

2.5톤 군용차량 동특성 분석에 따른 내부구조물 설계 방안

양인아^{*1)} · 최우균¹⁾ · 정경욱¹⁾ · 심동혁¹⁾ · 손동협²⁾

¹⁾ LIG넥스원(주) L-SAM체계단

²⁾ 국방과학연구소 제1유도무기체계개발단

Design Method of Internal Structure Based on Dynamic Characteristic Analysis of 2.5ton Military Vehicle

Ina Yang^{*1)} · Wookyun Choi¹⁾ · Kyongwook Jung¹⁾ · Donghyouk Shim¹⁾ · Donghyeop Son²⁾

¹⁾ L-SAM System R&D, LIG Nex1, Co., Ltd., Korea

²⁾ The 1st Development Institute of Guided Weapon System, Agency for Defense Development, Korea

(Received 19 August 2021 / Revised 16 December 2021 / Accepted 27 January 2022)

Abstract

Electronic equipment mounted on military vehicles is exposed to external shocks and vibrations. This causes problems in tactical operation and also causes cost loss in equipment maintenance. Therefore, to optimize the test standards for military vehicles with vibration, dynamic characteristics should be analyzed and standardized through actual driving tests. In this paper, the internal structure of 2.5tons military vehicle is designed in the form of a drawer and lathe, and the dynamic characteristics are identified by experiment, and the design is proposed.

Key Words : Military Vehicle(군용차량), MIL-STD-810G(미 군사규격), Power Spectral Density(전력 스펙트럼 밀도), Grms(가속도 실효값)

기 호 설 명

PSD : Power Spectral Density
Grms : Root-Mean-Square Acceleration
x : System Response Displacement

1. 서 론

차량탑재 전자장비는 외부 충격과 진동에 노출⁶⁾된다. 특히 군용차량은 비포장도로와 같은 진동과 충격이 심한 환경에서 운용되기 때문에⁹⁾ 전자장비의 손상을 방지하기 위해 진동 감소를 통한 안정성 확보^{7,9)}를 요구받는다. 따라서 진동을 고려한 2.5톤 군용차량에 최적화된 시험규격을 위해 실제 주행시험을 통해 얻은 데이터의 동특성 분석으로 규격을 정리할 필요가 있다.

^{*} Corresponding author, E-mail: Ina.yang@lignex1.com
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

본 논문에서는 2.5톤 군용차량 내부에 동일면적에서 단면계수가 가장 큰 H-beam 형태^[2]의 선반 및 서랍형태 구조물을 설계^[3]하고자 한다. ○○벤은 선반형태, △△벤은 서랍형태로 설계하고 시험을 통해 발생하는 가속도를 분석하여 동특성 파악 후, 이를 고려한 설계를 제안한다.

2. 본 론

2.1 군용차량 내부구조물 설계를 위한 진동해석

2.1.1 강제감쇠진동 운동방정식

군용차량 시스템은 외부에서 진동과 충격에 의해 외력이 작용하고 군용차량 내부에 장착된 suspension을 통해 주행 시 노면으로부터의 진동 및 충격 하중을 감쇠시키는 강제 감쇠진동이다^[2,8].

$$\begin{aligned} \sum F &= ma \\ &= \frac{md^2x}{dt^2} \\ \sum F &= F_{external} + F_{damping} + F_{spring} \\ &= F(t) - \frac{cdx}{dt} - kx \\ \therefore F(x) &= m\ddot{x} + c\dot{x} + kx \end{aligned} \quad (1)$$

2.5톤 군용차량 시스템의 diagram은 Fig. 1과 같고 이를 Newton의 제 2법칙에 적용하면 식 (1)과 같이 운동방정식을 정리할 수 있다^[2,8].

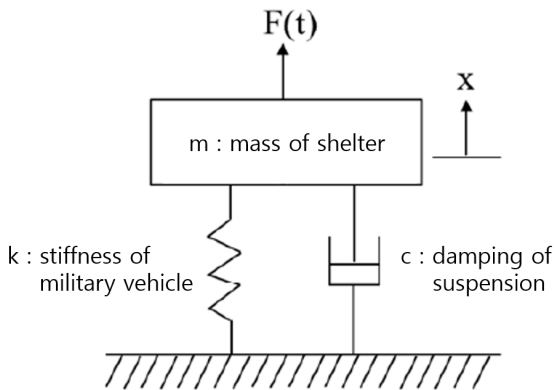


Fig. 1. Military vehicle system modeling

2.1.2 PSD를 통한 진동해석

일반적으로 기계시스템의 강제응답을 계산^[2]하는 과정은 다음과 같다. Stationary한 랜덤 가진 $f_k(t)$ 에 의해 시스템 응답 변위 $x(t)$ 가 Stationary라고 가정하면, Autocorrelation은 정의에 의해 식 (2)와 같다. 이는 신호 $x(t)$ 가 얼마나 빨리 변화하는가를 나타내는 척도가 된다^[2,4].

