HEMP 필터 잔류 전류와 전도 내성 기준의 특성인자 비교를 통한 장비의 HEMP 영향성 분석

HEMP Effect Analysis for Equipment Using Comparison of Norms between HEMP Filter Residual Current and Conducted Susceptibility Criteria

권 준 혁*** · 송 기 환* · 육 종 관**

Joon-Hyuck Kwon*** · Ki-Hwan Song* · Jong-Gwan Yook**

요 약

고 고도 전자기 펄스(HEMP: High-altitude Electromagnetic Pulse)용 필터는 펄스 전류 주입(PCI: Pulsed Current Injection) 인수시험을 통해 인수기준을 충족하더라도, 실제 부하 장비를 연결하여 장비 운용 상태에서 실시하는 PCI 검증 시험 수행 시에는 부하 장비의 전자기 전도 내성 수준에 따라서 장비가 손상될 수도 있다. 본 논문에서는 HEMP 방호시설에서 PCI 검증 시험 수행이 어려운 경우, 이에 대한 방안으로서 HEMP 필터의 PCI 인수시험 잔류 전류 측정값과 부하 장비의 과도 전자기 전도 내성 기준 값에 대한 특성인자(norm) 비교를 통해 필터 잔류 전류가 부하 장비에 미치는 영향분석 방법을 제안하였다. C4I(Command, Control, Communications, Computer, and Intelligence) 셀터용으로 제작된 HEMP 필터와 셀터 탑재 장비를 활용하여 HEMP 필터 PCI 인수시험, 과도 전자기 전도 내성 시험 및 PCI 검증 시험을 수행하였고, 결과를 분석하였다.

Abstract

Although High-altitude electromagnetic pulse(HEMP) protection filter meets the requirements of pulsed current injection(PCI) acceptance test, the equipment under test which has low electromagnetic susceptibility level can be damaged during PCI verification test that is performed on operating condition of equipment. This paper proposed the HEMP effect analysis method using comparison of norms between residual current of HEMP filter and transient electromagnetic conducted susceptibility criteria of equipment, as an alternative method under the condition that performing PCI verification test is limited in HEMP hardened facilities. PCI acceptance test of HEMP filter, transient electromagnetic conducted susceptibility test, and PCI verification test are performed and test results are analyzed.

Key words: HEMP(High-Altitude Electromagnetic Pulse), HEMP Filter, Pulsed Current Injection(PCI), Transient Electromagnetic Conducted Susceptibility

I. 서 론

지상 30 km 이상 고 고도 핵 폭발 시 감마-선과 콤프톤

효과(compton effect)에 의해 발생하는 고 고도 전자기 펄스(HEMP: High-altitude Electro-Magnetic Pulse)는 지상의 광범위한 지역에 걸쳐 50~65 kV/m 수준의 침투 전기장,

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

**연세대학교 전기전자공학과(Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

· Manuscript received September 16, 2013 ; Revised November 28, 2013 ; Accepted December 1, 2013. (ID No. 20130916-083)

· Corresponding Author: Jong-Gwan Yook (e-mail: jgyook@yonsei.ac.kr)

0.9~4.6 ns의 상승 시간 및 23~184 ns의 펄스 폭을 가지게 되며, 전기전자 장비에 작용하여 치명적인 손상이나 오동작을 초래할 수 있어 군사 시설 뿐만 아니라, 발전소, 방송국, 통신시설 등 주요 민간시설에도 이에 대한 대책 수립이 필요한 실정이다^{[1][2]}.

