

섬광체와 평행구멍조준기가 감마프로브 영상에 미치는 영향에 관한 컴퓨터 시뮬레이션

봉정균*·***·김희중*·**·이종두*·***·권수일***

연세대학교 방사선학과연구소*, 연세대학교 의과대학 진단방사선과학교실**,
경기대학교 물리학과***
(1998년 7월 30일 접수, 1998년 12월 7일 채택)

Computer Simulation for Effects of Scintillator and Parallel Hole Collimator on Gamma Probe Imaging

J.K. Bong*·***, H.J. Kim*·**, J.D. Lee*·**, S.I. Kwon***

Research Institute of Radiological Science*, Yonsei Univ., Department of Diagnostic Radiology**,
Yonsei Univ. College of Medicine, Department of Physics***, Kyonggi Univ.
(Received June 30, 1998, Accepted December 7, 1998)

Abstract : The purpose of this study was to investigate the effects of scintillator and collimator parameters that tradeoff between system sensitivity and spatial resolution. The parameters simulated using Monte Carlo program were scintillator thickness, collimator hole shape, septal thickness, and hole length. The results show that the sensitivity increases exponentially upto about 1 cm of scintillator thickness as the thickness increases. However the sensitivity is almost constant when the scintillator is thicker than about 1 cm. The simulation of collimator hole shape shows that the hexagonal hole gives the best spatial resolution for the same system sensitivity. The system spatial resolution is improved, as both collimator septal thickness and hole length increase, however the system sensitivity is rapidly decreased. In conclusion, The optimization of scintillator and collimator parameters using monte carlo simulation may be useful to develop a high-resolution miniature gamma probe.

Key words : Collimator, Scintillator, Sensitivity, Spatial resolution, Simulation

서 론

방사선편출을 이용하여 영상을 얻는 핵의학 영상기기는 크게 방사선원을 가시광선영역의 섬광으로 전환하는 섬광체와 섬광을 광전자로 전환하여 증배시키는 광증배관으로 구성되는 검출기부분, 검출기의 광증배관에서 전환된 전기신호를 처리하는 진단중

폭기와 주증폭기로 구성되는 신호처리부분, 아날로그 신호를 디지털로 전환하여 컴퓨터에 전송을 할 수 있는 인터페이스부분으로 구분할 수 있다. 이중 검출기부분은 조준기와 섬광체의 물리적 영향으로 인하여 기기의 공간분해능과 민감도에 많은 영향을 주고, 이러한 공간분해능과 민감도는 영상기기의 성능을 결정한다[1-3].

일반적으로, 섬광체에서 민감도와 공간분해능에 관련이 있는 것은 섬광체의 두께라고 알려져있는데, 이것은 섬광체 두께에 따른 섬광체내 광자와의 상호작용에 달려있다. 섬광체내의 상호작용으로 인하여 광자들의 꺾임이 커져서 공간분해능이 떨어지는 반면에 많은 상호작용으로 인해 민감도는 높아진다[1]. 그러므로, 이러한 섬광체의 두께에 대해서 민감도와 공간분해능이

이 연구는 1997년도 선도기술(G7) 의료공학기술개발사업 연구비 보조로 이루어졌음.

통신저자 : 김희중, (120-752) 서울시 서대문구 신촌동 134
연세대학교 의과대학 진단방사선과, 연세대학교 방사선
과학연구소
Tel. (02)361-5753, Fax. (02)313-1039,
E-mail : hjkim@yumc.yonsei.ac.kr

표 1. 여러 가지 구멍모양을 가진 조준기들의 기하학적 요소와 구경함수

Table 1. Geometric factors and aperture functions of typical collimators with different hole shapes.

	ROUND	SQUARE	HEXAGONAL
Hole Shape			
Hole Open Area *open	$\frac{\pi w^2}{4}$	w^2	$\frac{3\sqrt{3}}{2} w^2$
Unit Hole Area *total	$\frac{\sqrt{3}}{2} (w+s)^2$	$(w+s)^2$	$\frac{3\sqrt{3}}{2} (w + \frac{s}{\sqrt{3}})^2$
Geometric Factor g ₀	$\frac{\pi}{32\sqrt{3}} \left[\frac{w^2}{L_e(w+s)} \right]^2$	$\frac{1}{4\pi} \left[\frac{w^2}{L_e(w+s)} \right]^2$	$\frac{3\sqrt{3}}{8\pi} \left[\frac{w^2}{L_e(w+s/\sqrt{3})} \right]^2$
Aperture Function A(v)	$\frac{J_1(\beta)}{\beta}$	$\frac{2\sin(\beta_c)\sin(\beta_s)}{\beta^2\sin(2\theta)}$ when $\theta \neq n\pi/2$ $\left[\frac{\sin\beta}{\beta} \right]$ when $\theta = n\pi/2$	$\frac{2}{\beta_s^2} \left[\frac{\cos\theta}{\cos 3\theta} \right] \{ \cos(\beta_c)\cos(\sqrt{3}\beta_s) - \cos(2\beta_c) - \sqrt{3}\tan\theta\sin(\beta_c)\sin(\sqrt{3}\beta_s) \}$ when $\theta \neq (2n+1)\pi/6$ $\frac{1}{3} \{ 2\text{sinc}(\beta_s) + \text{sinc}(\frac{\beta_s}{2}) \}$ when $\theta = (2n+1)\pi/6$

$\beta = \pi w v$, $\beta_c = \beta \cos\theta$, $\beta_s = \beta \sin\theta$, $\beta_s = \sqrt{3}\beta \text{sinc}(x) = \sin(x)/x$
 L_e is the effective length of the collimator hole
 $J_1(x)$ is the first order Bessel function of the first kind

역으로 작용하기 때문에 민감도를 우선으로 해야할지 또는 공간 분해능을 우선으로 해야할지 미리 결정하여 섬광체 두께를 선택할 필요가 있다.

