

전기 기폭 장치 RF 민감도 특성 분석

A Characteristic Analysis of the RF Sensitivity for Electro-explosive Device

김응조* · 최태인* · 윤태훈** · 김재창**

Eung-Jo Kim* · Tae-In Choi* · Tae-Hoon Yoon** · JaeChang Kim**

요 약

본 논문은 화약이 장착된 EED의 RF 민감도 특성분석을 위해 저주파수대역(1~250 MHz)과 고주파수 대역(8~10 GHz)에서 운용할 수 있는 측정시스템을 구성하고 각 시스템에 대한 시험절차를 제시하였다. 저주파수대역에서 여러 단계의 기폭신호를 인가하면서 EED의 기폭 특성을 측정하였고, Bruceton 분석기법을 도입하여 EED의 평균 기폭레벨, 표준편차 및 신뢰도 레벨을 계산하였다.

Abstract

A measuring system was integrated for the testing of live EED with continuous wave RF stimulus at low frequency range(1~250 MHz) and pulsed RF stimulus at high frequency range(8~10 GHz). The test system, set-up method and test procedure for the RF sensitivity of EED are described in this paper. The Bruceton method is applied to obtain distribution statistics such as mean firing level, standard deviation of the distribution and confidence levels for various applied firing signals.

I. 서 론

전자장비의 고집적화, 고출력화에 따라 전자기 환경이 점점 복잡해지면서 장비 상호간 전자기간섭이 증대되어 많은 문제를 발생시키고 있다. 자동차의 에어백 등에 설치되어 있는 EED(Electro-Explosive Device)의 경우 전자파환경에 취약하여 오동작 발생시 치명적인 결과를 초래할 수 있어

RF 민감도(sensitivity) 시험을 통한 성능분석의 필요성이 요구되고 있다. 국내에서는 DC 민감도에 국한하여 성능을 분석하였으나 최근 미군사규격 MIL-STD-1512/1576 에서 제시하고 있는 요구조건을 분석할 수 있도록 일부 주파수 대역에서 측정시스템을 구성하였고, EED가 주어진 전자파환경에서 정확하게 동작하는지를 검증할 수 있는 RF 민감도 평가기술을 보유하게 되었다.

본 논문에서는 HF/VHF 통신기 운용주파수 대

*국방과학연구소(Agency for Defence Development)

**부산대학교 전자공학과(Dept. of Electronic Engineering, Pusan National University)

· 논문 번호 : 990403-037

· 수정완료일자 : 1999년 6월 1일

역에서 EED의 RF 민감도 특성분석을 위해 1~250 MHz의 측정시스템을 구성하여, 90 MHz에서 시험을 수행하였고 그 특성을 분석하였다. 초고주파대역에서의 EED의 특성을 분석하기 위해 8~10 GHz의 측정시스템을 구성하고 그에 따른 시험절차를 제시하였다. Brucceton 분석기법을 도입하여 EED의 기폭 가능성에 대한 신뢰도를 계산하였다.

II. EED의 구조적 특성

EED는 개략적으로 그림 1과 같이 내부에 발열선(Bridge wire) 및 강력한 화학물질로 구성되어 있기 때문에 신뢰도와 안전도를 중요하게 고려해야 한다. 화약의 혼합비율에 따라 불꽃(flame)을 발생시켜서 기폭시키거나 가스를 발생시켜서 대상물을 팽창시킨다. 또한 기계적인 힘을 발생시켜서 스위치 차단을 시키거나 래치(latch)를 눌러서 기능을 수행하고, 예민한 충격을 발생하여 2차 기폭을 유도하는 경우도 있다.

EED의 민감도에 영향을 주는 변수로서는 가열, 냉각정도, 습도, 기계적 충격 및 노화(aging)등이 있다. 저장상태, 이동과정 및 시험 중에도 항상 기폭될 수 있는 위험이 있으므로 안전에 유의해야 한다. 임의의 자극(stimulus) 조건에 따라 EED의 RF 민감도를 결정하기 위해 시험평가에 많은 수의 EED가 소요되며, 자극의 세기를 변화시켜 가면서 진행이 된다. 고정된 임의의 자극세기에 EED를 노

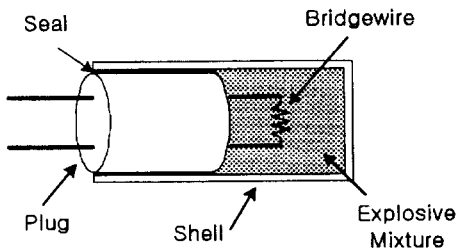


그림 1. 전기기폭장치
Fig. 1. Electro-explosive device.

