

KITSAT-1 TDE의 차폐 효과에 의한 총 축적 방사능양 변화에 대한 연구

김성준^{1†}, 신영훈², 민경욱¹
¹한국과학기술원 물리학과
²Star V-Ray Co., Ltd.

SIMULATION OF SHIELDING EFFECTS ON THE TOTAL DOSE OBSERVED IN TDE OF KITSAT-1

Sung-Joon, Kim^{1†}, Young Hoon Shin², Kyoung Wook Min¹
¹Department of Physics, KAIST, Tae-jon, 305-701, Korea
²Star V-ray Co., Ltd., Tae-jon, 300-132, Korea
E-mail: aramis@space.kaist.ac.kr

(Received April 9, 2001; Accepted May 8, 2001)

요 약

KITSAT-1에 탑재된 Total Dose Experiment (TDE)로부터 관측된 RADFET의 문턱전압 변화를 원자력 연구소 조사실의 Co-60 감마선 조사 장치를 이용한 보정 실험을 통해 총 방사능양으로 환산하였다. 위성 내 센서의 위치에 따라 측정되는 총 방사능양이 다르게 나타났으며, 지구 자기권에서의 NASA 방사선 모델을 이용한 시뮬레이션을 통해 이러한 차이가 센서 위치에 따라 위성체에 의한 차폐 효과가 다르기 때문에 나타나는 현상임을 확인하였다.

ABSTRACT

The threshold voltage shift observed in TDE (Total Dose Experiment) on board the KITSAT-1 is converted into dose (rad(SiO₂)) using the result of laboratory calibration with Co-60 gamma ray source in KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute). Simulation using the NASA radiation model of geomagnetosphere verifies that the dose difference between RADFET1 and RADFET3 observed on KITSAT-1 comes from the difference in shielding thickness at the position of these RADFETs.

Key words: total dose, shielding effect

1. 서 론

1992년 8월, Kourou (French Guiana)에서 TOPEX/POSEIDON에 대한 보조 탑재체로 아리안 42P 로켓에 실려 발사된 한국의 첫 인공위성 (KITSAT-1)은 안쪽 반알렌대 (inner Van Allen

[†]corresponding author

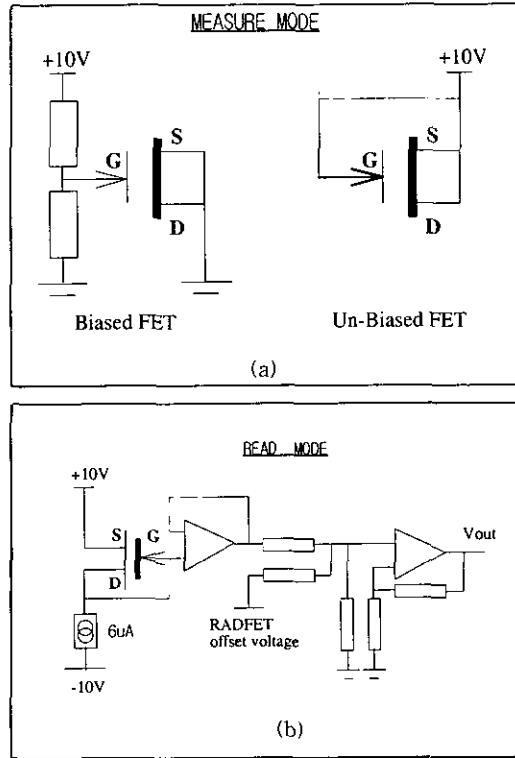


그림 1. TDE의 두 가지 작동 모드. (a) 관측 모드, (b) 읽기 모드

radiation belt)에 속하는 1330km의 고도를 갖는다. KITSAT-1에는 우주 방사능 환경과 이에 의한 전자회로에 대한 영향을 연구하기 위해 Cosmic Ray Experiment (CRE)가 탑재되었다 (Underwood et al. 1994). CRE는 Cosmic Particle Experiment (CPE)와 Total Dose Experiment (TDE)라는 두 개의 하위 시스템으로 구성되어있는데, CPE는 짧은 시간 간격동안 위성체를 통과해서 들어오는 이온화 방사능 입자들의 실리콘 (silicon) 검출기 내에서의 linear energy transfer (LET) 스펙트럼을 측정하며, TDE는 위성체가 궤도에서 받는 총 축적 방사능량을 측정하는 실험으로 MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)의 문턱 전압 변화로부터 이온화 방사능량 (ionizing radiation)을 유추한다 (Shin et al. 1994). 두 실험장치 중 본 논문에서는 TDE에서 얻은 데이터를 집중적으로 고려하기로 한다.

