

ATMEL 68360에 대한 단일 사건 효과 시험 결과 및 분석

Single Event Effect Test Results and Analysis of ATMEL 68360

김성준, 민경욱, 박선미, 강성원, 이지나, 고대호
한국과학기술원
대전 유성구 구성동 373-1
선종호
SaTReCi
대전 유성구 전민동 461-26

요 약

ATMEL 68360 마이크로프로세서는 MACSAT(Medium-sized Aperture Camera Satellite)의 OBC로써 비행 운영과 자세 제어 소프트웨어를 운영하고 조종한다. 이 소자는 위성의 궤도 내에 존재하는 고 에너지 양성자로부터 발생하는 단일 사건 효과(Single Event Effect)에 의해 오류를 발생시킬 수 있으므로 이에 대한 테스트가 요구된다. UC Davis 내 Crocker Nuclear Laboratory의 76" 사이클로트론에서 발생되는 고 에너지 양성자를 선원으로 사용하여 이 소자에 대한 양성자 SEE 시험을 수행하였다. Single Event Upset과 Single Event Functional Interrupt 현상이 관찰되었으며 누적된 방사선에 의한 TID 효과에 의해 소자가 작동 불능의 상태에 빠지게 되는 것도 확인하였다.

Abstract

ATMEL 68360 Microprocessor, used as an OBC in MACSAT(Medium-sized Aperture Camera Satellite), performs and handles flight operation and attitude control software. Single event effects(SEE) can occur in this device by high energy protons in its orbit, and so proton SEE test is necessary. Proton SEE test for this device was performed by the high energy proton source through 76" cyclotron at Crocker Nuclear Laboratory in UC Davis. Single Event Upsets and Single Event Functional Interrupts were observed and this device stopped the operation by proton TID effect.

1. 서론

지구 주위를 운행하는 인공위성들은 지구 자기장에 의해 포획된 고 에너지 입자들이 만들어낸 방사선 환경을 겪게 된다. 이들 방사선에 의해 위성 내의 반도체 소자들은 총 이온화 방사선 효과(Total Ionizing Dose Effect), 단일 사건 효과(Single Event Effect), 변위 손상(Displacement Damage) 등의 영향을 받게 되며 특히 단일 사건 효과는 고 에너지 입자 하나만으로도 위성의 작동에 심각한 영향을 줄 수 있다.(Gaffey et al. 1994, Poivey 2002) 그러므로 위성에 탑재되는 주요 부품들에 대한 내 방사선 시험이 필수적이며 현재 KOMAC(Korea Multipurpose Accelerator Complex)에서 인공 우주 방사선 환경 재현 시설 구축을 통해 양성자에 의한 단일 사건 효과 및 총 이온화 방사선 효과의 시험을 수행할 수 있도록 진행 중이다.

MACSAT 위성에서 사용되는 ATMEL 68360 마이크로프로세서는 양성자에 의한 단일 사건 효과에 대한 시험 결과나 탑재 후의 관측 결과를 갖고 있지 않으므로 양성자 단일 사건 효과에 대한 시험이 필요하다. 이 소자를 구동시키고 양성자 단일 사건 효과 시험에서 발생하는 오류를 검출하기 위한 시험용 S/W를 개발하였으며, 고 에너지 양성자 선원은 현재 국내 실험이 불가능하여 미국 UC Davis 내의 Crocker Nuclear Laboratory의 76인치 사이클로트론을 사용하여 시험을 수행하였다.

2. 본론

2.1 MACSAT과 ATMEL 68360

MACSAT (Medium-sized Aperture Camera Satellite)은 SaTReCi와 말레이시아 ATSB(Astronautic Technology (M) Sdn. Bhd.)가 공동으로 개발하고 있는 중구경 카메라 탑재 소형 저궤도 위성이다. 탑재된 카메라의 해상도는 2.5m이며 적도를 중심으로 남북 방향으로 각각 9°의 범위를 촬영하게 된다. 이 위성은 고도 685km, 궤도각 7°의 NEO(Near Earth Orbit)를 궤도로 갖기 때문에 안쪽 반알렌대(Inner Van Allen Radiation Belt)의 고에너지 입자들에 의한 방사선의 영향을 받게 된다.(Poivey 2002)

ATMEL 68360 소자는 마이크로프로세서의 일종으로 Motorola사에서 개발되었으며, MACSAT 위성에서 비행 운영과 자세 제어 S/W를 실행시키는데 사용된다. 33MHz의 속도를 갖는 Dual CPU 타입의 마이크로프로세서로 CPU32+, CPM(Communication Processing Module), SIM(System Integration Module)60의 세 모듈로 구성되어 데이터 처리와 통신 기능을 동시에 수행할 수 있다. 테스트에 사용될 소자의 정확한 제품번호는 TS68EN360MRB/Q33L로 DSCC 표준의 제품 선별 기준(screening criteria)을 통과한 고 신뢰도(High Reliability) 제품이다.

