

삼중수소 검출용 광섬유 방사선 센서의 제작 및 특성분석

장경원 · 조동현 · 유욱재 · 이봉수[†]

건국대학교 의학공학부 의공학실용기술연구소
Ⓣ 380-701 충청북도 충주시

문주현

동국대학교 에너지·환경시스템학부
Ⓣ 780-714 경상북도 경주시

박병기

순천향대학교 에너지환경공학과
Ⓣ 336-745 충청남도 아산시

조영호

대구가톨릭대학교 방사선학과
Ⓣ 712-702 경상북도 경산시

김 신

제주대학교 에너지공학과, 방사선응용과학연구소
Ⓣ 690-756 제주특별자치도 제주시

(2009년 6월 5일 받음, 2009년 7월 7일 수정본 받음, 2009년 7월 7일 게재 확정)

본 연구에서는 무기섬광체와 광섬유를 이용하여 삼중수소 검출용 광섬유 방사선 센서를 제작하였다. 무기섬광체 선택을 위해 $Gd_2O_3:S:Tb$, $Y_3Al_5O_{12}:Ce$, $CsI:TI$ 를 이용하여 센서팁을 제작한 후, 금속 수소화물 형태의 삼중수소를 이용하여 섬광효율이 가장 좋은 섬광체를 선별하였다. 또한 선정된 섬광체를 사용하여 제작한 센서를 이용하여 삼중수소 선원으로부터 거리에 따른 섬광량을 측정하였고 선원의 방사능 세기에 따른 섬광량을 측정하여 표면 방사능 모니터의 결과와 비교 분석하였다.

Fabrication and Characterization of a Fiber-optic Radiation Sensor for Detection of Tritium

Kyoung Won Jang, Dong Hyun Cho, Wook Jae Yoo, and Bongsoo Lee[†]

School of Biomedical Engineering, College of Biomedical & Health Science, Research Institute of Biomedical Engineering, Konkuk University, Chungju 380-701, Korea

[†]E-mail: bslee@kku.ac.kr

Joo Hyun Moon

Department of Energy & Environment System Engineering, Dongguk University, Gyeongju 780-714, Korea

Byung Gi Park

Department of Energy & Environment Engineering, Soonchunhyang University, Asan 336-745, Korea

Young-Ho Cho

Department of Radiological Science, Catholic University of Daegu, Gyeongsan 712-702, Korea

Sin Kim

Department of Nuclear & Energy Engineering, Applied Radiological Science Research Institute, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea

(Received June 5, 2009; Revised manuscript July 7, 2009; Accepted July 7, 2009)

[†]E-mail: bslee@kku.ac.kr

In this study, we have fabricated a fiber-optic radiation sensor for detection of tritium using inorganic scintillators and optical fibers. We have tested various kinds of inorganic scintillators such as $Gd_2O_3:S:Tb$, $Y_3Al_5O_{12}:Ce$, and $CsI:Tl$ to select the most effective sensor tip. In addition, we have measured the scintillating lights using a photomultiplier tube as a function of distance between sensor tips to the source with the different activities of hydride tritium. The final results are compared with those which are obtained using a surface activity monitor.

Keywords: Fiber-optic sensor, Inorganic scintillator, Tritium, Beta-ray

OCIS codes: (060.2370) Fiber optics sensors; (060.2380) Fiber optics sources and detectors; (350.5610) Radiation

I. 서 론

방사선은 물리적 성질에 따라 크게 엑스선, 감마선과 같은 전자기 방사선과 입자로 구성된 입자 방사선으로 구분된다. 입자 방사선은 다시 전하를 띠고 있는 직접전리방사선과 전하를 띠지 않는 간접전리방사선으로 구분되는데 직접전리방사선은 전자선, 베타선, 알파선이 있고 간접전리방사선은 중성자와 중성미자가 있다.^[1] 방사선 검출에 있어 전자기 방사선은 투과력이 높아 섬광체(scintillator) 및 이온전리함(ionization chamber) 등을 이용하여 비교적 쉽게 검출할 수 있는데 반해 입자 방사선, 특히 베타선 및 알파선과 같은 직접전리방사선은 그 투과력이 낮아 계측에 어려움이 많다.

