

## 고에너지 우주방사선 차폐계산을 위한 근사모델 비교

신명원<sup>†</sup>, 김명현  
경희대학교 원자력공학과  
경기도 용인시 기흥읍 서천리 1

### COMPARISON OF APPROXIMATE MODELS FOR HIGH ENERGY COSMIC RADIATION SHIELDING CALCULATION

Myung-Won Shin<sup>†</sup> and Myung-Hyun Kim  
Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University,  
Yongin, Gyeonggi, 449-701, Korea  
e-mail: mwshin@korea.com

(Received April 24, 2002; Accepted May 28, 2002)

#### 요 약

인공위성에서의 우주방사선 차폐계산을 위한 근사계산 방법으로 sectoring method를 적용하는 방법과 chord-length 분포를 이용하는 방법을 상세계산 결과와 비교하였다. 저궤도 위성인 우리별 1호를 대상으로 양성자의 차폐계산을 수행하였다. 이때 방사선환경은 AP-8 model을 이용하여 구한 SAA(South Atlantic Anomaly)지역으로 가정하였다. Sectoring method와 chord-length 분포를 이용하는 방법은 양성자가 물질내에서 직진한다는 기본적인 가정을 사용하므로 3차원 상세계산 결과와 비교하여 어느 정도의 오차를 갖는다. 그러나 우리별 1호를 대상으로 수행된 계산 결과에서 두 계측기 위치에서의 피폭량 예측은 2가지 근사모델이 모두 상세계산 결과와 근사하게 일치하였다.

#### ABSTRACT

Two approximate calculation models for a cosmic radiation shielding in satellite are compared with detailed 3-dimensional calculation results. One is a sectoring method and the other is a chord-length distribution method. Shielding calculation is performed for KITSAT-1 under the assumed environment at SAA (South Atlantic Anomaly) location with AP-8 radiation spectrum model. When both approximate models are applied, calculation error is expected compared with 3-D detailed geometry calculation because of straight knock-on assumption neglecting the deflection of incident proton. However, both approximate models showed good agreements with 3-dimensional detailed Monte Carlo calculation in two dose detector locations.

*Keywords:* sectoring method, chord-length method

---

<sup>†</sup>corresponding author

표 1. KITSAT-1의 궤도요소.

궤도자료	값
근지점 고도	1306.1km
원지점 고도	1326km
궤도 경사각	66.08°
크기	352 × 356 × 670mm <sup>3</sup>
무게	48.7kg

## 1. 서 론

인공위성의 내부에 있는 반도체는 우주방사선에 매우 민감하므로 위성의 수명과 성능을 결정하는 중요한 부품이다. 특히 최신의 상용반도체들은 내방사선 설계가 들어있지 않은 경우 고 에너지의 우주방사선 환경에서 손상가능성이 매우 높아진다. 따라서, 반도체에 대한 우주방사선의 차폐계산은 인공위성의 설계단계에서 중요한 첫 단계가 된다. 저궤도 우주방사선 환경의 경우 양성자와 그에 따른 이차입자들인 중성자가 주된 차폐계산의 대상이 된다. MCNP-X나 LAHET과 같은 Monte Carlo code들은 양성자와 같은 고에너지 하전입자의 수송해석에 사용될 수 있으나, 계산시간이 너무 길고 우주환경의 특수성 때문에 아직 사용되지 못하였다. 우주방사선환경은 위성의 운항궤도에 따라 급격히 변화하여 장시간의 운항시간에 대한 해석이 요구된다. 따라서 근사모델이 개발되어 사용되어 왔다. 본 논문에서는 근사계산 방법의 하나인 sectoring method와 chord-length 분포를 이용하는 근사계산모델을 개발하고, 상세계산 결과와 비교하여 개발된 계산방법의 사용 가능성을 평가하고자 한다.

## 2. 우주방사선 환경

인공위성은 궤도의 종류에 따라 정지궤도 위성, 중궤도위성 그리고 저궤도위성으로 분류된다. 저궤도는 지구자기장인 Van Allen belt의 아래 고도에 해당된다. 이곳의 방사선 환경은 양성자의 경우 수십에서 수백 MeV급의 에너지준위에  $10^5 \text{ #cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 flux level로 분포하고, 전자의 경우는 MeV급의 에너지준위에  $10^7 \text{ #cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 flux level로 분포한다. 이러한 방사선 환경의 해석을 위해 지난 수십년간 NASA가 중심이 되어 이 지역의 방사선환경을 조사하여 AP, AE 모델을 만들었다(Barth 1997). 가장 최근에 만들어진 모델이 AP(E)-8 모델이며, 저궤도위성에 대한 방사선환경의 해석에 많이 사용된다. 본 논문에서는 우리별 1호를 대상으로 차폐계산을 수행하였다. 실제의 경우, 우리별 1호는 표 1과 같은 궤도요소를 가지며, 방사선 스펙트럼은 위성의 궤도에 따라 연속적으로 변하게 되지만, 본 논문에서는 우리별 1호(KITSAT-1)의 궤도중 방사선의 강도가 가장 높은 SAA(South Atlantic Anomaly)에서의 스펙트럼으로 고정하여 사용하였으며, 스펙트럼의 계산에는 그림 1과 같이 AP-8 model을 사용하는 IGRF model과 RADBELT 전산체계를 이용하였으며 태양활동이 극소기(Solar minimum)일때의 조건을 사용하였다.

