

HERO 시험평가 기법 연구

The Research of the HERO Test and Evaluation Technique

신 승 제*
Shin, Seung-Je

ABSTRACT

This report presents the test technique using optic thermal sensor for the HERO evaluation of equipment installed EED. The calibration method of EED-thermal sensor assembly is explained by relation between the current in bridge wire and voltage in thermal sensor. And the HERO test and evaluation method is indicated based on MIL-STD-464A and MIL-STD-331C. The safety and reliability levels of EED-thermal sensor assembly are evaluated when exposed in the electromagnetic environment.

주요기술용어(주제어) : Electric Explosive Device(EED : 전기기폭장치), Hazards of Electromagnetic Radiation to Ordnance(HERO : 병기에 대한 전자기 복사위해), Maximum No Fire Stimulus(MNFS : 최대 비발화 자극)

1. 머리말

다양한 전자장비의 고집적화와 고출력화에 따라 전자파 환경이 점점 복잡해지면서 장비 또는 시스템 상호간에 전자파 간섭 가능성이 증가되고 있으며, 간섭 현상의 결과로 장비 또는 시스템의 성능저하 및 오동작이 발생할 수 있다. 특히 무기체계인 함정, 항공기, 유도탄 등에서 발생하는 전자파 간섭은 군 전력과 직결되므로 더 큰 위협 요인이라고 할 수 있다.

전기기폭장치(EED : Electric Explosive Device)는 주로 작은 금속관 내부에 발열선과 기폭약, 주장약 등으로 구성되어 있으며, 정해진 전기신호가 인가되면 발열선에 발생하는 Joule열에 의해 기폭약이 점

화되고 이 폭발의 연쇄작용으로 주장약을 점화시키는 장치로 사용된다^[1-4]. 이러한 EED는 자동차 에어백, 로켓의 기체 분리 등 민수 및 군수 분야에 널리 사용되고 있다. 만약 고출력 통신기나 레이더에서 방사되는 전자파에 의해 예기치 않은 EED의 기폭이 발생할 경우 대형 사고로 발전할 수 있다. 특히 EED가 탑재된 무기체계의 경우 장전, 발사, 저장, 운반 및 취급시 전자파 환경에 노출되어 기폭될 경우 큰 피해를 유발 시킬 수 있으므로 EED가 탑재된 장비 및 시스템에 대한 HERO시험이 필수적으로 요구된다.

퓨즈(fuze)의 성능평가 규격인 MIL-STD-331C 및 체계 전자파환경 요구조건을 제시한 MIL-STD-464A에는 병기에 장착된 EED가 직접적인 무선주파수(RF : Radio Frequency)에 의해 유도된 전자파 환경에 노출되는 동안에 신뢰성과 안전성 기준을 충족해야 한다고 규정하고 있다^[5,6].

본 논문에서는 광섬유 온도센서를 이용하여 EED

† 2007년 1월 22일 접수~2007년 4월 3일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : ssjsin@add.re.kr

가 탑재된 무기체계에 대한 HERO 특성을 검증하기 위한 시험평가 기법을 제시하였다. 먼저 HERO 시험평가 기준 및 시스템 구성을 제시하였고, EED-온도센서 결합체에 대한 교정절차 및 시험절차를 개발하여 시험용 EED에 적용함으로써 신뢰성과 안전성을 평가하였다.

2. HERO 시험평가 기준

가. 전자파 환경인가 기준

MIL-STD-464A에서는 EED가 장착된 무기체계를 운용 상황에 따라 표 1과 같이 6가지 상태로 분류하며 각 상태에 대한 전원 조건 및 응답 조건에 따라 “비제한적(unrestricted)” 및 “제한적(restricted)”으로 환경기준을 결정한다. 표 2는 MIL-STD-464A에 규정된 1GHz 이하의 전자파 환경 수준을 나타내었고, EED가 탑재된 피시험체는 이런 전자파 환경에 노출될 경우에 오동작 또는 성능저하가 발생되지 않아야 한다. EED의 오동작은 안전성과 관계되며, 성능저하는 신뢰성 정도를 나타내는 것으로서 EED가 여러 차례 낮은 수준의 RF 에너지에 노출되면 둔감해질 수 있으며 이에따라 기폭신호 인가시 발화되지 않게 될 수도 있다^[5,6].

