

우리별 1, 2호에서의 고에너지 입자 환경 관측

신영훈 · 박선미 · 민경욱 · 김성현 · 이대희

한국과학기술원 인공위성연구센터

SPACE RADIATION ENVIRONMENT MONITORED BY KITSAT-1 AND KITSAT-2

Y. H. Shin, S. M. Park, K. W. Min, S. H. Kim and D. H. Lee

Satellite Technology Research Center, KAIST, Taejon 305-701

(Received March 20, 1996; Accepted May 4, 1996)

요 약

1992년 8월에 발사된 한국의 첫번째 위성인 우리별 1호에는 저궤도 고에너지 입자환경을 관측하는 탑재체 cosmic ray experiment(CRE)가 실려있다. CRE는 크게 cosmic particle experiment(CPE)와 total dose experiment(TDE) 두 시스템으로 구성된다. 이와 더불어 실험 탑재물은 아니지만, 프로그램 메모리와 램디스크(RAM disk)의 비트바뀔현상(SEU) 결과를 통해서 고에너지 입자환경에 대한 간접적인 정보를 얻을 수 있었다. 1993년 9월에 발사된 두 번째 위성 우리별 2호에는 OBC인 KASCOM에서 프로그램 메모리와 램디스크 메모리에 대한 비트바뀔현상실험을 수행하였다. 우리별 1호와 2호는 그 구조는 비슷하지만 서로의 궤도가 다르기 때문에 두 위성의 실험결과를 분석해본다면 각 궤도에서의 고에너지 입자환경에 대한 비교연구할 수 있는 좋은 기회가 된다.

ABSTRACT

The results of space radiation experiments carried out on board the first two Korean technology demonstration microsattellites are presented in this paper. The first satellite, KITSAT-1, launched in August 1992, carries a radiation monitoring payload called cosmic ray experiment(CRE) for characterizing the low-earth orbit(LEO) radiation environment. The CRE consists of two sub-systems: the cosmic particle experiment (CPE) and the total dose experiment(TDE). In addition, single event upset(SEU) rates of the program memory and the RAM disk are also monitored. The second satellite, KITSAT-2, launched in September 1993, carries a newly developed 32-bit on-board computer(OBC), KASCOM(KAIST satellite computer) in addition to OBC186. SEUs

occurred in the KASCOM, as well as in the program memory and RAM disk memory, have been monitored since the beginning of the satellite operation. These two satellites, which are very similar in structures but different in orbits, provide a unique opportunity to study the effects of the radiation environment characterized by the orbit.

1. 서 론

1992년 8월 TOPEX/POSEIDON의 보조 탑재체로 Ariane 42P 로켓에 의해 Kourou(French Guiana)에서 발사된 우리별 1호(KITSAT-1)에는 패킷통신실험(packet data communication experiment: PCE), 지구표면 촬영 장치(earth imaging system: EIS), 디지털 신호처리실험(digital signal processing experiment: DSPE)과 우주 고에너지입자검출 실험(cosmic ray experiment: CRE) 등 4개의 실험 장치가 탑재되어 있다. 우리별 1호의 궤도는 표 1에서 보듯이 안쪽 반알렌대에 위치하므로 위성체의 전자 부품이 30MeV 이상의 고에너지 양성자(proton)들에 의한 방사선 효과를 많이 받으며, 특히 반알렌대가 지표면과 근접한 south atlantic anomaly(SAA)에서는 그 영향이 심하게 된다. 이러한 고에너지 하전 입자 환경을 연구하기 위한 실험인 CRE는 cosmic particle experiment(CPE)와 total dose experiment(TDE)의 두 부분으로 구성되어 있다. CPE는 고에너지 입자가 실리콘 검출기에 전달하는 linear energy transfer(LET) 스펙트럼을 측정하는 장치이고, TDE는 위성체가 궤도에서 받는 총 이온화 방사능량을 측정하는 실험으로 solid-state RADFET dosimeter(modified p-channel MOSFET(metal oxide semiconductor field effect transistor))의 문턱 전압 변화로부터 이온화 방사능량을 유추한다. CRE의 결과는 우리별 1호에 사용된 여러 전자부품의 성능을 알아보는 중요한 자료가 될 것이다. CPE는 지구자기장에 속박되어 있는 양성자와 더불어 Galactic cosmic ray(GCR)와 태양 플레어와 관계 깊은 solar cosmic ray(SCR) 등도 관측할 수 있도록 설계되었다. 따라서, 이 실험 결과는 태양의 활동이 지구 radiation환경에 주는 영향을 연구하는 좋은 자료가 된다. TDE는 장기간 방사능 효과를 보기 위해서 만든 검출기로써 RADFET의 결과를 비교해 보면 차폐 두께에 따라 고에너지 입자 환경이 위성체부품에 주는 영향을 비교해 볼 수 있다. 한편 고에너지 입자 환경에 의해 위성체가 받는 영향은 위성 제어를 위한 주컴퓨터 OBC186의 프로그램 메모리와 램디스크 메모리의 비트바뀔현상이 일어나는 빈도(SEU rate)를 조사함으로써 그 정보를 얻을 수 있다.

우리별 2호는 1993년 8월 SPOT-3의 보조 탑재체로 Kourou에서 발사되었으며 그 궤도요소는 우리별 1호보다 약간 낮은 고도를 갖는다(표 1). 우리별 2호에는 PCE, 적외선 감지 실험(infrared sensor experiment: ISE), DSPE, 저에너지 전자 검출실험(low energy electron detector: LEED)과 EIS 등의 실험 장치가 탑재되어 있다. 또한, 우리별 1호와 같은 종류의 OBC(on-board computer)외에 소형위성용 32-bit 컴퓨터 KASCOM(KAIST satellite computer)이 추가로 탑재되어 있어 프로그램 메모리, 램디스크 메모리 및 KASCOM에서 일어나는 비트바뀔현상을 살펴 볼

표 1. 우리별 1호와 우리별 2호의 개요.