## 3. 차폐계산을 위한 위성체 모델링

본 논문에서는 우리별 1호를 대상으로 차폐해석을 수행하였다. 우리별 1호는 그림 2에 보여지는 것처럼 매우 복잡한 구조를 가지나, 기본적으로 stack 구조를 가지며 대부분의 구조체가 알루미늄

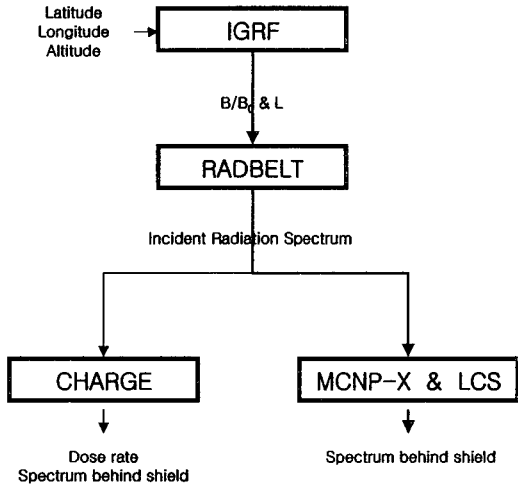


그림 1. 우주방사선 차폐계산을 위한 전산체계.

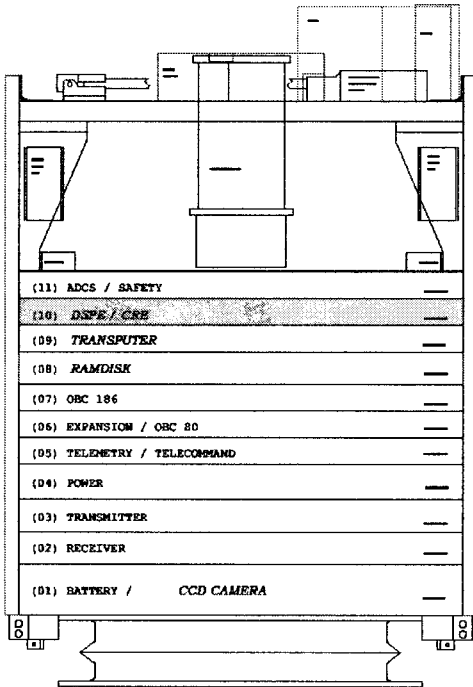


그림 2. KITSAT-1의 개략도.

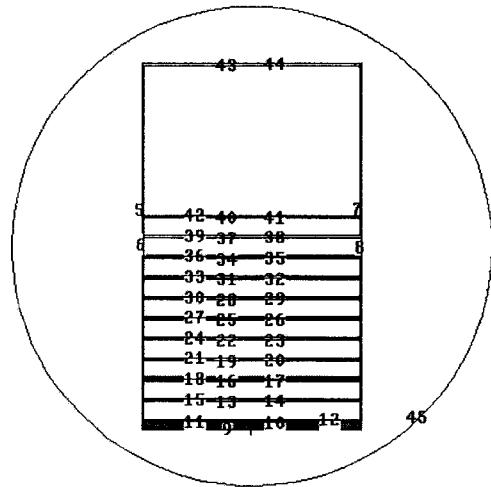


그림 3. MCNP(또는 LCS) modeling 결과.

높으로 이루어져 있기 때문에 우리별 1호의 모델링은 다양한 크기의 직사각형 알루미늄판들과 에폭시 판들로 적절히 조합하여 만들어 졌으며, 방사선환경에 대한 영향은 DSPE/CRE stack에 있는 RADFET-1과 RADFET-3에서 평가된다(Kim et al. 2001). 이러한 구조를 완벽히 묘사한다 하더라도 확실하지 않은 물질의 자료에 의해 계산오차를 유발할 수 있다. 본 논문의 목적은 근사계산방법의 효과를 평가하는 것이므로 그림 3와 같이 비교적 간단하게 유사한 형태의 모델에 대하여 계산을 수행하였다. RADFET-1은 위성체의 모듈박스의 외벽가까이에 위치하며, RADFET-3은 중심부에 위치한다. 차폐계산은 위성체내에서 다른 위치에 있는 2개의 Total Ionizing Dose 측정기 위치에 대하여 dose가 평가되었으며, 구조물은 알루미늄과 에폭시만으로 구성되어 있다고 가정하였다

#### 4. 계산모델

본 논문에서는 우리별 1호에 대한 차폐계산이 chord-length 분포를 이용한 근사모델, sectoring method를 이용한 근사모델 그리고 삼차원 Monte Carlo 상세모델에 의해 수행되었으며, 각각의 계산결과는 삼차원 상세계산결과인 MCNP-X를 사용한 결과와 비교하였다.

