

2000 추계 학술발표회 논문집

한국원자력학회

저궤도 위성의 우주방사선 차폐물질 비교연구
**A Comparative Study on Space Radiation Shielding Materials
for LEO Satellite**

신명원, 이상윤, 김명현

경희대학교

경기도 용인시 기흥읍 서천리 1

요 약

본 연구에서는 Monte Carlo 방법을 사용한 LCS(LAHET Code System)을 사용하여, 저궤도 위성에 대한 차폐해석을 수행하였다. 150 MeV, 50 MeV, 그리고 30 MeV의 단일에너지 빔에 대하여 여러 가지 차폐구조(Al, Al-Ta-Al, Al-borated polyethelene-Al)에 대한 특성을 비교하였다. 계산결과, Al-borated polyethelene-Al구조가 가장 좋은 차폐효과를 보였다. 이러한 결과를 바탕으로, 세가지 종류의 차폐구조를 KISAT-1의 방사선 환경에 적용하여 양성자 차폐해석을 수행하였다. Al-borated polyethelene-Al구조가 역시 가장 우수한 차폐효과를 보였으며, Al-Ta-Al구조가 가장 나쁜 차폐효과를 보였다. 또한 이차중성자에 의한 dose rate는 양성자에 의한 dose rate에 비해 무시할 수 있는 값을 가졌다.

Abstract

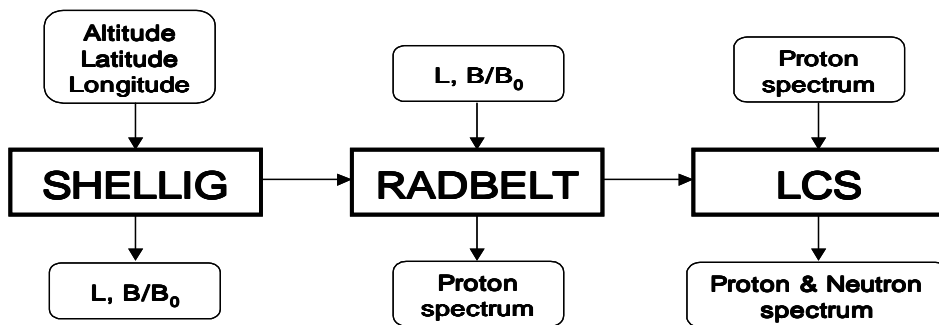
In this study, a proton shielding design was optimized for choice of shielding materials by using a Monte Carlo transport code system LCS(LAHET Code System). Proton shielding calculation was done for a mono-directional, mono-energetic beam impinging on the slab shields. Effect of multi-layer shields(Al-Ta-Al, Al-borated polyethelene(BPT)-Al) for secondary particle reflecting was compared with single layer of aluminium. Al-BPT-Al is better than others. And also, production of secondary neutron was smaller. Based on this result, proton shielding calculation was applied for KISAT-1. The best choice was Al-BPT-AL and the worst was Al-Ta-Al among three. Besides, it was found that there is no significant dose effect from secondary neutron in LEO.

1. 서론

우주방사선환경은 Van Allen Belt에 포획되어 있는 전자와 양성자, solar flare에서 발생하는 양성자 그리고 Galactic cosmic ray에서 오는 고에너지의 하전입자로 구성된다. 이중 저궤도위성이 운전되는 Van Allen belt의 방사선 환경은 주로 전자와 양성자로 구성된다. 여기에는 수백 MeV까지의 에너지를 갖는 양성자가 약 $10^5\#/cm^2\text{-sec}$ 의 flux level로 분포하고, 수 MeV의 에너지를 갖는 전자들이 약 $10^7\#/cm^2\text{-sec}$ 의 flux level로 분포한다. 이러한 우주방사선은 위성체내의 반도체에 손상을 입힐 수 있으며, 적절한 차폐로 인해 많은 경제적인 이득을 가져올 수 있다. 이전의 연구내용에서는 전자와 광자에 대한 연구가 중심이 되어 전자에 대한 최적화는 하였으나[1], 양성자 차폐에 대한 최적화는 하지 못하였다. 그리고 양성자에 대한 차폐연구에 있어서도 대부분의 경우 이차중성자의 생성은 무시하고 계산을 하였다. 본 연구에서는 Monte Carlo code인 LCS(Lahet Code System)[2]을 사용하여 이차중성자의 효과를 고려한 양성자의 차폐해석을 수행하였다.