	KITSAT-1	KITSAT-2
고도	1,330km	800km
궤도 경사각	66°	98.7°
크기(mm ³)	352×356×670	352×356×670
무게	48.6kg	47.5kg

수 있다. 두 위성은 궤도가 다를 뿐 유사한 구조를 가지고있어 궤도에 따른 고에너지 입자 환경을 비교해볼 수 있는 좋은 기회를 제공한다.

2. 실험 장치

2.1 Cosmic Particle Experiment(CPE)

비트바뀔현상의 원인은 대부분 고에너지 하전 입자에 있으므로 위성체 주변의 우주환경에 대한 정보는 비트바뀔현상 분석에 중요한 자료가 된다. CPE는 우리별 1호 궤도에서의 고에너지 입자 환경이 위성체 안쪽에 주는 linear energy transfer(LET)를 측정하는 실험으로 센서 부분은 30mm×30mm의 면적에 두께 300 μ m인 실리콘 다이오드(silicon diode)로 되어 있다(Underwood *et al.* 1994). 전하를 띤 입자들이 검출기의 센서 부분을 통과하면 전자-전공쌍(electron-hole pair)이 생기는데, 실리콘의 경우 이 전자-전공쌍이 한 개 생기는데는 3.6eV가 필요하다. 센서에 생기는 전하는 센서에 전달된 에너지에 비례하므로 이 전하의 양을 측정하여 전달된 입자의 에너지를 알 수 있다. 다중채널 분석기를 연결하여 측정되는 전하량에 따라 LET 스펙트럼을 512개의 채널로 분류하는데 이웃하는 두 채널은 0.05pC(LET로는 16MeVcm²/g)씩 간격을 가지고 있으므로 측정 전하 범위는 25.6pC 이하이고, 이 값을 수직으로 입사하는 입자의 LET로 환산해 보면 8,230MeVcm²/g에 해당한다. 한편 512개의 채널중 첫 4개의 채널은 검출기의 문턱값(48MeV) 이하이어서 의미가 없으므로 실제 분석에서는 508개의 채널만 사용된다. 각 채널의 측정 데이터는 4byte의 데이터 메모리중 3byte를 사용하고 나머지 1byte에는 비트바뀔현상 검출을 위해서 정해진 패턴의 데이터가 기록되어 있다. 이 데이터를 저장하는 RAM은 비트바뀔현상의 방지를 위해 silicon-on-sapphire(SOS) 공정에 의해서 만들어졌으며, 실제 실험에서도 비트바뀔현상이 거의 검출되지 않았다. 실험은 150초동안 측정한 값이 하나의 데이터가 되도록 하였으므로 위성의 궤도상에서 1,100km의 위치 분해능을 가지게 된다. CPE는 다이오드에서 생성된 전하의 양에 의해서 LET를 측정하므로 입자의 종류와 에너지를 직접 확인할 수는 없으나, 태양 활동의 변화 또는 위성의 위치에 따른 상대적인 변화는 감지할 수 있다.

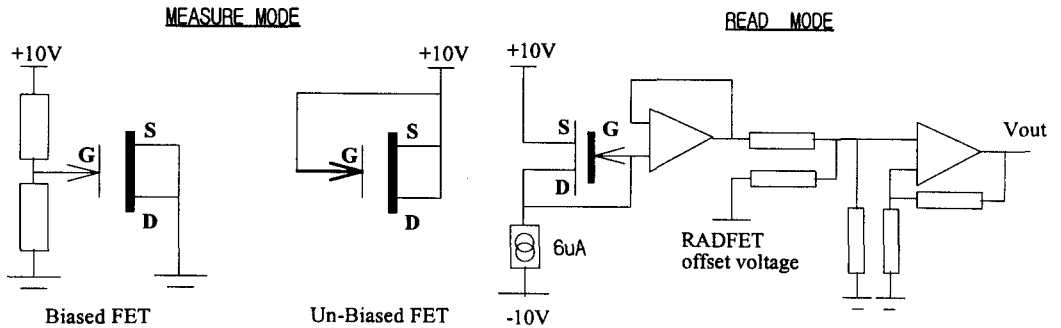


그림 1. RADFET Dosimeter 동작.

2.2 Total Dose Experiment (TDE)

TDE는 위성체가 궤도 운동을 하면서 우리별 1호 몸체의 여러 위치에 쌓이는 이온화 방사능을 측정하는 실험이다. TDE의 센서로는 이온화 방사능에 민감하도록 gate-oxide에 $0.1 \mu\text{m}$ 이상 두꺼운 solid state RADFET dosimeter가 여러 개 연결되어 사용된다. RADFET에 방사선을 쬐어주게 되면 space charge effect에 의해서 gate-oxide에 붙잡히는 전공이 생긴다. 이 전하들에 의해서 FET의 문턱전압변화가 생기게 된다(Holmes-Siedle 1974). 각 RADFET 센서는 한 쌍의 p-channel MOSFET로 되어 있는데, 한 개는 unbiased 상태(measure mode)로 계속 두고 나머지 한 개는 측정하는 동안 biased 상태(measure mode)로 둔다. 이와 같이 두가지 경우를 생각하는 이유는 RADFET의 gate-oxide에는 방사능에 의해서도 charge carrier가 생기지만 열에 의해서도 역시 charge carrier인 전자-전공쌍이 생기므로 이것이 문턱전압에 영향을 미치기 때문이다. 그러므로, 더욱 정확한 측정을 위해서는 이 열효과를 빼주어야 한다. RADFET의 문턱전압을 측정할 때에는 그림 1과 같이 FET의 source에 +10V를 연결하고, gate와 drain에 $6 \mu\text{A}$ 전류원을 연결한다. Gate의 출력전압이 데이터로써 측정될 만큼 낮아지기 위해서 RADFET offset을 연결한다. Read mode에서는 24 analog RADFET에서의 데이터와 그와 관련된 온도 데이터를 1개의 아나로그 원격검침입력으로 다중화(multiplexing)해서 원격검침(telemetry)에 전달한다. 그 데이터들을 OBC가 random access하여 읽어 들이게 된다. 위성체 각 부분에 쌓이는 dose의 양을 측정하기 위해서 TDE의 센서는 여러 곳에 위치시켰다. 우리별 1호 각 부분의 RADFET은 차폐 두께가 모두 다르므로 각 RADFET의 데이터를 비교해 보면 차폐 두께에 따라 radiation 환경이 주는 영향을 비교해 볼 수 있다(Underwood et al. 1994).

