

# 진동환경에 따른 전기설비의 내구성 향상에 관한 연구

## A Study on Endurance Improvement of Electrical Equipment according to Vibration Environment

박근석\* · 심재명\* · 이대동†  
(Keun-Seok Park · Jae-Myung Shim · Dae-Dong Lee)

**Abstract** - The equipment in ships and railway vehicles are continuously exposed to vibration, and its durability is very important. Therefore, consumers require the verification of the performance of equipment via standardized tests under the given environments to improve and stabilize the performance. In this study, a durability improvement and stabilization plan was proposed, which included the exploratory vibration test, variable frequency test and endurance test for the electrical equipment according to the vibration environment. It is expected that this study results will improve the technological competitive power of the ship and railway-related manufacturers and contribute to the equipment development and export.

**Key Words** : Endurance improvement, Endurance test, Exploratory vibration test, Variable frequency test

### 1. 서론

철도차량 및 선박에 탑재되는 기기나 장비는 외부 진동환경에 계속적으로 노출되어 있으므로 진동환경에서의 장비의 주 기능을 유지할 수 있는 내구성을 필요로 한다. 철도 차량 및 선박 제조기술의 진보와 함께 탑재되는 장비들도 성능뿐만 아니라 소음, 진동 및 충격 등에 대한 특수성능 사항도 강화되고 있다[1]. 수요자들은 설비의 성능 향상과 안정화뿐만 아니라 특수성능도 중요하게 여기므로 철도차량 및 선박을 구성하는 주요구성품 및 보조구성품에 대해 성능평가를 요구하고 있다. 함정탑재장비의 진동시험은 MIL-STD-167-1A, 철도차량의 차체, 대차 등에 부착하는 기기 및 부품에 대한 진동시험은 KS R 9144, 철도 차량 설비의 충격 및 진동시험은 IEC 61373으로 규정한다[2, 3].

본 논문에서는 MIL-STD-167-1A 규격을 적용하여 진동환경에 노출된 전기설비의 내구성 향상을 위한 방안을 제시하고자 한다.

### 2. 기계진동

일반적으로 진동은 자유진동과 강제 진동으로 구분한다. 자유진동(free vibration)은 외력이 없는 경우에 계의 자체에 내재하는 힘에 의하여 발생하고, 계는 하나 또는 그 이상의 고유 진동수(natural frequency)를 가지고 진동하며, 이 고유 진동수는 질량과 강성의 분포에 의하여 결정되는 동적 계의

고유 특성이다.

외력이 작용하여 발생하는 진동을 강제진동(force vibration)이라고 하며, 외력의 진동수가 계의 고유 진동수 중의 어느 하나와 일치하는 경우에는 공진(resonance, 共振)이 발생한다. 이때에는 진폭이 매우 커져서 장비는 위험상태에 도달하게 된다[4]. 하지만, 장비의 완전성을 위해 장비를 구성하는 주요 구성품들은 환경조건에서 예상되는 외부 진동과 공진현상에 대해 충분한 강성과 성능을 유지해야만 한다.

#### 2.1 시험장비

본 실험을 위한 6자유도 대형 진동대의 구조는 그림 1과 같고, 진동대의 세부제원은 표 1과 같다.

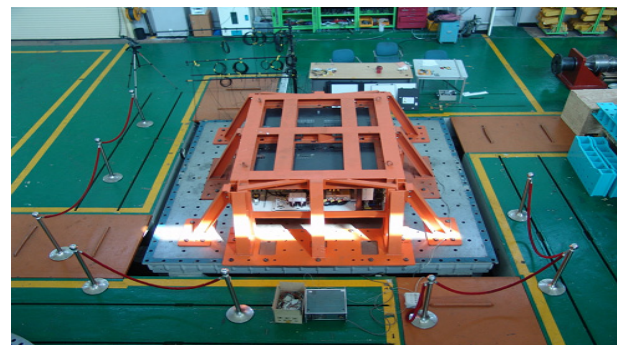


그림 1 진동대의 구조

Fig. 1 Structure of vibration table

#### 2.2 시험방법

MIL-STD-167-1A에서 규정된 시험 방법은 미국 해군

\* Dept. of Electrical Engineering, Hanbat National University, Korea

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Hanbat National University, Korea  
E-mail : ldd77@hanbat.ac.kr

