

방호시설에 설치된 HEMP 필터의 전도성 PCI 검증시험을 위한 디커플러 설계 및 제작

Design and Fabrication of a Decoupler to Conduct PCI Verification Test of a HEMP Filter Installed in a Protection Facility

김 영 진 · 박 용 배*

Young-Jin Kim · Yong Bae Park*

요 약

방호시설에 고 고도 전자기 펄스(HEMP: high-altitude electromagnetic pulse)용 필터를 설치하면, PCI(pulsed current injection) 인수(acceptance)시험을 하고, 인수 기준을 충족하더라도 검증(verification)시험을 하게 된다. 검증시험은 HEMP 필터에 전원이 연결되어 운용 중인 상태에서 수행되므로, PCI 제너레이터의 주입전류에 의해 외부의 전원부가 손상될 수 있는 문제점이 있다. 기존 디커플러(decoupler)는 용량 및 용도가 한정되어 있기 때문에 현장 상황에 맞는 디커플러를 설계해서 적용할 수 있는 방안이 필요하다. 본 논문에서는 PCI 검증시험을 위해 필요한 디커플러를 시뮬레이션을 통해 설계하고 제작했다. 또한, 실제 방호시설과 유사한 테스트 베드(test-bed)를 이용해 제작된 디커플러를 통해 전원부의 보호회로로 적용 가능함을 실험을 통해 검증하였다.

Abstract

When a high-altitude electromagnetic pulse(HEMP) power line filter is installed in a protection facility, the pulsed current injection (PCI) acceptance test is performed. A verification test is required even if the acceptance criteria are met. The injection current of the PCI generator may damage the external power source because a verification test is performed while the HEMP filter is connected to the power supply. Current decouplers have limited capacity and use; thus, they should be designed according to the actual environment. In this study, a decoupler is designed and fabricated for the PCI verification test. It is confirmed that the fabricated decoupler can be used as a protection circuit of the power supply by using a test-bed similar to that in the actual protection facility.

Key words: High-Altitude Electromagnetic Pulse(HEMP), Decoupler, PCI(Pulsed Current Injection) Verification Test

I. 서 론

30 km 이상의 높은 고도에서 핵폭발에 의해 발생하는 고 고도 전자파펄스(HEMP)는 전자 및 시스템의 성능 저

하, 오동작뿐만 아니라, 심지어 하드웨어 고장 등의 심각한 장애를 유발할 수 있다^[1]. 미국방성 규격 MIL-STD-188-125-1^[2] 규격에 따르면 HEMP 전도성 신호에 대한 시설 또는 시스템의 방호성능은 PCI 시험을 통해 정량적인

한국화학융합시험연구원 국방산업팀 (KTR: Korea Testing Research Institute)

*아주대학교 NCW공학과(Department of NCW(Network Centric Warfare), Ajou University)

· Manuscript received March, 4, 2020 ; Revised April, 13, 2020 ; Accepted May, 26, 2020. (ID No. 20200304-021)

· Corresponding Author: Yong Bae Park (e-mail: yong@ajou.ac.kr)

