

## 대전류 대칭형 HEMP 필터의 소형화 설계

# Miniaturized Designing of a High Current Symmetric High Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Filter

조흥열 · 조성인 · 박재현 · 안병진

Heung Yeol Jo · Sung In Jo · Jae Hyun Park · Byeong Jin Ahn

### 요 약

본 연구에서는 세계에서 가장 작은 대칭형 대전류(1,250 A) HEMP(high-altitude electro magnetic pulse) 필터를 제작하고, 그 성능을 입증하였다. 필터는 와전류(eddy current)로 인한 근접효과(proximity effect)와 줄(Joule) 열 방지를 위해 모든 라인을 분리하고 케이스를 비자성체(nonmagnetic material)로 제작하였다. 특히 잔류자속이 적은 재료의 코어를 설계하여 필터를 소형화했다. 차폐 효과(shielding effectiveness) 시험의 경우, 400 MHz에서 18 GHz까지 100 dB가 감쇄되었으며, 삽입손실 측정 결과, 10 kHz부터 1 GHz까지 MIL-STD-188-125-1 차폐 성능 기준을 만족하였다. PCI 단 펄스 시험 결과 잔류전류 6.04 A, 최대 전류 도달시간  $6.00 \times 10^{-5}$  A/s, 루트 액션  $4.18 \times 10^{-2} A/\sqrt{s}$  로 기준을 충족하였고, 중 펄스 시험 역시 필터 성능에 이상이 없었다. 마지막으로 부하 시험은 1,250 A를 인가하여 포화될 때까지 버스 바의 평균 온도 상승 치가 45.5 K로 그 성능을 입증하였다.

### Abstract

In this study, the world's smallest symmetric high current (1,250 A) high-altitude electromagnetic pulse (HEMP) filter was fabricated and its performance was demonstrated. The filter was separated from all lines and made of a non-magnetic material to prevent the proximity effect and Joule heat caused by eddy current. The size of the filter was miniaturized by designing the core with a material with low residual magnetic flux. In the case of the shielding effectiveness (SE) test, 100 dB was attenuated from 400 MHz to 18 GHz and measurement of insertion loss, the MIL-STD-188-125-1 standard was met from 10 kHz to 1 GHz. The pulse current injection (PCI) short pulse test met MIL-STD-188-125-1 with a residual current of 6.04 A, maximum current arrival time of  $6.00 \times 10^{-5}$  A/s, and root action of  $4.18 \times 10^{-2} A/\sqrt{s}$ , and the intermediate pulse test also showed no damage or performance degradation in filter performance. Finally, in the load test, the average temperature rise of the bus bar was 45.5 K until it was saturated by applying 1,250 A, proving its performance.

Key words: High-Altitude Electro Magnetic Pulse, HEMP Filter, Low Pass Filter, Metal Oxide Varistor

### I. 서 론

상공 30 km 이상에서 폭발하는 핵 공격에 의해 발생하는 고고도 전자기펄스(high-altitude electro magnetic pulse,

「본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업(과제번호: 20SCIP-B146646-03)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.」

(주)아이스펙(I-SPEC)

· Manuscript received December 27, 2022 ; Revised February 2, 2023 ; Accepted July 24, 2023. (ID No. 20221227-109)

· Corresponding Author: Byeong Jin Ahn (e-mail: bjahn@i-spec.co.kr)

HEMP) 또는 비핵 EMP(non nuclear electro magnetic pulse, NNEMP) 공격으로 지상의 광범위한 부분에 피해를 준다<sup>[1],[2]</sup>. EMP 공격으로부터 시설을 보호하기 위해서 전자기적으로 차폐된 시설을 짓는다. 이 시설의 모든 외벽은 금속으로 이루어져 있으며, 환기 또는 전선의 접속을 위해 외부와 관통된 홀(point of entry, POE)은 허니콤(honey comb) 또는 HEMP 필터로 보호한다<sup>[3],[4]</sup>.

최근 콘크리트 방호 및 RF EMP 방호와 같이 다양한 분야의 연구가 활발히 진행 중이다<sup>[5],[6]</sup>. 본 논문에서는 세계에서 가장 작은 대전류(1,250 A) 대칭형 HEMP 필터의 소형화 설계를 완료하여 기존 시설보다 가볍고 비용이 저렴한 HEMP 방호시설 설계를 가능하게 하여, 그 시설에 대한 다양성을 제공할 것을 기대한다.

HEMP 필터는 MIL-STD-188-125-1, 2에 의거하여 시험을 진행하며, 위 규격에서 필터에 관한 시험은 크게 두 가지로 차폐 효과(shielding effectiveness, SE) 시험과 전류 주입(pulsed current injection, PCI)이다.

먼저 SE 시험은 지상으로 도달하는 EMP로부터 시설을 보호하는 능력을 확인하는 시험이다. 그림 1의 조건에 따라 주파수 1 kHz에서 1.5 GHz까지의 SE 측정값을 만족해야 하며 최대 80 dB의 SE 성능을 만족해야 한다.

