

GEANT4를 이용한 체렌코프 원리 기반 광섬유 방사선 센서의 특성 분석

한화정, 김범규, 박병기*

순천향대학교, 충청남도 아산시 순천향로 22

*withan@sch.ac.kr

1. 서론

방사선을 검출하는 방법은 전리작용, 여기작용, 섬광작용, 감광작용, 화학작용 등을 이용한 다양한 방법이 있다[1]. 이 중 섬광작용을 이용한 섬광체와 광섬유 그리고 광계측장비로 구성된 섬광체 기반의 방사선 검출기가 있으며, 섬광체 없이 광섬유와 광계측장비로만 구성된 체렌코프 현상을 이용한 광섬유 기반의 방사선 검출기가 있다.

체렌코프 현상은 잘 알려진 프로세스로 물과 같은 투명한 매질 내에서 빛의 위상 속도보다 빠른 속도로 하전 입자가 매질 내를 진행할 때 체렌코프 방사선이 발생하는 현상이다[2]. 체렌코프 방사선 발생의 주요인은 감마선에 의해 발생하는 콤프턴 전자이다. 콤프턴 전자는 감마선이 광섬유 내 전자와 충돌하여 전자가 에너지의 일부를 얻어 튕겨나가는 콤프턴 산란에 의해 생성된 전자이다. 콤프턴 산란은 100keV~10MeV 사이에서 일어나는 중간 에너지를 가진 감마선과의 상호작용이며, 이 상호작용을 통해서 체렌코프 방사선이 발생된다.

체렌코프 방사선의 원리를 이용하여 감마선에 의해 광섬유에서 발생하는 체렌코프 방사선의 측정을 통해 감마선 측정을 위한 광섬유 방사선 센서의 성능평가 연구를 진행하였다[3]. 또한 핵분열 원자로 코어 내부의 혼합 감마-중성자 방사선 영역의 감마 플럭스 모니터링 시스템을 개발하기 위해 광섬유를 사용한 체렌코프 방사선의 모니터링 기술을 제안하는 연구가 있었다[4]. 두 연구는 공통적으로 감마선의 세기가 증가할수록 발생하는 체렌코프 방사선의 세기가 증가하는 결과를 보였다.

감마선이 물질과의 상호작용으로 발생하는 물리적 현상들을 모사할 수 있는 Geant4[5]를 사용하여 광섬유 내에서 감마선과의 상호작용으로 발생된 체렌코프 광자를 모사하여 광섬유 방사선 센서의 특성을 분석하고자 한다.

2. Modeling

2.1 GEANT4 시뮬레이션 코드

본 연구는 ^{60}Co 방사선원으로부터 방출되는 1 MeV 영역의 감마선을 다루기 위해, GEANT4에서 구현된 물리적 모델 중 250 eV 이하의 전자기적 상호작용까지 포함하는 전자기 물리적 현상을 다루는 저 에너지 모델을 사용한다. 이 모델은 다양한 상호작용을 담은 부속 코드들로 이루어져있고, 사용자는 모사하고자 하는 목적에 맞게 기하학적 구조, 선원, 물리적 특성, 결과 처리에 관련된 부분을 직접 작성할 수 있도록 구성되어 있다[6].

2.2 광섬유 방사선 센서

광섬유 방사선 센서를 전산모사하기 위하여 상용화된 실리카 광섬유 모델인 BFH-48(1000, Thorlabs)을 사용하였다. 이 광섬유는 수산기(OH-)를 많이 함유하는 광섬유로서 순수 실리카(pure silica)로 이루어진 코어와 하드 폴리머(hard polymer) 재질의 클래딩(cladding)으로 구성되어 있으며, 개구수(numerical aperture, NA)는 0.48이다[3].

광섬유 센서 모델에서는 외부직경 1 mm, 길이 1 m의 원통 형태로 가정하였다. 광섬유의 한 쪽은 발생한 체렌코프 광자를 반사시키기 위하여 반사체 역할을 하는 알루미늄(Al)을 위치 시켰다. 반대 쪽은 체렌코프 효과에 의해 발생된 광자를 측정할 수 있도록 광자 흡수체를 위치시켰다.

방사선원은 감마선을 모사하기 위해 1.17 MeV와 1.33 MeV의 감마선을 방출하는 ^{60}Co 선원을 사용하였다. 1.17 MeV와 1.33 MeV의 광자가 각각 50%의 확률을 가지고 모든 방향으로 방출하도록 설정하였다.

2.3 Simulation 결과

Fig. 1은 방출된 감마선이 광섬유와 반응하여 발생하는 체렌코프 방사선을 나타내는 시뮬레이션이다. 감마선이 광섬유에 입사되면 체렌코프 효과에 의해 광자를 발생시킨다. 이 광자가 광섬유를 따라 검출 부분에 도달할 때 광자 에너지를 측정하였다.

