특집
국방기술에서의 소음진동

진동환경에 대한 군사규격의 소개와 개발적용 사례

김지억, 양성철*
(LIG 넥스원)

1. 머리말

군사무기는 민수 제품에 비해 훨씬 열악한 환경에서 운용된다. 온도, 습도, 고도, 진동, 충격 및 이외에도 많은 특수한 환경에 노출되어 운용되는데, 이러한 운용 환경하에서 요구 성능을 만족하도록 설계, 제작되고 환경시험을 통해 평가하는 과정을 거치는 것이 군사무기 개발의 한 과정이다.

환경조건에 대한 규격을 결정할 때 실 운용환경을 실측하여 적용하는 경우와 군사규격(예, 미 군사규격)을 적용하는 경우로 나누어 볼 수 있다. 실측 데이터를 바탕으로 규격을 결정하면 개발을 가장 효과적으로 진행할 수 있지만, 비용, 시간, 개발단계상의 문제 등으로 인해 실측 데이터를 확보하는 것이 불가능한 경우가 더 많은 것이 군사무기 개발의 현실이다.

진동 환경은 군사무기가 노출되는 중요한 환경 중 하나인데 진동 환경규격도 앞에서 언급한 것과 마찬가지로 실측 데이터를 적용하는 경우와 군사규격을 적용하는 경우가 있다. 실측 데이터를 적용한 사례와 군사규격을 적용한 사례를 3장의 '개발 적용사례' 에서 소개하고자 한다. 한편, 군사규격은 과거에 개발된 무기들을 대상으로 측정된 많은 실측 데이터를 바탕으로 미리 정해 놓은 규격인데, 국산 무기 개발 시 적용하는 가장 대표적인 규격은 미 육군의 개발 시험 통제소에 의해 제정된 MIL-STD-810이다. MIL-STD-810 규격은 초기에 다양한 종류의 장비에 대하여 적용 규격을 일반화하려고 시도함으로써 다소 과도한 규격으로 정의되어 있었다. 이후, 810D버전부터는 실제 운용 상황을 고려하여 규격을 운영하도록 권고하고 있다. 현재, 최신 규격으로는 810G가 발표된 상태이다.

이 글에서는 이러한 군사규격인 MIL-STD-810 및 관련 규격을 간략히 소개하고 설정된 규격을 적용하여 해석 및 시험을 수행한 사례를 소개 하고자 한다.

2. 군사규격소개

2.1 MIL-STD-810

(1) 개요

MIL-STD-810에는 군사무기의 운용환경과 관련된 고도, 온도, 습도, 가속도, 진동, 충격 등의 규격과 시험방법이 정리되어 있다. 표1은 MIL-STD-810에 정리되어있는 각 시험방법들에 대한 내용이다.

* E-mail : calviny@lignex1.com / (031) 288-9251

표 1 MIL-STD-810F 시험항목분류

분류코드	시험항목
500	Low pressure (altitude)
501	High temperature
502	Low temperature
503	Temperature shock
504	Contamination by fluids
505	Solar radiation (sunshine)
506	Rain
507	Humidity
508	Fungus
509	Salt fog
510	Sand and dust
511	Explosive atmosphere
512	Immersion
513	Acceleration
514	Vibration
515	Acoustic noise
516	Shock
517	Pyroshock
518	Acidic atmosphere
519	Gunfire vibration
520	Temperature, humidity, vibration and altitude
521	Icing/freezing rain
522	Ballistic shock
523	Vibro-acoustic/temperature

진동, 충격, 소음 관련하여서는 514(진동), 515(소음), 516(충격)으로 분류되어있다. 또한, MIL-STD-810에서는 군사무기의 종류에 따라 다른 군사규격을 지정하여 참조하도록 하는 경우도 있다. 예를 들어 해상무기의 경우에 진동규격은 MIL-STD-167, 충격규격은MIL-S-901을 지정하여 참조하도록 하고 있다.

