

플라스틱 섬광체를 이용한 방사선 검출기의 검출 효율을 높이기 위한 섬광체 연마 기술 연구

Study on Scintillator Polishing Technology for Increasing the Detection Efficiency of Radiation Detectors Using Plastic Scintillators

김 정 호*, 주 관 식**

Jeong-Ho Kim*, Koan-Sik Joo**

Abstract

Scintillators were polished in four steps using polishing paper, to reduce the optical loss occurring at their cross section when radiation detectors are fabricated with plastic scintillators. We studied the correlation between the polishing steps and detection efficiency and assessed the detection characteristics that are dependent in the polishing steps. Our results showed that the detection efficiency increased by approximately 7.75 times for a detector that used a scintillator polished in four steps, compared to a detector that used an depolished scintillator. For detectors fabricated using scintillators polished in different steps, better detection characteristics were obtained in terms of the activity, distance, and location of radiation, compared to detectors fabricated with an depolished scintillator.

요 약

본 연구는 방사선 검출용 플라스틱 섬광체 검출기의 검출효율을 높이기 위한 섬광체 연마에 관한 연구이다. 플라스틱 섬광체를 이용한 검출기를 제작하여 4단계의 연마 과정으로 섬광체 절단면에서 광손실을 감소시켰다. 이때 연마단계와 검출 효율에 대한 상관관계를 구하여 검출 특성을 평가하였다. 연마단계에 따른 검출 효율을 측정된 결과 연마하지 않은 섬광체와 비교하여 4단계의 연마 과정을 모두 연마한 섬광체를 이용한 검출기의 검출 효율이 최대 7.57배 증가하는 것을 확인하였고 각 단계 별로 연마한 섬광체를 이용하여 제작한 검출기에서도 방사선의 세기, 거리, 위치에 대한 검출 특성에서도 연마하지 않은 섬광체에 비하여 좋은 검출 특성을 보였다.

Key words : Plastic scintillator, Scintillator detector, SiPM, Polishing paper, Radiation.

* Dept. of Physics, Myongji University

★ Corresponding author

031-330-6167, ksjoo72@gmail.com

※ Acknowledgment

This work was supported by the Korea Atomic Energy Research Institute (No.2013M2A2A4027122)

Manuscript received Oct. 16, 2014; revised Nov. 12, 2014 ; accepted Nov 13. 2014

I. 서론

방사선을 검출하는 방법은 전리작용, 여기작용, 발광작용, 감광작용, 화학작용 등을 이용한 다양한 방법들이 있다. 이 중 발광작용을 이용한 섬광검출기는 섬광체와 광센서(PMT, APD, Pin-diode, SiPM)와 결합하여 의료, 산업, 국방 등 다양한 분야에서 다양한 형태로 연구 및 개발되고 있다. 이러한 섬광검출기는 검출 목적에 따라 목적에 부합하는 섬광체를 선정하게 된다. 섬광체는 크게 무기 섬광체와 유기 섬광체로 두 가지로 나뉘게 된다. 무기 섬광체는 발광효율이 높으며 화학적 내성이 높고 원자번호와 밀도가 높은 특성을 지니고 있어 감마선 또는 엑스선 및 중성자 측정에 용이하다. 유기 섬광체는 C, H, O가 주성분이므로 광전효과 발생 확률이 낮아 베타 또는 알파 측정에 용이하다. 유기 섬광체 중 플라스틱 섬광체는 저렴한 가격, 유연성 그리고 제작의 용이하다는 장점을 가지고 있어 알파 또는 베타 검출기 제작에 많이 사용된다. 그러나 플라스틱 섬광체를 이용한 검출기 제작 시 검출 목적에 따라 크기와 모양을 설정하여 사용해야하므로 절단면이 발생한다. 절단면에서의 불균일로 인해 광손실이 발생하게 되는데 이러한 광손실을 줄이기 위하여 섬광체의 절단면을 연마지로 연마하게 된다.[1]-[3]

본 연구에서는 플라스틱 섬광체를 이용한 방사선 검출기의 검출 효율을 높이기 위하여 섬광체의 절단면을 4가지 종류의 연마지를 이용하여 연마하였다. 또한 연마지의 종류에 따라 증가되는 검출 효율에 대하여 연구하고 각 연마단계에 따라 연마한 섬광체와 광센서를 결합 한 검출기를 통하여 검출 특성을 평가하였다.

