

4-D 전산모사 기법을 이용한 회전형 컴프턴 카메라의 영상 특성 평가

서희¹, 이세형⁺, 박진형¹, 김찬형¹, 박성호⁺, 이주한⁺, 이준식⁺, 이재성⁶

¹한양대학교 원자력공학과, ⁺울산대학교 의과대학 서울아산병원 방사선종양학과,

⁺중앙대학교 물리학과, ⁶서울대학교 핵의학교실

2009년 4월 7일 접수 / 2009년 6월 26일 1차수정 / 2009년 7월 3일 채택

컴프턴 카메라는 컴프턴 산란 현상에 기반을 둔 감마선 영상장치로 기존의 영상장치가 가지는 여러 가지 한계점들을 극복할 수 있어서 차세대 영상장치로 관심을 받고 있다. 본 연구에서는 4D 전산모사 기법을 이용하여 회전형 컴프턴 카메라의 영상 특성을 평가하였으며, 원자력 산업용으로 활용될 수 있는 컴프턴 카메라에 대하여 가능성을 확인하여 보았다. 고정된 시스템 보다는 선원 주위를 회전하여 영상을 획득할 경우 선원의 위치 및 분포를 상대적으로 정확하게 결정할 수 있음을 확인하였다. 또한, 컴프턴 카메라의 3차원 영상 기능을 통해 대형 원자력 시설 해체 시 콘크리트 벽안에 존재하는 방사화된 철근 구조의 위치 및 분포를 한 쪽 벽면에서 정확히 결정할 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서 활용한 4D 전산모사 기법은 컴프턴 카메라 분야에 최초로 적용된 기술이며, 이는 움직이는 장기 및 LINAC 겐트리, 4-D CT 등 동적 구조에 대한 모델링이 가능하므로 다양한 응용 분야에서 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

중심어 : 컴프턴 카메라, 몬테칼로 전산모사, 4-D, Geant4, 원자력 시설 해체

1. 서론

몬테칼로 전산모사 기법은 무작위적으로 생성되는 난수(random number)를 이용하여 각종 물리량을 추정할 수 있는 매우 유용한 도구이다. 물리학 및 수학을 비롯하여 신뢰도 분석, 리스크관리, 금융공학 등 확률이 포함된 의사 결정 문제에서 광범위하게 활용되고 있으며, 특히 결정론적 방법으로 결정하기 어려운 문제들이나, 비용이나 시간적인 문제, 또는 위험성 등으로 인해 실험적으로 획득하기 어려운 결과들을 확인하는데 도움이 되고 있다. 원자력 및 방사선 분야에서는 기본적으로 방사선과 물질의 상호작용을 모델링하여 선량 평가, 차폐 계산, 생물학적 영향 평가, 의학물리, 원자로심 설계, 방사선 계측기 개발 등 다양한 목적을 위해 사용하고 있다. 현재까지 매우 많은 수의 몬테칼로 기법을 이용한 전산코드들이 개발되어 있으며, 그 중 MCNP[1-4], Geant4[5,6], EGS[7,8] 등이 방사선 수송 몬테칼로 전산모사 코드로 주로 사용되고 있다[9].

Geant는 GEometry ANd Tracking의 약자로 1970년대 CERN과 KEK의 주도로 고에너지 입자 물리 분야에서 몬테칼로 전산모사를 수행하기 위해 개발되었다. 처음에는 Fortran언어를 기반으로 개발되었으나, 1994년 개발자 그룹인 RD44를

구성하여 C++ 프로그래밍 언어를 기반으로 객체 지향 프로그래밍 기술(object-oriented technology)을 적용하여 다시 개발하기 시작하였다. 이후 1998년 Geant4라는 명칭으로 정식 배포되었고, 객체 지향 프로그래밍이 지니는 개방성과 유연성에 힘입어 적용 분야의 확장을 가져왔다. 현재는 원래 개발목적이었던 고에너지 입자물리 및 핵물리 분야를 넘어 천체물리, 가속기 물리, 의학물리, 방사선 차폐 등 광범위한 영역에서 활용되고 있다. Geant4 툴킷의 중요한 특징으로는 타겟이나 검출기가 전산모사를 하는 동안에 그 위치를 계속적으로 변경할 수 있다는 점을 들 수 있다. 즉, 기존의 3D 전산모사가 아닌 시간항을 포함하는 4D 전산모사가 가능하다는 장점을 가지고 있으며, 이는 다양한 응용 분야에서 유용하게 활용될 수 있다. 예로, 방사선을 수송하는 동안 움직이는 장기나 빔 노즐 내에 있는 돌아가는 휠 또는 LINAC 겐트리 등을 모사할 수 있으며, 이들이 각자 독립적인 주기를 가지고 운동을 하는 경우에도 종합적으로 모델링이 가능하다. 만약 이를 3D 전산모사 기법을 이용하여 고정된 구조로 나누어 전산모사를 수행한다면, 그 경우의 수가 매우 많으므로 상당한 시간과 노력이 요구될 것이다.

우리는 선행 연구를 통해 Geant4 툴킷을 기반으로 하여 4D 전산모사 기법이 적용된 컴프턴 영상장치 시뮬레이터를 개발한 바 있다[10]. 본 연구에서는 시뮬레이터를 이용하여 고정형과 회전형 컴프턴 카메라의 영상 특성을 비교하였으며, 원자력 산업용으로 활용될 수 있는 컴프턴 카메라에 대하여 가능성을 확인하여 보았다.

