

저궤도 인공위성의 고에너지 방사선 차폐계산을 위한 근사모델 개발  
Development of Approximate Shielding Calculation Method  
for High Energy Cosmic Radiation on LEO Satellites

신명원, 김명현  
경희대학교  
경기도 용인시 기흥읍 서천리 1

요 약

인공위성의 임무기간동안 우주방사선에 의한 반도체에서의 total dose effect를 효과적으로 계산하기 위해 두 가지 근사 계산방법으로 sectoring method와 chord-length method을 사용하였다. 근사 계산방법을 적용 시에 복잡한 구조의 위성체는 여러 개의 일차원 평판구조로 묘사되고, 또한 여러 가지 구성물질은 기준물질인 알루미늄으로 모두 전환되어 계산에 적용된다. 알루미늄으로 전환 시에 두 물질의 저지능을 유지시키는 방법을 사용하였으며, 계산과정을 단순화하기 위하여 미리 계산되어진 dose-depth curve에 대한 fitting 함수를 사용하였다. 근사 계산방법의 검증을 위하여 삼차원 상세 계산결과와 실험 값과 비교하였다. 근사 계산방법을 사용하여 계산된 결과는 삼차원 계산결과와 비교하여 적은 오차범위 내에서 보수적인 결과를 보였다. 그러나 궤도운전조건을 묘사하여 실험 값과 비교한 경우 계산 값이 실험 값에 비해 많은 오차를 가지고 과소 평가되었다.

Abstract

To calculate total dose effect on semi-conductor devices in satellite for a period of space mission effectively, two approximate calculation models for a cosmic radiation shielding were proposed. They are a sectoring method and a chord-length distribution method. When an approximate method was applied in this study, complex structure of satellite was described into multiple 1-dimensional slabs, structural materials were converted to reference material(aluminum), and the pre-calculated dose-depth conversion function was introduced to simplify the calculation process. Verification calculation was performed for orbit location and structure geometry of KITSAT-1 and compared with detailed 3-dimensional calculation results and experimental values. The calculation results from approximate method were estimated conservatively with acceptable error. However, results for satellite mission simulation were underestimated in total dose rate compared with experimental values.

## I. 서론

1990년대 초반에 우리별위성과 무궁화위성이 발사되면서 국내 위성산업이 시작되었다. 또한 2015년까지 19기 이상의 위성발사계획을 가지고 있으며, 2005년까지 저궤도위성의 발사 장치를 개발할 예정이다. 그러나 위성의 설계기술은 선진국의 기술에 비하여 많이 뒤떨어져 있다. 인공위성에서 방사선 차폐체의 중요한 기능은 위성체내의 고가의 반도체를 우주방사선으로부터 보호하는 것이다. 반도체는 위성의 수명과 운전성능을 결정짓는 중요한 부품이지만, 이들은 우주방사선에 매우 취약하다. 특히, 상용반도체의 경우는 내방사선 설계가 들어있지 않은 경우 손상가능성이 매우 높다. 따라서, 고에너지 우주방사선에 대한 차폐계산은 위성체의 구조설계와 안전성평가에 있어 첫 단계가 된다. 양성자와 이와 관련된 이차입자는 저궤도 임무에서의 차폐계산에 대한 주된 대상이 된다. MCNP-X와 LCS는 하전 입자의 수송계산에 사용될 수 있으나, 계산시간이 너무 길고, 우주환경의 특수성 때문에 일반적으로 사용되기에는 어렵다. 본 논문에서는, 근사 계산방법인 sectoring method와 chord-length method의 효율성을 평가하기 위해 몬테카를로 방법을 이용한 상세 삼차원계산 결과와 실험 값과 비교하였다.

