

HEMP 전도성 방해 펄스 전류 주입(PCI) 케이블의 영향 분석

Analysis of PCI Cable Effects in HEMP Conducted Disturbance

장 태 현

Tae-Heon Jang

요 약

고고도 핵폭발로 생성되는 고출력 전자기 펄스(HEMP)에 의해 복사성 방해 환경과 케이블 커플링에 의한 전도성 방해 환경이 조성된다. IEC 61000-2-10은 HEMP의 전도성 방해 환경에 대하여 정의한다. IEC 61000-5-5에는 HEMP 전도성 방해에 대한 보호 장치의 특성이 규정되어 있다. IEC 61000-4-24는 보호 장치에 대한 특성 측정 방법을 다루고 있다. IEC 61000-4-24:1997은 소형 보호 소자에 대한 측정 방법을 기술하고 있으나, 최근 많이 사용되고 있는 보호 소자와 필터가 결합된 형태의 조합형 필터에 대한 측정 방법은 미비한 상태이다. HEMP 전도성 방해 신호는 50 MHz 이하의 주파수 스펙트럼을 포함하고 있으므로 측정 셋업을 구성하는데 있어서 케이블의 굵기, 길이, 접지평면으로부터의 높이 등의 측정 셋업 파라미터의 특성을 파악하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 HEMP 전도성 방해 전류 파형의 주파수 스펙트럼을 고려하고, 측정셋업에서 존재하는 케이블 파라미터의 영향을 분석하여 최적의 PCI 측정 방법을 도출하고자 한다.

Abstract

The high-altitude electromagnetic pulse(HEMP) conducted environment and the HEMP radiated environment are established as the consequences of a high-altitude nuclear explosion. The IEC 61000-2-10, the international standard, defines the HEMP conducted environment. The IEC 61000-5-5 defines how protective devices for conducted disturbance proposed for HEMP protection shall be specified. The IEC 61000-4-24 deals with methods for testing protective devices for HEMP conducted disturbance. The IEC 61000-4-24:1997 mainly describes the measurement method of small protective components. However, it does not provide the measurement method for a combination filter of a protective component and a filter which is widely used in recent. It is important to consider the characteristic of the measurement setup parameters like thickness and length of the cable and its height above ground plane etc. in establishing measurement setup because HEMP conducted disturbances include the frequency spectrum below 50 MHz. This paper deals with the optimized measurement method, considering the frequency spectrum of HEMP conducted disturbance, current waveform, and analyzing the effects of cables existing in the measurement setup.

Key words : HEMP, Filter, Pulse Current Injection(PCI), Cable, Measurement Method

I. 서 론

고고도 핵폭발로 생성되는 고출력 전자기 펄스

(HEMP)에 의해 복사성 방해 환경과 케이블 커플링에 의한 전도성 방해 환경이 조성된다. HEMP 방해에 대한 보호 소자 와 관련된 국제 표준화 현황은 그

「이 연구는 국가표준기술력향상사업 "HEMP 필터 시험방법 개발을 통한 국제표준화 추진" 과제 연구비의 지원으로 연구되었음.」
한국산업기술시험원 전자파기술센터(EM Technology Center, Korea Testing Laboratory)

· Manuscript received June 14, 2013 ; Revised August 14, 2013 ; Accepted August 16, 2013. (ID No. 20130614-09S)

· Corresponding Author : Tae-Heon Jang (e-mail : thjang@ktl.re.kr)

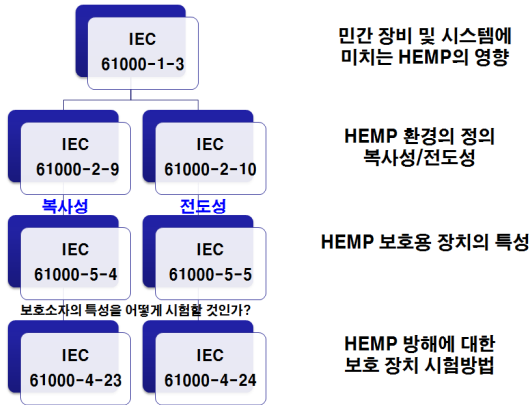


그림 1. HEMP 보호를 위한 국제 표준화 현황
Fig. 1. International standardization for HEMP protection.

림 1과 같다. IEC 61000-2-10은 HEMP의 전도성 방해 환경에 대하여 정의한다. IEC 61000-5-5에는 HEMP 전도성 방해에 대한 보호 장치의 특성이 규정되어 있다. IEC 61000-4-24는 보호 장치에 대한 특성 측정 방법을 다루고 있다^{[1]-[3]}.

