

픽셀형 검출소자의 차세대 3차원 감마선영상 컴프턴 카메라



· 이춘식 ·
중앙대
물리학과 교수



· 이주한 ·
중앙대
물리학과 박사과정

1. 서론

인간은 상황 판단과 사물 인지에 있어서 다른 감각 기관에 비해 시각에 대한 의존도가 매우 높기 때문에, 정보의 시각화 또는 영상화를 위해 수많은 노력을 기울여 왔으며, 그 결과로 살아있는 생명체의 상세한 내부 모습과 그 동안 베일에 가려져 있었던 별들의 탄생과 죽음 순간의 폭발적인 모습, 규칙적으로 배열된 원자들의 미세한 모습 등을 생생하게 볼 수 있게 되었다. 이러한 영상화 기술은 탐구 대상으로부터 정보를 전달하는 매개물에 대한 이해와 그 제어 메커니즘의 확립에 바탕을 두고 있는데, 특히 감마선을 이용한 영상화에 있어서 감마선이 지니는 우수한 정보전달 능력에 대한 낮은 정보 산출현황은 감마선 제어 메커니즘 개발의 중요성을 보여주는 좋은 예가 되고 있다. 본 논문에서는 '전기적 집속(Electronic collimation)' 이라는 새로운 감마선 제어 메커니즘을 이용하여 감마선 방출원의 분포에 대한 3차원적 영상을 구현하는 '컴프턴 카메라(Compton camera)'에 대한 기초연구를 다루었다.

컴프턴 카메라의 원리는 1974년 R. W. Todd 등에 [1] 의해서 처음 제안되었다. 그림 1에 나타난 바와

같이 감마선이 검출기로 들어와 한 번만 컴프턴 산란을 하고 다시 광전효과에 의하여 완전히 멈추는 과정을 이용하는 것이다. 전자·양전자 쌍 생성 상호작용에 의한 감마선의 전자 변환 과정은 다소 복잡하기

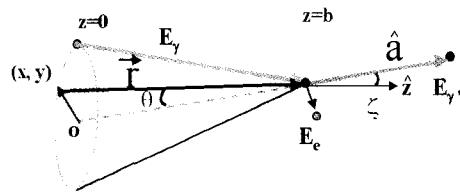


Image plane에서의 타원궤적 산란부 (컴프턴 산란) 흡수부 (광전효과)

$$1) \quad \vec{r} \cdot \hat{z} = b, \quad \vec{r} \cdot \hat{a} = r \cos \theta, \quad \hat{a} \cdot \hat{z} = \cos \zeta$$

$$= \left(x + \frac{bcos\zeta \sin \zeta}{\cos^2 \theta - \sin^2 \zeta} \right)^2 + \frac{\cos^2 \theta}{\cos^2 \theta - \sin^2 \zeta} y^2 = \left(\frac{bcos \theta \sin \zeta}{\cos^2 \theta - \sin^2 \zeta} \right)^2 \quad \text{타원 방정식}$$

$$\zeta = 0 \text{ 일 경우, } x^2 - y^2 = (b \tan \theta)^2 \quad \text{쌍곡 방정식}$$

2) 컴프턴 산란각 θ의 결정

$$E_{\gamma'} = E_{\gamma} - E_e, \quad E_e = \frac{E_{\gamma} \cdot m_e c^2}{m_e c^2 + E_{\gamma}(1 - \cos \theta)}$$

$$= \cos \theta - 1 = \frac{E_{\gamma} \cdot m_e c^2}{E_{\gamma}(E_{\gamma} + E_e)}$$

그림 1. 컴프턴 산란의 기하학적 해석인 전기적 집속 원리.

때문에 현 기술 수준에서는 고려하지 않는다. 광전효과에 의하여 곧바로 멈추거나, 두 번 이상 콤프턴 산란이 생기는 과정들에 대해서도 이 기술이 동일하게 적용된다. 콤프턴 산란에서 광전효과에 의하여 멈출 때까지 걸리는 시간은 빛이 빠르기 때문에 동시에 일어나는다고 하여도 무방하며, 각 위치에서 잃은 감마선 에너지는 콤프턴 전자와 광 전자의 운동 에너지로 변환된다. 이 두 전자의 에너지를 더하면 검출기로 들어온 감마선의 에너지와 같으므로, 입사된 감마선의 에너지가 결정되고, 어떤 핵 준위, 물리적 특성, 방사성 동위원소로부터 발생하였는지를 알 수 있다. 검출기 외부에 있는 감마선원의 위치를 인식하기 위해서는, 전자 변환 위치에 대한 정확한 정보가 요구된다. 감마선의 전자 변환은 원자 크기(나노미터)의 불확실도를 갖는 하나의 지점에서 순간적으로 일어나고, 전자 변환 이전까지의 감마선 궤적은 이 본질적 불확실도 내에서는 직선이다. 콤프턴 전자, 광전자 에너지와 콤프턴 산란공식을 이용하면 콤프턴 산란각이 결정된다. 콤프턴 전자와 광 전자가 발생한 위치를 알면, 산란각이 정의되는 기하학적 중심선이 정해지고, 감마선원의 위치는 이 중심선 둘레로 그려지는 타원 상의 어느 한 점에 위치한다. 콤프턴 산란이 일어나는 위치에 따라 다양한 타원들이 만들어지며, 최소한 세 개 이상의 타원들이 서로 만나는 교점이 감마선원의 위치가 된다. 콤프턴 산란에 대한 이러한 기하학적 고찰로부터 파생된 전기적 집속이라는 특징은 물리학에서 간과되어 왔으나, CT용 콤프턴 카메라를 처음으로 제안하게 된 원리가 되었으며 1991년 발사된 COMPTEL 우주망원경의 위치 인식 원리로 이용되었다.

콤프턴 카메라가 실증되고 의료용 및 산업용으로 실용화되기까지 개발하여야 할 요소기술들이 많으며, 특히 비교적 단순한 기존 영상장비의 영상처리 및 획득 기술과는 원리적인 측면에서 그 성격을 달리하므로 많은 핵심기술에 대한 기초연구가 이루어져야 하고 이 기술들을 융합하고 실용화하는 통합기술이 개발되어야 한다. 엑스선원이나 감마선원으로부터 방출되는 광자의 궤적은 감마선원의 위치에 대한 정보를 지니고 있다. 이 정보를 산출해 내기 위하여, 일차적으로 산란부(Scatterer)라 불리는 검출기 내부

에서 콤프턴 산란이 발생한 3차원적 위치와 광자의 양자변환 에너지를 계측하고, 이차적으로 콤프턴 산란된 광자가 흡수부(Absorber)라 불리는 검출기 내부에서 광전효과에 의하여 최종적으로 에너지를 모두 잃어버린 3차원적 위치와 광자의 양자변환 에너지를 계측하는 감마선궤적 계측기술이 필수적이다. 즉, 한 번의 콤프턴 산란과 한 번의 광전효과에 의하여 양자변환된 입사 감마선(또는 엑스선)의 궤적에 대한 위 네 가지 검출요소를 계측하고 콤프턴 산란의 전기적 집속을 적용하여 감마선원의 3차원적 위치나 분포를 결정할 수 있다. 감마선원의 위치에 대한 정확도는 바로 이 계측된 네 가지 검출요소의 정확도에 절대적으로 의존하므로 감마선궤적 계측기술은 콤프턴 카메라의 연구개발에 가장 중요한 핵심기술이 된다. 위치민감형(Position-sensitive) 감마선 검출기를 이용하여야만 이 기술을 구현해 낼 수 있으며, 90년대 중반부터 제작이 가능하게 된 픽셀형 또는 분할전극형 반도체 검출기를 이용하여야 한다. 감마선 에너지 영역에서 에너지 분해능이 우수한 게르마늄 검출소자가 가장 유망하며, 실리콘이나 CZT와 같은 상온 반도체 검출소자 역시 엑스선이나 저 에너지 감마선에 대하여 제한적으로 이용될 수 있다.

