

고출력 전자기파의 커플링 효과에 의한 마이크로컨트롤러 소자의 피해

The Damage of Microcontroller Devices due to Coupling Effects
by High Power Electromagnetic Wave

홍 주 일*
Hong, Joo-Il

황 선 목*
Hwang, Sun-Mook

허 창 수*
Huh, Chang-Su

ABSTRACT

We investigated the damage effects of microcontroller devices under high power electromagnetic(HP EM) wave. HP EM wave was radiated from the open-ended standard rectangular waveguide(WR-340) to free space. The influence of different reset-, clock-, data-, and power supply-line lengths has been tested. The susceptibility of the tested microcontroller devices was in general much influenced by clock-, reset-, and power supply-line length, little influenced by data-line length. Further the line length was increased, the malfunction threshold was decreased as expected, because more energy couples to the devices. The surfaces of the destroyed microcontroller devices were removed and the chip conditions were investigated with microscope. The microscopic analysis of the damaged devices showed component and bondwire destructions such as breakthroughs and melting due to thermal effects.

주요기술용어(주제어) : High Power Electromagnetic Wave(고출력 전자기파), Microcontroller(마이크로컨트롤러), Malfunction(오동작), Destruction(파괴), Coupling Effect(커플링 효과)

1. 머리말

전자파 환경이란 전자기기들이 목적에 맞게 정상적으로 동작하는 것을 방해하는 전자기적인 주위 상황을 지칭한다. 이와 같은 전자파 환경에는 낙뢰와 같은 자연 현상에 의해 기인한 자연 전자파 환경과 핵폭탄이 공중에서 폭발할 때 넓은 지역에 걸쳐 강력하

게 나타나는 High Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) 및 전자기기들의 피해를 목적으로 의도적으로 만들어낸 High Power Electromagnetic(HP EM), Ultra Wide-Band(UWB), High Power Microwave (HPM)와 같은 인위적 전자파 환경으로 구분될 수 있다^[1-3].

전자기기들은 크게 서로 다른 역할을 수행하며 특정 기능을 수행하는 반도체 소자들과 이러한 반도체 소자와 함께 서로 다른 구성품을 유기적으로 연결시키는 선로로 구성되어 있다. 물론 반도체 소자와 선로로 구성된 하나의 전자기기는 금속의 합체로 둘러

† 2008년 10월 10일 접수~2008년 12월 12일 게재승인

* 인하대학교(Inha University)

주저자 이메일 : g2051091@inhaian.net

싸여 외부 전자기 환경으로부터 보호되어 있으나 전자기기를 구동시키기 위해 사용되는 전원선과 같은 선로 및 합체의 틈과 구멍(slot)에 전자파가 침투되었을 경우 전자기기들은 장애를 일으킬 수 있다. 특히 의도적으로 고안된 HPEM은 공중과 지상에서 사용되는 각종 전자기기들에 강한 전자기적 충격을 주어 본래의 목적과 달리 제 기능을 발휘할 수 없게 만든다^[4-9].

이러한 HPEM은 매우 낮은 주파수로부터 높은 주파수대의 넓은 대역에 걸쳐 높은 전자계를 발생시키기 때문에 각종 전자기기내의 회로가 열화 되고, 반도체 소자내의 접합 상태가 붕괴되며, 안테나 및 케이블 등의 외부 노출에 의해 높은 세력의 간섭 신호가 유기되어 전체적인 계통상에 막대한 지장을 초래한다. 이러한 장애를 유발하는 HPEM의 위협으로부터 전자기기 및 시스템의 보호가 필요하며, 이를 위해 반도체 소자의 오동작 및 파괴 메커니즘을 연구하고 보호 기술을 확보하기 위해 위와 같은 인위적인 전자기 환경에서의 반도체 소자의 거동을 조사하는 것은 의미가 있을 것이다^[4-9].