(2) 진동규격항목

MIL-STD-810F(이하 '810F')에서 진동 시험 규격 및 시험방법은 514 진동시험 방법을 적용하도록 하고 있으며 표 2는 각 장비의 범주 별로 진동시험 방법을 분류한 표이다. 표에는 장비형태 및 운용환경에 따라 적용가능규격을 항목별로 세분화 하였으며 각 항목에 따라 시험하는 방법

표 2 장비형태 및 운용환경 별 분류

Life phase	Platform	Category	Materiel description	Level & duration anner A	Test[1]
Manufacture/ Maintenance	Plant facility/ Maintenance facility	1. Manufacture/ Maintenance processes	Materiel/ assembly/part	2.1.1	[2]
		2. Shipping handling	Materiel/ assembly/part	2.1.2	[2]
		3. ESS	Materiel/ assembly/part	2.1.3	[3]
Transportation	Truck/Trailer/ Tracked	4. Restrained cargo	Materiel as restrained cargo[4]	2.2.1	I
		5. Loose cargo	Material as loose cargo[4]	2.2.2	II
		6. Large assembly cargo	Large assemblies, shelters, van and trailer units[4]	2.2.3	III
	Aircraft	7. Jet	Material as cargo	2.2.4	I
		8. Propeller	Material as cargo	2.2.5	I
		9. Helicopter	Material as cargo	2.2.6	I
	Ship Railroad	10. Surface ship	Material as cargo	2.2.7	I
		11. Train	Material as cargo	2.2.8	I
Operational	Aircraft	12. Jet	Install Material	2.3.1	I
		13. Propeller	Install Material	2.3.2	I
		14. Helicopter	Install Material	2.3.3	I
	Aircraft stores	15. Jet	Assembled stores	2.3.4	IV
		16. Jet	Installed in stores	2.3.5	I
		17. Propeller	Assembled/Installed in stores	2.3.6	IV/I
		18. Helicopter	Assembled/Installed in stores	2.3.7	IV/I
	Missiles	19. Tactical missiles	Assembled/Installed in missiles(free flight)	2.3.8	IV/I
	Ground	20. Ground vehicles	Installed in wheeled/ tracked/trailer	2.3.9	I/III
	Watercraft	21. Marine vehicles	Installed materiel	2.3.10	I
	Engines	22. Turbine enginees	Material installed on	2.3.11	I
	Personnel	23. Personnel	Materiel carried by/ on personnel	2.3.12	[2]
Supplemental	All	24. Minimum integrity	Installed on isolators/ life cycle not defined	2.4.1	I
	All vehicles	25. External cantilevered	Antennae, airfoils, masts, etc.	2.4.2	[2]

1) Test procedure-see paragraph 4
2) See annex A reference.
3) Use applicable ESS procedure.
4) See paragraph 2.3.3.

및 프로파일들이 지정되어있어서 연구개발 초기에 진동규격 정의 및 설계반영을 할 수 있도록 한다.

(3) 진동세부규격

LIG넥스원에서는 육 · 해 · 공 분야의 다양한 장비의 개발에 참여함으로써 다양한 진동규격을 적용한 경험을 가질 수 있었다.

육상장비의 경우 플랫폼인 육상차량은 크게 차륜차량과 무한궤도차량으로 나눌 수 있다. 그림 1은 차륜차량의 일반적인 진동시험 프로파일이며, 그림 2는 무한궤도차량의 일반적인 진동시험 프로파일이다. 810F에는 그림 1 차륜차량의 경우 제시된 구체적인 값이 있으나, 무한궤도차량의 경우 구체적인 값들을 제시하고 있지 못하며 별도의 자료를 참조하도록 하고 있다.

