

인위적인 전자파에 의한 TTL IC의 오동작 및 파괴 특성

홍주일[†] · 황선목 · 허창수

인하대학교 전기공학과

(2007. 5. 14. 접수 / 2007. 9. 2. 채택)

Breakdown and Destruction Characteristics of the TTL IC by the Artificial Microwave

Joo-Il Hong[†] · Sun-Mook Hwang · Chang-Su Huh

Department of Electrical Engineering, Inha University

(Received May 14, 2007 / Accepted September 2, 2007)

Abstract : We investigated the damage of the TTL ICs which manufactured five different technologies by artificial microwave. The artificial microwave was rated at a microwave output from 0 to 1000W, at a frequency of 2.45GHz. The microwave power was extracted into a standard rectangular waveguide(WR-340) and TTL ICs were located into the waveguide. TTL ICs were damaged two types. One is breakdown which means no physical damage is done to the system and after a reset the system is going back into function. The other is destruction which means a physical damage of the system so that the system will not recover without a hardware repair. TTL SN74S08N and SN74ALS08N devices get a breakdown and destruction occurred but TTL SN74LS08N, SN74AS08N and 74F08N devices get a destruction occurred. Also destructed TTL ICs were removed their surface and a chip conditions were analyzed by SEM. The SEM analysis of the damaged devices showed onchipwire and bondwire destruction like melting due to thermal effect. The tested results expect to be applied to the fundamental data which interprets the combination mechanism of the semiconductors from artificial microwave environment.

Key Words : artificial microwave, TTL IC, semiconductor, breakdown, destruction

1. 서 론

각종 반도체 소자의 IC화는 시스템을 점점 소형화 및 경량화 시킬 수 있을 뿐만 아니라 이로 인하여 시스템의 신뢰성과 경제성을 향상시키고, 조작 및 제어를 용이하게 하였다. 그러나 반도체 IC가 점차 저전압, 소형화, 고밀도 실장화로 발전함에 따라 IC의 절연 내력이 낮아지고 전원 회로, 통신회로, 감시·제어 회로 등이 망상화 되어 회로 및 IC에 유도되는 순간적으로 매우 높은 전압에 의해 IC가 일시적인 오동작 및 영구적인 파괴와 같은 장애를 유발시켜 IC로 구성되는 전자기기가 원래의 목표대로 동작하지 못하는 문제점들이 나타나고 있다. 특히 뇌서지나 정전기 및 과도 전자파에 의한 반도체 소자의 피해는 의료 기기 및 군용 장비, 항공기와 자

동차와 같은 운송기기의 손상으로 인한 인명 피해를 초래할 수 있을 뿐만 아니라 생산 공정에서 사용되는 전자기기의 손상으로 인한 시스템의 정지는 막대한 물질적 손상을 초래할 수 있다¹⁻³⁾.

이러한 여러 전자기기의 피해를 줄이기 위해 어떠한 메카니즘으로 반도체 소자가 전자파에 의해 영향을 받는지 여러 연구자에 의해 연구 중이다¹⁻⁹⁾. 특히 독일의 M. Camp는 펄스폭이 매우 짧은 인위적으로 발생된 방사 전자파에 의한 반도체 소자의 피해를 집중 연구하였다⁷⁻⁹⁾. 그러나 그의 연구에서는 반도체 소자 자체가 전자파에 의해 받는 영향뿐만 아니라 반도체 소자를 구동시키기 위해 연결되는 구동 전원선과 같은 부수적인 선로에도 전자파가 동시에 유기되어 오동작 및 파괴 현상이 나타나기 때문에 반도체 소자 자체의 전자파에 의한 전자파 환경을 정량화하기에 문제가 있다. 또한 M. Camp가 실험한 전자파는 펄스폭이 매우 짧은 단 펄스에 의한

[†] To whom correspondence should be addressed.
g2051091@inhaian.net

영향으로 특정한 전자파 환경에서의 영향으로 제한되기 때문에, 현장 환경에서 나타나는 연속적인 전자파(CW : continuous wave)에 의한 영향도 고찰할 필요가 있다.