Received : May 28, 2014; Accepted : July 4, 2014

**표 1** 진동대의 세부제원

**Table 1** Detail data of vibration table

Table Size	4 (m) × 4 (m)
Specimen Weight	30,000 (kg) (Max.)
Control Method	Electro-hydraulic Servo Control
Excitation Axes	X,Y,Z,φX,φY and φZ
Max. Dynamic Displacement	
X Axis	± 0.100 (m)
Y Axis	± 0.100 (m)
Z Axis	± 0.067 (m)
Max. Velocity	
X Axis	0.075 (m/s)
Y Axis	0.075 (m/s)
Z Axis	0.050 (m/s)
Max. Acceleration (with 30 ton specimen)	
X Axis	14.7 (m/s <sup>2</sup> ) (1.5g)
Y Axis	14.7 (m/s <sup>2</sup> ) (1.5g)
Z Axis	9.8 (m/s <sup>2</sup> ) (1.0g)
Control Degree of Freedom	6 DOF
Data Acquisition	64 Channels
Frequency Range	0.1~100 (Hz)

국방부에서 규정한 시험방법으로 함정을 추진하는 프로펠러의 질량 불 평형으로 발생하는 환경진동(Type-I)과 내부여기 진동의 기계적 진동을 전달하는 함정 장비(Type-II)가 있다[5].

본 논문에서는 함정 장비의 불평형 회전 부품에 의해 발생한 환경진동(Type-I)을 적용하여 선상에서 장비가 부착되는 지점과 영역, 설치되는 방향, 각도, 위치에 맞는 환경조건을 구성하여 시험하였고, 장비를 구성하는 주요 구성품에 가속도 센서를 부착하여 가속도를 계측하였다.

**2.2.1 탐색진동 시험(Exploratory Vibration Test)**

장비를 진동대 테이블에 고정하고 0.010±0.002 인치의 단일진폭으로 4~33(Hz)까지 진동시킨다. 진동수 변경은 1 (Hz)의 산재성 진동수 간격으로 최소 15초 동안 실시하고 탐색진동 시험조건은 표 2와 같다[5].

**표 2** 탐색진동 시험조건

**Table 2** Conditions of exploratory vibration test

Vibration Type	Sine Step
Amplitude	0.254 ± 0.050 (mm)
Minimum Frequency	4 (Hz)
Maximum Frequency	33 (Hz)
Ramp Interval	5 (sec)
Test Duration	600 (sec)

**2.2.2 가변주파수 시험(Variable Frequency Test)**

가변주파수 시험조건은 표 3과 같고 환경 진동의 주파수별 가진 변위는 표 4와 같다[5]. 가변주파수 시험을 위한 장비는 표 4와 같은 진폭에서 1(Hz) 간격으로 4~33(Hz)까지의 진동수로 진동해야 하고, 각 정수 진동수에서 5분씩 가진한다.

**표 3** 가변주파수 시험조건

**Table 3** Conditions of variable frequency test

Vibration Type	Sine Step
Ramp Interval	5 (sec)
Dwell Interval	300 (sec)
Test Duration	2.5 (hour)

**표 4** 환경진동의 가진 변위

**Table 4** Vibratory displacement of environmental vibration

Frequency Range	Table Single Amplitude (Inch/mm)
4 to 15	0.030 ± 0.006 / 0.762 ± 0.152
16 to 25	0.020 ± 0.004 / 0.508 ± 0.102
26 to 33	0.010 ± 0.002 / 0.254 ± 0.051

**2.2.3 내구성 시험(Endurance Test)**

내구성 시험의 진동수는 탐색진동 및 가변주파수 시험 중 진동대 가속도에 대한 장비에 부착된 부품의 가속도 전달률을 확인하고 국소 최대점들을 내구성 시험 진동수 목록에 포함시킨다. 만약 여러 개의 주파수가 발견되었을 경우에는 각 진동수에 따른 진동시험 시간은 표 5와 같고, 공진 주파수가 관찰되지 않을 때는 최대 진동수 33(Hz)로 2시간 시험한다. 주파수 영역에 따른 변위는 가변주파수 시험의 주파수별 진동 변위와 동일하다[5].

