

AP-8 모델을 이용한 우리별 1호 SEU 문턱에너지 추정

김성준^{1†}, 신영훈², 김성수³, 민경욱¹

¹한국과학기술원 물리학과

²KOMED Co., Ltd.

³UCLA 천문학부

ESTIMATION OF SEU THRESHOLD ENERGY FROM KITSAT-1 DATA USING AP-8 MODEL

Sung-Joon, Kim^{1†}, Young Hoon Shin², Sung Soo Kim³, Kyoung Wook Min¹

¹Department of Physics, KAIST, Tae-jon, 305-701, Korea

²KOMED Co., Ltd., Kyunggi, 464-865, Korea

³Division of Astronomy, UCLA, Los Angeles, CA 90095-1562, USA

E-mail: aramis@space.kaist.ac.kr

(Received October 2, 2001; Accepted October 30, 2001)

요 약

1992년에 발사된 우리별 1호는 고에너지 양성자들이 OBC(On-Board Computer)186의 메모리에 SEU(Single Event Upset)을 일으키는 안쪽 반알렌대(Inner Van Allen Radiation Belt)를 통과한다. 본 논문에서는 Chi-Square 방법을 이용하여 OBC(On-Board Computer)186 메모리에서 측정된 SEU 데이터와 NASA/NSSDC의 AP-8 양성자 모델을 비교하여, SEU를 유발하게 되는 문턱 에너지를 추정해 보았다. OBC186 위치에서의 양성자 선속을 유도하기 위해서 위성체에 의한 차폐 효과가 고려되었으며 모델의 신뢰성을 높이기 위해 태양 활동이 활발한 기간에 얻어진 데이터들은 제거되었다. 비교 결과 우리별 1호 OBC186 주 메모리의 문턱에너지는 110 ± 10 MeV로 추정되었다.

ABSTRACT

KITSAT-1, launched in 1992, passes through Inner Van Allen Radiation Belt in which high energy protons cause single event upsets(SEUs) in the main memory of KITSAT-1 OBC(On-Board Computer)186. The present paper compares SEU data from the OBC186 with the AP-8 model of NASA/NSSDC using the Chi-Square method to estimate the SEU threshold energy. Shielding effect by the satellite body has been taken into account to model the proton fluxes at the position of OBC186, and SEUs recorded during the high solar activities have been removed to avoid the spurious result. The result shows that the SEU threshold energy of the main memory of KITSAT-1 OBC186 is estimated to be about 110 ± 10 MeV.

Key words: single event upset, threshold energy, Radiation Belt

[†]corresponding author

1. 서론

반알렌대(Van Allen Radiation Belt) 중 안쪽 방사선대를 주로 구성하고 있는 고에너지 양성자는 그 궤도에서 운용되는 위성의 microprocessor와 memory chip 등의 전자 부품에 Single Event Upset(SEU) 같은 Single Event Effect(SEE)를 일으킬 수 있다(Gaffey Jr. & Bilitza 1994). 우리별 1호의 궤도는 안쪽 반알렌대에 위치하므로 위성체의 전자 부품이 고 에너지 양성자들에 의한 방사선 효과를 많이 받으며, 특히 반알렌대가 지표면과 근접한 South Atlantic Anomaly(SAA)에서는 그 영향이 심각하다. 우리별 1, 2호의 경우 고에너지 입자 환경에 의한 영향은 위성 제어를 위한 주컴퓨터 OBC186의 프로그램 메모리와 RAMDISK 메모리의 SEU rate를 조사함으로써 그 정보를 얻을 수 있다.

SEU를 유발하는 양성자의 문턱에너지를 측정하기 위해서는 일반적으로 수백 MeV의 가속기 빔을 이용한다. 한편 이와는 별도의 접근 방법으로 TOPEX/Poseidon 위성의 SEU 데이터를 National Aeronautic and Space Administration /National Space Science Data Center(NASA/NSSDC)에서 개발된 AP-8 모델과 비교함으로써 SEU를 유발하는 양성자에 대한 문턱 에너지를 구하려는 시도가 있었다(Vampola & Lauriente 1998a, 1998b). 본 논문에서는 Chi-Square 방법을 통해 우리별 1호 OBC186의 메모리 시스템에서 발생한 SEU 데이터와 AP-8 모델을 비교하여 메모리 시스템의 SEU를 유발하기 시작하는 양성자의 문턱 에너지를 추정해 보았다.

