

섬광체 옆 표면처리가 소형 감마카메라 영상에 미치는 효과

김중호* · 최 용* · 김준영* · 오차현** · 김상은* · 최언성* · 이경한* · 주판식*** · 김병태*

*싱근관내학교 의과대학, 삼성서울병원 핵의학과, 삼성생명과학연구소, 인상의학연구소센터

한양대학교 물리학과, *명지대학교 물리학과

(1999년 7월 23일 접수, 1999년 12월 6일 채택)

Effects of Scintillation Crystal Surface Treatments on Small Gamma Camera Imaging

J.U. Kim*, Y. Choi*, J.Y. Kim*, C.H. Oh**, S.E. Kim*, Y.S. Choe*, K.H. Lee*, K.S. Jo***, B.T. Kim*

*Sungkyunkwan University School of Medicine, *Department of Nuclear Medicine, Samsung Medical Center
Center for Clinical Research, Samsung Biomedical Research Institute

**Department of Physics, Hanyang University

***Department of Physics, Myongji University

(Received July 23, 1999, Accepted December 6, 1999)

요약 : 감마카메라에서 섬광체는 감마선을 검출하여 카메라의 영상 특성을 결정하는 중요한 센서 역할을 한다. 이 연구에서는 감마카메라 제작 시에 고려되어야 하는 섬광체의 옆표면처리가 감마카메라영상에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

섬광체는 크기가 20 mm(직경) × 10 mm(두께)인 NaI(Tl)와 CsI(Tl)를 설정하여 옆표면처리를 반사체와 흡수체로 하였다. 선정된 4개의 섬광체에서 감마선에 의해 발생한 섬광이 광전자증배관의 광음극에 도달할 때까지의 광학적 특성을 몬테카를로(Monte Carlo) 시뮬레이션 방법을 이용하여 고찰하였다. 또한 이 네 개의 섬광체급 위치민감형 광전자증배관에 광학적으로 결합하여 Tc-99m 140 keV에 대한 민감도와 플러드 영상, 에너지 분해능 그리고 위치분해능을 측정하였다.

시뮬레이션 결과, NaI(Tl)-반사체가 가장 우수한 민감도를 보인 것으로 계산되었으며, 감마카메라를 이용하여 획득한 플러드영상에서 민감도는 NaI(Tl)-반사체 2920 cps/ μ Ci, NaI(Tl) 흡수체 2322 cps/ μ Ci, CsI(Tl) 반사체 1754 cps/ μ Ci, CsI(Tl)-흡수체 1401 cps/ μ Ci로 측정되었다. 내인성 위치분해능은 NaI(Tl)-반사체 5.17 mm, NaI(Tl) 흡수체 4.54 mm, CsI(Tl)-반사체 6.99 mm, CsI(Tl)-흡수체 6.31 mm FWHM의 결과를 나타냈다. Tc-99m 140 keV에 대한 에너지분해능은 NaI(Tl) 반사체 12.5%, NaI(Tl)-흡수체 23.5%, CsI(Tl)-반사체 20.5%, CsI(Tl)-흡수체 33.3% FWHM으로 측정되었다.

이 연구에서는 감마카메라에서 사용되는 섬광체의 옆표면처리가 카메라의 주요 특성에 직접적인 영향을 미친다는 것을 시뮬레이션과 실제 측정방법으로 고찰할 수 있었으며, 두 가지 방법이 일치된 결과를 보여주었다. 결론적으로 섬광체와 광전자증배관 그리고 Tc 99m 선원을 이용하여 영상 획득을 목적으로 하는 감마카메라 제작에는 NaI(Tl)섬광체가 CsI(Tl)보다 적합하며, 해상력을 고려할 경우에는 섬광체 옆표면을 흡수체로, 민감도를 고려할 경우에는 반사체로 선택하여 처리해야 함을 확인하였다.

Abstract : Scintillator crystal is an important part and determines performance characteristics of the gamma camera. We investigated the effects of scintillation crystal surface treatment on gamma camera imaging.

NaI(Tl) and CsI(Tl) scintillators, 20 mm diameter and 10 mm thickness, applied with two different surface treatments, white

본 연구는 1999년도 선도기술(7) 의료공학기술개발사업과 보건외교

기술연구개발사업 연구비 보조로 이루어졌음.

통신저자 : 최 용, (135 710) 서울 강남구 일원동 50

삼성서울병원 핵의학과

Tel. (02)3410-2624, Fax. (02)3410 2639

E-mail : v7choi@samsung.co.kr

서 론

감마카메라는 생체 내 생물학적 현상을 나타내는 방사성의약품 분포를 영상으로 표현할 수 있어 생체현상 규명이나 질병 진단 목적으로 널리 사용되고 있는 의료용 영상진단기기 중 하

and black reflectors, were applied to NaI(Tl) and CsI(Tl). The optical properties of generated scintillation light were evaluated by Monte Carlo simulation method and by actual measurement using a position sensitive photomultiplier tube (PSPMT). We measured sensitivity, energy resolution and spatial resolution of a gamma camera with the various scintillators coupled to a PSPMT.

