

협대역 고출력 전자기파에 의한 포토커플러 영향 분석

이성우, 허창수^a, 서창수, 진인영

인하대학교 전기공학과

The Analysis of Effect for Photocoupler by Narrow-Band High-Power Electromagnetic Wave

Sung-Woo Lee, Chang-Su Huh^a, Chang-Su Seo, and In-Young Jin
 Department of Electrical Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

(Received October 10, 2017; Revised October 18, 2017; Accepted October 23, 2017)

Abstract: This study analyzed the change of electrical characteristics of a photocoupler when a narrow-band electromagnetic wave was combined with the photocoupler. A magnetron (3 kW, 2.45 GHz) was used as the narrow-band electromagnetic source. The EUT was Photocoupler (6N139) and the input signal was divided into two types: a square pulse and the second signal is 0 V. The malfunction of the photocoupler was confirmed by monitoring the variation in the output voltage of the photocoupler. As a result of the experiment, changes in the malfunctioning was observed as the electric field was increased. There are three types of malfunction modes: delay, output voltage off, and fluctuation. Bit errors were analyzed to verify the electrical characteristics of the photocoupler by narrow-band electromagnetic waves. The result of this study can be used as basic data for the effect analysis of photocoupler protection and impact analysis of high-power electromagnetic waves.

Keywords: Narrow-band electromagnetic radiation, Photocoupler, Electrical properties analysis, Bit errors

1. 서론

국가 주요 인프라에 심각한 영향을 끼칠 수 있는 여러 위협 요인 중 하나로 고출력 전자기파가 있다. 이는 요즘 이슈화되고 있는 EMP (electromagnetic pulse)의 다른 말인데, 이 중에서도 특히 전자기기들의 피해를 목적으로 만들어진 HPM (high power microwave), HPEM (high power electromagnetic) 등은 아직 국내에 적절한 방호시설이 구비되어 있지 않다. 이러한 고출력 전자기파

는 전기기기에 내장된 IC나 PCB에 상당한 악영향을 끼치는 것으로 조사된다. 따라서 본 논문에서는 원자력 발전소나 기타 전력망 제어 장비에서 자주 쓰이고 ESD (electrostatic discharge)와 같은 전자파에 취약한 IC 소자인 포토커플러를 선정하여 고출력 전자기파에 대한 내성시험을 하였다 [1]. 포토커플러는 광 신호소자로서 입력과 출력이 절연되어 회로 설계가 간단해지는 장점이 있으며, 고속 스위칭(switcing)과 높은 이득(gain)을 바탕으로 수많은 전자기기에 사용된다. 선진연구에 따르면 많은 전자기기는 L-band (1~2 GHz)와 S-band (2~4 GHz)에서 커플링 영향이 나타나며 이에 따라 기기의 영구 파괴 및 오동작이 발생한다. 따라서 본 논문에서는 협대역 고출력 전자기파에 의한 포토커플러의 특성 변화를 알아보고자 한다.

a. Corresponding author; emblemdo@kopti.re.kr

Copyright ©2018 KIEEME. All rights reserved.
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2. 실험 방법

그림 1은 협대역 고출력 전자기파에 의한 포토커플러의 영향 실험의 구성을 보여 준다. 그림에서 보는 바와 같이 실험 구성은 크게 전자파 소스(3 kW 마그네트론)와 피시험체(EUT, equipment under test), 펄스발생기(pulse generator), 측정 시스템으로 구분된다. IEC-61000-2-13 부록 B의 도파관 외부 방사 실험과 비교하여 도파관 내부 방사 시험을 하였다 [2]. 전계가 보다 집중되며 열적 현상이 심화될 것으로 판단된다.

