

디지털 제어장치의 고출력 전자기펄스에 대한 취약성 사례 분석

Vulnerability Case Analysis of the High Power Electromagnetic Pulse on Digital Control System

우정민 · 주문노 · 이홍식 · 강성만 · 최승규 · 이재복

Jeong Min Woo · Mun-No Ju · Hong-Sik Lee · Sung-Man Kang · Seung-Kyu Choi · Jae-Bok Lee

요 약

디지털 제어 시스템에서 주로 사용되는 설비인 PLC(Programmable Logic Controller)와 통신선로에 대한 HPEM(High Power Electromagnetic) 펄스의 노출 위험이 최근 증가되고 있다. 본 연구에서는 서로 다른 주파수 대역을 가지는 HPEM 발생장치를 이용하여 분리된 독립 객체로써 전자 장치의 HPEM에 대한 취약성을 평가하였다. 전자장치가 어떠한 영향을 받는지 상황별로 나누어 비교하였고, HPEM에 노출된 피 시험 기기의 취약성을 분석하였다. 피 시험 기기는 특정 이상의 HPEM에 노출되면, 제어 장치의 전압 및 통신 파형에 왜곡된 특성을 보였으며, UTP(Unshielded Twisted Pair) 케이블에 연결된 장치는 유도전압에 의해 작동 불량을 나타냈다. 그러나 FTP(Foiled Twisted Pair) 케이블에 연결된 장치인 경우에는 HPEM 노출로부터 효율적으로 보호되었다. 따라서 현재 전력설비 및 산업현장에서 이용되고 있는 디지털 제어시스템에 대한 HPEM 노출 취약성과 보호대책의 필요성을 입증하였다.

Abstract

The risk of high power electromagnetic(HPEM) pulse exposure to the devices used in digital control system such as PLC(programmable logic controller) and communication cable is increasing. In this paper, two different frequency ranges HPEMs were exposed to those control systems to assess the each vulnerability. The vulnerability of the EUTs exposed from HPEM were analyzed and compared with a variation of distances and source power. As the EUTs were exposed to higher level of HPEM, the voltage and communication waveform of the control system had shown a distorted response. And the unshielded twisted pair(UTP) cable connected to the EUTs showed operation failures with induced voltage. However, the foiled twisted pair(FTP) cable shielded the connected device efficiently from the HPEM exposure. Therefore, the necessity of the protection measures against the vulnerability of HPEM exposure for the digital control system used in power facilities and industrial site were verified.

Key words: High Power Electromagnetic Pulse, Digital Control System, Shield, Conduction, Vulnerability

I. 서 론

최근 산업기술의 발달과 함께 에너지, 국방, 방송/통신,

교통/수송, 기상설비 등의 디지털 제어장치에서 운용되는 전기, 전자설비는 대부분 집적회로로 구성된 반도체 부품을 주로 이용하고 있다. 이와 같이 기기의 소형화, 경량

「이 연구는 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 주요 사업임(No. 17-12-N0101-08).」
한국전기연구원(Korea Electrotechnology Research Institute)

· Manuscript received March, 21, 2017 ; Revised April, 26, 2017 ; Accepted September, 13, 2017. (ID No. 20170321-025)

· Corresponding Author: Jeong Min Woo (e-mail: woojm@keri.re.kr)

화, 다기능화를 추구하는 설비는 전자기 펄스에 매우 민감하게 되어 전자기 펄스(EMP: Electromagnetic Pulse)에 노출시 기기의 오동작 또는 소손을 초래할 수 있다. 이러한 전자기 펄스는 낙뢰(LEMP: Lightning Electromagnetic Pulse)와 같이 자연적으로 발생하는 전자기 펄스와 설비의 손상을 목적으로 인위적으로 발생시키는 전자기 펄스로 구분할 수 있다^{[1],[2]}. 고도화된 ICT 기술 기반의 전자·정보화 사회로 급변한 우리나라의 특성상, 핵심 국방시설 뿐만 아니라, 국가기간 시설물에 대한 고출력 전자기(HPEM: High Power Electromagnetic) 펄스 공격에 매우 취약한 실정이며, 막대한 경제적 피해 및 사회적 혼란을 초래할 가능성이 있다. 이러한 혼란을 극복하기 위해 고출력 전자기 펄스에 대한 보호대책이 필요하지만, 국가별 전라기술로 분류되어 국가 간 기술교류 및 기술판매가 현실적으로 불가능하여 연구가 부족한 상태이다. HPHEM 보호대책기술은 무기의 속성이 노출되지 않은 상황에서 공격무기의 전자기 세기, 상승률, 주파수, 반복성, 펄스 에너지 등의 위협 파라미터에 대응하는 방호기술이다. 보호대책기술은 흔히 안테나, 도파관과 같은 정상적인 전파 경로(front-door coupling) 또는 케이블, 자유공간 등 예측하지 못한 경로(back-door coupling)에 대한 것으로 나뉘게 된다. 또한, back door coupling은 다시 전력선이나 통신선을 통해 고출력 전자기 펄스가 들어오는 전도성 형태, 자유공간에서 펄스가 전파하여 들어오는 방사형 형태로 구분할 수 있다. 이에 대한 대비책도 그림 1에서와 같이 전