방사성 동위원소인 삼중수소(tritium)는 핵 실험으로 생성되기도 하지만 원자로(nuclear reactor) 및 핵연료 재처리과정(nuclear fuel reprocessing)에서 생겨나는 오염물질이다.^[2] 이러한 삼중수소는 12.35년의 반감기(half-life)를 가지고 최고 18.54 keV, 평균 5.69 keV 에너지의 베타선을 방출한다.^[3] 삼중수소에서 발생하는 베타선은 그 에너지가 미약하고 투과력이 매우 낮아 공기 중에서 비정(range)은 약 6 mm이며 수 중에서는 최대 6 μm 에 불과하므로 비접촉식 계측이 거의 불가능하다.^[4,5] 또한 삼중수소 검출을 위해 현재 주로 사용하고 있는 액체섬광계수기(liquid scintillation counting: LSC)는 샘플을 채취하여 측정하는 것으로 실시간 계측이 불가능한 단점을 가진다. 이와 같이 삼중수소 및 계측의 특성들로 인해 삼중수소의 미약한 베타선을 비접촉식 및 실시간으로 측정할 수 있는 계측기는 현재 거의 전무한 상태이며 이에 따라 삼중수소 검출 및 저 에너지 베타선 측정을 위한 새로운 방사선 센서가 필요한 실정이다.

일반적으로 광섬유를 이용한 방사선 센서는 섬광체, 광섬유(optical fiber) 그리고 광 검출기로 구성된다.^[6-8] 섬광체는 구성 성분에 따라 무기섬광체(inorganic scintillator)와 유기섬광체(organic scintillator)로 나눌 수 있으며 계측 방사선의 특성에 따라 선택적으로 사용이 가능하다. 광섬유는 섬광체에서 발생된 섬광빛을 광 계측 장비로 전달해 주는 역할을 한다. 신호계측 및 전달에 있어 광섬유는 온도, 압력, 전자기파에 의해 영향을 받지 않으며 원거리 신호 전송의 가능, 실시간 계측 등 많은 장점을 가지고 있어 방사선 및 물리량 계측 센서에 그 활용도가 높다.^[9] 광 검출기로는 주로 광증배관(photomultiplier tube: PMT)을 사용한다. 광증배관은 섬광체에서 발생하는 미세한 섬

광빛을 증폭하여 전기적 신호로 출력하는 장비로서 그 종류에 따라 파장 민감도가 다른데 일반적으로 짧은 파장의 가시광 영역에서 최대 민감도를 갖는다. 위와 같은 구성의 광섬유 방사선 센서 시스템은 실시간 계측이 가능하고 공간 분해능(spatial resolution)이 높다. 또한 유연성이 뛰어나고 접촉/비접촉식으로 계측이 가능하므로 공간이나 환경적으로 제약이 많은 곳에서 사용 가능하다는 장점을 가지고 있다. 광섬유 방사선 센서의 단점으로는 일정 에너지 이상(전자: 0.22 MeV, 양성자: 400 MeV)의 하전입자(charged particle)와 광섬유와의 직접적인 작용으로 발생하는 체렌코프 빛(Cerenkov light)이 있다. 이러한 체렌코프 빛은 가시광선 영역에서 섬광체의 섬광빛과 유사한 파장을 방출하여 섬광빛 계측에 방해요소로 작용하게 되므로 기존 광섬유(background optical fiber)를 사용한 감법(subtraction method) 및 광학 필터를 사용한 필터링 방법(wavelength discrimination method)을 이용하여 제거하게 된다.^[10]