출시켜서 기폭 여부를 확인하고 단계적으로 다른 세기의 자극에서도 기폭시험을 수행하여 기폭확률(percentage probability of firing)을 결정한다^{[3]~[5]}. 자극의 형태에는 DC 전류, DC 전압, RF 전력 등이 있고, 자극의 주기는 대체로 수 μsec 에서 수 분 정도를 주고 있다.

기폭상자(firing chamber)는 EED RF 민감도 시험시 운용자의 안전을 위해서 기계적 접합부가 안전하게 결속되고, 개폐부에 인터록크 장치를 설치해서 자극인가 중에 문을 열지 않도록 제작하였다. EED가 설치되는 마운트(Mounts)는 설계된 EED의 형상에 맞도록 그림 2와 같이 pin-to-pin 모드 및 pin-to-case 모드용으로 각각 제작하였다. 마운트는 기폭시 충격에 견딜 수 있고 RF 발생장비, 전송선로 및 EED간에 전기적 인터페이스가 양호하도록 정밀하게 제작되었다. 컨넥터가 부착되어 설계된 EED의 경우는 절연체가 포함되어 있으므로, 절연체는 RF 주파수 영역에서 손실이 적은 테프론(teflon)으로 교체한 후 시험을 진행한다.

비파괴 시험(nondestructive tests)은 실제로 기폭시키지 않고 측정할 수 있는 전기적 파라미터를 도출하여, EED의 결함 여부를 확인하는 시험으로

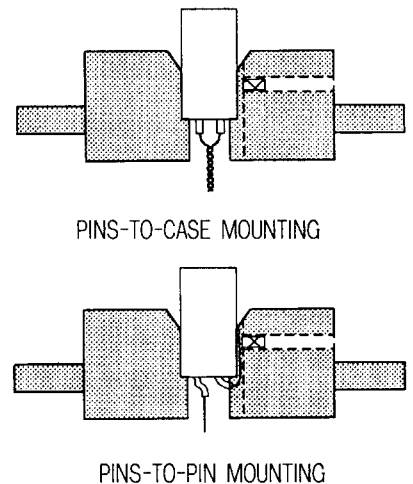


그림 2. 마운트의 형태
Fig. 2. Types of mounts.

써 그 파라미터에는 발열선의 저항, RF 입력임피던스, 발열선의 열계수 및 열시정수(thermal time constant) 등이 있다. 정전압 형태의 DC 시험의 경우 저항값 변화로 인해 EED가 가열되어 특성변화가 예상되므로, EED 발열선 저항보다 적은 내부 임피던스를 보유한 전력공급기를 이용해야 한다. 정전류 형태의 DC 시험은 EED 발열선 저항보다도 큰 내부 임피던스를 갖고 있는 전력공급기를 이용해야 한다. 일반적으로 사용되는 자극의 형태는 정전류 펄스형태로서 펄스폭은 1 μ sec에서 10 초 정도이다. RF 민감도시험은 화약에 삽입된 발열선이 가열되어 기폭이 시작되는 열선(hot-wire) 형태의 EED가 주로 사용된다. EED에 RF 에너지를 인가했을때 기폭될 수 있는 모드는 발열선 가열모드, pins-to-case 아아크(arc ing)모드 및 발열선-발열선 아아크 모드 등과 같이 3가지의 경우로 분류할 수 있다.

III. RF 민감도 시험장비 구성 및 절차

3-1 저주파수 대역 RF 민감도 시험

측정시스템은 그림 3과 같이 구성되며, 측정주파수는 1~250 MHz에서 가능하며, 시험 조건에 따라 pin-to-pin 시험 및 pins-to-case 시험을 수행할 수 있다. 측정시스템 정확도 향상을 위해 시스템교정을 주파수 대역 100 MHz 이하 또는 pin-to-pin 시험에서는 V-I Probe 기법(A)을 적용하고, pins-to-case 시험에서는 RF 밀리볼트미터(B)를 사용하여 그림 4와 같이 시스템 교정과 시험을 수행한다 [1].