자기 펄스의 입력 경로에 따라서 나뉘게 된다. 케이블 등을 따라서 들어오는 전도성 형태는 일반적으로 PIN 또는 쇼트키 다이오드를 기반으로 한 리미터, LC 공진을 기반으로 한 전원용 필터 등이 주로 이용되며, 방사형 형태는 구조적으로 두꺼운 시멘트 또는 철근, 패러데이 케이지, 차폐망 등을 보호대책으로 이용하고 있다.

본 연구에서는 디지털 제어장치에 대한 전자기 펄스 영향을 평가하기 위해 전력설비 및 산업현장에서 주로 이용되고 있는 PLC(Programmable Logic Controller)와 통신선로에 대한 전자기 펄스 노출의 취약성을 비교분석하였다. IEC 61000-4-36 국제 표준 규격을 만족시키면서 보다 효율적인 방호대책을 설계하기 위해 HPHEM의 주파수 대역에 따라 나누어 객체의 취약성을 분석하였다. 또한, 분리된 독립 객체로써 HPHEM에 대한 취약성을 분석하고, 각 객체를 연결했을 경우에 어떠한 영향을 받는지 분석하기 위해 상황별로 나누어 실험을 수행하였다.

II. 고출력 전자기 펄스 발생기

2-1 펄스 생성

고출력 전자기 펄스 발생기의 기본적인 회로는 주로 막스 발생기(Marx generator) 또는 테슬라 변압기(Tesla transformer)로 이루어지며, 주파수 대역은 회로에 연결되어 있는 안테나의 구조에 따라서 정해진다. 해당 회로들은 저전압에서 고전압의 DC로 승압시키며, 병렬의 커패시터들에 충전되어 있는 에너지를 순간적으로 방출시키는 원리를 기본으로 한다^{[3],[4]}. 발생된 에너지를 안테나와 연결시켜 임피던스 정합을 통해 고출력 전자기 펄스로 방사시킨다. 본 연구는 서로 다른 주파수 대역을 가지는 EMP 발생기를 토대로 취약성에 대한 영향을 비교하였고, 각각 S1, S2로 명명하였다.

2-2 S1 EMP 발생기(250~500 MHz)

S1 EMP 발생기 모델은 EMP-MGP-120으로 주파수 대역은 250~500 MHz이고, 배터리를 사용하는 특징을 가지며 상세사양을 표 1에 나타냈다. EMP 발생기는 그림 2에서와 같이 왼쪽은 전원 공급 장치, 중앙은 고전압 발생원, 오른쪽은 fat dipole 안테나 구조로 구성된다. 펄스 상승시

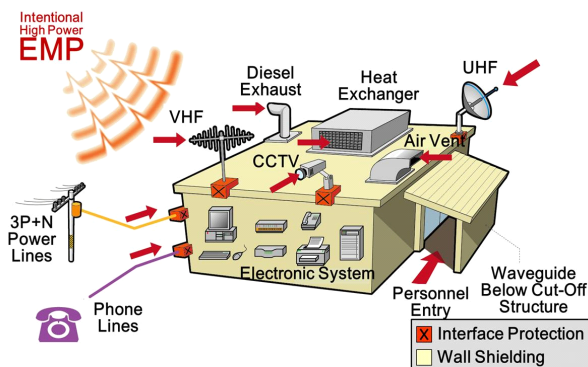


그림 1. HPHEM 침투경로와 보호방법 모식도
Fig. 1. Schematic diagram of HPHEM pathways and protections.

표 1. S1 EMP 발생기 사양(EMP-MGP-120)

Table 1. Specification of S1 EMP generator(EMP-MGP-120).

Contents		Value	Others
Power supply	Input voltage	~25.9 V	Battery operation
	Output voltage	~50 kV	RMS deviation: <5 %@max.
	PRF	<10 Hz	Battery operation <30 min.
High voltage generator	Output voltage	>400 kV	RMS deviation: <10 %@max.
	Type	Marx generator	—
Antenna	rE/V	~0.5	—
	Type	Fat dipole antenna	—
System	Size (L×W×H)	46×34×17 cm	—
	Weight	≤20 kg	Case included
	rE	>200 kV	—



그림 2. S1 EMP 발생기(EMP-MGP-120)

Fig. 2. S1 EMP generator(EMP-MGP-120).

간이 0.5 ns인 S1 EMP 발생기의 5 m 거리에서 측정된 파형 100개의 평균값을 그림 3에 나타냈다. 거리별 4 m, 5 m, 7 m, 10 m에서 측정된 전계값은 각각 50 kV/m, 40 kV/m, 28 kV/m, 20 kV/m이며 오차값은 10 % 이내이다.