2. 관측 결과

TDE의 센서는 solid-state RADFET dosimeter이며, 두꺼운 gate oxide를 갖는 특별히 고안된 p-channel MOSFET이다. 각 RADFET 센서는 관측 모드에서 10V로 bias되는 p-channel MOSFET과 un-bias되는 p-channel MOSFET 한 쌍으로 구성된다 (그림 1).

방사선에의 노출은 gate oxide 내에 포획된 전공들의 형성을 가져오며, 이것은 누적된 방사능에

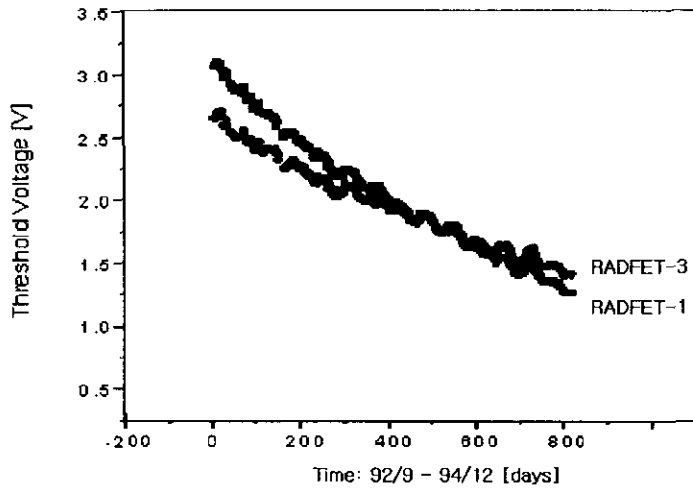


그림 2. RADFET1과 RADFET3의 Biased FET 문턱전압 이동 (1992년 9월에서 1994년12월까지).

따른 문턱전압 (V_{th} : threshold voltage)의 점진적인 이동을 유발한다. 매 5분마다 시스템은 읽기 모드에 돌입하여 일정한 전류 ($6\mu A$)를 각 RADFET에 순차적으로 흘려주게 되며, 측정된 문턱 전압은 위성의 on-board computer에 전달된다. 그림 2의 두 곡선은 위성체 내의 서로 다른 두 위치에서 측정된 RADFET 문턱 전압의 변화를 나타낸다. RADFET1이 RADFET3에 비해 더 큰 문턱 전압 이동을 나타내고 있음을 확인할 수 있으며 이것은 이온화 방사선이 RADFET3보다 RADFET1에 더 많이 쌓였다는 것을 의미한다.

RADFET1은 위성체의 모듈 박스의 외벽 가까이에 위치하며, RADFET3은 중심부에 위치한다. 이러한 위치 차이의 결과로, RADFET1은 RADFET3에 비해 상대적으로 더 얇은 유효 차폐 두께를 갖게 되어 결과적으로 더 큰 외부 방사선을 받게 된 것이라고 추측해 볼 수 있다 (Shin et al. 1999). 이를 확인하기 위하여 우선 KITSAT-1 TDE의 문턱전압변화 데이터를 Co-60 소스를 사용한 지상 실험을 통해 총 축적 방사능량으로 환산하였으며, RADFET1과 RADFET3의 위치에 대한 chord-length 분포를 KITSAT-1에 대한 모델링과 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통하여 구하였다. 그리고 각 RADFET이 받게 되는 총 축적 방사능량의 차이를 NASA (National Aeronautics & Space Administration) 모델과 chord-length 분포를 이용하여 시뮬레이션 하였으며, 이를 TDE 데이터에서 구한 값과 비교해 보았다.

