

# 동특성 분석을 통한 하우징의 구조건전성 평가

## The Evaluation of the Electronic Housing Structural Integrity Using Dynamic Analysis

이재은†‡ · 최혜윤\* · 김병준\* · 이증\* · 정오균\*\*

Jae-Eun Lee, Hye-yoon Choi, Byung-Jun Kim, Jeung Lee and Oh-Kyun Jeong

**Key Words :** SRS(충격응답스펙트럼), Random Vibration(랜덤가진),Structural Integrity(구조건전성)

### ABSTRACT

The rapid tactical operation and mobility are getting important to recently developed the guided weapon systems. And military wants multi-purposes equipment to carry the war more easily. So military wants to have the equipment that can apply without any distinction about environment. For this reason, the robust design is getting more important now to guarantee survivability of equipment. In this paper, we try to check about structural integrity of Fire Control Unit(FCU) which is one of the guided weapon system using dynamic FEM analysis.

### 1. 서 론

유도무기 체계는 사용 환경에 따라 육, 해, 공으로 나뉘며, 그에 따라 습도, 염수, 진동, 충격, 강우, 먼지, 곰팡이 등의 조건에 대하여 특정이상의 성능 확보가 가능하도록 설계해야한다.

최근 들어 개발되는 유도무기 체계는 앞에서 언급한 환경요소에 대한 기본적인 성능확보 요구 외에 이동성 및 신속한 작전 전개력 확보를 위해 경량화된 설계를 요구하고 있으며, 장비의 재사용 비율을 높이기 위해 환경 구별 없이 통합사용이 가능한 장비를 개발하도록 요구하고 있다.

기계 설계적 입장에서 다양한 환경에서 전자장비의 생존성을 확보하기 위해서는 무엇보다도 장비를 강건(Robust) 구조로 설계 하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 유도무기체계의 주요 구성 장비 중

에 하나인 제어기에 대하여 합상, 육상 플랫폼에서의 진동, 충격 및 피로에 대한 내 환경성 확보 여부 및 구조건전성을 평가 하고자한다.

본 논문의 구조건전성 평가 방향은 먼저 유한요소 해석(FEA)을 통한 고유치 분석으로 장비의 동특성을 확인 한 뒤, 군사 환경 규격에 명시된 진동, 충격 조건에서의 장비 응답을 살펴보고 예상 진동 환경에서의 피로 분석을 통해 장비의 수명을 예측하는 방식으로 진행하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 구조 및 규격 검토

##### (1) 기본 구조 검토

분석을 실시할 제어기(Control Unit, CU)는 아래와 같은 형상이다.

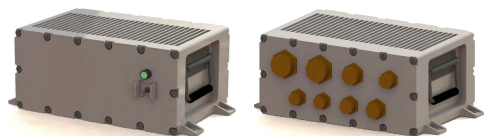


Fig. 1 Modelings of Control Unit(CU)

† ‡ 교신저자, 발표자; 정회원, LIGNex1  
E-mail : jaeeun.lee@lignex1.com  
Tel :031-8026-4913, Fax :031-8026-7084

\* LIGNex1  
\*\* 국방과학연구소

본 장비의 구성은 전면판, 몸체부, 후면판으로 나뉜다.

전면판에는 회로차단기와 LED가, 후면판에는 외부 장비와의 연동을 위한 커넥터가 배치되어 있으며 하우징에는 고정을 위해 발구조가 적용되어 있다.

장비 내부에는 장비 크기 및 중량 감소를 위해 케이블을 없애고 연결기와 모체반이 하나로 구성된 연결기 일체형 보드를 적용하였다.

연결기 일체형 보드는 내부 모체반과 케이블간의 하네스를 없앴으로써 장비 경량화에는 유리하나, 외부 진동이 내부 모체반과 연결기 일체형 보드에 그대로 전해지는 구조이므로, 적절한 진동 절연이 없을 시 진동에 취약한 구조이다.

본 장비의 분석에 있어서 관심이 되는 부위는 진동, 충격과 같은 동적 하중 적용 시 응력 집중이 예상되는 하우징 발 부위와 커넥터가 부착되는 후면판이다. 이 부위의 구조건전성 평가는 응력과 변형률 분석을 도출해서 확인하였다.