2. 전산체계

우주방사선의 에너지 스펙트럼을 생산하기 위하여, SHELLIG와 RADBELT를 사용하였다. 저궤도에서의 방사선 스펙트럼은 AP(E)-8 모델을 사용한다. AP(E)-8 모델은 위도, 경도, 고도를 사용하는 좌표계 대신에, B-L 좌표계를 사용한다. 따라서 아래의 그림과 같이 SHELLIG는 위성의 위도, 경도 및 고도를 이용하여 적도 상에서 위성의 고도를 나타내는 L 값과 주어진 고도에서 동일한 자기장 세기를 가진 선을 연결한 B_0 를 구하게 되고, RADBELT는 이 값들을 이용하여 AP-8모델에 의해 위성의 방사선 스펙트럼을 제공하게 되고, 이 스펙트럼은 LCS의 입력자료로 사용된다.



3. 차폐물질 선정

LCS(Lahet Code System)를 사용하여 1.62 g/cm^2 의 두께를 갖는 finite slab에 대하여 차폐계산을 수행하였다. Aluminium 차폐체를 기준으로 하여 다중구조 차폐체의 차폐효과를 비교하였다. Aluminium은 현재 비행체나 우주선의 구조재로 많이 사용되는 물질이며,

tantalum은 전자의 차폐효과를 얻기 위해 사용된 물질이며[1], borated polyethelene은 원자력시설에서 중성자의 흡수체로 사용되는 물질로서 이차중성자의 흡수효과를 얻기 위해 사용되었다[3]. 계산에 적용된 차폐구조는 아래와 같다.

- ① Al 단일구조
- ② Al-Ta-Al 3중구조
- ③ Al-borated polyethelene-Al 3중구조

우주방사선 환경에 존재하는 양성자의 스펙트럼은 $C \cdot E^{-n}$ 의 형태를 갖는다. 따라서 고에너지의 입자들이 존재하지만 그 양은 적으며, 대부분의 입자는 50 MeV이하의 에너지를 갖고 약 30 MeV정도의 에너지를 갖는 입자가 가장 많이 분포하게 된다. 그러므로 본 연구에서는 150MeV, 50MeV 그리고 30MeV의 양성자가 입사되는 경우에 여러 가지 차폐구조에 대한 차폐해석을 수행하였다.

4. 차폐계산 결과

4-1. 에너지 스펙트럼 비교

150 MeV의 양성자가 입사된 경우, 입사된 양성자의 비정이 차폐체의 두께에 비해 매우 길기 때문에 차폐효과가 거의 없다고 할 수 있다. 따라서 150 MeV 이상의 고에너지 양성자의 차폐는 차폐체의 두께가 매우 두꺼워야 하는데, 위성의 차폐체의 무게는 한계가 있으므로 과한 차폐는 할 수 없다. 그러므로 고에너지 양성자의 차폐는 위성체에 있어 불가능하다고 할 수 있다. 그림 1에서는 각각의 차폐체를 통과한 양성자와 중성자의 스펙트럼을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 아주 적은 차이지만 Al-borated polyethelene-Al 구조가 다른 차폐체보다 나은 효과를 보였다.

양성자의 감속은 대부분 원자내의 전자와의 비탄성산란에 기인한다. 그러므로, 양성자의 저지능은 매질의 Z/A와 비례하고, 이차중성자의 생성량은 high-Z물질과 양성자의 반응기인한다. 이러한 이유로, 양성자의 차폐에는 low-Z 물질이 유리하다.

