

Fatigue Damage Spectrum을 이용한 궤도차량의 진동환경 비교

Tracked Vehicle Vibration Environment Comparison using Fatigue Damage Spectrum

김재하* 최병민* 우호길**
Jai-Ha Kim, Byoung-Min Choi, Ho-Gil Woo

ABSTRACT

This paper provides the test results of tracked vehicle at each driving condition and life cycle. Fatigue Damage Spectrum(FDS) has evaluated with the Power Spectrum Density(PSD) and the life time of equipment. Finally, provisional vibration qualification test level is evaluated.

Key Words: Fatigue Damage Spectrum, Vibration Environment, Tracked Vehicle

기호 설명

b : geometry and material-dependent constant	
c : material-dependent exponent	
d_i : damage fraction or fraction of consumed fatigue life	
D : 누적파괴	f_o : 특성주파수
n_i : the number of cycles experienced by the specimen by at load i	
N_i : the number of cycles to failure at load i from an appropriate material S-N curve	
k : spring coefficient	$p(z)$: probability density function
T : time	z : amplitude(displacement)
Γ : Gamma function	σ : stress level

1. 서론

오늘날 모든 구조물이나 시스템은 기계적, 전기적 성능이 독자적으로 혹은 서로 유기적으로 조합되어

고유의 기능을 발휘하게되는데 첨단장비나 고가장비 일수록 전자부품이 차지하는 비중이 더욱 커져가고 있다. 또한 시스템의 신뢰도를 향상시키기 위하여 대부분의 시스템은 완성전부터 진동이나 충격 환경을 분석하여 시스템의 내구성을 검증하는 절차를 수행

* 국방과학연구소

** 충남대학교 기계공학과

하게 된다. 그러나, 고정장비가 아니고 차량, 선박 또는 항공기에 탑재되어 운용되는 장비의 경우에는 진동환경이 매우 복잡하다. 쉽게 접할 수 있는 운송수단인 차량의 경우에도 차량은 포장도로, 비포장도로 또는 야지를 주행할 수 있으며 각각의 도로를 주행할 때 시스템이 받는 진동은 상이하다. 실제로 개발자가 이러한 환경을 비교하여 과잉설계(over design)나 부족설계(under design)가 이루어지지 않도록 진동환경을 비교하기가 쉽지 않았으며, 개발 후 차량에 탑재하여 내구성을 검증하거나 MIL-STD-810을 적용하는 경향이 많았다. 이에 본논문에서는 Fatigue Damage Spectrum을 이용하여 여러 가지 도로에서 차량의 진동자료를 획득하여 시스템의 운용순기동안 시스템에 가해지는 진동환경을 비교할 수 있는 방안과 실제 운용환경과 운용순기를 고려한 진동시험 규격을 제시하고자 한다.

2. Fatigue Damage Spectrum

2.1 개요

파괴 선도를 구하기 위해 적용한 이론은 Miner's Theory이다. Miner's Theory는 선형 계(linear system)의 누적 파괴론(cumulative damage theory)으로서 비교적 간단하면서 다른 방법에 비해 피로 정도나 파괴 등을 예측하는데 비교적 정확하기 때문에 미국 군사 규격인 MIL-STD에서도 채택하고 있다.

Miner's Theory는 아래의 식에서와 같이 간단한 분수식의 합으로 나타낸다.

$$D = \sum_{i=1}^m d_i = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

식(1)에 의하면 피로 파괴는 장비가 흡수하는 일량

에 비례한다고 가정하는 것이다. 또한 흡수 일량은 S-N curve에서 파괴가 발생하는 숫자 N과 실제로 그 해당 응력을 받는 숫자인 N과의 비율에 비례한다고 할 수 있다. 따라서 식(1)의 D값이 1이 되면 파괴가 일어난다고 할 수 있다.

그리고 σ -N 곡선에서 아래와 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$N \sigma^b = c \quad (2)$$

$$\frac{1}{N_i} = \frac{\sigma_i^b}{c} \quad (3)$$

여기서 식(2), (3)은 Basquine's Equation이라고 하며, b와 c는 재료의 고유 특성으로서 피로 시험에 의해 구한다.