**표 5** 시험 진동수별 내구성 시험 시간

**Table 5** Duration time of endurance test according to test vibration

Number of Endurance Test Frequency	Test Duration at each Endurance Test Frequency	Total Time
1	2 hours	2 hours
2	1 hour	2 hours
3	40 minutes	2 hours
4	40 minutes	2 hours, 40 minutes
n > 2	40 minutes	40×n, minutes

### 2.3 MIL-STD-167-1A Type I 을 적용한 전기설비의 진동시험

#### 2.3.1 탐색진동 시험(Exploratory Vibration Test)

그림 2는 진동시험에 사용한 팬코일 유니트 시동기이다. 내부의 중판에는 팬코일 유니트를 동작하기 위한 회로가 구성되어 있고, 주요 기능은 AC 440 (V)의 출력 전압으로 외부의 팬코일 유니트를 동작하는 제품이다. 선박에 설치되는 영역의 조건과 동일한 조건으로 설치되었으며, 진동대에 설치된 시험품은 그림 2와 같고, 계측에 사용된 가속도센서 및 계측장비는 표 6과 같다.

시험순서는 전후, 좌우, 상하방향 순으로 시험하였으며, 그림 3과 같이 부착된 가속도계 A00은 진동대의 진동 가속도를 확인하기 위해 진동대에 부착하고, A01은 시험품 상단, A02는 정면문 내부 중앙, A03은 내부 변압기에 부착되었으며 진동대의 가속도에 대한 가속도계 부착위치의 전달률을 확인하였다. 전달률이란 주어진 환경 진동 가속도에 대한 시험품의 진동 가속도의 비율을 나타내는 전달함수로 시험품의 공진 주파수를 확인하는데 유용하다.

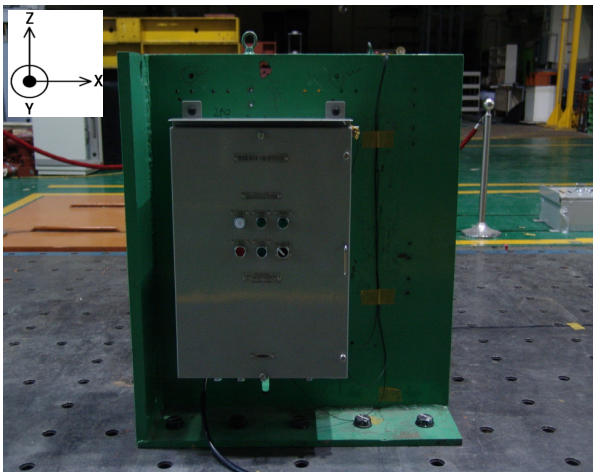


그림 2 시험품 설치  
Fig. 2 Installation of test equipment

표 6 가속도계 및 계측장비

Table 6 Accelerometer and measuring equipments

Item	Model	Serial No.	Quantity
Accelerometer	B&K 4370	30885, 30889, 30890	3
	B&K 4507 C	30156	1
Charge Amp.	B&K 2692	2340680	1
A/D Board	BNC-2111	12E5998	1
Notebook	SENS R40 Plus	24Y93DP700075F	1

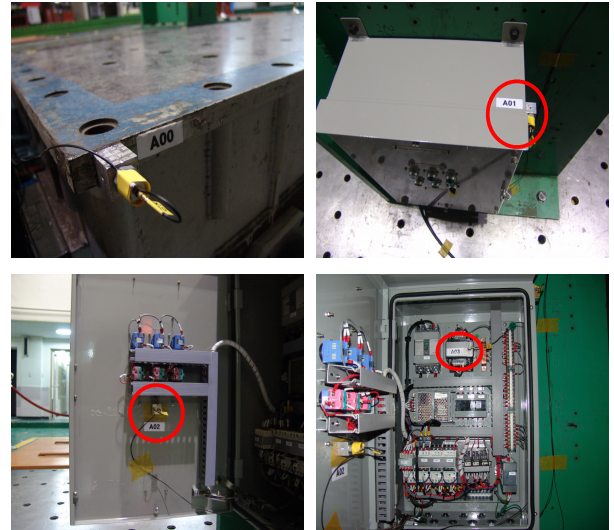
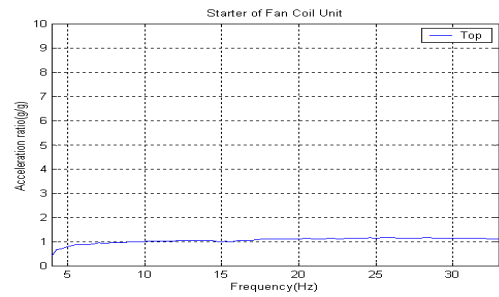
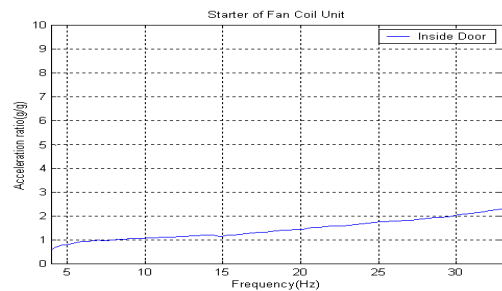