본 연구에서는 무기섬광체와 광섬유를 이용하여 삼중수소 검출용 광섬유 방사선 센서를 제작하였다. 무기섬광체 선택을 위해 $Gd_2O_3:S:Tb$, $Y_3Al_5O_{12}:Ce$, $CsI:Tl$ 을 이용하여 센서팁을 제작한 후, 금속 수소화물(hydride) 형태의 삼중수소를 이용하여 섬광효율이 가장 좋은 섬광체를 선별하였다. 또한 선정된 섬광체를 사용하여 제작한 센서를 이용하여 삼중수소 선원으로부터 거리에 따른 섬광량을 계측하였고 선원의 방사능(activity)의 세기에 따른 섬광량을 측정하여 표면 방사능 모니터(surface activity monitor: SAM)의 결과와 비교 분석하였다.

II. 실험 재료 및 방법

본 연구에 사용된 섬광체는 베타선에 반응하는 무기섬광체($Gd_2O_3:S:Tb$, $Y_3Al_5O_{12}:Ce$, $CsI:Tl$)로서 그 특성은 표 1과 같다.

Table 1. Characteristics of inorganic scintillators

Scintillator	Wavelength peak	Decay to 10%	Efficiency relative to NaI (%)	Afterglow
$Gd_2O_3:S:Tb$	545 nm	1.5 ms	15%	low
$Y_3Al_5O_{12}:Ce$	550 nm	70 ns	5%	no
$CsI:Tl$	545 nm	5 μs	8.5%	yes

표 1에 표기된 NaI에 대한 상대적인 효율(Efficiency relative to NaI)은 NaI의 절대섬광효율(absolute scintillation efficiency)을 100%로 보았을 때 상대적인 비율이다. 실험적 데이터를 토대로 NaI의 절대섬광효율은 12%이며 이는 1 MeV 에너지를 받았을 때 0.12 keV의 에너지를 섬광빛으로 방출함을 뜻한다.^[11] 그러므로 $Gd_2O_3 : Tb$, $Y_3Al_5O_{12} : Ce$, $CsI : Tl$ 섬광체들의 절대섬광효율은 상대효율에 0.12를 곱하여 각각 1.8%, 0.6%, 1.02%가 된다.

실험에 사용된 광섬유(SH4001, Mitsubishi)는 계단형의 굴절률(step index)을 갖는 플라스틱 멀티모드 광섬유로서 직경은 1 mm이며 클래딩(cladding)의 두께는 0.01 mm이다. 본 광섬유의 코어(core)와 클래딩의 굴절률(refractive index)은 각각 1.492, 1.402이고 개구수(NA: numerical aperture)는 0.510이다. 또한 감쇄율(attenuation rate)은 650 nm 파장의 빛에서 0.20 dB/m 이하이며 연구에서 사용한 섬광체의 방출파장인 550 nm에 대해서는 약 0.16 dB/m 이하이다. 본 실험에서는 섬광체에서 발생하는 섬광량의 수광효율을 높이기 위해 40개의 직경 1 mm 광섬유를 번들(bundle)형태로 제작하여 섬광량을 측정하였다. 광섬유의 양 끝 단은 여러 종류의 폴리싱 패드(polishing pad)를 이용하여 연마하였으며 광학용 에폭시를 사용하여 광섬유와 무기섬광체를 결합하였다.

그림 1은 무기섬광체와 광섬유를 이용한 베타선 검출용 센서팁의 구성을 보여주고 있다. 각각의 무기섬광체와 광학용 에폭시(DP-100 plus, 3M)를 1 : 1의 비율(부피비)로 혼합하여 0.1 mm의 두께로 제작하였고 삼중수소에서 발생하는 베타선의 에너지가 매우 미약한 것을 감안하여 보호층 없이 센서팁을 제작하였다. 또한 본 연구에서는 1 mm 직경의 광섬유를 사용하였으므로 센서팁의 최소 크기는 직경 1 mm까지 제작 가능하나 광섬유 번들에 접합하기 위해서 10 mm 직경의 센서팁을 제작하였다.

