

# 체렌코프 원리 기반 광섬유 방사선 센서모델을 이용한 방사화 생성물 검출 시뮬레이션

한화정, 김범규, 박병기\*

순천향대학교, 충청남도 아산시 순천향로 22

\*withan@sch.ac.kr

## 1. 서론

방사선 구역 내 주요 피폭원은 부식생성물에서 방출되는 핵종이며 특히 Co-60, Co-58, Zn-64, 및 Mn-54 등의 방사화 생성물은 계통 선량율을 증가시키는 주요 요인이다. 반감기가 긴 Fe-55, Ni-63 및 Co-60은 방사성폐기물의 취급과 처분 시에도 특별한 관리가 요구되는 핵종들이다. Co-60은 구역 내 전체 선량율에 상대적으로 가장 높은 비율을 차지한다. Co-60은 5.27 년의 반감기를 가지며 베타 붕괴를 통해 Ni-60으로 붕괴한다. 붕괴 시 1.33 MeV와 1.17 MeV의 높은 에너지를 가지는 감마선을 방출하기 때문에, 방사선 구역 내의 안전 관리를 위해 방사선 측정이 필요한 핵종이다[1].

일반적으로 감마선은 매질과의 상호작용으로 다양한 물리적 반응들이 일어날 수 있다. 예를 들어, 사용후핵연료로부터 방출되는 감마선은 저장조의 물 분자와 상호작용하여 체렌코프 방사선을 발생시킨다. 체렌코프 방사선은 하전입자가 물과 같은 투명한 매질을 빛의 위상속도보다 빠르게 진행할 때 발생하는 현상인데, 이 원리를 이용하여 감마선을 검출하기 위한 광섬유 방사선 센서 연구가 진행되고 있다. 광섬유 방사선 센서는 작고 유연하며 원거리에서도 손실 없이 광 신호 측정이 가능한 이점을 가진다. 또한 전자기 방사선 환경에 대한 내성을 가지므로 극한의 방사선 환경에서 감마선을 검출하는 데 이용될 수 있다[2-3].

본 연구에서는 체렌코프 원리 기반의 광섬유 방사선 센서를 이용하여 방사화 생성물의 감마선을 검출하는 시뮬레이션을 수행하였다. 길이가 서로 다른 광섬유 방사선 센서를 동시에 사용하여 체렌코프 방사선을 검출하였으며, 감법을 적용하여 감지 영역에서 체렌코프 방사선만을 고려하였다.

## 2. 본론

방사화 생성물 검출 시뮬레이션을 수행하기 위하여 몬테카를로 기반의 GEANT4(Geometry and Tracking)

toolkit을 사용하였다. GEANT4 toolkit은 다양한 분야에서 방사선 검출기 또는 고 에너지 물리 실험과 같은 시뮬레이션을 위해 이용되고 있다[4].

### 2.1 감마선의 상호작용

시뮬레이션 진행되는 동안 감마선이 광섬유 매질과 상호작용으로 발생하는 물리 반응을 다루기 위해 GEANT4 내 물리적 모델을 이용하였다. 감마선의 상호작용(광전효과, 콤프턴 산란, 전자쌍생성)과 광섬유 방사선 센서의 광학 반응(체렌코프 효과, 굴절, 반사, 흡수)을 물리 반응 목록에 포함시켜 구성하였다.

### 2.2 광섬유 방사선 센서

광섬유 방사선 센서는 core 직경 1 mm, 개구수 0.48인 실리카 광섬유 (BFH48-1000, ThorLab)를 이용하여 모델링하였다. 서로 다른 길이를 가지는 두 개의 광섬유로 구성되며 하나는 감지 광섬유이고, 다른 하나는 기준 광섬유이다. 광섬유 방사선 센서는 방사선원의 측면에 위치하며 모든 광섬유의 양 끝 단에는 각각 반사체와 검출기를 부착하였다. 광섬유 방사선 센서의 검출방법은 선행연구[5]를 참고하여 광섬유 간의 길이 차이를 이용해 감지영역에서 발생하는 체렌코프 방사선만을 고려하였다.

### 2.3 시뮬레이션

시뮬레이션 공간은 납 벽으로 차폐되어 있으며, 광섬유 방사선 센서는 한 쪽 벽을 관통하여 위치해 있다. 방사선원으로는 잘 알려진 방사화 생성물 중 하나인 Co-60을 이용하였다.

시뮬레이션이 시작되면, Co-60이 붕괴하며 감마선이 방출된다. 감마선이 광섬유 방사선 센서로 입사하면 광섬유와 상호작용에 의해 이차전자를 생성한다. 이차전자에 의해 체렌코프 현상이 발생하고, 그로 인해 발생된 체렌코프 광자가 광섬유를 따라 진행하다 검출기에 도달하여 흡수된다. 흡수된 광자의 정보는 출력 파일에 기록되며 시뮬레이션은 종료된다.