2. 관측 결과

우리별 1호는 소형 저궤도 위성으로서, 위성 제어를 위한 주컴퓨터(on-board Mission Control Computer: MCC) 시스템은 CPU로 INTEL 80C186을 사용하는 OBC186이다. OBC186 메모리 시스템은 bootstrap ROM, 프로그램 메모리 및 데이터 저장을 위한 RAMDISK로 구성되어 있다.

프로그램 메모리 영역은 OS kernel에 의해 조절되며 4개의 128Kbyte SRAM을 사용한다. 프로그램 메모리의 에러 보정 회로(Error Detection and Correction Circuit: EDAC)는 512Kbyte 전체에 대해 해밍코드(hamming code)를 하드웨어로 구현한 회로로, Single Error Correction and Double Error Detection(SEC-DED) 성능을 갖는다. 이에 따라 코드를 저장하기 위한 512Kbyte의 메모리 공간이 추가로 설치되어 있다. 구현된 에러 보정 회로(EDAC)는 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 읽어내어 비교한다. 이때 데이터에 한 개의 비트 에러가 발견되면 데이터를 정정하여 CPU로 보내주게 되며, 이 때 2bit EDAC의 수가 1만큼 증가한다(그림 1). 여기에 채용된 에러 보정 회로(EDAC)는 데이터를 메모리에 쓸 때만 정정한 데이터와 코드 비트를 저장하도록 되어 있다. 따라서 일단 SEU가 일어난 후 정정한 데이터가 메모리에 저장되기 전에 SEU가 다시 일어나면 2bit 에러가 만들어지게 되고 이것은 해밍코드로 정정할 수 없다. 따라서 에러가 축적되는 것을 방지하기 위해 주기적으로 메모리 영역을 읽고 쓰는 Memory Wash 소프트웨어를 이용한다(Underwood 1990). 프로그램 메모리는 매초마다 2Kbyte의 영역을 wash하도록 되어 있으므로 512Kbyte를 wash하는데 소요되는 시간은 평균 4분이다. 따라서 에러 발생 장소를 정확히 알기 위해서 이 시간 지연을 고려해야 한다. 우리별 1호의 프로그램 메모리에서 구현된 wash 방식은 256byte씩 블럭 단위로 메모리 내

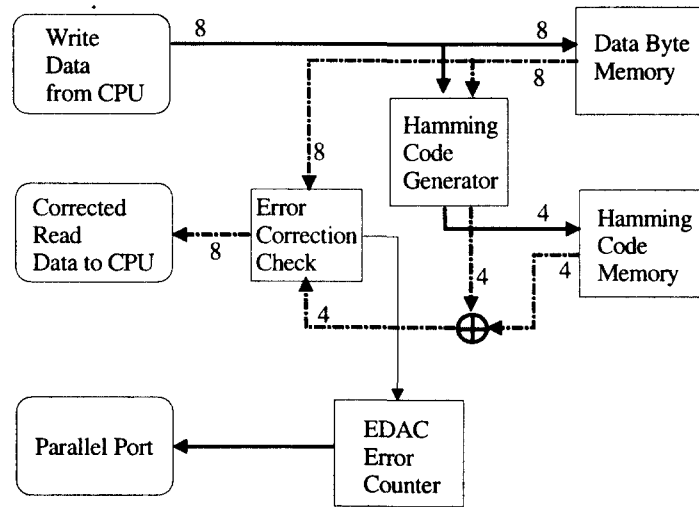


그림 1. Hamming Code를 이용한 에러 보정 회로.

용을 읽고 써서 확인하며 각 블록에 할당된 3byte EDAC 코드를 비교하여 에러 발생을 확인하고, 에러가 검출되면 관측 시간과 발생 장소를 기록한다. 256byte 내에서 일어난 1 byte 이상의 에러는 1개의 에러로 기록된다.

