

기폭용 퓨즈의 RF 감도 특성

A Characteristics of RF Sensitivity for a Firing Fuse

간 종 만 · 권 준 혁

Jong-Man Kan · Joon-Hyuck Kwon

요 약

전기기폭장치(EED, electroexplosive device)는 브리지와이어, 추진제, 리드 핀 및 금속관으로 구성되었고, 기폭 신호가 인가되면 브리지와이어의 발열에 의해 추진제를 점화시킨다. 또한 고출력 통신기나 레이더에서 방사되는 전자파에 의해 EED는 예기치 않은 기폭이 발생할 수 있어, EED에 대한 EMC 설계 및 시험관련 군사규격서를 제정하여 적용하고 있다. 본 논문은 항공기에 대한 전기체 EMC 시험평가를 수행할 때, 항공기에 설치된 EED 대신에 사용할 기폭용 퓨즈의 RF 감도 특성을 기술하였다. RF 기폭수준은 전송선로 이론을 활용하여 예측하였고, 군사규격서에 규정된 DC 감도와 RF 감도를 측정하였다.

Abstract

EED consists of bridgewire, explosive charge, lead pins and metal case. If a firing signal is injected to EED, the explosive charge in EED is initiated by heating of bridgewire. Electromagnetic waves radiated from high power transmitters or radars can also cause unexpected firing of EED. Therefore, EMC design and test requirements for EED in military specifications are established and applied. This report describes the characteristics of RF sensitivity for a firing fuse which is used for EMC test instead of a real EED installed in aircraft. RF firing level of the fuse was predicted using transmission line(TL) theory. DC sensitivity and RF sensitivity specified in military specifications were measured.

Key words : EED, EMC, DC Sensitivity, RF Sensitivity

I. 서 론

인공위성, 유도탄, 항공기 및 무기체계에 다양하게 사용되는 전기기폭장치(EED)는 작은 금속관 내부에 HBW(hot bridgewire)와 추진제(charge) 등으로 구성되었고, 정해진 전기신호가 인가되면 브리지와이어에서 발생하는 줄(joule) 열에 의해 추진제를 점화시키는 역할을 한다^[1]. 따라서 고출력 통신기나 레이더에서 방사되는 전자파에 의해 예기치 않은 EED의 기폭이 발생할 수 있다. 월남전 당시 미국의 Forrestal 항공모함에서 출격준비가 끝난 전투기의 유도탄이 함상에 탑재된 레이더의 고출력 송신신호에

의해 점화되는 대형 폭발사고가 발생하였다^[2].

현대의 무기체계는 다양한 전자파환경(EME) 하에서 운용되므로 EED가 탑재된 무기체계는 전자파 적합성(EMC) 시험이 필수적으로 요구되어, 미국에서는 EED에 대한 EMC 설계 및 시험관련 규격서를 제정하여 적용하고 있다^{[3]~[6]}. MIL-STD-464에 따라 항공기 전기체에 대한 EMC 시험평가를 수행할 때, EED 관련 장비는 전자파간섭(EMI) 여부를 확인해야 한다^[7]. 본 논문은 항공기에 탑재된 EED의 대체 시험용으로 사용할 기폭용 퓨즈(fuse)의 DC 및 RF 감도 특성을 측정하기 위한 이론을 제시하여 항공기 EMC 시험에 적용할 수 있는지를 판단하였다.

국방과학연구소 전자기법(EMI & Magnetics Team, Agency for Defense Development)

· 논문 번호 : 20040330-037

· 수정완료일자 : 2004년 5월 25일

II. 본 론

그림 1과 같이 HBW형 EED의 정상적인 기폭모드는 pin-to-pin에 기폭신호가 인가될 때 일어나지만 예기치 않은 pin-to-case 전압에 의해 기폭될 수 있다^[1]. 또한 EED는 RF 및 초고주파 신호에 의해 유전체 손실에 의한 절연물질(header)의 열화와 추진제의 직접적인 열화에 의해 기폭될 수 있다.

실제로 EED가 무기체계에 탑재될 때, 외부의 전자기파가 EED 내부 핀으로 유기되는 것을 방지하기 위해 차폐 케이블이 EED 금속관에 연결되므로 EED 내부에서 발생하는 전기장은 그림 2와 같이 표현할 수 있다. EED 내부에서 접지되지 않은 핀에 전기신호가 인가되면 각 핀은 케이스에 대해 평형 쌍이 되어 그림 2(a)와 같은 차동모드의 전기장이 형성된다. 또한 각 입력 핀은 케이스에 대해 병렬 쌍이 되어 그림 2(b)와 같은 공통모드의 전기장이 형성된다.