전자기파 발생 장치는 마그네트론 시스템이 사용되었다. 마그네트론 시스템은 파워 서플라이, 마그네트론, 서큘레이터, 도파관, 더미로드로 구성된다. 파워 서플라이(0~3 kW)는 마그네트론에 전원을 공급하며 입력한 값에 따라 출력되는 전자기파의 크기가 바뀐다. 마그네트론은 2.45 GHz의 CW (continuous wave) 전자기파를 생성하며, 전자기파는 서큘레이터를 통과하여 도파관으로 향한다. 서큘레이터는 소스 방향으로 전자파가 반사되는 것을 방지하며 수냉식으로 동작한다. 협대역 전자기파는 WR-340 구형 도파관(rectangular waveguide)을 따라 진행하고 포토커플러가 놓여 있는 jig를 지나 더미로드에서 열로 소멸한다 [3]. 도파관 내부 전계에 EUT를 놓기 위해 도파관에 구멍을 뚫어 jig를 제작하였다. 협대역 전자기파는 10초간 방사하였으며, 전계마다 10번의 실험을 하였다.

그림 2는 실험에 사용된 EUT (포토커플러)의 특성을

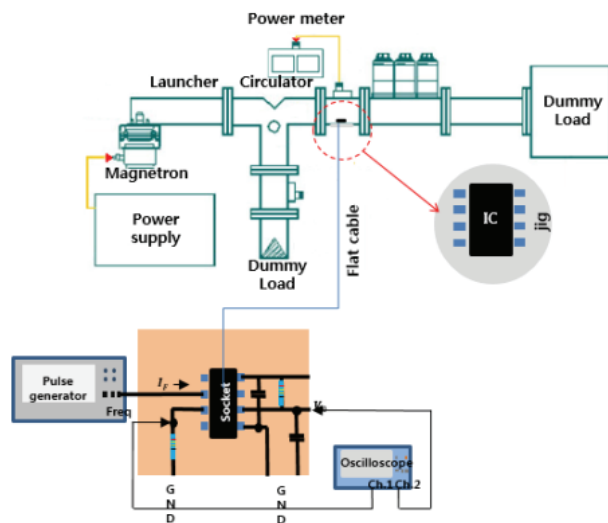


Fig. 1. Experiment setup.

보여준다. 실험에 사용된 포토커플러는 6N-139이 사용되었다. 일반적으로 많이 쓰이는 A사의 제품과 시중에서 가장 저렴하게 판매되고 있는 B사의 제품을 각각 비교 실험하였다.

그림 3은 포토커플러를 도파관 내부에서 실험하기 위해서 제작된 jig에 포토커플러가 고정되도록 소켓을 만들어 고정하였으며, 소켓은 시험회로와 flat cable로 연결하였다. 포토커플러의 이상 상태는 시험회로의 출력 전압시간의 변동으로 판별하였다.

협대역 고출력 전자기파에 의한 포토커플러의 오동작 상태는 특정한 조건하에서 항상 비슷하게 나타나지 않는다. 따라서 동일한 조건에서의 실험을 반복하여 확률적으로 오동작/파괴 모델을 산출하였다.

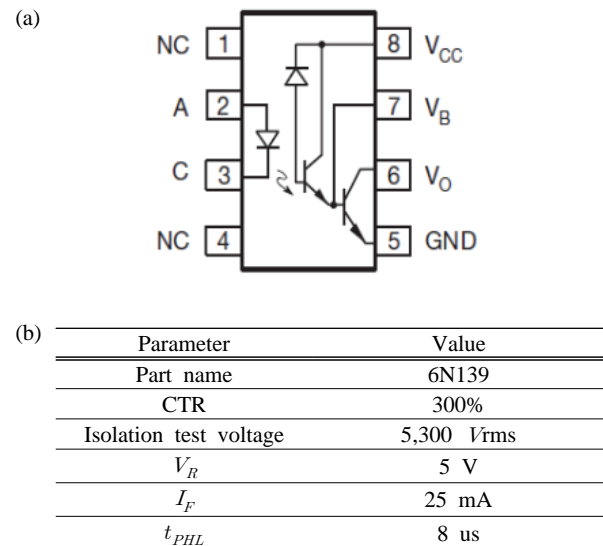


Fig. 2. EUT specification. (a) photocoupler arrangement and (b) photocoupler specification.