책임저자: 김찬형, chkim@hanyang.ac.kr, 한양대학교 원자력공학과
133-791 서울시 성동구 행당동 17 한양대학교 원자력공학과

2. 재료 및 방법

2.1 컴프턴카메라

컴프턴 카메라의 영상 원리는 1973년 Schönfelder에 의해서 최초로 제안되었다[11]. 기계적 집속 장치를 대신하여 전기적 집속이라는 신개념의 집속방법을 도입한 컴프턴 카메라는 에너지에 거의 제한이 없이 고에너지 광자의 3차원적 발생 위치를 고정된 위치에서 결정할 수 있다. 이러한 장점을 바탕으로 COMPTEL을 비롯한 여러 종류의 컴프턴 망원경이 개발되어[12-15], 우주 감마선 측정 분야에서 광범위하게 활용되고 있다. 핵의학 분야에는 1974년 Todd 등에 의하여 컴프턴 카메라의 원리가 Nature지에 소개되고[16], 그 후 1983년 Singh 등에 의해 최초로 기계적 집속기를 제거한 Anger camera와 HPGe 검출기로 구성된 핵의학용 컴프턴 카메라의 원형이 개발되었다[17]. 이후 1990년대 중반에 들어서면서부터는 반도체 검출기와 신호처리 기술의 발전에 힘입어 세계 여러 나라에서 다양한 구조의 컴프턴 카메라가 개발되고 있으며[18-28], 우리나라에서도 반도체 검출기로 구성된 소형의 컴프턴 카메라를 개발하고 있다[29,30].

컴프턴 카메라의 장점으로는 (i) 고정된 위치에서 3차원 영상을 획득할 수 있으며, (ii) 기계적 집속기를 사용하지 않기 때문에 원리적으로 높은 영상 감도를 제공할 수 있으며, (iii) 감마선의 에너지가 높아질수록 도플러 퍼짐에 의한 영향은 감소하고 검출기 에너지 분해능은 다소 향상되어 결과적으로 영상 해상도가 향상된다는 점, 그리고 (iv) 에너지를 계측하기 때문에 다양한 에너지를 방출하는 방사성동위원소를 개별적으로 한 번에 영상화하는 다중 추적자 기능을 가지고 있다는 점을 들 수 있다. 기존의 핵의학용 방사선 영상장치들은 기계적 집속기를 사용하기 때문에 영상 감도가 낮으며, 이로 인해 고해상도의 영상을 획득하기 위해서는 많은 양의 동위원소를 환자에게 투여해야 하는 단점이 있다. 또한 사용 가능한 감마선의 에너지에 제한이 있으므로 활용 가능한 표지 화합물에 제약이 따르게 된다. 그리고 단면영상을 획득하기 위해서는 대상체를 중심으로 링 형태의 검출시스템을 제작하여 대상체를 스캔해야 한다는 조건이 있다. 그러나 컴프턴 카메라는 광자의 컴프턴 산란반응을 기초로 하는 전기적 집속이라는 새로운 집속방법을 사용하여 이러한 한계를 극복할 수 있기 때문에 차세대 핵의학 및 분자 영상장치로서 관심을 받고 있다.

2.1.1 영상원리

컴프턴 카메라는 컴프턴 동역학(Compton kinematics)을 이용하여 광자의 궤적을 추적하고, 이를 이용하여 방사선원의 삼차원적분포를 영상화하는 감마선 영상장치이다. 컴프턴 카메라는 일반적으로 두 대의 위치민감형 검출기를 사용하는데, 광자가 컴프턴 산란 반응을 일으키는 산란부와 산란된 광자가 최종적으로 흡수되는 흡수부로 구성된다. 3차원 공간상에 존재하는 방사선원에서 발생한 광자가 산란부로 입사하여 한 번 컴프턴 산란 반응을 일으킨 후, 흡수부로 입사하여 완전히 흡수되면 이를 유효반응이라고 정의하고 영상 재구성에서 사용한다. 이 때, 두 검출기에서 계측된 반응위치 정보로부터 광자가 산란부에서 흡수부로 진행한 궤적을 알 수 있으며, 이 궤적을 잇는 산란축을 생성할 수 있다. 또한, 흡수부에 전달된

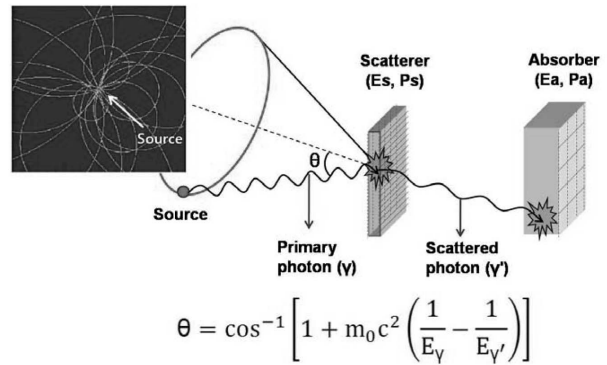


Fig. 1. Principle of Compton camera.

에너지(E_2)를 컴프턴 산란 공식에(Eq. 1) 적용하여 산란각 θ 를 결정할 수 있고, 광자는 생성된 축을 중심으로 θ 의 각도로 입사했음을 알 수 있다. 하지만 방위각은 알 수 없으므로, 단지 θ 의 각도를 갖는 원뿔곡면 위의 어느 한 지점에서 광자가 방출되었다는 것만을 추정할 수 있다(Fig. 1). 원리적으로 이러한 원뿔곡면 3개만 있으면 이 곡면들의 교점을 통해 3차원 공간상에서 점선원의 위치를 결정할 수 있게 된다.

$$\theta = \cos^{-1} \left(1 + m_0 c^2 \left(\frac{1}{E_1 + E_2} - \frac{1}{E_2} \right) \right) \quad (1)$$

여기서, m_0 는 전자의 정지 질량이며, c 는 빛의 속도, E_1 은 산란부에 흡수된 에너지, E_2 는 흡수부에 전달된 에너지이다.

이렇게 어떠한 기계적인 집속 장비 없이, 검출기에서 측정된 위치와 에너지 정보만을 이용하여 방사선원의 위치를 추적하는 방식을 통상 전기적 집속(electronic collimation) 방식이라 한다. 컴프턴 카메라는 앞서 설명한 원뿔곡면을 정확히 결정해야 높은 해상도의 영상을 획득할 수 있으며, 이는 구성 검출기로 사용되는 산란부와 흡수부의 에너지 분해능과 반응위치 분해능에 전적으로 의존하게 된다. 그리고, 핵에 속박된 전자의 운동량에 의해 발생하는 도플러 퍼짐 현상은 컴프턴 카메라의 영상 해상도에 달성 가능한 물리적인 한계로 작용한다[31].

