

## 우리별 1호에서의 SPACE RADIATION 환경 조사<sup>1</sup>

신영훈 · 민경욱 · 최영완 · 김성현  
한국과학기술원 인공위성연구센터

### CRE EXPERIMENT ON KITSAT-1

Young-Hoon Shin, Kyoung-Wook Min, Young-Wan Choi and Sung-Heon Kim  
SaTReC, KAIST, Taejon 305-701

*(Received March 24, 1994; Accepted May 15, 1994)*

#### 요 약

Cosmic Ray Experiment (CRE)는 KITSAT-1 의 여러 module 중 하나로 Total Dose Experiment (TDE) 와 Cosmic Particle Experiment (CPE) 두개의 sub-system 으로 구성되어 있다. CRE 의 목적은 KITSAT-1 궤도에서의 우주 환경을 조사하는 것이다. KITSAT-1 의 궤도는 inner Van Allen belt에 위치하며, 이 지역에서는 고에너지 proton들이 많이 분포하고 있어 위성체에 단기적인 또는 장기적인 radiation 효과를 미치고 있다. 1년여의 실험 결과로부터 Van Allen belt가 무척 안정되어 있고 태양의 활동이 CPE, TDE 및 SEU (Single Event Upset) rate 에 영향을 줄 수 있었다. 또한 CREME code 에 의해 예상됐던 것보다 많은 고에너지 입자 flux가 관찰되었다.

#### ABSTRACT

The Cosmic Ray Experiment (CRE) is one of the modules flown on board the KITSAT-1 satellite and consists of two sub-systems: the Total Dose Experiment (TDE) and the Cosmic Particle Experiment (CPE). The purpose of CRE is to characterize the space radiation environment as encountered by an Earth-orbiting spacecraft. KITSAT-1 orbit is dominated by the inner Van Allen radiation belt. This region has a large population of high energy protons which contributes significantly to both long-term and transient radiation effects. The data shows that the inner Van Allen radiation belt is very stable and the solar

---

<sup>1</sup>본 연구는 국방과학연구원 및 한국과학재단의 지원에 의하여 수행되었음

activity influences the CPE, TDE data and SEU (Single Event Upset) rates. The result also shows that much larger high energy particle flux is recorded than the predictions of the CREME code.

## 1. 서 론

KITSAT-1에는 Space Radiation 환경을 조사하는 Cosmic Ray Experiment (CRE) module이 탑재되어 있다. 이 Space Radiation 환경은 그 궤도에서 운용되고 있는 인공위성에게 위성체의 오동작과 system 파괴라는 심각한 영향을 준다. 구체적으로 radiation 환경이 위성체에 끼칠 수 있는 영향(Tascione 1988)으로써는 Single Event Phenomena (SEP)를 들 수 있으며 SEP에는 Single Event Upset (SEU), Single Event Latchup (SEL) 및 Single Event Burnout (SEB) 등이 있다. 그러므로, Space Radiation 환경을 연구한다는 것은 이러한 현상들에 대한 이해와 앞으로 같은 궤도를 이용할 인공위성 설계 운용에 기초 자료가 될 것이다. 실제로 발사되어 우주에서 운용중인 거의 모든 인공위성에는 이런 Space Radiation 환경을 관측하는 detector module들이 실려 있다.

KITSAT-1은 여러 개의 module로 구성되어 있으며 CRE는 DSPE (Digital Signal Processing Experiment) 와 함께 위로부터 두번째의 module을 차지하고 있고 CPE(Cosmic Particle Experiment)와 TDE (Total Dose Experiment) 의 두 부분으로 구성되어 있다. KITSAT-1의 궤도는 고에너지 proton이 주로 분포하는 inner ('hard') Van Allen belt에 위치하게 된다. 이 영역에는 long-term과 transient radiation 효과 모두를 주는 30MeV 이상의 proton들이 존재하며, 특히 Van Allen belt가 지표면과 근접한 South Atlantic Anomaly에서는 고에너지 proton들의 영향을 심하게 받게 된다. 따라서 CRE의 결과는 KITSAT-1에 사용된 여러 electronics의 성능을 알아보는 중요한 자료가 될 것이다. CRE는 이러한 trapped proton과 더불어 Galactic Cosmic Ray (GCR)과 solar flare와 관계 깊은 Solar Cosmic Ray (SCR)등도 관측할 수 있도록 설계되었다. 따라서, CRE 실험 결과는 태양의 활동이 지구 radiation 환경에 주는 영향을 연구하는 좋은 자료가 될 것이다.

## 2. 실험 장치 및 방법

CPE (Cosmic Particle Experiment)의 목적은 KITSAT-1 궤도에서의 radiation 환경이 위성체 안쪽에 주는 Linear Energy Transfer (LET) 를 측정하는 것이다 (Min *et al.* 1993). CPE와 같은 solid state detector는 작고, 제작 운용이 쉽기 때문에 많은 여러 실험들에서도 사용되었는데 CPE와 같은 구조의 detector로서는 U.K.의 Cosmic-Ray Effects and Dosimetry (CREDO)(Underwood *et al.* 1992)와 Concorde, Space-Shuttle, UoSAT-3에 실험된 적이 있으며, 이들의 결과들과 CPE의 data는 직접 비교가 가능하다. CPE의 센서 부분은 30mm×30mm, active area가 900 mm<sup>2</sup>, depth 300 μm인 silicon diode로 되어 있다. 전하를 띤 입자들이

