

저궤도 우주방사선 환경에서의 반도체 소자의 신호오류 예측모델  
SEU Model of Semiconductor Devices  
under the LEO Space Radiation Environment

신명원, 김명현  
경희대학교  
경기도 용인시 기흥읍 서천리 1

요 약

Total Ionizing Dose(TID)와 함께 우주선의 운전에 있어 제한이 되는 Single Event Upset(SEU)의 예측계산방법에 대하여 평가하였다. One-parameter model을 이용하여 우리별 1호 위성을 대상으로 SEU의 문턱에너지를 평가하였고, 가속기를 사용한 지상 실험 결과를 one-parameter model과 two-parameter model을 사용하여 비교평가하였다. One-parameter model이 SEU 발생율을 좀더 보수적으로 평가 하였으며, 인공위성의 차폐설계의 시작점에서는 one-parameter model이 유용하게 사용할 수 있는 것으로 판단되었다. 또한 궤도조건과 차폐체의 두께에 따라 반도체의 성능과 위성에 탑재된 에러보정회로의 성능을 평가하였다. 저궤도 조건에서 우리별 1호 위성 차폐체의 등가두께인 20 mm을 적용한 경우, 문턱에너지가 26.2 MeV이상의 값을 갖는 반도체 소자를 사용하면 SEU로 인한 정보손실의 위험은 없는 것으로 평가되었으며, 저궤도 조건에서 임무궤도에 따라 에러보정회로의 성능이 약 4배정도의 차이를 갖는 것으로 평가되었다.

Abstract

For a space satellite or spaceship, the evaluation model for SEU effect as well as TID effect is crucial in structure design. The ground experiment results from accelerators were analyzed by one-parameter model and two-parameter model for SEU cross-section. SEU probability was calculated more conservatively when using the one-parameter model. Therefore one-parameter model could be used more effectively at initial stages of the configuration design of satellites. In addition, the performance of the semiconductor and the error correction circuit installed on the satellite were evaluated in the Low Earth Orbit(LEO) condition. In LEO condition, it was evaluated that the loss of information by SEU could be protected by using the device having threshold energy 26.2 MeV when considered the equivalent shield thickness of the KITSAT-1, about 20 mm. The difference in performance of error correction circuit was about 400 % with various mission orbits in identical altitude.

## I. 서론

1990년대 초반부터 국내의 위성산업이 본격적으로 시작되어 국가적 기간산업으로 우주산업을 추진하고 있다. 그러나 국내의 위성설계기술은 선진외국의 기술과 비교하여 많이 뒤떨어진 것이 사실이다. 저궤도를 운행하는 인공위성은 지구 자기장에 포획된 고에너지 방사선의 환경을 겪게 된다. 이들 방사선에 의해 위성체 내의 반도체 소자들은 총 이온화 효과(TID), 단일사건효과(SEE), 변위손상(Displacement Damage)등의 영향을 받게 되며 특히 단일사건효과는 이들 세 가지 반응 중 가장 빈번히 발생하는 반응이며, 고에너지 입자에 의해 순간적으로 발생되기 때문에 차폐체를 사용한 방호는 거의 불가능할 뿐 아니라 위성의 작동에 심각한 영향을 줄 수 있다. 그러므로 위성에 탑재되는 주요 반도체 부품들의 단일사건혼란(SEU)에 대한 평가가 필수적이다. 그러나 국내의 경우 반도체에 대한 SEU의 시험을 할 수 있는 설비가 갖추어져 있지 않고, 현재 KOMAC(Korea Multipurpose Accelerator Complex)에서 인공 우주 방사선 환경 재현 시설 구축을 통해 양성자의 단일사건효과 및 총 이온화 방사선 효과의 시험을 할 수 있도록 계획 단계에 있다.

본 연구에서는 SEU의 평가모델인 one-parameter model과 two-parameter를 사용하여 SEU의 평가 타당성을 조사하였으며, one-parameter model을 이용하여 저궤도 위성인 우리별 1호에서의 SEU 문턱에너지를 평가하였다. 또한 저궤도 방사선 환경의 변화에 따른 SEU의 발생량과 위성에 사용되는 반도체와 에러보정회로의 성능을 평가하였다.

## II. SEU 반응단면적 평가모델

SEU란 방사선환경내에서 반도체 메모리내의 정보가 bit단위로 변하게 되는 현상이며(0→1, 1→0), 이러한 SEU 현상은 일정 시간 경과 후에는 없어지며 반도체는 정상상태로 회복한다. 대부분의 SEU는 중이온( $Z \geq 2$ )과 메모리 셀의 물질과의 반응에 의해 발생하며, 메모리의 논리상태가 변하는 반응은 셀의 체적( $V_{cell}$ )내에 문턱에너지( $E_{thr}$ )이상의 에너지가 축적될 때마다 발생한다. TID 효과가 위성의 수명을 결정짓는 요인이라면, SEU에 의해 위성에서 오신호를 발생시킬 수 있으므로 위성의 효율적인 운전측면에서 매우 중요한 인자라고 할 수 있다. 정확한 SEU 발생의 예측은 위성이 경제적인 설계에 많은 영향을 미칠 수 있다. SEU 예측의 정확성에 영향을 주는 인자로는 SEU 반응단면적 모델, 가속기를 이용한 반도체의 조사실험과 실험 자료의 정확한 분석 그리고 방사선환경등이 있다.

SEU는 주로 중이온과 양성자에 의해 발생되며 기본적인 물리현상은 중이온과 양성자의 경우가 같다. 두 가지 모두 소자를 투과하는 중이온의 이온화에 의해 생성되어진 전하가 집적되어 소자에 영향을 주게 된다. 중이온의 경우에는 소자에 직접적인 영향을 주지만, 양성자는 핵반응에 의해 생성되는 이차입자에 의해 발생한다. 양성자에 의해 유발되는 SEU의 평가에는 일반적으로 Bendel이 개발한 one-parameter model과 two-parameter이 사용되며, 이들에 대한 설명은 아래에 나타내었다. 아래의 식 1에서와 같이 one-parameter model에서는 SEU 문턱에너지인 "A"

parameter 하나에 의해서 SEU 반응단면적을 결정할 수 있기 사용하기에 매우 용이한 장점을 가진다. 식 2는 Bendel과 Petersen이 제안한 two-parameter model이다. 아래의 식에서 미지수는  $\sigma(\infty)$ 과 A이며, two-parameter model을 사용하기 위해서는 충분한 실험자료가 확보되어야 한다.

$$\sigma = \left(\frac{24}{A}\right)^{14} \times [1 - \exp(-0.18Y^{0.5})]^4 \quad (1)$$

$$\sigma = \sigma(\infty)[1 - \exp(-0.18Y^{0.5})]^4 \quad (2)$$

$$\text{여기서 } Y = \left(\frac{18}{A}\right)^{0.5}(E - A),$$

$E, A$ 의 단위는 MeV,

$A$ 는 upset에 필요한 문턱에너지 값을 나타낸다.

