

즉발감마선에 의한 상용전자소자의 피해현상분석 연구

The Study of Transient Radiation Effects on Commercial Electronic Devices

오 승 찬* · 이 남 호** · 이 흥 호†
(Seugn-Chan Oh · Nam-Ho Lee · Heung-Ho Lee)

Abstract - In this study, we carried out transient radiation test for identify failure situation by a transient radiation effect on operational amplifier devices. This experiments were carried out using a 60 MeV electron beam pulse of the LINAC(Linear Accelerator) facility in the Pohang Accelerator Laboratory. In this test, we has found that a serious failure as a burn-out effect due to overcurrent on the partial electronic devices.

Key Words : Pulsed gamma-ray, Transient radiation effect, Total ionizing dose effect

1. 서 론

핵폭발(Nuclear burst) 시 방출되는 방사선의 형태는 폭발초기에 순간적으로 발생하는 즉발감마선(Prompt gamma-rays) 및 중성자선원(Neutrons)과 함께 비교적 긴 시간동안 전달되는 지연방사선(Delayed gamma-rays)으로 나뉜다 [1]. 이러한 형태의 감마선은 전자소자의 전기적 특성을 변화시키고 동시에 일시적 과도현상에 따른 다양한 형태의 피해현상을 유발하는 원인으로 작용할 수 있다. 일반적으로 방사선에 의한 전자부품소자의 영향으로는 크게 누적선량효과(Total dose effects), 과도선량효과(Transient radiation effects on electronic device)로 구분되어 설명될 수 있으며 누적선량효과는 주로 누적선량에 비례하여 전자부품소자의 전기적 특성을 변화시켜 최종적으로 전자부품소자의 성능저하 및 기능상실을 유발하는 것을 의미하며 과도선량효과는 순간적인 높은 선량율(dose rate)에 의한 전자소자내부에서 생성된 순간적인 광전류에 의하여 발생하는 과도응답특성으로 인한 Upset현상과 함께 레치업(Latchup)을 비롯한 번아웃(burnout)현상과 같은 영구적 손상을 유발하는 현상으로 정의된다[1]. 이러한 특수한 환경에서의 방사선영향은 우주발사체 및 인공위성의 우주방사선환경에서 고려하는 누적선량효과와 단일사건효과에 의한 영향을 다루는 것과는 달리 핵폭발 초기 발생하는 높은 선량의 즉발감마선에 의한 영향이 지배적으로 작용한다. 따라서 본 연구에서는 상용전자부품소자의 즉발감마선환경에서의 발생될 수 있는 피해현상을 평가/분석하기 위하여 고선량의 펄스감마선 발생기술을 기반으로 미국방성(DoD)의 전자소자의 방사선 시험관련 절차인 MIL-STD-883G[2][3]를 준용하여 로직소자 및 선형소자로 구성된 총 24종의 상용전자부품소자에 대한 과도방

사선 피해평가시험을 수행하였으며 10^7 rad(si)/sec 이상의 선량율 조건에서 대부분의 소자에서 Upset현상 및 레치업 현상이 확인되었으며 10^8 rad(si)/sec이상의 조건에서는 일부소자의 Burn-out현상이 발생하는 것을 확인하였다.

2. 즉발감마선 피해평가 시험구성

핵폭발초기 순간적인 형태로 방출되는 고선량의 펄스감마선 조건상에서 전자소자의 피해현상을 평가/분석하기 위하여 이번 전자소자에 대한 즉발감마선 피해평가 시험은 먼저 핵폭발초기의 고선량의 펄스감마선조건을 적용하기 위하여 고에너지의 전자빔출력 펄스감마선으로 변환하기 위한 펄스감마선발생장치를 설계/적용하고 미국방성의 전자소자의 방사선시험관련 절차인 MIL-STD-883G에 명시된 사항에 따라 원격 실시간 계측시스템을 구성하고 명시된 방사선 시험절차 및 방법을 준용하여 실시하였다.

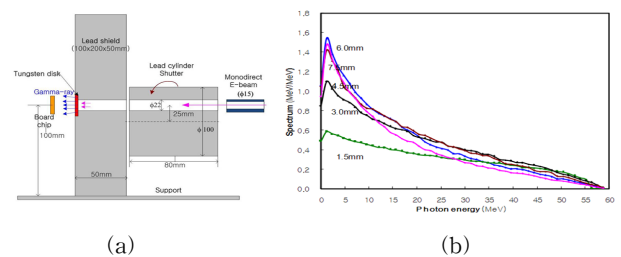


그림 1 감마선 변환장치의 구성(a) 및 두께별 변환 에너지 스펙트럼(b)

Fig. 1 (a) Configuration of tungsten converter, (b) Energy spectrum of gamma-ray on tungsten thickness.