In the simulation, NaI(Tl)-white presented the best sensitivity. In the measurements, the sensitivities and the intrinsic spatial resolutions of NaI(Tl)-white, NaI(Tl)-black, CsI(Tl)-white, CsI(Tl)-black were 2920, 2322, 1754, 1401 cps/ μ Ci and 5.2, 4.5, 7.0, 6.3 mm FWHM, respectively. Their intrinsic energy resolutions were measured 12.5, 23.5, 20.5, 33.3% FWHM at 140 keV of Tc-99m.

In this study, we investigated the effects of a side surface treatment of the scintillator on the gamma camera imaging. Simulation and measurement presented similar trends. Based on the results, we concluded that the surface of the NaI(Tl) scintillator must be treated by absorptive materials in order to develop the gamma camera having good spatial resolution.

Key words : 섬광체(Scintillator), 표면처리(surface treatment), 위치민감형 광전자증배관(position sensitive photomultiplier tube), 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation) 감마카메라(gamma camera)

나이다. 감마카메라는 γ -선을 검출하는 검출기 부분과 신호처리 부분 그리고 영상을 표현하는 부분으로 구성되어 있으며, 이 중 검출기 부분은 감마카메라의 계수율과 해상도를 결정하는 핵심 부분이다. 감마카메라의 검출기로는 무기섬광결정을 이용한 섬광검출기를 많이 사용하고 있다. 검출기를 이루고 있는 섬광체에 γ -선이 입사되면 주로 광전효과(photoelectric effects)와 콤프턴산란(compton scattering)에 의해 그 에너지를 섬광체에 축적한 후 등방적으로 가시광선 영역의 섬광을 발생시키는 물리적 현상을 이용하여 감마선을 검출한다. γ -선에 의해 섬광체에서 발생한 광자들을 측정하기 쉬운 전기신호로 전환하기 위하여 일반적으로 광전자증배관(photomultiplier tube)을 사용하는데, 이때 발생한 광자는 광전자증배관의 광음극(photo-cathode)에 의해 검출되기까지 섬광체내에서 흡수, 산란, 반사, 회절 등의 광학적 상호작용을 한다. 이러한 섬광의 광학적 특성은 섬광체 종류와 기하학적 크기 및 섬광체와 광전자증배관을 접합시키는 매질의 물리적 성질, 그리고 섬광체면의 표면처리 등에 의해 결정된다[1-4].

일반적으로 감마카메라 검출기로 사용되는 섬광체는 입사된 γ -선의 에너지에 비례하여 섬광을 발생시키므로, γ -선에 대한 정보를 정확하게 얻기 위해서는 발생한 광자의 개수를 손실 없이 광전자증배관내의 광음극에서 검출하여 전기신호로 전환해야 한다. 또한 전환된 전기신호를 측정하여 카메라영상을 구현할 경우, 검출된 광자의 개수는 시스템감도, 에너지분해능, 위치분해능 등 감마카메라 성능에 영향을 미치게 되므로, 섬광체내에서 발생하는 여러 가지 광학적 현상은 감마카메라시스템 구축을 위하여 반드시 고려해야 한다. 특히 검출되는 광자의 개수와 밀접한 관계가 있는 섬광체면의 표면처리에 대한 연구는 고감도·고해상력 감마카메라 개발을 위해 필수적으로 선행되어야 한다. 이러한 섬광체면의 표면처리에 대한 연구는 방사추적코드를 이용한 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 통해 그 결과들이 보고되었다[2-9].

이 연구에서는 감마카메라를 개발하는데 핵심기술 부분인 검출기 제작 시에 고려되어야 하는 섬광체의 표면처리와 관련된 감마카메라 특성에 미치는 영향에 대하여 몬테카를로 시

뮬레이션과 실제 측정실험을 통하여 비교 고찰하고자 한다.

재료 및 방법

이 연구에서는 시뮬레이션과 실제 실험을 위해 현재 상용 감마카메라에 가장 많이 쓰이고 있는 대표적인 무기섬광체인 NaI(Tl)와 CsI(Tl)결정을 선정하였으며 직경이 20 mm이고, 두께가 10 mm인 원통형으로 하였다. 이들은 공기중에 있는 습기를 흡수하여 섬광체로서의 특성을 잃어버리는 조해성(NaI(Tl) : 매우 강함, CsI(Tl) : 약함)을 가지고 있어 이를 방지하기 위해 0.5 mm 두께의 알루미늄으로 밀봉하였다. 결정의 밑면(섬광체와 광전자증배관이 집합된 면)은 발생한 섬광이 광전자증배관으로 전달될 수 있도록 6 mm 두께의 유리창으로 밀봉하였다. 두 종류의 섬광체에 대한 열 표면처리 효과를 고려하기 위해 각 섬광체 옆면을 반사체(흰색 코팅) 또는 흡수체(흑색 코팅)로 처리하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션 방법과 감마카메라와 Tc 99m을 이용한 실제 측정 방법으로 고찰하였다. 표 1에 이 연구에서 이용된 두 종류의 섬광체에 대한 물리적 특성들을 나타내었다[10].

1. 몬테카를로 시뮬레이션

이 연구에서는 섬광의 광학적 움직임에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 DETECT97을 이용하여 몬테카를로 방법으로 실행하였다[9]. 섬광체내에 감마선이 입사하면 에너지에 비례하여 섬광이 선택된 무작위 수에 의거하여 반원지로부터 발생하며, 매질내에서 각 광자의 진행속도는 굴절률 역수에 의해 설정하였고, 섬광체 표면에서의 광학적 특성을 Snell의 굴절률 법칙(식 (1))을 사용하여 처리하였다.

$$\frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

여기서 θ_1 와 θ_2 는 매질에 대한 입사각과 굴절각이며, n_1 과 n_2 는 매질 1과 2의 굴절률이다.