나. HERO 평가 기준

EED가 탑재된 무기체계가 저장, 운반, 취급, 장전

[표 1] HERO 전자파 환경시험 수준

상태	전자기 환경 수준	
	전원 미인가, 지연응답기폭기	전원 인가, 고속응답기폭기
운송/저장	비제한적	비제한적
조립/분해	제한적	제한적
장전/제거	제한적	제한적
수송집결	비제한적	비제한적
플랫폼 적재	비제한적	비제한적
발사 직후	비제한적	비제한적

[표 2] HERO 시험을 위한 외부 전자파 환경 (10kHz~1GHz)

주파수 범위 (MHz)	전계강도[V/m]			
	비제한적		제한적	
	최대치 ¹⁾	평균치 ²⁾	최대치	평균치
0.01~2	70	70	70	70
2~30	200	200	100	100
30~150	90	61	50	50
150~225	90	61	90	61
225~400	70	70	70	70
400~700	1940	260	1500	100
700~790	290	95	290	95
790~1000	70	70	70	70

- 1) 최대치 : 펄스변조 인가 시험치
- 2) 평균치 : 무변조 인가 시험치

및 발사 시 지정된 전자파 환경에 노출 되었을 때, 안전성과 신뢰성을 유지하고 있는지를 판단하기 위한 기준은 다음과 같이 정의 한다^[5,6].

a. 안전성 평가기준

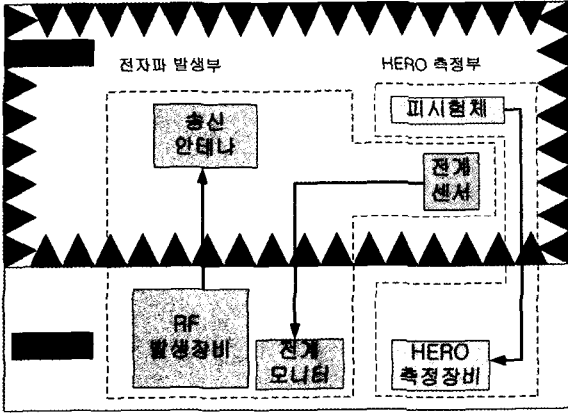
병기가 지정된 전자파 환경에 노출 되었을 때 EED 내부 발열선에 유기되는 전류가 최대 비발화 자극(MNFS : Maximum No Fire Stimulus)의 16.5dB이면 안전성을 상실하고 오폭의 위험이 존재한다고 판단한다.

b. 신뢰성 평가기준

병기가 지정된 전자파 환경에 노출 되었을 때 EED 내부 발열선에 유기되는 전류가 MNFS의 6.9dB이면 신뢰성을 상실한다.

3. HERO 시험평가 시스템 구성

HERO 시험평가를 수행하기 위해 전자파 흡수체가 설치된 차폐실험실에 그림 1과 같이 전자파 발생부와 HERO 측정부를 구성한다.

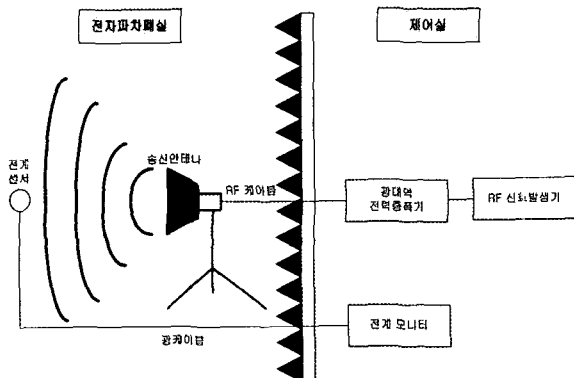


[그림 1] HERO 시험평가 시스템 구성

가. 전자파 발생부

전자파 환경 조성을 위한 장비는 그림 2와 같이 제어실에 RF 신호발생기(signal generator), 광대역 전력증폭기(wideband power amplifier) 및 전계모니터 장비를 설치하고, 전자파차폐실에 송신안테나 및 전계센서를 설치하여 구성한다.