조준기 설계에 있어서 조준기구멍크기와 벽두께 그리고 벽길이에 대한 결정은 공간분해능과 민감도에 밀접한 관계가 있다. 이러한 변수들은 조준기 설계 및 제작에 들어가기전 사용할 에너지 영역과 연구할 목적에 따라 신중히 고려되어야 할 것이다. 조준기 설계의 목적은 무시할 수 있는 정도로 조준기 벽을 통과하는 성분을 줄이는 반면에, 적당한 공간분해능과 영상 대조도를 얻을 수 있는 기하학적 성분을 최대화시키는 것이다[3-4]. 조준기에서 조준기 구멍쪽으로 감마선이 방출된다면, 이것은 검출기 응답의 기하학적 성분에 기여할 것이다. 그러나, 방출된 감마선이 조준기벽과 충돌한다면, 그것은 조준기 벽에 흡수되거나 조준기 벽을 통과할 것이다. 이러한 감마선의 벽통과는 영상의 질을 떨어뜨리는데 기여를 할 것이다. 평행구멍조준기에 대한 공간분해능과 민감도 그리고 벽통과는 Anger에 의해서 개발된 공식을 사용하여 결정될 수 있다[5]. 그러나, 그러한 공식은 선확산함수(line spread function)을 정확하게 예측할 수 없고, 조준기 성능에서의 구멍모양의 영향을 정확하게 설명하지 못한다.

본 연구는 영상용 감마프로브를 최적화시켜주는 섬광체 두께, 조준기 구멍모양, 벽두께 그리고 벽길이에 대해 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 연구하였다.

몬테카를로 코드

본 연구에서 사용한 몬테카를로 코드는 SIMIND로써, photon history와 여러 가지 형태들의 상호작용 과정을 선택하여 시뮬레이션하기위해서 균일하게 분포된 난수(Random number)에 기반을 두고 있다[6]. 방사붕괴는 정의된 방사원원 체적(Radioactive volume)내에서 샘플화되었고, 방사붕괴로부터 방출된 광자들은 팬텀내에서 추적된 후, 광전효과, 콤프턴과 부착(coherent) 산란과 같은 상호작용들이 팬텀 물질내에서 상대적 상호작용 확률에 의해 시뮬레이션된다. 그리고나서 팬텀으로부터 나온 광자들은 섬광카메라쪽으로 추적된다. 그러나, 이 코드에서 광증배관(Photomultiplier Tube)의 시뮬레이션은 포함하지 않는 반면에, 에너지 신호에서의 통계적 변화들은 가우시안 함수에 따라 부가된 에너지를 중첩시키는 것에 의해 시뮬레이션된다.

섬광체카메라 조준기의 시뮬레이션은 광자가 조준기 구멍중의 하나를 통과하는지를 검사하는 기하학적 계산에 바탕을 두고있고, 또한 조준기 구멍벽들의 가장자리를 통과하는 광자의 벽투과효과에 대한 접근은 물리적 두께로부터 유효 조준기 두께를 계산하는것에 의해 실행된다. 또한, 여러 가지 조준기 구멍모양에 대해에 대해서 시뮬레이션하기 위해서 표1에 나오는 구경함수를 사용한다.

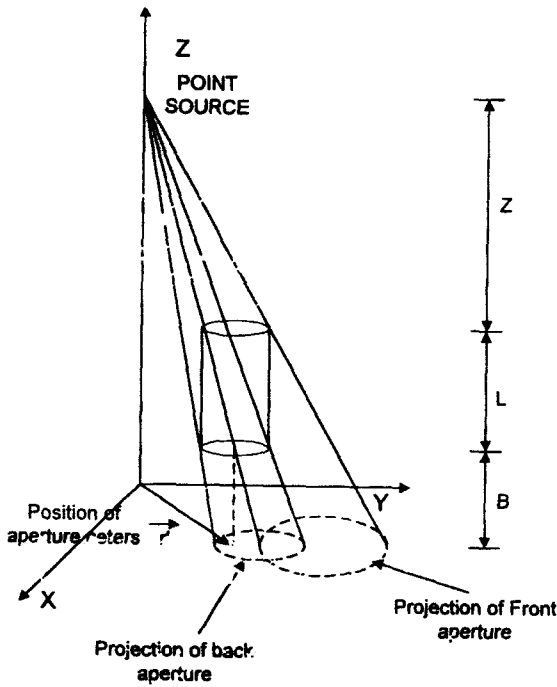


그림 1. 임의의 모양을 가진 조준기의 단구멍에 의한 점선원 영상형성 기하학

Fig. 1. The geometry of point source image formation by a single straight collimator hole of arbitrary shape

광자가 조준기를 통과한다면, 광자가 NaI(Tl) 결정에 흡수되거나 이탈할 때까지 결정내에서 추적한다.