2.3 OBC186 SEU 관측

우리별 1호와 우리별 2호는 소형 저궤도 위성으로서, 위성 제어를 위한 주 컴퓨터(on-

board mission control computer: MCC) 시스템은 CPU로 INTEL 80C186을 사용하는 OBC186이다. OBC186 메모리 시스템은 bootstrap ROM, 프로그램 메모리 및 데이터 저장을 위한 램디스크로 구성되어 있다. 프로그램 메모리 영역은 OS kernel에 의해 조절되며 4개의 128kbyte SRAM을 사용한다. 프로그램 메모리는 512kbyte 전체에 대해 해밍 코드(hamming code)를 하드웨어로 구현한 single error correction and double error detection(SEC-DED) 성능을 갖는다. 이에 따라 코드를 저장하기 위한 512kbyte의 메모리 공간이 추가로 설치되어 있다. 메모리 영역의 비트바뀔현상 검색 기능은 1byte 데이터를 메모리에 쓸 때 4bit 해밍 코드를 생성하며, 데이터는 메모리에 저장하고 코드는 해밍 코드 메모리에 저장한다. 저장된 1byte 데이터를 메모리에서 읽을 때 다시 4bit의 해밍 코드를 생성하고, 해밍 코드 메모리로부터 기존에 저장된 코드를 읽어 내어 비교한다. 이때 데이터에 한 개 비트에 에러가 있으면 데이터를 정정하고 이를 CPU로 보내 준다. 그리고 2bits EDAC counter가 증가한다. 여기에 채용된 에러 보정 회로(error detection and correction system: EDAC)는 메모리에 자동적으로 정정한 데이터를 보내주지 않고 데이터를 메모리에 쓸 때만 정정한 데이터와 코드 비트를 저장하게 된다. 따라서 일단 비트바뀔현상이 일어난 후 정정한 데이터가 메모리에 저장되기 전에 비트바뀔현상이 다시 일어나면 두 비트 에러가 만들어지게 되고 이것은 해밍 코드로 정정할 수 없다. 따라서 에러가 축적되는 것을 방지하기 위해 주기적으로 메모리 영역을 읽고 쓰는 memory wash 소프트웨어를 이용한다(Underwood 1990). 우리별 1, 2호의 프로그램 메모리에서 구현된 wash 방식은 256byte씩 블록 단위로 메모리 내용을 읽고 써서 확인하며 각 블록에 할당된 3byte EDAC 코드를 비교하여 에러 발생을 확인하고, 에러가 검출되면 관측 시간과 발생 장소를 기록한다. 256byte내에서 일어난 1byte 이상의 에러는 1개의 에러로 기록된다. 프로그램 메모리는 매 1초마다 2kbyte의 영역을 wash하도록 되어 있으므로 512kbyte를 wash하는데 소요되는 시간은 평균 4분이다. 따라서 에러 발생 장소를 정확히 알기 위해서 이 시간 지연을 고려해야 한다.

우리별 1, 2호의 램디스크는 각각 13Mbyte, 12Mbyte인데, 이는 각각 4개의 1Mbyte hybrid SRAM으로 구성된 3개의 뱅크(bank)로 되어있고 우리별 1호는 4개의 256kbyte hybrid SRAM으로 구성된 1개의 뱅크를 추가로 가지고 있다. 램디스크는 하드웨어 EDAC 회로 대신 소프트웨어 코딩을 이용한다. 소프트웨어 EDAC을 사용하여 256byte의 데이터 블록내의 한 바이트에서 일어난 한 비트 또는 여러비트 에러를 확인하고 그 발생 위치를 알 수 있다. 각 256byte의 데이터 블록에는 3byte의 EDAC 코드를 할당한다. 또한 주기적인 wash에 의해 multiple event를 방지한다. 그러나, 252byte의 데이터에서 두 바이트 이상의 에러가 발생하면 정정이 불가능하다. 일반적인 event는 한 비트 에러이므로 이 코드를 이용하여 대부분의 에러는 검출되고 정정되고 할 수 있다. 우리별 1, 2호는 매 1초마다 1kbyte 클러스터씩 wash하므로 13Mbyte를 모두 wash하는데 약 222분이 소요된다. 따라서, 공간 분해능이 떨어지므로 비트바뀔현상이 발생한 장소를 정확히 알 수는 없다.

표 2. 위성에서 사용한 RAM의 종류.