HEMP 전도성 방해 보호 장치에는 가스방전관 (GDT), 스파크갭(Spark Gap), 어레스터와 같은 절연 파괴 전압 장치와 금속산화물 바리스터(MOV) 등과 같은 전압 제한 장치, 필터 및 보호회로와 같은 대역 폭 제한 장치, 광링크 및 광결합기 등과 같은 분리장치, 동축 홀더 및 스템브 라인, 공진기와 같은 동축형 RF 회로 보호기 등이 있다.

IEC 61000-4-24:1997 Ed.1.0은 GDT와 MOV 같은 소형 보호 소자에 대한 측정 방법을 기술하고 있으나, 최근 많이 사용되고 있는 보호 소자와 필터가 결합된 형태의 조합형 필터에 대한 측정 방법은 미비한 상태이다.

HEMP 전도성 방해 신호는 초기(early-time) HEMP 신호(E_1)와 중기(Intermediate-time) HEMP 신호(E_2), 말기(Late-time) HEMP 신호(E_3)로 분류할 수 있다. 이러한 신호들은 그림 2와 같이 이중 지수 함수의 임펄스 파형을 가지고 있다.

현재 HEMP 보호 시설의 성능을 평가하는데, 일반적으로 적용하고 있는 Mil-Std-188-125-1에서 규정된 전도성 HEMP 신호의 파형은 표 1과 같다^[4].

E_1 펄스의 경우, 50 MHz 이하의 주파수 스펙트럼을 포함하고 있으므로 측정 셋업을 구성하는데 있어

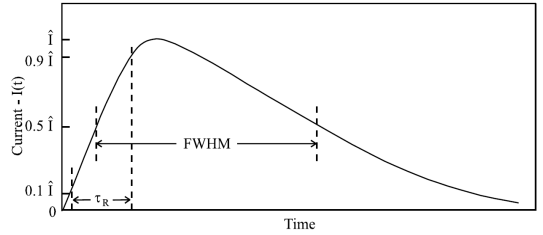


그림 2. 이중 지수 함수 파형
Fig. 2. Double exponential waveform.

표 1. Mil-Std-188-125-1의 전도성 HEMP 파형 정의
Table 1. Definition of conducted HEMP waveform in Mil-Std-188-125-1.

	E_1	E_2	E_3
상승 시간	≤ 20 ns	≤ 1 us	≤ 0.2 s
펄스폭	500~550 ns	3~5 ms	20~25 s
진폭	2,500 A	250 A	1,000 A

서 케이블의 굵기, 길이, 접지평면으로부터의 높이 등의 측정 셋업 파라미터의 특성을 파악하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 HEMP 전도성 방해 전류 파형의 주파수 스펙트럼을 고려하고, 측정 셋업에서 존재하는 케이블 파라미터의 영향을 분석하여 최적의 PCI 측정 방법을 도출하고자 한다.

II. E_1 펄스 주입 케이블 영향 분석

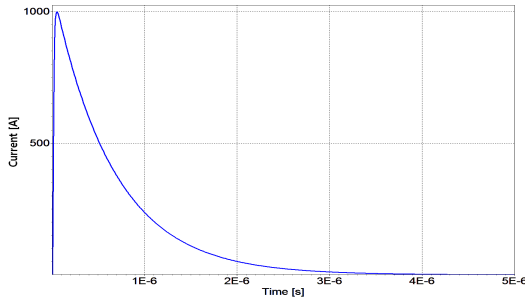
2-1 HEMP 전도성 방해신호의 분석

HEMP 전도성 보호용 조합형 필터의 측정 방법을 정립하기 위해서는 주입되는 신호의 파형 및 주파수 스펙트럼 정보가 중요하다. HEMP 전도성 방해신호의 파형은 이중 지수 함수로서 식 (1)과 같이 표현된다^[4].

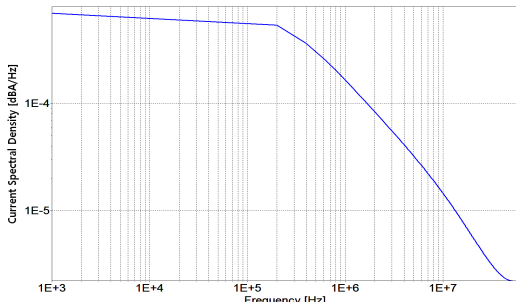
$$I(t) = K_{DE} \hat{I} (e^{-\beta t} - e^{-\alpha t}) \quad (1)$$

여기서 \hat{I} 는 첨두값 전류(A)이고, t 는 시간(s), K_{DE} 는 상수이고 α, β 는 상승 시간 τ_r 과 펄스폭(Full Width Half Maximum, FWHM)의 함수이다.

