

# Geant4 몬테칼로 전산모사 툴킷을 이용한 이중모드 컴프턴 카메라 최적화 설계 및 성능평가

박진형\*, 서희†, 김성훈‡, 김영수\*, 김찬형\*

\*한양대학교 원자력공학과, †한국원자력연구원, ‡한양대학교병원

2012년 8월 17일 접수 / 2012년 10월 5일 1차 수정 / 2012년 12월 4일 2차 수정 / 2012년 12월 5일 채택

한양대학교에서는 핵물질 탐지를 위해 고에너지 감마선원 영상화에 적합한 이중산란형 컴프턴 카메라의 원형을 개발하였다. 이중산란형 컴프턴 카메라는 높은 영상해상도를 제공하지만, 기존의 단일산란형 컴프턴 카메라보다 상대적으로 영상감도가 낮다는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 개발된 이중산란형 컴프턴 카메라에 단일산란형 컴프턴 카메라의 기능을 추가함으로써 하나의 시스템에서 두 가지 모드로 작동하는 이중모드 컴프턴 카메라(고민감도(단일산란형) 모드와 고해상도(이중산란형)모드)에 대한 개념설계와 이에 대한 최적화 설계를 수행하였다. 최적화된 시스템에서 고 민감도 모드는 고해상도 모드에 비해 전 에너지 영역에서 약 100배 정도 높은 고유영상감도를 제공하는 것으로 평가되었으며, 고해상도 모드에서 영상해상도는 기존의 이중산란형 컴프턴 카메라와 거의 같은 결과를 보여 고해상도 영상을 제공하는 것으로 나타났다.

중심어: 컴프턴 카메라, 이중모드, 핵물질 탐지, Geant4

## 1. 서론

컴프턴 카메라는 컴프턴 산란원리를 이용하여 방사선원의 3차원적 위치 분포를 영상화하는 감마선 영상장치이다. 컴프턴 카메라는 물리적 집속기를 사용하지 않기 때문에 고에너지 감마선원을 방출하는 핵종에 대한 영상화가 유리하다는 장점이 있으며 선원의 3차원적 분포를 고정된 위치에서 획득할 수 있다는 점, 선원의 에너지가 높아질수록 영상해상도가 향상되는 장점 등을 바탕으로 원자력 산업용 영상장치로서의 활용 가능성을 가지고 있다[1,2].

컴프턴 카메라는 통상적으로 2대 이상의 위치민감형 검출기(산란부+흡수부)로 구성되며 각 검출기로부터 측정된 에너지와 위치 정보를 이용하여 영상재구성에 사용되는 원뿔면(conical surface)의 꼭짓점 및 내각 그리고 축을 결정한다. 산란부 검출기의 위치분해능은 원뿔면 꼭짓점의 위치 결정에 기여하며, 원뿔면의 내각은 산란부 검출기와 흡수부 검출기의 에너지 분해능에 의존한다. 마지막으로 원뿔면의 축은 구성검출기들의 위치분해능에 의존한다. 따라서 구성 검출기들의 위치분해능 및 에너지 분해능은 컴프턴 카메라의 성능을 결정하는 주요 인자가 된다.

컴프턴 카메라는 일반적으로 두 대의 위치민감형 검출기를 각각 산란부와 흡수부로 사용하는 구조로 되어 있

다. 이러한 구조는 입사된 광자가 산란부 검출기에서 컴프턴 산란을 일으킨 후 흡수부 검출기에서 완전히 흡수된 광자를 계측하여 영상재구성에 사용하기 때문에 단일산란형 컴프턴 카메라로 분류할 수 있으며 입사된 광자를 한번 산란시키면 되기 때문에 영상감도가 높다는 장점이 있다. 그러나 산란된 광자를 흡수부 검출기의 한 픽셀 내에서 완전히 흡수시키기 위하여 흡수부 픽셀의 크기가 커질 수밖에 없다는 문제가 있다. 이는 곧 광자의 반응위치를 정확히 결정하기 어렵다는 의미이며 결과적으로 영상해상도를 저하하는 원인이 된다.