Satellite	KITSAT-1	KITSAT-2	KITSAT-2
MCC	OBC186	OBC186	KASCOM
Program Mem.	Monolithic	Monolithic	Hybrid
Data Memory	Hybrid	Hybrid	Monolithic

2.4 KASCOM SEU monitor

KASCOM은 우리별 2호와 같은 소형위성의 실시간 제어를 목적으로 만들어진 컴퓨터 시스템으로서 32-bit Intel 80960MC를 사용한다. KASCOM의 메인 메모리 서브시스템은 128kbyte EPROM과 에러 보정이 되는 2Mbyte 프로그램 메모리, 및 8Mbyte의 데이터 메모리로 구성된다. 64kbyte의 EPROM에는 bootstrap image가 저장된다. 프로그램 메모리의 에러 보정 회로(EDAC)는 하드웨어 해밍 코드를 이용하고, 데이터 메모리는 소프트웨어 EDAC을 사용한다. 프로그램 메모리는 monolithic SRAM을 사용한 우리별 1호와 2호의 OBC와는 달리 hybrid 1Mbyte SRAM을, 데이터 메모리와 EDAC 코드 메모리는 512kbyte monolithic SRAM을 사용한다. Static RAM을 택한 이유는 dynamic RAM보다 비트바뀔현상에 강하고 전력 소모가 적으며 기존의 소형위성에서 사용해왔기 때문이다. 표 2는 위성의 프로그램 메모리와 램 디스크에 사용한 RAM의 종류를 보여 준다.

3. 결과 분석 및 논의

3.1 CPE

안쪽 반알렌대에 존재하는 고에너지 입자들의 주된 원인은 cosmic ray가 지구 대기와 상호 작용에 의해 만든 중성자가 양성자(proton)와 전자로 붕괴되어 그 일부가 지구자기장에 잡히게 되어 띠모양을 이루게 된다고 생각되고있으며, 또한 방사선대는 큰 태양플레어 등의 태양 활동에 의해 영향을 받게 된다. 그림 2는 태양 활동의 변화가 방사선대에 주는 영향을 알아보기 위해서 1993년 3월 13일에 발생한 플레어 이후 입자가 많이 모여있는 SAA에서 CPE 데이터의 변화를 살펴본 것이다. 시간이 지남에 따라 전 채널에 걸쳐 입자의 count 수는 작아졌지만 스펙트럼의 모양에는 변화가 없음을 알 수 있다.

그림 3은 태양활동이 평온한 상태일 때 CPE 데이터를 관측한 위치에 표시한 것이다. CPE에서 가장 민감한 채널들인 4~8 채널의 150초 동안 count 수를 더하여 그 숫자를 회색 농도에 대응시켜서 나타내었다. 여기에서는 브라질 남동 해안에 많은 입자가 모여있는 south atlantic anomaly(SAA)를 뚜렷이 보여주고있다. 이곳은 지구자기장이 가장 약한 곳이므로 magnetic mirror point가 지표면에 대해 다른 곳보다 상대적으로 많이 내려왔기 때문에 많은 입자가 모여있게 된다. McIlwain에 의해 정의된 L값은 자기장을 따라갈 때 적도면과 만나는 위치를 지

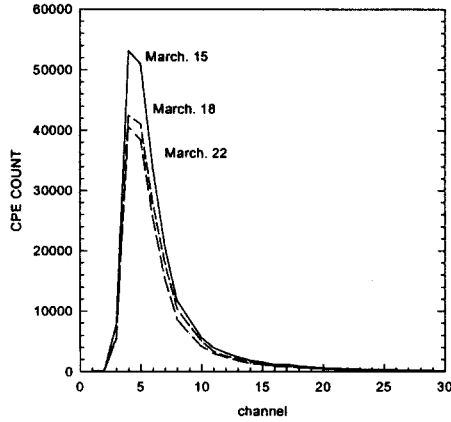


그림 2. 태양 플레어(1993년 3월 12일)가 일어난 직후 SAA에서의 LET 스펙트럼.

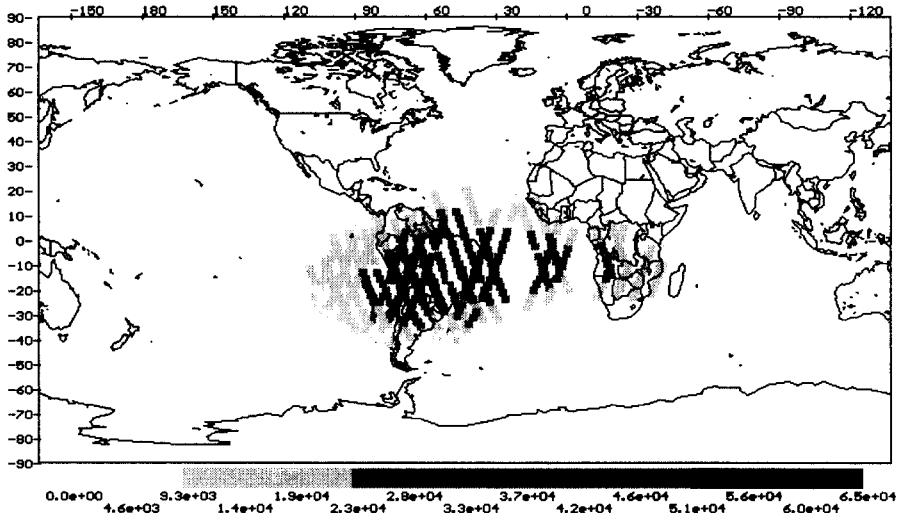


그림 3. CPE 채널 4~8 count 수를 표시한 지도. SAA가 뚜렷하게 보인다.

구 반경으로 나눈 값으로 주어진 자기력선 위에서는 거의 일정한 값을 가진다. 따라서 자기력선에 속박되어있는 방사선대의 입자를 기술하는데 있어서 위치를 나타내는 유용한 변수가 된다(McIlwain 1961).

그림 4와 그림 5는 L값에 따른 CPE 채널 4, 6 및 7의 count 수를 나타낸 것이다. 그림 4는 1993년 SAA 근방에서 관측된 CPE 결과이고, 그림 5는 1994년 1월에서 3월까지 관측된 CPE 결과이다. L=1.3에서 최대값을 가짐을 알 수 있다. 1994년 데이터에서 각 채널별로 한달동안 CPE count 수를 그래프로 그려보면 L=1.3에서 항상 최대값을 가지면서 큰 L값($L > 1.6$)에서는 입자 분포의 fluctuation이 보인다. 이러한 영역에서는 태양 활동 등에 의한 자기장의 변화에 따라 영향을 받을 수 있으므로 L=1.3에서와 같이 안정적인 분포를 갖지 못하는 것 같다(White 1973).

