

우주방사선 차폐의 근사계산 모델의 개발

Development of Approximate Calculation Model for Space Radiation Shielding

이상윤, 신명원, 김명현

경희대학교
경기도 용인시 기흥읍 서천리

요약

본 연구에서는 우주방사선 차폐코드인 CHARGE 코드와 저궤도위성의 방사선 환경을 계산하는 SHELLIG와 RADBELT 코드를 결합하여 우주방사선에 대한 차폐계산 체계를 개발하였다. 계산체계의 검증을 위해서 Monte Carlo 방법을 사용한 LCS(LAHET Code System)와 범용 코드인 SPACE_RADIATION을 사용 비교하였다. 계산 결과 SHELLIG-RADBELT-CHARGE의 계산체계의 적용 타당성이 입증되었으나, 양성자의 반응단면적 및 이차 입자에 대한 해석에 대한 개선이 필요함을 발견하였다. 또한 이차입자인 중성자에 대한 보다 정확한 해석을 위해서 새로운 근사모델인 CHARGE-ANISN 계산체계를 개발하였다. 고에너지 양성자에 의해 생성되는 이차중성자에 대해 자세한 계산을 수행하기 위해서 중성자 수송을 ANISN으로 추가 계산하도록 하였다. 비교 결과 CHARGE코드만으로 계산하면 중성자에 대해 과대 평가함을 확인하였다

Abstract

In this study, approximate calculation code system for space radiation shielding for LEO satellite was developed by using code CHARGE with SHELLIG and RADBELT code, which predict space radiation spectrum at the satellite orbit. This calculation system was verified by LCS(LAHET Code System) using Monte Carlo method and SPACE_RADIATION. As a result of verification, it was found that SHELLIG-RADBELT-CHARGE system is suitable for space radiation shielding calculation. However it was found that modification and improvement are needed in proton cross section evaluation and secondary particle analysis. For an accurate calculation of neutron, new approximate calculation model, CHARGE-ANISN, was developed. The calculation of Neutron production from protons was performed by ANISN code. It was known that CHARGE code has overestimated in neutron dose calculation.

1. 서론

최근 우리나라에서도 무궁화 위성과 우리별 위성을 발사하면서 인공위성 분야에 대한 연구 및 사업활동이 본격적으로 진행되고 있다. 그러나 인공위성의 설계기술은 선진외국과는 달리 아직 초보단계에 있다. 위성체의 우주방사선 차폐설계의 경우, 국내에서는 경험이 거의 전무하며, 적절한 차폐 계산 방법론 및 차폐체 설계 방안도 수립되어 있지 않다. 인공위성의 부품 중에서 반도체 소자는 인공위성의 수명 및 성능 결정에 중요한 역할을 한다. 그러나 이러한 반도체 소자는 방사선에 의해 손상을 입을 수 있다. 우주방사선과 반도체 소자와의 반응은 크게 TID(total ionizing dose), displacement damage 그리고 SEE(Single event effect)의 세가지로 구분된다. 이중 TID는 위성이 궤도를 운항하면서 반도체 소자내에 축적되는 방사선의 양으로, 이는 반도체의 수명을 결정하는 가장 중요한 인자가 된다. 위성체 내부의 반도체 소자의 TID해석에 있어 입사 방사선의 해석과 함께 위성체 차폐벽을 투과한 방사선 입자에 의한 이차방사선에 의한 효과도 반드시 수반되어야 한다. 이러한 차폐해석을 하기 위해서 CHARGE 코드를 사용하였다. CHARGE 코드는 400 MeV까지의 고에너지 하전입자의 해석이 가능하며 또한 이차입자에 대한 해석도 가능하다. 본 논문에서는 CHARGE 계산모델의 검증계산 그리고 이차 중성자의 효과를 보다 정확히 묘사할 수 있는 CHARGE-ANISN 연결체계를 개발하였다. 그리고 실제 인공위성의 차폐계산을 수행할 수 있는 SHELLIG-RADBELT-CHARGE 전산체계의 적용 타당성 평가를 수행하였다.