3. 보정 (calibration) 실험

그림 2의 문턱 전압을 방사능량으로 환산하기 위해서는 TDE에 사용된 RADFET에 대한 보정을 위한 지상 실험이 필요하며 이는 원자력 연구소 조사실의 Co-60 감마선 조사 장비를 이용하였다. Co-60 감마선은 1.17MeV와 1.33MeV의 에너지를 갖는 광자를 방사하기 때문에 평균적으로 1.25MeV/광자라고 생각할 수 있다. 이 에너지 대의 광자는 대부분 콤프턴 산란에 의해서 매질에 에너지를 전달

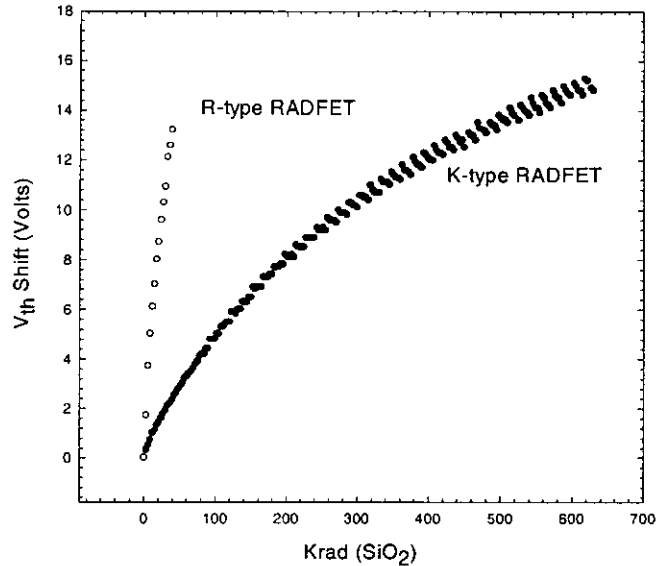


그림 3. 방사선 조사에 따른 RADFET 문턱 전압의 변화.

하는데, 우주의 고에너지 전자나 양성자와 거의 비슷한 효과를 내기 때문에 방사능 선량이 작은 우주 방사선 환경의 지상실험에서 방사선원으로 많이 사용된다. 실험은 90Krad (SiO_2)/시간의 Co-60 감마선으로 수행되었으며, KITSAT-1에 탑재된 것과 동일한 RADFET (modified p-channel MOSFET: TOT500)을 사용하였다. RADFET은 secondary radiation을 줄이기 위해 다른 모든 실험장치와는 떨어져 있도록 설치하였다. 각 RADFET은 서로 다른 2가지 타입의 RADFET로 구성되는데, 하나는 $0.13\mu\text{m}$ oxide 두께를 갖는 K-type이며 다른 하나는 $0.95\mu\text{m}$ 의 oxide 두께를 갖는 더 민감한 R-type이다. oxide가 두꺼울수록 방사능에 민감하며, 우리별 1호에서는 K-type을 이용하여 방사능을 측정하였다. 타입별로 2개씩 총 4개의 MOSFET들이 $1\text{mm}\times 1\text{mm}$ die에 집적되었고, standard 14 lead Dual-in-Line 패키지 내에 넣어졌다. 본 지상 실험에서 gate는 10V로 bias시키고 나머지 모든 터미널은 접지 시킨 상태의 RADFET에 방사선을 조사하였다. Drain 전류를 매 10분마다 10V의 일정한 drain 전압을 걸어준 상태에서 gate 전압의 함수로 측정하였으며 Drain 전류가 $1\mu\text{A}$ 이상 흐르기 시작할 때의 Gate-Source 사이의 전압을 문턱 전압 (V_{th})으로 정의하였다. 이러한 전류-전압 특성 측정은 컴퓨터로 제어되는 parameter analyzer를 통해 수행되었다. 본 실험의 결과를 그림 3과 같이 MOSFET 문턱전압의 점진적인 이동을 누적된 방사능량과 함께 나타내었다. 더 민감한 R-type MOSFET은 더 급한 기울기를 갖는 반면, K-type MOSFET의 문턱전압은 누적된 방사능량이 궤도상에서 TDE가 받게 되는 총 축적 방사능량을 넘는 200Krad (SiO_2)까지 거의 선형적으로 변하는 것이 확인되었다.