이러한 문제를 해결하기 위해 한양대학교에서는 두 대의 매우 얇은 위치민감형 검출기를 산란부로 사용하고 단결정 섬광 검출기를 흡수부로 사용하여 이중산란형 구조를 가지는 컴프턴 카메라의 원형을 개발하였다[3]. 이는 기존의 컴프턴 카메라들과는 달리 두 개의 산란부로 광자의 산란 반응위치를 정확히 결정하고 흡수부 검출기는 두 번 산란한 광자의 에너지만을 측정하게 되는 구조이다. 이중산란형 컴프턴 카메라는 구성 검출기의 위치분해능을 획기적으로 향상해 높은 영상해상도를 제공한다는 장점이 있으나 입사된 광자를 두 번 산란시켜야 하므로 영상감도가 낮다는 단점이 있다.

본 연구에서는 기존의 이중산란형 컴프턴 카메라에 영상감도가 높은 단일산란형 컴프턴 카메라 기능을 추가하고 측면흡수부 검출기를 추가로 설치함으로써 높은 영상해상도와 영상감도를 동시에 달성 가능한 이중모드 컴프턴 영상장치를 제안하고 Geant4 (version 9.3) 툴킷[4,5]을

책임저자: 김찬형, chkim@hanyang.ac.kr  
서울 성동구 행당동 17 한양대학교 원자력공학과

이용하여 기하학적 구조를 최적화하였다. 최적화된 시스템은 다양한 에너지의 감마선원을 이용해 그 성능을 평가하였다.

## 2. 재료 및 방법

본 연구에서 개발하고자 하는 이중모드 컴프턴 카메라는 하나의 시스템에서 고민감도 모드와 고해상도 모드, 이렇게 두 가지 모드로 동시에 작동하는 영상장치이다. 고민감도 모드는 단일산란형 구조로 작동하는 모드로써 중심구역을 빠르게 스캔하는데 사용되고 고해상도 모드는 이중산란형 구조로 작동하는 모드로써 스캔 된 지역을 자세히 조사하기 위해 사용된다. 이중모드 컴프턴 카메라는 기본적으로 이중산란형 컴프턴 카메라와 같은 기하학적 구조를 가진다. 다만 에너지만 결정하였던 후면 흡수부 검출기를 위치민감형 검출기로 대체함으로써 에너지 및 반응위치를 모두 결정하는 형태로 변경하였으며, 영상감도를 높이기 위해 1, 2차 산란부 검출기 사이에 4대의 측면흡수부 검출기를 추가로 설치하였다. 동작 원리를 살펴보면, (1) 고해상도 모드에서는 이중 산란 구조를 그대로 유지하게 된다. 두 개의 산란부에서 반응위치를 정확히 결정하여 높은 영상해상도를 획득하고, 흡수부에서는

에너지만 결정하게 된다(그림 1-a). (2) 고민감도 모드에서는 단일 산란 컴프턴 영상 기법을 활용하는 것이다. 즉, 광자가 각각의 산란부에서 산란할 확률이 낮기 때문에, 첫 번째 산란부에서 산란한 후 흡수부에서 흡수된 반응을 영상재구성에 활용하는 것이다(그림 1-b). 이렇게 되면, 기존의 영상감도를 기본적으로 가지게 되고, 여기에 이중산란 이벤트에 대한 영상감도 증가분이 추가되는 것이므로 영상감도에서도 기존의 컴프턴 영상장치에 비해 높은 성능을 기대할 수 있다.

컴프턴 카메라의 성능은 일반적으로 각 구성 검출기들의 기하학적 구조에 영향을 받는 특성이 있다. 따라서 새로운 검출시스템의 성능을 평가하기 이전에 검출기간 거리, 각도, 검출기 두께, 등을 변경해가면서 컴프턴 카메라의 성능을 평가해보고 최적화하는 과정이 필요하다. 이에 본 연구에서는 이중모드 컴프턴 카메라 구성 검출기의 거리를 변경해가면서 성능을 평가해보고 최적화된 구조를 결정하였다. 컴프턴 카메라의 성능평가는 영상해상도(FWHM, mm)와 영상감도(S)로 결정했으며, 이 두 가지 인자를 동시에 고려할 수 있도록 성능지수(figure-of-merit, FOM)를 도입하였다(식 1) [6].

