

이중 산란형 컴프턴 카메라 구성 검출기 성능 평가

서희*, 박진형*, 김찬형*, 이주한†, 이춘식†, 이재성‡

*한양대학교 원자력공학과 · †중앙대학교 물리학과 · ‡서울대학교 핵의학교실

2010년 3월 26일 접수 / 2010년 5월 2일 1차수정 / 2010년 5월 3일 채택

현재 개발중에 있는 이중 산란형 컴프턴 카메라는 두 대의 산란부 검출기(양면 실리콘 스트립 검출기, DSSD)와 하나의 흡수부 검출기(NaI(Tl) 섬광 검출기)로 구성되며, 소형이면서도 높은 영상해상도를 제공할 수 있는 구조를 가지고 있다. 본 연구에서는 이중 산란형 컴프턴 카메라를 구성하고 있는 감마선 검출기들의 에너지 분해능 및 시간 분해능을 평가하고, 산란부 검출기의 에너지 분해능에 영향을 미치는 인자들을 등가 노이즈 전하(equivalent noise charge)를 통하여 분석하였다. DSSD-1은 평균적으로 59.5 keV 피크(^{241}Am)에 대하여 $25.2 \text{ keV} \pm 0.8 \text{ keV}$ FWHM의 에너지 분해능을 보였으며, DSSD-2는 $31.8 \text{ keV} \pm 4.6 \text{ keV}$ FWHM의 에너지 분해능 지니고 있는 것으로 확인되었다. DSSD의 시간 분해능은 57.25 ns FWHM으로 평가되었고, NaI(Tl) 섬광 검출기의 시간 분해능은 7.98 ns FWHM이었다. 또한 이중 산란형 컴프턴 카메라를 이용하여 ^{137}Cs 점선원에 대한 컴프턴 영상을 획득한 후 성능을 평가하였다. 이번 실험을 통해서 영상해상도 8.4 mm FWHM (각 분해능 8.1° FWHM)을 획득하였고, 영상감도는 1.5×10^{-7} (고유 효율 = 1.9×10^{-6})으로 나타났다.

중심어: 컴프턴 카메라, 이중 산란, 에너지 분해능, 시간 분해능, 컴프턴 영상

1. 서론

컴프턴 산란에 기반을 둔 컴프턴 카메라는 3차원적인 방사선원의 분포를 고정된 위치에서 결정할 수 있는 감마선 영상장치로서 물리적 집속기를 사용하지 않기 때문에 높은 에너지 감마선을 방출하는 핵종에 대한 영상화가 유리하다는 장점이 있다[1]. 또한 선원의 에너지가 높아질수록 영상해상도가 향상된다는 점, 영상해상도와 영상감도 사이에 대립적인 특성이 없다는 장점 등을 바탕으로 의료용 영상장치 뿐만 아니라 원자력 산업용 영상장치로서의 활용 가능성을 가지고 있다. 현재 사용중인 의료용 영상장치의 경우에는 511 keV 미만의 감마선에 대한 영상화에만 용도가 한정되며, 산업적 목적으로 활용되기 위해서는 511 keV 이상의 감마선원에 대해서도 성능이 보장되어야 하기 때문에 핀홀 카메라 또는 단일광자방출단층촬영(single photon emission computed tomography, SPECT)과 같이 물리적 집속기를 사용하는 영상장치 보다는 컴프턴 영상기법이 대안으로 주목받고 있다[2].

컴프턴 영상기법에서 필수적으로 획득해야하는 물리량은 컴프턴 산란 위치와 산란된 감마선의 진행 방향, 그리고 산란된 감마선의 에너지이다. 이러한 물리량들을 사용

하여 컴프턴 영상 재구성에 사용되는 원뿔면(conical surface)의 꼭짓점 및 축, 그리고 내각을 결정하므로, 결국 이러한 물리량을 얼마나 정확히 결정할 수 있는지가 컴프턴 카메라의 영상해상도를 결정하는 요소가 된다. 이러한 물리량들을 결정하기 위해서 컴프턴 카메라는 통상적으로 2대 이상의 위치 민감형 감마선 검출기로 구성이 된다. 산란부 검출기의 위치 분해능이 컴프턴 산란 위치 정확도를 결정하며, 산란된 감마선의 진행 방향 결정 정확도는 구성 검출기(산란부와 흡수부)들의 위치 분해능에 의존한다. 마지막으로 산란된 감마선 에너지의 결정 정확도는 산란부 또는 흡수부 검출기의 에너지 분해능에 의존한다. 여기에 추가적으로 고려해야 되는 인자는 각 구성 검출기들의 시간 분해능이다. 컴프턴 카메라는 각 구성 검출기들을 동시계수(coincidence detection)를 통해 연결하여 모든 구성 검출기에서 반응이 있을 경우에만 단일 광자에 의한 이벤트를 확신하고 데이터를 획득한다. 따라서 구성 검출기들의 시간 분해능이 우수해야 동시계수 시간 윈도우를 좁게 설정할 수 있으며 우연 동시반응들에 의한 영향을 최소화 할 수 있다.

컴프턴 카메라는 일반적으로 두 대의 위치 민감형 검출기를 각각 산란부와 흡수부로 사용하는 구조를 가지고 있다. 이러한 구조는 산란부 검출기에서 한 번 컴프턴 산란을 일으킨 후 흡수부 검출기에서 완전히 흡수된 광자를 계측하여 컴프턴 영상을 획득하기 때문에 단일 산란형 컴

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

프턴 카메라로 분류할 수 있다. 이러한 구조의 경우 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 영상해상도의 저하를 가져오게 된다. 만약, 픽셀의 크기를 작게 하여 이러한 문제를 해결하고자 한다면 다중 픽셀 이벤트가 증가하여 영상감도의 급격한 저하를 가져오게 된다. 이러한 문제는 흡수부내에 있는 여러 픽셀에서 발생한 다중산란 반응의 시퀀스를 정확히 결정하는 기술이 마련되지 않는 한 해결하기 어려우며, 선원의 에너지가 높아짐에 따라 문제는 더욱 심각해진다.