##### 4.1 근사계산 모델

근사계산 방법은 상세계산을 위한 3차원 Monte Carlo 방법의 대체방법으로 사용되며, 복잡한 구조의 위성을 여러 개의 일차원 평판구조로 표현한다. 본 논문에서는 근사계산 방법으로 sectoring method와 chord-length 분포를 이용한 근사계산 방법을 적용하였다. 근사계산 방법을 적용할 때, 중요한 관점은 일차원 평판의 두께를 산정하는 과정과, 정확한 dose-depth curve를 적용하는 것이 중요하다. Chord-length 분포를 이용하는 방법과 sectoring method를 이용하는 방법은 두가지 모두 dose-depth curve를 사용하는 것은 동일하나, 일차원 평판구조의 두께를 정하는 방법에 의해 두가지 방법이 확연히 구분된다.

##### 4.1.1 Sectoring Method를 이용한 근사계산 모델

Sectoring method는 source의 표면상에서 미리 정해진 위치에서 발생된 입자가 위성체로 입사될 때 target의 위치와 차폐체의 구조를 고려하기 위해 ray tracing 방법을 사용하여 beam의 실제 차폐체의 통과길이를 계산하였으며, 구해진 차폐체의 두께는 각 sector의 평균두께로 적용되어 계산이 수행되며, source표면에서 beam이 차지하는 면적 분율을 dose 계산시에 normalization factor로 적용하였다. Sectoring method를 사용하여 원하는 위치에서의 dose를 계산하기 위한 순서는 아래와 같다(Kinnison 1998).

1. 계산대상이 되는 구조물의 geometry를 정의한다. 이때 계산에 사용되는 모든 물질을 포함한다.
2. Dose 계산이 되는 위치를 중심으로 구조물을 여러 개의 solid sphere로 나눈다.
3. 각각의 sector에서 물질의 평균두께를 계산한다. 만일 서로 다른 물질이 포함되어 있다면, 면적밀도를 사용하거나, 표준이 되는 물질인 알루미늄과 동등한 두께로 전환한다.
4. Dose-depth curve를 이용하여 각 sector에서 구해진 평균두께에 의한 dose를 계산한다. 이때, 각각의 sector에서 구해진 normalization factor가 고려되어야 한다. 각각의 sector에서 구해진 dose rate를 식 1에 적용하여 원하는 위치에서의 dose를 평가한다.

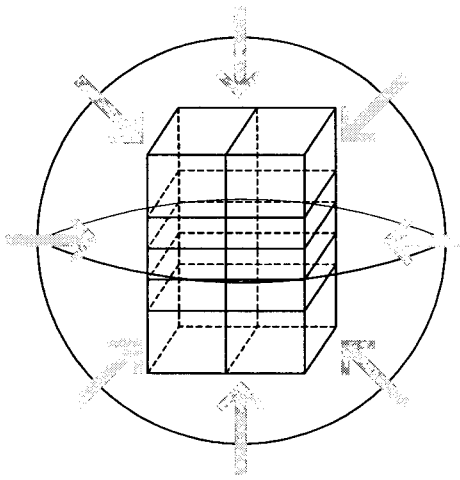


그림 4. 양성자가 각 방향에서 위성체로 입사되는 형태.

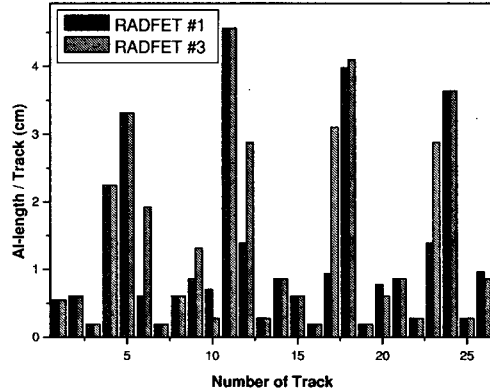


그림 5. 각 sector에서의 빔이 통과한 알루미늄의 두께.

$$\dot{D} = \sum_{i=1}^N [\dot{D}(t_i) \times (A.F.)_i] \tag{1}$$

여기에서  $\dot{D}$ 는 total dose rate,  $N$ 은 sector의 개수,  $A.F.$ 는 source표면에서 입사빔이 차지하는 면적의 분율이다.

