

배열형 섬광결정을 이용한 소형 감마카메라의 평행구멍형 조준기 최적화 연구

*연세대학교 보건과학대학 방사선학과, †보건과학연구소

정용현*[†] · 백철하*[†] · 이승재*[†] · 박진형*

이 연구의 목적은 몬테칼로 모사방법을 이용하여 배열형 CsI 섬광결정을 가진 소형 감마카메라의 평행구멍형 조준기를 최적화하고 조준기 부착시 발생할 수 있는 결합오차가 영상의 질에 미치는 영향을 평가하는 것이다. GATE 코드를 이용하여 육각형과 사각형 평행구멍형 조준기의 구멍크기에 따른 Tc-99m 점선원 영상의 민감도 및 공간분해능을 측정하고 최적화된 조준기를 바탕으로 조준기와 섬광체 사이에 2 mm 이내의 미세한 틈이 있을 경우에 대한 평판선원의 영상 균일도를 측정하였다. 동일 구멍크기에 대해 사각구멍형 조준기가 육각구멍형 조준기에 비해 민감도가 우수한 결과를 보였으며, 섬광결정과 사각구멍조준기의 크기를 1 대 4로 일치시켰을 때, 선원의 거리에 따른 공간분해능의 변화가 가장 적은 것을 알 수 있었다. 조준기와 검출기의 결합면 평행오차는 영상의 균일도와 민감도 모두를 선형적으로 감소시키는 경향을 보였다. 이 연구 결과는 배열형 섬광결정과 단일 섬광결정에 대해 조준기의 성능차이를 보이고, 영상의 균일도 및 민감도 저하의 원인이 조준기의 결합오차에서 기인할 수 있음을 증명함으로써, 핵의학 영상 화질 개선을 위한 새로운 접근법을 제시한다.

중심단어: GATE, 배열형 섬광결정, 민감도, 분해능, 균일도

서 론

감마카메라와 단일광자방출단층촬영기(Single Photon Emission Computed Tomography, SPECT)는 감마선을 방출하는 방사성동위원소를 사용하여 생체의 생물학적 정보를 포함한 기능 영상을 제공한다. 현재 감마카메라 및 SPECT는 유전자 변환수준 및 발현 정도, 종양의 발생 및 치료에 대한 정량적인 정보를 비침습적으로 획득할 수 있는 장점이 있어 여러 분야에서 실험 쥐와 같은 소동물들을 영상화하는 데 응용되고 있다. 소동물 영상을 획득하는데 현재 임상용으로 사용하는 감마카메라를 사용하면 넓은 실험공간과 많은 실험 비용이 필요하며, 충분한 민감도와 공간분해능을 획득할 수 없는 단점이 있다. 그러므로 고민감도와 고분해능

을 가진 소동물 전용 시스템의 개발이 필요하고, 많은 연구 그룹에서 이러한 소동물 기기 개발 연구를 활발히 진행하고 있다.¹⁾

작은 촬영시야(Field of view, FOV) 내에서 고분해능을 얻으려면, $2 \times 2 \text{ mm}^2$ 이내의 입사면적을 가진 섬광결정을 2차원으로 배열하고, 위치민감형 광증배관(Position sensitive photomultiplier, PSPMT)과 결합한 형태의 영상검출기를 사용하는 것이 효과적이다. 그러나 검출기의 성능이 우수해도 단일감마 영상에서는 공간분해능과 민감도가 조준기에 의해 크게 좌우된다. 초고분해능을 위한 바늘구멍조준기의 최적화 연구는 이미 많은 연구 그룹에서 진행되었으나,²⁻¹⁰⁾ 범용으로 사용할 수 있는 평행구멍형 조준기의 최적화 연구는 아직 미흡한 상태이다. 임상용으로 사용되는 큰 FOV의 감마카메라는 일반적으로 단일의 블록형 섬광결정과 육각기둥형태의 평행구멍형 조준기를 사용하는데, 이러한 검출기는 배열형 섬광결정을 사용하지 않기 때문에 조준기의 구멍 형태나 결합시의 위치오차가 공간분해능 성능에 큰 영향을 미치지 않는다. 하지만, 배열형 섬광결정 검출기의 경우, 섬광결정이 사각기둥형태를 하고 있기 때문에, 조준기의 구멍 형태가 육각형일 경우, 섬광배열의 격벽과 조준기의 격벽 위치가 일치하지 않아 조준기의 격벽이 섬광배

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국과학재단의 원자력기반확충사업으로 지원받았음(연구과제 관리코드: M2AB06-2008-03790).