(2) 적용 규격 검토

본 장비는 앞에서 언급한 것과 같이 합상, 육상 환경에 사용이 가능한 장비여야 하므로 각 환경에 대하여 적용할 규격서는 아래와 같다.

**Table 1 Environment Reference of FCU**

적용 환경	적용 구분	규격서
합상	진동	MIL-STD-167-1A <sup>(1)</sup>
	충격	MIL-STD-901D <sup>(2)</sup>
육상	진동	MIL-STD-810G <sup>(3)</sup> , 514.6
	충격	MIL-STD-810G, 516.6

합상 장비의 경우 엔진과 프로펠러 추진 시 발생되는 진동 및 교전 시 탄에 의한 충격으로부터 운용자의 안전성을 확보하고 전투가 지속될 수 있도록 장비 설계 시 아래의 규격을 만족하도록 하고 있다.

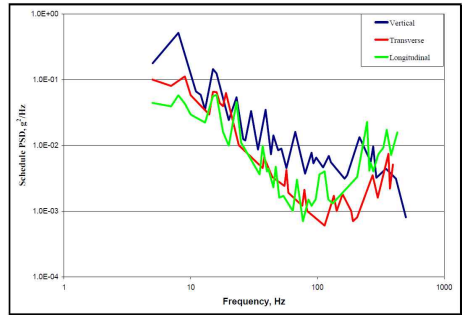
**Table 2 Summary of MIL-STD-167-1**

항목	시험주파수	내용
공진탐색 시험	4~33Hz	시험주파수 영역에서 1Hz 단위로 15초씩 가진
가변주파수 시험		시험주파수별 지정된 진폭으로 5분간 가진
내구성시험		장비 공진 Hz에서 최대 2시간 가진 하여 장비 내구성 평가. 공진이 없을 시 33Hz에서 실시.

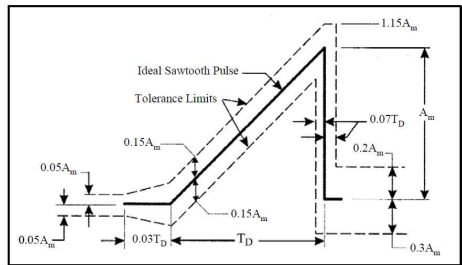
**Table 3 Summary of MIL-S-901D**

경 중량 충격시험	중간 중량 충격시험	중 중량 충격시험
<ul style="list-style-type: none"> <li>•Load 550lb 이하 (치구+ 장비)</li> <li>•1,3.5ft 높이에서 해머 낙하 충격</li> <li>•3축 방향 최소 9회 해머 낙하 충격</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Load 550lb~7,400lb (치구+ 장비)</li> <li>•load에 따라 해머 낙하 높이 지정</li> <li>•최소 6회 해머 낙하 충격 (수평 3회, 경사3회)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Load 60,000lb 이상 혹은 400,000lb 이상(플랫폼 차이)</li> <li>•4 UNDEX shots</li> </ul>

육상 장비는 일반적으로 MIL-STD-810G 환경규격을 따른다. 진동의 경우 수송 장비의 특성 및 도로 포장 여부에 따라 5~500Hz 주파수 영역에서의 랜덤가진에 대하여 장비 내구성을 평가를 하며, 충격의 경우 삼각과 펄스 형태의 과도입력에 대한 응답 확인 혹은 장비 특성에 맞는 충격 스펙트럼 입력을 통해 장비 내구성을 평가한다.



**Fig. 2 Random Vibration Profiles of MIL-STD-810G**



**Fig. 3 Shock Profile of MIL-STD-810G**

**2.2 고유치 분석에 따른 구조건전성 평가**

(1) 모델 작성

본격적인 구조건전성 분석을 위해 설계 모델링에 대한 유한요소모델을 아래와 같이 생성하였다. 격자는 신뢰도 높은 응답 확인을 위해 모델 전처리 과정 후 고차 Hex요소를 이용하여 작성하였고, 자유도는 약 300만개이다.