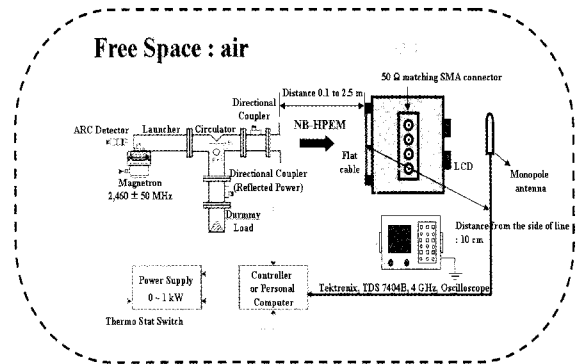
이 연구에서는 주파수뿐만 아니라 전자계가 비교적 높은 인위적인 전자파 환경에서 microcontroller와 유기적으로 연결되어 있는 선로의 coupling effect에 의한 피해 효과를 분석한 것이다. 실험에 사용된 HPEM은 정격 발진주파수가 2,460±50MHz이고, 정격 출력이 0~1,000W로 제어가 가능한 마그네트론이 사용되었다. HPEM에 의해 생성된 에너지가 microcontroller와 연결되어 있는 reset-, clock-, data-, power supply-line에 유기될 때 나타나는 피해 효과를 선로 변화에 따라 조사하였다. 이러한 실험 결과를 바탕으로 HPEM에 의한 반도체 소자의 영향을 이해하는데 도움이 되고자 하였다.

2. 본 론

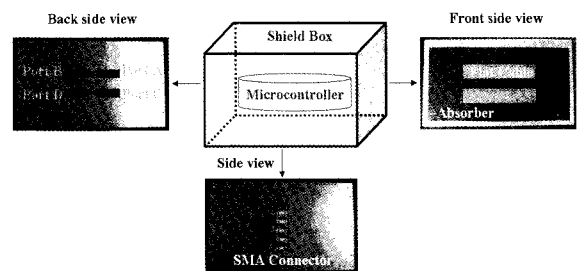
가. 실험 방법

이 연구에서는 전자기기들이 목적에 맞게 동작하는 것을 의도적으로 방해하는 전자파원으로 전자기기들의 주요 구성요소인 반도체 소자에 영향을 미칠 수 있는

비교적 주파수가 높고, 고출력을 발생시키는 조작이 간편하고 안정적인 magnetron을 사용하였다^[3-5]. 실험에 사용된 magnetron의 정격 발진 주파수는 2,460±50MHz의 narrow band이며, 정격 고주파 출력은 0~1,000W까지 조절이 가능하다. 이렇게 magnetron으로부터 발생된 고출력 전자기파(HPEM wave : High Power Electromagnetic wave)는 끝단이 개방되어있는 규격 WR-340 구형 도파관(open-ended waveguide)을 따라 전파되어 자유공간(free space : air)으로 그림 1의 (a)와 같이 5초간 방사된다. 이렇게 자유공간으로 방사되는 HPEM wave가 microcontroller와 유기적으로 연결된 선로에 커플링될 경우의 피해 효과를 그림 1의 (b)와 같이 구성하여 비교 검토 하였다. HPEM wave는 외부로 노출된 특정 선로(clock-, reset-, data-, power supply-line)에 유기되어 금속으로 둘러싸인 차폐함 내부에 있는 MC로 침투하게 된다. 이 때 시스템 외부는 그림 1의



(a) System setup



(b) EUT setup

[그림 1] 자유공간으로 방사되는 HPEM wave에 의한 피해 효과 시험

[표 1] 마이크로컨트롤러의 특징

Features	
AT mega 8515	High-performance, Low-power AVR 8-bit microcontroller
	RISC(Reduced Instruction Set Computer) Architecture
	Nonvolatile Program and Data Memories - 8K Bytes of In-System Self-Programmable Flash - 512 Bytes EEPROM - 512 Bytes Internal SRAM
	I/O and Packages - 35 Programmable I/O Lines - 40-pin PDIP
AT mega 16	High-performance, Low-power AVR 8-bit microcontroller
	Advanced RISC(Reduced Instruction Set Computer) Architecture
	Nonvolatile Program and Data Memories - 16K Bytes of In-System Self-Programmable Flash - 512 Bytes EEPROM - 1K Byte Internal SRAM
	I/O and Packages - 32 Programmable I/O Lines - 40-pin PDIP

(b)와 같이 흡수체를 부착하여 특정 선로에만 HPEM wave가 유기 되도록 구성하였다. 여기서, 특정 선로 길이 변화에 따른 피해 효과 분석을 위해 선로에 적절한 에너지가 유기되도록 특정 선로의 길이를 HPEM wave의 파장($f=2.46\text{GHz}$, $\lambda=12.24\text{cm}$)을 기준으로 flat cable을 사용하여 각각 3.06cm, 6.12cm, 12.24cm, 24.48cm로 선정하였다^[5].

