

협대역 고출력 전자기파로 인한 CMOS IC에서의 오동작 특성 연구

박진욱, 허창수^a, 서창수, 이성우

인하대학교 전기공학과

A Study on Malfunction Mode of CMOS IC Under Narrow-Band High-Power Electromagnetic Wave

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

(Received June 29, 2016; Revised August 8, 2016; Accepted August 11, 2015)

Abstract: This study examined the malfunction mode of the HCMOS IC under narrow-band high-power electromagnetic wave. Magnetron is used to a narrow-band electromagnetic source. MFR (malfunction failure rate) was measured to investigate the HCMOS IC. In addition, we measured the resistance between specific pins of ICs, which are exposed and not exposed to the electromagnetic wave, respectively. As a test result of measurement, malfunction mode is shown in three steps. Flicker mode causing a flicker in LED connected to output pin of IC is dominant in more than 7.96 kV/m electric field. Self-reset mode causing a voltage drop to the input and output of IC during electromagnetic wave radiation is dominant in more than 9.1 kV/m electric field. Power-reset mode making a IC remained malfunction after electromagnetic radiation is dominant in more than 20.89 kV/m. As a measurement result of pin-to-pin resistance of IC, the differences between IC exposed to electromagnetic wave and normal IC were minor. However, the five in two hundred IC show a relatively low resistance. This is considered to be the result of the breakdown of pn junction when latch-up in CMOS occurred. Based on the results, the susceptibility of HCMOS IC can be applied to a basic database to IC protection and impact analysis of narrow-band high-power electromagnetic waves.

Keywords: Magnetron, Narrow-band electromagnetic radiation, Susceptibility, Semiconductor, Intentional electromagnetic interference

1. 서 론

사회 기반 시스템에서 “컴퓨터”의 의존성, 중요도는 점점 커지고 있다. 특히 공항, 병원, 발전소와 같은 사

회 기반 시스템에서의 컴퓨터는 필수 불가결한 요소이다. 컴퓨터는 이러한 시스템에서의 데이터들을 입력, 기억, 연산, 제어, 출력함으로써 시스템이 안정적인 상태를 유지할 수 있도록 한다. 또한 여러 시스템들과 네트워크를 형성하여 전체 시스템이 유기적으로 동작하게 한다.

그림 1은 국가 사회 기반 시스템들의 상호 의존성을 보여 준다.

a. Corresponding author; cshuh@inha.ac.kr

Copyright ©2016 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.

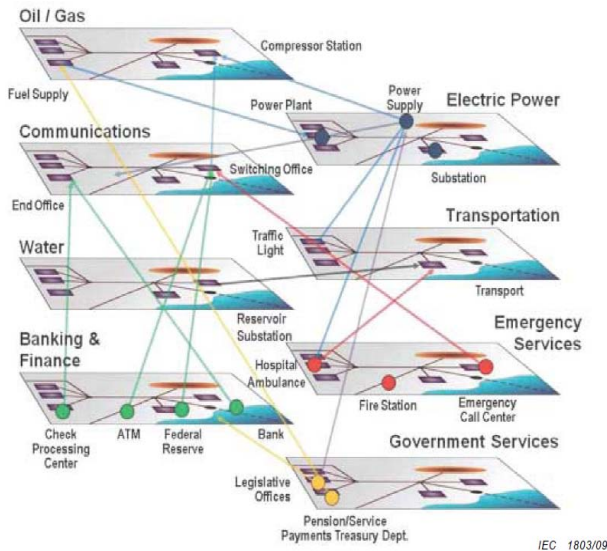


Fig. 1. The interdependence of national infrastructure systems.