detector의 센서 부분을 통과하면, silicon의 bound electron들과의 Coulomb interaction에 의해 에너지를 전달한다. 이 에너지는 charge carrier의 형태로 나타나는데, 센서 부분에 생기는 전하는 센서에 전달된 에너지에 비례하므로 생긴 전하의 양을 통해서 검출된 입자의 에너지를 알 수 있다. Multichannel analyzer에서 각 channel당 센서에 생기는 전하는 0.05 pC 이고, 이는 LET로 16 MeV/(g/cm<sup>2</sup>)에 해당한다. 이런 channel이 512 개가 모여 전체 측정 전하 범위는 0.05 pC ~ 25.6 pC이고, 이 값을 수직으로 입사하는 입자의 LET로 환산해보면 16MeV/(g/cm<sup>2</sup>) ~ 8230 MeV/(g/cm<sup>2</sup>)에 해당한다. CPE의 512 channel 중 첫 4개의 channel은 detector의 threshold 값 이하여서 의미가 없으므로 실제로는 508개의 channel이 사용된다. PIN diode에 생기는 전하는 charge pulse 신호가 되므로 이것을 증폭해서 analogue to digital converter (ADC)에 기록한다. 실제 실험에서는 150초동안 count를 하고, 이 실험을 4번 반복해서 600초 동안 count한 결과가 하나의 data packet이 되도록 하였다. 그러므로, CPE는 2분 30초의 position resolution을 가지게 된다. CPE analog board는 1 cm 두께의 특별한 aluminum shielding box에 쌓여 있는데 이것은 위성이 South Atlantic Anomaly (SAA) 중심을 지날 때, 가장 sensitive한 channel에서의 count가 초당 10,000번을 넘지 않게 count 수를 제한하기 위해서이다. 이 전체 detector system은 dead-time이 10 sec이므로 초당 count수가 100,000까지 측정 가능하도록 설계되어 있다. 결과적으로 detector 전체의 total counting efficiency가 98% 정도에 이른다.

TDE(Total Dose Experiment)는 위성체가 궤도운동을 하면서 KITSAT-1 몸체 여러 위치에서 쌓이는 ionizing radiation을 측정하는 실험이다. 센서로는 solid-state RADFET dosimeter (modified p-channel MOSFETs)가 사용된다 (Holems-Siedle 1974). UoSAT-5의 TDE도 UoSAT-3 TDE의 변형이므로 TDE data를 KITSAT-1 TDE data와 서로 비교해 볼 수 있다. TDE의 센서로는 ionizing radiation에 sensitive하도록 gate-oxide가 0.1 μm 이상 두꺼운 solid state 'RADFET' dosimeter가 여러 개 연결되어 사용된다. RADFET에 radiation을 쬐여주게 되면 space charge effect에 의해서 gate-oxide에 trapped hole이 생긴다. 이 charge들에 의해서 FET의 threshold voltage shift가 생기게 된다. 각 RADFET 센서는 한 쌍의 p-channel MOSFET로 되어 있는데, 한 개는 unbiased 상태로 계속두고 나머지 한 개는 측정하는 동안 biased 상태로 둔다. 이와 같이 두 가지 경우를 생각하는 이유는 RADFET의 gate-oxide에는 radiation에 의해서도 charge carrier가 생기지만 열에 의해서도 역시 charge carrier 인 electron-hole pair가 생기므로 이것이 threshold voltage에 영향을 미치기 때문이다. 그러므로, 더욱 정확한 측정을 위해서는 이 thermal effect를 빼주어야 한다. 위성체 각 부분에 쌓이는 dose의 양을 측정하기 위해서 TDE의 센서는 여러 곳에 위치한다. TDE는 무척 적은 전력을 소모하기 때문에 위성이 동작하기 시작할 때부터 계속 켜둔다. KITSAT-1 각 부분의 RADFET은 effective shielding 두께가 모두 다르므로 각 RADFET의 data를 비교해보면 shielding 두께에 따라 radiation 환경이 주는 영향을 비교해 볼 수 있을 것이다(Freeman *et al.* 1978).

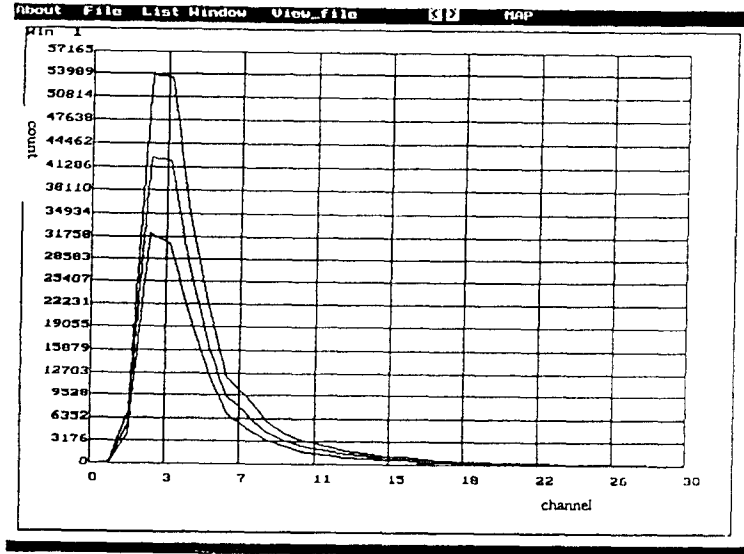


그림 1. SAA에서의 LET spectrum (위로부터 3월 15일, 17일 및 24일의 순서).