기폭상자에서 L, C 상자를 분리하고 디지털 멀티미터를 이용하여 EED의 저항을 측정한다. 본 논문에서 사용된 EED 발열선의 저항값은 1.01~1.12 Ω 정도이다. L, C 상자를 연결후 전력계의 영점 조정을 하고, 증폭기(AR 150C)를 정지상태에서 작동상태로 전환 후 전력계의 지시값이 100mW가

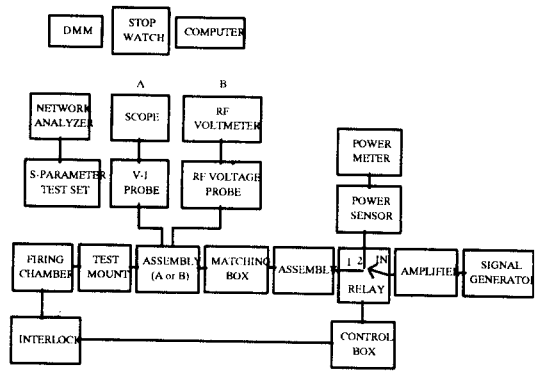


그림 3. 저주파수 대역 시험장비 구성

Fig. 3. Components of the low frequency testing system.

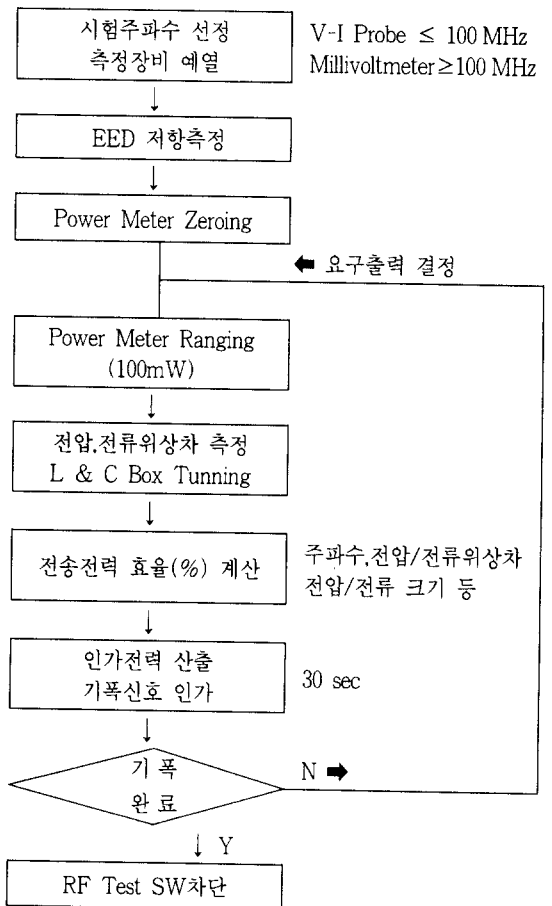


그림 4. 교정 및 시험절차

Fig. 4. Calibration and test procedure.

되도록 신호발생기의 출력을 조정한다. 조정판 널의 RF 시험스위치를 연결 후 오실로스코프에 전시되는 전압 및 전류파형의 위상차를 측정한다. L상자의 인덕터값을 조정해서 전압파형이 최대가 되도록 동조시키고, C상자의 커패시턴스값을 조정해서 전류파형이 최대가 되도록 동조시킨다. L 및 C상자를 교대로 조정해서 전압, 전류파형의 피크값 및 위상차 등의 데이터를 확보하여 인가전력에 대한 효율(%)을 구할 필요가 있다. 조정판널의 RF 시험스위치를 연결할 때 출력되는 전력값을 이용하여 전력효율을 계산하고 실제 EED에 인가될 전력값을 산출한다.

$$\text{인가전력} = \frac{\text{요구전력}}{\text{효율}(\%)} \quad (1)$$

조정판널의 RF 시험스위치를 차단후 30초간 스위치를 연결시켰을 때 기록될 경우 RF 시험스위치를 차단하고, 실제 인가된 전류값을 계산한다. 기록되지 않은 경우, 출력을 재조정하여 상기 절차를 반복한다.