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau)dt \quad (2)$$

Impulse response function $y(t)$ 와 가진력 $f(t)$ 으로 응답 변위 $x(t)$ 를 표현하면 식 (3)이 되고^[2], 식 (3)을 식 (2)에 대입하고 정리하면 식 (4)가 된다^[2].

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t-\theta)y(\theta)d\theta \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \therefore R_{xx}(\tau) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau-\theta_2+\theta_1)y(\theta_1)y(\theta_2)d\theta_1d\theta_2 \end{aligned} \quad (4)$$

응답변위 $x(t)$ 의 파워스펙트럼 밀도함수($S_{xx}(\omega)$, power spectral density)는 정의^[2]에 의해 식 (5)가 되고, 식 (4)를 식 (5)에 대입하고 정리하면 식 (6)이 된다^[2,4].

$$S_{xx}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau)e^{-j\omega\tau}d\tau \quad (5)$$

$$\begin{aligned} S_{xx}(\omega) &= H(\omega)H(-\omega)S_{ff}(\omega) \\ &= |H(\omega)|^2S_{ff}(\omega) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 R_{ff} 는 가진함수 $F(t)$ 의 자기상관함수를, S_{ff} 는 $F(t)$ 의 PSD를 나타내고 $|H(\omega)|^2$ 는 복소주파수 응답함수 크기의 제곱을 나타낸다^[2]. 식 (6)은 가진력의 PSD, 구조물의 동특성 그리고 응답의 PSD간의 상관관계를 나타낸다. 즉, PSD는 주파수 응답 함수의 진폭의 제곱에 가진력에 대한 PSD를 곱한 것과 같다^[2,4]. 본 논문에서는 시험에서 가속도 센서로부터 측정된 가속도의 PSD를 입력으로 하여 출력의 가속도 응답(PSD)을 계산한다. 이 과정에서 적용되는 절차는 Fig. 2와 같다^[2,7].



Fig. 2. Data analysis process

○○밴과 △△밴의 셸터 내·외부 상·하단에 가속도 센서를 부착하고 X, Y, Z축 방향의 시간축 진동 데이터를 획득한다. 센서 및 군용차량의 좌표계 기준 방향^[2]은 아래 Fig. 3과 같다.

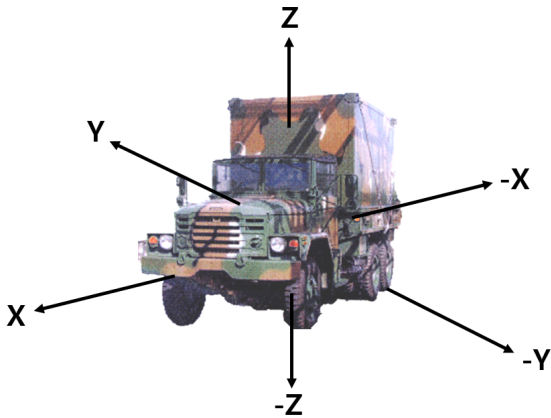


Fig. 3. Military vehicle coordinate system

주행 시 노출되는 진동은 일정한 규칙이 없고 임의의 진폭과 주기 특성을 갖는 랜덤 진동^[2]이다. 따라서 랜덤 진동을 분석하기 위해서 다양한 주파수 값의 신호 레벨의 분포를 비교할 수 있는 PSD를 사용한다. 또한 Grms는 가속도가 시간에 대하여 변화하는 경우의 평균적인 값이고 이는 통해 랜덤 진동의 전체적인 에너지를 분석할 수 있는 지표가 되므로 PSD와 함께 진동분석에 사용한다^[2].

2.2 ○○밴 및 △△밴 내부구조물 설계

2.2.1 ○○밴 및 △△밴 외부 형상

2.5톤 군용차량 동특성 분석 시험에 사용된 ○○밴과 △△밴의 외부 형상은 Fig. 4, Fig. 5이고 동특성 시험에 사용된 2.5톤 군용차량의 셸터는 길이방향 6.8 m, 폭방향 2.9 m, 높이 3.55 m^[3]이다.

2.2.2 ○○밴 및 △△밴 설계도면

선반과 서랍 구조는 H-beam 구조로 동일면적에서 보(beam)의 굽힘 강도를 측정하는 단면계수가 가장

크고^[2] 장비 보관을 위한 내부 공간 확보가 용이하다는 장점을 갖고 있다. ○○밴과 △△밴의 셸터 내부는 압출재를 기본으로 선반형태인 ○○밴과 서랍형태인 △△밴으로 나누어 설계를 한다^[3]. ○○밴과 △△밴의 설계 도면은 각각 Fig. 6과 Fig. 7이다.