항공기의 경우 플랫폼은 크게 제트항공기, 프로펠러항공기, 헬리콥터 등으로 나눌 수 있으며 항

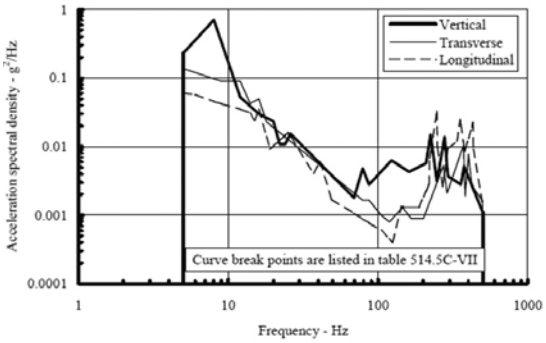

그림 1 차륜차량 진동프로파일

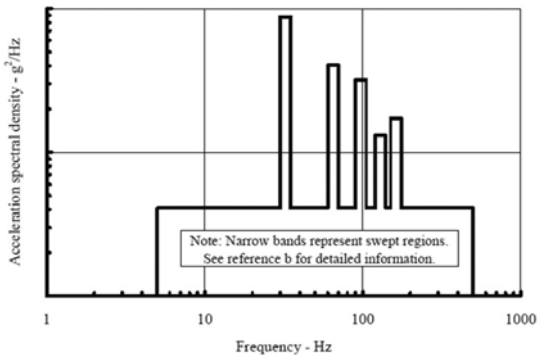

그림 2 궤도차량 진동프로파일

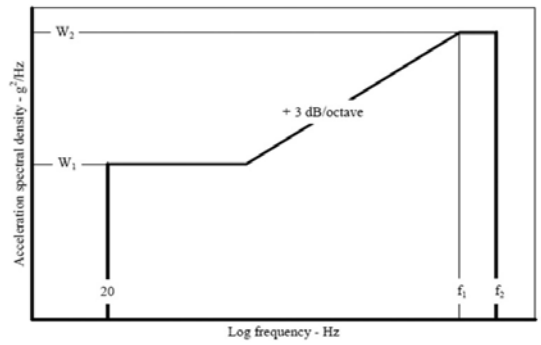

그림 3 제트항공기 외부장착물 진동프로파일

공기 외부장착물과 미사일에 대하여 별도의 규격으로 제시하고 있다. 그림 3은 제트항공기 외부장착 장비의 진동시험 프로파일이다. W_1, W_2를 결정하기 위해 810F에서 제시하고 있는 수식들을 적용하여 계산한다. 이 계산을 위해서는 항공기와 관련된 속도, 장착위치, 장착수량, 동적압력구배 등의 구체적인 값들이 필요하다.

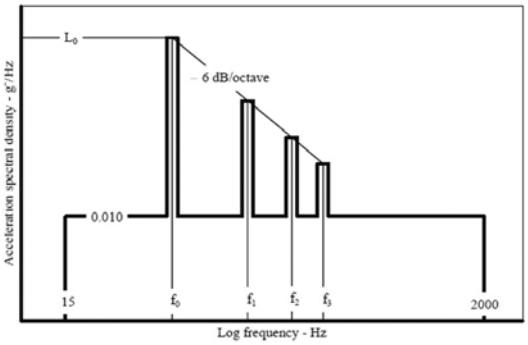

그림 4 프로펠러 항공기 진동프로파일

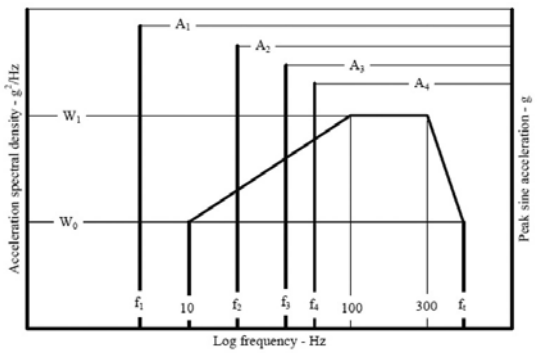

그림 5 헬리콥터 진동프로파일

프로펠러항공기 탑재장비경우 그림 4의 프로파일을 적용한다. 항공기의 프로펠러 RPM 및 날개의 수에 따라 협대역 진동주파수인 f_0~ f_3값이 계산되고 진동크기인 L_0는 장비의 장착위치 별로 결정된다.