2.2 시험용 S/W

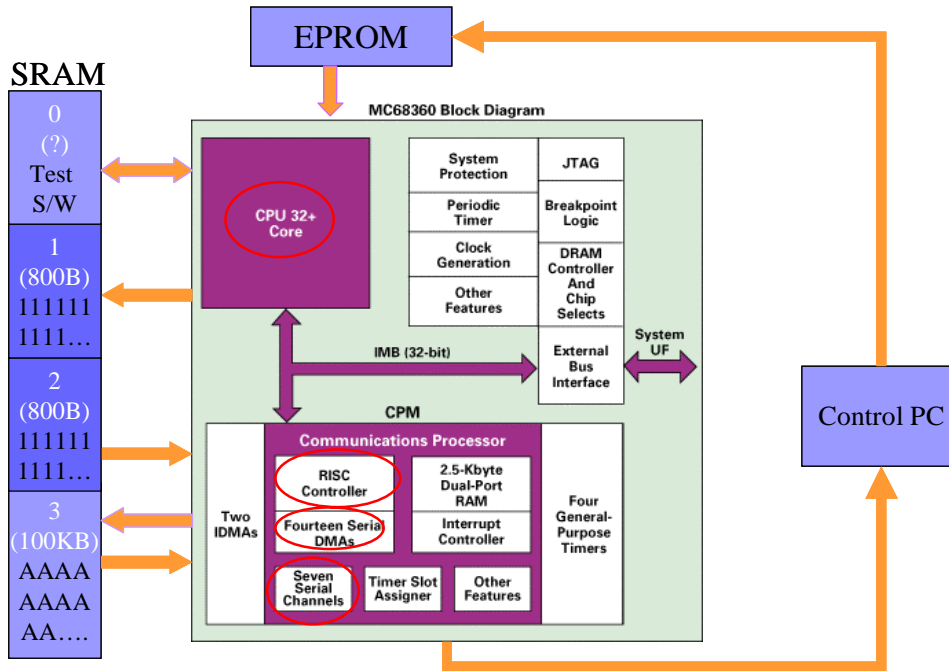


그림 1. 시험용 S/W 구동 시 데이터 흐름

ATMEL 68360의 세 모듈과 시험용 회로 상의 SRAM, EPROM, 그리고 Control PC 사이의 데이터 흐름은 그림 1과 같다. 본 시험에서는 CPU32+와 CPM에서 발생하는 SEE를 각각 측정하였으며 SIM60에선 SEE가 발생하지 않는 것으로 가정하였다. 이것은 사용되는 테스트 보드가 SIM60만을 분리하여 테스트할 수 없기 때문인데, 68360 소자의 원형이라고 볼 수 있는 68302 소자의 SEE의 테스트에서 68360의 SIM60에 해당되는 system control block, timer block, clock control block 등에서 오류가 발생하지 않는 것이 확인되었기 때문에 이 가정은 어느 정도 타당성을 갖게 되고, 측정된 SEE가 SIM60에서 발생한 오류일 가능성은 매우 적다고 볼 수 있다.

2.2.1 CPU32+ 시험(ALU test, Duty factor 100%)

CPU32+ 모듈의 시험은 다음과 같은 과정으로 진행된다. 이것은 ALU(Arithmetic Logic Unit) 시험이며 Duty factor 100%로 수행되게 만들어졌다.

a) 다음의 식을 계산한다.

$$D = \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) + \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) - \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) - \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) + \sin\left(\frac{\pi}{2}\right)$$

sine이나 cosine 함수 각각이 수행되는데 약 2ms의 CPU time이 소모되므로 D값의 계산에는 $2\text{ms} * 5 = \text{약 } 10\text{ms}$ 가 소요되고 1초에 약 100회의 연산이 수행될 것이다.

- b) 계산된 D값을 SRAM1로 전송하여 저장시키고(SRAM1과 SRAM2는 800 bytes의 크기를 갖으며 100개의 D값을 저장할 수 있다.) 1)로 돌아간다.
- c) SRAM1이 다 차면, SRAM1의 데이터들을 Host PC로 전송하며 계산된 D값들은 SRAM2에 저장된다.
- d) SRAM2가 다 차면, SRAM2의 데이터들을 Host PC로 전송하며 계산된 D값들은 SRAM1에 저장된다.
- e) 위 과정을 반복한다.