2-3 S2 EMP 발생기(500 MHz~2.75 GHz)

S2 EMP 발생기의 모델명은 EMP-TGP-250, 주파수대역

은 500 MHz~2.75 GHz이고, 배터리를 사용하는 특징을 가지며, 상세사양을 표 2에 나타냈다. EMP 발생기 구조는

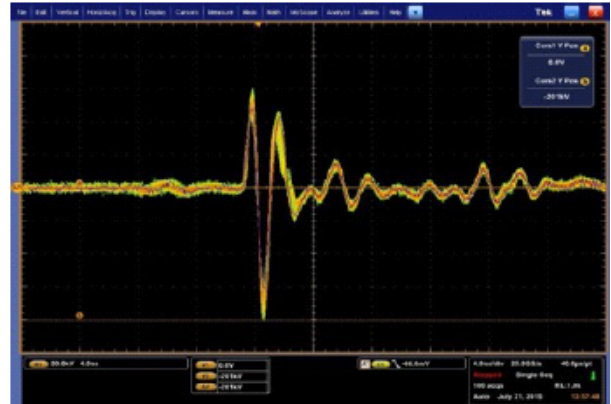


그림 3. S1 EMP 발생기 파형(100개의 평균값)

Fig. 3. S1 EMP generator far-field waveform(avg. of 100 shot).

표 2. S2 EMP 발생기 사양(EMP-TGP-250)

Table 2. Specification of S2 EMP generator(EMP-TGP-250).

Contents		Value		Others
Power supply	Output voltage	~700 V		RMS deviation: <5 %@max.
	PRF	<10 Hz		Battery operation <30 min.
High voltage generator	Output voltage	>350 kV		RMS deviation: <10 %@max.
	Type	Tesla transformer		—
Pulse generation	Waveform	Unipolar	Bipolar	Unipolar/Bipolar pulse convertible
	Peak voltage	≤340 kVp	≤500 kVp-p	RMS deviation: <20 %@max.
	Pulse width	≤700 ps	≤800 ps	FWHM
Antenna	rE/V	0.82	0.62	—
	Type	TEM horn		—
System	Size (L×W×H)	90×23×20 cm		—
	Weight	≤27 kg		Gas controller not included
	rE	>280 kV	>300 kV	—

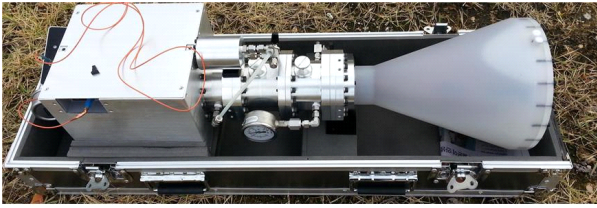
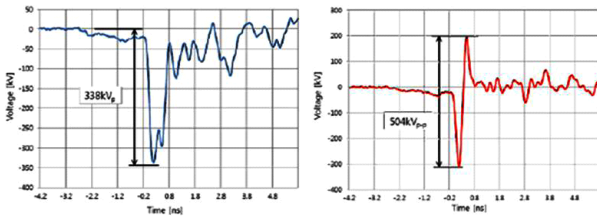


그림 4. S2 EMP 발생기(EMP-TGP-250)
Fig. 4. S2 EMP generator(EMP-TGP-250).



(a) 단극성 파형 (b) 양극성 파형
(a) Monopolar wave (b) Bipolar wave

그림 5. S2 EMP 발생기의 출력 파형
Fig. 5. Waveform of S2 EMP generator.

그림 4와 같이 왼쪽은 전원공급장치, 중앙은 고전압 발생원과 펄스형성 네트워크, 오른쪽은 TEM horn 안테나로 구성된다.

S2 EMP 발생기는 펄스형성 네트워크를 기반으로 하며, 이는 효율적인 임피던스 정합을 위해서 필요로 한다. 그림 5(a)와 같이 단극성 파형은 일반적인 transmission line을 통해 생성된다. 그림 5(b)와 같은 양극성 파형은 중앙에 저항이 위치하며 동일한 길이를 가지는 두 개의 transmission line을 기반으로 한다. 단극성 파형의 측정된 전계값은 거리별로 4 m, 5 m, 10 m, 15 m, 20 m에서 각각 75 kV/m, 60 kV/m, 30 kV/m, 20 kV/m, 15 kV/m이며, 오차값은 10 % 이내이다. 단극성 및 양극성 파형의 펄스 상승시간은 0.1 ns이며, 주파수 대역은 그림 6과 같이 500 MHz~2.75 GHz이다. S1 및 S2 EMP 발생기는 국내 EMP 발생기 업체를 통해서 제공받았다^[5].