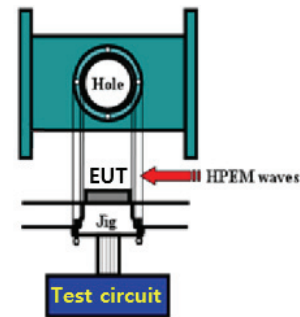


Fig. 3. EUT configuration.

여기서 말하는 오동작은 반도체 소자의 물리적 손상을 의미하지 않고 단지 전자기파가 방사되었을 때 출력 전압에서 측정되는 플리커(노이즈) 또는 반도체 소자의 동작 특성 변화를 말한다. 전자기파 방사가 끝나면 자체적으로 회복되는 reset 현상을 보여주었다. 파괴(destruction)현상은 반도체 소자의 물리적 손상을 의미하며, 정상 동작 특성을 보여주지 못하고 반도체 소자의 교체를 통해서만 시스템의 복구가 가능한 경우를 말한다 [5,6]. 이런 오동작과 파괴 현상을 확률로 나타내기 위해 MT (malfunction threshold), DT (destruction threshold), MB (malfunction bandwidth), DB (destruction bandwidth), MFR (malfunction failure rate), DFR (destruction failure rate)를 각각 사용하였다. MT는 MFR의 임계 5%를 나타내며 오동작이 발생하는 임계 전압을 나타내며, MB는 MFR의 임계 5%에서 95% 사이의 전압 대역폭을 말한다. MFR은 고출력 전자기파에 의해 오동작한 소자의 개수를 동일 조건의 총 실험 소자 개수로 나눈 확률을 뜻한다 [4].

포토커플러는 크게 single TR, daring TR, logic IC 등으로 분류되며 본 실험에서 사용한 포토커플러는 high speed darlington 유형의 소자이다. 이러한 포토커플러의 특징을 이용하여 펄스제너레이터로 주입되는 포토커플러의 입력 전압이 사각 펄스이거나 0 V이면 포토커플러의 출력전압은 on/off 동작을 하거나 4.5 V로 나타나게 된다. 이때 험대역 고출력 전자기파가 포토커플러에 방사되면 출력 전압에 변화가 생기게 되는데, 입력 펄스에 따라 오동작을 구분하였다. 전계에 따른 오동작 모드의 구분과 비트(bit)형식의 오동작을 분석하여 고출력 전자기파가 포토커플러 내부에 어떠한 영향을 주었는지 확인하였다.

| Malfunction | Destruction |
|---|---|
| $MFR = \frac{\text{Number of Malfunctions}}{\text{Total Number of Tested Devices}}$ | $DFR = \frac{\text{Number of Destructions}}{\text{Total Number of Tested Devices}}$ |
| | |

Fig. 4. The definition of malfunction and destruction.

3. 결과 및 고찰

3.1 오동작 모드 측정

그림 5는 펄스제너레이터의 2 V, 1 kHz의 사각 펄스를 포토커플러의 2번 핀에 주입한 상태에서 험대역 전자기파에 의한 포토커플러의 오동작 현상을 보여준다. 오동작 유형은 크게 출력 전압 딜레이, 출력 전압 off, 입력 전압 fluctuation으로 나뉜다. 모든 오동작 유형은 전자파 방사가 끝나면 다시 정상상태로 돌아가는 모습을 보였다. 본 실험의 최대 전계 세기로는 포토커플러의 파괴가 나타나지 않았다. A사와 B사의 포