평가가 가능하며, HEMP 필터에 대한 인수시험과 시설 및 장비 운용 상태에서 평가를 수행하는 검증시험으로 구분된다. PCI 인수시험은 HEMP 필터를 규정된 조건에 따라 설치하고, 필터의 출력단에 부하저항(2 Ω 또는 50 Ω)을 연결한 후, PCI 제너레이터를 통해 규정에서 제시하는 형태의 전류파형을 인가한다^{[3][4]}. 필터 출력단에 연결된 부하를 통해 흐르는 잔류 전류(residual current)의 3가지 특성인자(peak current / rise time / root action)를 측정하여 HEMP 필터를 평가하는 시험이다^{[5][6]}. 그리고 PCI 검증 시험은 HEMP 필터를 대상 방호시설에 설치한 후 실제 부하 장비를 연결하여 운용(operating) 중인 상태에서 PCI 제너레이터의 펄스 전류를 커플러 및 디커플러를 이용하여, HEMP 필터에 인가한 후 HEMP 필터 출력단의 잔류 전류가 부하 장비에 미치는 영향에 따라 부하장비 이상 유무를 판단하여 평가하는 시험이다^{[7][8]}. PCI 검증 시험은 HEMP 필터와 함께 실제 부하 장비가 설치/연결되어 운용 중인 상태에서 수행되어야 하므로, HEMP 필터의 잔류전류에 의해 시험 중 방호시설 내·외부의 운용장비가 손상을 입을 수도 있다^[2]. 잔류전류에 의해 손상을 입은 내부 장비는 원인 검토 후에 장비를 교체하고 재시험을 진행하면 되지만, 디커플러가 제 역할을 못하게 된다면, 방호시설의 전원공급이 손상되는 상황이 발생해 누전 차단과 스파크 또는 시설의 정전 상태가 일어날 수 있다. 상용 디커플러는 용량이 전원선의 경우, 최대 60 A까지만 있고, 신호선(통신선, 데이터선, 제어선 등)의 경우에는 용도에 따라 제한적이기 때문에 현장 상황에 맞는 디커플러를 설계해서 적용할 수 있는 방안이 필요하다.

본 논문에서는 전원용량의 한계와 신호의 특성으로 현장에서 검증시험 수행이 제한을 받는 경우, 이에 대한 방안으로써 검증시험에 필요한 디커플러를 시뮬레이션으로 설계하고, 실제로 제작했다. 제작된 디커플러를 이용하여 수행한 실험 및 분석결과를 제시하였다. 또한, 방호 시설과 유사한 테스트 베드 환경을 구축하여 제작된 디커플러를 통과한 잔류전류가 전원공급에 영향을 미치는지 확인하였고, 전원선 보호회로로 적용 가능함을 확인하였다. 시험은 MIL-STD-188-125-1 표준서^[2]의 PCI 검증시험 항목을 적용하였다.

II. 디커플러의 설계 및 제작

2-1 PCI 제너레이터 설계

디커플러의 성능 및 검증시험을 하기 위해서 PCI 제너레이터가 필요하고, 발생하는 HEMP E1 펄스의 파형은 이중 지수 함수로서 식 (1)과 같이 표현된다.

$$I(t) = K_{DE}I(e^{-\beta t} - e^{-\alpha t}) \quad (1)$$

여기서 I 는 첨두값 전류(A)이고, t 는 시간 (s), K_{DE} 는상수이고, α 와 β 는 상승 시간 τ_r 과 펄스폭(FWHM: full width half maximum)의 함수이다^{[2][3]}. 모델링을 위해 I , α 와 β 의 시정수 값을 계산했고, 시정수 값은 1.052가 계산되었다. 시정수 값을 사용하여 RLC 등가회로를 구성하였고, I 에 대한 시정수 값을 충·방전 역할을 하는 커패시터 C에 적용했다. L은 케이블을 모델링한 수동소자이며, 10 nH이다. R은 소스 임피던스 역할을 하며, 규격에서 제시한 60 Ω을 적용했다.

모델링한 PCI 제너레이터의 등가회로는 그림 1이며, 출력결과는 그림 2와 같다. 실제 PCI 제너레이터 장비의 고정출력을 측정 후 시뮬레이션 결과와 비교를 했고, 표 1과 같이 제한치 기준에 모두 만족함을 확인했다.

2-2 디커플러 설계

HEMP 필터에서 MOV(metal oxide varistor)가 없으면 EMI(electro magnetic interference)필터처럼 동작을 하고, 인덕터와 캐패시터의 역할로 인해 전자파 노이즈(noise)를 제거하는 역할을 한다. HEMP 필터에서 MOV의 역할

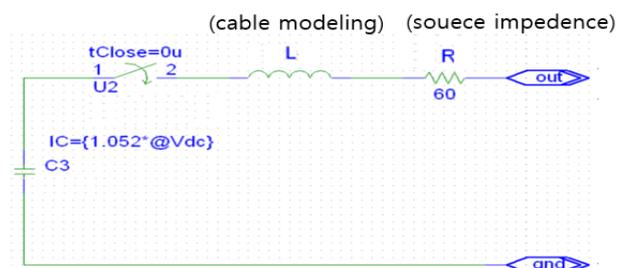


그림 1. PCI 제너레이터의 등가회로 (시뮬레이션)
Fig. 1. Equivalent circuit of PCI generator (simulation).