2.1 펄스감마선 발생장치

이번 과도방사선 피해평가시험에서는 적용된 펄스감마선은 그림 1(a)에 나타난 것과 같이 선형가속기 시설을 이용하여 60MeV의 고에너지 전자빔출력을 디스크형태로 제작된

* 정 회 원 : 충남대학교 공대 전기공학과 박사과정

** 정 회 원 : 한국원자력연구원 책임연구원

† 교신저자, 종신회원 : 충남대학교 공대 전기공학과 교수

E-mail : leehh@cnu.ac.kr

접수일자 : 2012년 8월 3일

최종완료 : 2012년 8월 29일

텡스텐표적에 조사시켜 제동복사에 의하여 방출되는 펄스형태의 2차감마선을 이용하는 방식을 사용하였다. 최대변환효율을 가지는 텡스텐표적의 최적화된 설계를 위하여 MCNP-5c코드를 이용하여 단방향(mono-direction)디스크형 선원에 대하여 텡스텐표적의 두께별 변환효율을 시뮬레이션분석을 수행하였으며 그림 1(b)의 텡스텐표적의 두께별 변환스펙트럼에서 보여주는 것과 같이 두께의 증가에 비례한 스펙트럼의 증가특성을 나타내었고 6mm 두께에서 최대분포를 나타내는 것을 확인하였다. 따라서 본 실험에서는 최대변환효율을 가지는 6mm두께의 텡스텐변환장치를 설계/적용하였다.

2.2 즉발방사선 실측시험 구성

즉발방사선 실측시험의 구성은 그림 2에 나타난 것과 같이 선형가속기 시설을 이용한 펄스감마선 발생장치와 펄스감마선 조사(Irradiation)에 따라 시험 소자에서 순간적으로 발생하는 다양한 전기적특성변화를 모니터링하기 위한 실시간 계측장치로 구성된다. 시험에 사용되는 소자는 각 소자별 회로적인 특징을 반영하여 설계한 DUT(Device under test)보드에 장착되며 시험소자로 인가되는 펄스감마선의 선량율을 확인하기 위한 선량측정방법으로는 시험소자와 동일 선상에 장착된 PIN다이오드 센서를 통하여 실제 시험소자에 조사되는 펄스감마선의 선량율(dose rate)에 비례한 전류신호를 측정하는 실시간 계측방식과 함께 측정정밀도 향상을 위하여 동일위치에 장착된 열형광선량계(TLD)의 펄스당 누적된 선량값을 이용하여 최종적으로 실제 선량율에 적용하는 방식을 사용하였다.

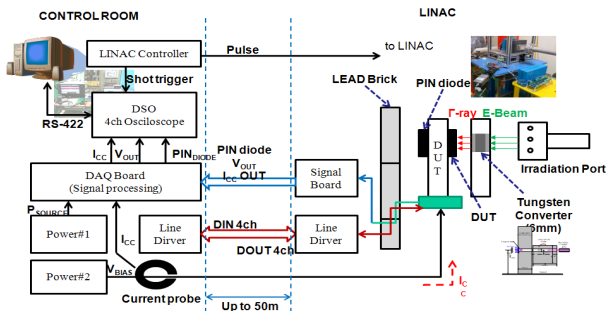


그림 2 즉발감마선 실측시스템 구성
 Fig. 2 Configuration of the actual measurement system for the prompt radiation experiment

2.3 펄스감마선 실측시험조건 및 절차

즉발감마선 실측평가시험은 미 국방성(DoD)의 방사선시험관련 주요규격을 준용하여 인가되는 펄스방사선의 선량율 조건에 대하여 나타날 수 있는 Upset/레치업 현상을 확인하기 위하여 MIL-STD-883G 1021.2[3], MIL-STD-883G 1020.1[2]에 명시된 시험방법 및 절차를 기준으로 그림 3에 나타난 것과 같이 시료의 장착 및 빔 조정 과정을 거쳐 과도방사선 조사에 따른 전자부품소자의 Upset/레치업(Latchup) 임계치(Threshold)를 평가하기 위한 방법을 적용하였다.