$$FOM = \frac{S}{FWHM^3} \times 10^{11} \quad (\text{Eq. 1})$$

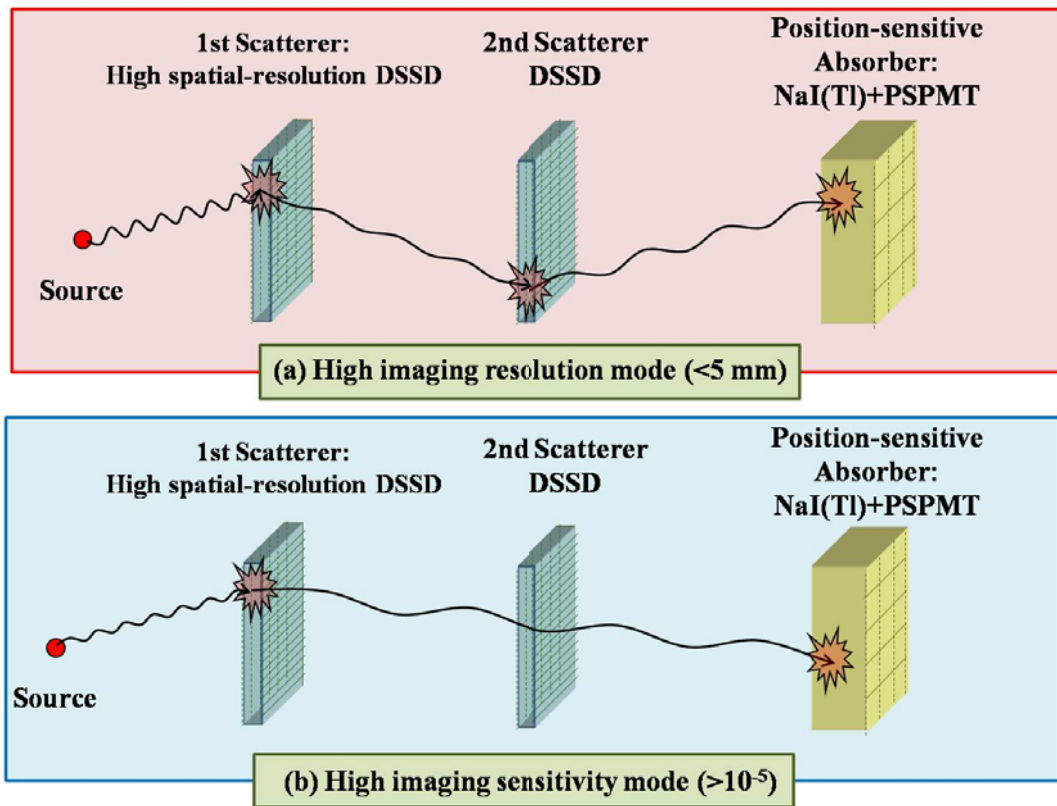


Fig 1. Basic concept of a dual-mode Compton camera which can operate two-different mode in a system. Upper image shows high-resolution mode and bottom image shows high-sensitivity mode.

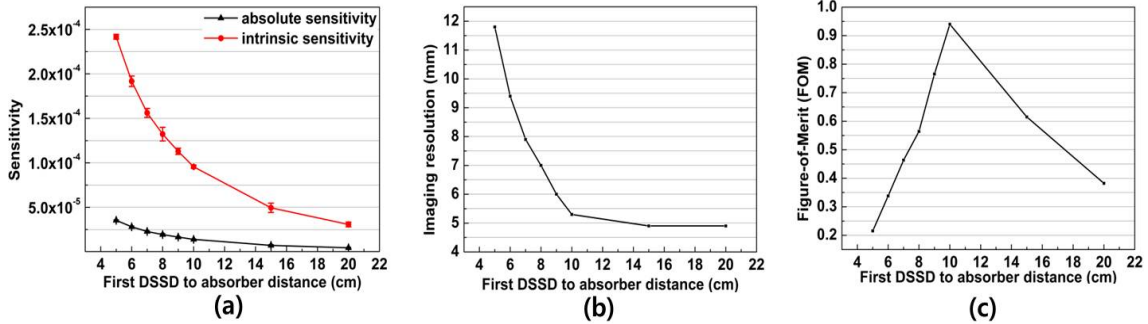


Fig 2. (a) Sensitivity, (b) imaging resolution, and (c) FOM of dual-mode Compton camera as a function of the distance between first scatter detector and absorb detector for high-sensitivity mode.