이러한 문제를 근본적으로 해결하기 위하여 우리는 이중 산란형 구조를 가지는 새로운 타입의 컴프턴 카메라를 개발하고 있다[3-5]. 이는 기존의 컴프턴 카메라들과는 달리 두 개의 위치 민감형 산란부 검출기를 사용하여 광자의 산란 반응위치를 정확히 결정하고, 산란된 광자의 에너지만을 별도로 측정하는 흡수부 검출기를 사용하는 구조이다(그림 1). 즉, 두 개의 매우 얇은 실리콘 검출기를 산란부로 사용하여 광자의 궤적을 정확히 결정하겠다는 것이 주된 아이디어이다. 이를 통해 시스템을 매우 간소화하면서도 높은 영상해상도를 제공할 수 있을 것으로 기대한다. 이러한 구조는 Scannavini 등에 의해 최초로 제안되었으나[6] 아직까지 실험적으로 실증되지 않고 있다.

본 연구에서는 이중 산란형 컴프턴 카메라의 성능을 결정하는 구성 검출기들의 에너지 분해능 및 시간 분해능을 평가하였으며, ¹³⁷Cs 점선원에 대해서 실험적으로 컴프턴 영상을 획득하고 이중 산란형 컴프턴 카메라의 성능을 평가하여 보았다.

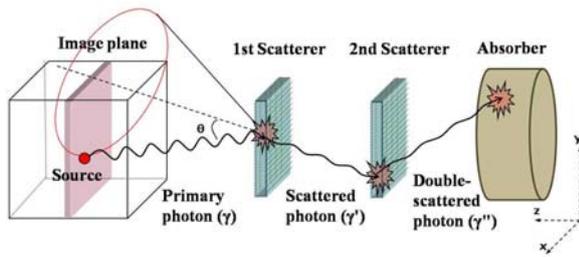


Fig. 1. Double-scattering Compton camera.

2. 구성 검출기 성능 평가

이중 산란형 컴프턴 카메라는 두 대의 양면 실리콘 스트립 검출기(double-sided silicon strip detector, DSSD)를 산란부로 사용하며, NaI(Tl) 섬광 검출기를 흡수부로 사용한다(그림 2). 산란부 검출기는 DC 타입의 PIN diode이며, 5 cm × 5 cm × 0.15 cm의 크기를 가지고 있다. 양면에 16개의 스트립이 직교하게 입혀져 있어서 3 mm × 3 mm의 평면 방향 위치 분해능을 제공하며, 깊이 방향은 검출기 두께에 해당하는 1.5 mm이다. 첫 번째 산란부에서 발생한 컴프턴 산란 반응의 위치를 컴프턴 원뿔

면의 꼭짓점으로 결정하며, 두 산란부에서의 반응 위치를 사용하여 컴프턴 원뿔면의 축으로 결정한다. 그리고, 첫 번째 산란부에 전달된 에너지를 식 1에 대입하여 산란각을 결정하고 이는 컴프턴 원뿔면의 내각으로 사용한다. 흡수부로 사용되는 NaI(Tl) 섬광 검출기는 지름 3 인치에 길이 3 인치를 갖는 원통형 검출기이며, 두 번 산란된 감마선의 에너지만을 계측하여 합에너지 게이트(sum-energy gate)를 적용하기 위해 사용한다. 합에너지 게이트는 구성 검출기에 전달된 에너지의 합이 선원의 에너지와 같아야 한다는 조건으로 이를 통해 우연 동시반응을 제거할 수 있게 된다.



Fig. 2. Component detectors of double-scattering Compton camera: double-sided silicon strip detector (left) and NaI(Tl) scintillation detector (right)

$$\theta = \cos^{-1} \left[1 + m_0 c^2 \left(\frac{1}{E_\gamma} - \frac{1}{E_{\gamma'}} \right) \right] \quad (\text{Eq. 1})$$

2-1. 에너지 분해능 평가

이중 산란형 컴프턴 카메라에서 첫 번째 산란부의 에너지 분해능은 앞서 설명한 컴프턴 원뿔면의 내각 결정 정확도를 결정하는 요인이 되며, 그 외 구성 검출기들의 에너지 분해능은 합에너지 게이트의 너비를 결정하는 인자가 된다. 따라서 우수한 에너지 분해능은 양질의 컴프턴 영상을 획득하기 위해 매우 중요한 인자가 된다. DSSD의 에너지 분해능을 결정하기 위하여 59.5 keV 감마선을 방출하는 ²⁴¹Am 선원과 88 keV 감마선을 방출하는 ¹⁰⁹Cd 선원을 사용하여 에너지 스펙트럼을 획득하였다. 그림 3과 4에서는 ²⁴¹Am 및 ¹⁰⁹Cd 감마선원에 대한 두 DSSD의 각 스트립별 에너지 분해능을 나타내고 있다. 각각의 스트립이 가지고 있는 에너지 분해능을 평균내어 살펴보면 DSSD-1은 25.2 keV ± 0.8 keV FWHM (²⁴¹Am) 및 28.1 keV ± 1.3 keV FWHM (¹⁰⁹Cd)의 에너지 분해능을 가지고 있으며, DSSD-2는 31.8 keV ± 4.6 keV FWHM (²⁴¹Am) 및 34.7 keV ± 4.6 keV FWHM (¹⁰⁹Cd)의 에너지 분해능을 보이고 있다. 그림 3과 4에서 볼 수 있듯이 DSSD-2는 전체적인 에너지 분해능 값도 좋지 않을뿐더러 각 검출기 채널간 편차도 심하게 나타나는 것으로 확인되었다. 이에 에너지 분해능이 상대적으로 우수한 DSSD-1을 첫 번째 산란부로 사용하는 것이 높은 영상해상도를 얻는데 도움이 될 것으로 판단된다.