표 1. NaI(Tl)와 CsI(Tl)섬광체의 물리적 성질

Table 1. Properties of NaI(Tl) and CsI(Tl) scintillators

Material	Density (g/cm ³)	Hygroscopicity	Refractive Index	Decay Constant(ns)	Peak Scintillation Wavelength (nm)	Photons/MeV
NaI(Tl)	3.67	Yes	1.85	230	410	40000
CsI(Tl)	4.51	slightly	1.80	1000	565	52000

몬테카를로 시뮬레이션을 실행하기 위해서 섬광체 종류 및 광학적 특성, 기하학적 모양, 면의 표면처리 그리고 매질의 광학적 특성 등에 대한 상세 정보를 입력하였고, 이 매개변수에 의해 임의로 샘플링된 각 광자의 광학적 행동과 운명 결과를 계산하였다. Tc-99m의 140 keV γ -선 하나가 섬광체 중앙부분에서 검출되었다고 가정하였으며, 이 때 섬광체 윗면(γ -선 입사면)은 광자손실을 방지하기 위해 반사체처리를 하였고, 섬광체와 광전자증배관이 광학적으로 결합되어 있는 아랫면은 광학적 광택처리 하였다. 섬광체 옆표면은 2종류의 섬광체에 대하여 각각 반사체(반사율 98%)와 흡수체(반사율 2%) 처리로 설정하였다. 시뮬레이션 결과를 이용하여 각 섬광체에 대한 영상을 획득하였으며, 섬광체 내에서 발생한 섬광이 광전자증배관에서 검출되었을 때 섬광체 옆표면처리 효과와 섬광의 피습성도를 관찰하였다. 이를 위하여 획득한 시뮬레이션 영상 중앙부분의 1차원 프로파일을 분석하여 상대적인 계수성도와 곡선형태를 비교하였으며, 각 섬광체내에서 발생한 광자들의 광학적 움직임에 대한 시뮬레이션 결과도 함께 계산하였다.

2. 감마카메라를 이용한 특성 측정

섬광체 옆표면처리에 따른 감마카메라 특성변화를 측정하기 위하여 그림 1과 같이 시스템을 구성하였다[11]. 옆표면을 각각 반사체와 흡수체 처리한 NaI(Tl)와 CsI(Tl) 섬광체를 위치민감형 광전자증배관에 실리콘 그리스를 사용하여 광학적으로 결합시켰다. 시스템에 사용된 위치민감형 광전자증배관은 R3941 (Hamamatsu, Shizuoka, Japan)로 77 mm×77 mm 의 광음극시야와 16층의 미세 그물형 다이노드(fine mesh dynode) 구조, 그리고 3.7 mm 간격의 16×18개 양극선(anode wire) 채널을 가지고 있다.

옆표면처리가 다른 두 종류의 섬광체에 입사된 γ 선은 섬광으로 변환되어 광학적으로 결합되어 있는 광전자증배관의 광음극에 의해 검출되고 진기신호로 전환된다. 검출된 신호들을 전치증폭기(preamp)와 주증폭기(amplifier) 등의 전자회로를 통하여 분석·처리한 다음, 디지털화하고 개인용 컴퓨터의 메모리에 입력하였다. 컴퓨터와의 디지털 입/출력 신호처리 제어를 위하여

