

EGS4 코드를 이용한 물질 내에서  
Photoneutron 생성률과 에너지분포 계산

신창호, 서보균, 김종경  
한양대학교

김귀년  
포항공과대학

장중화  
한국원자력연구소

요 약

고에너지 전자가 매질 내에서 수송될 때, 매질 내에서 Photoneutron 생성률과 생성된 중성자 에너지 분포를 EGS4 코드를 사용하여 계산하였다. EGS4 코드는 광자-전자 연계 수송코드로 Photoneutron 반응단면적을 제공하지 않기 때문에, Photoneutron 반응단면적 계산루틴과 생성된 중성자 에너지분포 계산루틴을 작성하여 Ta와 Pb의 표적 매질에 100 MeV의 전자가 입사하였을 때 표적의 두께변화에 따른 Photoneutron 생성률과 생성된 중성자 에너지분포를 계산하였다.

1. 서 론

고에너지 전자가 물질내에서 수송될 때, 전자와 물질의 반응으로 광자를 발생시키고 이때 발생된 광자는 다시 물질과 반응하여 중성자를 생성할 수 있으며 이러한 반응을 Photoneutron 반응이라 한다. Photoneutron 반응은 광자 에너지가 대략 35 MeV 이내의 영역, 35 MeV에서 150 MeV 사이의 영역, 그리고 150 MeV 이상의 영역에서 발생되는 것으로 나뉘어 진다. 특히 35 MeV 이내의 영역을 Giant Resonance 영역이라고 하고, 이 영역에서 발생되는 중성자를 Giant Resonance 중성자라고 한다. Photoneutron 반응에 의해 생성되는 중성자는 수 MeV에서 입사 전자 에너지 이하의 에너지를 가진다.

방사선량 계산시 중성자는 방사선가중치(Radiation Weight Factor)가 다른 입자에 비해 높으므로 고에너지 전자를 이용하는 시설의 방사선 안전성평가를 위해서는 중성자 선원항을 정확히 계산하여야 한다. 그러므로 고에너지 전자가 매질내에서 수송될 때 물질 내에서 Photoneutron 생성률과 생성된 중성자 에너지의 정확한 계산은 고에너지 전자를 이용하는 시설의 방사선 안

전성평가에 있어 매우 중요하다. 본 연구에서는 EGS4<sup>(1)</sup> 코드를 이용하여 고에너지 전자가 Ta와 Pb 매질에 입사하였을 때 Photoneutron 생성률과 생성된 중성자의 에너지분포를 계산하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1. Photoneutron 생성단면적

Photoneutron 반응중 광자의 에너지가 대략 35 MeV 이하에서 일어나는 Giant Resonance 중성자 생성단면적은 원자질량 40 이하의 가벼운 원자의 경우 광자 에너지가 약 20-30 MeV에서 최대값이 나타나고 원자질량 40 이상의 무거운 원자의 경우는 광자 에너지가 13-18 MeV에서 최대값을 보인다. Giant Resonance 중성자 생성단면적 분포 피크의 폭은 무거운 핵의 경우 약 3 MeV, 가벼운 핵의 경우는 약 10 MeV 정도이다.

광자는 수소를 제외한 모든 물질과 반응하여 Giant Resonance 중성자를 발생하며, 일반적으로 생성률은 원자핵의 크기에 비례한다. 광자의 에너지를 문턱에너지(Threshold Energy)에서 최대에너지까지 적분한 Giant Resonance 중성자 생성단면적<sup>(2)</sup>은 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_{total} \approx \int_{E_{th}}^{E_{Max}} \sigma_n(E_\gamma) dE_\gamma \approx \frac{NZ}{A} \text{ MeV-barn} \quad (1)$$

여기에서,  $\sigma_n(E_\gamma)$  = Giant Resonance 중성자 생성단면적,  $cm^2$ ,

$E_\gamma$  = 광자 에너지,  $MeV$ .