III. 시험대상기기(EUT)

3-1 PLC(Programmable Logic Controller)

실험에 사용된 PLC의 모델명은 PLC-CPU-CM2-BP32M

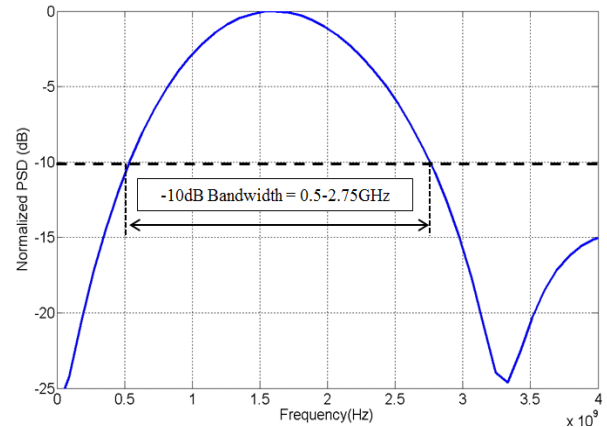


그림 6. 주파수 스펙트럼
Fig. 6. Frequency spectrum.

이며, 전원은 100~240 VAC/24 VDC, 디지털 입력은 24 VDC, 입력/출력은 각 16채널, CPU 속도는 200 ns/Step, 그리고 RS485 Channels이 통신선으로 내장되어 있다. RS 485 통신케이블은 TWISTED OVERALL SHIELD CABLE 2P × 24 AWG, 통신속도 19.2 kbps 특성을 가진다. 그림 7에 나타난 왼쪽 부품은 제어장치와 연결되는 PLC CPU이며, 중앙은 A/D converter로 PLC의 동작 여부를 판단하기 위하여 A/D converter 내에 10초 간격으로 충방전하는 회로를 구성하였다. 오른쪽 부품은 정상적인 작동을 가시적으로 나타내기 위한 삼색 LED 장치이다. 해당 LED 장치는 빨간색으로 시작하여, 노랑, 초록으로 일정한 시간을 가지며, 순차적으로 점멸하도록 설정하였다.

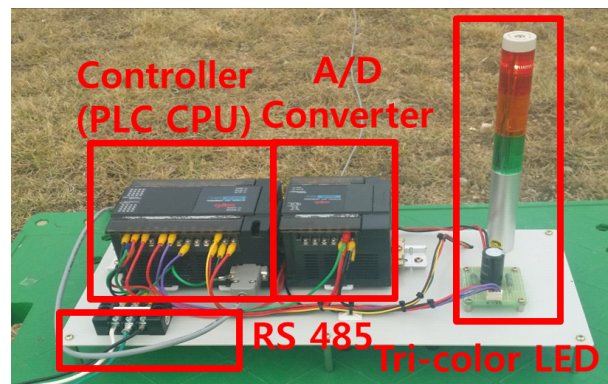


그림 7. 시험대상기기 : PLC
Fig. 7. EUT : PLC.

3-2 Lan 케이블

사용된 케이블은 30 m 길이의 FTP(Foiled Twisted Pair) Cat.5E와 UTP(Unshielded Twisted Pair) Cat.5E가 사용되었다. FTP 케이블의 구조는 피복한 다수의 동선들을 브레이드(braid) 구조의 철망으로 감싸며, UTP 케이블의 구조는 피복한 두 줄의 동선을 꼬아 만드는 형태로 외부에서 오는 전파간섭을 상쇄시키는 구조를 가진다.

IV. 디지털 제어장치의 취약성 분석

측정용 장비인 노트북과 오실로스코프를 철판으로 이루어진 차폐박스 안에 위치시켜 외부환경에 대한 영향을 최소화시켰고, S1과 S2 EMP 발생기를 이용하여 EUT를 전자기 펄스에 노출시켰다. 실험장소는 주변에 가공전선이 없는 한국전기연구원 내부 시험장에서 이루어졌다.

4-1 PLC 영향

PLC를 그림 8, 그림 9와 같이 EMP에 노출시키고, PLC 출력 채널 측 영향을 PC상 모니터링 프로그램 및 LED 점멸 여부로 확인하였다. 일반적인 PLC는 보관함 또는 케이스 내부에 설치되어 있으며, 앞면에 유리창이 설치된 경우 등 HPEM에 노출되는 가장 취약한 상태를 고려하기

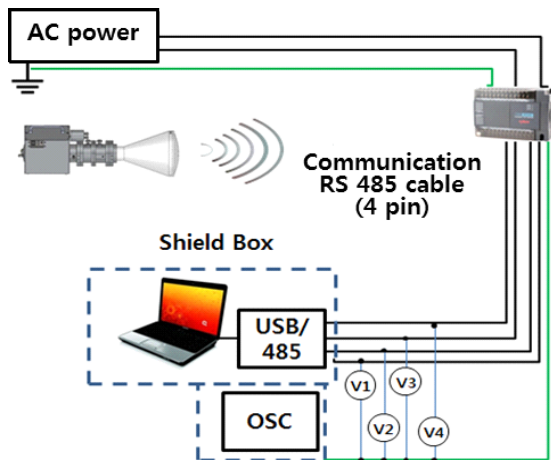


그림 8. PLC의 EMP 노출 실험구성도(거리: 5 m, 10 m, 15 m, 20 m)

Fig. 8. Schematic view of PLC's EMP exposure experiment (distance: 5 m, 10 m, 15 m, 20 m).