다음으로 PCI 시험은 EMP로부터 지상에 포설되어 있는 전선으로 유기되는 pulse를 차단하는 능력을 확인하는 시험이다. 전원 필터는 단 펄스(short pulse) 시험과 중 펄스(intermediate pulse) 시험으로 나뉜다. 펄스 파형은 그림 2와 같이 이중 지수 형태의 파형이며, 표 1과 표 2는 파형

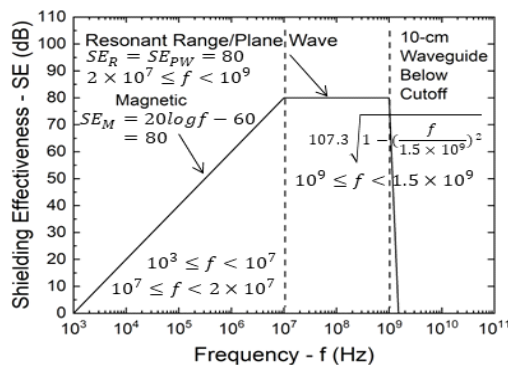


그림 1. HEMP SE 최소 요구 조건<sup>[7]</sup>  
Fig. 1. Minimum HEMP SE requirements<sup>[7]</sup>.

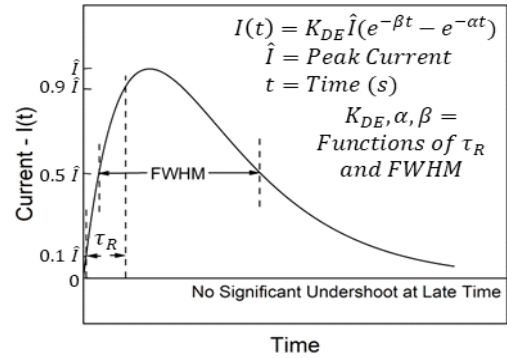


그림 2. 이중 지수 파형<sup>[7]</sup>  
Fig. 2. Double exponential waveform<sup>[7]</sup>.

표 1. 이중 지수 파형 조건<sup>[7]</sup>  
Table 1. Double exponential waveform requirements<sup>[7]</sup>.

Parameters	Short pulse	Intermediate pulse
Peak current [A]	2,500	250
Source impedance [ $\Omega$ ]	$\geq 60$	$\geq 60$
Risetime [s]	$\leq 2 \times 10^{-8}$	$\leq 0.15$
FWHM [s]	$5 \times 10^{-7} - 5.5 \times 10^{-7}$	3 ~ 5
Load impedance [ $\Omega$ ]	2 or $V_{rated}/I_{rated}$	50

표 2. PCI 시험 요구 조건<sup>[7]</sup>  
Table 2. PCI test requirements<sup>[7]</sup>.

Parameters	Short pulse	Intermediate pulse
Peak response current [A]	$\leq 10$	No damage or performance degradation
Peak rate of rise [A/s]	$\leq 1 \times 10^7$	
Root action [ $A\sqrt{s}$ ]	$\leq 1.6 \times 10^{-1}$	

의 요구 조건과 필요한 필터의 성능이다<sup>[7],[8]</sup>.

마지막으로 부하 시험은 사용자 조건으로 1,250 A의 전류를 흘렸을 상온에서 온도가 포화될 때까지 상승분이 65℃를 초과하지 않는지 확인하였다.

## II. 대전류 HEMP 필터 구조 설계

대전류 필터의 구조는 그림 3(a)처럼 하나의 합체로 되어있는 저용량 필터와 같이 설계한다면 무게가 많이 나가기 때문에 제작에 어려움이 따른다. 따라서 그림 3(b)와 같이 필터의 제작 및 수리의 편의성을 고려하여 입력, 출

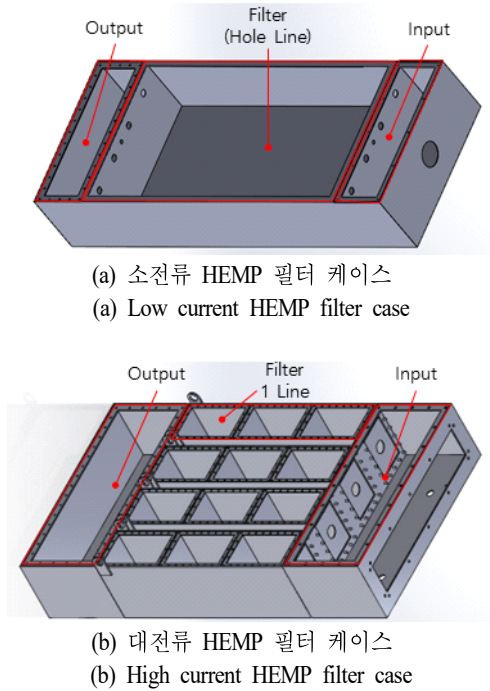


그림 3. HEMP 필터 케이스

Fig. 3. HEMP filter.

