J. Astron. Space Sci. 18(2), 163–173 (2001)

아리랑 2호의 방사능 환경 및 영향에 관한 분석(II) - SINGLE EVENT 영향 중심으로 -

백명진†, 김대영, 김학정
한국항공우주연구원 위성사업부

THE ANALYSIS ON SPACE RADIATION ENVIRONMENT AND EFFECT OF THE KOMPSAT-2 SPACECRAFT(II): SINGLE EVENT EFFECT

Myung-Jin Baek†, Day-Young Kim, Hak-Jung Kim
Korea Aerospace Research Institute, P.O. Box 113, Yu-Sung, Taejon, 305-600, Korea
E-mail: mjbaek@viva.kari.re.kr

(Received September 20, 2001; Accepted October 25, 2001)

요 약

본 논문에서는 아리랑 2호가 운용될 궤도의 우주방사능 환경 및 single event 영향(SEE)에 관하여 분석하였다. 위성체 외부 및 내부 방사능 환경으로서 지구 자기장 내부에 포획되어 활동하는 포획된 양자, 태양 및 태양계 외부에서 전달되는 SEP(solar energetic particle) 및 GCR(galactic cosmic ray) 고 에너지 입자에 대하여 양자와 중이온으로 구분하여 그들의 스펙트럼을 분석하였다. 아리랑 2호 전자소자로 사용 예정인 Intel 계열 80386 마이크로 프로세서 CPU에 대한 SEU 및 SEL 발생률을 추정하였다. 분석결과, 정상적인 조건에서 포획된 양자나 고 에너지 양자에 의한 SEU 영향은 아리랑 2호 위성이 운용되는 3년동안 발생하지 않을 것으로 추정된다. 반면에, GCR 중이온에 의한 SEU 발생은 운용 중에 수차례 발생할 수 있는 것으로 추정되었다. 아리랑 2호는 탑재 소프트웨어의 프로세서 CPU 오류 감지기능을 이용하여 SEU발생에 대처할 수 있는 시스템 레벨의 설계를 반영하고 있다.

ABSTRACT

In this paper, space radiation environment and single event effect(SEE) have been analyzed for the KOMPSAT-2 operational orbit. As spacecraft external and internal space environment, trapped proton, SEP(solar energetic particle) and GCR(galactic cosmic ray) high energy protons and heavy ions spectrums are analyzed. Finally, SEU and SEL rate prediction has been perfomed for the Intel 80386 microprocessor CPU that is planned to be used in the KOMPSAT-2. As the estimation results, under nominal operational condition, it is predicted that trapped proton and high energetic proton induced SEU effect will not occur. But, it is predicted that heavy ion induced SEU can occur several times during KOMPSAT-2 3-year mission operation. KOMPSAT-2 has been implementing system level design to mitigate SEU occurrence using processor CPU error detection function of the on-board flight software.

Key words: space radiation, environment, single event effect

†corresponding author

1. 서 론

우주방사능 환경은 인공위성의 전자 부품에 중대한 영향을 끼칠 수 있기 때문에 인공위성을 개발하는데 있어서 중요한 설계인자로 고려되고 있다. 인공위성의 전 수명기간을 통하여 계속적으로 축적되는 저 준위 에너지 입자의 영향에 의한 전자소자나 태양전지판 전지 셀(solar cell)의 성능 저하는 인공위성의 수명을 단축시키거나 오동작의 원인이 된다. 태양활동에 의하여 방출되는 고 에너지 입자(SEP)나 태양계 외부에서 전달되는 고 에너지 입자(GCR)는 인공위성 시스템의 운용을 일시적으로 교란시키며 경우에 따라서는 영원히 복구할 수 없는 상태에 이르는 원인이 된다. 따라서, 인공위성에 대한 우주방사능 환경은 위성체 전자소자의 선택이나 기능 설계 단계에서 반드시 고려해야 할 요소라는데 그 중요성이 있다. 아리랑 2호는 685km의 고도에서 98°의 경사각을 가지고 태양동기궤도에서 3년의 임무수명을 가지고 있는 저궤도 위성이다. 따라서, 아리랑 2호는 지구 자기권 내부에 포획되어 활동하는 우주방사능과 지구 외부에서 전달되는 우주방사능의 영향을 모두 받는다.

