

전술기동무선통신체계 안테나 HEMP 방호 필터 설계

Design of an Antenna High Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Protection Filter for Tactical Mobile Wireless Communication System

박경제 · 정길수* · 김정섭* · 박용우* · 한창곤** · 박재현

Kyoung-Je Park · Kil-Soo Jeong* · Jung-Sup Kim* · Yong-Woo Park* · Chang-gon Han** · Jae-Hyun Park

요 약

현재 군의 전술기동무선통신체계의 경우, HF(high frequency), VHF(very high frequency), UHF(ultra high frequency)대역에 이르는 다양한 장비를 운용하고 있다. 군 운용 장비는 HEMP(high-altitude electromagnetic pulse) 상황에도 성능 저하 및 통신 불능이 일어나지 않는 방호능력 확보가 요구된다. 본 논문에서는 각 운용 대역별 안테나 특성에 따른 방호수준을 위협레벨조사(threat level illumination: TLI)시험을 통해 확인하였고, TLI 시험결과를 바탕으로 각 대역별 HEMP 방호 필터를 설계 및 제작하였다. 제작한 HEMP 방호 필터를 대역별 전술기동무선통신체계에 적용한 후 TLI 시험을 재수행하여 HEMP 방호 방안을 확보하였다. 제안된 HEMP 방호 필터는 각 장비별 운용대역의 삽입손실 0.5 dB 이하, PCI(pulse current injection) 시험결과 잔류전류 1A 이하를 만족한다.

Abstract

Currently, the military's tactical mobile wireless communication system (TMWCS) operates various equipment ranging from high frequency (HF), very high frequency (VHF), and ultra-high frequency (UHF) bands. Military operation equipment are required to secure protection capabilities such as performance degradation and inability to communicate even in high-altitude electromagnetic pulse (HEMP) situations. In this study, we performed a threat level illumination (TLI) test for the level of protection according to the antenna characteristics operating band, and designed and manufactured HEMP protection filters for each band based on the TLI test results. After applying the manufactured HEMP protection filter to the TMWCS for each band, the TLI test was repeated to secure the HEMP protection plan. The proposed HEMP protection filter satisfies an insertion loss of 0.5 dB or less in the operating band for each piece of equipment, and a residual current of 1 A or less as a result of the pulse current injection (PCI) test.

Key words: HEMP(High-Altitude Electromagnetic Pulse), Tactical Mobile Wireless Communication System, PCI(Pulsed Current Injection), BPF(Band Pass Filter), Frequency Bands

I. 서 론

전자기 펄스(electromagnetic pulse: EMP) 중 가장 이슈

「본 논문은 국방과학연구소 주관의 전술기동무선통신체계 EMP 방호장치 설계/제작 및 시험지원 제작구매(UG190049ED)의 지원을 받아 수행됨.」
아이스펙(I-SPEC, Republic of Korea)

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

**한양대학교 융합전자공학과(Department of Electronic Engineering, Hanyang University)

· Manuscript received March 26, 2021 ; Revised April 6, 2021 ; Accepted May 3, 2021. (ID No. 20210326-026)

· Corresponding Author: Kil-Soo Jeong (e-mail: ksjeong@add.re.kr)

가 되고 있는 위협은 고도 40 km 이상의 고고도에서 핵폭발에 의해 발생하는 콤프턴 효과(compton effect)에 의한 고고도 전자기 펄스(high altitude electromagnetic pulse: HEMP)이다^[1].

HEMP는 순간적으로 수십 ns에서 수백 ms 동안 고출력 전자기 펄스를 발생하여 금속성 물질에 빠른 속도로 유기되어 많은 전자기기, 통신장비의 성능 저하 또는 작동 불능 등의 심각한 영향을 초래하게 된다. 특히, 임무의 계속성 보장이 필요한 전술기동무선통신체계(tactical mobile wireless communication system)에서는 HEMP 방호능력의 확보가 요구되고 있어 HEMP의 주요 위협요소에 대한 방호수준 및 취약성을 분석하고, 방호장치 제작을 통한 효과적인 방호대책을 수립해야 한다.

이러한 HEMP의 위협에 대응한 HEMP 방호 필터에 관한 연구가 전원선, 신호 및 데이터선 및 안테나 전용 필터로 구분되어 국·내외적으로 진행되고 있다. 안테나용 HEMP 방호 필터의 경우, 주파수 대역이 광범위하고, 송·수신 출력에 대한 신호 감쇄가 적어야 한다. 이러한 제약 때문에 기 개발되어 있는 안테나용 HEMP 방호 필터의 경우, 대부분 GDT(gas discharge tube)를 병렬로 내장한 서지보호용 필터이며, GDT만으로 구성되어 있는 안테나용 HEMP 방호 필터의 경우, MIL-STD-188-125 규격에서 요구하는 EMP 방호 성능 기준치를 만족하기 어렵다^{[2][3]}.