일반적으로 문턱에너지(A)값은 약 17 MeV를 사용하며, limiting cross-section,  $\sigma(\infty)$ 는  $1 \times 10^{-13} \text{cm}^2/\text{bit}$ 이하의 값을 적용한다. One-parameter model에서는 많은 지상실험 자료를 이용하여 two-parameter model의 limiting cross section,  $\sigma(\infty)$ 을  $(24/A)^{14}$ 으로 근사하였다.

여러 연구결과에서는 two-parameter model이 one-parameter model보다 실험결과를 잘 묘사하는 것으로 보고하고 있고, Bendel의 two-parameter model의 개선에 대한 연구내용을 발표하였다. 개선 내용은 주로 limiting cross section에 대한 수정하거나 입사 양성자의 에너지에 따른 단일사건혼란(SEU) 반응단면적의 형태를 개선하는 방법을 사용하였다. Stapor는 기존의 one-parameter model에서 limiting cross section을  $\sigma(\infty) \approx (B/A)^{14}$ 로 근사하여 식 3와 같이 나타내어, 단일사건혼란의 반응단면적을 "A"와 "B" parameter에 의하여 결정하도록 하였으며, "B" parameter는 반도체소자의 특성에 따라 다른 값을 갖는다.<sup>[1]</sup> 식 4에서는 limiting cross section(S)값을 독립적으로 사용하여 실험값에의 적용을 용이하게 하였다.<sup>[2]</sup> 식 5에서 표현된 two-parameter model은 one-parameter model에  $B_0$ 값을 추가로 도입하여 반응단면적의 에너지에 따른 형태를 변화시켜 실험값과의 적용을 용이하게 하였다.<sup>[3]</sup>

$$\sigma = \left(\frac{B}{A}\right)^{14} [1 - \exp(-0.18Y^{0.5})]^4 \quad (3)$$

$$\sigma = S [1 - \exp(-0.18Y^{0.5})]^4 \quad (4)$$

$$\sigma = \left(\frac{24}{A}\right)^{14} [1 - \exp(-B_0Y^{0.5})]^4 \quad (5)$$

언급된 이상의 4가지 two-parameter model을 적용하기 위해서는 원하는 소자에 대하여 2가지 다

른 에너지빔에 대한 조사실험 자료가 필요하다. 계산에 사용되는 인자를 결정하기 위한 실험 자료는 에너지 영역이 40 ~ 75 MeV 와 200 ~ 500 MeV사이에서 각각 선택하여 사용하는 것이 효과적인 것으로 나타났다. 이는 양성자의 에너지가 200~400 MeV에서 핵자간의 반응의 특성이 변화하기 때문이다.

### III. 가속기 실험자료 수집 및 분석

앞에서 언급한 것과 같이 양성자에 의해 유발되는 단일사건혼란(SEU)의 반응단면적 계산을 위해 여러 가지 모델이 연구 및 개발되었다. 그러나 본 연구에서는 실험 자료의 부족 등 여러 가지 이유로 사용하기에 가장 용이한 one-parameter model을 이용하여 단일사건혼란(SEU)에 대한 해석을 수행하고자 하였다. 여러 연구 자료에서 총 198개의 반도체에 대한 가속기 조사실험 자료를 발췌하여 사용하였다.<sup>[1],[4],[5],[6],[7]</sup>

실험 자료들을 여러 가지 기준에 따라 분류하여 반도체의 SEU 문턱에너지의 특성을 살펴보았다. 먼저 실험 자료를 제조회사별로 분류하여 SEU 문턱에너지의 특성을 살펴보았으나 아래의 그림 1에서 보듯이, 제조회사에 따른 특징은 찾아볼 수 없었다.

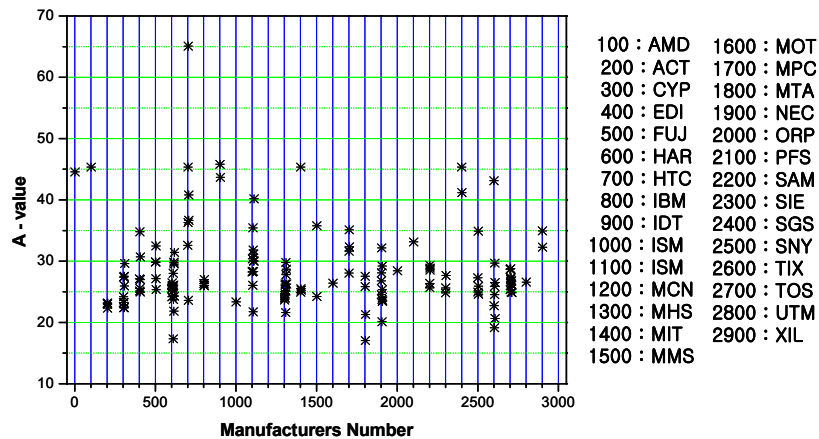


그림 1. 제조회사별 반도체소자의 양성자 유발 SEU 문턱에너지 값

두 번째로 반도체의 종류에 따라 SEU의 문턱에너지의 특성을 살펴보았다. 실험에 사용된 소자의 종류는 Micro-controller, First-In First-Out(FIFO), Field Programmable Gate Array(FPGA), Flash Memory, Static Random Access Memory (SRAM), Dynamic Random Access Memory(DRAM)이다. 아래의 표 1에서는 문턱에너지를 10개의 그룹으로 나누어 각각의 소자들의 문턱에너지를 살펴보았다. 소자의 종류에 따른 분석결과에서 flash memory의 경우에 다른 소자들에 비해 월등히 높은 문턱 에너지 값을 가짐을 확인하였으며, 대부분의 소자들의 문턱에너지는 20 ~ 30 MeV 사이의 값을 가지는 것으로 나타났다. 이는 근래에 인공위성에서 SEU로 인한 정보의

손실을 방지하기 위해 기존의 SRAM이나 DRAM을 사용하는 대신에 flash memory를 사용하는 사실을 확인하는 결과이다.