2.2.2 CPM 시험

CPM 모듈은 RISC Controller, DMA(Direct Memory Access), SCC(Serial Communication Controller)에 대해 점검하였으며 역시 Duty Factor 100%로 수행되도록 설계되었다. 시험의 진행은 다음과 같다.

- a) 전체 테스트 시스템이 부팅할 때 SRAM3(512*200 = ~100KB) 영역에 미리 정해둔 값 A(2진수로 1010)를 채워 넣는다.
- b) DMA를 통해 SRAM3에 저장해뒀던 데이터를 512 bytes만큼 읽어 들인다.
- c) 읽은 값을 SCC를 통해 Host PC로 전달한 후 2)로 다시 이동
- d) SRAM 저장해두었던 모든 데이터를 읽은 후엔 다시 저장 영역의 첫 데이터부터 다시 읽어 들이기 시작한다.
- e) Host PC로의 데이터 전송은 CPU32+가 우선권을 갖는다.

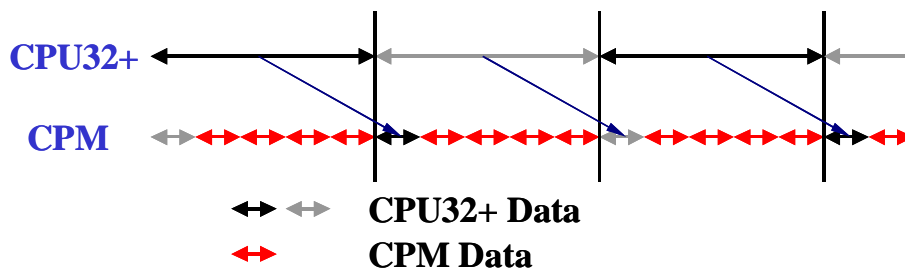


그림 2. CPU32+와 CPM의 데이터 전송 타이밍

Host PC로의 데이터 전송은 CPM을 통해서 이뤄지며 CPU32+의 계산 결과와 SRAM3에 미리 저장해 둔 데이터를 약 1 대 4의 비율로 전송하게 된다. 전송 타이밍은 그림 2와 같이 매 1초마다 먼저 CPU32+의 계산 결과를 전송하고(SRAM1 또는 SRAM2 전체) 나머지 시간에 SRAM3에 저장된 데이터를 전송하게 된다.

2.2.3 Data Handling S/W

Host PC에 설치되는 Data Handling S/W는 부팅 시 SRAM의 일정 영역에 시험 S/W를 업로드하며, RS-232 포트를 통해 들어오는 데이터들을 저장하고 정상 여부를 화면에 표시하며 오류의 횟수를 CPU32+와 CPM으로 나누어 기록해 준다. 이

프로그램은 저장된 데이터를 다시 읽어 들여 화면에 재생하는 역할도 수행하게 된다.

2.3 TID 시험

준비된 시험 회로와 시험 S/W을 포함한 전체 시험 구성의 정상 동작 여부를 확인하기 위하여 원자력 연구소(KAERI) 내의 저준위 조사실의 Co-60 감마선원을 사용한 TID 시험을 수행하였다. Co-60 감마선원은 MIL-STD-883, ASTM F1892 등의 내방사선 테스트에 대한 표준 문서에서 TID 효과(TID : Total Ionizing Dose)에 대한 가장 일반적인 방사선 선원으로 권장된다.