본 논문에서는 전술기동무선통신체계 장비 보호를 위한 HEMP 방호 필터를 제작하여 상기 규격의 PCI(pulse current injection) 허용기준치를 만족하며, 통신 신호의 저하를 최소화(≤ 0.5 dB)하는 필터를 개발하는 것에 목적이 있다. 실제 무전기에 안테나용 HEMP 필터를 장착하여 HEMP 모사시험인 위협레벨조사(threat level illumination: TLI)^{[4][5]}를 진행하여 무전기 생존 가능성을 확보하였고 출력시험을 통하여 통신 신호 수준(level) 저하 최소화를 확인하였다.

II. HEMP 방호 필터 설계 및 제작

HEMP 위협요소는 주파수 범위 10 kHz~1 GHz 범위에 존재하므로 HF, VHF, UHF 대역으로 운용하는 전술기동

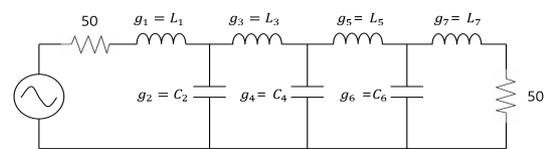
무선통신체계는 HEMP 에너지 분포에 따라 수십에서 수백 암페어의 유도전류가 인가됨으로써 운용 장비 내부 회로를 손상시킬 수 있다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 보완하기 위한 안테나용 HEMP 방호 필터를 설계 및 구현하고자 한다.

HEMP 방호 필터는 원하는 송·수신 안테나 주파수는 통과시키고, 원하지 않는 주파수 정보를 제거하는 BPF (band pass filter) 특성을 갖도록 설계하였으며, 일정한 통과 대역을 가지기 위하여 버터워스(butterworth) 필터를 설계하였다. 단수는 7단으로 제작하고 주파수 대역은 HF, VHF 및 UHF 대역을 하였다. 삽입손실(insertion loss)은 0.5 dB 이하로 목표를 설정하였다.

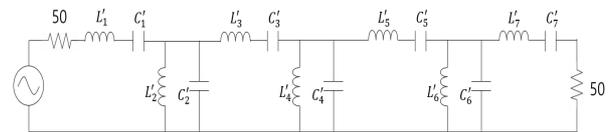
그림 1(a)와 같이 필터를 설계하기 위하여 7단의 저역 통과필터(low pass filter)의 기본형을 사용하고, 주파수 변환식 (1)과 식 (2)를 이용하여 그림 1(b)처럼 대역통과필터를 설계한다. n 은 홀수이며, $R_0=50$ 이다. $\Delta=(\omega_2-\omega_1)/\omega_0$ 이고, ω_0 는 중심 각 주파수, ω_1, ω_2 는 통과대역 시작과 끝 각 주파수를 의미한다. g_n 은 버터워스의 계수 값을 나타낸다^[6].

$$L'_n = \frac{L_n R_0}{\omega_0 \Delta}, \quad L'_{n+1} = \frac{\Delta R_0}{\omega_0 C_{n+1}} \quad (1)$$

$$C'_n = \frac{\Delta}{\omega_0 L_n R_0}, \quad C'_{n+1} = \frac{C_{n+1}}{\omega_0 \Delta R_0} \quad (2)$$



(a) 7단 저역 통과 필터 기본형
(a) 7-stage low pass filter prototype.



(b) 7단 대역 통과 필터
(b) 7-stage band pass filter.

그림 1. 7단 필터 설계 회로도
Fig. 1. 7-stage filter design circuit diagram.

HEMP 방호를 위한 안테나 필터의 경우, 과도전압 방지 부와 사용하는 주파수 대역을 통과시키는 BPF부로 구성된다. 과도전압 방지부에서는 입력단의 GDT를 통하여 1차 과전압을 억제하였으며, 2차 과전압의 경우 스위칭 다이오드를 병렬로 연결하여 억제하였다. BPF부는 인덕터 및 캐패시터를 통하여 구현하였다. 그림 2에 제안한 HEMP 방호 필터의 회로도를 나타내었으며, 표 1에 소자의 파라미터 값을 나타내었다⁷⁾. C_3, C_4 및 L_3, L_4 의 소자는 고주파의 영역으로 저주파 대역의 HF, VHF대역 HEMP 방호필터 회로는 오픈되도록 하였다.