그림 4와 같이 구형의 source 표면에서 양성자가 위성체로 입사되어 RADFET-1과 RADFET-3에 도달할 때까지 실제 알루미늄 차폐체를 통과하는 길이를 여러 개의 방향에 대하여 계산을 수행하였다. 이때 입사양성자와 차폐체와의 충돌에 의한 입사방향의 편향은 없으며, 차폐체와 입사양성자와의 반응에 의해 생성되는 이차입자 또한 입사방향으로 진행하는 것으로 가정하였다. 실제의 경우, 고에너지 입자는 매질내에서 직진한다는 가정이 타당하지만, 저에너지의 양성자의 경우 매질과의 충돌에 의해 어느 정도의 편향성을 가진다. 이들 저에너지의 양성자는 고에너지의 양성자보다 큰 LET 값을 가진다. 그림 5에서는 26개의 sector로 나눈 경우, 각 sector에서 실제 양성자가 알루미늄을 통과하는 길이를 나타내었다. RADFET-3의 경우가 약 4.4%정도 더 많은 두께의 알루미늄의 차폐체를 통과하는 것으로 나타났다. 이러한 이유로 RADFET-1에서의 dose값이 RADFET-3에서의 값보다 높은 값을 갖는다.

#### 4.1.2 Chord-length 분포를 이용한 근사계산 모델

Chord-length 분포 계산시, 구형의 source표면의 임의의 위치에서 발생된 입사입자가 위성체로 입사될 때, RADFET까지의 거리를 계산하여 두께의 분포가 구해진다. 입사입자의 발생위치는 구의 표면상에서 random 함수를 사용하여 무작위로 추출되며, 각각의 입자에 대하여 계산된 차폐체의 두께는 그림 6과 같은 분포를 갖도록 계산되어진다. Sectoring method의 경우와 마찬가지로, 입사입자와 생성된 이차입자는 입사입자의 진행방향으로 차폐체 내에서 직진하는 것으로 가정

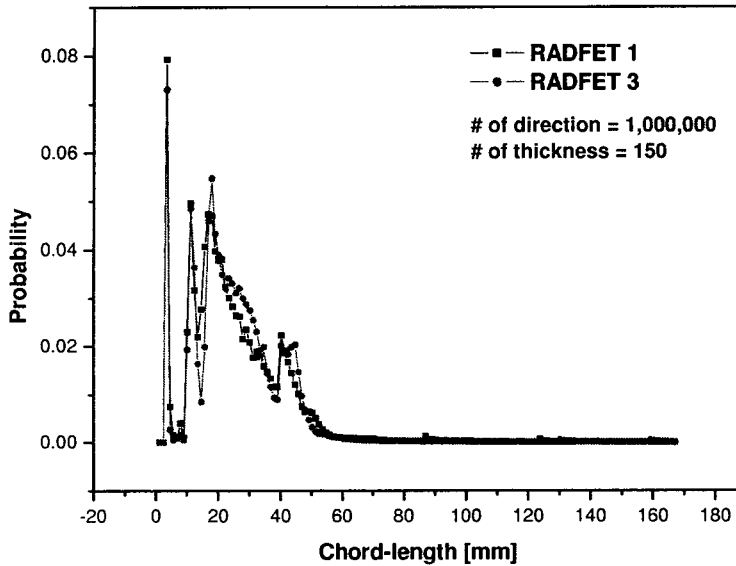


그림 6. RADFET-1과 RADFET-3의 chord-length 분포.

된다. 그림 6에서는 구의 표면에서 임의로 추출된 1,000,000개의 위치로부터 계산된 차폐체의 두께(0.0mm ~ 167.0mm)를 150개의 두께로 구분하여 나타내었다. 각각의 두께에 대한 확률은 dose 계산시에 normalization factor로 사용되어진다. Chord-length 분포를 사용하여 target의 dose를 계산하는 과정은 아래와 같다.

1. 계산대상이 되는 구조물의 geometry를 정의한다. 이때 계산에 사용되는 모든 물질을 포함한다.
2. Random 함수를 사용하여 source 표면에서의 입자의 발생위치를 결정한다.
3. 입자의 발생위치에서 target까지 진행하는 동안의 차폐체의 통과길이를 계산한다. 만일 서로 다른 물질이 포함되어 있다면, 면적밀도를 사용하거나, 표준이 되는 물질인 알루미늄과 동등한 두께로 전환한다.
4. 각각의 발생위치에 대하여 계산된 차폐체의 두께를 정해진 두께의 갯수에 대하여 두께 분포를 구한다.
5. Dose-depth curve를 이용하여 각 평판의 두께에 의한 dose를 계산한다. 이때, 각각의 sector에서 구해진 normalization factor가 고려되어야 한다.
6. 각각의 두께에 대하여 계산된 dose는 식 2를 사용하여 원하는 위치에서의 dose를 평가한다.

$$\dot{D} = \sum_{i=1}^N [\dot{D}(t_i) \times (\text{probability})_i] \quad (2)$$

여기에서  $\dot{D}$ 는 total dose rate,  $N$ 은 두께의 갯수, probability는 source 표면에서 발생한 입자가 차폐체 두께  $t_i$ 를 통과할 확률 나타낸다.

