

몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 광섬유 기반 검출 센서의 응답 특성 연구

한화정, 김범규, 박병기*

순천향대학교, 충청남도 아산시 순천향로 22

withan@sch.ac.kr

1. 서론

방사선원을 안전하게 다루고 보관하기 위해서는 방사선원의 세기와 방출되는 방사선량을 정확히 파악하고 있어야 한다. 이론적으로 주요 방사성 동위원소에서 방출되는 방사선의 에너지와 방출확률이 잘 알려져 있지만, 감마선을 방출하는 선원의 경우 감마선의 에너지 범위에 따라 검출 매질과의 상호작용이 구분될 뿐만 아니라 상호작용으로 인한 이차반응이 발생하여 정확하게 예측하기 어렵다[1].

주로 관찰되는 감마선의 상호작용은 콤프턴 산란으로 감마선이 검출매질과 반응하여 이차전자를 생성시킨다. 이차전자가 물이나 광섬유와 같은 투명한 매질 속을 빛의 위상속도보다 빠르게 진행하면 체렌코프 방사선이 발생한다.

체렌코프 방사선을 이용하여 IAEA에서는 안전조치를 위해 체렌코프 방사선 촬영 장치로 사용후핵연료 집합체의 연료봉 존재 유무를 판별하고 있으며, 일본이나 벨기에 등은 체렌코프 원리를 응용하여 원자로 출력 측정 기술을 사용하고 있다[2]. 국내에서는 핵연료의 유무를 감지하기 위해 섬광체 기반의 감마선 측정 광섬유 센서를 개발하였고, 최근에는 사용후핵연료의 연소도 및 결함 판별을 위한 광섬유 기반 방사선 센서 기술개발 연구도 진행되었다[3-4].

체렌코프 방사선 검출 실험은 고 선량 선원을 취급하므로 다루는 데 제약이 많고 접근이 어렵다. 그러므로 방사선원의 변화나 검출 과정마다 일어나는 반응을 상세히 확인하고자 할 때 몬테카를로 기반의 컴퓨터 프로그램을 이용하여 구현할 수 있다.

본 연구는 방사선원으로부터 감마선을 측정하기 위한 이전 연구에서 개발된 몬테카를로 기반 프로그램을 이용한다. 방사선원의 세기에 따라 이차반응으로 생성되는 체렌코프 방사선의 양을 측정하여 체렌코프 방사선과 방사선원의 세기와의 관계를 파악하고자 한다.

2. 시뮬레이션

본 연구에서는 몬테카를로 기반의 GEANT4 (ver.10.02) 프로그램을 사용한다. GEANT4 내 라이브러리를 이용하여 필요한 프로세스를 구성하고, 가상 실험 공간을 조성하여 시뮬레이션 한다.

2.1 물리적 프로세스

방사선원으로부터 붕괴에 의해 방출되는 감마선이 매질과의 상호작용을 하여 체렌코프 현상이 발생하는 과정을 모사하기 위해 주요한 프로세스를 크게 세 가지로 나누어 구성하였다.

- 붕괴프로세스: 방사선원이 붕괴되어 감마선을 방출하는 과정을 모사하며, 선원의 원자번호, 원자 질량 및 선원형태 같은 입력 자료를 필요로 한다.
- 전자기방사선프로세스: 방출된 감마선이 검출매질과의 상호작용에 의해 이차전자가 생성되는 과정으로 감마선의 에너지 범위에 따라 일어나는 광전효과, 콤프턴산란, 전자쌍생성 등의 상호작용이 포함되어 있다.
- 광학프로세스: 상호작용으로 생성된 이차전자가 매질 내에서 일으키는 반응을 다루며 반사, 굴절 같은 경계 반응 및 섬광, 제동복사, 체렌코프 현상 등이 포함되어 있다.

2.2 기하학적 형상 구조

본 연구에서 구성한 가상의 실험 공간을 Fig. 1에 나타내었다. 납 벽으로 차폐된 공간 안에 점 형태의 방사선원을 원점에 위치시키고, 5 m의 길이를 가지는 실리카 광섬유 검출 센서가 선원과 0.3 m의 간격을 가지고 위치한다. 검출 센서는 한 쪽 벽을 관통하여 나오는 형태로, 공간 내 위치한 센서의 끝에는 반사체를 부착하였고 공간 외 위치한 센서의 끝에는 광 음극을 부착하였다.

