

우주 방사능에 의한 실리콘 태양 전지의 특성 변화

이재진^{1†}, 곽영실¹, 황정아¹, 봉수찬¹, 조경석¹, 정성인², 김경희², 최한우³, 한영환⁴,
최웅운⁴, 성백일⁵

¹한국천문연구원 태양우주환경연구그룹

²한국과학기술원 인공위성연구센터

³한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

⁴한국원자력연구원 양자광학기술개발부

⁵(주) 세트렉아이

Space Radiation Effect on Si Solar Cells

Jae-Jin Lee^{1†}, Young-Sil Kwak¹, Junga Hwang¹, Su-Chan Bong¹,
Kyung-Seok Cho², Seongin Jeong², Kyunghee Kim², Han-Woo Choi³,
Young-Hwan Han⁴, Yongwoon Choi⁴, and Baek-il Seong⁵

¹Solar and Space Weather Research Group, KASI, Daejeon, 305-348, Korea

²Satellite Technology Research Center, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

³Geological & Environmental Hazards Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources,
Daejeon 305-350, Korea

⁴Lab. for Quantum Optics, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea

⁵Avionics Group, SATREC initiative, Daejeon 305-811, Korea

E-mail: jjlee@kasi.re.kr

(Received September 4, 2008; Accepted October 10, 2008)

요 약

우주 방사선은 인공위성의 오동작을 유발하거나 수명을 단축하는 주된 요인 중 하나이다. 반 알렌 벨트라고 불리는 전하를 띤 고에너지 입자들이 지구 자기장에 포획된 공간은 이 지역에서 운용되는 인공위성뿐만 아니라, 지구 자기장을 따라 저고도까지 도달하므로 저궤도 위성들에게도 위협이 된다. 2003년 발사된 과학기술위성 1호에는 자세 제어를 위해 사용된 태양 센서가 탑재되었다. 태양 센서에는 빛을 감지하기 위한 검출기로 실리콘 태양 전지가 사용되었는데, 이 태양 전지의 합선 전류가 시간이 지남에 따라 감소하는 것이 관측되었다. 이 연구에서는 이러한 태양전지의 특성 변화가 어떠한 요인에 의해 발생하는지 지상에서의 방사능 실험을 통해 밝히고자 한다. 이를 위해 과학기술위성 1호에서 사용된 것과 동일한 태양 전지에 여러 에너지 대역의 고에너지 전자와 양성자를 조사하고 이 때 변하는 합선 전류를 측정하였다. 그리고 NOAA POES 위성 데이터를 이용하여 과학기술위성 1호에 피폭되었을 방사선량을 예측하였다. 연구 결과, 과학기술위성 1호에 나타난 실리콘 태양 전지의 감쇠 현상은 700keV에서 1.5MeV의 에너지를 갖는 양성자에 의한 것으로 밝혀졌다. 이 연구 결과는 우주에서 태양 전지의 수명을 예측하기 위한 자료로 활용될 수 있다.

Abstract

High energy charged particles are trapped by geomagnetic field in the region named Van Allen Belt. These particles can move to low altitude along magnetic field and threaten even low altitude spacecraft. Space Radiation can cause equipment failures

[†]corresponding author

and on occasions can even destroy operations of satellites in orbit. Sun sensors aboard Science and Technology Satellite (STSAT-1) was designed to detect sun light with silicon solar cells which performance was degraded during satellite operation. In this study, we try to identify which particle contribute to the solar cell degradation with ground based radiation facilities. We measured the short circuit current after bombarding electrons and protons on the solar cells same as STSAT-1 sun sensors. Also we estimated particle flux on the STSAT-1 orbit with analyzing NOAA POES particle data. Our result clearly shows STSAT-1 solar cell degradation was caused by energetic protons which energy is about 700 keV to 1.5 MeV. Our result can be applied to estimate solar cell conditions of other satellites.