2.1.2 국내·외 개발 동향

일본은 현재 가장 활발히 컴프턴 카메라를 개발하고 있는 나라 중 하나이며 현재 세 가지 타입의 컴프턴 카메라를 개발하고 있다. 하나는 교토대, 히타치 메디칼 등이 공동연구를 통해 개발하고 있는 컴프턴 카메라(Electron Tracking Compton Camera, ETCC)로 time projection chamber (TPC)와 섬광검출기를 이용하고 있다[20]. 기체검출기를 산란부로 사용하고 있으므로 효율이 떨어진다는 단점이 있으며, 흡수부로 섬광검출기를 사용하고 있어서 에너지 분해능이 떨어진다는 단점이 있다. 다만, 컴프턴 산란에 의해 발생한 전자의 진행 경로를 결정하여 원뿔곡면이 아닌 원호를 생성하여 선원의 위치를 찾기 때문에 주변 노이즈를 낮추고 해상도를 높일 수 있다는 장

점을 가지고 있다. 다른 하나의 컴프턴 카메라(Gamma-ray Emission Imaging, GREI)는 이화학연구소(RIKEN)에서 개발하고 있으며 게르마늄 스트립 검출기 두 대를 사용하고 있다 [23]. 이 경우에는 에너지 분해능이 매우 우수하다는 장점이 있으나, 산란부 검출기도 게르마늄을 사용하고 있으므로 도플러퍼짐 현상이 크게 작용한다는 한계가 있으며 큰 픽셀 사이즈 때문에 다중 산란에 대한 시퀀스를 결정해야 한다는 어려움이 존재한다. 마지막으로 일본우주항공개발기구(JAXA) 과 동경대 등에서 우주 감마선 측정용으로 개발중인 컴프턴 카메라로 양면 실리콘 스트립 검출기(double-sided silicon strip detector, DSSD)와 CdTe 검출기를 사용하고 있다[24]. 신호처리 회로로 ASIC 소자를 개발하여 사용하고 있어서 DSSD의 에너지 분해능이 2 keV 정도로 매우 높다. 구성 검출기들의 반응위치분해능도 매우 우수하여 최종적으로 영상 해상도가 매우 뛰어난 컴프턴 카메라를 개발하고 있다.

미국에서도 역시 다양한 기관에서 각기 다른 구조의 컴프턴 카메라를 개발하고 있다. 대표적인 기관으로는 미시간 대학교, 로렌스 버클리 국립연구소(LBNL), 로렌스 리버모어 국립연구소(LLNL)를 들 수 있다. 미시간 대학에서는 기존의 감마선 영상장비인 SPECT 모듈에 기계적 집속기를 제거하여 흡수부로 사용하고, 실리콘 패드 검출기를 산란부로 이용하는 컴프턴 카메라(Compton-Single Photon RING Tomograph, C-SPRINT)를 개발하여 원리 검증연구를 수행한 바 있으며 [25], 최근 삼차원 위치민감형 CdZnTe 검출기를 컴프턴 카메라에 이용하기 위한 특성 연구도 수행 중에 있다[22]. LBNL과 LLNL에서는 보안검색 분야에 적용하기 위해 Si(Li) 검출기와 게르마늄 스트립 검출기를 이용하여 컴프턴 카메라(Compact Compton Imager-2, CCI-2)를 개발하고 있다[21].

유럽입자물리연구소(CERN) 및 스페인의 CSIC-IFIC, 노르웨이의 IDEAS사, 미국의 미시간대/오하이오주립대 등이 공동연구 그룹 CIMA를 결성하여 전립선암을 진단하기 위한 컴프턴 카메라를 개발하고 있으며[18], 컴프턴 영상기법의 원

리와 양전자 방출 단층촬영(positron emission tomography, PET)의 원리를 결합한 Compton PET을 개발하고 있다[26]. 독일의 Siegen 대학에서는 각종 검출기 인자들이 컴프턴 카메라의 성능에 미치는 영향을 전산모사를 통해 정량적으로 평가한 바 있으며[27], 최근 실리콘 드리프트 검출기(silicon drift detector, SDD)와 Anger camera의 NaI(Tl) 검출기 모듈을 이용하여 컴프턴 영상 실험 결과를 보고한 바 있다[28].

국내에서는 중앙대학교에서 양면 실리콘 스트립 검출기(DSSD)와 분할 전극형 게르마늄 검출기(SEGD)를 이용하여 컴프턴 카메라를 개발하고 있다[29]. 이러한 구조는 도플러 퍼짐에 의한 영향이 가장 작은 실리콘 검출기를 산란부로 사용하고, 흡수부로는 에너지 분해능이 좋은 게르마늄 검출기를 이용함으로써 최적의 구성은 갖추고 있다. 다만, 흡수부 검출기의 픽셀 사이즈가 상당히 큰 편이어서, 반응위치 분해능의 저조하다는 문제가 있다. 따라서, 현재 흡수부의 반응위치 분해능 향상 및 CdZnTe 검출기로의 교체 등을 위한 연구가 진행중에 있다. 한양대학교에서는 소형이면서도 고해상도의 컴프턴 영상을 획득할 수 있도록 이중 산란형이라는 독특한 구조의 컴프턴 카메라를 개발하고 있다. 반응위치 분해능이 매우 우수한 DSSD 두 대를 산란부로 사용하고, NaI(Tl) 섬광 검출기를 흡수부 검출기로 사용하고 있다. 이를 통해 산란축을 보다 정확히 결정하여 해상도를 높이겠다는 것이 핵심 아이디어이다[30]. 이중 산란형 컴프턴 카메라는 영상감도는 고 해상도 감마선 영상이 요구되는 다양한 분야에서 활용 가능할 것으로 기대한다.