그림 2에 제시된 EED 내부의 전기장 형성을 시험적으로 모의하기 위해 차동모드의 pin-to-pin 전력(전류)과 공통모드의 pin-to-case 전압에 대한 EMI 시험이 요구된다. Pin-to-case 전압은 정전기방전(ESD), 전자파펄스(EMP)나 낙뢰처럼 외부 EME에 따라 차폐케이블로 유기되는 전류에 의해 발생된 전압에 대한 시험평가로서 EED 케이스와 리드 핀 사이의 피크전압과 피크로 생긴다. EED의 전압과 피크는 리드 핀과 케이스 사이의 거리와 EED 내부의 폭발성 추진제의 유전성질에 따라 결정된다.

EED에 대한 EMC 설계 및 시험요구조건을 규정하는 군사규격서는 MIL-STD-1576, MIL-HDBK-1512, MIL-HDBK-240, MIL-STD-464A 등이 있다^{[2]-[6]}. 연

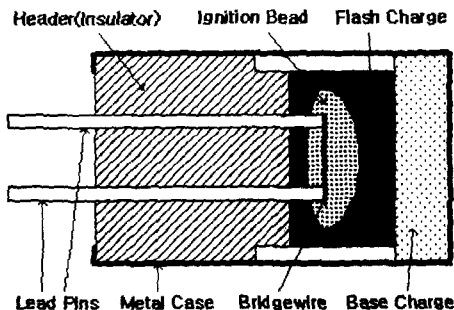


그림 1. 일반적인 EED 구조
Fig. 1. Section view of typical EED.

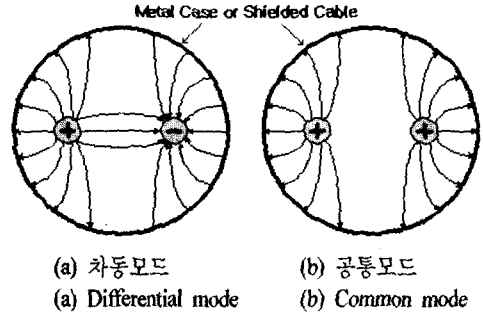


그림 2. EED의 전기장 형성
Fig. 2. Field configurations in two-wire shielded TL.

구 대상체계(항공기)에 적용할 MIL-STD-464에 규정된 EED 관련 요구조건은 안전용으로 사용되는 EED가 MNFS(maximum no-fire stimulus)에 대해 16.5 dB 이상의 여유치가 필요하다^[7]. 따라서 기폭용 퓨즈에 적용할 시험항목은 DC 감도와 RF 감도로 결정하였고 이 시험을 위해 브리지 와이어의 저항과 RF 임피던스를 측정해야 한다. 본 시험에 사용될 퓨즈의 요구조건은 DC 저항과 RF 임피던스의 저항이 EED의 DC 저항(약 2 Ω)과 유사하고 MNFS에 대해 16.5 dB 이상의 여유치를 가져야 한다. 그러나 퓨즈는 그림 1의 EED와 달리 금속관이 없어 RF 감도시험에서 요구하는 pin-to-case 전압에 대한 시험이 불가능한 단점이 있다.

2-1 퓨즈 기폭수준 설정

2-1-1 DC 기폭수준

퓨즈의 DC 기폭수준(V_{DC})은 군사규격서에서 요구하는 저항체를 이용하여 퓨즈의 DC 저항(R_{DC})과 사용할 퓨즈의 기폭신호(I_{DC})에 의해 결정된다.

$$V_{DC} = I_{DC} R_{DC} \quad (1)$$

2-1-2 RF 기폭수준

RF 감도는 측정된 RF 임피던스가 주파수에 따라 다르기 때문에 전송선로 이론을 활용하여 각 시험주파수에 대한 기폭수준을 설정하였다. 그림 3과 같은 유한 전송선로에서 V_s 는 소스(source)전압, Z_s 는 소스 임피던스, Z_m 은 소스 끝에서 부하 쪽으로 바라본 입력임피던스, V_m 은 소스 끝의 전압, I_m 은 소스 끝

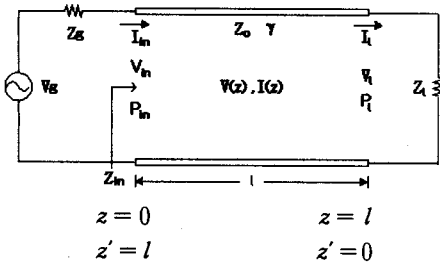


그림 3. 유한 전송선로
Fig. 3. Finite transmission line.