선형계로 가정하였으므로 응력 σ 는 변위에 비례한다.

따라서

$$\sigma = k z \quad (4)$$

여기서 z는 최대 상대 변위(Maximum Relative Displacement)이다.

식(4)를 식(3)에 대입하면

$$\frac{1}{N_i} = \frac{k^b}{c} z_i^b \quad (5)$$

따라서 식(5)를 식(1)에 대입하면

$$D = \frac{k^b}{c} \sum_{i=1}^m n_i z_i^b \quad (6)$$

이 된다.

한편, p(z)를 응력의 최대값이 발생하는 확률 밀도 함수라고 생각하면, T시간 동안 임의의 Δz 에서 peak

치가 발생하는 회수는

$$n(z) = f_o T p(z) dz \quad (7)$$

이므로 이를 식(6)에 대입하면

$$D = \frac{k^b}{c} f_o T \sum_{i=1}^m z_i^b p(z_i) dz \quad (8)$$

이 되며, p(z)는 최대 응답 스펙트럼 계산시와 마찬가지로 Rayleigh 분포를 따르므로,

$$p(z) dz = \frac{z}{\sigma_x^2} e^{-\frac{z^2}{2\sigma_x^2}} dz \quad (9)$$

이 된다.

그리고 변수 z가 연속이므로 식(9)를 식(8)에 대입하면

$$D = \frac{k^b}{c} f_o T \frac{1}{\sigma_x^2} \int_0^{\infty} z^{b+1} e^{-\frac{z^2}{2\sigma_x^2}} dz \quad (10)$$

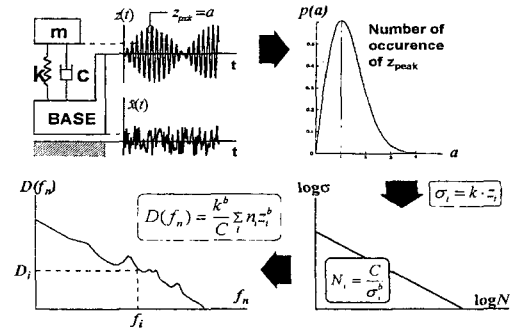
과 같이 된다.

위의 식을 Gamma Function을 이용하여 간단히 표현하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$D = \frac{k^b}{c} f_o T (\sqrt{2} \sigma_x)^2 \Gamma(1 + \frac{b}{2}) \quad (11)$$

식(11)은 약한 감쇠계에서 손상을 예측하는데 널리 이용하는 것으로 k, b, c 같은 상수 값을 정확히 알고 있으면 D=1로하여 파괴되는 시간도 예측할 수 있다.

이상과 같이 파괴 선도를 구하는 흐름을 도식적으로 나타내면 그림 1과 같다.



(그림 1) Damage Curve를 구하는 흐름도

3. Tracked Vehicle 진동환경 및 FDS

3.1 개요

대부분의 구조물은 조립/생산 공장으로부터 출하되어 운전자(소비자)가 운용하기 위해서는 각종 차량에 장착되거나 적재되어 육상, 해상 또는 항공편으로 수송되어진다. 이번 연구에서는 한국형 단거리 지대공유도무기체계에 탑재되는 천마 유도탄의 진동환경의 비교를 위하여 아래 표 1과 같이 포장도로, 비포장도로 및 야지 주행시의 진동 특성을 계측하였다.

여러 가지 주행조건중에서 천마체계가 주로 운용되는 조건인 포장도로(55KPH), 비포장도로(35KPH)와 야지(20KPH)에 대하여 PSD 및 FDS를 계산하였고 이를 근거로 진동시험규격을 작성하였다.