2.2 컴프턴 영상장치 시뮬레이터(Compton imaging simulator, CIS)

선행 연구[10]를 통해 개발된 컴프턴 영상장치 시뮬레이터는 범용 몬테칼로 전산모사코드인 Geant4 툴키트를 계산 엔진으로 하고 있으며, 사용자 인터페이스는 MATLAB을 활용하여 Windows 환경에서 친숙하게 컴프턴 카메라 전산모

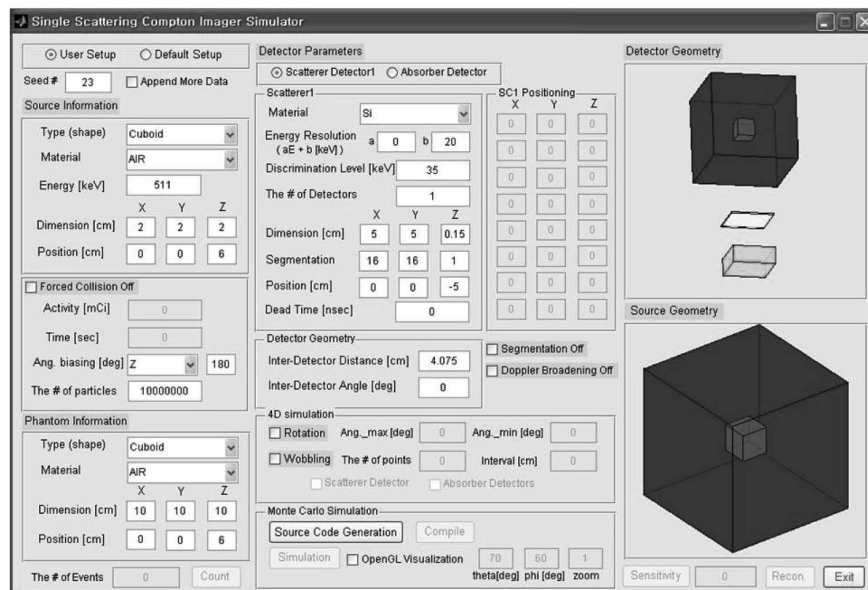


Fig. 2. Main window of Compton imaging simulator.

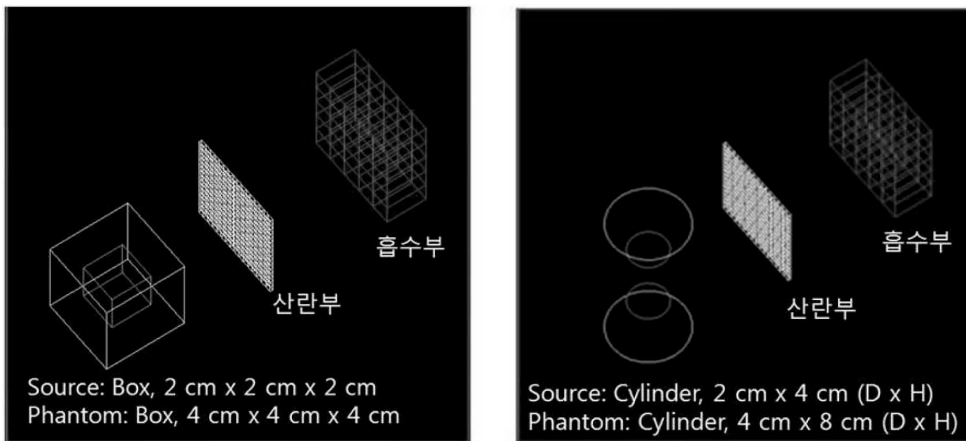


Fig. 3. Visualization of the simulation geometry by using OpenGL driver incorporated into the simulator.

사 연구를 수행할 수 있도록 개발되었다. CIS에서는 산란부 검출기가 박스형의 단일 산란형 타입과 이중 산란형 타입을 모두 모델링할 수 있도록 개발되었다. 시뮬레이터 내부를 간략히 설명하자면, 사용자가 GUI (graphical user interface) 환경으로 개발된 CIS를 활용하여 간단히 각종 인자들의 값을 입력하여 주면, CIS는 입력받은 데이터를 적용하여 Geant4 소스 파일들을 생성한다. 이후, Cygwin 환경에서 소스파일들을 컴파일하고 몬테칼로 전산모사를 실행한다. 전산모사 결과인 컴프턴 데이터는 내장된 영상재구성 알고리즘을 사용하여 컴프턴 카메라 영상재구성에 사용된다. 영상재구성 알고리즘은 단순 역투사(simple-backprojection, SBP) 알고리즘과 기댓값 최대화(expectation-maximization, EM) 알고리즘 [32,33]이 탑재되어 있다. 최종적으로는 재구성된 영상과 영상해상도 및 영상감도를 사용자에게 제공하게 된다. Fig. 2는 개발된 CIS의 주 입력창을 보여주고 있다. 이를 이용하여 몬테칼로 기법에 대한 전문적인 지식이나 Geant4 툴킷 사용에 대한 경험이 없이도 다양한 조건에서 컴프턴 카메라 전산모사를 손쉽게 수행할 수 있도록 개발되었다. 또한, 사용자의 오류를 최소한으로 줄이고자, 입력된 데이터에 대한 전산모사 구조를 OpenGL 드라이버를 이용하여 사용자에게 보여주는 3차원 가시화 기능을 탑재하였다(Fig. 3). CIS의 입력은 아래와 같이 크게 4가지 부분으로 나누어져 있다.

- (i) 선원: 전산모사에 사용될 선원에 관한 조건을 설정하는 부분으로 점선원뿐만 아니라 다양한 체적선원을 포함하도록 개발되었으며, 선원의 모양 및 크기, 에너지, 위치 그리고 입자의 개수를 설정할 수 있다.
- (ii) 팬텀: 선원을 감싸는 팬텀의 구조를 정의하는 부분으로 팬텀의 모양, 물질, 크기 그리고 위치 등을 설정할 수 있다.
- (iii) 검출기 인자: 컴프턴 카메라를 구성하는 산란부와 흡수부 검출기의 인자들에 대한 부분으로 검출기의 크기 및 위치, 물질, 에너지 분해능, 반응위치 분해능 등 주요 검출기 인자들을 설정할 수 있다.
- (iv) 기타: 추가 선택부분으로 컴프턴 카메라 시스템을 회전시키면서 전산모사를 수행할 수 있도록 4D 전산모사 옵션을 설정할 수 있으며, 영상재구성 알고리즘 개발 시에 사용 가능한 각종 노이즈가 제거된 컴프턴 데이터를 생

산할 수 있도록 설정하는 것이 가능하다.