과도전압 방지부에 사용되는 소자는 주로 MOV(metal oxide varistor), GDT, 스위칭 다이오드 등을 사용하여 순시 과전압(overvoltage)을 억제한다. 그러나 MOV의 주파수에 따른 전압, 전류 특성이 비선형적이기 때문에 필터에서는 주로 GDT를 사용한다. GDT는 정상 상태에서 매우 높은 절연저항치와 낮은 정전용량으로 피보호 장비의 정상동작에 영향을 주지 않으며, 일정한 전압 이상에 이르면 방전을 시작하여 대부분의 에너지를 흡수하거나 접지를 통해 방전된다. 방전 후 에너지는 소모되고, 속류 또한 차단되어 원래의 절연상태로 돌아간다.

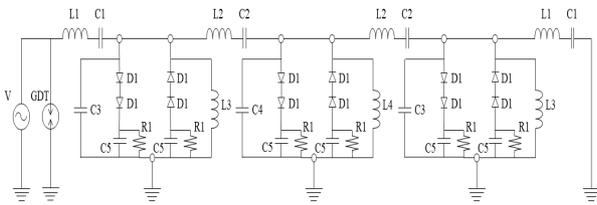


그림 2. HEMP 방호 필터 설계 회로도
Fig. 2. HEMP protection filter design circuit diagram.

표 1. HEMP 방호 필터 소자 파라미터 값
Table 1. HEMP protection filter element parameter value.

Parameter	Value [HF, VHF]	Value [UHF]	Parameter	Value [HF, VHF]	Value [UHF]
L_1	15 nH	7 nH	C_1	470 nF	120 pF
L_2	50 nH	15 nH	C_2	33 nF	33 pF
L_3	-	120 nH	C_3	-	4 pF
L_4	-	75 nH	C_4	-	5 pF
R_1	1 M Ω	1 M Ω	C_5	2.2 uF	1 uF

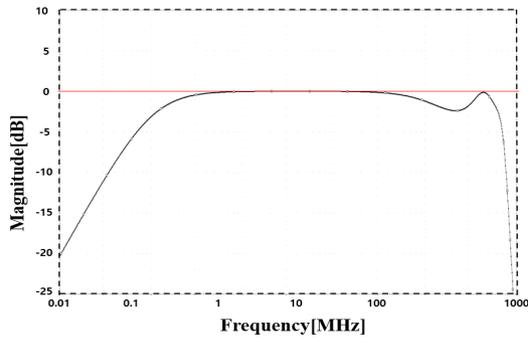
스위칭 다이오드는 일반적인 정류 다이오드와 비슷한 특성을 가지나, HEMP 파형의 특성상 짧은 시간에 파형이 인가되므로 역 회복 시간(reverse recovery time)이 빠른 다이오드가 사용된다. 스위칭 다이오드의 임계전압보다 높은 HEMP 펄스가 인가될 경우 스위칭 다이오드가 Turn On되어 억제된다.

다이오드 임계전압 이상의 입력 전압이 들어오게 되면 스위칭 다이오드로만 구성된 회로의 경우, 출력 손실이 발생한다. 따라서 스위칭 다이오드에 직렬로 수 uF의 커패시터를 라인별로 연결하였다. 이 경우, 순방향의 임계전압 이상의 전압이 인가될 때 순방향 다이오드의 라인 은 오픈되어 순방향으로 흐르지 않으며, 역방향 다이오드 쪽으로는 역방향전압 이하가 걸려 흐르지 못하기 때문에 출력 손실이 발생하지 않는다.

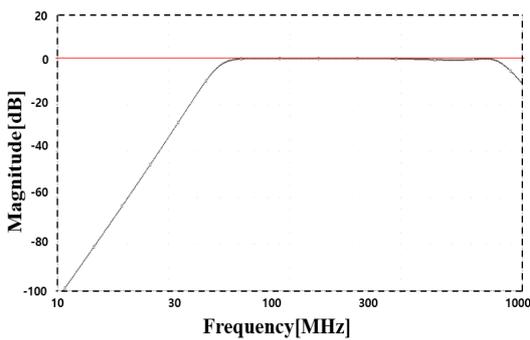
BPF부의 경우, LC소자 값을 이용하여 원하는 주파수 대역의 응답 및 삽입손실을 얻어내며, GDT로 제거되지 못한 과전압을 추가로 억제하는 부분이다. 고주파대역으로 갈수록 회로의 기생성분 영향을 고려하여 커패시터(capacitor)는 MLCC(multi layer ceramic capacitor)를 사용하였다.

일반적으로 HEMP 방호 필터에 사용되는 인덕터(inductor)의 경우, 필터에 직렬로 삽입되며, 부하 전류에 의한 포화(saturation)를 피하기 위하여 포화자속 밀도가 큰 코어를 사용한다. 그러나 코어를 이용한 인덕터의 경우 주파수가 증가함에 따라 발생하는 에너지 손실이 발생하게 된다. 따라서 안테나용에 사용되는 인덕터의 경우, 내부가 비어 있는 공심 인덕터(air-core inductor)를 사용한다. 공심 인덕터는 주파수가 높아짐에 따라 발생하는 에너지 손실로 인한 신호 파형 문제를 해결할 수 있으며, 매우 낮은 인덕턴스 허용 오차를 갖는다.