섬광검출기의 제작에는 Saint-gobain사의 플라스틱 섬광체인 BCF-12와 BCF-20을 사용하였다. 또한 섬광체와 결합되는 센서는 BCF섬광체의 발광 파장에 맞는 흡수 파장을 가지며 PMT나 APD, Pin-diode에 비하여 높은 증배율, 낮은 인가전압, 작은 면적 등의 장점을 가지는 Hamamatsu사의 실리콘 광 증배소자

Table 1. Property of photo sensor

표 1. 광센서 및 광전자증배관의 특성

재료	APD	SiPM	PMT
인가전압(V)	100~200	30~70	1,000~3,000
증배율	100~200	10 ⁶	10 ⁶
청색양자 효율(%)	50	20	25~30

(SiPM, Silicon Photo-Multiplier)인 C10507-11-050U를 사용하였다(표 1).

II. 본론

1. 시스템 제작 및 실험 방법

1.1 플라스틱 섬광체 표면 및 섬광검출기의 검출효율 측정

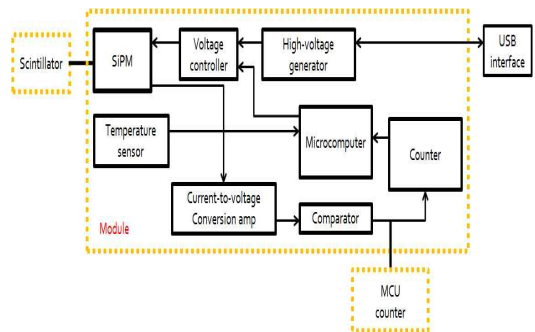


Fig. 1. Block diagram of plastic scintillator detector

그림 1. 섬광 검출기의 블록선도

본 연구에서 방사선 검출기를 제작하기 위하여 435nm와 492nm의 파장을 가지는 BCF-12와 BCF-20 섬광체를 사용하였으며 섬광체의 직경은 1mm이고 베타/감마선 투과 깊이에 따라 섬광체의 길이는 20mm로 설정하였다. 절단면에서 발생하는 광손실을 줄이기 위하여 섬광체의 절단면을 3M사의 4가지 두께의 연마지(40um, 13um, 4um, 0.3um)를 사용하여 연마하였다. 각 각 연마 된 두 종류의 섬광체와 440nm의 흡수 파장을 갖는 실리콘 광 증배소자와 접합하여 그림 1과 같은 시스템을 구성하여 특성 분석하였다. 효율 측정 및 특성 분석 시 섬광체에서 발생 한 광자가 실리콘 광 증배소자에서 전기적 신호로 바뀌어 펄스를 형성하게 되는데 이를 계수량으로 변환하기 위하여 MCU모듈의 한 종류로 대중적으로 사용되고 있는 Arduino uno를 이용하여 MCU계수기를 제작하였다. MCU계수기로 들어가는 신호의 잡음을 줄이기 위하여 콤퍼레이터를 사용하여 아날로그 신호를 디지털 신호로 바꾸어 사용하였다.[4]-[6]

나노 단위에서 정확히 같은 지점에서 측정하여서 비교 할 수 있는 장점을 가지고 있는 AFM(Atomic Force Microscope)은 팁과 시료의 표면에서의 상호작용을 이용하여 표면 영상과 표면에서의 기계적, 전기적, 자기적 및 전기화학적 특성을 평가하는데 사용된다. 본 연구에서는 연마 정도에 따른 표면 구조 변화

를 측정하기 위하여 Park systems사의 XE-100 AFM을 사용하여 각 단계에서 얻어 된 표면 영상을 측정 및 분석 비교하였다.

방사선 검출 시 검출기의 유감체적에 상호 작용한 입자는 각각의 입자 한 개당 출력 펄스를 가지게 되며 이 펄스를 이용하여 검출효율을 구하기 위해서는 다음과 같은 계산 방법이 사용 된다.

$$PDE(\%) = \frac{D}{N} \times 100 \quad (1)$$

계산식 (1)에서 D는 검출 광자의 개수, N는 검출기에 입사 양자의 개수를 나타낸다. 본 연구에서는 각각의 단계에 따라 얻어진 두 종류의 섬광체와 실리콘 광 증배소자가 결합된 섬광 검출기의 검출 효율을 구하기 위하여 10uCi의 방사선 세기를 갖는 Cs-137 교정선원을 사용하였으며 검출기와의 거리는 밀봉재질의 두께를 포함하여 2mm로 설정하여 검출 효율을 측정하였다.