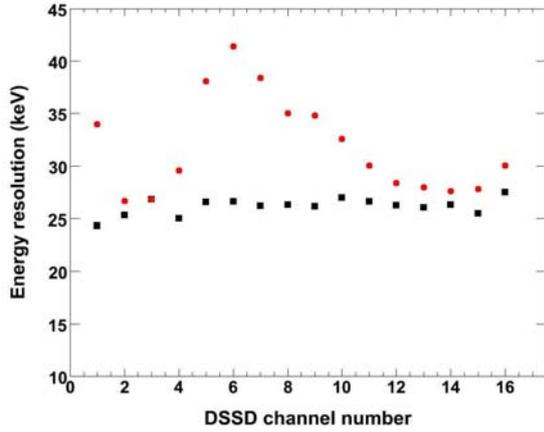


Fig. 3. Energy resolution of DSSD-1 (square) and DSSD-2 (circle) for 59.5 keV peak of ²⁴¹Am.

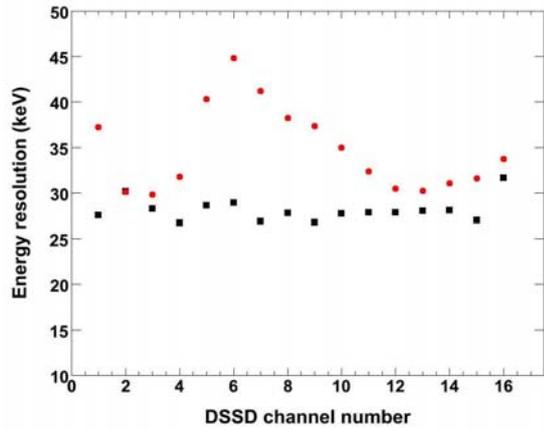


Fig. 4. Energy resolution of DSSD-1 (square) and DSSD-2 (circle) for 88 keV peak of ¹⁰⁹Cd.

DSSD의 에너지 분해능에 영향을 미치는 주요 인자로는 검출기 누설전류, 검출기 축전용량 및 검출기와 전치증폭기를 연결하는 케이블의 축전용량, 그리고 바이어스 저항값을 들 수 있다. 통상적으로 노이즈는 직렬 성분과 병렬 성분으로 나누어 볼 수 있으며, 이들은 shaping time의 증가에 따라 직렬 성분 노이즈는 증가하는 경향이 있으며 병렬 성분 노이즈는 감소하는 경향이 있다. 이러한 노이즈는 등가 노이즈 전하(equivalent noise charge, ENC)라는 양으로 표현할 수 있는데, 실리콘 검출기에서 누설 전류에 의한 ENC는 다음의 식 2를 통해 구할 수 있다[7].

$$ENC_L = \frac{e}{2} \sqrt{\frac{I_L t_p}{q}} \quad (\text{Eq. 2})$$

여기서 e는 오일러 상수(=2.718), I_L은 검출기 누설전류, t_p는 peaking time (shaping된 펄스가 자신의 피크 전압까지 올라가는데 걸리는 시간), 그리고 q는 전자의 전하량(=1.6×10⁻¹⁹ C)이다. 현재 사용중인 DSSD는 통상 실온에서 450 nA/strip 정도의 누설전류를 보이고 있다. DSSD의 다채널 신호를 처리하기 위해 mesytec사에서 제

작한 MUX-16을 사용하고 있다. MUX-16은 16개의 입력 신호 중 신호가 발생한 채널의 에너지와 위치 신호 그리고 트리거 신호를 출력신호로 내보낸다. MUX-16의 peaking time은 ~0.8 μs이다. 이 값들을 사용하여 계산된 누설전류에 의한 ENCL 값은 2039 electrons이며, 여기에 실리콘 검출기에서 하나의 전자/전공쌍을 생성하기 위한 에너지인 3.62 eV를 곱하고, FWHM으로 계산하기 위해 2.35를 곱하면 최종적으로 17.3 keV FWHM의 노이즈 값을 구할 수 있다.

MUX-16의 사용설명서에 따르면 검출기 및 케이블의 축전용량에 의한 노이즈는 다음의 식 3으로 계산할 수 있다. DSSD의 제작사에 따르면 검출기 축전용량은 대략 20 pF 정도이며, DSSD와 MUX-16을 연결하는 케이블은 90 pF의 축전용량을 가지고 있다. 따라서 해당 축전용량에 의한 노이즈는 12.5 keV FWHM으로 유추할 수 있다.

$$ENC_C = 5.5 \text{ keV} + 0.064 \times C_{(\text{det} + \text{cable})} \text{ keV/pF} \quad (\text{Eq. 3})$$

또다른 노이즈 성분으로는 바이어스 저항에서 발생하는 열적 노이즈(thermal (or Johnson) noise)가 있으며 이는 식 4를 통해 ENC를 구할 수 있다. MUX-16의 제작사에 따르면 바이어스 저항값(R)은 10 MΩ이며, k는 볼츠만 상수(=1.38×10⁻²³ J/K), T는 절대온도(300 K)이다. 그 외 변수들은 식 2와 동일하다. 검출기 저항값에 의한 노이즈는 1.9 keV FWHM 정도로 계산되었다.

$$ENC_R = \frac{e}{q} \sqrt{\frac{kTt_p}{2R}} \quad (\text{Eq. 4})$$

따라서 총 노이즈 값은 식 5에 의해 21.4 keV FWHM이 되며, 이는 현재 DSSD의 검출 시스템으로 달성 가능한 에너지 분해능의 한계로 여겨진다. 여기에 전자/전공쌍 생성시에 발생하는 통계적 요동, 외부적인 노이즈 픽업, 전치 증폭기의 직렬성분 노이즈 등이 추가적으로 기여를 하여 최종적으로 25~35 keV FWHM 정도의 성능을 보이는 것으로 판단된다. 검출기 누설전류는 온도에 매우 민감하여 7 K 감소함에 따라 누설전류는 대략 절반 정도로 줄어든다고 한다[8]. 따라서 DSSD의 에너지 분해능 향상을 위해서 검출기 냉각을 고려해야 할 것으로 생각되며, 현재 90 cm에 달하는 검출기와 전치증폭기 사이의 케이블을 짧은 것으로 대체하는 것도 고려해야 될 것으로 생각한다. 또한 현재 MUX-16이 외부적인 노이즈에 상당히 민감하게 반응하므로 최적의 그라운드 설정을 통해 노이즈를 빼 주어야 할 것으로 판단된다.

