

전자파환경에서 EED에 유기되는 전류에 관한 연구

A Study on the induced Current of Electro Explosive Device Bridge Wire under Electromagnetic Field

김 응 조*
Kim, Eung-Jo

ABSTRACT

Electro Explosive Devices can be susceptible to electromagnetic interference. When these components are exposed to external electromagnetic fields, it may cause to induce sufficient current to generate enough heat for an inadvertent detonation. It is almost impossible to monitor the event of firing throughout the electromagnetic environment test. The survivability of EED for hazards of electromagnetic radiation is investigated. A fiber optic sensor is installed near the bridge wire after removing explosive material in order to measure the induced current on the bridge wire. The length of lead-wire of the EED fabricated is around 15 cm.

주요기술용어 : Electromagnetic Interference

1. 서 론

송신장비의 고출력화와 전자장비의 고집적화로 인해 장비 상호간 간섭은 증가되고 있다. 대부분 전자장비는 마이크로프로세서 처리 기능을 보유함에 따라 제어신호 레벨은 더 낮아지고 전자파간섭에 더욱 취약해져서 컴퓨터를 사용하여 각종 제어기능을 제어하는 전자장비는 전자파간섭을 일으키거나 운용성능에 손상을 초래할 수 있다.

인공위성, 미사일 및 자동차와 같은 시스템에는

EED가 설치 되어 있다. EED는 작은 금속관 내부에 발열선과 화약으로 구성되며, 전기신호가 인가되면 열에 의해서 폭발된다.

전자파에 EED가 노출되어 와이어에 전류가 유기되어 흐를 경우, 전류가 충분히 큰 경우 EED가 가열되어 기폭이 된다. 화약이 주입된 EED 단자선의 길이를 길게 연장시키고 다이폴 안테나 처럼 구부린 상태에서 전계를 200 V/m 정도 인가시 기폭하는 현상을 확인하였다. 실제 EED가 기폭될 때 전자파에 의해서 어느 정도의 전류가 EED 내부에 흘렀는지 정확한 분석이 어려우며, 유도탄과 같이 내부에 장착되어 있는 경우 실시간 관측이 불가능하다^[1].

* 국방과학연구소 선임연구원

본 논문에서는 EED에 유기되어 흐르는 전류를 이론적으로 계산하고, 실험적 검증을 위해 제작공정에서 화약을 주입하지 않은 EED에 광섬유 센서를 발열선에 근접 설치하고 유기전류를 측정하고자 한다. 안전 여유치(safety margin)를 고려해 볼 때 일반적으로 발열선에 흐르는 전류는 MNFC(maximum no fire current)의 20 dB 범위에 있을 때 EED는 안전하다고 제안한다.

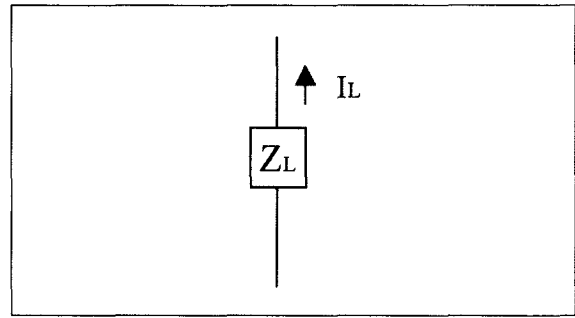
2. EED에 유기되는 전류

EED를 그림 1(a)와 같이 다이폴안테나 처럼 가정할 경우 발열선은 수신안테나와 같은 기능을 하며, EED에 인가된 전자기에너지는 전류로 변환된다. 단 자선은 다이폴 안테나와 같이 구성되고 전기회로의 일부분이 되어 수신기회로에 전류를 흐르게 하는 전압원의 역할을 한다. EED의 전기적 모델링은 입사 전자계에 놓인 수신안테나로 가정하고 관련이론을 제시하고자 한다^[2~6]. 전자파에 EED가 노출되면 전계가 결합되어 전류가 흐르는데, 수신안테나처럼 가정할 경우 EED의 발열선에 흐르는 최대 전류값을 계산할 수 있다. 여기서 부하전류 I_L 은 그림 1과 같이 테브난 등가회로와 노턴 등가회로에서 구할 수 있다.