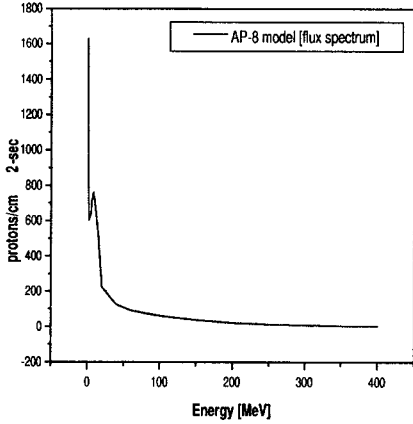


그림 7. KITSAT-1의 궤도 중 SAA 영역에서의 양성자 스펙트럼.

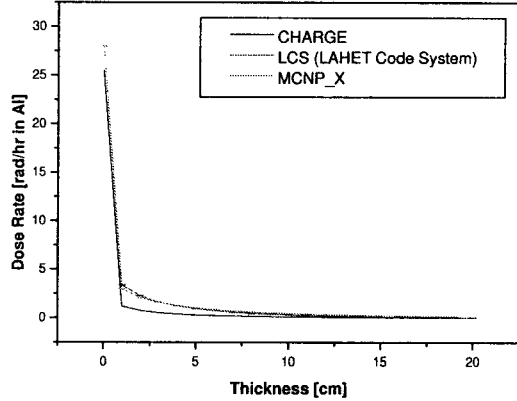


그림 8. SAA 영역에서의 양성자 스펙트럼 dose-depth curve.

#### 4.1.3 Dose-depth curve 계산

위에서 언급되었듯이, 근사계산 방법을 사용하는 경우에, 정확한 dose-depth curve를 적용하는 것이 중요하다. 실제의 경우, 위성이 궤도운전을 하는 동안 방사선 환경이 연속적으로 변하게 되지만, 본 연구에서는 우리별위성의 궤도 중 방사선의 강도가 가장 높은 SAA위치에서의 양성자 스펙트럼을 고정하여 사용하였으며, 그림 7에는 AP-8 model에 의해 구해진 SAA에서의 양성자 스펙트럼을 나타내었고, 그림 8에서는 MCNP-X와 LAHET 그리고 CHARGE에서 계산된 양성자 플럭스를 사용하여 식 3에 의해 계산된 dose-depth curve를 나타내었다(Haffner 1967).

$$\dot{D}(x) = \int_0^{E_{max}} [(\mu_a/\rho)(E) \times E \times \phi(x, E) \times C] dE \quad (3)$$

여기에서  $\mu_a$ 는 차폐물질의 질량감쇄계수,  $\rho$ 는 차폐물질의 밀도( $g/cm^3$ ),  $\Phi(E)$ 는 양성자의 플럭스이다.

LAHET과 MCNP-X를 사용하여 계산된 결과는 거의 같은 값을 가졌으나, CHARGE에 의해 생성된 값은 다른 코드의 계산값에 비해 어느 정도의 오차를 보인다. 이는 계산방법과 DCF(Dose conversion factor)의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. DCF는 MCNP-X와 LAHET의 경우 ICRU Report 49의 자료를 사용하였으며, CHARGE의 경우는 code내에 내장된 값을 사용하였다. 계산에 사용된 MCNP-X와 LAHET code는 식 4에 나타낸 하전입자의 수송방정식을 Monte Carlo방법을 사용하여 해석하며 3차원 계산 및 이차입자의 해석이 가능한 코드이다.

$$\begin{aligned} & \Omega \cdot \nabla \Phi_j(r, \Omega, E) - \frac{\partial}{\partial E} [S_j(E) \Phi_j(r, \Omega, E)] + \sigma_j(E) \Phi_j(r, \Omega, E) \\ & = \int \sum_k \sigma_{jk}(\Omega, \Omega', E, E') \Phi_k(r', \Omega', E') d\Omega' dE' \end{aligned} \quad (4)$$

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

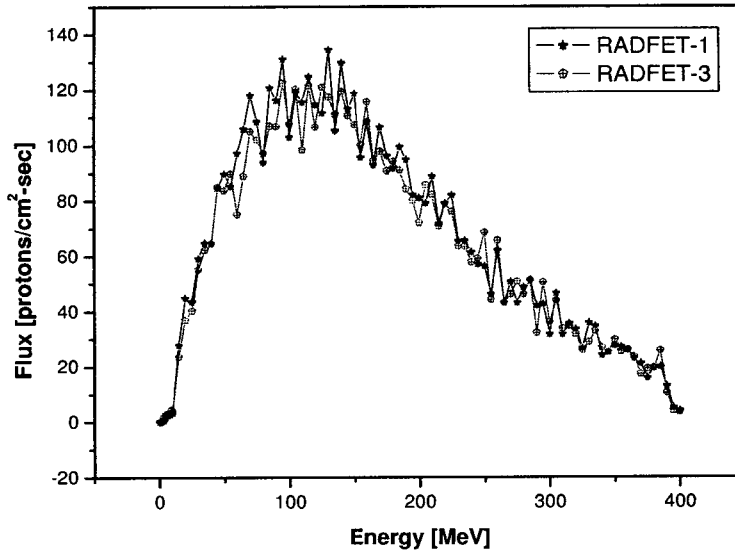


그림 9. MCNP\_X로 계산된 RADFET-1과 RADFET-3에서의 양성자 플럭스 스펙트럼.