50 MeV의 양성자가 입사된 경우, 그림 2와 같은 차폐효과를 얻을 수 있었다. 그림에서와 같이 Al-borated polyethelene-Al 차폐구조가 다른 Al 차폐체나 Al-Ta-Al 차폐구조보다 좋은 차폐효과를 보였다. 또한 Al-borated polyethelene-Al 구조가 다른 차폐구조보다 이차중성자의 생성량도 적음을 알 수 있다.

그림 3의 30 MeV의 양성자가 입사된 경우, Al-Ta-Al 차폐구조만을 제외하고는 첫 번째 차폐층에서 모두 차폐가 가능하였다. 또한 30 MeV 양성자에 의한 중성자 생성량은 거의 없음을 알 수 있다.

4-2 Dose량 비교

그림 4에서는 양성자와 중성자의 DCF(Dose Conversion Factor)를 나타내었다. 양성자의 경우 DCF값은 입자의 에너지가 증가함에 따라 DCF값은 감소하고, 중성자의 경우는 그 반대의 경향을 보인다.

그림 5, 6 그리고 7에서는 150 MeV, 50 MeV 그리고 30 MeV의 단일에너지를 가진 입자가 세가지 차폐구조를 통과한 후의 스펙트럼에 DCF를 적용하여 dose rate로 환산한 값을 나타내고 있다. 위 4-1절에서 언급된 세 가지 차폐구조 중 가장 차폐효과가 좋은 것으로 나타난 Al-borated polyethelene-Al 차폐체를 통과한 경우가 가장 높은 dose rate를 가진다. 이러한 결과는 차폐체를 통과하면서 에너지 감속이 가장 많이 되었음을 의미한다. 또한 이차 중성자에 의한 dose량은 양성자에 의한 dose양에 비해 무시할 수 있을만한 값을 보였다. 30 MeV의 양성자가 입사된 경우 그림 8에서와 같이 차폐구조에 상관없이 양성자가 모두 차폐되었으며, 중성자의 생성은 거의 없었다.

4-3. 실제 우주방사선 스펙트럼을 적용한 차폐효과 비교

위의 4-1절과 4-2절의 결과를 바탕으로, KISAT-1에 대해 양성자의 차폐계산을 수행하였다. 적용된 양성자의 스펙트럼은 SAA지역에서 고도 1,305 km에 대해 AP-8 model을 사용하여 구하였다. 그림 8에서는 입사방사선과 각각의 차폐체를 통과한 양성자의 스펙트럼을 비교하였으며, 4-1절과 4-2절에서와 같은 효과를 나타내었다. 계산결과 Al-Ta-Al구조가 양성자의 에너지 감쇄효과가 가장 떨어지고, 중성자 생성 측면에서도 Al-Ta-Al구조가 가장 불리함을 보였다. Al-borated polyethelene-Al 차폐구조는 양성자의 에너지 감쇄나 중성자의 생성측면에서도 가장 우수한 효과를 보였다. 그림 9에서는 그림 8의 스펙트럼을 dose rate로 환산한 값을 나타내었다. 그림 9에서 알 수 있듯이, Al-borated polyethelene-Al차폐구조를 통과한 경우가 양성자나 중성자에 의한 dose rate가 가장 적은 값을 보였으며, 대부분의 dose rate은 양성자에 기인함을 알 수 있다. 따라서 KISAT-1과 같은 저궤도 위성의 경우, 방사선 환경이 고에너지의 양성자보다는 30 MeV이하의 양성자가 대부분을 차지하므로, 이차중성자에 의한 조사량은 중요하지 않음을 알 수 있다.