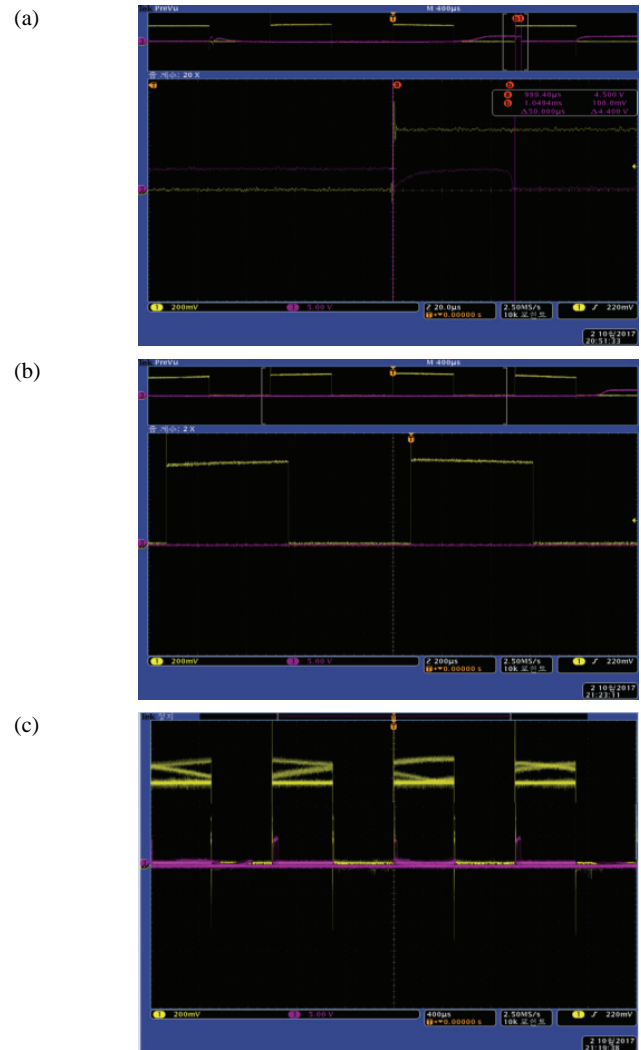


Fig. 5. Photocoupler malfunction mode by high electromagnetic wave (a) delay, (b) output voltage off, and (c) fluctuation.

토커플러 오동작 유형은 같았으며, 오동작 확률 분포도 유사하였다.

출력 전압 딜레이는 비교적 저전계 영역에서 발생하며, 고출력 전자기파의 전계세기에 따라 점점 늘어남을 보여준다. 각 전계에 매번 일정한 딜레이를 보여주지 않기 때문에 10번 반복 실험한 평균값을 확인하였다. 출력 전압 off는 전원 소스가 1,100 W일 때부터 발생했는데, 포토커플러가 사각파형에 따라 on/off 동작을 하지 않고 그대로 0 V 유지하는 현상이 나타났다. 입력 전압 fluctuation은 전원 소스가 1,500 W일 때부터 측정되었으며, 펄스제너레이터에서 포토커플러로 입력되는 사각펄스의 변동을 뜻한다. 각 오동작 유형은 대개 전계 레벨에 따라 구분되지만 같은 전계 레벨에서 복합적으로 나타나는 경우도 있다. 입력 전압 fluctuation의 경우 출력 전압 off 시작 임계값보다 높은 전계에서 발생하므로 기본적으로 출력 전압 off의 동작도 가지고 있다.

3.2 오동작 확률 분석

그림 6, 표 1은 고출력 전자기파의 전계 레벨에 따른 포토커플러의 오동작 모드를 MFR curve로 나타낸 것이다. 오동작 모드의 MT와 MB는 각각 12.06 kV/m, 11.29 kV/m와 24.15 kV/m, 6.29 kV/m 그리고 31.21 kV/m, 1.61 kV/m로 확인되었다. 전계가 높아질수록 각 오동작 모드의 변화를 알 수 있었으며, 발생 확률이 지수 함수적으로 증가하였다.

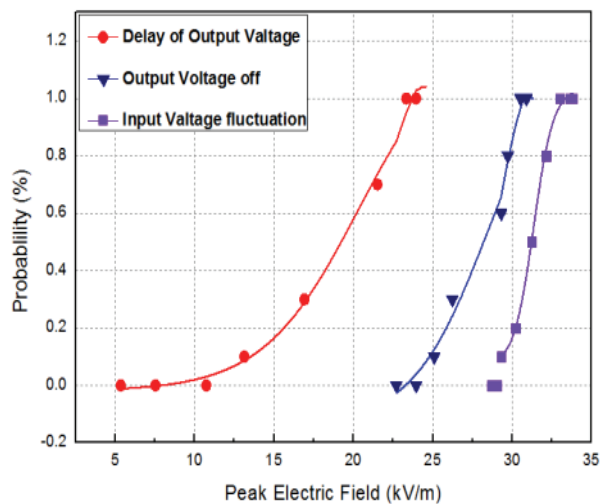


Fig. 6. MFR curve of malfunction modes by E-field.