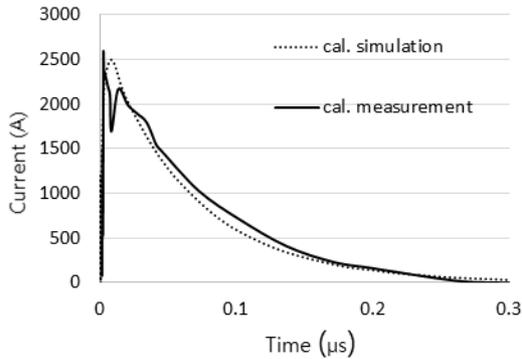


그림 2. PCI 제너레이터의 교정 펄스
Fig. 2. Calibration pulse of PCI generator.

표 1. PCI 제너레이터의 주입전류 (교정값)
Table 1. Injection current of PCI generator (calibration).

Calibration pulse			
Contents	Peak current(A) >2,500	Rise time ≤20 ns	FWHM (pulse width) 500~550 ns
Cal-simulation	2,500	16.33	532.00
Cal-measurement	2,550	10.20	522.84

은 중요하고, MOV는 특정 전압 이상에서 저항이 변하는 전자부품으로 재료에 따라서 특성은 상이하지만, 보호하고자 하는 부품이나 회로에 병렬로 연결하여 과도전압이 증가하면 낮은 저항회로를 형성하여 과도전압이 더 이상 상승하는 것을 막아주며^[9], MOV의 특성을 고려하여 디커플러 설계시 적용할 예정이다. 또한, MOV는 낙뢰와 의도치 않은 과도전압에 대한 전원시스템의 보호를 위해 널리 사용되기도 한다^[10]. MOV 리드타입 응답속도는 25 ns이며, 리드선이 없는 경우에는 0.5 ns의 응답속도를 가지며, HEMP 펄스의 경우 20 ns 이하의 상승시간 특성을 가지기 때문에 MOV 소자를 디커플러에 적용하기로 했다. 기존 국내·외 상용 디커플러는 그림 3과 같은 형태이며, 2라인은 60 A, 4라인은 10 A로, 공통 인덕터와 MOV를 연결한 구조이다. 상용 디커플러는 연구목적으로 활용하기는 우수하지만, 공통 인덕터 사용으로 전원용량에 한계가 있고, 높은 전류(50~100 A)를 사용할 경우, 과

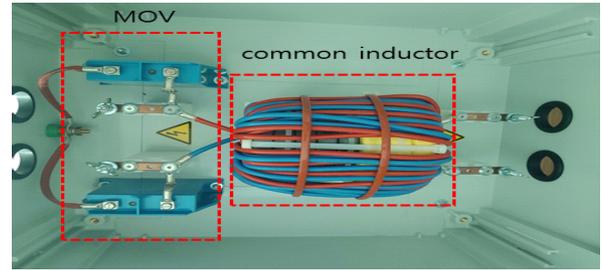


그림 3. 상용 디커플러 (단상, 60 A)
Fig. 3. Commercial decoupler (2 line, 60 A).