우리별 1호의 RAMDISK는 13Mbyte인데, 이는 각각 4개의 1Mbyte hybrid SRAM으로 구성된 3개의 bank로 되어있고 우리별 1호는 4개의 256Kbyte hybrid SRAM으로 구성된 1개의 bank를 추가로 가지고 있다. RAMDISK는 에러 보정을 위해 하드웨어 EDAC 회로 대신 Hodgart-Burton Single-byte Error Correction 방식의 소프트웨어 코딩을 이용한다. 소프트웨어 EDAC을 사용하여 252byte의 데이터 블록에서 한 개의 바이트에서 일어난 단일 또는 다중 비트 에러(upset)를 확인하고 그 발생 위치를 알 수 있는데 각 252byte의 데이터 블록에는 3byte의 EDAC 코드를 할당한다. 또한 주기적인 wash에 의해 Multiple Event를 방지하며, 매초마다 1Kbyte 클러스터씩 wash 하므로 13Mbyte를 모두 wash하는데 약 222분이 소요된다. 따라서 공간 분해능이 심각하게 떨어지므로 SEU 발생 장소를 정확히 알 수는 없게 되어 본 연구에서는 OBC186 주 메모리에서 발생한 SEU로 국한하여 AP-8 모델과 비교하였다.

그림 2는 1993년 한해 동안 OBC186 주 메모리에서 관측된 SEU를 지도 위에 나타낸 그림이다. 대부분의 SEU가 SAA에서 관측됨을 알 수 있으며 위성 궤도 형태로 뚜렷이 나타나는 곡선들은 특별한 태양 활동 시기에 지구 자기권에 나타나는 방사능 입자들의 증가에 의해 나타나는 것으로 볼 수 있다.

3. SEU 데이터와 AP-8 모델 비교

AP-8 모델과 우리별 1호의 SEU 데이터를 비교하기 위해서는 먼저 위성체의 차폐 효과, 태양 활동을 고려한 데이터 추출, 위도에 따른 가중치 보정 과정이 필요하다.

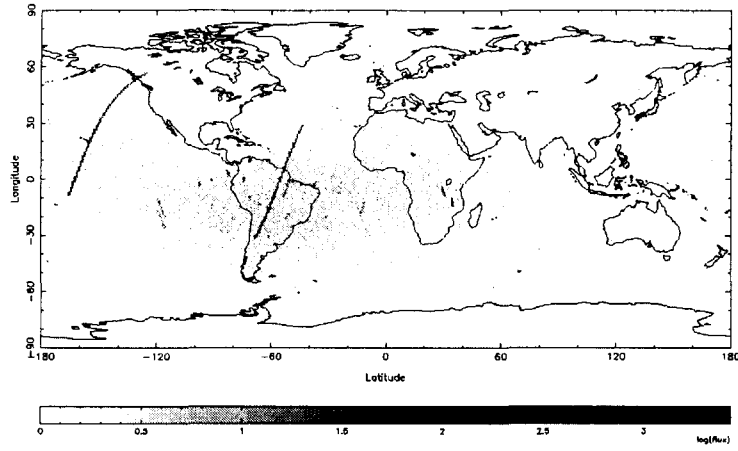


그림 2. 1993년에 우리별 1호 OBC186 주 메모리에서 관측된 SEU 분포.

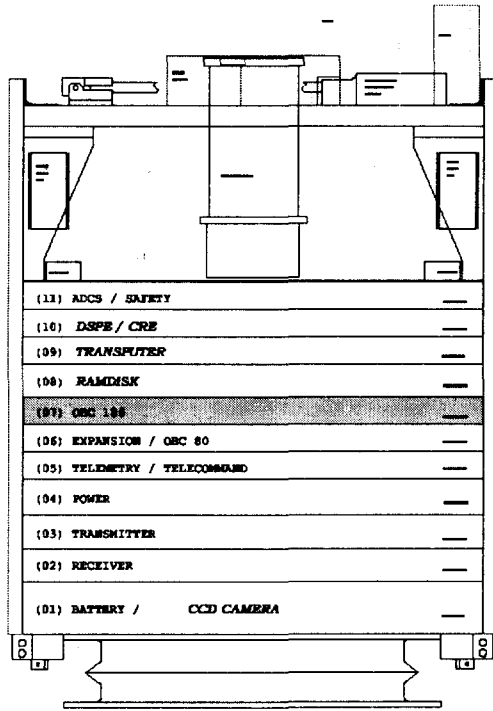


그림 3. 우리별 1호의 구조.