섬광량 측식을 위한 광 검출장비로는 광증배관을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 광증배관(H7532-10, Hamamatsu photonics)의 측정 파장의 범위는 200 ~ 900 nm이며 400 nm에서 최대 민감도를 가지고 암전류(dark current)는 보통 3 nA, 최대 50 nA이다. 또한 광증배관에서 발생하는 전류를 증폭하기 위해서 별도로 제작한 증폭기(amplifier) 시스템을 사용하였으며 최종적으로 발생하는 전압은 LabVIEW를 통하여 측정하였다. 본 연구에 사용된 증폭기는 그림 2와 같이 구성되어 있으며

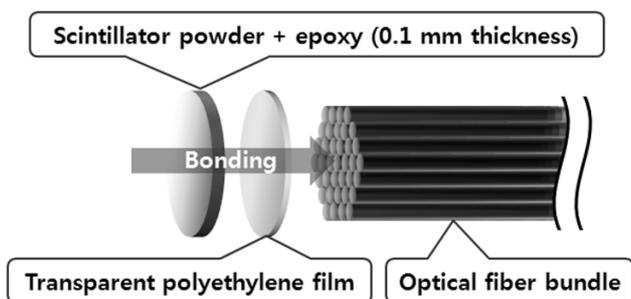


Fig. 1. Composition of sensor tip to detect beta rays.

가변저항을 이용하여 증폭을 조절할 수 있고 최대 300배까지 증폭이 가능하다.

실험에 사용된 선원은 금속 수소화물(hydride) 형태의 삼중수소로서 0.05, 0.2, 0.4 Ci의 삼중수소가 장입된 티타늄(Ti) 분말을 슬러리(slurry)로 만들어 약 5 mm 직경의 원형으로 코팅하여 그림 3과 같이 제작된다. 삼중수소 선원의 정확한 방사능 세기는 알 수 없으므로 본 연구에서는 삼중수소 검출용 광섬유 방사선 센서와 비교 측정을 위해 표면 방사능 모니터(7001-SAM-001, TYNE)를 사용하여 선원의 방사능 세기를 측정하였다. 실험에 사용된 표면 방사능 모니터의 측정면적(measurement area)은 100 cm²이고 ±10%의 정확성을 가지며 약 2분의 응답시간(response time)을 갖는다.

그림 4(a)는 삼중수소 선원으로부터 거리에 따라 광섬유 방사선 센서에서 발생하는 섬광량을 측정하기 위해 XYZ-translation stage를 사용하여 구형한 실제 사진을 보여주고 있다. 본 연구에서는 삼중수소 선원과 센서팁과의 거리를 0.5 ~ 6 mm까지 0.5 mm씩 증가하면서 실험을 진행하였다. 그림 4(b)는 전체적인 실험 구성을 보여주고 있다. 금속 수소화물 삼중수소에 의해 섬광체에서 발생된 섬광빛은 1 m 길이의 광섬유 번들에 의해 광증배관으로 전달되고 전기신호로 변환되며 증폭기 시스템에 의해 증폭된다. 증폭된 신호는 LabVIEW 보드에 의해 컴퓨터로 전송되고 LabVIEW 프로그램을 이용하여 디스플레이 및 저장된다.

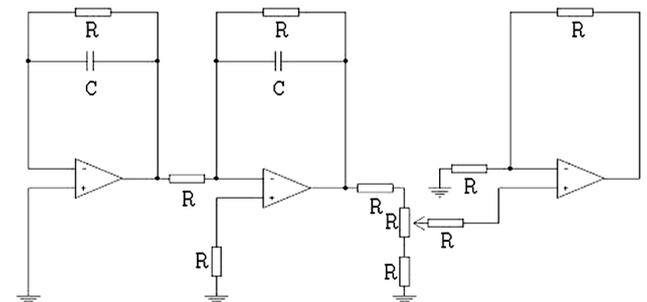


Fig. 2. Circuit diagram of amplifier system.