Keywords: space radiation, satellite, sun sensor, solar cell

1. 서 론

반 알렌대(Van Allen Belt)로 알려진 방사선대(Radiation Belt)는 1958년 발견된 이래 인공위성 및 우주 탐사선의 오동장 및 수명 단축을 유도하는 중요한 요인으로 지목되어왔다(Baker 2003). 방사능대는 100keV에서 100MeV의 높은 에너지를 갖는 전자와 양성자가 지구 자기장에 갇힌 영역으로, 전자들로 구성된 ‘전자 방사선대’와 양성자로 구성된 ‘양성자 방사선대’로 나뉘어 진다. 양성자로 이루어진 방사선대는 비교적 지구와 가까운 쪽에 하나의 띠를 이루며 분포하고 있는 반면, 전자 방사선대는 안쪽 방사선대(Inner Radiation Belt)와 바깥쪽 방사선대(Outer Radiation Belt)로 구성되어 있다. 방사선대 입자들의 분포는 태양 활동과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 방사선대 입자들은 태양으로부터 기원하여 지구 자기장에 포획되기도 하며 지구 이온층에 있던 입자들이 가속되는 경우도 있는 것으로 알려져 있는데, 아직 어떤 과정이 더 크게 방사선대 입자 증가에 기여하는지 밝혀지지 않고 있다. 보통 1000km 이하 고도에서 운용되는 저궤도 위성의 경우 방사선대 중심부에서 많이 벗어나 있기 때문에 비교적 우주 방사선의 영향을 적게 받는 것으로 알려져 있는데, 그렇더라도 지구 자기장의 세기가 약한 South Atlantic Anomaly(SAA)지역이나 방사선대와 자기장으로 연결된 극지방에서 높은 방사선이 관측되고 있다. 따라서 이들 지역을 통과하는 저궤도 위성 설계 시 반드시 방사선에 대한 고려가 이루어져야 한다.

우주 방사능이 인공위성 전자 부품에 미치는 영향에 대한 국내 연구는 우리별 위성에서부터 시작되었다. 1992년과 1993년 각각 발사된 우리별 1호와 우리별 2호에는 우주방사능에 의한 전자 소자의 특성을 파악할 수 있는 간단한 실험 장치가 탑재되어 Single Event Upset(SEU)과 Total Dose Effect(TDE)를 관찰하는 임무를 수행하였다(Underwood et al. 1994). 이 실험을 통해 저궤도 위성의 경우 SAA 지역과 극 지역에서 SEU가 많이 발생함을 알 수 있었으며, TDE의 경우 태양 활동이 활발할 경우 더 많이 Dose 효과가 나타남을 알 수 있었다. 우주 입자를 관측하기 위한 실험 장치도 국내 위성에 탑재되었는데, 2003년 발사된 과학기술위성 1호가 대표적이다. 과학기술위성 1호에는 170keV에서 360keV의 에너지를 갖는 전자를 관측하기 위한 실리콘 검출기가 탑재되었다. 이 실험 장치를 통해 극지방에서 지구로 침투하는 고에너지 전자의 특성을 파악할 수 있었다(Lee et al. 2005).

이 연구는 우주 환경이 어떻게 인공위성 부품에 영향을 미치는가에 대한 연구의 일환으로 진행되었다. 우선 인공위성 부품 중 가장 중요하면서도 우주 환경 변화에 영향을 많이 받을 것으로 예상되는 태양전지를 대상으로 연구를 진행하였다. 인공위성의 전력을 생산하는 태양전지의 경우, 외부에 노출되어 있기 때문에 우주 방사능에 특히 취약한데, 태양전지의 방사능 영향은 위성의 수명을 결정하는 중요한 요인이기도 하다. 따라서 방사능에 의한 태양전지의 특성 변화에 대한 연구는 그 중요성이 오래 전부터 강조되어 왔으며 지상에서 방사능 피폭 실험이 많이 수행되어졌다(Sharps et al. 2002, Masafumi et al. 1996, Miller & O'Quinn 1999). Triska et al.(2005)는 체코 위성인 MAGION 위성의 태양전지판 성능 감쇠가 우주 기상(Space Weather)과 밀접한 관련이 있다는 것을 보였다. 큰 우주 폭풍이 발생할 경우, 태양전지에서 생성하는 전력이 약 1% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 이처럼 인공위성 부품이 우주 환경에 의해 큰 영향을 받는다는 것은 잘 알려진 사실이나 실제 위성 운용을 통해 관측된 태양전지의 성능 변화와 지상에서 실험을 통해 얻은 방사선 영향 자료를 정량적으로 분석한 연구는 우리가 아는 한 아직 없는 것으로 추측된다. 이처럼 실제 위성운용 데이터를 이용한 태양전지의 특성 변화 연구가 미진한 이유는 전력용 태양전지의 경우 생산되는 전력이 위성의 자세, 위치 혹은 운용 모드 등의 영향을 받기 때문에 순수한 방사능 효과를 구하기 어렵기 때문이다. 특히 저궤도 위성의 경우 인공위성에 피폭되는 방사선량은 우주 환경 변화와 아주 밀접한 관련이 있기 때문에 태양전지의 성능 감쇠는 운용되는 기간마다 다르게 나타나며 따라서 방사능 효과를 파악하는 것이 쉽지 않다(정성인 등 2008).