본 논문에서는 아리랑 2호가 운용되는 궤도의 고 에너지 우주방사능 환경 및 이로 인한 single event 영향(SEE)에 대하여 분석하였다. 이를 위해 태양에서 전달되는 SEP 및 태양계 외부에서 전달되는 GCR 고 에너지 입자들을 양자와 heavy ion(이하 "중이온"이라고 칭한다.)으로 구분하여 환경분석을 수행하였으며 아리랑 2호에 영향을 주는 우주방사능 외부환경을 분석하였다. 또한, 본 논문에서는 우주방사능 외부환경이 위성체 내부에 전달되면서 구성되는 내부환경 스펙트럼을 분석하였으며 그에 대한 영향을 분석하였다. 양자의 경우 유속 대비 에너지의 함수로 스펙트럼을 도출하였으며, GCR과 SEP 중이온의 경우 유속에 대한 에너지 감소량(LET: linear energy transfer)로 표시되는 Flux-to-LET 스펙트럼으로 도출하였다. 스펙트럼의 분석 결과, 중이온 입자들은 알루미늄의 차단 두께를 증가하여도 Flux-to-LET 스펙트럼의 변화가 거의 없음을 알 수 있었다. 마지막으로, 아리랑 2호 전자소자로 사용 예정인 Intel 계열 80386 마이크로 프로세서 CPU에 대한 SEU 및 SEL 발생률을 추정하였다. 분석결과, 아리랑 2호의 3년 임무기간 중 중이온에 의한 SEU는 수차례 발생할 것으로 추정되었다.

2. SINGE EVENT EFFECT(SEE)

Single Event Effect(SEE)는 우주 방사능 입자(양자 또는 중이온 등)가 전자소자에 침투할 경우 전자소자의 특성에 영향을 미치는 현상을 의미한다. Total Ionizing Dose(TID)는 시간에 따라 전자소자 내부에 축적되는 방사량(rad)에 의하여 계량화 할 수 있다(Baek & Kim 2001). 그러나, SEE는 주어진 시간 안에 발생 가능한 확률(probability)로 평가된다. 양자와 중이온은 전자소자에 침투 후 에너지를 전달하는 구조가 다르다. 고 에너지를 가진 중이온은 직접적인 이온화(direct ionization)를 통하여 충분한 에너지를 전달하며 그로 인하여 SEE가 발생한다. 반면에, 양자의 경우 대부분 직접적인 이온화를 통하여서는 SEE를 발생시키기 위한 충분한 에너지를 전달하지 못한다. 그러나, 양자는 실리콘과 핵반응 작용(nuclear interaction)을 통하여 2차 방사능을 방출하게 되며, 2차 방사능에 의한 이온화는 SEE를 발생시키기에 충분한 에너지를 전달한다(Bendel & Peterson 1983). 그림 1은 고 에너지 방사능 입자에 의하여 SEE가 발생하는 현상을 도식화한 것이다.

전자소자가 SEE에 의하여 반응하는 종류는 여러 가지가 있으며, Single Event Upset(SEU), Single Event Latchup(SEL), Single Event Functional Interrupt(SEFI), Single Event Gate Rupture (SEGR),

표 1. SEE의 종류 및 그 영향.

SEE Type	Sensitive Parameter	Type of Damages	Seriousness
SEU	Stored charges at electrical nodes	Transistor level: - Photo current leading to bit flip IC level: - Loss of functionality	Reversible bit flip on one single cell
SEL	Parasitic thyristor of CMOS IC's	Transistor level: - Parasitic thyristor switched-on IC level: - Very large and sudden increase of consumption current - Loss of functionality	Irreversible and destructive effect if power is not switched off in time.
SEGR	Gate oxide insulation on thin gate IC's and/or for high voltage operations	Transistor level: - Destruction of oxide gate - Short circuit gate-source - Large gate leakage increase IC level: - Loss of functionality	Irreversible damage of a cell
SEB	Parasitic bipolar transistor transistor	Transistor level: - Second breakdown of parasitic switched off in time	Thermal destruction of device if power is not

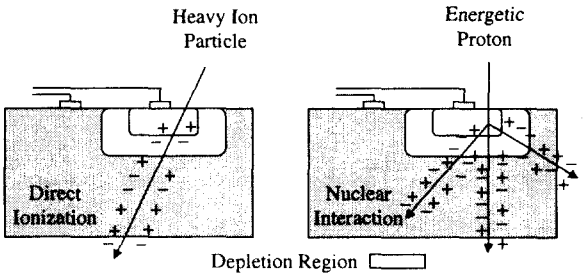

그림 1. 고 에너지 방사능 입자에 의한 SEE 발생 현상.

Single Event Burnout(SEB), Single Hard Error(SHE) 등 여러 가지가 있다. 표 1은 SEE의 종류 및 그 영향을 나타낸 것이다(Astrium 2001).