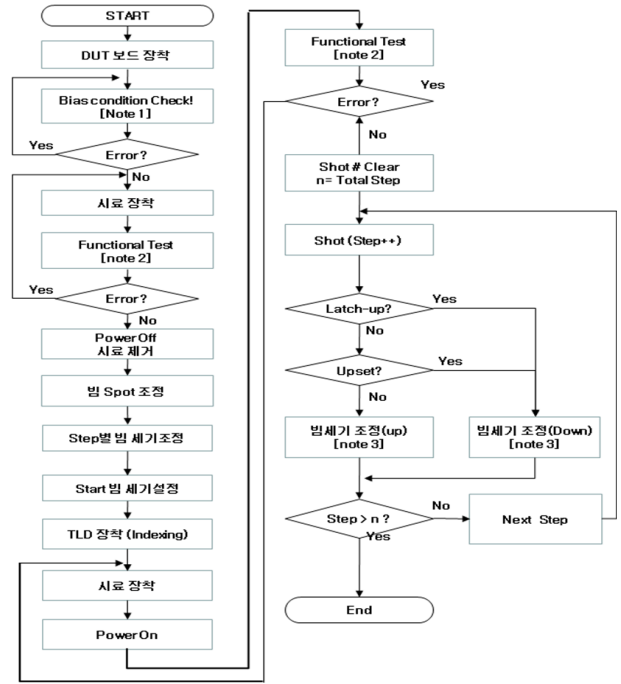


그림 3 전자부품소자의 펄스방사선조사에 따른 Upset/Latchup 평가시험절차

Fig. 3 Upset/Latchup test procedure for transient radiation effects on electronic devices.

표 1 방사선시험 관련규격(MIL-STD-883G)

Table 1 Radiation test procedure.(MIL-STD-883G)

규격	내용
MIL-STD-883G 1017.2	Neutron Irradiation
MIL-STD-883G 1019.7	Ionizing Radiation(Total Dose) Test Procedure
MIL-STD-883G 1020.1	Dose-rate Induced Latchup Test Procedure
MIL-STD-883G 1021.2	Dose-rate Upset Testing of Digital Microcircuit
MIL-STD-883G 1023.2	Dose-rate Response of Linear Microcircuit

3. 즉발감마선 실측시험결과 및 분석

3.1 즉발방사선 실측시험결과

이번 즉발방사선 실측시험을 통하여 총24개의 상용전자부품소자에 대한 과도방사선 피해평가를 수행하였으며 그림 4의 조사되는 방사선 선량율에 따른 전자부품소자들의 피해평가 시험결과에서 보여주는 것과 같이 $10^7 \text{rad}(\text{si})/\text{sec}$ 이상의 선량율 조건에서 전자소자로 인가되는 소비전류 및 출력전압에서의 일시적 Upset 현상과 함께 일부 로직소자를 비롯한 DC/DC 컨버터소자의 경우 레치업 현상이 발생되었다. 특히 약 $10^8 \text{rad}(\text{si})/\text{sec}$ 이상의 선량율 조건에서 선형증폭기

소자인 LM118의 경우 이러한 일시적 과도응답특성과 함께 번아웃과 같은 치명적인 오류를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 또한 선형증폭기 소자인 AD711를 포함한 일부 선형증폭소자의 경우 과도방사선 펄스에 의하여 누적된 총 누적선량에 따라 발진현상과 함께 출력이득변화가 발생되었으며 APW7079소자의 경우 조사 직후 출력전압이 감소되는 전기적 특성변화를 확인하였다. 이러한 전기적 특성변화는 누적선량효과(Total Ionizing Dose Effect)에 의한 것으로 펄스방사선에 의하여 일시적인 과도응답특성과 함께 누적선량에 따른 전기적특성의 변화도 발생할 수 있음을 보여준다.

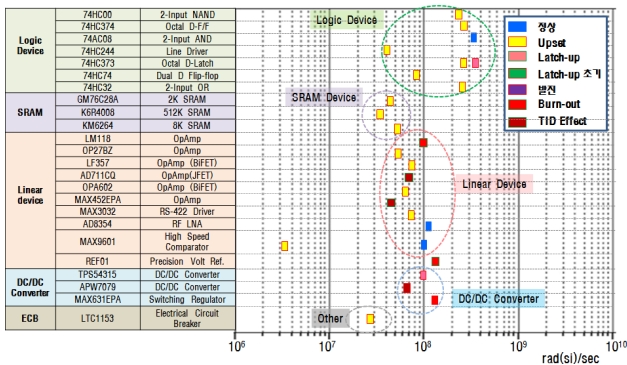


그림 4 상용전자부품소자의 펄스방사선 실측시험결과
Fig. 4 The test results of pulsed radiation effects on commercial electronic devices.

3.2 펄스방사선에 의한 전자부품소자의 피해분석

다음은 과도방사선에 의하여 전자소자에서 발생할 수 있는 피해현상에 대한 설명과 함께 이번 상용전자부품소자의 즉발방사선 실측시험결과로 확인된 피해현상에 대한 사례별 분석결과를 보여준다.