### 3. 결과 분석 및 논의

#### 3.1 C P E

태양 활동의 변화에 따른 CPE data의 변화를 알아보기 위해서 3월 13일에 발생한 solar flare를 예로 들어본다. 이 flare로 생긴 입자들이 지구에 도달하기까지는 이들이 걸리는데 radiation belt에 주는 이 flare의 영향을 알아보기 위해서 입자가 많이 모여있는 SAA에서의 CPE data를 보면 그림 1과 같다. 3월 15일, 3월 17일, 3월 24일로 시간이 지남에 따라 전 channel에 걸쳐 입자의 count수가 작아짐을 알 수 있다. 하지만 3월 17일이나 3월 24일의 data와 3월 15일의 data를 자세히 비교해보면 spectrum의 hardness에는 변함이 없다. 즉, 어떤 특정한 channel대가 상대적으로 특별하게 줄거나 늘지는 않았다. 전체의 flux는 flare 이후에 늘지만 그 flux를 구성하고 있는 입자들의 LET 구성비는 일정하다는 결론을 얻을 수 있다. 앞의 결과에서 보면 태양의 flare나 태양풍에 의해서 생긴 하전입자가 직접적으로 inner Van Allen belt를 생성하는 것이 아니라 이 입자들이 대기와의 상호 작용에 의해 중성자가 생기고 이 중성자가 붕괴해서 지구 자기장에 잡히는 (CRAND theory) 간접적 원인이 되기 때문이다(Parks 1991). 이를 뒷받침하는 또 하나의 증거는 태양의 대기에는 중심핵에서의 핵융합 반응의 산물인 alpha 입자가 많은데 지구의 radiation belt에서는 거의 발견되지 않는다는 점이다(Freden 1969). KITSAT-1의 결과는 DMSF/F7

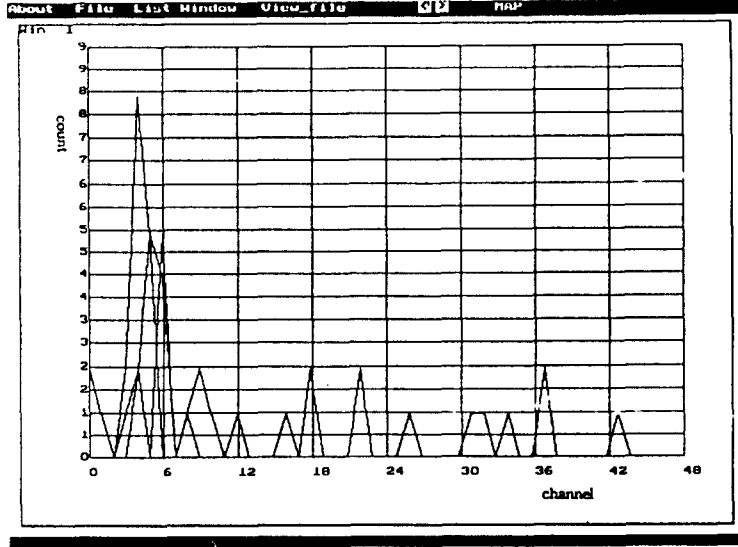


그림 2. 극지방에서의 3월 15일, 17일 및 24일의 LET spectrum.

satellite 이 1983년 12월부터 1987년 10월까지 고도 800 km 에서 solar maximum 부근과 solar minimum에서의 proton spectrum을 분석한 결과와도 잘 일치한다. 즉, solar minimum 과 solar maximum 에서 flux 의 변화는 있었지만 proton spectrum 에는 변화가 없었다고 보고 되었다 (Gussenhoven *et al.* 1988). CPE 실험의 결과는 1310 km KITSAT-1에 가장 큰 영향을 주는 것은 high energy trapped proton으로 total flux양은 태양의 활동에 따라 달라지지만 그 구성 입자의 비는 일정하다는 것을 이야기해 주고 있다.

3월 13일 solar flare후의 극지방에서의 CPE data의 변화는 그림 1의 SAA에서 변화와는 조금 다르다. 그림 2에서 보면 그림 1에서 보이는 것 같은 특별한 변화가 없다. Flare에 의해서 생긴 하전 입자들은 극지방에서는 자기장이 강하기 때문에 Lorentz force에 의해 자기장에 갇혀서 자기력선을 따라 magnetotail 쪽으로 갔다가 다시 지구쪽으로 들어오게 되므로 그 변화가 solar flare와는 큰 관계가 없게 된다. 또한, 위치상으로 L-shell parameter가 3이상이므로 극쪽에서는 proton 보다는 high energy electron이 큰 관계가 있을 것이다. L-shell parameter(McIlwain 1961) 와 CPE data 사이의 관계를 알아보기 위해서 6월 11일 하루 동안의 CPE data channel 4를 L-shell parameter에 따라 count로 표시한 것이 그림 3이다. 여기에서 보면 1.3 L-shell에서 최대 count 수가 나타남을 알 수 있고 이로부터도 CPE에 영향을 많이 주는 것은 inner Van Allen radiation belt임을 알 수 있다.

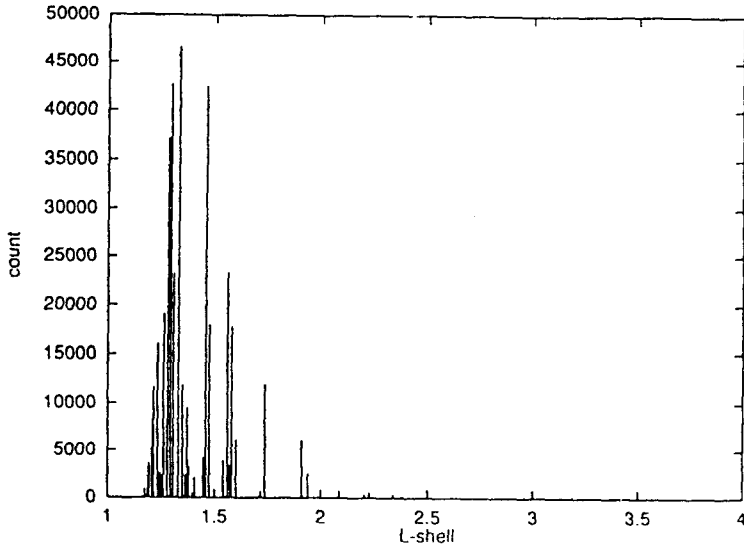


그림 3. 1993년 6월 11일 CPE data의 L-shell에 따른 count 수.