HERO 시험에 사용되는 RF 신호발생기 및 전력증폭기는 시험대상 주파수 범위에서 안정적인 출력이 가능해야 한다. 또한 출력 주파수는 공진주파수의 2% 이내에서 통제할 수 있을 정도로 정밀해야 한다. 전자파를 방사하기 위해 사용되는 안테나는 송신 장비의 출력을 시험대상 공간에 균일한 전계 세기로 복사시킬 수 있어야 하며, 1GHz 이하 주파수 대역에서는 시험대상 공간의 전계 세기가 6dB 이상 변하지 않아야 한다. 1GHz 이상 주파수 대역에서는 위와 같



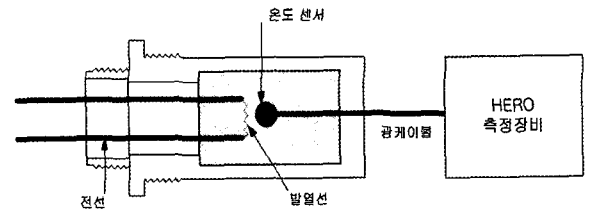
[그림 2] 전자파 환경 조성을 위한 장비구성

은 규정은 없지만 EED가 탑재된 피시험체의 균열 부위, 이음새 부위, 기타 침투 부위들이 전자기 복사 환경에 충분히 노출되어야 한다. 인가한 전자파 환경 즉 전계 세기를 측정하기 위해서는 전계센서를 사용하여 측정하며 최소한 2dB의 절대 정확도를 가진 장비를 이용한다^[5].

나. HERO 측정부

전자파 환경 인가에 따른 피시험체 내부 EED 발열선의 온도변화를 측정하기 위해 광섬유 온도 센서를 피시험체의 EED 내부 발열선 가까이에서 그림 3과 같이 설치한다. 이때 안전한 시험을 위해 기폭약과 주장약은 제거한다. 본 논문에서 사용한 온도 센서의 동작 범위는 0°C에서 120°C이며 반응속도는 1msec이다. 세부사양은 표 3과 같다.

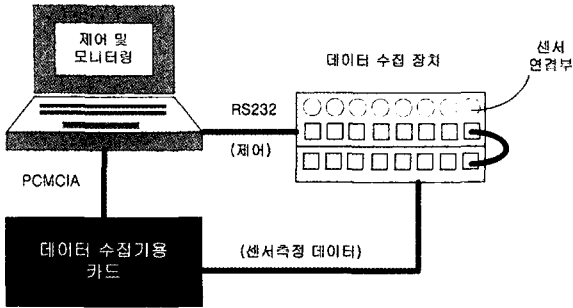
온도센서를 통해 측정된 신호를 수집하고 분석하기 위해 그림 4와 같은 HERO 측정 장비를 구성하였다. 이 HERO 측정장비는 8개 온도센서의 데이터를 동시에 수집(data acquisition unit) 및 저장하여 측정결과를 비교 분석할 수 있다. 데이터 수집 장치의 세부 사양은 표 4와 같다.



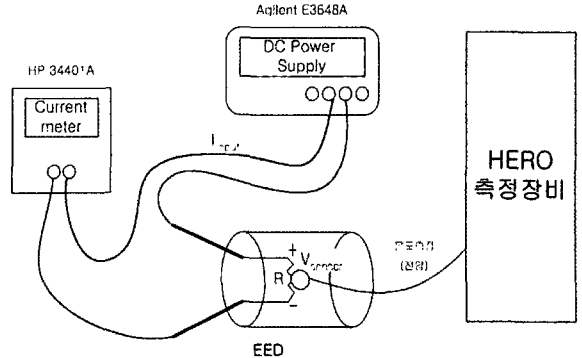
[그림 3] 온도센서 설치

[표 3] 온도 센서 사양

구 분	사 양
동작 온도 범위	0~120°C (32 to 248°F)
정확도	0.03°C @ 0.001sec avg
센서 응답시간	< 1msec
센서 크기	150×150microns
광섬유 직경	100microns



[그림 4] HERO 측정 장비



[그림 5] 교정을 위한 구성도

[표 4] 데이터 수집 장치 사양

구 분	사 양
채널 수	8
샘플링 수	1kHz
정확도	0.03℃
동작한계	150℃
통신(제어)	RS-232
동작범위	0℃ to 40℃

$$V_{bridge} = R_{bridge} \times I_{input} \quad (1)$$

$$P_{bridge} = R_{bridge} \times I_{input}^2$$

$$T_{sensor} \propto P_{bridge}$$

온도센서에서 측정된 온도는 HERO 측정장비에서 전압의 형태로 변환되어 나타나며, 식 (3)과 같이 온도센서 출력전압(V_{sensor})은 EED전류의 제곱에 비례하는 형태로 나타난다^[7].

$$V_{sensor} \propto T_{sensor} \quad (2)$$

$$V_{sensor} \propto I_{input}^2 \quad (3)$$

4. 시험 절차 및 적용

HERO 시험평가를 수행하기 위해서는 시험 전 피 시험체에 탑재되는 EED의 발열선 가까이에 그림 3과 같이 온도센서를 설치한 다음 교정 및 시험을 수행한다.