헬로콥터 탑재장비경우 그림 5의 sine on random프로파일을 적용한다. Sine진동의 주파수는 main rotor와 tail rotor의 회전속도 및 개수에 따라 계산되며, 진동의 크기인 W_0, W_1과 A_1~ A_4값들은 장착위치에 따라 결정된다.

해상장비 진동규격의 경우는 810F규격에서 MIL-STD-167을 지정하여 참조하도록 하고 있다.

2.2 MIL-STD-167

(1) 개요

함정에 탑재되는 군사무기는 함정으로부터 받게 되는 진동 환경하에서 성능을 지속적으로 유지할 수 있는 내구성능이 요구되고 있다. 함정용 장비의 진동환경에 대해서 미 해군은 MIL-STD-167-1을 적용하고 있으며, 대한민국 해군도 일반적으로 이 표준을 동일하게 적용하여 개발 및 시험평가를 수행하고 있다.

함정용 장비는 설치되는 위치에 따라 함상과 함내 장비로 구분되는데, 이들의 진동원은 다음과 같은 3개로 나누어질 수 있다.

① 해상 환경으로부터의 진동
② 함정 내부 기진으로부터 발생되는 진동
③ 함정의 왕복용 기계, 추진시스템 및 축에 관련된 진동

이 중에서 ①번 및 ②번 항목은 MIL-STD-167-1에 기술되어 있으며, ③번 항목은 MIL-STD-167-2에서 다루고 있다.

함정장비에 대한 진동시험은 공진 주파수를 탐색하는 시험과 탐색된 공진주파수에서의 내구성을 확인하는 시험으로 이루어져있다.

(2) 진동세부규격

MIL-STD-167-1에서 규정하는 진동시험규격은 공진탐색시험, 가변주파수 시험 그리고 내구성 시험으로 구성된다. 공진탐색시험은 표 3에 따라 4~33 Hz의 범위에 대해 1 Hz간격으로 주파수당 15초씩 가진하여 수행한다. 가변주파수 시험은 1 Hz 간격으로 주파수당 5분씩 가진한다. 내구성시험은 4~33 Hz 구간 내에 공진주파수가 존재하는 경우는 공진주파수에서, 4~33 Hz 범위에서 공진주파수가 존재하지 않는 경우는 33 Hz에서 2시간 동안 해당 축에 대해서 실시하도록 규정하고 있다. 모든 시험은 3축에 대해 동일하게 적용한다.

표 3 공진탐색 시험

주파수	Table single amplitude
4 ~ 33 Hz	0.010±0.002 inch

표 4 가변주파수 시험

주파수	Table single amplitude
4 ~ 15 Hz	0.030±0.006 inch
16 ~ 25 Hz	0.020±0.004 inch
26 ~ 33 Hz	0.010±0.002 inch

표 5 마스트 장착장비에 대한 가변주파수 시험

주파수	Table single amplitude
4 ~ 10 Hz	0.100±0.010 inch
11 ~ 15 Hz	0.030±0.006 inch
16 ~ 25 Hz	0.020±0.004 inch
26 ~ 33 Hz	0.010±0.002 inch

3. 개발적용사례

3.1 차기 전자전 장비-육상장비

(1) 개요

차기 전자전 장비는 기존 사용되고 있는 구형 통신 전자전 장비의 교체를 목적으로 개발되었다. 주요 기능으로써 적 통신 감청, 방향탐지 및 통신방해등이 있다. 차기 전자전 장비의 전자유니트들은 그림 6과 같은 무한궤도차량의 후방 쉘터 내에 그림 7과 같이 탑재되어 운용된다. 궤도차량 주행 시 발생하는 진동외란이 탑재장비의 주요 진동원이 된다.