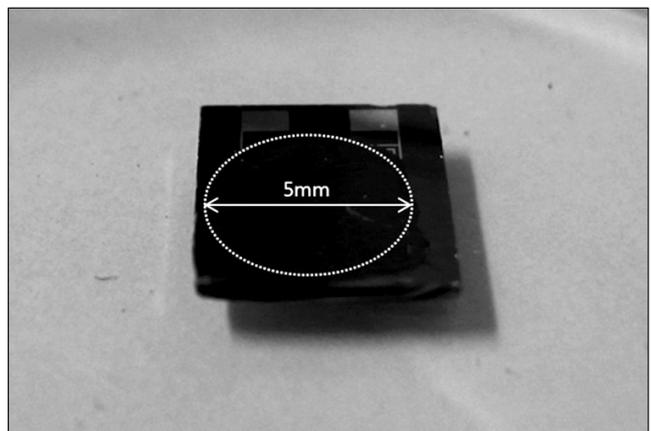


Fig. 3. Tritium as metal hydride type.

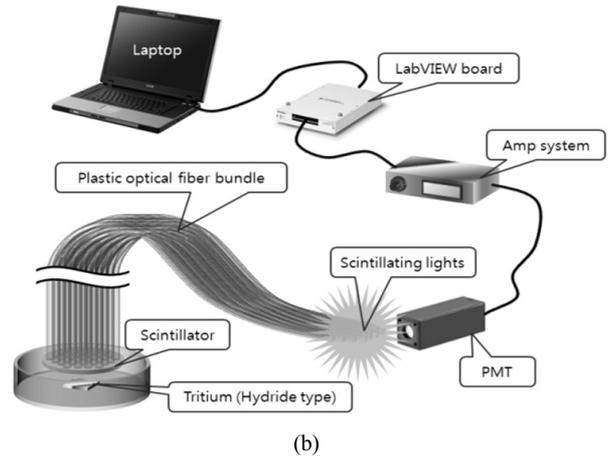
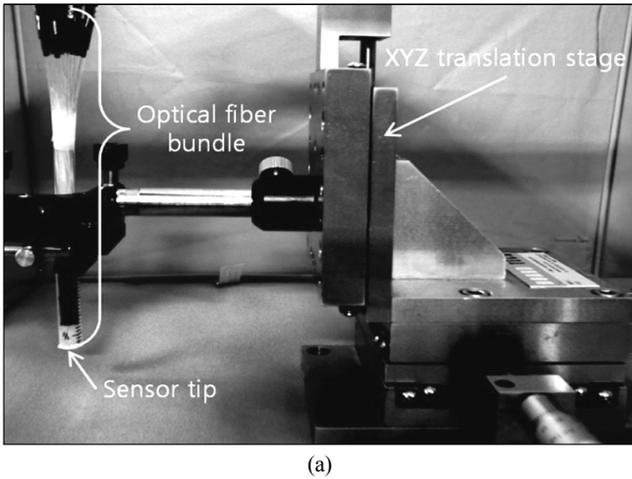


Fig. 4. Experimental setup (a: experimental equipment including XYZ translation stage, b: overall experimental setup configuration).

III. 실험 결과

그림 5는 0.4 Ci의 삼중수소를 장입하여 제작한 금속 수소 화물 삼중수소에 대한 각각의 무기섬광체의 섬광량 측정 결과를 보여주고 있다. 본 실험에서는 선원과 센서팁의 거리를 0.5 mm로 두고 실험을 수행하였다. $Gd_2O_3:S:Tb$ 를 이용하여 제작한 센서의 섬광량이 가장 크게 나타났으며 선원에 대하여 가장 민감하게 반응하는 것을 확인할 수 있다. 세 종류 무기섬광체의 최대방출파장은 모두 545~550 nm로 거의 유사한 값을 가지므로 계측상에 있어 광증배관의 파장민감도는 큰 변수가 되지 못한다. 실험에 사용된 무기섬광체 CsI:TI, $Y_3Al_5O_{12}:Ce$, $Gd_2O_3:S:Tb$ 의 NaI에 대한 섬광효율(Table 1 참조)은 각각 8%, 5%, 15%를 가지므로 본 결과의 경우 섬광효율에 대해서 의존성을 갖는 것을 알 수 있다. 실험결과와 섬광효율간의 관계를 분석하기 위해 두 변량 사이의 상관관계의 정도를 나타내는 상관계수(correlation coefficient)를 이용하여 결과를 분석하였다. 상관계수는 그 절대값이 항상