1.2 플라스틱 섬광 검출기의 검출 특성 연구

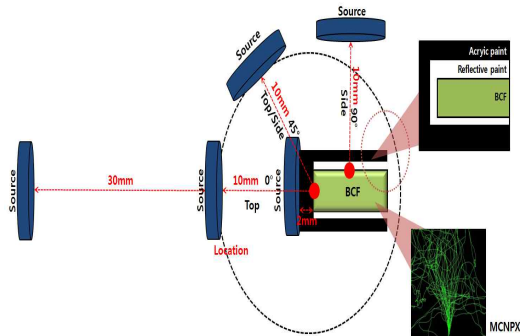


Fig. 2. The outline of position and distance measure
그림 2. 거리 및 위치 측정 방법

연마한 섬광체와 실리콘 광 증배소자를 결합한 검출기의 검출 특성을 연구하기 위하여 본 연구에서는 방사선 세기 및 위치와 거리 변화에 따른 검출기의 방사선 계수량을 측정하였고 측정값을 몬테칼로 전산모사의 값과 비교하였다.

몬테칼로 방법을 이용한 전산모사 프로그램으로 방사선을 이용한 전산모사에 가장 많이 사용되고 있는 MCNPX를 이용하여 위치 및 거리에 대한 기하학적인 변수를 그림 2와 같은 시스템으로 구성하였다. 구성된 시스템에서 BCF 내부에서 발생하는 광자의 수를 측정하기 위하여 F4 tally를 사용하였으며 전산모

사의 오류를 줄이기 위하여 시행 횟수를 10^9 번으로 설정하여 전산모사 하였다.

방사선 세기에 따른 계수량을 측정하기 위하여 Cs-137 선원을 사용하였고 검출기와의 거리는 밀봉재질을 포함하여 2mm로 설정하여 1uCi, 5uCi, 10uCi 세기에서 측정하였다. 거리에 따른 검출 특성을 평가하기 위하여 1uCi, 5uCi, 10uCi 세기의 Cs-137 선원을 이용하였으며 거리는 5mm부터 40mm까지 5mm 간격으로 측정하였다. 위치에 따른 검출 특성을 평가하기 위하여 10uCi 세기의 Cs-137 선원을 이용하였고 밀봉재질을 포함하여 10mm 거리에서 0도(전면), 45도(측면), 90도(대각선) 위치에서 측정하였다.

2. 실험 결과 및 분석

2.1 섬광체 표면영상 및 검출기의 검출효율 측정

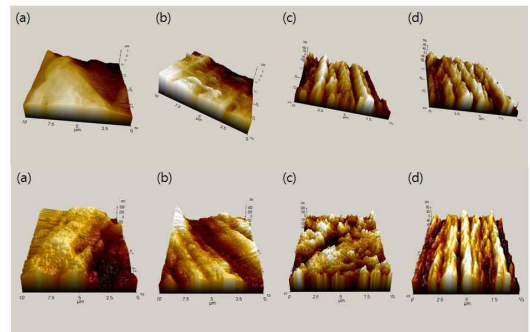


Fig. 3. Topography of BCF scintillators, BCF-12 (a) 40um (b) 12um (c) 4um (d) 0.3um, BCF-20 (a) 40um (b) 12um (c) 4um (d) 0.3um

그림 3. BCF 섬광체의 표면 영상, BCF-12 (a) 40um (b) 12um (c) 4um (d) 0.3um, BCF-20 (a) 40um (b) 12um (c) 4um (d) 0.3um

그림 3는 AFM을 통하여 얻어진 섬광체의 표면영상을 획득한 이미지이다. 두 섬광체 모두 연마단계가 증가 할수록 단위 면적 당 더 작은 크기의 많은 미세 피라미드 구조를 형성한다. 이러한 피라미드 구조의 증가는 섬광체 내부에서 발생 한 광자와 표면사이에서 더 많은 상호작용이 일어나는 것을 의미한다.[1]

상호작용의 증가는 광량의 증가로 이어지게 된다. 이러한 현상은 그림 4의 그래프에서 확인 할 수 있다. BCF-12와 BCF-20 모두 연마의 정도가 높아질수록 계수량을 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 4의 (c)와(d)를 통하여 0.3um 연마치를 기준으로 연마하지 않았을 때의 BCF-12는 10%, BCF-20는 13%의 계수율을 보였다. 연마 단계가 증가함에 따라