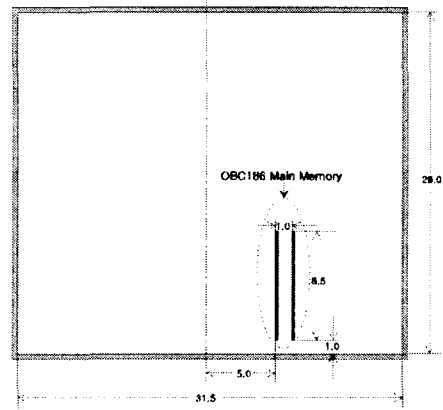


그림 4. OBC186 Stack을 위에서 본 그림.

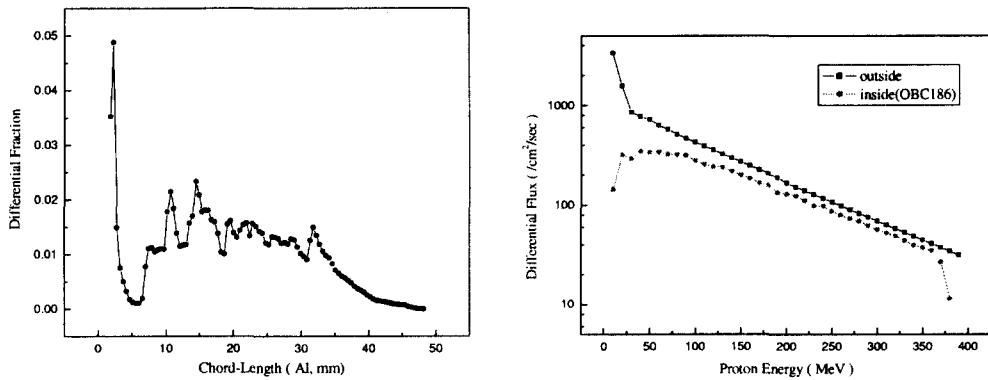


그림 5. OBC186 Main Memory에서의 chord-length 그림 6. 차폐 효과 고려에 의한 양성자 선속 분포 변화. 분포.

3.1 차폐 효과

그림 3은 우리별 1호의 구조를 나타낸 것으로 안쪽 반알렌대에 존재하는 고에너지 양성자들이 OBC186 메모리에 도달하려면 먼저 태양전지판, 위성체 외벽 등을 통과해야 하고 이 과정에서 에너지 손실이 있게 되므로, 이에 따른 양성자 선속의 에너지에 대한 분포 변화를 고려하여야 한다. 이를 위해 먼저 우리별 1호 구조의 모델링이 필요하며, 이로부터 양성자가 OBC186 주 메모리에 도달하면서 겪게 되는 차폐 두께의 확률 분포, 즉 chord-length 분포를 구하게 된다. 다음으로 chord-length 분포를 사용한 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통해 OBC186 메모리 시스템 위치에서의 에너지에 따른 양성자 선속 분포를 계산하게 된다(Kim et al. 2001). 그림 3과 그림 4에 나타낸 OBC186 주 메모리의 위치에서 chord-length 분포를 구하면 그림 5와 같다. 이때 입사 에너지에 따른 종적 산재도 및 횡적 산재도(longitudinal & lateral straggling)의 차이는 chord-length에 대해 상대적으로 작으므로 전체 chord-length 분포에 미치는 영향은 매우 작을 것으로 보고, 입사 에너지에 따른 chord-length 분포 차이는 없다고 가정한다. 그림 6은 SAA 내에서의 AP-8 모델에 따른 양성자 선속 분포가 그림 5의 chord-length 분포를 이용한 차폐효과 고려 후 어떻게 변하는지를 나타내고 있다.