3-2 초고주파수 대역 RF 민감도 시험

측정시스템은 그림 5와 같이 구성되며, 측정주파수는 8~10 GHz에서 가능하며 전압 최소-최대(MIN-MAX)교정법을 이용하여 시스템의 정확도를 다음과 같이 교정할 수 있다. 마그네트론을 예열시키고, 전력계의 영점을 조정한다. 마이크로미터를 슬롯라인(Slotted Line) 위에 설치하고 마그네트론을 동작상태로 전환하면서 가변감쇄기를 이용하여 그림에서 우측에 있는 전력계(1)의 출력값이 1mW가 지시되도록 조정한다. 마이크로미터의 범위를 500으로 조정하고, 기폭상자의 마운트 위에 전력계(A)를 설치한다. 전력계(A)의 범위를 최소상태로 조정하고 영점 조정후 인체접촉에 의한 변위오차를 제거한다^[2].

전력 전송효율을 측정하기 위해 마이크로미터

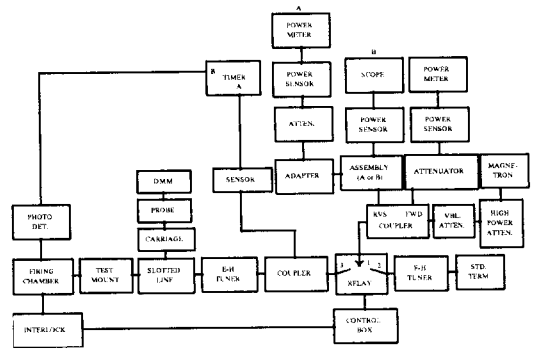


그림 5. 고주파수 대역 시험장비 구성
Fig. 5. Components of 8 to 10 GHz testing system.

및 전력계(A)의 범위를 조정한 후 조정판널의 RF 시험스위치를 연결시키면서 전력계(A)의 지시값이 1mW를 지시하는지 확인하고, 그림에서 좌측의 E-H 동조기(tuner)를 이용하여 최대 출력값을 지시하도록 조정한다. RF 시험스위치를 차단시킨 후 전력계(A)의 영점을 조정한다. RF 시험 스위치를 연결시킨 후 전력계(A)의 지시값을 확인하고, 마이크로미터의 범위를 500에서 100정도로 낮추고, 마이크로미터를 조정하면서 인가되는 출력 최대값이 1mV가 되는지 확인한다. 좌측의 E-H 동조기를 조정하여 마이크로볼트미터가 최대값 및 최소값을 지시하도록 조정하고, RF 시험스위치 및 마그네트론 스위치를 차단함으로써 교정절차는 종료된다.

시험절차는 우선 인가전력 전송효율을 측정하고 EED에 실제로 인가될 인가 전력값을 계산한다. 마그네트론을 동작상태로 전환하고 가변감쇄기를 조정하여 우측의 전력계가 10mW를 지시하도록 조정한다. 우측의 E-H 동조기를 조정해서 전력계(A)의 지시값이 0이 되도록 조정한 후 RF 시험스위치를 연결한다. 반사전력을 제거하여 전력 전송효율을 최대로 조정하기 위해 좌측의 E-H 동조기를 가변하여 전력계(A)의 지시값이 0.01 mW 이하가 되도록 조정한다. RF 시험스위치를 차단하고 전력계(2)의 열전력센서 대신에 크리스탈 감지기