CHARGE code의 경우는 현재 우주방사선 해석에 주로 사용되는 SPACE\_RADIATION code와 마찬가지로 식 5와 같은 감쇄공식을 사용하는 일차원 코드이다(Yucker & Lilley 1969). 그러나 SPACE\_RADIATION의 경우는 입사입자에 대한 이차입자의 생성을 무시하고 계산을 수행한다.

$$\Phi(E) = \Phi_0(E) \times e^{\Sigma_{N.E.}(E) \cdot t} \quad (5)$$

여기에서  $\Phi_0(E)$ 는 입사양성자의 플럭스,  $\Sigma_{N.E.}(E)$ 는 양성자의 non-elastic cross-section이다.

이전의 연구(Lee 2001)에서 우리별 1호에 대한 TID(Total Ionizing Dose)를 계산한 결과, CHARGE code를 사용한 경우가 SPACE\_RADIATION을 사용한 결과에 비해 오차가 3.7%로 잘 일치함을 알 수 있었다. CHARGE code에서는 cascade model과 evaporation model을 사용하여 이차입자의 생성을 간단하게 묘사하고 있다.

#### 4.2 상세계산 내용 및 결과

3차원 상세계산에는 결정론적 방법과 Monte Carlo 방법을 사용하는 code를 선택할 수 있으나, 현재 결정론적 방법을 사용하는 code중 고에너지 하전입자의 수송해석이 가능한 code는 없다. 따라서 본 논문에서는 Monte Carlo 방법을 사용하고 삼차원해석이 가능한 MCNP-X와 LCS(LAHET Code System)을 상세계산에 사용하였다. 본 연구에서는 우리별 1호의 궤도 중 SAA(South Atlantic Anomaly)에서의 방사선 스펙트럼을 사용하였다. 아래의 그림 9에서는 MCNP-X로 계산된 RADFET-1과 RADFET-3에서의 양성자 플럭스 스펙트럼을 나타내었다. RADFET-1은 위성체 모듈박스의 외벽 가까이에 위치하며, RADFET-3은 중심부에 위치하기 때문에 RADFET-3에서의 플럭스가 전반적으로 낮은 값을 가진다. Monte Carlo 계산시 전체적인 상대오차는 10% 미만으로 유지되어 수렴하였다. 이를 dose로 환산시 RADFET-1에서는 2.188 rad/hr의 값을 가졌고, RADFET-3에서는 2.092의 값으로, RADFET-3에서의 값이 RADFET-1에 비하여 약 4.6% 낮은 값을 보였다. 이



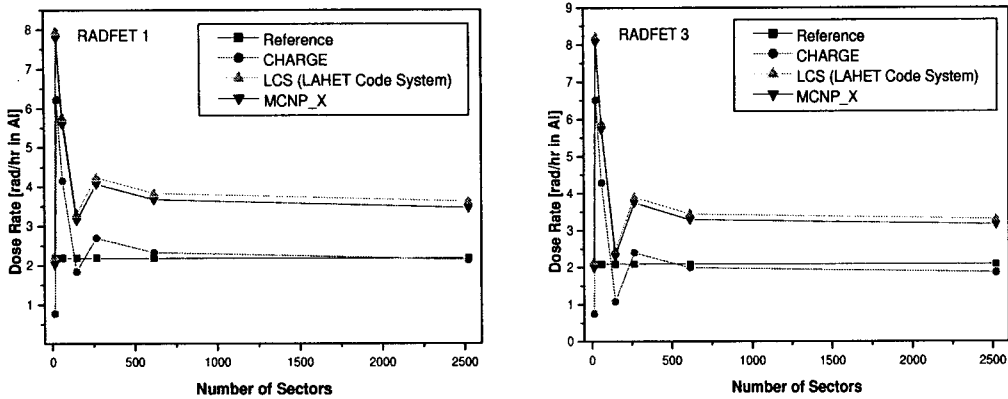


그림 10. RADFET-1과 3에서의 sectoring method를 적용한 결과와 상세계산 결과비교.

표 2. Sectoring method를 적용한 경우 우리별 1호의 차폐계산 결과.