Fig. 4. ○○van exterior shape



Fig. 5. △△van exterior shape

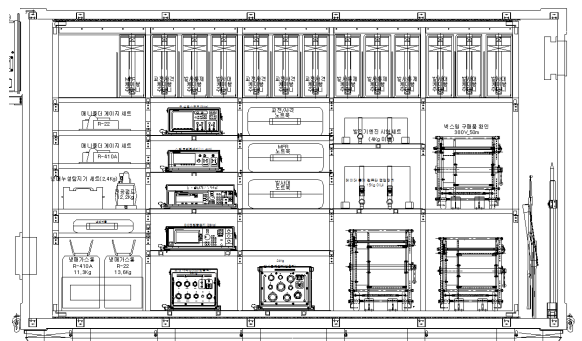


Fig. 6. Shelf-type ○○van design

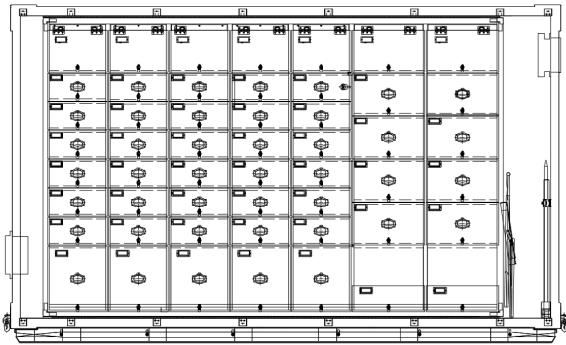


Fig. 7. Drawer-type ΔΔvan design

2.3 ○○밴 및 ΔΔ밴 동특성 시험

군용차량은 포장 및 비포장도로 모두 고려해야하므로 직선로에서 80 km/h, 자갈길에서 25 km/h의 속도로 시험을 구성하고 Table 1의 위치에 가속도 센서를 부착하여 X(roll), Y(pitch), Z축(yaw) 데이터를 획득한다. ○○밴 및 ΔΔ밴에 부착된 가속도 센서의 정확한 위치는 아래 Fig. 8, 9, 10, 11과 같다.

Table 1. Accelerometer installation location

No.	○○밴	ΔΔ밴
1	적치대조립체 전방하단	쉘터 바닥 전방
2	적치대조립체 후방하단	쉘터 바닥 후방
3	적치대조립체 전방상단	보관함 조립체상단(인도)
4	적치대조립체 후방하단	보관함 조립체하단(도로)
5	차량 후방차축	보관함 조립체상단(도로)

2.3.1 동특성 시험 결과

가속도 센서인 Accelerometer, VBOX Speed Sensor로 데이터를 측정하고 2~500 kHz 주파수 대역에서 대역 통과 필터링(Band Pass Filtering)을 수행하여 PSD그래프로 나타냈다. 이때 FFT는 signal conditioner(PCB 481A), PXI system을 통해 신호를 처리하였다. Fig. 12는 차량 상단의 X축, Y축, Z축 time domain 가속도 데이터이고 Fig. 13은 차량 하단의 X축, Y축, Z축 time domain 가속도 데이터이다.

Fig. 14는 차량 상단 X축, Y축, Z축 frequency domain PSD 데이터이고 Fig. 15는 차량 하단 X축, Y축, Z축 frequency domain PSD 데이터이다. 이때 분석에 사용한 센서는 ○○밴의 #3(상단), #1(하단)센서와 ΔΔ밴의 #5(상단), #4(하단) 센서이다. 대체적으로 차량 상단 및