K-type에 대한 실험 결과를 이용하여 1992년 9월부터 1993년 8월 사이 1년 동안 이동한 문턱전압을 RADFET1과 RADFET3에 대해 각각 dose로 환산한 결과 각각 $18.5\text{ rad}(\text{SiO}_2)/\text{day}$, $13.7\text{ rad}(\text{SiO}_2)/\text{day}$ 로 나타났다. 1993년 8월 이후의 문턱전압 변화는 열적 annealing에 의한 문턱전압의 진

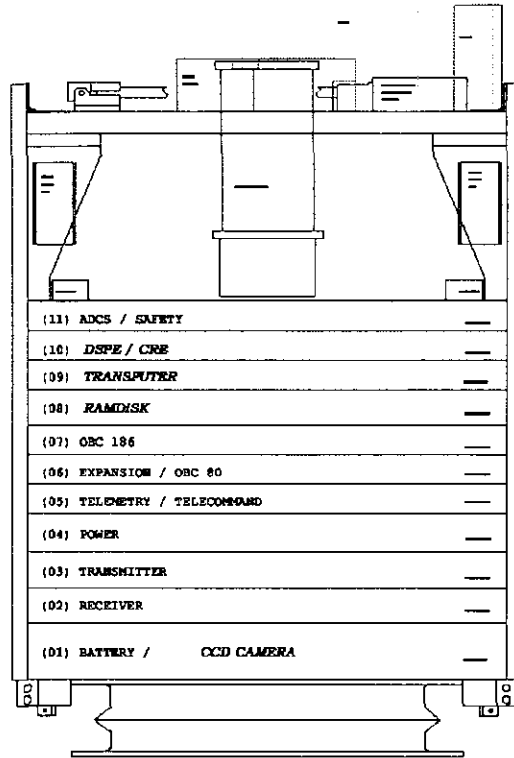


그림 4. KITSAT-1 측면도.

동이 심하며, 이 경우 같은 양의 방사선에 대해 문턱 전압 변화가 더 작게 나타난다 (Shaneyfelt et al. 1998, Shin et al. 1999). 따라서 1993년 8월 이후의 문턱전압 변화를 본 실험의 결과를 사용하여 dose로 환산하는 것은 적합하지 않으며 향후 위헤선 열적 효과가 고려된 추가적인 실험을 수행할 예정이다.

4. 시뮬레이션 결과

4.1 Chord-length 분포

RADFET1과 RADFET3의 위치 차이에 의한 총 축적 방사능량의 차이를 시뮬레이션을 통해 구하기 위해서는 먼저 방사능 입자들이 각각의 RADFET까지 도달하면서 겪게 되는 KITSAT-1 위성체 기계 구조에 의한 차폐 두께의 확률 분포, 즉 chord-length 분포를 구해야 한다.

4.1.1 KITSAT-1 모델링

KITSAT-1은 기본적으로 스택 (stack) 구조 (그림 4)를 갖고 있으며 대부분의 구조체가 알루미늄으로 이루어져 있기 때문에 시뮬레이션을 위한 KITSAT-1 모델링은 다양한 크기의 직사각형 알루미늄

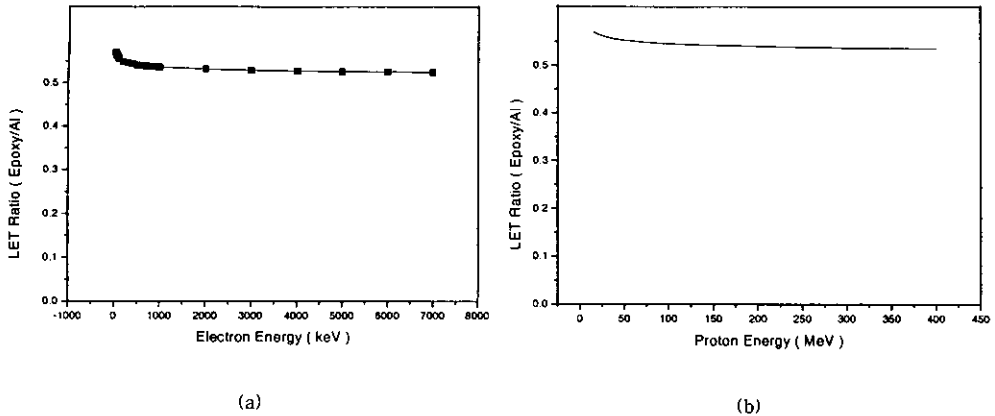


그림 5. 알루미늄에 대한 에폭시의 LET 비율 (a) 전자, (b) 양성자.

늄 판들을 적절히 조합하여 만들어졌으며, 비교적 간단하게 유사한 형태의 모델을 만들 수 있었다.