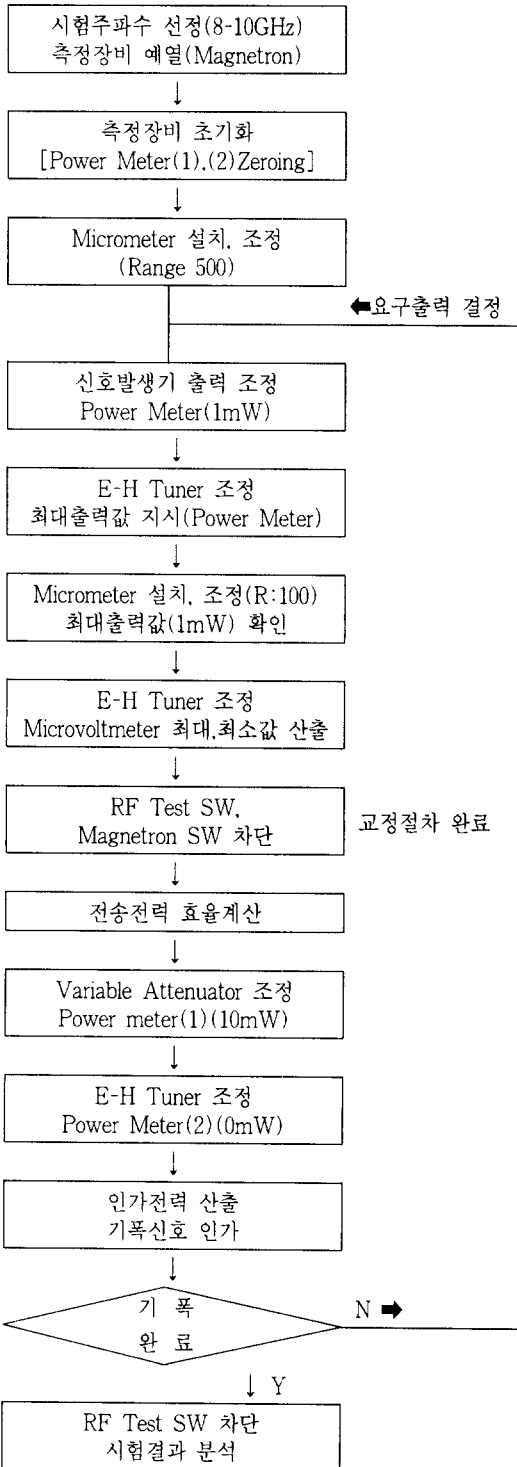


그림 6. 교정 및 시험절차
Fig. 6. Calibration and test procedure.

(crystal detector)로 교체한 후 우측의 E-H 동조기를 조정하면서 반사파를 제거한다. RF 시험스위치를 연결하고 오실로스코프에 주기적인 임펄스 파형이 양호하게 발생하는지 확인한 후 RF 시험스위치를 차단한다. 가변감쇄기를 가변해서 1차적으로 요구된 값으로 조정 후 타이머스위치를 작동시키면서 RF 시험스위치를 연결한다. 인가시간은 약 30초 정도이며, 이때 파형의 상태를 확인하면서 기폭 되지 않은 경우 위의 순서를 반복하고, 기폭될 경우 RF 시험스위치를 차단하고 측정결과를 분석한다.

IV. 시험결과 분석

EED의 One-Shot 시험결과에 대한 통계적 분석 기법으로서 Bruceton 시험기법을 적용하였다^[6]. Bruceton 기법에 소요되는 피시험체인 EED는 생산되는 동일 로트(lot) 그룹에서 30개를 추출하였고, 분석주파수는 90 MHz에서 수행되었다. 1단계로서 실제 시험에 적합한 인가전류 레벨과 주파수 선정을 고려한 Probing 시험결과에서 얻은 데이터를 이용하여 최초 인가전류 레벨을 결정하였고, 시험 중에 몇 개의 레벨을 선정하여 단계적으로 레벨을 증감하면서 시험을 수행하였다. 선정된 EED를 이용하여 초기시험은 평균값에 해당되는 인가레벨(h)에서 수행되며, 그 다음은 $h-d$ 레벨에서 수행된다. 여기서 d 는 시험시 인가되는 레벨간의 간격을 의미한다. h 레벨에서 기폭되지 않으면 두 번째 시험은 $h+d$ 레벨에서 수행하고, 두 번째 시험에서 기폭되면 세 번째 시험은 다시 h 레벨에서 진행되지만 기폭이 되지 않을 경우 $h+2d$ 의 레벨에서 시험을 한다. 이와 같은 방법으로 순차적으로 선정된 EED를 시험하고 분석하였다. 인가레벨이 선정된 후 분석절차에서 기폭이 되면 해당된 EED는 표 1 처럼 \times 로 표시하고, 기폭이 되지 않을 경우 \circ 으로 표기를 한다. 선정된 레벨은 표 2와 같이 낮은 레벨을 $i=0$ 으로, 그 다음 레벨은 1씩 증

가하여 분류한다. EED가 기록된 경우와 기록되지 않은 경우의 개수를 N 이라고 하면, 각각의 레벨에서 기록된 수는 N_{ix} , 기록되지 않은 수는 N_{io} 라고 표기한다. 표 2에서 A와 B는 각각 종축의 데이터를 합산한 값이며, 이때 그 값을 평균값(m)에 대한 추정치로서 식 (2)에 대입한다^[6].

$$m = I_o + d \cdot \left[\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2} \right] \quad (2)$$

여기서 I_o 는 최저 인가레벨을 의미하며, (+)는 기록이 되지 않은 경우, (-)는 기록이 될 때 적용된다. 표준편차(M)에 대한 추정치는 식 (3)에서 구할 수 있다.

