

이중탄성지지 합정용주기관의 충격, 진동 및 고체음 성능평가

Performance Evaluation of Shock, Vibration and Structure-borne Noise for Double-resilient Mounting Engine Module

유 광 택, 박 정 근 (쌍용중공업(주)), 정 정 훈, 김 병 현(한국기계연구원)
 K. T. Yoo, J. G. Park(SSHI), J. H. Chung, B. H. Kim(KIMM)

1. 서 언

합정용 주기관은 내충격 및 고체음 저감을 위하여 이중탄성지지시스템으로 설치되고 있다. 이중탄성지지에 의한 방법은 기뢰(mines)의 비접촉 수중폭발 공격으로부터 충격손상을 방지하며, 또한 수중으로 고체음이 전파되어 피탐되는 가능성을 저감하는데 그 목적이 있다.

합의 전투유지능력(survivability) 향상을 위하여 이중탄성지지에 의한 합정용 주기관의 내충격, 방진 방음설계기술이 요구되고 있으나 이 분야에 대한 국내 연구경험이 일천하여 대부분의 경우 선진외국기술에 의존하고 있는 실정이다<1>.

본 고에서는 군의 요구사항을 만족시키기 위하여 선진 외국사에서 수행한 이중탄성지지 합정용 주기관의 충격, 진동 및 고체음 성능평가방법을 분석하였으며, 이를 토대로 해석프로그램을 개발하였고, 시험평가시스템을 구성하여 동분야의 설계 및 시험평가 기술자립을 도모하였다. 그리고 합정용 주기관 및 부품의 충격, 진동 및 고체음 품질인증 방안을 제시함으로써 장비 국산화개발에 기여토록 하였다.

2. 충격, 진동해석 프로그램개발

2.1 좌표계

n개의 강체와 m개의 스프링 및 댐퍼로 이루어진 다물체계를 고려한다. 각 강체, 스프링 및 댐퍼의 Global 좌표계에 대한 위치는 위치벡터 및 Euler's Angles로써 표시되며, Global 좌표계는 기초(혹은 선체)에 고정된 것으로 간주한다.

2.2 운동방정식

small motion을 가정하면 6n개의 자유도를 가진 계의 운동방정식은 다음과 같이 연성된 matrix형태의 미분방정식으로 표시할 수 있다.

$$M \cdot \ddot{x} + C \cdot \dot{x} + K \cdot x = F \quad (1)$$

여기서 \ddot{x}, \dot{x}, x 는 각각 $6n \times 1$ 의 계의 가속도, 속

도 및 변위벡터이며, M, C, K는 각각 $6n \times 6n$ 의 계의 관성, 감쇠 및 강성행렬이다. 또한 F는 $6n \times 1$ 의 외 부가진력벡터이다.

위의 방정식으로 부터 각 강체 무게중심의 변위 (T_i, R_i)를 구한후 다음식을 이용하여 각 마운트 및 연결부위의 변위를 구할수 있다.

$$x_{pi} = \begin{bmatrix} T_{pi} \\ R_{pi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_i + R_i \times r_{pi} \\ R_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서,

x_{pi} : 강체 i 상에 있는 임의 p점의 변위

T_{pi} : x_{pi} 의 병진운동변위 성분

R_{pi} : x_{pi} 의 회전운동변위 성분

r_{pi} : 강체 i 무게중심에 대한 p점의 위치벡터

2.3 정하중 응답해석

정하중조건에서의 운동방정식 (1)은

$$Kx = F \quad (3)$$

와 같이 표현된다.

중력가속도를 작용외력으로하여, 해상조건 및 함의 운동(pitching, rolling)에 따른 각 강체 무게중심에서의 정하중변위 x와 무게중심으로부터 r만큼 떨어져있는 p점 스프링(마운트)요소의 변위를 식 (2)를 이용하여 구하였다.

2.4 자유진동해석

선형스프링계에 대한 자유진동해석을 위한 운동방정식은 다음과 같다.

$$M \cdot \ddot{x} + K \cdot x = 0 \quad (4)$$

여기서 $x = X_0 e^{i\omega t}$ 라고하면

$$(K - \omega^2 M) \cdot X_0 = 0 \quad (5)$$

와 같이 표현된다.

따라서 자유도가 6n개일 경우, 6n개의 고유진동수 및 고유진동형을 계산할 수 있고 이것을 이용하여

엔진기진력과의 공진가능성등을 검토할 수 있다.