평행구멍조준기

1. 기하학적 전환 함수(geometric transfer function)

조준기의 성능은 검출기 효율과 공간 분해능에 관련된다. 그리고 이러한 성능들은 섬광카메라 조준기의 설계에 영향을 받는다[3-5]. 조준기 설계에 있어서 가장 고려해야할 것은 공간분해능에 대해 다양한 설계에 사용되는 변수들의 결합된 영향들이다. 이러한 영향을 연구하기 위해서 평행구멍조준기가 부착된 섬광카메라를 위한 기하학적인 전환 함수 성분을 예측할 수 있는 이론적 접근이 Metz 등에 의해 이루어졌다[4]. 조준기가 부착된 검출기의 공간분해능의 성질들은 영상 검출 시스템의 점확산함수(point spread function)의 2 차원 푸리에 변환(Fourier transform)인 전환함수에 의해서 설명될 수 있다.

조준기의 기하학적 전환 함수 성분, $S_g(\nu)$ 는 조준기 구멍을 통해 기하학적으로 받아들여지는 광자들에 의해 조준기 후면에 형성되는 점선원 영상의 규격화된 2차원적인 푸리에 변환으로 정의된다.

그림 1과 같이 길이 L 이고 조준기 후면으로부터 섬광카메라의 크리스탈의 유효영상면까지를 B 라 하고 r' 을 유효영상면에

있는 좌표계 $r=(x,y)$ 에 대해 구멍 구경의 중심위치를 나타낸다고 한다면 조준기 구멍의 전면과 후면은 함수 $a(r-r')$ 으로 설명될 수 있다. 점선원에 의한 영상면의 r 위치에 도달하는 photon fluence는 다음과 같이 주어진다.

$$\phi(r;r') = k \times a\left[\left(\frac{Z}{Z+L+B}\right)r-r'\right] \times a\left[\left(\frac{Z+L}{Z+L+B}\right)r-r'\right] \quad (1)$$

식(1)에서 k 는 상수이고, 오른쪽의 두 번째 항은 조준기 전면 함수이고, 세 번째 항은 조준기 후면함수이다.

조준기 구멍이 영상 형성동안 모든 가능한 위치 r' 에 대해 이동한다면, r 에서의 total photon fluence 또는 다중구멍조준기의 유효 점선원 응답함수는 다음과 같다.

$$\bar{\phi}(r) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} \phi(r;r') dr' \quad (2)$$

식(2)에 식(1)을 대입하는 것에 의해서 다음을 얻을 수 있다.

$$\bar{\phi}(r) = k \int \int_{-\infty}^{+\infty} a\left[\left(\frac{L}{Z+L+B}\right)r-\rho\right] a(-\rho) d\rho \quad (3)$$

식(3)의 오른쪽항은 중첩적분으로써 고려할 수 있다. 그리고 다음과 같은 유효 기하학적 전환함수를 얻을 수 있다.

$$S_g(\nu) = \bar{\phi}(\nu) / \bar{\phi}(0) \quad (4)$$

$$\bar{\phi}(\nu) \approx K \left| A\left(\left(\frac{Z+L+B}{L}\right)\nu\right) \right|^2 \quad (5)$$

식(5)에서 K 는 상수이다. $A(\nu)$ 는 구경함수의 2차원적 푸리에 변환이다. 여러 가지 모양의 조준기 구멍에 대한 구경함수들은 표1에서 보여주고 있다.

2. 기하학적 효율

평행구멍조준기에 대해서, 기하학적 효율 $g(x,y,z)$ 를 조준기를 통과하는 방사선의 비율로써 정의한다면, $g(x,y,z)$ 는 다음과 같다.

$$g(x,y,z) = g_0 \times \left(\frac{a_{open}}{a_{total}}\right) = \left(\frac{a_{open}}{4\pi L^2}\right) \times \left(\frac{a_{open}}{a_{total}}\right) \quad (6)$$

g_0 는 점선원에 의해 크리스탈면에 cover되는 구면적(spherical surface)의 비율이다. a_{open} 은 조준기 후면에 있는 구멍의 구경 면적이고, a_{total} 은 조준기벽(septa)을 포함하고 있는 단위 구멍 면적의 총면적이다. 식(6)의 오른쪽 첫 번째 항은 조준기 구멍에 대각인 입체각이고, L 은 조준기 길이이다. 두 번째 항은 조준기벽이 결정면에 접하지않는 카메라 결정의 양이다. 조준기에 대해서, 구멍길이는 구멍 직경보다 크다. 여러 가지 모양의 조준기 구멍에 대한 기하학적 인자 g_0 를 표1에서 보여주고 있다.

3. 벽통과의 효과

만약 벽통과를 하나의 벽두께에 대해 나타낸다면, 벽두께는 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$s = \frac{2dw}{(L-w)} \quad (7)$$

w는 감마선이 어떤 구멍에서 다음 구멍으로 벽을 통과하는 가장 짧은 길이이고, L은 조준기 길이, d는 조준기 구멍의 직경이다.

주어진 벽두께 w에 대해서 벽을 통과하는 감마선의 양은 다음과 같이 주어진다.

$$\text{Fraction Transmitted} = e^{-\mu w} \quad (8)$$

μ 는 조준기를 구성하는 물질의 선형감쇠계수이다.