력, 필터라인을 모두 별개의 합체로 제작하였다. 필터의 모든 회로가 같은 대칭형 필터이기 때문에 그림과 같이 각각 제작이 가능하다. 입력, 출력 및 라인의 면이 닿는 부분은 스타드를 용접하고 매쉬 가스켓(mesh gasket)을 넣고 너트로 체결하여 차폐를 보강하였다.

필터 케이스 소재 선정하며 제작 시 와전류(eddy current) 현상을 고려하여 설계하였다. 와전류는 그림 4와 같이 필터의 인덕터( $L$ )에 의해 생기는 자기장( $B$ ) 때문에

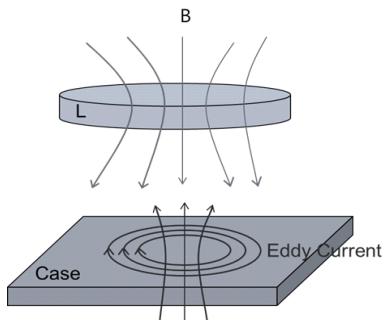


그림 4. 와전류 현상

Fig. 4. Phenomena of eddy current.

필터 케이스(case)에 발생한다. 큰 전류가 흐르기 때문에 케이스에 흐르는 와전류에 의해 그 손실이 줄(Joule) 열로 발생하여 합체의 온도가 올라갈 수 있고<sup>[9]</sup>, 와전류에 의해 발생하는 2차 자기장으로 합체가 자화될 수 있다<sup>[10]</sup>. 와전류는 케이스의 두께가 동일하다고 봤을 때 주파수 및 최대자속밀도의 제곱에 비례한다. 따라서 본 전원 필터는 투자율이 매우 낮은 오스테나이트(Austenite)계 SUS로 제작하였고, 사용 주파수 환경이 60 Hz로 매우 낮은 주파수 환경에서 사용되기 때문에 크게 문제가 되지 않는다. 만약 사용 주파수가 수십 kHz 이상 높아지게 되면 그에 따른 대책이 필요하게 될 것이다.

### Ⅲ. 대전류 HEMP 필터 회로 설계 및 제작

그림 5는 시뮬레이션 회로를 나타내었다. 전원 필터는 기본적으로 저역 통과 필터(low pass filter)로서  $L$ 과  $C$ 를 조합하여 6단 필터로 설계하였다. 필터의 인입구에는 서지 보호의 핵심 소자인 금속산화물 바리스터(metal oxide varistor, MOV)를 설치하였다. 표 3은 파라미터(parameter) 값을 나타내었다. MOV는 사용전압 385 Vac를 사용하였고, 라인 인덕터  $80 \mu\text{H}$ ( $L_1, L_2, L_3$ ), 캐패시터  $20 \mu\text{F}$ ( $C_1, C_2, C_3$ ), 부하 저항  $176 \text{ m}\Omega$ ( $R$ )을 각각 적용하여 회로를 완

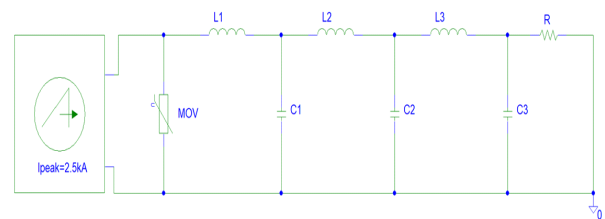


그림 5. 대전류 HEMP 필터 시뮬레이션 회로

Fig. 5. Simulation circuit of high current HEMP filter.

표 3. 대전류 HEMP 필터 파라미터

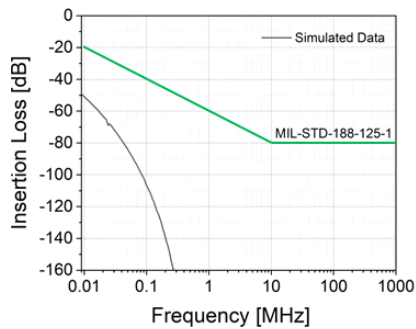
Table 3. Parameter of high current HEMP filter.

Parameters	Value	Remarks
MOV	385 V	Varistor
$L_1, L_2, L_3$	$80 \mu\text{H}$	Inductor
$C_1, C_2, C_3$	$20 \mu\text{F}$	Feed-through capacitor
$R$	$176 \text{ m}\Omega$	Load impedance

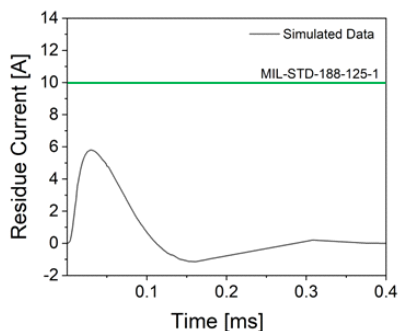
성하였다.

그림 6(a)는 삽입손실이며, 그림 6(b)는 PCI 시험의 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션을 통해 회로를 완성하였고 삽입손실의 감쇄량은 MIL-STD-188-125-1의 차폐 기준 이상의 감쇄 효과가 있었으며 PCI 시험 잔류 전류(residue current) 또한 기준치 이하로 나오는 것을 확인하였다.