국제전기기술위원회(IEC)에서 제정한 IEC 61000-2-9^[3] 규격에서는 HEMP의 복사환경을 생성 원인에 따라 초기(E1), 중기(E2) 및 후기(E3) 파형으로 구분하고, 각 파형을 정형화하여 제시하고 있으며, HEMP에 의한 전도 환경은 IEC 61000-2-10^[4]에서 제시하고 있다. 이러한 HEMP 복사 및 전도 환경에 대한 군사시설 또는 시스템의 HEMP 방호성능 평가기준과 방법은 MIL-STD-188-125-1^[5] 및 MIL-STD-188-125-2^[6]에서 차폐 효과(SE: Shielding Effectiveness), 펄스 전류 주입(PCI: Pulsed Current Injection), 연속 파침잠(CWI: Continuous Wave Immersion) 및 위협 수준 조사(TLI: Threat Level Illumination)로 구분하여 제시하고 있다. 이 중에서 전도성 HEMP 신호에 대한 시설 또는 시스템의 방호성능은 PCI 시험을 통해 정량적인 평가가 가능하며, HEMP 필터에 대한 인수시험(acceptance test)과 시설 및 장비 운용 상태에서 평가를 수행하는 검증 시험(verification test)으로 구분된다. PCI 인수시험은 HEMP 필터를 규정된 조건에 따라 설치하고, 필터의 출력단에 부하저항(2 Ω 또는 50 Ω)을 연결한 후, PCI 발생기를 통해 규정된 형태의 전류파형을 인가하였을 때, 필터 출력단에 연결된 부하를 통해 흐르는 잔류 전류(residual current)의 특성인자(norm)를 측정하여 HEMP 필터를 평가하는 시험이다. 그리고 PCI 검증 시험은 HEMP 필터를 대상 시설에 설치한 후 실제 부하 장비를 연결하여 운용 중인 상태에서 PCI 발생기의 펄스 전류를 HEMP 필터에 인가하여, 필터 출력단의 잔류 전류 및 부하 장비의 이상 유무를 판단하여 평가하는 시험방법이다. 그러나 PCI 검증 시험은 HEMP 필터와 함께 실제 부하 장비가 설치/연결되어 운용 중인 상태에서 수행되어야 하므로, HEMP 필터의 잔류 전압 또는 전류에 의해 시험 중 방호시설 내/외부의 운용 장비가 손상을 입을 수도 있다^{[5][6]}. 이는 HEMP 필터가 인수시험 기준을 만족하더라도 연결된 부하 장비가 과도 전자기에 대한 전도 내성(conducted susceptibility) 수준이 낮은 경우에는 필터를 통과한 잔류 전류에 의해 영향을

받을 수 있기 때문이다. PCI 검증 시험 시 HEMP 필터를 통과하여 실제로 장비에 인입되는 잔류 전류의 크기는 부하 장비의 입력 임피던스에 따라 달라지게 된다. 따라서 방호시설 내부 전자장비가 민감하거나, 전자기적 내성수준이 확인되지 않은 경우, 또는 방호시설 현장의 공간적/구조적 여건으로 인해 PCI 검증 시험을 수행하기 어려울 때는 이를 대체하여 확인할 수 있는 방안이 필요하다.

본 논문에서는 PCI 검증 시험 수행이 제한을 받는 경우, 이에 대한 방안으로서 HEMP 필터의 PCI 인수시험 잔류 전류 측정값과 부하장비의 과도 전자기 전도 내성 기준 값에 대한 특성인자 분석을 통해 HEMP 필터를 통과한 잔류 신호가 부하 장비에 미치는 영향성 분석 방법을 제안하고, 실제 C4I(Command, Control, Communications, Computer, and Intelligence) 셀터용으로 제작된 HEMP 필터와 셀터 탑재 장비를 이용하여 수행한 실험 및 분석 결과를 제시하였다. 부하장비의 과도 전자기 전도 내성 기준은 MIL-STD-461F 표준서^[7]의 CS115 및 CS116 항목을 적용하였다.