표 1. Device 종류별 문턱에너지값에 따른 분포.

Group #	Region [MeV]	FIFO	FPGA	SRAM	Flash Memory	DRAM	Micro-controller
1	0 ~ 25	0	0	0	0	1	0
2	5 ~ 10	0	0	2	0	3	1
3	10 ~ 15	0	0	2	0	6	7
4	15 ~ 20	1	0	1	0	1	1
5	20 ~ 25	1	4	26	0	14	0
6	25 ~ 30	2	2	51	0	27	2
7	30 ~ 35	0	2	8	0	7	1
8	35 ~ 40	0	1	5	0	2	0
9	40 ~ 45	0	0	5	4	2	0
10	45 <	0	0	0	4	2	0
합 계		4	9	100	8	65	12

위의 분석결과를 사용하여 각 소자의 종류에 따라 평균된 SEU 문턱에너지, A값을 산출하였다. 대부분의 인공위성에서는 안정적인 자료의 송·수신을 위하여 SRAM을 사용하고 있으나, 최근에는 자료의 처리속도와 저장능력의 증대를 위하여 DRAM을 사용하려는 연구가 진행되고 있다. 아래의 표 2에서는 소자의 종류별로 실험 자료를 이용하여 평가된 평균 SEU 문턱에너지를 나타내었으며, DRAM의 경우 SEU 측면에서 SRAM과 비교하여 큰 차이는 없지만, 실험결과와 분포가 일정하지 않은 이유로 편차가 크게 나타났다.

표 2. 반도체 소자의 종류별 평균 SEU 문턱에너지.

소자의 종류	SEU 평균 문턱에너지 (MeV)
SRAM	26.63 ± 3.42
DRAM	28.79 ± 7.31
SRAM + DRAM	27.44 ± 5.30
Flash Memory	44.30 ± 1.56

세 번째로 반도체의 메모리 사이즈에 따른 SEU 문턱에너지의 특징을 살펴보았으나, 특별한 경향을 나타내지 않았다. 그러나 SRAM의 경우 성능이 비슷한 경우 문턱에너지의 분포는 서로 비슷한 값을 갖는 것으로 평가되었다.

이외에도 각 소자의 제조회사의 홈페이지를 검색하여 구동 전압과 구동 전류에 따라 분류하여 분석을 하였으나, SEU 문턱에너지에 대한 경향을 파악할 수 없었다. 아래의 그림 2는 조사된 실

험자료들을 대상으로 SEU 문턱에너지값(A)을 계산하여 A값을 크기에 따라 실험자료의 분포를 나타내었다. 대부분의 실험자료(65.05 %)들이 20 ~ 30 MeV 사이의 값을 갖는 것으로 나타났다. 높은 SEU 문턱에너지를 갖는 소자들은 대부분이 SRAM과 DRAM이외의 소자들이다. 이는 상용 반도체의 경우 특별한 기능이나 목적을 갖는 경우를 제외한다면, 거의 비슷한 SEU 문턱에너지 값을 갖는다고 할 수 있다. 따라서 위성의 차폐설계의 초기단계에서 SEU의 영향을 개략적으로 분석하기 위해 앞서 구해진 소자의 종류별 SEU 문턱에너지(A) 평균값을 사용하는 것은 타당할 것으로 예상된다. 본 연구에서는 보수적인 계산을 위하여 평균값에 대한 68 % 신뢰도 구간에서의 최소값인 23.22 MeV를 SRAM에 대한 A 값으로 적용하여 위성에서의 SEU 발생율을 평가하였다.

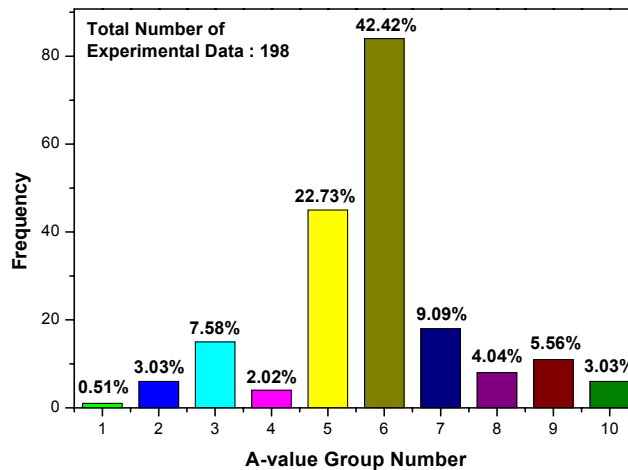


그림 2. 조사된 실험자료의 SEU 문턱에너지 분포.

#### IV. One-parameter model과 Two-parameter model의 계산결과 비교

본 절에서는 SEU 반응단면적의 평가모델인 one-parameter model과 two-parameter model의 계산결과를 비교하였다. 그림 3에서는 두 모델에 의해 평가된 SEU 반응단면적을 나타내었다. 계산시 one-parameter model에 적용된 문턱에너지, A값은 위에서 평가한 SRAM에 대한 값, 23.22 MeV을, two-parameter model의 A과  $\sigma(\infty)$ 값은 앞서 언급된 대표값으로 A는 17.0 MeV,  $\sigma(\infty)$ 는  $1.0^{-13} \text{ cm}^2/\text{bit}$ 을 적용하였다. One-parameter model에 의해 평가된 단일사건혼란(SEU) 반응단면적이 저에너지영역을 제외하면 높은 값을 갖는 것으로 나타났다. 아래의 그림 4에서는 one-parameter model을 사용하는 경우 A값의 변화에 따른 SEU 반응단면적의 변화를 나타내었다. A값이 증가할수록  $\sigma(\infty)$ 은 감소하였으며, 전체적인 SEU 반응단면적도 감소하였다. 그러므로 A값만을 사용하여 양성자에 대한 반도체간의 SEU 민감도를 비교할 수 있다.