그림 3은 안테나 HEMP 방호 필터 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 최종적으로 제작한 HF, VHF 대역, UHF 대역 형상은 그림 4에 나타내었으며, 방호 필터 삽입손실은 그림 5에 나타내었다. HF, VHF 대역은 최대 출력 100 W, UHF 대역은 50 W로 제작되었고, 필터의 삽입손실은 0.5 dB 이하를 만족한다. 저주파에서는 시뮬레이션값과 실제 삽입손실 측정값은 비슷하지만, 고주파로 갈수록 소자의 특성 값이 바뀌어 차이가 나는 것을 확인할 수 있다.



(a) HF, VHF 대역 HEMP 방호 필터 시뮬레이션
(a) HF, VHF band HEMP protection filter simulation



(b) UHF 대역 HEMP 방호 필터 시뮬레이션
(b) UHF band HEMP protection filter simulation

그림 3. HEMP 방호 필터 시뮬레이션
Fig. 3. HEMP protection filter simulation.

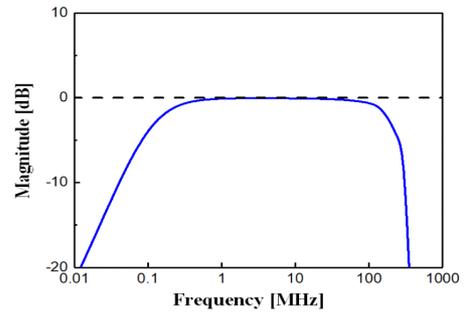


(a) HF, VHF 대역 형상
(a) HF, VHF band shape

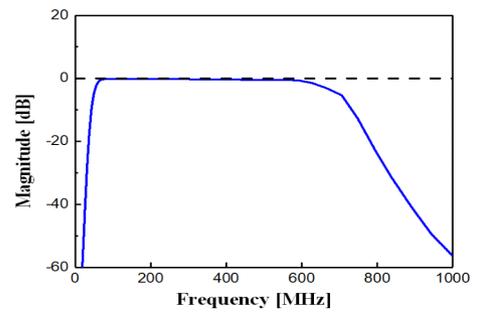


(b) UHF 대역 형상
(b) UHF band shape

그림 4. HEMP 방호 필터 형상
Fig. 4. HEMP protection filter shape.



(a) HF, VHF 대역 HEMP 방호 필터 삽입손실
(a) HF, VHF band HEMP protection filter insertion loss



(b) UHF 대역 HEMP 방호 필터 삽입손실
(b) UHF band HEMP protection filter insertion loss

그림 5. HEMP 방호 필터 삽입손실
Fig. 5. HEMP protection filter insertion loss.

필터의 HEMP 방호 능력을 시험하기 위하여 과도전압 방지부만을 사용하여 HEMP 방호장치를 PCI 시뮬레이션 하여 과도전압 방호능력을 검증하였다. GDT와 다이오드로 구성된 회로에 인가 전류는 최대치인 2.5 kA로 인가하였다. 그 결과, 그림 6과 같이 잔류 전류가 450 mA로

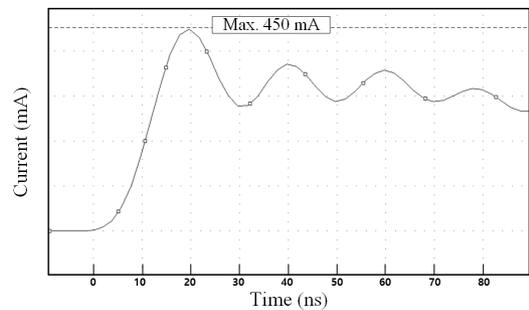


그림 6. 과도전압 방지부 PCI 시뮬레이션
Fig. 6. Transient voltage prevention unit PCI simulation.

MIL-STD-188-125 규격의 1A 이하를 만족하는 것을 알 수 있다.

MIL-STD-188-125 규격 중 필터에 관련하여 HEMP 방호와 직접적인 연관이 있는 PCI 시험은 전도성 침투를 방호하기 위해 필터에 강한 전류를 인가하여 필터의 안정성을 평가하는 시험이다. PCI 시험의 경우, 사용 용도에 따라 전원선, 신호 및 데이터선, 안테나선으로 구분하여 인가전류 값을 규정하고 있다. 표 2는 사용 용도에 따른 인가전류를 나타내며, 그림 7은 안테나의 PCI 시험 구성도를 나타내었다.