$$s = 1.620d \cdot \left[\frac{NB - A^2}{N^2} + 0.029 \right] \quad (3)$$

식 (3)은 다음조건을 만족할 때 유효하다^{[4],[5]}.

$$M = \frac{(NB - A^2)}{N^2} > 0.3 \quad (4)$$

기록되지 않은 경우의 추정치는 식 (5)와 같고, 여기서 Z_p 는 신뢰도 요구구격에 따른 정규변수(normal deviate)로서 본 논문에서는 99.9%의 신뢰도에 대해서는 $Z_p = 3.09$ 에 해당된다^[6]. 기록되어야 하는 경우의 추정치는 식 (6)과 같다.

$$NF = m - Z_p \cdot s \quad (5)$$

$$AF = m + Z_p \cdot s \quad (6)$$

식 (2)의 m 값에서 표준편차에 대한 추정치는 식 (7)과 같고, 식 (3)의 s 값에서 표준편차에 대한

표 1. RF 민감도 시험결과

Table 1. Results of the RF sensitivity test.

| 인가전류 Item No. | 0.89 | 0.90 | 0.91 | 0.92 | True level | 인가전류 Item No. | 0.89 | 0.90 | 0.91 | 0.92 | True level |
|------------------|------|------|------|------|------------|------------------|------|------|------|------|------------|
| 1 | | | ○ | | × | 16 | | × | | | |
| 2 | | | | × | | 17 | ○ | | | | × |
| 3 | | | × | | | 18 | | ○ | | | × |
| 4 | | ○ | | | × | 19 | | | ○ | | × |
| 5 | | | ○ | | × | 20 | | | | × | |
| 6 | | | | × | | 21 | | | × | | |
| 7 | | | × | | | 22 | | ○ | | | × |
| 8 | | × | | | | 23 | | | × | | |
| 9 | ○ | | | | × | 24 | | ○ | | | × |
| 10 | | ○ | | | × | 25 | | | ○ | | × |
| 11 | | | ○ | | × | 26 | | | | × | |
| 12 | | | | × | | 27 | | | ○ | | × |
| 13 | | | × | | | 28 | | | | × | |
| 14 | | × | | | | 29 | | | ○ | | × |
| 15 | ○ | | | | × | 30 | | | | × | |

표 2. RF 민감도 시험결과에 대한 분석용 데이터

Table 2. Analysis data for the results of RF sensitivity test.

| h_i | i | N_{ix} | N_{io} | iN_{io} | i^2N_{io} |
|-------|----------|----------|----------|-----------|-------------|
| 0.92 | 3 | 7 | 0 | 0 | 0 |
| 0.91 | 2 | 5 | 7 | 14 | 28 |
| 0.90 | 1 | 3 | 5 | 5 | 5 |
| 0.89 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 |
| | Σ | 15 | 15 | A=19 | B=33 |

추정치는 식 (8)과 같다. 요구된 신뢰도에 관련하여 비점화(no fire) 전류 및 신뢰도 레벨(confidence level)은 식 (9)와 같고, 점화(all fire) 전류에 대한 신뢰도 레벨은 식 (10)과 같다.

$$s_m = \frac{6s + d}{7\sqrt{N}} \quad (7)$$

$$s_s = \frac{s(1.1d + 0.3s)}{d\sqrt{N}} \quad (8)$$

$$NFC = NF - t\sqrt{s_m^2 + z_p^2 \cdot s_s^2} \quad (9)$$

$$AFC = AF + t\sqrt{s_m^2 + z_p^2 \cdot s_s^2} \quad (10)$$

식 (9), (10)을 이용하여 추출된 30개의 EED에 대해서 안전한 수준의 레벨과 기폭되어야 하는 레벨의 수준을 확인하였다. 시험결과를 분석한 결과 비점화전류(NFC)는 0.855 A 값을 얻었으며, 이 전류레벨에서는 EED가 기폭되어서는 안되는 값이다. 또한 점화전류(AFC)에서는 0.959 A 값을 계산하였는데 이 전류레벨에서는 EED가 99.9 % 기폭되어야 한다.