2.5 내충격 해석

기초에 충격하중을 받는 탄성지지 강체의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$M \cdot \ddot{u} + C \cdot \dot{u} + K \cdot u = -M \cdot A \cdot \ddot{y}$$

$$u = x - A \cdot y \quad (6)$$

여기서,

x : 강체의 절대변위 벡터

y : 기초의 절대변위 벡터

u : 기초에 대한 강체의 상대변위 벡터

A : 단위 행렬로 이루어진 interlinking matrix

본 프로그램에서는 Newmark method를 이용한 직접시간적분법을 사용하여 각 강체의 상대변위 및 절대가속도를 계산하였다. 그리고 강체를 연결하는 마운트 및 스프링요소의 변형량과 스프링력을 구하였다.

2.6 스프링 비선형성 고려

대부분의 탄성마운트는 비선형적인 특징을 가지고 있다. 이러한 마운트의 비선형성을 고려하기 위해서, 그림1 비선형마운트의 특성곡선으로부터 식(7)과 같이 실제 스프링력 F_{spring} 을 선형력과 비선형력 F_{NL} 의 합으로 표현하였다.

$$F_{spring(x)} = k \cdot x + F_{NL}(x) \quad (7)$$

따라서 강체들 사이에 연결된 모든 비선형스프링(마운트)력의 합성행렬을 $P(x)$ 라할 때 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$M \cdot \ddot{x} + C \cdot \dot{x} + K \cdot x = F(t) - P(x(t)) \quad (8)$$

즉, 비선형 스프링력을 외력으로 간주함으로써 그 시점에서의 선형운동방정식을 얻을 수 있다.

2.7 해석프로그램의 평가

그림 2는 본 해석에 사용된 이중탄성지지 합정용 주기관을 6개의 강체와 지지스프링계로써 이상화한 모델이다. 좌,우현 주기관은 base frame에 탄성지지 되어 있고 transverse girder에 의해 연결된 base frame이 선체에 탄성지지된 이중탄성지지구조이다.

해석프로그램의 평가를 위해서 외국사의 계산결과 <2>와 개발프로그램에 의한 결과를 정하중 조건, 자유진동 및 충격응답에 대하여 비교하여 표 1,2 와 그림 5에 보였다.

정하중 해석결과(표 1)와 자유진동해석결과(표 2)는 외국사의 해석결과와 일치함을 알 수 있다.

충격응답결과(그림 5)는 차이를 보이고 있는데 이는 균비로 분류되고있는 BV043<7>의 충격설계기준

Double half-sine pulse(그림 3)를 적용하지 못하였기 때문에 추정된다. 따라서, 프로그램검증을 충격입력값(그림 4)이 알려진 그림 7의 비선형 이중탄성지지 Starting air compressor에 대하여 수행하였다. 그림 6과 같이 외국사의 결과<3>와 일치하는 것을 보임으로써 프로그램을 검증하였다.

3. 고체음 시험평가

합정용 디젤엔진으로부터 발생하는 소음은 흡기소음, 배기소음, 방사소음, 고체음이 있다. 고체음은 고주파영역의 진동에 의해 나타나는 소음으로 보통 마운트를 설치하여 줄인다.

고체음 관련기준에 따라 탄성마운트위의 가속도레벨을 단일탄성지지 및 이중탄성지지 주기관에 대하여 계측하였다. 그림 8은 계측장비 구성도이다.

8개 RD214B 마운트로 주기관을 단일탄성지지한 경우 마운트위의 가속도레벨은 그림 9와같이 허용레벨을 초과한다. 따라서 이를 만족하기 위해서는 이중탄성마운트의 사용이 불가피함을 알 수 있다.

이중탄성지지 고체음계측은 내충격조건을 만족하도록 선정된 상부 엔진마운트 'Dunlop P 8 1/4 D'와 하부 base frame mount 'Dunlop super D'로 지지된 실제 주기관에 대하여 수행하였다<4>.

상,하부 마운트위치에서 수직방향 가속도레벨은 그림 10과 같고, 이중탄성지지에 의해 하부 base frame mount위 가속도레벨이 허용레벨이하로 되었다. 기관연소과정에 의해 주로 도입되는 고주파진동이 효과적으로 감소됨을 알 수 있으며 상,하부 마운트에 의해 각각 약 20dB의 고체음이 저감되었다.