미국의 Naval Research Lab.에서는 NASA의 많은 위성 운용의 경험과 실험 data를 통해서 cosmic radiation이 위성에 실린 전자부품에 미치는 영향을 예측하는 CREME (Cosmic Radiation Effects on MicroElectronics) model(Adams 1987)을 만들었다. 이 CREME model과 실제 CPE data값과 비교해보기 위해서 SAA에서 3월 24일 경우 CREME model로 simulation해보면 CPE channel 4의 LET에 해당하는  $60 \text{ MeV}/(\text{g}/\text{cm}^2)$ 의 경우 위성이 10회 지구를 회전하는 동안의 Fluence가  $7.0 \times 10^6$  정도 예상되었다. 이 결과에 CPE detector Area ( $900\text{mm}^2$ )과 solid angle ( $4\pi$ )와 CPE 한 개의 channel 범위 (16 Mev)와 위성의 궤도운동한 시간의 비 ( $8/10$ )을 곱하면 3월 24일의 CPE data의 channel 4와 직접 비교해 볼 수 있다.

$$7.0 \times 10^6 \times \frac{900\text{mm}^2}{10^6\text{mm}^2} \times 4\pi \times 16 \times \frac{8}{10} = 1013352 \text{ count}$$

로써 실제 3월 24일 KITSAT-1이 지구 주위를 8번 회전하면서 channel 4에 count 된 총 수는 1435939 이었으므로 CREME simulation 결과보다 약간 많음을 알 수 있다.

### 3.2 T D E

TDE sensor 부분인 p-MOSFET의 gate-insulator에 dose가 쌓이게 되면 threshold voltage가 올라가게 되는데 여기에 온도의 효과를 뺀 결과는 그림 4와 같다. 그림 4에서 보면 135

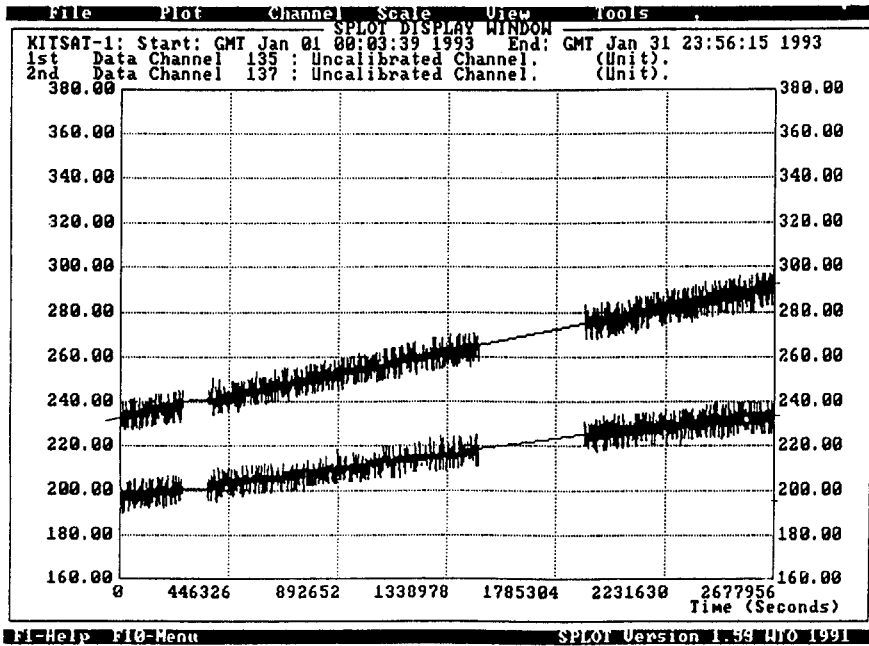
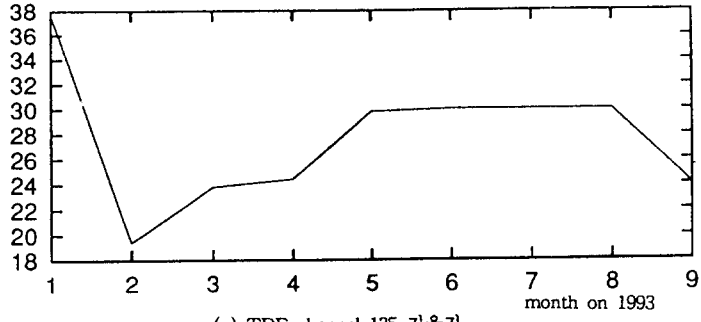


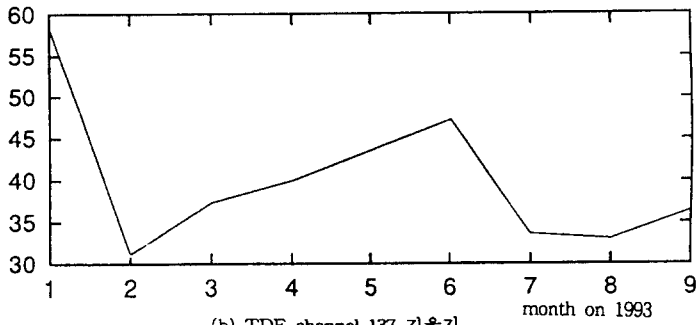
그림 4. 1993년 1월 동안의 TDE data.

channel (RADFET 1)의 기울기가 137 channel (RADFET 3)의 기울기보다 급하다. 이런 차이가 생기는 것은 RADFET의 위치 차이에 의한 상대적 radiation shielding 차이 때문이라고 생각된다. KITSAT-1 구조에서 RADFET 3은 module 가운데 있고 RADFET 1은 바깥쪽에 있으므로 RADFET 3은 boom과 외부부분에 많은 구조물이 있어 RADFET 1보다 상대적으로 radiation shielding이 잘되기 때문이다.