설계치가 나온 기준은 바리스터는 전원용 필터이기 때문에 일반적으로 서지 보호에 사용되는 사용전압 수준(385 Vac)으로 선정하였다. 라인 인덕터( $L_1, L_2, L_3$ )와 관통형 커패시터(feed-through capacitor,  $C_1, C_2, C_3$ )는 PCI 시험 시 펄스 전류를 감쇄하는 중요한 역할을 한다. 인덕터는 투자율이 높은 재료를 사용하여 무작정 인덕턴스를 키우는 방법보다 포화자속밀도가 높고, 잔류자속이 적은 재료의 코어를 사용하여 코어가 포화되는 것을 최소화해야 필터 단을 줄여 소형화할 수 있다. 접지 커패시터는 차



(a) 삽입손실 시뮬레이션 결과  
(a) Result of insertion loss simulation



(b) PCI 시험 시뮬레이션 결과  
(b) Result of PCI test simulation

그림 6. 시뮬레이션 결과  
Fig. 6. Result of simulation.

폐가 가능한 관통형 커패시터로 관통된 원통에 필름을 감아 직접 제작하여 사용하였다. 이는 차폐와 펄스 전류의 감쇄 두 가지 역할을 한다. 부하 저항은 MIL-STD-188-125-1 규격에 따라  $2 \Omega$  또는  $V_{rated}/I_{rated}$  중 작은 값을 적용한다. 본 연구에서는 1,250 A 필터를 사용하고 라인-샤시에 걸리는 전압이 220 V로 176 mΩ을 사용하였다.

그림 7은 위에서 설계한 내용을 바탕으로 최종 제작된 필터의 사진이다. 설계와 같이 분리형 케이스를 이용하여 조립하였고, 시뮬레이션 된 회로를 이용하여 제작하였다. 잔류자속이 적은 코어를 사용하여 기존 제품 대비 효율적으로 필터를 제작하여 시장에 판매 중인 대칭형 필터 중에는 가장 작은 크기로 제작하였다. 표 4는 설계된 필

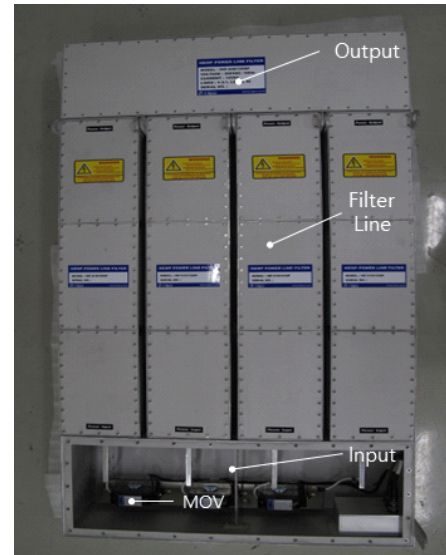


그림 7. 대전류 HEMP 필터  
Fig. 7. High current HEMP filter.

표 4. 대전류 HEMP 필터 사양 비교  
Table 4. Parameter of high current HEMP filter.

Country	Republic of Korea	United States of America	United Kingdom
Rated voltage [V]	480	480	440
Rated current [A]	1,250	1,200	1,200
Line	3 $\Phi$ 4 W	3 $\Phi$ 4 W	3 $\Phi$ 4 W
Size [mm] (W×H×D)	1,850×1,160×300	2,570×1,350×610	2,350×1,500×400



터의 사양 및 판매 중인 해외 제품군과 크기를 비교하였다. 가로 길이만 보아도 기존 제품보다 20 % 이상 작게 제작하였다.

#### IV. 대전류 HEMP 필터 시험

##### 4.1 차폐 효과 시험

SE 시험은 MIL-STD-188-125-1 규격에 따라 다음 식 (1) 및 식 (2)의 값을 만족해야 한다.

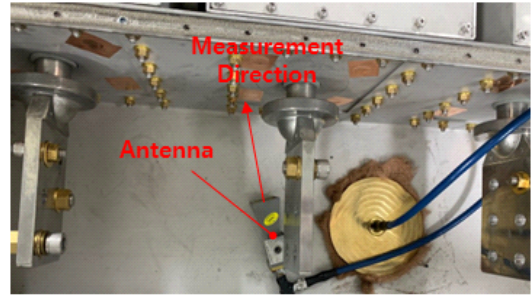
$$20\log f - 60 \text{ dB} \quad (10^4 \leq f < 10^7) \quad (1)$$

$$80 \text{ dB} \quad (10^7 \leq f < 10^9) \quad (2)$$

깨질 수 있는 연결 틈 또는 이음새 위주로 시험을 진행하여 성능을 확인하였다.