(2) 진동규격 설정

810F에서는 무한궤도차량에 탑재되는 장비의 진동시험 규격의 구체적인 값을 제시하지 않고

그림 6 무한궤도차량(BV206)

그림 7 쉘터내 장착된 콘솔형상

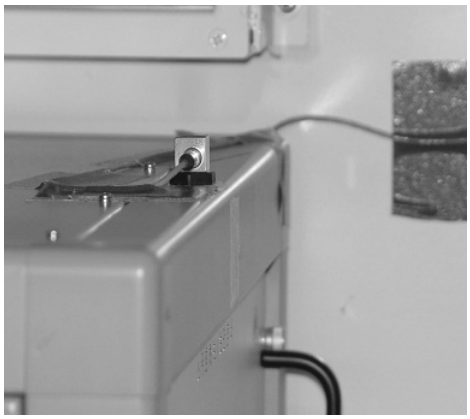

그림 8 장비에 가속도계 부착

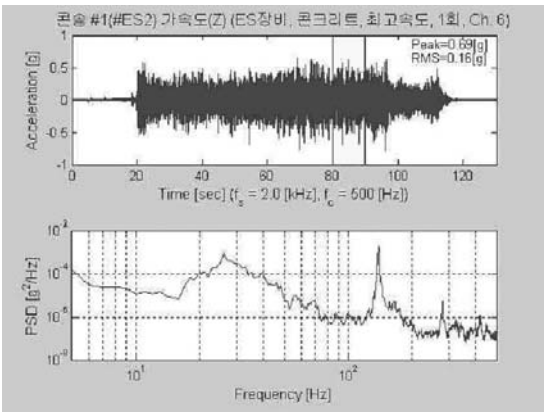

그림 9 측정 데이터

있으며, 실측한 데이터를 이용하여 규격을 정의하는 과정을 "ITOP(international test operating procedure)"라는 보고서를 참조하도록 소개하고 있다. ("ITOP"는 MIL-STD-810F에서 참조하는 자료이나 비공개 문서이다.) 따라서, 궤도차량에 탑재되는 차기 전자전 장비의 진동규격을 설정하기 위해서 주행 시 장비에 전달되는 진동을 실측하여 규격을 설정하였는데, 진동을 실측하여 진동시험 규격을 설정하는 개략적인 과정은 다음과 같다.

① 그림 8과 같이 시험대상 장비에 가속도계를 부착한다.

② 차량이 주행하는 도로 환경 중 가장 진동수준이 높게 나타나는 도로에 대해 주행하는 동안 진동을 측정하여 기록한다. 그림 9는 측정된 가속도 신호의 시간대역 성분과 주파수대역 성분이다.

③ 실측 데이터를 사용하여 랜덤진동시험 프로파일을 만든다. 반복시험으로 측정된 진동PSD를 각 주파수에서 평균값과 표준편차를 구한 후 더하여 규격에 적용할 각 주파수에서의 랜덤 PSD를 계산한다.

그림 10은 차기 전자전 장비에 대해 측정하여 PSD선도를 구한 예이다. 큰 영향을 줄 것으로 판단되는 피크성분을 선정하여 협대역 랜덤성분으로 분류하고 그 외 성분을 기저 랜덤성분으로

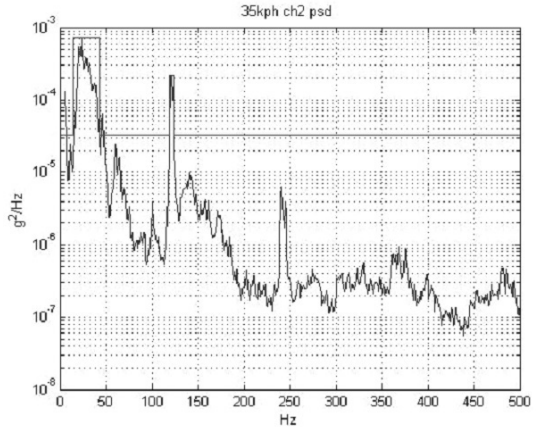

그림 10 실측 데이터와 규격 그래프

분류하여 규격을 도출하였다.