다음 반도체 패키징과 PCB (printed circuit board)에 사용되어 위성체에서 알루미늄 다음으로 많은 부피를 점유하고 있는 에폭시 (Epoxy)는 적절한 두께의 알루미늄으로 바꾸어 모델링하였다. 매질 내에서 입자가 진행하는 방향으로의 단위 길이 당 평균 에너지 손실을 의미하는 LET (Linear Energy Transfer)를 에폭시와 알루미늄에 대해 계산한 뒤 이들 사이의 비율을 고려하여 에폭시를 동일한 차폐 효과를 주는 알루미늄으로 대신하여 모델링하였다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 알루미늄에 대한 에폭시의 LET 비율은 거의 모든 에너지 대역에 걸쳐 변화가 없으며 양성자와 전자간의 차이도 거의 없다. 양성자에 대한 계산은 IBM Research의 SRIM (The Stopping and Ranges of Ions in Matter) 코드를 사용하였으며, 전자에 대한 계산은 Bethe 공식 (Tsoulfanidis, 1983)을 사용하였다. 본 시뮬레이션에서 LET 비율은 평균치인 0.55를 사용하였다.

4.1.2 Monte-Carlo 시뮬레이션

이와 같은 방법으로 만들어진 모델에 각 RADFET의 위치를 설정하고 Monte-Carlo 방법을 통해 각각에 대한 chord-length 분포를 구하였다 (그림 6). 위성의 속도에 비해 입자들의 속도가 훨씬 빠르므로 위성의 움직임은 고려할 필요가 없으며 입자들의 방향성에 대한 정보까지 포함한 우주 방사능 환경 모델은 아직 개발되지 않은 상태이므로 일단 입자들은 편향성 없이 균일하게 (isotropic) 입사한다고 가정하였다. 두 RADFET 모두 그림 4의 DSPE/CRE 스택 내에 위치하며 RADFET1은 외벽 가까이, RADFET3은 중심부 가까이 위치한다. 입자들이 통과하게 되는 위성체의 두께에 대한 확률 분포가 센서의 위치에 따라 다른 것을 확인할 수 있다.

4.2 NASA 모델을 이용한 총 축적 방사능량 계산

KITSAT-1 궤도상에서의 우주 방사선 환경 시뮬레이션에는 지구 자기권에서의 전자와 양성자에 대한 선속 모델 (flux model)과 자기장 모델 (geomagnetic field model)이 기본적으로 필요한데, 본

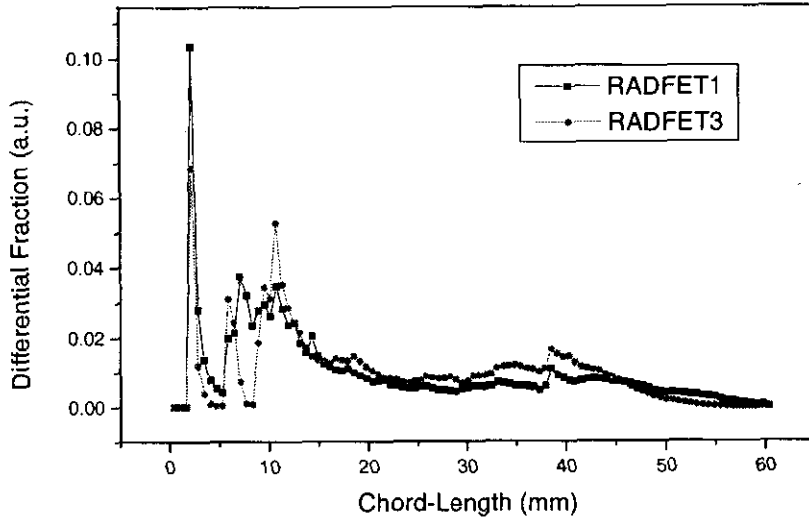


그림 6. RADFET1과 RADFET3의 Chord-length 분포.



그림 7. 시뮬레이션에 사용된 KITSAT-1 궤도 (최초 25 궤도).