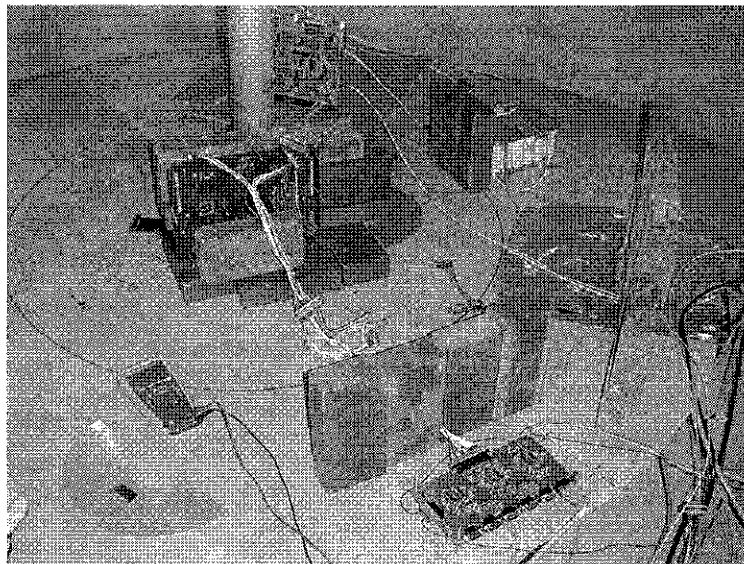


그림 3. Radiation Test Setup

계산 결과는 실시간으로 Host PC에 저장됨과 동시에 모니터 화면을 통해 정상 동작 유무를 확인할 수 있었다. 사용된 조사율(dose rate)은 $3 \text{ rad}(\text{SiO}_2)/\text{sec}$ 이었으며 조사 도중에 계속해서 방사선에 의한 영향을 확인할 수 있는 실시간 측정 방법으로 테스트가 진행되었다. 68360 칩을 제외한 테스트 보드에 감마선이 조사되는 것을 막기 위해 조사 시 소켓 둘레를 납 벽돌로 막아 테스트 보드가 받는 영향을 최소화하였으며(그림 3) 정확한 조사율 확인을 위해 소자의 위치에 알라닌을 놓고 함께 조사하였다. 조종실에선 두 대의 노트북을 통해 계산 결과를 받아들이고, 누적되는 방사선량에 따른 사용 전류 증가 역시 실시간으로 확인하였다.

누적된 방사선 조사량이 증가함에 따라 $18 \text{ krad}(\text{SiO}_2)$ 가 넘어서면서 이상 동작을 나타냈으며 $2 \text{ krad}(\text{SiO}_2)$ 가량 더 조사된 후 소자는 정지하였다. 이 과정은 그림 4에서도 확인할 수 있다. $8 \text{ krad}(\text{SiO}_2)$ 부터 전류가 증가하였으며 $18 \text{ krad}(\text{SiO}_2)$ 에서 functional failure와 함께 사용 전류의 불연속적인 증가를 나타낸다. 이후 칩이 완전

히 멈춤에 따라 전류가 급격히 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

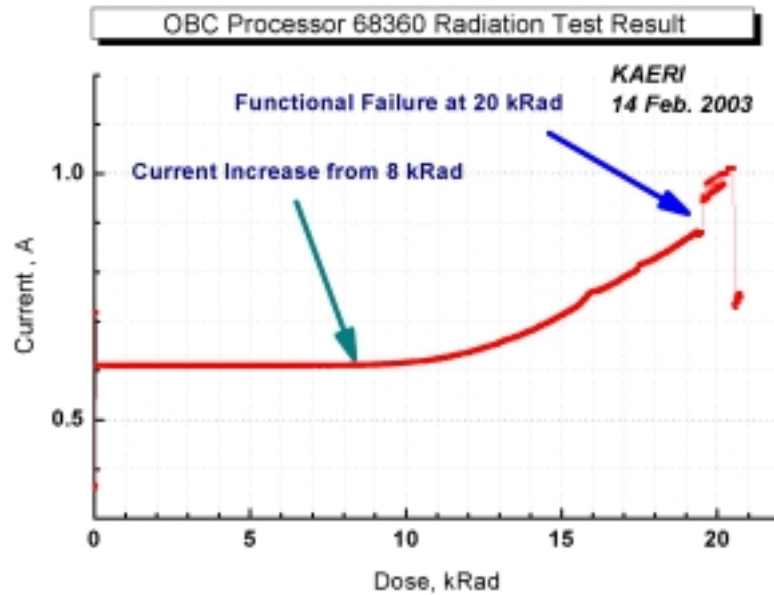


그림 4. Current Observation for SEE Test Setup

TID 시험 결과 준비된 시험 회로 및 시험 S/W를 포함한 전체 시험 구성이 정상 구동되는 것이 확인되었다. 여기에 고 에너지 양성자에 의해 가열되는 ATMEL 68360의 온도 변화의 측정을 위한 thermocouple이 추가되어 양성자 SEE 시험이 수행되었다.