표 2에서 언급된 것과 같이 전원선과 신호 및 데이터선의 인가전류는 명확한 값이 표시되어 있으나, 안테나선의 인가전류는 위협레벨(threat level)로 표기되어 있다. 따라서 MIL-STD-188-125 규격에서 규정하는 위협레벨의 정의인 외삽법을 통한 예상 값을 적용하여 안테나용 HEMP 방호 필터를 제작하고자 한다.

외삽법은 측정을 통해 얻은 데이터를 기반으로 그래프 상 선형으로 일정하게 증가하는 측정지점의 마지막 부분을 기점으로 추세선을 연장해 예상 측정값을 도출하는 기법이다. 주파수 대역으로 구분하고, 전체의 세기는 1, 2, 5, 10 kV/m로 TLI 시험을 진행하였고, 측정값을 50 kV/m

표 2. 사용 용도별 PCI 인가전류^{[2],[3]}
Table 2. PCI applied current by application^{[2],[3]}.

Class of electrical POE	Peak-short-circuit (A)	Risetime (ns)	FWHM (ns)
Power lines	2,500	≤ 20	500~550
Data/signal lines	2,500	≤ 20	500~550
Antenna lines	Threat-level	≤ 20	500~550

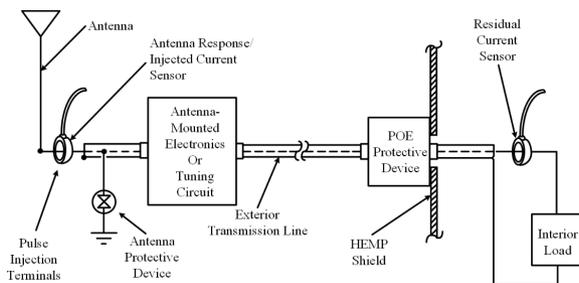


그림 7. 안테나 PCI 시험 구성도^{[2],[3]}
Fig. 7. Antenna PCI test configuration diagram^{[2],[3]}.

로 환산하여 얻은 예상 값은 표 3에 나타내었다^{[8],[9]}.

표 3의 외삽법을 통한 예측 값으로 시험하기 위해서는 MIL-STD-188-125 규격에서 제시하는 기타 불확도를 감안하여 외삽법을 통해 얻은 결과 값의 10배가 되도록 하여 인가 전류를 규정하게 되어 있다. 그에 따라 주파수별 PCI 인가 전류를 표 4에 나타내었다.

표 4에서 보는 것과 같이 각 주파수 대역별로 안테나 선로에 인가하여야 하는 전류는 최소 780 A 이상인 것을 알 수 있다. 그러나 안테나 신호 도체용 충전선로 펄스 발생기의 경우, 최대 400 A 펄스를 발생시키므로 MIL-STD-188-125 규격에서는 그 이상의 펄스 전류에 대하여 그림 8과 같은 단펄스 발생기의 파형을 인가한 시험을 규정하

표 3. 외삽법으로 50 kV/m 적용 시 예상 값
Table 3. Expected value when 50 kV/m is applied by extrapolation.

Expected value (50 kv/m)	1 kV/m	2 kV/m	5 kV/m	10 kV/m
HF band	163 A	159 A	217 A	192 A
VHF band	132 A	123 A	125 A	94 A
UHF band	68 A	63 A	64 A	62 A

표 4. 주파수 별 PCI 인가 전류
Table 4. PCI applied current by frequency.

Frequency	PCI applied current
HF band	2.17 kA
VHF band	1.32 kA
UHF band	0.68 kA

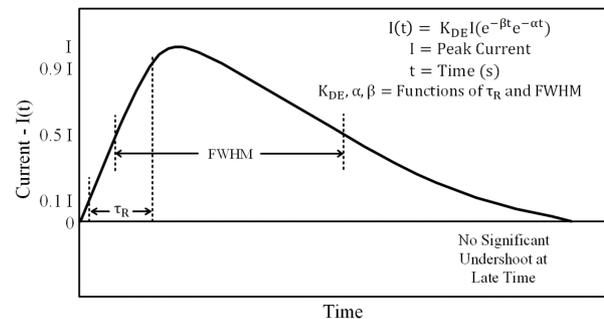


그림 8. 단펄스 파형^{[2],[3]}
Fig. 8. Short pulse waveform^{[2],[3]}.

고 있다.

단펄스 과형 발생기를 통하여 PCI 시험구성을 그림 9와 같이 나타내었다. 예상 PCI 인가 전류 값을 바탕으로 PCI Generator에서 단펄스 과형을 발생시켜 HF 및 VHF 대역 HEMP 방호 필터에는 2.5 kA를 인가하였고, UHF 대역 HEMP 방호 필터는 1 kA를 인가하여 오실로스코프로 측정하였다.