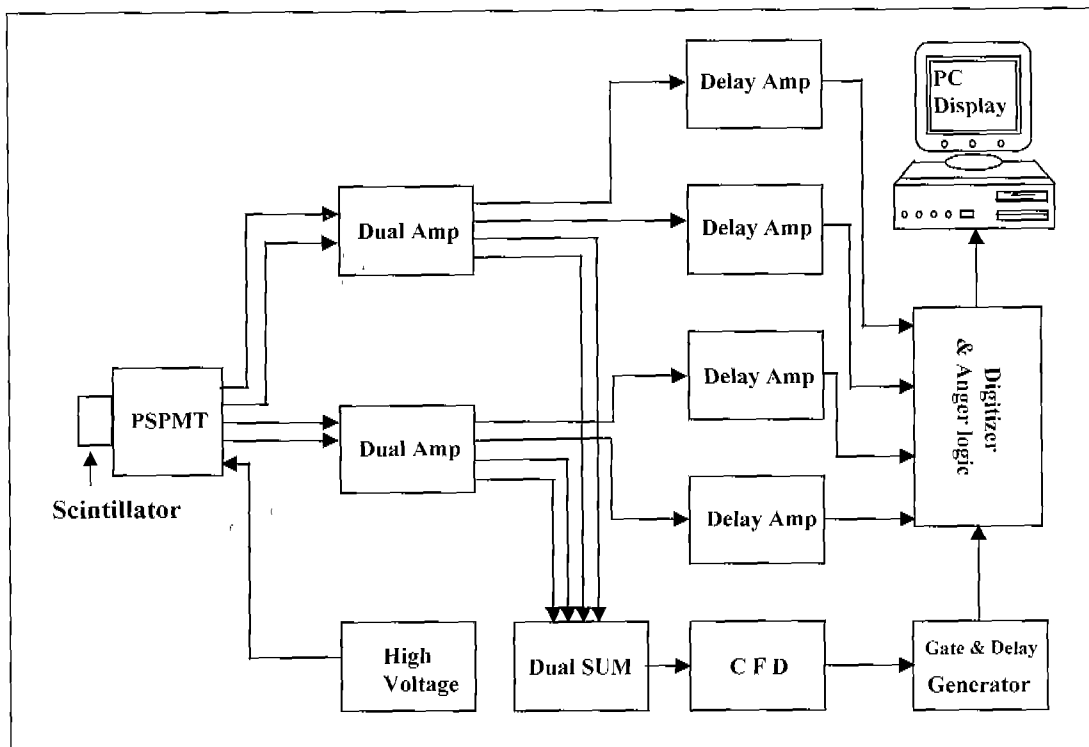


그림 1. 감마카메라 시스템 도식도
Fig. 1. Block diagram of a gamma camera system

LabVIEW™ (Austin, Texas, U.S.A.) 그래픽 소프트웨어를 사용하였으며, 이 시스템을 이용하여 영상을 획득· 저장하고 간단한 분석을 할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

섬광체 옆표면처리가 감마카메라 영상에 미치는 효과를 고찰하기 위하여 먼저 내인성 플러드 영상을 획득하였다. Tc-99m 점선원(300 μCi)을 이용하여 4개 섬광체(NaI(Tl)-반사체 처리, NaI(Tl)-흡수체 처리, CsI(Tl)-반사체 처리, CsI(Tl)-흡수체 처리)를 위치민감형 광전자증배관에 교체 결합하여 플러드 영상과 민감도를 획득하였다. 측정시간은 4개 섬광체에 대하여 모두 동일하게 300 초씩으로 설정하였다.

섬광체 옆표면처리에 따른 감마카메라의 에너지 분해능 변화 고찰을 위하여 Tc-99m 감마선 붕괴에너지인 140 keV에 대한 에너지 스펙트럼을 4개의 섬광체에서 측정하였다. 획득한 스펙트럼으로부터 각 섬광체에 대한 에너지 분해능을 FWHM (full width at half maximum)으로 결정하였다.

감마카메라의 위치 분해능 측정을 위하여 남으로 두께 3 mm, 슬릿 폭이 1mm인 선 슬릿 마스크를 자체 제작하여 사용하였다. 제작한 선 슬릿 마스크를 각 섬광체면 위에 올려놓고 Tc-99m 선원에서 방출되는 γ-선이 섬광체에 평행하게 입사 되도록 한 뒤 선 슬릿 영상을 구현하였다. 획득한 선 슬릿 영상으로부터 얻은 선 프로파일과 컴퓨터로 계산한 가우시안 (Gaussian) 분포함수(식 (2))를 비선형 최소제곱 방법으로 합치하여 위치 분해능 값을 계산하였다[12].

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

여기서 x_0 는 x 의 평균치이며, σ 는 x 의 분산이다.

결 과

1. 몬테카를로 시뮬레이션

섬광체 옆표면처리에 대한 몬테카를로 시뮬레이션 결과를 표 2에 나타내었다. NaI(Tl)와 CsI(Tl)섬광체에서 옆표면을 반사체와 흡수체로 처리하였을 때, 광전자증배관내의 광음극에서 계수된 광자의 수와 섬광체내에서 흡수된 광자의 수, 그리고 섬광체 표면처리에 의해 흡수된 광자의 개수 결과를 비교하여

표 2. 섬광체 옆표면처리에 대한 몬테카를로 시뮬레이션 결과
Table 2. Results of Monte Carlo simulation of scintillator side surface treatments

	NaI(Tl) (White)	NaI(Tl) (Black)	CsI(Tl) (White)	CsI(Tl) (Black)
Number of photons(Standard errors)				
Photons counted	8751(±47)	1922(±40)	5497(±36)	1194(±31)
Bulk absorbed	1917(±40)	440(±21)	1116(±31)	282(±17)
Surface absorbed	1089(±32)	9399(±44)	663(±25)	5804(±34)

보여주고 있다. 4개의 섬광체에 Tc 99m 140 keV γ-선 하나가 입사되었을 때 계수된 광자의 수와 섬광체내에서 흡수된 광자의 수는 NaI(Tl)-반사체 처리의 경우가 각각 8751개와 1917개로 가장 많은 값을 나타내었다. 반면 CsI(Tl)-흡수체 처리의 경우는 가장 적은 1194개와 282개로 NaI(Tl)-반사체 처리의 경우에 비해 약 14%에 해당하는 값을 갖는 것으로 나타났다. 또한 표면처리에 의해 흡수된 광자 개수는 NaI(Tl) 흡수체 처리의 경우, 발생한 광자의 약 80% 정도로 가장 많은 개수를 나타내었다.

그림 2와 그림 3은 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 이용하여 계산하고 구현한 4개 섬광체의 내인성 플러드 영상을 보여주고 있다. 그림 2는 NaI(Tl)섬광체에 대한 결과로, 좌측 영상은 옆표면을 반사체 처리한 경우이며 우측은 흡수체 처리한 경우이다. 영상 아래에 나타낸 프로파일 결과에서도 관찰할 수 있듯이 우측 영상에 비해 좌측 영상이 더 많은 계수정도를 나타내었다. 그림 3의 CsI(Tl)섬광체에 대한 시뮬레이션 결과에서도 같은 경향을 나타내었다.