2. 저궤도 위성의 우주 방사선 환경

인공위성은 궤도의 종류에 따라 정지궤도 위성, 중궤도 위성, 그리고 저궤도 위성으로 구분된다. 최근 우리나라에서 발사된 우리별 위성, 무궁화 위성 그리고 아리랑 위성은 모두 저궤도 위성으로 분류된다. 그러나 이러한 위성의 설계시 우주방사선에 대한 자세한 차폐계산은 수행되지 않았다. 저궤도에서의 우주 방사선환경은 Van Allen Belt내에 속하게 된다.^[1] Van Allen Belt는 외층과 내층의 두개의 층으로 구성되며 대부분의 저궤도 위성은 내층을 통과하게 된다. 이 곳의 방사선환경을 보면 양성자의 경우 수십에서 수백MeV급의 에너지에 $10^5\#/cm^2 \cdot sec$ 의 flux level로 분포하고, 전자의 경우는 MeV급의 에너지에 $10^7\#/cm^2 \cdot sec$ 의 flux level로 분포한다. 이러한 방사선 환경의 해석을 위해 지난 수십년 동안 NASA가 중심이 되어 이 지역의 방사선 환경을 조사하여 AP, AE 모델을 만들었다. 가장 최근에 만들어진 모델이 AP(E)-8이며, 현재 우주 방사선 환경, 특히 저궤도 위성에 대한 방사선 환경에 많이 쓰여지고 있다. 본 연구에서도 AP(E)-8 모델을 사용하여 위성의 방사선 환경을 묘사하였으며, 우리별 1호의 궤도상에서의 방사선 스펙트럼을 사용하여 차폐계산을 수행하였다.

3. 전산체계

Van Allen Belt내의 근사 차폐해석에 사용될 수 있는 전산 코드로는 SPACE_RADIATION, CHARGE, SHIELDOSE, HEMES-KFA등 여러 가지가 있다. 고에너지의 우주방사선이 차폐체와 반응하면서 생성되는 이차입자의 효과를 무시할 수 없으므로 본 논문에서는 양성자를 포함한 고에너지 중하전 입자의 해석이 가능하고, 고에너지 입자에 의한 이차입자의 해석이 가능한 CHARGE를 사용하여 근사 계산을 수행하였다. CHARGE 검증을 위해서 Monte Carlo 방법을 사용하여 LANL에서 개발한 LCS(Lahet Code System)을 사용하여 검증계산을 수행하였다. 또한 고에너지 양성자에 의한 이차입자인 중성자의 보정을 위하여 ORNL에서 개발된 1-D discrete ordinates transport code인 ANISN를 사용하였다. 그리고 우주방사선의 에너지 스펙트럼의 생산을 위해 SHELLIG와 RADBELT를 CHARGE와 연계하였다. 이러한 SHELLIG-RADBELT

-CHARGE 전산체계의 적용타당성을 평가하기 위해서 현재 인공위성 차폐계산에 많이 사용하고 있는 SPACE_RADIATION 코드와 비교하였다.

3.1 CHARGE 코드의 계산 모델

3.1.1 양성자 계산 모델^[2]

CHARGE에서의 dose rate 은 아래의 식 1과 같이 구하여진다.

$$\text{Dose rate} = C \int dE N(E) \frac{dE}{dX} R(E, \frac{dE}{dX})$$

where C : Dose conversion constant
dE/dX : Energy loss rate (식 1)
R : Quality factor
N(E) : Flux at the dose point

위 식 1에서 N(E)는 양성자 flux를 나타내는데 CHARGE에서는 이 flux는 다음의 간단한 계산식에 의해서 계산되어진다.

$$\Phi(E) = \Phi_0(E) \times e^{-\Sigma_R \cdot t} \quad (\text{식 2})$$

where $\Phi_0(E)$: Incident proton flux
 Σ_R : Proton removal cross-section
t : Thickness

또한 식 1에서 dE/dX는 energy loss rate를 나타내는데 이는 양성자가 물질과 반응하며 물질 속을 dx만큼 지나갈 때 잃은 에너지를 나타낸다. CHARGE에서 사용되는 energy loss rate 식은 식3과 같다.

$$-\frac{dE}{dX} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m^2} NB \quad (\text{식 3})$$

where e : electronic charge
m : electronic mass
z : charge of the incident particle, unit of e
v : velocity of the incident particle
N : density of stopping atoms
B : stopping number

3.1.2 Non-elastic 단면적 및 2차 입자 발생 모델^[3]

우주 방사선 차폐코드인 CHARGE 코드에서 차폐 계산시 사용되어지는 반응 단면적은 non-elastic 반응 단면적을 사용한다. 이 단면적은 에너지와 물질에 관한 함수로 CHARGE 코드 내에 내재되어 있다. 이 식들은 실험 data와 Monte Carlo 방법에 의한 계산에 의해서 도출되어졌다.