3.2 태양 활동을 고려한 데이터 추출

우리별 1호의 SEU 데이터는 solar flare 등 특별한 태양 활동이 있었던 시간에는 SAA가 아닌 다른 지역에서도 많은 SEU가 발생하는 등 평소와는 완전히 다른 분포형태를 보여준다. 한편 AP-8 모델은 오랜 시간 축적된 데이터들을 기초로 한 평균화된 모델이기 때문에 AP-8 모델과 SEU 데이터의 적합한 비교를 위해서는 태양활동이 특별히 활발한 시간의 데이터들을 제거할 필요가 있다. 이를 위해 다음과 같은 방법을 사용하였다. 즉 기준 시각을 증가시켜가면서 그 시각 이후 일정 시간(24시간) 동안 일어난 SEU 데이터의 수를 합하여 이 값이 일정한 값(12 counts)을 넘어서는 부분들을 제거하는 방법을 사용하였다. 대부분의 태양 활동이 지구 자기권에 주는 영향은 대략 하루정도 유지되기 때문에 기준 시각 이후 24시간 동안의 SEU 데이터 수를 합하였다.

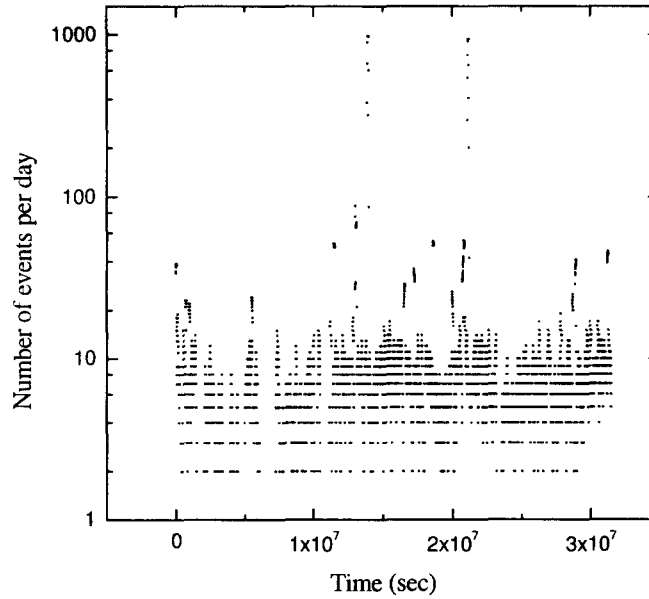


그림 7. 기준 시각 vs. 기준 시각 후 24시간 동안의 SEU 수.

x축을 기준시각, y축을 기준시각 이후 24시간 동안의 SEU 데이터수로 잡고 그래프로 나타내 보면(그림 7) y값이 특별히 큰 점들이 나타나게 되는데 이 점에 속한 데이터들을 특별한 태양활동에 의한 SEU 데이터로 간주하고 SEU 문턱에너지 계산에서 제외하였다. 이와같이 보정된 SEU 분포에서는 그림 2에 나타났던 진한 선들이 사라진 것을 확인할 수 있다(그림 8).

3.3 SEU count rate의 위도에 대한 가중치 계산

우리별 1호의 궤도를 고려할 때 위도에 따라 머무르는 시간이 다른 점을 고려해야 한다. 우리별 1호의 속력(speed)은 일정하며, 적도면에 대해 66° 기울어진 상태로 거의 원운동에 가까운 궤도를 유지하기 때문에 적도 부근에서는 위도방향 속도가 크므로 단위 위도에 머문 시간이 가장 짧고, 위도 66° 부근에선 위도방향의 속도가 가장 작기 때문에 단위 위도에 머문 시간이 가장 길다. 그러므로 우리별 1호 고도에서의 SEU 발생이 전 영역에 일정하다면 우리별 1호에서 측정된 SEU 데이터는 적도에서 가장 적고, 위도가 커질수록 많아지게 되는 것이다. 그러므로 AP-8 모델과의 비교를 위해서는 이러한 데이터 수집 시간의 불균형을 보정해 주어야 한다.