3.2.1 이온화 방사선에 의한 전자소자의 피해현상

방사선에 의한 전자소자의 피해현상의 주요한 원인은 전자소자내부의 이온화현상으로 발생된 전자-정공쌍(EHP, Electron-hole pair)에 의한 피해현상[1][5]으로 조사되는 선량을 및 인가형태에 따라 누적방사선효과와 과도선량효과로 구분되어 설명 할 수 있다. 방사선에 의한 누적선량효과는 그림 5에 나타난 것과 같이 방사선조사에 따른 이온화현상으로 발생된 잔류-정공쌍 중 재결합에 실패한 이탈된 잔류정공이 계면(Bulk)을 따라 이동하게 되고 이에 따라 게이트의 절연층에 포획됨에 따라 정공트랩을 형성함으로 인하여 트랜지스터의 문턱전압(Threshold voltage)를 변화시키는 현상으로 이러한 현상은 누적된 선량에 비례하여 증가되는 특성을 나타내며 누적선량이 일정 임계치를 초과하는 경우 트랜지스터를 영구적으로 개방(Open) 또는 단락(Short) 되도록 만들어 결국 소자가 손상되는 현상과 동일한 결과를 초래할 수 있다.

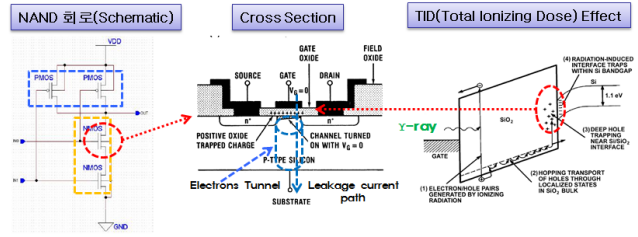


그림 5 전자부품소자의방사선에 의한 누적선량효과
Fig. 5 Total ionizing dose effects in electronic devices.

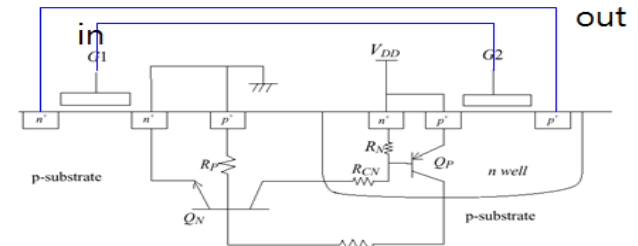


그림 6 CMOS Inverter 소자의 레치업 모델링
Fig. 6 Latchup modeling of CMOS Inverter devices

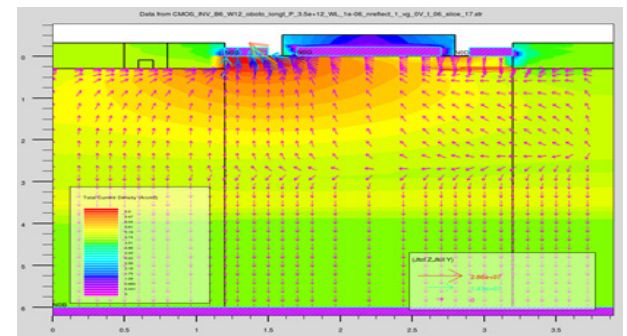


그림 7 Inverter소자의 과도방사선 조사에 의한 레치업 발생 시 내부전류거동특성
Fig. 7 Distribution of internal photo-current at latchup status of Inverter IC

과도선량효과(Transient radiation effects on Electronic devices)는 순간적으로 높은 선량율로 인하여 소자내부에 생성된 일시적 과도광전류에 의한 피해현상으로 반도체 바디(Body) 전체에 광전류(Photocurrent)를 발생시켜 트랜지스터를 무작위로 개방시키거나 플립-플롭(Flip-Flop)과 메모리 셀(Memory Cell)의 논리상태(Logic State)를 변화시킬 수 있고 이러한 광전류신호는 CMOS 및 바이폴라 소자의 공정 구조상 생성되는 기생 Four-layer(pnpn)구조를 트리거 시킴으로 인하여 레치업 현상을 유발할 수 있다[1][4]. 그림 6은 CMOS형태의 Inverter소자에 대한 레치업 모델링을 보여주며 그림 7은 과도방사선입력에 의하여 이러한 레치업 구조가 턴온 상태에서의 비정상적인 전류의 흐름을 보여준다.