이 논문은 2008년 9월 24일 접수하여 2008년 12월 15일 채택되었음.
 책임저자 : 정용현, (220-710) 강원도 원주시 흥업면 매지리 234번지 연세대학교 보건과학대학 방사선학과
 Tel: 033)760-2477, Fax: 033)760-2815
 E-mail: ychung@yonsei.ac.kr

열의 입사면을 차폐하게 되고 이는 공간분해능 및 민감도를 저하시키는 요인이 된다. 또한, 형태를 일치시킨 섬광배열과 조준기를 사용하더라도 결합시 위치가 정확히 일치하지 않으면 공간분해능 및 민감도가 저하되게 된다. 섬광배열과 조준기의 X-Y 평면상의 위치 오차에 대한 영향 및 개선 방법은 연구된 바 있으나,¹¹⁾ Z축 방향의 결합 오차에 대한 영향은 아직 연구되지 않았다.

이 연구의 목적은 배열형 CsI 섬광결정을 이용한 소동물용 감마카메라 시스템의 공간분해능 향상을 위한 최적의 조준기 파라미터를 몬테카를로 시뮬레이션으로 도출하는 것이다. 연구 목적을 달성하기 위해 GATE 코드¹²⁻¹⁴⁾ (geant4 application for tomographic emission)를 이용하여 배열형 섬광결정에 적합한 평행구멍조준기의 형태 및 크기를 결정하고, 결정한 파라미터를 기반으로 모사한 검출기의 성능평가를 수행하였다. 또한 조준기를 감마카메라에 결합시 발생할 수 있는 미세한 위치오차가 영상의 균일도에 미치는 영향을 분석하였다.

대상 및 방법

1. 배열형 섬광결정 설계

일반적으로 소형 감마카메라 시스템은 배열형 섬광결정과 위치민감형 광전자증배관으로 구성된 검출기가 평행구멍형 조준기와 결합된 구조이다. Fig. 1은 소형 감마카메라 검출기의 기본적인 설계구조로 단일형 및 배열형 섬광결정을 사용했을 경우 섬광결정 구조가 분해능에 미치는 차이를 보여 준다. 공간분해능은 섬광결정의 두께가 얇을수록

향상되지만 민감도가 저하되므로, 입사면적이 작고 두꺼운 섬광결정을 배열형으로 구성함으로써 고분해능과 고민감도를 동시에 얻을 수 있다. 본 연구에서는 140 keV의 에너지를 갖는 Tc-99m을 이용한 감마영상에 적합하도록 검출 효율이 좋은 CsI (TI)을 섬광결정으로 선택하였고, 픽셀크기 1.6×1.6×4.0 mm, 픽셀간 간격 1.8 mm, 격벽두께 0.2 mm의 섬광결정을 29×29로 배열한 전체 크기 52.2×52.2×4.0 mm의 검출기를 설계하였다.

2. 조준기 설계

배열형 섬광결정 감마카메라에 적합한 조준기 파라미터를 결정하기 위해 GATE (Geant4 Application for Tomographic Emission) 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용한 선원의 방사능은 18.5 MBq이고, 선원의 직경은 0.1 mm로 설정하였다. Tc-99m 점선원을 검출기의 중심축 상에서 조준기로부터 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 cm 떨어진 곳에 위치시켜 영상을 획득하고 민감도와 공간분해능을 측정하였다. 평행구멍조준기의 재질은 텅스텐으로 하였다. 민감도는 선원의 방사능 대 측정된 광자수의 비로 정의하였고, 공간분해능은 점선원 영상의 점확산분포를 가우시안 함수를 이용하여 측정된 반치폭(full width at half maximum, FWHM)으로 정의하였다.