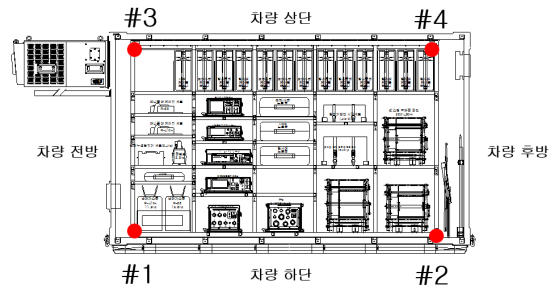


Fig. 8. ○○van Accelerometer position_inside

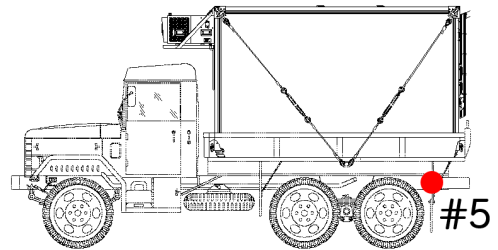


Fig. 9. ○○van Accelerometer position_outside

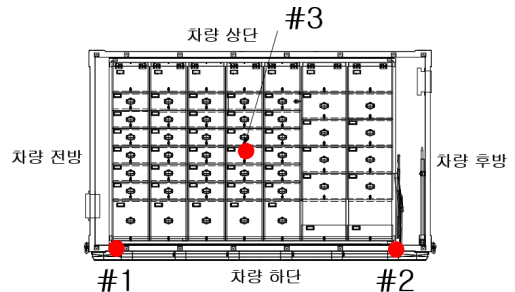


Fig. 10. ΔΔvan Accelerometer position_1

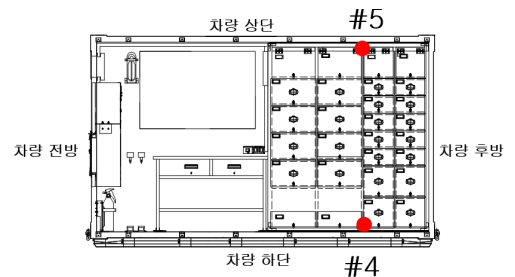


Fig. 11. ΔΔvan Accelerometer position_2

하단의 진동은 비슷하지만 상단 진동이 하단 진동보다 다소 크게 전달되고, 포장도로와 비포장도로에서 받는 진동의 차이는 적다³⁾.