LET(linear energy transfer)는 피폭된 물질의 비중(ρ)과 방사능의 통과길이(Δx)당 전달된 에너지의 함수로(ΔE) 나타내며 식 1과 같이 표시된다.

$$\mathrm{LET} = \frac{1}{\rho}\frac{\Delta E}{\Delta x} \tag{1}$$

여기서,

$$\rho = \frac{\delta m}{\delta V} \tag{2}$$

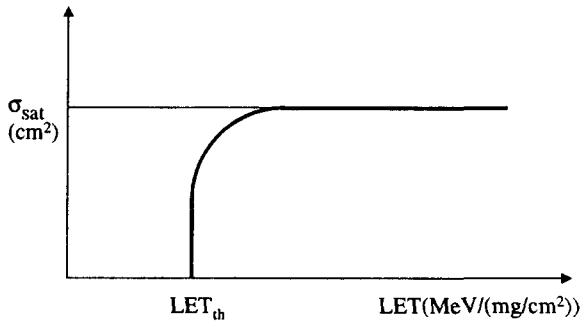

그림 2. LET와 전자소자의 단면적 관계곡선.

표 2. NASA와 Astrium의 SEE 분석기준.

Device LET Threshold(LET_{th}) MeV/(mg/cm^2)		Environment Sensitivity (Environment to be Assessed)
NASA	Astrium	
$LET_{th} < 10$	$LET_{th} < 12$	Trapped Proton, Solar Flare, Galactic Cosmic Ray
$10 < LET_{th} < 100$	$12 < LET_{th} < 100$	Galactic Cosmic Ray
$LET_{th} > 100$	$LET_{th} > 100$	No Analysis Required

LET의 단위는 MeV/(mg/cm^2) 또는 MeV/(g/cm^2)으로 표시하며, 자연적인 우주 방사능 환경에는 주로 150 MeV/(mg/cm^2) 이내의 범위가 논의의 대상이다.

LET 허용한계(LET Threshold: LET_{th})는 피폭된 전자소자에 SEE가 발생하는 최소한의 LET 값을 의미한다. 보다 LET_{th}큰 LET를 가지고 있는 방사능 입자는 SEE를 발생시킬 수 있는 가능성을 가지고 있다. LET_{th}값이 작으면 SEE에 민감하고 반대의 경우 SEE에 둔감하기 때문에, LET_{th}는 위성 전자소자의 SEE 분석을 위한 기본적인 요구사항을 제시하는 기준으로 사용된다. 표 2는 미국의 NASA(LaBel et al. 1996)와 유럽의 Astrium (2001)의 기준을 나타낸다.

에너지 입자의 침투에 의해 영향을 받는 전자소자의 단면적 및 LET 값은 SEE발생률을 계산하는 입력 값으로 사용되는데 그림 2와 같은 일반적인 관계곡선을 가지고 있으며, 이들의 수치들은 지상에서 전자소자의 방사능 피폭측정 시험에 의하여 구해진다.

수치적으로, 단면적은 식 3과 같이 계산이 가능하다.

$$\sigma_{bit} = \frac{Ns}{\phi N_b} \tag{3}$$

여기서, Ns는 초당 발생한 SEU 수, ϕ는 유속(flux), N_b는 시험에 사용된 전체 bit수를 의미한다. 포화 단면적(saturation cross section: σ_{sat})은 LET가 증가함에 따라 점근되는 단면적 값(asymptotic value of cross section)을 의미하며 SEE에 민감한 전체 단면적을 의미한다. 포화 단면적의 값이 작으면 SEE에 둔감하고, 반대로 값이 크면 SEE에 민감하다. 포화 단면적의 단위는 cm^2이다.

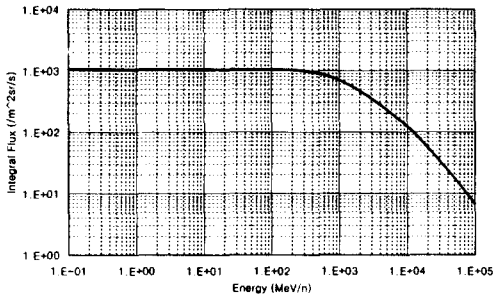

그림 3. GCR proton external environment.

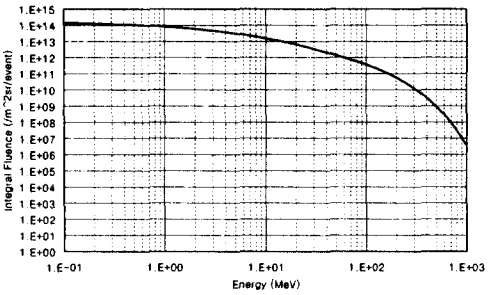

그림 4. SEP proton external environment.