다음의 식들은 non-elastic 단면적, CASCADE yield, average residual nuclear excitations, EVAPORATION yields을 표현한다. 이러한 식들은 고에너지 양성자와 차폐 물질과의 반응에서 생성되는 이차입자들의 data를 평가하는데 도움을 주는 간단한 모델을 제공하여 준다. 실험에 의한 양성자 및 중성자의 non-elastic 단면적은 optical model formula를 least-square 방법으로 fitting하여 만들었다. CHARGE 코드에 내재되어있는 non-elastic 단면적 및 이 반응에 의해 생성되는 이차 입자 발생 모델은 다음과 같다. 양성자의 non-elastic 단면적은 식 4과 같이 표현이 된다.

$$\sigma_{nep} = \pi R^2 \left(\frac{2Z}{A} \right)^2 \left(1 - \frac{V}{E} \right) (K_p R)^{0.35592} \quad (\text{식 4})$$

$$\times \left[1.31212 - \frac{2.52875 - 3.90389 (1 + 2K_p R) \exp(-2K_p R)}{2(K_p R)^2} \right]$$

where K_p : An attenuation coefficient for proton
 R : Nuclear radius($1.292A^{1/3} \times 10^{-13}$ cm)
 V : Coulomb barrier ($1.44 \times 10^{-13} Z/R$ MeV)

이 식4는 에너지 E 가 3V 보다 클 때 유효하다. 즉 차폐체가 알루미늄일 경우 양성자에너지가 약 6 MeV 이상일 때만 위의 식을 사용하고 그 이하의 에너지를 가진 입자에 대해서는 다른 근사식이 적용된다.

또한, 중성자의 non-elastic 단면적은 식 5과 같이 표현이 된다.

$$\sigma_{nen} = \pi R^2 \left(\frac{2Z}{A} \right)^2 (K_n R)^{0.13774} \quad (\text{식 5})$$

$$\times \left[1.58336 - \frac{3.41395 - 4.71941 (1 + 2K_n R) \exp(-2K_n R)}{2(K_n R)^2} \right]$$

where K_n : An attenuation coefficient for neutron

아래는 CHARGE 코드에서 사용되는 이차입자의 생성모델에 대하여 기술하였다. 고에너지 입자와 반응에 의해 핵은 여기상태가 되고 이러한 핵은 cascade(고에너지) phase와 evaporation(저에너지) phase를 순차적으로 거치게 되며 각각의 phase에서 이차입자를 발생한다. Cascade 입자는 전방산란만을 하며, evaporation 입자는 등방 산란을 한다고 가정한다.

Cascade model : cascade phase에서 생성된 이차입자는 전 에너지 영역에 걸쳐 고르게 분포하지만, 발생하는 이차입자의 수는 evaporation phase에서 생성되는 수에 비해 적다. 아래의 식 6은 cascade phase에서 비탄성 산란에 의해 발생하는 이차입자의 총수를 나타내었으며, 식 7은 여기서 생성되는 이차 입자중 양성자와 중성자의 비율을 나타내고 있다.

$$Y_C = (2.905 - 0.0092 Z) \left(\frac{E}{300} \right)^{(0.252Z)^{0.263}} - 1.0 \quad (\text{식 6})$$

$$\frac{n}{p} = 0.65 + 2.10 \left(\frac{A - 2E}{Z} \right) \quad (\text{식 7})$$

Evaporation Model : cascade phase를 거친 후 잔여 여기 에너지를 사용하여 evaporation phase를 거치게 되는데, cascade phase에서 발생하는 고에너지의 이차입자에 비해 evaporation phase에서 많은 양의 이차입자가 발생된다. 고에너지의 입자보다 저에너지의 입자가 LET에 많은 영향을 주므로 자세한 계산이 필요하게 된다.

Cascade phase 이후에 평균잔여 여기 에너지는 아래의 식 8를 사용하여 구해진다.

$$E^* = 9E^{0.2697} + 0.07834 \times \ln(A/27) \quad \text{MeV}, \quad E \leq 375 \text{ MeV} \quad (\text{식 8})$$

$$E^* = (41.1 \ln E - 199.0) \left(\frac{A}{27} \right)^{0.128 \ln \frac{E}{100}} \text{ MeV}, \quad E \geq 375 \text{ MeV}$$

Evaporation phase에서 비탄성산란에 의해 발생하는 이차입자의 수는 식 9에 의해 구해지고, 총 이차입자에 대한 이차중성자의 비율은 식 10과 같다.

$$Y_E = \frac{E^*}{4.0 + 3.8\tau} \quad (\text{식 9})$$

$$\text{where } \tau = \sqrt{\frac{E^*}{A - Y_C}}$$

$$\frac{n}{n+p} = 5.05 \left(\frac{A+Z}{A} + 1.172 E^{-0.349} \right) - 2.23 \quad (\text{식 10})$$

3.2 CHARGE 코드의 검증

지난 십수년 동안 Los Alamos National Laboratory(LANL)에서는 Oak Ridge National Laboratory(ORNL)에서 개발한 nucleons, pion, muon의 Monte Carlo 수송코드인 HETC의 LANL version을 바탕으로 한 code system을 개발하여 왔다. 이 LANL version을 LAHET 이라 하고 이 코드를 바탕으로 만든 코드 system을 LAHET Code System(LCS)라 한다.