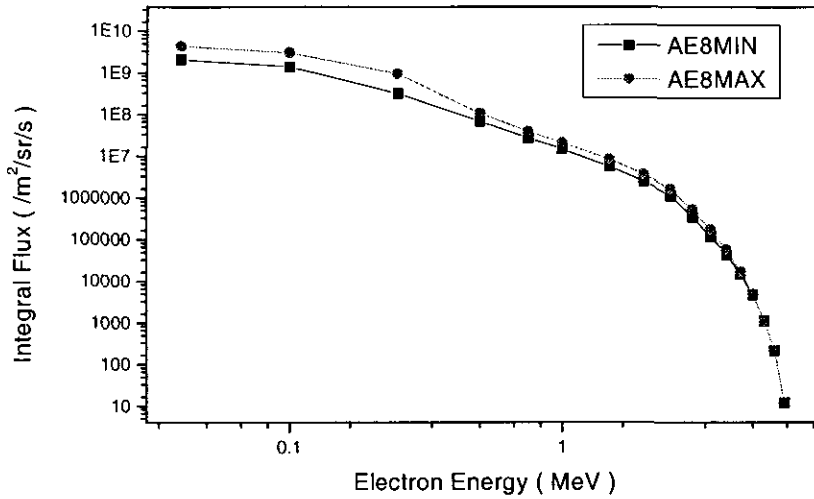


그림 8. 에너지에 대한 전자 flux 분포.

논문에선 선속 모델로 AP-8 (proton flux model)과 AE-8 (electron flux model)이 사용되었으며 지구 자기장 모델로는 DGRF (Definitive Geomagnetic Reference Field) 1990 모델을 해당기간에 대해 내삽하여 사용하였다.

시뮬레이션 프로그램을 이용하여 먼저 KITSAT-1의 궤도상에서의 해당 기간 동안 누적된 양성자와 전자의 에너지에 대한 선속 분포를 구하게 된다. 그리고 이 선속 분포를 chord-length 분포와 결합하여 통해 실제 RADFET1과 RADFET3에 도달하게 되는 선속 분포를 얻게 되고 이 선속 분포를 다시 SiO₂에 대한 방사능량 (rad(SiO₂))으로 환산하게 된다. 이 과정은 Space Radiation version 1.1을 통해 수행되었으며 단계별로 다음과 같이 요약된다.

1. KITSAT-1의 궤도 정보 (고도, 궤도각)를 이용해 시뮬레이션에 사용할 궤도를 정한다. (그림 7은 실제 시뮬레이션에 사용된 궤도 중 처음 25궤도를 나타내며 총 1000궤도에 대해 계산되었다.)
2. AP (AE)-8 모델과 DGRF1990 모델을 사용하여 시뮬레이션 궤도에서 겪게 되는 양성자와 중성자 선속 분포를 구한다. (그림 8, 그림 9)
3. 에너지에 대한 선속 분포를 차폐 두께의 확률 분포와 결합하여 위성체 통과 후 RADFET 위치에 도달하게 되는 선속 분포를 구한다.
4. 전자와 양성자의 에너지에 대한 선속의 분포를 RADFET1과 RADFET3에 대한 총 축적 방사능량으로 환산한다.

RADFET1과 RADFET3의 위치 차이에 의한 영향은 3단계에서 반영된다. 시뮬레이션에 해당하는 기간은 태양활동의 극대기와 극소기 사이 위치하기 때문에 극대기에 해당하는 모델 (AP8MAX, AE8MAX)과 극소기에 해당하는 모델 (AP8MIN, AE8MIN)을 모두 사용하여 결과를 비교하였다.

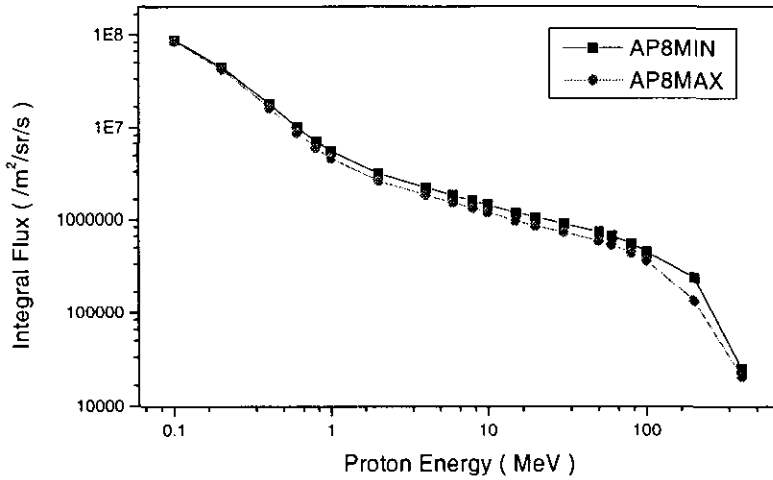


그림 9. 에너지에 대한 양성자 flux 분포.