MIL-STD-188-125 규격의 안테나 선 PCI 잔류전류 만족 기준은 송·수신 단의 경우, 피크(peak) 잔류전류 값을 1 A 이하로 규정하고 있다. 그림 10은 각 주파수별 PCI 시험 결과를 나타낸다. PCI 시험 결과, HF, VHF 대역 HEMP 방호 필터의 피크 잔류 전류 값은 448 mA, UHF 대역 HEMP 방호 필터는 680 mA로 시험 기준을 만족한다.

HEMP 에너지는 주파수 1 GHz 이하에 집중되어 있으므로 1 GHz 이하의 통과 대역을 가지는 HF, VHF, UHF 대역의 장비들은 치명적이다. 제한한 HEMP 방호 필터의 경우, 특정 주파수 대역의 신호를 선택적으로 통과할 수 있도록 하여 주변 장비의 노이즈를 제거하며, HEMP 공격에도 장비를 효과적으로 보호할 수 있도록 제작하였다.

III. HEMP 방호 필터 적용 및 시험

본 연구에서는 HEMP 환경에 노출된 전술기동무선통신체계 안테나를 대상으로 TLI(threat level illumination)

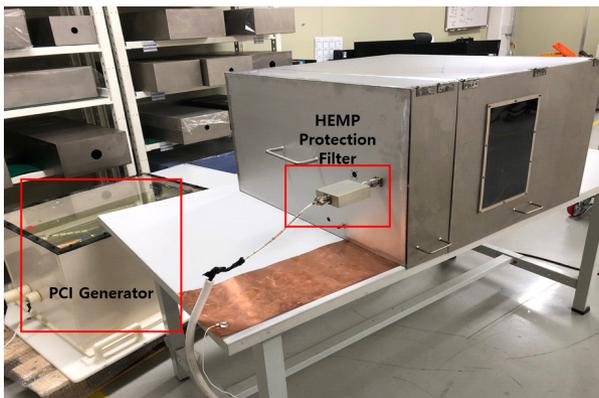
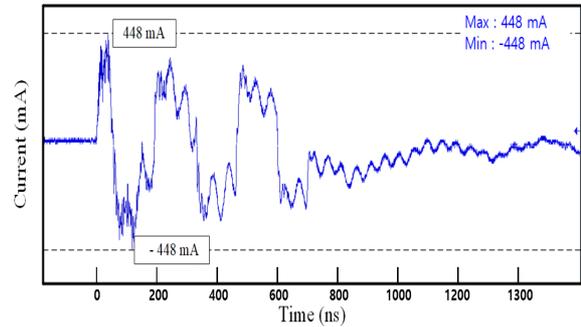
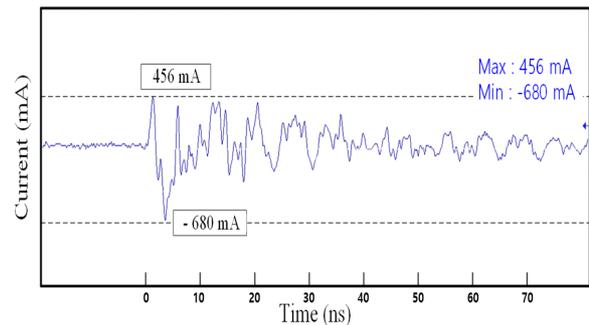


그림 9. HEMP 방호 필터 PCI 시험 set-up
Fig. 9. HEMP protection filter PCI test set-up.



(a) HF, VHF 대역 PCI 시험 결과
(a) HF, VHF band PCI test results



(b) UHF 대역 PCI 시험 결과
(b) UHF band PCI test results

그림 10. PCI 시험 결과
Fig. 10. PCI test results.

를 통해 영향성을 분석하고, 연구결과를 검증하였다. TLI는 실제 HEMP 과형(EI 펄스)을 모사하여 시험대상에 인가한 후 HEMP에 대한 방호성능을 평가하는 시험이다. 그림 11은 HEMP 실내 시험시설 형상을 보여준다.



그림 11. HEMP 실내 시험시설
Fig. 11. HEMP indoor testing facility.

먼저 기존 전술기동무선통신체계의 방호수준을 알아보기 위하여 HF, VHF, UHF 대역 대상별로 안테나 연결 전후의 장비 방호수준 평가에 대한 시험을 수행하였다. 본 시험에서는 시험 진행 간 정상 동작 여부를 판단하는 기준으로 전술기동무선통신체계 자체진단기능을 적용하였고, 세부적인 성능 저하 여부를 판단하기 위하여 시험 종료 후 송신출력 및 수신감도 확인을 통하여 정상 동작 여부를 확인하였다. 표 5는 필터가 미 장착된 전술기동무선통신체계의 HEMP 방호수준 시험결과를 나타낸다.