이 연구에서는 주파수뿐만 아니라 전자계가 높은 인위적인 전자파 환경에서 반도체 소자의 피해 효과를 분석한 것이다. 발진주파수가 2.45GHz이며, 정격 출력이 0~1,000 W인 마그네트론에서 인위적으로 발생하는 연속적인 전자파에 의해 TTL IC의 영향을 시험하였다. 이 전자파에 의해 오동작 및 파괴된 TTL IC의 피해를 조사하였고, 실험을 통하여 파괴된 반도체 소자의 내부 칩 상태를 전자주사현미경(Scanning electron microscope : SEM)을 사용하여 파괴 현상을 분석하였다. 이러한 실험 결과는 전자파에 의한 반도체 소자의 피해 효과를 이해하는데 도움이 될 것으로 예상된다.

2. 실험

인위적으로 발생시킨 전자파에 의한 반도체 소자의 피해 효과를 알아보기 위해 TTL 기반 기술의 플라스틱 DIP형의 AND 논리 소자를 사용하였다. 여기서 TTL AND 논리 소자는 서로 다른 제조 기술을 바탕으로 동작 속도 개선이나 소비전력 감소 등을 목적으로 각각 개발 되었으며, 이러한 제조 기술 차이가 전자파에 어떻게 영향을 받는지 조사하였다. Table 1은 실험에 사용된 TTL AND 논리 소자로서 제조 기술에 따라 5가지 다른 형태로 분류된 TTL AND 논리 소자의 Part Code를 나타낸 것이다.

전자 장비를 구성하는 많은 요소들 중 하나인 반도체 소자들의 인위적으로 발생된 전자파에 의한 영향을 조사하기 위해 수십에서 수백 GHz의 높은 주파수를 가지고, 고에너지를 발생시키는 발생장치를 사용하는 것은 인체뿐만 아니라 주위 전자장비들에게 위협을 초래할 수 있고, 제작 또한 어려운 일이다. 따라서 이 연구에서는 비교적 주파수가 높고, 고출력을 발생시키며, 조작이 간편한 마그네트

론(magnetron)을 사용하였다¹⁾. 시험에 사용된 마그네트론은 발진 주파수가 $2,450 \pm 50\text{MHz}$ 이며, 정격 고주파 출력이 0~1,000W까지 조절이 가능하여 전자파 세기에 따른 IC의 피해를 조사하기 적당하다. 마그네트론으로부터 발생하는 전자파는 규격 WR-340 구형 도파관을 따라 전달되며, 도파관내에 위치한 피시험체인 반도체 소자에 5초간 방사되도록 하였다. 도파관을 따라 방사되는 전자파의 세기는 Directional coupler의 probe로 전자파가 전달되어 유기되는 전자파 세기를 Power meter로 측정하게 되며, 측정 probe 아래에 IC가 위치되도록 하였다. 전자파가 도파관 끝단에서 반사되어 되돌아오는 반사파에 의한 영향을 최소화하기 위해 공랭식의 Termination을 장착하여 IC는 도파관을 따라 입사되는 전자파에 의해서만 영향을 받도록 하였다.

인위적으로 발생된 전자파가 실험에 사용된 반도체 소자에 인가될 때 나타나는 피해 효과를 확인하기 위해 LED 구동 회로를 구성하여 육안 식별이 가능하게 하였으며, Fig. 1은 구성된 실험 장치를 나타낸 것이다. 전자파에 의해 파괴되어진 반도체 소자는 내부 칩 상태 변화 관찰을 위해 몰딩되어 있는 반도체 표면을 제거하는 디캡(decap) 과정을 거친 후 SEM을 사용하여 내부 칩의 상태 변화를 관찰함으로써 파괴 현상을 분석하였다.