4D 전산모사를 위해서는 선원에서 발생된 방사선의 속도가 검출기나 타겟이 움직이는 속도보다 현저히 빠르다는 필요조건이 존재한다. 만약 이러한 조건을 만족한다면, 하나의 발생입자가 진행되는 동안은 전산모사 구조를 변경할 필요가 없다. 따라서 사용자는 몇 개의 입자를 발생시킬 때마다 구조를 변경하여 줄 것인지를 결정하여 주면 된다. 이를 위해 Geant4 툴킷에서 "G4VPVParameterisation" 클래스를 상속받아 사용해야 한다. 해당 클래스는 하나의 입자가 발생할 때마다 실행되어, 멤버 함수를 통해 전산모사에 사용되는 검출기 및 타겟의 위치, 크기 및 모양, 물질 등을 변경할 수 있다.

국내에서 개발 중인 컴프턴 카메라의 산란부 검출기는 양면 실리콘 스트립 검출기로 그 두께가 0.15 cm이므로, 수백 keV의 에너지를 갖는 감마선은 대부분 산란부 검출기 내에서 반응을 하지 않고 그냥 투과하게 된다. 상층으로 나오는 DSSD의 최대 두께는 0.2 cm이며, 대부분의 기관에서 산란부 검출기로 사용 중인 실리콘 검출기는 0.1 cm 이하이다. Si(Li) 검출기를 사용하는 경우에도 두께는 1 cm 밖에 되지 않는다. 따라서 효율적인 전산모사를 위해서 분산감소기법의 활용이 필수적이다. 개발된 CIS에서는 산란부 검출기 내부에서의 컴프턴 산란의 확률을 높여주고, 대신 입자의 가중치를 낮추어 주는 기법(exponential transform technique)을 사용하여 계산 속도를 10배 이상 향상시켰다. 이로써 일반적으로 많은 시간이 소요되는 몬테칼로 전산모사를 효율적이고도 정확하게 수행할 수 있었다. 여기에 추가적으로 선원에서 발생하는 감마선의 각도에 제한을 주는 source biasing 기법을 적용하여 주어 최종적으로 계산시간을 100배 이상 단축시켰다.

3. 결과 및 논의

3.1 회전형 컴프턴카메라 성능 평가

컴프턴 카메라는 원리적으로 고정된 위치에서 3차원의 영상을 획득할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 고정된 시스템에서 감마선의 반응정보를 계속하고 영상을 획득할 경우 구성 검출기가 위치한 동일 축 방향으로 영상이 왜곡되는 특징

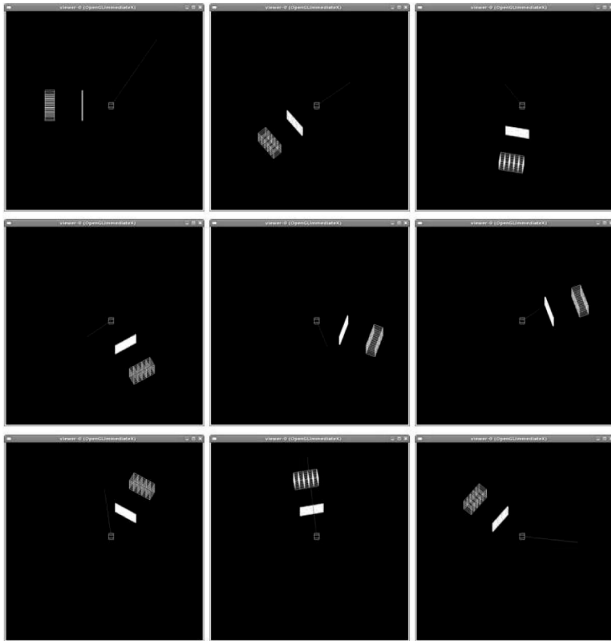


Fig. 4. Simulation geometry for a rotating Compton camera.

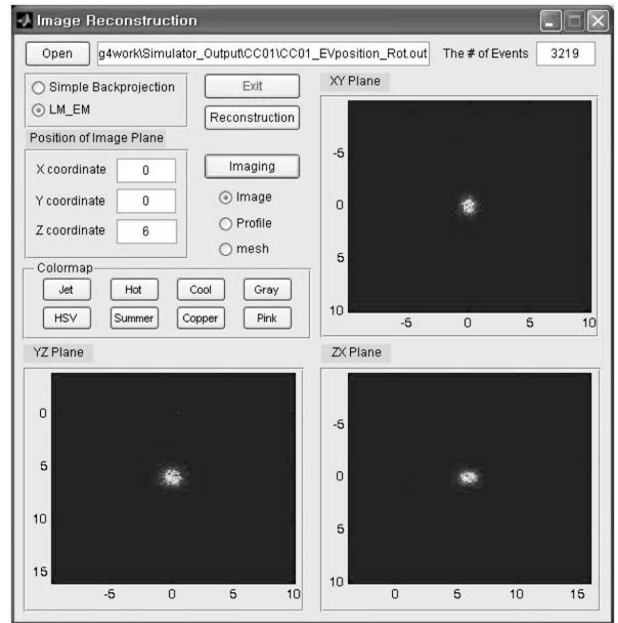


Fig. 6. Compton images obtained from a rotating system.

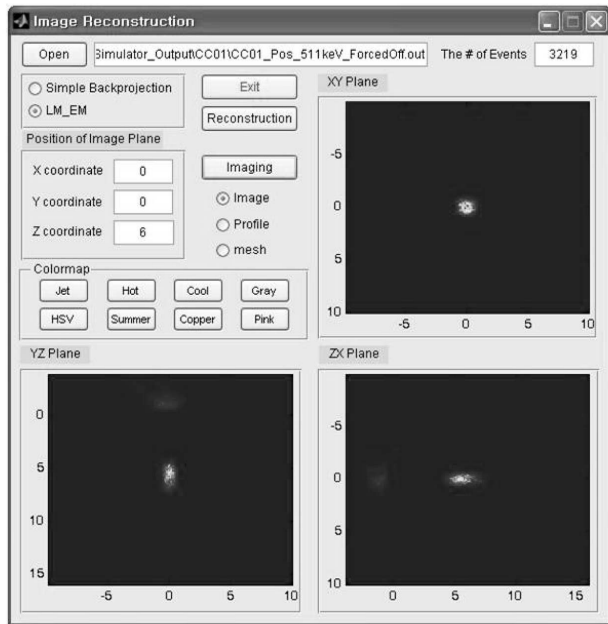


Fig. 5. Compton images obtained from a stationary system.