2.5톤 군용차량 동특성 분석에 따른 내부구조물 설계 방안

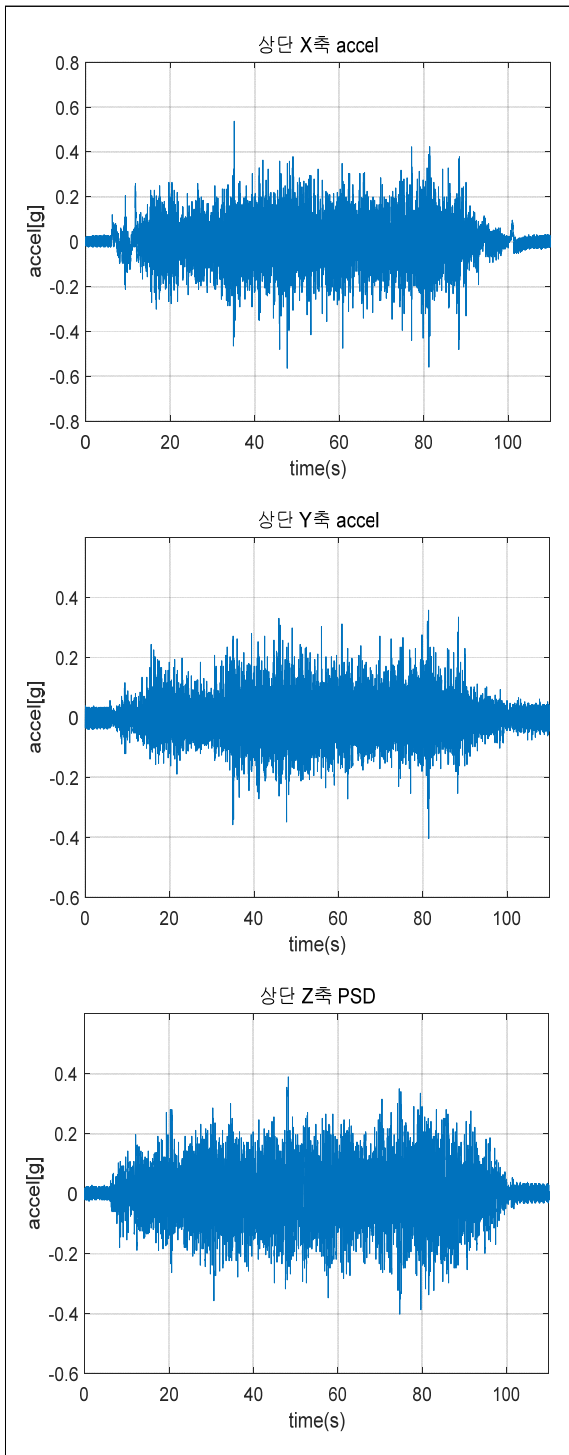


Fig. 12. Drawer and shelf structure acceleration data_top

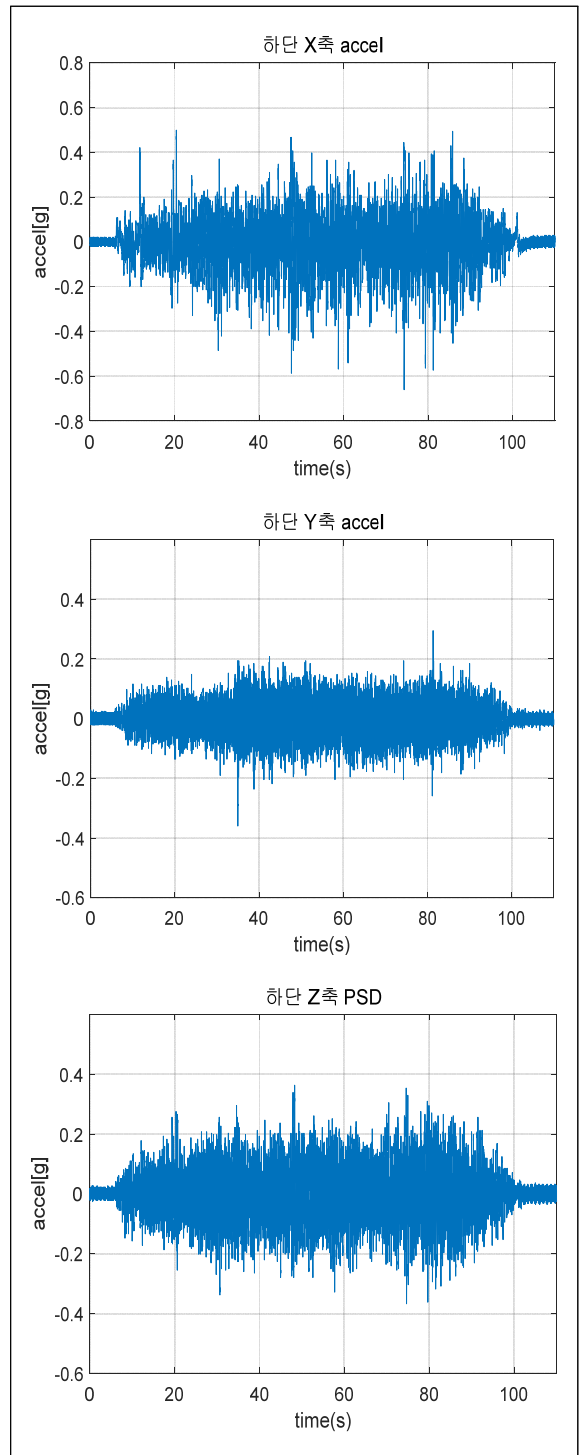


Fig. 13. Drawer and shelf structure acceleration data_bottom

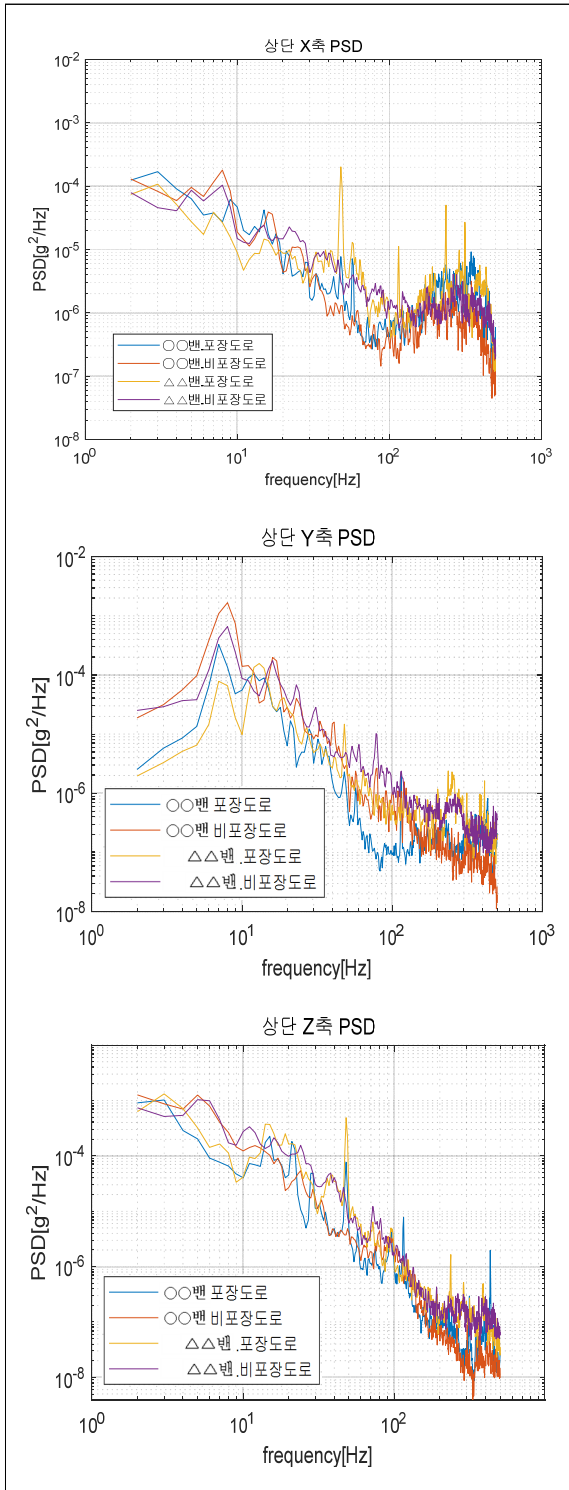


Fig. 14. Drawer and shelf structure PSD_top

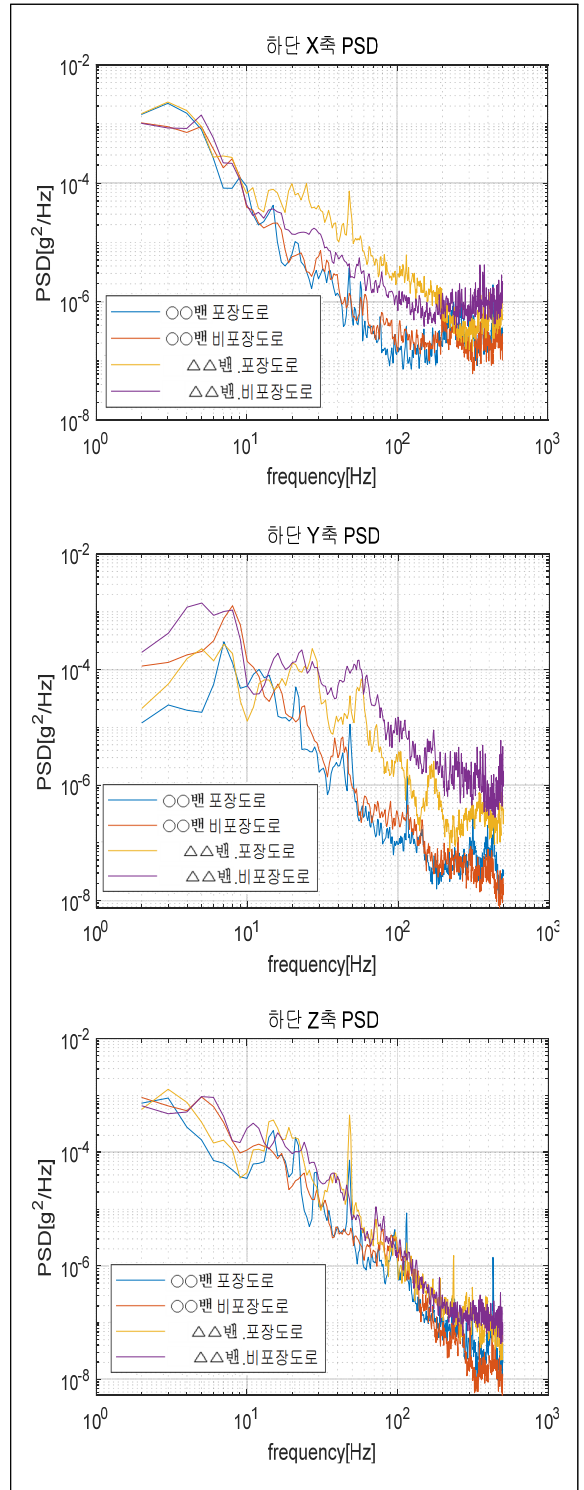


Fig. 15. Drawer and shelf structure PSD_bottom

2.5톤 군용차량 동특성 분석에 따른 내부구조물 설계 방안

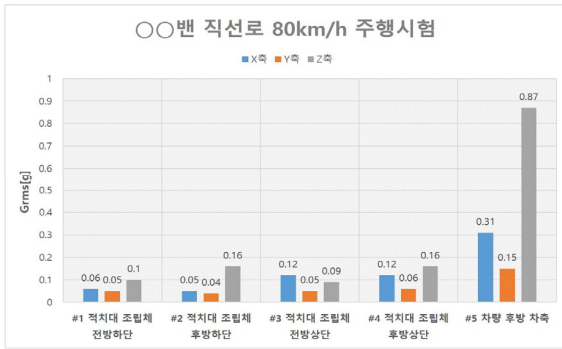


Fig. 16. Paved road ○○van driving test_Grms

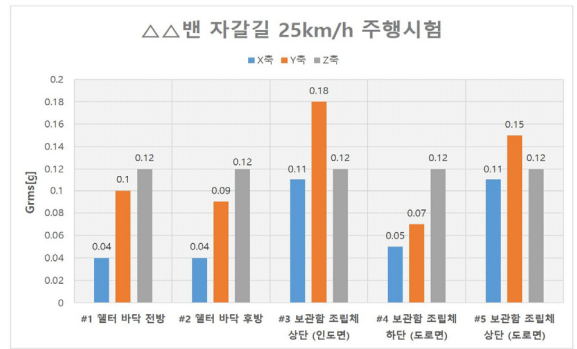


Fig. 19. Unpaved road △△van driving test_Grms