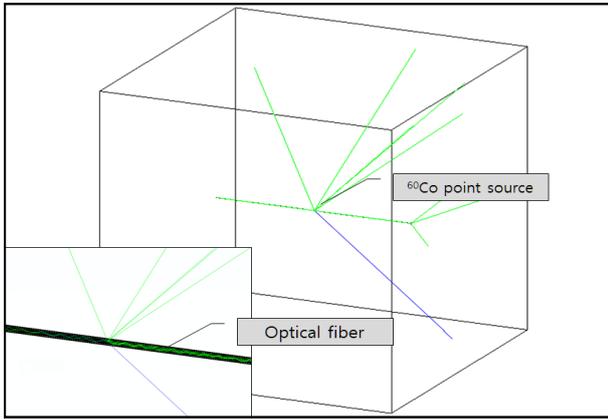


Fig. 1. The Cerenkov radiation in silica optical fiber generated by gamma ray(green line).

시뮬레이션을 통해 얻어진 체렌코프 광자의 에너지 값으로 각각의 파장을 계산하였다. 식 (1)을 사용하였다.

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

여기서, h 는 플랑크 상수이며 c 는 빛의 속도이다. E_{photon} 는 체렌코프 광자의 에너지이고, 이 값은 시뮬레이션을 통해 얻어졌다. 각각의 값을 대입하여 파장을 계산하였다. 계산된 결과 값을 바탕으로 Fig. 2에 파장 스펙트럼을 나타내었다.

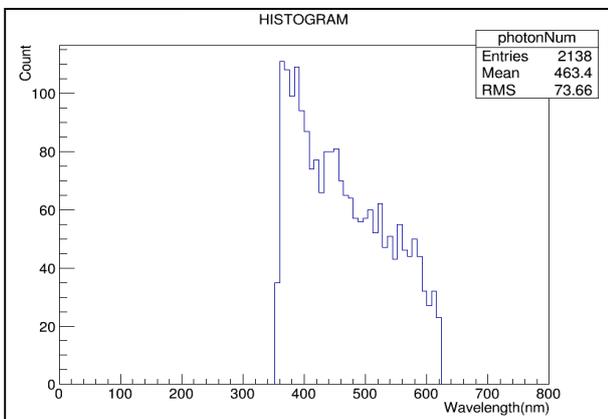


Fig. 2. Cerenkov photon energy spectrum calculated with GEANT4.

Fig. 2를 보면, 350nm에서 가장 높은 봉우리가 보이고 620nm까지 점차 감소하는 형태를 보인다. 계산 결과, 스펙트럼은 일반적으로 알려진 체렌코프 방사선의 방출 스펙트럼과 유사하다는 것을 알 수 있다[7].

3. 결론

본 연구에서는 Geant4를 이용하여 방사선원에서 방출된 감마선이 광섬유 내로 입사하여 광섬유 매질과의 상호작용에 의해 발생된 체렌코프 광자의 에너지를 측정하였다. 측정된 값을 이용해 파장을 계산하여 스펙트럼으로 나타내었다. 얻어진 스펙트럼의 형태는 체렌코프 방사선의 방출 스펙트럼과 유사함을 보였다.

앞으로의 연구방향은 이번 연구에서 사용된 60Co 외에 감마선을 방출하는 다른 방사선원의 파장 스펙트럼을 구하여 비교하고자 한다. 방사선원 별로 가지는 스펙트럼 상의 특징을 찾아 시뮬레이션을 통해 혼합된 방사선원의 구별이 가능한지 확인할 것이다.

4. 참고문헌

- [1] 김정호 주관식, 플라스틱 섬광체를 이용한 방사선 검출기의 검출 효율을 높이기 위한 섬광체 연마 기술 연구, KEEE.18.4, (2014).
- [2] Landau L D and Lifshitz E M, *Electrodynamics of Continuous Media*(Oxford: Pergamon) chapter13, (1984).
- [3] 신상훈 외 5인, 사용후핵연료 집합체 모사장치를 이용한 광섬유 체렌코프 방사선 센서 시스템의 성능평가, *Journal of Sensor Science and Technology* 23.4, (2014).
- [4] B Brichard, A F Fernandez, H Ooms and F Berghmans,, *Fibre-optic gamma-flux monitoring in a fission reactor by means of Cerenkov radiation*, *Measurement Science and Technology* 18, (2007).
- [5] H. Yoriyaz, M. Moralles, P. de T. D. Siqueira, C. da C. Guimaraes, F. B. Cintra and A. dos Santos, *Med. Phys.* 36, 5193(2009).
- [6] 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.
- [7] A A Ivanov, S P Knurenko and I Ye Sleptsov, *Measuring extensive air showers with Cherenkov light detectors of the Yakutsk array: the energy spectrum of cosmic rays*, *New J. Phys.* 11 (2009).