## II. 우주방사선 환경 묘사

본 논문에서 차폐계산은 저궤도 위성인 KITSAT-1에 대하여 수행되었으며, KITSAT-1의 궤도 요소는 아래의 표1과 같다. 저궤도 영역에 존재하는 대부분의 하전입자는 지구자기장에 의해 포획되어있다. 따라서 임의의 위치에서의 하전입자의 플럭스는 지구자기장의 세기에 의해 결정이 되어진다. 본 논문에서는 지구자기장을 묘사하기 위하여 IGRF(International Geomagnetic Reference Field) model을 사용하였으며, 하전입자의 플럭스 계산에는 AP(E)-8 model을 사용하였다. 그림 1에서는 우주방사선 차폐계산을 위해 본 논문에서 사용된 전산체계를 나타내었다. AP(E)-8 model은 RADBELT program의 library로 사용되며, 태양활동이 극소기(solar minimum)일때의 조건과 극대기(solar maximum)일때의 조건으로 구성되어 있다. 본 논문에서는 양성자의 플럭스가 가장 높은 상태인 태양활동이 극소기일때의 조건을 사용하여 계산에 적용하였다.

표 1. KITSAT-1의 궤도요소

궤도요소	
perigee height	1306.1 km
apogee height	1326 km
inclination	66.08.
크기(mm <sup>3</sup> )	352 × 356 × 670
무게	48.7 kg

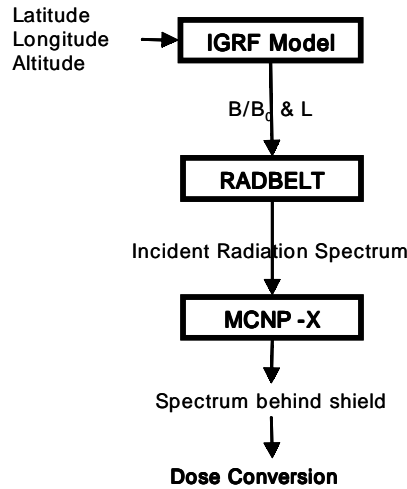


그림 1. 우주방사선 차폐계산을 위한 전산체계

### III. 근사 계산방법

근사 계산방법은 상세 몬테카를로방법을 대체하여 사용되어지며, 복잡한 구조와 물질로 구성된 위성체는 단일물질로 이루어진 여러 개의 입차원 평판구조로 근사되어 묘사된다. 본 논문에서는 근사 계산방법으로 sectoring method와 chord-length distribution method를 사용하였다. 근사 계산방법에 사용될 수 있는 전산코드로는 MCNP-X, CHARGE, HZETRN등 여러 가지 코드들이 적용되어 질 수 있다. Sectoring method에서는 그림 2에서와 같이 위성체내의 관심의 대상이 되는 위치를 중심으로 입체각으로 나누어진 sector의 표면으로부터 하전 입자가 입사되어진다고 가정된다. 각각의 sector내에서의 차폐체의 두께는 입자가 차폐체를 통과한 두께로 결정되어진다. 즉, 임의의 sector로 입사되는 모든 입자는 동일한 두께의 차폐체를 통과하는 것으로 가정된다. Source 표면에서의 각 sector의 면적비는 dose-rate계산시에 normalization factor로 적용된다.

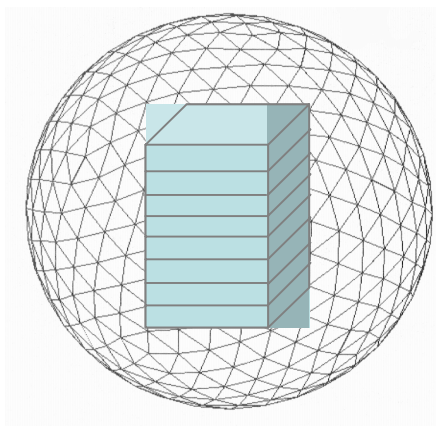


그림 2. Sectoring Method에서 위성체가 입체각에 의한 sector로 분할된 모델

Chord-length method에서는 source 표면에서 하전입자의 입사위치가 무작위로 결정되어지며, chord-length는 source 위치에서 관심이 되는 위치까지의 차폐체의 유효두께를 계산하여 평가된다. 각 chord-length의 분포확율은 dose-rate 계산시에 normalization factor로 적용된다.