감마선궤적 계측기술에서는 전통적인 엑스선 및 감마선 계측에 비해 수십 배에 달하는 출력신호를 처리하여야 한다. 이렇게 방대한 출력신호를 고속으로 처리하기 위해서는 전통적인 아날로그 신호처리 방식보다는 디지털 신호처리 방식이 장치개발의 기술적 또는 경제적 측면에서 훨씬 장점이 많다. 이러한 장점은 타 신호처리 분야에서도 보다 일반화된 추세이나 콤프턴 카메라 연구개발에서는 필수적으로 요구되는 신호처리 방식이다. 검출기 내부에서의 양자변환 위치에 대한 3차원적인 정보를 계측하려면 아날로그 방식으로는 정확도에 대한 한계가 있기 때문에 검출소자의 전치증폭기로부터 출력되는 신호를 곧바로 디지털 신호로 변환하여 기록하고 펄스 하나 하나의 파형을 분석함으로써 위치에 대한 정확도를 현저하게 향상시킬 수 있게 된다. 콤프턴 카메라 연구개발에서 디지털 신호처리에 입각한 펄스파형 분석기술이 가장 유망한 기술로 간주되고 있으나, 아직 그 기술이 확립되어 있지 못한 상태이다. 특

히, 실용화 수준에서 이루어져야 할 신호처리 기술에는 ASIC이나 FPGA를 제작하기 위하여 선행되어야 할 양자변환 위치 및 에너지 인식을 가능케 하는 기능설정 연구가 설계 단계에서 필수적으로 요구된다. 컴프턴 카메라에 의해 생성되는 이벤트 형태의 추상적이고 복잡한 수치 데이터로부터 3차원 위치 정보를 시각적으로 추출하는 기술로서 3차원 영상 복원(3D image reconstruction) 및 3차원 가시화(3D visualization)에 관련된 기술로 구성된다. 특히, 컴프턴 산란에 내재된 타원추의 곡면을 수치기하학적으로 산출해 내는 3차원 영상복원에는 기존의 기계적 집속에 의한 영상기술을 적용할 수 없으며, 더욱이 영상복원 과정에서 필연적으로 발생하는 비등방적 오차문제를 최소화하는 획기적인 영상복원 기법이 출현하여야 한다. 3차원 가시화 부분에서는 고속 알고리즘 개발, 메모리 요구량의 최적화, 그리고 효과적인 사용자 인터페이스 개발 등 컴퓨터 공학적 연구 역시 중요하게 된다. 컴프턴 산란이라는 양자물리학을 원리로 하고, 첨단 감마선궤적 계측, 디지털 신호처리에 의한 펄스파형 분석, 3차원 영상복원 기술을 융합한 고도의 기술결정체가 컴프턴 카메라이며, 이를 실증하고 나아가 실용화 수준까지 개발하는 데 필수적인 위 세 가지 핵심기술에 대한 집중적인 기초 및 응용연구는 세계를 선도할 만한 새로운 문제의 발굴, 광범위한 신기술 및 응용분야를 탄생시킬 것으로 전망한다.

감마선 카메라가 제공해주는 영상은 '기계적 집속(Mechanical collimation)'이라는 단순한 감마선 제어 메커니즘으로 인해 커다란 시·공간적 한계를 지니고 있었고, 이의 극복과 아울러 의료영상의 일대 혁신을 가져올 컴프턴 카메라에 있어서는 당시의 감마선 계측기술 수준으로 그 원리의 검증조차도 힘든 실정이었다. 1980년대 초반, M. Singh 등이 당시의 하

전입자(전자) 검출기법과 감마선 검출기법을 통한 '컴프턴 카메라의 원리 검증(Proof-of-principle)연구'에서 의료용 기기로의 현실화 가능성을 확인한 이래로[2], 천체, 의료 및 산업 등 크게 3가지 분야에서 연구가 진행되어왔다. 다른 분야에 비해 비교적 제약조건이 적은 천체분야에서는 1980년대 후반부터 성간물질 분포 연구 및 gamma-ray burst와 같은 폭발적인 천체현상 연구에 활용되어 그 분야에 있어서 중추적인 역할을 해왔으나[3], 의료 및 산업분야에 있어서는 고도의 영상 해상도 구현에 대한 감마선계측 기술의 한계에 부딪혀 10여 년 동안 이렇다할 결과를 보여주지 못했다. 90년대 중반, 고에너지 입자물리학연구에 활용되던 고분해능 위치판별 기술이 감마선분광학에 이용된 '감마선궤적 계측기법(Gamma-ray Tracking)'이 탄생하면서[4], 답보상태에 있던 컴프턴 카메라 연구에 활기를 불어넣었으며 21세기에 접어든 지금, 컴프턴 카메라의 핵심기술을 선점하기 위한 세계의 경쟁이 시작되고 있는 상황이다. 국내에서는 컴프턴 카메라 뿐만 아니라 감마선궤적 계측기법에 대한 연구조차도 보고된 바 없는 실정이다. 지난 20여 년 동안 진행된 컴프턴 카메라 연구개발에 관한 국내외 주요 연구 동향을 그림 2에 나타내었다.

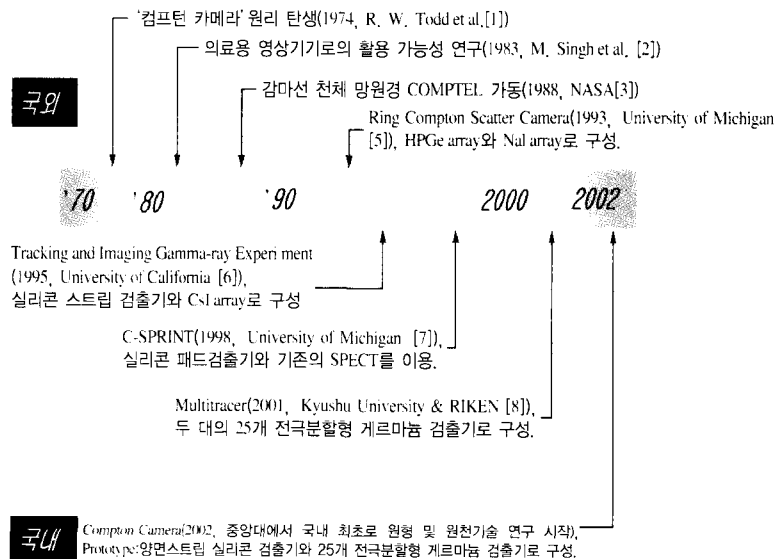


그림 2. 컴프턴 카메라 연구개발의 국내외 주요 연구동향.

2. 검출소자 및 실험장치 개요

2.1 컴프턴 카메라의 특징

컴프턴 카메라가 기존의 기능성 영상장치가 갖고 있는 한계성 및 단점을 극복할 수 있는 가장 중요한 특징은 전기적 집속에 기반하므로 집속기를 필요로 하지 않는다는 점과 광자의 에너지를 구별해 내고 고유 에너지마다 해당 추적자의 영상을 얻을 수 있는 멀티트레이서(Multitracer) 기능을 보유한다는 점이다. 즉, 영상해상도와 투여 방사선량 간의 대립적인 상관관계가 존재하지 않아 적은 방사선량으로도 우수한 해상도를 얻을 수 있으며, 컴프턴 산란의 동력학 조건을 가하면 배경계수를 완벽한 수준으로 제거할 수 있으므로 영상 감도 역시 우수한 수준으로 얻을 수 있다. 멀티트레이서 기능이 전기적 집속과 결합된 컴프턴 카메라가 실용화되면 광자 에너지에 대한 제한이 없어 다중 추적자에 의한 다양한 생체 조직 및 장기의 동시 촬영이 가능해질 것이다. 이러한 점에서 컴프턴 카메라는 분석력과 경제적 측면에서 SPECT(Single Photon Emission Computed Tomography)와 PET(Positron Emission Tomography)를 보완하거나 대체할 수 있는 잠재력을 갖고 있다.