Fig. 4 FEM of Control Unit(CU)

(2) 고유치 분석(Eigenvalue Analysis)

해석 모델링의 검증 및 구조적 취약성 확인을 위해 고유치 분석을 실시하였다.

$$\det([K] - \omega_i [M]) = 0 \quad (1)$$

분석 시 모드 중첩법(Mode Superposition Method)에 의한 응답 신뢰도를 높이기 위해 주요 모드는 질량 참여도에 따라 10개를 도출하였다.

Table 4 Eigenvalues of Fire Control Unit(FCU)

Mode	Frequency (Hz)	Mass Participation Ratio		
		Transverse	Longitudinal	Vertical
1st	634.48	-	0.62	-
2nd	883.03	-	0.37	-
3rd	1202.3	0.98	-	-
4th	3856.8	-	-	0.10
5th	4640.0	-	-	0.11
6th	6642.3	-	-	0.08
7th	7311.1	-	-	0.12
8th	7372.2	-	-	0.30
9th	7989.8	-	-	0.20
10th	8277.0	-	-	0.05
Sum		0.98	0.99	0.91

고유치 해석을 통해 모드에 따라 각 방향별 전체 질량 참여도가 90%이상 확보되었으므로, 모드 중첩법에 의한 진동, 충격에 대한 분석 시 응답 결과에 대하여 비교적 높은 신뢰도를 기대할 수 있으리라 생각된다.

2.3 진동 환경에서의 구조건전성 평가

(1) 합상 진동에서의 구조건전성 평가

MIL-STD-167-1A에 명시된 가변주파수 시험은 강제 조화 변위에 대한 응답을 검토하는 시험으로 조화력에 대한 응답 분석을 통해 구조건전성을 평가할 수 있다.

$$[M]\ddot{u} + [C]\dot{u} + [K]u = F_{\max} e^{i\psi} e^{i\Omega t} \quad (2)$$

본 하우징에 적용한 재료의 응력-변형률 관계를 살펴보면 재료의 항복점 이후 소성 변형구간이 존재하는 연성재료이므로, 연성재료(Ductile)의 파괴를 비교적 잘 예측할 수 있는 Von-mises 응력을 이용하여 장비의 구조건전성을 평가하였다.

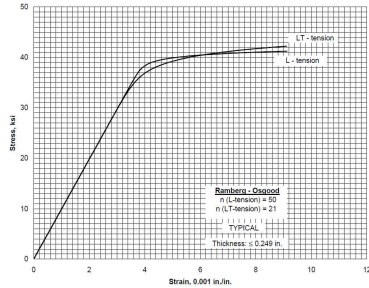


Fig. 5 Tensile Stress-strain Curves for Al6061-T6<sup>(4)</sup>

관심주파수 영역에서 입력 진폭에 대한 하우징 발부위의 최대 응력과 하우징 변위의 응답 결과는 다음과 같다.

Table 5 Stress(Mpa) for Directions

Transverse	Longitudinal	Vertical
7.9	12.3	2.0

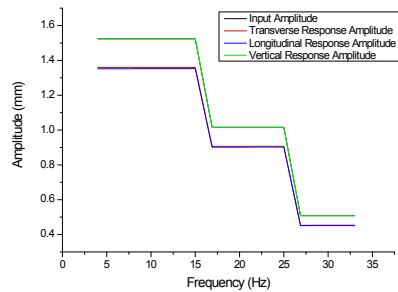


Fig. 6 Response Amplitude for Directions

최대 응력을 검토한 결과 해당 부에 응력 마진이 있음을 확인할 수 있었으며, 변위 응답을 검토한 결과 본 장비는 공진에 대한 영향은 없음을 알 수 있었다.

(2) 육상 진동에서의 구조건전성 평가

차량 수송에 의한 가진은 랜덤가진으로 정의되며, 그렇기 때문에 확률에 의한 응력 평가를 통해 구조건전성을 평가할 수 있다.