3. 실험결과 및 분석

피시험체인 각각의 TTL 계열의 SN74**08N 소자들은 4개의 AND 게이트로 이루어져 있으며, 각각 2개의 입력과 1개의 출력을 가지고 있다. 각각의 AND 소자들은 입력이 모두 High일 때 출력이 High

Table 1. Tested Technologies

TTL Technology	Low power schottky(LS)	SN74LS08N
	Advanced schottky(AS)	SN74AS08N
	Advanced low power schottky(ALS)	SN74ALS08N
	Schottky(S)	SN74S08N
	Fairchild advanced schottky(F)	74F08N

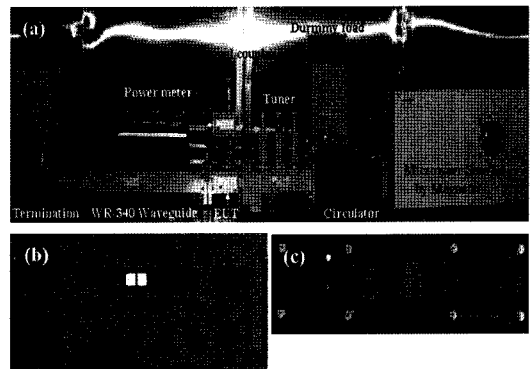


Fig. 1. General measurement setup and test circuit. (a) Test setup (b) High frequency power generator (c) LED circuit

가 되어 이 연구와 같이 LED 구동 회로를 구성하였을 경우 LED의 불이 켜지게 된다. 전자파에 노출된 반도체 소자의 오동작은 첫째 입력이 모두 High일 경우 점등되어 있는 LED가 점멸하거나 소등된 후 리셋을 통하여 정상 동작을 하는 경우, 둘째 입력이 모두 High가 아닐 경우 소등되어 있는 LED가 점멸하거나 점등 후 리셋을 통하여 정상 동작을 하는 경우를 오동작으로 판별하였다. 또한 반도체 소자의 파괴는 입력이 모두 High일 경우 점등되어 있는 LED가 소등되고 리셋 후 계속 소등 상태를 유지하는 영구적으로 정상 동작을 하지 못하는 경우, 둘째 입력이 모두 High가 아닐 경우 소등되어 있는 LED가 점등하고 리셋 후 영구적으로 점등 상태를 유지하는 경우를 파괴로 판별하였다.

서로 다른 기술로 제작된 TTL IC에서 오동작이 처음 발생하는 시점인 breakdown threshold(BT)와 파괴가 처음 발생하는 destruction threshold(DT)를 Fig. 2에 나타내었고, 여기서 breakdown은 물리적인 시스템의 손상이 없고 리셋 후 다시 기능을 회복하는 것을 의미하며, destruction은 하드웨어의 교체로 인한 기능을 회복할 수 있는 경우로서 시스템의 물리적 손상을 의미한다.

표준 TTL IC는 시리즈화된 TTL IC 중 가장 오래된 타입으로 소비전력이 크고, 동작 속도가 늦기 때문에 현재는 많이 사용되지 않는다. 따라서 이를 개선하여 속도 및 전력 면에서 표준 TTL IC 보다 우수한 74S 시리즈가 개발되었다. TTL 74S IC는 기본 동작이 표준 TTL IC와 같으나 쇼트키 다이오드를 트랜지스터의 컬렉터-베이스 간에 접속한 다이오드, 클램프 회로를 구성함으로써 고속 동작을 가능하게 한 것이다. 동작 속도는 크게 개선되었으나 소

비 전력이 크게 개선되지 못했기 때문에 소비전력을 내리는 목적으로 74LS 시리즈가 개발되었다. TTL 74LS IC는 쇼트키 다이오드를 사용하여 표준 TTL 보다 속도는 약간 더 빠르고 전력은 1/5 배로 낮추었다. 그러나 TTL 74S 시리즈보다 동작 속도가 느리기 때문에 이를 보완하여 개발한 것이 74ALS 시리즈이다.