II. HEMP 필터 PCI 잔류 전류 기준 및 장비의 과도 전자기 전도 내성 기준 분석

2-1 HEMP 필터에 대한 PCI 잔류 전류 기준

전도성 HEMP로부터 시설을 방호하기 위해서는 차폐 구조물의 전기 인입점(point of entry)에 HEMP 필터를 설치하여야 한다. HEMP 필터는 전도성 HEMP 신호로부터 차폐 구조물 내부의 전기전자 장비를 방호하는 장치로서 HEMP 필터의 성능은 PCI 시험을 통해 측정한다^[8]. PCI 시험에 사용되는 펄스전류 파형은 단 펄스(short pulse), 중 펄스(intermediate pulse), 장 펄스(long pulse) 및 충전 선로 펄스(charged line pulse)로 구성되며, 각 펄스에 대한 특징과 HEMP 필터의 평가기준은 참고문헌 [5], [6]에 상세히 기술되어 있다. 이 중에서 전원 및 신호선용 필터 시험에 사용되는 펄스는 단 펄스와 중 펄스 및 장 펄스이지만, 중 펄스는 필터의 잔류전류 제한기준치가 없고, 장 펄스는 아직 규격에서 요구하는 발생기 기준을 충족하는 펄스발생기가 상용화되어 있지 않다. 따라서 본 논문에서는 단 펄스에 대한 분석을 수행하였으며, 단 펄스 PCI 인

표 1. HEMP 필터 잔류 전류 제한기준^{[5],[6]}Table 1. Limit of HEMP filter residual current^{[5],[6]}

특성인자 필터구분	첨두치 (A)	첨두 상승률 (A/s)	루트액션 (A√s)
전원용	≤10	≤1.0×10 ⁷	≤1.6×10 ⁻¹
고전압신호용 (≥90 V)	≤1	≤1.0×10 ⁷	≤1.6×10 ⁻²
저전압신호용 (<90 V)	≤0.1	≤1.0×10 ⁷	≤1.6×10 ⁻³

가신호에 대한 전원/신호선용 HEMP 필터 출력단 잔류 전류 제한치는 표 1과 같다.

표 1에서 특성인자는 첨두치(peak residual current), 첨두 상승률(peak rate of rise) 및 루트 액션(root action)으로 구분되며, 각각 진폭의 크기, 펄스의 빠르기 및 펄스의 에너지를 나타낸다. 루트액션은 다음 식과 같이 정의된다^{[5],[6]}.

$$\text{Root Action} = \sqrt{\int_0^{5 \times 10^{-3}} I^2(t) dt} \quad (1)$$

2-2 장비에 대한 과도 전자기 전도 내성 기준

HEMP 필터를 통과한 PCI 잔류 전류는 부하 장비에 입력되어 장비의 정상작동에 영향을 미치게 된다. 전자기 펄스 및 낙뢰 유기전류에 의한 전기전자 장비의 영향은 MIL-STD-461의 전도 내성 시험항목 중 CS115와 CS116 항목을 통해 분석할 수 있다^{[9]~[11]}. 따라서 단 펄스 PCI 잔류 전류와 같은 과도 전자기 신호 입력에 대한 부하 장비의 내성 분석을 위해 본 논문에서는 MIL-STD-461F의 CS115와 CS116 기준을 적용하였다.

CS115는 그림 1과 같이 50 Ω의 동축 부하와 감쇄기 등이 연결된 교정치구에 그림 2와 같이 2 ns의 상승 시간과 30 ns의 지속시간을 가지는 5 A 수준의 임펄스 신호가 형성되는 신호를 피시험 장비에 인가하여 내성을 판단한다. CS116은 동일한 교정치구에 그림 3, 4와 같은 감쇄 정현파 신호가 형성되는 신호를 인가하여 내성을 판단한다. 진동 주파수는 최소한 0.01, 0.1, 1, 10, 30, 100 MHz를 포함한다. 감쇄 전류파형은 식 (2)와 같이 정의되며, 감쇄계수(Q)는 15이다^[7].

그림 1. CS115 교정을 위한 구성

Fig. 1. CS115 test setup for calibration.

그림 2. 전형적인 CS115 파형

Fig. 2. Typical CS115 waveform.

그림 3. CS116 감쇄 정현파

Fig. 3. CS116 damped sinusoidal waveform.

$$I(t) = e^{-\frac{\pi f t}{Q}} \times \sin(2\pi f t) \quad (2)$$

f : 주파수(Hz)
 t : 시간(sec)

그림 4. CS116 인가 기준치

Fig. 4. CS116 limit.