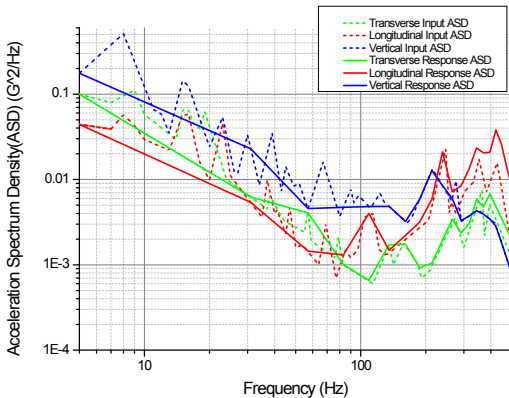
$$S_{out}(\omega) = |H(\omega)|^2 S_{in}(\omega) \quad (3)$$

랜덤가진에 의한 응답은 가우시안 정규분포 (Gaussian Distribution)<sup>(5)</sup> 형태를 따르는 것으로 알려져 있다. 그러므로 응답 분포는 3대역(1σ~3σ)에 의한 평가가 가능한데, 본 논문에서는 3대역 중 발생 확률은 0.27%로 가장 낮지만 장비에는 치명적일 수 있는 3σ 대역에서의 응력에 대하여 검토하였다.

관심주파수 영역에서의 입력 ASD(Acceleration Spectrum Density)에 대한 하우징 발 부위의 최대 응력과 하우징의 가속도 응답 결과는 다음과 같다.

**Table 6** 3σ(0.27%) Stress(Mpa) for Directions

Transverse	Longitudinal	Vertical
22.3	54.5	16.4



**Fig. 7** Input and Response ASD for Directions

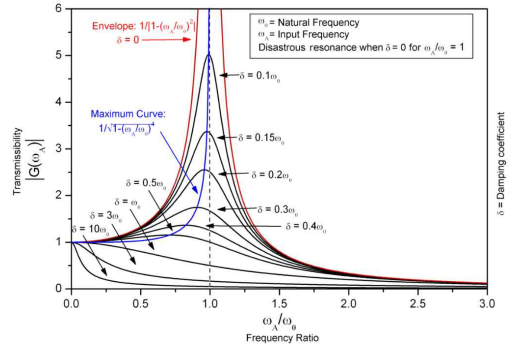
최대 응력을 검토한 결과 해당 부에 응력 마진이 있음을 확인할 수 있었으며, 가속도 응답을 검토한 결과 장비 세로축 방향으로 450~500Hz 대역에서 약간의 증폭이 발생하는 것을 확인하였다.

장비의 각 방향별 입력 및 출력 Grms(G' Acceleration Root Mean Square)에 대하여 전달율을 비교해 본 결과 세로축 방향으로 약 32% 정도 응답 증폭이 있음을 확인 할 수 있었다.

**Table 7** Transmissibility for Directions

Direction	Input ASD (Grms)	Response ASD (Grms)	Transmissibility
Transverse	1.48	1.67	1.12
Longitudinal	1.90	2.51	1.32
Vertical	2.24	2.30	1.02

이는 이론적으로 입력/출력 주파수 비가 1.4배 이상 되는 영역까지는 공진에 의한 증폭효과가 있으므로, 세로방향의 경우는 1차 모드에 의하여 응답 증폭이 일어난 것이 원인이라 생각된다.



**Fig. 8** Transmissibility-Frequency Ratio Curves<sup>(6)</sup>

## 2.4 충격 환경에서의 구조건전성 평가

### (1) 합상 충격에서의 구조건전성 평가

본 제어기는 설치 치구를 포함한 예상 중량이 65kg(143.3lb) 내외이므로, Table3에서 언급한 시험법 중 경중량 충격 시험에 해당된다.

**Table 8** Total Weight(kg) of FCU Parts

구분	전면판	후면판	하우징	PCB	모체반	시험 치구	합산 중량
중량	0.87	1.48	6.48	5.0	0.5	48.8	63.13

충격 분석법은 일반적으로 등가정적분석법, 스펙트럼 분석법, 과도응답 분석법이 있으며, 본 장비는 스펙트럼 분석법을 사용하여 충격에 대한 구조건전성을 평가하였다.

주파수 변환 시 감쇠는 1% (Q=50)로 가정하였으며, 모드 합산 시 인접 공진주파수 간에 일부 영역이 겹치므로 상호 연관성을 고려하기 위해 Rosenblueth(ROSE)법을 이용하였다.

$$R_a = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \varepsilon_{ij} R_i R_j} \quad (4)$$

스펙트럼 분석을 위해 사용할 입력 데이터는 유사 체계에서 가속도계로 측정된 데이터와 참조서(NRL 7396)<sup>(7)</sup>에서 제공하는 스펙트럼을 사용하였다.