기존의 감마선 영상기기의 기본 원리인 '기계적 집속'은 두꺼운 차폐물(납)을 이용하여 일정 방향 또는 일정 영역의 검출기로 입사되는 감마선만을 선택하는 방법으로 진정한 의미에서 집속이라 할 수 없다. 이 방법에 의한 감마선원의 영상 해상도는 검출 영역의 크기에 의존하는데 검출 영역의 크기는 또한 계수율에 영향을 미치므로 사용되는 검출기의 종류에 따라, 계수율에 의한 검출영역의 한계가 존재하고 이것은 영상 해상도의 한계로 나타나게 된다. 또한, 낮은 계수율에 따른 분석력 저하는 감마선량 또는 촬영시간 증가의 요인이 되며, 완벽한 차폐를 위해 낮은 에너지의 감마선을 이용해야 하는 제약이 따른다. 전적으로 '기계적 집속'에 의존하여 감마선원의 영상을 구현하는 장비가 바로 SPECT이다. SPECT의 영상해상도는 수 cm에 이르고 전자양전자 쌍소멸시 발생하는 감마선을 동시계수법으로 검출하여 영상해상도를 향상시킨 PET 역시 5mm 정도에 달하기 때문에 1mm 이하의 해상도를 갖는 해

부학적 영상기인 MRI(Magnetic Resonance Imaging)나 CT(Computed Tomography)와 극명한 차이를 보인다. 또한 3차원적 영상을 얻기 위해서는 감마선원을 공간적으로 둘러싸거나 스캔을 해야하는 번거로움이 있다.

반면, '전기적 집속'은 렌즈에 의한 '광학적 집속'과 유사한 결과를 낳는다. 광원에서 방출된 개개의 빛이 렌즈 표면의 곡률과 굴절률에 의해 초점면상에서 광원의 영상으로 재구성되는 것과 마찬가지로, 감마선이 검출기 내부 물질의 전자와 일으키는 컴프턴 산란을 이용하여 개개의 감마선들의 산란 전후의 경로를 추적하여 공간상에 감마선원의 영상을 재구성한다는 것이다. 물론 '광학적 집속'의 영상은 입사 광선에 의해 실제 공간상에 형성되지만 '전기적 집속'의 영상은 검출기를 통해 획득된 정보로부터 수리적 계산을 통해 가상의 공간상에 형성된다는 것과 감마선의 우수한 물질 투과력으로 인해 감마선원의 3차원 분포에 대한 정보를 얻을 수 있다는 점에서 큰 차이가 있다. 검출된 감마선 하나 하나가 감마선원의 영상이 되므로 영상의 해상도는 감마선 경로의 정확성에 의존하게 되고 이것은 컴프턴 산란공식에 따른 산란각의 불확실도(검출기에 흡수된 에너지의 불확실도)와 검출 위치의 불확실도에 전적으로 의존하게 된다. 현재 세계적으로 이루어진 선행연구에서 보고된 영상 해상도는 3cm 정도에 불과하나 '감마선궤적 계측기술'을 고려한 컴퓨터 모사 결과에서 2mm 이하까지도 가능한 것으로 나타났다. 현실적으로 5mm 이하의 영상해상도가 실현될 경우, 기존의 감마선 영상기기인 PET와 SPECT를 보완하거나 대체하는 것은 물론이며, 비파괴검사 및 핵연료의 균일도 조사와 같은 산업 및 원자력 활용에의 수요는 폭발적으로 늘어날 것이며, 저에너지 감마선을 방출하는 농축 우라늄(U-235는 186keV)과 플루토늄(Pu-239은 375 및 414keV 감마선을 방출) 핵탄두의 사찰을 위한 컴프턴 라디오그래피까지도 실증할 수 있다 [10].

2.2 위치민감형 감마선 계측용 분할전극 (Segmented) 픽셀형 반도체 검출소자

컴프턴 카메라 개발의 성공여부는 바로 컴프턴 산

관각의 정확성을 위한 검출기의 우수한 에너지 분해능과 검출기에서의 전자변환 위치(Interaction point) 결정에 있다고 할 수 있다. 기본적으로 컴프턴 카메라라는 컴프턴 산란이 일어나는 산란부 검출기와 산란 후 산란된 감마선을 광전효과에 의해 완전히 흡수하는 흡수부 검출기로 구성되어 있다. 2002년 현재, 유망한 검출소자와 이 기술들을 결합하여 2keV(1MeV 감마선을 기준) 수준의 에너지 분해능과 2mm 이하의 위치 분해능을 구현해 내는 것이 가장 핵심적인 사항이다. 실리콘에 비해 원자번호($Z=32$)가 높아 검출효율이 좋고 전자·홀 쌍생성 평균에너지(액체 질소 온도에서 $\sim 3\text{eV}$)가 작아 에너지 분해능이 좋은 게르마늄이 선호된다. 우리가 가장 유망하다고 보는 소자는, 두께 1~2cm 고순도 게르마늄 단결정에 분할전극(Segmented) p^- 전극을 단면에 입히거나 스트립(Strip) p^- , n^+ 전극을 양면에 서로 직교하게 입혀, 검출면적을 2차원적으로 분할시킨 평판 모양의 픽셀형 게르마늄 검출소자이다. 이 2차원 위치민감형 검출기로부터 전자 변환 위치의 3차원적인 (x, y, z) 좌표에 대한 2mm 이하의 위치 분해능을 얻기 위해서는, 게르마늄 반도체의 잘 알려진 물리적 특성을 이용하여 검출소자의 기하학적 구조에 대한 이론 및 설계 연구와 전자 변환 위치를 고도의 신호 처리기술로서 검출하는 성능평가 연구로부터 시작된다.

우리는 산란부 검출기로 양면 스트립 실리콘(Double-sided silicon strip detector; 약칭 DSSD)을, 그리고 흡수부 검출기로 25개 분할전극 게르마늄 검출기를 이용할 계획이다. 양면 스트립 실리콘 검출기는 면적 $5 \times 5\text{cm}^2$, 두께 $300\mu\text{m}$ 인 n-type 실리콘의 양면에 16개씩의 전극을 사로, 세로 상호 직교하게 입힌 것으로 위치분해능 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 가 각각 3mm, 3mm, $300\mu\text{m}$ 정도이며, 감마선과 검출기내의 전자간의 컴프턴 산란시 전자의 궤도운동에너지가 비교적 작아 도플러 퍼짐 현상이 게르마늄 검출기보다 작기 때문에 컴프턴 산란에 대해서는 도플러 퍼짐 효과가 게르마늄 검출기보다 우수하다 [9]. 비록 실리콘 검출기가 게르마늄 검출기보다 검출 효율은 낮지만 컴프턴 도플러 퍼짐에 의한 산란각의 오차를 줄임으로써 영상해상도를 향상시킬 수 있다는 점에서 산란부 검출기로 선택하였다. 흡수부 검출기로 이용할 25개

분할전극 게르마늄 검출기는 면적 $5 \times 5\text{cm}^2$, 두께 2cm인 p-type 게르마늄의 한 면에 $1 \times 1\text{cm}^2$ 인 25개의 전극을, 다른 면에는 한 개의 전극을 입힌 것으로 위치분해능 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 가 각각 1cm, 1cm, 2cm이다. 에너지분해능에 비해 위치분해능이 많이 떨어지지만 주변 전극에 발생하는 유도전하에 의한 신호파형 분석기술을 적용하면 물리적 전극 크기의 10분의 1 이하까지 위치분해능을 향상시킬 수 있다는 사실이 최근 보고된 바 있다 [11]. 우리가 목표로 하는 컴프턴 카메라 원형의 구성은 지금까지 세계적인 선형연구에서도 찾아볼 수 없는 독창적인 것으로, 픽셀형 반도체 검출소자의 유도전하 신호파형 분석을 적용하면 아직까지 보고된 바 없는 5mm 이내의 영상해상도를 구현할 가능성이 매우 높다고 할 수 있다.