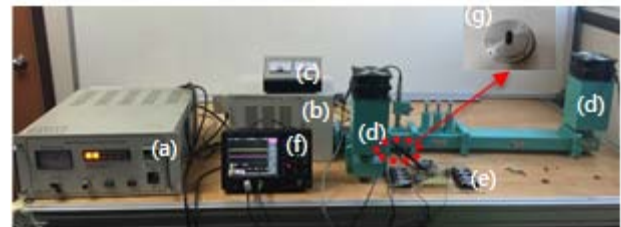
그러나 시스템의 자동화, 정보화, 첨단화를 위해 많은 시스템들이 복잡한 네트워크로 연계됨에 따라 전자기파 교란에 대한 위협이 증가하고 있다. 학계의 보고에 따르면 컴퓨터와 같은 전자기기는 200 Mhz ~ 5 Ghz 주파수 대역의 고출력 전자기 펄스에 치명적인 영향을 받는 것으로 밝혀져 왔다. 그 중 컴퓨터의 제어회로는 특히 전자기 교란에 취약한 것으로 알려져 있다.

시스템에 전자기파가 침투되는 경로로는 일반적으로 안테나와 같은 전자기 센서에서부터 회로의 선로, PCB 트랙, DIP (dual in-line package) IC의 리드 등과 같은 다양한 경로를 통해 유입될 수 있다. 이러한 경로로 흘러들어 온 전자기파는 과도 전류를 발생시키며 네트워크 시스템 중 가장 취약한 소자들에게 피해를 주게 된다. 만일 고출력 전자기파 교란의 발생 후 어떤 소자에 어느 정도의 피해가 발생하였는지를 조사한다면 이를 확인하는데 많은 시간과 비용이 들 것이며, 특별히 중요 시스템의 제어회로에서 이와 같은 현상이 나타난다면 막대한 피해를 발생하게 될 것이다. 따라서 소자 및 회로 구조에 따른 영향 분석을 통해 이에 대비해야 할 것이다. 전자기파 교란원에는 주파수 대역에 따라 크게 광대역 전자기파와 협대역 전자기파로 나눌 수 있는데 본 연구에서는 협대역 전자기파로 인한 HCMOS IC에서의 오동작 특성과 이에 대한 분석 방법에 대해서 알아보려고 한다 [1-4].

2. 실험 방법

실험 구성은 크게 전자기파를 발생시키는 microwave system, DUT (device under test)에 해당하는 IC, IC에 커플링된 전계로 인한 IC의 input · output 핀의 전압 변동을 감시하는 오실로스코프로 구성된다.

그림 2는 협대역 전자기파를 생성하는 microwave system과 이를 DUT의 오동작 유무를 감시하는 오실로스코프를 보여준다.



(a) Power supply
(b) Magnetron
(c) Power meter
(d) Dummy load
(e) Test circuit
(f) Oscilloscope
(g) IC & jig

Fig. 2. Experiment setup.

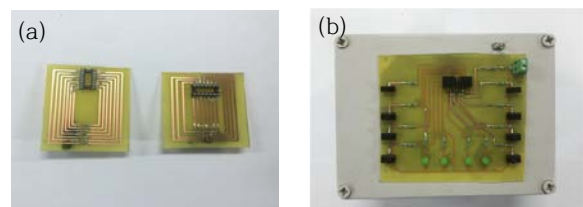


Fig. 3. LED circuit detecting the malfunction of IC. (a) connector connected to the jig and (b) DUT circuit.

전자기파를 생성하는 microsystem은 power supply, magnetron, launcher, 도파관 등으로 구성된다. Power supply는 magnetron에 전원을 공급하는데 이 값에 따라 생성되는 전자기파의 출력이 변동한다. Magnetron은 2.45 ± 0.05 GHz의 전자기파를 생성하며, 0~1,000 W의 정격 출력을 낸다. Magnetron로부터 발생된 전자기파는 launcher와 도파관을 따라서 진행하게 되며 dummy load에서 열에너지로 소비되게 된다.