광자 에너지에 대한 Giant Resonance 중성자 생성단면적은 다음과 같은 Lorentz 공식<sup>(3)</sup>으로 생산할 수 있다.

$$\sigma(E_\gamma) = \sum_i \frac{\sigma_{mi}}{1 + [(E_\gamma - E_{mi})^2 / E^2 \Gamma_i^2]}, \quad (i=1, 2) \quad (2)$$

여기에서,  $E_\gamma$  = 광자 에너지,  $MeV$ ,

$E_{mi}$  = 최대 중성자 생성단면적을 보이는 광자 에너지,  $MeV$ ,

$\sigma_{mi}$  = 최대 중성자 생성단면적,  $cm^2$ ,

$\Gamma_i$  = Full-Width-at Half-Maximum,  $MeV$ .

광자 에너지가 Giant Resonance 영역이상 150 MeV 이내의 영역에서는 중성자 생성률이 비교적 일정하며 광자 에너지가 증가하면 광자와 핵의 중성자-양자 쌍과의 반응에 의한 중성자 생성률이 점차 증가한다. 핵의 중성자-양자 쌍을 반중양자(quasi-deuteron)라고 하고, 광자의 에

너지가 Giant Resonance 영역 이상에서는 반중양자 효과에 의해 중성자 생성률이 증가한다. 광자와 반중양자와의 반응 단면적<sup>(2)</sup>은 다음과 같다.

$$\sigma_{QD}(E_\gamma) \cong L \frac{NZ}{A} \sigma_D(E_\gamma) \quad (3)$$

여기에서,  $E_\gamma$  = 광자 에너지,  $MeV$ ,

$L$  = 중양자 반응거리에 대한 반중양자의 상대적 반응거리,

$N$  = 매질 원자의 중성자 수,

$Z$  = 매질의 원자번호,

$A$  = 매질의 원자질량,

$\sigma_D$  = 중양자 생성단면적,  $7 \times 10^3 E^{-1} mb$  ( $50 MeV \leq E_\gamma \leq 125 MeV$ ).

## 2.2. Photoneutron의 에너지 분포

광자 에너지가 대략 35 MeV 이내에서 생성되는 Giant Resonance 중성자는 등방성(isotropic)이고, 다음과 같은 Maxwellian 에너지분포<sup>(2)</sup>를 가진다.

$$\frac{dN}{dE_n} = \frac{E_n}{T^2} e^{-E_n/T} \quad (4)$$

여기에서,  $E_n$  = 중성자 에너지,  $MeV$ ,

$T$  = 매질의 핵온도(nuclear temperature),  $MeV$ .

5 MeV 이상의 에너지를 가지는 대부분의 중성자는 반중양자 효과에 의해 생성되는 중성자이다. 반중양자 효과에 의해 생성되는 5 MeV 이상의 중성자 에너지분포<sup>(2)</sup>는 다음과 같다.

$$\frac{dN}{dE_n} \approx E_n^{-\alpha} \quad (5)$$

$\alpha$  값은 원자번호의 증가와 함께 약간 증가하는 경향을 보인다. Pb나 Ta 같은 무거운 원소의 경우  $\alpha$  값은 3.0에서 3.3사이의 값을 가진다.

## 2.3. Photoneutron 생성률 계산

Photoneutron 생성률은 광자와 매질의 반응을 변형한 식으로 주어지며 Photoneutron 반응의 모든 에너지 영역에서의 중성자 생성률은 다음과 같이 주어진다.

$$Y(E_0) = \int_{E_{th}}^{E_0} T(E_\gamma, E_0) n \sigma(E_\gamma) dE_\gamma \quad (6)$$

여기에서,  $Y(E_0)$  = 중성자 생성률, *neutron/electron*,

$E_0$  = 입사 전자의 에너지, *MeV*,

$E_{th}$  = Giant Resonance 반응의 문턱에너지, *MeV*,

$T(E_\gamma, E_0)$  = 광자의 궤적(Track Length), *cm/MeV*,

$n$  = 매질의 수 밀도, *number/cm<sup>3</sup>*,

$\sigma(E_\gamma)$  = 중성자 생성단면적, *cm<sup>2</sup>*.