2.4 SEE 시험

2.4.1 방사선 설비

UC Davis내 Crocker Nuclear Laboratory(CNL)에서 제공하는 76인치 Cyclotron을 사용하여 고 에너지 양성자 입자를 생성하였다. 양성자의 에너지는 1.25 MeV에서 68 MeV까지 사용가능하며 선속(flux)은 $\sim 10^2$ protons/cm²sec에서 3.13×10^{10} protons/cm²sec까지 변화시킬 수 있다. 필요한 에너지를 얻기 위해 투과 이후의 에너지가 측정되어 있는 degrader를 사용할 수도 있지만 본 실험과 같이 에너지 변화를 크게 할 경우 에너지 및 공간 분포에 대한 균일성이 나빠지게 된다. 그러므로 본 시험에선 cyclotron 자체 내에서 에너지를 변환시켜 사용하였으며, 에너지를 한번 바꾸는 데는 약 한 시간가량이 소요되었다. 양성자를 SEE 테스트의 방사선원으로 사용할 경우 중이온(heavy ion)을 사용할 경우 같은 수의 오류를 얻는데 필요한 선량(flucence)이 훨씬 높기 때문에 TID 효과에 의해 SEE 시험의 결과가 영향 받기 쉽다. 따라서 누적 방사선량을 주의 깊게 측정해야 하는데, CNL에서는 SEEM(Secondary Electron Emission Monitor)과 FC(Faraday Cup)을 dosimetry로

사용하여 실시간으로 방사선량을 측정, 확인할 수 있다.(Castaneda, 2001)

2.4.2 시험 과정

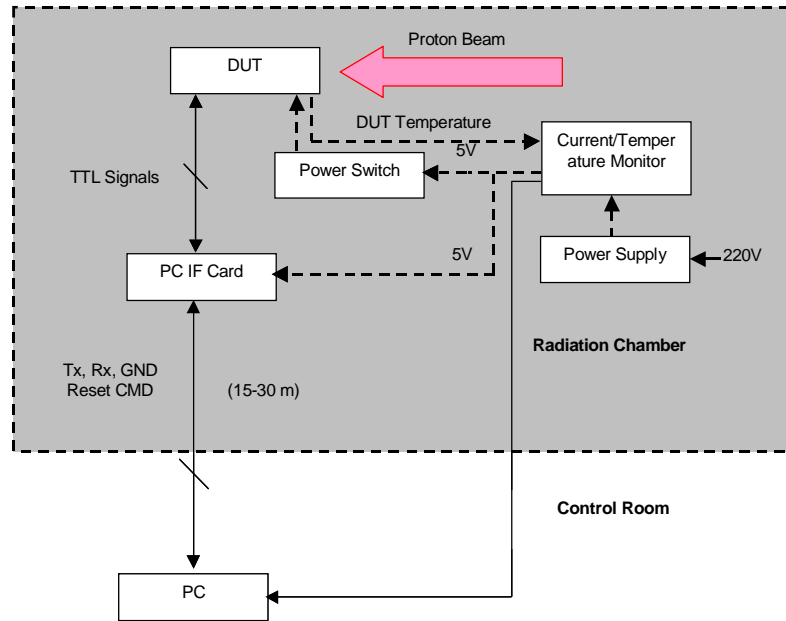


그림 5. 전체 시험 구성도

양성자 단일 사건 효과 시험을 위한 전체 시험 구성은 그림 5와 같다. 이와 같은 시험 장치들의 배열, 양성자 선원 준비 등을 포함한 시험 과정은 다음과 같다.

- a) Cyclotron에서 시험에 필요한 beam 에너지를 설정한다.
- b) 테스트 영역에 맞는 beam shaping cover를 씌운다.
- c) 테스트 보드에 68360 칩을 설치한다.
- d) 테스트 보드를 XY 위치 조정 테이블에 설치한다.
- e) 조사실 내에 설치될 장치들을 배치하고 RS-232 케이블을 통해 조종실(Control Room)에 설치된 Host PC들과 연결한다.
- f) 위치 확인용 레이저를 켜고, XY 위치 조정 장치를 이용해 조사될 영역을 정확히 조정한다.(그림 6)
- g) 68360의 metal cap 옆에 thermocouple을 고정시킨다.
- h) 테스트 보드를 포함한 모든 장치들의 전원을 켜고 정상 동작을 알리는 LED가 켜지는지 확인한다.
- i) Host PC1에서 테스트 S/W를 업로드한 후 정상 작동하는지 확인한다.
- j) Host PC2에서 출력 전류와 칩의 온도, 그리고 조사실의 온도가 제대로 기록되는지 확인한다.
- k) 사용할 선속을 BEAMMON을 통해 입력한 뒤 Test S/W의 시작과 동시에 beam

을 조사시킨다. 시작 시간을 기록한다.

l) Host PC들을 통해 모니터링하며 작동이 멈출 경우 beam 조사를 멈추고 시간을 기록한다.

m) 다시 부팅 후 성공할 경우 k)부터 반복한다.

n) 부팅에 실패할 경우 테스트 보드를 XY 테이블에서 제거한 뒤 68360칩을 교체한 뒤 a)부터 반복한다.