제안된 근사 계산방법이 위성체의 차폐계산에 적용될때, 식 1을 이용한 입사방사선이 차폐체를 통과한 후의 입자의 스펙트럼의 계산과정과 식 2를 이용한 dose conversion의 계산과정이 각각의 sector와 chord-length에 대하여 반복계산이 되어져야만 한다. 이러한 많은 반복 계산과정은 근사 계산방법의 장점을 감소시킬 수 있으므로, 본 논문에서는 알루미늄에 대한 dose-depth curve를 미리 계산하여 근사 계산에 적용하는 방법을 사용하여 계산과정을 식 3과 같이 단순화하였다.

$$\Phi_g = \sum_{i=0}^N [\Phi_g(t_i) \times (N.F.)_i] \quad (1)$$

where  $\Phi_g$  : 표적에서의 g-group 에너지를 갖는 예서의 양성자의 플럭스

$\Phi_g(t_i)$  :  $t_i$  두께의 차폐체 후면에서의 g-group 에너지를 갖는 양성자의 플럭스

N.F. : normalization factor

<Sectoring method가 적용되는 경우>

$t_i$  : i-sector에서 알루미늄 차폐체의 두께

N : sector의 개수

N.F. : source 표면에서 sector 표면의 면적비

<Chord-length method가 적용되는 경우>

$t_i$  : i 번째 두께 group에서 알루미늄차폐체의 평균두께

N : 두께 group의 갯수

N.F. : i 번째 두께 group에 속하는 입사빔의 개수와 총입사빔의 개수의 비율

$$\dot{D} = \sum_{g=1}^G [\Phi_g \times (DCF)_g] \quad (2)$$

where  $\dot{D}$  : 표적위치에서의 dose-rate

G : 에너지 group의 수

$DCF_g$  : 에너지 그룹 g에서의 dose conversion factor

$$\dot{D} = \sum_{g=1}^G [\dot{D}(t_i) \times (N.F)] \quad (3)$$

where  $\dot{D}$  : 표적위치에서의 dose-rate

$\dot{D}(t_i)$  :  $f(t_i)$

$f(t_i)$  : dose-depth curve에 대한 fitting 함수

N.F. : normalization factor

#### IV. 근사 계산방법의 검증

근사 계산방법의 효율성을 평가하기 위하여, 두 가지 검증계산이 수행되었다. 입사양성자의 스펙트럼이 SAA(South Atlantic Anomaly)의 값으로 고정되고, 간략하게 묘사된 위성체의 구조에 대하여 삼차원 상세계산 결과와 dose-rate를 비교하였으며, 일정기간동안의 위성체의 궤도운전을 묘사하여 계산된 결과와 실험결과를 비교하였다.

##### IV.1. 차폐계산을 위한 위성체 모델링

우리별1호는 그림 3과 같이 알루미늄과 에폭시 패키지로 이루어진 평판에 PCB(printed circuit board)가 스택구조를 가진 복잡한 구조를 가지고 있다. 위성체내에는 두개의 TID(total ionizing dose) 계측장치인 RADFET-1과 RADFET-3가 DSPE/CRE 스택에 위치하고 있다. RADFET-1은 위성체의 외벽근처에 위치하고 RADFET 3은 스택의 중심부에 위치한다. 이 논문의 목적은 근사 계산방법의 효율성을 판단하는데 그 목적이 있으므로, 아래의 그림 4와 같이 각각 다른 두께를 가지는 평판으로 구성된 비교적 간단한 위성체 모델에 대하여 계산을 수행하였다. 3차원계산시에 위성체는 알루미늄과 에폭시만으로 구성되어있다고 가정하였으며, 차폐계산은 RADFET-1과 RADFET -3의 위치에 대하여 수행되었다.