방 법

1. NaI(Tl) 섬광체 시뮬레이션을 위한 매개변수

섬광체 시뮬레이션을 위해 Tc-99m이 들어있는 길이 0.2cm, 반경 2.5cm인 원통형 선원 $1\mu\text{Ci}$ (37 kBq)를 사용하였다. 섬광체는 직경 7.5 cm인 원통형 NaI(Tl) 섬광체를 이용 0.1, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0 cm의 길이로 각각 변화를 주어 시뮬레이션하였다.

2. 조준기 시뮬레이션을 위한 매개변수

조준기 시뮬레이션시 방사선원은 공간분해능을 구하기 위해서 길이 10 cm, 직경 1 mm인 선선원 $1\mu\text{Ci}$ (37 kBq)를 사용하였고, 그리고 민감도를 구하기 위해서 길이 0.2 cm, 반경 2.5 cm인 원통형 선원 $1\mu\text{Ci}$ (37 kBq)를 시뮬레이션에 이용하였다. 조준기의 재질은 납을 이용하였다. 조준기로부터 선원의 거리를 2 cm로 하여 각각 시뮬레이션하였다.

1) 조준기 구멍 모양에 따른 변화

조준기 구멍 모양에 따른 기하학적 영향을 측정하기 위해 벽두께 0.2 mm와 길이 3.5 cm인 원형, 사각, 그리고 육각구멍조준기를 이용하였다. 각 구멍 모양에 대해서 기하학적인 효율만을 고려하기 위해서 조준기 벽에 부딪히는 방사선이 모두 흡수된다고 가정하였고, 각 구멍의 면적을 같게하여 조준기 효율을 같게 만들었다. 즉, 모든 구멍의 면적을 3.02 mm^2 로 하였다. 원형구멍의 지름은 1.96 mm, 사각구멍의 가로, 세로 길이는 1.74 mm, 그리고 육각구멍의 X방향 길이는 1.87 mm, Y방향 길이는 2.16 mm이었다. 사각구멍과 육각구멍은 정사각과 정육각구멍이었다.

2) 조준기 벽두께 및 길이에 따른 변화

조준기는 평행구멍조준기로써 일반적으로 사용되는 육각구멍(Hexagonal hole)조준기를 이용하였다. 조준기 길이에 따른 물리적 특성을 알아보기 위해 조준기 벽두께를 0.02 cm로 고정시킨 후, 조준기 길이를 0.1, 0.5, 2.0, 3.5, 8.0, 10, 20 cm 까지 변화를 주었다. 또한, 조준기 벽두께에 따른 물리적 특성을 알아보기 위해 조준기 길이를 3 cm에 고정시킨 후, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.25, 0.5 cm 까지 벽두께에 변화를 주어 특성을 알아 보았다. 조준기 벽두께 및 길이에 대한 시뮬레이션은 조준기 벽에 부딪히는 방사선에 대해 벽투과와 물리적 상호작용에 대해 고려하였다.

본 연구에서 사용한 몬테카를로 코드는 앞에서 설명한 기하학적 전환 함수를 바탕으로 조준기를 시뮬레이션하였다.

3. 공간분해능 계산

공간분해능은 FWHM과 FWTM, 그리고 MTF(Modulation Transfer Function)를 구하여 알아보았다. FWHM과 FWTM을 얻기 위하여 가우시안 회귀분석(Gaussian fitting)을 적용하였다. 다음은 가우시안 함수이다.

$$P(x) = \text{Amp} \cdot \exp(-(x-m)^2/2\sigma^2) \quad (9)$$

$P(x)$ 는 x 에서의 가우시안 값이다. Amp는 가우시안의 진폭이고, m 은 가우시안의 중심값이다. 그리고 σ 는 가우시안의 너비이다.

MTF는 LSF(Line Spread Fuction)에 대해서 규격화된 퓨리에 변환식(Fourier Transform)에 의해서 얻었다. LSF는 256×256 매트릭스에서 Tc-99m 선선원축에 수직인 방향으로 화소 값을 얻어 계산하였다[7].

$$\text{MTF} = \frac{\sum f(x) \cos(2\pi \nu x)}{\sum f(x)} \quad (10)$$

$f(x)$ 는 LSF이고, ν 는 spatial frequency이다. 최대주파수는 0.25cycles/mm이었다.

4. 민감도 계산

민감도는 팬텀내에 들어있는 총방사능양에 대한 검출기에서 측정된 총계수값으로 계산하였고, 민감도 S는 다음과 같다.

$$S = \frac{\text{Total Counts(cps)}}{\text{Total Activity(kBq)}} \quad (11)$$

5. 모의 카메라 시스템

모의 카메라 시스템에 대한 데이터 획득의 매개변수으로써 140 keV 중심 에너지 식별 영역을 이용하였다. 그리고 매트릭스 크기는 256×256 이었고, 화소크기는 0.20 cm이었다. 고유공간분해능은 0.32 cm 이었다. 그리고 에너지 분해능은 9.8%이었다.