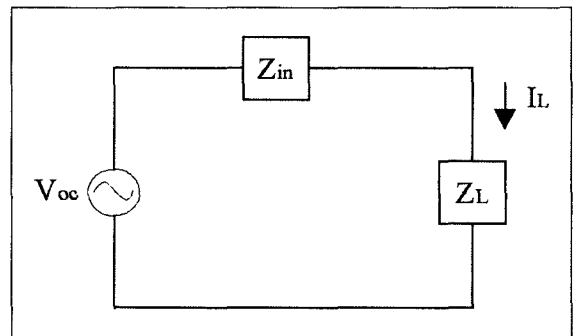
$$I_L = \frac{V_{oc}}{Z_{in} + Z_L} \quad (1)$$

$$I_L = \frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_L} I_{sc} \quad (2)$$

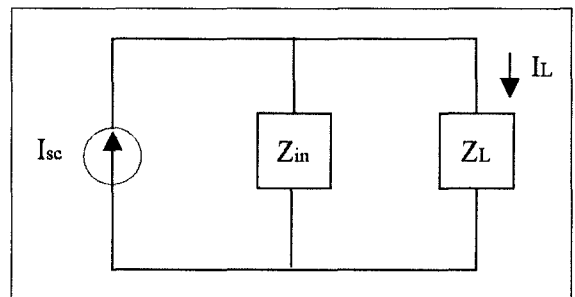
$$V_{oc} = Z_{in} I_{sc} = h \cdot E \quad (3)$$



(a) 수신안테나,



(b) 테브난 등가회로,



(c) 노턴 등가회로

[그림 1] EED 전기적 등가회로

여기서 V_{oc} 는 수신단자에서 측정된 개방전압이고, Z_{in} 은 EED를 전송모드로 가정할 때 동작시 안테나의 입력 임피던스 이다. Z_L 은 발열선의 임피던스로서 부하임피던스라고 한다. I_{sc} 는 수신단자에서 흐르

는 단락전류이고 \mathbf{h} 는 벡터실효높이(vector effective height)이다.

EED 단자에 흐르는 유기전류는 파장(λ)에 따라 전류의 크기가 다르므로 방사전계, 전력 및 방사저항을 구하기가 곤란하다. 그러므로 이러한 단자선을 마치 전류분포를 갖고 있는 단자선으로 개념을 바꾸어 생각할 수 있다. 급전점 전류의 크기와 동일하게 전류 분포를 가정하면, 이 경우 가상적인 단자선의 실효길이(effective length)를 구할 수 있다. 안테나가 전송 모드에서 운용될 때 원거리장에서 전계와 자계는 다음과 같이 정의할 수 있다^[2].

$$\mathbf{E} = \frac{-jkZ_0 \mathbf{N} e^{-jkr}}{4\pi r} \quad (4)$$

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{r} \times \mathbf{E}}{Z_0} \quad (5)$$

여기에서 k 는 전파정수로서 다음과 같이 표시할 수 있고,

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = w(\mu_o \epsilon_o)^{1/2} \quad (6)$$

Z_0 는 자유공간의 특성임피던스로서 다음과 같이 정의한다.

$$Z_0 = (\mu_o / \epsilon_o)^{1/2} \quad (7)$$

벡터 \mathbf{N} 와 크기벡터(amplitude vector) \mathbf{A} 사이에는 다음과 같은 관계가 있다. 벡터 \mathbf{N} 의 단위는 Ampere-meter 이며, 벡터 \mathbf{A} 는 임의의 구면에 존재하는 탄젠트 평면에 놓인 성분으로 단위는 (watts)^{1/2}

로서 표시된다.

$$\mathbf{N} = j \frac{4\pi}{k\sqrt{Z_0}} \mathbf{A} \quad (8)$$

벡터 실효길이 \mathbf{h} 는 다음과 같이 정의되며 I_{in} 은 안테나에 흐르는 입력전류이다. \mathbf{h} 의 단위는 미터로서 height function 이다.

$$\mathbf{h} = \frac{\mathbf{N}}{I_{in}} \quad (9)$$

안테나의 수신 유효면적(cross section)은 입사 전력밀도에 대한 수신전력의 비로서 정의되며 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\sigma_R = \frac{\frac{1}{2} |I_L|^2 R_L}{\frac{1}{2} \frac{|E|^2}{Z_0}} = \frac{|I_L|^2 R_L Z_0}{|E|^2} \quad (10)$$

여기에서 식 (1), (3)을 정리하여 $|I_L|^2$ 에 관해서 정리하면 다음과 같다.

$$|I_L|^2 = \frac{|\mathbf{h} \cdot \mathbf{E}|^2}{|Z_{in} + Z_L|^2} \quad (11)$$