펄스 전류 주입(Pulse Current Injection, PCI)을 위한 펄스 발생기의 실제 상승 시간 10 ns, 펄스폭이 500 ns인 전도성 E_1 펄스 전류 파형은 그림 3(a)와 같



(a) E_1 펄스의 전류 파형
(a) Current waveform of E_1 pulse



(b) E_1 펄스의 주파수 스펙트럼
(b) Frequency spectrum of E_1 pulse

그림 3. E_1 펄스의 전류 파형 및 주파수 스펙트럼
Fig. 3. Waveform and frequency spectrum of E_1 .

으며, 이것을 푸리에 변환을 하면 그림 3(b)와 같이 주파수 스펙트럼을 얻을 수 있다. 그림 3(b)에서 보여주는 전도성 E_1 전류 펄스의 주파수 스펙트럼은 50 MHz 이하이다.

2-2 E1 펄스 주입 케이블의 파라미터 분석

HEMP 전도성 방해 신호를 보호 소자의 입력에 인가하기 위해서는 그림 4와 같은 측정 셋업을 구성하고, 시험 펄스 레벨 및 파형을 검증해야 한다. 이러한 측정 셋업은 기존의 IEC 61000-4-24 Ed.1.0을 개정하기 위한 국제표준화 프로젝트 회의(PT 61000-4-24)를 통하여 도출되었다.

그림 4에서 레벨 및 파형 검증에 사용된 케이블 L_1 은 HEMP 전도성 방해 보호 장치의 펄스 전류 주입 시험을 위하여 보호 장치에 직접 인가할 때도 동일하게 사용되어야 한다. 10 ns의 상승 시간을 갖는 전도성 E_1 펄스에 대하여 케이블 L_1 의 영향을 분석하여 최적의 케이블 조건을 도출해 내는 것이 측정 방

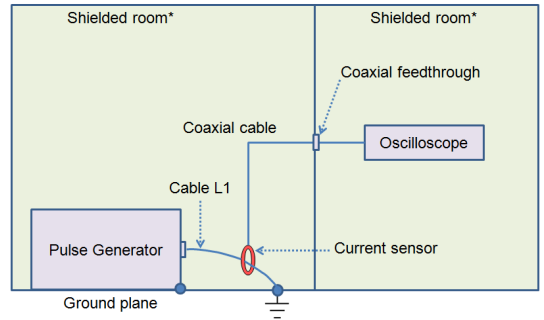


그림 4. 시험 펄스 레벨의 검증을 위한 셋업
Fig. 4. Setup for verification of the test pulse level.

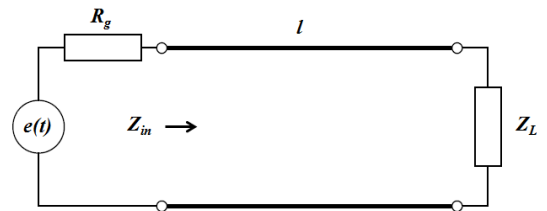


그림 5. 시험 펄스 레벨 검증 셋업의 등가회로
Fig. 5. Equivalent circuit for verification setup of the test pulse level.

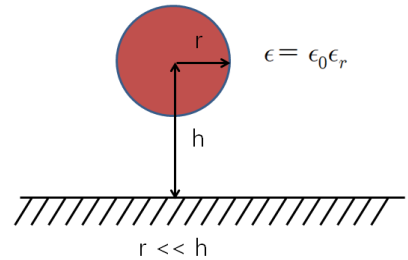


그림 6. 접지평면 위의 단일 케이블(손실은 무시)^[6]
Fig. 6. Single cable over ground plane(losses neglected)^[6].

법 표준화에 필요하다. 케이블 L_1 의 조건이 인가 펄스의 파형에 미치는 영향을 분석하기 위해서 그림 5의 등가회로와 그림 6의 완전한 전도성 접지평면 위에 있는 단일 케이블의 전송선로 모델을 가지고, 케이블 L_1 의 파라미터인 단위 길이 당 인덕턴스와 커패시턴스, 특성 임피던스 Z_c 등을 산출하고자 한다.