1967년 Alsmiller<sup>(4)</sup>는 Zerby와 Moran이 개발한 광자-전자 샤워어(Shower) 코드<sup>(5)</sup>를 이용하여 광자의 궤적길이를 계산하고 계산된 궤적을 이용하여 Photoneutron 생성률을 계산하였고, 1975년 Hansen<sup>(6)</sup>은 RPI(Rensselaer Polytechnic Institute)에서 개발한 Analogue 몬테칼로 코드를 이용하여 Photoneutron 생성률을 계산하였다. 또한 1979년 Swanson<sup>(7)</sup>은 Tamm과 Belenky의 준 이론적 근사식<sup>(8)</sup>을 이용하여 광자의 궤적을 계산하고 계산된 광자의 궤적을 이용하여 Photoneutron 생성률을 계산하였다.

### 3. EGS4 코드를 사용한 Photoneutron 생성률과 에너지분포 계산

Photoneutron 생성률을 계산하기 위한 광자의 궤적은 EGS4 코드를 이용하여 계산하였다. EGS4 코드의 광자-전자 수송루틴에는 입자의 현 위치에서 다음 반응지점까지의 거리를 USTEP이란 변수에 저장하므로 USTEP 변수를 이용하여 매질내에서 광자의 궤적길이를 계산하였다. Giant Resonance 중성자 생성단면적은 식 (2)를 이용하여 계산하였고, 반중양자 효과에 의해 생성되는 중성자의 생성단면적은 식 (3)을 이용하여 계산하였다.

EGS4 코드안에서 계산된 광자의 궤적과 식 (2)와 (3)을 이용해 계산한 Photoneutron 생성단면적을 식 (6)을 변형한 다음식에 대입하여 Photoneutron 생성률을 계산하였다.

$$Y(E_0) = \sum_{event} USTEP(E_\gamma, E_0) n \sigma(E_\gamma) \quad (7)$$

생성된 중성자의 에너지분포는 Photoneutron 반응이 일어날 때 마다 식 (4)와 (5)를 이용하여 생성되는 중성자의 에너지를 샘플링하여 계산하였다. 이때 사용한 핵은도는 Pb의 경우 0.98 MeV, Ta의 경우 0.65 MeV를 적용하였고  $\alpha$ 값은 3.0을 사용하였다.

#### 4. 계산결과

Photoneutron 생성률 계산의 검증을 위해 Hansen의 Pb와 Ta 표적에서 Photoneutron 생성률 계산결과와 비교하여 그림 1과 2에 나타내었다. 그림에서 Hansen의 계산결과와 EGS4 코드로 계산한 결과가 거의 일치함을 보여주고 있다. 또한 Photoneutron 생성률은 표적의 두께와 비례하여 증가하지만 10 RL(Radiation Length)이상의 두께에서는 더 이상 증가하지 않고 포화(saturation)상태에 도달하며 표적의 두께가 2~3 RL에서 포화상태 중성자 생성률의 1/2 정도가 생성되는 것으로 알려져 있는데 EGS4 코드로 계산한 결과에서도 동일한 결과를 보여주고 있다.

생성된 중성자의 에너지분포는 대략 입사전자 에너지의 1/2 이내에서 분포를 가지며, 핵온도 주변(0.5~1.0 MeV)의 에너지영역에서 최대값을 가지는 Maxwellian 에너지분포를 가진다. 반중양자 효과에 의한 중성자 생성단면적은 Giant Resonance 중성자 생성단면적에 비해 작기 때문에 광자에너지가 30 MeV 이상일 때 생성되는 중성자중 10% 이내만이 반중양자 효과에 의해 발생된 중성자이다.