식 (11)을 식 (10)에 대입하면 다음과 같이 정리된다.

$$\sigma_R = \frac{|\mathbf{h} \cdot \mathbf{E}|^2 R_L Z_0}{|Z_{in} + Z_L|^2 |E|^2} \quad (12)$$

임피던스 정합계수(matching factor) q 는 다음과

같이 정의되며, 즉 $0 \leq q \leq 1$ 이다.

$$q = 1 - \left| \frac{Z_L - Z_{in}}{Z_L + Z_{in}} \right|^2 = \frac{4R_L R_{in}}{|Z_L + Z_{in}|^2} \quad (13)$$

식 (13)을 다음과 같이 정리한 후,

$$\frac{R_L}{|Z_L + Z_{in}|} = \frac{q}{4R_{in}} \quad (14)$$

식 (12)에 대입하면,

$$\sigma_R = \frac{qZ_o |\mathbf{h} \cdot \mathbf{E}|^2}{4R_{in} |\mathbf{E}|^2} \quad (15)$$

안테나에 입사되는 전력과 입사전력에 대한 방사전력의 비는 다음과 같이 표시된다.

$$P_{in} = \frac{1}{2} |I_{in}|^2 R_{in} \quad (16)$$

여기서 η 는 안테나의 저항손실에 관련된 방사효율을 의미한다.

$$P_r = \eta P_{in} \quad (17)$$

지향성 계수(directivity) $D(\theta, \phi)$ 와 원거리장 영역의 전력밀도 $S(\theta, \phi)$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$D(\theta, \phi) = \frac{4\pi r^2 S(\theta, \phi)}{P_r} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} S(\theta, \phi) &= \frac{|\mathbf{E}(\theta, \phi)|^2}{2Z_o} \\ &= \frac{K^2 Z_o |I_{in} \mathbf{h}|^2}{32\pi^2 r^2} \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 지향성 계수 D 는 식(20), (21)과 같다.

$$D(\theta, \phi) = \frac{k^2 Z_o |I_{in}|^2 |\mathbf{h}|^2}{8\pi P_r} \quad (20)$$

$$D(\theta, \phi) = \frac{k^2 Z_o |\mathbf{h}|^2}{4\pi \eta R_{in}} \quad (21)$$

이 식에서 R_{in}/Z_o 항을 삭제하기 위해서 식(21)을 다음과 같이 변형시킬 필요가 있다.

$$\frac{Z_o}{R_{in}} = \frac{4\pi \eta D(\theta, \phi)}{k^2 |\mathbf{h}|^2} \quad (22)$$

식 (22)를 식 (15) 에 대입하여 R_{in}/Z_o 항을 삭제하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_R &= \frac{\lambda^2 q |\mathbf{h} \cdot \mathbf{E}|^2}{4\pi |\mathbf{h}|^2 |\mathbf{E}|^2} \eta D(\theta, \phi) \\ &= \frac{\lambda^2}{4\pi} q p \eta D(\theta, \phi) \end{aligned} \quad (23)$$

여기서 p 는 polarization matching factor이며 다음과 같이 정의된다.

$$p = \frac{|\mathbf{h} \cdot \mathbf{E}|^2}{|\mathbf{h}|^2 |\mathbf{E}|^2} \quad (24)$$

식 (23)과 식 (10)을 동일하게 놓고 정리하면 다음과 같고,

$$\begin{aligned} &\frac{|I_L|^2 R_L Z_o}{|\mathbf{E}|^2} \\ &= \frac{\lambda^2 q}{4\pi} \frac{|\mathbf{h} \cdot \mathbf{E}|^2}{|\mathbf{h}|^2 |\mathbf{E}|^2} \eta D(\theta, \phi) \end{aligned} \quad (25)$$

식 (25)에서 I_L 에 관해서 유도하면 다음과 같이 전류에 대한 최종식을 얻을 수 있다.

$$|I_L| = \left[\frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{qG}{R_L Z_0} |E|^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (26)$$