그림 9. PLC의 EMP 노출 실험 전경

Fig. 9. Photograph of PLC's EMP exposure experiment.

위해 케이스가 없는 PLC로 실험을 수행하였다. 그림 8에 표시된 V1, V2, V3, V4는 PLC에 RS 485 케이블을 통해 연결된 RX-, RX+, TX-, TX+에 대한 공통모드 전압이다.

S2 EMP 발생기의 인가출력별 PLC 동작상태를 표 3에 나타내었다. 출력강도는 거리와 반비례하여 구해졌다. 20 kV/m 이하로 노출된 경우, LED 순차점멸회로 및 충방전 회로 모두 정상동작하여 그림 10에서와 같이 신호전달도 정상적으로 나타나서 10초 간격으로 3 V를 충방전하며, 그림 11에서와 같이 유도되는 전압도 정상적인 형태를 보였다. 30 kV/m로 노출된 경우, LED 순차점멸회로는 정상 동작을 하였지만, 충방전 회로는 스위치 오동작 후 자동 복귀하였으며, RX-단자에 유도되는 전압이 정상 상태보다 크게 나타났다. 60 kV/m로 노출된 경우 LED 순차점멸 회로는 정상동작을 하였지만, 충방전 회로는 기존 그림

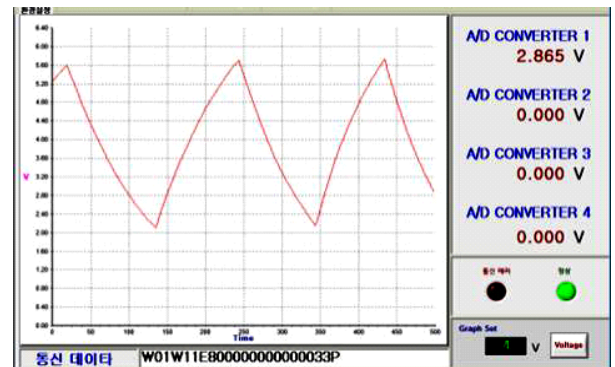


그림 10. HPEM 20 kV/m 노출 시 PLC 동작특성(S2)

Fig. 10. PLC operation characteristics in case of HPEM 20 kV/m exposure(S2).

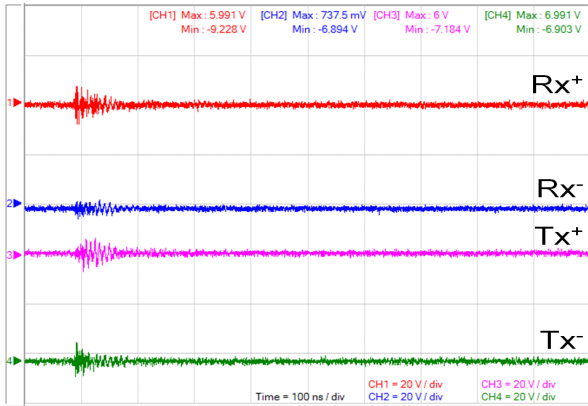


그림 11. HPEM 20 kV/m에 노출된 PLC의 신호케이블 유도전압 파형(S2)
Fig. 11. PLC's signal cable voltage waveform in case of HPEM 20 kV/m exposure(S2).

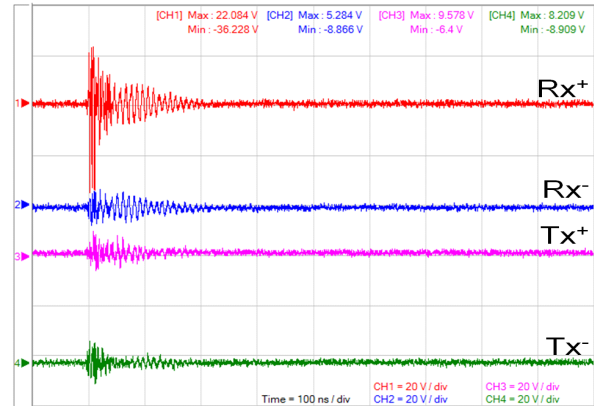


그림 13. HPEM 60 kV/m에 노출된 PLC의 신호케이블 유도전압 파형(S2)
Fig. 13. PLC's signal cable voltage waveform in case of HPEM 60 kV/m exposure(S2).