3. 아리랑 2호의 우주 방사능 환경

3.1 우주방사능 외부환경

위성체의 전자소자에 SEE를 발생시키는 우주 방사능 환경은 고 에너지를 가지고 있는 입자들이다. 대표적인 영향으로 태양활동이 활발할 때 방출되는 SEP 고 에너지의 입자와 태양계 외부에서 전달되는 GCR 중이온 입자들이다. 지구의 자기권은 이들의 입자의 침입으로부터 대부분 방어를 해 준다. 이와는 반대로, 극 궤도로 올라갈수록(지구 자기권의 영향 감소) 위성체는 지구 자기권의 보호를 받을 수 없게 되며, 위성체가 극지방을 지날 경우 지구 외부에서 전달된 방사능 입자의 영향을 받게된다. 또한, 표 1에서 설명되었듯이, LET_{th}값이 상대적으로 작은 소자의 경우 SAA 영역에 집중되어 있는 포획된 양자에 의하여 SEE 현상이 발생 가능하다. 실제로, UoSat의 궤도($700 \times 700km$, 98.25°)에서 중이온(galactic and solar cosmic rays) 및 SAA의 포획된 양자에 의하여 SEU가 발생하였음이 보고되고 있다(internet source, Asenek et al.). 따라서, 아리랑 2호는 $685km$의 고도에서 98도의 경사각을 가지고 SAA 영역을 통과할 경우 양자의 영향을 받을 수 있으며, 극지방으로 가까워짐에 따라 외부에서 전달되는 고 에너지 입자의 영향을 주로 받게 된다. 아리랑 2호가 운용될 2000년대 중반은 태양활동 주기 상 태양의 활동이 저조한 시기이기 때문에 포획된 양자 및 GCR의 활동이 활발할 것으로 예상되며, SEP에 의한 영향 또한 보수적인 관점에서 접근하여야 한다.

태양 활동이 활발할 때에는 고 에너지 SEP 양자 및 중이온이 분출되며 이것들은 위성체의 일시적 기능 이상을 발생시킨다. 태양계 외부에서 전달되는 GCR 또한 양자 및 중이온으로 구성되며 태양활동이 저조할 때 GCR의 영향은 극대화된다(Stassionpoulos & Ryamond 1988). GCR 우주방사능 환경모델은 태양활동에 의한 방사능 분출이 가장 저조한 시기(solar minimum)의 환경모델로서 태양계 외부에서 전달되는 방사능 환경으로 사용된다 반면에, SEP 우주방사능 환경모델은 1989년 10월 19일에 시작으로 약 180시간동안 발생한 태양활동 환경모델로서 99% 최악의 경우의 태양 방사능 환경으로 사용된다(NRL 1996, Space Radiation Associate 1998). 그림 3, 4 및 5는 아리랑 2호 궤도에서 GCR 및 SEP에서 방출되는 양자 및 중이온 우주방사능 외부환경을 나타낸다. 그림 6은 포획된 양자의 우주방사능 외부환경을 나타낸다. 이들의 환경모델 스펙트럼은 "Space Radiation Ver. 4.0"(Space Radiation Associate 1998) 및 "CREME96"(NRL 1996) 소프트웨어를 이용하여 산출하였다. 그림에서도 알 수 있듯이 GCR 및 SEP은 GeV급 이상의 고 에너지 입자를 가지고 있기 때문에

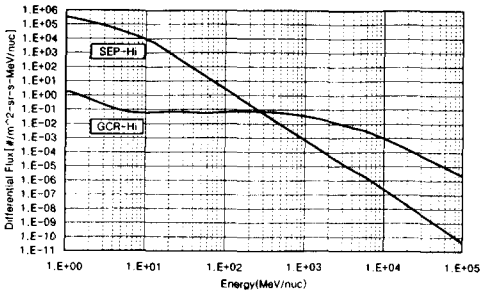

그림 5. GCR/SEP Hi external environment.

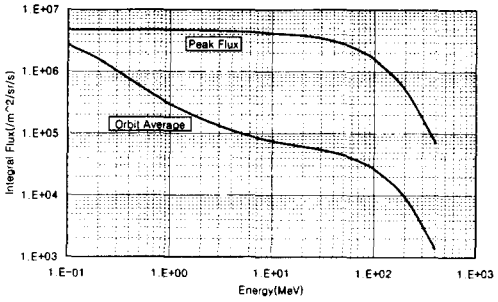

그림 6. Trapped proton external environment.

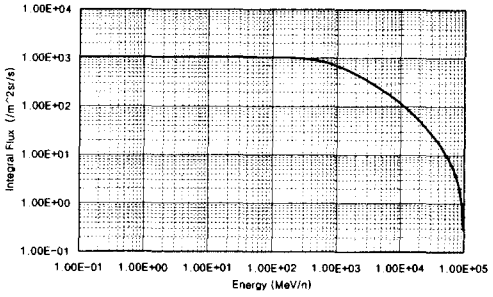

그림 7. GCR Proton spectrum behind 200 mils of Al Shielding.