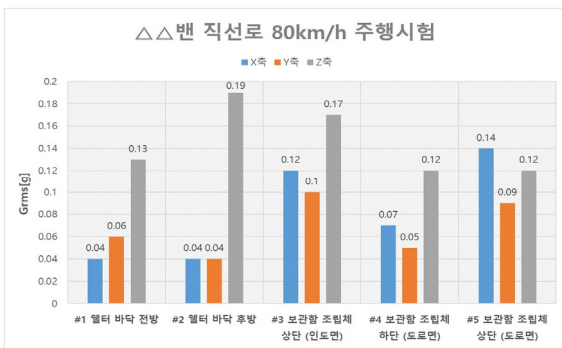


Fig. 17. Paved road △△van driving test_Grms

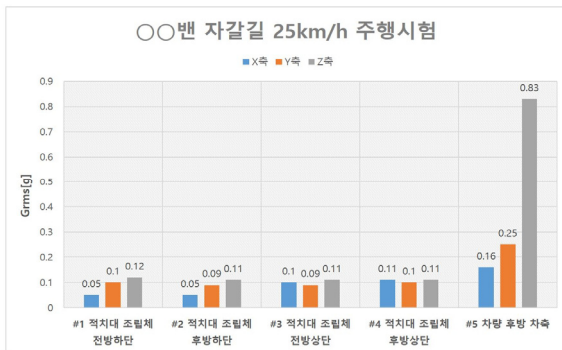


Fig. 18. Unpaved road ○○van driving test_Grms

○○밴과 △△밴 각각의 5개 가속도 센서 X, Y, Z 축에 대한 Grms 결과 그래프는 Fig. 16, 17, 18, 19와 같다. Fig. 16, 17은 ○○밴과 △△밴의 포장도로 주행 시험 Grms이고 Fig. 18, 19는 비포장도로 주행 시험 Grms이다. 이를 정리한 표는 Table 2이다. △△밴이 ○○밴보다 X축 32.7 %, Y축 9.1 %, Z축 50.2 % 큰 진동이 전달된다. 또한 80 km/h로 주행하는 ○○밴의

Table 2. ○○van and △△van Grms

	주행속도 [km/h]	○○밴			△△밴		
		X축	Y축	Z축	X축	Y축	Z축
1	80 km/h	0.06	0.05	0.1	0.04	0.06	0.13
	25 km/h	0.05	0.10	0.12	0.04	0.10	0.12
2	80 km/h	0.05	0.04	0.16	0.04	0.04	0.19
	25 km/h	0.05	0.10	0.12	0.04	0.09	0.12