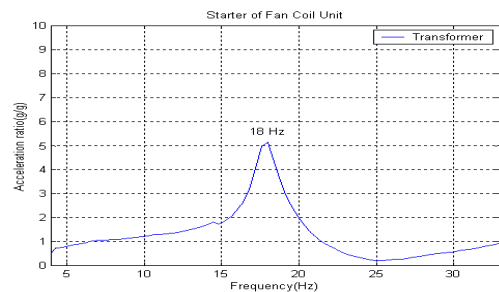
그림 3 가속도계 부착위치  
Fig. 3 Attached location of accelerometer



(a) top



(b) inside Door



(c) transformer

그림 4 탐색진동 시험의 가속도 전달률  
Fig. 4 Acceleration transmissibility of exploratory vibration test

표 2의 조건으로 진동대를 가진하였을 때 전후방향 탐색 진동시험에서 계측된 전달률은 그림 4와 같다. 그림 4(a)와 같이 장비의 국부진동은 진동대와 동일한 가속도를 갖는 1의 전달률을 나타내고, 회로가 구성되어 있는 중판에서는 그림 4(b)와 같이 전달률은 증가하지만 공진 주파수는 발견되지 않았다. 하지만, 중판의 구성품 중 변압기에서는 그림 4(c)와 같이 18(Hz)에서 진동대의 가속도보다 약 5배의 가속도를 갖는 공진 현상을 확인할 수 있었다. 만약 해당 시험품이 18(Hz)의 환경진동 주파수를 갖는 장소에 설치된다면 내부의 설치된 변압기는 많은 스트레스를 받게 될 것이다.

**2.3.2 가변주파수 시험(Variable Frequency Test)**

표 4의 조건으로 진동대를 가진 하였을 때 가변 주파수 시험에서 계측된 전달률은 그림 5와 같다. 시험품의 국부진동과 중판의 전달률은 탐색진동시험의 전달률과 비슷한 경향을 갖지만 변압기의 공진주파수는 17(Hz)로 변화하였다.

이러한 현상은 강성이 다소 낮은 변압기가 환경진동 외력의 변화로 공진주파수가 변화된 것으로 판단된다.

주파수별 진동대의 변위를 X (mm), 가속도를 a (m/s<sup>2</sup>)로 가정하면 주파수 변위별 진동대의 가속도는 식 (1)과 같이 계산된다[4].

$$a = \omega^2 \times X = (2\pi f)^2 \times X \div 1000 \tag{1}$$

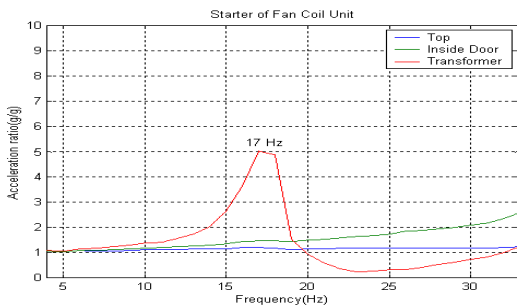


그림 5 가변주파수 시험의 가속도 전달률  
Fig. 5 Acceleration transmissibility of variable frequency test