V. 결론

EED의 RF 민감도 특성분석을 위해 RF 민감도 측정시스템이 설계 및 구성되고, 관련 시험절차 및 분석방법을 기술하였다. 현재 보유하고 있는 측정

시스템은 HF/VHF 통신기 주파수대역과 초주파수 대역 중 민감한 영역에 대해서 안전도 평가를 할 수 있도록 1~250 MHz, 8~10 GHz의 측정시스템을 MIL-STD-1512/1576에서 제시하는 요구조건에 따라 구성하였고^{[7],[8]}, pin-to-pin 기법과 pins-to-case 기법을 적용할 수 있도록 장비가 설치되었다. 30개의 EED를 시험에 사용하였고 주파수는 VHF 통신기 주변에 설치된 EED의 RF 민감도 분석을 위해 90 MHz에서 시험을 수행하였다. Brucceton 분석 기법을 적용하여 기폭되지 않는 안전한 레벨 수준값으로 0.855 A를 구하였고, 반드시 기폭되어야 하는 레벨 수준값으로는 0.959 A를 계산하여 EED의 RF 민감도 특성을 분석하였다. 점화 전류값은 EED가 99.9 % 기폭되는 값이고, 비점화 전류값은 안전한 레벨의 전류값으로서, 일반적으로 시스템내에 기폭장치를 설계시 운용되는 위해한 전자파환경에서 EED가 보호될 수 있도록 EED 기폭신호선의 차폐(shielding) 정도를 설계하는 기준 데이터로서도 활용할 수 있다.

본 논문은 선(wire)을 통하여 자극을 인가하였는데 실제 선을 통하지 않고 공간이나 내부의 틈을 통해 노이즈가 침투되는 경우는 시스템에 부착되어 있는 EED 내부의 화약을 제거한 후, EED의 발열선 근처에 광섬유 센서를 2~3 μm 정도 설치하여 외부 전자파환경에 의한 영향정도를 분석하여 EED의 기폭 가능성을 해석할 수 있다^[9].

참고 문헌

- [1] Beth C. Shimer, Ph. D Instruction Manual for Low Frequency Continuous Wave RF Testing System For EEDs, FAC, June, 1995.
- [2] Beth C. Shimer, Ph.D Instruction Manual for Pulsed 8.9 GHz RF Testing System for EEDs, FAC, June, 1995.
- [3] Hardening Weapon Systems against RF

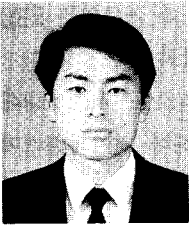
Energy, AMCP 706-235, Feb., 1972.

- [4] H.P. Culling, Statistical Methods Appropriate for Evaluation of Fuze Explosive trin Safety & Reliability, Naval Ordnance Lab, AD 066428, Oct., 1953.
- [5] Statistical Analysis for a New Procedure in Sensitivity Experiments, Princeton Univ., AMP. Report No. 101R
- [6] Karl O. Brauer, Handbook of Pyrotechnics, Chemical Publishing Co, INC., New York,

pp. 325-339, 1974.

- [7] MIL-STD-1512(USAF), Electroexplosive Sub-systems, Electrically Initiated, Design Requirements and Test Method, 1972.
- [8] MIL-STD-1576(USAF), Electroexplosive Sub-systems Safety Requirements and Test Method for Spacs Systems, 1984.
- [9] 김응조, 광섬유센서를 이용한 EED 전자파방사 위해도 분석, 한국전자파학회 논문집, 9(5), pp. 725-734, 1998. 12.

김 응 조



1984년: 한양대학교 전기공학과(공학사)
 1986년: 한양대학교 전기공학과(공학석사)
 1997년: 부산대학교 전자공학과 박사과정 수료
 1989년~현재: 국방과학연구소 선임 연구원

[주 관심분야] EMI/EMC

윤 태 훈



1979년: 서울대학교 전자공학과(공학사)
 1982년: 한국과학기술원 전자공학과(공학석사)
 1986년: 한국과학기술원 전자공학과(공학박사)
 1986년~현재: 부산대학교 전자공학과 부교수

[주 관심분야] LCD, Laser Diodes, Photonic switching devices

최 태 인



1974년: 서울대학교 응용물리학과(공학사)
 1980년: University of Florida(공학석사)
 1984년: University of Florida(공학박사)
 1977년~현재: 국방과학연구소 책임 연구원

[주 관심분야] EMI/EMC, Magnetic sensor, System performance test

김 재 창



1969년: 서울대학교 전자공학과(공학사)
 1979년: University of Alabama(공학석사)
 1981년: University of Alabama(공학박사)
 1975년~현재: 부산대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] LCD, Optical information processing, Sonar signal processing