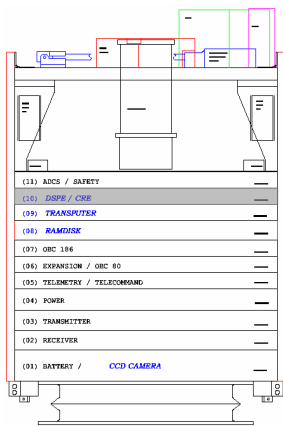


그림 3. 우리별 1호의 상세도

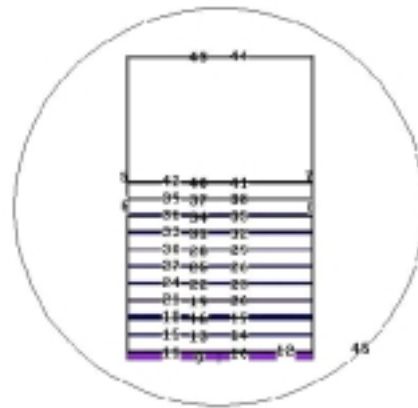


그림 4. 우리별 1호의 MCNP-X 계산모델

#### IV.2. 삼차원 상세계산과 근사모델을 이용한 계산결과 비교

삼차원 상세계산은 고에너지 하전입자의 수송을 몬테카를로 방법을 이용해서 해석하는 MCNP-X를 사용하였다. 이 검증계산에서는 우리별1호위성의 궤도중 플럭스가 가장 높은 SAA위치에서의 스펙트럼을 사용하였으며, 입사 양성자의 스펙트럼 계산에는 AP-8 model이 사용되었다. 그림 5에서는 MCNP-X로 계산된 RADFET-1과 RADFET-3에서의 양성자 플럭스를 나타내었다. 몬테카를로 계산시 전체적인 상대적차는 10%미만으로 유지되어 수렴하였다. RADFET-3에서의 플럭스가 RADFET-1에서의 값보다 낮은 결과를 보였으며, 이는 RADFET-1이 위성체의 외벽근처에 위치하여 상대적으로 차폐효과를 적게 받기 때문이다. 계산된 플럭스는 ICRU Report49에서 얻어진 DCF(dose conversion factor)를 사용하여 dose로 환산하였다. RADFET-1에서의 dose값이 RADFET-3에서의 값보다 약 4.6%높은 값을 가졌다. 본 논문에서는 이 MCNP-X를 사용하여 얻은 결과를 근사계산결과와의 비교시에 기준자료로 사용하였다.

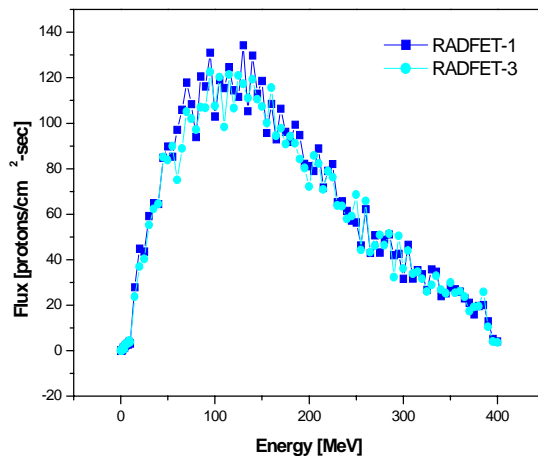


그림 5. MCNP-X에 의해 계산된 RADFET-1과 3에서의 양성자 플럭스

앞서 언급한 대로, 근사 계산방법을 사용하는 경우에 위성체를 구성하는 물질은 기준물질로 대체하여 계산되어진다. 본 논문에서는 우리별 1호의 모델링시에 위성체는 알루미늄과 에폭시만으로 구성되어있다고 가정하였으므로, 에폭시를 알루미늄으로 전환하기 위해 아래의 4가지 방법을 적용하였다. 첫 번째, 에폭시를 같은 무게의 알루미늄으로 전환, 두 번째, 에폭시와 알루미늄매질에서 단위길이 당 에너지 손실율을 동일하게 유지하도록 전환, 세 번째, 에폭시와 알루미늄매질에서 단위질량 당 에너지 손실율을 동일하게 유지하도록 전환, 그리고, 네 번째, 에폭시와 알루미늄매질에서 동일한 전자의 수를 갖도록 전환하는 방법을 사용하였다. 그림 6에서는 위의 네 가지 방법에 의해 에폭시를 알루미늄으로 전환하여 계산한 결과를 나타내었다. 그림에서와 같이 단위질량당 에너지 손실율을 같도록 유지하여 알루미늄으로 전환한 경우가 가장 좋은 계산결과를 보였으며, 본 논문에서는 근사계산방법을 차폐계산에 적용할 때, 기준물질로 전환시에 알루미늄과 에폭시의 저지능 비율인 0.77을 적용하였다.