Microcontroller를 활용하여 구성된 LCD(16×2) 구동회로는 HPEM wave에 의해 microcontroller가 어떻게 동작하는지 실시간 육안 관찰하기 위해 부하로서 사용되었다. 사용된 microcontroller의 특징은 표 1과 같으며, 각각의 microcontroller는 package 내부에 4개의 port로 구성되어 있다. 따라서 각각의 port에 대한 이상 유무를 동시에 확인하기 위해 port 당 각각의 LCD 첫 번째 줄에 무슨 port인지 표시하는 “HERE IS PORT(A~D)”, 두 번째 줄에는 “INHA UNIVERSITY”라는 문구가 표시되도록 프로그램 하여 실험하였다. Reset-, Clock-, Data-, Power

supply-line에 HPEM wave에 의한 커플링 에너지가 microcontroller 내부로 침투될 경우 LCD에 표현된 문구가 잘못 표기되거나 문구의 손실이 발생하게 된다. 또는 LCD의 표시 문자가 완전히 사라지거나 깜박이는 커서가 첫줄의 가장 왼쪽으로 옮겨가는 “clear display” 상태가 된다. 위와 같은 이상 상태에서 reset 버튼에 의해 정상 동작되거나 power 스위치의 off/on에 의해 정상 동작하는 경우를 오동작으로 판정하였고, 정상 동작되지 않은 경우를 파괴로 판정하였다. 또한 NB-HPEM wave에 의해 파괴되어진 MC의 내부 칩 상태 변화 관찰을 위해 몰딩 되어 있는 microcontroller 표면을 제거하는 디캡(decap) 과정을 거친 후 microscope를 사용하여 내부 칩의 상태 변화를 관찰함으로써 파괴 현상을 분석하였다.

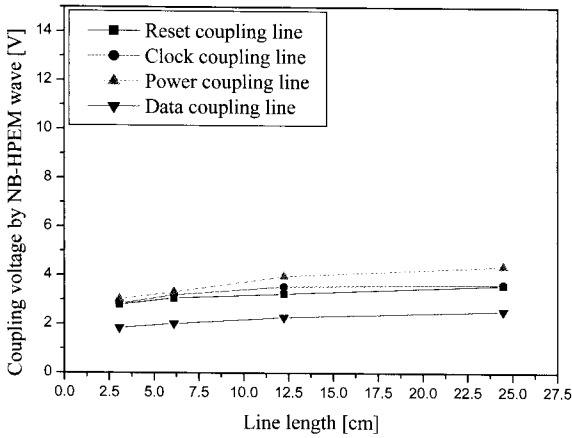
나. 실험 결과 및 고찰

HPEM wave가 방사되어 microcontroller와 연결되어 있는 특정 선로에 유기될 때 나타나는 전압을 E-field의 편파 방향과 선로의 진행 방향이 수직인 경우와 수평인 경우로 나누어 조사한 결과를 그림 2에 나타내었다. 선로의 길이가 길어지면 유기되는 전압의 크기는 점차 증가하였다^[6~8].