본 연구에서 컴프턴 카메라의 성능평가를 위해 GEANT4 툴킷을 사용하여 매우 사실적으로 컴프턴 카메라를 모델링 하였으며, 계산시간을 줄이기 위해 source biasing 기법을 사용하여 선원의 발생각도를 검출기가 위치되어 있는 방향으로 제한하였고 영상감도 계산 시 이를 고려해 가중치를 적용하였다. 영상재구성에는 통계적 기법의 기댓값 최대화(expectation maximization, EM) 알고리즘기를 사용하였으며, 영상해상도는 획득된 영상프로파일의 full width at half maximum (FWHM)을 이용하여 계산하였다. 최적화는 일차 산란부 검출기와 후면 흡수부 검출기 사이의 거리 최적화, 일차 산란부 검출기와 이차 산란부 검출기 사이의 거리 최적화 순으로 진행하였으며 추가로 측면흡수부 검출기가 놓이는 각도에 따른 영상감도의 변화를 평가하였다. 최종적으로 결정된 이중모드 컴프턴 영상장치의 성능을 다양한 선원에너지에 대하여 평가하였다.

### 3. 결과 및 논의

#### 3.1 고민감도 모드 검출기간 거리 최적화

이중모드 컴프턴 영상장치의 고민감도 모드는 핵물질의 존재 유무를 빠르게 스캔할 때 사용 가능하며 단일산란형 컴프턴 카메라의 구조로 작동한다. 최적화된 구조를 찾기 위해 1차 산란부 검출기와 후면 흡수부 사이의 거리를 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20 cm으로 변경하면서 전산모사를 수행하였다. 전산모사에 사용된 1차 산란부 검출기는 양면에 128개의 스트립이 입혀져 있는 양면 실리콘 검출기(사이즈: 10 cm×10 cm×0.05 cm, 위치분해능: 0.76 mm×0.76 mm×0.5 mm)를 사용하였고 후면 흡수부 검출기는 PS-PMT를 부착한 NaI(Tl) 섬광체(사이즈: 5 cm × 5 cm×3 cm, 위치분해능: 6 mm×6 mm×30 mm)를 사용하였다. 그림 2의 (a)와 (b)는 각각 검출기간 거리에 따른 영상감도와 영상해상도 결과를 보여주고 있으며 (c)는 두 인자를 모두 고려한 성능지수를 나타낸다. 검출기간 거리가 멀어짐에 따라 영상해상도는 좋아지지만, 영상감도는 감소하는 결과를 보이고 있으며, 성능지수로 평가한 결과 1차 산란부 검출기와 후면 흡수부의 거리는 대략 10 cm

정도가 가장 좋은 성능을 보임을 확인하였다.

#### 3.2 고해상도 모드 검출기간 거리 최적화

이중모드 컴프턴 영상장치의 고해상도 모드는 고민감도 모드에서 스캔된 지역에서 오염물질의 위치를 좀 더 정밀히 영상화하기 위해 사용하며 1차 산란부 검출기와 2차 산란부 검출기 그리고 후면 흡수부 검출기 모두에서 동시 반응이 있을 때 해당 이벤트를 영상재구성에 사용한다. 고해상도 모드는 영상감도에서 손해를 보더라도 매우 높은 영상해상도가 필요할 때 사용된다. 이에 영상해상도에 영향을 미치는 기하학적 인자인 1, 2차 산란부 검출기 사이의 거리를 1 cm 에서 9 cm까지 2 cm 간격으로 변경해가면서 전산모사를 수행하였다. 이때 전산모사의 효율을 높이기 위해서 흡수부 검출기는 2차 산란부 검출기 뒤 1 cm 지점에 위치시켰다. 전산모사에 사용된 검출기의 구조는 일차 산란부 검출기와 후면 흡수부 검출기는 고해상도 모드에서 사용된 것과 같고, 2차 산란부 검출기는 양면에 16개의 스트립이 입혀져 있는 양면 실리콘 검출기(사이즈: 5 cm×5 cm×0.15 cm, 위치분해능: 3 mm×3 mm×1.5 mm)를 사용하였다. 그림 3은 1차 산란부 검출기와 2차 산란부 검출기 사이의 거리에 따른 영상해상도 변화를 나타낸다. 평가결과 두 검출기간 거리가 5 cm 에서 최적의 성능을 나타내는 것으로 평가되었다.