2.3 PCI 잔류 전류 기준과 CS115/116 인가기준에 대한 특성인자 비교 분석

CS115 및 CS116의 기준 파형을 특성인자로 나타내면 표 2와 같다. CS115 파형의 첨두 상승률은 그림 2로부터 진폭변화가 가장 큰 구간의 변화율($4 \text{ A} / 2 \text{ ns}$)을 이용하여 산출하였으며, 루트 액션은 5 A의 진폭과 30 ns의 펄스 폭을 이용하여 구하였다. CS116 파형은 Matlab을 이용하여 식 (2)의 미분 값으로부터 첨두 상승률을 구하였고, 식 (1)을 이용하여 루트액션을 구하였다.

표 1의 PCI 특성인자는 HEMP 필터의 출력단에 연결된 2 Ω 저항을 통해 흐르는 전류 파형 특성이지만, 표 2의 CS115, CS116 특성인자는 그림 1과 같이 동축 부하와 감쇄기에 의한 100 Ω 의 루프 저항에 흐르는 전류 특성 값이다. PCI 특성인자와 CS115, CS116의 특성인자를 서로 비교 분석하기 위해서는 부하 저항 값 차이에 대한 보정이 필요하다. 본 논문에서는 CS115와 CS116의 교정치구에 그림 5와 같이 2 Ω 저항을 연결하고, 펄스발생기의 출력 전압을 표 2의 실험 때와 동일한 값으로 설정하여 펄스를 인가한 후 부하 저항에 흐르는 전류파형을 측정하였다. 측정 결과는 그림 6, 7 및 표 3과 같이 나타났다.

표 1과 표 3에서 첨두치와 첨두 상승률은 PCI 잔류 전류 제한치보다 CS115, CS116의 특성인자가 대부분 높게 나타나고, 루트 액션도 전원 필터를 제외하고는 대부분

표 2. CS115 및 CS116 파형의 특성인자

Table 2. Norm of CS115 and CS116 waveforms.

특성인자 구분	첨두치 (A)	첨두 상승률 (A/s)	루트액션 ($A\sqrt{s}$)
CS115	5	2.0×10^9	8.7×10^{-4}
CS116 (10 kHz)	0.1	6.3×10^3	1.1×10^{-3}
CS116 (100 kHz)	1	6.3×10^5	3.5×10^{-3}
CS116 (1 MHz)	10	6.3×10^7	1.1×10^{-2}
CS116 (10 MHz)	10	6.3×10^8	3.5×10^{-3}
CS116 (30 MHz)	10	1.9×10^9	2.0×10^{-3}
CS116 (100 MHz)	3	1.9×10^9	3.3×10^{-4}

그림 5. CS115, CS116 측정(2 Ω 부하)Fig. 5. Measurement of CS115, CS116(2 Ω load).

CS115, CS116의 특성인자가 높게 나타났다. 따라서 CS115와 CS116의 시험파형들은 대부분의 PCI 잔류 전류 제한기준보다 엄격하고, PCI 검증 시험 시 필터의 잔류 전류에 의해 발생할 수 있는 위험수준을 충분히 모사 가능하다고 판단된다.

실제 PCI 측정을 통해 획득한 HEMP 필터의 잔류 전류 특성인자와 표 3의 CS115 및 CS116 특성인자 비교를 통해 HEMP 필터를 통과한 잔류 신호가 장비에 미치는 영향성을 예측할 수 있다.

(a) 진폭
(a) Amplitude

(a) 진폭
(a) Amplitude

(b) 상승률
(b) Rate of rise

(b) 상승률
(b) Rate of rise

(c) 루트액션
(c) Root action

(c) 루트액션
(c) Root action

그림 6. 2 Ω 부하에 흐르는 CS115 인가 전류 측정 파형
Fig. 6. CS115 current waveforms of 2 Ω load.

그림 7. 2 Ω 부하에 흐르는 CS116 인가 전류 측정 파형 (30 MHz)
Fig. 7. CS116 current waveforms of 2 Ω load(30 MHz).

표 3. 2 Ω 부하 조건으로 측정된 CS115 및 CS116 파형의 특성인자

Table 3. Measured norm under 2 Ω load for CS115 and CS116 waveforms.