3.2.2 Upset 사례 분석

과도방사선에 의한 Upset현상은 디지털소자의 경우 이전 입력에 따른 출력을 가지는 형태의 기억소자에서 펄스방사선 조사 시 기억된 출력 값의 비정상적인 변화(기억 값 천이)와 함께 출력전압레벨의 일시적 변화 그리고 선형소자의 경우 출력전압 및 소비전류의 일시적 과도응답특성변화를 나타낸다[1]. 이번 시험을 통하여 우리는 SRAM을 포함한 총 10종의 디지털소자에서 $2.0 \times 10^7 \text{ rad}(\text{si})/\text{s}$ 이상의 선량을 조건에서 Upset현상이 확인되었으며 총 11종의 비메모리소자들의 경우 $3.0 \times 10^7 \text{ rad}(\text{si})/\text{s}$ 이상의 조건에서 출력전압의 일시적 붕괴현상에 따른 upset현상이 확인되었다. 비메모리소자에 대한 upset 현상은 그림 8의 MAX3032소자의 실측시험결과에서 보여 주는 것과 같이 펄스방사선 조사에 따라 전자소자내부에 공급되는 소비전류의 일시적 증가현상과 함께 출력전압이 일시적으로 붕괴되는 형태로 나타나고 메모리소자의 경우 그림 9의 KM6264(8K SRAM)의 실측시험결과에 나타난 것과 같이 기억 값이 천이 되는 형태로 나타나는 것을 볼 수 있다. 따라서 이러한 두 가지 형태의 소자에 대한 Upset결과에서 나타난 공통적인 특징인 소비전류의 일시적 과도현상으로 볼 때 과도방사선 조사에 따라 소자내부의 이온화현상으로 생성된 일시적인 광전류 신호에 의하여 입력전원의 일시적 붕괴현상과 함께 소자내부의 입력포트 및 클럭 입력신호 단의 일시적 레벨변화가 주요한 원인임을 알 수 있다.

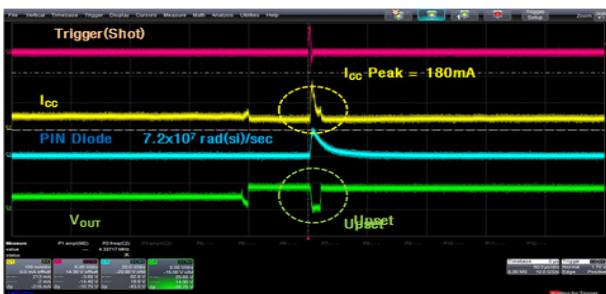


그림 8 MAX3032소자의 펄스방사선 시험결과(Upset)
 Fig. 8 Irradiation test result of max3032 for pulsed radiation, (Upset)

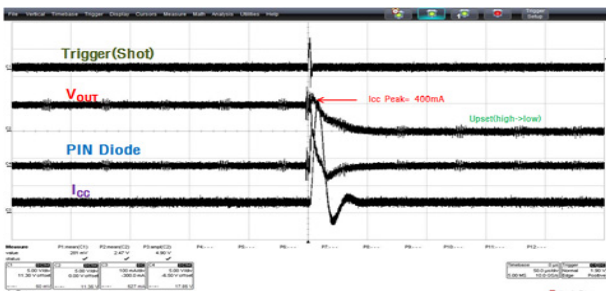


그림 9 KM6264소자의 펄스방사선 시험결과 (upset)
 Fig. 9 Irradiation test result of KM6264 for pulsed radiation, (upset)

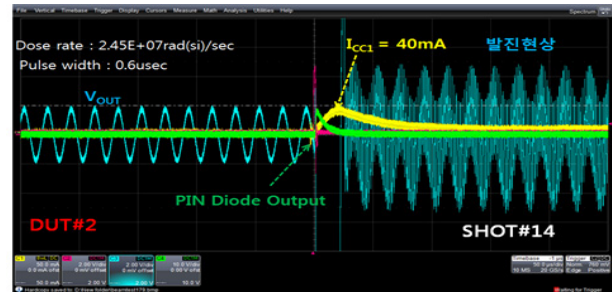


그림 10 LM118소자의 펄스방사선 시험결과(Upset), Dose rate : $2.45 \times 10^7 \text{ rad}(\text{si})/\text{sec}$
 Fig. 10 Irradiation test result of LM118 for pulsed radiation (upset), Dose rate : $2.45 \times 10^7 \text{ rad}(\text{si})/\text{sec}$

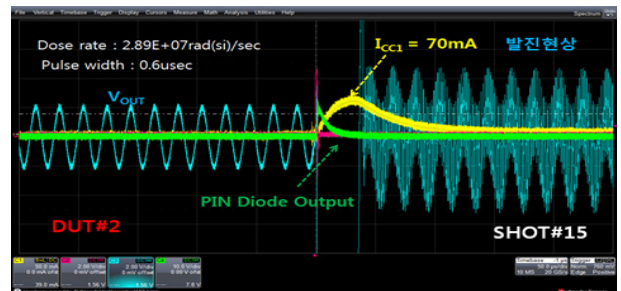


그림 11 LM118소자의 펄스방사선 시험결과(Upset), Dose rate : $2.89 \times 10^7 \text{ rad}(\text{si})/\text{sec}$
 Fig. 11 Irradiation test result of LM118 for pulsed radiation (upset), Dose rate : $2.89 \times 10^7 \text{ rad}(\text{si})/\text{sec}$