서 BCF-12는 30%, 52% 91%로 증가하였고 BCF-20은 33%, 61% 91%로 2가지 섬광체 모두 큰 변화폭으로 증가하는 것을 확인하였으며 3단계인 이상의 단계에서 90%의 계수율을 보이는 것을 확인하였다. 또한 40um 두께의 연마지를 사용하였을 때 평균에서 최대 편차인 115%의 편차를 보였으며 0.3um 두께의 연마지를 사용하여 연마한 결과에서는 최소 편차인 10% 편차를 보였다.

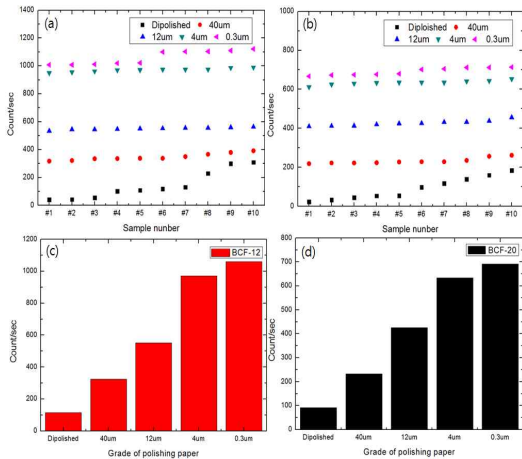


Fig. 4. Change of Polishing step, Count of (a) BCF-12 and (b) BCF-20, Average Count of (c) BCF-12 and (d) BCF-20

그림 4. 연마단계 변화 (a) BCF-12와 (b) BCF-20의 계수량, (c) BCF-12와 (d) BCF-20의 평균 계수량

표 2는 그림 4의 평균 계수량과 식 (1)을 이용하여 계산한 검출 효율의 값이다. BCF-12 섬광체는 연마하지 않았을 때 2.49%의 검출효율에서 단계별로 연마하였을 때 6.01%, 9.53%, 18.35%로 최소 2.41배에서 4단계의 과정을 연마한 섬광체에서 최대 7.36배까지 증가하였고 BCF-20 섬광체는 연마하지 않은 섬광체의 효율이 1.58%에서 연마 단계별로 4.03%, 7.38%, 10.97%, 11.97%로 최소 2.23배에서 최대 7.57배까지 증가하는 것을 확인할 수 있다. 두 섬광체 모두 연마 전보다 연마 후의 검출효율이 약 2배에서 7배까지 증가한 것을 확인할 수 있었다.

2.2 섬광검출기의 검출 특성 분석

2.2.1 방사선 세기에 따른 측정

그림 5는 방사선 세기에 따른 계수량 비교 그래프이다. 1uCi, 5uCi, 10uCi 세기의 Cs-137 선원을 이용

Table 2. PDE(%) of detector
표 2. 검출기의 검출 효율

Cs-137 10uCi의양자수						5780
연마지 두께(um)	X	40	12	4	0.3	
BCF-12						
계수량(Count/sec)	144.1	347.6	550.8	970.8	1060.9	
검출 효율(%)	2.49	6.01	9.53	16.80	18.35	
BCF-20						
계수량(Count/sec)	91.3	233	426.5	634.2	691.7	
검출 효율(%)	1.58	4.03	7.38	10.97	11.97	

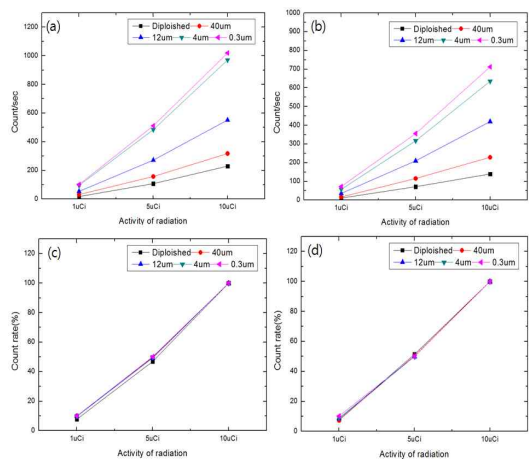


Fig. 5. Change of intensity, Count of (a) BCF-12 and (b) BCF-20, Count rate of (c) BCF-12 and (d) BCF-20