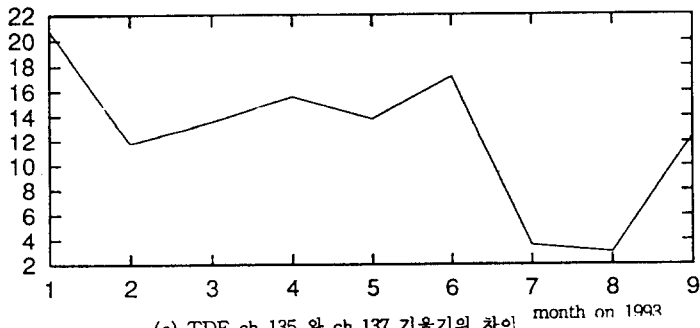
1993년 1월부터 9월까지 각 달의 기울기는 그림 5와 같다. 전체적 기울기의 경향은 NOAA에서 발간한 solar geophysical data에 나타난 태양의 활동성과 일치한다. 즉, 1월에 태양의 활동이 무척 활발했으며, 2월에는 조용했고, 3월부터 조금씩 활동이 활발해졌었다. TDE 기울기의 그림 5 (c)는 RADFET 1과 RADFET 3의 기울기 차이를 나타낸 것인데 1월과 6월에는 기울기의 차이가 심하다가 7월과 8월에는 차이가 적어진다. 그림 5의 (a)와 (b)에서 보면 7월과 8월에는 RADFET 3의 기울기의 변화는 거의 없었는데 반해 RADFET 1은 기울기의 증가량이 크게 떨어졌음을 알 수 있다. KITSAT-1에서의 radiation 환경은 크게 세가지로 구분할 수 있다. 첫째는 거의 변하지 않는 trapped high energy proton, 둘째는 변화가 심한 바깥 영역의 전자들, 셋째는 일정한 Galactic cosmic ray와 예측할 수 없는 solar cosmic ray이다. 이 세 가지 원인을 다시 3개의 LET 영역으로 나눌 수 있다.



(a) TDE channel 135 기울기



(b) TDE channel 137 기울기



(c) TDE ch 135 와 ch 137 기울기의 차이

그림 5. 1993년 각 달의 (a) channel 135와 (b) channel 137의 TDE 기울기 및 (c) 두 channel의 기울기 차이.



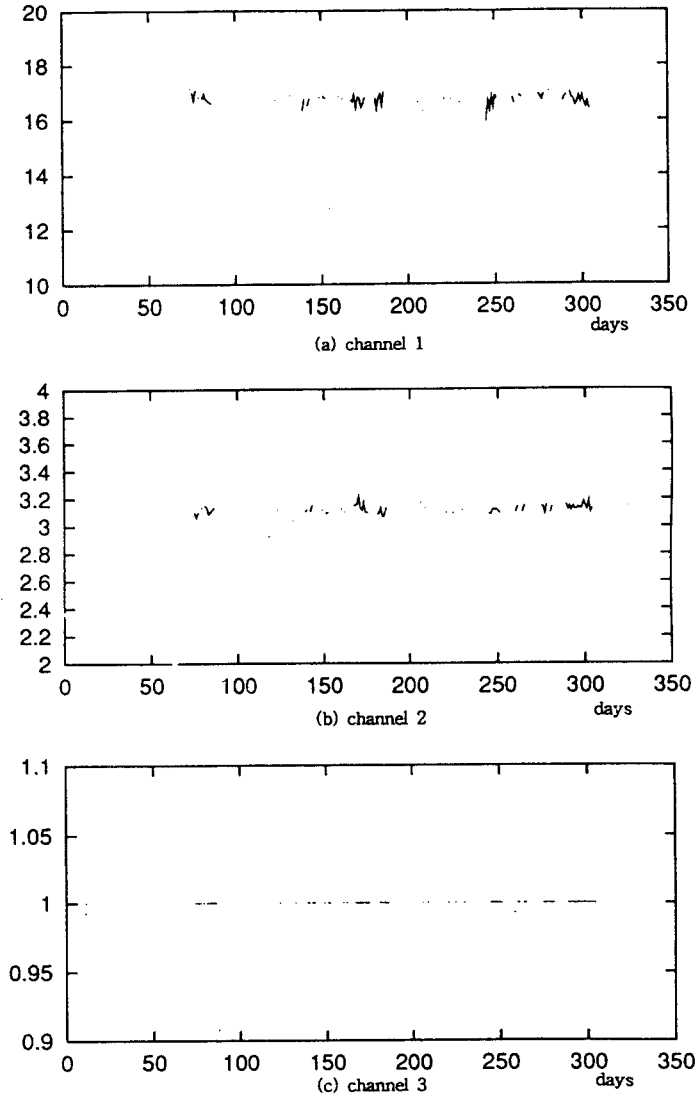


그림 6. processed CPE channel data: (a) channel 1, (b) channel 2, and (c) channel 3.