평행구멍조준기의 구멍 형태, 구멍 크기, 조준기 높이, 격벽두께는 영상의 질을 결정하는 중요한 파라미터이다.^{15,16)} 조준기의 구멍 형태와 크기가 민감도와 공간분해능에 미치는 영향을 고찰하기 위해, 조준기 높이는 모두 24.0 mm, 격벽 두께는 모두 0.2 mm로 고정시키고, 구멍 형태 및

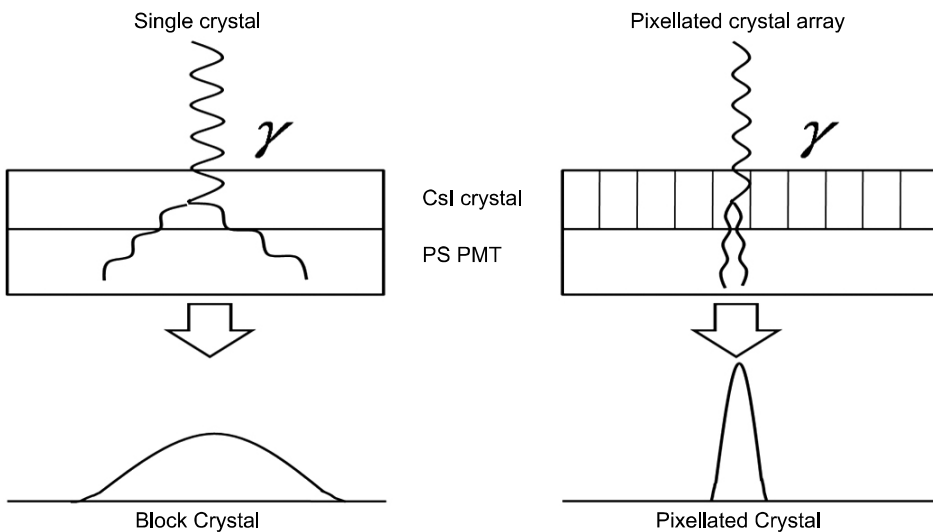


Fig. 1. Schematic diagram of small gamma camera consisting of single crystal and pixellated crystal array.

크기는 일반적으로 사용되는 반지름 1.3 mm의 육각형, 고분해능을 위한 반지름 0.65 mm의 육각형, 섬광결정과 조준기 구멍을 1 대 1 및 1 대 4로 일치시키기 위한 한 변의 길이가 1.6 mm와 0.7 mm인 정사각형, 총 네 가지 형태의 평행구멍형 조준기를 설계하였다. Table 1은 GATE 코드를 이용하여 설계한 평행구멍형 조준기의 설계변수들이다. 네 가지 형태의 조준기를 전체 크기 52.2×52.2×4.0 mm의 배열형 CsI (TI) 검출기에 결합시켜 점선원 영상 획득 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 2는 GATE로 모사한 네 종류의 조준기를 보여준다.

3. 조준기와 검출기 결합오차가 영상의 질에 미치는 영향

감마카메라를 이용한 영상획득 실험시 영상화하고자 하는 대상 또는 민감도나 공간분해능의 최적 세팅을 위해 다양한 종류의 조준기를 교환하여 사용하는 경우가 많다. 임상용 감마카메라의 경우, 검출기 헤드부와 조준기는 자동 또는 수동으로 고정 조임새를 통해 고정하지만, 소형 감마

카메라는 FOV 외곽에 여러 개의 나사를 이용하여 고정하는 경우가 일반적이다. 이와 같이 수동으로 나사 조임을 통해 검출기와 조준기를 결합할 경우, Fig. 3과 같이 검출기의 평면과 조준기의 평면이 평행하게 고정되지 않는 문제가 발생할 수 있으며 이는 영상의 질 저하를 가져오는 결과를 나타낼 수 있다.

GATE 시뮬레이션을 통하여 조준기와 검출기가 평행하지 않게 결합되어 한쪽 면에 미세한 틈이 생긴 경우, 이러한 결합오차가 영상의 질에 미치는 영향을 균일도 측면에서 분석하였다.