5. 결 론

위성의 효과적인 차폐물질을 선정하기 위하여 기존의 Al 차폐체와 Al-Ta-Al, Al-BPT-Al 차폐구조의 차폐효과를 비교해 보았다. 세가지 차폐구조의 특성을 비교하기 위하여 150 MeV, 50 MeV, 30 MeV의 단일에너지 빔에 대한 차폐계산을 수행하였다. 계산 결과 150 MeV의 양성자가 입사된 경우, 이차 중성자의 생성량은 가장 많았으나 양성자에 의한 dose량은 작은 값을 가졌고, 30 MeV의 양성자가 입사된 경우, 차폐구조와 상관없이 모두 차폐되었고, 이차 중성자의 생성량도 거의 없었다. 따라서 dose의 주된 영향은 50 MeV 근처의 입자들에 기인함을 알 수 있다. 계산결과, Al-borated polyethelene-Al이 가장 좋은 차폐효과를 나타내었다. 위의 특성비교 계산을 바탕으로 KISAT-1의 방사선환경에 세가지 차폐구조를 적용하였다. Al-borated polyethelene-Al이 가장 효과적인 차폐효과를 보였으며, 이차 중성자의 효과는 무시할 수 있는 값을 가졌다.

참고문헌

1. Wesley C. Fan, Clifton R. Drumm, Stanley B. Roeske, and Gary J. Scrivner, "Shielding Considerations for Satellite Microelectronics," IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 43, No. 6, Dec. 1996.
2. Richard E. Prael and Henry Lichtenstein, "User Guide to LCS: The Lahet Code System," LANL, 1989.
3. Robert C. Singleterry, Jr., and Sheila A. Thibeault, "Materials for Low-Energy Neutron Radiation Shielding," NASA/TP-2000-210281, June 2000.

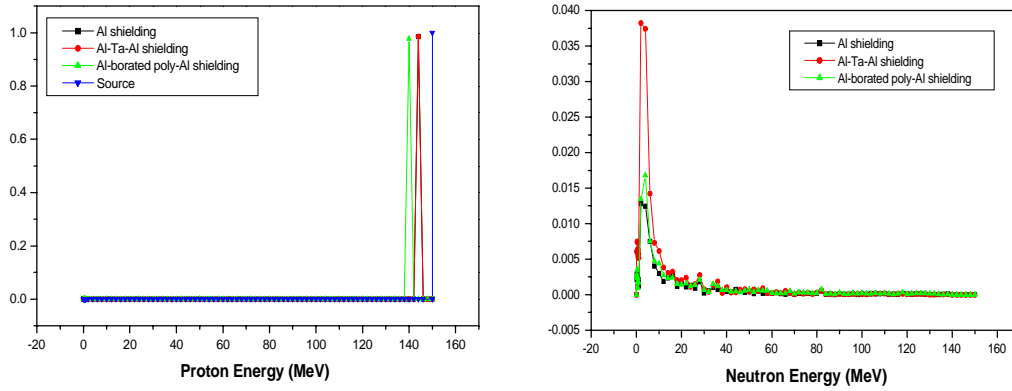


그림 1. 각각의 차폐체 뒤에서 양성자와 중성자의 스펙트럼(150 MeV proton 입사된 경우)

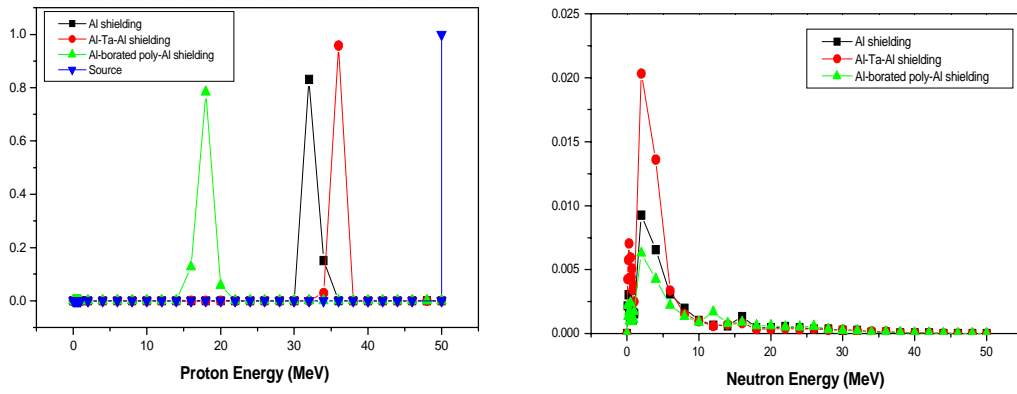


그림 2. 각각의 차폐체 뒤에서 양성자와 중성자의 스펙트럼(50 MeV proton 입사된 경우)