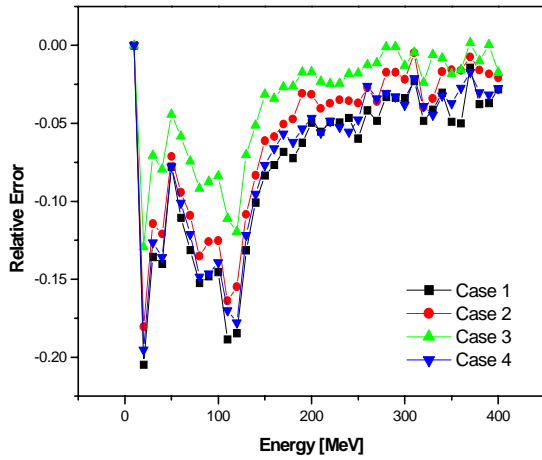


그림 6. 에폭시를 알루미늄으로 전환시, 각 계산방법에 따른 오차계산결과

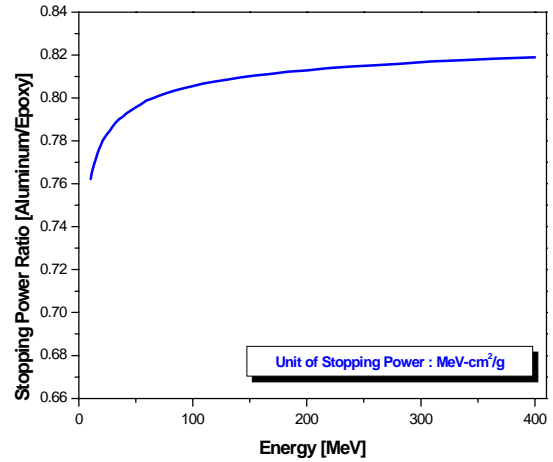


그림 7. 알루미늄과 에폭시에서 에너지별 저지능 비율계산

본 연구에서 근사 계산방법을 사용하여 TID를 평가할 때, dose-depth curve를 미리 계산하여 계산에 적용하였다. 입사 양성자와 전자의 스펙트럼은 AP(E)-8 model을 사용하여 SAA위치에서의 값을 사용하였다. 전자의 경우, 두개의 RADFET에 미치는 TID 영향이 양성자에 비해 1%미만의 값을 가지므로, 본 논문에서는 TID평가시 전자의 효과는 무시하였다. 기준물질인 알루미늄 차폐체 후면에서의 양성자 플럭스는 MCNP-X, Lahet 그리고 CHARGE code를 사용하여 계산되었으며, dose-depth curve는 아래의 식 4를 사용하여 계산되었다. 그림 8에서와 같이 MCNP-X와 Lahet의 계산결과는 서로 거의 같은 값을 가졌다. 그러나 CHARGE를 사용하여 계산된 결과는 MCNP-X나 Lahet의 결과보다 약 10cm 까지 낮게 평가되었다. 이러한 차이는 계산방법과 사용된 DCF의 차이에서 기인한 것으로 판단된다. MCNP-X와 Lahet의 경우에는 DCF를 ICRU Report49에서 얻어진 값을 사용하였으며, 아래의 식 5와 같이 하전입자에 대한 수송방정식을 몬테카를로 방법을 적용하여 계산을 수행한다. 그러나 CHARGE code에서는 아래의 식 6과 같이 간략한 감쇄공식을 사용하여 하전입자의 거동을 묘사하게된다. 본 논문에서는 MCNP-X를 사용하여 계산된 dose-depth curve를 근사 계산방법에 적용하였다. 그림 9에서는 MCNP-X를 사용하여 얻은 계산결과를 fitting하여 나타낸 결과이다. Fitting 함수는 이차지수붕괴함수를 적용하였으며, fitting curve는 계산결과를 매우 잘 대변하고 있다.