포화가 일어나면 인덕터에 열이 발생하여 안전 사고가 발생할 수도 있다. 방호시설에는 전원 용량이 크기 때문에 공통 인덕터 대신 높은 전류를 포화할 수 있게 노멀 인덕터를 사용했다. 또한, 장비와 연계된 전원 신호에 고주파 성분도 있는 경우가 있기 때문에 고주파 노이즈 제거를 위해 캐패시터를 추가하여 설계했다. 캐패시터의 특성상 저주파는 차단하고, 고주파는 통과시켜주는 역할을 하여 고주파 노이즈를 접지로 보내 고주파 노이즈를 제거할 수 있다. 완성된 디커플러는 그림 4와 같다. 실제 디커플러에 적용할 MOV는 EPCOS B60K385 모델로 V_{1mA} 는 558 V에서 682 V범위에 있으며, 최대 사용전압은 V_{1mA} 가 가장 낮은 값을 기준으로 설정한다. 558 V를 기준으로 하였을 경우, AC에 사용할 경우에는 $\sqrt{2}$ 를 나누어 394.6 V이고, 이 값이 AC 최대 사용전압이다. 실제 제작에 앞서 시뮬레이션을 통해 성능을 확인할 계획이다. 앞서 모델링된 PCI 제너레이터와 디커플러에 MOV를 병렬로 연결한 회로는 그림 5와 같고, 세부 소자값을 표 2에 나타내었다. 시뮬레이션 결과, 디커플러의 잔류전류는 7.23 A로 제한치 기준의 10 A 이하를 만족했고, 파형은

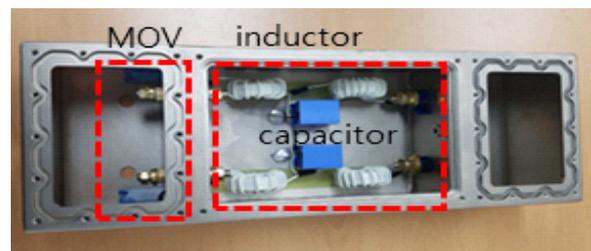


그림 4. 제작된 디커플러 (단상, 60 A)
Fig. 4. Fabricated decoupler (2 line, 60 A).

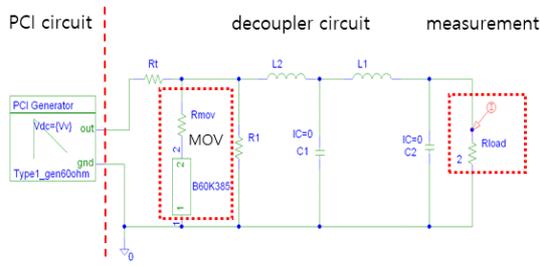


그림 5. 디커플러와 PCI 제너레이터 연결 회로
Fig. 5. Circuit of decoupler connected PCI generator.

표 2. 제작된 디커플러의 설계값
Table 2. Design value of fabricated decoupler.

Element	Design value
MOV	V_{ImA} , 558 V~682 V
R_t	Due to the characteristic of the simulation program, the resistance value applied to allow the current to flow
R_1	1 k ohm, discharge resistance
L_1, L_2	3 mH, inductor, cut-off of high frequency
C_1, C_2	10 uF, capacitor, cut-off of low frequency

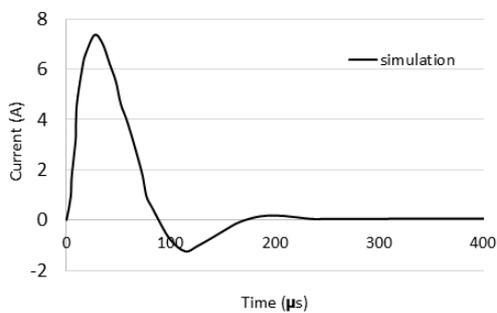


그림 6. 잔류전류 펄스 (시뮬레이션 결과)
Fig. 6. Residual current pulse (simulation result).

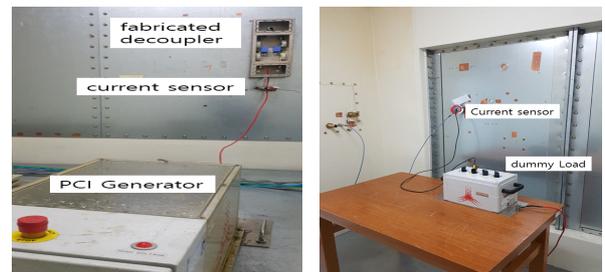
그림 6과 같다.