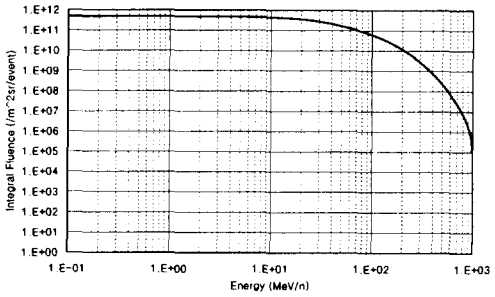

그림 8. SEP Proton spectrum behind 200 mils of Al Shielding.

이들의 입자들은 위성체 전자소자에 영향을 미칠 수 있음을 예측할 수 있다. 이와 같은 영향은 SEU나 SEL의 형태로 위성체의 운용을 일시적으로 교란시키거나 경우에 따라서는 영원히 복구할 수 없는 상태에 이르는 원인을 제공한다.

3.2. 우주방사능의 위성체 내부환경

제 3.1절에서 분석된 우주방사능 외부환경은 위성체의 구조물과 전자박스 하우징을 통과하여 위성체 내부의 방사능 환경을 구성하게 된다. 고 에너지 양자의 경우 핵반응(nuclear reaction)을 통하여 SEU를 발생시킨다. 따라서, SEP 양자 입자들은 고 에너지 양자의 세기 및 입자 수에 따른 양자 핵반응 가능성(probability of a proton nuclear reaction) 정도가 SEE 영향의 중요한 요소가 된다(Petersen 1981, 1996). 반면에 중이온은 위성체 내부에 축적되지 않고 위성을 통과하는 과정에서 에너지를 상실하게되며 이때 전자소자에 영향을 미치어 SEU 및 SEL등을 야기한다. 그림 7, 8 및 9는 각각 GCR, SEP 및 포획된 양자 우주 방사능 외부환경(그림 3, 4, 6 참조)에 대하여 알루미늄 차단구조 200 mils(약 5mm)의 두께를 통과한 뒤 형성된 내부환경을 나타낸 것이다. 본 분석 시 geomagnetic shielding의 조건은 orbit average, omnidirectional particle arrival direction, quiet geomagnetic field condition 및 earth's shadowing이 포함되었다.

양자의 경우 SEE 영향분석을 위하여 유속(flux)에 대한 에너지 스펙트럼이 사용되나 중이온의 경우 단위 면적에 대하여 단위 시간당 방사 입자가 전자소자를 통과하면서 손실하는 에너지의 양을 나타내는 에너지 전달(LET)의 단위로 나타내며 Flux-to-LET 스펙트럼으로 표시한다 (Bendel &

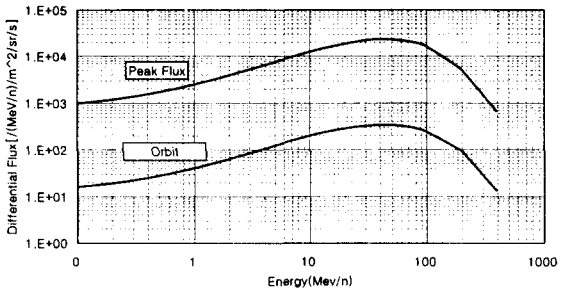

그림 9. Trapped protons transport behind 200 mils of Al Shielding.

표 3. GCR/SEP Heavy Ion LET Spectrum behind 200 mils of Al Shielding.

LET (MeV-cm^2/g)	Integral Flux(particles/m^2-s-sr) Cosmin Ray Heavy Ions	Solar Energetic Particles	LET (MeV-cm^2/g)	Integral Flux(particles/m^2-s-sr) Cosmin Ray Heavy Ions	Solar Energetic Particles
1.01E+02	6.69E+00	6.32E+02	7.04E+03	3.87E-03	2.16E-01
2.00E+02	2.85E+00	1.78E+02	8.00E+03	2.86E-03	1.57E-01
3.01E+02	1.83E+00	8.21E+01	9.09E+03	2.13E-03	1.18E-01
4.02E+02	1.23E+00	4.78E+01	1.01E+04	1.66E-03	9.11E-02
5.01E+02	9.85E-01	3.20E+01	2.00E+04	2.38E-04	1.28E-02
6.03E+02	8.53E-01	2.28E+01	3.00E+04	1.16E-06	4.73E-05
7.01E+02	7.41E-01	1.74E+01	4.01E+04	7.91E-08	1.85E-06
8.05E+02	6.64E-01	1.34E+01	5.00E+04	3.76E-08	8.39E-07
9.04E+02	5.97E-01	1.08E+01	6.02E+04	1.77E-08	3.39E-07
1.00E+02	5.41E-01	8.89E+00	7.00E+04	8.31E-09	1.75E-07
2.01E+02	6.99E-02	2.21E+00	8.04E+04	3.14E-09	8.24E-08
3.02E+02	2.76E-02	1.20E+00	9.03E+04	3.84E-10	1.40E-08
4.04E+02	1.42E-02	7.19E-01	1.00E+05	2.62E-11	4.05E-10
5.03E+02	8.53E-03	4.62E-01	1.01E+05	1.18E-11	1.82E-10
6.06E+02	5.53E-03	3.09E-01	1.03E+05	5.67E-12	8.78E-11