CHARGE 코드의 검증을 위해서 위에서 설명한 LCS의 결과와 비교하였다. 검증계산은 slab geometry에 250MeV에서 peak 점을 가지는 임의의 양성자 spectrum을 사용하였고 차폐체는 Al-27 차폐두께는 0.1 ~ 10 cm로 하는 조건을 가지고 검증 계산을 수행하였다.

비교 결과 양성자의 경우 차폐두께가 증가할수록 두 코드간의 계산 결과는 차이를 보였다. 약 1cm 두께까지는 비슷한 값을 가졌지만 그 이상의 두께에서는 차이가 벌어지는 것으로 나타났다. 그리고 10cm 정도의 두께에서는 두 코드간의 차이는 더욱 벌어져 두 코드의 spectrum의 차이가 확연하게 들어났다. 그림 1은 임의 양성자 source와 차폐체 Al-27의 두께에 따른 CHARGE 코드와 LAHET 코드 Transmitted Proton flux 계산결과를 비교한 그래프이다. 이러한 차이가 생기는 이유는 여러 가지가 있겠지만 가장 큰 이유는 우선 양성자의 반응 단면적의 차이이다. 그리고 또 다른 차이점은 양성자를 계산하는 모델에 있다. LCS는 Monte Carlo방법을 사용하여 양성자 입자 하나하나를 추적하여 계산하지만 CHARGE는 근사 모델로써 양성자가 물질과 충돌하여 방향이 바뀌는 것을 고려하지 않는 straight-ahead approximation을 사용한다.

중성자의 경우 그림 2에서 알 수 있듯이 위의 양성자에 대한 계산 결과와 달리 차폐두께와 상관없이 두 코드의 계산 결과가 상당히 큼을 할 수 있다. 이러한 차이는 차폐두께가 커짐에 따라 양성자와 마찬가지로 그 차이도 커졌다. 이러한 차이가 나는 이유 또한 여러 가지가 있을 수 있겠지만, 중성자의 경우도 반응단면적과 계산 모델의 차이에서 기인한다 할 수 있다. LCS의 중성자 반응 단면적은 ENDF/B 사용하고 또한 20 MeV이하의 중성자에 대해서는 아주 정확한 계산을 하는 MCNP를 중성자 계산 모듈로 사용한다. 그러나 CHARGE 코드는 단지 non-elastic 반응 단면적 (20 MeV 이하에서는 단일값의 removal 단면적 사용)을 사용한다. 또한 CHARGE 코드는 산란 과정에서 생기는 에너지 그룹의 변화에 대해서는 고려를 하지 않는다. 즉, 에너지 그룹간 scattering in , scattering out 개념이 고려하지 않는다.

검증 계산 결과 양성자 및 중성자의 계산 모델에 대한 보정이 이루어 져야 함을 알았다. 양성자의 경우 차폐두께에 따라 일정하게 그 차이가 나타남에 따라 반응단면적의 수정이나 보정계수를 사용하여 CHARGE 코드를 보정할 수 있다. 그러나 중성자의 경우 그 차이가 너

무 큼에 따라 새로운 계산 모델을 마련해야 한다. 이에 S_n 방법을 사용하여 중성자 수송을 계산하는 ANISN 코드를 도입하여 CHARGE-ANISN 연결체계를 개발하였다.

3.3 전산체계의 적용 타당성 평가

우주방사선의 에너지 spectrum을 생산하기 위하여 SHELLIG와 RADBELT을 사용하였다.. SHELLIG는 위도, 경도 및 고도를 이용하여 L 값과 B/B_0 을 구해준다. RADBELT는 이 값들을 이용하여 AP-8모델에 의한 CHARGE 코드에 들어가는 우주방사선 flux를 제공하여 준다. 이 과정을 도식화하면 그림 3과 같다.

현재 위성의 실측치가 확보되지 못하여 CHARGE 코드의 계산내용과 실측치를 직접 비교하여 계산하는 대신, 현재 우주방사선의 차폐해석에 일반적으로 많이 사용되는 SPACE_RADIATION의 계산결과와 비교하였다.