$$\dot{D}(x) = \int_0^{E_{\max.}} [ (\mu_d/\rho)(E) \times E \times \phi(x, E) \times C ] dE \quad (4)$$

where  $\mu_a$  : 차폐물질의 질량감쇄계수  
 $\rho$  : 차폐물질의 밀도 ( $g/cm^3$ )  
 $\Phi(E)$  : 양성자의 플럭스

$$\begin{aligned} \Omega \cdot \nabla \Phi_j(r, \Omega, E) &= \frac{\partial}{\partial E} [S_j(E) \Phi_j(r, \Omega, E)] + \sigma_j(E) \Phi_j(r, \Omega, E) \\ &= \int \sum_k \sigma_{jk}(\Omega, \Omega', E, E') \Phi_k(r', \Omega', E') d\Omega' a \end{aligned} \quad (5)$$

where 
$$S_j(E) = \frac{4\pi N Z_1^2 Z_2^2 e^4}{mv} \times \left[ \ln \left( \frac{2mv^2}{(1-\beta)^2 \times I_2} \right) \right]$$

$$\Phi(E) = \Phi_0(E) \times e^{\Sigma_{N,E}(E) \cdot t} \quad (6)$$

where  $\Phi_0(E)$  : 입사양성자의 플럭스

$\Sigma_{N,E}(E)$  : 양성자의 non-elastic cross-section

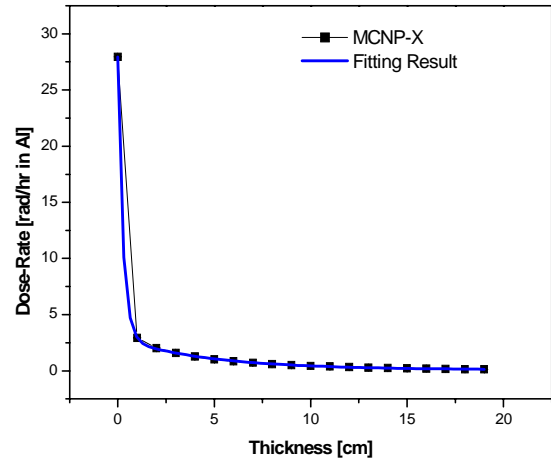
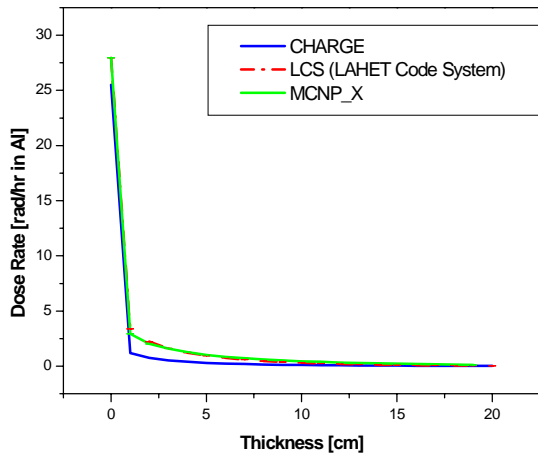
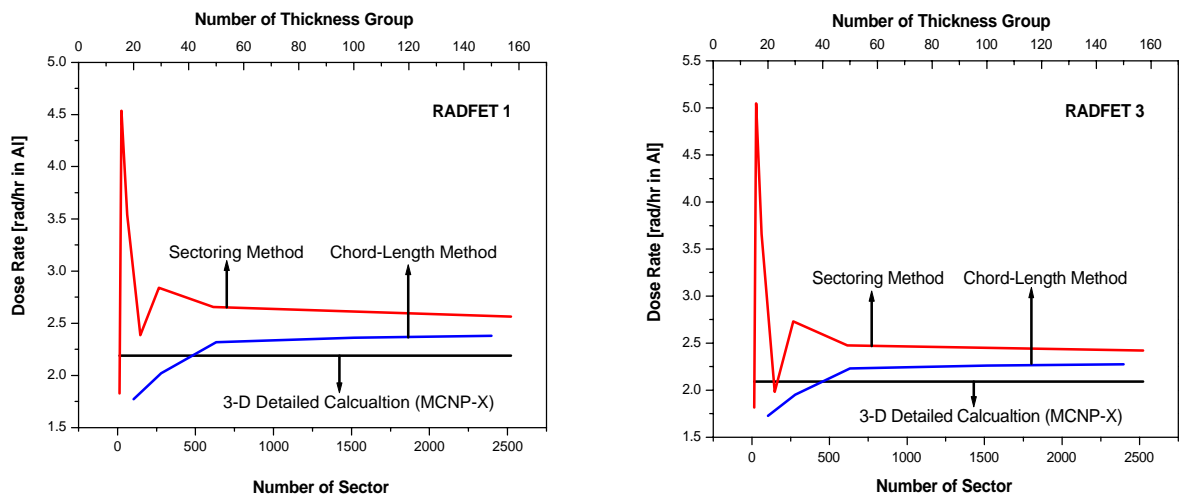