	RADFET-1 위치	RADFET-3 위치	위치간의 상대오차(RADFET-3기준)
상세계산결과	2.188 rad/hr	2.092 rad/hr	4.6%
MCNP-X	3.468 rad/hr	3.163 rad/hr	9.6%
근사계산결과	LCS	3.630 rad/hr	9.6%
CHARGE	2.141 rad/hr	1.870 rad/hr	14.5%

는 RADFET-3가 stack의 중심부에 위치하여 차폐효과가 크게 나타나기 때문이다. 이는 실측치와 비교했을 때 RADFET-1이 RADFET-3보다 35% 높은 값을 보이는 결과와 같은 경향을 나타낸다. 실측치와 계산값의 차이가 크게 나타나는 이유는 본 연구에서는 전자에 대한 영향은 평가하지 않았으며, 또한 SAA이외의 지역에서는 입사되는 양성자의 플럭스가 매우 낮은 값을 가지므로 stack의 중심부에 위치한 RADFET-3에 영향을 미치지 못하기 때문으로 판단된다. 같은 계산을 LCS(LAHET Code System)를 사용하여 수행하였으나(Prael & Lichtenstein 1989), MCNP-X와는 달리 source 사용조건의 제한과 컴퓨터 메모리의 문제로 인해 신뢰성을 갖는 결과를 얻을 수 없었다. 본 연구에서는 MCNP-X의 계산결과를 근사계산 결과의 기준 자료로 사용하고자 한다.

### 5. SECTORING METHOD를 이용한 근사모델 계산결과 평가

그림 10에서는 sector의 수가 증가함에 따라 sectoring method에 의해 계산된 값과 3차원 상세계산 결과값을 비교하였다.

본 논문에서는 sector의 갯수를 14에서 2522개까지 증가시키면서 계산을 수행하였다. Sector의 수가 증가할수록 reference 값에 근접하고 있지만 어느 정도의 오차를 보였다. 이는 sectoring method 적용시 입사양성자와 매질과의 충돌과정에서의 운동방향의 편향을 무시하는 가정에서 가장 크게 기인하는 것으로 판단된다. 표 2에서는 상세계산결과와 sectoring method를 적용한 경우를 비교하였다. 상세계산결과와 95%신뢰도 구간에서 RADFET-1과 3의 최대오차가 약 19%임을 고려할 때, sectoring method를 적용한 근사계산 결과는 RADFET-1과 3의 위치효과를 잘 나타내고 있다.

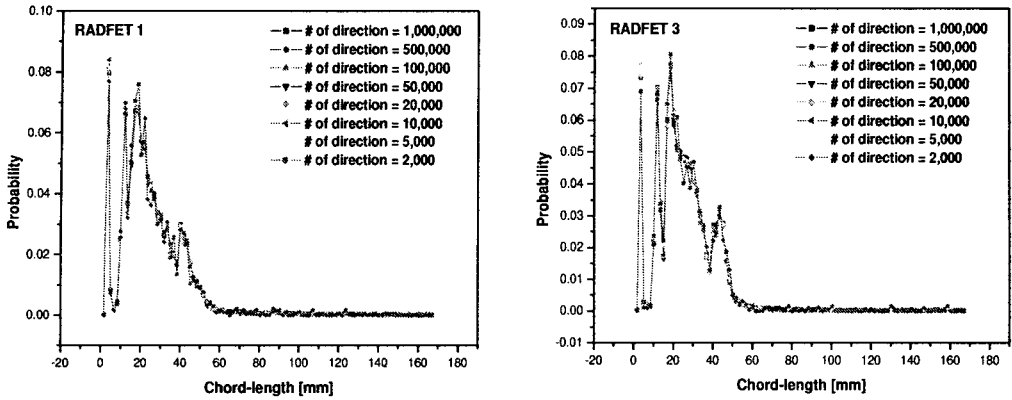


그림 11. RADFET1과 RADFET3에 대한 입사방향의 갯수에 따른 chord-length 분포비교.

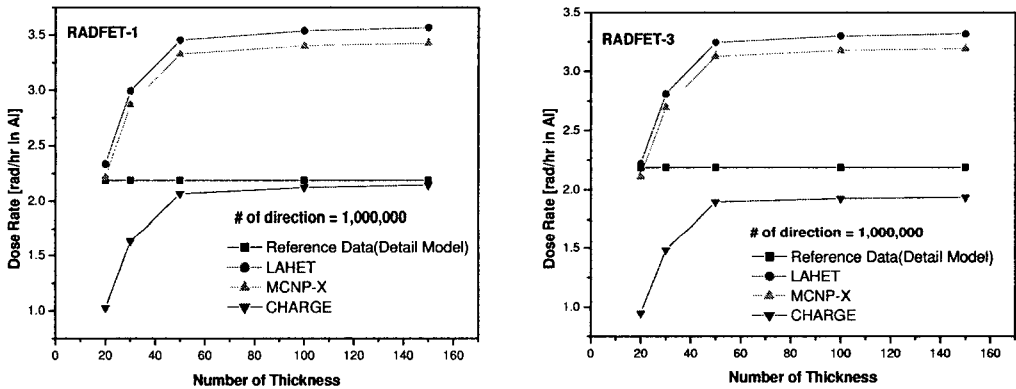


그림 12. RADFET1과 RADFET3에 대한 두께분포의 갯수에 따른 dose-rate 계산결과.