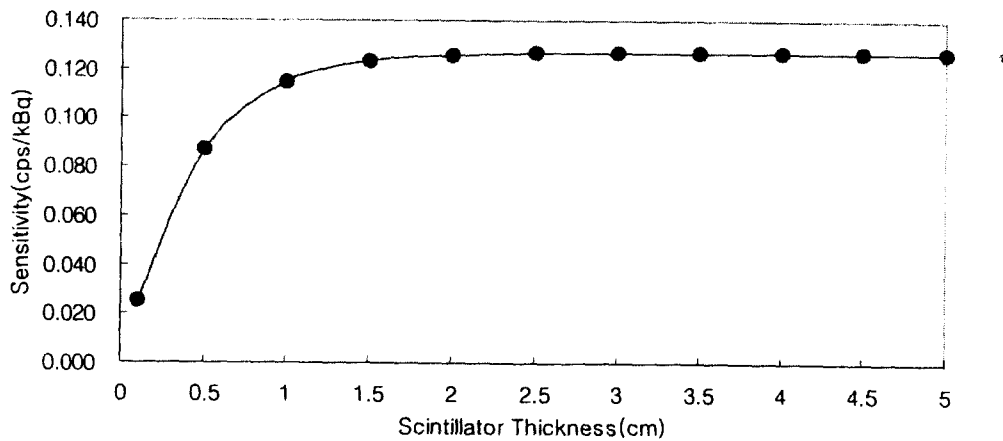


그림 2. 섬광체 두께에 따른 민감도의 변화
Fig. 2. Effects of scintillator thickness on sensitivity

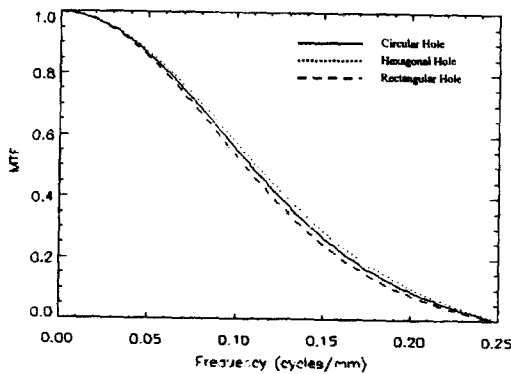


그림 3. 다양한 조준기 구멍모양에 따른 MTF
Fig. 3. MTFs for various collimator hole shape

결 과

1. 섬광체 두께에 따른 민감도 변화

섬광체 두께에 따른 민감도 변화를 측정하기 위해서 반경 2.5 cm, 길이 0.2 cm인 원통형 선원 37 kBq를 이용하여 시뮬레이션하였다. 섬광체 두께에 따른 민감도 변화는 섬광체 두께가 두꺼워질수록 민감도가 좋아지는 것을 볼 수 있었다. 그러나, 섬광체내 광자와의 상호작용을 할 수 있는 두께의 한계치에 도달하면 민감도가 일정하게 되는 것으로 나타났다(그림 2).

2. 조준기 구멍모양에 따른 공간분해능의 변화

조준기 모양에 따라 공간분해능을 비교하기 위해서 원, 사각, 그리고 육각모양의 구멍을 가진 조준기를 이용하였고, 육각구멍인 경우 정육각모양의 구멍을 가진 조준기를 시뮬레이션 하였다. 공간분해능의 척도인 FWHM과 FWTM은 각각 원모양이

표 2. 조준기 구멍 모양에 따른 공간분해능

Table 2. Spatial resolution for various collimator hole shapes

Hole Shape	FWHM(mm)	FWTM(mm)
Circle	4.06	7.37
Rectangle	4.19	7.63
Hexagon	3.93	7.16

표 3. 벽두께에 따른 민감도와 공간분해능

Table 3. Sensitivity and spatial resolution for various septal thickness

Septal Thickness(mm)	Sensitivity(%)	FWHM(mm)	FWTM(mm)
0.1	0.15	5.68	10.35
0.2	0.13	5.42	9.87
0.5	0.10	5.00	9.12
1.0	0.07	4.70	8.57
2.5	0.03	4.46	8.12
5.0	0.01	4.37	7.97

4.05 mm, 7.37 mm, 사각모양이 4.19 mm, 7.63 mm 마지막으로 육각모양이 3.93 mm, 7.16 mm이었다(표 2). MTF는 육각모양에 대해서 가장 좋은 결과를 보여주었고, 그림 3과 같았다.

3. 조준기 벽두께에 따른 변화

조준기 두께에 따른 민감도와 공간분해능은 조준기 두께가 두꺼워짐에 따라 공간분해능이 점점 더 좋아졌고, 반면에 민감도는 떨어지는 것을 볼 수 있었는데, 조준기 벽두께에 따른 민감도는 그림 4와 같은 경향을 보였고, 공간분해능에 대한 FWHM과 FWTM은 0.1 mm일 때 5.68 mm, 10.35 mm으로 가장 낮았으며, 5 mm일 때 4.37 mm, 7.97 mm으로 가장 높게 나타났다(표 3). 그리고 MTF는 FWHM과 같이 두께가 두꺼워질수록