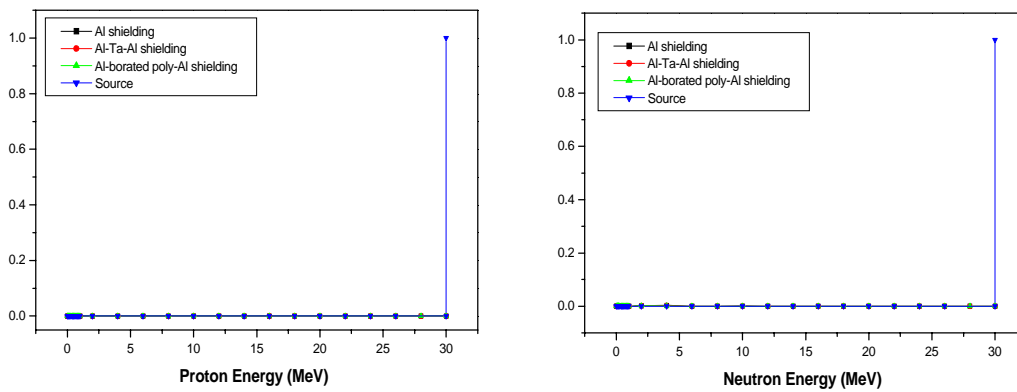


그림 3. 각각의 차폐체 뒤에서 양성자와 중성자의 스펙트럼(30 MeV proton 입사된 경우)

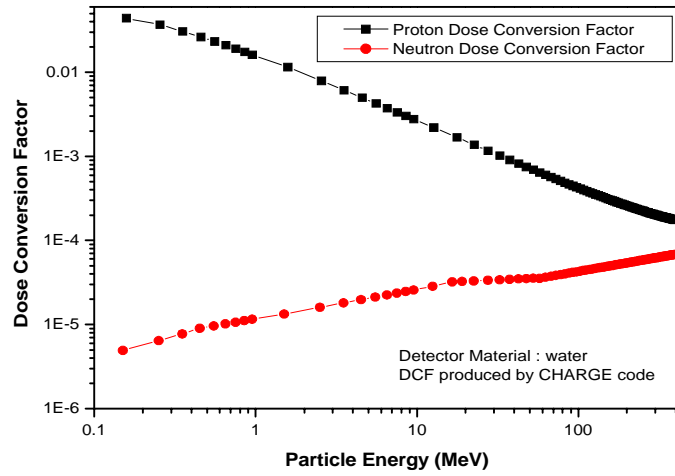


그림 4. 중성자와 양성자의 에너지에 따른 DCF(Dose Conversion Factor)