가. 교정 절차

교정은 온도센서 각각의 미세한 특성 차이와 온도센서를 EED에 설치하는 과정에서 발열선과 온도센서의 거리에 따른 온도 차이를 보상하기 위해서 필요하다. 교정 절차는 그림 5와 같이 시험 장비를 구성한 다음, EED에 일정한 값의 전류를 공급하고 이 전류에 의해 발열선에 발생하는 열을 온도센서를 통해 측정한다. 온도센서를 통해 측정된 온도(T_{sensor})는 식 (1)과 같이 표현 할 수 있다.

세부 교정절차는 다음과 같다.

- 그림 5와 같이 교정 장비를 구성한다.
- 센서 교정에 사용할 시험 전류의 범위를 결정하고 인가한다.(전류계로 인가 전류를 확인)
- 인가전류를 on/off 하면서 HERO 측정장비로 전압의 변동량을 측정한다.
- 결정된 인가전류 범위에 대해 차례대로 b와 c의 절차를 반복한다.
- 인가전류와 측정전압의 관계를 온도센서의 교정치로 활용한다.

그림 5의 HERO 측정장비는 온도센서를 이용하여 측정된 온도를 전압으로 변환하는 기능을 수행하게

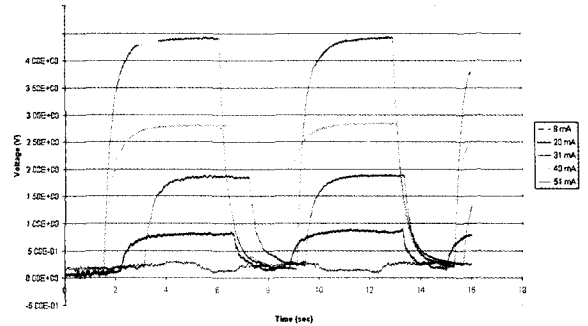
된다. 따라서 대기 중의 미세한 온도변화에 따라 전압으로 변환된 출력값의 정렬기준선이 달라질 수 있으므로 정렬기준선 변화에 따른 측정오차를 보상하기 위해서는 전류 미인가시의 측정치와 전류인가시의 측정치 간의 상대적인 차이값을 측정전압으로 이용하여야 한다.

나. 시험절차

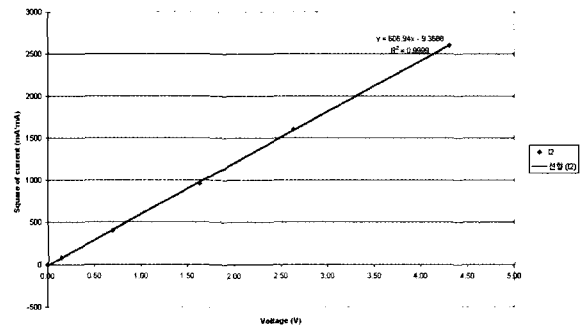
- a. 그림 1~3에 따라 피시험체 및 시험장비를 배치한다.(송신안테나와 피시험체간의 이격거리는 1m로 한다.)
- b. 시험장비를 on하여 안정화 상태를 유지한다. 이때 시험장비의 출력은 최소로 유지한다.
- c. 표 2의 시험주파수에 따라 신호발생기를 동조하여 한다.(펄스변조 : 1kHz, 50%)
- d. 전계를 인가하고 전계세기를 확인하면서 표 2의 기준치까지 또는 안전성 및 신뢰성 한계치에 도달할 때 까지 전계값을 서서히 증가 시킨다.(표 7, 8 참조)
- e. 전계 인가/비인가에 따른 온도센서 출력전압의 변화량을 측정하기 위해 신호발생기 출력을 주기적으로 on/off 한다.
- f. 측정된 전압 변동량을 기록한다.
- g. 교정결과를 이용하여 EED전류를 계산한다.
- h. 시험대상 주파수범위에 대하여 [d~g]과정을 반복한다.(30MHz 이상 주파수에 대해서는 수직 및 수평편파에 대해 위 과정을 반복한다.)

