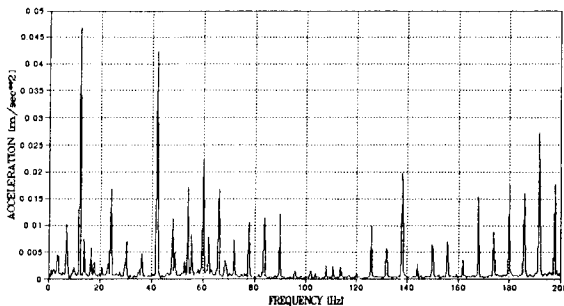


그림 16. 바다 구조물에서의 진동레벨 (rms)

바다 구조물에서 측정된 진동레벨중 가장 큰 Overall값을 표8.에 정리하였다. 이는 선박진동레벨의 허용기준인 9mm/sec 이하임을 알 수 있다.

표 8. 바다 구조물에서의 진동레벨 (Overall)

측 방 향	속 도 [mm/sec] _{peak}
X 축	0.55
Y 축	3.2
Z 축	3.11

6. 결 론

엔진마운트를 제작하여 성능시험을 수행함으로써 시험방법과 검증결과를 고찰하였고 다음과 같은 결론을 내렸다.

1) 엔진마운트의 정적스프링상수가 모델 UEM-155인 경우 $k_s = 277.8$ (kg/mm)이고, UEM-255인 경우 $k_s = 555.6$ (kg/mm)로서 적은 엔진마운트의 정적스프링상수가 2배정도 됨을 알 수 있다.

2) 선형영역에서의 최대변위가 12mm(UEM-155), 8.7mm(UEM-255)로서 사양서보다 적용율을 20%확대시켜 성능을 개선할 수 있었다.

3) 현장 여건상 엔진 정지상태에서 충격시험을 하지 못하였기 때문에 엔진마운트의 동적스프링상수를 비교하지 못하였으나, 엔진마운트를 적용한 엔진시스템의 방진Base와 바다구조물에서의 진동레벨 측정자료를 고찰해보면 약10배 이상의 차이가 있음을 보여주고 있다.

4) Engine의 정상운전보다 110% Over Load운전시 수직(Z축)방향보다 수평(Y축)방향, 종(X축)방향의 진동레벨이 증가함을 알 수 있었다.

7. 후 기

엔진마운트의 현장장착시험은 쌍용중공업(주) 협조로 수행되었고, 엔진기술연구소 연구 1부의 도움을 받았음을 밝히며, 관계되는 분들께 감사를 포함합니다.

참고 문헌

1. KSM 6518 - 91, "가황고무의 물리적시험방법"
2. KSM 6604 - 1985, "방진고무시험법"
3. 유춘화, 이신언, "방진고무재료의 진동특성 해석 및 실험(II)" 사단법인 한국항공우주학회(춘계), PP.5-10,1992.
4. Noise and Vibration Group, "Vibration Control in Ships", VERITEC Marin Technology Consultants, PP.6.4-6.49,1985.
5. 정일록, "소음 진동 이론 과 실무", 녹화출판사,1988.