마그네트론으로부터 인위적으로 발생시킨 전자파에 의해 SN74ALS08N과 SN74S08N의 경우 오동작 현상이 나타났으며, 그 외 반도체 소자들에서는 오동작 현상 없이 모두 파괴 현상이 관찰되었다. 전자파에 의한 이러한 오동작 현상은 IC의 소비 전력보다 스위칭 특성과 관련이 있는 것으로 판단된다. 게이트에서는 입력신호가 들어온 후 출력신호가 나오기까지 약간의 시간이 걸린다. 그 시간을 전달 지연시간이라고 부르며, 전달 지연 시간에 관한 전기적 특성을 스위칭 특성이라 한다. TTL 74ALS IC의 게이트 전달지연 시간은 4 ns이고, TTL 74S IC의 게이트 전달지연 시간은 3 ns로 TTL 74LS IC와 TTL 74AS IC의 각각의 게이트 전달시간 95 ns, 15 ns 보다 빠르다. 따라서 74LS IC와 74AS IC는 신호가 입력에서 출력까지 전달하는 시간이 74ALS IC와 74S IC 보다 길어 전자파에 의해 Lead frame을 통하여 IC 내부로 커플링되어 들어가는 전류가 계속 증가하여 칩을 손상시키기 때문에 오동작 현상을 관찰할 수 없고 바로 파괴로 진전되는 것으로 사료된다.

마그네트론으로부터 발생하는 도파관내 전자파의 평균 전력(P_{av})은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다¹⁾. 여기서 도파관 내 피크 전계강도(E_0)을 구하기 위해 WR-340 도파관의 내부 치수 a(가로치수=8.636cm)와 b(세로치수=4.318cm) 및 $TE_{1,0}$ 모델의 임피던스 $Z_{1,0}=534.5 \Omega$ 을 식 (1)에 대입하면 식 (2)와 같이 되고, E_0 에 대하여 정리하면 식 (3)과 같이 된다. 도파관 내에서 평균 전력 또는 rms 전력과 전계 피크값의 관계를 Table 2에 나타냈다.

$$P_{av} = \frac{E_0^2 ab}{2Z_{1,0}^2} \tag{1}$$

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

$$E_0 = 757 \sqrt{P_{av}} \text{ [V/m]} \tag{3}$$

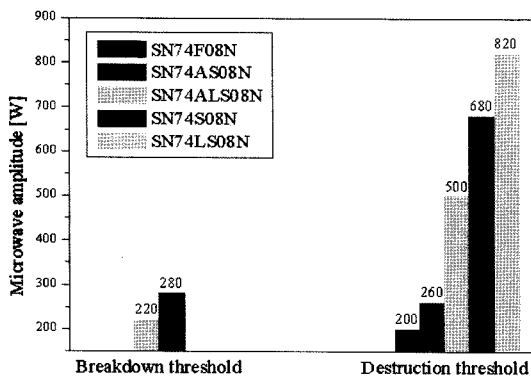


Fig. 2. Breakdown threshold and destruction threshold of TTL AND devices.

Fig. 3은 어떤 특정한 전계 강도 범위에서 각각의 TTL IC의 오동작과 파괴가 나타나는 최대 및

Table 2. Relationship between the power and the peak electric field (E_0) in WR-340

P_{av} [W]	E_0 [kV/m]	P_{av} [W]	E_0 [kV/m]	P_{av} [W]	E_0 [kV/m]
10	2.39	140	8.96	550	17.75
20	3.39	150	9.27	600	18.54
30	4.15	160	9.58	650	19.30
40	4.79	170	9.87	700	20.03
50	5.35	180	10.16	750	20.73
60	5.86	190	10.43	800	21.41
70	6.33	200	10.71	850	22.07
80	6.77	250	11.97	900	22.71
90	7.18	300	13.11	950	23.33
100	7.57	350	14.16	1000	23.94
110	7.94	400	15.14	1050	24.53
120	8.29	450	16.06	1100	25.11
130	8.63	500	16.93	1150	25.67