Peterson 1983, Petersen 1996). 그림 10과 그림 11은 각각 100 mils(약 2.5mm)과 200 mils(약 5mm)의 알루미늄의 두께를 통과 후의 LET 스펙트럼을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, GCR 중이온의 경우 알루미늄에 의한 중이온 차단효과는 두께를 증가하여도 거의 없는 것을 알 수 있다. GCR의 경우 위성의 운용 전체 기간을 통하여 극지방 지역을 중심으로 영향이 있으나, SEP의 경우 태양활동의 기간에 따라 한시적으로 짧게는 수 시간, 길게는 며칠동안만 위성체에 영향을 미친다. 그러나, 앞에서 설명되었듯이 입자들의 세기는 매우 강하기 때문에 그들의 영향은 위성체에 회복할 수 없는 치명적인 손상(permanent damage)을 줄 수 있다는데 그 중요성이 있다. 이것은 인공위성의 방사능 환경 중 중이온에 의한 영향은 제거될 수 없으며 인공위성 설계에 언제나 고려되어야 한다는 것을 또한 의미한다. 표 3은 그림 11에 대한 GCR 및 SEP 각각의 중이온 LET 스펙트럼 값을 나타낸다.

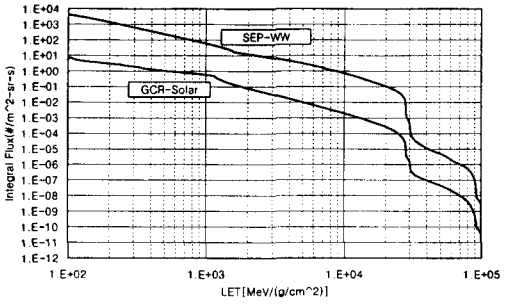

그림 10. GCR/SEP Hi LET spectrum behind 100 mils of Al Shielding.

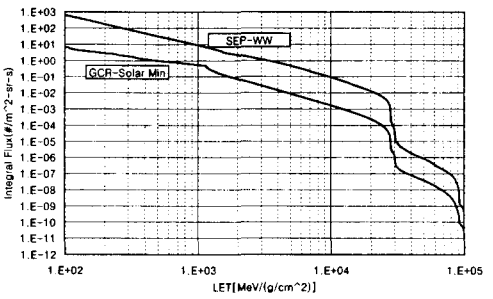

그림 11. GCR/SEP Hi LET spectrum behind 200 mils of Al Shielding.

표 4. Heavy Ion에 의한 80386 SEU 발생률 추정 입력자료.

항 목	80386 CPU 시험자료	
	SEU	SEL
LET_{th}	3.38 MeV/(mg/cm^2)	29 MeV/(mg/cm^2)
Cross Section	7.8E-07 cm^2/bit	1E-04 cm^2/device
Device bits numbers	3845 bits	-

4. SEU 및 SEL 발생률 계산 추정 및 토의

앞에서 설명되었듯이, 고 에너지 양자는 전자소자 내에서 핵반응을 통하여, GCR 입자는 위성체를 통과하는 과정을 통하여 전자소자의 상태를 일시적으로 변경하여 SEU를 발생시키거나 일시적 또는 영구적으로 기능을 파손시키는 SEL 등을 발생시킨다. 본 항에서는 아리랑 2호의 탑재 컴퓨터 마이크로 프로세서 CPU로 사용 예정인 Intel 80386 계열 모델에 대하여 SEU 및 SEL 발생률을 추정하였으며 그 결과에 대한 분석을 수행하였다.

SEU 및 SEL 발생률 계산을 위한 입력값을 산출하기 위하여 IBM (1989), LaBel et al. (1992), Moran & LaBel (1996), Rioux (2000) 및 Sabb Space (1991) 등을 이용하여 표 4와 같은 입력 정보를 도출하였다. NASA JPL 및 GSFC에서 수행된 SEU 및 SEL 시험 보고서의 자료에 의하면, 80386 CPU 경우 데이터 오류가 발생하는 SEU, lockup SEU 및 마이크로 SEL 현상이 관측되었으나 영구적인 SEL은 관측되지 않았음을 알 수 있다. SEU 또는 마이크로 SEL 오류는 일시적인 오류로서 전원을 다시 인가하여 주거나 재시동을 통하여 회복될 수 있는 것이나 영구적으로 파손되는 SEL은 회복될 수 없는 오류를 의미한다.