컴프턴 카메라의 광범위한 응용잠재력이 입증되었음에도 불구하고 오늘날에도 아직 실용화 수준의 장치가 개발되지 못한 데에는 양자변환 위치 분해능 2mm 이하, 영상해상도 5mm를 구현해 낼 수 있는 세 가지 핵심기술, 즉, 감마선궤적 계측기술, 펄스파형 분석기술, 3차원 영상복원 기술에서 독립적이거나 통합적인 기술을 확보하기가 수월치 않았기 때문이다. 90년대 중반부터 제작이 가능하게 된 분할전극 게르마늄 감마선 검출기는 위치민감형 감마선 계측에서 거의 유일하게 이용될 수 있는 첨단 검출기이다. 최근에는 스트립 게르마늄 감마선 검출기가 출현함에 따라, 감마선궤적 계측기술로서 얻을 수 있는 양자변환 위치에 대한 정보를 스트립 폭인 수 mm 수준까지 얻을 수 있는 가능성이 생겼으며, 주변 전극에 유도되는 유도전하의 디지털 신호파형 분석을 추가적으로 적용하면 전극 크기의 10분의 1 이하 수준의 2차원(x, y) 공간 분해능과 1mm 수준의 깊이(z)에 대한 정확도까지 얻을 수 있는 이론적 기반과 예비 측정결과가 보고된 바 있다. 이를 구현할 수 있다면 임상용 수준의 컴프턴 카메라가 실증되는 것이며, SPECT나 PET의 통상 해상도인 5mm~2cm 보다도 우수한 3차원 영상을 얻을 수 있는 가능성을 예고하는 것이다. 컴프턴 카메라가 실용화되기 위해서는 위치민감형 검출소자 특성연구, 최적화 설계, 신호처리 그리고 3차원 영상화 등에 관련된 요소 기술들이 유기적으로 결합되어야만 가능하다. 차세대 감마

선분광기인 미국 버어클리연구소의 GRETA는, 총 120대의 원통 모양의 분할전극 게르마늄을 배열하여 1MeV 감마선에 대한 검출효율을 40%까지 달성하려는 것이다. 1999년, 원형 1대를 제작하여 개발 목적을 달성시킬 수 있다는 예비결과를 발표한 바 있다. 일본 규슈대와 RIKEN에서는, 평판 모양 분할전극 게르마늄 검출기 2대로 구성된 Multitracer의 연구결과를 2001년 10월 발표하였다. 서로 다른 지점에 배치된 세 종류의 감마선원의 (x, y) 2차원적 위치를 분할전극 면적 $1 \times 1 \text{cm}^2$ 로 해상도 2cm에 달하는 2차원 영상을 얻었다. 미국 미시간대에서는 SPECT 장치의 중심에 컴프턴 산란이 생기도록 픽셀형 실리콘 검출소자를 설치한 C-SPRINT를 만들어 컴프턴 카메라의 원리를 검증한 바도 있다. 2002년 10월 발사된 유럽연합의 INTEGRAL은 CdTe 반도체와 CsI(Tl) 섬광체로 구성된 IBIS 궤적 계측기를 탑재하여 0.015~10MeV 광대역 엑스선·감마선 우주지도 만들 계획을 세웠다. 특수가공된 게르마늄 검출기의 높은 제작 기술을 보유한 프랑스 Eurisys Mesures사는 90년대 중반부터 분할전극 및 스트립 게르마늄 검출기 제작에 관한 한 거의 독점적인 지위를 누리 고 있다. 장래 유망한 스트립 게르마늄 검출소자는, 평판 모양의 두께 1~2cm 게르마늄 양면에 각각 폭 2mm인 p^+ 와 n^+ 스트립을 서로 직교하게 입힌 양면 스트립 게르마늄 검출소자(DSGD)이다. 이 회사는 이온빔 리소그래피 마스크로 Strip 폭 2mm, 간격 $100 \mu\text{m}$, 두께 $0.1 \mu\text{m}$ 까지 가진 DSGD를 주문제작할 수 있다. DSGD는 같은 유효 검출면적에서 출력되는 신호채널 수를 현저히 감소시킬 수 있기 때문에 분할전극형 보다 불감시간, 신호처리 비용 면에서도 유리하다. 이 소자는 스트립 폭 2mm 분해능으로 전자 변환의 (x, y) 좌표와 2keV 분해능으로 에너지를 찾아내는 최첨단 검출소자이다. 미국 Perkin Elmer사도 유사한 검출소자를 개발하고 있다. 영국 Micron Semi conductor사는 하전입자 검출용 양면 실리콘 스트립 검출기(DSSD)를 제작해 왔다. 미국 XIA사는 FPGA 집적소자를 통하여 펄스파형 분석기와 Flash ADC가 통합된 전자기기를 제작하여, rare event 현상 및 감마선분광 연구에 유용한 디지털 펄스 처리 전자기기를 생산하고 있다. 이들 대부분 회사들은 긴

밀한 산·학·연 공동개발 형태로 출발하여 성장하고 있다.

2.3 실험장치 개요

우리는 현재 컴프턴 카메라 핵심기술을 개발하기 위한 기초연구에 집중하고 있으며, 디지털 신호처리 방식에 의한 펄스파형 분석기술을 개발하기 위하여 90° 컴프턴 산란을 이용하고 직경 1mm의 집속된 감마선원으로 구성된 컴프턴 분광계를 제작하였다 [그림 3]. 이 장치는 산란부 또는 흡수부 검출기로 유망한 25개의 분할전극 게르마늄 검출기에서의 전자 변환 3차원 위치 결정을 우수한 분해능으로 측정하는 기술을 개발하기 위한 목적으로 개발되었다. 컴프턴 산란에 내재된 원시데이터를 영상 복원화 하는 알고리즘 개발과 비등방적 오차를 줄이는 계산 및 모사 연구를 수행하고 있으며, 컴프턴 카메라의 구조에 대한 최적화 연구를 통하여 두 개의 반도체 검출소자를 통합시키는 설계를 수행하고 있다. 이러한 연구들은 임상용·산업용 컴프턴 카메라를 실증하는 데 기술적 장벽이 되어 왔던 양자 변환 위치 분해능 2mm이하, 최종 영상해상도 5mm를 구현해 낼수 있는 기술을 개발하는 데 중요하다. 현재 컴프턴 카메라 개발을 개발함에 있어 필수적으로 요구되고 있는 3가지 핵심기술을 개발하고 있다. 1) 감마선 검출기 내에서 광자가 전자를 방출하는 위치에 대한 3차원적인 정보와 에너지 및 시간 등의 5가지 검출기 계측량을 고도의 분석력과 2mm 이내의 공간분해능으

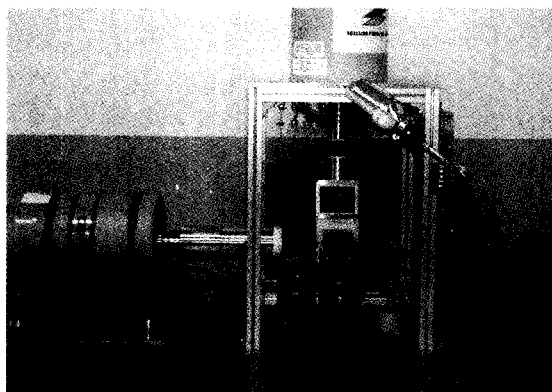


그림 3. 집속 감마선원(직경 1mm)과 컴프턴 분광계.

로 검출하는 위치민감형 감마선 검출기술을 개발하고 있으며, 2) 컴프턴 산란 공식에 내재되어 있는 기하학적 특성으로 인한 영상복원 과정에서의 비등방적 오차문제를 해결하고, 3) 향후 컴프턴 카메라가 상용화 단계에 접어들 때 비용적 측면에서 80% 이상을 차지하고 있는 신호처리 분야에 대한 획기적이고 집적소자인 FPGA나 ASIC의 설계에 필요한 기능 설정 연구를 수행할 계획이다.

'컴프턴 카메라' 개발을 위해 시도되는 기술들은 그 역사가 매우 짧기 때문에 아직까지 국제적으로 인정받는 결과를 산출하지 못하고 있는 실정이다. 그러므로 컴프턴 카메라의 개발은 그 과정에서 수많은 새로운 기술들을 탄생시킬 가능성이 높고, 그것은 핵물리실험 분야뿐만 아니라 반도체 제조분야 및 회로설계분야 등 주변 분야의 기술적 발전에 많은 기여를 할 것이다. 이것은 컴프턴 카메라의 개발을 통해 얻고자 하는 부차적인 목적에 불과하며 궁극적인 목적은 바로 고비용, 저효율의 기존 감마선 영상장비의 대체에 있다. 이러한 대체는 감마선 영상기기의 전통적인 물리적 원리를 혁신시키는 새로운 패러다임에 기반함으로써 궁극적으로는 3차원 영상을 활용한 새로운 영상분야의 창출과 산업적 이용에까지 광범위한 응용성을 보이게 될 것이다. 컴프턴 카메라의 설계기술과 신호처리 기술은 선진국에서도 시작한 지 10여년 밖에 되지 않았고, 훌륭한 물리학·계산기하학 문제, 설계 및 응용연구 등 많은 연구분야가 해결되지 않은 채 남아 있으므로, 오히려 선진국을 뛰어 넘는 세계적인 기술을 탄생시킬 가능성이 높다.