이 논문에서는 과학기술위성 1호에서 태양 센서(sun sensor)의 빛 검출기로 사용된 태양전지의 시간에 따른 특성 변화를 분석하고, 우주 방사능의 어떠한 에너지 대역을 갖는 입자가 태양전지 성능 감쇠에 크게 기여하는지 밝히고자 한다. 태양 센서는 태양전지의 합선(Short Circuit) 전류만을 측정하기 때문에 동작 원리가 간단하고 위성의 자세만 고려 해주면 우주 방사능에 의해 성능이 감쇠된 정도를 쉽게 파악할 수 있다는 장점이 있다. 비록 전력 생산용이 아닌 센서로 사용된 태양전지의 특성에 대한 연구이지만, 여기서 도출된 결과는 위성 전력 생산용 태양전지에도 적용될 수 있을 것이다.

2. 과학기술위성 1호 태양전지의 특성 변화

과학기술위성 1호에는 두 종류의 태양 센서가 탑재되어 있다. 하나는 대략적인 태양의 위치를 파악할 수 있는 Coarse Sun Sensor(CSS)이고 다른 하나는 비교적 정밀한 태양 각도를 계산할 수 있는 Analog Sun Sensor(ASS)가 그것이다. 이 두 태양 센서는 태양 빛을 검출하기 위한 센서로 실리콘 태양전지를 사용하는데, 태양전지의 합선 전류를 측정하여 태양의 위치를 파악한다. 그림 1은 과학기술위성 1호에 실린 CSS(좌)와 ASS(우)의 모습을 나타낸다. CSS는 피라미드 형태로, 센서로 사용된 태양전지가 외부에 노출된 반면, ASS는 태양전지가 알루미늄 상자에 내장되어 있으며 빛은 유리 슬릿을 통해 입사하게 된다.

그림 2와 그림 3은 각각 과학기술위성 1호 ASS와 CSS에서 관측한 태양전지의 합선 전류의 변화를 나타낸다. 여기서 합선 전류 값은 전압으로 변환되어 표시되었으며, 데이터는 2003년 10월 1일부터 2005년 12월 31일까지의 값을 사용했다. 이들 그림에서 합선 전류의 값이 같은 날 여러 값을 갖는 것은 위성의 자세가 계속 변하기 때문인데, 이들 그림에서 합선 전류의 최대 값 변화가 우주 환경의 변화를 반영한다고 봐도 무방할 것이다. 중간에 데이터가 빈 것은 위성 운용 상 문제로 위성 데이터

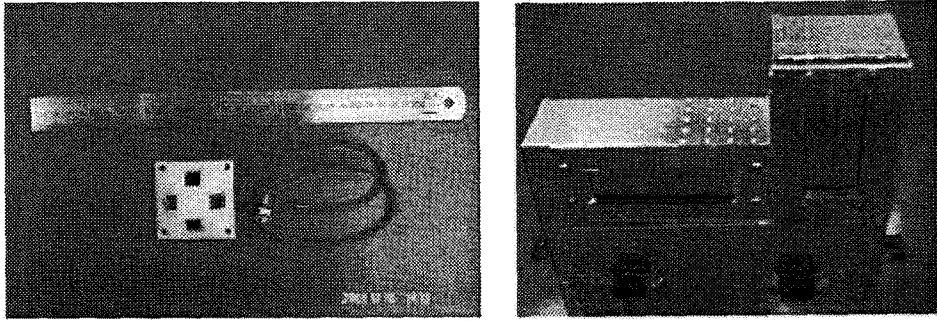


그림 1. 과학기술위성 1호에 탑재된 Coarse Sun Sensor(CSS) (좌)와 Analog Sun Sensor(ASS) (우)의 모습.