$$Noise_{total} = \sqrt{Noise_{leakage}^2 + Noise_{capitance}^2 + Noise_{resistor}^2} \quad (\text{Eq. 5})$$

NaI(Tl) 섬광 검출기는 59.5 keV 피크에 대해서 9.1 keV FWHM의 에너지 분해능을 나타냈으며, ⁶⁰Co 선원의 1173 keV 및 1332 keV 피크에 대해서는 각각 77.4 keV

와 77.8 keV FWHM 정도를 나타냈다.

2-2. 시간 분해능 평가

이중 산란형 컴프턴 카메라는 3대의 감마선 검출기로 구성되기 때문에 우연 동시반응을 최소화하고 유효한 반응만을 기록하는 최적의 동시계수회로 구성이 필수적이다. 이를 위해서는 각 구성 검출기 및 이와 연결된 신호처리회로 조합의 시간 분해능을 정확히 결정하는 것이 선결되어야 한다. 이에 본 연구에서는 컴프턴 카메라를 구성하는 검출기 및 신호처리회로를 사용하여 각 검출시스템의 시간분해능을 결정하였다.

그림 5에서는 NaI(Tl) 섬광 검출시스템의 시간 분해능을 결정하기 위해 사용된 신호처리 로직을 보여주고 있다. 두 대의 동일한 섬광 검출기 및 신호처리 로직을 구성하고 두 검출기 사이에 511 keV 소멸 감마선을 방출하는 ²²Na 감마선원을 위치시켰다. Timing filter amplifier (TFA; model 474, ORTEC, USA)를 사용하여 빠르게 shaping 한 다음 시간 분해능에 영향을 미치는 amplitude walk의 영향을 최소화하기 위하여 constant fraction discriminator (CFD; model 935, ORTEC, USA)를 사용하여 트리거 신호를 획득하였다. 이렇게 생성된 로직 신호를 time-to-digital converter (TDC; model 7186, Phillips Scientific, USA)에 넣어 주어 반응시간 정보를 획득하였다. 동시계수회로를 구성하여 두 대의 검출기에서 동시에 반응이 일어난 경우에만 게이트를 열어주어 데이터를 기록하였으며, 우연 동시반응들을 제거하기 위하여 511±50 keV의 에너지 게이트를 적용하여 주었다. 그림 6에서는 동시계수를 통해 획득한 에너지 스펙트럼과 단독으로 두었을 경우의 에너지 스펙트럼을 보여주고 있다. 그림 6에서 확인할 수 있듯이 단독(single)으로 데이터를 획득하면 511 keV 피크뿐만 아니라 ²²Na 선원에서 방출되는 1275 keV 감마선에 대한 피크도 선명하게 보이는데 반하여, 동시계수를 통해 획득한 스펙트럼에서는 511 keV를 제외한 이벤트들이 상당 부분 제거가 되었음을 알 수 있다. 여기에 추가적으로 에너지 게이트를 적용하여 두 검출기 모두 511 keV에 해당하는 이벤트가 있을 경우에만 해당 이벤트들의 반응 시간 정보를 사용하여 시간차 스펙트럼을 획득하였다.

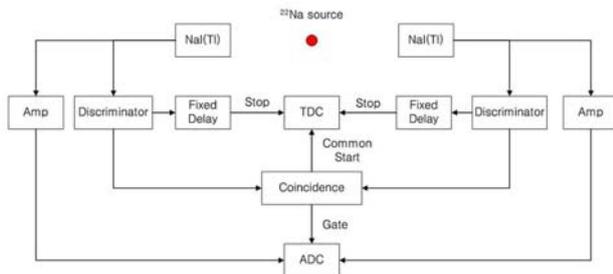


Fig. 5. Simplified schematic diagram of electronics used to determine timing resolution of NaI(Tl) scintillation detector.

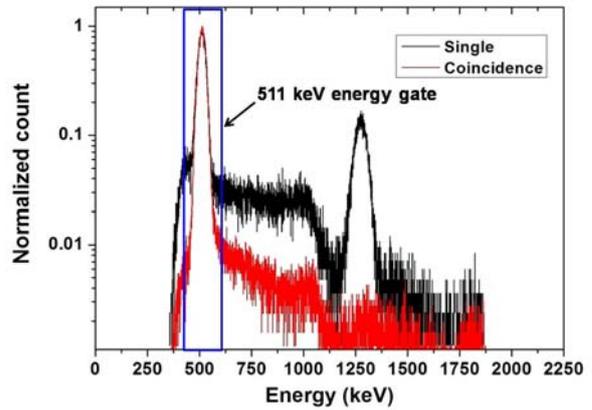


Fig. 6. Normalized energy spectrum of NaI(Tl) scintillation detector measured with (red) and without (black) coincidence detection.