이 있다. 이러한 왜곡 현상을 개선하고자 본 연구에서는 시뮬레이터를 이용하여 선원주위를 360° 회전하는 동적 시스템의 컴프턴 영상장치에 대해 모델링하여 4D 몬테카를로 전산모사를 수행하였다(Fig. 4). 중앙대학교에서 개발중인 단일 산란형 컴프턴 카메라 시스템을 모델링하였으며, 감마선원으로는 산란부 검출기 앞 6 cm 지점에 위치하는 511 keV의 감마선을 방출하는 점선원으로 가정하였다. 컴프턴 영상은 시뮬레이터에 탑재된 EM 알고리즘을 이용하여 획득하였다.

Fig. 5에서 보여주는 바와 같이 고정된 시스템의 경우 YZ, ZX 평면의 영상에서 점선원임에도 불구하고 축 방향(Z 축)으로 컴프턴 영상이 왜곡되어 길게 늘어지는 현상이 나타난다. 이는 컴프턴 영상장치가 고정되어 있을 경우 영상 재구성 시 역투사되는 콘의 진행 방향이 제한되어 감마선원이 존재하는 위치의 영상 상자의 격자뿐 아니라 콘이 역투사되는 방향과 같은 축 상의 앞과 뒤의 한정된 격자에도 비슷한 수의 콘이 누적되기 때문이다. 하지만 동적 시스템의 컴프턴 영상장치의 경우 회전을 하면서 유효반응을 획득하기 때문에 영상 재구성 시 다양한 축 방향으로 콘을 역투사하여 선원 위치에 근접한 격자에 누적되는 콘의 수를 분산시키므로 Fig. 6과 같이 개선된 컴프턴 영상을 획득할 수 있었다. 따라서 높은 해상도를 요구하는 의료용 컴프턴 카메라의 경우에는 고정된 시스템보다는 회전형의 컴프턴 카메라를 개발해야 할 것으로 생각된다.

3.2 원자력 산업용 컴프턴 영상장치 활용 가능성

원자력 발전소와 같은 대형 원자력 시설의 해체 시 콘크리트 벽 안에 존재하는 방사성 오염물질의 분포를 정확하게 파악하는 것은 방사선 방호의 관점에서 매우 중요한 문제이나 오염물질의 유무만을 확인할 수 있을 뿐 방사선원의 분포를 삼차원적으로 정확히 찾아내는 방법은 아직까지 확립되어 있지 않다. 특히, 깊이 방향의 정보를 획득할 수 있는 방법은 아직까지 개발되지 않고 있다. 핵의학 영상장치인 SPECT나 PET과 같이 삼차원 영상을 획득하기 위해 대상체를 중심으로 회전시키는 방법은 산업용으로는 적절하지 않으며, 대형 시설의 경우에는 스캔을 통한 삼차원 영상획득은 불가능에 가깝다. 따라서, 고정된 위치에서 삼차원 영상을 획득할 수 있는 컴프턴 카메라가 가장 효과적인 해결책으로 생각된다.

본 연구에서는 이러한 분야에서 컴프턴 카메라의 활용가능성을 확인하기 위해 콘크리트 내 2 cm 깊이에 위치한 지름

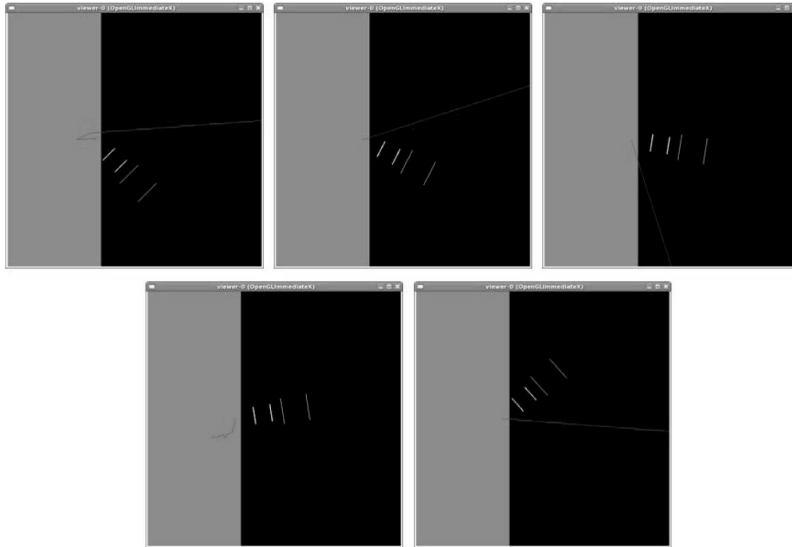


Fig. 7. Simulation geometry for a rotating system with the gamma source in the concrete wall.