또한 선형소자에 대한 펄스방사선 조사시험에서는 펄스방사선 조사시점에서 출력전압의 붕괴되는 일시적 Upset현상이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 그림 10, 11은 선형증폭기소자인 LM118의 펄스방사선 조사에 따른 소자의 전기적특성변화를 측정된 결과로 약 $2 \times 10^7 \text{ rad}(\text{si})/\text{s}$ 이상의 선량을 조건에서 과도방사선 조사에 따른 일시적 Upset현상이 발생되었으며 방사선조사에 따른 소비전류의 일시적증가현상은 인가되는 선량율에 비례한 특성을 나타내었다. 특이한 점은 방사선 조사에 따른 일시적 Upset이후 출력전압의 발진현상이 발생되었고 전원리셋이후 발진현상이 제거되는 결과를 보여주었다. 따라서 이러한 실측결과를 통하여 피드백 형태의 이득을 가지는 증폭기 소자의 경우 회로구성에 따라 일시적 과도현상에 따른 발진현상이 발생할 수 있으며 인가되는 방사선에 의하여 내부적으로 생성된 광전류의 양은 선량율에 비례적으로 발생됨을 확인하였다.

3.2.3 레치업 사례 분석

과도방사선 조사에 따른 레치업 현상은 CMOS소자의 설계구조상에서 형성될 수 있는 소자의 기생 Four-layer (pnpn, SCR형태)구조에서 바디(Body)영역에서 발생한 광전류신호가 이러한 SCR구조를 트리거 시킴으로서 바디영역 전체에 비정상적인 과전류현상이 발생하는 현상으로 레치업 현상이 발생된 소자의 경우 이러한 과전류현상으로 인한 발열현상과 함께 소자고유의 동작특성을 잃어버리는 특성을

나타낸다. 따라서 이러한 레치업 현상은 결과적으로 회로전체의 소비전류를 증가시키고 주변회로의 온도증가현상을 초래하여 회로전체의 심각한 기능저하를 일으키는 심각한 오류를 일으킬 수 있다. 그림 12는 DC/DC컨버터 소자인 TPS54315의 펄스방사선 조사에 따른 레치업 현상이 발생된 사례로서 레치업 현상에 의한 소비전류의 비정상적인 증가 이후 출력전압의 점진적인 감소현상이 발생하여 약 500msec이후 0(zero)로 변화되는 보여주었다. 따라서 이러한 레치업현상이 발생된 소자의 경우 비정상적인 소비전류의 증가와 함께 소자고유의 정상적인 기능을 수행할 수 없음을 보여준다. 또한 이번 TPS54315소자에 대한 연속된 펄스방사선 펄스 조사시험을 통하여 레치업 발생이후 연속되어 인가된 펄스방사선에 의하여 내부 리셋로직이 초기화됨에 따라 레치업 현상이 제거되는 현상을 확인하였다. 이러한 현상은 리셋회로가 내장된 전자소자의 경우 인가되는 펄스방사선 조건과 내부로직상태에 따라 리셋조건이 활성화되는 경우 레치업 현상을 방지할 수 있음을 보여준다.



그림 12 단일펄스방사선 조사조건에서의 TPS54315소자의 펄스방사선 시험결과(Latchup),
 Fig. 12 Irradiation test result of TPS54315 for single pulsed radiation, (Latchup)

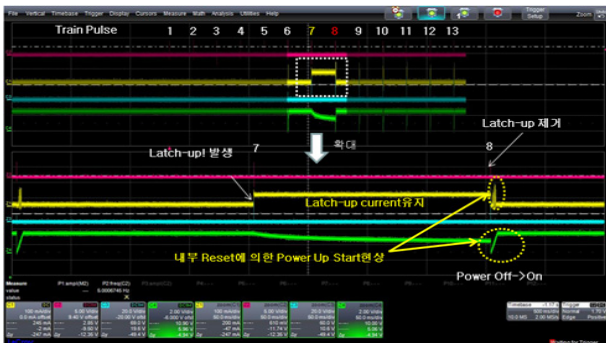


그림 13 연속된 펄스방사선 조사조건에서의 TPS54315소자의 펄스방사선 시험결과
 Fig. 13 Irradiation test result of TPS54315 for train pulsed radiation, (Upset)