최소 전계 강도 범위인 breakdown bandwidth(BB)와 destruction bandwidth(DB)를 나타낸 것이다. 반도체 소자가 전자파의 세기가 증가함에 따라 최대 및 최소 전계 강도 사이에서 오동작과 파괴 현상이 random하게 발생되므로 오동작 및 파괴 확률을 조사하여 정의하기는 어려웠다. 또한 몇몇 반도체 소자는 오동작 및 파괴 전계강도가 현저히 낮았다. 이는 반도체 소자가 상용되기 위해 실시하는 적합성 평가로 인해 비록 반도체 소자가 평가에서 합격하여 기능이 정상이라 하더라도 이미 내성이 취약한 상태로 상용화되었기 때문인 것으로 사료된다.

고분자로 몰딩되어 있는 반도체 소자 표면을 제거하여 내부 칩 상태 변화를 SEM으로 관찰하였고, SN74S08N 소자와 SN74LS08N 소자의 전자파에 의한 피해를 Fig. 4와 5에 나타내었다. 전자파에 의한

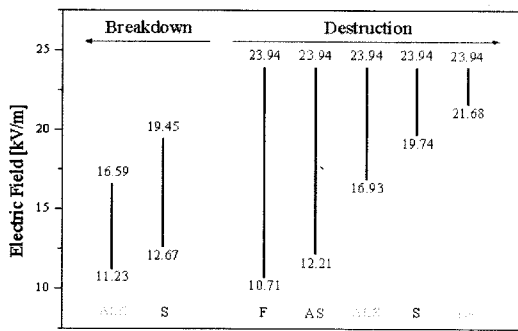


Fig. 3. Breakdown bandwidth and destruction bandwidth of TTL AND devices.

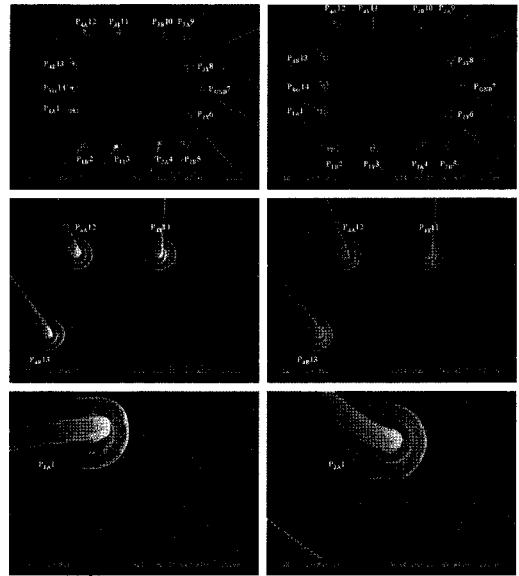


Fig. 4. TTL SN74S08N device before and after artificial microwave impact.

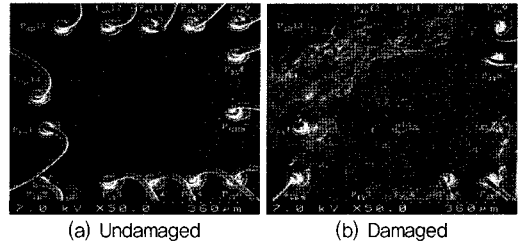


Fig. 5. TTL SN74LS08N device before and after artificial microwave impact.

반도체 소자 내부 칩의 전형적인 파괴 형태는 크게 세 가지로 나타낼 수 있다. 첫째 반도체 소자 내부 칩에 패턴에 의해 구성된 다이오드, 트랜지스터, 저항과 같은 component의 손상, 둘째 칩에 형성된 트랙이 녹는 onchipwire의 손상과 동시에 다수의 component의 손상, 셋째 반도체 내부 칩과 리드 프레임(lead frame)을 연결하는 bondwire의 손상 및 동시에 onchipwire와 다수의 component의 손상이 있다.