표 1. RADFET1과 RADFET3이 받은 일당 총 방사능양(rad(SiO₂)/day).

		Proton	Electron	Total	Exp.	Sim./Exp.
(a)	RADFET1	10.2	3.50	13.7	18.5	74.1
	RADFET3	8.80	2.09	10.9	13.7	79.6
(b)	RADFET1	8.63	5.16	13.8	18.5	74.6
	RADFET3	7.41	3.07	10.5	13.7	76.6

(a) AP8MIN, AE8MIN 모델 사용.

(b) AP8MAX, AE8MAX 모델 사용.

4.3 결과 비교 및 분석

시뮬레이션에 의해 계산된 RADFET1과 RADFET3에 대한 총 축적 방사능양을 Co-60 보정을 통해 환산한 TDE로부터의 데이터와 비교하여 표 1에 나타냈다. 시뮬레이션을 통해 구한 RADFET1과 RADFET3의 총 방사선량은 실측치 (문턱전압 변화를 Co-60 보정을 통해 환산한 값)의 70~80%를 나타낸다. 이것은 지구 자기권에 대한 NASA 방사선 모델 자체의 통계적 한계와 위성체의 모델링, Co-60을 사용한 문턱 전압 이동의 보정 등에서 발생하는 오차를 고려할 때 시뮬레이션이 성공적이었음을 의미하며 모델에 의한 시뮬레이션 값이 실측치보다 작은 것은 저궤도에서 AP-8 모델이 선속을 실제보다 과소평가하고 있다는 보고들과 일치한다 (Petersen 1997, Gussenhoven et al. 1997). 특히 위성체에 의한 차폐 효과로부터 발생하는 RADFET1과 RADFET3간의 총 축적 방사능양 차이를 실제 상황에 근접하게 묘사해 낸 것은 고무적인 일이다. 실측치에선 26.0%의 차이를 보인 반면, 시뮬레이션에선 모델별로 23.9% (극대기 모델)와 20.4% (극소기 모델)의 차이를 보았다.

5. 결 론

KITSAT-1 탑재체인 TDE로부터 관측된 RADFET의 문턱전압 변화를 원자력 연구소 조사실의 Co-60 감마선 조사 장치를 이용한 보정 실험을 통해 총 축적 방사능양으로 환산하였다. KITSAT-1의 실험에서 RADFET의 위치에 따라 측정되는 총 방사능양이 다르게 나타났으며, 지구 자기권에서의 NASA 방사선 모델을 이용하여 총 방사능양을 시뮬레이션 한 결과, 총 방사능양과 RADFET의 위치에 따른 차이가 실험치에 가깝게 나타남을 확인하였다. 이러한 위성체 모델링을 통한 차폐 효과 고려는 우주에서의 위성 내 방사능 환경을 더 정확하게 예측할 수 있게 해 줄 것이다.

참고문헌

- Gussenhoven, M. S., Mullen, E. G., Bell, J. T., Madden, D., & Holeman, E. 1997, NS-44, 2161
- Petersen, E. L. 1997, IEEE, NS-44, 2174
- Shaneyfelt, M. R., Schwank, J. R., Fleetwood, D. M., & Winokur, P. S. 1998, NS-45, 1372
- Shin, Y. H., Min, K. W., Choi, Y. W., & Kim, S. H. 1994, JA&SS, 11, 131
- Shin, Y. H., Min, K. W., Rhee, J. G., Lee, D. H., Kim, S. H., Kim, H. S., Park, S. D., Sung, D. K., & Choi, S. D. 1999, IEEE, NS-46, 1586
- Tsoufanidis, N. 1983, Measurement and Detection of Radiation, 413
- Underwood, C. I., Block, D. J., Williams, P. S., Kim, S., Dialo, F., Santos, P. R., Britto, M. C., Dyer, C. S., & Sims, A. J. 1994, IEEE, NS-41, 2353