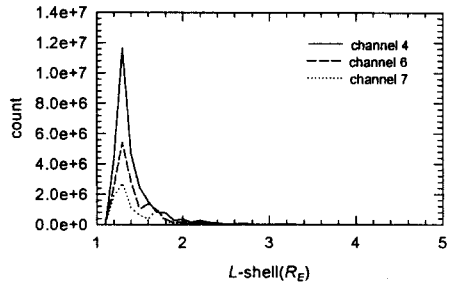
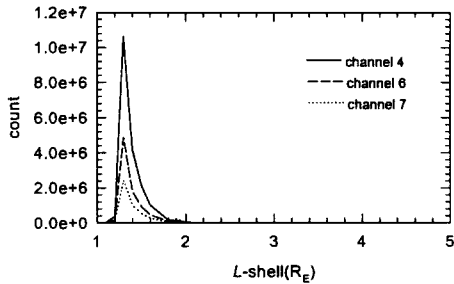


그림 4. 1993년 SAA 근방에서 L-shell 변수에 따른 CPE 채널 4, 6 및 7의 count 수. L=1.3에서 최대값을 가진다.

그림 5. 1994년 1월~3월 L-shell 변수에 따른 CPE 채널 4, 6 및 7의 count 수. L=1.3에서 최대값을 가진다.

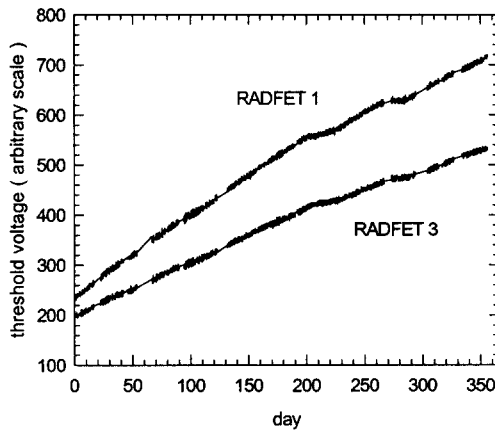


그림 6. 1993년 RADFET 1과 RADFET 3 dosimeter 문턱전압의 변화. 두 RADFET 기율기의 차이는 위성구조체의 차폐 두께 차이 때문이다.

3.2 TDE

그림 6은 우리별 1호의 RADFET dosimetry 데이터이다. 축적된 dose rate은 일정하지 않고 전체적 기울기의 경향은 NOAA solar geophysical data에 나타난 태양의 활동성과 일치한다(Adams *et al.* 1991). M3 플레어가 있었던 3월의 기울기는 특히 급하다. 그림을 보면 전체적으로 RADFET 1의 기울기가 RADFET 3의 기울기보다 급함을 알 수 있다. 이것은 위성구조체에 의한 차폐효과의 차이로 RADFET 3는 위성체 안쪽에 있으므로 상대적으로 쌓인 dose의 양이 적게 되었다. 하지만, NASA의 기본 모델을 사용한 shielddose 프로그램을 이용하여 계산해보면 두 RADFET 사이에 큰 차이를 보이지 않았는데 이것은 second inner radiation belt의 고에너지 입자들의 에너지가 약해서 위성체의 구조물에 의해 쉽게 차폐될 수 있기 때문인 것 같다. 또다른 이유로는 열효과가 완전히 제거되지 않았을 가능성이 있다. 열에너지는 RADFET dosimeter 내에 전자-전공쌍을 생성하므로 열효과와 보정은 중요하다(Adams & Holmes-Siedle 1978).

3.3 SEU

비트바뀔현상은 고에너지 하전 입자에 의해 반도체 부품내의 비트 정보가 바뀌는 소프트 에러(soft-error)를 말한다. 이러한 현상은 반도체 격자의 임계 체적내에 충분한 에너지가 축적 되었을 때 입사 입자에 의해 바로 일어나거나, 또는 핵반응의 결과로 생긴 입자에 의한 이차 이온화의 결과로 일어난다(Underwood 1990, Adams & Holmes-Siedle 1978). Cosmic ray의 무거운 이온 성분과 지구자기장내에 잡혀있는 입자들, 특히 고에너지 양성자에 의해 일어나는 비트바뀔 현상은 위성체의 전자 부품에서 중요하게 고려되어야 할 요소 중의 하나이다. 따라서 위성을 운용할 때는 비트바뀔현상이 일어났는지 검사하고 비트바뀔현상이 발생하면 정정하는 프로그램이 항상 동작하고 있다. 이 비트바뀔현상 검사 결과는 에러 기록 화일(error log file)에 기록된다.

그림 7은 1994년 1월부터 12월까지 우리별 1호의 주 컴퓨터 시스템(on-board computer: OBC)의 프로그램 메모리에서 일어난 비트바뀔현상을 관측 위치에 대응시켜 지도상에 표시한 것으로 south atlantic anomaly 상공에서 비트바뀔현상이 많이 관측됨을 알 수 있다(Wilkinson 1994). 1993년 우리별 1호와 1994년 우리별 2호의 프로그램 메모리에서 관측된 SEU 역시 SAA에서 많이 발생한 것으로 나타났다. 이러한 사실은 우리별 2호와 궤도 요소가 비슷한 University of Surrey Satellite(UoSAT-2: 고도 700km, 궤도 경사각 98°)에서도 확인된 바 있다(Wilkinson 1994). SAA는 지구자기장의 세기가 약해 방사선 벨트가 다른 곳보다 지표면에 많이 내려와있어서 고에너지 입자들이 많이 모여있는 곳으로 이는 우리별 1호의 고에너지 입자 검출기인 CPE의 관측 결과에서도 확인되었다(Underwood *et al.* 1994). 따라서 검출된 비트바뀔현상 대부분이 고에너지 입자의 영향이라는 것을 알 수 있다. 그림 8은 우리별 2호에 탑재되어있는 32-bit 컴퓨터 KASCOM의 프로그램 메모리에서 1994년 1월~6월 사이에 일어난 비트바뀔현상의 위치를 표시한 것이다. 대부분의 비트바뀔현상은 그림 7과 마찬가지로 SAA에서 일어났지만, 특이한 점은 위도 55° 이상(또는 -55° 이하)의 고위도 지역에서도 많은 비트바뀔현상이 관측