이러한 레치업 현상은 로직소자인 74HC373(Octal D-latch)에서도 확인되었으며 그림 14의 결과에서 보여주는 것과 같이 TPS54315와 마찬가지로 레치업 전류의 비정상적인 증가와 더불어 출력전압이 0V에서 1V로 상승되어 unknown상태가 유지되는 결과를 나타내었다. 일반적으로

TTL소자의 V_{IL} (Low인식 최대전압)이 약 0.8V이하인 점을 미루어 볼 때 이러한 Unknown상태의 출력은 Low 또는 High에 대한 특성을 보장할 수 없게 됨으로서 시스템의 비정상적인 동작을 유발할 수 있다. 또한 이러한 레치업 특성은 그림 15에서 보여주는 것과 같이 출력전압의 로직레벨이 high인 상태에서 동일한 결과를 보여줌에 따라 입·출력전압의 조건에 무관함을 보여준다.

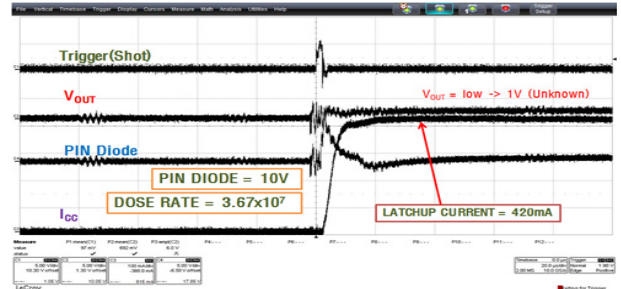


그림 14 74HC373소자의 펄스방사선 시험결과(Latchup), $V_{IN} = \text{High}$, $V_{OUT} = \text{Low}$
 Fig. 14 Irradiation test result of max3032 for pulsed radiation, (Latchup), $V_{IN} = \text{High}$, $V_{OUT} = \text{Low}$

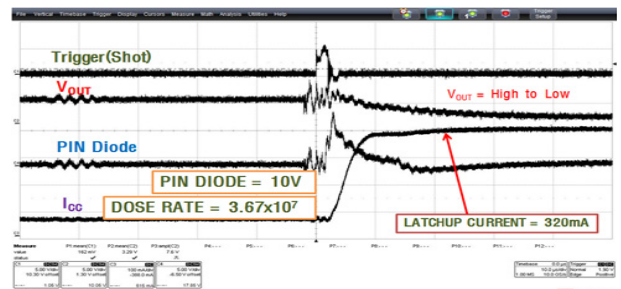


그림 15 74HC373소자의 펄스방사선 시험결과(Latchup), $V_{IN} = \text{Low}$, $V_{OUT} = \text{High}$
 Fig. 15 Irradiation test result of max3032 for pulsed radiation, (Latchup), $V_{IN} = \text{High}$, $V_{OUT} = \text{Low}$

3.2.3 Burn-out 사례분석

앞서 기술한 upset사례에서 설명한 바와 같이 LM118소자의 과도방사선 조사에 따른 소비전류의 일시적 증가현상은 조사된 방사선의 선량율에 비례한 특성을 보여주었다. 그러나 이러한 일시적 전류증가현상은 약 $1 \times 10^8 \text{ rad}(\text{si})/\text{sec}$ 이상 조건에서 그림 16에 나타난 것과 같이 소비전류의 급격한 증가와 함께 출력전압이 붕괴되는 현상이 발생되었고 조사 직후 출력전압 및 소비전류 모두 0으로 감소되는 결과를 나타내었다. 따라서 이러한 결과가 조사 후 상황에서 지속되는 결과를 보임에 따라 시험 소자에 대한 Decap과정을 통하여 내부회로를 이상 유무를 확인하였으며 그 결과 그림 17에 나타난 것과 같이 Metal층의 전원입력부의 패턴 일부가 소손되었음을 확인하였다. 이러한 결과는 LM118의 Upset사례에서 나타난 인가되는 방사선의 선량율의 증가에 따라 소비전류의 일시적 과도현상이 증가되는 형태로 볼 때 인가된 펄스방사선에 의하여 전원입력 단에서 발생한 일시적 과도전류가 주요한 원인으로 작용하였음을 알 수 있다.