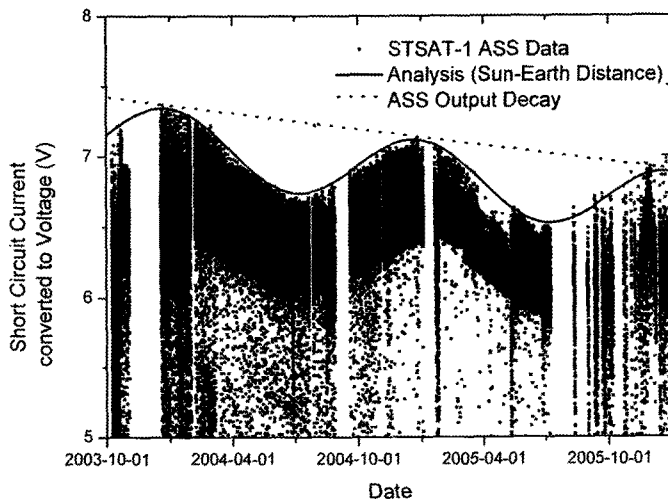


그림 2. 과학기술위성 1호 ASS에서 관측된 합선 전류(Short Circuit Current)의 변화 모습. 실선은 태양과 지구 사이의 거리 변화를 고려하여 근사한 값이고, 점선은 2년 동안 감소한 전류의 변화를 나타낸다.

를 수신하지 못 한 경우다. 그림 3에서 굵은 선으로 표시한 것은 이 연구를 통해 얻은 결과 값을 나타내는데, 이에 대해서는 뒤에 자세히 기술하도록 하겠다. 그림 2에서 겨울에는 관측 값이 크고 여름에는 줄어드는 계절적인 변화가 관측되었는데, 이것은 지구가 태양 주위를 돌 때 근일점과 원일점에 의해 생기는 것으로 이해된다. 이러한 요인을 제외한 실제 합선 전류의 변화는 2년 동안 약 5% 정도 감소한 것으로 파악된다. 반면 그림 3에서 보인 것처럼 CSS에서 관측된 합선 전류의 변화는 ASS 보다 훨씬 큰 것을 알 수 있다. CSS에서 계절적인 변화가 잘 나타나지 않는 것은 그 변화 폭이 계절적인 요인보다 훨씬 크기 때문인 것으로 생각된다. CSS의 합선 전류는 2년 동안 약 37% 감소했다. 이렇게 CSS의 변화 폭이 ASS 보다 큰 것은 ASS에서는 태양전지가 알루미늄 상자 안에 장착되어 있었지만, CSS에서는 그대로 외부에 노출되었기 때문으로 생각 된다.

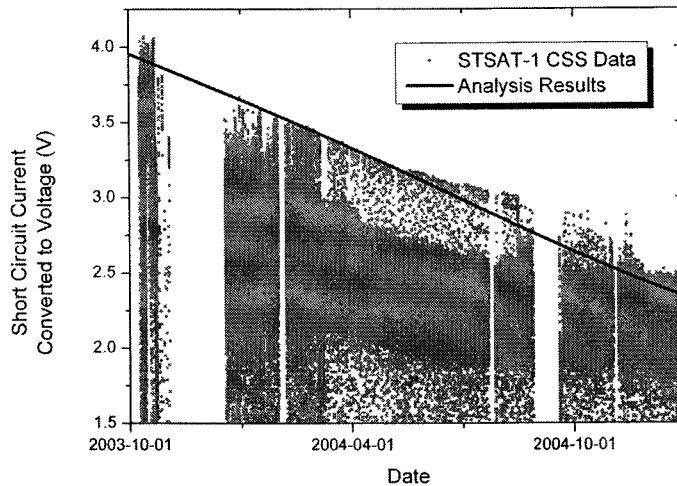


그림 3. 과학기술위성 1호 CSS에서 관측된 합선 전류(Short Circuit Current)의 변화 모습. 굵은 실선은 방사선 조사 실험을 통해 얻은 예측치를 나타낸다.

3. 방사능 조사 실험 및 분석

태양전지의 특성 변화에 영향을 미치는 요인으로는 고에너지 양성자, 전자, 중성자를 들 수 있다. 이 중 전자와 중성자는 충돌 단면적(Collision Cross Section)이 작기 때문에 양성자에 비해 태양전지에 미치는 영향이 작은 것으로 알려져 있다. 그러나 저궤도 위성의 경우, 전자는 양성자 보다 약 100배 정도 많이 위성에 충돌하기 때문에 전자에 의한 효과를 무시할 수 없을 것으로 예상하고, 고에너지 전자에 의한 태양전지의 감쇠 현상을 알아보기 위해 과학기술위성 1호에 탑재된 것과 동일한 태양전지에 전자빔을 조사하는 실험을 수행하였다. 이 실험은 한국원자력연구원의 전자빔 조사 장치 를 이용하였으며 전자빔 에너지에 의한 효과를 알아보기 위해 300keV, 1MeV, 2MeV의 에너지를 갖는 전자빔을 조사하였다. 이때 측정된 합선 전류 값의 변화를 그림 4에 나타냈었다.