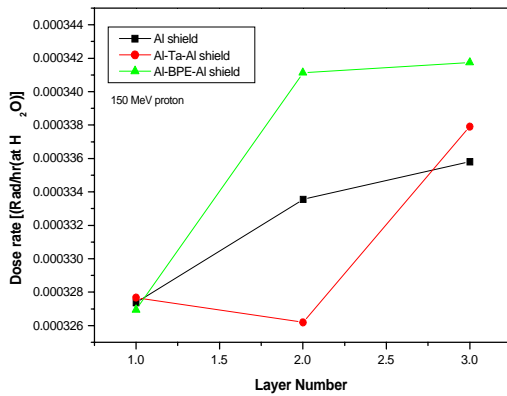


그림 5. 각각의 차폐체 뒤에서 150 MeV의 proton에 의한 dose rate

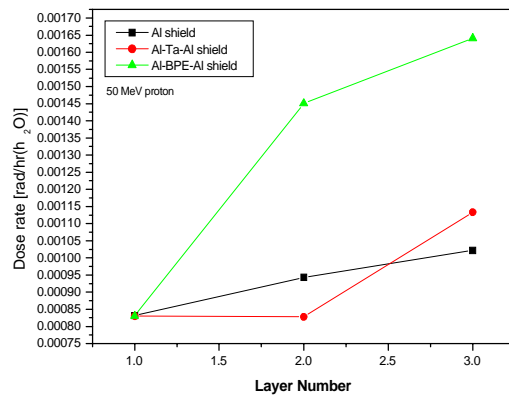


그림 6. 각각의 차폐체 뒤에서 50 MeV의 proton에 의한 dose rate

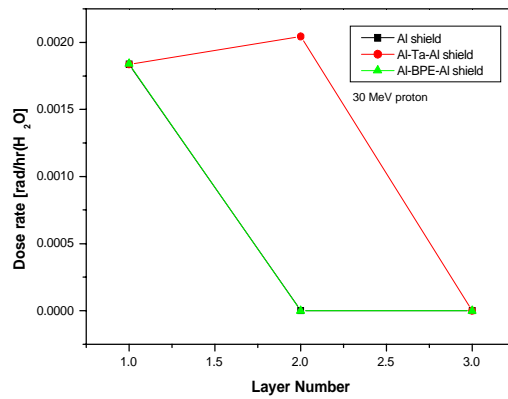


그림 7. 각각의 차폐체 뒤에서 30 MeV의 proton에 의한 dose rate

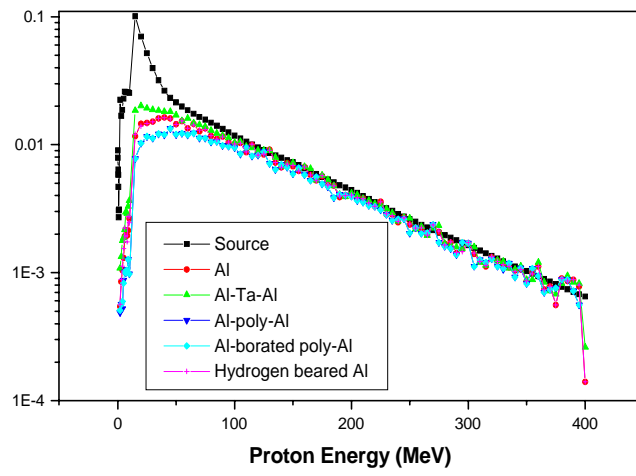


그림 8. KISAT-1 궤도환경에서의 차폐구조에 따른 proton의 spectrum

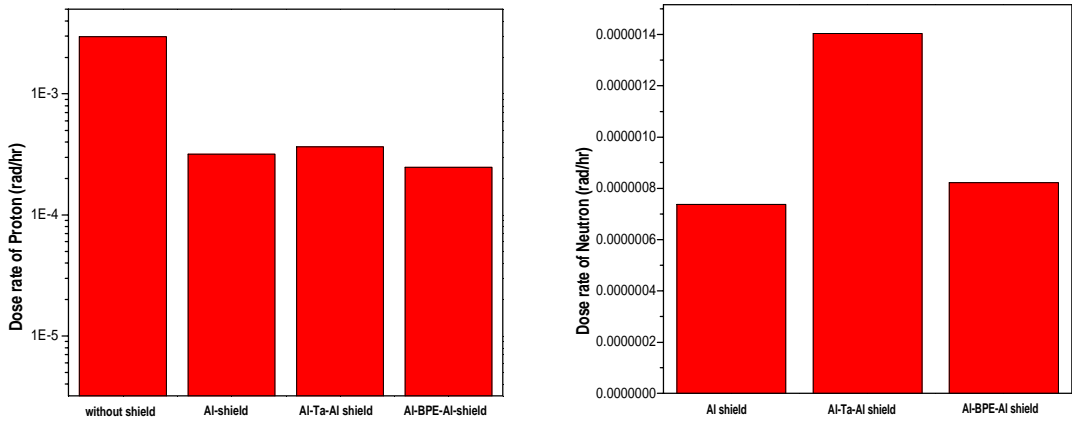


그림 9. 각각의 차폐체뒤에서의 양성자와 중성자에 의한 dose rate비교