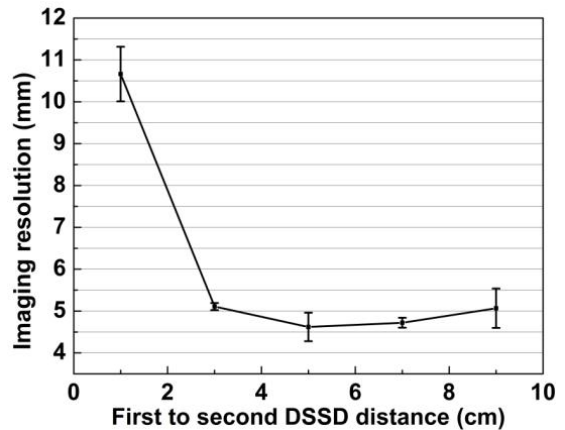


Fig 3. Imaging resolution according to the distance between first and second scatter detectors for high-resolution mode.

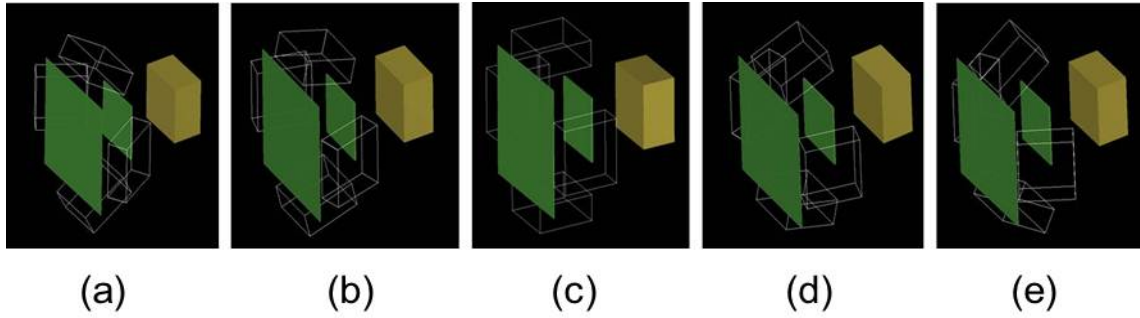


Fig 4. Geant4 simulation models for performance evaluation according to the placed angle of side absorber detectors with (a) 60, (b) 75, (c) 90, (d) 105, and (e) 120 degrees.

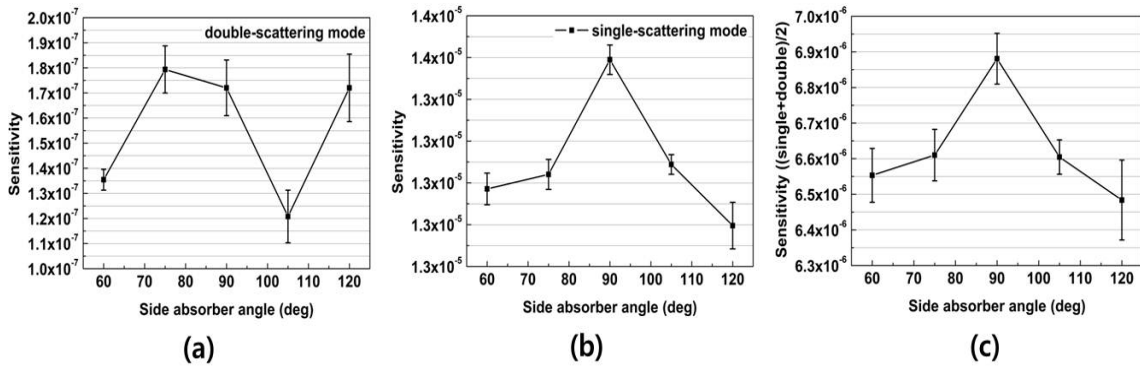


Fig 5. Sensitivity according to the placed angle of side absorber detectors, for (a) high-resolution mode, (b) high-sensitivity mode, and (c) dual-mode (i.e., high-resolution and high-sensitivity mode).