검증계산에 적용된 방사선환경은 표 1 같이 우리별 1호의 궤도조건을 사용하였으며, 위성체를 0.3 cm의 알루미늄 차폐체를 갖는 구형으로 가정하였다. 표 3와 그림4에서는 CHARGE의 계산위치와 위치별 선량율을 나타내었다. 두 코드의 계산결과 표 2에 나타내었듯이, CHARGE의 계산결과가 SPACE_RADIATION의 계산결과보다 3.7 % 과대 평가되었다. 그러나 이 값은 CHARGE 계산시 SPACE_RADIATION과는 달리 이차입자의 생성을 고려하기 때문에 생긴 오차로 볼 수 있으므로, 두 코드의 계산오차는 무시할 수 있다. 따라서, SHELLIG-RADBELT-CHARGE계산체계는 우주방사선의 차폐해석에 적합하다고 판단된다.

4. CHARGE-ANISN 연결체계

위의 CHARGE 검증계산 결과에서 보듯이 CHARGE 코드의 중성자 계산은 많은 오차를 가지고 있다. 비록 고에너지 양성자의 이차입자인 중성자가 전체 dose양에는 10% 미만을 차지하지만 고에너지의 중성자는 인공위성내의 반도체에 SEE를 발생시킬 수 있다.^[4] 그러므로 이러한 중성자가 총 피폭량에는 큰영향을 미치지 못한다 하더라도 중성자의 정확한 스펙트럼계산은 인공위성의 차폐계산에 매우 중요하다. 이에 본 연구에서는 중성자의 보다 정확한 해석을 위해서 S_n 방법을 사용하여 중성자 수송 계산을 하는 ANISN 코드와 과 연결을 수행하였다.

고에너지 양성자는 물질과 반응하여 이차입자인 중성자를 발생시킨다. CHARGE 코드에서 계산된 위치별 중성자 생성량을 ANISN 코드의 source term으로 연결하는 방법으로 두 코드의 연결체계를 만들었다.

CHARGE에서는 중성자의 dose계산을 위해 식 11과 같이 간단한 모델을 사용한다.

$$\Phi(E) = \Phi_0(E) \times e^{-\Sigma_R \cdot t} \quad (\text{식 11})$$

where $\Phi_0(E)$: Incident neutron flux
 Σ_R : Neutron removal cross-section
 t : Thickness

위의 식 11은 중성자의 거동을 자세히 묘사하기에는 부족하므로 이를 보정하기 위하여, 식 12과 같은 수송방정식을 사용하는 ANISN^[5]을 CHARGE와 연결하여 중성자에 대한 자세한

계산을 수행하였다.

$$\begin{aligned} & \Omega \cdot \nabla \Psi(\mathbf{r}, \Omega, E) + \sigma_t(\mathbf{r}, E) \Psi(\mathbf{r}, \Omega, E) \\ &= \int_0^\infty dE' \int_{-1}^1 d\Omega' [\chi(E) \nu \sigma_f(\mathbf{r}, E') + \sigma_s(\mathbf{r}, \Omega' \rightarrow \Omega, E' \rightarrow E)] \Psi(\mathbf{r}, \Omega, E) + Q(\mathbf{r}, \Omega, E) \end{aligned} \quad (\text{식 12})$$

where $\Psi(\mathbf{r}, \mu, E)$: directional flux density
 σ : macroscopic cross section

그림 5는 CHARGE의 계산결과와 CHARGE-ANISN 연결모델의 계산결과를 비교하였으며, 두 계산 결과는 많은 차이를 보였다. 두 계산 결과의 차이가 나타나는 가장 큰 이유는 식 12과 13에서 알 수 있듯이 중성자 거동 모델의 차이에서 기인하고, 또한 두 코드에서 사용되는 중성자 반응 단면적의 차이에서도 기인한다. 따라서 CHARGE 코드에서는 중성자에 대하여 과대 평가하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

우주방사선 차폐 코드인 CHARGE를 사용하여 저궤도 인공위성의 차폐계산을 수행하였다. 이 차폐계산 결과를 현재 우주 방사선에 의한 TID 계산에 많이 사용되는 SPACE_RADIATION의 계산결과 비교하였다. 비교 결과 약간의 차이는 있었지만 SHELLIG-RADBELT-CHARGE의 인공 위성 차폐계산 체계의 유효성을 확인할 수가 있었다.

그러나 SPACE_RADIATION 또한 상세모델이 아니고 근사모델을 사용하는 코드 시스템이기 때문에 상세 모델로의 검증이 다시 한번 필요하다. 또한 Monte Carlo 방법 코드인 LCS(LAHET Code System)을 사용하여 양성자와 중성자 입자에 대한 차폐계산을 수행한 결과 양성자의 경우는 약간의 보정이 필요하고, 중성자의 경우는 그 차이가 너무 커서 새로운 계산 모델이 필요하게 되었다. 이에 Sn 방법을 이용한 중성자 수송코드인 ANISN을 도입하여 CHARGE-ANISN 연결체계를 개발하였다. 계산 결과 CHARGE 코드만을 사용했을 때 중성자 평가가 과대 평가됨을 알았다.