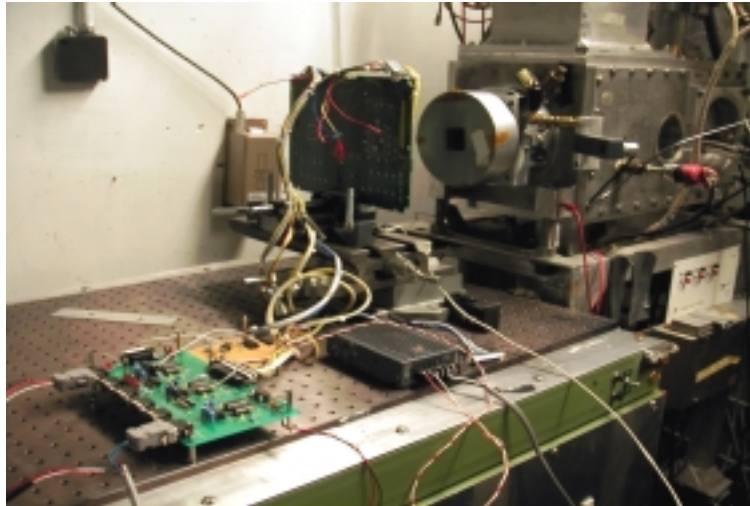


그림 6. Irradiation Table Setup

2.4.3 시험 결과

Beam Energy	CPU32+ Error	CPM Error	CPU Halt	Total
63.3 MeV		1	4	5
51 MeV	1	1	8	10
25 MeV	1	1	5	7
	2	3	17	22

표 1. 관찰된 Event 분류

표 1에서 나타나듯이 일반적으로 나타나는 양성자 단일 사건 효과의 경향과는 반대로 사용된 모든 beam 에너지에 대해 soft error보다는 hard error가 많이 발생한 것을 확인할 수 있다. hard error의 대부분은 SEFI(single event functional interrupt)이며 micro-latchup에 의한 hard error로 추측되는 event도 있다.(ASTM F1192, 2000)

ATMEL 68360 소자가 TID 효과에 비교적 약한 한계로 인해 소자가 완전히 동작을 멈추기 전까지 발생한 SEE가 적다는 것은 추후 여러 소자를 사용한 시험을 통해 해결될 수 있을 것이다. 에너지 변화에 따른 event 수의 변화는 거의 없다고 볼 수 있다.

조사 시험 중 측정된 68360 칩 내부의 전류는 Data Acquisition Unit을 통해 전압의 형태로 측정된다. 이 전압을 전류로 변환하기 위해 측정된 데이터를 linear fitting한 결과 선형도(linearity) $r=0.9999$ 를 갖고 $I=1.189V-0.0226$ 과 같은 변환 관계로 나타났다. 이 식을 사용하여 측정된 모든 전압은 실제의 사용 전류(DUT Current)로 변환되었다. 사용된 각각의 beam 에너지에 대한 측정 결과를 정리하면 다음과 같다.

a) 25 MeV

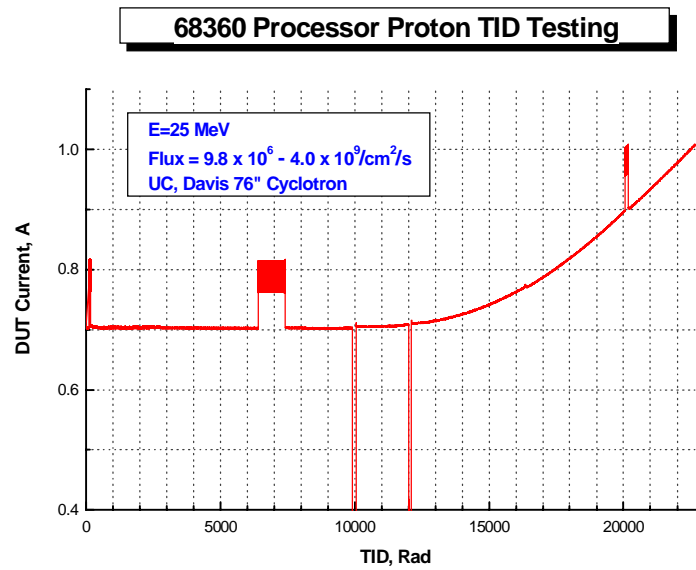


그림 7. 누적된 방사선량에 따른 DUT 전류 변화(Beam 에너지: 25 MeV)