### 6. CHORD-LENGTH 분포를 이용한 근사모델 계산결과 평가

그림 11에서는 source 표면에서 임의로 추출된 위치로부터 RADFET까지의 차폐체의 두께를 계산한 chord-length 분포를 나타내었다. 그림에서와 같이 입사방향의 개수에는 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 이러한 결과는 그림 12에서도 같은 경향을 나타낸다. 입사방향의 갯수보다, 두께분포를 나타내는 두께의 갯수가 dose 계산결과에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그리고, dose 계산시 적용된 DCF에 의해 CHARGE와 MCNP-X, LAHET의 계산결과와의 차이가 있음을 보인다.

Chord-length분포를 이용한 근사계산에서도 sectoring method와 마찬가지로 상세계산결과와 어느 정도의 오차를 포함하고 있다. Sectoring method의 경우와 마찬가지로 입사양성자가 차폐체와의 충돌에 의한 편향이 없다는 가정에 의해 그림 12와 같은 오차가 발생되고 있다. 그러나 표 3에 나타나듯이 RADFET-1과 RADFET-3의 위치효과는 잘 나타내고 있음을 알 수 있다.

표 3. Chord-length 분포를 이용한 우리별 1호의 차폐 계산 결과.

	RADFET-1 위치	RADFET-3 위치	위치간의 상대오차(RADFET-3기준)
상세계산결과	2.188 rad/hr	2.092 rad/hr	4.6%
MCNP-X	3.427 rad/hr	3.190 rad/hr	7.5%
근사계산결과	LCS 3.566 rad/hr	3.318 rad/hr	7.4%
CHARGE	2.143 rad/hr	1.936 rad/hr	10.7%

표 4. 우리별 1호의 dose-rate 계산 결과 요약.

	RADFET-1 위치	RADFET-3 위치	위치간의 상대오차(RADFET-3기준)
상세계산결과	2.188 rad/hr	2.092 rad/hr	4.6%
근사계산결과	MCNP-X 3.468 rad/hr	3.163 rad/hr	9.6%
(Sectoring method 사용)	LCS 3.630 rad/hr	3.312 rad/hr	9.6%
CHARGE	2.141 rad/hr	1.870 rad/hr	14.5%
근사계산결과	MCNP-X 3.427 rad/hr	3.192 rad/hr	7.5%
(Chord-length 분포 사용)	LCS 3.566 rad/hr	3.318 rad/hr	7.4%
CHARGE	2.143 rad/hr	1.936 rad/hr	10.7%
실측치	18.50 rad/yr	13.70 rad/yr	35.04%

## 7. 결 론

본 논문에서는 고에너지 양성자 차폐계산을 위한 근사계산방법을 개발하였으며, 그 결과를 상세계산결과와 비교하였다. 표 4에서는 상세계산결과와 sectoring method를 적용한 결과, chord-length 분포를 사용하여 계산한 결과 그리고, 실측치를 비교하였다. 표 4에 나타난 실측치는 1년동안의 궤도운전에 대하여 평가된 값이고 또한 RADFET-3의 경우 외벽 가까이에 위치하여 전자에 의한 효과도 무시할 수 없다. 따라서, 계산값은 SAA 위치가 고정된 값이므로 계산값과 실측치의 절대값의 비교는 무의미하다. 표 4의 결과에서 알 수 있듯이, chord-length 분포를 사용한 경우가 상세계산결과에 조금 더 가까운 결과를 보였으나, sectoring method를 사용하는 경우보다 계산과정이 추가되는 단점이 있다. 두가지 근사계산 방법 모두 사용되는 기본적인 가정에 의한 오차는 있지만, 위성체 내부의 2개의 위치효과는 상세계산 결과와 비교하여 보았을 때 잘 대변하였다. 따라서 본 논문에서 사용된 sectoring method와 chord-length 분포를 사용하는 방법은 보수적인 근사계산 방법으로서 인공위성의 차폐계산에 효과적으로 사용될 수 있는 것으로 판단되었다.

**감사의 글:** 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(1999-2-306-001-3) 지원으로 수행되었음을 밝히며, 귀중한 자료를 제공해 주신 한국과학기술원 민경욱 교수님 연구실의 도움에 깊이 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- Barth, J. 1997, IEEE NSREC Short Courses (New Jersey: IEEE Publishing Services), pp.22-48
- Haffner, J. W. 1967, Radiation and Shielding in Space (New York: Academic Press), pp.107-175
- Kim, S. J., Shin, Y. H., & Min, K. W. 2001, JA&SS, 18, 71
- Kinnison, J. D. 1998, IEEE Short Courses (New Jersey: IEEE Publishing Services), pp.14-16
- Lee, S. Y. 2001, Master Thesis, Kyung Hee University
- Prael, R. E. & Lichtenstein, H. 1989, User Guide to LCS: The Lahet Code System (New Mexico:

Los Alamos National Laboratory), pp.5-20

Yucker, W. R. & Lilley, J. R. 1969, CHARGE Code for Space Radiation Shielding Analysis (CA: McDonnell Douglas Astronautics Co.), pp.6-24