다. 시험 적용 및 분석

앞서 수행한 교정 및 시험절차를 이용하여 실제 체계에 적용되는 MNFS가 1A인 EED에 온도센서를 설치하여 시험 및 분석을 수행하였다. 실제 체계 전자파 환경에 적합하도록 차폐해야 하지만 본 시험에서는 전자파환경 변화에 따른 영향을 비교하기 위해 차폐를 일부 제거한 시험용 EED에 대해 시험을 수행하였다. 그림 6은 온도센서를 설치한 시험용 EED에 9mA, 20mA, 31mA, 40mA, 51mA의 전류를 각각 인가하여 얻은 온도센서 출력전압을 나타낸 그래프로서 인가된 각 전류값의 on/off시의 출력전압 변동치(ΔV_{sensor})를 알 수 있다. 따라서 온도센서 출



[그림 6] 시험용 EED-온도센서 결합체 교정을 위한 측정전압



[그림 7] 시험용 EED-온도센서 결합체의 교정결과

력전압의 변동치에 따른 EED 유기 전류($I_{coupling}$)의 관계를 그림 7과 같이 유추할 수 있으며, 식 (4)와 같은 선형 방정식으로 표현하여 이용할 수 있다. 그림 7의 그래프와 선형 방정식은 본 논문에서 시험용으로 제작한 EED-온도센서 결합체의 교정값으로 활용된다.

$$I_{coupling}^2 = 605 \times \Delta V_{sensor} \quad (4)$$

본 시험에서는 표 1에 제시된 상태 중 조립/분해 및 운송/저장 상태조건에 대한 시험을 수행하였다. 조립/분해 상태를 모사하기 위해 EED-온도센서 결합체 자체를 전자파환경에 노출하였으며 시험주파수는 300MHz~600MHz, 인가전계 강도는 표 2의 제한적-평균치 기준을 적용하였다. 운송/저장 상태를 모사하기 위해 슬롯이 있는 금속함체를 제작하여 그 내부에 EED-온도센서 결합체를 위치시키고 금속함체

를 전자파환경에 노출하였다. 시험주파수는 400MHz~600MHz, 인가전계 강도는 비제한적-최대치 기준을 적용하였다. 시험은 전자파 차폐실에서 실시하였고 사용한 장비 사양 및 HERO 측정 장비의 측정변수 설정은 표 5, 6과 같다.

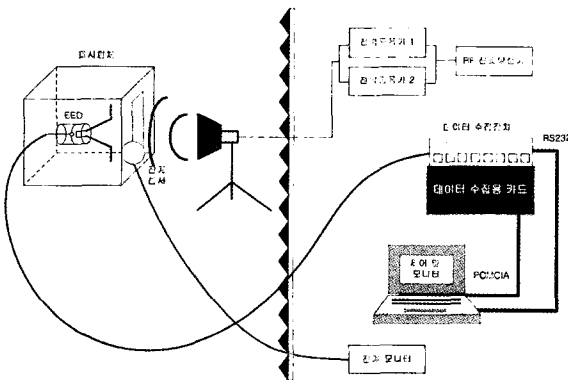
시험구성은 그림 8과 같다.

[표 5] 시험에 사용된 장비사양

장비명	모델명	주파수 대역
RF 신호발생기	Agilent 8648B	9kHz~2GHz
전력증폭기 1	AR200HAA	220MHz~400MHz
전력증폭기 2	AR100HB	400MHz~1GHz
송신안테나	EMCO 3106	200MHz~2GHz
전계센서	AR FP5000	10kHz~1GHz
전계모니터	AR FM5000	-