2. 감마카메라를 이용한 특성 측정

본 연구에서 선정된 4개 섬광체를 위치민감형 광전자증배관에 광학적 결합하고 Tc-99m 선원을 이용하여 각 섬광체에 대해 획득한 내인성 플러드 영상을 그림 4와 그림 5에 나타내었다. 선정된 4개 섬광체중 NaI(Tl)-반사체 처리의 경우가 2920 cps/μCi로 가장 우수한 민감도를 보였고, CsI(Tl)-흡수체 처리의 경우는 1401 cps/μCi로 가장 낮은 민감도를 나타내었다. 또한 두 종류의 섬광체에서 모두 옆표면처리를 반사체로 하였을

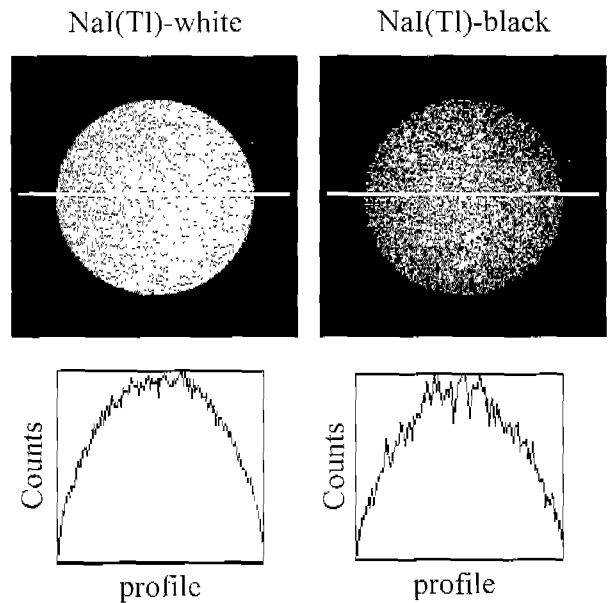


그림 2. 반사체와 흡수체로 옆표면처리한 NaI(Tl) 섬광체의 몬테카를로 시뮬레이션 영상과 프로파일
Fig. 2. Simulated images and profiles obtained using the NaI(Tl) scintillators having different side surface treatments

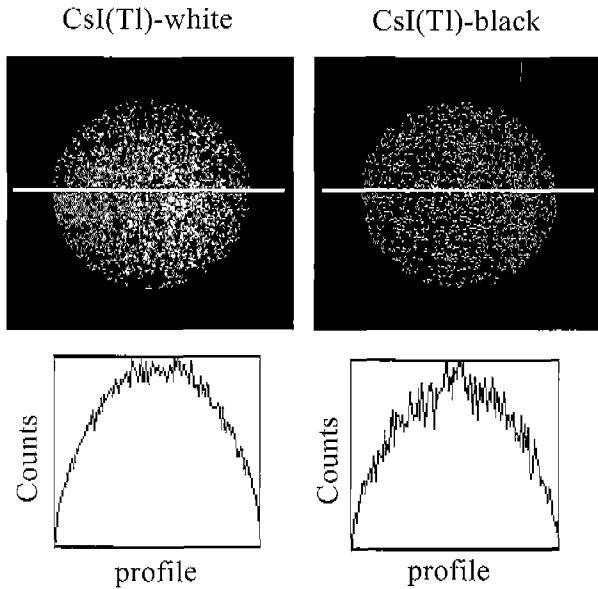


그림 3. 반사체와 흡수체로 옆표면처리한 CsI(Tl) 섬광체의 몬테카를로 시뮬레이션 영상과 프로파일
 Fig. 3. Simulated images and profiles obtained using the CsI(Tl) scintillators having different side surface treatments

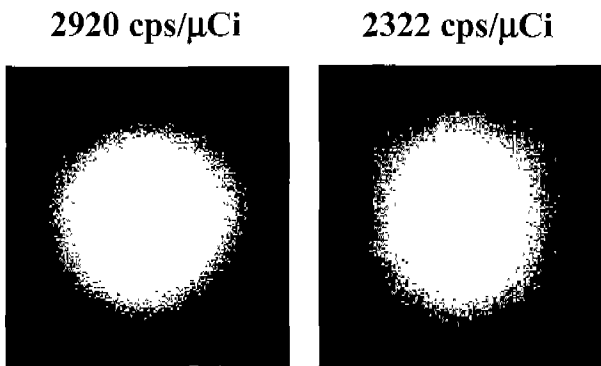


그림 4. NaI(Tl) 섬광체의 옆표면처리를 서로 다르게 하여 획득한 Tc-99m 내인성 플러드 영상과 민감도
 Fig. 4. Tc-99m intrinsic flood field images and sensitivities obtained with different side surface treatments of NaI(Tl) scintillator