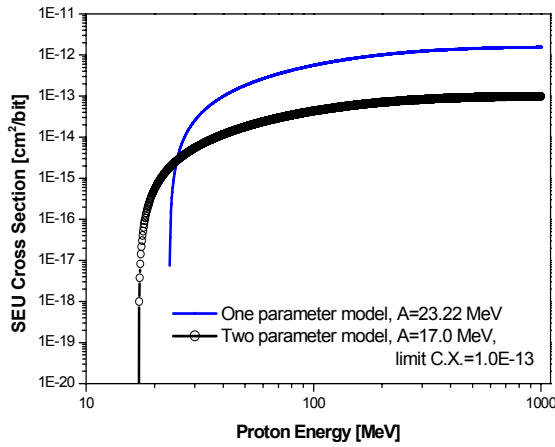


그림 3. One-parameter model과 Two-parameter model로 계산된  $\sigma_{SEU}$ .

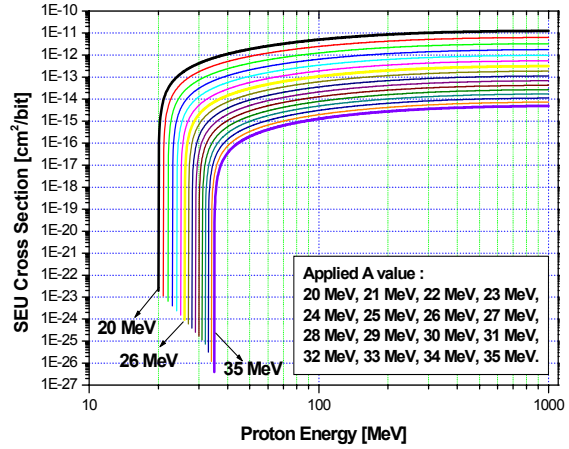


그림 4. One-parameter model에서 A값의 변화에 따른  $\sigma_{SEU}$ 의 변화.

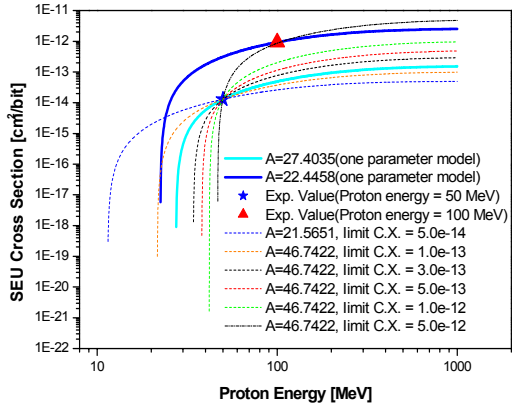
아래에서는 실험값과의 비교를 통하여 one-parameter model과 two-parameter model을 평가하였다. 평가에는 식 1에 나타낸 one-parameter model과 식 4에 나타낸 two-parameter model을 대상으로 하였고, 실험 자료는 발췌한 자료중 동일한 반도체 소자에 대하여 두 가지 이상의 에너지 범이 조사된 자료를 선택하였다. 표 3에서는 계산에 사용된 실험결과를 요약하였다.

표 3. 비교계산에 사용된 양성자 가속기 실험결과.

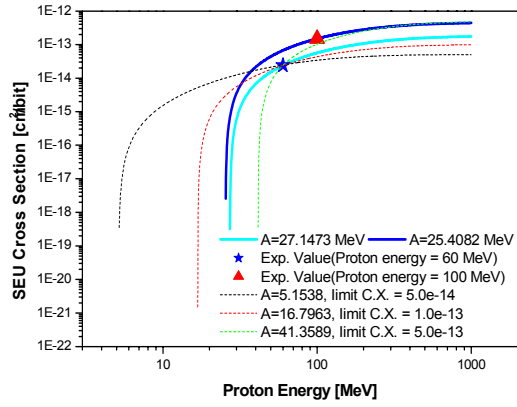
Test Org.	Device	Function	Technology	Ntr	Proton Energy (MeV)	Cross Section (cm <sup>2</sup> /bit)	Test Date	Facility
ESA	EDH8832C100CL	32K * 8	CMOS	EDI	50	0.13E+00	Apr-91	SAT
					100	0.93E+00	Nov-89	PSI
ESA	HMI-6616-9	2K * 8	CMOS	HAR	60	0.24E+00	Jun-89	VEC
					100	0.15E+00	Nov-89	PSI
ESA	HMIE-65664B-2	8K * 8	CMOS	MHS	50	2.90E-14	Apr-93	PSI
					300	0.15E+00	Apr-93	PSI
ESA	HM6116P-3	2K * 8	CMOS	HTC	45	0.31E+00	Jun-89	VEC
					209	0.58E+00	Nov-89	PSI
					500	0.36E+00	Apr-91	PSI
ESA	MM1-6504H11	4K * 1	CMOS	MHS	60	0.10E+00	Jun-89	VEC
					100	0.90E+00	Nov-89	PSI
ESA	TC5516AP-2	2K * 8	CMOS	TOS	100	0.59E+00	Apr-91	SAT
					500	0.16E+00	Apr-91	SAT
					45.4	0.41E+00	Jun-89	VEC

(ESA : European Space Agency, EDI : EDI corp., HAR : Harris Corp., MHS : Matra Harris Semiconductor, HTC : Hitach Ltd., TOS : Toshiba, SAT : SATURNE, CEA, Saclay, France, PSI : Paul Scheerer Institute VEC : Variable Energy Cyclotron)

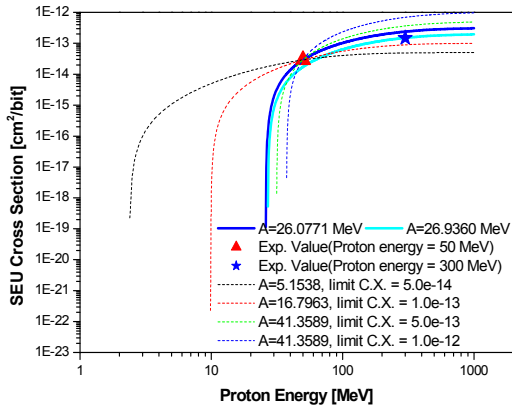
아래의 그림 5의 (a) ~ (f)에서는 실험 자료에 대하여 두 가지 SEU 반응단면적 평가모델을 적용한 결과를 나타내었다.