자체진단기능(built in test: BIT)은 초기 자체진단(power-on BIT: PBIT), 연속 자체진단(continuous BIT: CBIT), 운용자 자체진단(initiated-BIT: IBIT)으로 구성된다.

PBIT은 전원인가 시 자동으로 실행되며, 관리 운용화면에서 결과 확인만 가능하다. 자체진단항목은 HF 송수신처리, U/VHF 송수신처리, 전지 전원, 공통기능의 정상 여부 및 보안 모듈 장착 여부를 검사한다.

CBIT은 주기적으로 자동 실행되며, 관리 운용화면에서 결과 확인만 가능하다. 연속 자체진단 항목은 송수신처리, 증폭 기능 및 전지 전원, 공통 기능이다.

IBIT은 운용자 자체진단을 실시하고, 과정과 결과를 전시한다. 운용자 자체진단 수행 시 송수신기에 안테나 연결 상태를 확인하기 위한 메시지가 전시되며, 선택된 안테나 연결 상태에 맞게 점검을 수행한다. 운용자 자체진단은 HF 송수신처리, U/VHF 송수신처리 및 전지 전원, 공통 기능을 검사한다. 본 시험에서는 HEMP E1 Pulse 인가 후, 장비의 이상 유무를 IBIT을 통해 확인하였다.

HF, VHF, UHF 대역 전술기동무선통신체계에 안테나 연결 시 자체진단 시험결과가 결함으로 나타난 것을 확인할 수 있다. 이는 HEMP의 초기 펄스의 최대 수백 암페

표 5. 필터 장착 전 시험결과
Table 5. Test result without filter.

Operating band	Antenna		Built in test
	Unconnected	Connected	
HF band	O		Pass
		O	Fail
VHF band	O		Pass
		O	Fail
UHF band	O		Pass
		O	Fail

어의 유도전류가 전술기동무선통신체계의 안테나를 통해 유기됨으로써 회로 전압 이상의 고전압 유입으로 인한 회로 내부 손상으로 판단된다. 이를 통해 실제 HEMP 상황 시 전술기동무선통신체계가 정상 동작할 수 없음을 알 수 있다.

안테나를 통해 전술기동무선통신체계에 유입되는 유도전압을 감쇄시키기 위하여 대역별로 제안한 HEMP 방호 필터를 적용한 후 HEMP 재시험을 통하여 정상 동작 여부를 확인하였다. 그림 12는 각 주파수별 전술기동무선통신체계에 제안한 HEMP 방호 필터를 적용한 시험 구성을 나타낸다. 표 6은 전술기동무선통신체계에 제안한 HEMP 방호 필터를 적용한 시험결과를 나타낸다.

안테나를 장착한 전술기동무선통신체계가 TLI 시험 후 전 대역에서 정상 동작하는 것을 확인하였으며, 이를

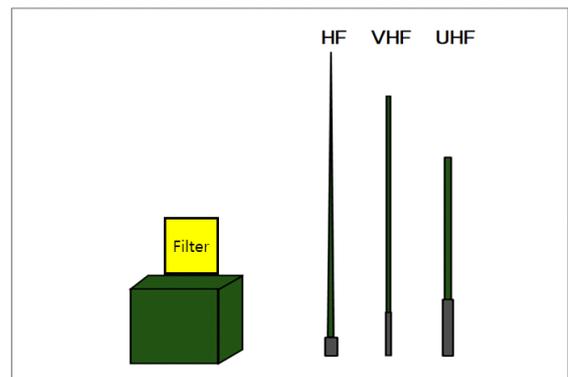


그림 12. HF, VHF, UHF 대역 무전기 시험 구성
Fig. 12. HF, VHF, UHF band radio test configuration.

표 6. 필터 장착 후 시험결과
Table 6. Test result with filter.

Operating band	Antenna		Built in test	Function/performance test
	Unconnected	Connected		
HF band	O		Pass	Pass
		O	Pass	
VHF band	O		Pass	Pass
		O	Pass	
UHF band	O		Pass	Pass
		O	Pass	

통해 HEMP 위협에 대응한 전술기동무선통신체계 방호 능력 방안을 확보하였다. 본 연구는 다양한 RF 포트용 HEMP 보호 필터 개발에 응용할 수 있으며, 통신 장비 보호기술 수립에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 HEMP 위협에 대응한 전술기동무선통신체계 방호용 안테나 HEMP 필터를 제안하였다. 제안된 필터는 HF, VHF, UHF 대역에서 0.5 dB 이하의 낮은 삽입 손실을 가지며, 군사규격인 MIL-STD-188-125 규격의 PCI 시험 1 A 이하를 만족하였다. 또한, 기존 전술기동무선통신체계에 제안한 필터를 적용한 후 TLI 시험을 통하여 정상동작 여부를 확인하였다. 본 논문에서 제안하는 안테나용 HEMP 방호 필터는 실제 HEMP 환경에서도 운용할 수 있도록 안테나 단으로 유입되는 유도전류를 수 암페어 미만으로 감쇄시켜 장비를 정상 동작할 수 있게 함으로써 군의 전술기동무선통신체계에 대한 HEMP 방호 방안을 확보할 수 있도록 하였다.