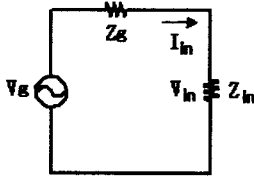


그림 4. 유한 전송선로의 등가회로($z=0$)
Fig. 4. Equivalent circuit for finite TL at $z=0$.

의 전류, P_{in} 은 소스 끝의 전력, Z_l 은 부하임피던스, V_l 은 부하전압, I_l 은 부하전류, P_l 은 부하전력, Z_o 는 선로의 특성임피던스, γ 는 전파상수, l 은 선로의 길이, z 는 전자파가 진행하는 방향이며, Z_o 와 γ 는 전송선로의 특성이 일정할 때 선로의 길이에 관계없이 결정되는 변수이다^{[8]~[10]}.

그림 3에서 부하 쪽으로 바라본 입력임피던스는 식 (2)와 같으므로 그림 3은 그림 4의 등가회로로 표현할 수 있어, V_g 에 의해 전송선로의 입력 쪽에 전달된 전력과 그림 3의 부하에 전달된 전력은 아래 식과 같다. 여기서 *은 공역 복소수를 의미한다.

$$Z_{in} = Z_o \frac{Z_l + jZ_o \tanh \gamma l}{Z_o + jZ_l \tanh \gamma l} \quad (2)$$

$$V_{in} = \frac{Z_{in}}{Z_g + Z_{in}} V_g \quad (3)$$

$$I_{in} = \frac{V_g}{Z_g + Z_{in}} \quad (4)$$

$$P_{in} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}[V_{in} I_{in}^*]_{z=0, z'=l} \quad (5)$$

$$P_l = \frac{1}{2} \left| \frac{V_l}{Z_l} \right|^2 R_l = \frac{1}{2} |I_l|^2 R_l \quad (6)$$

그림 3의 유한 전송선로가 무손실($R=G=0$)일 경우, 선로의 특성변수는 아래 식과 같다.

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = j\omega \sqrt{LC} \quad (7)$$

$$Z_o = R_o + jX_o = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (8)$$

$$Z_{in} = Z_o \frac{Z_l + jZ_o \tan \beta l}{Z_o + jZ_l \tan \beta l} \quad (9)$$

부하임피던스가 선로의 특성임피던스와 다를 경우, 입사파와 반사파가 존재하게 되어 전송선로의 전압, 전류 및 전력은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$V(z') = \frac{Z_o V_g}{Z_o + Z_g} e^{-\gamma z'} \left(\frac{1 + \Gamma_l e^{-2\gamma l}}{1 - \Gamma_g \Gamma_l e^{-2\gamma l}} \right) \quad (10)$$

$$I(z') = \frac{V_g}{Z_o + Z_g} e^{-\gamma z'} \left(\frac{1 - \Gamma_l e^{-2\gamma l}}{1 - \Gamma_g \Gamma_l e^{-2\gamma l}} \right) \quad (11)$$

$$P(z') = \frac{1}{2} \operatorname{Re}[V(z')I(z')^*] = \frac{1}{2} \frac{|V_o^+|^2}{Z_o} (1 - |\Gamma_l|^2) \quad (12)$$

$$\text{여기서, } \Gamma_l = \frac{Z_l - Z_o}{Z_l + Z_o}, \Gamma_g = \frac{Z_g - Z_o}{Z_g + Z_o}, T = 1 - |\Gamma_l|^2$$