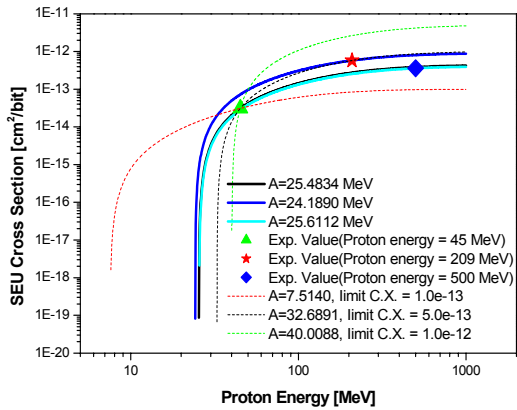
(a) part number : ED48832C100C



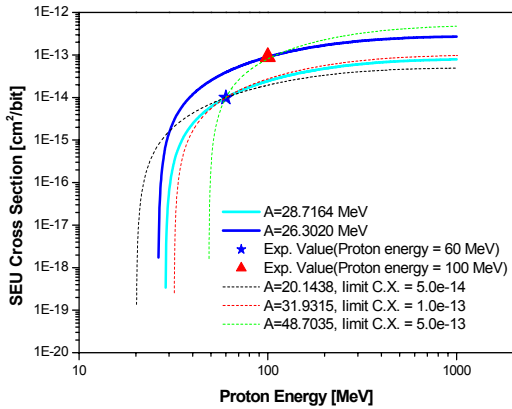
(b) part number : HMI-6516-9



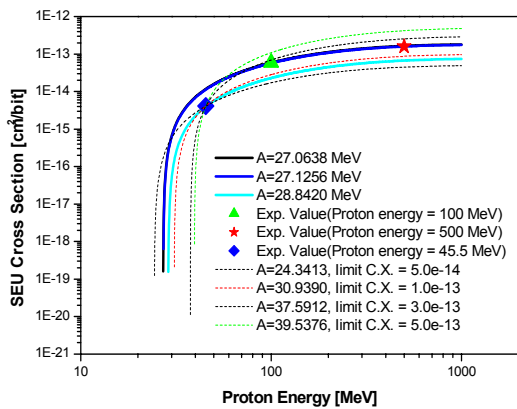
(c) part number : HMI-65664B-2



(d) part number : HMI6116P-3



(e) part number : HMI-6504H11



(f) part number : TC56164P-2

그림 5. One-parameter model과 Two-parameter model의 실험 자료에의 적용결과.

평가결과 two-parameter model이 실험결과를 보다 더 정확하게 묘사하였으나 평가된 A값은



one-parameter model에서 평가된 A보다 높은 값을 가졌다. 그림 5의 (c)와 (d)에서처럼 조사된 양성자의 에너지가 40 ~ 75 MeV영역과 200 ~ 500 MeV영역에서 선택된 경우에는 one-parameter model의 계산결과는 실험결과를 잘 대변하였다. 따라서 소자에 대한 실험 자료가 충분한 경우에는 two-parameter model을 사용하여 SEU 반응단면적을 평가하여야 하지만, 자료가 충분하지 않은 조건에서 two-parameter model을 사용하여 두 가지 인자를 모두 가정하는 것은 계산결과에 신뢰성을 가질 수 없다. 인공위성의 차폐설계의 초기단계에서 개략적인 위성의 차폐 설계시에는 보수적인 계산을 위하여 낮은 A값을 갖는 one-parameter model을 사용하는 것이 타당 할 수 있다.

## V. One-parameter model을 이용한 우리별1호의 SEU 문턱에너지 평가

우리별1호의 경우 주메모리로 사용하는 반도체에 대한 지상실험결과가 없기 때문에 SEU 계산을 통하여 예측 평가할 수 없으므로 one-parameter model을 이용하여 우리별1호에 탑재된 메모리 소자에 대한 양성자 유발 SEU의 문턱에너지를 추정하였다. 일반적으로 우주방사선에 의해 발생하는 SEU의 평가는 아래와 같은 과정을 거치게 된다.<sup>[8]</sup>

- ① Proton에 대한 SEU 반응단면적 실험자료 확보.
- ② SEU 문턱에너지 결정.
- ③ 입사 양성자 스펙트럼 생산.
- ④ 반도체소자에서의 차폐효과 평가.
- ⑤ 반도체소자로 입사되는 양성자 스펙트럼 계산.
- ⑥ SEU 반응단면적과 양성자 스펙트럼을 사용하여 SEU 발생량 평가.

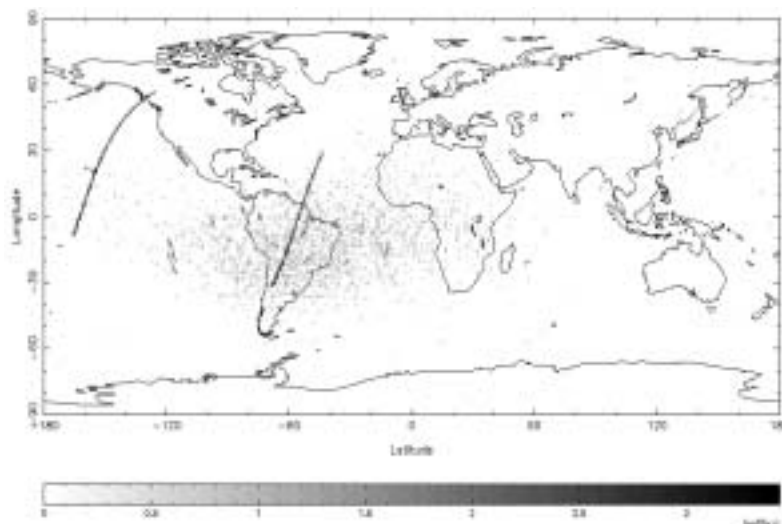


그림 6. 1993년 우리별 1호 OBC186 주 메모리에서 관측된 SEU 분포.

One-parameter model에서는 양성자의 SEU 반응단면적을 A 값에 의해 결정하기 때문에 이러한 특성을 이용하여 A값을 변화시키면서 우리별 1호에서 측정된 SEU 자료와 계산된 SEU 발생율을 비교하여 우리별 1호에서의 SEU 문턱에너지를 평가하였다. 그림 6에서와 같이 대부분의 단일사건혼란(SEU)은 South Atlantic Anomaly(SAA) 지역에서 발생하였으며, 1992년 8월 4일 ~ 1994년 12월 31일 기간의 792일 동안 OBC186의 주 메모리에서 관찰된 upset의 횟수는 4,979회이며 연간 2,493회이다.<sup>[9]</sup>

아래의 그림 7에서는 우리별1호 내의 OBC186이 위치한 stack에서의 주 메모리의 위치를 나타내었다. 아래의 자료를 바탕으로 OBC186의 주 메모리까지의 위성체 구조에 의한 차폐효과를 계산하였다. 그림 8에서는 1993년 1년동안의 평균 양성자 플럭스 스펙트럼과 차폐체 통과후 OBC186 주메모리 내에서의 양성자 플럭스 스펙트럼을 나타내었다.