그림 7에서는 TDC를 통해 획득한 NaI(Tl) 검출기에 대한 시간차 스펙트럼을 보여주고 있다. 동시계수 시간 분해능은 11.28 ns FWHM으로 평가되었다. 양쪽의 검출시스템이 시간차 스펙트럼에 동일한 영향을 미쳤다는 가정하에 개별 NaI(Tl) 검출시스템의 시간 분해능(x)은 7.98 ns로 평가되었다(식 6).

$$11.28 \text{ ns} = \sqrt{x^2 + x^2} \tag{Eq. 6}$$

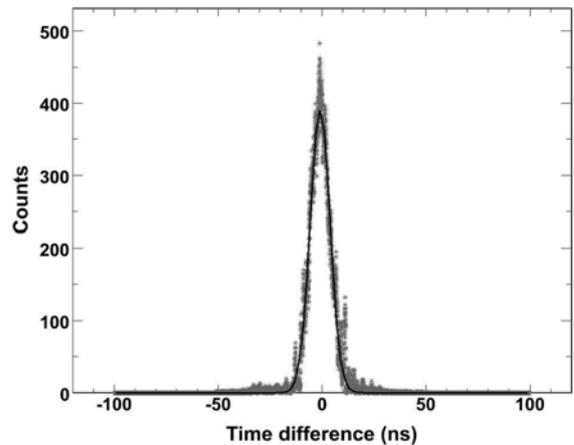


Fig. 7. Time difference spectrum measured with coincidence detection between two identical NaI(Tl) detection systems.

DSSD 및 이와 연결된 신호처리회로의 시간 분해능을 결정하기 위해서 DSSD와 NaI(Tl) 검출기 조합을 선택하였다. 앞서 설명한 NaI(Tl) 검출시스템의 시간 분해능을 결정하기 위해 사용하였던 방법은 DSSD에는 적합하지 않는데, 그 이유는 DSSD는 원자번호가 낮고 두께가 매우 얇기 때문에 511 keV 감마선에 대한 전에너지 피크(full-energy peak)를 형성할 확률이 매우 낮기 때문이다. 참고로 전에너지 피크는 다중 산란 이후 흡수된 경우도 포함하고 있으나, 검출기의 픽셀 사이즈가 작고(3 mm×3 mm×1.5 mm) 다중 채널 반응은 측정 시 포함하지 않기 때문에 포토피크(photopeak)에 대한 반응 확률을 확인하여 보았다. NIST에서 제공하는 XCOM [9]을 통해 실리콘

에서 511 keV 광자의 광전흡수에 대한 선형 감쇠계수를 $4.06 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1} (= 1.74 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1} \times 2.33 \text{ g cm}^{-3})$ 로 확인하였고, 여기에 산란부 검출기 두께에 해당하는 0.15 cm를 곱하여 최종적으로 0.006%의 반응확률을 획득하였다. 즉 DSSD에 입사된 511 keV의 광자 중 0.006%만이 광전흡수를 통해 포토피크를 형성한다는 의미이다. 반면 동일한 방법으로 결정된 511 keV 광자의 컴프턴 산란 확률은 약 3%로 광전 효과보다 약 500배가 크다.

이에 DSSD와 NaI(Tl) 검출기를 산란 구조로 구성하고 실제 감마선의 반응 시간에는 차이가 없다고 가정하였다. 즉, DSSD와 NaI(Tl) 검출기를 매우 가깝게 위치시키고(1 cm 간격), DSSD에서 산란된 후 NaI(Tl) 검출기에서 완전히 흡수된 경우에 반응의 시간차는 없다고 가정하였다. 선원으로는 662 keV 감마선을 방출하는 ^{137}Cs 점선원을 DSSD 앞면에서부터 4 cm 거리에 두었다. 컴프턴 카메라에 사용되는 동일한 신호처리 모듈들을 사용하였고, 역시 에너지까지 기록하여 두 검출기에 전달된 에너지의 합이 선원의 에너지와 같아야 한다는 에너지 게이트($662 \pm 60 \text{ keV}$)를 적용하여 우연동시반응들은 제거하여 주었다. 이때 사용된 신호처리 로직은 그림 8에 나타내었다. 그림 9에서는 동시계수를 통해 획득한 DSSD-NaI(Tl) 검출기 간의 합에너지 스펙트럼을 보여주고 있으며, 여기서 662 keV에 해당하는 피크를 확인할 수 있다.

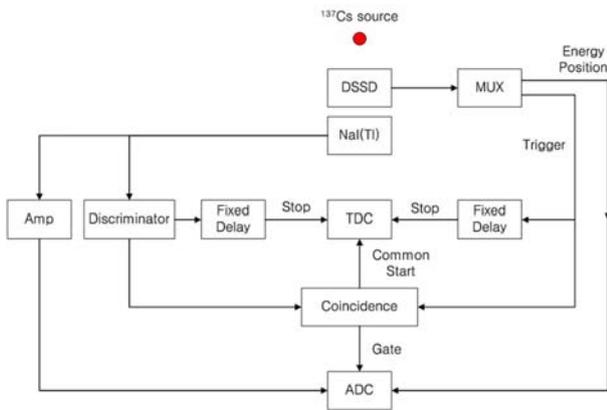


Fig. 8. Simplified schematic diagram of electronics used to determine timing resolution of DSSD.

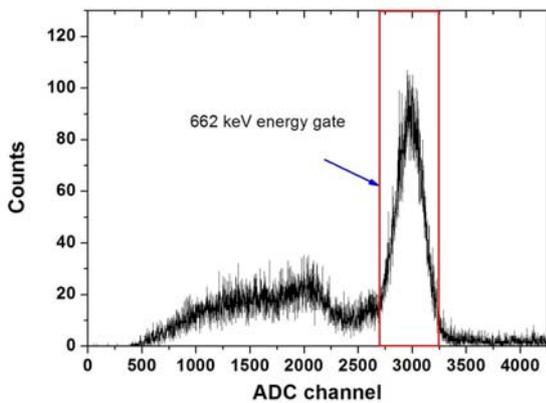


Fig. 9. Sum-energy spectrum measured with coincidence detection between DSSD and NaI(Tl) scintillation detector.