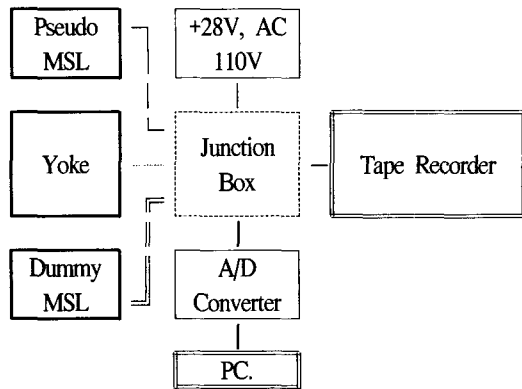
그림 2 Tracked Vehicle 진동 계측 장면

[표 1] 동특성 시험 Course

주행 조건		운 전 내 용	비고
도로상태	주행상태		
포장도로	Idling I	단순 Idling(500~600rpm)	
	Idling II	전투 Idling(1500~1600rpm)	
	Pivoting	왼쪽으로 회전	
	Bumper	요철 지역 통과	
	변속	55Km/h까지 가속후 정지	
	55KPH	55Km/h로 포장도로 주행	
	30KPH	30Km/h로 포장도로 주행	
비포장 도로	35KPH	35Km/h로 비포장도로 주행	
	20KPH	20Km/h로 비포장도로 주행	
야 지	20KPH	20Km/h로 야지 주행	

3.2 계측 System

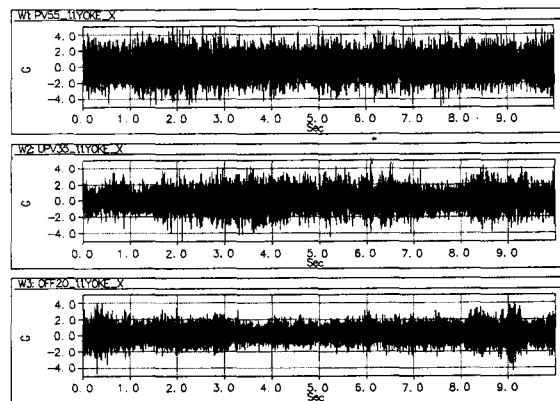
유도탄의 진동환경을 계측시에는 아래 그림과 같은 계측 system을 구축하여 차량의 이동중에 진동환경을 계측하였다.