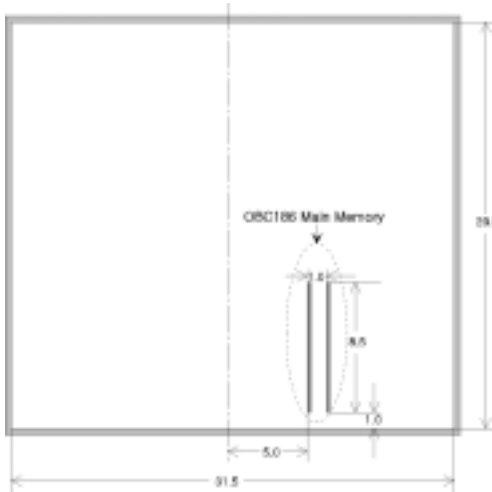


그림 7. OBC186 Stack에서의 주메모리의 위치.

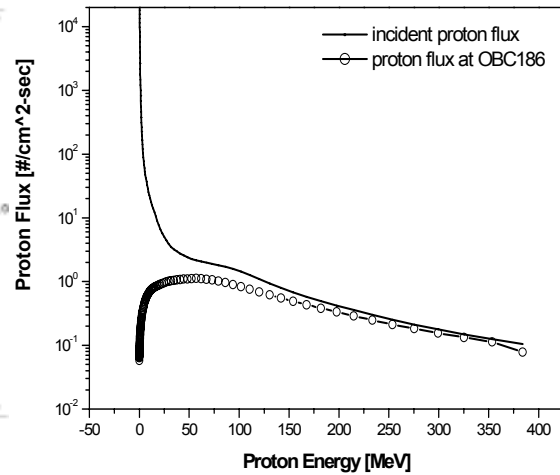


그림 8. 차폐체 통과 전·후의 양성자 플럭스 스펙트럼 비교

One-parameter model을 이용하여 구한 양성자 SEU 반응단면적을 아래의 식 6에 적용하여 양성자에 의한 SEU 발생율을 계산하였다. 계산된 SEU 발생율( $N_{SEU}$ )의 단위는 upsets/sec이고,  $\sigma_{SEU}$ 의 단위는  $cm^2/bit$ 이다.

$$N_{SEU} = \int \Phi(E) \sigma_{SEU}(E) dE \times M$$

$$\approx \sum_{g=1}^G (\Phi_g \times \sigma_{SEU}^g \times \Delta E) \times M \quad (6)$$

여기서  $M$ 은 메모리소자의 bit 수이다.

우리별 1호는 소형 저궤도 위성으로서, 위성 제어를 위한 주컴퓨터(on-board Mission Control Computer: MCC) 시스템은 CPU로 INTEL 80C186을 사용하는 OBC186이다.<sup>[10]</sup> 프로그램 메모리 영역은 OS kernel에 의해 조절되며 4개의 128 kbyte SRAM을 사용한다. 아래의 그림 9에서는 one-parameter model을 사용하여 SEU 문턱에너지인 A값을 변화하면서 발생된 SEU의 관측 자료와 일치하는 값을 구하였다. 계산결과, 우리별1호의 주메모리에 대한 양성자 유발 SEU 문턱에너지는 약 26.06 MeV의 값을 가지는 것으로 나타났다.

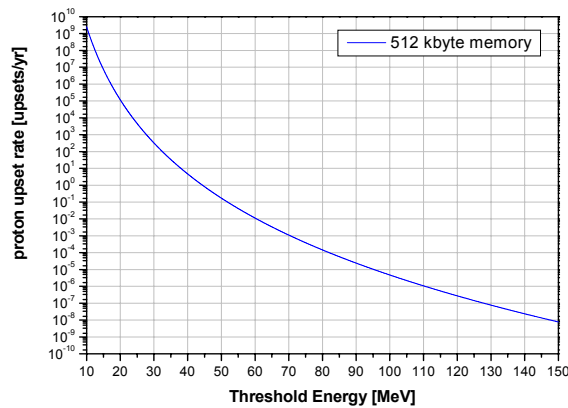


그림 9. Threshold energy의 변화(10 ~ 150 MeV)에 따른 upset rate 계산결과.

우리별 1호에 탑재된 OBC186의 메모리 소자는 Sony사의 제품으로 model number는 CXK581001M-70L (128K\*8 bit)이다.<sup>[9]</sup> 이들 소자의 특성을 조사하기 위하여 Sony사의 홈페이지를 검색하였으나 정보를 얻지 못하였고, 검색된 실험자료 중에서 유사한 성능을 갖는 소자의 자료를 사용하여 탑재된 소자에 대한 SEU 문턱에너지값을 얻었다. 아래의 표 4의 결과에서 알 수 있듯이 실험자료에 의해 계산된 문턱에너지 A값은 우리별1호의 SEU 관측자료에서 계산된 A값과 거의 유사한 값을 얻었다. 따라서, 양성자에 의한 SEU의 평가에 one-parameter model을 이용하는 것이 타당함을 확인하였다.

표 4. 실험자료와 실측자료에 의해 계산된 우리별 1호의 SEU 문턱에너지.

KITSAT-1에 탑재된 소자의 part number	A값(MeV)	실험자료에서 얻은 유사한 소자의 part number	A값(MeV)	Device 종류
CXK581001M-70L	26.06	CXK58258P-35	25.93	SRAM

## VI. 제궀도 방사선 환경에 따른 반도체와 보정회로의 성능평가

우리별 1호의 주메모리 시스템에서는 그림 10과 같이 SEU를 검색하기 위한 에러보정회로(Error Detection and Correction Circuit:EDAC)로서 해밍코드(hamming code)를 하드웨어로 구현한 회로를 사용하고 있다. 이 회로는 하나의 SEU에 의한 정보의 오류는 수정할 수 있지만, 동시에 발생하는 두개의 오류에 대해서는 검색만 가능하고 수정은 할 수 없다. 따라서 코드의 내용을 저장하기 위한 메모리 공간이 추가로 설치되어 있다.