퓨즈의 RF 감도를 측정하기 위해 그림 3의 유한 전송선로는 무손실이고 특성임피던스가 일반 RF 장비의 입·출력임피던스와 같은 50 Ω이며, 전송선로의 길이는 파장에 비해 매우 짧은 것으로 가정하여 선로의 분포정수(L, C)에 의한 영향을 최소화시켰다. 퓨즈의 RF 기폭신호는 부하 쪽의 전력으로부터 역으로 소스 쪽에 필요한 신호의 크기를 결정하는 것이므로, RF 신호발생기의 출력(P_g)은 다음 순서로 설정할 수 있다. 먼저 퓨즈의 RF 임피던스(Z_{RF})를 측정하여 식 (12)에 제시된 부하 쪽의 반사계수와 투과계수를 계산하면 퓨즈 기폭에 필요한 RF 전력(P_{RF})을 구할 수 있다. P_{RF} 를 예측하려면 퓨즈의 RF 기폭전류(I_{RF})를 알아야 하는데, 본 연구에서는 $I_{RF} = I_{DC}$ 로 가정하고 P_{RF} 를 설정하였다. 여기서 P_{RF} 는 단지 RF 신호발생기의 출력을 미리 결정하기 위한 기준전류를 계산하는데 사용된다. 전송선로의 부하 쪽에 필요한 전력은 식 (13)에 의해 계산할 수 있고, 전송선로가 무손실이므로 $P_l = P_{in}$ 이 되어 RF 신호발생기의 출력을 설정할 수 있다.

$$P_l = \frac{P_{RF}}{T} \quad (13)$$

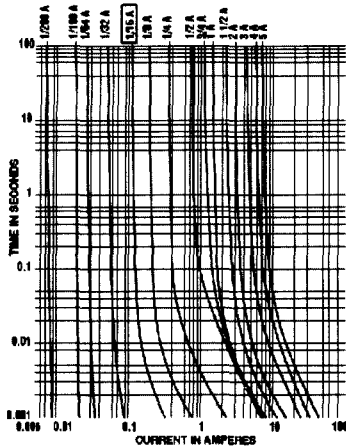


그림 5. 퓨즈의 평균 시간-전류 곡선(P/N 279.062)
Fig. 5. Average time-current curves of Littelfuse.

2-2 퓨즈 특성 측정 및 분석

항공기에 탑재된 EED의 MNFS가 1A인 경우, EED의 허용 유기전류는 150 mA(1A에 대한 16.5 dB) 이하가 되어야 한다. 이러한 요구조건 외에 앞서 제시된 퓨즈의 DC 저항과 RF 임피던스의 요구조건을 참조하여 Littelfuse사 “Very Fast-Acting” 형의 퓨즈(P/N 279.062)를 선정하였고, 선정된 퓨즈의 시간-전류 특성곡선은 그림 5에 나타내었다^[11].

2-2-1 DC 저항

EED 대신에 사용할 퓨즈의 DC 저항은 군사규격서에 제시된 저항계를 이용하여 측정할 수 있다. DC 저항측정에 사용된 시료의 수는 5개이고 측정된 DC 저항은 표 1에 기술하였다. 측정된 DC 저항의 범위는 2.23~2.33 Ω으로 EED의 DC 저항과 유사함을 알 수 있다.

표 1. DC 저항 측정결과
Table 1. Measured DC resistance.

시료 번호	DC 저항(Ω)	
	제품 규격	측정결과
1	2.32	2.23
2	2.32	2.23
3	2.32	2.32
4	2.32	2.31
5	2.32	2.33

표 2. DC 감도 측정결과

Table 2. Measured DC sensitivity.

시료번호	DC 저항(Ω)	인가전류(mA)	측정결과
1	2.23	110	F
2	2.23	110	F
3	2.32	110	F
4	2.31	108	F
5	2.33	108	F

2-2-2 DC 감도

그림 5에 제시된 줄 열에 의한 전류는 약 110 mA 이므로 이 값을 DC 감도측정의 기준전류로 설정하거나 식 (1)에 의해 계산할 수 있다. 측정된 DC 감도는 표 2에 기술하였다. 여기서 F는 인가전류에 의해 퓨즈가 기폭되었다는 것을 의미한다. DC 감도 측정 결과로부터 기폭전류의 범위는 108~110 mA로 제품 규격서에 제시된 110 mA와 유사함을 확인할 수 있다.

2-2-3 RF 임피던스

회로망분석기로 RF 임피던스를 측정하기 위해 선정된 퓨즈는 그림 6에 제시된 순서대로 SMA 커넥터에 설치하였다. 식 (6)과 같이 RF 임피던스의 저항은 RF 감도시험에 중요한 자료로 활용되기 때문에 10 개 시료에 대한 측정결과와 평균치를 그림 7에 나타내었다. 100 MHz 이하에서 저항성분은 2 Ω 부근이고 0.1~1 GHz까지 2~8 Ω 범위에 있지만 1 GHz 이상에서 저항성분이 급격히 변함을 알 수 있다.