때 흡수체의 경우보다 월등하게 우수한 민감도를 보여주었다. 서로 다른 옆표면처리를 실시한 두 종류의 섬광체에서 Tc-99m 선원의 에너지 스펙트럼과 분해능 측정결과를 그림 6 과 그림 7에 나타내었다. NaI(Tl) 섬광체의 경우, 140 keV γ -선에 대하여 반사체 처리는 12.5% FWHM으로 가장 우수하였으며 흡수체 처리는 23.5% FWHM로 다소 저하된 분해능을 보여주었다. 또한 CsI(Tl) 섬광체의 경우는 140 keV에서 반사체 처리가 20.5% FWHM, 흡수체 처리는 33.3% FWHM으로 측정되었다. 따라서 두 종류 섬광체에서 모두 옆표면처리를 흡수체로

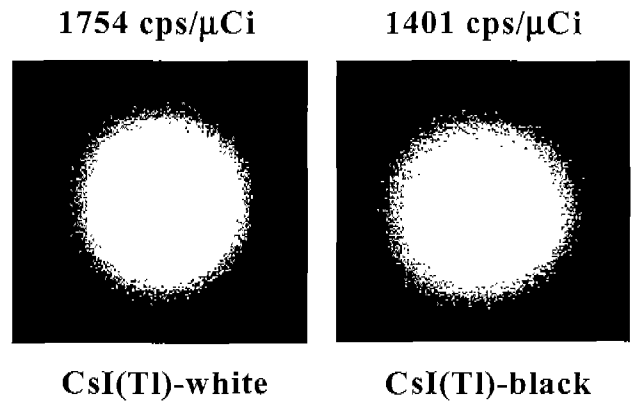


그림 5. CsI(Tl) 섬광체의 옆표면처리를 서로 다르게 하여 획득한 Tc-99m 내인성 플러드 영상과 민감도
 Fig. 5. Tc-99m intrinsic flood field images and sensitivities obtained with different side surface treatments of CsI(Tl) scintillator

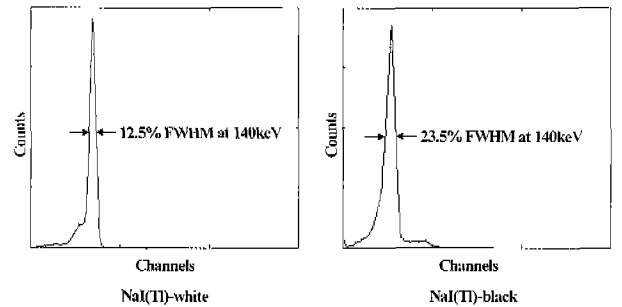


그림 6. NaI(Tl) 섬광체의 옆표면처리를 서로 다르게 하여 측정된 Tc-99m 140 keV에 대한 에너지 스펙트럼
 Fig. 6. Energy spectrums measured at 140 keV of Tc-99m with different side surface treatments of NaI(Tl) scintillator

하였을 때 140 keV γ -선에 대한 에너지 분해능이 현저하게 저하되는 것으로 관찰되었다.

그림 8과 그림 9는 4개 섬광체에 대한 내인성 위치 분해능 측정결과를 보여주고 있다. NaI(Tl)-반사체 처리의 경우는 5.17 mm FWHM, NaI(Tl)-흡수체 처리는 4.54 mm FWHM으로 측정되었고, CsI(Tl)-반사체 처리는 6.99 mm FWHM, CsI(Tl)-흡수체 처리는 6.31 mm FWHM의 분해능을 갖는 것으로 나타나 두 종류의 섬광체에서 모두 옆표면처리를 흡수체로 처리하였을 때 반사체의 경우보다 우수한 위치 분해능을 나타내었다.

고찰 및 결론

방사성동위원소를 이용하여 인체내 질병을 진단하는 영상신단 기기인 감마카메라에서 섬광체는 감마선을 검출하여 카메라의 영상 특성을 결정하는 중요한 센서역할을 한다. 따라서 섬광체의 종류 및 크기, 그리고 섬광체 옆표면처리에 대한 충분한 고찰은 보다 향상되고 정확한 영상을 획득할 수 있는 감마카메라 개발을 위해 필수적이다. 이 연구에서는 감마카메라 제

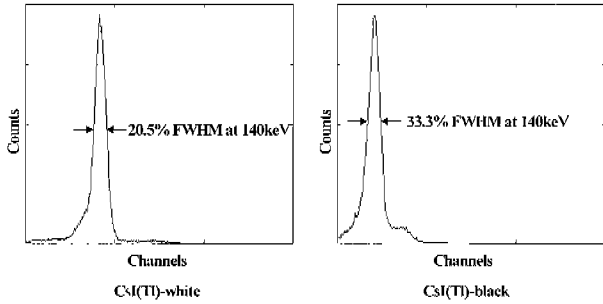


그림 7. CsI(Tl) 섬광체의 옆표면처리를 서로 다르게 하여 측정된 Tc-99m 140 keV에 대한 에너지 스펙트럼
 Fig. 7. Energy spectra measured at 140 keV of Tc-99m with different side surface treatments of CsI(Tl) scintillator

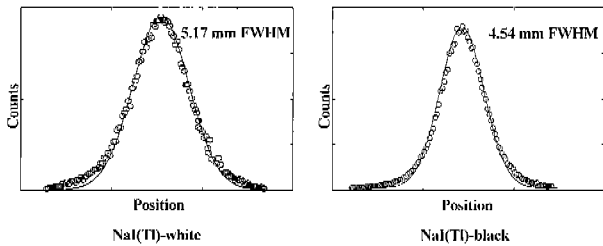


그림 8. NaI(Tl) 섬광체의 옆표면처리를 서로 다르게 하여 측정된 위치 분해능
 Fig. 8. Spatial resolutions evaluated with different side surface treatments of NaI(Tl) scintillator

작 시에 고려되어야 하는 섬광체의 옆표면처리가 감마카메라의 특성에 미치는 영향에 대하여 몬테카를로 시뮬레이션과 실제 측정을 통하여 고찰하였다.