메모리의 내용을 CPU로 전송하기 전에 프로그램 메모리의 내용과 hamming code 메모리의 내용을 비교하여 SEU의 발생여부를 검색하게 되며, SEU의 축적을 막기 위하여 주기적으로 메모리 영역을 읽고 쓰는 Memory Wash 소프트웨어를 이용한다. 우리별 1호의 프로그램 메모리는 512 kbyte이며, washing 과정에 소요되는 시간은 약 512초이다. 이는 SEU의 발생을 512초이내에 감지 할 수 있음을 의미한다. 그러나 washing 과정 이내에 1개 이상이 SEU이 발생하게 되면 정정할 수 없음을 의미한다. 따라서, washing 과정에 걸리는 시간을 사용하여 SEU에 대한 보정 한계를 추정할 수 있으며, 평가된 SEU 보정의 한계 발생율은 30,791 upsets/yr이다. 92년8월14일에서 94년12월31일까지, 729일간 우리별 1호의 OBC186 Memory에서 발생한 SEU의 개수는 4,979개(2492.95 upsets/yr)이다. 따라서 우리별 1호위성의 임무기간 중 SEU에 의한 자료의 손실은 없는 것으로 평가할 수 있다.

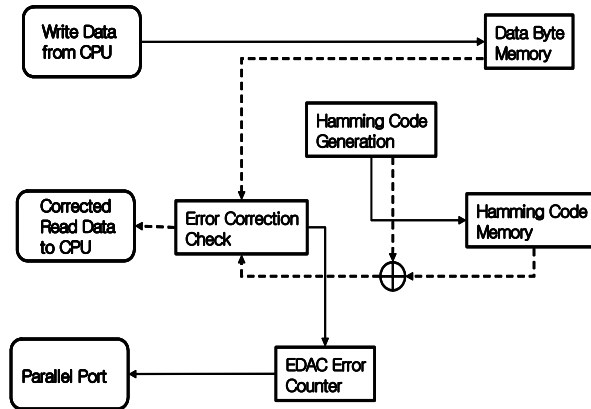


그림 10. Hamming Code를 이용한 에러보정회로

우주 방사선 환경에서 SEU으로 인한 자료의 손실을 줄이기 위한 방법으로는 SEU 문턱에너지가 높은 반도체를 사용하는 방법과 에러보정회로의 성능을 향상 시키는 방법이 있다. 따라서 위성의 궀도조건을 고려하여 반도체의 사양이나 에러보정회로의 성능을 선택하여야 한다. 제궀도의 경우, 대부분의 SEU는 SAA영역에서 운전되는 기간동안 발생한다. 그림 11에서는 위성의 궀도 경사각에 따라 SAA에서 운전되는 시간의 비율과 SEU의 발생량을 비교하였다. 궀도운전 중 SAA에서 운전되는 시간의 비율이 높을수록 SEU의 발생량이 증가함을 알 수 있다.

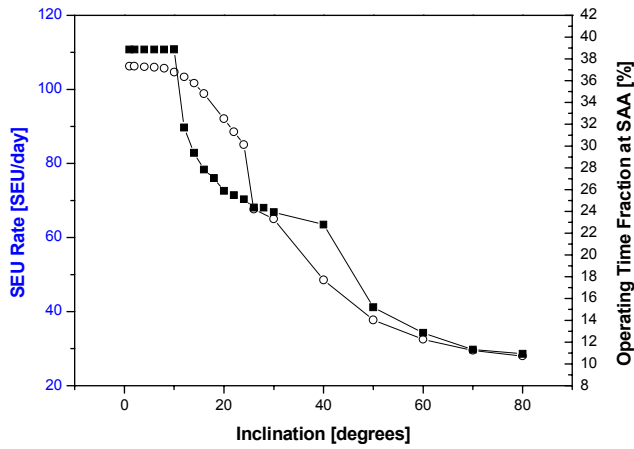
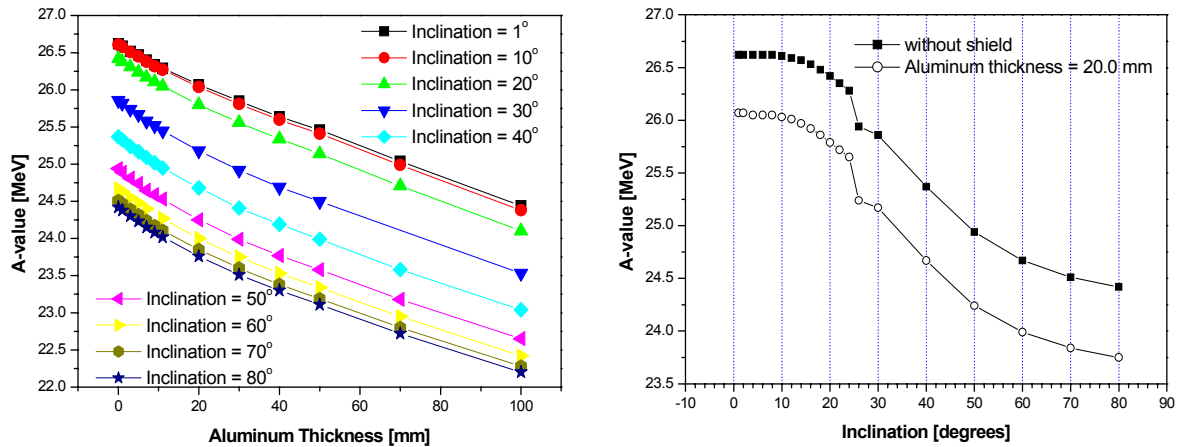


그림 11. 궤도경사각에 따른 SAA에서의 운전시간 비율과 SEU 발생량 비교.

그림 12에서는 에러보정회로의 성능을 우리별 1호의 에러보정회로의 성능을 적용하고, 궤도 경사각과 차폐체의 두께에 따라 SEU으로 인한 자료의 손실을 막을 수 있는 반도체의 A값을 평가하였다. 저궤도 조건에서 A값이 26.62 MeV이상, 위성의 차폐체의 평균두께가 20.0 mm인 경우 A값이 26.0 MeV이상인 반도체를 사용하여 SEU에 의한 자료의 손실을 막을 수 있다.