**2.3.3 내구성 시험(Endurance Test)**

MIL-STD-167-1A의 규정에 따라 탐색진동시험 및 가변 주파수 시험에서 발견되는 공진 주파수에서 내구성 시험을 수행하였다. 해당 시험품의 공진 주파수는 17(Hz), 18(Hz)로 규격에서 요구하는 표 4의 환경진동과 표 5의 시험 시간동안 내구성 시험을 수행하였다. 변압기에서 공진현상은 발생하였지만 변압기에 부착된 고정밴드의 영향으로 고정 강성이 보완되어 탈거, 파손 등의 현상은 발생하지 않았고, 장비의 주요 기능인 AC 440(V) 출력전압에도 이상이 없음을 확인하였다. 그림 6은 시험품의 출력전압 AC 440(V)을 1/50로 감압하여 진동시험 중 기능 동작 유지 상태를 확인한 그래프이다. 상기와 같은 절차를 반복하여 좌우, 상하 방향에 대한 진동시험을 수행하였으며, 해당 시험품은 적용 규격에 부합되는 내구성을 갖고 있음을 확인하였다.

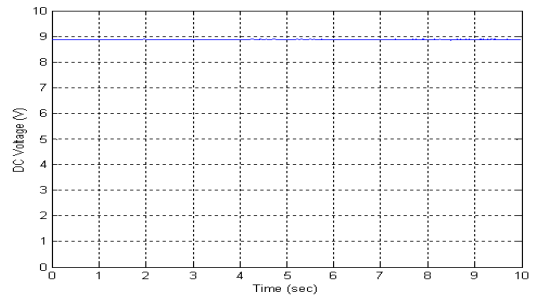
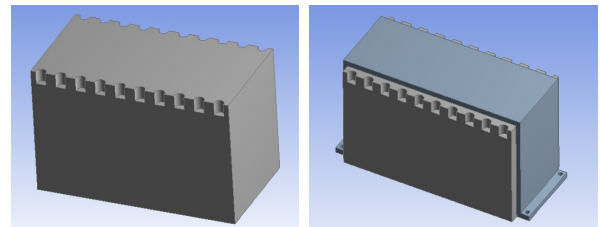


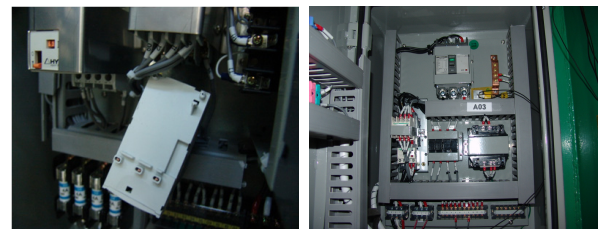
그림 6 출력전압 유지 상태 확인  
Fig. 6 Continuity check of output voltage

**3. 내구성 향상을 위한 방안**

철도 차량, 함정 등 진동환경에 계속적으로 노출되는 장비는 진동, 충격 등의 환경 조건에서도 장비의 주 기능을 보장해야 하는 것은 필수적이다. 이러한 환경 조건에서 장비의 내구성을 평가하기 위한 시험 중 주 기능이 유지되지 못한다면 해당 장비를 탑재하는 것은 제한된다. 시험에 부합하지 못한 시험품은 결함 부분을 수정 보완하고 재시험을 수행하여 요구되는 내구성을 만족하고 있음을 검증해야만 탑재할 수 있다[5]. 시험품 내부에 장착되는 구성품이 진동에 대한 자체 무게와 모멘트를 견디지 못해 그림 7(c)과 같이 파손되거나 이탈되는 경우가 있다. 이러한 경우 그림 7(b),(d)과 같이 구성품의 고정밴드를 부착하면 모멘트 감소 및 이탈을 방지할 수 있다.



(a) not attached fixing band (b) attached fixing band to solid model



(c) get out of component (d) example of specimen

그림 7 고정밴드 부착  
Fig. 7 Attached fixing band

전기적 Cable이 사용되는 시험품은 Cable을 보호하기 위해 그림 7(d)과 같이 Cable의 경로에 Cable 몰드와 Ties를 사용하여 케이블을 고정하여야 Cable 진동으로 인한



Terminal Lug의 소손 및 2차 손상을 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 시험품이 대형 판넬인 경우 외부에서 판넬의 기초를 고정하는 고정부의 면적이 충분하지 않으면 그림 8과 같이 고정부가 파손되는 경우가 있다. 이는 기능 동작성에 만족을 하였더라도 장비의 이탈로 인한 2차 사고를 예측할 수 있다. 이러한 경우 기초고정부의 파손을 방지하기 위해 그림 9와 같이 고정부 면적을 증가하여 고정부가 받는 스트레스를 분산시킬 필요가 있다.