④ 기본적인 시험 프로파일이 만들어지면 시험 레벨과 시험시간을 결정한다. 실측한 PSD의 수준대비 시험실에서 시험에 적용할 PSD수준을 조정함으로써 실제 작전운용 시간을 시험실에서 시험할 시간으로 바꾸는 단계이다. 누적피로 손상법에 의한 계산식을 이용하여 계산하는데, 실제 계측한 가속도 수준 W_1에 대한 시험실에서 시험에 적용할 규격용 가속도 수준인 W_2의 비인 W_2 / W_1를 구하고 다음의 식에 의해 시험시간인 t_2를 결정하게 된다.

- 계산식 : $\left(\frac{W_1}{W_2}\right)^{\frac{b}{n}} = \frac{t_2}{t_1}$

W_1 = 실제 측정한 PSD 크기(g^2/Hz)
W_2 = 규격용 PSD 크기(g^2/Hz)
t_1 = 작전운용시간
t_2 = 규격시험적용시간
b = 9 ;내구성 곡선 상수
n = 2.4 ;응력감쇠곡선 상수

W_2 / W_1는 2보다 크지 않도록 결정한다. 이것은 진동시험을 위한 가속도 레벨의 크기가 소재의

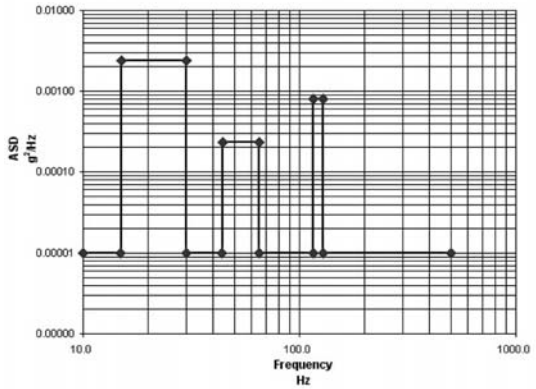

그림 11 유니트 단위 진동시험 규격

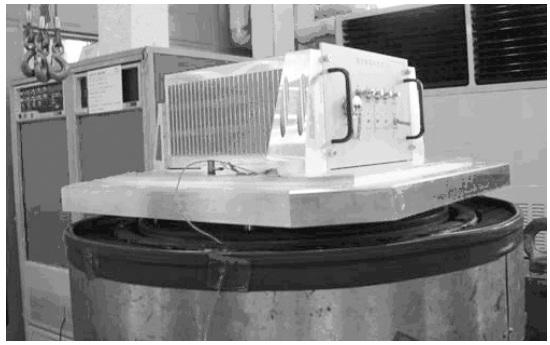

그림 12 유니트 단위 진동시험 수행

항복강도나 인장강도를 넘어서지 않도록 해야 하기 때문이다.

(3) 시험평가

앞에 언급된 진동시험 규격설정 절차에 따라 그림 11과 같이 차기 전자전 장비의 유니트에 적용하는 시험규격을 설정하였고 시험시간은 1시간 50분을 적용하여 진동시험을 실시하였다.

그림 12는 이렇게 결정된 진동시험규격을 적용하여 유니트 단위로 진동시험을 수행한 예이다.

3.2 전투기 외장형 전자방해장비-항공장비

(1) 개요

전투기 외장형 전자방해장비는 F-16전투기 외

그림 13 전투기 외장형 장비

부에 장착되어 적의 레이더로부터 오는 RF신호를 교란함으로써 전투기를 자체적으로 보호하는 장비이다.

(2) 진동규격 설정

전투기의 기동으로부터 발생하는 공력 및 항공기엔진으로부터 발생하는 랜덤진동은 외부에 장착된 전자방해장비에 가진을 유발하며 이런 진동은 구조물 내에 장착되는 전자모듈 및 안테나에 전기적, 기계적으로 치명적 영향을 줄 수 있다.

적용되는 진동시험규격은 MIL-STD-810F, 514.5 vibration의 category 15, aircraft stores-assembled, jet aircraft이다. 진동프로파일은 그림 3과 같다. 장비의 길이가 폭과 높이의 4배 이상이 되면 길이방향 축으로 진동시험을 실시하지 않도록 규정하고 있다.