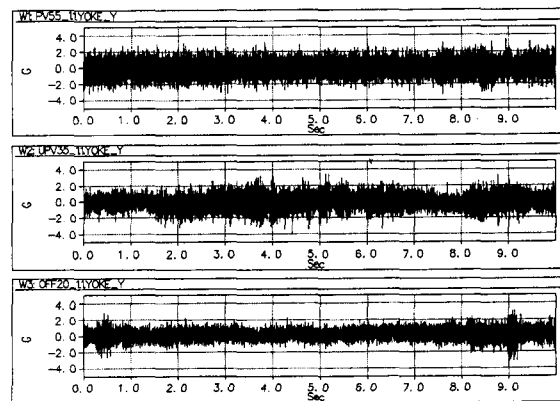
[그림 3] Tracked Vehicle 진동 계측 시스템

3.3 계측결과 및 Fatigue Damage Spectrum

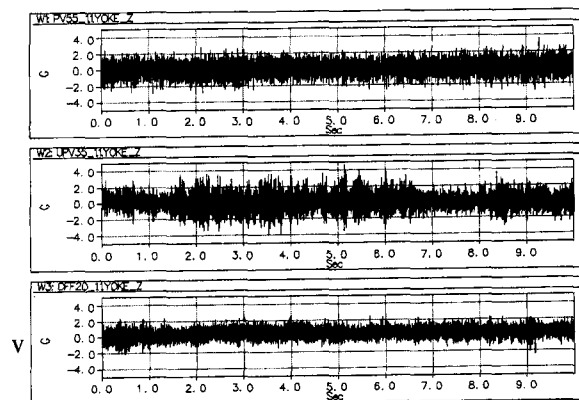
3.3.1 도로별 퀘도차량 진동 계측 결과



[그림 4-1] 퀘도차량의 도로별 X 방향 진동

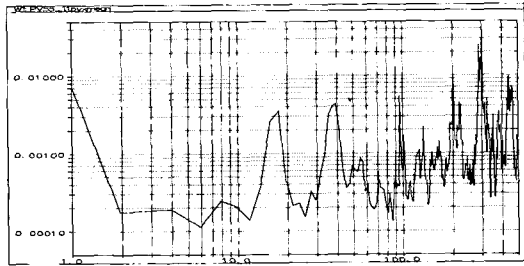


[그림 4-2] 퀘도차량의 도로별 Y 방향 진동

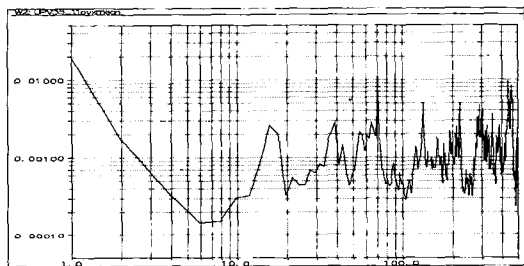


[그림 4-3] 퀘도차량의 도로별 Z 방향 진동

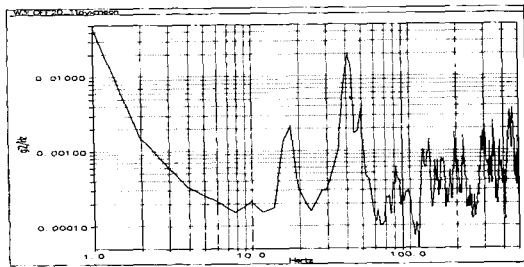
3.3.2 도로별 궤도차량의 PSD



(그림 5-1) 궤도차량의 X 방향 PSD(포장도로)

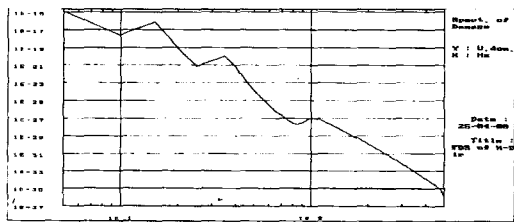


(그림 5-2) 궤도차량의 X 방향 PSD(비포장도로)

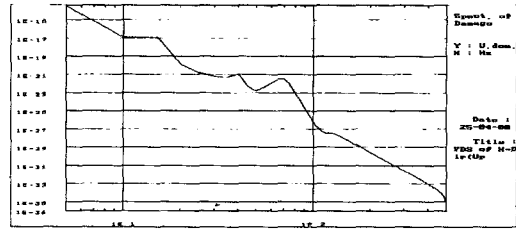


(그림 5-3) 궤도차량의 X 방향 PSD(아지)

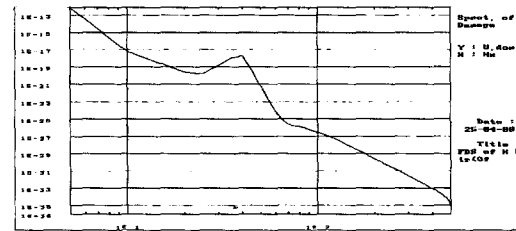
3.3.3 도로별 궤도차량의 FDS



(그림 6-1) 궤도차량의 X방향 FDS(포장도로)

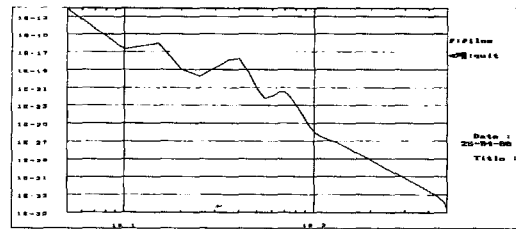


(그림 6-2) 궤도차량의 X방향 FDS(비포장도로)



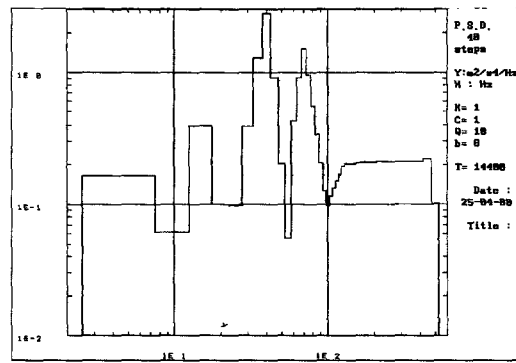
(그림 6-3) 궤도차량의 X방향 FDS(아지)

3.3.4 Sum of Each FDS



(그림 7) 궤도차량의 X방향 FDS의 합

3.3.5 Provincial V.Q.L.



(그림 8) 궤도차량의 X방향 Provincial V.Q.L.