3. 결과 및 고찰

3.1 25개의 분할전극 픽셀형 게르마늄 검출기의 특성

컴프턴 카메라의 흡수부 검출기로 사용할 25개의 분할전극 픽셀형 게르마늄 검출기는 평판형 고순도 게르마늄 결정의 양 면에 각각 $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$ 의 p^- 전극 25개와 $5.0 \times 5.0 \text{ cm}^2$ 의 n^+ 전극을 입힌 위치민감형 검출기로서 유효검출영역이 $5.0 \times 5.0 \times 2.05 \text{ cm}^3$ 이며 프랑스의 Eurisys Mesures사에 주문, 제작한 것

이다. 본 검출기는 25개 p^- 전극(이하 cathode)으로부터 입사 감마선의 이차원적 위치정보를 얻을 수 있으며 n^+ 전극(이하 anode)으로부터는 입사 감마선의 에너지 정보를 동시에 얻을 수 있다. 본 검출기의 대표적인 특징은 바로 위치민감형이라는 것이다. cathode에서 얻는 감마선의 전자변환 위치에 대한 2차원적 정보는 cathode 간의 coincidence 조건과 함께 Compton-scattered event를 선별할 수 있는 정보로도 활용될 수 있는데, 이를 이용하면 Compton background를 제거하여 Peak-to-total ratio가 향상된 감마선 분광스펙트럼을 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 본 검출기를 Compton polarimeter로 이용하여 감마선 선형편극도 측정실험도 수행할 수 있다 [12]. 그림 4는 ^{60}Co source의 1173keV와 1332keV의 감마선에 대해 cathode간의 다양한 coincidence 조건에 따라 얻어진 에너지 스펙트럼을 보여주고 있다. 모든 스펙트럼은 검출기의 anode에서 얻은 것으로 cathode signal은

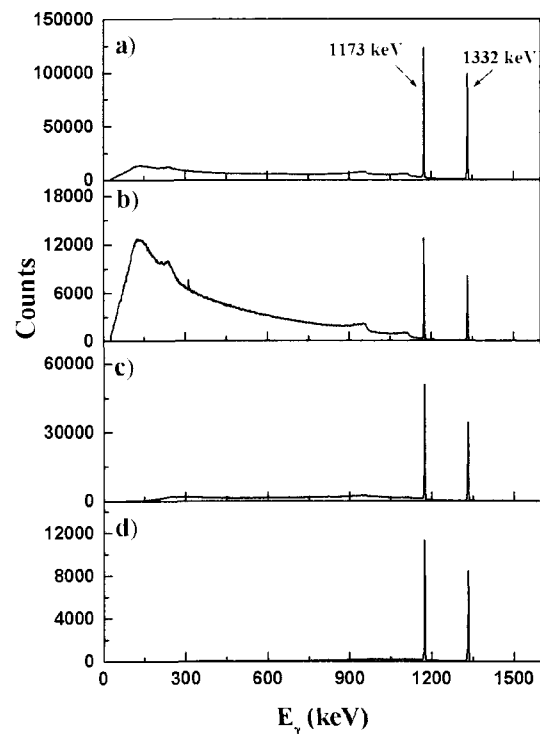


그림 4. ^{60}Co 감마선원에 대한 25개의 분할전극 픽셀형 게르마늄 검출기의 anode 스펙트럼 [13].

coincidence 조건을 위해서만 사용되었다. 그림 4(a)는 cathode 간의 coincidence 조건을 고려하지 않은 경우로 전형적인 게르마늄 검출기의 에너지 스펙트럼과 유사하다. 그림 4(b)는 한 개의 cathode에서만 신호가 발생한 경우로, Compton background가 full energy peak 보다 현저하게 많이 나타나는데 이것은 고에너지 감마선에 대해서 Compton scattering 현상이 photoelectric effect 보다 우세하게 발생된다는 것을 보여준다. 그림 4(c)는 두 개의 cathode가 동시에 신호를 발생시킨 경우에 대한 스펙트럼으로 두 개의 cathode 영역에서 한 번 이상 컴프턴 산란이 일어난 경우이고 그림 4(d)는 세 개의 cathode 영역에 2번 이상 컴프턴 산란이 일어난 이벤트에 대한 스펙트럼이다. 그림 4의 (c)와 (d)에서는 Compton background가 현저히 감소한 것을 볼 수 있는데 특히 (d)의 경우는 Peak-to-total ratio 가 0.32로 본 연구실에서 BGO scintillation detector를 이용하여 제작한 Compton-suppressed High-purity Germanium detector system으로 얻은 0.28 보다도 우수하였다.

본 검출기의 cathode에서 얻어지는 에너지 스펙트럼의 특징은 energy tail 현상이 나타난다는 것이다. 일반적으로 energy tail은 small pixel 효과로 불리는 charge escape 현상과 charge trapping 및 recombination에 의해 발생하므로 cathode의 위치에 따라 그 크기가 다르게 나타나게 된다 [13]. 본 검출기의 또 다른 특징은 anode와 cathode사이의 시간차 스펙트럼으로부터 전자변환 깊이를 결정할 수 있다는 것이다. 이것은 펄스파형 분석과도 연관이 있기 때문에 앞으로 심도 높은 연구가 진행되어야 할 것이다.

3.2 3차원 Green's function 이론방법에 의한 펄스파형 분석

25개의 분할전극 픽셀형 게르마늄 검출기의 위치 분해능은 통상적인 아날로그 신호처리방법을 적용할 경우, Δx , Δy , Δz 가 각각 1cm, 1cm, 2cm에 이르기 때문에 2mm 수준의 우수한 위치분해능을 목표로 하는 컴프턴 카메라에는 적합하지 않다. 위치 분해능을 향상시키는 가장 간단한 방법은 픽셀의 크기를 감소시키거나 전극을 스트립형으로 제작하는 것이지만 고가의 아날로그신호처리 회로들이 다량으로

필요하게 되므로 경제적인 측면에서 볼 때 비효율적이다. 그래서 본 연구진이 선택한 방법이 디지털 신호처리에 의한 펄스파형 분석법이다. 펄스파형 분석법은 반도체 검출기의 특성중의 하나인 감마선의 전자변환 위치에 따른 펄스파형의 변화를 이용한 것으로 이 기술은 게르마늄 검출기에 대한 연구가 한창이던 1960년대말 처음 소개되었으나 [14], 각각의 펄스파형을 기록하고 처리할 수 있는 신호처리기술의 미비로 인해 널리 활용되지 못하였다. 본 연구진은 전자변환 위치에 따른 펄스파형을 측정하기에 앞서서 25개 분할전극 픽셀형 게르마늄 검출기의 위치분해능의 향상을 위한 펄스파형 분석법의 개발을 위한 이론 연구를 수행하였다. 3차원 Green's function method를 이용하여 검출기내에 입사된 감마선이 전자로 변환된 후 전자에 의해 생성되는 전자-홀 쌍에 의해 검출기의 전극에 유도되는 유도 전하 밀도를 계산하였다 [15].

$$\sigma_z = \mp e \frac{8}{\pi ab c^2} \sum_{l, m, n=1}^{\infty} n \sin\left(\frac{l\pi}{a} x\right) \sin\left(\frac{m\pi}{b} y\right) \times \frac{\sin\left(\frac{l\pi}{a} x'\right) \sin\left(\frac{m\pi}{b} y'\right) \sin\left(\frac{n\pi}{c} z'\right)}{\left[\left(\frac{l}{a}\right)^2 + \left(\frac{m}{b}\right)^2 + \left(\frac{n}{c}\right)^2\right]} \quad (1)$$

식 (1)로 주어지는 전극의 유도전하밀도는 전자-홀 쌍이 검출기내부의 전기장에 의해 drift velocity로 전극을 향해 이동하기 때문에 시간에 따라 변하게 되는데 그 변화하는 전하량을 시간에 따라 적분함으로써 펄스파형을 얻을 수 있었다. 그림 5는 위의 계산 결과에 의해 얻은 다양한 전자변환 깊이에 따른 25개의 분할전극 픽셀형 게르마늄 검출기의 anode와 13번(중심) cathode의 펄스파형을 보여주고 있다. 전자변환 위치 중 x, y는 13번 cathode의 중심으로 고정하여 얻은 결과이다. 그림 5에 나타난 바와 같이 깊이에 따라서 anode 및 cathode로부터 발생하는 신호의 risetime이 변한다는 것을 알 수 있다. 이것은 anode와 cathode에서 발생하는 신호의 risetime을 이용하면 전자변환 깊이를 알아낼 수 있음을 나타내는 것이다. 본 연구진은 anode 펄스가 자신의 최대 전하