그림 4에서 보는 것과 같이 300keV의 전자빔을 조사했을 경우, 태양전지 합선 전류의 변화가 미미한 것으로 나타났지만, 1MeV나 2MeV의 높은 에너지를 갖는 전자빔을 조사했을 경우, 확실한 감쇠현상을 관찰할 수 있었다. 이 그래프에서 전자빔에 의한 효과로 과학기술위성 1호에 나타난 CSS의 감쇠 현상을 설명하기 위해서는 약 2년 동안 2MeV의 전자에 1×10^{15} 개/cm² 정도 피폭되어야 한다는 결론을 얻을 수 있다. 실제 과학기술위성 1호에 피폭되는 전자 량이 얼마나 되는지 알아보기 위해 과학기술위성 1호와 비슷한 궤도에서 운용되는 미 해양대기청(NOAA)의 Polar Operation Environmental Satellite(POES) 위성 데이터 데이터를 이용하였다. NOAA POES 14 위성은 과학기술위성 1호와 비슷한 극궤도를 도는 위성으로 이 위성에는 고에너지 전자와 양성자를 관측하는 실험장치가 탑재되어 있다. 고에너지 전자의 경우, 30keV 이상, 100keV 이상 그리고 300keV 이상의 Flux를 매 2초 마다 측정하게 된다.

그림 5에 2004년 1년 동안 NOAA POES 위성이 관측한 전자의 총 개수를 나타내었다. 전자들의 입자 플루언스(flucence)는 에너지가 높아짐에 따라 감소하는 경향을 보임을 알 수 있다. 갑자기 전자의

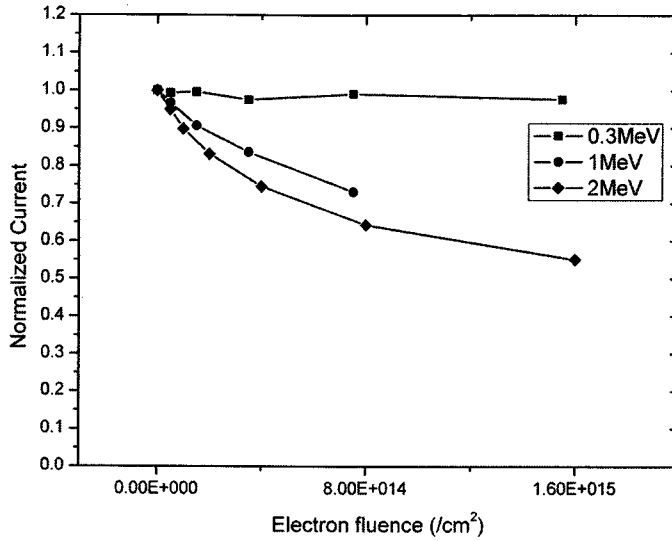


그림 4. 실리콘 태양전지에 전자빔을 조사했을 때 합선 전류의 변화. 0.3, 1, 2MeV의 에너지를 갖는 전자빔을 각각 조사한 후 합선 전류를 측정하였다.

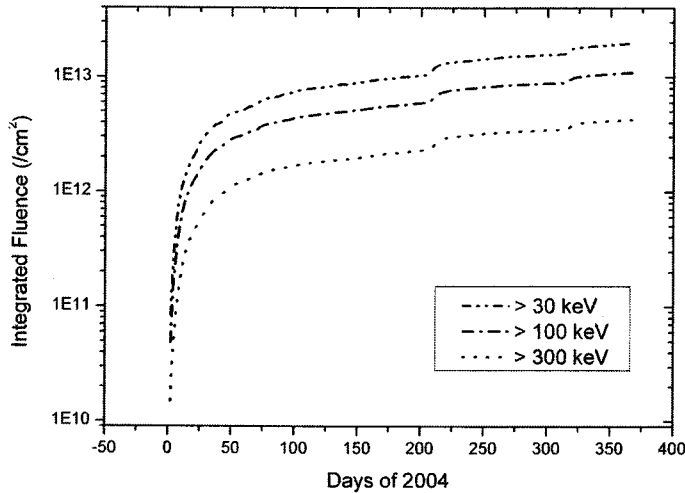


그림 5. 2004년 1년 동안 NOAA POES 위성에서 관측한 전자의 총 개수.