그림 10에서는 TDC를 통해 획득한 DSSD-NaI(Tl) 검출 시스템에 대한 시간차 스펙트럼을 보여주고 있다. 시간차 스펙트럼이 NaI(Tl) 검출기의 경우와는 달리 좌/우 비대칭인 이유는 동시계수로 연결된 검출기 및 신호처리 로직이 서로 다르기 때문이며 DSSD의 시간 분해능이 상대적으로 저조하여 좌측으로 테일이 생겼다고 판단된다. 시간차 스펙트럼의 반치폭(FWHM)이 57.80 ns이고 NaI(Tl) 검출기의 시간분해능은 앞서 7.98 ns로 평가되었으므로 DSSD의 시간 분해능(x)은 57.25 ns라고 결정할 수 있었다(식 7). 참고로 검출기 연결을 해제하고 펄스생성기를 통해 결정된 MUX-16과 그 뒷단의 시스템 시간 분해능은 2.56 ns으로 평가되었다.

$$57.80 \text{ ns} = \sqrt{x^2 + 7.98^2} \quad (\text{Eq. 7})$$

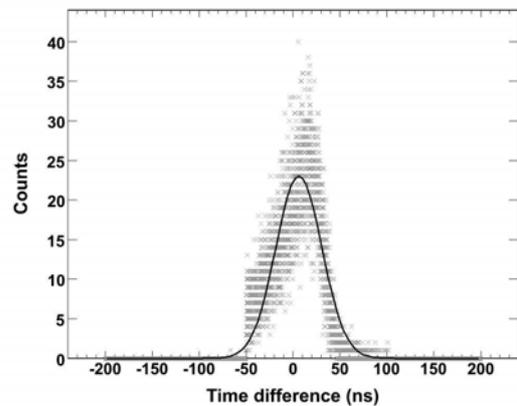


Fig. 10. Time difference spectrum measured with coincidence detection between DSSD and NaI(Tl) detection system.

결정된 시간 분해능을 바탕으로 최적의 동시계수 로직 입력 신호의 너비(width)는 DSSD의 경우에는 200 ns, NaI(Tl) 검출기는 50 ns로 판단된다. 이는 동시계수의 시간 윈도우를 결정하는 값이며, 시간 분해능 보다는 몇 배 정도 넓게 잡아주는 것이 적절하다고 알려져 있다[10]. 또한, 이중 산란형 컴프턴 카메라의 경우 삼중 동시계수를 사용하고 있고, 합에너지 게이트를 통해 추가적으로 우연 동시반응을 제거할 수 있으므로 다소 넓게 잡아주는 것이 유효한 반응을 놓치지 않고 기록하는데에 유리하다고 판단된다.

3. ^{137}Cs 점선원에 대한 컴프턴 영상

662 keV 감마선을 방출하는 점선원 형태의 ^{137}Cs 선원을 사용하여 컴프턴 영상을 획득하였다. 선원은 이중 산란형 컴프턴 카메라로부터 4 cm 앞에 위치시켰고, 삼중 동시계수를 통해 10시간 동안 데이터를 획득하였다. 실험 당일 방사능의 세기는 $9.11 \mu\text{Ci}$ 정도였다(제조사에서 제시한 기준 일자와 방사능의 세기를 지수감쇠 법칙에 적용하여 계산하였음). 두 산란부 간 거리는 10 cm이며, 산란부와 흡수부는 1 cm 거리를 두었다. 삼중 동시계수를 통

해 총 6085개의 이벤트를 획득하였으며, 각 검출기들의 에너지 스펙트럼과 합에너지 스펙트럼을 그림 11에 나타내었다. 노이즈를 제거하기 위하여 설정된 에너지 선별준위는 DSSD의 경우에는 40 keV였고, NaI(Tl) 검출기는 20 keV였다. DSSD-1, 즉 첫 번째 산란부의 에너지 선별준위는 컴프턴 카메라에서 측정 가능한 최소 산란각을 결정하는 중요한 인자로서 40 keV는 약 18°의 산란각에 해당된다. 따라서 높은 영상감도를 달성하기 위해서는 노이즈 레벨을 낮추어 에너지 선별준위를 낮게 유지하는 것이 중요한 문제라 생각된다. 그림 11의 합에너지 스펙트럼에서 선원의 에너지에 해당하는 662 keV 피크가 선명하게 나타나고 있으며, 해당 피크의 반치폭은 52.6 keV FWHM으로 평가되었다. 그림 12에서는 이차원 에너지 스펙트럼을 보여주고 있다. x축은 첫 번째 산란부에 전달된 에너지이고, y축은 두 번째 산란부와 흡수부에 전달된 에너지의 합을 나타낸다. 해당 스펙트럼에서 세 검출기에 전달된 에너지의 합이 선원의 에너지와 같아지는 대각선 라인이 보이고 있으며, 박스 형태로 표현된 이차원 에너지 게이트를 적용하여 우연 동시반응들은 제거하여 주었다.

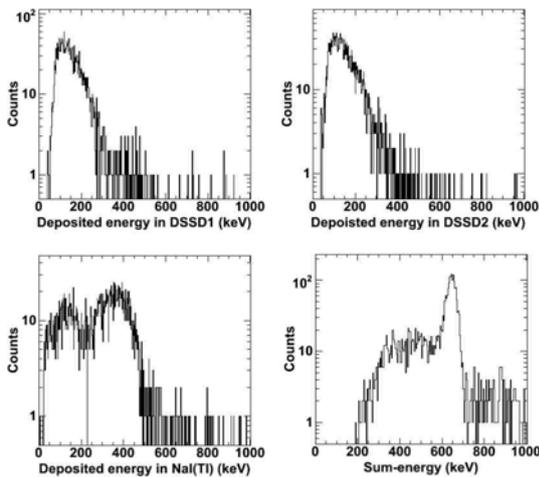


Fig. 11. Energy spectrum of component detectors and sum-energy spectrum measured with triple coincidence detection for ¹³⁷Cs gamma source.