본 연구에서는 다음과 같은 simulation 방법을 사용하였다. 먼저 원점이 지구 중심과 같고 z축이 지축에 대해 66° 기울어진 구면좌표를 설정한 뒤, 이 좌표의 적도 둘레에 일정한 간격으로 점을 찍어 나간다. 여기서 일정한 간격은 위성의 선속도가 일정함을 의미하며 간격을 무리수로 선택하여 같은 위치에 겹치는 상황을 피하도록 한다. 찍혀진 각 점들의 위도를 계산하여 위도별로 얼마나 많이 점들이 누적되는지를 확인함으로써 weighting factor를 구할 수 있는데 그 결과는 그림 9와 같이 평균오차 1.3%미만, 최대 오차 2.2% 미만으로 analytic solution과 거의 일치함을 확인하였다. analytic

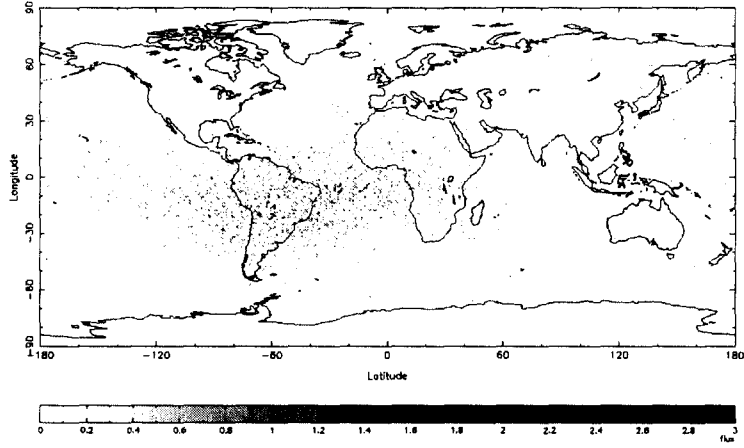


그림 8. 그림 2로부터 태양 활동에 의한 효과를 제거한 SEU 분포.

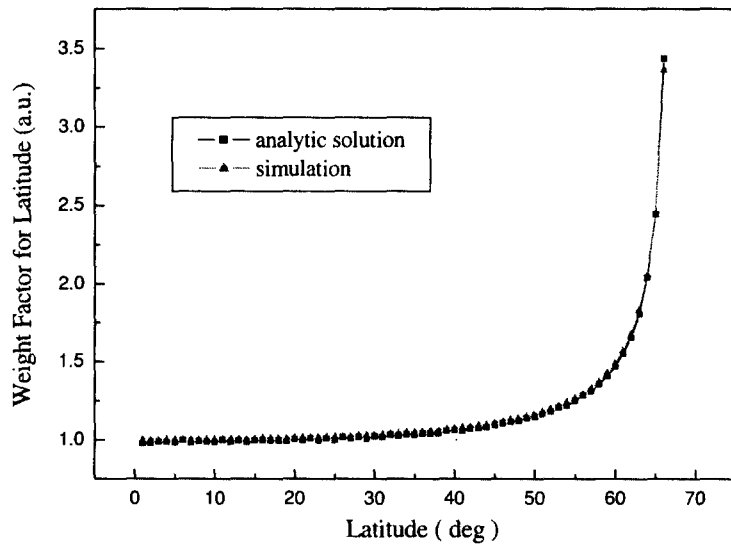


그림 9. 위도에 따른 가중치.