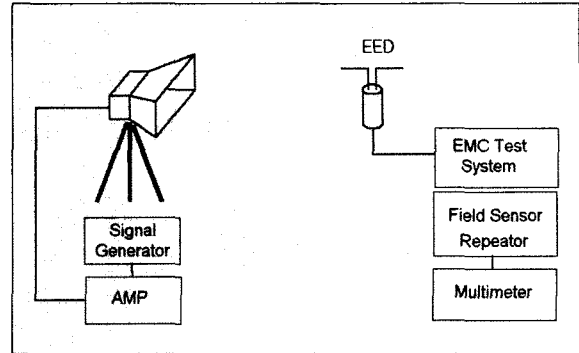
윗 식에서 E 는 전계세기(V/m), λ 는 파장, G 는 등방성 소오스와 관련하여 반파장 다이폴의 이득을 표시하는 계수이다^[2-5]. 안테나 이득(G)와 지향성계수(D)는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\eta D(\theta, \phi) = G \quad (27)$$

3. 시험 및 결과분석

EED 한 변의 길이를 15 cm 로 만들고, EED에 유기된 전류를 측정할 수 있도록 마이크로미터와 현미경을 이용하여 광섬유 센서를 발열선 근처에 설치하였다. EED 단자에 일정 전류를 인가하면서 광섬유 센서가 최대온도를 측정할 수 있는 위치가 되었는지 확인 후 내열본드를 사용하여 광섬유 센서를 EED 몸체에 고정시켰다. 광섬유 센서는 Fabry Perot 마이크로칩 Cavity가 부착되어 있다. 발열선의 온도가 상승하게 되면 파장에 따른 광학적 두께와 Cavity의 반사계수가 변하여 입사광과 반사광의 형상이 달라지는 원리를 이용한다. 광섬유센서는 10~250 mA 전류를 감지할 수 있다.

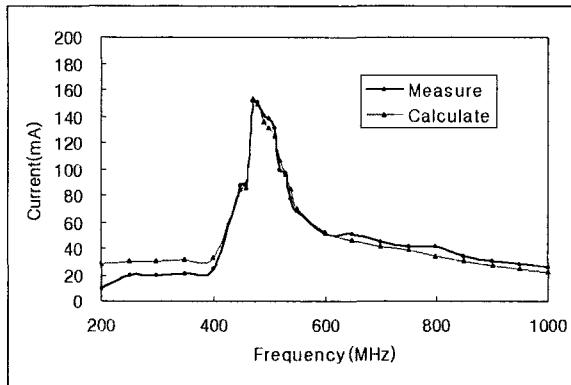
송신안테나를 EED로부터 6 m 떨어진 위치에 설치하였고, EED 단자의 길이 즉 파장 λ 를 고려하여 시험주파수는 200 MHz~1 GHz 대역을 선정하였다. 전계를 40 V/m 인가하면서 각 주파수 대역에서 신호



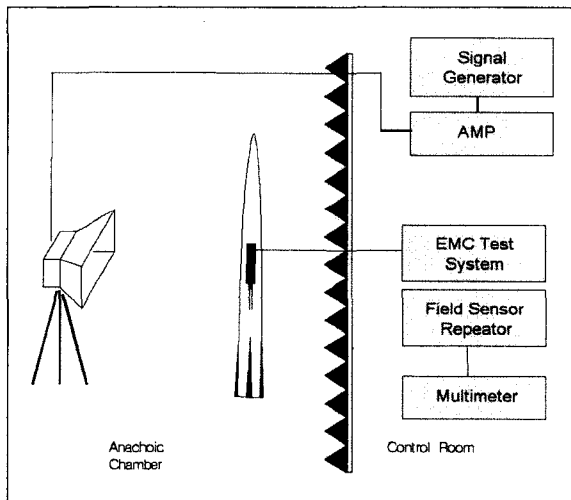
[그림 2] 전자파 방사 위해도 시험구성도

발생기의 출력을 조정하고 그 값을 기록한다. 교정시험이 종료 후 전계센서 위치에 다시 광섬유 센서가 부착된 EED를 설치하고 기록된 대로 신호발생기의 출력값을 다시 주파수별로 그대로 신호를 인가하면 출력신호는 증폭기를 거쳐 안테나에서 EED로 전계가 인가된다. 인가전계에 대해 EED에 설치된 광섬유 센서가 측정한 전류값을 그림 3에 제시하였다. 전계를 40 V/m 인가시 주파수가 470 MHz 주변에서 151.2 mA 전류가 유기 되었다. 발열선에 유기되어 흐르는 전류를 이론적으로 계산하고 측정치와 비교할 필요가 있다. 계산식은 식 (26)을 사용하였으며, 발열선의 임피던스 Z_L 은 RF 임피던스 분석기를 사용하여 200 MHz 에서 1 GHz 까지 측정하였다. 측정결과와 계산 결과의 비교는 그림 3에서 보여 주고 있다. 주파수별로 차이가 발생하는 것은 EED의 안테나이득을 구하기가 어렵기 때문에 계산과정에서 안테나 관련자료를 활용하여, 이득을 균일하게 1.635로 정의하였기 때문이다. 이론적 계산과 시험을 통한 검증결과를 비교해 볼 때 주파수 400 ~ 600 MHz에서 임피던스 정합 비율이 높고 그 외의 주변 주파수에서는 정합비율이 작음을 알 수 있다.