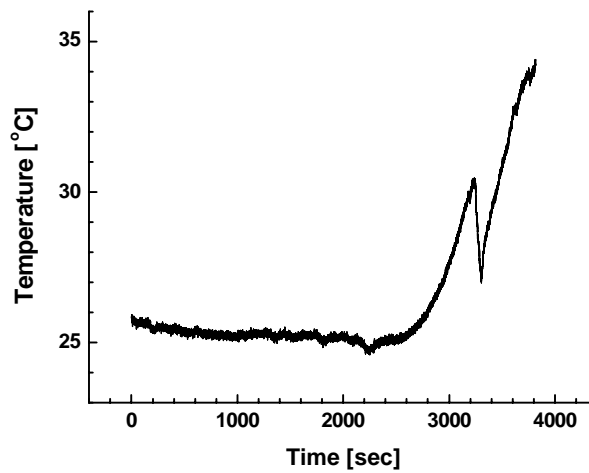


그림 8. 시험 중의 온도 변화(Beam 에너지: 25 MeV)

10 krad(SiO₂)가량 조사된 시점부터 DUT 전류가 증가하고 이에 따라 온도도 증가하는 것을 확인할 수 있다. hard error 발생 시점에서 DUT 전류가 급격히 증가하거나 감소하는 현상을 보여주며, 동작 정지 시점의 온도가 ATMEL 68360의 정상 작동 온도보다 훨씬 낮은 것으로 볼 때 TID 효과에 의한 직접적인 영향이 소자의 동작을 멈추게 했다고 생각할 수 있다. SEE 시험의 관점에서 보면, 연속적인 CPU Error를 발생시키다가 동작을 멈추었으므로 실제로 소자가 정상 동작의 불능 상태에 빠진 것은 이 연속 error의 시작 시점이라고 볼 수 있다.

2) 51MeV

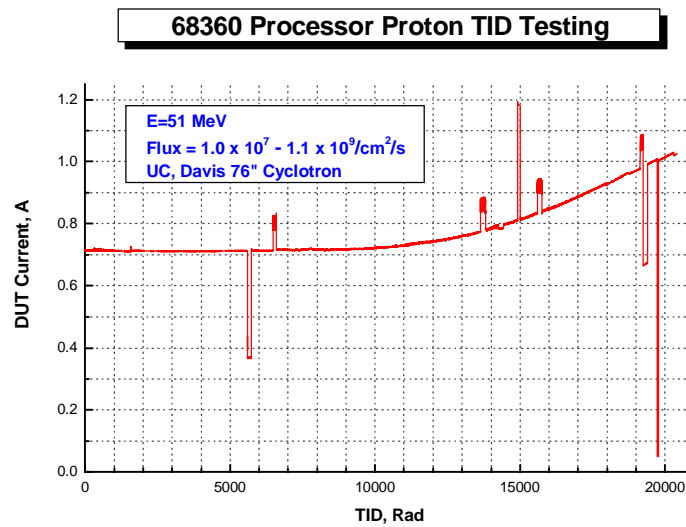


그림 9. 누적된 방사선량에 따른 DUT 전류 변화(Beam 에너지: 51 MeV)

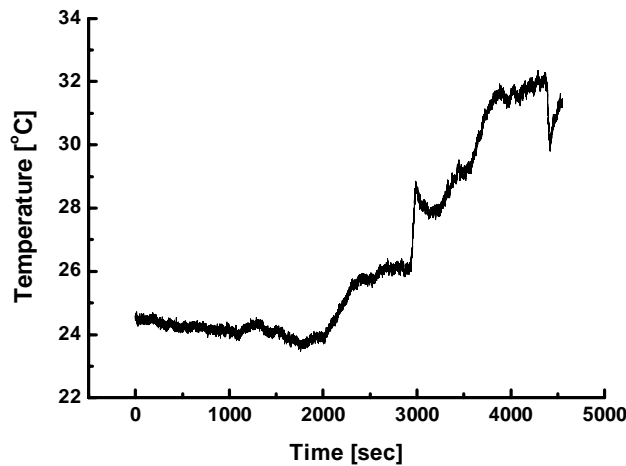


그림 10. 시험 중의 온도 변화(Beam 에너지: 51 MeV)