### 3.3 측면흡수부 검출기의 놓이는 각도에 따른 영상감도 평가

이중모드 컴프턴 카메라의 영상감도를 향상하기 위해 4대의 단결정 CsI(Tl) 섬광검출기를 1차 산란부 검출기와 2차 산란부 검출기 사이에 설치하였다. 섬광체의 크기는 1차 산란부 검출기와 2차 산란부 검출기 사이의 거리와 같은  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 로 결정하였고 두께는 2 cm으로 하였다. 측면흡수부 검출기는 고민감도 모드에서 흡수부 검출기로부터 후방 산란되어 오는 광자를 흡수시키는 역할을 하게 되고, 고해상도 모드에서 2차 산란부로부터 후방 산란되어 오는 광자를 흡수시키도록 동작한다. 측면흡수부 검출기를 추가로 설치함으로써 얻을 수 있는 영상감도를 최대화하기 위해 측면흡수부와 1차 산란부 검출기의 각도를 60, 75, 90, 105 그리고 120도로 변경해 가면서 영상감도를 평가하였다(그림 4). 측면흡수부 검출기는 영상해상도에는 거의 영향을 주지 않으면서 영상감도를 향상하기 위해 사용되며, 측면흡수부 검출기가 설치되기 전과 후의 영상해상도는 662 keV의 점선원에 대해 거의 차이가 없는 것으로 확인되었다(고민감도 모드: 4.8 mm→5.0 mm, 고해상도 모드: 4.6 mm→4.7 mm). 그림 5는 측면흡수부 검출기가 1차 산란부 검출기와 이루는 각도에 따른 영상감도의 변화를 나타낸 것으로서 (a), (b)는 고해상도 모드와 고민감도 모드에서 측면흡수부 검출기가 놓이는 각도에 따른 영상감도의 변화를 나타낸 것이고, (c)는 두 가지 모드를 종합한 결과를 나타낸 것으로

서, 측면흡수부 검출기가 90도 각도로 놓여있을 때 영상감도가 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 측면흡수부 검출기가 90도 각도로 놓였을 때 후방산란되는 광자를 가장 많이 흡수시킨다는 의미이며 측면흡수부 검출기를 설치한 전 후의 민감도 차이는 662 keV의 점선원에 대해 고해상도 모드에서 25%, 고민감도 모드에서는 41% 증가하였다.

### 3.4 최적화된 이중모드 컴프턴 영상장치 성능평가

본 연구에서 최적화된 시스템의 성능을 평가하기 위해 다양한 에너지의 점선원(662, 1332, 2000, 4400 keV)에 대하여 영상해상도와 영상감도를 평가해보았다. 전산모사 시 1, 2차 산란부 검출기, 측면, 후방 흡수부 검출기의 에너지 분해능은 각각 10 keV, 20 keV, 9%, 8%로 가정하였으며, 에너지 선별준위는 산란부 검출기는 30 keV, 흡수부 검출기는 50 keV로 설정하였다. 그림 6은 점선원에 대한 고해상도 모드(위), 고민감도 모드(아래)의 컴프턴 영상을 나타내고 있다. 전산모사 결과 영상감도의 경우, 고민감도 모드는 각 선원에너지에 대해  $8.1 \times 10^5$ ,  $2.8 \times 10^5$ ,  $1.3 \times 10^5$ ,  $5.1 \times 10^6$ 로 나타났으며, 고해상도 모드의 영상감도는  $6.5 \times 10^7$ ,  $2.6 \times 10^7$ ,  $1.1 \times 10^7$ ,  $4.3 \times 10^8$ 로 평가되었다. 따라서 고민감도 모드는 고해상도 모드에 비해 전 에너지 영역에서 100배 정도 높은 고유 영상감도를 제공하고 있으며, 이는 핵물질의 재빠른 탐지에 더 적합한 것으로 판단된다. 일반적으로 컴프턴 영상장치는 선