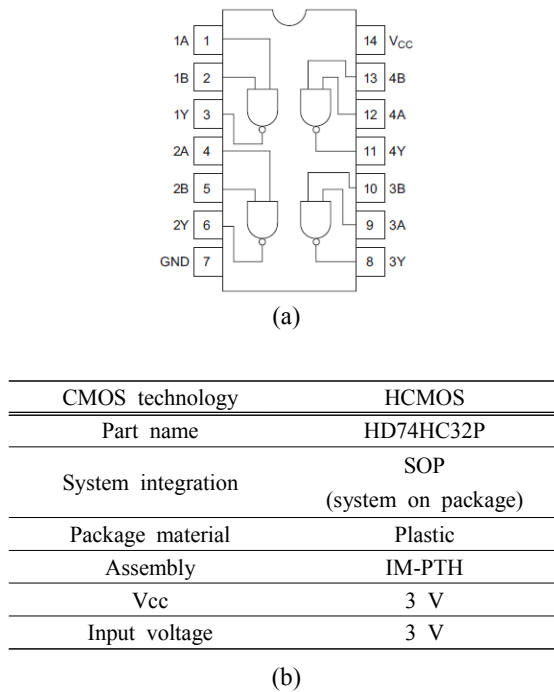


Fig. 4. DUT specification. (a) IC pin arrangement and (b) OR gate IC specification.

DUT를 일정한 전계 하에서 실험하기 위해서 도파관에 구멍을 뚫어 jig를 설치하였다.

그림 3은 IC의 오동작을 육안으로 확인하기 위해 제작된 회로와 도파관 jig에 IC를 장착하기 위해 제작된 회로를 보여준다. DUT는 HCMOS OR gate IC가 사용되었으며 그림 4에서 상세한 사양을 나타내고 있다. IC를 도파관 내부에서 실험하기 위해서 제작된 jig에 IC가 고정되도록 socket을 만들어 그 위에 고정되도록 하였다. 전계에 대한 IC의 방향은 항상 수직이 되도록 하였다. Jig에 장착된 socket은 test circuit와 flat cable로 연결하였으며, IC의 output과 직렬로 연결된 LED를 통해 IC의 동작 상태를 육안으로 확인할 수 있도록 하였다. IC에 커플링 되어 나타는 변화는 IC의 1번 OR gate의 Input2와 output1을 오실로스코프로 감시하였다.

IC의 오동작 특성을 알아보기 위해서 MT, MB와 MFR 그래프를 이용하였다. MFR (malfunction failure rate)은 실험에 사용된 소자 중 오동작한 소자의 개수를 확률로 나타내는 방법을 말하며 식 (1)과 같다. 여기서 오동작이란, IC가 전자기파 입사 중 오동작을 일으킨 후 스스로 정상 동작으로 회복되거나 혹은 reset

후 정상 동작으로 회복하는 것을 말한다.

$$MFR = \frac{\text{Number of Malfunction}}{\text{Total number of Pulses}} \quad (1)$$

MT (malfunction threshold)는 오동작이 발생하기 시작하는 임계 전압으로 MFR의 임계 5%를 나타낸 것이다. 그리고 MB (malfunction bandwidth)는 임계 5%에서 95%까지의 전압 대역폭을 나타낸 것이다 [5].

3. 결과 및 고찰

3.1 도파관 내부의 전계 크기

도파관 내부 방사 실험 시 power meter에서는 P_{peak} 만 측정되므로 전계의 크기는 식 (2)와 식 (3)을 통해 구하였다 [6].

$$P_{peak} = 2P_{av} = \frac{E_0^2 ab}{2Z_{1,0}} \quad (2)$$

$$P_{av} = \frac{E_0^2 ab}{4Z_{1,0}} \quad (3)$$

여기서,

a= 도파관의 내부 가로 길이 [cm]

b= 도파관의 내부 세로 길이 [cm]

$Z_{1,0}$ = $TE_{1,0}$ 모드 임피던스 [Ω]

E_0 = 도파관에서의 peak 전계 강도 [V/m]

을 나타낸다.