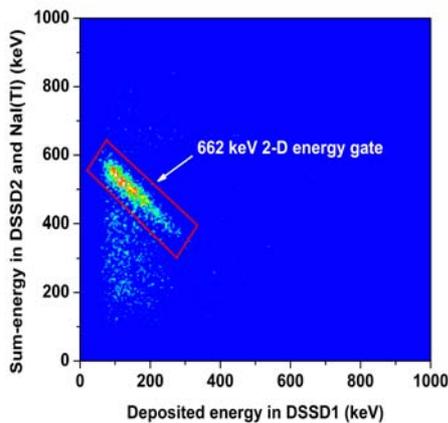


Fig. 12. Two-dimensional energy spectrum and energy gate for ¹³⁷Cs gamma source.

2차원 에너지 게이트를 적용하여 최종적으로 1548개의 유효반응들을 획득하였으며, 이들을 사용하여 영상재구성을 실시하였다. 컴프턴 카메라에서 영상감도는 유효반응의 수를 선원에서 방출된 감마선의 수로 나누어 줌으로써 구할 수 있으며, 이번 실험에서의 영상감도는 1.5×10^{-7} 으로 평가되었다(식 8). 이때 ¹³⁷Cs 선원에서 662 keV 감마선에 대한 붕괴당 방출율(yield, 85.1%)을 고려하였다.

$$Imaging\ Sensitivity = \frac{1548}{9.11\ \mu Ci \times 3.7 \times 10^4\ Bq/\mu Ci \times 0.851 \times 36000\ s} \quad (Eq. 8)$$

앞서 결정된 영상감도는 선원의 위치에 의존하는 값이므로 컴프턴 카메라의 고유 효율(intrinsic efficiency)을 추가적으로 확인하여 보았다. 이중 산란형 컴프턴 카메라의 고유 효율은 삼중 동시계수로 획득한 유효반응의 수(= 1548 개)를 첫 번째 산란부에 입사된 감마선의 수로 나누어 줌으로써 구하였다. 선원에서 방출된 감마선 중 7.87%가 검출기로 입사되는 것으로 평가되었고, 이에 ¹³⁷Cs 선원에 대한 고유 효율은 1.9×10^{-6} 임을 확인하였다.

그림 13에서는 1548개의 유효반응을 사용하여 재구성된 컴프턴 영상을 보여주고 있으며, 그림 14에서는 재구성된 영상을 x축으로 프로젝션한 분포를 보여주고 있다. 해당 분포에 가우시안 피팅을 하여 영상해상도를 구하였고, 이번 실험에서는 ¹³⁷Cs 점선원에 대하여 8.4 mm FWHM의 영상해상도를 획득하였다. 컴프턴 영상 기법에 있어서 영상해상도를 표현하는 또 다른 방법은 각 분해능(angular resolution)이다[11]. 이 각 분해능은 에너지로 계산된 산란각과 반응위치로 계산된 산란각의 차(angular resolution measure)를 그림 15와 같이 분포화 시킨 다음 해당 분포를 가우시안(또는 보이트) 피팅함으로써 구할 수 있다. 재구성된 컴프턴 영상을 통해 구할 수 있는 길이 단위의 영상해상도는 컴프턴 카메라의 성능뿐만 아니

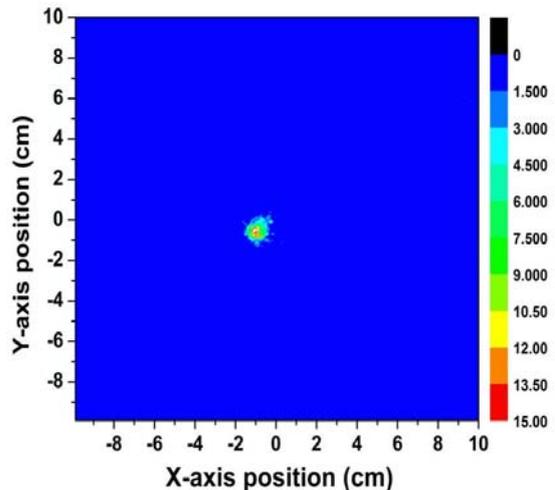


Fig. 13. Reconstructed Compton image for ¹³⁷Cs point source at 4 cm in front of double-scattering Compton camera.

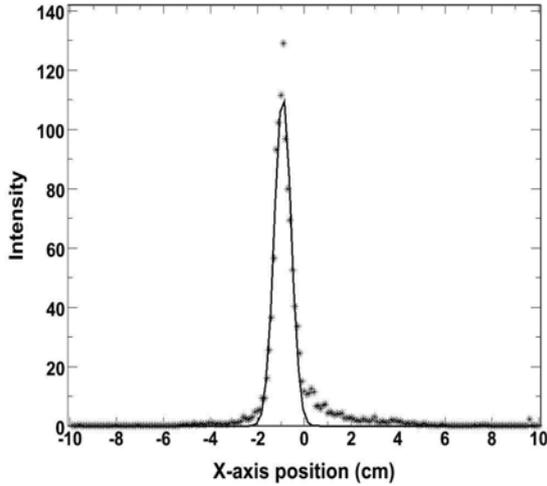


Fig. 14. Projection distribution with fitted Gaussian curve for reconstructed Compton image.

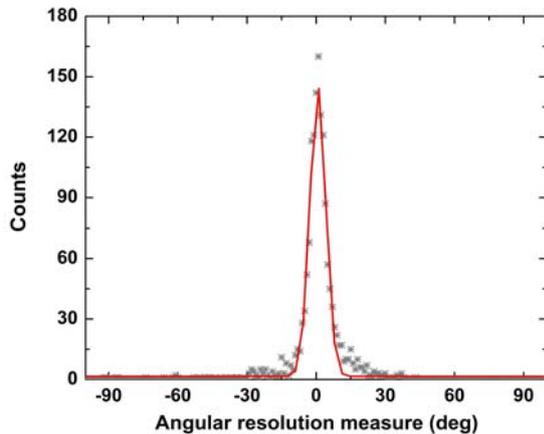


Fig. 15. Angular resolution measure (ARM) distribution with fitted Gaussian curve.