그림 4에서 E_1 펄스 발생기의 $R_g=60$ 옴이고, 단락 전류를 측정하기 위한 셋업이므로 그림 5에서 $Z_L=0$ 이다. 이러한 조건을 가지고 전송선로의 임피던스 식 (2)와 같이 된다.

$$Z_{in} = jZ_c \tan \beta l \quad (2)$$

그림 6과 같이 접지평면 위의 단일 케이블의 경우 단위 길이당 파라미터는 이미지 방법을 사용하여 두 평행선의 경우에 대한 결과로부터 식 (3)과 같이 유도할 수 있다^[5].

$$Z_c = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cosh^{-1} \left(\frac{h}{r} \right) \quad (3)$$

여기서 r 은 케이블의 반지름이며, h 는 접지평면 위의 케이블의 높이이다.

케이블이 접지 평면으로부터 충분히 떨어져 있는 경우($r \ll h$) 식 (2)는 식 (4)와 같이 간략하게 표현될 수 있다.

$$Z_c' = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(\frac{2h}{r} \right) \quad (4)$$

식 (3)에서 케이블의 특성 임피던스는 접지평면으로부터 멀어질수록 증가하고, 케이블의 굵기에는 반비례함을 알 수 있다. $r \ll h$ 인 조건에서는 케이블의 굵기보다는 접지 평면으로부터의 이격거리와 케이블의 길이에 따라 더 영향을 받는 것으로 예측할 수 있다.

그림 5를 단순하게 RL 회로로 가정하면, RL 직렬 회로의 시상수 $\tau = L/R$ 에서 상승 시간과 펄스폭에 영향을 주는 요인은 인덕턴스이다. 인덕턴스가 증가하게 되면 상승 시간이 느려지고, 펄스폭도 증가하게 된다.

III. EM Topology Tool을 이용한 시뮬레이션

3-1 EMEC에서의 PCI 시험 셋업 구현

PCI 시험에서 주입 케이블의 영향을 분석하기 위하여 전송 선로 이론을 적용하여 선로의 영향을 확인할 수 있는 EM 토폴로지 시뮬레이션 툴, EMEC에서 펄스 주입 시험 셋업을 그림 7과 같이 구현하였다. PCI 측정 셋업 영역에 펄스 발생기와 오실로스코프 사이에 PCI 전류 주입 케이블을 연결한다. 펄스 발생기 블록에서는 HEMP 전도성 방해 신호인 E_1 펄스와 E_2 펄스를 설정할 수 있다.

오실로스코프 기능에서는 케이블(L_1)을 접지로 직

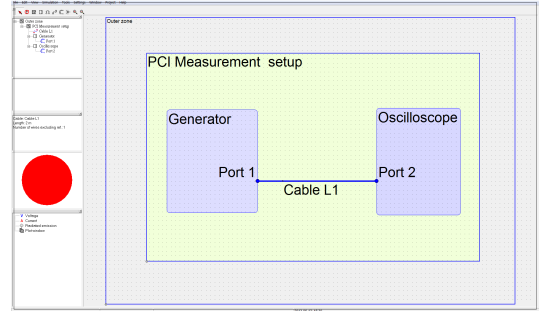


그림 7. EMEC에서 PCI 시험 레벨 검증 셋업
Fig. 7. Verification setup for PCI test level in EMEC.

접 연결시켜 주어 단락회로 전류 파형을 측정할 수 있게 한다. 펄스 발생기와 오실로스코프 블록 안에서는 손실이 없도록 설정한다. PCI 전류 주입 케이블(L_1)은 완전한 접지 평면 위에 배치하도록 한다.

3-2 케이블 길이(L_1) 변화에 따른 영향 분석

굵기가 다른 두 종류의 케이블, 단면적: 9 mm^2 와 4 mm^2 에 대하여 0.2 m, 0.4 m, 0.8 m, 1.6 m, 2.0 m의 길이 변화에 따른 파형의 변화를 시뮬레이션 하였다. 이 때 케이블 L_1 은 접지 평면 위 50 mm 지점에 위치하도록 설정하였다. 펄스 발생기에서 E_1 신호가 인가될 때, 오실로스코프에서 전류 파형의 진폭, 상승 시간, 펄스폭이 측정되었다. 그림 8에서 그림 13에 시뮬레이션 결과를 그래프로 나타내었다. 표 2는 길이 변화에 따른 PCI 인가 파형의 변화 정도를 수치로 표현하였다.

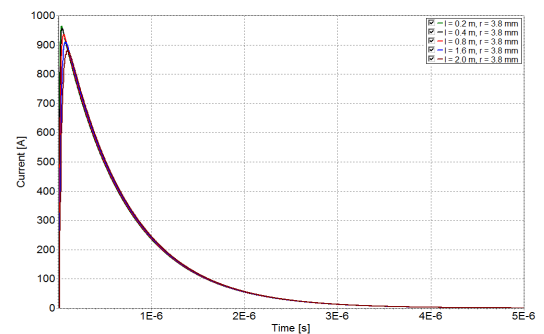


그림 8. 단면적 9 mm^2 케이블 길이에 따른 전류의 진폭 변화

Fig. 8. Variation of current amplitude depending on cable length of the cross section area 9 mm^2 .