그림 5. 세기 변화, (a) BCF-12와 (b) BCF-20의 계수량 (c) BCF-12와 (d) BCF-20의 계수율

하여 측정된 결과 세가지 세기 모두에서 연마하지 않은 섬광체와 비교하여 연마 되어진 섬광체의 계수량이 증가하는 확인 하였고 각 단계에서 10uCi에서 측정된 결과 값을 기준으로 하여 선형성을 측정된 결과 BCF-12와 BCF-20 모두 0.3um 두께로 연마한 섬광체가 1% 내로 가장 좋은 선형성을 보였으며 각 방사선 선원의 세기에 따른 최대 오차로는 BCF-12에서 1uCi 세기 선원을 사용하였을 때 연마하지 않은 섬광체에서 2.27%의 오차를 보였고 BCF-20에서는 40um 두께의 연마지로 연마 되어진 섬광체에서 2.58%의 최대 오차를 보였다. 또한 5uCi를 사용하여 측정된 결과 BCF-12에서 연마하지 않은 섬광체에서 3.34%의 오차를 보였고 BCF-20에서도 연마하지 않은 섬광체에서 1.43%의 최대 오차를 보였다.

2.2.2 거리 변화에 따른 방사선 측정

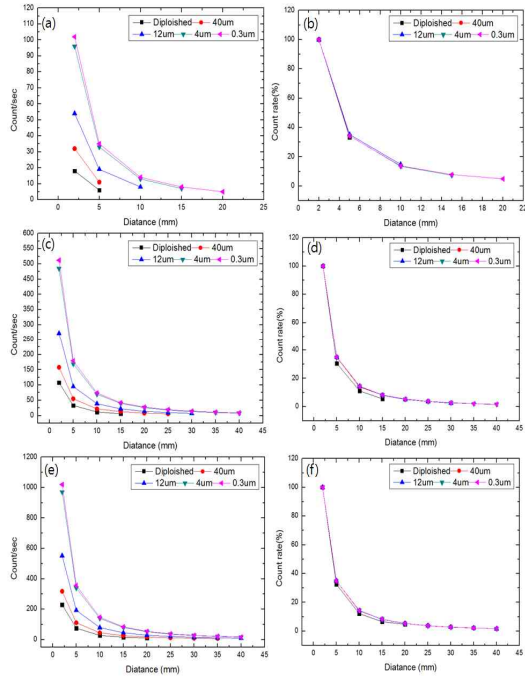


Fig. 6. Change of distance, Count of BCF-12 at (a) 1uCi (c) 5uCi (e) 10uCi, Count rate of BCF-12 at (b) 1uCi (d) 5uCi (f) 10uCi

그림 6. 거리 변화, (a) 1uCi (c) 5uCi (e) 10uCi에서의 BCF-12 계수량, (b) 1uCi (d) 5uCi (f) 10uCi에서의 BCF-12 계수율

그림 6은 BCF-12 섬광체의 연마 정도에 따른 거리별 검출 값의 비교 그래프이다. (a), (c), (e)는 각각 선원의 1uCi, 5uCi, 10uCi 세기의 선원과의 거리를 5mm 씩 변화하여 측정된 계수량이다. 1uCi에서 연마하지 않은 섬광체는 5mm의 거리까지 측정 가능하였으며 연마 단계별로 5mm, 10mm, 15mm, 20mm로 측정 가능한 거리가 증가하는 것을 확인하였다. 5uCi와 10uCi의 세기에서도 연마하지 않은 섬광체는 연마한 섬광체에 비하여 측정 가능거리가 짧은 것을 확인하였다. (b), (d), (f) 그래프는 1uCi, 5uCi, 10uCi 세기의 선원과의 거리를 5mm씩 변화하여 측정된 계수율로 섬광체에서 최대 계수율을 100%로 설정하여 MCNPX 전산모사와 비교한 그래프이다. 연마하지 않은 섬광체는 전산모사와 비교하여 1uCi, 5uCi, 10uCi에서 각각 1.7%, 4.4%, 2.4%의 최대 오차를 보였다. 연마 단계별 연마한 섬광체의 측정값과 전산모사와 비교한 결과는 1uCi에서 단계별로 0.6%, 0.34%, 0.95%,

0.75%로 최대 오차가 모두 1% 미만으로 나왔다. 또한 5uCi, 10uCi에서도 최대 오차가 모두 1% 미만으로 거리 변화에 따른 측정에 있어서 연마한 섬광체가 연마하지 않은 섬광체와 비교하여 좋은 검출 특성을 보이는 것을 확인하였다.