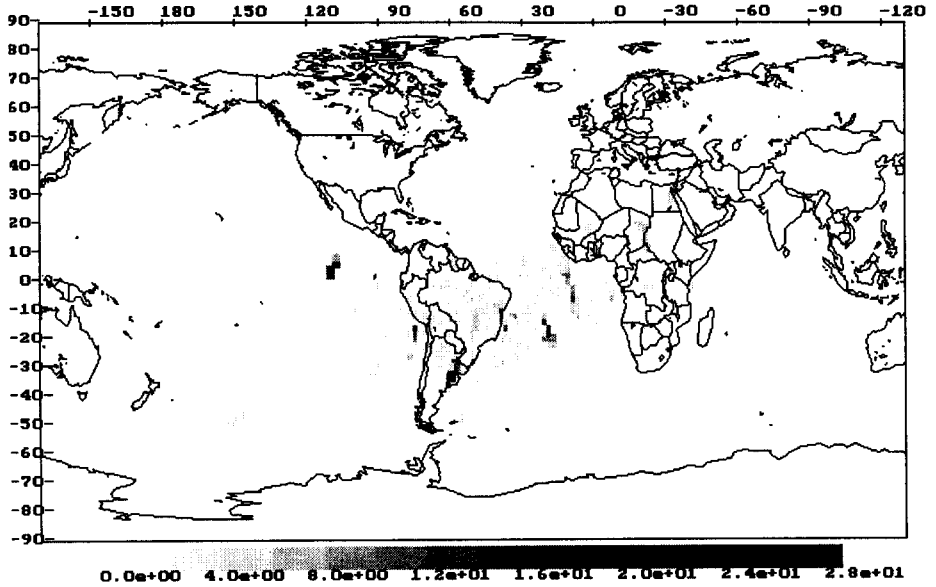


그림 7. 1994년 우리별 1호 주 컴퓨터의 프로그램 메모리에서 일어난 비트바뀔현상의 위치. SAA에서 비트바뀔현상이 집중적으로 일어났다.

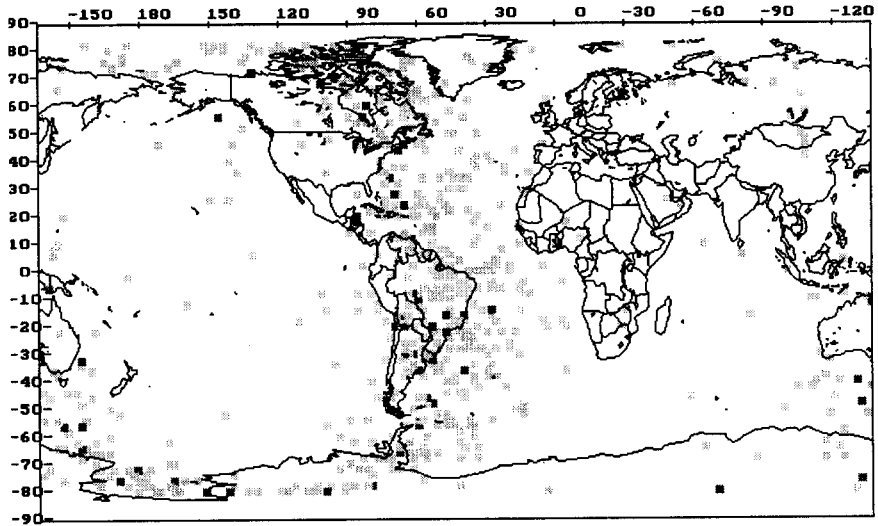


그림 8. 1994년 1월~6월 우리별 2호 KASCOM의 프로그램 메모리에서 일어났던 비트바뀔현상의 위치. SAA뿐만 아니라 고위도 지역(위도 55° 이상)에서도 비트바뀔현상이 많이 관측되었다.

표 3. 비트바뀔현상 기록 분석.

	Program Memory SEU Rate (RAM size)	Data Memory SEU Rate (RAM size)	Program Memory Max SEU (date)	RAMDISK MBit.SByte Event (Events/Days)	RAMDISK SBit.MByte Event (Events/Days)
1993년 KITSAT-1	16.6 (512K)	61.6 (13M)	974 (93.6.11)		
1994년 KITSAT-1	10.2 (512K)	59.9 (13M)	176 (94.1.20)	53/1	34/30
1994년 KITSAT-2	5.1 (512K)	58.4 (12M)	558 (94.12.12)	148/98	2/2
1994년 KASCOM	4.0 (2M)	29.5 (8M)			

된 것이다. 이는 우리별 2호와 같이 극궤도를 가지는 위성은 지구자기장이 열려있는 고위도 지방에서 cosmic ray에 많이 노출되므로 그 영향으로 비트바뀔현상이 많이 일어났던 것으로 생각된다. 이러한 효과는 KASCOM의 데이터 메모리에서도 나타났다.