표 2. L_1 길이에 따른 단락 전류 파형 시뮬레이션 결과
Table 2. Simulation results for the waveform of short-circuit current with the lengths of cable L_1 .

L_1 단면적(9 mm^2)			
L_1 길이(m)	진폭(A)	상승 시간(ns)	펄스폭(ns)
0.2	966	12	502
0.4	960	16	502
0.8	940	22	528
1.6	903	35	560
2.0	885	43	573
L_1 단면적(4 mm^2)			
0.2	963	15	504
0.4	953	18	505
0.8	930	26	536
1.6	903	38	555
2.0	872	46	582

그림 6에서 그림 13까지의 시뮬레이션 결과에서 케이블의 길이가 0.4 m를 초과하는 경우에 상승 시간이, 케이블의 길이가 1.6 m 이상인 경우에 펄스폭이 Mil-Std-188-125-1의 요구 조건을 만족하지 못하는 파형의 변화가 있음을 확인할 수 있다. 표 3에는 케이블 길이가 0.2 m에서 2.0 m로 늘어났을 때 전류 파형의 변화 정도를 표시하였다. 상승 시간이 매우 많이 길어졌음을 알 수 있다.

3.3 접지면 위 케이블 높이에 따른 영향 분석

그림 6에서 케이블의 높이 위치 h 를 접지평면에

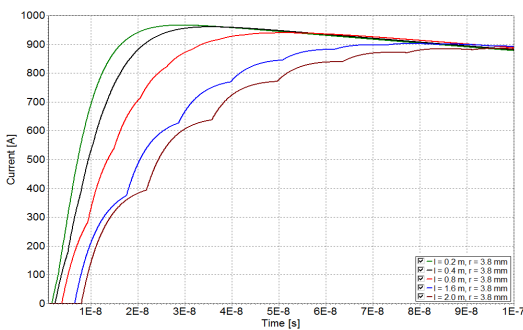


그림 9. 단면적 9 mm^2 케이블 길이에 따른 펄스 상승 시간의 변화
Fig. 9. Variation of pulse rise time depending on cable length of the cross section area 9 mm^2 .

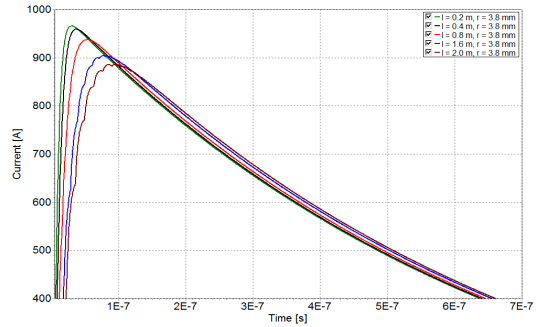


그림 10. 단면적 9 mm^2 케이블 길이에 따른 펄스폭의 변화
Fig. 10. Variation of FWHM depending on cable length of the cross section area 9 mm^2 .

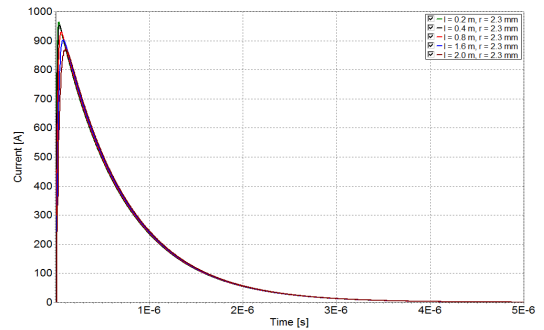


그림 11. 단면적 4 mm^2 케이블 길이에 따른 전류의 진폭 변화
Fig. 11. Variation of current amplitude depending on cable length of the cross section area 4 mm^2 .

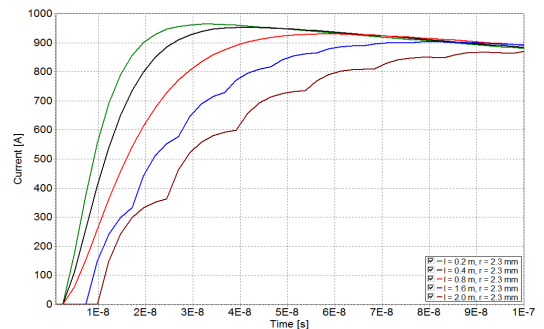


그림 12. 단면적 4 mm^2 케이블 길이에 따른 펄스 상승 시간의 변화
Fig. 12. Variation of pulse rise time depending on cable length of the cross section area 4 mm^2 .