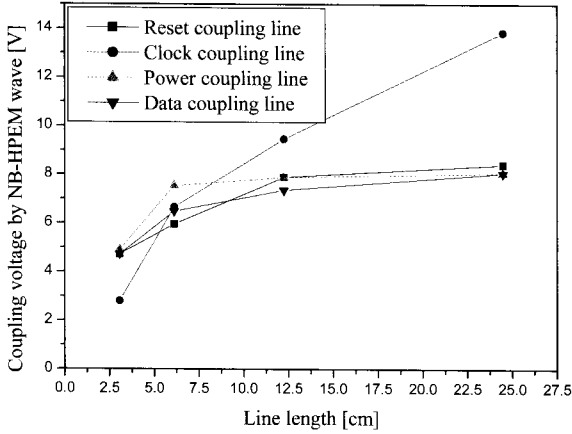
특히 커플링 양이 가장 적은 3.06cm 선로에서는 수직 일 때 $1.84V_{\min} \sim 3.027V_{\max}$ 보다 수평 일 때 $2.803V_{\min} \sim 4.906V_{\max}$ 로 더 많은 전압이 유기 되었으며, 커플링 양이 가장 많은 24.48cm 선로에서는 수직 일 때 $2.54V_{\min} \sim 4.378V_{\max}$ 보다 수평 일 때 $8.059V_{\min} \sim 13.84V_{\max}$ 로 더 많은 전압이 유기 되었다. 따라서 HPEM wave의 coupling 효과에 의한 microcontroller의 피해를 용이하게 조사하기 위해 E-field의 편파 방향과 선로의 방향이 수평일 경우에 대해 조사하였다.

참고문헌 6~8의 연구자들은 전자기 펄스에 의한 반도체 소자의 오동작 및 파괴 확률 정의하였고 이 연구에서는 식 (1)과 식 (2)와 같이 microcontroller의 오동작 및 파괴 발생 횟수를 5초간 방사시킨 HPEM wave의 시험 횟수로 나눈 것으로 정의하여 분석하였다^[6~8].

$$MFR = \frac{\text{Number of Malfunctions}}{\text{Number of Tests}} \times 100 [\%] \quad (1)$$



(a) Vertical



(b) Horizontal

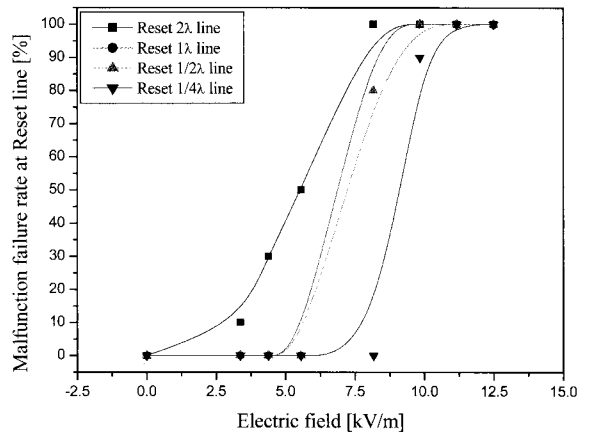
[그림 2] NB-HPEM wave에 의한 E-field(1.91kV/m)의 편파 방향과 선로의 방향에 따른 커플링 전압

$$DFR = \frac{\text{Number of Destructions}}{\text{Number of Tests}} \times 100 [\%] \quad (2)$$

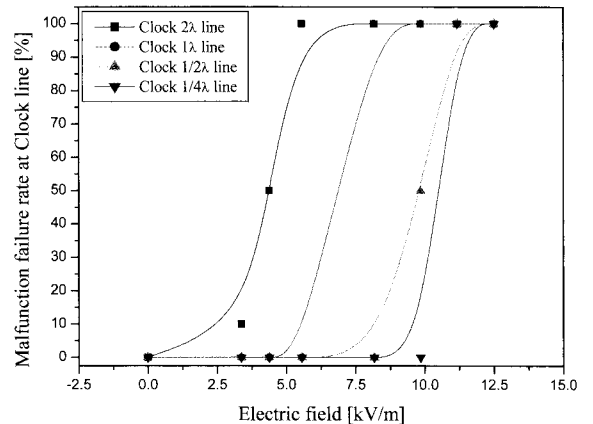
HPEM wave의 coupling effects에 의한 microcontroller의 오동작 유형은 크게 두 가지로 나타났다. Microcontroller가 정상 동작할 경우 LCD의 첫 번째 열에는 “HERE IS PORT(A~D)”, 두 번째 줄에는 “INHA UNIVERSITY”라는 문자가 표시된다. 이 때 HPEM wave에 의해 오동작이 발생하면 LCD의 문자는 “He&# I3 pOR\$A”, “Inh@ eRSIT\ ”

의 예와 같이 문자의 변형과 손실이 나타나며, LCD의 표시 문자가 완전히 사라지거나 깜박이는 커서가 첫 번째 열의 가장 왼쪽으로 옮겨가는 “clear display” 상태가 된다.