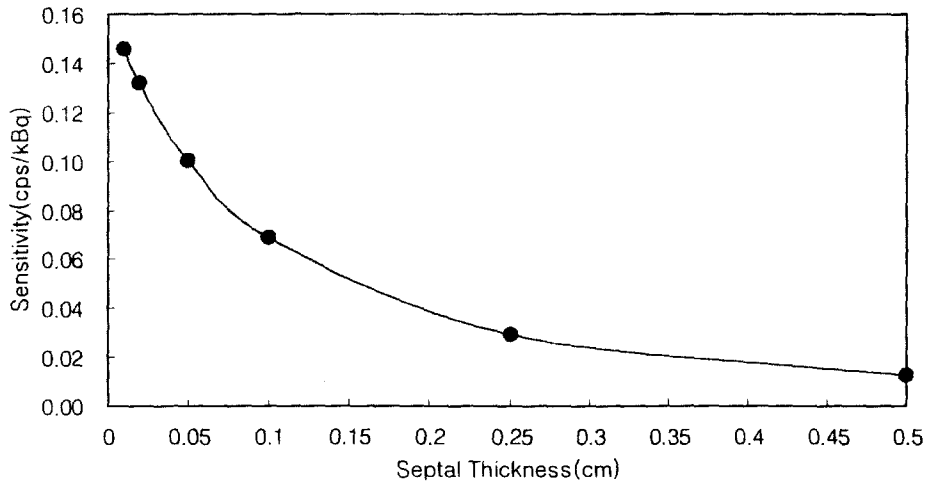


그림 4. 벽두께에 따른 민감도
 Fig. 4. Effects of septal thickness on sensitivity

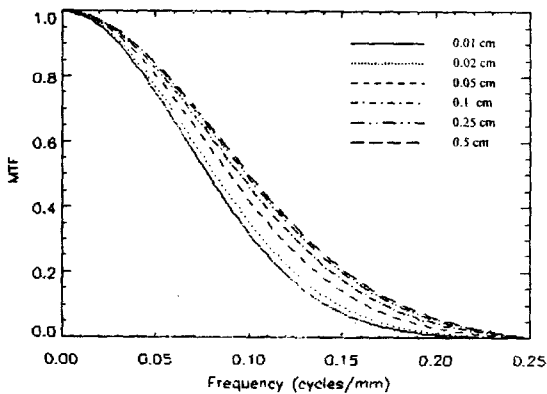


그림 5. 다양한 벽두께에 따른 MTF
 Fig. 5. MTFs for various septal thickness

좋아지는 것을 볼 수 있었다(그림 5). 그러나, 벽두께 5 mm일 때 영상의 찌그러짐이 일어났다.

4. 조준기 길이에 따른 변화

조준기 길이에 대한 시뮬레이션 결과 또한 벽두께와 같은 경향을 보였는데 조준기 길이가 길어짐에 따라 공간분해능은 좋아지고, 민감도는 조준기 길이가 길어짐에 따라 급격하게 떨어지는 것을 보여주었다. 또한 영상에서도 많은 차이를 보였다(그림 6). 조준기 길이에 따른 민감도의 변화는 그림 7처럼 나타나는 것을 볼 수 있었다. 공간분해능에 대한 FWHM과 FWTM은 0.1cm 일 때 44.37mm, 80.89mm이었으며, 20 cm 일 때 4.73 mm, 8.62 mm이었다(표 4). 그리고 MTF는 그림 8에서 볼 수 있듯이 길이가 길수록 좋은 것으로 나타났다.

표 4. 조준기 길이에 따른 민감도와 공간분해능
 Table 4. Sensitivity and spatial resolution for various collimator hole length

Hole Length(cm)	Sensitivity(%)	FWHM(mm)	FWTM(mm)
0.1	61.09	44.37	80.89
0.5	6.12	16.88	30.76
2	0.40	6.85	12.48
3.5	0.13	5.48	9.98
10	0.02	4.82	8.79
20	0.00	4.73	8.62

고찰

핵의학에서 사용되는 영상기기는 일반적으로 민감도와 공간분해능으로 성능이 평가된다. 핵의학 영상기에서 민감도와 공간분해능에 영향을 미치는 요소들중 가장 대표적인 것은 섬광체와 조준기이다. 섬광체는 두께가 두꺼워질수록 민감도는 좋아지는 반면에 섬광체내 콤프턴 산란과 같은 많은 상호작용들이 일어나기 때문에 공간분해능은 떨어지게 된다. 조준기는 사용하는 목적에 따라서 평행구멍, 확산형(diversing), 집속형(converging) 조준기 등으로 구분되고, 더 자세히 들어가면 에너지에 따라 고에너지용, 중간에너지용, 그리고 저에너지용으로 구분될 수 있고, 더 자세히 구분하면 민감도용, 분해능용 등으로 구분할 수 있다. 이렇게 다양한 조준기들 중에서 일반적으로 사용되는 평행구멍조준기에 대해서 연구하였다. 조준기는 조준기의 구멍모양에 따라서 즉, 원모양, 사각모양, 육각모양 등에 따라서 민감도나 공간분해능이 달라진다. 또한, 조준기 벽두께, 조준기 벽길이에 대해서도 민감도와 공간분해능이 영향을 받는다. 이러한