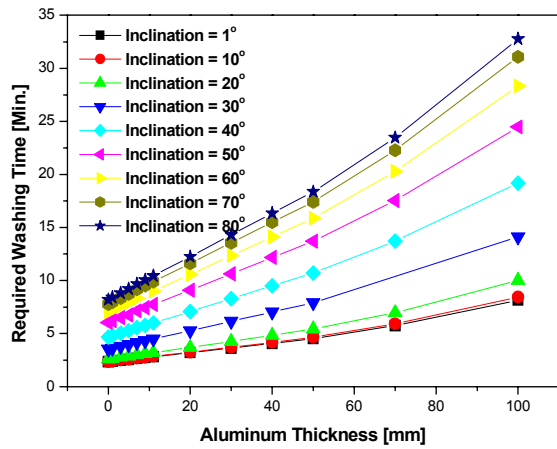


(a) 여러 가지 궤도조건에서 차폐체의 두께에 따른 반도체의 A값 평가.

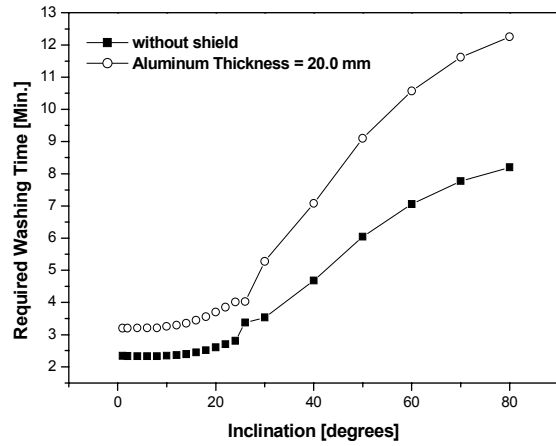
(b) 차폐체의 두께가 20.0 mm인 경우, 경사각에 따른 A값 평가.

그림 12. 경사각과 차폐체의 두께에 따른 SEU 방호를 위한 반도체의 A값 평가.

그림 13에서는 반도체 메모리의 성능이 고정된 경우, SEU로 인한 자료의 손실을 막을 수 있는 반도체의 A값을 궤도 경사각과 차폐체의 두께에 따라 평가하였다. A값은 실험 자료에서 구한 SRAM에 대한 평균값인 23.22 MeV를 사용하였다. 계산결과 궤도 경사각에 따라 에러보정회로의 성능이 최대 4배 이상 향상되어야 함을 알 수 있다.



(a) 여러 가지 궤도조건에서의 차폐체 두께에 따른 SEU보정회로의 성능평가.



(b) 차폐체의 두께가 20.0 mm인 경우, 경사각의 변화에 따른 SEU보정회로의 성능평가.

그림 13. 경사각과 차폐체의 두께에 따른 SEU 보정회로의 성능평가.

## VII. 결론

본 연구에서는 저궤도 환경에서 SEU의 평가를 위해 one-parameter model에 대한 타당성을 평가하였다. 가속기를 사용한 지상실험 자료를 수집하여 one-parameter model과 two-parameter model을 각각 적용하여 계산된 SEU 반응단면적을 비교하였으며, one-parameter model을 사용하는 경우에 SEU를 좀더 보수적으로 평가할 수 있음을 확인하였고, 우리별 1호의 관측결과를 사용하여 우리별 1호위성에 탑재된 반도체의 SEU 문턱에너지를 계산하여 실험결과와 비교하여 one-parameter model이 사용 타당성을 확인하였다. 따라서 인공위성의 차폐설계 초기 단계에서 one-parameter model이 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 궤도조건과 위성의 차폐체의 두께에 따라 반도체의 성능과 위성에 탑재된 에러보정회로의 성능을 평가하였다. 저궤도 조건에서 반도체의 SEU 문턱에너지가 26.0 MeV 이상인 반도체를 사용하는 경우 SEU로 인한 정보 손실을 막을 수 있고, 경사각에 따라 에러보정회로의 성능이 최대 4배 이상의 차이를 보였다.

## 감사의 글

본 연구는 1999~2002년간의 한국과학재단 목적기초연구(1999-2-306-001-3) 지원과 2002년~2004년의 KISTEP 기초연구지원 사업의 지원으로 수행되었음을 밝힙니다.

## 참고문헌

- [1] W. J. Stapor, J. P. Meyers, J. B. Langworthy and E. L. Petersen, "Two Parameter Bendel Model Calculations for Predicting Proton Induced Upset," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **37**, 6, 1966, (1990).

- [2] Y. Shimano, T. Goka, S. Kuboyama, K. Kawachi, T. Kanai and Y. Takami, "The Measurement and Prediction of Proton Upset," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **36**, 6, 2344, (1989).
- [3] E. Normand and W. J. Stapor. "Variation in Proton Induced Upsets Rates from Large Solar Flare Using an Improved SEU Model," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **37**, 6, 1947, (1990).
- [4] Philippe Cavel, Catherine Barillot, Pierre Lamothe & Robert Ecoffet, "An Empirical Model for Predicting Proton Induced Upset," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **43**, 6, 2827, (1996).
- [5] J. G. Rollins, "Estimation of Proton Upset Rates from Heavy Ion Test Data," *IEEE Transaction on Nuclear Science*, **37**, 6, 1961, (1990).
- [6] Eugene Normand, "Extensions of the Burst Generation Rate Method for Wider Application to Proton/Neutron-Induced Single Event Effects," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **45**, 6, 2904, (1998).
- [7] J. Coss, T. Miyahira, and G. Swift, "Device SEE Susceptibility Update : 1996-1998," *IEEE Annual Nuclear & Space Radiation Effects Conference*, Norfolk, Virginia, USA, July 12, (1999).
- [8] Edward L. Petersen, "Approaches to Proton Single Event Rate Calculations," *IEEE Transaction on Nuclear Science*, **43**, 2, 496 (1996).
- [9] C. I. Underwood and M. K. Oldfield, "Observed Radiation-Induced Degradation of Commercial-Off-The-Shelf(COST) Devices Operating in Low-Earth Orbit," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **45**, 6, 2737, (1998).
- [10] Sung-Joon, Kim, Young Hoon Shin, Sung Soo Kim and Kyung Wook Min, "Estimation of SEU Threshold Energy from KITSAT-1 Data Using AP-8 Model," *Journal of Astronomy and Space Sciences*, **18**, 2, 109 (2001).