본 연구에서 사용된 마그네트론은 S-band용 장비로써 WR-340 도파관이 사용되었다. 따라서 IEC 규격에 따라 a=8.636 cm, b=4.318 cm이 된다. $TE_{1,0}$ 모드 임피던스는 534.5 Ω이므로, 이 값을 식 (2)와 식 (3)에 대입하면, 식 (4)와 식 (5)를 유도할 수 있다. 계산을 통해 얻은 값들은 표 1과 같다 [7].

$$P_{av} = (1.744 \times 10^{-6}) E_0^2 \quad (4)$$

$$E_0 = 757 \sqrt{P_{av}} \text{ [V/m]} \quad (5)$$

Table 1. Relationship between the power and the peak electric field in WR-340.

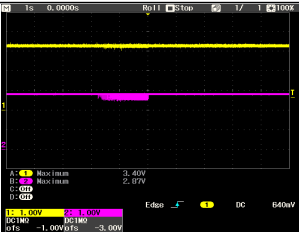
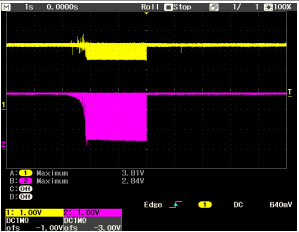
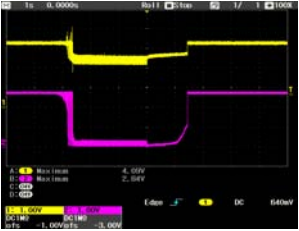
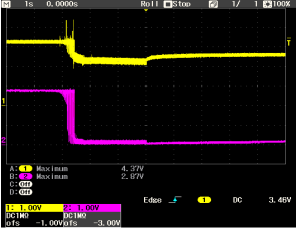
P_{av} [W]	E_0 [kV/m]	P_{av} [W]	E_0 [kV/m]
50	5.35	600	18.54
100	7.57	700	20.03
150	9.27	750	20.73
200	10.71	775	21.07
300	13.11	800	21.41
400	15.14	900	22.71
500	16.93	1,000	23.94

3.2 오동작 분석

IC의 오동작 형태는 크게 3가지로 나타났다.

표 2는 IC에 전자기파가 커플링 되었을 때 나타나는 오동작 모드를 설명한다.

Table 2. Malfunction mode by the electric field.

Mode	Characteristic	Type
Normal	<ul style="list-style-type: none"> Weak noise occurrence 	
Flicker	<ul style="list-style-type: none"> Flicker occurrence Flicker variation by E-field 	
Self-reset	<ul style="list-style-type: none"> Self-reset Recovery time occurrence by E-field 	
Power-reset	<ul style="list-style-type: none"> Power-reset 	

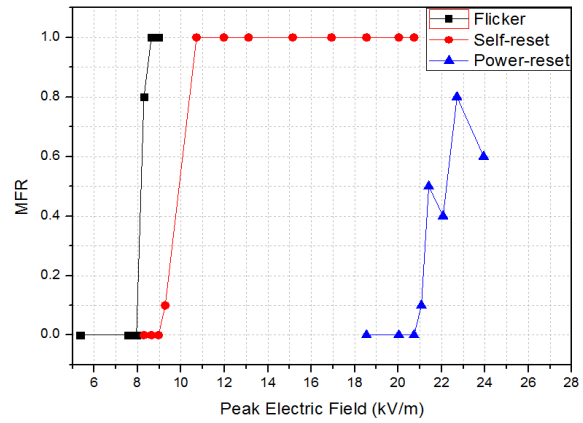


Fig. 5. MFR curve by E-field.

Table 3. MT and MB of IC.

Mode	MT [kV/m]	MB [kV/m]
Flicker	7.96	0.58
Self-reset	9.1	1.5
Power-reset	20.89	-

Normal mode는 전자기파가 발생하였을 때 약간의 노이즈가 발생하거나 혹은 영향을 받지 않는 상태를 말하며 오동작으로 간주하지 않았다. Flicker mode는 전자기파가 방사되는 동안 LED에 플리커 현상을 일으켰다. 그러나 전자기파의 방사가 완료된 시점에서는 다시 제 기능을 회복하였다. Self-reset mode는 전자기파가 방사되는 동안 IC에 오동작을 일으키며 input과 output의 전압 강하를 발생시켰다. 방사가 완료된 후 IC는 제 기능을 회복하였다. 이때 전계의 강도에 따라 회복 시간이 발생하였다. Power-reset mode는 전자기파 방사로 오동작이 발생하여 input과 output의 전압 강하가 발생하고 전자기파 방사가 끝난 후에도 전압 강하의 상태를 유지하였다. 그러나 IC의 Vcc를 reset 할 경우 다시 제 기능을 회복하였다. 선행 연구에 따르면 전계가 더 높아지면서 영구적인 파괴가 발생한다고 보고하고 있다.