서 3 mm부터 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100 mm까지 변화시켰을 때 파형의 변화를 시뮬레이션 하였다. 이때

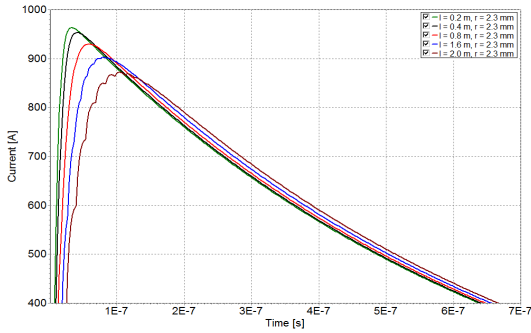


그림 13. 단면적 4 mm² 케이블 길이에 따른 펄스폭의 변화

Fig. 13. Variation of FWHM depending on cable length of the cross section area 4 mm².

표 3. L₁ 길이 변화에 따른 전류 파형 변화 시물레이션

Table 3. Variation of the waveform of short-circuit current with variation of the lengths of L₁ in simulation.

케이블 종류(mm ²)	L ₁ 길이 변화(m)	진폭 변화(%)	상승 시간 변화(%)	펄스폭 변화(%)
9	0.2~2	-8.4	258	14.1
4	0.2~2	-9.4	207	15.5

표 4. L₁ 높이에 따른 단락 전류 파형 시물레이션 결과
Table 4. Simulation results for the waveform of short-circuit current with the heights of L₁.

L ₁ 단면적(9 mm ²), 길이(1 m)			
높이 h(mm)	진폭(A)	상승 시간(ns)	펄스폭(ns)
3	978	13	494
5	961	17	522
10	949	20	542
20	938	23	560
30	932	25	570
40	928	27	578
50	925	28	582
100	916	31	600

케이블 L₁의 조건은 단면적이 9 mm²이고, 길이를 1 m로 고정하였다. 그 결과를 표 4와 그림 14에 나타내었다. 접지평면으로부터 케이블의 위치가 높아짐에 따라 인가되는 전류의 진폭이 최초 3 mm 높이인 경우에 비해 100 mm 높이일 때 약 6 % 감소되었으

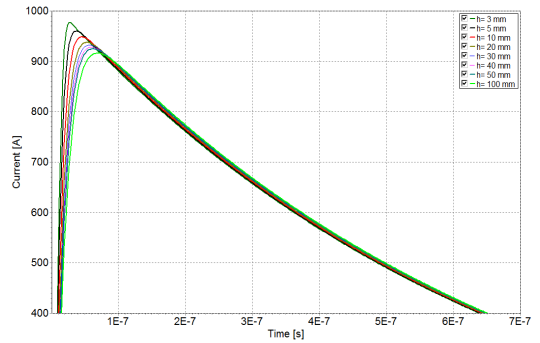


그림 14. 접지면 위 케이블 높이에 따른 영향

Fig. 14. Height effects of cable over the ground plane.

며, 상승 시간은 138 % 증가, 펄스폭은 21.5 % 증가되는 경향을 나타내었다.

IV. PCI 측정 셋업에서의 단락전류파형 측정 결과

그림 4와 같이 PCI 측정 셋업을 구성하고, 그림 15와 같이 E₁ 펄스의 단락전류를 측정하였다^[7].

표 5와 그림 16으로부터 그림 21에는 PCI 시험에서 전류 주입 레벨 검증 셋업에서 측정된 단락 전류 파형의 결과를 나타내었다. 시물레이션 결과에서와 마찬가지로 주입 케이블의 길이와 굵기에 따라서 진폭, 상승 시간과 펄스폭에 있어서 Mil-Std-188-125-1의 요구 조건을 초과하는 파형의 변화가 있음을 보여준다. 표 6에는 케이블 길이가 0.2 m에서 2.0 m로 늘어났을 때 측정된 전류 파형의 변화 정도를 표시하였다.