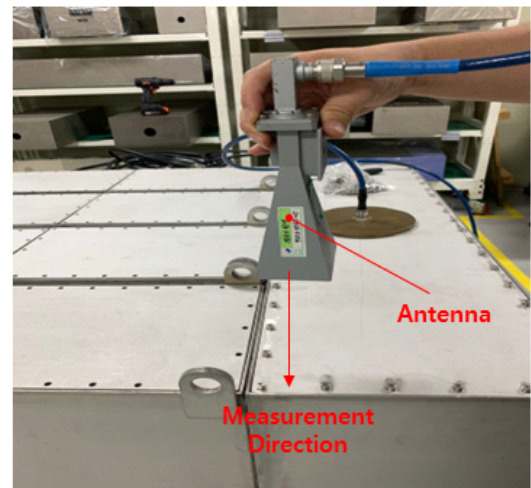
시험은 그림 8과 같이 신호 발생기(signal generator)를 안테나(antenna)와 연결하고 바깥쪽에 스펙트럼 애널라이저(spectrum analyzer)와 안테나를 연결하여 구성하였다. 안테나는 400 MHz에서 다이폴(dipole) 안테나를 1 GHz에서 18 GHz까지 혼(horn) 안테나를 사용했고, 측정 전 기준(reference)을 잡고 진행하였다.

측정 사진은 그림 9(a)처럼 내부에 안테나를 측정방향을 향해 위치시키고 그림 9(b)와 같이 외부에서 안테나 방향으로 측정하였다. 결과는 표 5에서 볼 수 있고 각 측



(a) 내부 안테나

(a) Inner antenna



(b) 외부 안테나

(b) Outer antenna

그림 9. 차폐 효과 시험 과정

Fig. 9. Sequence of SE test.

표 5. 차폐 효과 시험 결과

Table 5. Result of SE test.

Frequency [GHz]	Input signal [dBm]	AMP [dBm]	Measurement [dB]	Shielding effectiveness [dB]
0.4	+ 10	+ 10	-95.3	-115.3
1	+ 10	+ 10	-97.5	-117.5
10	+ 10	+ 10	-85.7	-105.7
18	+ 10	+ 10	-89.4	-109.4

정 주파수에서 차폐값은 400 MHz에서 -115 dB, 1 GHz에서 -117.5 dB, 10 GHz에서 -105.7 dB, 18 GHz에서 -109.4 dB로 모두 100 dB 이상의 성능으로 MIL-STD-188-125-1

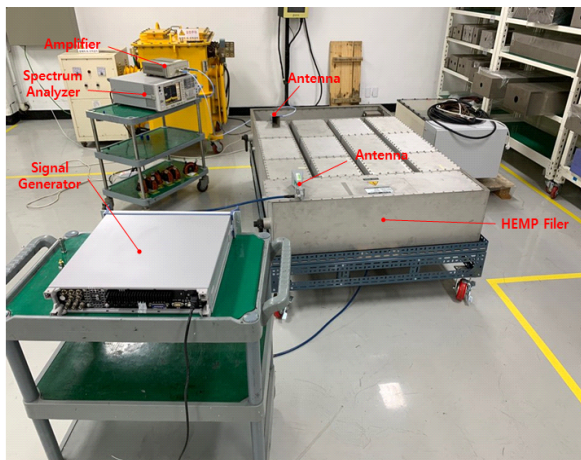


그림 8. 차폐 효과 시험 구성

Fig. 8. SE test set-up.

규격을 충족함을 확인했다.

#### 4.2 삽입손실 시험

다음은 삽입손실 측정을 진행하였다. 삽입손실은 필터의 감쇄량을 측정하는 방법이며, 입력 대비 출력 전압의 비를 측정한다. 시험 구성은 그림 10과같이 네트워크 애널리저의 포트 1(Port 1)과 포트 2(Port 2)를 각각 연결하여  $S_{21}$  모드로 측정하였다. 측정을 진행할 때 외부와의 완전한 차폐를 위해 모든 덮개를 덮어 필터 내부를 외부와 분리한다. 기준은 MIL-STD-188-125-1의 차폐 기준인  $20\log f - 60$  dB( $10^4 \leq f < 10^7$ ,  $f$ =frequency)와 80 dB( $10^7 \leq f < 10^9$ ) 이상의 감쇄가 나오는지 측정하였다.

측정 결과는 그림 11과 같이 시뮬레이션 결과와 거의

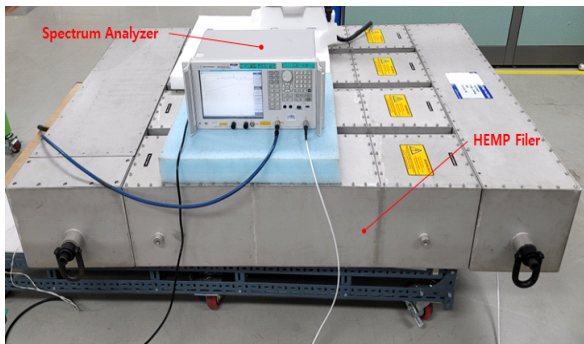


그림 10. 삽입손실 시험 구성  
Fig. 10. Insertion loss test set-up.