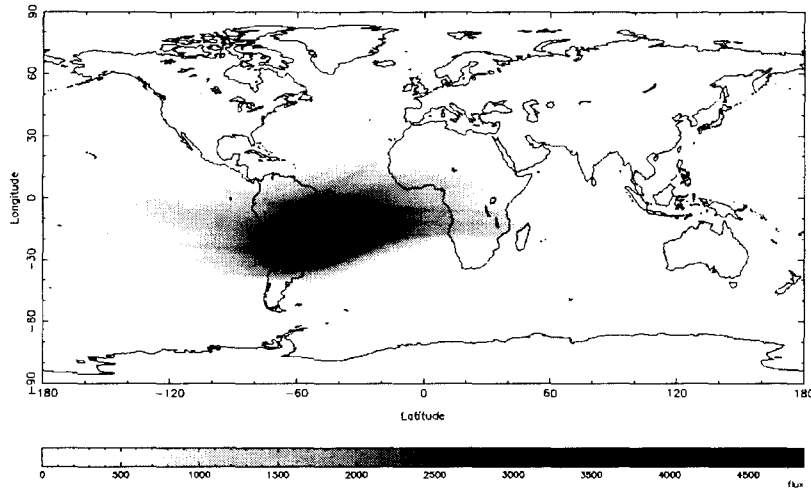


그림 10. 1993년 OBC186 위치에서의 양성자(> 110 MeV) 선속 분포.

solution을 구하면 다음과 같다.

$$\text{Weighting factor}(\theta_{lat}) = \frac{1}{\sin \theta_{orb} \cdot \cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{\tan \theta_{lat}}{\tan \theta_{orb}} \right) \right]} \quad (1)$$

여기서, θ_{lat} 는 위도, θ_{orb} 는 위성의 궤도각(66°)이다.

AP-8 모델로부터 구해진 양성자 선속 분포를 우리별 1호 위성체에 의한 차폐효과 및 위도에 따른 가중치를 모두 고려한 결과 그림 10과 같은 분포를 얻을 수 있었다.

3.4 비교 방법 및 결과 분석

SEU 데이터와 AP-8 모델로부터 구한 양성자 선속 분포의 비교는 Chi-Square 방법을 사용하였다. 먼저 경도, 위도를 각각 배열의 x, y 축으로 선택하고 배열 내 각 bin의 크기는 $1^\circ \times 1^\circ$ 로 설정한 2차원 배열을 각각에 대해 설정하였다. x축과 y축의 범위를 각각 경도 $-120^\circ \sim 20^\circ$, 위도 $-40^\circ \sim 10^\circ$ 로 설정하였으므로, 배열의 크기는 140×50 이 되며, 두 배열의 bin에는 각각 1993년 한해 동안 누적된 SEU수와 설정된 에너지 이상의 에너지를 갖는 양성자 선속이 입력되게 된다. SEU 데이터의 경우 태양 활동에 대한 필터링이 이뤄진 데이터가 각 bin에 들어가며, 양성자 선속은 차폐 효과, 위도에 따른 가중치가 고려된 값이 각 bin에 대입되게 된다. AP-8 모델은 400 MeV까지의 양성자 선속을 구해주므로, 차폐 효과를 고려할 때 위성체 밖에서의 양성자 선속을 10 MeV부터 400 MeV까지 10 MeV 간격으로 AP-8 모델로부터 구해가면서 각각에 대한 위성체 통과 후의 분포를 누적시켜 나간다. 다음으로 두 이차원 배열을 1차원의 위도방향 배열과 경도방향 배열로 단순화시킨다. 위도방향 배열은 같은 위도를 갖는 모든 경도의 데이터를 합하여 위도 방향으로의 정보만 갖는 1차원 배열이며, 경도방향의 배열은 같은 경도를 갖는 모든 위도의 데이터를 합하여 경도 방향으로의 정보만 갖는 1차원 배열이다. 이러한 배열의 1차원화는 SEU의 데이터수가 충분히 많지 않아 2차원 배열을 그대로 사용