이중탄성지지 설계시 적정한 마운트의 선정뿐만 아니라, base frame은 torsion과 bending 모우드를 가지므로 공진회피와 고감쇠제질을 갖도록 최적화할 필요가 있다. 실 적용된 본 고의 base frame은 복합 콘크리트를 채운 구조로 되어 있다.

4. 품질인증방안

합정용 주기관 및 탑재장비의 품질은 수요군의 요구사항과 비교하여 인증되어야 한다.

4.1 군 요구사항

합정용 주기관의 충격,진동,소음관련 군 요구사항은 표 3과 같이 일반적으로 MIL 규격에 근거하고 있으며 이에 상당하는 BV등 타규격을 용인하고 있는 입장이다.

4.2 내충격설계검증

주기관 및 탑재장비는 함운항시 해상조건에 따른

정하중과 충격기준을 만족하도록 설계되어야 한다.

정하중설계검증은 통상 다음 하중조건<5>,

- dead wieght
- max. engine torque
- max. engine torque combined with
 - . trim $\pm 5^\circ$, heeling $\pm 15^\circ$ (MIL-E-23457B)
 - . load multiple
- heavy sea condition(MIL-E-23457B)
 - . pitching $\pm 10^\circ$, rolling $\pm 45^\circ$

에 대하여 수행하고 마운트 및 스프링요소의 정적 변형량, 스프링력을 허용값과 비교하여 안전성을 평가한다.

내충격해석은 미 해군의 DDAM(Dynamic Design Analysis Method)<6>으로 대표되는 spectral analysis 방법과 NATO국가들이 사용하는 직접시간적분법을 이용한 시간영역에서의 과도응답해석(transient response analysis)방법등이 있다. 표 4는 각국의 충격계산관련규격이다.

5Hz이하의 고유진동수를 갖는 비선형 탄성지지체에 DDAM을 적용하는 것은 불합리하다고 알려져 있다<1>. 따라서, 2.5절과 같이 시간적분법에 의한 충격해석을 수행하고, 마운트 및 스프링요소의 충격 변형량, 스프링력과 각 강체의 가속도응답(residual load multiple)으로부터 내충격 안전성을 평가한다.

강체로 가정한 요소부품의 내충격검증은 부품의 무게중심에 '강체의 가속도응답 \times safety factor'의 충격력이 작용할 때 응력을 FEM 등의 방법으로 구하여 검증한다.

4.3 충격시험검증

MIL-STD-901C/D에서는 표 5와같이 시험대상장비의 중량에 따라 충격시험기 및 시험방법을 규정하고 있다<8>.

본 주기관은 중중량(heavy weight)충격시험을 수행하여야 하나 실제 수중폭발시험을 수행해야하는 어려움 때문에 실선 충격시험에 의해 검증될 것이다.

4.4 소음시험검증

MIL-STD-740-2에 고체음 계측위치와 방법 및 허용값을 규정하고 있다<9>. 이중탄성지지 함정용 주기관은 TYPE I으로 구별되며 마운트 위에서 1/3 octave band pass filter를 사용하여 계측한 가속도 레벨은 다음과 같이 표현된다.

$$L_a = 20 \log \left(\frac{a_{rms}}{a_0} \right) [dB] \quad (9)$$

단, a_{rms} : 측정가속도의 rms값

a_0 : 10^{-5} m/sec²

5. 결 언

함정용 이중탄성지지 주기관 충격,진동 및 고체음 성능평가방법을 분석하여, 충격,진동해석기술 개발 및 고체음 시험평가를 수행함으로써 동분야의 기술 자립을 도모하였으며 그 내용을 다음과 같이 정리할 수 있었다.

- 1) 고체음 저감성능이 요구되는 본 고의 함정용 주기관은 이중탄성지지구조가 필수적이라 고찰된다.
- 2) 내충격,내진동 해석프로그램을 개발하였으며 그 결과를 외국사와 비교하여 검증하였다.
- 3) 함정용 주기관의 내충격, 방진 및 고체음 품질인 증방안을 제시, 확립하였다.