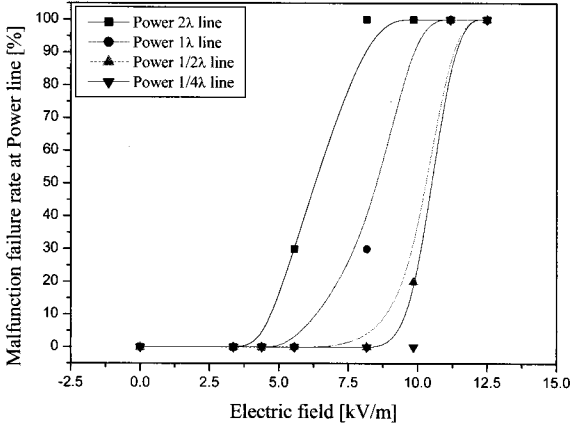
특정 선로의 길이 변화에 따른 HPEM wave에 의한 microcontroller의 오동작 확률을 그림 3과 그림 4에 나타내었다. Reset-, Clock-, Power supply-line은 Data line에 비해 낮은 전계 강도에서 넓은 분포로 오동작이 발생하여 HPEM wave에 민감하다는 것을 알 수 있다. HPEM wave에 노출 전 Reset-, Clock-, Data-, Power supply-line에 나타나는 전압은 각각 90~210mV, 2~3V, 1~2V, 3~4V였다. Reset-, Clock-, Power supply-line이 각각 HPEM