References

[1] R. Hoad, W. A. Radasky, "Progress in high-altitude electromagnetic pulse(HEMP) standardization," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 55, no. 3, pp. 532-538, Jan. 2013.

[2] *High-altitude Electromagnetic Pulse(HEMP) Protection for Ground-Based C4I Facilities Performing Critical, Time Urgent Missions, Part 1 - Fixed Facilities*, MIL-STD-188-125-1, 1998.

[3] *High-altitude Electromagnetic Pulse(HEMP) Protection*

for Ground-based C4I Facilities Performing Critical, Time Urgent Missions, Part 2 - Transportable Systems, MIL-STD-188-125-2, 1999.

[4] S. D. Yeo, "A study on the measurement method of test waveform for system-level HEMP immunity test," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 22, no. 2, pp. 233-240, 2019.

[5] J. H. Kwon, K. H. Song, and J. G. Yook, "HEMP effect analysis for equipment using comparison of norms between HEMP filter residual current and conducted susceptibility criteria," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 25, no. 2, pp. 199-207, Feb. 2014.

[6] J. S. G. Hong, M. J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/microwave Applications*, New York, NY, John Wiley & Sons, pp. 39-45, 2001.

[7] J. H. Son, K. J. Park, Y. W. Park, D. H. Lee, J. S. Kim, and K. S. Jeong, et al., "Band antenna EMP filter apparatus having HEMP protection capability," Korea Patent 10-2020-0188239, 2020.

[8] J. H. Sohn, Y. W. Park, D. H. Lee, J. S. Kim, and K. S. Jeong, "A study of induced current measurement and analysis on VHF antenna for tactical mobile communication system," in *2020 Conference on the Korea Institute of Military Science and Technology*, 2020, pp. 741-742.

[9] J. S. Kim, K. S. Jeong, "The study of the HEMP protection methods for operational frequency bands on Combat Net Radio System," in *2020 Conference on the Korea Institute of Military Science and Technology*, 2020, pp. 1344-1345.

박 경 제 [(주)아이스펙/선임매니저]

<https://orcid.org/0000-0001-5672-1892>



2016년: 신라대학교 전자공학과 (공학사)
2018년: 경북대학교 전자공학부 (공학석사)
2018년~현재: (주)아이스펙 선임매니저
[주 관심분야] EMI/EMC 대책 및 EMP 필터설계

박 용 우 [국방과학연구소/선임기술원]

<https://orcid.org/0000-0001-5726-8268>



2016년: 충남대학교 산업공학과 (공학석사)
2012년~현재: 국방과학연구소 선임기술원
[주 관심분야] EMI/EMC, HEMP

정 길 수 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-7824-6914>



1999년: 영남대학교 전자공학과 (공학사)
2007년: Toyohashi University of Technology 전자정보공학과 (공학박사)
2007년~2009년: ATR 파동공학연구소 선임연구원
2009년~2011년: 한국전자통신연구원 선임연구원

2011년~현재: 국방과학연구소 책임연구원
[주 관심분야] 무선통신 신호처리, EMP 방호기술

한 창 곤 [한양대학교/석사]

<https://orcid.org/0000-0003-4508-0510>



2019년: 대전대학교 전자정보통신공학과 (공학사)
2021년: 한양대학교 융합전자공학과 (공학석사)
[주 관심분야] RF, EMC/EMI, EMP 필터 등

김 정 섭 [국방과학연구소/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-2266-6626>



1986년: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1988년: 경북대학교 유선통신 (공학석사)
2000년: 경북대학교 정보통신 (공학박사)
1988년~현재: 국방과학연구소 수석연구원
[주 관심분야] 대전자전 통신, EMI/EMC 대책 및 필터설계

박 재 현 [(주)아이스펙/연구소장]

<https://orcid.org/0000-0003-2555-0458>



1991년: 전북대학교 전자공학과 (공학사)
1990년 12월~2003년 10월: 기아자동차 기술연구소
1999년~2012년 12월: CISPR/D 전문위원
1999년~현재: TC77C 전문위원
2003년 10월~현재: (주)아이스펙 연구소장
[주 관심분야] EMI/EMC 대책 및 EMP 필터설계