그림 8. SAA에서의 양성자 스펙트럼이 입사될때, 알루미늄 차폐체에 대한 dose-depth curve  
 그림 9. dose-depth curve에 대한 fitting 결과

Sectoring method를 적용할 때, 위성체는 14개에서 2522개의 sector로 나누어 계산을 수행하였으며, chord-length method의 사용시에는 source 표면에서 1,000,000개의 입자발생 위치를 무작위로 추출하였고, source 위치에서 표적의 위치까지 투과된 차폐체의 두께는 20 ~ 150 group으로 구분하였다. 그림 10에서는 두가지 근사 계산방법과 삼차원 상계산에 의해 평가된 dose-rate를 나타내었다. Sector의 수와 두께 group의 수가 증가할수록 dose-rate 계산결과가 일정한 값으로 수렴



됨을 알 수 있다. 그리고, RADFET-1과 3에서 계산된 dose-rate와 위치효과를 표 2에 나타내었다. 두가지 근사 계산방법에 의해 계산된 dose-rate은 삼차원 상세계산 결과와 비교하여 sectoring method를 적용한 경우에 약 15%, chord-length method를 적용한 경우에 약 8%의 과대평가를 하였으며, RADFET-1과 3의 위치효과는 상세 계산결과와 잘 일치하였다. 근사 계산방법에서 발생되는 오차는 기준물질(알루미늄)로 전환시, 그리고 위성체의 모델링(geometric effect)에서 기인하는 것으로 판단된다.



(a) RADFET-1

(b) RADFET-3

그림 10. 근사계산결과와 3차원 상세계산결과의 비교

표 2. 근사계산과 3차원 상세계산결과 비교

	RADFET-1	RADFET-3	상대오차 (RADFET-3기준)
3차원 상세계산 결과(MCNP-X)	$2.188 \pm 0.026$ rad/hr	$2.092 \pm 0.025$ rad/hr	4.6 %
Sectoring Method	2.562 rad/hr	2.418 rad/hr	6.0 %
Chord-length Method	2.378 rad/hr	2.275 rad/hr	4.5 %

### IV.3. 실험값과 계산값의 비교

궤도상에서 인공위성의 위치에 따라 방사선환경이 변하기 때문에 차폐계산은 궤도상에서의 위치를 따라가며 계산이 수행되어야만 한다. 그러나, 각각의 위치마다 계산을 수행한다는 것은 불가능한 일이므로, 본 논문에서는 위성의 운전기간동안 시간에 대하여 평균된 양성자 플럭스를 계

산하여 일정한 우주방사선환경을 가정하였다. 실험 값과 비교하기 위하여, 우리별1호의 궤도운전을 그림 11과 같이 묘사하였다. 그림 12에서는 궤도운전기간동안 평균된 양성자의 스펙트럼과 SAA에서 얻어진 양성자의 스펙트럼을 비교하였다. 그림 13은 평균스펙트럼을 사용하여 얻어진 dose-depth curve와 fitting 함수를 적용한 결과를 나타내었다.



그림 11. 시뮬레이션에 사용된 우리별 1호의 궤도(최초 25궤도)