입자 플루언스가 증가하는 구간은 우주 폭풍 등에 의해 고에너지 전자가 많이 증가하는 구간을 나타낸다. 이 그림에서 나타낸 바와 같이 1년 동안 관측된 300keV 이상 전자의 총 개수는 4×10^{12} 개/ cm^2 이다. NOAA POES 위성의 전자 검출 장치에서는 관측하지 못 했지만, 1MeV나 2MeV의 에너지를 갖는 전자들의 개수는 이 보다 훨씬 적을 것이다. 전자빔 조사 실험에서 제시되었던 것과 같이 2MeV의 전자가 2년 동안 1×10^{15} 개/ cm^2 만큼 조사되어야 과학기술위성 1호 태양 센서의 성능 감쇠를 설

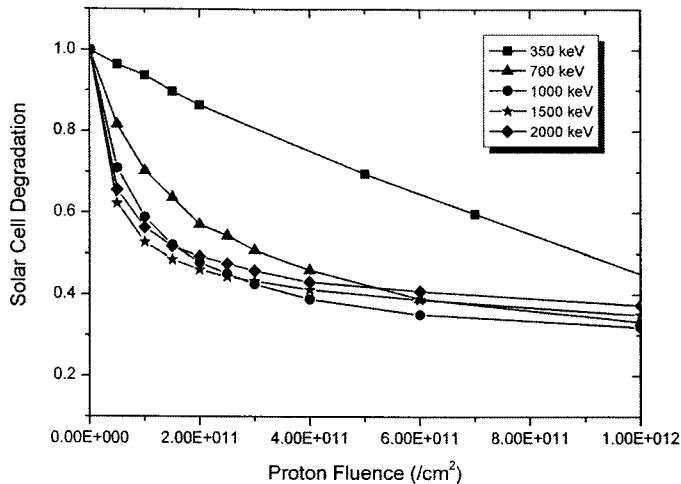


그림 6. 실리콘 태양전지에 양성자빔을 조사했을 때 합선 전류의 변화. 0.35, 0.7, 1, 1.5, 2MeV의 에너지를 갖는 양성자빔을 각각 조사한 후 합선 전류를 측정하였다.

명할 수 있는데, 관측 치는 이에 훨씬 못 미치는 결과를 제시하고 있다. 이로써 과학기술위성 1호 태양전지의 성능 감쇠 현상은 고에너지 전자가 아닌 다른 요인에 의해 설명되어야 한다는 결론에 도달한다.

이번에는 과학기술위성 1호 태양전지의 감쇠 현상을 설명하기 위해 실리콘 태양전지에 양성자빔을 조사하였다. 양성자빔 조사 실험은 한국지질자원연구원에 있는 양성자 가속기를 이용하였다. 전자빔 조사실험에서와 마찬가지로 여러 에너지 대역의 양성자를 조사하면서 합선 전류를 측정하였는데, 그림 6은 그 결과를 보여 주고 있다. 양성자빔에 의한 태양전지의 성능 감쇠는 전자빔에 의한 것과 다른 경향을 보여 주고 있다. 350keV의 낮은 에너지에 대해서는 비교적 선형적인 합선 전류량 감소를 보이지만, 높은 에너지 대역에서는 급격한 감소를 보이다 이후 천천히 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 항상 높은 에너지를 갖는 양성자가 더 많이 태양전지 성능 감쇠에 기여하는 것이 아니라, 어느 정도 이상의 에너지에서는 같은 양의 양성자를 조사하여도 그 효과는 오히려 줄어드는 것을 알 수 있다. 예를 들면, 그림 6에서 양성자 플루언스가 대략 1.5×10^{11} 개/cm² 이하인 경우 2MeV인 양성자 보다 1.5MeV의 에너지를 갖는 양성자가 태양전지 합선 전류 감소에 더 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 이것은 전자와 양성자가 태양전지에 에너지를 전달하는 방식이 다르기 때문인 것으로 생각된다. 양성자는 전자에 비해 무겁고 충돌 단면적이 크기 때문에, 좁은 영역에 많은 에너지를 전달한다. 태양전지에서 빛에 의해 전류가 생성되는 부분은 전지 표면의 얇은 층에 국한되기 때문에 적은 양의 양성자를 조사해도 합선 전류량의 감소는 크게 나타난다. 그림 6에서 보는 것처럼 350 keV의 양성자를 1×10^{12} 개/cm² 만큼 조사할 경우, 합선 전류량은 50% 이상 감소하는 것을 알 수 있다.