검출기 면과 조준기 면이 평행하게 결합되었을 때와 0.2°, 0.5°, 1°, 2°의 각을 이루는 경우에 대해, 선원의 방사능이 50 MBq이고, 반지름이 40 mm인 Tc-99m 평판형 선원을 조준기로부터 15 mm 거리에 위치시키고 평면 영상을 획득하였다.

균일도를 측정하기 위해 평판선원 영상의 중심부분 64×64 영역을 관심영역(Region of interest, ROI)으로 설정하였다. NEMA 프로토콜의 적분 균일도 측정 방법을 적용하여 [(1 2 1), (2 4 2), (1 2 1)]의 3×3 필터함수를 이용한 컨벌루션 계산 방법으로 영상의 평탄화(smoothing)를 수행하였고, ROI 내의 최대 화소값과 최소 화소값을 선택한 뒤 불균일도를 아래의 식 1을 통하여 계산하였다.

$$Non-Uniformity = 100 \times \frac{Max - Min}{Max + Min} \tag{1}$$

Table 1. Design parameters of parallel-hole collimators.

	Hole type	Hole size
Square hole	1 to 1	1.6×1.6×24.0 mm septa 0.2 mm, pitch 1.8 mm
	1 to 4	0.7×0.7×24.0 mm septa 0.2 mm, pitch 0.9 mm
Hexagonal hole	0.65 mm	반지름 0.65 mm, 높이 24.0 mm septa 0.2 mm, pitch 1.5 mm
	1.3 mm	반지름 1.3 mm, 높이 24.0 mm septa 0.2 mm, pitch 2.8 mm

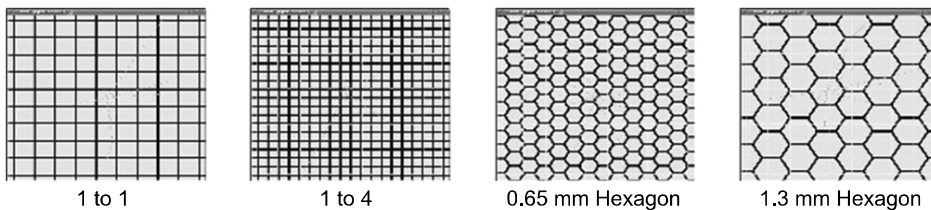


Fig. 2. Simulated geometry of 4 type collimators using GATE.

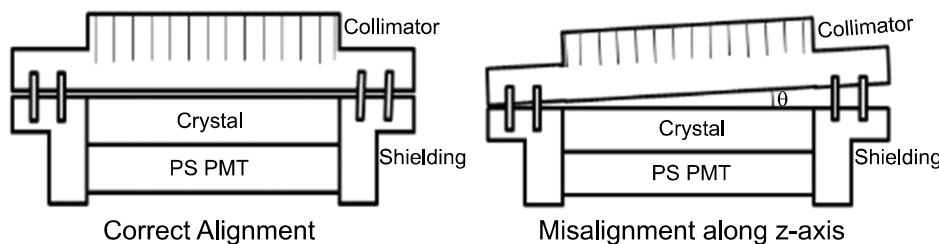


Fig. 3. Schematic diagram of crystal-collimator alignment (left) and misalignment (right) along the Z-axis.

결 과

1. 조준기 설계

반지름이 0.65 mm와 1.3 mm인 육각형 평행구멍조준기와 섬광결정 픽셀과 1 대 1, 1 대 4로 일치시킨 사각형 평행구멍조준기에 대한 감마카메라의 공간분해능과 민감도의 GATE 시뮬레이션 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 선원이 조준기로부터 멀어짐에 따라 공간분해능은 저하되고 민감도는 유지되는 평행구멍형 조준기의 일반적인 특징이 잘 나타나 있고, 동일 구멍 형태를 가지면 구멍크기가 커질수록 공간분해능은 저하되나 민감도는 향상되는 결과를 보였다. 동일 구멍크기를 가지면(반지름 0.65 mm 육각

형과 1 대 1 일치형 사각형) 사각형 구멍모양이 육각형 구멍모양에 비해 민감도는 향상되었으나, 공간분해능은 가까운 거리에서는 저하되고, 4 cm 이상의 거리에 대해서는 거의 비슷한 결과를 보였다. 사각형 구멍모양의 일치형 조준기를 사용하면 육각구멍에 비해 거리에 따른 공간분해능의 저하 정도가 적은 것으로 나타났다. 특히, 1 대 4 일치형 사각구멍 조준기의 경우 선원-조준기간 거리에 따라 공간분해능의 편차가 매우 적어 네 가지 조준기 중 가장 우수한 공간분해능 특성을 나타내었다. Fig. 6은 선원-조준기간 거리 5 mm 에서 네 가지 조준기를 이용하여 획득한 각각의 점선원 영상을 보여준다.