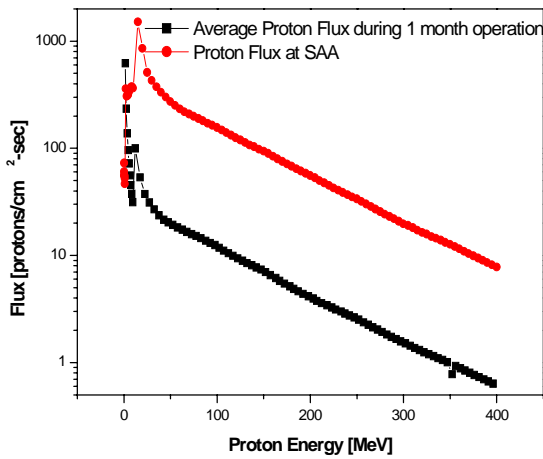


그림 12. SAA에서의 양성자 스펙트럼과 평균 양성자 스펙트럼의 비교

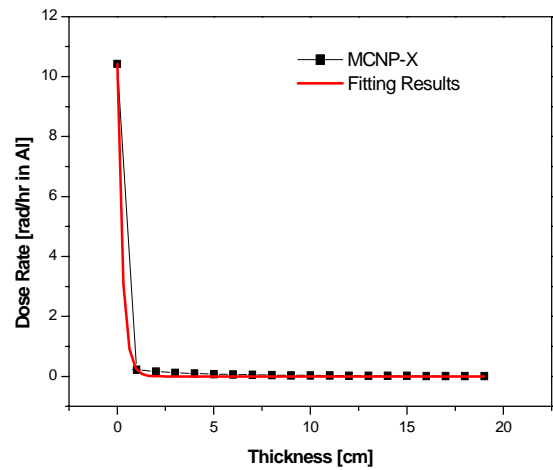


그림 13. 평균스펙트럼이 입사되는 경우 dose-depth curve에 대한 fitting 결과

계산결과와 실험값을 비교하여 표 3에 나타내었으며, 계산결과가 실험값에 비하여 낮은 값을 가짐을 알 수 있다. 이러한 오차는 실험과정, 위성체 모델링, 방사선환경의 모델링 등에서 기인될 수 있다. 그러나, 표 3에 나타난 계산결과는 AP-8 model이 실제 우주방사선환경을 과소평가한다는

보고와 일치하는 결과이다. 그리고, 궤도운전조건을 묘사한 경우, RADFET-1과 RADFET-3의 위치효과는 SAA의 스펙트럼을 사용한 경우보다 큰 값을 나타내었다.

표 3. 근사계산결과와 실험값과의 비교

	RADFET-1	RADFET-3	상대오차 (RADFET-3기준)
실험값	0.771 rad/hr	0.571 rad/hr	35.0 %
Sectoring Method	0.392 rad/hr	0.282 rad/hr	16.6 %
Chord-length Method	0.265 rad/hr	0.235 rad/hr	12.8 %
3차원 상세계산 결과(MCNP-X)	0.189 rad/hr	0.155 rad/hr	22.2 %

## V. 결론

본 논문에서는 우주방사선의 차폐계산을 위해 두 가지 근사 계산방법을 제안하였다. 계산결과는 3차원 상세 계산결과와 실험결과와 비교되었다. 제안된 계산방법을 사용한 계산결과를 두개의 측정위치에서 삼차원 계산결과와 비교했을 때, 위치효과는 매우 잘 일치하였으며, dose-rate계산결과도 보수적인 계산을 하였다. 그러나 궤도운전조건을 묘사하여 계산을 수행한 경우, 실험 값과의 비교에서 큰 오차를 가지고 낮은 값을 보였다. 이러한 오차에 대한 원인은 명확하게 밝혀지지 않았다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(1999-2-306-001-3) 지원으로 수행되었음을 밝히며, 귀중한 위성체 실측자료를 제공해 주신 인공위성센터의 한국과학기술원 민경욱 교수님 연구실의 도움에 깊이 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- [1] Sung-Joon Kim et al., "Simulation of Shielding Effects on the Total Dose Observed in TDE of KISAT-1," Journal of Astronomy and Space Sciences, Vol.18, 2001
- [2] James D. Kinnison et al., "Rad Effect in the New Millenium - Old Realities and New Issues," IEEE NSREC Short Courses, 1998
- [3] Janet Barth, "Modeling Space Radiation Environments," IEEE NSREC Short Courses, 1997
- [4] James W. Haffner, "Radiation and Shielding in Space," North American Aviation, Corp.

Downey, California. (1967)

[5] W.R. Yucker, J.R. Lilley, "CHARGE Code for Space Radiation Shielding Analysis," McDonnell Douglas Astronautics Company, 1969

[6] Richard E. Prael and Henry Lichtenstein, "User Guide to LCS: The Lahet Code System," LANL, 1989.

[7] L.S.,Waters, "*MCNPX User's Manual*, Version 2.1.5", LANL, 1999.