참고문헌

- <1> 정정훈, 김병현, 정태영, "함정용 탑재장비의 내충격 성능평가기술", 대한조선학회지 제33권 제2호, 1996.
- <2> MTU, "Shock Calculation Report EAM 24 038", 1994.
- <3> IKL, "Design Report 124-232/0432-01-00-00", 1989.
- <4> MTU, "Airborne and Structureborne Noise Test Report EAM 24 853", 1995.
- <5> MIL-E-23457B, "Engine, Diesel Marine, Propulsion and Auxiliary, Medium Speed", 1976.
- <6> NAVSEA 0908-LP-000-3010, "Shock Design Criteria for Surface Ships", 1976.
- <7> BV043, "Building Specification for Ships of the Federal Armed Forces : Shock Resistance", 1985.
- <8> MIL-STD-901C/D, "Shock Tests, H.I.(High Impact); Shipboard Machinery, Equipment and Systems, Requirements for", 1963/1989.
- <9> MIL-STD-740-2(SH), "Structureborne vibratory acceleration measurements and acceptance criteria of shipboard equipment", 1986.
- <10> MIL-STD-167, "Mechanical Vibrations of Shipboard Equipment", 1974.

㉟ 1. Results of Static Analysis for Base Frame Mount

Load Condition		Dead Weight						Max. Engine Torque Combined with -15 ° Heeling					
		MTU			SSHI			MTU			SSHI		
Direction		T	L	V	T	L	V	T	L	V	T	L	V
Defl. (mm)	Min	0.00	0.00	-14.61	0.00	0.00	-14.62	-5.89	0.00	-3.72	-5.89	0.00	-3.72
	Max	0.00	0.00	-14.80	0.00	0.00	-14.80	0.00	0.00	4.77	0.00	0.00	4.78
Force (kN)	Min	0.00	0.00	-30.98	0.00	0.00	-30.99	-11.90	0.00	-7.51	-11.90	0.00	-7.52
	Max	0.00	0.00	-31.38	0.00	0.00	-31.38	0.00	0.00	9.65	0.00	0.00	9.65

㉟ 2. Results of Free Vibration Analysis

Frequency	MTU						SSHI					
	3.78 Hz(5th)						3.78 Hz(5th)					
Dir.	T	L	V	R _T	R _L	R _V	T	L	V	R _T	R _L	R _V
Ease Frame	0.000	-0.054	0.536	-0.022	0.000	0.000	0.000	-0.054	0.536	-0.022	0.000	0.000
Engine	0.000	-0.066	1.000	-0.087	0.000	0.000	0.000	-0.066	1.000	-0.086	0.000	0.000
Pedestal B/R	0.000	0.024	0.466	-0.296	0.000	0.000	0.000	0.024	0.467	-0.296	0.000	0.000

㉟ 3. 군 요구사항 관련규격

Attitude Limits	Shock Test	Shock Design	Vibration	Structureborne Noise
MIL-E-23457B	Keel Shock Factor (Ship) MIL-STD-901C/D (Equip.)	DDAM (BV043)	MIL-STD-167 (BV044)	MIL-STD-740-2

㉟ 4. Shock Calculation Standard

Nation	U.S.	Germany	NATO	U.K.
Standard	NAVSEA 0908-LP-000-3010A DDS 072-1(classified)	BV 043	STANAG 41 42	BR 30 21

㉟ 5. Shock Test Category

LIGHT W.	MEDIUM W.	HEAVY W.	
		FSP	LFSP
<550 lb (240kg)	<7,400 lb (3,357kg)	<60,000 lb (27,215kg)	<400,000 lb (181,436kg)