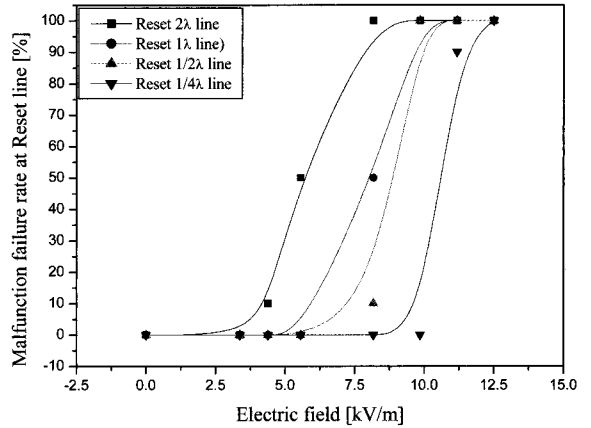
(a) MFR of reset lines



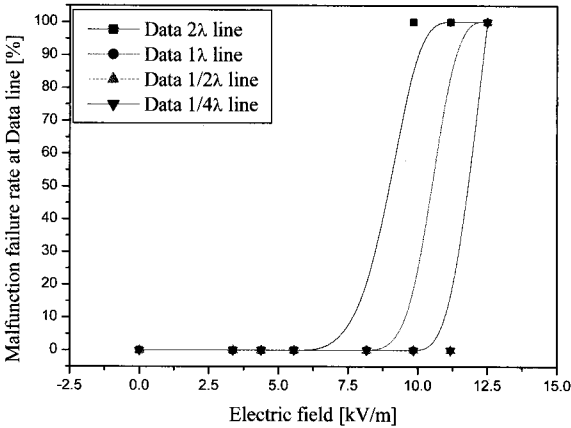
(b) MFR of clock lines



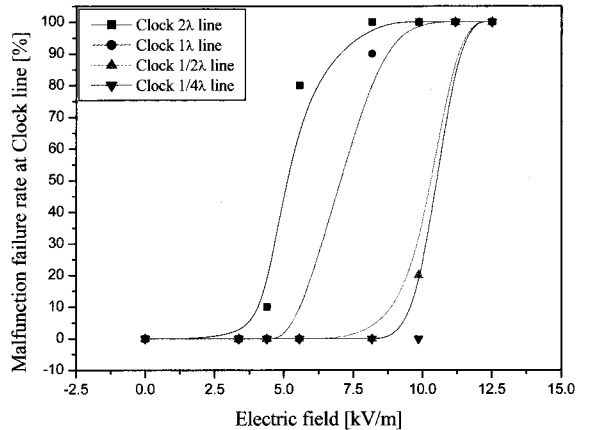
(c) MFR of power lines



(a) MFR of reset lines



(d) MFR of data lines

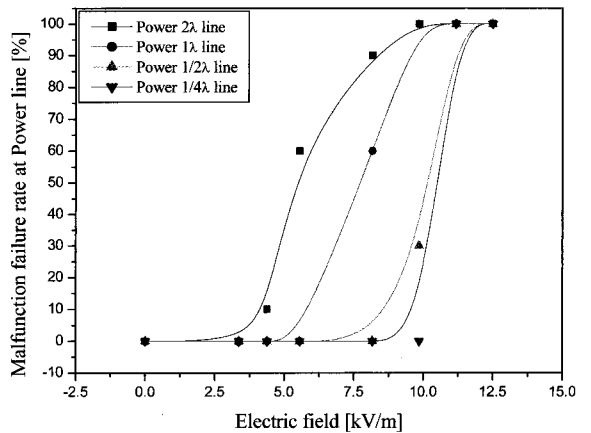


(b) MFR of clock lines

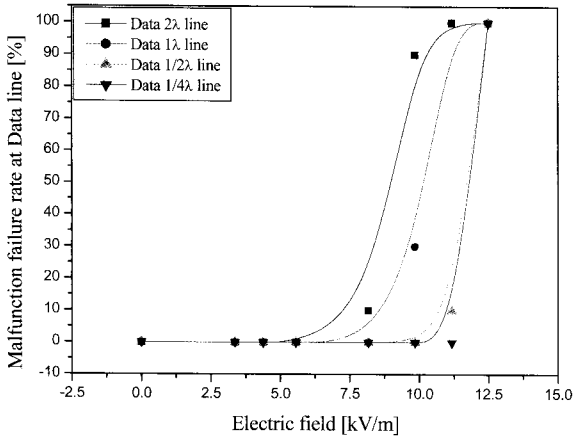
[그림 3] ATmega8515의 특정 선로 길이 변화에 따른 HPEM wave에 의한 피해 효과

wave에 노출 후 오동작이 발생될 때 나타나는 전압은 약 15~20V이었으며, Data line의 경우 약 30V이었다.

Microcontroller와 연결되어있는 특정 선로 중 한 개의 선로는 HPEM wave에 노출시키고, 나머지 선로는 차폐된 합체 내부에 위치시켰을 때 HPEM wave에 microcontroller가 오동작이 발생 시 노출된 선로와 노출되지 않은 선로의 나타나는 전압을 측정하였다. HPEM wave에 노출 전 Reset-, Clock-, Data-, Power supply-line에 나타나는 전압은 각각 90~210 mV, 2~3V, 1~2V, 3~4V이었으며, HPEM wave에