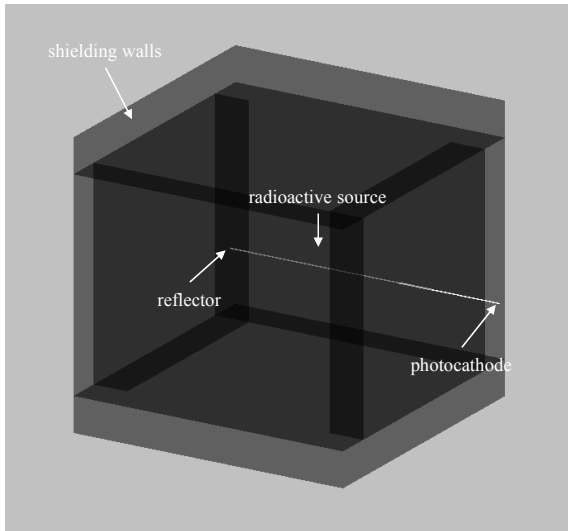


Fig. 1. Geometrical view of Cerenkov Radiation Detection Modeling in GEANT4.

2.3 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에서 방사선원으로 Co-60를 이용하였다. Co-60은 매 붕괴마다 1.17 MeV와 1.33 MeV의 에너지를 가지는 두 개의 감마선을 동일한 비율로 방출하며, 5.27 년의 반감기를 가지는 방사성 동위원소이다. Co-60 방사선원의 세기에 따른 체렌코프 광자의 발생량을 검출하기 위해, Co-60 방사선원의 세기를 1000Ci(37TBq)부터 5000Ci(185TBq) 까지 1000Ci(37TBq) 씩 증가시켜 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션이 진행되면 Co-60 방사선원이 붕괴되면서 감마선이 방출된다. 방출되는 감마선은 광섬유와 상호작용에 의해 이차전자를 생성한다. 이차전자는 광섬유 내를 빠르게 진행하면서 체렌코프 방사선을 발생시키고, 최종적으로 광 음극에 부딪쳐 흡수된 체렌코프 광자의 정보를 기록한다.

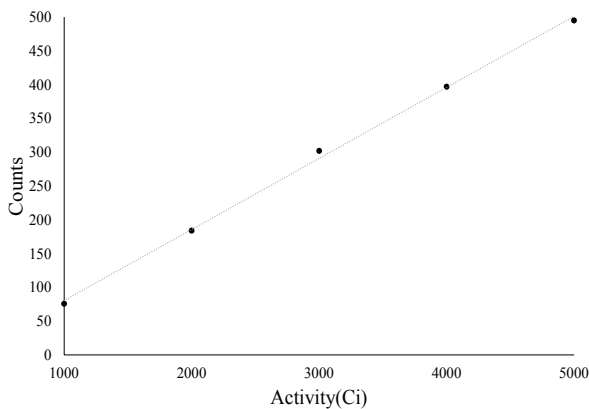


Fig. 2. Relationship between activity of Co-60 radiation source and Cerenkov photon counts.

기록된 데이터를 토대로 방사선원의 세기에 대한 광 음극에 수집된 체렌코프 광자의 발생량의 결과 그래프를 Fig. 2에 도시하였다. 방사선원의 세기가 증가할수록 센서에 검출되는 체렌코프 광자의 수도 선형적으로 증가하는 특성을 나타냈다.

3. 결론

본 연구에서는 방사선원의 붕괴로 방출되는 감마선이 검출 매질과 상호작용하여 이차전자를 생성하고, 이차반응으로 생성된 체렌코프 광자가 광 음극에 흡수되는 일련의 과정을 모사하였다. 개발한 몬테카를로 프로그램을 이용하여 감마선을 방출하는 방사선원의 세기변화에 대한 체렌코프 광자의 발생량을 측정하여 비교하였고, 체렌코프 광자의 발생량은 방사선원의 세기가 높을수록 증가하는 특성을 확인했다. 앞으로의 연구방향은 개발한 프로그램을 이용하여 Co-60 이외 다른 방사성 동위원소에 대해서도 체렌코프 광자를 검출하여 각 동위원소 별로 가지는 특성을 파악하는 것이다.

4. 참고문헌

- [1] 강상구, 김종일, 김진영, 양광모, 김정기, 강영록, 정동혁, GEANT4를 이용한 Co-60 방사선 치료기의 전산 시뮬, *New Physics: Sae Mulli* (The Korean Physical Society), 61(12), (2011.12), 1163-1169.
- [2] International Nuclear Verification, *Series No. 1*, IAEA, Vienna, (2003).
- [3] 신상훈, 유욱재, 장경원, 조승현, 박병기, 이봉수, 사용후핵연료 집합체 모사장치를 이용한 광섬유 체렌코프 방사선 센서 시스템의 성능평가, *Journal of Sensor Science and Technology* 23(4), (2014)
- [4] 장경원, 조동현, 유욱재, 서정기, 허지연, 이봉수, 신상훈, 박병기, 김신, 광섬유 방사선량계를 이용한 Co-60 방사선원으로부터 조사되는 상대선량측정, *Journal of the Korean Sensors Society*, 19(1), (2010), 52-57.