그림 5와 표 3은 협대역 전자기파로 인한 IC의 오동작 모드를 MFR curve으로 나타낸 것과 각 레벨에 따른 MT, MB를 나타낸다. 전계가 증가함에 따라 우세하게 나타난 잡음 레벨이 다르게 나타났다. 약 7.96 kV/m 이하의 전계에서는 IC는 약간의 노이즈만 감지할 뿐 정상적으로 동작하였다. 그러나 전계가 증가하면서 output에 연결된 LED에서 플리커 현상을 발생

시키는 flicker mode가 발생하였다. 전계가 9 kV/m를 넘으며 self-reset mode가 발생하기 시작하였다. Self-reset mode의 MB는 1.5 kV/m로 실험에서 나타난 오동작 중 가장 많이 나타났는데 이 mode에서 전계 세기가 증가하면서 전자기 방사 끝난 후 IC의 제 기능으로 돌아오는데 회복시간이 발생하였다. Power-reset mode는 20.89 kV/m 이상의 전계 발생 시 나타나기 시작하였다.

본 실험에서는 23.94 kV/m의 전계까지 실험하였으며 power-reset mode가 100% 발생하는 전계는 찾지 못하였다. 그러나 전계가 증가함에 따라 power-reset mode 확률이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

이와 같은 협대역 전자기파로 인한 IC의 오동작 발생은 latch-up 현상으로 설명할 수 있다. Latch-up 현상이란 CMOS type의 IC 내부의 기생 사이리스터로 인해 칩 내부에 수백 mA 이상의 많은 전류가 흐르는 현상을 말한다. Latch-up 현상이 발생하면 IC의 오동작을 일으키며, 심한 경우 영구적인 파괴를 발생시키기도 한다. 본 실험의 경우 영구적인 파괴는 단 5회만 발생하였다 [8,9].

3.2 Pin-to-pin 저항 분석

실험에 사용된 IC의 pin-to-pin 저항을 측정하여 칩 내부의 물리적인 변화를 추정해 보았으며 그림 6에서 측정된 저항들을 나타내고 있다.

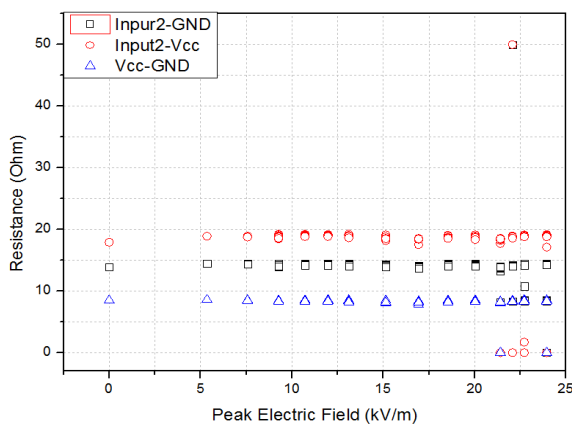


Fig. 6. Pip-to-pip resistance of IC.