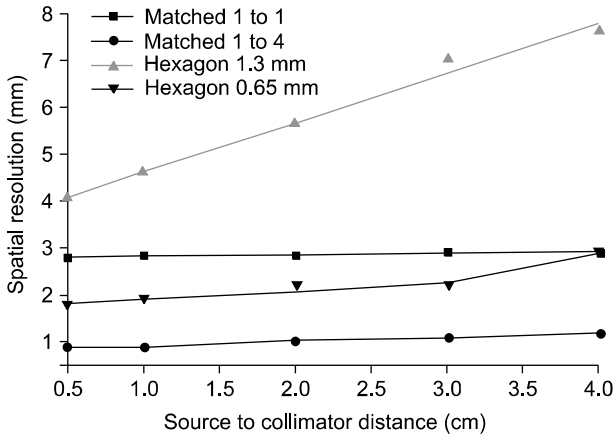


Fig. 4. Simulated spatial resolution as a function of distance between source and detector for 4 type collimators.

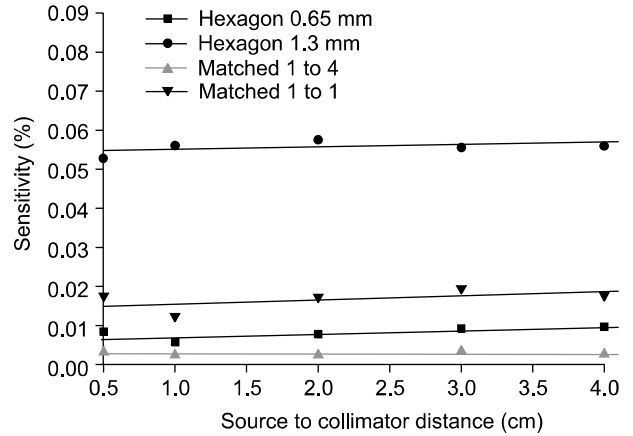


Fig. 5. Simulated sensitivity as a function of distance between source and detector for 4 type collimators.

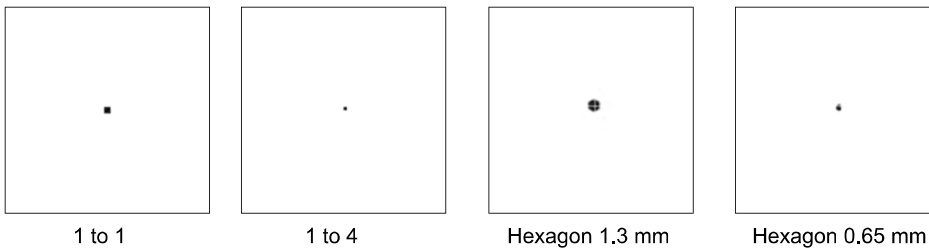


Fig. 6. Point source images with distance between source and detector of 5 mm (from left to right, the types of collimator: 1to1, 1to4, 0.65 mm Hexa, 1.3 mm Hexa) by GATE simulation.

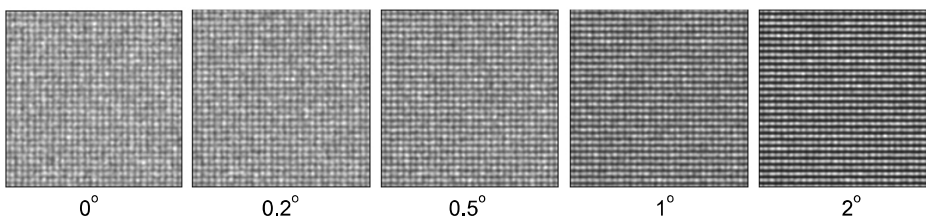


Fig. 7. Flood images after smoothing for uniformity calculation (from left to right, misalignment angle: 0°, 0.2°, 0.5°, 1°, 2°) by GATE simulation.