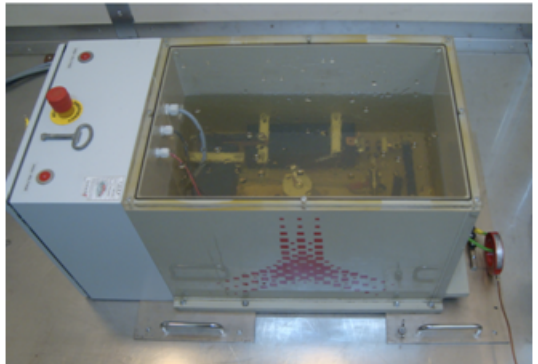


그림 15. E₁ 펄스 발생기의 인가 레벨 측정 셋업

Fig. 15. Measurement setup for test level of E₁ pulse generator.

표 5. L_1 길이에 따른 단락 전류 파형 측정 결과
Table 5. Measurement results for the waveform of short-circuit current with the lengths of L_1 .

L_1 단면적(9 mm^2)			
길이 L_1 (m)	진폭(A)	상승 시간(ns)	펄스폭(ns)
0.2	1040	12	506
0.4	1005	16	526
0.8	973	20	545
1.6	960	24	565
2.0	983	39	582
L_1 단면적(4 mm^2)			
0.2	1,005	13	500
0.4	1,030	14	522
0.8	990	19	546
1.6	949	33	572
2.0	927	42	585

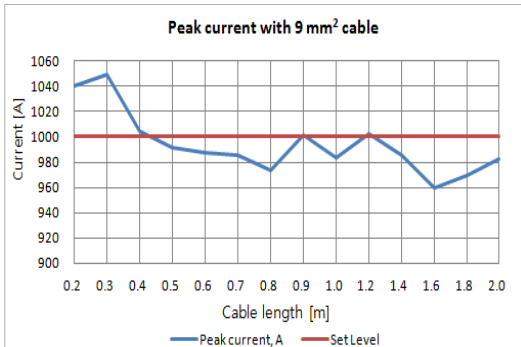


그림 16. 9 mm^2 케이블을 사용하여 측정된 첨두 전류값($1,000 \text{ A} \pm 4\%$)
Fig. 16. Peak current measurement results with 9 mm^2 cables($1,000 \text{ A} \pm 4\%$).

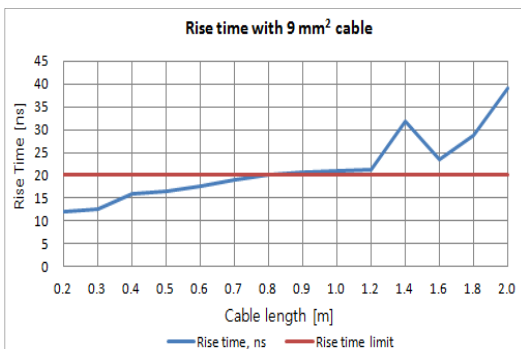


그림 17. 9 mm^2 케이블을 사용하여 측정된 상승 시간
Fig. 17. Rise time measurement results with 9 mm^2 cables.

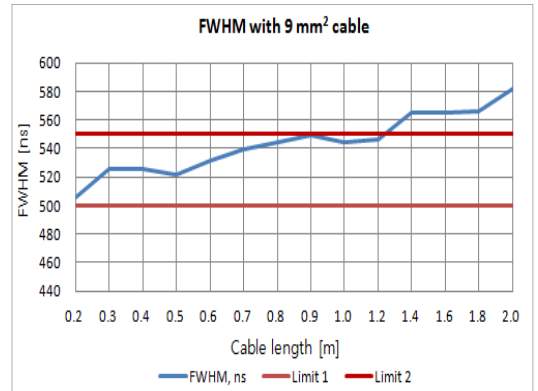


그림 18. 9 mm^2 케이블을 사용하여 측정된 FWHM
Fig. 18. FWHM measurement results with 9 mm^2 cables.

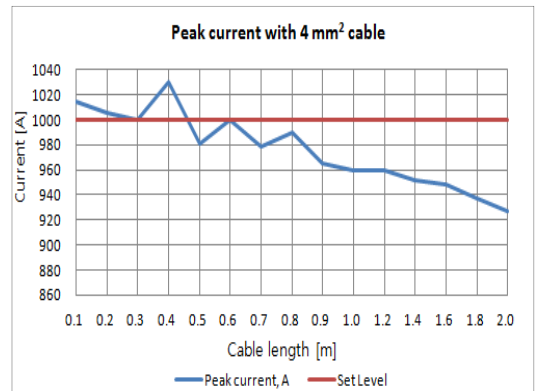


그림 19. 4 mm^2 케이블을 사용하여 측정된 첨두 전류값($1,000 \text{ A} \pm 4\%$)
Fig. 19. Peak current measurement results with 4 mm^2 cables($1,000 \text{ A} \pm 4\%$).