III. PCI 검증시험 실험 및 결과

3-1 디커플러의 성능시험

PCI 제너레이터를 사용하여 실제 제작된 디커플러 입력부에 2,500 A 침두치 전류를 갖는 HEMP E1 펄스를 주

입한 후 출력부로 나오는 잔류전류를 측정했다. 실제 측정은 그림 7과 같고, 측정결과를 표 3 및 그림 8과 같다. 주입전류 고정값과 인수시험 때의 주입전류 측정결과를 비교해 보면, 침두치 전류의 크기는 일치함을 확인했지만, 파형의 형태에는 차이가 있다. HEMP E1 펄스를 모의하는 PCI 제너레이터의 주입전류는 2,500 A, 상승시간 20 ns 이하, 펄스폭 500~550 ns 이하의 펄스형태로, 케이블의 길이 변화와 케이블과 접지평면 거리에 따라 파형의 차이가 발생하게 되고^[3], 인수시험을 측정할 때, 케이블 길이가 길어지고 접지평면으로부터 멀어지기 때문에, 침두치 펄스영역에서 형태 차이가 발생한다. 잔류전류의 경

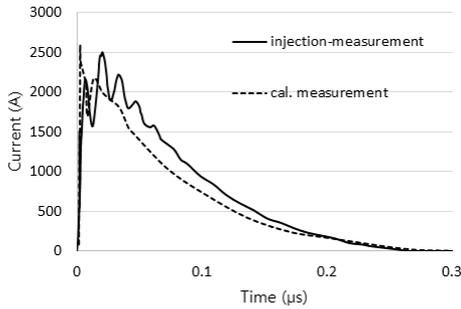


(a) 주입전류 (a) Injection current
(b) 잔류전류 (b) Residual current

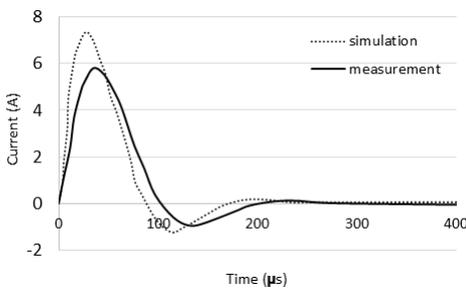
그림 7. 디커플러의 PCI 인수시험 구성도
Fig. 7. PCI acceptance configuration of decoupler.

표 3. 디커플러의 PCI 인수시험 결과
Table 3. PCI acceptance test result of decoupler.

Injection pulse			
Contents	Peak current(A)	Rise time ≤ 20 ns	FWHM (pulse width) 500~550 ns
Simulated result	2,500	16.33	532.00
Measured result	2,550	19.67	512.94
Residual current			
Contents	Peak current (A) (<10 A)	Peak rate of rise (A/s) <math><1 \times 10^7</math>	Root action (A√s) <math><1.6 \times 10^{-1}</math>
Simulated result	7.23	16.87×10^3	11.88×10^{-3}
Measured result	5.62	21.87×10^3	6.88×10^{-3}



(a) 주입전류 파형
(a) Injection current pulse



(b) 잔류전류 파형
(b) Residual current pulse

그림 8. 디커플러의 PCI 인수시험 결과
Fig. 8. PCI acceptance test result of decoupler.

우 5.62 A가 측정되었으며, 시뮬레이션보다 1.61 A 작게 측정이 되었고, 제한 기준치 10 A 이하를 만족했다. 개발된 디커플러가 제한 기준치를 만족했기 때문에 검증시험에서 디커플러를 통과한 잔류전류가 전원공급장비에 미치는 영향은 없을 것으로 판단할 수 있다^[8].

3-2 디커플러를 이용한 검증시험 결과

인수시험 조건을 만족한 유럽 M사의 HEMP 전원용 필터를 차폐벽에 설치해서 HEMP 방호시설 내·외부와 유사한 테스트 베드 환경을 구축했고, 그림 9와 같다. 실험은 제작된 디커플러를 설치한 상태에서 진행했다. PCI 검증시험의 경우, 전원용 HEMP 필터를 PoE(point of entry)를 이용해 차폐벽면에 설치 후, 이를 통해 내부 장비에 전원을 인가하여 동작시킨다. 이때, PCI 제너레이터는 HEMP 필터의 입력선에 인덕티브 커플러(inductive coupler)를 통해 연결했다. 전류주입을 위한 커플러 사용은 고주파의



그림 9. 검증시험을 위한 테스트 베드
Fig. 9. Test-bed for verification test.