1보다 작은 값을 가지며 상관관계가 없을수록 0에 가까운 값을 갖고 양의 상관관계를 가질수록 1에 가까운 값을 갖는다. 이러한 상관계수는 식 (1)을 이용하여 구할 수 있으며 실제로 각각의 섬광효율과 실험결과와의 상관계수는 0.9701로 그 상관관계가 매우 높은 것을 확인할 수 있다.

$$corr_{x,y} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y} \quad (1)$$

여기서, x, y 는 변량이고 \bar{x}, \bar{y} 는 각 변량의 평균을 나타내며 σ_x, σ_y 는 각 변량들의 표준편차(standard deviation)를 나타낸다.

이후의 실험에서는 본 실험결과를 반영하여 섬광효율이 가장 뛰어난 $Gd_2O_3:S:Tb$ 을 이용하여 제작한 센서로 실험을 진행하였다.

그림 6은 0.4 Ci의 삼중수소를 장입하여 제작한 금속 수소

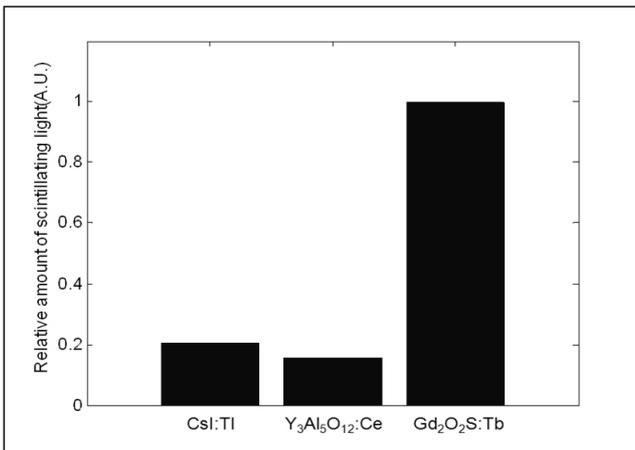


Fig. 5. Measurement of amount of scintillating lights in inorganic scintillators.

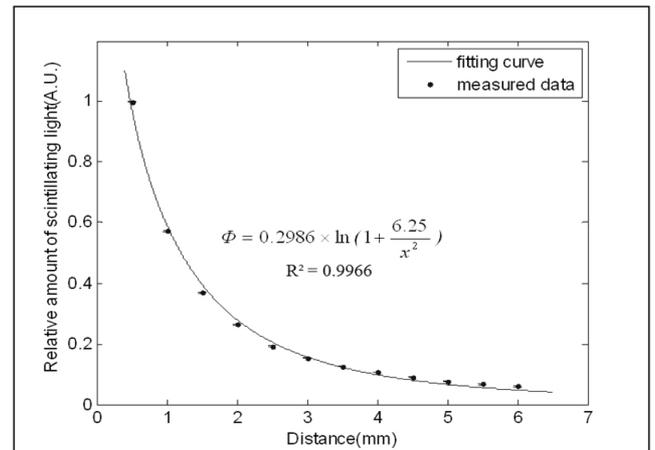


Fig. 6. Measurement of amount of scintillating lights according to the distance from source.