3.3 분석 결과

그림 4-1~4-3은 궤도차량이 포장도로, 비포장도로, 야지를 주행할 때 계측한 각각의 X, Y, Z 방향의 가속도 자료이며, 그림 5-1~5-3은 각도로별 X방향 가속도 자료로부터 구한 PSD이다. 그림 6-1~6-3은 식(11)에 의하여 각도로별 PSD와 각 도로에서 한국형 단거리 지대공 유도무기체계의 운용시간을 고려하여 구한 FDS이다. 그림(8)은 각 FDS의 합이며, 그림(9)는 FDS의 합으로부터 Max Stress Spectrum을 구한 예비 진동 시험 규격이다.

- 1) 한국형 단거리 지대공 유도무기체계의 탑재되는 유도탄의 진동환경은 100Hz이하의 낮은 주파수 영역에서 에너지가 크게 전달됨을 알 수 있다.
- 2) 각 도로별로 주행할 때 가진되는 주파수 영역이 상이함을 알 수 있다.
- 3) 한국형 단거리 지대공 유도무기체계의 탑재차량은 MIL-STD-810D⁽⁶⁾에서 제시한 궤도차량과 유사무기체계인 Thomson-CSF의 궤도차량과도 상이한 진동특성을 나타냄을 확인할 수 있다.
- 4) 그림 8은 한국형 단거리 지대공 유도무기체계의 유도탄이 운용중 받은 진동환경에 대하여 4시간동안 시험할 X방향 진동시험 예비 규격이다. 시험시 사용할 가진기의 규격과 탑재장비의 동특성을 고려하여 진동시험규격을 만들 수 있을 것이다.

4. 결 론

여러 가지 도로에서 운용되는 궤도차량의 진동자

료로부터 운용시간을 반영한 Fatigue Damage Spectrum를 계산하여 진동환경을 검토하여 보았다. 또한 이를 바탕으로 시스템의 내구성 검증을 위한 진동시험시 활용할 수 있는 진동시험 규격을 작성할 수 있게 되었다. 따라서 획일적인 MIL-STD-810D의 적용을 피하고 운용환경에 적합한 진동환경을 작성할 수 있게 되었다.

참 고 문 헌

1. C. Lalanne, "Maximax Response and Fatigue Damage Spectra - Part I", The journal of environmental sciences, July/August, pp. 35-40, 1984
2. C. Lalanne, "Maximax Response and Fatigue Damage Spectra - Part II", The journal of environmental sciences, September/October, pp. 40-44, 1984
3. D.E. Newland, "An Introduction to Random vibrations and spectral analysis", Longman
4. Paul H. Wirsching, Thomas L. Paez and Keith Ortiz, "Random Vibrations Theory and Practice ", Wiley-Interscience Publication, 1995
5. "Development of Laboratory vibration test schedules", International Test Operations Procedure (ITOP) 1-1-050
6. "Environmental Test Methods and Engineering Guidelines(MIL-STD-810D)", David L. Earls
7. Jack Robinson, "The Changing Vibration for Military Ground Vehicles", Shock and Vibration Bulletines, June, pp. 113-124, 1984
8. Pulgrano. L. J. and Ablowitz M. "The Response of Mechanical Systems to Bands of Random Excitation", The shock and Vibration Bulletin, No.39, Part 3, pp.73-86, 1968
9. Stephen H. Crandall and William D. Mark, " Ran-

- dom Vibration in Mechanical System", ACADEMIC PRESS, 1973
10. 기무현 외 5명, MSRD-516-92092, "천마체계 진동 시험(I)", 국방과학연구소, 1992. 2
 11. 김재하 외 3명, MSDC-416-940055, "천마 유도탄 진동 규격 작성 및 결과", 국방과학연구소, 1994. 1
 12. 최병민 외 5명, MSDC-516-950240, "천마체계 진동시험 규격 작성", 국방과학연구소, 1995. 3
 13. 김재하 외 2명, MSDC-416-950846, "한국형 단거리 유도탄 진동시험 규격에 관한 연구", 국방과학연구소, 1995. 11
 14. 김재하 외 4명, MSDC-516-980966, "천마체계 동특성 시험결과 분석보고서", 국방과학연구소, 1998. 2