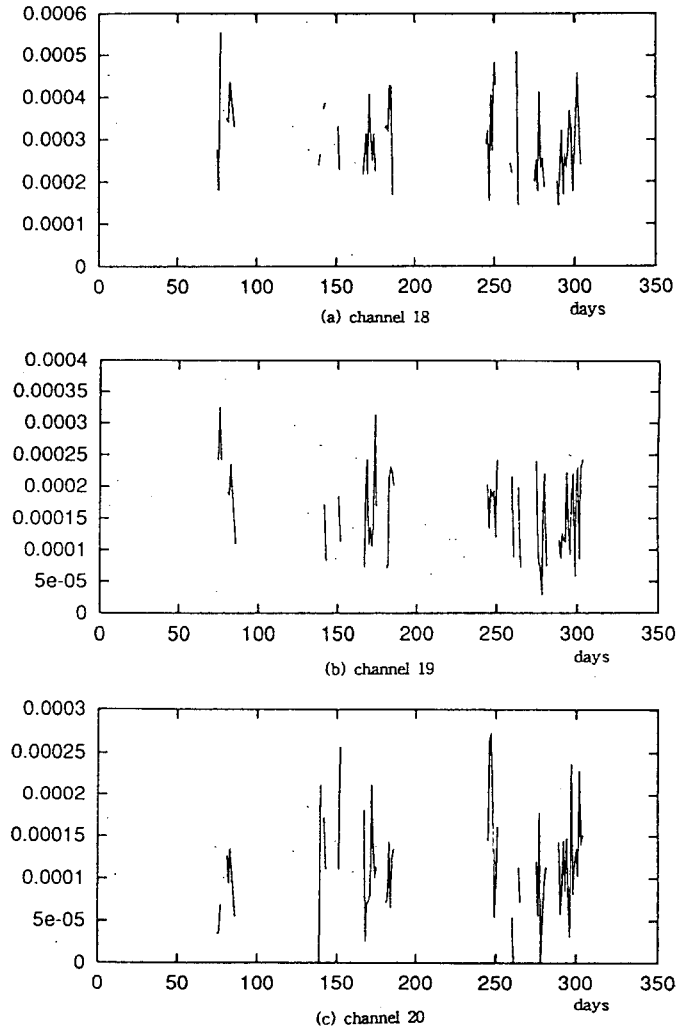


그림 7. processed CPE channel data: (a) channel 18, (b) channel 19, and (c) channel 20.

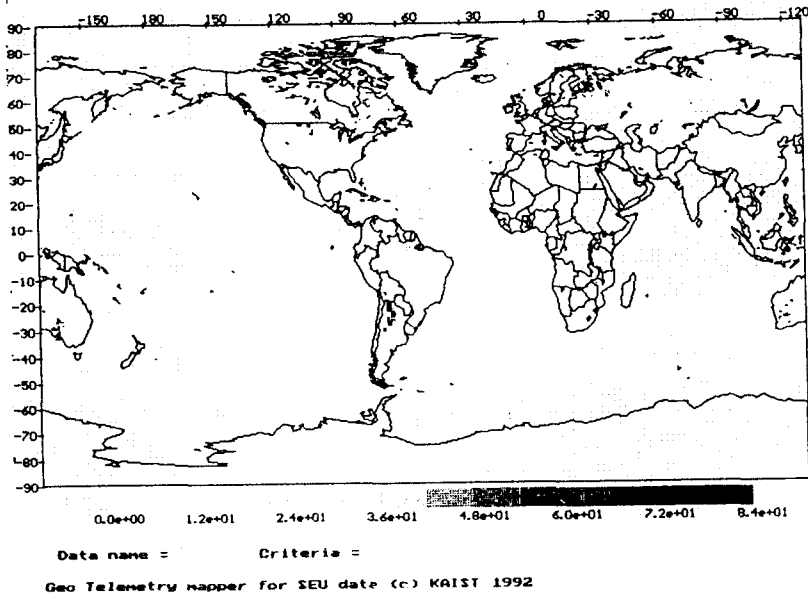


그림 8. 1993년에 일어났던 SEU의 위치.

- Low LET : 전자, high energy proton ( $>100$  MeV), Bremsstrahlung
- High LET : proton ( $< 100$  MeV), Galactic cosmic ray (GCR)
- very High LET : 고에너지 proton, GCR의 핵반응 생성물

Aluminum shielding의 두께가 두꺼워질수록 electron의 Bremsstrahlung에 의한 에너지 전달이 많아지므로 RADFET3의 low LET 성분에는 Bremsstrahlung이 일정 부분을 차지하게 된다. RADFET1에서는 high LET 성분이 RADFET3에 비해 전체 radiation effect에 차지하는 비율이 크기 때문에 만약 high LET 성분이 줄어든다면 RADFET3에 비해 상대적으로 radiation dose가 많이 줄어들 것이다. Shielding 두께가 적은 RADFET1의 radiation 양이 RADFET3의 radiation 양에 비해 상대적으로 줄어든 것은 high LET 성분이 줄었기 때문이라고 생각된다. 여기에서 7, 8월의 CPE data의 high LET 성분이 다른 달에 비해 어떤 특별한 점이 있는지 조사해 볼 필요가 있다. 각 LET 성분의 기여도를 알아보기 위해서 CPE의 channel을 4 개씩 묶어 새로 처리한 CPE data를 channel 3(실제 CPE 12~15 channel)의 count 수를 기준으로 상대적인 count 수로 나타내어 보면, 그림 6의 channel 1~3 (각 각 실제 CPE 4~7, 8~11, 12~15 channel) low LET에서는 7월과 8월 (day 190~day 240)이 다른 달에 비해서 큰 차이가 없었지

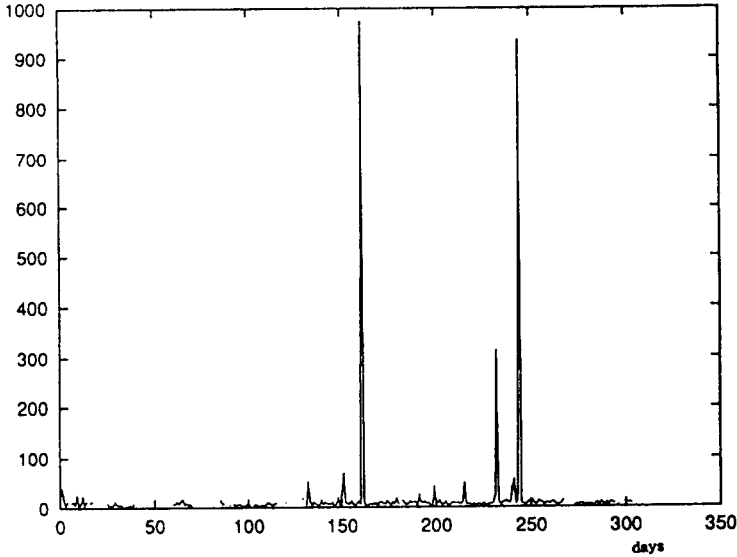
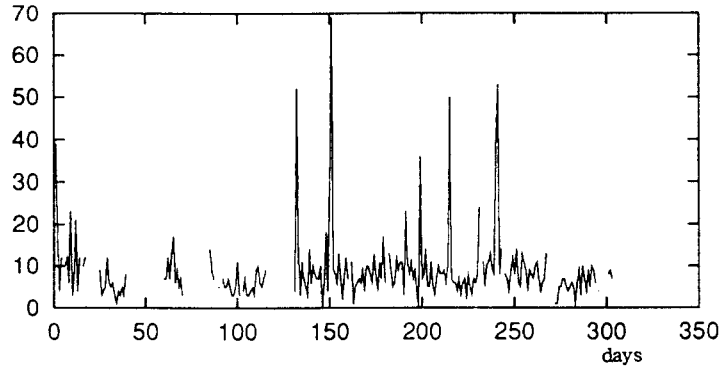