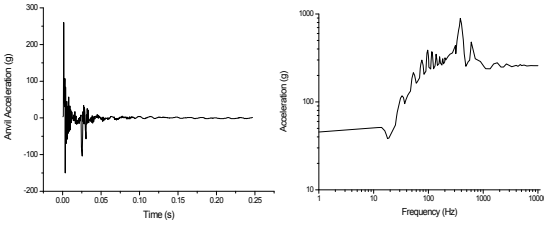


Fig. 9 Transforming Time Domain into Frequency Domain

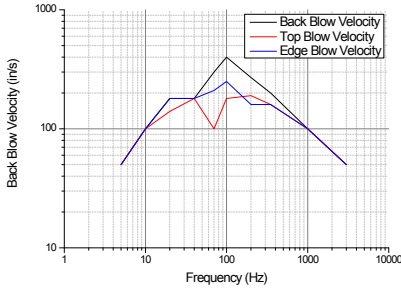


Fig. 10 NRL7396 Spectrum(5ft-57lb) for Directions

두 가지 방법으로 도출한 충격 스펙트럼에 대한 하우징 발 부위의 최대 응력 결과는 다음과 같다.

Table 9 Stress(Mpa) for Test Spectrum(2ft-1800lb)

Transverse	Longitudinal	Vertical
182.3	214.8	125.5

Table 10 Stress(Mpa) for NRL7396 Spectrum

Transverse	Longitudinal	Vertical
203.7	235.3	150.3

최대 응력 값을 검토한 결과 해당 부에 응력 마진이 있음을 확인할 수 있었다.

(2) 육상 충격에서의 구조건전성 평가

MIL-STD-810G에서는 충돌 위험이 예상되는 장비를 위한 시험과 기능상 시험으로 나누어 충격 스펙트럼을 적용하도록 하고 있다.

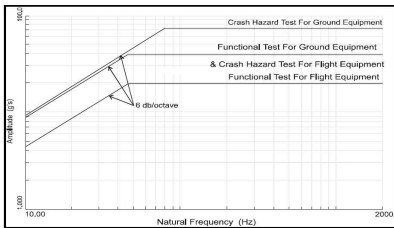


Fig. 11 Shock Spectrum for Ground Equipment

충돌 위험이 예상되는 장비일 경우가 보다 가혹한 조건이므로 이때의 하우징 발 부위 최대 응력 결과는 다음과 같다.

Table 11 Stress(Mpa) for Shock Spectrum

Transverse	Longitudinal	Vertical
147.8	198.6	75.5

최대 응력 값을 검토한 결과 해당 부에 응력 마진이 있음을 확인할 수 있었다.

2.5 피로 환경에서의 구조건전성 평가

(1) 함상 진동 피로에서의 구조건전성 평가

진동에 의한 피로는 재료가 탄성영역에서 거동하고 교번하중(Alternating Stress)이  $10^3$  사이클 이상 지속되는 경우 S-N(응력-수명) 곡선을 이용하여 피로를 평가 할 수 있다.

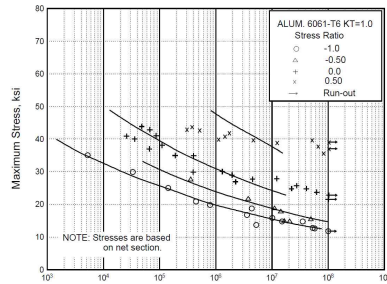


Fig. 12 S-N Curve for Al6061-T6

이때, 진동 피로에 대한 수명은 아래의 S-N 곡선에 대한 관계식에 의해 도출 할 수 있다.

$$N_1 S_1^b = N_2 S_2^b \quad (5)$$

본 장비의 고유치 분석 결과 1차 모드가 634.48 Hz대역이므로 앞에서 언급된 MIL-STD-167-1A 내구성 시험의 경우 규격의 최대 가진 주파수인 33Hz에서 각 축별로 2시간 동안 내구성 시험을 해야 한다.