민감도에 대한 시뮬레이션 결과에서 섬광체 옆표면처리가 광전자증배관내의 광음극에서 세수되는 광자의 개수에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. NaI(Tl)와 CsI(Tl) 섬광체 모두에서 반사체 처리의 경우가 흡수체 처리의 경우에 비해 약 4.6배 정도 많은 광자의 개수결과를 나타냈으며, 그 주요한 원인은 표 2의 결과에서 알 수 있듯이 흡수체 표면처리에 의해 흡수된 광자 개수 때문이었다. 또한 옆표면처리를 반사체로 하였을 때, 발생한 광자가 섬광체 표면에서 흡수되거나 섬광체에서 탈출하지 못하고 에너지를 잃어버려 섬광체내에 사체 흡수되는 광자의 개수가 흡수체 처리에 비하여 약 4배 정도 많은 것으로 나타났다.

시뮬레이션 플러드 영상과 프로파일 결과인 그림 2와 3은 섬광체 옆표면처리가 감마카메라 영상에 미치는 효과를 보다 명확하게 나타내었다. 두 종류 섬광체에서 반사체 처리의 경우가 흡수체 처리에 비해 보다 밝은 영상으로 시뮬레이션 되었고, 각 영상에 대한 프로파일에서도 흡수체 처리의 경우는 영상 전면에 걸쳐 계수상태의 요동이 관찰되나 반사체 처리의 경우는 비교적 양호한 계수상태를 보여주고 있다. 또한 섬광체 옆표면을 반사체 처리로 하였을 경우, 발생한 광자가 옆표면에서 흡수되지 않고 반사되어 검출되므로 영상 가장자리의 민감

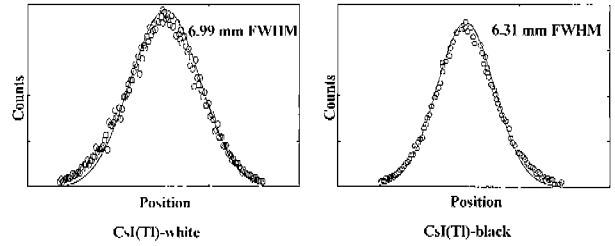


그림 9. CsI(Tl) 섬광체의 옆표면처리를 서로 다르게 하여 측정된 위치 분해능
 Fig. 9. Spatial resolutions evaluated with different side surface treatments of CsI(Tl) scintillator

도가 흡수체 처리의 경우에 비해 뚜렷하게 향상됨이 관찰되었다. 이러한 영향은 실제 감마카메라의 유효시야를 결정하는 중요한 요인이 될 것이다 그러나 섬광체에서 발생한 섬광의 퍼짐 정도는 옆표면을 흡수체 처리로 하였을 때가 상대적으로 작으므로 우수한 위치 분해능 영상획득이 요구될 때는 흡수체 처리가 유리할 것이다.

실제 4개 섬광체를 위치민감형 광전자증배관에 광학적 결합하여 획득한 내인싱 플러드 영상결과에서는 시뮬레이션 결과에서와 유사하게 두 종류의 섬광체에서 반사체 처리한 섬광체로 획득한 영상이 흡수체 처리 섬광체로 얻은 영상에 비해 많은 광자가 검출되어 나타났으며, 영상 가장자리 부분도 상대적으로 밝은 것으로 확인하였다. 또한 민감도 결과에서는 시뮬레이션 예측결과와 정도차이는 있지만 유사한 경향을 보였으며, 두 종류 섬광체에서 모두 반사체 처리의 경우가 흡수체 처리에 비해 약 20%가량 향상된 민감도를 나타내고 있다. 감마카메라의 민감도는 실제 임상응용에서 빠르고 정확한 진단영상 획득을 위해 중요한 요인이 되므로 충분한 고찰이 필수적이다.

이 연구에서 실시한 Tc-99m 선원의 에너지 스펙트럼 획득결과에서는 두 종류 섬광체에서 모두 반사체 처리의 경우가 흡수체 처리에 비해 원등하게 우수한 것으로 관찰되었다. 이는 Tc 99m의 붕괴에너지인 140 keV γ 선이 섬광체내에서 비례적으로 전환되어 발생한 섬광중 일부가 흡수체 처리된 옆표면에 의해 흡수되었기 때문에 본래의 에너지를 제대로 전달하지 못하고 광자 손실이 생겨 상대적으로 에너지 분해능이 저하된 것으로 판단한다. 감마카메라에서 좋지 못한 에너지 분해능은 신호 대 잡음 비(signal to noise ratio)를 감소시키고 산란감마선 제거를 어렵게 한다. 따라서 진단영상의 대조도가 저하되며 인체 내 병변 검출에 대한 정확도를 떨어뜨리게 된다.