(3) 진동해석

개발진행 시 전자방해장비에 대한 유한요소모델을 만든 후 진동해석을 실시하여 구조물을 최적설계한다. 그림 14는 진동해석에 사용된 유한요소모델과 모드해석 및 random vibration response해석결과이다.

모드해석을 실시 후 구조물의 동적거동을 확인

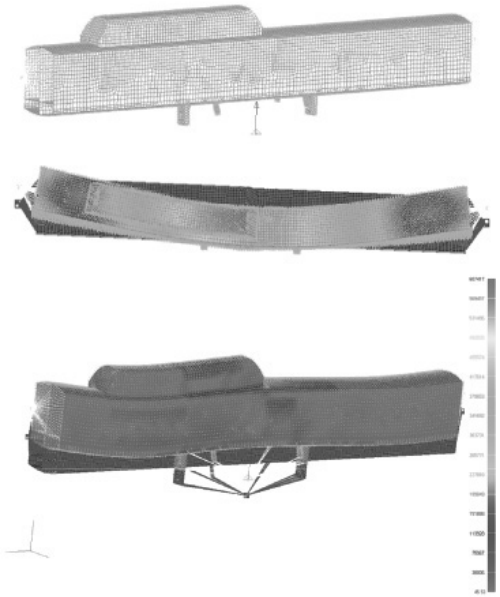

그림 14 유한요소모델 및 진동응답해석

하고 유효모드를 합성하여 random vibration response해석을 실시한다. random vibration response해석을 통하여 랜덤진동 가진 시 구조물에 발생하는 응력분포를 확인하여 구조물의 건전성을 평가한다.

(4) 시험평가

유한요소모델의 적합성을 확인하기 위하여 가속도센서, DSA장비 및 충격가진을 이용하여 모드테스트를 수행한다. 그림 15는 모드테스트 사진이다.

전자방해장비의 구조적 및 전자적인 성능만족을 확인하기 위한 운용환경진동시험을 실시하였다. 그림 16과 같은 시험 셋업으로 진동시험을 수행하여 장비의 안정적인 동작 및 해석결과와 잘 일치함을 확인하였다.

3.3 레이더시스템-해상장비

(1) 개요

레이더시스템은 마스트에 장착되어 함정의 대

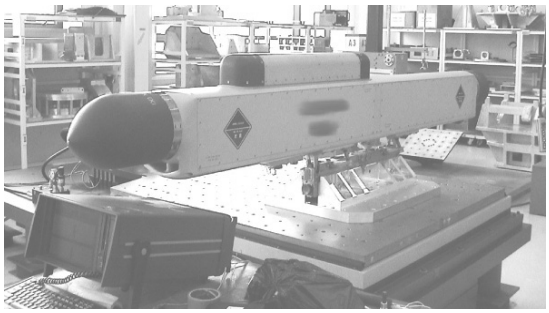

그림 15 모드테스트

그림 16 운용환경진동시험

함, 대공 및 미사일 등을 탐지하는 함정의 핵심장비 중 하나이다. 이번 절에서 소개할 레이더시스템은 최신형 3차원 탐색레이더로써 마스트에 장착되어 표적을 탐지, 식별하는 장비이다.

이와 같은 레이더시스템은 일반적으로 회전이 되는 상부구조물인 안테나와 회전부를 지지하는 하부구조물로 구성되어 있다. 상부구조물은 TWTA에서 송출된 전자기파를 방사하는 안테나와 이를 회전하는 구동부로 구성된다.