우리별 1호와 우리별 2호에서 1993년과 1994년에 기록된 비트바뀔현상을 분석한 표 3은 monolithic RAM인 프로그램 메모리와 데이터 저장을 위한 램디스크 hybrid RAM의 우주환경에 대한 반응이 다른 것을 보여준다. 1994년 프로그램 메모리의 경우 고도 1,300km인 우리별 1호에서의 비트바뀔현상 발생율이 고도 800km인 우리별 2호에서보다 2배 정도 더 크게 나타난 것에 반하여, 램디스크 메모리의 비트바뀔현상 발생 빈도는 비슷하였다. 즉, monolithic RAM은 hybrid RAM에 비하여 방사선대의 영향을 더 크게 받는 것을 알 수 있다. 램 디스크의 경우, 비트바뀔현상이 발생한 address를 살펴보면 1,300km 고도의 우리별 1호에서는 single-bit multiple-byte error(SBit.MByte)가 자주 발생하였고 800km 고도의 우리별 2호에서는 multiple-bit single-byte error(MBit.SByte)가 자주 발생하였다. 이는 우리별 2호가 위치한 800km 고도가 지구자기장에 붙잡힌 양성자의 영향을 덜 받는 대신 고위도 지역에서 더 높은 에너지인 cosmic ray의 영향을 받기 때문인 것으로 생각된다. 또한 우리별 2호의 OBC와 KASCOM의 프로그램 메모리를 비교하여 단위 바이트당 환산하여보면 monolithic RAM인 OBC의 비트바뀔현상 발생율이 hybrid RAM인 KASCOM에 비해서 5배쯤 높은 것을 알 수 있다. KASCOM의 RAM은 우리별 2호의 OBC와 다른 것을 사용하여 절대적인 비교는 어려우나 우리별 1호와 2호의 궤도 차이에 따른 비교에서 얻은 프로그램 메모리의 결과에서도 보듯이 hybrid RAM이 monolithic RAM에 비해서 방사선 영향을 적게 받는다고 말할 수 있다.

그림 9는 우리별 1호의 프로그램 메모리에서 1993년 1월부터 1994년 12월까지 1일당 비트바뀔현상의 갯수를 그래프로 나타내었다. 비트바뀔현상이 많이 일어난 날을 GOES-7(geostationary operational environment satellite) 위성에서 관측한 양성자 플럭스(flux) 데이터와 비교해보면 1993년 6월 11일(day 162), 1994년 1월 20일(day 385), 2월 24일(day 420), 10월 19일(day 657), 11월 6일(day 675)에 있었던 비트바뀔현상은 양성자 플럭스가 증가한 후에 일어났음을 알 수 있다. 1993년 우리별 1호에서 관측된 CPE 데이터를 보면, 태양 플레어가 있을 후 입자가 많이

모여있는 SAA에서 전 채널의 count 수가 증가되었다가 시간이 지남에 따라 점차 감소함을 확인할 수 있었다(Shin et al. 1994). 한편 양성자 플럭스의 증가와 비트바뀔현상발생 빈도의 증가가 반드시 비례하는 것은 아니다. 1994년 2월 22일의 양성자 플럭스의 증가는 1월 18일에 있었던 양성자 플럭스 변화보다 훨씬 컸었는데 비트바뀔현상의 갯수는 오히려 1월 20일의 2배 정도 많이 일어났다. 이는 아마도 1월 20일에 증가한 입자들의 LET 영역에 대해 위성의 RAM이 특히 민감하게 반응했기 때문인 것으로 생각된다.

그림 10은 우리별 1호의 램디스크 메모리에서 일어나는 비트바뀔현상의 주기성을 살펴보기 위해 1993년 6월부터 1994년 10월까지의 일당 비트바뀔현상 발생율을 Fourier transform한 그림이다. 여기서 peak가 나타나는 주기는 31일, 57일 및 86일 등으로 태양의 자전주기인 29일 및 그 배수들에 매우 가깝게 나타났다. 이러한 주기성이 나타나는 것은 태양에서 오랫동안 유지되는 활성영역의 영향 때문이라고 생각된다. 따라서 발생이 태양 자전주기에도 밀접한 상관관계가 있음을 알 수 있다(Williams 1966). 그림 11는 우리별 1호와 2호의 OBC 프로그램 메모리의 L값에 따른 비트바뀔현상 갯수를 그래프로 나타낸 것으로 우리별 1호의 결과를 보면 L=1.3에서 최대값을 보이는 것을 알 수 있다. 비트바뀔현상은 고에너지 양성자에 의해 일어나므로 안쪽 반알렌대 고에너지 양성자 분포를 확인할 수 있었다. 그림 11에서 1994년 우리별 2호에서는 L=1.2에서 최대값을 보여주는데 이는 우리별 2호의 고도가 낮기 때문이다.

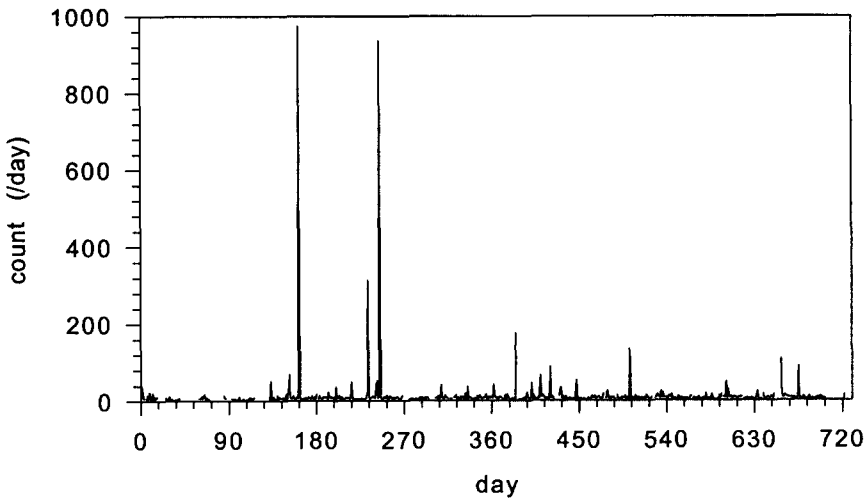


그림 9. 1993년과 1994년 우리별 1호 OBC 프로그램 메모리의 일별 비트바뀔현상 검출 수.