#### 5. 결 론

기존의 광자-전자 연계 코드들은 Photoneutron 반응을 다루지 못하고 있다. 본 연구에서는 EGS4 코드에 Photoneutron 반응을 다룰 수 있는 루틴을 첨가하여 Photoneutron 생성률 계산과 동시에 생성되는 중성자의 에너지분포를 계산하였다. 따라서 EGS4 코드에 첨가된 Photoneutron 생성률 과 에너지분포 계산루틴을 사용하면 고에너지 전자를 이용하는 시설의 중성자 선원량을 정확히 계산할 수 있어 고에너지 전자가 매질내에서 수송될 때 광자와 전자는 물론 Photoneutron 반응에 의해 생성되는 고에너지 중성자에 대한 방사선 안전성 평가를 정확히 수행할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT : 본 연구는 포항공과대학 포항가속기연구소의 지원금에 의한 것입니다.

#### 참 고 문 헌

1. W. R. Nelson, H. Hirayama, and D. W. O. Rogers, "The EGS4 Code System." SLAC-265, Stanford Linear Accelerator Center, 1985.
2. International Atomic Energy Agency, "Radiological Safety Aspects of the Operation of Electron Linear Accelerators," IAEA Technical Report Series 188, Vienna, 1979.

3. B. L. Berman, "Atlas of Photoneutron Cross Section Obtained with Monoenergetic Photons," *Atomic and Nucl. Data Tables*, **15**, 319(1975).
4. R. G. Alsmiller, Jr. and H. S. Moran, "Electron-Photon Cascade Calculations and Neutron Yields from Electrons in Thick Target," *Nucl. Instr. and Meth.*, **48**, 109(1967).
5. C. D. Zerby and H. S. Moran, "A Monte Carlo Calculation of the Three-Dimensional Development of High-Energy Electron Photon Cascade Showers," ORNL-TM-422, Oak Ridge National Lab., 1962.
6. E. C. Hansen, C. S. Bartoletti, and P. B. Daitch, "Analog Monte Carlo Studies of Electron-Photon Cascades and the Resultant Production and Transport of Photoneutrons in Finite Three-Dimensional Systems," *J. Appl. Phys.*, **46**, 1109(1975).
7. W. P. Swanson, "Improved Calculation of Photoneutron Yields Released by Uncident Electrons," *Health Phys.*, **37**, 347(1979).
8. I. Tamm and S. Belenky, "On the Soft Component of Cosmic Rays at Sea Level," *J. Phys.(U.S.S.R.)*, **1**, 177(1939).
9. 김종경 외 3인, "EGS4 코드를 이용한 물질내에서의 Giant Resonance 증성자의 생성률 계산," 한국원자력학회 '94 춘계학술발표회, 포항공과대학, 1994.

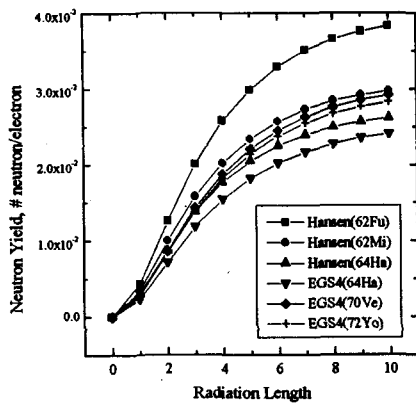


그림 1. Pb 원통에 100 MeV 전자 입사시 원통 깊이별 Photoneutron 생성률

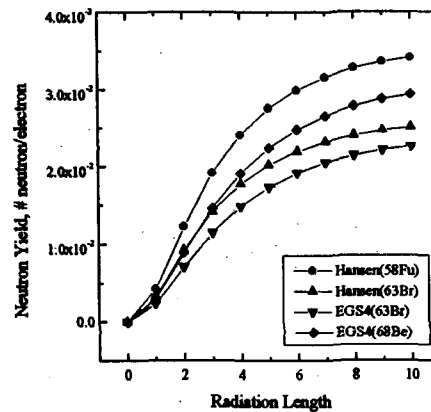


그림 2. Ta 원통에 100 MeV 전자 입사시 원통 깊이별 Photoneutron 생성률