(c) MFR of power lines



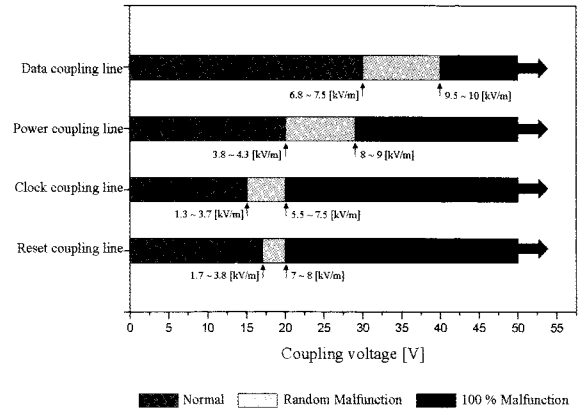
(d) MFR of data lines

[그림 4] ATmega16의 특정 선로 길이 변화에 따른 HPEM wave에 의한 피해 효과

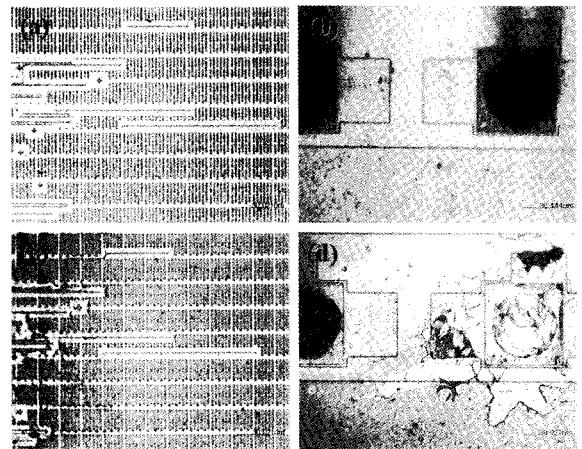
노출 후 노출된 선로에 유기되는 전압을 제외하고 함체 내부에 있는 선로들에 나타나는 전압은 각각 1.9 ~ 4.5V, 18 ~ 25V, 8 ~ 25V, 2.7 ~ 18.1V였다. 따라서 microcontroller와 연결되어있는 선로의 커플링 효과에 의한 오동작은 clock에 의한 영향 때문인 것으로 판단된다.

Microcontroller는 프로그램이 저장된 flash memory에서 순차적으로 명령어를 SRAM의 instruction register로 읽어온다. 이렇게 읽어 들인 명령어가 해석되어 포트의 입력, 출력, interrupt 등의 기능을 수행하게 된다. 여기서 clock은 명령어를 처리하기 위한 펄스 신호로서 이 clock 속도에 맞춰 데이터를 입출력하고, 내부 프로그램을 단계 별로 수행하게 된다. 명령어의 실행은 입력되는 clock의 rising edge, falling edge, 또는 both edges 마다 수행된다. HPEM wave가 clock-line에 유기되거나 다른 선로에 의해 clock의 속도 및 파형을 변형되어 rising edge, falling edge, 또는 both edges를 정상적으로 검색 할 수 없게 만들기 때문에 그 순간에 실행되고 있던 명령어가 정상적으로 처리될 수 없게 된다. 따라서 LCD에 출력되는 문자가 손실되거나 변형이 발생하는 것으로 사료된다.

고분자로 몰딩되어 있는 microcontroller의 표면을 제거(decapsulation)하여 내부 칩 상태를 광학현미경으



[그림 5] HPEM wave의 coupling effects에 의한 microcontroller의 오동작 발생 전압



[그림 6] HPEM wave에 의한 microcontroller의 파괴

로 관찰하였고, ATmega8515와 ATmega16의 HPEM wave에 의한 피해를 그림 6에 나타내었다. HPEM wave에 의한 반도체 소자 내부 칩의 전형적인 파괴 형태는 크게 세 가지로 나타낼 수 있다. 첫째 반도체 소자 내부 칩에 패턴 형식으로 구성된 다이오드, 트랜지스터, 저항과 같은 component의 손상, 둘째 전계가 증가하면 칩에 형성된 트레이 녹는 onchipwire의 손상과 동시에 다수의 component의 손상, 셋째 더욱 전계가 증가하면 반도체 내부 칩과 리드 프레임(lead frame)을 연결하는 bondwire의 손상 및 동시에 onchipwire와 다수의 component의 손상이 있다. HPEM wave에 의한 MC의 파괴 형태도 반도체 소

자의 파괴 형태와 같이 component, onchipwire, bondwire의 손상이 관찰되었다. 여기서 onchipwire와 bondwire의 파괴는 재료의 녹는 형태로 발생되는데 이러한 현상은 패키지 내부 칩 위의 교차점에 매우 높은 전계가 집중되어 금속선은 6ns 시간에 1,000K 이상의 온도로 상승하여 금속이 녹는 열적 파괴에 도달하기 때문이다^[8]. HPEM wave에 의해 패키지 내부 칩에 형성되는 높은 전계 밀도에 의해 microcontroller의 내부 칩 회로가 short 또는 open 되어 이때 발생하는 순간적인 큰 전류에 의해 금속 배선이 녹는 열적 파괴가 발생하는 것으로 사료된다⁽⁶⁻¹¹⁾.