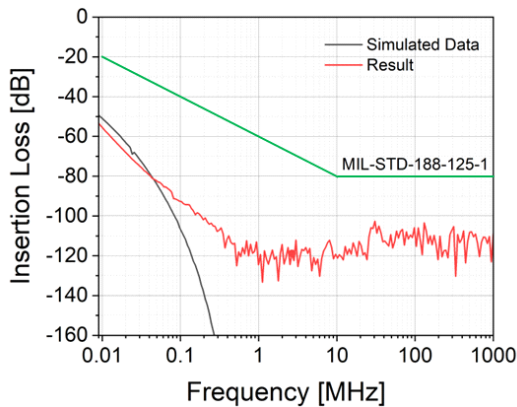


그림 11. 삽입손실 시험 결과  
Fig. 11. Result of insertion loss test.

유사하게 나오다가 수십 kHz 이후부터 시뮬레이션 데이터와 결과가 역전된다. 그 원인으로는 시뮬레이션상에서 커패시터의 주파수 특성이 매우 이상적이고, 계측기의 특성상 그 이하의 성능을 측정할 수 없으므로 그림과 같은 결과가 나왔다. 결과는 초록색 선으로 나타낸 MIL-STD-188-125-1의 규격보다 약 20 dB 이상 향상된 성능을 보인다.

#### 4.3 PCI 시험

SE 시험과 마찬가지로 PCI 시험도 MIL-STD-188-125-1 규격으로 진행하였다. 시험 구성은 그림 12와 같이 구성하였고 단 펄스와 중 펄스에 주입하여 필터의 성능을 검증하였다.

단 펄스의 경우, 시험 조건이 2.5 kA의 전류를 인가했을 때 잔류 전류 10 A 이하, 최대전류 도달시간  $1 \times 10^7$  A/s 이하, 루트 액션  $1.6 \times 10^{-1}$  A $\sqrt{s}$  이하의 조건을 만족하여야 하고, 중 펄스의 경우 250 A의 전류를 인가했을 때 제품이 정상 동작 범위에 있어야 한다. 중 펄스는 정상 동작의 확인 여부는 MOV 등의 서지 보호 소자의 전압 레벨을 통해 확인할 수 있다. 본 필터는 1 mA에서 전압

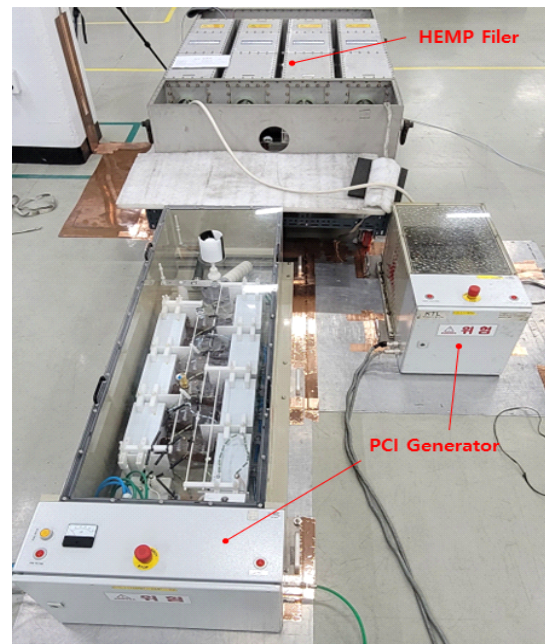


그림 12. PCI 시험 구성  
Fig. 12. PCI test set-up.

표 6. PCI 시험 결과

Table 6. Result of PCI test.

Parameters	Short pulse	Intermediate pulse
Peak response current [A]	6.04 A	No damage or performance degradation 617 V (558~682 V)
Peak rate of rise [A/s]	$6.00 \times 10^5$	
Root action [ $A\sqrt{s}$ ]	$4.18 \times 10^{-2}$	

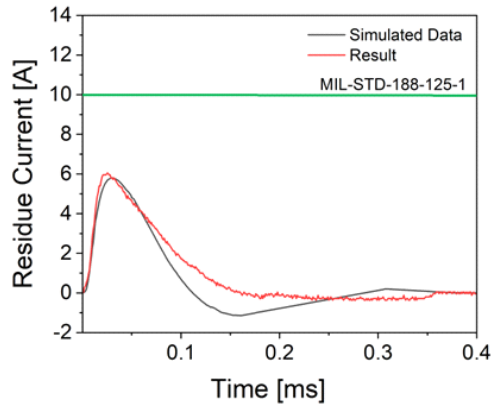


그림 13. 단 펄스 시험 결과

Fig. 13. Result of short pulse test.

레벨이 620 V인 MOV를 사용하므로 정상 동작 범위는  $\pm 10\%$ 인 558~682 V 사이에 들어와야 한다.

시험 결과는 표 6에서 확인할 수 있다. 단 펄스 시험 결과 잔류 전류 6.04 A, 최대전류 도달시간  $6.00 \times 10^5 A\sqrt{s}$ , 루트 액션  $4.18 \times 10^{-2} A\sqrt{s}$ 로 모든 조건을 만족하였고, 중 펄스 시험 결과 617 V로 성능 이상 없음을 확인하였다.