참고 문헌

1. Janet Barth, "Modeling Space Radiation Environments," IEEE NSREC Short Courses (1997)
2. W.R. Yucker, J.R. Lilley, "CHARGE Code for Space Radiation Shielding Analysis," McDonnell Douglas Astronautics Company (1969)
3. W.R. Yucker, "Empirical Formulas for Secondary Nucleon Production Cross Section," . Nucl. Sci. and Engr. 27, 467 (1967)
4. Wesley C. Fan et al., "Shielding Considerations for Satellite Microelectronics," IEEE Transaction on Nuclear Science, Vol. 43, No.6, (1996)
5. Ward W. Engle, Jr., "A User Manual for ANISN," ORNL (1973)

표 1 우리별 1호의 궤도조건

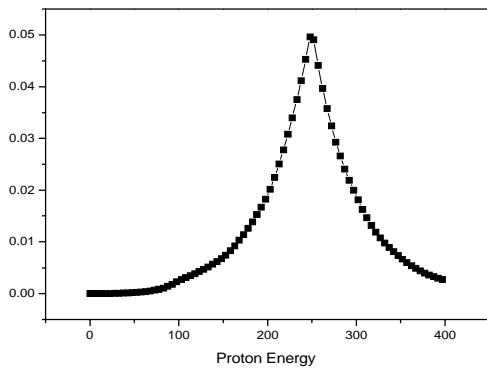
Perigee height	1306.1 km
Apogee height	1326.0 km
Inclination	66.08 °

표 2 CHARGE와 SPACE_RADIATION의 비교 계산결과

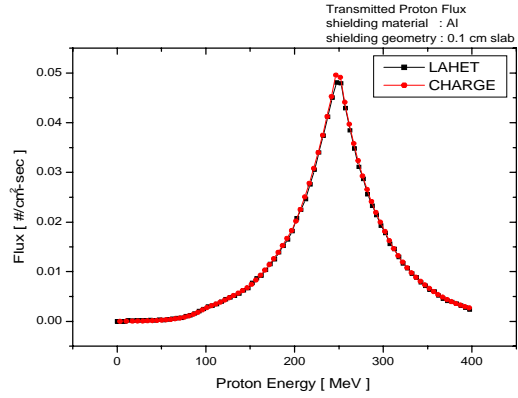
궤도주기	111.98분
CHARGE 계산결과	2.52 rad (= $\sum [\frac{\text{궤도주기}(111.98\text{분})}{\text{step 갯수}(40)} \times (\text{Dose rate})_{\text{point}}]$)
SPACE_RADIATION 계산결과	2.43 rad (= 1.3 rad/hr × 111.98 min × hr/60min)
오 차	3.7%

표 3 CHARGE계산 위치

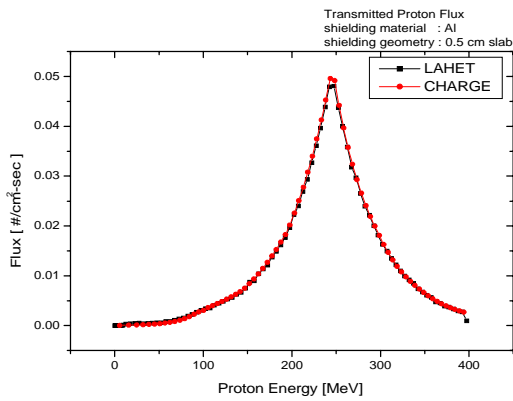
point	고도	위도	경도	point	고도	위도	경도
1	1306.1	0	0	21	1326	0	165.96
2	1306.22	8.24	2.98	22	1325.88	-8.2	168.93
3	1306.59	16.45	6.12	23	1325.51	-16.37	172.05
4	1307.19	24.58	9.6	24	1324.92	-24.46	175.5
5	1308	32.58	13.66	25	1324.1	-32.42	179.52
6	1309.02	40.36	18.63	26	1323.09	-40.18	-175.55
7	1310.21	47.79	25.06	27	1321.91	-47.6	-169.19
8	1311.54	54.63	33.76	28	1320.58	-54.44	-160.6
9	1312.99	60.47	45.91	29	1319.14	-60.31	-148.59
10	1314.51	64.58	62.67	30	1317.62	-64.49	-132.01
11	1316.06	66.08	83.35	31	1316.06	-66.08	-111.42
12	1317.62	64.49	103.94	32	1314.51	-64.58	-90.74
13	1319.14	60.31	120.52	33	1312.99	-60.47	-73.98
14	1320.58	54.44	132.52	34	1311.54	-54.63	-61.83
15	1321.91	47.6	141.12	35	1310.21	-47.79	-53.13
16	1323.09	40.18	147.48	36	1309.02	-40.36	-46.71
17	1324.1	32.42	152.41	37	1308	-32.58	-41.73
18	1324.92	24.46	156.43	38	1307.19	-24.58	-37.67
19	1325.51	16.37	159.88	39	1306.59	-16.45	-34.19
20	1325.88	8.2	163	40	1306.22	-8.24	-31.05