25 MeV의 결과와 유사하게 9 krad(SiO₂) 이후 사용 전류의 증가와 함께 연속적인 CPU Error를 발생시키다가 동작을 멈추었다.

c) 63.3MeV

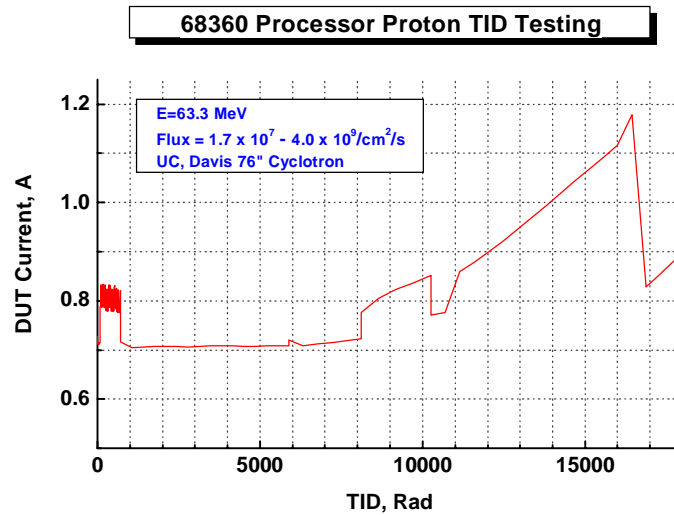


그림 11. 누적된 방사선량에 따른 DUT 전류 변화(Beam 에너지: 63.3 MeV)

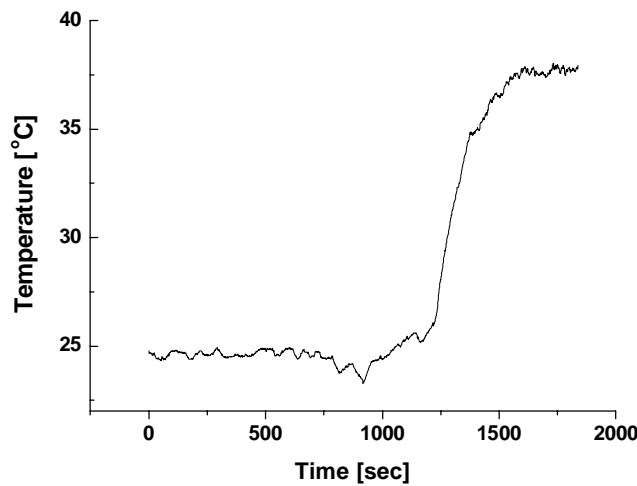


그림 12. 시험 중의 온도 변화(Beam 에너지: 63.3 MeV)

전체적인 온도 및 DUT 전류의 측정 결과는 유사하지만 동적 정지 전의 과정에서 특이함을 나타내었다. 25 MeV, 51 MeV의 경우와는 달리 CPU32+에서 먼저 연속적인 Error를 발생하였으며, 이어서 CPM에서 연속적인 Error가 발생한 뒤 동작을 완전히 멈추었다.

3. 결론

MACSAT 위성의 OBC로 사용되는 ATMEL 68360 마이크로프로세서에 대해 고 에너지 양성자를 사용한 단일 사건 효과 시험을 수행하였다. CPU32+와 CPM 모듈의 사용률을 100%로 하여 오류를 검출할 수 있는 S/W와 CNL의 사이클로트론을 사용하였으며, SEU와 SEFI가 관측되었다. 일반적인 양성자 단일 사건 효과의 경향과는 반대로 사용된 모든 beam 에너지에 대해 soft error보다는 hard error가 많이 발생한 것을 확인할 수 있었으며 시험 회로 및 측정 시스템, 시험 S/W의 upgrade 및 추가 실험을 통해 정확한 발생 기작과 발생 경향 차이를 분석해야 할 것이다. 에너지 변화에 따른 event 수의 변화는 없다고 볼 수 있으며 더 넓은 범위의 양성자 에너지에 대한 시험을 통해 실제 궤도에서의 오류 발생을 예측하는데 필요한 양성자 에너지에 따른 SEE 단면적 곡선(cross section curve)을 구해야 할 것이다.

ATMEL 68360에 대한 TID 효과는 양성자 조사와 Co-60 감마선원 조사의 결과를 종합해 볼 때 10 krad(SiO₂) 이하에서는 그 영향을 무시할 수 있으며 이것은 mission requirement 4 krad(SiO₂)의 2배 이상이므로 MACSAT에서는 문제되지 않는다고 결론지을 수 있다. 또한 측정된 온도의 최고치를 볼 때 열에 의한 직접적인 소자 손상 및 동작 정지는 없었다.

참고 문헌

ASTM F1192, 2000, 2

Castaneda, C. M., Crocker Nuclear Laboratory (CNL) Radiation Effects Measurement and Test Facility, 2001

Crain, S. H., La Lumondiere, S. D., Miller, S. W., Crain, W. R., Crawford, K. B., Hansel, S. J., Koga, R., & Moss, S. C. 2000, IEEE Radiation Effects Data Workshop, 2000, 85

Gaffey Jr., John D., & D. Bilitza 1994, J. of Spacecraft and Rocket, 31, 172

Poivey, C. 2002, IEEE NSREC Short Course Notebook, V-2