3	80 km/h	0.12	0.05	0.09	0.12	0.10	0.17
	25 km/h	0.10	0.09	0.11	0.11	0.18	0.12
4	80 km/h	0.12	0.06	0.16	0.07	0.05	0.12
	25 km/h	0.11	0.10	0.11	0.05	0.07	0.12
5	80 km/h	0.31	0.15	0.87	0.14	0.09	0.12
	25 km/h	0.16	0.25	0.83	0.11	0.15	0.12

경우, Z축 Grms에 대한 X축의 비는 47.8 %, Y축은 25.4 %이고 25 km/h 주행시험에서 Z축 Grms에 대한 X축의 비는 36.4 %, Y축은 49.6 %이다. 80 km/h로 주행하는 △△밴의 경우, Z축 Grms에 대한 X축의 비는 56.2 %, Y축은 46.6 %이고 25 km/h 주행시험에서 Z축 Grms에 대한 X축의 비는 58.3 %, Y축은 98.3 %이다. ○○밴과 △△밴의 모든 주행시험에서 Z축의 Grms가 X축과 Y축의 Grms보다 더 크다.

2.3.2 동특성 시험 결과와 MIL-STD-810G 비교

2.5톤 군용차량의 동특성 확보를 통해 유사체계 설계 시 기초자료로 활용하기 위해, 시험 결과 중 가장 큰 값을 Fig. 20 랜덤 진동 규격^[1]과 비교^[8]한다.