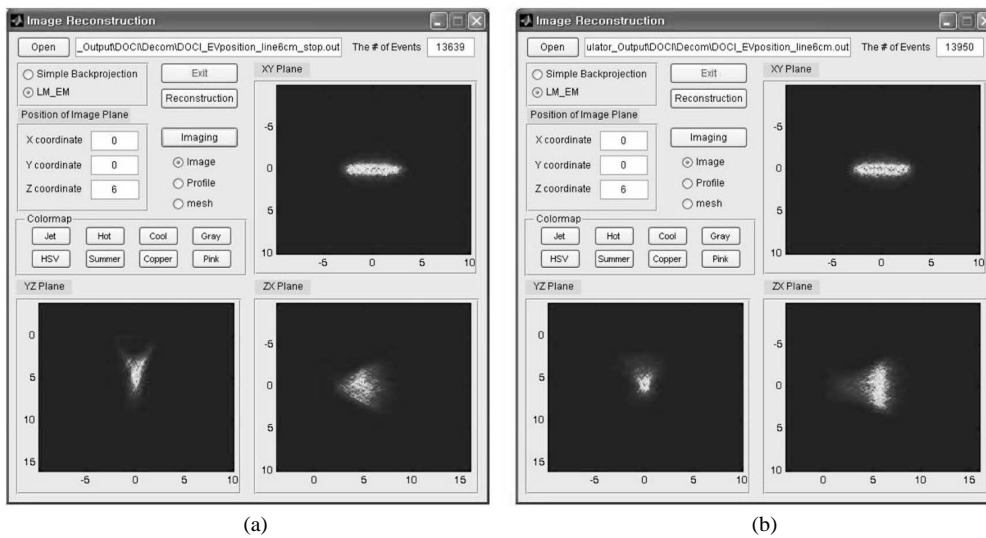


Fig. 8. Compton images of the line source located in the concrete wall obtained from (a) a stationary system, and (b) a rotating system.

0.1 cm, 길이 6 cm의 선선원 (line source, ^{137}Cs , 662 keV)에 대하여 컴프턴 영상을 획득하였다. 컴프턴 영상장치는 현재 한양대학교에서 개발중인 이중 산란형 시스템을 모델링하였으며, 보다 정밀하게 선원의 형태 및 위치를 결정하기 위하여 Fig 7과 같이 -45° 에서 45° 로 움직이는 회전형 컴프턴 카메라를 4D 몬테칼로 전산모사 기법을 이용하여 모델링하였다. 컴프턴 영상은 EM 알고리즘을 이용하여 획득하였다. Fig. 8은 각각 고정된 시스템과 동적 시스템으로 획득한 선선원에 대한 컴프턴 영상이다. 그림에서 보는 바와 같이 고정된 시스템에서 보다 동적시스템의 경우 축 방향의 영상이 상당히 개선되어 보다 정확한 선원의 형태를 확인할 수 있었다. 비록 회전형 시스템이지만, 한 쪽 벽면에서 한정된 각도로만 회전을 시켜주어도 고해상도의 3차원 영상을 획득할 수 있다는 것이 컴프턴 카메라만의 장점이다. 이러한 3차원 가시화 기능을 통

해 컴프턴 영상장치가 향후 의학 분야뿐만 아니라 원자력 산업 분야에서도 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

4. 결론

컴프턴 카메라는 전기적 집속이라는 새로운 개념의 영상 원리가 적용된 감마선 영상장치이다. 컴프턴 카메라는 기존의 물리적 집속기를 사용하는 영상장치가 가진 한계들을 극복할 수 있어서 광범위한 응용분야에서 활용이 가능할 것이며, 이를 실증하기 위해 현재 전 세계적으로 다양한 목적을 위하여 각자 독자적인 구조의 컴프턴 카메라를 개발하고 있다. 본 연구에서는 4D 전산모사 기법이 탑재된 컴프턴 영상 장치 시뮬레이터를 이용하여 회전형 컴프턴 카메라의 영상

특성을 평가하였으며 원자력 산업용으로의 활용 가능성을 확인하여 보였다. 4-D 몬테카를로 전산모사 기법을 이용하여 선원 주위를 회전하는 동적 시스템의 컴프턴 카메라에 대한 연구 결과로서 컴프턴 영상장치가 움직이면서 감마선의 반응정보를 획득할 경우 고정된 시스템에서 보다 더욱 개선된 영상을 획득할 수 있음을 확인하였다. 또한, 컴프턴 카메라의 활용방안에 대한 연구의 한 부분으로, 컴프턴 카메라는 한 쪽 측면에서도 선원의 분포를 정밀하게 추적할 수 있으며, 특히 일정 각도로 움직일 경우 컴프턴 영상이 상당히 개선되어 선원의 형태 또한 정밀하게 결정할 수 있음을 알 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 컴프턴 카메라가 향후 대형 원자력 시설 해체 시 콘크리트 벽안에 존재하는 방사화된 철근의 깊이 정보를 정확히 결정하는 데에 활용될 수 있을 것으로 기대한다. 4-D 전산모사 기법과 관련하여서는 동적 구조에 대한 모델링이 가능하므로 폐나 심장과 같이 움직이는 장기나 양성자 치료에서 사용되는 가속기의 빔노즐, 방사선 치료기의 겐트리, 4D CT 등 시간에 따라 구조 및 위치가 변하는 다양한 시스템을 모델링할 때 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

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

참고문헌

1. X-5 Monte Carlo Team. MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. LA-UR-03-1987, Los Alamos National Laboratory, 2005.
2. Forster RA, Cox LJ, Barrett RF, et al. MCNP Version 5. Nucl. Instr. Meth. B 2004;213:82-86.
3. Hendricks JS, et al. MCNPX 2.3.0 User's Guide (Unrestricted Distribution Version). LA-UR-02-2607, Los Alamos National Laboratory, 2002.
4. Hendricks JS, McKinney GW, Durkee JW, et al. MCNPX, Version 26c. LA-UR-06-7991, Los Alamos National Laboratory, 2006.
5. Agostinelli S, Allison J, Amako K, et al. GEANT4-A simulation toolkit. Nucl. Instr. Meth. A 2003;506(3):250-303.
6. Allison J, Amako K, Apostolakis J, et al. Geant4 Developments and Applications. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2006;53(1):270-278.
7. Hirayama H, Namito Y, Bielajew AF, Wilderman SJ, and Nelson WR. The EGS5 code system. SLAC-R-730, Stanford, CA; Stanford Linear Accelerator Center, 2006.
8. Kawrakow I and Rogers DWO. The EGSnrc code system: Monte Carlo simulation of electron and photon transport. NRCC PIRS-701, 2006.
9. Basaglia T, Bell ZW, Dressendorfer PV, Larkin A, and Pia MG. Writing Software or Writing Scientific Atricles? IEEE Trans. Nucl. Sci. 2008;55(2):671-678.
10. Lee SH, Seo H, Park JH, Park SH, Lee JS, Lee JH, Lee CS, and Kim CH. CIS: a GUI-based Software System for Monte Carlo Simulation of Compton Camera. Nucl. Technol. (in press).
11. Schoenfelder V, Hirner A, and Schneider K. A telescope for soft gamma ray astronomy. Nucl. Inst. Meth. 1973;107:385-394.
12. Schoenfelder V, et al. Instrument description and performance of the imaging gamma-ray telescope COMPTEL aboard the Compton gamma-ray observatory. Astrophys. J. Suppl. Ser. 1993;86:657-692.
13. Blosler PF, Ryan JM, McConnel ML, et al. The MEGA