Table 1. MT, MB, DT and DB of photocoupler.

| Mode | MT [kV/m] | MB [kV/m] | DT [kV/m] | DB [kV/m] |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Delay | 12.06 | 11.29 | - | - |
| Voltage off | 24.15 | 6.29 | - | - |
| Fluctuation | 31.21 | 1.61 | - | - |

3.3 Bit 오류에 의한 포토커플러의 특성 분석

그림 7, 표 2은 포토커플러의 입력 전압이 0 V일 때 고출력 전자기파의 전계 레벨에 따른 출력 전압의 변화를 나타낸 것이다. 출력 전압은 4.5 V로 유지되어야 하지만, 협대역 전자기파의 영향으로 대략 120 Hz의 주파수를 보이며 on/off 동작을 하였다. 이 경우 또한 A사와 B사의 제품의 차이는 없었다. 포토커플러는 내부의 저항과 커패시터로 인해서 특정 주파수(120 Hz)에 반응을 하는 것으로 보였다. 오동작 파형의 상승 시간은 전계가 증가함에 따라 감소하였고, 하강 시간은 전계의 세기와 연관성을 보이지 않았다. 또한 전계가 높아질수록 나타나는 파형의 duty 값이 점점 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 내부 수광 소자

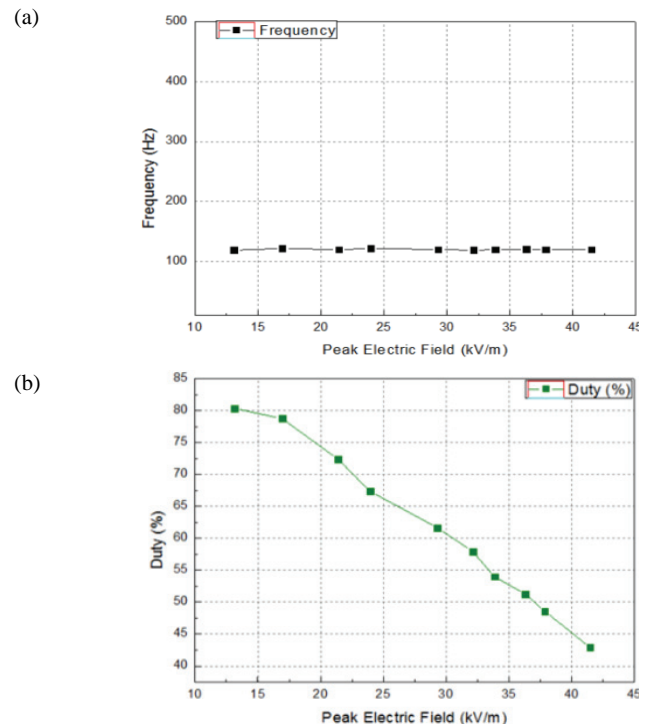


Fig. 7. Parameter change according to electric field intensity. (a) Frequency change and (b) duty change.

Table 2. Frequency, rise/fall time, duty of photocoupler according to electric field.

| Power (W) | Frequency (Hz) | Rise time (us) | Fall time (us) | Duty (%) |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------|
| 500 | 121.7 | 260 | 95.49 | 78.74 |
| 800 | 120 | 203 | 89 | 72.35 |
| 1,000 | 121.7 | 169 | 85 | 67.35 |
| 1,500 | 120.1 | 148 | 100.9 | 61.66 |
| 1,800 | 119 | 133 | 86.6 | 57.95 |
| 2,000 | 119.9 | 124 | 84.87 | 54 |
| 2,300 | 121 | 96.6 | 100 | 51.3 |
| 2,500 | 120 | 92.98 | 174 | 48.6 |
| 3,000 | 120 | 87.2 | 133.6 | 42.95 |