량의 90%에 도달하는 시간(T_{90})과 cathode 펄스가 자신의 최대 전하량의 50%에 도달하는 시간(T_{50})을 조합하면 전자변환 깊이와 일대일로 대응된다는 것을 찾아내었으며 이러한 관계가 x, y 평면상의 위치가 변할 경우에도 미미한 차이만을 보인다는 것을 발표하였다[15]. 그림 6에서와 같이 T_{90} 과 T_{50} 의 그래프상에서 깊이가 1mm 이하의 정확도로 확연히 구분됨을 알 수 있으며 또한 (x, y) 위치의 변화에 크게 변하지 않음을 알 수 있다. 그러므로 전자변환의 깊이는 anode와 cathode의 펄스로부터 T_{90} 과 T_{50} 의 관계를 이용하면 (x, y) 위치와 무관하게 1mm 이하의 정확도로 결정할 수 있다.

(x, y) 위치에 대해서는 anode와 cathode의 펄스파형에 변화가 미비하므로 펄스파형 분석보다는 transient signal을 이용하는 것이 유리하다. transient signal이란 전자-홀 쌍이 생성된 지점에서 가장 가까운 전극(주전극)뿐만 아니라 그 주변의 전극에도 전하가 유도되어 발생하는 신호를 말한다. 전자-홀 쌍이 주전극으로 이동함에 따라 주변 전극과의 거리가 멀어지게

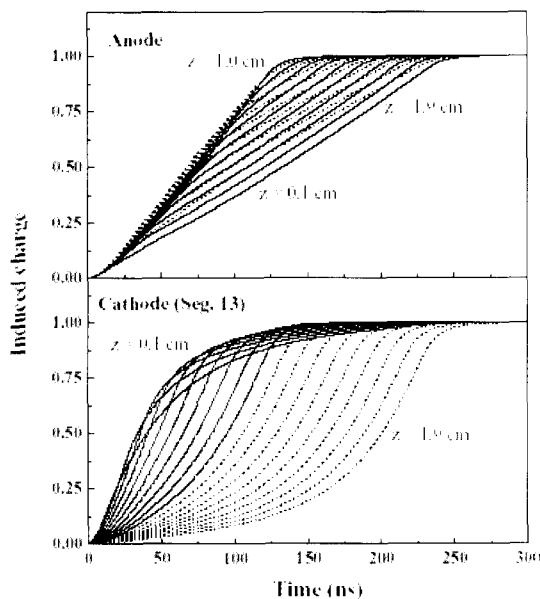


그림 5. 전자변환 깊이의 변화에 따른 anode와 cathode의 펄스파형의 변화. 13번 cathode의 중심에 대해 전자변환 깊이(z)를 1mm 간격으로 변화시켰다[15].

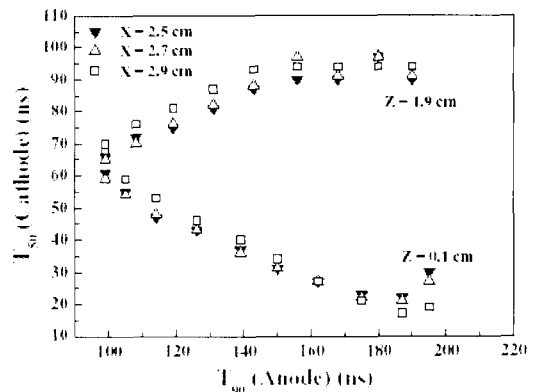


그림 6. 전자변환 깊이에 따른 T_{90} 과 T_{50} 의 2차원 plot [15].

되고 전자-홀 쌍에 의한 전기장 가운데 주변 전극에 수직인 성분이 급격히 작아지게 되므로 transient signal은 그 크기가 매우 작다. 그러나 양은 전극과의 거리에 민감하게 의존하므로 전자변환 (x, y) 위치에 따라 그 크기의 변화가 생기게 된다. 그러므로 만약 13번 cathode의 한 가운데에서 전자변환이 발생되었다면 그 주변의 cathodes(8번, 12번, 14번, 18번)에는 동일한 크기의 transient signal이 생성될 것이다.

그러나 12번 방향으로 치우친 지점에서 전자변환이 발생하면 8번cathode와 18번 cathode에서 발생하는 transient signal은 동일하지만 12번 cathode와 14번 cathode에서 발생하는 transient signal에는 차이가 생기게 될 것이다. 그 미묘한 차이를 명확히 구별하기 위해서 식 (2)와 같은 asymmetry 값 R을 정의하였다.

$$R = \frac{C_{12} \cdot C_{14}}{C_{13} \cdot C_{18}} \quad (2)$$

전자변환의 x, y 위치에 대한 R의 변화를 알아보기 위해 전자변환 위치를 13번 cathode의 중심으로부터 x축으로 1mm씩 이동하면서 R값을 계산한 결과를 그림 7에 나타내었다. 결과에 따르면 asymmetry 값 R이 위치에 따라 선형적으로 변하며 또한 1mm 이내의 정확도로 (x, y) 위치를 결정할 수 있다. 그러므로 T_{90} 과 T_{50} 을 이용한 펄스파형 분석과 asymmetry R을 이용한다면 25개의 분할전극 픽셀형 게르마늄 검출

기의 경우, 1mm×1mm×1mm의 3차원 위치 분해능을 얻을 수 있다는 이론적 가능성이 나온다.

2.3 영상복원 및 가시화

컴프턴 카메라의 개발에 있어서 간과할 수 없는 중요한 기술이 바로 영상복원 및 가시화기술이다. 컴프턴 카메라가 제공하는 데이터는 기존 영상장비의 데이터와는 달리 컴프턴 산란공식에 의해 공간상에 존재확률로 변환되는 영상복원의 전처리 과정이 필요하다. 모든 데이터가 이러한 전처리 과정을 거친 후, 공간상에 부여된 존재확률밀도에 따라 영상을 결정하는 영상복원화 작업이 진행되게 되고, 그 후 가시화기법에 따라 2차원 또는 3차원 영상을 얻게 된다. 컴프턴 카메라 데이터에 대한 영상복원 및 가시화 연구가 본격적으로 진행된 지는 불과 5년여밖에 되지 않았다. 그 동안 기존의 영상복원 기법의 응용 및 Neural network simulator를 이용한 새로운 시도가 있었으나 아직까지 효과적인 해법을 찾지 못하고 있는 실정이다. 현재 컴프턴 카메라의 영상복원기법 가운데 가장 널리 활용되고 있는 것이 바로 Back projection method이다. 전처리 과정을 통해 식 (3)과 같은 원뿔방정식으로 주어지는 영상의 존재확률밀도를 격자화된 image 공간상에 투영하는 방법으로, 영상복원과정이 단순하여 가시화시간이 짧은 장점이 있으나 존재확률밀도의 투영과정에서 발생하는 수치해석적 오차로 인해 비등방적인 영상분해능을 나타

나게 된다.

$$[n_x(x-x_i) + n_y(y-y_i) + n_z(z-z_i)]^2 = \cos^2\theta[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2] \quad (3)$$

본 연구에서는 이러한 비등방성을 최소화하기 위해서 image 공간상의 격자와 원뿔간의 거리에 따라 확률밀도값을 보정함으로써 실제 영상과 영상복원과정에서 발생하는 background 간의 확률밀도의 차이를 증폭시켰으며, 그 결과로 수치해석적 오차를 상대적으로 감소시킬 수 있었다. 또한 이렇게 얻어진 영상을 바탕으로 확률밀도가 최대인 격자를 제외한 나머지 격자에 대해서 각 데이터의 원뿔이 투영되는 확률밀도 값을 감소시킴으로써 영상복원과정에서 발생하는 background를 제거하였다. 그림 8의 (a), (b), (c)는 위의 세 가지 영상복원법을 통해 얻은 point spread function을 보여주고 있다. Back projection method의 경우, 영상 분해능을 나타내는 point spread function의 FWHM이 0.4mm였으며, 거리 보정을 취한 경우에는 0.3mm, 그리고 background까지 제거한 경우에는 0.2mm 이하의 값을 얻을 수 있었다. 그림 8의 (d)는 본 연구실의 머릿글자인 'CSL' 형태로 분포하는 감마선원에 대한 컴프턴카메라의 데이터를 거리 보정과 background 제거를 통해 복원한 영상이다.