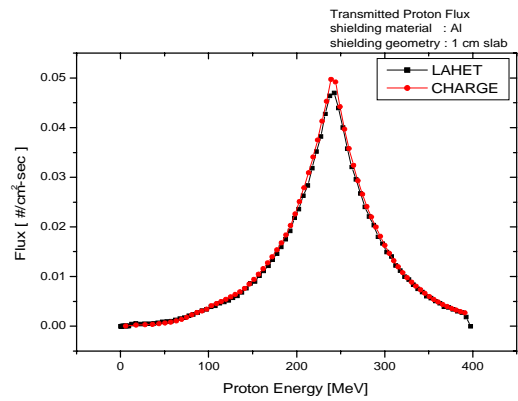
(a) 250MeV에서 Peak 값을 가지는
입자의 양성자 source



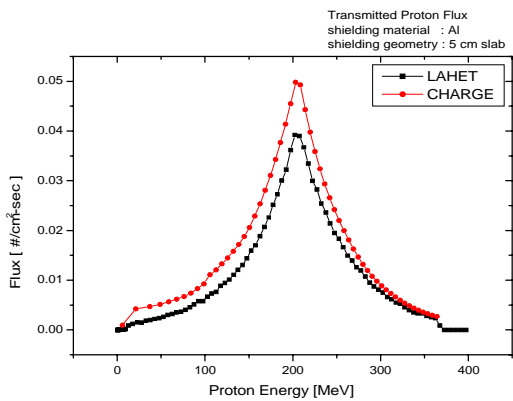
(b) 0.1 cm의 Al차폐체 뒤에서의
양성자 flux 비교



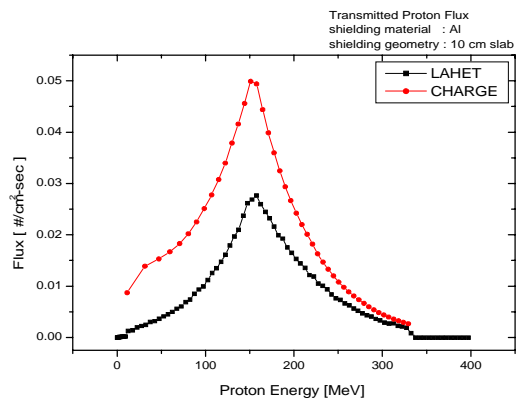
(c) 0.5 cm의 Al차폐체 뒤에서의
양성자 flux 비교



(d) 1 cm의 Al차폐체 뒤에서의
양성자 flux 비교

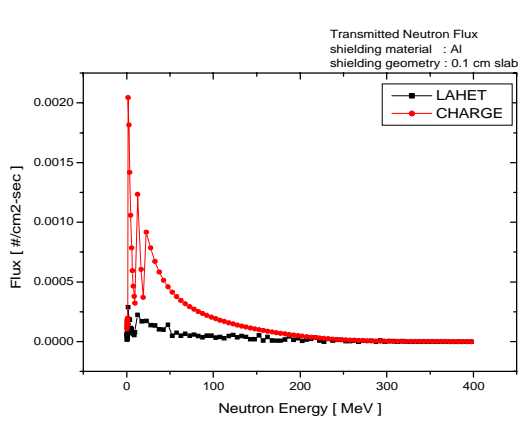


(e) 5 cm의 Al차폐체 뒤에서의
양성자 flux 비교

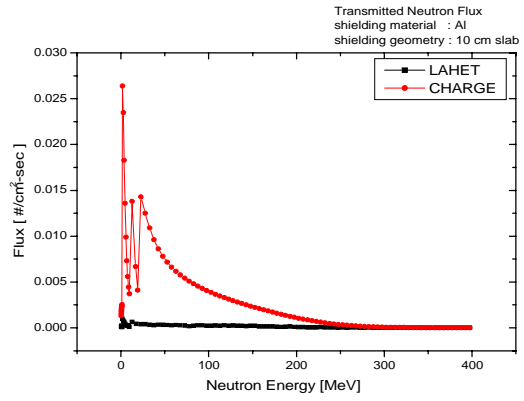


(f) 10 cm의 Al차폐체 뒤에서의
양성자 flux 비교