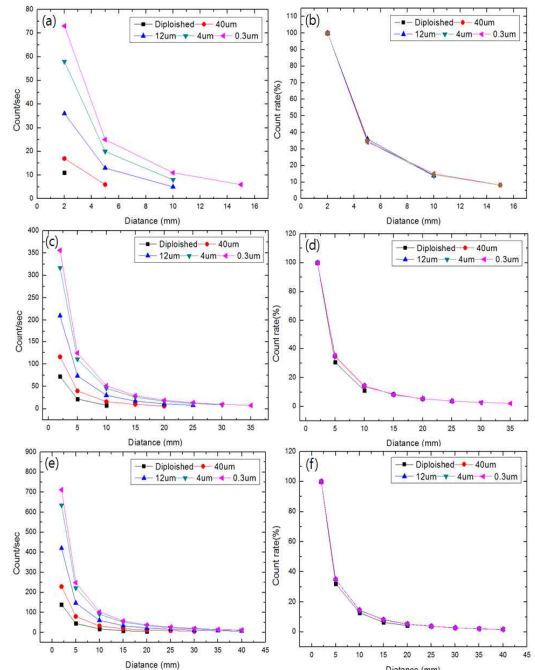


Fig. 7. Change of distance, Count of BCF-20 at (a) 1uCi (c) 5uCi (e) 10uCi, Count rate of BCF-20 at (b) 1uCi (d) 5uCi (f) 10uCi

그림 7. 거리 변화, BCF-20 (a) 1uCi (c) 5uCi (e) 10uCi에서의 계수량, BCF-20 (b) 1uCi (d) 5uCi (f) 10uCi에서의 계수율

그림 7은 BCF-20 섬광체의 연마 정도에 따른 거리별 검출 값의 비교 그래프이다. (a), (c), (e)는 각각 선원의 1uCi, 5uCi, 10uCi 세기의 선원과의 거리를 5mm 씩 변화하여 측정된 계수량이다. 연마하지 않은 섬광체는 1uCi 세기의 선원에서 2mm 이외의 거리에서 측정이 불가능하였다. 또한 5uCi, 10uCi에서 10mm와 20mm로 연마한 섬광체와 비교하여 측정 가능거리가 최소 10mm에서 최대 20mm까지 짧은 것을 확인하였다. (b), (d), (f) 그래프는 1uCi, 5uCi, 10uCi 세기의 선원과의 거리를 5mm씩 변화하여 측정된 계수율과 MCNPX 전산모사 값을 비교한 그래프이다. 연마하지 않은 섬광체는 1uCi에서 2mm 이외의 거리에서 측정이 되지 않았기 때문에 전산모사와 비교가 불가

능하였다. 5uCi와 10uCi에서 전산모사와 비교한 결과 각 각 4.4%와 2.85%로 연마한 섬광체가 5uCi에서 최대 0.68% 10uCi에서 최대 0.15%의 오차를 보이는 것에 비하여 높은 오차를 보였다.

2.2.3 위치 변화 따른 방사선 측정

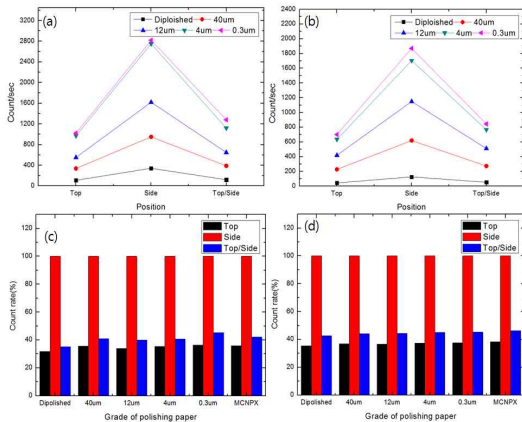


Fig. 8. Change of Position, Count of (a) BCF-12 and (b) BCF-20, Count rate of (c) BCF-12 and (d) BCF-20