위의 영상복원에 사용된 데이터는 본 연구실에서

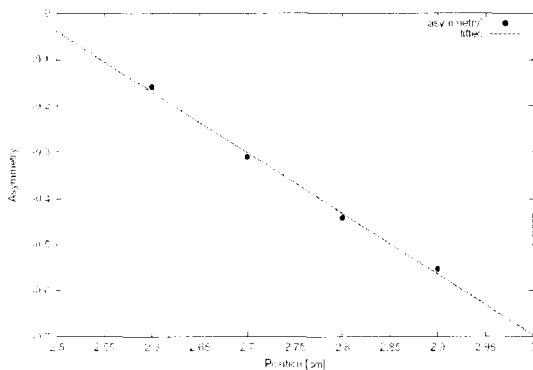


그림 7. 13번 cathode의 중심에서 14번 cathode 쪽으로 1mm씩 이동할 때 12번 cathode와 14번 cathode사이의 asymmetry.

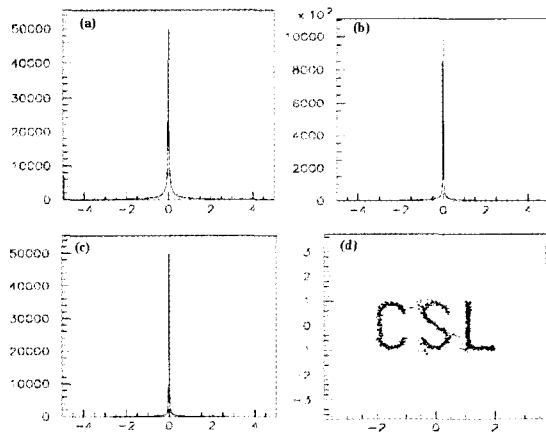


그림 8. 영상복원 기법에 따른 point spread function과 'CSL' 글자의 영상.

자체 개발한 컴프턴 카메라용 Monte Carlo simulation code를 통해서 만든 것으로 영상복원 기법의 비교를 위해서 감마선 계측 시 발생하는 전자 변환위치에 대한 오차 및 검출기의 에너지분해능은 고려되지 않은 것이다. 그러나 전자 변환위치 오차 및 검출기의 에너지 분해능은 영상분해능에 막대한 영향을 끼치며, 이들에 의해 악화되는 영상 분해능은 위의 영상복원방법을 가지고서는 근본적으로 개선되지 않기 때문에 이들의 효과를 최소화 또는 분리해내기 위한 새로운 영상복원기법을 개발 중에 있다.

2.4 컴프턴 분광계 개발 및 위치인식 측정

앞선 Green's function 이론방법을 통해 얻은 펄스파형 분석법을 감마선의 전자변환 3차원 위치 결정에 적용하기 위해 이를 검증할 컴프턴 분광계를 개발하였다. 컴프턴 분광계는 90°로 산란하는 컴프턴 산란 이벤트만을 선택하여 전자변환 3차원적 위치를 결정하는 장치로서, 25개의 분할전극 픽셀형 게르마늄 검출기로 입사되는 감마선의 위치(x, y)를 5cm 두께의 납 collimator를 이용하여 약 1mm 구경의 집속된 빔으로 입사시켜, 감마선의 입사방향과 90°를 이루게 하고, 검출기의 옆면에 동일한 납 collimator과 고순도 동축형 게르마늄 검출기를 설치하여, 25개의 분할전극 픽셀형 게르마늄 검출기에서 90°로 컴프턴 산란되는 감마선만을 계측함으로써 컴프턴 산란에 의한 전자변환 3차원 위치를 결정하게 된다. 이 때 25개 분할전극 픽셀형 게르마늄 검출기의 cathode 및 anode에서 발생하는 신호를 디지털 펄스파형 분석기인 DGF4C를 이용하여 저장하고 감마선 입사 위치에 따른 파형의 변화와 주변 전극에서 발생하는 transient signal을 가지고 펄스파형을 분석하게 된다. 펄스파형 분석에서 감마선의 입사 위치는 게르마늄 crystal에 대한 절대적 위치를 나타내므로 게르마늄 crystal의 정확한 위치를 결정하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해 펄스파형 분석실험에 앞서 게르마늄 crystal의 위치보정 실험을 수행하였다. 검출기 표면에 게르마늄 crystal의 크기와 위치, 그리고 cathode 전극의 위치를 표식한 mask를 제작하여 씌우고 납 collimator에 의해 직경 1mm로 집속된 감마선을 이용, 게르마늄 crystal의 중앙에 있는 13번

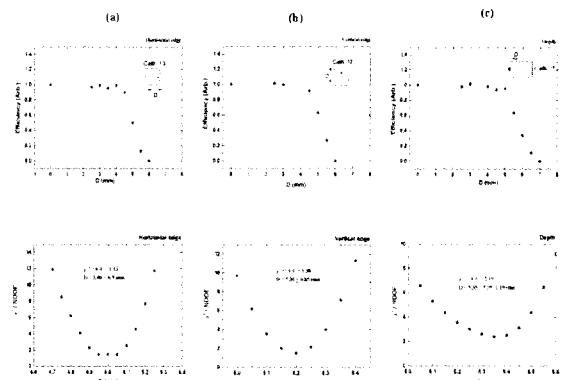


그림 9. 위치보정 실험의 데이터와 컴퓨터 모사와의 비교 및 Chi-square fitting 결과.

cathode에 대해서 상·하, 좌·우로 0.5mm씩 입사 위치를 바꿔가며 감마선의 양을 계측하였고 게르마늄 crystal의 옆면에서도 같은 방식으로 감마선을 입사시킨 후 입사위치와 가장 가까운 15번 cathode에 계측된 감마선의 양을 계측하였다. 이때 이용한 감마선은 full peak 검출효율을 높이고 변환된 고에너지 전자의 운동에 따른 전자 변환위치의 불확정성을 최소화하기 위해 ²⁴¹Am에서 발생하는 59.5keV 감마선이다. 각 위치에 따라 계측된 감마선 full peak의 양과 Monte Carlo simulation을 통해 얻어진 결과와의 Chi-square fitting을 통해서 mask에 대한 게르마늄 crystal의 위치를 결정하였는데 [그림 9], 그 결과 x방향으로는 0.0±0.9mm, y방향으로는 0.20±0.85mm 그리고 z방향으로는 0.35±1.15mm의 차이가 있음을 알았다. 앞으로 본 실험결과를 바탕으로 감마선의 입사 위치를 보정하여 펄스파형 분석 연구를 수행할 계획이다.

4. 결론

현재 이용되고 있는 엑스선 및 감마선 영상장비는 광자흡수나 기계적 집속기를 통해 선택적인 광자만에 의한 영상을 구현하고 있는 반면, 컴프턴 카메라는 광자의 양자적 현상인 컴프턴 산란과 광전효과에 의하여 광자가 전자로 변환된 지점에서의 양자변환 위치와 에너지를 계측하고, 컴프턴 산란의 기하학적