그림 1 차폐체 Al-27의 두께에 따른 CHARGE 코드 와 LAHET 코드 Transmitted Proton flux 비교



(a) 0.1 cm의 Al차폐체 뒤에서의 중성자 flux 비교



(b) 10 cm의 Al차폐체 뒤에서의 양성자 flux 비교

그림 2 차폐체 Al-27의 두께에 다른 CHARGE 코드 와 LAHET 코드 Transmitted Neutron flux 비교

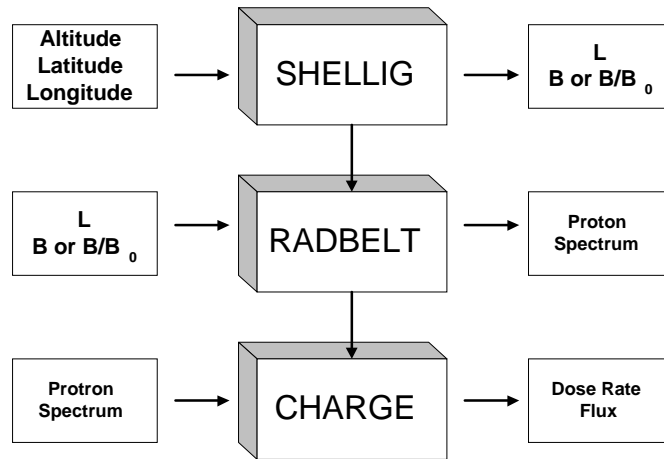


그림 3 SHELLIG-RADBELT-CHARGE 전산체계

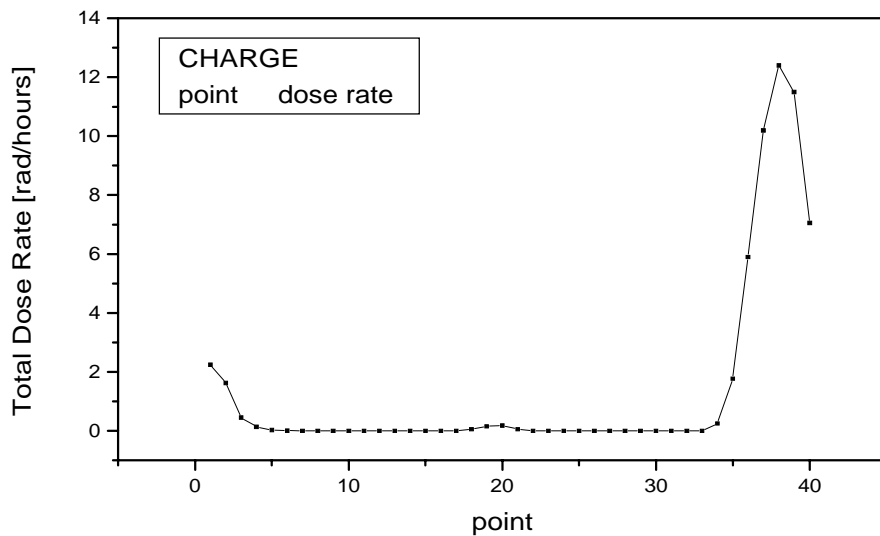


그림 4 CHARGE계산시 위치별 선량을

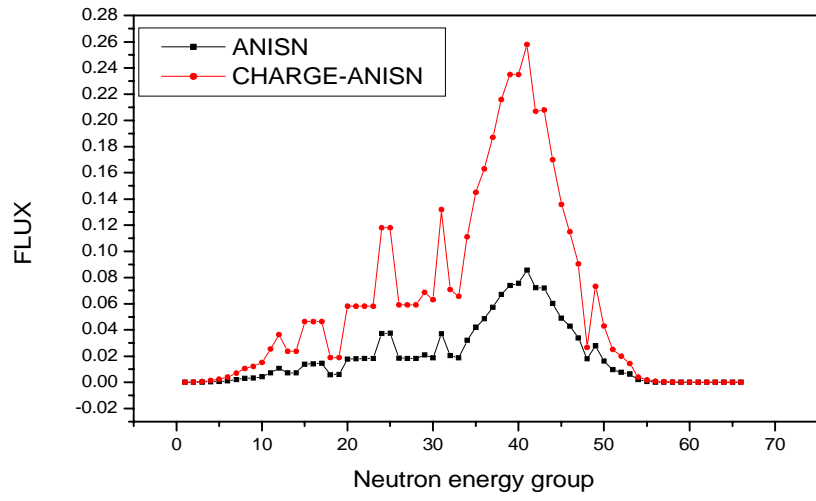


그림 5 ANISN과 CHARGE-ANISN 중성자 비교