3. 맺음말

자유공간으로 방사되는 주파수 범위가 좁은 High Power Electromagnetic wave가 microcontroller와 연결되어 있는 서로 다른 길이의 선로에 커플링 될 경우 나타나는 피해 효과를 조사하였다. HPEM wave에 의한 E-field의 편파 방향과 선로의 방향이 수직일 경우 보다 수평일 경우 많은 양의 에너지가 선로에 유기되어 수평일 경우를 대상으로 조사하였다. 제조 특성상 정해지는 각 핀의 부하 크기로 인해 특정 선로에 커플링 되는 에너지는 다르게 나타나지만 에너지 레벨에 따라 각각의 특정 선로마다 민감성(susceptibility)이 다르게 나타나며, 실험 결과 Reset line, Clock line, Power supply line에 의한 영향이 많았고, Data line에 의한 영향이 가장 적었다.

HPEM wave에 노출된 Reset line, Clock line, Power supply line에 유기되는 전압이 약 20V 이상 이되면 microcontroller는 오동작이 발생하기 시작하며, Data line은 약 30V 이상이 유기되면 오동작이 발생하였다. 그러나 HPEM wave 노출된 선로에 유기되는 전압을 제외하고 함체 내부에 있는 선로들에 나타나는 전압은 각각 분석한 결과 microcontroller와 연결되어있는 선로의 커플링 효과에 의한 오동작은 clock에 의한 영향 때문인 것으로 판단된다.

HPEM wave에 의해 파괴된 microcontroller의 내부 칩을 분석한 결과 칩 회로의 특이 분기점에 높은 전계가 집중되어 증가하는 전류에 의해 회로가 short

또는 open 되어 이때 발생하는 순간적인 큰 전류에 의해 금속 배선이 녹는 열적 파괴 현상이 관찰되었다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소 지원에 의한 연구 결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] C. H. Diaz, S. M. Kang, C. Duvvury, "Modeling of Electrical Overstress in Integrated Circuits", Kluwer Academic Publishers, Boston, 1995.
- [2] D. V. Giri and F. M. Tesche, "Classification of Intentional Electromagnetic Environments (IEME)," IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, Vol. 46, No. 3, pp. 322~328, 2004.
- [3] D. V. Giri, "High-power Electromagnetic Radiators Nonlethal Weapons and Other Applications", Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, and London, England, pp. 36~40, 2004.
- [4] Clayborne D. Taylor, D. V. Giri, "High-Power Microwave Systems and Effects", Taylor & Francis, Washington D. C., 1994.
- [5] 홍주일, 황선목, 김광용, 허창수, 허욱열, 최진수, "고출력 과도 전자파 커플링 효과에 의한 microcontroller의 민감성", 한국군사과학기술학회, 2008 종합학술대회, pp. 622~625, Aug. 2008.
- [6] M. Camp, H. Garbe, D. Nitsch, "UWB and EMP Susceptibility of Modern Electronics", Electromagnetic Compatibility, 2001 IEEE International Symposium on, Vol. 2, pp. 1015~1020, Aug., 2001.
- [7] M. Camp, H. Girth, H. Garbe, "Predicting the Breakdown Behavior of Microcontrollers Under EMP/UWB Impact Using a Statistical Analysis",

- IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 46, No. 3, pp. 368~379, Aug., 2004.
- [8] S. Korte, M. Camp, H. Garbe, "Hardware and Software Simulation of Transient Pulse Impact on Integrated Circuits", Electromagnetic Compatibility, 2005 IEEE International Symposium on, Vol. 2, pp. 489~494, Aug., 2005.
- [9] G. B. Mats, G. L. Karl, "Susceptibility of Electronic Systems to High-Power Microwaves : Summary of Test Experience", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 46, No. 3, pp. 396~403, 2004.
- [10] Steven H. Voldman, "The Impact of Technology Scaling on ESD Robustness of Aluminum and Copper Interconnects in Advanced Semiconductor Technologies", Components, Packaging, and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on, Vol. 21, No. 4, pp. 265~277, Oct., 1998.
- [11] E. A. Amerasekera, D. S. Campbell, "Failure Mechanisms in Semiconductor Devices", John Wiley & Sons, 1987.