- Project for Medium Energy Gamma-ray Astronomy. Chin. J. Astron. Astrophys. 2006;6(S1):388-392.
14. Brandt S, Budtz-Jørgensen C, Lund N, et al. X-ray observations of the Crab Pulsar and Nebula with JEM-X on INTEGRAL. Astronomy & Astrophysics 2003;411:L433-L436.
15. Bhattacharya D, O'Neill TJ, AkyüA, Samimi J, Zych AD. Prototype TIGRE Compton γ -ray balloon-borne telescope. New Astronomy Review 2004;48:287-292.
16. Todd RW, Nightingale JM and Everett DR. Proposed Gamma Camera. Nature 1974;251:132-134.
17. Singh M, Doria D. An Electronically Collimated Gamma Camera for Single Photon Emission Computed Tomography. Part II: Image reconstruction and preliminary experimental measurements. Med. Phys. 1983;10:428-435.
18. Llosa G, Bernabeu J, Burdette D, et al. Last Results of a First Compton Probe Demonstrator. IEEE Trans. Nucl. Sci. 2008;55(3):936-941.
19. Watanabe S, Tanaka T, Watanabe S, et al. Performance Study of Si/CdTe Semiconductor Compton Telescopes with Monte Carlo Simulation. Nucl. Instr. and Meth. A 2007;579:878-885.
20. Kabuki S, Hattori K, Kohara R, et al. Development of Electron Tracking Compton Camera using micro pixel gas chamber for medical imaging. Nucl. Instr. and Meth. A 2007;580:1031-1035.
21. Vetter K, Burks M, Cork C, et al. High-sensitivity Compton Imaging with Position-sensitive Si and Ge Detectors. Nucl. Instr. and Meth. A 2007;591:363-366.
22. Du YF, He Z, Knoll GF, Wehe DK, Li W. Evaluation of a Compton scattering camera using 3-D position sensitive CdZnTe detectors. Nucl. Instr. and Meth. A 2001;457:203-211.
23. Motomura S, Kanayama Y, Haba H, Watanabe Y and Enomoto S. Multiple molecular simultaneous imaging in a live mouse using semiconductor Compton camera. J. Anal. At. Spectrom. 2008;23:1089-1092.
24. Watanabe S, Takeda S, Ishikawa S, et al. Development of semiconductor imaging detectors for a Si/CdTe Compton camera. Nucl. Instr. and Meth. A 2007;579:871-877.
25. Leblanc JW, Clinthorne NH, and Hua CH, et al. C-SPRINT: A prototype Compton Camera system for low energy gamma ray imaging. IEEE Trans. Nucl. Sci. 1998;45:943-949.
26. Park SJ, Rogers WL, Huh S, et al. Performance evaluation of a very high resolution small animal PET imager using silicon scatter detectors. Phys. Med. Biol. 2007;52:2807-2826.
27. Çonka-Nurdan T, Nurdan K, Constantinescu F, et al. Impact of the Detector Parameters on a Compton Camera. IEEE Trans. Nucl. Sci. 2002;49(3):817-821.
28. Çonka-Nurdan T, Nurdan K, Walenta AH, et al. First Results on Compton Camera Coincidences With the Silicon Drift Detector. IEEE Trans. Nucl. Sci. 2005;52(5):1381-1385.
29. Lee JH, Kim NY, Lee CS and Jang ZH. Development of the Multi-purpose Gamma-ray Detection System Consisting of a Double-sided Silicon Strip Detector and a 25-segmented Germanium Detector. Nucl. Phys. A 2005;758:150-153.
30. 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.
31. 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.
32. Wilderman SJ, Fessler JA, Clinthorne NH, LeBlanc JW, and Rogers WL. Improved modeling of system response in list mode EM reconstruction of Compton scatter camera images. IEEE Trans. Nucl. Sci. 2001;48(1):111-116.

33. Hebert T, Leahy R, and Singh M. Three-dimensional maximum likelihood reconstruction for an electronically collimated single photon-emission imaging system. J. Opt. Soc. Amer. A 1990;7(7):1305-1313.

Image Quality of a Rotating Compton Camera Evaluated by Using 4-D Monte Carlo Simulation Technique

Hee Seo^o, Se Hyung Lee[†], Jin Hyung Park^o, Chan Hyeong Kim^o, Sung Ho Park[†], Ju Hahn Lee[‡], Chun Sik Lee[‡] and Jae Sung Lee^o

^oDepartment of Nuclear Engineering, Hanyang University

[†]Department of Radiation Oncology, Asan Medical Center, College of Medicine, University of Ulsan

[‡]Department of Physics, Chung-Ang University

^oDepartment of Nuclear Medicine and Interdisciplinary Program in Radiation Applied Life Science, Seoul National University

Abstract - A Compton camera, which is based on Compton kinematics, is a very promising gamma-ray imaging device in that it could overcome the limitations of the conventional gamma-ray imaging devices. In the present study, the image quality of a rotating Compton camera was evaluated by using 4-D Monte Carlo simulation technique and the applicability to nuclear industrial applications was examined. It was found that Compton images were significantly improved when the Compton camera rotates around a gamma-ray source. It was also found that the 3-D imaging capability of a Compton camera could enable us to accurately determine the 3-D location of radioactive contamination in a concrete wall for decommissioning purpose of nuclear facilities. The 4-D Monte Carlo simulation technique, which was applied to the Compton camera fields for the first time, could be also used to model the time-dependent geometry for various applications.

Keywords : Compton Camera, Monte Carlo Simulation, 4-D, Geant4, Nuclear Decommissioning