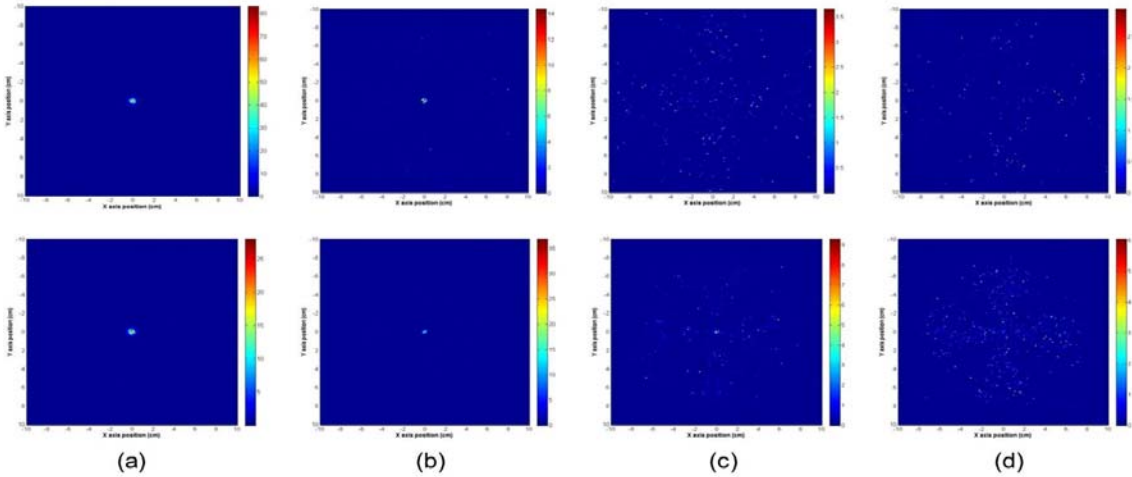


Fig 6. Reconstructed Compton image for point gamma source: high resolution mode (upper) and high sensitivity mode (bottom), for source energy of (a) 662 keV, (b) 1332 keV, (c) 2000 keV, and (d) 4400 keV.

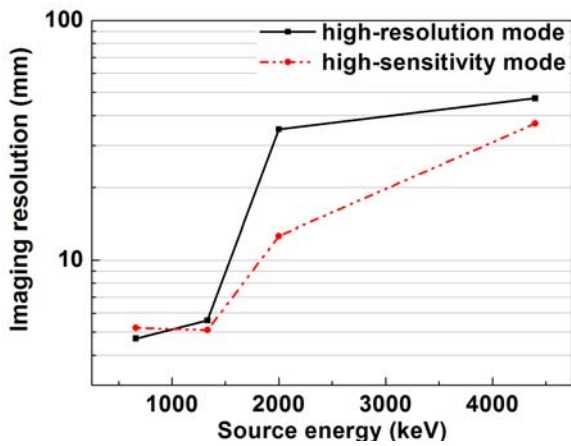


Fig 7. Imaging resolution (black) and sensitivity (red) according to the source energy.

원의 에너지가 높아지면 영상해상도는 향상되는 경향을 보이나, 본 연구에서는 1332 keV 이상의 선원에 대해서는 영상해상도가 급격하게 저하되는 경향을 확인하였다 (그림 7). 이는 1차 산란부 검출기의 두께가 매우 얇아서 (0.5 mm), 감마선에 의해 생성된 이차 전자가 검출기 내에서 모두 흡수되지 않고 빠져나가는 전자의 수가 증가하였기 때문으로 판단된다. 이 때문에 산란각 계산에서 오차가 크게 발생하여 재구성된 영상에서 선원의 위치를 확인하기 어려웠다. 따라서 현재 시스템으로는 1332 keV 선원까지는 문제없이 높은 영상해상도를 획득할 수 있으나, 그 이상의 에너지를 갖는 감마선원의 영상화가 필요하다면 더욱 두꺼운 산란부 검출기로 교체해야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