그림 13의 단 펄스 시험 결과 그래프를 살펴보면 파형의 형태는 거의 유사하지만 약간의 차이를 보인다. 실제 시험 결과가 시뮬레이션상의 결과보다 초기 전류의 상승이 가파르고 최대전류 이후 하락 시 더 늦게 하락한다. 그 이유는 실제 조건에서는 전류가 주입되는 순간 코어가 어느 정도 포화되어 상승이 가팔라지고, 하락 시 MOV 또는 커패시터의 접지 상태 또는 경로에 따라 임피던스가 변하기 때문에 더 늦게 하락하게 된다.

#### 4.4 부하시험

마지막으로 필터의 안전성을 검증하기 위해 부하시험을 진행하였다. 측정 위치는 각 상의 버스 바 및 외함이다.

고, 부하는 1,250 A(60 Hz)를 인가하였으며 온도가 포화가 되는 시점까지 온도 상승분을 측정하였다. 그림 14 부하시험 구성 사진이고 결과는 표 7에 나타내었다.

먼저 버스 바 측정 결과, 초기 온도는  $25.3^\circ\text{C}$ 이고, 부하를 인가했을 때 먼저 버스 바의 포화 온도는  $69.8^\circ\text{C}(L_1)$ ,  $69.4^\circ\text{C}(L_2)$ ,  $73.2^\circ\text{C}(L_3)$ 이고, 온도 상승치는  $44.5\text{ K}(L_1)$ ,  $44.1\text{ K}(L_2)$ ,  $47.9\text{ K}(L_3)$ 으로 나왔다. 그리고 외함 측정 결과,  $44.8^\circ\text{C}(L_1)$ ,  $45.5^\circ\text{C}(L_2)$ ,  $43.7^\circ\text{C}(L_3)$ 이고, 온도 상승치는  $19.5\text{ K}(L_1)$ ,  $20.2\text{ K}(L_2)$ ,  $18.4\text{ K}(L_3)$ 으로 나왔다.

실제로 부하가 흐르는 도체(버스 바)가 함체에 비해 2

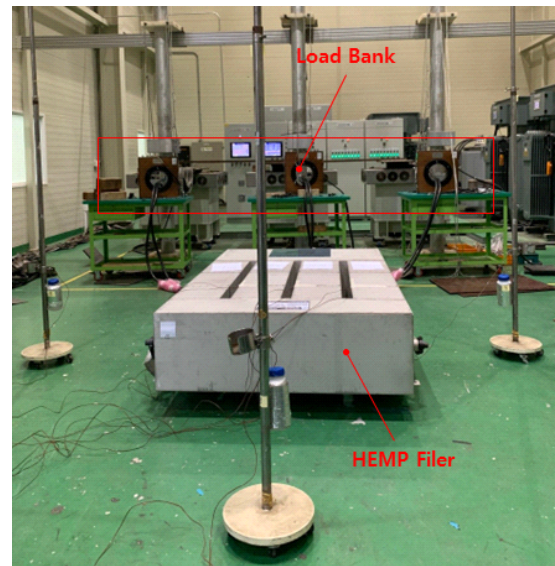


그림 14. 부하시험 구성

Fig. 14. Load test set-up.

표 7. 부하시험 결과

Table 7. Result of load test.

Measuring location	Initial temperature [ $^\circ\text{C}$ ]	Saturation temperature [ $^\circ\text{C}$ ]	Temperature rise [K]
Bus bar ( $L_1$ )	25.3	69.8	44.5
Bus bar ( $L_2$ )		69.4	44.1
Bus bar ( $L_3$ )		73.2	47.9
Case ( $L_1$ )		44.8	19.5
Case ( $L_2$ )		45.5	20.2
Case ( $L_3$ )		43.7	18.4



배 이상 온도가 상승하는 것을 보였으며, 버스 바와 함체 모두 온도 상승치가 65 K 이내로 1,250 A 부하를 걸어도 사용상에 문제가 없음을 확인했다.

## V. 결 론

지금까지 대전류 대칭형 HEMP 필터를 소형화로 제작하기 위해 필터 설계, 회로 시뮬레이션 및 필터 제작 후 성능시험을 진행했다.

와전류(eddy current)에 의한 열 손실과 자화를 예방하기 위해 필터는 모든 라인을 별개의 케이스로 제작했으며, 재질은 차폐를 위해 전도성이 있는 비자성(nonmagnetic) 재질인 SUS를 사용했다. 특히 인덕터 선정 시 잔류 자속이 적은 재질을 채택함으로써 효율적으로 PCI 성능을 구축하여 필터의 소형화에 성공하였다.

필터 성능 확인을 위한 시험은 MIL-STD-188-125-1을 기준으로 한 차폐 효과 시험, PCI 시험 그리고 1,250 A를 인가하는 부하시험을 진행하였다.