Shot#5 : LM118, Burn-out, +전원부 단선, 내부회로 단락

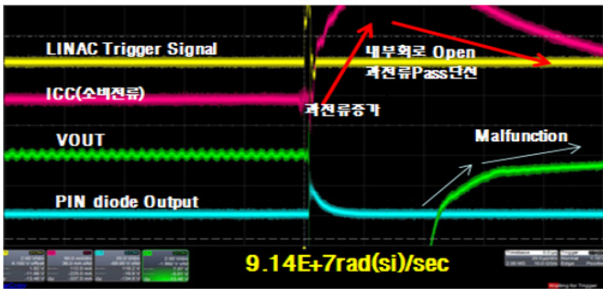


그림 16 LM118소자의 펄스방사선 시험결과(burnout)
 Fig. 16 Irradiation test result of LM118 for pulsed radiation, (burnout)

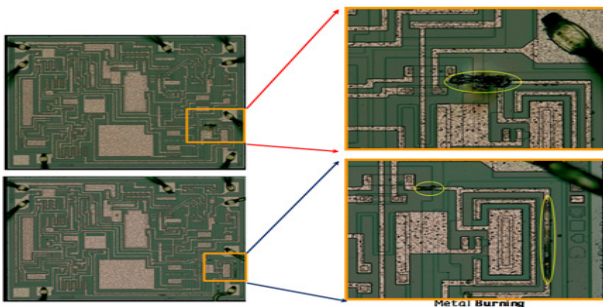


그림 17 LM118 소자의 burnout 사례(Metal burnout)
 Fig. 17 The result of burnout phenomenon by a pulsed radiation on LM118 device

4. 결 론

본 연구를 통하여 우리는 과도방사선 시험평가체계구축을 위하여 국내 선형가속기 시설을 이용한 펄스감마선 발생기술과 함께 전자부품소자의 과도방사선 실측평가시스템을 구축함에 따라 핵 방호 체계구축을 위한 기반기술을 확보하였으며 24종의 상용전자부품소자에 대하여 실측평가시험을 통하여 다양한 형태의 오류현상이 발생됨을 확인할 수 있었다. 특히 시험대상소자중 군용장비에 적용되는 환경조건을 만족하는 소자인 LM118(Operational amplifier, National Semiconductor)의 과도방사선 조사에 따른 소자내부회로의 패딩상의 영구적 손상이 발생한 결과에서 보여주는 것과 같이 이러한 전자부품소자의 피해영향은 개별전자부품소자에 명시된 일반적인 환경조건과는 별도로 소자내부의 구조적 형태에 따라 영향이 다르게 나타날 수 있음을 보여준다. 따라서 우리는 이번 연구를 통하여 구축된 과도방사선 실측평가체계를 활용하여 좀 더 다양한 형태의 상용화된 전자부품소자에 대한 지속적인 연구와 함께 핵 방호기술을 확보하기 위한 연구를 수행하여야 할 것이다.

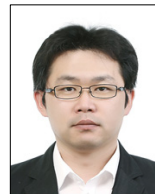
감사의 글

본 연구는 한국원자력연구원을 통한 국방과학연구소 연구비지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Lewis Cohn and Al Wolicki and Mayrant Simons and Clay Rogers and Alfred Costantine, "Transient Radiation Effects on Electronics (TREE) Handbook ", Defense Nuclear Agency 6801 Telegraph Road Alexandria, VA 2231-3398, December 1995
- [2] MIL-STD-883G 1020.1, "Dose rate induced latchup test procedure", (28, February 2006)
- [3] MIL-STD-883G 1021.2 "Dose rate upset testing of digital microcircuits", (28, February 2006)
- [4] OH S.C, Lee,N.H, Lee H.H, "Investigation of Transient Radiation Effects in CMOS ICS Using the TCAD Simulation and Experiment" Juornal of the Korea Physical Society, Vol.59, No.2, August, 2011
- [5] George C. Messenger and Milton S. Ash, "The Effects of Radiation On Electronic Systems", VAN NOSTRAND REINHOLD COMPANY, New York, May 14, 1992

저 자 소 개



오 승 찬 (吳 承 燦)

2000년 건양대학교 컴퓨터공학과 졸업(학사). 2002년 동대학원 컴퓨터공학과 졸업(석사). 2008~현재 충남대학교 전기공학과 박사과정. 2008~현재 한국원자력연구원 융합기술개발부 박사과정연구원



이 남 호 (李 南 昊)

1991년 경북대학교 전자공학과 졸업(학사). 1993년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2004년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국원자력연구원 원자력융합기술개발부 책임연구원, 충남대학교 전기공학과 겸임교수



이 흥 호 (李 興 浩)

1973년 서울대학교 공업교육과 졸업(학사). 1977년 서울대학교 대학원 공업교육과 졸업(석사). 1994년 서울대학교 대학원 컴퓨터공학과 졸업(공학박사), 1979년~현재 충남대학교 공대 전기공학과 교수, 2011~ 현재 충남대학교 산업대학원 원장