2-2-4 RF 감도

RF 감도측정은 전송선로 이론에서 도출한 반사계수, 투과계수 및 부하전력을 이용하여 각 시험주파수별로 퓨즈의 전류나 전력을 발생시키기 위한 RF



그림 6. SMA(F) 커넥터에 설치된 퓨즈
Fig. 6. Installed fuse at SMA(F) connector.

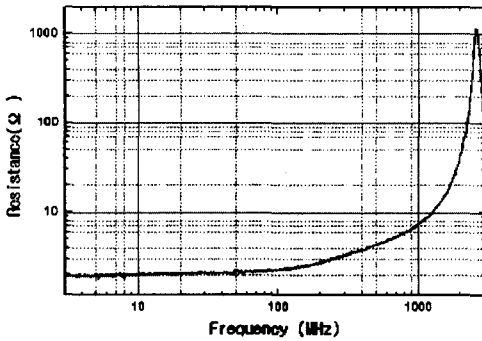


그림 7. RF 임피던스의 저항성분(평균치)
Fig. 7. Average resistance of RF impedance.

신호발생기의 출력을 결정해야 한다. 표 1에 제시된 DC 감도의 수준은 108~110 mA이므로 퓨즈에 인가될 RF 기준전류는 110 mA로 설정하였다. 이 설정값과 회로망분석기로 측정된 임피던스로부터 퓨즈에 전달된 전력을 계산한 다음, 식 (13)을 이용하여 RF 신호발생기의 출력을 예측하였다. 만약 예측된 전력보다 적은 값에서 퓨즈가 기폭될 경우에는 설정된 값을 감소시킨 후에 RF 감도를 측정하였다. RF 감도를 측정할 때, 그림 6과 같이 퓨즈가 설치된 SMA 커넥터는 그림 8의 RF 증폭기 출력단에 RF 어댑터를 통해 바로 연결하였다. 본 측정에 사용된 시료의 수는 각 주파수마다 5개이며, 시험장비 구성은 그림 8과 같고 RF 신호발생기의 출력신호는 군사규격서에 따라 CW 신호를 사용하였다^[3].

측정된 RF 기폭전류와 기폭전력의 평균치는 표 3에 나타내었으며, RF 기폭전류의 범위가 66.4~121.2 mA로서 100 MHz에서 66.4 mA로 기폭전류가 최소이고 10 MHz에서 121.2 mA로 가장 크게 나타났다. 반면에 RF 기폭전력의 범위는 10.82~49.9 mW로 약 5배의 차이가 나고, 100 MHz에서 기폭전력이 최소인 10.82 mW이며 400 MHz에서 기폭전력이 49.9 mW로 가장 크게 나타났다.

그림 9는 선정된 퓨즈(Littelfuse, P/N 279.062)의

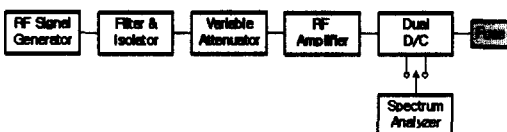


그림 8. RF 감도 시험장비 구성도
Fig. 8. Test setup of RF sensitivity.

표 3. RF 감도 측정결과(평균치)
Table 3. Measured RF sensitivity(average).

주파수 (MHz)	평균 임피던스(Ω)		평균 기폭수준	
	R	X	기폭전류 (mA)	기폭전력 (mW)
5	2.207	0.27	117.2	30.34
10	2.063	0.556		30.12
25	2.3	1.439	120	33.26
50	2.268	2.709	102.8	23.6
100	2.46	5.489		
150	2.568	7.933	94	22.78
200	3.201	10.689	111.2	37.4
250	3.241	12.844	100.8	32.94
300	3.714	15.475	82.4	25.2
350	3.652	17.651	87.6	27.86
400	3.965	20.125	112	
450	4.279	22.808	101.2	43.66
500	4.415	25.169	92	37.4
550	5.011	27.838	77.6	30.06
600	4.856	30.778	90	39.12
650	5.444	33.423	93.6	47.56
700	5.377	35.67	85.2	38.9
750	6.103	38.084	75.6	34.7
800	6.483	41.303	83.2	44.82

DC 및 RF 측정결과를 토대로 항공기 전기체에 대한 EMC 시험평가를 수행하기 위해 EED 대신에 기폭용 퓨즈가 설치된 치구를 나타내었다. 그림 6과 유사하게 퓨즈의 한 편은 항공기에 장착하기 위해 치구의 중심 축(positive)에 납땜하였고 다른 편은 러그를 이용하여 치구 케이스(negative)에 접속시켰다. 치구 내부에는 퓨즈의 움직임을 방지하도록 실리콘

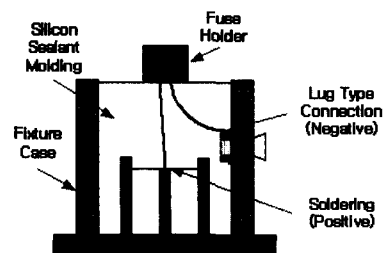


그림 9. EED 케이스를 활용한 치구
Fig. 9. Fixture using EED case.