가 120 Hz의 주파수로 반응을 하면서 전계가 증가할수록 반응하는 시간이 길어진다는 것을 의미한다. 협대역 고출력 전자기파가 포토커플러에 방사되면 내부 광 신호 소자에 커플링 되어 의도하지 않은 on/off 현상을 유도하게 된다. 이와 같은 double- heterojunction 구조의 LED는 협대역 고출력 전자기파에 특정한 주파수(120 Hz)로 반응하며 전계의 세기가 강해질수록 LED가 오래 반응한다는 것을 알 수 있었다. 또한 A사와 B사 제품 비교를 통해 협대역 전자기파에 의한 포토커플러의 영향은 시료의 종류에 크게 영향받지 않는 것으로 사료된다.

4. 결론

본 논문에서는 협대역 고출력 전자기파에 의한 포토커플러의 영향 분석을 하였다. 실험 결과로 다음의 결론을 알 수 있었다.

- 1) 협대역 고출력 전자기파로 인한 포토커플러의 오동작 모드는 전계의 세기에 따라 다르게 나타났다. 오동작 모드는 출력 전압 delay, 출력 전압 off, 입력 전압 fluctuation의 3단계로 나타났다. 파괴가 발생하지 않고 전자기파의 방사가 끝나면 곧바로 회복되는 것으로 보아 내부 물리적인 특성 변화는 일어나지 않는 것으로 보이며, 전자파 방사 중에는 커플링 된 전계가 오동작을 유발하는 것을 알 수 있다.
- 2) 포토커플러의 on/off 특성을 제외한 변화를 측정하기 위하여, 입력 신호를 0 V로 주입하여 실험하였다. 전계의 세기에 따른 오동작 파형의 주파수 변화, 상승/하강 시간 변화, duty 값의 변화를 측정하였다. 검출된 커플링 신호는 주파수가

120 Hz이었고, 전계의 세기에 따라 바뀌지 않았다. 또한 오동작 신호의 duty 값은 전계가 커질수록 감소하는 것을 보였는데, 이는 전자기파가 고출력될수록 내부 LED에 더 많이 커플링 되어 수광 소자가 on되는 것을 길어지게 하는 것으로 판단된다. 또한 시료의 종류에 크게 영향받지 않는 모습을 보였다.

추후 이와 같은 포토커플러 단품 실험이 아닌 PCB와 결합되어 있는 소자의 실험을 진행·비교하여 협대역 전자기파에 대한 회로 내의 포토커플러의 취약성을 파악할 수 있을 것으로 본다. 또한 포토커플러의 on/off 특성이 아닌 전류 증폭과 관련된 실험도 필요할 것으로 보인다. 본 연구 결과는 협대역 고출력 전자기파에 의한 포토커플러의 전자기 내성 평가 및 보호 설계 연구의 기초 자료로 사용될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No.20161015201550).

REFERENCES

- [1] M. G. Backstrom and K. G. Lovstrand, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, **46**, 396 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1109/temc.2004.831814>]
- [2] IEC, *IEC 61000-2-13: Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 2-13: Environment - High-Power Electromagnetic (HPME) Environments - Radiated and Conducted* (IEC, Geneva, 2005) p. 12-38.
- [3] J. W. Park, C. S. Huh, C. S. Seo, and S. W. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **29**, 559 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2016.29.9.559>]
- [4] M. Camp, H. Garbe, and D. Nitsch, *Proc. 2002 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility* (IEEE, Minneapolis, USA, 2002) p. 87. [DOI: <https://doi.org/10.1109/isemc.2002.1032453>].
- [5] D. V. Giri, *High-Power Electromagnetic Radiators Nonlethal Weapons and Other Applications* (Harvard University Press, United States, 2004). [DOI: <https://doi.org/10.1109/map.2006.323371>]
- [6] J. I. Hong, S. M. Hwang, and C. S. Huh, *Trans. Korean Inst. Electr. Eng.*, **56**, 1282 (2007).