표 4에서 알 수 있듯이 80386의 SEU LET_{th} 값은 표 2의 첫 번째 항목에 해당한다. 따라서, 포획된 양자 및 태양계 및 태양계 외부에서 전달되는 고 에너지 입자에 대한 계산이 요구된다. 표 5는 SEU 및 SEL 발생률 계산을 위한 항목으로서 정상적인 조건(norminal condition)과 최악의 조건(worst condition)으로 구분할 수 있으며 각각의 경우에 대하여 적용되는 우주 방사능 환경을 나타낸다.

표 6은 3.2항의 아리랑 2호 위성체 내부의 방사능 환경을 바탕으로 표 4의 입력자료를 이용하여 SEU 계산 상용 소프트웨어(Space Radiation Associates 1998)를 이용하여 SEU 및 SEL 발생률

표 5. SEU 및 SEL 발생률 계산 항목.

Environment	Conditions
Nominal Condition	Averaged Trapped Proton + GCR-P + GCR-Hi
Worst Condition	SEP-P + SEP-Hi

표 6. 80386 CPU SEU 및 SEL 발생률 추정치.

80386 CPU Upset Rate (Upsets/device-year)	SEU	SEL
Nominal Condition		
Average Trapped Proton	0.25	-
GCR Proton	0.015	-
GCR Heavy Ion	8.5	-
Total	8.765	-
Worst Condition		
SEP Proton	1.35	-
SEP Heavy Ion	238.77	0.2
Total	240.12	0.2

을 계산한 것이다. 정상적인 조건에서 8.765 upsets/device-year의 SEU가 발생할 수 있음을 추정할 수 있었다. 표 6에서도 알 수 있듯이, SEU의 발생원인은 주로 중이온에 의한 것이며, 포획된 양자나 고 에너지 양자에 의한 영향은 매우 적은 것을 알 수 있다. 최악의 조건에는 240.12 upsets/device-year의 SEU가 발생할 수 있음을 추정하였다. SEL의 경우 최악의 상태에서 0.2 upsets/device-year의 micro-latchup 발생 가능함을 추정하였다.

표 6의 결과는 CPU 레지스테의 100% 사용을 전제로 한 결과이다. 그러나, 실제적인 위성의 운용 중에는 전체 레지스테의 일부분만 사용을 하기 때문에 표 6의 결과는 현실적인 위성운용 개념을 고려할 때에는 비현실적인 발생률 추정치이다. IBM (1989)는 합리적인 발생률을 추정하기 위해서 instaneous worst case(전체 레지스터의 80% 사용 가정), typical worst case(전체 레지스터의 40% 사용 가정) 및 actual usage(전체 레지스터의 25% 사용 가정) 등의 세가지 경우에 대하여 발생률 조정치를 제시하고 있다. 또한, IBM (1989)에서 제시한 조정치는 CPU 동작모드 중 multitasking등을 고려한 protect mode(다수 사용자에 의한 multitasking을 효율적으로 수행하는 기능 지원)에서의 값들이기 때문에 real mode(단일 사용자를 고려한 매우 빠른 8086 기능 수행)만을 고려할 경우 조정치는 대략 3분의 1정도가 더 감소할 것으로 예상된다.

표 7은 SEU 및 SEL 발생률을 IBM (1989)에서 제시한 3가지 경우의 조정조건 및 CPU의 동작모드를 적용한 후의 SEU 및 SEL 발생률 추정치를 나타낸다. 3.1절에서도 언급하였듯이, 최악의 경우는 태양폭발 등의 비정상적인 태양활동에 의해 단기간에 분출되는 에너지에 의한 영향을 나타내기 때문에 정상적인 태양활동 시에는 발생하지 않는다고 가정을 한다. 따라서, 위성체의 설계에 적용되는 경우는 정상적인 조건의 값들이며, 실제로 어떤 발생률 조정 조건을 SEU 발생률 기준으로 선택

표 7. 합리적으로 조정된 SEU 및 SEL 발생률 추정치.

80386DX CPU Upset Rate (Upsets/device-year)	SEU		SEL
Nominal Condition	Protect Mode	Real Mode	
Instanteneous worst case	7.01	4.67	-
Typical worst case	3.5	2.33	-
Actual usage	2.19	1.46	-
Worst Condition			
Instanteneous worst case	204.1	136.06	0.16
Typical worst case	96.05	64.03	0.08
Actual usage	60.03	40.02	0.05

할 것인가는 위성체 설계 개념의 보수성 관점에서 접근되어야 할 것이다. 그러나, 표 7에서 나타나듯이 어떤 발생률 조정 조건이 적용되더라도 고 에너지 GCR 중이온에 의한 SEU 발생은 아리랑 2호가 운용되는 기간 중에 수 차례 발생할 수 있는 가능성을 보여주고 있으며, 이에 대한 영향이 시스템에 어떤 영향을 미치는지 분석이 따라야 한다. 현재, 아리랑 2호는 표 7의 SEU 추정치를 바탕으로 SEU 발생에 대처할 수 있는 시스템 레벨의 설계를 반영하고 있다. 반면에 SEL의 경우, 어떤 경우에서도 아리랑 2호가 운영될 3년동안에는 발생하지 않을 것으로 보여지며 이에 대한 시스템 영향분석은 필요치 않을 것으로 사료된다.