라 영상재구성 알고리즘의 성능에도 영향을 받는 값으로 종합적인 성능 평가가 가능하지만, 각 분해능은 온전히 컴프턴 카메라 구성 검출기의 성능에만 영향을 받는 값이므로 단순히 영상장치의 성능을 표현하기에는 각 분해능이 더욱 적절하다고 생각한다. 이번 실험에서는 8.1° FWHM의 각 분해능을 획득하였다.

4. 결론

컴프턴 카메라는 공간상에 존재하는 방사선원의 위치를 3차원적으로 확인할 수 있는 감마선 영상장치로서 다양한 목적으로 활용될 가능성을 지니고 있다. 예로, 의료진단 목적으로 인체내에 주입된 방사성 동위원소의 분포를 영상화 할 수 있으며 방사성 폐기물 분석 및 대형 원자력 시설에서의 방사화된 오염원의 추적 등 다양한 분야에서 활용될 수 있다. 이중 산란형 컴프턴 카메라는 두 대의 산란부 검출기(양면 실리콘 스트립 검출기, DSSD)

와 하나의 흡수부 검출기(NaI(Tl) 섬광 검출기)로 구성되어 있으며, 소형이면서도 높은 영상해상도를 제공할 수 있는 구조를 가지고 있다. 본 연구에서는 이중 산란형 컴프턴 카메라를 구성하고 있는 감마선 검출기의 에너지 분해능 및 시간 분해능을 평가하고, 산란부 검출기의 에너지 분해능에 영향을 미치는 요인들을 분석하였다. 구성 검출기들의 시간 분해능을 바탕으로 현재 시스템에서 적절한 동시계수 시간 윈도우를 결정할 수 있었다. 그리고 점선원 형태의 ¹⁵⁷Cs 감마선원에 대한 컴프턴 영상을 획득하고 컴프턴 카메라의 성능을 평가하였다. 산란부 검출기의 에너지 분해능 및 반응위치 분해능이 개발중인 이중 산란형 컴프턴 카메라의 성능을 제한하고 있는 것으로 판단되며, 이에 최근 반응위치 분해능이 현재 사용중인 DSSD 보다 4배 우수한 DSSD (760 μm strip pitch)를 새로이 도입하였으며 노이즈 레벨이 낮은 다채널 신호처리 모듈을 개발하기 위한 노력을 진행하고 있다. 또한 영상감도 향상 방안으로 다수의 흡수부 검출기를 사용하는 시스템을 제작하고 있다.

감사의 글:

본 연구는 원자력연구개발사업(BAERI, 핵심기초) 및 지식경제부(2008-P-EP-HM-E-06-0000)/선광원자력(주)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 서희, 이세형, 박진형, 김찬형, 박성호, 이주환, 이춘식, 이재성. 4D 전산모사 기법을 이용한 회전형 컴프턴 카메라의 영상 특성 평가. 방사선방어학회지 2009;34(3):107-114.
2. Short course lecture note. Nuclear science for homeland security. 2007 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference.
3. Seo H, An SH, Kim JK, Kim CH. Monte Carlo study of a double-scattering Compton camera with GEANT4. Nucl. Instr. and Meth. A 2007;580:314-317.
4. Seo H, Lee SH, Kim CH, An SH, Lee JH, Lee CS. Optimal geometrical configuration of a double-scattering Compton camera for maximum imaging resolution and sensitivity. Nucl. Instr. and Meth. A 2008;591:80-83.
5. 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.
6. Scannavini MG, Speller RD, Royle GJ, Cullum I, Raymond M, Hall G, Iles G. A possible role for silicon microstrip detectors in nuclear medicine: Compton imaging of positron emitters. Nucl. Instr. and Meth. A 2002;477:514-520.
7. Toker O, Masciocchi S, Nygaard E, Rudge A, and Weilhammer P. VIKING, a CMOS low noise monolithic 128 channel frontend for Si-strip detector readout. Nucl. Instr. Meth. A 1994;340:572-579.

8. Wilburn C. Private communication. 2007.
9. <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>
10. Knoll GF. Radiation detection and measurement. 3rd ed. New York; John Wiley and Sons, 2000.
11. Zoglauer A and Kanbach G. Doppler broadening as a lower limit to the angular resolution of next generation Compton telescopes. Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng. 2003;4851:1302-1309.

Performance Evaluation of Component Detectors of Double-scattering Compton Camera

Hee Seo^{*}, Jin Hyung Park^{*}, Chan Hyeong Kim^{*}, Ju Hahn Lee[†], Chun Sik Lee[‡], and Jae Sung Lee^{*}

^{*}Department of Nuclear Engineering, Hanyang University

[†]Department of Physics, Chung-Ang University

[‡]Department of Nuclear Medicine and Interdisciplinary Program in Radiation Applied Life Science, Seoul National University

Abstract - Prototype double-scattering Compton camera, which consists of three gamma-ray detectors, that is, two double-sided silicon strip detectors (DSSDs) as scatterer detectors and a NaI(Tl) scintillation detector as an absorber detector, could provide high imaging resolution with a compact system. In the present study, the energy resolution and the timing resolution of component detectors were measured, and the parameters affecting the energy resolution of the DSSD were examined in terms of equivalent noise charge (ENC). The energy resolutions of the DSSD-1 and DSSD-2 were, in average, $25.2 \text{ keV} \pm 0.8 \text{ keV}$ FWHM and $31.8 \text{ keV} \pm 4.6 \text{ keV}$ FWHM at the 59.5 keV peak of ^{241}Am , respectively. The timing resolutions of the DSSD and NaI(Tl) scintillation detector were 57.25 ns FWHM and 7.98 ns FWHM, respectively. In addition, the Compton image was obtained for a point-like ^{137}Cs gamma source with double-scattering Compton camera. From the present experiment, the imaging resolution of 8.4 mm FWHM (angular resolution of 8.1° FWHM), and the imaging sensitivity of 1.5×10^{-7} (intrinsic efficiency of 1.9×10^{-6}) were obtained.

Keywords : Compton Camera, Double-scattering, Energy Resolution, Timing Resolution, Compton Image