HEMP 펄스전류를 주입하는 동시에 저주파인 상용전원을 이용하는 장비에 영향을 주지 않기 위해 필요하다. 또한, PCI 제너레이터의 펄스가 전원공급단 소스(source)로 흘러 전원공급 장비에 피해를 주지 않도록 하기 위해 제작된 디커플러를 연결했다. 주입 및 잔류전류를 측정하기 위한 전류센서는 필터의 입력선 및 출력선에 설치를 하고, 접지선과 함께 측정을 하면 측정이 불가하기 때문에 L상과 N상을 분리해서 별도로 측정을 한다. 데스크탑과 모니터의 HEMP 검증시험은 커플러를 통해 5,000 A 펄스 주입 후 데스크탑의 본체와 모니터를 관찰한 결과, 인터넷과 동영상의 끊김 현상 없이, 정상 동작하였다. 유럽 M사의 전원용 HEMP 필터의 인수시험에서 4.31 A 잔류전류가 측정되었지만, PCI 검증시험에서는 0.086 A 측정되었다. 약 50배 작은 값이 측정되었으며, 시험품의 임피던스가 인수시험에서 사용된 부하저항(2 Ω)보다 크기 때문에 작은 전류가 측정된 것으로 보인다.

전자제품 자체에도 낙뢰 등과 같은 의도치 않은 과도 전류를 보호하기 위한 서지보호기가 연결되어 있어 HEMP 필터를 통과한 10 A 이하의 작은 에너지량으로는 전자제품에 오작동이 발생하기는 어렵다. 또한, 방호시설의 주요 전자기기는 MIL-STD-461G 규격의 전자파 내성 기준을 만족하는 전자장비가 사용되기 때문에 오작동을 하기는 어렵다고 사료된다. PCI 검증시험 구성도는 그림 10과 같고, 표 4는 측정결과이다.

1번 프로브에는 PCI 제너레이터에서 5,000A 침투치 전류를 주입을 하는데 L선과 N선으로 분할되어 각 상에 약 2,500 A가 측정되었다. 2번 프로브의 결과는 HEMP 필터의 인수시험 때보다 잔류전류가 적게 측정이 되었고, 이

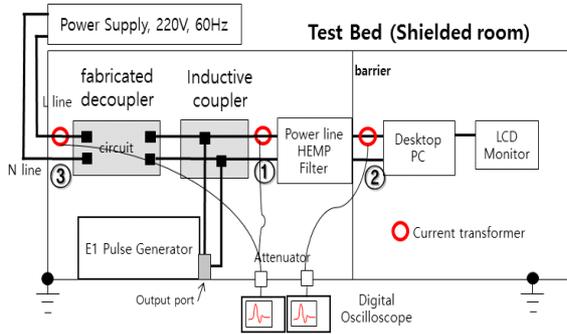


그림 10. 검증시험 구성도
Fig. 10. Configuration of verification test.

표 4. 검증시험 결과
Table 4. Verification test result.

①	Injected pulse	Line	Peak Current(A) >2,500	Rise time ≤20ns	FWHM (pulse width) 500~550ns
	5,000 A	L	2,546	17.88	512.86
		N	2,532	15.63	508.46
②	Residual current	Line	Peak current (A) (<10 A)	Peak rate of rise (A/s) < 1×10 ⁷	Root action (A√s) <1.6×10 ⁻¹
	-	L	0.086	23.7×10 ³	48.44×10 ⁻⁶
		N	0.055	22.6×10 ³	48.44×10 ⁻⁶
③	Impossible measurement				

유는 2옴보다 부하가 커서 잔류전류 값이 작게 측정되었다. 전원공급 장비 앞단에 3번 전류 프로브로 측정을 했고, 디커플러를 통과한 잔류전류는 데스크탑을 운용하는 전류보다 작기 때문에 측정이 불가능했다. 운용전류보다 작게 측정되는 결과와 전원공급단에 이상이 없는 결과를 통해, 제작된 디커플러를 통과하면서 감쇄된 HEMP 펄스 잔류전류는 전원공급단에 인입되더라도 해당 장비에 미치는 영향은 없을 것으로 판단할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 방호시설에 설치된 전원선 HEMP 필터