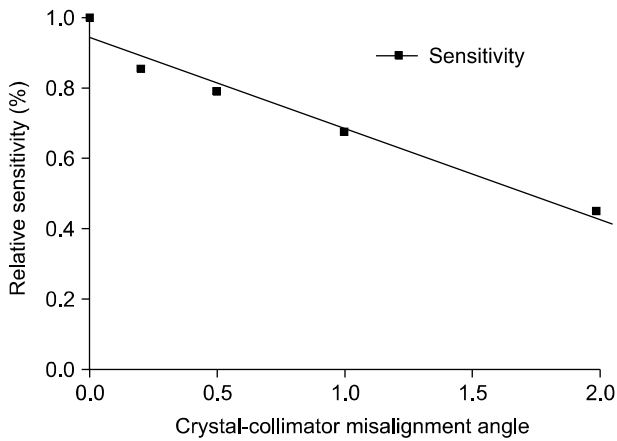


Fig. 8. Simulated relative sensitivity as a function of crystal-collimator alignment angle.

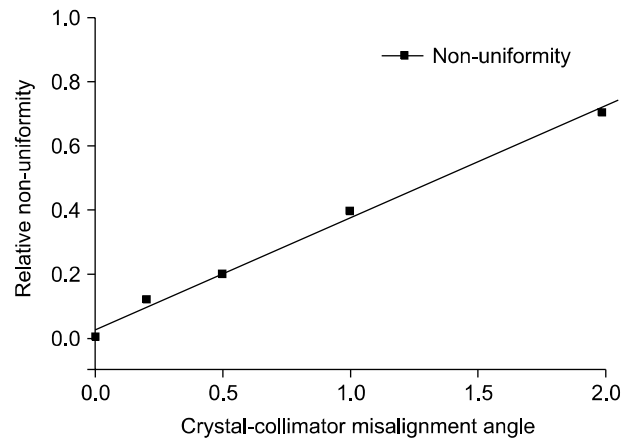


Fig. 9. Simulated relative non-uniformity of as a function of crystal-collimator alignment angle.

2. 조준기와 검출기 결합오차가 영상의 질에 미치는 영향

Fig. 7은 1 대 4 일치형 사각구멍 조준기와 검출기를 결합하였을 때, Z축 방향의 결합오차에 따라 획득한 평판선원의 영상을 보여준다. 조준기와 검출기가 평행하게 결합되었을 때에는 조준기의 패턴이 매우 균일하게 보이지만, 두 평면 사이에 각도가 발생할 경우 조준기가 기울어진 방향으로 섬광체의 불음 면적이 점차 넓어지는 것을 볼 수 있고, 각도에 따라 균일도 및 민감도가 저하됨을 알 수 있다. Fig. 8은 조준기와 검출기 사이에 결합오차가 있을 경우의 상대적 민감도를 나타낸 도표이다. 민감도는 조준기와 검출기 사이의 각도가 0°, 0.2°, 0.5°, 1°, 2°일 때, 가장 민감도가 높은 0°일 때의 값을 1로 정규화하였을 때, 각각 1, 0.85, 0.79, 0.67, 0.44로 측정되었다. Fig. 9는 평판선원의 영상으로부터 측정된 상대적 불균일도를 조준기와 검출기 사이의 각도에 따라 그린 도표이다. 불균일도는 가장 불균일도가 낮은 0°일 때의 값을 0으로 정규화하였을 때, 어긋난 각도 0°, 0.2°, 0.5°, 1°, 2°에 대해 각각 0, 0.12, 0.19, 0.39, 0.70으로 측정되었다.

고찰 및 결론

본 연구의 목적은 배열형 섬광결정을 이용한 소형 감마 카메라의 평행구멍형조준기의 구멍형태 및 섬광결정과 조준기의 결합정확도에 따른 시스템 민감도와 공간분해능, 영상의 균일도를 몬테카를로 시뮬레이션으로 도출하는 것이다. 파라미터 결정 및 성능 평가를 위해 Geant4 기반의

시뮬레이션 코드인 GATE를 사용하였다.