차폐 효과 시험은 각 측정 주파수에서 값은 400 MHz에서 -115 dB, 1 GHz에서 -117.5 dB, 10 GHz에서 -105.7 dB, 18 GHz에서 -109.4 dB로 모두 100 dB 이상을 보여 기준을 만족하였다. 삽입손실 시험 결과는 MIL-STD-188-125 차폐 기준인  $20\log f - 60$  dB( $10^4 \leq f < 10^7$ ,  $f$ =frequency)와 80 dB( $10^7 \leq f < 10^9$ ) 이상 나온 것을 확인했다. PCI 단 펄스 시험은 주입전류 최대 2.5 kA에서 잔류 전류 6.04 A, 최대전류 도달시간  $6.00 \times 10^5$  A $\sqrt{s}$ , 루트액션  $4.18 \times 10^{-2}$  A $\sqrt{s}$ 으로 기준을 충족했고, 중 펄스 시험은 주입전류 250 A를 인가하였을 때 MOV 전압 변화율이 기준값 대비 10 % 이내로 필터 성능에 이상이 없는 것을 확인하였다.

부하시험 결과, 최대 부하(1,250 A)를 걸었을 때 초기 온도에서 온도가 포화 될 때까지 측정하였으며, 버스 바는 평균 포화 온도는 70.8℃(온도 상승치: 45.5 K)이며, 평균 포화 온도는 44.7℃(온도 상승치: 19.4 K)로 온도 상승치가 65 K 이내로 정격 부하 사용상 문제가 없음을 확인하였다.

계속해서 고도화되는 기술에 따라 규격이 개정되고 있다. 본 논문의 MIL-STD-188-125-1 규격도 추후 개정 본에 따라 필터의 고도화 개발이 필요하다.

## References

- [1] X. Y. Zhao, W. Z. Ji, W. Q. Shu, Z. Hui, and S. B. Yun, "High altitude nuclear electromagnetic pulse waveform standards: A review," *High Power Laser and Particle Beams*, vol. 15, no. 8, pp. 781-787, Aug. 2003.
- [2] Y. C. Chung, "A study on the introduction of legal EMP protection system," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 24, no. 8, pp. 781-790, Aug. 2013.
- [3] A. Auddy, S. Sahu, "Tempest: Magnitude of threat and mitigation techniques," in *2008 10th International Conference on Electromagnetic Interference & Compatibility*, Bangalore, Nov. 2008, pp. 603-611.
- [4] T. H. Jang, "A study on the design and construction of EMP shield room," *The Proceeding of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 25, no. 3, pp. 48-57, May 2014.
- [5] S. Jo, K. Cho, Y. H. Noh, N. Lee, S. Kim, and J. G. Yook, "Electromagnetic shielding effectiveness of the concrete composite as a function of structural parameters of steel fibers," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 6, pp. 517-526, Jun. 2021.
- [6] K. J. Park, K. So. Jeong, J. S. Kim, Y. W. Park, C. Han, and J. H. Park, "Design of an antenna high altitude electromagnetic pulse(HEMP) protection filter for tactical mobile wireless communication system," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 5, pp. 446-454, May 2021.
- [7] *High-Altitude Electromagnetic Pulse(HEMP) Protection for Ground-Based C<sup>I</sup> Facilities Performing Critical, Time-Urgent Missions, Part 1-Fixed Facilities*, MIL-STD-188-125-1, Jul. 1998.
- [8] *High-Altitude Electromagnetic Pulse(HEMP) Protection for Ground-Based C<sup>I</sup> Facilities Performing Critical, Time-Urgent Missions, Part 2-Transportable Systems*, MIL-STD-188-125-2, Mar. 1999.
- [9] P. Karunakaran, M. S. Osman, V. Karuppanna, S. C.



Cheng, M. D. Lee, and M. D. Fadhilah, "Eddy current versus Joule heating effects for a cable suspended in an iron pipe," in *2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology(INOCON)*, Bangluru, Nov. 2020,

pp. 1-6.

[10] R. I. Rabinovici, B. Z. Kaplan, "Effective magnetization and forces due to eddy currents," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 28, no. 3, pp. 1863-1869, May 1992.

조 홍 열 [(주)아이스펙/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-2688-0280>



2015년 2월: 울산대학교 물리학과 (이학사)  
2017년 2월: 울산대학교 물리학과 (이학석사)  
2019년 1월~현재: (주)아이스펙 선임연구원  
[주 관심분야] EMP 필터 설계

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 필터 설계

조 성 인 [(주)아이스펙/주임연구원]

<https://orcid.org/0009-0008-5504-5229>



2022년 2월: 한국폴리텍대학 메카트로닉스공학과 (공학사)  
2022년 3월~현재: 경상국립대학교 기계시스템공학과 석사과정  
2015년 9월~현재: (주)아이스펙 주임연구원  
[주 관심분야] EMP 필터 설계

안 병 진 [(주)아이스펙/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8877-7636>



2011년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)  
2023년 2월: 영남대학교 전기공학과 (공학석사)  
2015년 8월~현재: (주)아이스펙 선임연구원  
[주 관심분야] EMP 필터/방호대책 설계, EMC/EMI Consulting