내구성 시험에 대한 진동에 의한 피로는 누적 손상법(Miner's Rule)을 통해 분석이 가능하다.

$$R_n = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots = 4.02E-6 \ll 1 \quad (6)$$

(2) 육상 진동 피로에서의 구조건전성 평가  
육상 진동에 대한 피로는 해당 랜덤가진에 대하여 각 축별로 2시간 동안 내구성 시험을 하도록 되었다. 육상 진동 피로 역시 누적 손상법에 의하여 1σ 부터 3σ 대역의 응력을 이용하여 분석하였다.

$$R_n = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots = 4.32E-3 \ll 1 \quad (7)$$

**Table 12** Test Cycles for Directions<sup>(8)</sup>

Direction	Eigenvalue (Hz)	Time Duration (s)	Time Ratio	Test Cycles
Transverse	1202.3	7200	1σ : 0.683	5912430
			2σ : 0.271	2345928
			3σ : 0.0433	374829
Longitudinal	634.4		1σ : 0.683	3119725
			2σ : 0.271	1237841
			3σ : 0.0433	197780.5
Vertical	7372.2	1σ : 0.683	36252547	
		2σ : 0.271	14384246	
		3σ : 0.0433	2298295	

누적 손상법에 의한 피로 검토 결과 합상, 육상 내구성 시험에 대하여 무한 수명을 확보하였음을 확인하였다.

### 3. 결 론

본 논문을 통해서 검토했던 내용은 아래와 같다.

(1) 고유치 분석을 통해 공진주파수를 확인하였고, 합상, 육상 환경 규격에 대하여 검토하였다.

합상 진동의 경우 주파수별 조화가진에 대하여 관심부의 응력 응답과 응답 변위를 검토하였다.

육상 진동의 경우 해당 주파수의 랜덤가진에 대하여 확률분포 응력을 이용하여 관심부의 응력 응답과 가속도 응답을 검토하였다.

합상 충격의 경우 측정된 시험데이터와 참조서에 언급된 스펙트럼을 이용하여 관심부의 응력 응답을 검토하였다.

육상 충격의 경우 MIL-STD-810G에 언급된 스펙트럼을 이용하여 관심부의 응력 응답을 검토하였다.

피로에 대하여 S-N 곡선과 누적 손상법을 이용하여 수명을 예측하였다.

(2) 관심영역 중 하나였던 후면판의 변형률을 검

토한 결과 응답 값이 극소하므로 연결기 일체형 보드의 구조건전성이 확보되었음을 확인하였다.

**Table 13** Maximum strain for Directions

Vibration Type	Direction	Connector Plate Strain(mm/mm)	Remark
Harmonic	Transverse	1.55e-6	MIL-STD-167-1A
	Longitudinal	5.58e-6	
	Vertical	8.65e-7	
Random	Transverse	1.86e-6	MIL-STD-810G
	Longitudinal	1.72e-5	
	Vertical	6.14e-7	
Shock Spectrum	Transverse	6.55e-5	MIL-S-901D
	Longitudinal	5.85e-4	
	Vertical	8.85e-5	
	Transverse	8.85e-5	MIL-STD-810G
	Longitudinal	1.92e-4	
Vertical	4.59e-6		

### 참 고 문 헌

(1) DOD, 2005, MIL-STD-167-1A FF: Department of Defense Test Method Mechanical Vibrations of Shipboard Equipment.

(2) DOD, 1989, MIL-S-901D : Military Specification Shock Test H.I Shipboard Machinery, Equipment, and System for, 1.2 Classification.

(3) DOD, 2008, MIL-STD-810G : Department of Defense Test Method Standard for Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests.

(4) DOD, 2003, MIL-HDBK-5J : Department of Defense Handbook Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures.

(5) Steinberg, D. S., 2000, Vibration Analysis for Electronic Equipment, John Wiley & Sons Inc., 3rd Edition.

(6) Allan G. Piersol, 2010, Harris's Shock and Vibration Handbook, Mc Graw-Hill, 6th Edition.

(7) E.W Clements, 1972, NRL Report 7396 : Shipboard Shock and Navy Devices for Its Simulation, Naval Research Laboratory.

(8) Jong-Hak Lee, 2013, Dynamic Characteristic Analysis Procedure of Helicopter-mounted Electronic Equipment, Transactions of the KSNVE. Vol. 23, No. 8, pp. 759~769.