Fig. 4는 이러한 반도체 소자의 전형적인 손상을 잘 보여주고 있으며, 대부분의 파괴는 어떤 특정한 곳에서 발생하는데 전원이 인가되는 P_{Vcc14} 와 두 개의 입력이 모두 High 상태인 P_{I1A1} 과 P_{I1B2} 사이 또는 두 개의 입력이 모두 Low 상태인 P_{4A12} 와 P_{4B13} 에서 파괴가 뚜렷하게 관찰되었다. 전계 강도가 더욱 높은 전자파에 의한 파괴를 Fig. 5에 나타내었으

Table 3. Details of melting point on the chip lines

Elements	Symbol	Melting Point Celsius	Melting Point Kelvin
Aluminum	Al	659	932.15
Copper	Cu	1,083	1,356.15
Gold	Au	1,063	1,336.15
Silver	Ag	961	1,234.15

며, Fig. 4의 결과 보다 더 심각한 손상을 보여준다. 이렇게 파괴된 반도체 소자의 칩 상태를 관찰하는 것은 어려웠는데 이것은 칩 위의 onchipwire가 녹거나 bondwire 또는 bondwire를 지지하는 bondpad가 녹으면서 칩 주위에 몰딩 되어있는 재료에 영향을 주어 금속과 고분자 물질의 융합된 형태로 칩 위에 부착되어 반도체 표면의 제거를 어렵게 만들기 때문이다.

반도체 소자 내부 칩의 onchipwire와 bondwire의 파괴는 재료의 녹는 형태로 발생되는데 이러한 현상은 반도체 소자의 내부 칩 위의 교차점에 매우 높은 전계가 집중되어 금속선은 수 ns 시간에 수백 K의 온도로 상승하여 금속이 녹는 열적 파괴에 도달하기 때문이다⁹⁾. 본 실험에서도 파괴된 시료의 SEM 분석 이전에 chip 상태를 광학 현미경으로 관찰한 결과 파괴 부근의 onchipwire가 녹는 손상뿐만 아니라 검게 변하는 thermal burn out 현상을 쉽게 확인할 수 있었으며, 이러한 현상은 전원을 공급하는 P_{Vcc}14 주위의 onchipwire와 bonding pad에서 뚜렷하였다. 그러나 SEM 분석을 위해 chip 표면을 백금 코팅하기 때문에 SEM 분석으로는 thermal burn out 현상을 확인할 수 없었다.

반도체 소자 내부 칩의 재질은 고집적도와 고속도를 위해 일반적으로 알루미늄, 구리, 금 등의 금속을 사용하여 회로를 이루고 있다. 참고문헌 [9]의 시뮬레이션 결과에 의하면 전자파가 반도체 소자 내부로 침투하면 이미터 부근에서 금속선의 온도는 3 ns에 860K(587°C)로 상승하고, 6 ns에는 1032K(759°C)으로 상승하였다. 일반적으로 알루미늄의 녹는점은 932K(659°C)으로 6 ns 이전에 알루미늄이 녹는 충분한 온도로 상승하여 열적 파괴에 도달하게 된다. 반도체 소자 내부 칩의 회로 재료로 사용되는 대표적인 금속을 Table 3에 나타내었다.