의 PCI 검증시험에 필요한 디커플러를 시뮬레이션으로 설계하고 제작하여, 전원 공급단의 보호회로로 적용 가능함을 검증하였다. HEMP 펄스를 모의로 발생시키는 PCI 제너레이터와 디커플러를 연결하여 잔류전류를 시뮬레이션한 결과와 실제 측정과의 차이는 1.6 A로 오차가 작았다. 또한, 실제 운용되는 방호시설에서 검증시험이 어려워 현장과 유사한 테스트 베드 환경에서 개발된 디커플러의 성능을 실험하고 고찰하였다. 방호시설에는 HEMP 필터의 용량과 용도가 다양하기 때문에 상황에 맞는 적절한 디커플러의 개발이 필요하고, 적절한 보호가 없어서 PCI 검증시험을 수행하기 어려운 조건 하에서 전원 용량의 크기 및 신호의 특성을 고려하여 설계를 하고 제작한다면, 현장에서 PCI 검증시험을 할 때 적용 가능한 방안으로 활용 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] E. H. Choi, "Development trend of oscillator and electromagnetic pulse bomb for high-power microwave," *KIPE Magazine*, vol. 9, no. 1, pp. 20-25, Feb. 2004.
- [2] *High-Altitude Electromagnetic Pulse(HEMP) Protection for Ground-Based C4I Facilities Performing Critical, Time-Urgent Missions, Part I - Fixed Facilities*, MIL-STD-188-125, Jul. 1998.
- [3] T. H. Jang, "Analysis of PCI cable effects in HEMP conducted disturbance," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 24, no. 8, pp. 772-780, Aug. 2013.
- [4] Y. J. Kim, H. J. Kang, Y. K. Jeong, D. G. Youn, and Y. B. Park, "Analysis and performance improvement of integrated E1 pulse generator for EMP protection performance test," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 6, pp. 415-423, Jul. 2018.
- [5] A. J. Nalborczyk, "HEMP filter design to meet MILSTD-188-125 PCI test requirements," in *2008 10th International Conference on Electromagnetic Interference & Compatibility*, Bangalore, 2008, pp. 205-209.

[6] H. Jiang, J. Zhou, Y. Huang, Y. Zeng, J. Humphries, and Q. Xu, et al., "Design of a Marx Generator for HEMP filter evaluation taking account of parasitic effect of components," in *2016 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*, Wroclaw, 2016, pp. 839-843.

[7] *Defense and Military Facility Criteria Standard: Design Criteria for Electromagnetic Protection, DMFC 4-40-70*, Apr. 2012.

[8] 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 sus-

ceptibility criteria," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 25, no. 2, pp. 199-207, Feb. 2014.

[9] S. W. Han, H. G. Cho, and J. L. He, "The statistic analysis on principal electric parameters of MOV for surge arrester," in *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, Yokohama, Oct. 2002, vol. 3, pp. 2208-2211.

[10] N. Tsukamoto, "Study of degradation by impulse having 4/10 μ s and 8/20 μ s waveform for MOVs," in *2014 International Conference on Lightning Protection(ICLP)*, Shanghai, Oct. 2014, pp. 620-623.

김 영 진 [한국화학융합시험연구원/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-3405-2071>



2011년 2월: 고려대학교 전자정보공학과 (공학사)

2014년 8월: 아주대학교 정보전자공학 (공학석사)

2012년 5월~현재: 한국화학융합시험연구원 국방산업팀 책임연구원

2017년 3월~현재: 아주대학교 NCW학과

박사과정

[주 관심분야] HEMP, EMP Filter, Pulse Generator

박 용 배 [아주대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-7095-4614>



1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)

2000년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

2003년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

2003년 2월~2006년 8월: KT 인프라연구

소 선임연구원

2006년 9월~현재: 아주대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] 전자장 해석, EMI/EMC