그림 8. 위치 변화, (a) BCF-12와 (b) BCF-20의 계수량, (c) BCF-12와 (d) BCF-20의 계수율

그림 8은 위치 변화에 따른 계수량 그래프이다. 선원을 전면, 측면, 대각선 3가지 방향에 위치하여 측정 한 결과 BCF-12와 BCF-20 두섬광체 모두 연마의 단계를 높임에 따라 모든 방향에서 계수량이 증가하였고 각 연마단계에서 가장 많이 계수되는 방향인 측면을 100%로 설정하여 MCNFX 전산모사의 값과 계수율을 비교한 결과 BCF-12 섬광체의 경우 연마하지 않은 섬광체가 전면에서 3.9% 대각선에서 7%로 가장 큰 오차를 보였고 연마 되어진 섬광체는 모든 방향에서 2%이내의 오차를 보였다. 또한 BCF-20 섬광체의 경우에도 연마하지 않은 섬광체가 전면에서 2.9% 대각선에서 3.8%로 가장 큰 오차를 보였고 연마한 섬광체는 모든 방향에서 2%이내의 오차를 보였으므로 BCF-12, BCF-20 섬광체 모두 연마 단계를 거친 섬광체에서 더 좋은 검출 특성을 보였다.

III 결론

본 연구에서는 방사선 측정용 플라스틱 섬광체 검출기의 검출효율을 높이기 위한 섬광체 연마에 관한 연구를 하였다. 연마하지 않은 섬광체를 이용한 검출

기에 비하여 4가지 단계의 연마를 거친 후의 섬광체가 더 많은 미세 피라미드 구조를 가지며 이를 이용하여 제작한 검출기가 연마하지 않은 섬광체를 이용하여 제작한 검출기에 비하여 검출효율이 최소 2.23 배에서 최대 7.57배까지 증가하는 것을 확인하였다.

또한 연마 전과 후의 섬광체를 이용하여 제작한 검출기의 특성 분석을 위하여 방사선원의 세기, 위치, 거리의 변수를 두어 측정한 결과 연마를 하지 않은 섬광체에 비하여 연마한 섬광체를 이용한 검출기가 세기에서 더 좋은 선형성을 보였다. 또한 위치 측정에서도 전산모사와의 오차가 적었으며 거리 측정에서도 더 먼 측정 가능거리를 확보할 수 있었다.

따라서 플라스틱 섬광체를 이용한 검출기 제작에서 검출효율의 증가와 더 좋은 검출 특성을 가지기 위해서는 섬광체를 4가지 이상의 연마 단계를 거쳐야 한다는 것을 확인할 수 있었다.

References

[1] J. W. Cates, J. P. Hayward, X. Zhang, "Increased Light Extraction From Inorganic Scintillators With Laser-Etched Microstructures," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. 60, No. 2 pp.1027-1032, Apr, 2013

[2] S. Siegel, M. Eriksson, L. Eriksson, M. Casey, R. Nutt, "An alternative to polishing the surface of scintillator detectors," *IEEE Nucl. Sci. Symp. Conference Record*, Vol. 3, pp.1212-1214, Nov, 1996

[3] K. Kurashige, Y. Kurata, H. Ishibashi, K. Susa, "Surface polishing of GSO scintillator using chemical process", *IEEE Trans Nucl. Sci.*, Vol, 45, No. 3, pp.522-524, Jun, 1998

[4] G. F. Knoll, T. F. Knoll, "Light collection in scintillator detector composites for neutron detection", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. 35, No. 1, pp.875-877, Feb, 1988

[5] C. M. Ahn, Y. S. Kim, "A 8-bit 10-MSample/s Folding & Interpolation ADC using Preamplifier Shaping Method", *Journal of IKEEE*, Vol. 17, No. 3, pp.275-283, Sep, 2013

[6] D. H. Lee, C. H. Lee, "The development of a bluetooth based portable wireless EEG measurmet device", *Journal of IKEEE*, Vol. 14, No. 2, pp.90-97, Jul, 2010

BIOGRAPHY

Jeong-Ho Kim (Student Member)



2012 : BS degree in Physics,
Myongji University.
2012~ : MS Course in Physics,
Myongji University.

Koan-Sik Joo (Member)



1972 : BS degree in Physics,
Yonsei University.
1976 : MS degree in Nuclear
Physics, Yonsei University.
1987 : PhD degree in Nuclear
Physics, Yonsei University.
1981 ~ Present : Profesor in Dept.
of Physics, Myongji University