협대역 전자기파에 노출되지 않은 normal IC의 Input2-GND, Input2-Vcc, Vcc-GND 저항은 각각

13.9 MΩ, 17.9 MΩ, 8.48 MΩ으로 나타났다. 실험에 사용된 샘플들의 pin-to-pin 저항의 측정 결과는 normal IC의 값들과 유사하였다. 그 이유는 IC들의 오동작을 유발하는 크기의 전계로 인해 일시적인 이상만 일으킬 뿐 물리적인 파괴나 변화까지 도달하지 못하였기 때문으로 추정된다. 그러나 실험에 사용된 200개의 샘플 중 5개의 IC에서 다른 IC에 비해 전기적으로 “short” 상태에 가까운 낮은 저항 값들을 나타냈다. 또한 1개의 IC에서 multimeter의 측정치를 넘는 25 MΩ 이상의 값을 나타냈다. 이는 latch-up 현상 발생 시, 순간적인 서지 전류가 반도체의 pn 접합면의 절연 파괴를 발생시킨 결과 때문인 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 협대역 전자기파로 인한 CMOS IC에서의 오동작 특성을 분석해 보았다. 실험 결과 다음의 결론을 도출해내었다:

1) 협대역 전자기파로 인한 CMOS IC의 오동작 모드는 전계 세기에 따라 flicker, self-reset, power-reset의 3단계로 나타났다. 전계 세기가 증가함에 따라 위의 현상이 순차적으로 나타났으며 IC의 본래 기능을 마비시키는 정도와 빈도가 증가하였다.

2) IC의 오동작을 발생시키는 메커니즘은 오동작 모드에 따라 다르게 나타난 것으로 사료된다. Self-reset의 경우 전자파 방사 시간 혹은 그 이상의 시간에서 일시적인 오동작을 나타내었는데 이는 전자기파로 인한 IC의 온도 증가가 반도체의 온도-저항 특성을 일시적으로 변화시킨 것으로 사료된다. Power-reset의 경우 pn 접합면에서 기생하는 latch-up 현상에 의한 것으로 사료된다.

3) 협대역 전자기파로 인해 오동작을 일으킨 IC들의 pin-to-pin 저항은 normal IC의 것과 거의 동일하였다. 그러나 전기적 “short”와 “open” 상태를 나타내는 저항 값이 일부 IC에서 측정되었다.

본 연구에서 사용된 IC들은 물리적 손상을 나타내는 “파괴 모드”를 나타내지 않았으나 일부 IC에서 내부 저항의 특성 변화가 있었음을 나타내었다. 이는 전자기파 교란에 의해 IC 내부 회로의 저항 변화(물성 변화)가 있었음에도 시스템이 정상적으로 동작할 수 있음

나타낸다. 이와 같은 현상은 추가적인 전자기 스트레스의 누적을 통해 향후 해당 시스템에 더욱 심각한 악영향을 초래할 것으로 사료된다. 따라서 시스템의 동작 상태뿐만 아니라 시스템 내 소자의 물리적 상태를 감시할 수 있는 방법이 요구되는 것으로 판단된다.

본 연구 결과는 IC 보호 및 고출력 전자기파의 영향 분석의 기초 자료로 사용될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20158540000010)

REFERENCES

- [1] W. Radasky and E. Savage, *Intentional Electromagnetic Interference (IEMI) and Its Impact on the US Power Grid. Meta..* 1-3 (2010).
- [2] M. Kreitlow, S. Frank, and H. Garbe, *2015 IEEE International Symposium on EMC*, 1063 (2015).
- [3] D. M. Tasca, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **17**, 364 (1970).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.1970.4325819>]
- [4] M. G. Bäckström and K. G. Lövstrand, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, **46**, 396 (2004). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TEMC.2004.831814>]
- [5] M. Camp, H. Garbe, and D. Nitsch, *IEEE Transactions on EMC*, **1**, 87 (2002).
- [6] D. V. Giri, *High-Power Electromagnetic Radiators Nonlethal Weapons and Other Applications* (Harvard University Press, 2004) p. 36.
- [7] J. I. Hong, S. M. Hwang, and C. S. Huh, *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, **56**, 1282 (2007).
- [8] C. D. Taylor and D. V. Giri, *High-Power Microwave Systems and Effects* (Taylor & Francis, 1994) p. 169.
- [9] S. M. Hwang, J. I. Hong, S. M. Han, C. S. Huh, and J. S. Choi, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, **24**, 1059 (2010).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1163/156939310791586061>]