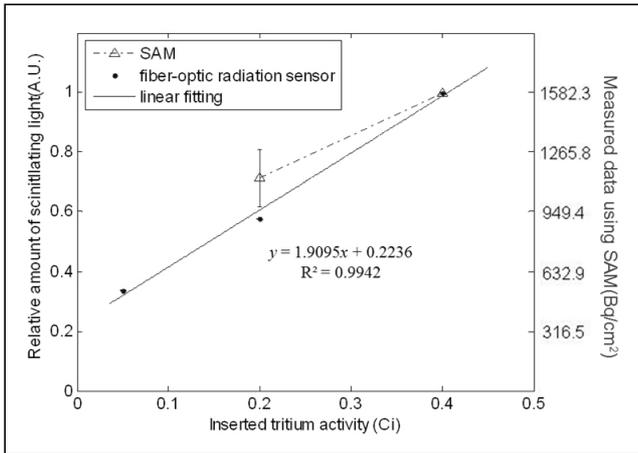


Fig. 7. Measured data using a fiber-optic radiation sensor and a SAM with metal hydride tritiums according to source activities.

화물 삼중수소 선원으로부터 거리에 따른 섬광량 측정 결과를 보여주고 있다. 선원으로부터 거리가 멀어짐에 따라 섬광량이 감소하였으며 삼중수소의 비정인 6 mm에서의 섬광량은 0.5 mm의 약 6%를 차지하였다. 디스크 형태의 방사선원에 대하여 거리 x 만큼 떨어진 곳에서의 선량은 다음 식 (3)에 의해 결정된다.^[12]

$$\Phi = \frac{S}{4} \times \ln \left(1 + \frac{r^2}{x^2} \right) \quad (3)$$

여기서, S 는 선원의 세기를 나타내는 상수이며 r 은 선원을 원반형태로 가정했을 때 반지름을 나타낸다.

그림에서 추세선(fitting curve)은 식 (3)의 $S/4$ 를 변수로 두고 피팅(fitting)한 것으로써 추세선 식의 0.2986은 최적의 추세선에서 구해진 값이다. 측정된 섬광량에 대하여 위 식 (3)을 이용한 추세선의 R^2 값은 0.99로 거의 정확한 것을 알 수 있다. 일반적으로 R^2 값은 추세선과 측정결과가 어느 정도 밀접한 관계인지를 나타내는 척도로서 결정계수(coefficient of determination)라고 하며 1에 가까울수록 추세선의 정확도가 높다는 것을 의미한다. 측정값의 평균 표준편차는 0.0018로 측정값 사이의 오차가 매우 작은 것을 알 수 있다.

그림 7은 금속 수소화물 삼중수소 선원의 방사능 크기 변화에 따른 광섬유 방사선 센서를 이용하여 측정한 섬광량과 표면 방사능 모니터를 이용하여 측정한 결과를 보여주고 있다. 표면 방사능 모니터로 측정한 결과를 먼저 살펴보면 0.05 Ci의 삼중수소를 장입하여 제작한 선원의 경우 표면 방사능 모니터로 측정이 불가능하여 그래프에 도시할 수 없었고 0.2 Ci의 삼중수소를 장입하여 제작한 선원에서는 측정값의 오차가 $\pm 153.9 \text{ Bq/cm}^2$ 으로 약 10%의 오차를 보이는 것을 확인할 수 있다. 0.4 Ci의 삼중수소를 장입하여 제작한 선원에서의 편차는 2.5 Bq/cm^2 으로 매우 작아 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있었으나 0.05 Ci에 대한 측정 결과가 없었으므로 표면 방사능 모니터의 방사능에 대한 선형성은 판단할 수 없

었다. 광섬유 방사선 센서의 결과를 살펴보면 0.05 Ci부터 0.4 Ci까지 측정값이 일정하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 방사능의 세기가 커지면 섬광체에서 발생하는 섬광량이 비례하여 발생되므로 그에 따른 상대 선량값 역시 선형적으로 증가하게 된다. 추세선 식의 R^2 값은 0.99로 측정값의 선형성을 확인할 수 있으며 평균 표준편차는 0.0025로 측정값 사이의 오차도 매우 작은 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

방사선 검출에 있어 베타선 및 알파선과 같은 직접전리방사선은 그 투과력이 낮아 계측에 어려움이 많다. 특히 삼중수소에서 발생하는 베타선은 그 에너지가 미약하고 투과력이 매우 낮아 삼중수소 검출에 많은 어려움을 겪어왔다.