해석으로 파생되는 전기적 집속이라는 신 개념의 영상 원리를 적용하여 광자 발생위치 및 분포에 대한 3차원적 영상을 구현하는 기술에 기반한다. 이는 기존의 감마선 영상장비가 갖는 단일 감마선원에 대한 에너지 한계, 고 방사선량, 낮은 영상해상도 등의 문제점을 해결해 줄 수 있을 뿐만 아니라, 전기적 집속이라는 혁신적인 패러다임에 따른 광범위한 응용력을 보유하고 있다. 컴프턴 카메라의 획기적이고도 광범위한 활용도를 감안해 볼 때, 국가의 연구개발 투자는 반드시 필요하며 바로 지금이 가장 적합한 시기이다. 2002년 1월을 기준으로, MRI는 국내에 300여 대, X-ray CT는 약 2,000대, SPECT는 약 200대, PET는 8대가 설치되어 임상에 사용되고 있다. 설치 현황은 선진국 수준이나 거의 대부분 수입한 장비이며, 국내 제조업체에 의하여 개발된 장비는 극히 일부이다. 연구개발 현황도 기계적 집속 또는 광자흡수 등 기존 계측기술의 연장선에서 국산화하고 있다. 체적형 반도체 원재료만 가공하여도 만들 수 있는 픽셀형 반도체 검출소자를 제작하는 회사나 연구소는 아직 없다. 반도체 D램 세계 1위 수출국이며, 실험연구용을 비롯하여 CT나 비파괴검사 Radiography에 쓰이는 기본 검출기를 전량 수입에 의존하고 있다는 점은 역설적이지 아닐 수 없다. 향후 5년 내에, 1cm 정도의 영상해상도를 가진 컴프턴 카메라의 원형이 개발될 수 있을 것으로 전망한다. 향후 10년 내에 임상용·산업용 수준의 컴프턴 카메라가 상용화되면, 의료, 방사선 이용분야에서의 과학적 탐구와 건강복지에 크게 이바지 할 것이며 국가 산업발전에 막대한 경제적 파급효과를 가져다 줄 것이다. 기존의 Medical Imager로 보기 힘들었던 환부를 보게 될 것이며, 2개 이상의 방사선원을 인체에 투여하여 각 장기나 암에 축적된 3차원 분포를 동시에 볼 수 있을 날도 머지 않았다. X-ray CT, MRI, SPECT, PET 그리고 MEG와 함께 컴프턴 카메라는 획기적인 Imager로 자리할 것이다. 임상용 컴프턴 카메라의 출시 가격은 2백 만 불은 될 것으로 보여, 세계시장 및 국내시장 규모는 10조 원은 될 것으로 예측한다.

우리는 컴프턴 카메라에 대한 기초연구를 수행하고 있으면서도, 상용화를 위한 실증연구를 진행시키

고 있다. 검출기 내부에서 감마선의 컴프턴 산란위치의 불확실도는 3차원 영상해상도 악화의 주요인으로 작용하기 때문에, 컴프턴 분광계를 이용하여 분할전극에 유도되는 신호 파형과 컴프턴 전자 및 광 전자의 발생 위치와의 상관관계를 밝혀내어 3차원 검출 위치분해능을 향상시키는 연구를 추진하고 있다. 에너지 분해능에 크게 의존하는 컴프턴 산란각의 오차는 주어진 검출기의 고유 에너지 분해능 외에도 컴프턴 산란 시 전자의 운동에 따른 도플러 퍼짐에 크게 의존하므로, 에너지 분해능을 악화시키는 인자에 대한 면밀한 연구가 필요하며, PET 수준의 영상해상도 1cm를 구현해내기 위해서는, 검출기 특성연구 외에도 Monte Carlo 모사를 통한 컴프턴 카메라 구조에 대한 최적화 설계가 요구된다. 궁극적으로는 양면 스트립 실리콘 검출기와 분할전극 게르마늄 검출기로 구성된 컴프턴 카메라의 실증장치를 개발하고, 각 검출기로부터 발생하는 원시 데이터를 효과적으로 처리할 수 있는 실시간 고속 신호처리 회로와 컴프턴 카메라 전용의 평가 결과로부터 얻어진 원시 데이터의 분석, 영상복원 및 가시화 프로그램을 개발할 계획이다. 또한, 핵의학, 산업, 원자력 및 국방 등 다양한 응용 분야에서 요구하는 제원의 설정 및 기능들에 대한 조사 연구를 수행하는 한편, 기존 영상과의 연계 및 영상결합을 통해 새로운 영상기법을 창출하고, 실용화 단계에서 중요하게 될 FPGA 및 ASIC의 설계를 위한 요소기술을 개발할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2002-070-C00031).

참고 문헌

- [1] R. W. Todd, J. M. Nightingale, and D. B. Everett, "A proposed γ camera", Nature, Vol. 251, p. 132, 1974.
- [2] M. Singh, "A electronically collimated gamma camera for single photo emission computed tomography. Part One: Theoretical considerations and design criteria",

Medical Physics Vol. 10, p. 421, 1983.

[3] R. Diehl, et al., "The COMPTEL experiment on the NASA Gamma-ray Observatory", Space Science Reviews, Vol. 49, p. 85, 1988.

[4] I. Y. Lee, "Gamma-ray tracking detectors", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Vol. 422, p. 195, 1999.

[5] J. B. Martin, G. F. Knoll, D. K. Wehe, N. Dogan, V. Jordanov, and N. Petrick, "A ring Compton scatter camera for imaging medium energy Gamma ray", IEEE Trans. on Nuclear Science, Vol. 40, p. 972, 1993.

[6] T. J. O' Neill, D. Bhattacharya, S. Blair, G. Case, O. T. Tumer, R. S. White, and A. D. Zych, "The TIGRE desktop prototype results for 511 and 900 keV Gamma rays", IEEE Trans. on Nuclear Science Vol. 42, p. 933, 1995.

[7] J. W. LeBlanc, N. H. Clinthorne, C-H Hua, E. Nygard, W. L. Rogers, D. K. Wehe, P. Weilhammer, and S. J. Wilderman, "C-SPRINT: a prototype Compton camera system for low energy Gamma ray imaging", IEEE Trans. on Nuclear Science, Vol. 45, p. 943, 1993.

[8] Y. F. Yang, Y. Gono, S. Motomura, S. Enomoto, and Y. Yano, "A Compton camera for multitracer imaging", IEEE Trans. on Nuclear Science, Vol. 48, p. 656, 2001.

[9] J. W. Le Blanc, "A Compton camera for low energy Gamma ray imaging in nuclear medicine applications", Ph. D. thesis, University of Michigan, 1999.

[10] B. F. Philips, et al., "Performance of a Compton telescope using position-sensitive germanium detector", IEEE Trans. on Nuclear Science, Vol. NS-43, p. 1472, 1996.

[11] K. Vetter, A. L. Kuhn, I. Y. Lee, R. M. Clark, M. Cromaz, M. A. Deleplanque, R. M. Diamond, D. Fallon, G. J. Lane, A. O. Macchiavelli, M. R. Maier, F. S. Stephens, C. E. Svenssen, and H. Yaver, "Three-dimensional position sensitivity in two-dimensionally segmented HP-Ge detectors", Nuclear Instruments and Methods in Physics

Research A, Vol. 452, p. 223, 2000.

[12] J. H. Lee, C. S. Lee, J. Y. Huh, J. Y. Moon, Y. K. Kwon, Y. Gono, T. Fukuchi, S. Tanaka, T. Shinozuka, M. Fujita, A. Tamazaki, T. Sonoda, Y. K. Kim, and J. S. Chai, "The linear polarization measurement of Gamma rays in 155Gd using a segmented Compton polarimeter", J. Korean Physical Society, Vol. 40, p. 793, 2002.

[13] Y. K. Kwon and C. S. Lee, "Characteristics of Gamma-ray energy and timing spectra for a planar-type segmented germanium detector", J. Korean Physical Society, to be published.

[14] M. G. Strauss, R. N. Larsen, and L. L. Sifter, "Pulse shape distributions from gamma rays in lithium drifted detector", Nuclear Instruments and Methods, Vol. 46, p. 45, 1967.

[15] J. Y. Moon, and C. S. Lee, "Pulse shape analysis of induced charges in a segmented planar germanium gamma-ray detector using the Green's function method", submitted to Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.

· 저 · 자 · 약 · 력 ·

성명 : 이 춘 식

❖ 학 력

- 1980년 서울대 물리학과 이학사
- 1988년 Rutgers University 핵물리학 이학박사

❖ 경 력

- 1988년-1992년 Rutgers 탄성가속기 연구소 연구원
- 1992년-1993년 서울대 자연과학종합연구소 연구원
- 1993년-현재 중앙대 물리학과 교수
- 1995년-1997년 중앙대 물리학과 학과장
- 2000년-2001년 미국 Oak Ridge 국립연구소 교환 교수
- 2002년-현재 한국물리학회 원자핵물리학과 위원장

성명 : 이 주 한

❖ 학 력

- 1995년 중앙대 물리학과 이학사
- 1997년 중앙대 물리학과 이학석사

❖ 경 력

- 1997년-현재 중앙대 물리학과 박사과정