구분 \ 특성인자	첨두치 (A)	첨두 상승률 (A/s)	루트액션 (A√s)
CS115	30.7	2.2×10^{10}	2.8×10^{-3}
CS116 (10 kHz)	5.0	2.9×10^6	5.2×10^{-2}
CS116 (100 kHz)	21.1	3.3×10^7	4.2×10^{-2}
CS116 (1 MHz)	72.0	1.6×10^9	5.5×10^{-2}
CS116 (10 MHz)	37.7	1.0×10^{10}	1.0×10^{-2}
CS116 (30 MHz)	74.8	3.3×10^{10}	8.5×10^{-3}
CS116 (100 MHz)	32.8	2.4×10^{10}	4.1×10^{-3}

III. 실험 및 분석 결과

C4I 셀터에 탑재되는 UPS(Uninterruptible Power Supply) 장비와 DMC(Digital Modem Complexer) 장비 보호용으로 설계된 HEMP 필터에 대한 PCI 실험결과와 UPS, DMC 장비에 대한 CS115, CS116 실험 수행을 통해 얻은 결과를 제시하고, 그 결과를 고찰하였다.

3-1 PCI 인수시험

UPS 장비용 HEMP 필터는 정격 AC220V/50A, 60 Hz 단상 전원용으로 설계하였고, DMC 장비용 HEMP 필터는 16 kbps의 저전압 신호용(<90 V)으로 설계하였다. 인수시험은 HEMP 필터를 셀터 차폐 벽면의 전기 인입점에 설치하고, 부하저항(2 Ω)을 연결한 다음 MIL-STD-188-125-2에서 요구하는 PCI 단펄스 전류를 최고 1,000 A 수준까지 인가하여 부하 저항에 흐르는 잔류 전류를 측정하였다. 실제 인가된 최고 전류는 그림 8과 같이 1,130 A의 첨두치, 14.8 ns의 상승 시간과 544 ns의 펄스폭으로 측정되었다. 잔류 전류 측정 결과는 그림 9~10, 표 4와 같이 나타났으며, 설계된 HEMP 필터는 표 1의 잔류 전류 제한 기준치보다

그림 8. PCI 인가 파형

Fig. 8. Injected PCI waveform.

표 4. HEMP 필터 잔류 전류 측정 결과

Table 4. Results of residual current of HEMP filters.

특성인자 필터구분	첨두치 (A)	첨두 상승률 (A/s)	루트액션 (A√s)
UPS용 필터	0.210	6.44×10^4	2.43×10^{-3}
DMC용 필터	0.016	5.82×10^4	2.32×10^{-4}

그림 9. UPS용 전원선 HEMP 필터 잔류 전류

Fig. 9. Residual current of HEMP filter of UPS.

그림 10. DMC용 신호선 HEMP 필터 잔류 전류

Fig. 10. Residual current of HEMP filter of DMC.

낮게 측정되어 필터 인수기준이 만족됨을 알 수 있다.

표 4의 잔류 전류 측정치를 표 3과 비교하여 보면, UPS

용 필터와 DMC용 필터 모두 표 3의 CS115, CS116 특성인자보다 낮은 값으로 측정되어, 검증 시험 시 필터 잔류 전류가 장비에 미치는 영향은 없을 것임을 예상할 수 있다.

3-2 장비에 대한 CS115, CS116 시험

UPS 및 DMC 장비에 대하여 CS115, CS116 전도 내성 시험을 수행하였다. 그림 11과 같은 시험구성으로 하여, 그림 2~4에 해당하는 시험 기준 신호를 인가하여 시험한 결과는 표 5, 6과 같이 측정되었으며, 모두 MIL-STD-461F에서 요구하는 과도 전자기 전도 내성 기준을 충족하였다. UPS의 유기전류는 입력 전원선에서 측정한 값이며, DMC의 유기전류는 통신선에서 측정한 값이다.

3-3 PCI 검증 시험

검증 시험을 위해 셀터 내부의 HEMP 필터 출력단에는 부하 저항 대신 UPS와 DMC 장비를 각각 연결하고, 셀터

그림 11. CS115 내성시험을 위한 구성
Fig. 11. CS115 setup for susceptibility test.