[표 6] 측정변수 설정

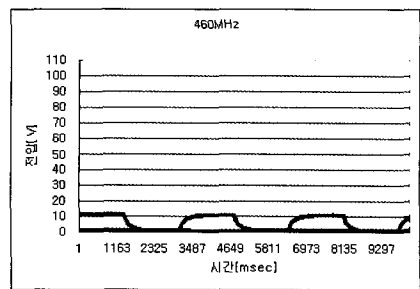
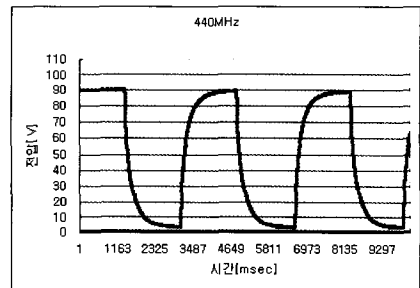
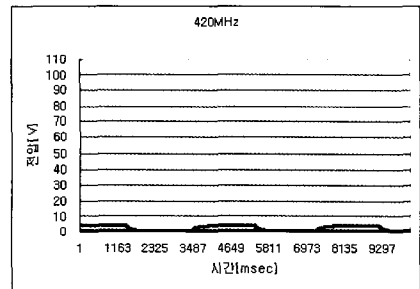
변수명	설정값
측정시간	20.3seconds
sampling rate	500Hz
scale factor	0.001volts/unit
refresh rate	0.001seconds



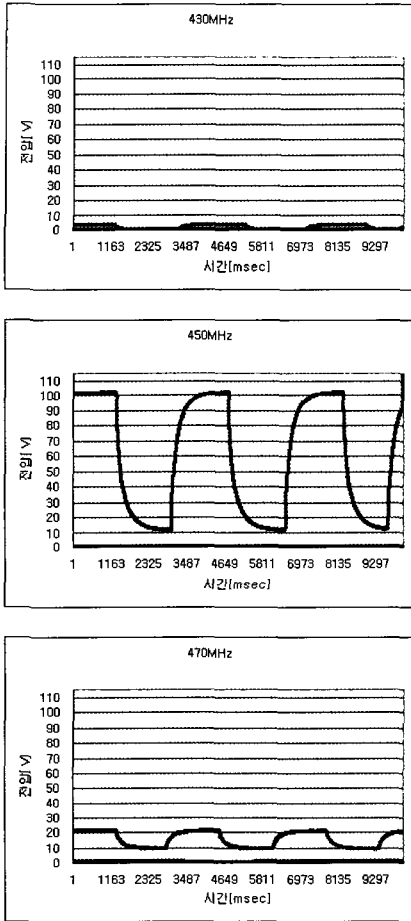
[그림 8] 시험 구성

시험결과 조립/분해 상태의 경우 그림 9와 같이 시험주파수 증가에 따라 유기전압이 서서히 증가하며 440MHz를 경계로 그 이상 주파수에서는 다시 감소하는 특성을 나타내고 있다. 운송/저장의 경우도 마찬가지로 그림 10에서 처럼 주파수 증가에 따라 유기전압이 증가하며 450MHz를 경계로 다시 감소하는 특성을 나타내었다. 측정전압 변동치는 그림 7의 교정결과를 이용하여 전계인가시 피시험체의 EED에 유기되는 전류를 계산할 수 있으며 그 결과는 표 7, 8과 같다.

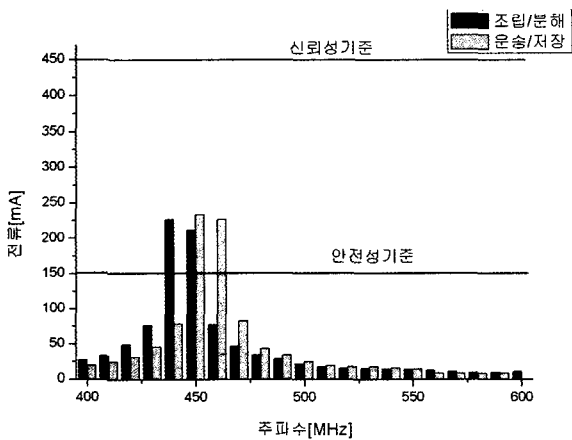
본 시험에 사용한 EED의 MNFS는 1A 이므로 안전성 기준은 16.5dB에 해당하는 150mA이며 신뢰성 기준은 6.9dB에 해당하는 약 450mA 이다. 따라서 본 시험에 사용한 EED에 대한 조립/분해 상태



[그림 9] 측정전압(조립/분해)



[그림 10] 측정전압(운송/저장)



[그림 11] 시험용 EED의 취급상태 따른 HERO 시험 평가 결과

[표 7] 시험용 EED의 HERO 시험평가 결과(조립/분해)