그러면, 과학기술위성 1호에 피폭되는 양성자량은 얼마나 될까? 그림 7에 NOAA POES 위성을 이용해 2004년 1년 동안 관측한 양성자량을 나타내었다. 이 그래프에서 240keV ~ 800keV에 해당하는 에너지를 갖는 양성자가 1년 동안 과학기술위성 1호와 같은 저궤도 위성 에 충돌하는 수는 약

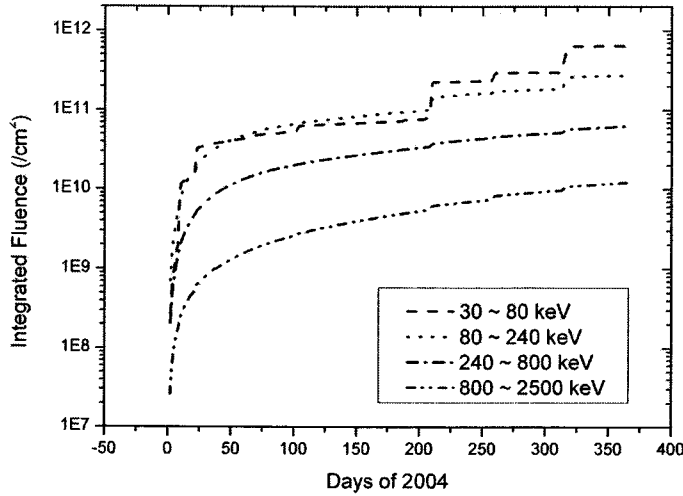


그림 7. 2004년 1년 동안 NOAA POES 위성에서 관측한 양성자의 총 개수.

6×10^{10} 개/cm²로 양성자빔 조사 실험을 통해 얻은 값들과 비슷한 것을 알 수 있다. 우주에서 양성자의 에너지 분포는 멱 법칙(Power Law)을 따르는 것으로 알려져 있는데, 그림 7에서 나타난 양성자 분포를 지수 함수로 근사하면 식 (1)을 얻을 수 있다.

$$F(E) = 1.02 \times 10^{14} \times E^{-2.21} (/cm^2keV) \tag{1}$$

식 (1)을 이용하면 양성자빔 조사 실험에 사용되었던 각 에너지 대역에 대해 1년 동안 얼마나 많은 양성자가 과학기술위성 1호에 피폭되었는지 알 수 있다. 그리고 그림 6에서 각 에너지에 대한 합선 전류 감소는 적어도 적은 양의 양성자 빔을 조사했을 경우, 지수 함수를 잘 따르는 것으로 나타났다. 1년 동안 인공위성에 피폭되는 양성자의 개수는 6×10^{10} 개/cm²로, 이 정도의 양성자 개수에 대해서는 태양전지의 합선 전류량의 변화가 지수 함수를 잘 따름을 확인하였다. 따라서 각 E_1 에서 E_2 에 해당하는 에너지 대역의 양성자에 의한 합선 전류 감소는 식 (2)로 표현될 수 있다.

$$I_{sc} = Ae^{-B \int_{E_1}^{E_2} F(E)dE} \tag{2}$$

여기에서 I_{sc} 는 합선 전류량을 나타내며, A 와 B 는 상수로 방사능 조사실험 값의 근사를 통해 구할 수 있다. 이 연구에서는 5개의 에너지 대역에 대한 양성자 조사 실험을 하였으므로 식 (2)를 이용하여 각 에너지 대역에 대한 합선 전류 값을 계산할 수 있다. 각각의 양성자가 태양전지에 주는 효과는 독립적이므로 이들 다섯 개의 식을 곱하면 전체 합선 전류에 대한 감소함수를 구할 수 있으며, 이 결과는 그림 3에 굵은 선으로 표시하였다. 그림 3에서 보는 것과 같이 방사능 조사 실험을 통해 얻은 결과는 궤도상에서 관측된 태양전지의 감쇠 현상을 잘 재현하고 있음을 알 수 있다. 다만 2003년 10월 부근에 보이는 해석 결과와 측정값의 변화는 이 시기에 강한 우주 폭풍이 발생하여 양성자 flux가 많이 증가하였는데, 해석 과정에서 이러한 특수 상황을 반영하지 못 했기 때문에 생긴 결과로 생각된다. 또한 과학기술위성 1호는 불행히도 2004년 중반부터 불안한 운용 상태를 보였다. 따라서 2004년 후

반부터 나타나는 불일치는 이러한 위성 상태에 기인한 것으로 생각된다. 그럼에도 불구하고 해석 결과와 관측치가 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있으며 이를 통해 과학기술위성 1호 태양전지의 성능 감쇠에 영향을 미친 주요인은 양성자라는 결론을 내릴 수 있으며, 이 때 양성자의 에너지는 700keV에서 1.5MeV 대역이 가장 큰 기여를 하는 것으로 나타났다.