그림 9. 1993년 각 날에 일어났던 SEU의 개수.

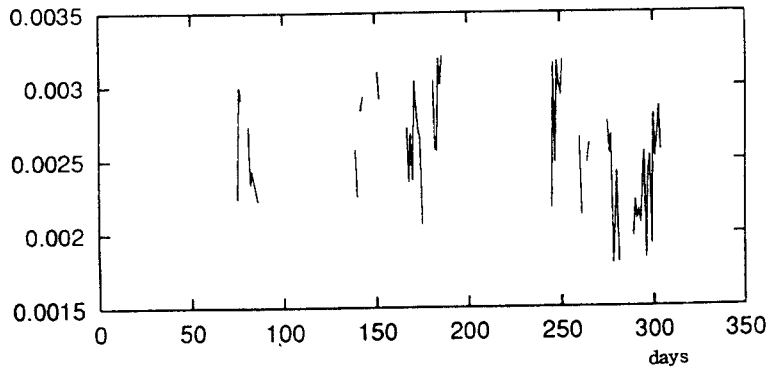
만, 그림 7의 channel 18 ~ 20 (각 각 실제 CPE 72~75, 76~79, 80~83 channel) high LET 성분을 보면 7월과 8월 (day 190~day 240)에 다른 달에 비해서 상대적으로 적음을 알 수 있다. 하지만, 특성상 KITSAT-1의 CPE detector는  $60 \text{ MeV}/(\text{g}/\text{cm}^2)$  이상만을 측정할 수 있으므로 실제 CPE data에 안 나타난 다른 이유들도 생각해 볼 수 있을 것이다.

### 3.3 S E U

SEU (Single Event Upset)은 실제 CRE module에 들어있는 radiation 환경 관측 detector의 data는 아니지만 SEU의 data에 의해서 간접적으로 radiation 환경에 대한 정보를 얻을 수 있으므로 SEU data에 대한 논의를 해본다. SEU란 큰 에너지를 가진 입자가 digital-logic circuit, microprocessor, memory system 등을 통과하면서 bit의 정보를 바꾸는 soft-error를 이야기 한다. 위성을 운용할 때에는 이 SEU는 일종의 error이므로 항상 SEU가 일어났는지 검사하고, 생긴 SEU를 고치는 routine이 항상 동작하고 있다. 이 SEU 검사결과는 error log file에 기록된다. 그림 8은 93년 1월부터 10월까지 일어난 SEU를 회색의 농도에 대응시켜서 관측된 위치에 그린 것으로 CPE 결과와 마찬가지로 SAA부근에서 많은 SEU가 관측됨을 보여준다. 이곳은 앞에서 이야기했듯이 지구 자기장이 가장 약한 곳이므로 magnetic mirror point가 지표면에 대해 다른 곳보다 상대적으로 많이 내려왔기 때문에 많은 입자가 모여 있게 되고 따라서 SEU가 일어날 가능



(a) SEU in memory



(b) processed CPE channel 14

그림 10. processed CPE channel 14와 SEU 경향과의 비교.

성이 높아지게 되는 것이다. 93년 1월부터 10월까지 각 날에 하루동안 일어난 SEU의 숫자를 그래프로 그린 결과는 그림 9와 같다. 몇개의 SEU가 특별히 많이 일어난 날이 있는데, 이 날들은 solar geophysical data에서 보면 태양의 활동이 활발했던 날들로 이날 CPE data의 count수도 평균보다 많음을 알 수 있었다. SEU가 최대값을 나타낸 날은 6월 11일 (day 162)로 이날 CPE data를 보면 이날 flux가 다른 날들에 비해 무척 큼을 알 수 있었다.

SEU의 각 peak 값을 나타내는 날들은 태양의 활동이 활발했던 날들로 그 경향이 일치하지만 정량적으로 볼 때 같은 정도의 solar flare 후 측, CPE data에서 보면 flux가 거의 같은 수준인

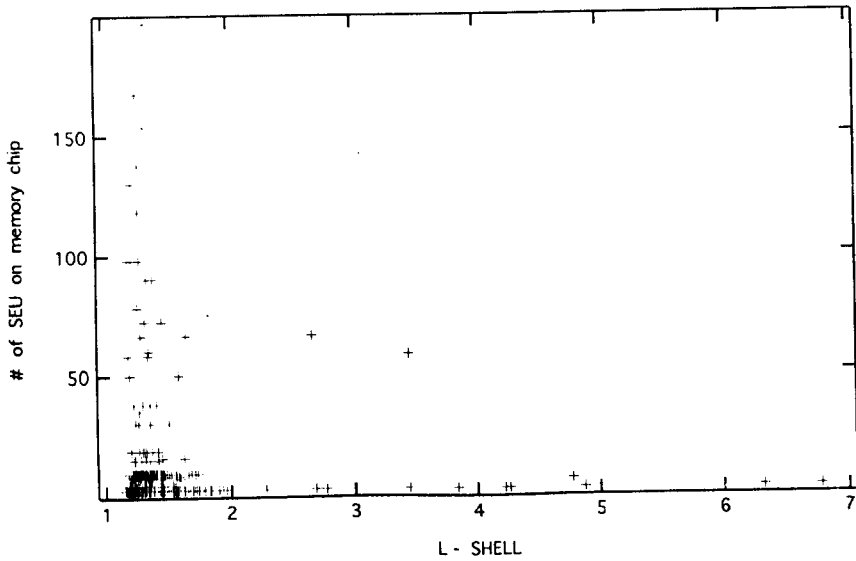


그림 11. L-shell parameter에 따른 memory chip에서의 SEU 개수.