본 연구에서는 무기섬광체와 광섬유를 이용하여 비접촉식으로 실시간 계측이 가능한 삼중수소 검출용 광섬유 방사선 센서를 제작하였다. 무기섬광체 선택을 위해 $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}$, $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$, $\text{CsI}:\text{Tl}$ 을 이용하여 센서를 제작 후, 금속 수소화물 형태의 삼중수소를 이용하여 섬광효율이 가장 좋은 $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}$ 을 선별하였다. 또한 $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}$ 을 이용하여 제작한 센서로 삼중수소 선원으로부터 거리에 따른 섬광량을 측정하였고 선원의 방사능의 세기에 따른 섬광량을 측정하여 표면 방사능 모니터의 결과와 비교·분석하였다.

광섬유 방사선 센서 시스템은 실시간 계측이 가능하고 공간 분해능 및 유연성이 뛰어나며 접촉/비접촉식으로 계측이 가능하므로 공간이나 환경적으로 제약이 많은 곳에서 사용이 가능하다. 특히 원자로의 중수 누설위치 탐지나 원거리 방사선 검출에 있어 큰 역할을 할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국과학재단의 연구지원프로그램으로 지원받았습니다. (연구과제 관리코드: M20809005555-08B0900-55510)

References

1. F. M. Khan, *The Physics of Radiation Therapy*, 2nd ed. (Williams & Wilkins, Baltimore, USA, 1994), pp. 8-10.
2. W. Plastino, I. Chereji, S. Cuna, L. Kaihola, P. D. Felice, N. Lupsa, G. Balas, V. Mirel, P. Berdea, and C. Baci, "Tritium in water electrolytic enrichment and liquid scintillation counting," *Radiation Measurements* **42**, 68-73 (2007).
3. J. Magill and J. Galy, *Radioactivity Radionuclides Radiation* (Springer, Berlin, Germany, 2005), pp. 137.
4. J. Chen, "Radiation quality of tritium," *Radiation Protection Dosimetry* **122**, 546-548 (2006).
5. B. Liu, D. Alvarez-Ossa, N. P. Kherani, S. Zukotynski, and K. P. Chen, "Gamma-free smoke and particle detector using

- tritiated foils," IEEE Sensors Journal **7**, 917-918 (2007).
6. A. S. Beddar, "Plastic scintillation dosimetry and its application to radiotherapy," Radiation Measurements **41**, S124-S133 (2007).
 7. B. Lee, K. W. Jang, D. H. Cho, W. J. Yoo, G. R. Tack, S. C. Chung, S. Kim, and H. Cho, "Measurements and elimination of Cherenkov light in fiber-optic scintillating detector for electron beam therapy dosimetry," Nucl. Instrum. Phys. Res. A **579**, 344-348 (2007).
 8. A. S. Beddar, T. J. Kinsella, A. Ikhlef, and C. H. Sibata, "A Miniature 'scintillator-fiberoptic-PMT' detector system for the dosimetry of small fields in stereotactic radio-surgery," IEEE Trans. Nucl. Sci. **48**, 924-928 (2001).
 9. K. W. Jang, D. H. Cho, S. H. Shin, H. S. Kim, J. H. Yi, B. Lee, S. Kim, and H. Cho, "Fabrication and characterization of two-dimensional fiber-optic radiation sensor for high energy photon beam therapy dosimetry," Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.) **18**, 241-245 (2007).
 10. K. W. Jang, B. Lee, D. H. Cho, H. S. Kim, J. H. Yi, J. W. Lee, S. Kim, and H. Cho, "Removal of cerenkov light in fiber-optic radiation sensor using optical filters," Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.) **17**, 312-316 (2006).
 11. G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 3rd ed. (John Wiley & Sons, USA, 1999), pp. 233-234.
 12. H. Cember, *Introduction to Health Physics*, 3rd ed. (McGraw-Hill, USA, 1996), pp. 423-424.