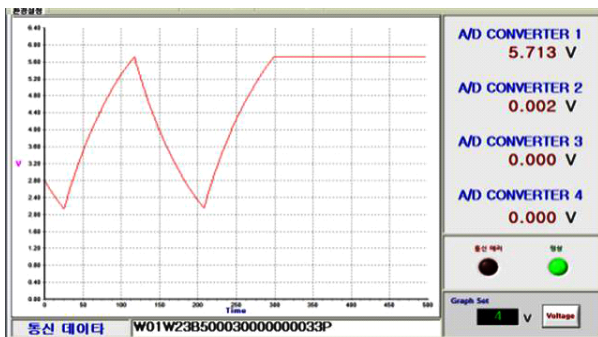


그림 12. HPEM 60 kV/m 노출 시 PLC 동작특성(S2)
Fig. 12. PLC operation characteristics in case of HPEM 60 kV/m exposure(S2).

10과 같은 정상상태에서 벗어나 그림 12에서와 같이 스위치 오동작 후 자동복귀되지 않았다. 그림 13과 같이, 각 단자로 유도되는 전압도 정상상태보다 크게 나타났으며, 해당 결과는 표 3에 정리하였다. 이는 정상동작 전압 12 V보다 높은 전압이 유도되어, PLC의 전원을 리셋시켜야 복구되는 영구적인 업셋 상태가 되었다^[6].

S1 EMP 발생기에 노출된 경우, 표 4와 같이 PLC가 40 kV/m로 노출된 경우, LED 순차점멸회로는 오동작하여 모든 채널의 LED는 꺼졌으며, 충방전 회로는 20 kV/m인 경우부터 그림 14와 같이 일시적으로 스위치 오동작 후 자동복귀하였으며. 그림 15에서와 같이 모든 단자에서 유

표 3. S2 EMP 발생기에 노출된 PLC 동작상태

Table 3. PLC operation characteristics in case of S2 EMP generator exposure.

Power[kV/m] / distance[m]	LED flicker circuit	Charge/discharge circuit	RS485 cable induced voltage [V]
15 / 20	Normal	Normal	15.2
20 / 15	Normal	Normal	19.2
30 / 10	Normal	After malfunction, automatic return (Temporary upset)	23.4
60 / 5	Normal	After malfunction, no automatic return (Permanent upset)	58.3

도되는 전압이 S2 EMP 발생기보다도 크게 나타났다. 이는 PLC의 임피던스 값이 250~500 MHz 대역에서 500 MHz~2.75 GHz 대역보다 자유공간의 임피던스 값에 근접하여 낮은 전계 크기에서도 그림 13에서 나타난 유도 전압 값보다 크게 상승한 것으로 판단된다.

4-2 LAN 케이블의 영향

LAN 케이블 종류는 UTP(Unshielded Twisted Pair)와 FTP(Foiled Twisted Pair) 케이블을 이용하였으며, JPerf 2.0.2 프로그램을 사용하여 네트워크 성능을 측정하였고,

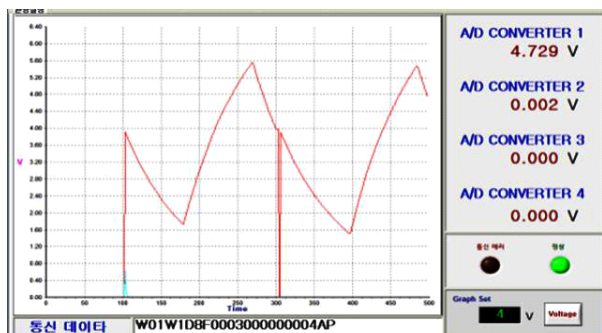


그림 14. HPEM 20 kV/m 노출 시 PLC 동작특성(S1)
Fig. 14. PLC operation characteristics in case of HPEM 20 kV/m exposure(S1).

표 4. S1 EMP 발생기에 노출된 PLC 동작상태
Table 4. PLC operation characteristics of S1 EMP generator exposure

Power[kV/m] /Distance[m]	LED flicker circuit	Charge/discharge circuit	RS485 cable induced voltage[V]
20 / 10	Normal	After malfunction, automatic return (Temporary upset)	68.8
40 / 5	Off	After malfunction, automatic return (Temporary upset)	86.2

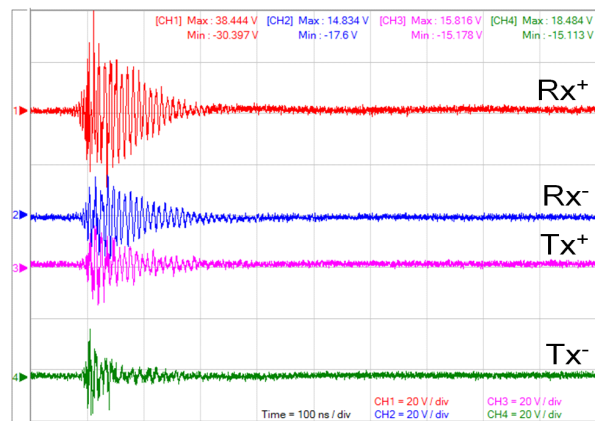


그림 15. HPEM 20 kV/m에 노출된 PLC의 신호케이블 유도전압 파형(S1)
Fig. 15. PLC's signal cable voltage waveform in case of HPEM 20 kV/m exposure(S1).