측정된 유기전류값은 미 군사규격에서 제시한



[그림 3] 이론적 계산결과와 시험결과 비교



[그림 4] 실용 시스템의 시험 예

MNFC의 20 dB를 초과하지 않고, 기폭 가능성은 없지만, 안테나와 EED 간의 이격거리를 좁히거나 안테나의 송신출력을 증가시킬 경우 기폭가능성은 있다. 실제 시스템에서는 EED의 화약을 제거하고 광섬유 센서를 설치한 후 시스템 내부 원래의 위치에 부착하고, 연결되어 있는 광케이블은 배꼽컨넥터 또는 구멍 등을 통해서 외부로 빼낸다.

시스템 운용조건에서 주파수 대역별로 전자파를 인가하면서 EED에 부착되어 있는 광섬유센서로 유기된

전류값을 측정 분석하면 시스템의 안전도를 평가할 수 있다. 그림 4는 실용 시스템에서 수행 가능한 시험 예를 보여 주고 있다.

4. 결 론

유도탄, 인공위성, 유전 탐사추 및 자동차용 에어백 등에 부착되어 있는 EED에 전자파가 인가될 경우, 어떤 주파수에서 어느 정도의 전류가 흐르고 그것이 시스템에 미치는 영향을 분석할 수 있는 이론적 접근과 시험적 검증이 필요하였다. 이를 위해 화약이 제거된 EED의 발열선에 광섬유센서를 근접시켜 설치하였고, EED 단자의 길이를 15 cm 로 조정하고, 다이폴 안테나 처럼 형상을 고안하여 전자파가 최대로 결합될 수 있도록 제작하였다. 인위적으로 전계를 40 V/m 인가하여 EED에 유기된 전류를 측정하였다. 이론적 접근을 통해서 얻은 계산결과를 측정치와 비교하였을 때 측정값과 계산값의 차이가 평균 10 mA 정도 발생하고 있는데, 이는 EED의 안테나 이득을 균일한 상수로 가정하고 안테나 정합특성이 감소하기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 470 MHz 대역에서 151.2 mA 전류가 측정되었다. 계산식에서 유기전류에 영향을 주는 변수는 식 (26)과 같이 입사전계, 발열선의 주파수별 임피던스, 자유공간의 특성임피던스, 파장, 안테나 이득 및 임피던스 정합계수이다.

본 논문에서 제안되고 수행된 시험방법은 유도 무기 시스템에 적용이 가능하다. 광섬유 센서가 부착된 EED를 시스템에 장착하여 전자파 환경조건에서 분석할 경우 시스템의 HERO(Hazard of Electromagnetic Radiation for Ordnance) 성능을 분석할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Emil J. Eichblatt, Jr., *Test and Evaluation of the Tactical Missile*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. pp.311~312, 1989.
- [2] Y.T.Lo, S.W.Lee, *Antenna Handbook*, volume II, pp.6-2~6-23, VAN NOSTRAND REINHOLD.
- [3] David A Weston, *Electromagnetic Compatibility Principles and Applications*, Marcel Dekker, Inc., pp.56~66, 1991.
- [4] David Morgan, *A Handbook for EMC Testing and Measurement*, Peter Peregrinus Ltd., pp.72~84, 1994.
- [5] Y.T.Lo, S.W.Lee, *Antenna Handbook*, pp.3-13~3-16, VAN NOSTRAND REINHOLD.
- [6] Thomas A. Milligan, *Modern Antenna Design*, McGraw-Hill Book Company, pp.66~72.
- [7] Gordon L. Mitchell, "Gigahertz RMS Current Sensors for EMC Testing", *Fiber Optic and Laser Sensors*, SPIE Vol. 1367. 1990.
- [8] W.N.MacPherson, "Phase Demodulation in Optical Fibre Fabry-Perot Sensors with Inexact Phase Steps", *IEE Proc. Optoelectron.*, Vol.144, No.3, June 1997.
- [9] Preclusion of Ordnance Hazards in Electromagnetic Fields ; General Requirements for, MIL-STD-1385B.