그림 8 파손된 기초고정부  
Fig. 8 Damaged part of foundation

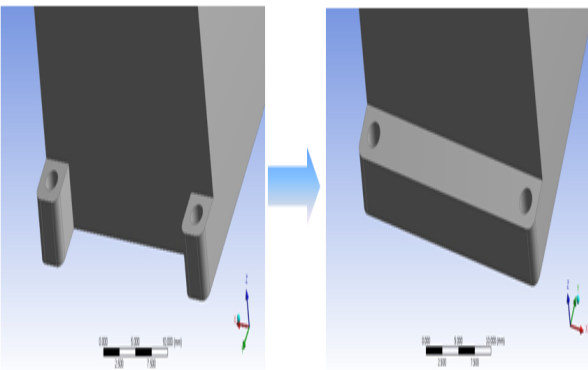


그림 9 증가된 고정부 면적  
Fig. 9 Increased part of foundation

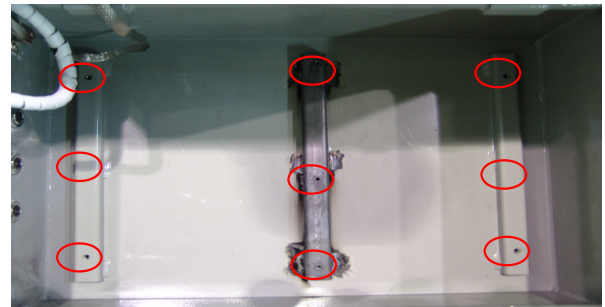
그림 7(d)과 같이 시험품에 중판을 설치하여 구성품을 배치하는 경우 그림 10(a)과 같이 주 프레임과 중판 사이에 충분한 고정이 이루어지지 않으면 그림 11과 같이 중판은 29(Hz)에서 진동대의 가속도 보다 10배 이상의 가속도를 갖는 공진현상을 초래하게 된다. 그러나 그림 10(b)과 같이 중판을 보강하여, 견고하게 고정하면 중판의 강성이 향상되어 그림 12와 같이 공진 주파수는 규격에서 요구하는 주파수영역 이상의 공진주파수를 갖게 되므로 부착되는 구성품은 보다 안정될 수 있다.

환경진동에서 내구성을 확보하기 위해 시험품을 구성하는 구성품 중 무거운 부품은 높은 위치에 배치하는 것은 지양하고, 가볍더라도 높게 위치하게 될 때에는 견고한 지지대를 필요로 한다.