일반적으로 검출기에 배열형 섬광결정을 사용하면 고분해능 영상을 얻을 수 있으나, 배열형 섬광결정의 픽셀 형태가 사각형이기 때문에 기존의 육각구멍 조준기와 형태가 일치하지 않아 민감도뿐만 아니라 공간분해능에도 저하가 생긴다. 평행구멍형 조준기의 경우 구멍 형태, 구멍 크기, 구멍 높이, 격벽 두께가 시스템의 성능에 영향을 끼치며, 이러한 변수는 시스템의 사용목적이나 검출하려는 대상 및 방사선의 에너지에 따라 정해진다. 이 연구에서는 단일 에너지에 대한 고분해능 영상을 목적으로 하는 시스템을 고려하여, 구멍 높이와 격벽 두께는 고정하고, 구멍 형태와 높이의 영향을 조준기 파라미터로 결정하였다. 배열형 섬광결정을 이용한 소형 감마카메라의 성능평가 결과, 육각구멍 조준기에 비해 사각구멍 조준기로 섬광결정 형태와 조준기 형태를 일치시켰을 때, 민감도가 향상되는 것을 알 수 있었으며, 섬광결정 한 픽셀과 조준기 구멍 4픽셀을 일치시켰을 때 가장 우수한 공간분해능을 얻을 수 있었고, 특히 선원의 거리가 멀어짐에 따른 공간분해능 저하 현상이 현저히 줄어드는 결과를 얻었다. Fig. 6과 같이 일치형 조준기의 경우 점선원의 영상이 섬광 픽셀의 형태에 대응하여 획득되지만, 육각구멍형 조준기의 경우 섬광 픽셀과 조준기 구멍이 일치하지 않아 여러 섬광 픽셀에서 반응이 발생하여 영상이 다소 퍼져 보이는 결과를 보인다.

배열형 섬광결정과 일치형 조준기를 이용하는 경우, 검출기와 조준기를 결합할 때 X-Y-Z 축 방향 모두에서 결합오차가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 그 중 Z 축 방향의 오차 즉, 검출기와 조준기 사이의 미세한 사이각 발생에 따

른 영상의 질을 영상의 균일도와 민감도 측면에서 평가하였다. 결합각도의 오차가 커질수록 조준기 격벽이 두꺼워지는 것과 같은 효과를 주기 때문에 기울어진 방향으로 섬광결정의 불응면적이 커지고, 결과적으로 영상에 선형 패턴이 두껍게 나타나게 된다. 결합오차 각도에 따른 민감도와 균일도 저하 정도는 모두 선형적인 관계를 보였으며, 2° 정도의 결합오차에 의해서도 평판영상의 균일도와 민감도가 각각 45%와 70% 저하됨을 알 수 있었다. 일반적으로 균일도 및 민감도의 저하는 에너지창 설정오차 또는 광증배관의 응답특성 불균일도에 의한 영향으로 평가해 왔으나, 이 결과를 통해 조준기의 결합오차도 무시하지 못할 변수라는 것을 알 수 있었다.

소형 감마카메라는 마우스나 랫의 심장 또는 뇌 등 소동물 연구와 갑상선 및 유방촬영 등에 유용성이 있고, SPECT 시스템으로 적용이 가능하다. 시뮬레이션 결과 배열형 섬광결정을 이용한 감마카메라와 형태 일치형 사각형 평행구멍조준기를 사용하면 고분해능과 고민감도를 동시에 획득할 수 있어 활용도가 매우 높을 것으로 예상된다. 또한, 실험동물영상뿐 아니라 임상에서 영상화질이 저하되었을 경우, 조준기와 검출기 사이의 결합정확도를 의심해 봄으로써, 영상촬영 조건 및 영상화질 개선에 새로운 해결책을 제시할 수 있으리라 판단된다. 현재 시뮬레이션으로 도출한 파라미터를 사용해 소형 감마카메라 시스템을 구축하기 위한 섬광결정과 조준기를 제작 중이며, 시스템 구축 후에는 소동물 핵의학 영상 획득에 이용할 계획이다.