4. 결론 및 토의

이 논문에서는 많은 반도체 소자 중에서 TTL을

기반 기술로 하는 AND gate 반도체 소자를 대상으로 마그네트론으로부터 인위적으로 발생하는 전자파에 의한 피해를 조사한 것이다. 실험에 사용된 반도체 소자는 그 제조 방법에 따라 5가지로 구분되고, 각각의 소자들은 전자파에 의해 각기 다른 전계 강도에서 영향이 나타났다. 특히 SN74ALS08N과 SN74S08N 소자의 경우 오동작 및 파괴 현상이 모두 관찰되었으나 그 외 반도체 소자에서는 오동작 현상 없이 파괴 현상만 관찰되었다. 인위적으로 발생한 전자파에 의해 영구적으로 파괴된 반도체 소자의 몰딩되어 있는 표면을 제거하고 내부 칩 상태를 SEM으로 관찰하였다. 대다수의 반도체 소자들이 V_{cc}(P_{Vcc}14)와 인접한 부근에서 파괴 현상이 뚜렷하게 나타났으며, 더욱 높은 전계 강도에서는 component 및 onchipwire가 녹는 손상과 bondpad 및 bondwire가 녹는 심각한 손상을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 반도체 소자의 내부 칩 위의 교차점에 매우 높은 전계가 집중되어 금속선은 수 ns 시간에 수백 K의 온도로 상승하여 금속이 녹는 열적 파괴에 도달하기 때문이다.

전자파에 의해 반도체 소자가 오동작을 일으킬 경우 입력/출력 편의 전류 변화를 조사하면 더욱 정량적이고, 육안 확인에 의한 오동작 판별보다 신뢰성 있는 데이터를 확보할 수 있는 오동작 평가 방법이 될 것이다. 또한 본 연구에서는 인위적으로 발생시킨 전자파의 주파수가 2,450 ± 50 MHz로 한정되어 있기 때문에 주파수 변화에 따른 반도체 소자의 피해를 분석하는 것이 필요하며, 반도체 소자가 받는 피해뿐만 아니라 전자파가 선로에 유기되는 coupling 효과도 고찰할 필요가 있다.

반도체 소자들의 전자파에 의한 영향을 실험적으로 정량화하여 데이터화 하는 것은 반도체 소자의 전자 환경을 정의하는데 도움이 될 것이며, 이 연구의 결과는 전자파에 의한 반도체 소자의 피해 효과를 이해하는 기초 자료로 활용할 수 있을 것이라 기대한다.

감사의 글 : 이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 1) D. V. Giri, "High-power Electromagnetic Radiators Nonlethal Weapons and Other Applications", Harvard

- University Press, Cambridge, Massachusetts, and London, England, pp. 36~40, 2004.
- 2) G. B. Mats, G. L. Karl, "Susceptibility of Electronic Systems to High-Power Microwaves : Summary of Test Experience", IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol. 46, No. 3, pp. 396~403, 2004.
 - 3) Y. Bayram, P. C. Chang, J. L. Volakis, Kyechong Kim, A. Iliadis, "High Power EMI on Digital Circuits Within Automotive Structures", Electro-magnetic Compatibility, 2006 IEEE International Symposium on Vol. 2, pp. 507~512, 14~18 Aug., 2006.
 - 4) E. A. Amerasekera, D. S. Campbell, "Failure Mechanisms in Semiconductor Devices", John Wiley & Sons, 1987.
 - 5) Clayborne D. Taylor, D. V. Giri, "High-Power Microwave Systems and Effects", Taylor & Francis, Washington D. C., 1994.
 - 6) C. H. Diaz, S. M. Kang, C. Duvvury, "Modeling of Electrical Overstress in Integrated Circuits", Kluwer Academic Publishers, Boston, 1995.
 - 7) M. Camp, H. Garbe, D. Nitsch, "Influence of the Technology on the Destruction Effects of Semiconductors by Impact of EMP and UWB Pulses", Electromagnetic Compatibility, 2002 IEEE International Symposium on, Vol. 1, pp. 87~92, 19~23 Aug., 2002.
 - 8) D. Nitsch, M. Camp, F. Sabath, H. Ter, J. L., H. Garbe, "Susceptibility of Some Electronic Equipment to HPEM Threats", Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on, Vol. 46, No. 3, pp. 380~389, Aug., 2004.
 - 9) 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, 8~12 Aug., 2005.