날들 사이에서도 SEU data 에는 조금 차이가 있다. 예를 들어, 3월 13일 (day 72)에 일어났던 flare는 그 크기에 있어서는 6월 9일 (day 160)의 그것과 비슷하지만 SEU 개수는 4배 정도의 차이가 난다. 이것은 6월 11일 (day 162)에 다른 날에 비해 어떤 특정한 LET영역이 많았고, LET가 memory chip 자체의 energy band gap과 같이 chip의 SEU를 일으키는 mechanism과 맞아서 특별히 SEU가 많이 일어났다는 가정을 해 볼 수 있다. 그래서, 여러 CPE의 channel 들을 조사해본 결과 새로 처리한 CPE channel 14 ( 실제 CPE 56 ~ 59 channel , 832 ~ 880 MeV/(g/cm<sup>2</sup>) )이 SEU의 경향과 상당히 유사함을 보여 주었다(그림 10). 하지만, SEU와 CPE data 모두 쌓인 양이 작기 때문에 이러한 관계에 대한 결론을 단정하기는 어렵다.

SEU가 일어난 위치에 L-shell parameter를 대응시켜 그래프로 그린 것이 그림 11과 같다. inner Van Allen belt인 L 값 1.3 지구 반지름에 SEU가 많이 관측되었다. 이것은 inner Van Allen belt가 KITSAT-1 radiation 환경에 가장 중요한 역할을 함을 이야기한다.

#### 4. 결 론

KITSAT-1 CRE module의 두 부분인 CPE 와 TDE의 data에서 우리는 태양의 활동 경향에 따라 KITSAT-1 궤도의 Van Allen belt 입자 분포에 많은 변화가 있음을 알 수 있었다.

Solar flare가 있는 후 CPE data는 입자의 flux가 크게 증가함을 보여 주었지만 LET spectrum의 hardness에는 큰 변화가 없었다. 이것은 지구의 inner Van Allen belt의 high energy proton들이 직접적으로 태양의 flare 입자에 그 근원을 두고 있는 것이 아니라, 고에너지 입자들이 지구 대기의 중성 입자들과 반응하여 생긴 중성자가 decay하여 생긴 전자와 proton이 지구의 자기장에 잡혀 생겼기 때문이다( CRAND theory ). TDE data는 유효 shielding thickness에 따라 radiation 효과가 달라짐을 보여 주었고 전체 data의 경향이 태양의 활동 경향과 같았다. SEU는 실제 CRE module에는 포함되지 않지만 간접적인 radiation 환경에 대한 정보를 주기 때문에 논의에 포함시키는데 SEU data에서는 CPE와 마찬가지로 SAA에서 입자가 다른 곳에 비해서 무척 많다는 사실을 알 수 있었다. 그리고, L-Shell parameter에 따라 SEU의 결과를 보면 KITSAT-1에서 가장 중요한 영향을 주는 radiation 환경은 지구 반지름의 1.3 배 되는 곳에 그 중심이 있는 inner Van Allen belt임을 알 수 있었다.

KITSAT-1 이 발사된 지 약 1년 6개월이 정도 밖에 지나지 않았으므로 많은 CRE data를 가지고 있지 못하다. 그러므로, 아직 관측 못한 현상들도 있을 것이고, 이 논문에서는 확실하게 결론을 못 내린 많은 논의들도 계속 시간이 지나고 KITSAT-1이 작동하여 많은 data들이 쌓이면 좀 더 깊고 확실한 결론에 도달할 수 있으리라 생각된다.

### 참고 문헌

- Adams Jr., J. H 1987, NRL Memorandum Report 5901, 5-5
- Dyer, C. S., Sims, A. J., Farren, A. & Stephen, J. 1989, IEEE Trans. Nucl. Sci., No.6, 2275
- Freden, S. C. 1969, Space Sci. Rev., 198
- Freeman, R. & Andrew Holems-Siedle, A. 1978, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-25, NO.6, 1216
- Gussenhoven, M. S., Mullen, E. G., Filtz, R. C., Brautigam, D. H. & Hanser, F. A. 1987, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-34, 676
- Gussenhoven, M. S., Brautigam, D. H. & Mullen, E. G. 1988, IEEE Trans. Nucl. Sci., NO.6, 1412
- Holmes-Siedle, A. 1974, Nuclear Instruments and methods. 169
- McIlwain, C. E. 1961, J. Geophys. Res., No.11, 3681
- Min, K. W., Kim, S. H., Shin, Y. H. & Choi, Y. W. 1993, JA&SS, 10, 103
- Parks, G. K. 1991, Physics of Space Plasma (Addison-Wesley)
- Takagi, S., Nakamura, T., Kokno, T., Shino, N., Hayashi, K. & Makino, F. 1992, 일본우주과학연구소보고 제75호 1
- Tascione, T. F. 1988, Introduction to the space environment (Orbit Book Co.)
- Underwood, C. I., Brock, D. J. & Kim, S. 1992, Payload Description and Flight Readiness (SatRec)