위치 분해능 측정 결과에서는 예측한 대로 에너지 분해능과는 반대현상이 나타났다. 두 종류 섬광체에서 모두 시뮬레이션 결과와 유사하게 흡수체 처리의 경우가 반사체 처리에 비해 양호한 분해능을 보이는 것으로 관찰되었다. 이 현상은 반사체 처리인 경우, 발생한 섬광이 옆표면에서 흡수되지 않고 지속적으로 반사됨으로써 원래 발생위치로부터 검출될 때까지 섬광퍼짐 정도를 넓히는 것으로 설명할 수 있다. 감마카메라의 위치 분해능은 실제 영상에서 검출할 수 있는 병변의 크기와 영상정확도에 밀접한 관계가 있으므로, 우수한 위치 분해능 획득을

위해서는 섬광체 열표면은 흡수체로 처리해야 한다는 것을 확인할 수 있었다.

NaI(Tl)와 CsI(Tl) 두 섬광체를 비교하면 민감도의 경우, 두 가지 열표면처리에서 모두 NaI(Tl)섬광체가 CsI(Tl)섬광체에 비해 시뮬레이션 결과에서는 약 1.6배, 실제 측정결과에서는 약 1.67배 정도 우수하게 나타났다. 이 현상은 NaI(Tl)섬광체가 CsI(Tl)섬광체에 비해 표 1에서 보는 바와 같이 에너지 당 발생하는 섬광개수는 떨어지나, 실온에서의 광전환(light conversion) 효율이 모든 무기섬광체중 가장 높고(CsI(Tl)섬광체에 비해 약 2.2배), NaI(Tl)섬광체 방출 스펙트럼 파장(410 nm)이 광전자증배관내의 광음극이 반응하는 파장과 잘 일치하기 때문인 것으로 생각한다[13]. 에너지 분해능과 위치 분해능에 있어서도 Tc 99m 140 keV에 대하여 적당한 밀도와 붕괴시간을 가지고 있는 NaI(Tl)섬광체가 상대적으로 우수한 결과를 나타내었다. 따라서 이 연구결과를 통하여 NaI(Tl)섬광체가 쉽게 부스러지고 조해성을 가지는 단점이 있지만, CsI(Tl)섬광체에 비해 우수한 특성을 나타내므로 감마카메라 제작에 적합한 섬광체라는 것을 확인할 수 있었다. 결론적으로 이 연구에서는 소형 감마카메라 시스템에 사용되는 섬광체의 열표면처리가 카메라의 주요 특성에 직접적인 영향을 미친다는 것을 컴퓨터 시뮬레이션 방법과 실제 실험을 통한 측정결과로 증명하였다.

참 고 문 헌

1. 김종호, 최 용, 김주영, 임기전, 김상은, 최연성, 주관식, 김병태, "소형 감마카메라 제작에 사용되는 NaI(Tl)-광전자증배관 검출기의 민감도와 위치분해능 특성 연구를 위한 몬테카를로 시뮬레이션", 의학물리, Vol. 8, No. 2, pp. 67-76, 1997
2. C.S. Levin, E.J. Hoffman, M.P. Tornai and L.R. MacDonald, "PSPMT and photodiode designs of a small scintillation camera for imaging malignant breast tumors", IEEE Trans on Nucl Sci, Vol 44, pp. 1513-1520, 1997
3. M. Spisar, J.N. Aarsvold, R.A. Mintzer, "DETECT97 simulation studies of light output in a full field-of-view

- small gamma camera", IEEE MIC Record, pp. 897-901, 1997
4. A. Levin and C. Moisan, "A more physical approach to model the surface treatment of scintillation counters and its implementation into DETECT", IEEE NSS Record, pp. 96-100, 1996
5. C.S. Levin, L.R. MacDonald, M.P. Tornai, E.J. Hoffman, J. Park, "Optimizing light collection from thin scintillators used in a beta-ray camera for surgical use", IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol 43, pp. 2053-2060, 1996
6. M.P. Tornai, L.R. MacDonald, C.S. Levin, S. Siegel, E.J. Hoffman, "Design considerations and initial performance of a 1.2cm beta imaging intra-operative probe", IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol 43, pp. 2326-2335, 1996
7. S. Siegel, S.R. Cherry, A.R. Ricci, Y. Shao, M.E. Phelps, "Development of continuous detectors for a high resolution animal PET system", IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol 42, pp. 1069-1074, 1995
8. I. HOLL, E. Lorenz, G. Mageras, "A measurement of the light yield of common inorganic scintillators", IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol 35, pp. 105-107, 1988
9. G.F. Knoll and T.F. Knoll, "Light collection in scintillation detector composites for neutron detection", IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol 35, pp. 872-875, 1988
10. G.F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, 2nd ed., New York, John Wiley & Sons, Inc., pp. 599-710, 1989
11. 김종호, 최 용, 권홍성, 김희중, 김상은, 최연성, 이경한, 김문희, 주관식, 김병태, "NaI(Tl)섬광결성과 위치민감형 광전자증배관을 이용한 유방암 진단용 소형 감마카메라 개발", 대한핵의학회지, Vol. 32, No. 4, pp. 314-322, 1998
12. J.A. Sorenson, M.E. Phelps, Physics in Nuclear Medicine, 2nd ed., New York, Grunc & Stratton, Inc., pp. 298-345, 1987
13. N. Tsoufanidis, Measurement and Detection of Radiation, New York, McGraw-Hill corp., pp. 195-216, 1976