동특성시험 결과를 MIL-STD-810G^[1]와 비교하였고 결과는 Table 3이다. ○○밴, △△밴이 규격범위보다 매우 적은 값을 가지므로 군용차량의 안정성이 확인됨을 알 수 있다^[5].

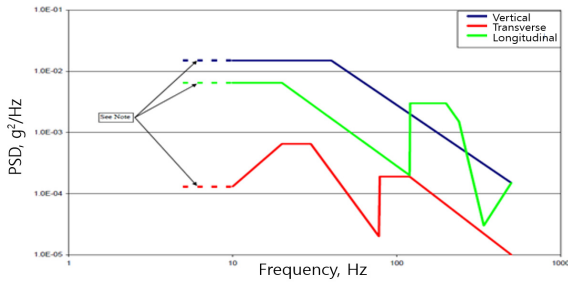


Fig. 20. MIL-STD-810G METHOD 514.6C-1

Table 3. Comparison of test results and MIL-STD-810G_Grms

방향	○○밴 #5	△△밴 #3	MIL-STD-810G
X	0.31	0.11	0.74
Y	0.15	0.18	0.2
Z	0.87	0.12	1.04

2.3.3 동특성 시험 분석 및 결론

2.3.3.1 동특성 시험 분석

서랍형 구조물은 양측 프레임이 고정되어 있고 선반형 구조물은 프레임에 베이스 판이 체결되어 있으므로 선반형이 서랍형 보다 더 안정적이다. 진동에 의해 상하운동이 발생하여 상단 진동이 하단 진동보다 다소 큰 값을 갖지만 쉘터는 양측 상단에서 하단 중앙부로 턴버클 조립체로 고정되어 있으므로 상단 및 하단으로 전달되는 진동의 큰 차이가 없다. 군용차량 자체의 suspension이 진동을 어느 정도 흡수하므로 포장도로와 비포장도로의 결과는 큰 차이가 없다³⁾.

2.3.3.2 동특성 시험 결론

선반형태 ○○밴이 서랍형태 △△밴 보다 외부 진동에 의한 안정성이 높지만, 서랍형태도 MIL-STD-810G 규격범위보다 상당히 낮은 수준의 Grms 값을 가지므로 2.5톤 군용차량 내부구조물 설계 시 기초자료로 사용될 수 있다.

3. 결론

이 논문에서는 주행 시, 외부 진동을 최소화함으로써 군용차량 내부 전자장비의 안정성을 위해 2.5톤 군용차량의 동특성을 비교하고 이에 따른 내부구조물 설

계를 제안한다. 선반형과 서랍형 모두 MIL-STD-810G 도로규격¹⁾을 만족하지만, 보다 안정적인 2.5톤 군용차량을 위해서는 내부 설계를 서랍형태보다 선반형태로 구성해야한다. ○○밴과 △△밴은 설계부터 DT/OT를 거쳐 현재 전력화 되었으며, 내부구조물 설계도면 및 동특성 시험 결과는 추후 2.5톤 군용차량과 무기체계 설계의 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 향후 포장도로와 비포장도로 주행시험 외에 험한 산악 지형을 모사하기 위해, 야지(off-road)에서 15±5 km/h의 주행시험을 분석 및 적용하여 다양한 도로의 가진 신호 응답특성을 파악하고 이를 통해 2.5톤 군용차량에 적용 가능한 규격으로 정리할 필요성이 있다.

References

- [1] The United State Department of Defense, “United States Military Standard-810G(MIL-STD-810G),” 2018.
- [2] Daniel J. Inman, “Engineering Vibration,” Pearson, New York, pp. 228-239, 2013.
- [3] DongHyouk Shim, “The Compared Analysis of the Characteristics According to the Inside Construction of 2.5 Ton Military Vehicle,” KSNVE, pp. 427-428, 2010.
- [4] Ohseop Song, “A Study on the Flight Vibration Specification of High Speed Vehicle using Response Analysis,” Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, pp. 723-730, 2018.
- [5] In-Kab Jang, “Trailer-Mounted Equipment Dynamic Text,” Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., pp. 237-240, 2015.
- [6] No-Cheol Park, “Dynamic Characteristic Analysis of a Military Vehicle via Road Tests,” Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., pp. 277-280, 2014.
- [7] Dong-Jun Shin, “Vibration Response Analysis of the Military Vehicle by Road Test,” Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., pp. 262-266, 2014.
- [8] Dong-Jun Shin, “Analysis of Transport Dynamic Property for Lowbwd Trailer and Vibration Specification Establishment of Large Radar,” Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., pp. 632-638, 2019.
- [9] Jong-Ik Jeon, “Analysis for Driving Shock Resistance of Military Vehicle,” Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., pp. 267-272, 2014.