방수제로 몰딩 처리하였다.

III. 결 론

군사규격서에는 EED에 대한 EMC 설계 및 시험 관련 사항을 제정하여 엄격히 적용하고 있다. 본 논문은 MIL-STD-464에 의한 항공기 전기체 EMC 시험 평가를 수행할 때, 탑재된 EED 관련 장비의 EMI 문제를 확인하기 위해 사용할 기폭용 퓨즈의 RF 감도 특성 연구결과를 기술하였다. 이를 위해 군사규격서에 규정된 EMC 관련 시험항목을 분석하여 기폭용 퓨즈에 적용할 시험항목은 DC 감도와 RF 감도로 결정하였다. 항공기에 탑재된 EED의 DC 저항은 약 2 Ω이므로 이 값과 유사한 기폭용 퓨즈(Littelfuse, P/N 279.062)를 선정하였다.

DC 감도는 군사규격서에 규정된 방법으로 예측과 측정이 가능하지만, RF 감도는 전송선로 이론을 활용하여 RF 기폭수준을 설정하였다. 먼저 기폭용 퓨즈는 SMA 커넥터에 설치하고 나서 회로망분석기로 측정된 RF 임피던스와 전송선로 이론에서 도출한 변수로부터 RF 신호발생기의 출력을 예측하여 RF 감도를 측정하였다.

선정된 퓨즈의 DC 저항은 2.23~2.33 Ω이고, DC 감도는 108~110 mA로 측정되었다. RF 임피던스의 저항은 100 MHz까지 2 Ω 부근에 있어 EED의 저항과 유사하였다. RF 감도는 66.4~121.2 mA로 측정되어 MIL-STD-464에 규정된 DC 및 RF 감도 요구조건을 모두 만족하였다. 따라서 본 퓨즈는 항공기 전기체에 대한 EMC 시험평가지 EED 대신에 기폭용 퓨즈로 사용할 수 있음을 확인하였고 항공기 장착용 치구를 제작하여 EMC 시험에 적용하였다.

참 고 문 헌

- [1] Jeffery D. Craven, Karen C. Compton, *Electro magnetic Environmental Effects Criteria and Guidelines for EMRH, EMRO, Lightning Effects, ESD, EMP, and EMI Testing of US Army Missile Systems*, US Army Materiel Command, TR-RD-TE-97-01, Jan. 1997.
- [2] Paul Sikora, "Testing military hardware to meet battlefield EMC requirements", *EMC Technology*, pp. 202-209, Nov. 1987.
- [3] MIL-STD-1576 Valid Notice 1, *Electroexplosive Subsystem Safety Requirements and Test Methods for Space Systems*, Sep. 1992.
- [4] MIL-HDBK-1512, *Electroexplosive Subsystems, Electrically Initiated, Design Requirements and Test Methods*, Sep. 1997.
- [5] MIL-HDBK-240, *Hazards of Electromagnetic Radiation to Ordnance(HERO) Test Guide*, Nov. 2002.
- [6] MIL-STD-464A, *Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems*, Dec. 2002.
- [7] MIL-STD-464, *Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems*, Mar. 1997.
- [8] Umran S. Inan, Aziz S. Inan, *Engineering Electromagnetics*, Addison-Wesley, 1999.
- [9] David M. Pozar, *Microwave Engineering*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [10] D. K. Cheng, *Field and Wave Electromagnetics*, 2nd Edition, Addison-Wesley, 1989.
- [11] Littelfuse Catalog, *Micro Fuse Very Fast-acting Type 279 Series*.

간 중 만



1985년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 1987년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
 1987년 2월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
 [주 관심분야] EMC 설계 및 EMI

시험기술 개발

권 준 혁



1990년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 1992년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
 1992년 3월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
 [주 관심분야] EMI/EMC 및 응용