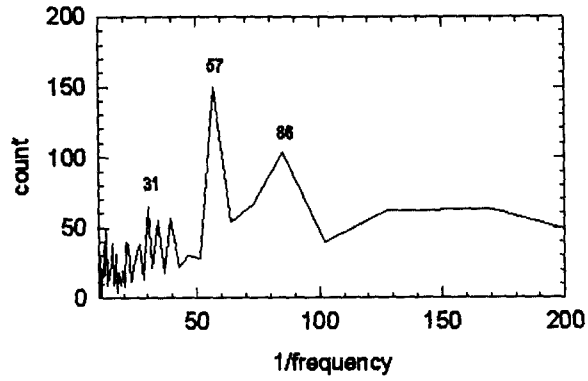


그림 10. 1993년 6월~1994년 10월 우리별 2호 램디스크 메모리 비트바뀔현상 발생률의 Fourier transform. 31일, 57일 및 86일에서 나타나는 peak는 태양의 자전주기(29일)와 상관 관계가 있다.

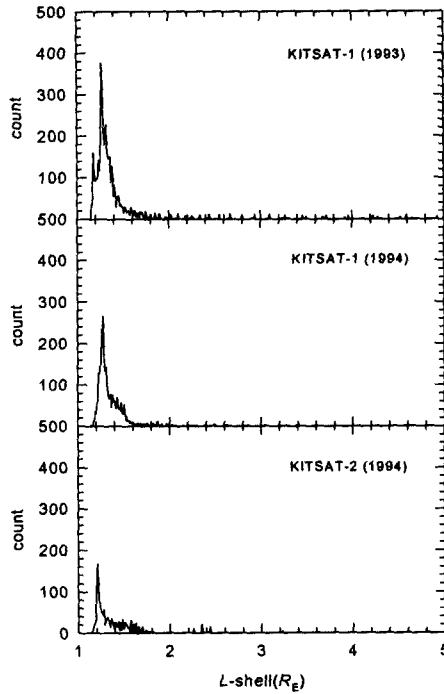


그림 11. 우리별 1호와 우리별 2호 OBC 프로그램 메모리의 L-shell 변수에 따른 비트바뀔현상 갯수. 우리별 1호는 L=1.3에서 우리별 2호는 L=1.2에서 최대값을 가진다.

4. 결 론

본 연구에서는 우리별 1호의 CRE와 프로그램 메모리에서의 비트바뀔현상 실험 결과와 우리별 2호의 KASCOM의 비트바뀔현상 실험에서 안쪽 반알렌대가 위성의 고에너지 입자 환경에 가장 중요한 영향을 끼침을 확인하였다. 그리고, 총방사능 축적 현상은 위성구조체의 차폐 효과에 따라 그 영향에 차이가 있으며, 태양의 활동에 따라 쌓이는 dose의 양이 달라짐을 알 수 있었다. 저궤도 위성인 우리별 1호와 2호는 south atlantic anomaly(SAA)를 지나는 동안 비트바뀔현상이 가장 민감하게 발생하였고, 특히 극궤도인 우리별 2호의 경우 극지방으로 직접 들어오는 cosmic ray에 의해 고위도 지역에서도 비트바뀔현상이 많이 발생하였다. 방사선대에서 일어난 비트바뀔현상이 single-bit multiple-byte 형식인데 반하여 고위도 지역에서는 multiple-bit single-byte 형식의 비트바뀔현상이 많이 관측되었으며 이는 고위도 지역의 cosmic ray가 방사선대 양성자보다 고에너지이기 때문인 것으로 추측된다. 두 위성에서 공통으로 사용된 기억소자의 비트바뀔현상을 비교함으로써 궤도에 따른 영향을 살펴볼 수 있었다. 그 결과는 monolithic RAM이 hybrid RAM보다 방사선의 영향을 더 크게 받는 것으로 나타났다. 또한 비트바뀔현상 및 CPE의 관측 결과로부터 $L=1.3$ 에서 안쪽 반알렌대의 고에너지 양성자 분포를 확인할 수 있었다. 한편, 비트바뀔현상의 발생은 태양의 자전주기와의 밀접한 상관 관계가 있는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- Adams, L. & Holmes-Siedle, A. G. 1978, IEEE Trans. Nuc. Sci., NS-25, 1657
 Adams, L., Daly, E. J., Harboe-Sorensen, R.A., Holmes-Siedle, A. G., Ward, A. K. & Bull, R.A. 1991, IEEE Trans. Nuc. Sci., 38, 1686
 Holmes-Siedle, A. G. 1974, Nuc. Ins. and Meth., 121, 169
 McIlwain, C. E. 1961, J. Geophys. Res., 66, 3681
 Shin, Y. H., Min, K. W., Choi, Y. W. & Kim, S. H. 1994, JASS, 11, 131
 Underwood, C. I. 1990, 4th Annual AIAA/USU Confer. on Small Satellite
 Underwood, C. I., Brock, D. J., Williams, P. S., Kim, S., Dialo, R., Santo, P. R., Brito, M. C., Dyer, C. S. & Sims, A. J. 1994, IEEE Trans. Nuc. Sci., 41, 1353
 White, R. S. 1973, Rev. Geophysics and Space Science, 11, 595
 Wilkinson, D. C. 1994, J. Spacecraft and Rockets, 31, 160
 Williams, D. J. 1966, J. Geophys. Res., 71, 1815