이중모드 컴프턴 카메라는 하나의 시스템에서 고민감

도 모드와 고해상도 모드, 이렇게 두 가지 모드로 동시에 작동하는 감마선 영상장치이다. 본 연구에서는 컴프턴 카메라의 성능에 영향을 미치는 인자들을 종합적으로 고려해 이중모드 컴프턴 카메라를 최적화하고 그 성능을 평가하였다. 그 결과 고민감도 모드에서는 고해상도 모드보다 100배 정도 높은 영상감도를 보임으로써 핵물질의 존재 여부를 스캔하는데 더 적합한 것으로 나타났다. 제안된 구조의 이중모드 컴프턴 카메라는 선원의 에너지가 1.3 MeV 이상이 되면 영상해상도가 급격히 저하되는 것으로 확인되었다. 이는 산란부 검출기의 두께가 매우 얇아 감마선에 의해 생성된 이차 전자가 검출기 내에서 모두 흡수되지 않고 빠져나가 산란각 계산에서 오차가 크게 발생하여 재구성된 영상에서 선원의 위치를 확인하기 어려웠기 때문으로 나타났다. 따라서 1.3 MeV 이상의 고에너지를 갖는 감마선원에 대한 영상화가 필요하다면, 더 두꺼운 산란부 검출기를 사용해야 할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글:

이 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 원자력연구사업(2010-0023825, 2012M2A8A5026057)

#### 참고문헌

1. 서희, 박진형, 김찬형, 이주한, 이춘식, 이재성. 이중산란형 컴프턴 카메라 구성 검출기 성능평가. 방사선방어학회지 2010;35:69-76.
2. Short course lecture note. Nuclear science for homeland security. 2007 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference.
3. Seo H, Kim CH, Park JH, Kim JK, Lee JH, Lee CS, Lee JS. Development of double-scattering-type Compton camera with double-sided silicon strip detectors and NaI(Tl) scintillation detector. Nucl. Instr. and Meth. A 2010;615:333-339.

4. Agostinelli S, Allison J, Amako K, et al. GEANT4-a simulation toolkit. Nucl. Instr. and Meth. A 2003; 560:250-303.
5. Allison J, Amako K, Apostolakis J, et al. Geant4 developments and applications. IEEE Trans. Nucl. Sci. 2006;53:270-278.
6. Yang YF, Gono Y, Motomura S, Enomoto S, Yano Y. A Compton camera for multitracer imaging. IEEE Trans. Nucl. Sci. 2001;48:656-661.
7. Wilderman SJ, Fessler JA, Clinthorne JA, et al. Improved modeling of system response in list mode EM reconstruction of Compton scatter camera images. IEEE Trans. Nucl. Sci. 2001;48:111-116.

## Preliminary Study of Performance Evaluation of a Dual-mode Compton Camera by Using Geant4

Jin Hyung Park<sup>\*</sup>, Hee Seo<sup>†</sup>, Seoung Hoon Kim<sup>‡</sup>, Young Soo Kim<sup>\*</sup>, and Chan Hyeong Kim<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Department of Nuclear Engineering Hanyang University, <sup>†</sup>Korea Atomic Energy Research Institute,

<sup>‡</sup>Department of Radiation Oncology Hanyang University Hospital

**Abstract** - A double-scattering type Compton camera which is appropriate to imaging a high-energy gamma source has been developed for nuclear material surveillance at Hanyang University. The double-scattering type Compton camera can provide high imaging resolution; however, it has disadvantage of relatively low imaging sensitivity than existing single-scattering type Compton camera. In this study, we introduce a novel concept of a dual-mode Compton camera which incorporates two different types of Compton camera, i.e., single- and double-scattering type. The dual-mode Compton camera can operate high-resolution mode and high-sensitivity mode in a single system. To maximize its performance, the geometrical configuration was optimized by using Geant4 Monte Carlo simulation toolkit. In terms of imaging sensitivity, high-sensitivity mode had higher sensitivity than high-resolution mode up to 100 times while high imaging resolution of the double-scattering Compton camera was maintained.

**Keywords** : Compton camera, Dual-mode, Nuclear material surveillance, Geant4