표 5. UPS 및 DMC 장비 CS115 측정 결과
Table 5. Results of CS115 test for UPS & DMC.

장비	UPS		DMC	
	유기전류 (A)	장비 상태	유기전류 (A)	장비 상태
-	10.6	정상	9.2	정상

표 6. UPS 및 DMC 장비 CS116 측정 결과
Table 6. Results of CS116 test for UPS & DMC.

주파수 (MHz)	UPS		DMC	
	유기전류 (A)	장비 상태	유기전류 (A)	장비 상태
0.01	0.97	정상	1.1	정상
0.1	0.08	정상	1.96	정상
1	11.9	정상	22.0	정상
10	17.1	정상	27.0	정상
30	5.8	정상	4.6	정상
100	0.8	정상	0.99	정상

그림 12. PCI 검증 시험 구성
Fig. 12. Configuration of PCI verification test.

외부에는 UPS 입력 전원과 DMC 운용을 위한 연동 장비를 그림 12와 같이 구성하였다. 검증 시험은 UPS와 DMC 장비 정상 운용 상태에서 수행하였으며, 측정 결과는 그림 13~14, 표 7과 같이 나타났다.

UPS용 필터를 통과한 잔류 전류의 특성인자는 모두 표 1의 기준을 만족하였고, 장비도 정상 운용 상태를 유지하였다. DMC용 필터는 잔류 전류의 첨두치가 1.17 A로 측정되어 제한기준치인 0.1 A를 만족하지 못하였으나, 장비는 정상적으로 동작하였다. DMC용 필터의 잔류 전류가 높게 나타난 것은 DMC 장비의 입력저항이 인수시험 시

표 7. PCI 검증 시험 잔류 전류 측정 결과
Table 7. Results of residual current measurement on PCI verification test.

특성인자 필터구분	첨두치 (A)	첨두 상승률 (A/s)	루트액션 ($A\sqrt{s}$)
UPS용 필터	0.09	6.43×10^4	6.38×10^{-4}
DMC용 필터	1.17	2.22×10^6	1.58×10^{-3}

그림 13. UPS용 HEMP 필터 검증 시험 잔류 전류
Fig. 13. Residual current of UPS HEMP filter on PCI verification test.

그림 14. DMC용 신호선 HEMP 필터 검증 시험 잔류 전류
Fig. 14. Residual current of DMC HEMP filter on PCI verification test.

사용한 부하저항($2\ \Omega$)보다 낮아서 제한기준치보다 큰 전류가 유기된 것으로 보인다.

셀터 장비용 각 HEMP 필터는 필터 자체의 인수시험 기준을 만족하였으며, 측정된 잔류 전류의 침두치, 침두 상승률 및 루트 액션은 표 3에 제시된 $2\ \Omega$ 부하 조건의 전도 내성 기준 특성인자 값보다 모두 낮게 나타났다.

그리고 UPS와 DMC 장비에 대한 과도 전자기 전도 내성 시험결과, MIL-STD-461F의 CS115, CS116 기준을 모두 만족하였다. 따라서 셀터에 설치된 HEMP 필터를 통과하면서 감쇄된 HEMP 잔류 전류는 UPS 및 DMC 장비로 인입되더라도 해당 장비에 미치는 영향은 없을 것으로 판단할 수 있다.