그림 16, 그림 17과 같이 LAN 케이블을 EMP 발생기에 노출시켜 PC상의 모니터링 프로그램을 통해 통신성능을 측정하였다.

FTP, UTP 케이블을 S1 및 S2 EMP 발생기 노출 여부에 따른 동작상태를 표 5에 나타내었다. FTP 케이블은 S1 및 S2 발생기의 최대출력까지 노출해도 모두 정상적인 통신 상태를 나타냈다. 그러나 UTP 케이블은 S1 및 S2 EMP 발생기 노출에서 그림 18과 같이 통신속도 저하 및 통신이 끊기는 Fail 현상이 나타났으며, 그림 19와 같이 케이블에 유도되는 전압도 정상상태보다 크게 발생되었다. 또

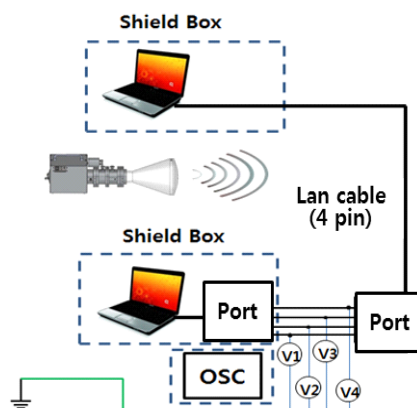


그림 16. LAN 케이블의 EMP 노출 실험구성도(거리: 4 m, 7 m)

Fig. 16. Schematic view of LAN cable's EMP exposure experiment(distance: 4 m, 7 m).



그림 17. LAN 케이블의 EMP 노출 실험 전경
Fig. 17. Photograph of LAN cable's EMP exposure experiment.

표 5. EMP 발생기에 노출된 LAN 케이블의 동작상태
Table 5. LAN cable operation characteristics in case of EMP generator exposure.

EMP generator			Results	
Type	Power[kV/m] /Distance[m]		Communication state	Cable induced voltage [V]
FTP	S1	28 / 7	Normal	14.5
		50 / 4	Normal	56.8
	S2	75 / 4	Normal	52.0
UTP	S1	50 / 4	Speed down	92.7
	S2	75 / 4	Failed	Failed

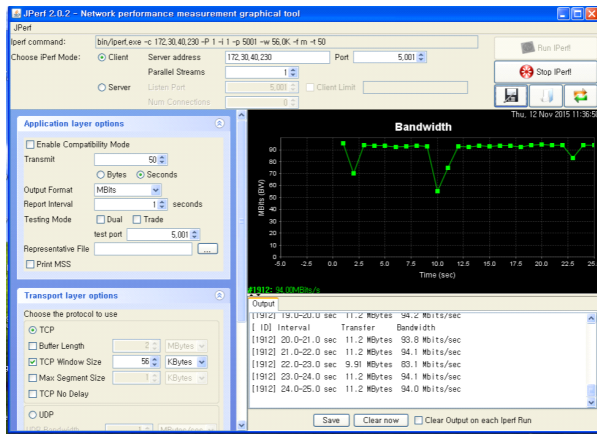


그림 18. HPEM 50 kV/m 노출 시 UTP 케이블 통신속도
Fig. 18. UTP cable communication speed in case of HPEM 50 kV/m exposure.

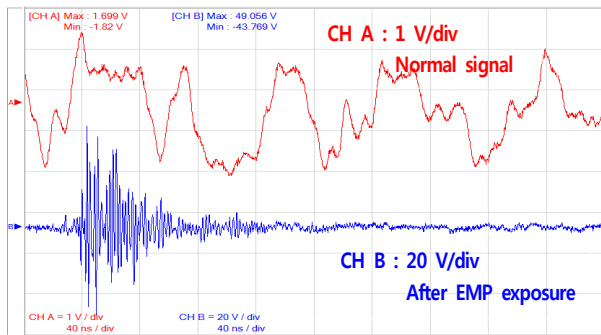


그림 19. HPEM 50 kV/m 노출시 UTP 케이블 TX+와 TX- 선간전압 파형
Fig. 19. UTP cable voltage waveform in case of HPEM 50 kV/m exposure.

한 UTP 케이블은 S1 및 S2 EMP 발생기의 모든 주파수 대역에서 낮은 전계 크기에서도 유도전압이 높게 나타났으며, 같은 크기의 전계 노출에 FTP 케이블보다 두 배에 가까운 유도전압 상승을 보였다. 이는 내부에 철망이 없는 UTP 케이블이 FTP 케이블보다 효율적으로 전압이 유도되는 상태인 것으로 사료된다.

V. 결 론

본 논문에서는 디지털 제어장치에서 주로 이용되고 있는 PLC와 통신선로를 S1 또는 S2 EMP 발생기의 전자기 펄스에 노출시켜 각 장치들의 동작상태를 비교분석하였다.