본 논문에서 수행된 SEE 추정치는 설계 초기단계에서 아리랑 2호에 사용될 실제 전자소자의 사양 및 설계방법을 정확히 확정할 수 없기 때문에 기존의 유사한 소자의 시험자료를 이용하여 초기 우주방사능 예비 환경 영향을 수행한 것이며 아리랑 2호 예비 설계를 위한 전자소자의 선택 및 위성체 예비 설계 방향을 설정하는데 사용될 수 있다는데 그 의미가 있다. 그러나, 우주방사능에 대한 최종 SEE 분석은 예비 환경 분석과 차이가 있을 수 있기 때문에, 실제 하드웨어의 구입, 제작과 그 결과에 따른 구체적인 정보습득이 가능한 후에 최종 환경 영향 분석을 다시 수행하여 예비 영향 분석과 비교하여 설계의 기본 방향의 정당성을 확인하는 반복과정이 필요할 것이다.

5. 결 론

본 논문에서는 아리랑 2호가 운용되는 궤도의 우주방사능 환경 및 single event 영향(SEE)에 관하여 분석하였다. 위성체 외부 방사능 환경으로서 지구 자기장 내부에 포획되어 활동하는 포획된 양자, 태양 및 태양계 외부에서 전달되는 SEP 및 GCR 고 에너지 입자에 대하여 양자와 중이온으로 구분하여 그들의 스펙트럼을 분석하였다. 또한, 본 논문에서는 고 에너지 우주방사능 외부환경이 위성체 내부에 전달되면서 구성되는 내부 방사능 환경 스펙트럼을 분석하였다. 특히, GCR 중이온의 경우 알루미늄에 의한 중이온 차단효과는 두께를 증가하여도 거의 없는 것을 알 수 있다. 이것은 인공위성의 방사능 환경 중 중이온에 의한 영향은 제거될 수 없으며 인공위성 설계에 언제나 고려되어야 한다는 것을 또한 의미한다. 마지막으로, 아리랑 2호 전자소자로 사용 예정인 Intel 계열 80386 마이크로 프로세서 CPU에 대한 SEU 및 SEL 발생률을 추정하였다. 분석결과, 정상적인 조건에서 포획

된 양자나 고 에너지 양자에 의한 SEU 영향은 아리랑 2호 위성이 운용되는 3년동안 발생하지 않을 것으로 추정된다. 반면에, GCR 중이온에 의한 SEU 발생은 운용 중에 수차례 발생할 수 있는 것으로 추정되며 이에 대한 영향이 시스템에 어떤 영향을 미치는지 분석이 따라야 할 것으로 제시하였다. 아리랑 2호는 탑재 소프트웨어의 프로세서 CPU 오류 감지기능을 이용하여 SEU발생에 대처할 수 있는 시스템 레벨의 설계를 반영하고 있다.

감사의 글: 본 연구는 한국항공우주연구원의 다목적 실용위성 2호 시스템 설계 및 개발사업 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

Astrium 2001, KS-TN-043-ASTR

Asenek, V. A., Underwood, C. I., & Oldfield, M. K. Univ. of Surrey (http://www.ee.surrey.ac.uk)

Baek, M. J., & Kim, H. J. 2001, JA&SS, 18, 153

Bendel, W. L., & Peterson, E. L. 1983, IEEE Trans. on Nuc Science, NS-30, 4481

IBM 1989, Space Station DMS 80386 Radiation Analysis, Systems Integration Division

LaBel, K. A., Gates, M. G, Moran, A. K., Marshall, P. W., Barth, J., Stassinopoulos, E. G., Seidleck, C. M., & Dale, C. J. 1996 IEEE Aerospace Applications Conference

LaBel, K. A., Stassionpoulos, E. G., Brucker, G. J., & Stauffer, C. A. 1992, IEEE Radiation Data Effects Workshop

Moran, A. K., & LaBel, K. A. 1996, NASA/GSFC Test Report on Radiation Effects and Analysis, March 7

NRL 1996, CREME96 Code and its on-line manual

Petersen, E. L. 1981, IEEE Trans. on Nuclear Science, NS-28, 3981

Petersen, E. L. 1996, IEEE Trans. on Nuclear Science, 43, 496

Rioux, J. 2000, EMS Technologies

Sabb Space 1991, COP/TRP/0022/SAAB

Stassionpoulos, E. G., & Ryamond, J. P. 1988, in Proceedings of the IEEE, 76, 11

Space Radiation Associates 1998, Oregon, U.S.A.