실제 HEMP 필터와 장비를 연결하여 수행한 PCI 검증 시험 결과, DMC용 HEMP 필터 잔류 전류 침두치가 제한 기준치를 만족하지 못하였지만, 장비는 모두 정상적으로 작동하는 것을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 HEMP 방호시설의 HEMP 필터를 통과한 잔류 전류가 시설 내부에 연결된 전기전자 장비에 미치는 영향을 분석할 수 있는 기법을 제시하였다. HEMP 필터의 PCI 단펄스 시험결과와 부하장비의 과도 전자기 전도 내성 시험항목인 CS115, CS116 기준파형분석 시험 결과와의 비교를 통해 HEMP 필터를 통과한 잔류 신호가 부하 장비에 미치는 영향성을 분석하고 고찰하였다. 셀터 장비용으로 설계된 HEMP 필터에 대한 PCI 인수시험, 탑재장비 과도 전자기 전도 내성 시험, 그리고 PCI 검증 시험 수행을 통해 특성인자를 이용한 분석이 타당함을 검증하였다. 본 분석 기법은 PCI 검증 시험을 수행하기 어려운 시험조건 하에서 HEMP 필터 및 연결 장비에 대한 PCI 검증 시험을 대체하는 방안으로 활용 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] R. Hoad, W. A. Radasky, "Progress in high-altitude electromagnetic pulse(HEMP) standardization", *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, vol. 55, no. 3, pp. 532-538, Jun. 2013.
- [2] 강희도, 오일영, 김정호, 육종관, "다층 지하 구조물로의 고고도 전자기파(HEMP) 커플링 현상에 대한 전자기적 모델링", *한국전자과학회논문지*, 23(3), pp. 392-401, 2012년 3월.
- [3] IEC 61000-2-9 : IEC Standard, Electromagnetic Compatibility(EMC), Part 2 : Description of HEMP environment - Radiated disturbance, 1996.
- [4] IEC 61000-2-10 : IEC Standard, Electromagnetic Compatibility(EMC), Part 2 : Description of HEMP environment - Conducted disturbance, 1998.
- [5] MIL-STD-188-125-1 : Department of Defense Interface Standard : High-altitude electromagnetic pulse(HEMP) protection for ground-based C4I facilities performing critical, time urgent missions, Part 1 - Fixed facilities, 1998.
- [6] MIL-STD-188-125-2 : Department of Defense Interface Standard : High-altitude electromagnetic pulse(HEMP) protection for ground-based C4I facilities performing critical, time urgent missions, Part 1 - Transportable sys-

tems, 1999.

- [7] MIL-STD-461F : Department of Defense Interface Standard : Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment, 2007.
- [8] A. J. Nalborczyk, "Frequency HEMP filter design to meet MIL-STD-188-125 PCI test requirements", *Electromagnetic Interference & Compatibility, INCEMIC 2008. 10th International Conference on*, pp. 205-209, 2008.
- [9] N. K. Agarwal, "Impacts of MIL-STD-461D on aerospace equipment", *Electromagnetic Interference & Com-*

patibility, INCEMIC 1995. International Conference on, pp. 362-369, 1995.

- [10] O. Hartal, "Hardening of I/O ports to the EMP susceptibility requirements of MIL-STD-461E", *Electromagnetic Interference & Compatibility, INCEMIC 2006. 9th International Conference on*, pp. 366-369, 2006.
- [11] 박상근, 김소영, "Noise Injection Path의 주파수 특성을 고려한 IC의 전자파 전도 내성 시험 방법에 관한 연구", *한국전자과학회논문지*, 24(4), pp. 436-447, 2013년 4월.

권 준 혁

1990년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 1992년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
 1992년 3월 ~ 현재: 국방과학연구소 책임연구원
 2010년 3월 ~ 현재: 연세대학교 전기전자

공학과 박사과정

[주 관심분야] EMI/EMC, HEMP 등

육 중 관

1987년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1989년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 1996년 12월: University of Michigan 전기전자공학과 (공학박사)
 1997년 1월 ~ 1998년 9월: University of Michigan Research Fellow

1998년 10월 ~ 1999년 2월: Qualcomm Inc. Senior Engineer

1999년 3월 ~ 2000년 2월: 광주과학기술원 조교수

2000년 3월 ~ 현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수

2012년 ~ 2013년: IEEE Distinguished Lecturer(EMC Society)

[주 관심분야] 마이크로파 시스템 해석 및 설계, 안테나 시스템, RF MEMS, Bio-radar and Sensors, Computational Electromagnetics, EMI/EMC, HEMP

송 기 환

2005년 2월: 고려대학교 전기전자전파공학부 (공학사)

2007년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학석사)

2007년 2월 ~ 현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] EMI/EMC, HEMP 등