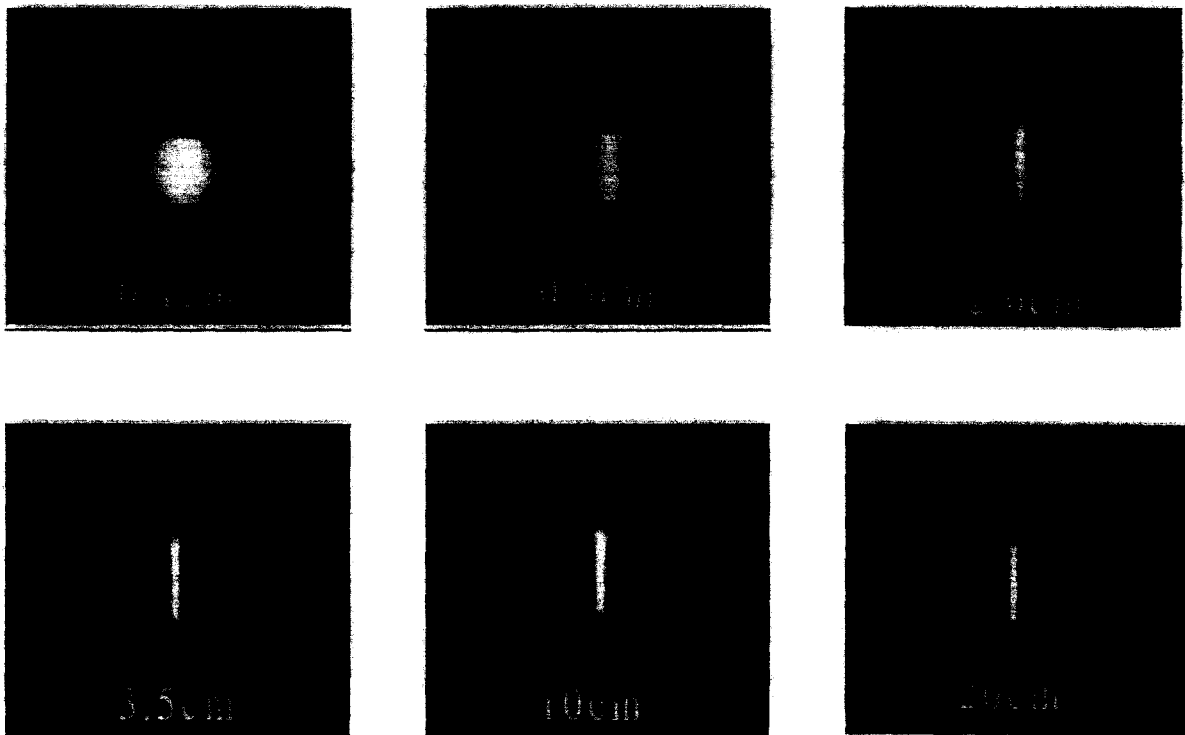


그림 6. 조준기 길이에 따른 영상질의 변화
 Fig. 6. Effects of collimator hole length on image quality

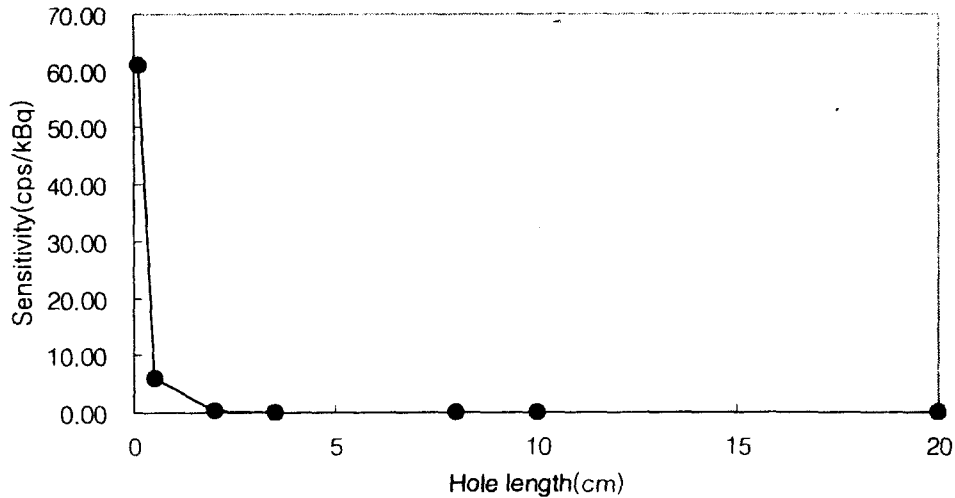


그림 7. 조준기 길이에 따른 민감도의 변화
 Fig. 7. Effects of hole length on sensitivity

섬광체와 조준기의 변수에 대한 결정은 에너지에 따라 또는 사용하는 목적에 따라 결정이 된다.

본 연구에서는 영상용 감마프로브의 섬광체와 조준기 변수들이 민감도와 공간분해능에 미치는 영향을 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 알아보았다. 섬광체 두께에 따른 민감도 변화는 섬광체 두께가 약 1 cm 이상부터 일정하게 되는 것을 볼 수 있

었는데, 감마프로브의 민감도를 결정하는 섬광체의 두께 결정시 1 cm이하에서 고려하는 것이 좋을 것으로 생각되었다. 섬광체 두께에 따른 공간분해능에 대한 고려는 본 연구에서 사용된 몬테카를로 코드가 고유분해능에 대해서 미리 결정을 해주어야 하기때문에 본 연구에서는 계산할 수 없었다. 조준기 벽두께에 대해서 두께가 두꺼워짐에 따라 공간분해능이 좋아지고 얇아질수