시험품 내부에 Cable 배선을 해야 할 경우 몰드 및 Ties

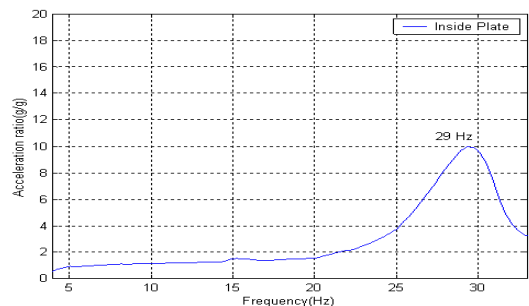


(a) before

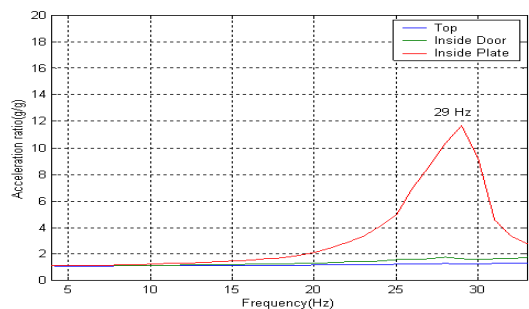


(b) after

그림 10 보강된 시험품의 고정부  
Fig. 10 Fixing part of reinforced test equipment



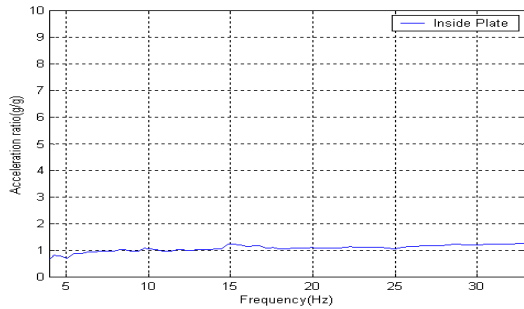
(a) exploratory vibration test



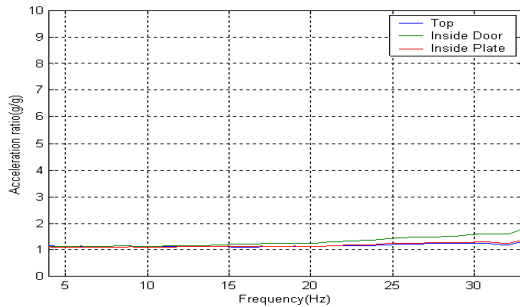
(b) variable frequency test

그림 11 시험품의 가속도 전달률(보강 전)  
Fig. 11 Acceleration transmissibility of test equipment (before reinforcement)

를 사용하여 Cable의 진동으로 인한 Terminal Lug의 파손 방지해야 하고, 무거운 대형 장비의 기초고정부 면적은 충분히 설계하여 고정부에서 받는 스트레스를 분산시키는 것



(a) exploratory vibration test



(b) variable frequency test

그림 12 시험품의 가속도 전달률(보강 후)

Fig. 12 Acceleration transmissibility of test equipment (after reinforcement)

이 바람직하다.

장비의 중판에 회로를 구성하는 경우에는 중판을 견고하게 고정하고 구성품은 고정 밴드를 사용하여 고정 강성을 확보하고, 환경진동과 동일한 진동 가속도를 갖는 1의 전달률을 갖도록 설계되어야 공진 현상을 방지할 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 MIL-STD-167-1A 규격의 Type I 을 적용하여 진동에 대한 전기설비의 내구성 향상 방안을 제시하였다. 함정에 탑재되는 장비뿐만 아니라 철도차량에 탑재되는 장비에서도 장비의 성능 향상, 안정화 및 안전을 위해 관련 규격에서 요구하는 성능평가를 수행 후 탑재장비의 내구성을 확신할 수 있다면 안정화된 제품으로서의 품질향상을 기대할 수 있을 것으로 예상된다.

또한, 우리나라 선박 및 철도 제작관련 기업의 기술 경쟁력을 확보하여 국산화 개발 및 제품생산을 통해 수입품의 원가절감 및 국내제품 수출에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

#### References

[1] S.J. Moon, S.M. Choi, J.A. Jeong, S.B. Choi, W.J. Jeong, J.Y. Koo, "A Study on Development of an Active Hybrid Mount for Naval Shipboard Equipment", The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, vol. 20, no. 7, pp. 685-692,

October 2010.

[2] KS R 9144. Test Method for Vibration of Part of Railway Rolling Stock.  
 [3] IEC61373:2010. Railway applications-Rolling stock equipment-Shock and vibration tests.  
 [4] William T. Thomsom, Marie Dillon Dahleh, "Theory of Vibration with Applications Fifth Edition"  
 [5] Department of Defense, USA, MIL-STD-167-1A:2005. Department of Defense Test Method Standard Mechanical Vibration of Shipboard Equipment.

### 저 자 소개



#### 박근석 (朴根碩)

1982년 4월 24일생. 2009년 한밭대학교 전기공학과 졸업. 2011년 동대학교 대학원 졸업(석사)



#### 심재명 (沈在明)

1951년 11월 13일생. 1976년 명지대학교 전기공학과 졸업. 1979년 동대학교 대학원 졸업(석사), 1992년 동대학원 졸업(박사). 1979 ~ 현재 한밭대학교 전기공학과 교수.



#### 李大東 (李大東)

1976년 12월 26일생. 2002년 우송대학교 전자공학과 졸업. 2004년 한밭대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2014년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사).