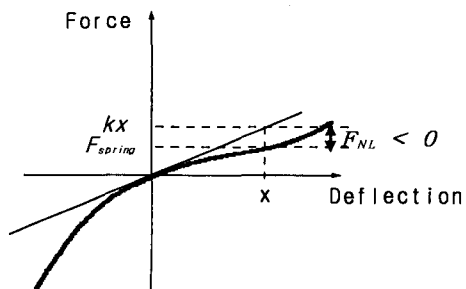


그림1. Characteristic Curve of Non-Linear Mount

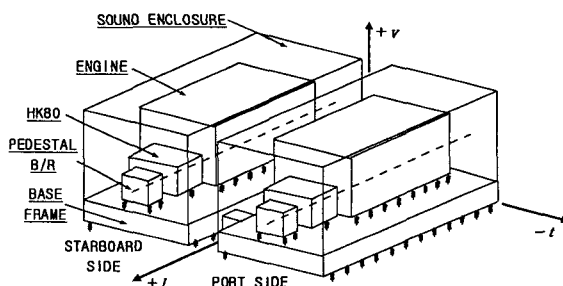


그림2. Rigid Body Model for Double-resilient Mounting Engine Module

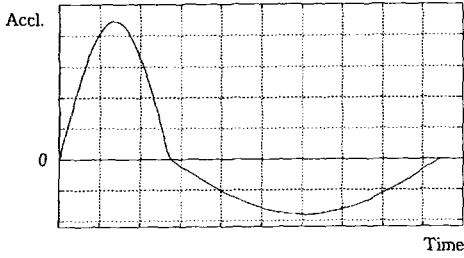


그림3. Double Half Sine Pulse in BV043

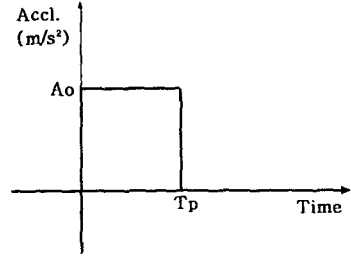


그림4. Rectangular Pulse

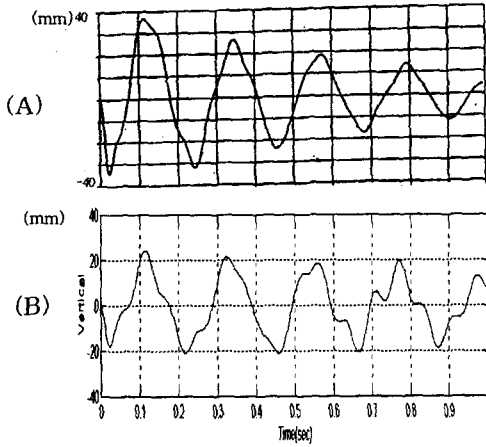


그림5. Shock Response of Base Frame Mount. (A) MTU / (B) SSHI

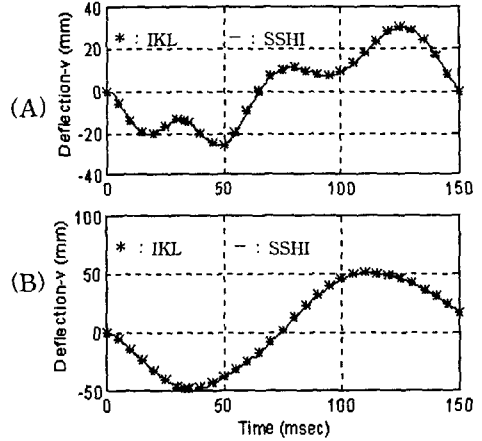


그림6. Shock Response of S. A. Comp., (A) Interm. Mass / (B) Comp.

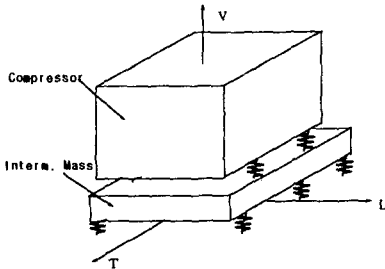


그림7. Rigid Body Model for Double-resilient Mounting S. A. Comp.

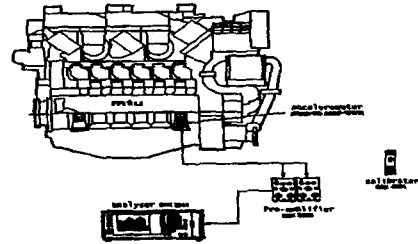


그림8. Lay-out for Structure-born Noise Measurements

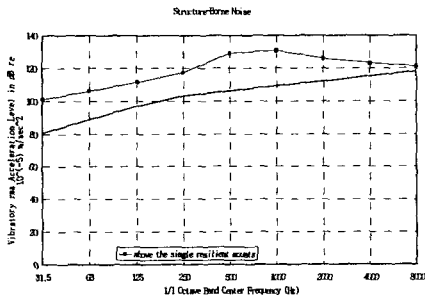


그림9. 1/1 Octave Band Levels in Single Mounting Engine

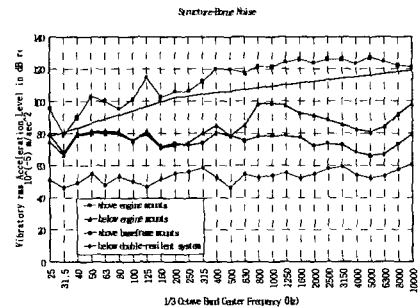


그림10. 1/3 Octave Band Levels in Double Mounting Engine