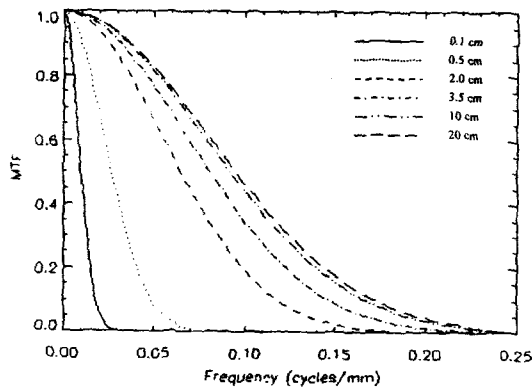


그림 8. 다양한 구멍길이에 따른 MTF
Fig. 8. MTFs for various hole length

록 민감도가 좋아지기 때문에 감마프로브를 위한 최적 조건을 정하기 어렵다. 또한 조준기 길이에 대해서 0.1 cm이 가장 높은 민감도를 표 4와 그림 6에서 보여주고 있지만, 거의 모든 방사선이 투과되는 것을 그림 7에서 볼 수 있었다. 방사선 투과정도가 2.0 cm까지 너무 높아 공간분해능이 나쁜 것을 그림 6과 표 4에서 볼 수 있었다. 그리고 10 cm이상은 공간분해능은 아주 우수하지만, 민감도가 너무 낮은 것을 볼 수 있었다. 그러나, 3.5 cm에 가까운 조준기 길이를 조준기 길이를 선택한다면 감마프로브를 최적화시키는데 도움을 줄 것이라고 생각되어진다. 그리고 조준기 두께와 길이를 선택하는데 있어서 실험목적에 따라 민감도를 우선시 할 것인지 공간분해능을 우선시할 것인지 신중한 고려가 필요할 것으로 생각된다. 조준기 구멍모양에 대한 기하학적 효과만을 고려하기 위해서 조준기 효율을 같게하고 그리고 조준기 벽에 충돌하는 방사선은 모두 흡수된다고 가정하여 시뮬레이션을 하였다. 140 keV 에너지를 이용하여 계산한 조준기 구멍모양은 육각모양의 구멍을 가진 조준기가 기하학적 인자만을 고려시 육각모양이 우수한 것으로 나타났다. 그러나, 민감도를 고려하는 실험에서는 기하학적 효율이 좋은 조준기 구멍모양을 선택해야할 것이다.

결 론

본 연구에서 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 예상한 감마 프로브 영상질에 미치는 섬광체와 조준기 변수들의 영향은 다음과 같다.

1. 섬광체의 두께가 두꺼워질수록 민감도는 증가하지만, 섬광체내 광자들이 상호작용을 하는 두께의 한계치를 넘어가면 민감도는 일정해지는 것을 볼 수 있었다.
2. 조준기의 구멍 모양, 즉, 원형, 사각, 그리고 육각 구멍모양에 따라서 조준기 효율을 거의 같게 하였을 때, 육각 모양의 조준기 구멍이 공간분해능이 우수한 것으로 나타났다.
3. 조준기 벽두께와 벽길이에 따라서, 민감도는 조준기벽이

두꺼워질수록, 벽길이가 길어질수록 감소하는 반면에 공간분해능은 좋아지는 것으로 나타났고, 3.5 cm에 가까운 조준기 길이가 적당한 것을 볼 수 있었다.

위의 결론을 바탕으로, 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 섬광체와 조준기 변수들의 최적화는 우수한 영상용 감마프로브를 개발하는데 유용할 것이다.

요 약

영상용 감마프로브의 검출기부분중 섬광체와 조준기가 민감도와 공간분해능에 미치는 영향을 시뮬레이션을 이용하여 분석하였다. 시뮬레이션은 섬광체 두께, 다양한 조준기 구멍모양, 조준기 벽두께, 조준기 길이에 대해서 이루어졌다. 섬광체와 조준기 변수들에 대한 시뮬레이션에서, 섬광체의 두께가 두꺼워질수록 민감도는 좋아지지만, 1cm이상에서는 일정하게 되었다. 조준기에 대해서, 조준기 구멍에 대한 시뮬레이션의 결과는 육각모양의 구멍을 가진 조준기가 공간분해능이 우수한 것으로 나타났으며, 조준기 벽두께와 벽길이가 증가할수록 공간분해능은 좋아지지만 민감도는 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 결론적으로, 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 섬광체와 조준기 변수들의 최적화는 우수한 영상용 감마프로브를 개발하는데 유용할 것이다.

참 고 문 헌

1. Glenn F.Knoll. *Radiation detection and measurment*. 2d ed. John Whiely & Sons, New York. pp. 215-250, 1989.
2. Sorenson JA, Phelps ME. *Physics in nuclear medicine*. 2d ed, Orlando, pp.298-317, 1987.
3. Martin P. Sandler, R. Edward Coleman, Frans J. TH. Wackers, James A. Patton, Alexander Gottschalk, Paul B. Hoffer, *Diagnostic nuclear medicine*. 3rd ed, Williams & Wilkins, pp.67-79, 1996
4. Charles E Metz, Frank B Atkins, Robert N Beck, "The geometric transfer function component for scintillation camera collimators with straight parallel holes", *Phys. Med. Biol.*, Vol 25, pp.1059-1070, 1980.
5. G. Muehlehner, J. Dudek, "Influence of hole shape on collimator performance", *Phys. Med. Biol.*, Vol. 21, pp.242-250, 1976
6. Michael Ljungberg, Sven-Erik Strand, "A Monte carlo program for the simulation of scintillation camera characteristics", *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, Vol. 29, pp.257-272, 1989.
7. Paul H. Murphy, John A. Burdine, "Imaging characteristics of a new low-energy diverging/converging collimator", *Radiology*, Vol. 107, pp.698-700, 1973.