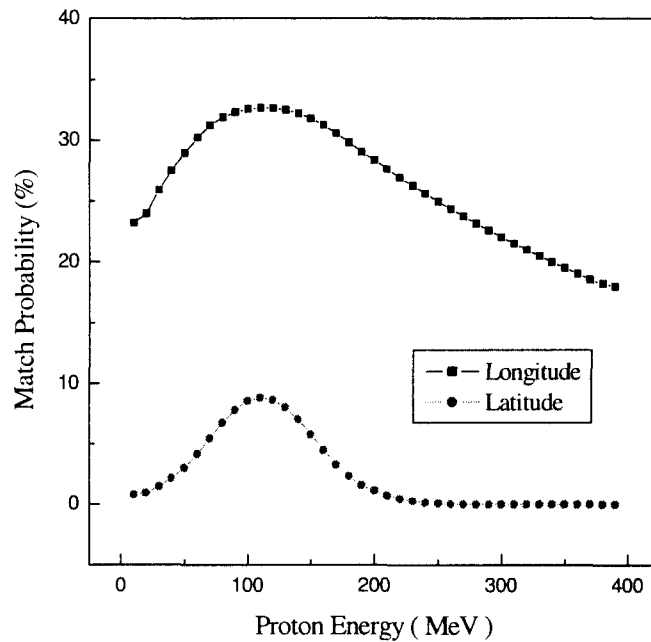


그림 11. 기준 에너지 이상을 갖는 양성자 선속 분포가 우리별 1호 SEU 분포와 일치할 확률.

할 경우 각 bin에 들어갈 데이터수가 너무 적고 비어있는 bin이 많아져 Chi-Square 방법의 적용에 적합하지 못하게 되기 때문이다. Chi-Square 방법은 이들 1차원 배열에 대해서 위도배열은 위도배열끼리, 경도 배열은 경도 배열끼리 적용되며, SEU 데이터와 AP-8 모델이 얼마나 유사한 분포를 갖고 있는지를 알려주게 된다.

양성자 선속의 최소 에너지를 바꿔 가면서 이 방법을 반복하며, 일치할 확률이 가장 높게 나오는 최소 에너지를 SEU의 문턱 에너지로 보게 되는 것이다. 여기서 확률은 평균 0, 분산 1의 조건을 만족하는 비교 point 수만큼의 무작위 표준 변수(random normal variable)들을 제공하여 합한 값이 Chi-Square 값보다 클 확률이다. 차폐 효과를 고려한 후의 양성자 에너지 기준으로, 10 MeV에서 400 MeV까지 10 MeV 간격으로 양성자 선속의 최소 에너지를 바꿔가며 우리별 1호의 93년도 SEU 데이터에 Chi-Square 방법을 적용해 보았으며, 그 결과 위도 배열 및 경도 배열 모두 110 MeV에서 가장 잘 맞았다(그림 11). 그러므로 우리별 1호 OBC186 메모리 시스템의 SEU 문턱에너지는 110 ± 10 MeV임을 추정해 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 안쪽 반알렌대에서 운행된 우리별 1호 위성의 주컴퓨터 OBC186의 메모리 시스템에서 고에너지 양성자들에 의해 일어나는 SEU 데이터와 NASA/NSSDC에서 개발된 양성자 모델 AP-8을 Chi-Square 방법을 통해 비교함으로써 메모리 시스템에 SEU를 발생 시키는 양성자의 문턱 에너지를 구해 보았다. SEU 데이터와 AP-8 모델의 적합한 비교를 위해 태양 활동을 고려한 SEU

데이터 추출, 위도에 대한 SEU count rate의 보정, 위성 차폐 효과에 의한 양성자 선속의 에너지 분포 변화 등이 고려되었다. 우리별 1호의 1993년도 SEU 데이터를 이용한 비교결과 우리별 1호의 OBC186의 주 메모리로 사용된 반도체의 SEU 문턱 에너지는 약 110 ± 10 MeV임을 추정해 볼 수 있었다.

참고문헌

- Gaffey Jr., J. D., & Bilitza, D. 1994, *J. of Spacecraft and Rocket*, 31, 172
- Kim, S. J., Shin, Y. H., & Min, K. W. 2001, *JA&SS*, 18, 71
- Underwood, C. I. 1990, *In-Orbit Radiation Effect Monitoring on the UoSAT Satellite*, the 4th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellite, Logan, Utah
- Vampola, A. L., & Lauriente, M. 1998a, *IEEE 1997 Conference on the High Energy Radiation Background in Space*, pp.104-107
- Vampola, A. L., & Lauriente, M. 1998b, *IEEE 1997 Conference on the High Energy Radiation Background in Space*, pp.118-123