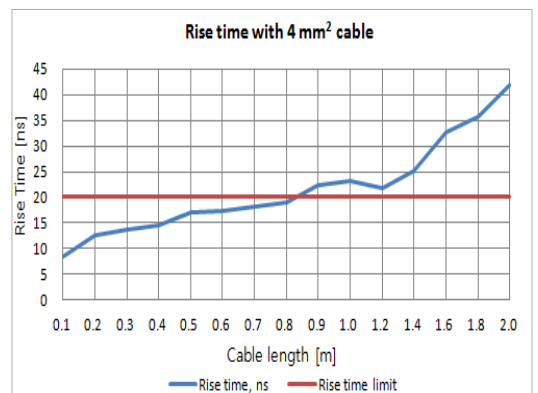


그림 20. 4 mm^2 케이블을 사용하여 측정된 상승 시간
Fig. 20. Rise time measurement results with 4 mm^2 cables.

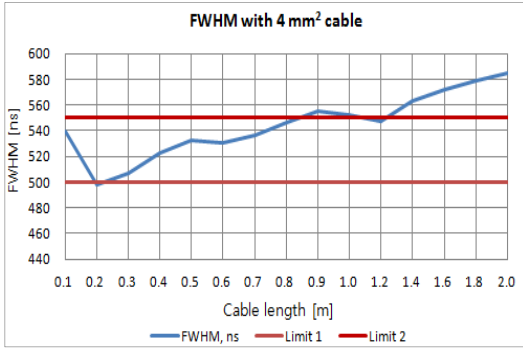


그림 21. 4 mm² 케이블을 사용하여 측정된 FWHM
Fig. 21. FWHM measurement results with 4 mm² cables.

표 6. L₁ 길이 변화에 따른 전류 파형 변화 측정 결과
Table 6. Variation of the waveform of short-circuit current with variation of the lengths of L₁ in measurement results.

케이블 종류 (mm ²)	L ₁ 길이 변화 (m)	진폭 변화 (%)	상승 시간 변화 (%)	펄스폭 변화 (%)
9	0.2~2	-5.5	225	15
4	0.2~2	-7.8	223	17

V. 결 론

HEMP 전도성 방해에 대한 보호 필터의 PCI 시험 셋업의 최적화를 위하여 펄스 주입 케이블의 물리적 조건의 변화를 통하여 인가되는 전류 파형에 미치는 영향을 분석하였다. HEMP의 전도성 E₁ 파형은 수 ns 수준의 빠른 상승 시간을 수반하기 때문에, 주입 케이블의 길이가 길어지거나 굵기에 따라 임피던스가 증가하게 되고, 그 결과 주입 전류의 세기가 감소 되고, 펄스 상승 시간과 펄스폭이 증가한다. 시뮬레

이션 결과와 측정 결과에 따라서 약 0.5 m 이하의 주입 케이블이 사용되는 것이 권고된다.

향후 접지면 위의 단일 케이블이 갖는 영향을 보완하기 위하여 동축 케이블을 통한 주입방법의 후속 연구가 진행될 예정이다.

References

- [1] IEC 61000-2-10, Electromagnetic compatibility(EMC)-Part 2-10: Environment-Description of HEMP environment-conducted disturbance, 1998.
- [2] IEC 61000-5-5, Electromagnetic compatibility(EMC)-Part 5: Installation and mitigation guidelines-Section 5: Specification of protective devices for HEMP conducted disturbance, 1996.
- [3] IEC 61000-4-24, Electromagnetic compatibility(EMC)-Part 4: Testing and measurement techniques-Section 24: Test methods for protective devices for HEMP conducted disturbance, 1997.
- [4] Mil-Std-188-125-1, "High-Altitude Electromagnetic Pulse(HEMP) protection for ground-based c4i facilities performing critical, time-urgent missions, Part I - fixed facilities", 2005.
- [5] Clayton A. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*(second edition), A John Wiley & Sons, Inc., pp. 195-196, 2006.
- [6] K. S. H. Lee, *EMP Interaction: Principles, Techniques, and Reference Data*, Hemisphere Publishing Corporation, pp. 606-613, 1986.
- [7] 장태현, 송태승, 최효식, "HEMP 방호용 필터의 측정 방법 표준화에 대한 연구", 2012년 표준학 회추계학술대회, 서울, 2012년 10월.

장 태 현



1992년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)

2002년 2월: 아주대학교 정보전자공학과 (공학석사)

1996년 5월~현재: 한국산업기술시험원 센터장/수석연구원

2008년 3월~현재: 한양대학교 전자전기제어계측공학과 박사과정

[주 관심분야] EMC, EMP, 국제표준화