## 2.4 시뮬레이션 결과

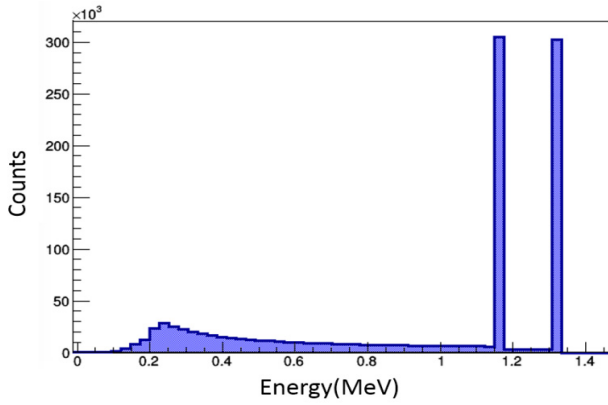


Fig. 1. Gamma-ray emitted by radioactive decay spectrum in GEANT4.

Fig. 1은 Co-60으로부터 방출되는 감마선의 에너지 분포를 나타낸 Fig이다. 감마선 에너지 분포는 초기에 방출된 일차 광자에 의해 1.17 MeV와 1.33 MeV에서 두 개의 봉우리를 나타내었으며, 초기 광자의 비율은 각각 30.00%로 계산되었다.

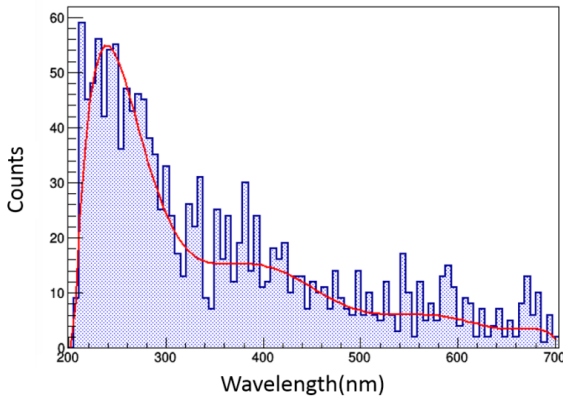


Fig. 2. Wavelength histogram of Cerenkov photon.

다음으로 시뮬레이션을 통해 출력 파일에 기록된 체렌코프 광자 에너지를 다음 식 1을 이용하여 파장으로 변환하였다.

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E_{\text{photon}}} \quad (1)$$

$h$ 는 플랑크 상수이고,  $c$ 는 빛의 속도이다.  $E_{\text{photon}}$ 은 시뮬레이션을 통해 기록된 체렌코프 광자의 에너지이다. Fig. 2는 계산된 파장값을 토대로 나타낸 히스토그램이다. 200 nm 부근에서 가장 높은 봉우리를 나타내며 파장이 길어질수록 감소하는 형태를 보였다. 이는 일반적으로 잘 알려진 체렌코프 방사선이 가지는 스펙트럼 형태와 유사하다는 것을 확인하였다.

## 3. 결론

본 연구에서는 체렌코프 원리 기반 광섬유 방사선 센서를 이용하여 방사화 생성물인 Co-60를 검출하는 시뮬레이션을 수행하였다. Co-60으로부터 방출되는 감마선의 에너지 분포를 구하여 나타내었을 때, 1.17 MeV와 1.33 MeV에서 가장 높은 분포를 보였다. 또한 시뮬레이션을 통해 기록된 체렌코프 광자 에너지를 파장값으로 계산하여 히스토그램으로 도시하였다. 200 nm 영역에서 가장 높은 봉우리를 나타내었고, 점차 감소하는 형태를 보였으며, 이는 일반적으로 체렌코프 방사선이 나타내는 스펙트럼의 형태와 유사함을 확인하였다. 앞으로의 연구방향은 Co-60 외 방사화 생성물에 대해 체렌코프 방사선 검출 시뮬레이션을 수행하고 각 방사화 생성물을 구분할 수 있는 특성을 파악하고자 한다.

## 4. 감사의 글

이 연구는 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 통한 원자력기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다 (2016M2A8A5904264).

## 5. 참고문헌

- [1] 김상헌, 김인섭, 원자력 발전소 배관재 부식생성물 모사와 분석에 관한 연구, 한국원자력학회 2002 추계학술발표회 요약집, (2002).
- [2] J. V. Jelly, Cerenkov radiation and its applications, British Journal of Applied Physics, 6(7), (1955), 227-232.
- [3] M. R. Arnfield, H. E. Gaballa, R. D. Awicker, Q. Islam, and R. Schimidt-Ullrich, "Radiation-induced light in optical fibers and plastic scintillators: Application to brachytherapy dosimetry", IEEE Trans. Nucl. Sci., 43, (1996), 2077-2084.
- [4] Geant4 Collaboration (S. Agostinelli, et al), "Geant4-a simulation toolkit", Nucl. Instrum Methods Phys. Res. A, 506, (2003), 250-303.
- [5] S. H. Shin, D. Jeon, J. S. Kim, J. S. Jang, K. W. Jang, W. J. Yoo, J. H. Moon, B. G. Park, S. Kim, and B. Lee, "Measurements of longitudinal gamma ray distribution using a multichannel fiber-optic Cerenkov radiation sensor", Meas. Sci. Technol., 25, (2014), 1-6.