주파수 [MHz]	인가 전계 [V/m]	측정치 ΔV [V]	전류 환산치 [mA]	기준치[mA]	
				신뢰성	안전성
300	70	0.03	4.26	450	150
310		0.01	2.46		
320		0.02	3.48		
330		0.02	3.48		
340		0.05	5.5		
350		0.08	6.96		
360		0.13	8.87		
370		0.18	10.44		
380		0.23	11.8		
390		0.41	15.75		
400	100	1.22	27.17	450	150
410		1.8	33.0		
420		4.01	49.25		
430		9.64	76.37		
440		85.27	227.13		
450		74.07	211.69		
460		9.85	77.2		
470		3.66	47.1		
480		1.93	34.17		
490		1.31	28.15		
500	0.77	21.58			
510	0.51	17.57			
520	0.36	14.76			
530	0.36	14.76			
540	0.35	14.55			
550	0.31	13.7			
560	0.23	11.8			
570	0.18	10.44			
580	0.13	8.87			
590	0.13	8.87			
600	0.18	10.44			

[표 8] 시험용 EED의 HERO 시험평가 결과(운송/저장)

주파수 [MHz]	인가 전계 [V/m]	측정치 ΔV [V]	전류 환산치 [mA]	기준치[mA]	
				신뢰성	안전성
400	70 *	0.6	19.1	450	150
410		1.0	24.6		
420		1.6	31.1		
430		3.5	46.0		
440		10.1	78.2		
450		90.0	233.3		
460		85.0	226.8		
470		11.3	82.7		
480		3.1	43.3		
490		1.9	33.9		
500		1.0	24.6		
510		0.6	19.1		
520		0.5	17.4		
530		0.5	17.4		
540		0.4	15.6		
550		0.3	13.5		
560		0.1	7.8		
570		0.1	7.8		
580		0.1	7.8		
590		0.1	7.8		
600	0	0			

* 인가전계 기준치(표 2 참조)는 1940V/m 이지만, 신뢰성/안전성 한계치에 도달하는 70V/m를 인가함

및 운송/저장 상태에 대한 HERO 시험평가결과 각각 440MHz 및 460MHz 부근에서 안전성 기준치를 만족하지 못하였다. 하지만 이 시험에 사용한 시험용 EED는 차폐를 일부 제거한 형태이므로 실제 체계에 차폐를 보완하여 적용될 경우 안전성 기준을 만족할 수 있다. 그림 11은 조립/분해 및 운송/저장 상태에 따른 표 7, 8의 시험결과를 그래프로 나타낸 것이다.

5. 맺음말

본 논문에서는 EED가 탑재된 장비 또는 시스템의 HERO 특성을 평가하기 위하여 EED 발열선을 통해 흐르는 전류와 발열선 열에 의한 온도센서 출력신호의 관계를 결정하는 교정기법을 제시 하였으며, MIL-STD-464A 및 MIL-STD-331C의 요구조건에 근거한 시험평가 기법을 제시 하였다. 시험용 EED 및 온도센서 결합체를 이용하여 전자파환경 조건에 대한 HERO 시험을 수행하여 시험용 EED의 안전성 기준과 신뢰성 기준 충족 여부를 분석하였다.

참 고 문 헌

- [1] Jeffery D. Craven, Karen C. Compton, Electro magnetic Environmental Effects Criteria and Fuidelines for EMRH, EMRO, Lightning Effects, ESD, EMP, and EMI Testing of US Army Missile Systems, US Aemy Materiel Command, TR-RD-TE-97-01, Jan. 1997.
- [2] MIL-STD-1576 Valid Notice 1, Electroexplosive Subsystem Safety Requirements and Test Methods for Space Systems, Sep. 1992.
- [3] MIL-HDBK-1512, Electroexplosive Subsystems, Electrically Initiated, Design Requirements and Test Methods, Sep. 1997.
- [4] MIL-HDBK-240, Hazards of Electromagnetic Radiation to Ordnance(HERO) Test Guide, Nov. 2002.
- [5] MIL-STD-331C, Fuze and Fuze components, Environmental and performance tests for, Jan. 2005.
- [6] MIL-STD-464A, Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems, Dec. 2002.
- [7] Frank P. Incropera, David P. De Witt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons Inc, pp.43~50, 1985.