1) PLC의 경우, S2 EMP 발생기의 EMP에 노출된 경우에는 LED 점멸회로에는 영향을 받지 않았지만, 노출전계가 30 kV/m 이상인 경우, 충방전 회로가 오동작하는 것을 확인하였다. S1 EMP 발생기에 노출된 경우에는 20 kV/m 이상에서 충방전 회로가 모두 오동작됨을 알 수 있었고, 출력이 40 kV/m 이상인 경우에는 PLC LED 회로에 부동작을 일으킴을 알 수 있었다. 이에 따라서 같은 출력에서 PLC에 대한 S1 발생기(250~500 MHz)의 EMP의 영향이 S2 발생기(500 MHz~2.75 GHz)인 경우보다 더 큼을 알 수 있었다.

2) LAN 케이블을 통신선로로 이용하는 경우, FTP 케이블은 모든 상황에서 EMP에 대한 영향이 최소화 됐으며, UTP 케이블은 EMP 노출에 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.

References

- [1] F. Napolitano, F. Tossani, C. A. Nucci, and F. Rachidi, "On the transmission-line approach for the evaluation of LEMP coupling to multiconductor lines", *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 30, no. 2, pp. 861-869, 2015.
- [2] J.-E. Baek, Y.-M. Cho, and K.-C. Ko, "Damage modeling of a low-noise amplifier in an RF front-end induced by a high power electromagnetic pulse", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 45, no. 5, pp. 798-804, 2017.
- [3] A. A. Elserougi, I. Abdelsalam, A. M. Massoud, and S. Ahmed, "A full-bridge submodule-based modular unipo-

lar/bipolar high-voltage pulse generator with sequential charging of capacitors", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 45, no. 1, pp. 91-99, 2016.

- [4] A. A. Elserougi, M. Fاطر, A. M. Massoud, and S. Ahmed, "A transformer-less bipolar/unipolar high-voltage pulse generator with low-voltage components for water treatment applications", *IEEE Transactions on Industry Applica-*

tions, vol. 53, issue 3, pp. 2307-2319, 2017.

- [5] <http://highpower.co.kr/%ea%b3%a0%ec%a0%84%ec%95%95-%eb%b0%9c%ec%83%9d-%ec%9c%a5%e c%b9%98>
- [6] S. Yi, Z. Du, "The influence of microwave pulse width on the thermal burnout effect of a PIN diode limiting-amplifying system", *Microelectron. Reliab.*, MR-12442, pp. 1-8, 2017.

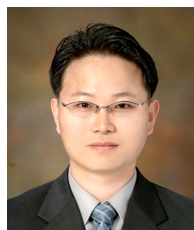
우 정 민



2011년 2월: 경북대학교 전자공학부 (공학사)
2013년 8월: 광주과학기술원 정보통신공학부 (공학석사)
2016년 8월: 광주과학기술원 전기전자컴퓨터공학부 (공학박사)
2016년 7월~현재: 한국전기연구원 차세대 전력망연구본부 전기환경연구센터 선임연구원

[주 관심분야] EMC대책기술, 초고주파공학, 메타물질, 화합물 반도체

강 성 만



1998년 2월: 인하대학교 전기공학과 (공학사)
2004년 2월: 인하대학교 전기공학과 (공학박사)
2010년 12월~현재: 한국전기연구원 차세대 전력망연구본부 전기환경연구센터 책임연구원

[주 관심분야] EMP(LEMP, NEMP, HPEMP) 방호기술, 낙뢰 및 EMC 대책기술

주 문 노



1994년 2월: 인하대학교 환경공학과 (공학사)
1996년 2월: 인하대학교 전기공학과 (공학석사)
2007년 2월: 한국해양대학교 전기공학과 (공학박사)
1996년~현재: 한국전기연구원 차세대 전력망연구본부 전기환경연구센터 책임연구원

[주 관심분야] 초고압 전력설비의 친환경설계기술

최 승 규



2012년 2월: 부경대학교 신소재공학부 (공학사)
2014년 2월: 한양대학교 신소재공학부 (공학석사)
2014년 1월~현재: 한국전기연구원 차세대 전력망연구본부 전기환경연구센터 연구원

[주 관심분야] MOV(Metal Oxide Varistor), Arrestor, 세라믹 공정 및 소결

이 홍 식



1975년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1983년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
1990년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학박사)
1990년 9월~현재: 한국전기연구원 차세대 전력망연구본부 전기환경연구센터 책임연구원

[주 관심분야] 고전압 대전류 펄스전력발생, 플라즈마 발생

이 재 복



1985년 2월: 인하대공대 전기공학과 (공학사)
1987년 2월: 인하대공대 전기공학과 (공학석사)
1999년 2월: 인하대학교 전기공학과 (공학박사)
1987년 2월~현재: 한국전기연구원 차세대 전력망연구본부 전기환경연구센터 책임연구원

[주 관심분야] EMP 대책 설계, 전기전자 통신설비의 서지 대책