4. 요약 및 결론

이 연구에서는 지상에서 수행한 방사능 조사 실험과 NOAA POES 위성의 데이터를 이용하여 과학기술위성 1호 CSS에서 관측된 태양전지의 합선 전류 감소 현상을 설명하고자 하였다. 앞에서 기술한 것과 같이, 과학기술위성 1호 CSS의 합선 전류 변화를 가져온 가장 직접적인 요인은 700keV에서 1.5MeV의 에너지를 갖는 양성자다. 태양 센서의 경우, 여러 셀(cell)에서 측정된 전류를 비교하여 태양의 위치를 찾게 되므로 우주 방사능에 의해 특성이 변한다고 해도 모든 셀의 특성이 같이 변한다면 태양 센서로서의 기능을 하는데 큰 문제는 없다. 그러나 오랜 기간 위성을 운용하게 되면, 태양 전지에서 생산하는 전류가 적어지기 때문에 노이즈의 영향을 받기 쉽고, 각 셀의 특성도 조금씩 틀러지게 되므로 위성 운용에 어려움을 겪게 된다. 과학기술위성 1호에서 센서로 사용한 태양전지와 달리, 전력용 태양전지는 보통 유리로 표면이 덮여 있기 때문에 양성자가 투과하기 어렵다. 따라서 전력용 태양전지는 앞에서 보인 과학기술위성 1호 CSS의 태양전지 특성 변화 보다 변화 정도가 훨씬 덜 할 것으로 생각된다. 실제 인공위성에서 나타나는 전력용 태양전지의 성능 감쇠는 약 1년에 5% 정도 되는 것으로 알려져 있다(Keil 2005). 그러나 앞에서 우리가 사용한 방법과 같이 지상에서 전력용 태양전지에 대한 방사능 조사 실험을 하고 이것을 위성에서 관측한 데이터와 비교하면, 정확하게 태양전지의 성능 변화를 예측할 수 있을 것으로 생각된다. 우주 방사능은 태양 활동과 밀접한 관련을 가지고 있으며 우주 방사선에 대한 태양전지의 특성은 지수 함수적으로 변하는 경향을 가지고 있다. 따라서 위성 운용 초기 우주 환경을 고려한 태양전지의 특성 변화는 위성을 운용하는 입장에서 매우 중요하다. 이 연구에서 사용한 접근 방법은 이러한 태양전지 특성 변화를 예측하는데 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

감사의 글: 이 논문은 한국천문연구원의 “우주환경예보센터구축사업”의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- 정성인, 이재진, 이흥호 2008, 전자공학회 논문지, 45, 227
- Baker D. N. 2003, Lecture Notes in Physics, 656, 3
- Lee, J.-J., Parks, G. K., Min, K. W., Kim, H. J., Park, J., Hwang, J., McCarthy, M. P., Lee, E., Ryu, K. S., Lim, J. T., Sim, E. S., Lee, H. W., Kang, K. I., & Park, H. Y. 2005, GRL, 32, L13106
- Keil, W. 2005, 2nd European Space Weather Week, Presentation
- Masafumi, Y., Taylor, S. J., Matsuda, S., & Kawasak, O. 1996, Appl. Phys. Lett., 68, 3141
- Miller, K. B. & O'Quinn, C. 1999, Radiation Effects Data Workshop, p.108
- Sharps, P. R., Aiken, D. J., Stan, M. A., Thang, C. H., & Fatemi, N. 2002, Advances in Space Photovoltaics, 10, 383

Triska, P., Czapek, A., Chum, J., Hruska, F., Simunek, J., Smilauer, J., Truhlik, V., & Vojta, J. 2005, *Annales Geophysicae*, 23, 3111

Underwood, C. I., Brock, D. J., Williams, P. S., Kim, S., Dilao, R., Santos, P. R., Brito, M. C., Dyer, C. S., & Sims, A. J. 1994, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 41, 2353