참 고 문 헌

1. 정용현, 송태용, 최 용: 분자영상 획득을 위한 핵의학 영상기. 핵의학과 분자영상 38:2:131-139 (2004)
2. Strand SE, Ivanovic M, Erlandsson K, et al: Small animal imaging with pinhole single photon emission computed tomography. Cancer 73:981-984 (1994)
3. Weber DA, Ivanovic M, Franceschi D, et al: Pinhole SPECT: An approach to in vivo high resolution SPECT imaging in small laboratory animals. J Nucl Medicine 35:342-348 (1994)
4. Ogawa K, Kawade T, Nakamura K, Kubo A, Ichihara T: Ultra high resolution pinhole SPECT for small animal study, IEEE. Trans Nucl Sci 45:3122-3126 (1998)
5. Hirai T, Nohara R, Hosokawa R, et al: Evaluation of myocardial infarct size in rat heart by pinhole SPECT. J Nucl Cardiology 7:107-111 (2000)
6. Weber DA, Ivanovic M: Ultra-high-resolution imaging of small animals: Implications for preclinical and research studies. J Nucl Cardiology 6:332-344 (1999)
7. Schramm N, Wirrwar A, Sonnenberg F, Halling H: Compact high resolution detector for small animal SPECT, IEEE. Trans Nucl Sci 47:1163-1167 (2000)
8. Wu MC, Tang HR, Gao DW, et al: ECG-gated pinhole SPECT in mice with millimeter spatial resolution, IEEE. Trans Nucl Sci 47:1218-1221 (2000).
9. Weber DA, Ivanovic M: Pinhole SPECT: Ultra-high resolution imaging for small animal studies [Editorial]. J Nucl Medicine 36:2287-2289 (1995)
10. Song TY, Choi Y, Chung YH, et al: Optimization of pinhole collimator for small animal SPECT using Monte Carlo simulation. IEEE. Trans Nucl Sci 50:327-332 (2003)
11. Raghunathan P, Goodale PJ, Klinger J, et al: collimators for pixellated gamma camera, IEEE NSS and MIC 07:104 (2005)
12. 정용현, 백철하, 이승재: 핵의학 영상연구를 위한 몬테칼로 모사코드, 핵의학과 분자영상 42:127-136 (2008)
13. Jan S, Santin G, Strul D, et al: GATE: a simulation toolkit for PET and SPECT, Phys Med Biol 49:4543-4561 (2004)
14. Staelens S, Strul D, Santin G, et al: Monte Carlo simulations of a scintillation camera using GATE: validation and application modelling. Phys Med Biol 48:3021-3042 (2003)
15. 정진호, 최 용, 송태용, 정용현: 소동물 Iodine-125 SPECT 개발을 위한 컴퓨터 시뮬레이션. 대한핵의학 38:75 (2004)
16. Bong JK, Kim HJ, Lee JD, Kwon SI. Computer Simulation for Effects of Scintillator and Parallel Hole Collimator on Gamma Probe Imaging. Journal of Korea Society of Medical Biological Engineering 19:563-570 (1998)

Optimization of Parallel-Hole Collimator for Small Gamma Camera Based on Pixellated Crystal Array

Yong Hyun Chung^{*†}, Cheol-Ha Beak^{*†}, Seung-Jae Lee^{*†}, Jin Hyung Park^{*}

^{*}Department of Radiological Science, Yonsei University College of Health Science,

[†]Institute of Health Science, Yonsei University, Wonju, Korea

The purpose of this study is to optimize a parallel-hole collimator for small gamma camera having the pixellated crystal array and evaluate the effect of crystal-collimator misalignment on the image quality using a simulation tool GATE (Geant4 Application for Tomographic Emission). The spatial resolution and sensitivity were measured for the various size of hexagonal-hole and matched square-hole collimators with a Tc-99m point source and the uniformity of flood image was estimated as a function of the angle between crystal array and collimator by misalignment. The results showed that the spatial resolution and sensitivity were greatly improved by using the matched collimator and the uniformity was reduced by crystal-collimator misalignment.

Key Words: Matched collimator, Pixellated crystal array, Spatial resolution, Sensitivity, Uniformity