(2) 진동규격 설정

함정에 탑재되는 레이더시스템은 프로펠러 및 엔진으로부터 발생되는 내부적인 기계적 진동과 함의 롤링현상 및 바람 등의 환경적 요인으로

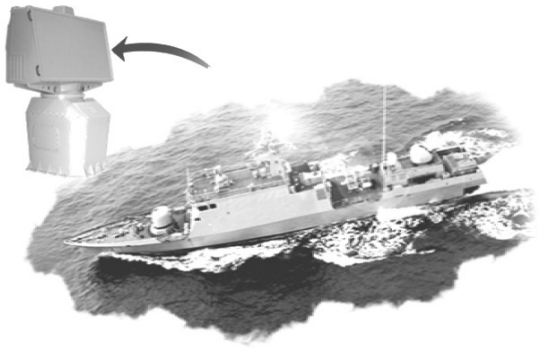

그림 17 레이더시스템

발생되는 외부진동의 영향을 받게 된다. 이와 같은 진동원들 중에서 함상 및 함내장비의 설계에 크게 고려되야 되는 가진원은 기계적 진동이다.

레이더시스템은 함정의 마스트에 장착되는 장비이므로 앞의 표 5규격을 진동규격으로 설정하였다.

(3) 진동해석

그림 18은 레이더시스템과 이를 유한요소모델로 구성한 형상을 나타낸 것으로서 안테나 및 구동부의 지지구조물은 셸요소로 구성하였으며, 내부구성품은 집중질량으로 구성하였다. 또한 회전구조물은 RBE 및 스프링요소로 구성하였다.

유한요소모델로 모드 해석을 실시하여 공진주파수를 분석하고 표 5의 규격에 따라 진동응답해석을 순차적으로 수행하였다. 그림 19는 1차부터 3차까지의 고유진동수 해석결과를 나타낸 것이다.

고유진동수 해석결과를 고려한 진동응답해석의 응력결과는 매우 낮은 응력분포를 나타내고 있으며, 일반 금속의 내구수명관점에서 내구성을 충분히 만족함을 알 수 있다.

(4) 시험평가

그림 20은 레이더 시스템의 진동시험 셋업 이

그림 18 유한요소모델 형상

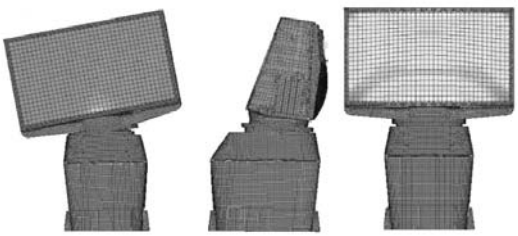

그림 19 고유진동수 해석결과

그림 20 운용환경 진동시험

다. 공진탐색시험을 수행하여 공진주파수를 측정한 후 공진주파수에서 각 축당 2시간씩 내구성 시험을 실시하였다. 시험결과, 기계적 손상 및 전자장비의 결함이 없음을 확인하였다.

4. 맺음말

이 글에서는 진동 환경에 대한 군사규격과 육·해·공의 군사무기에 대한 개발적용 사례를 중심으로 진동규격 분석, 해석 및 시험평가에 대하여 소개하였다.

군사무기에 대한 진동규격은 장비 운용환경에 따라 특성과 적용방법이 다양하기 때문에 개발 초기에 철저한 운용환경 분석을 통하여 합리적인 진동규격을 도출해야만 한다.

한편, 실측을 통한 데이터가 확보된다면 그 데이터를 활용하여 규격을 설정하는 것이 더 바람직할 것이다. 미국과 같은 선진국의 경우에는 다양한 장비의 개발을 통해서 많은 데이터를 확보함으로써 실 데이터를 규격으로 적용하거나 또는 이를 정리하여 다양한 미래 개발 장비에 적용할 수 있는 군사규격을 제정하고 지속적으로 보완 발전시키고 있다. 국내에서도 점차 군사무기의 국산화 개발이 많아지고 경험도 다양해짐에 따라, 많은 전문가들이 참여하여 국산규격의 제정이 가능하도록 하는 활동이 기대된다.

참고문헌

(1) Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, 2000, MIL-STD-810F.
(2) Mechanical Vibrations of Shipboard Equipment, 1974, MIL-STD-167-1.
(3) 이석규, 양성철, 김진천, 2004, "전투기 외장형 전자방해장비의 진동시험 및 동특성 해석," 항공우주 무기체계 발전세미나.