

## 모사된 콤프턴 카메라 투사데이터의 재구성을 위한 OSEM 알고리즘의 부분집합 구성법 비교 연구

서울대학교 의과대학 핵의학교실 및 방사선응용생명과학 협동과정<sup>1</sup>,  
배재대학교 전자공학과<sup>2</sup>, 중앙대학교 물리학과<sup>3</sup>, 한양대학교 원자력공학과<sup>4</sup>  
김수미<sup>1</sup> · 이재성<sup>1</sup> · 이미노<sup>2</sup> · 이주한<sup>3</sup> · 김중현<sup>1</sup> · 김찬형<sup>4</sup> · 이춘식<sup>3</sup> · 이동수<sup>1</sup> · 이수진<sup>2</sup>

### A Comparative Study of Subset Construction Methods in OSEM Algorithms using Simulated Projection Data of Compton Camera

Soo Mee Kim, M.S.<sup>1</sup>, Jae Sung Lee, Ph.D.<sup>1</sup>; Mi No Lee, B.S.<sup>2</sup>, Ju Hahn Lee, Ph.D.<sup>3</sup>,  
Joong Hyun Kim, M.S.<sup>1</sup>, Chan Hyeong Kim, Ph.D.<sup>4</sup>,  
Chun Sik Lee, Ph.D.<sup>3</sup>, Dong Soo Lee, M.D.<sup>1</sup>, and Soo-Jin Lee, Ph.D.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Nuclear Medicine and Interdisciplinary Program in Radiation Applied Life Science Major, Seoul National University College of Medicine, Seoul, Korea; <sup>2</sup>Department of Electronic Engineering, Paichai University, Daejeon, Korea; <sup>3</sup>Department of Physics, Chung-Ang University, Seoul, Korea; <sup>4</sup>Department of Nuclear Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

**Purpose:** In this study we propose a block-iterative method for reconstructing Compton scattered data. This study shows that the well-known expectation maximization (EM) approach along with its accelerated version based on the ordered subsets principle can be applied to the problem of image reconstruction for Compton camera. This study also compares several methods of constructing subsets for optimal performance of our algorithms. **Materials and Methods:** Three reconstruction algorithms were implemented; simple backprojection (SBP), EM, and ordered subset EM (OSEM). For OSEM, the projection data were grouped into subsets in a predefined order. Three different schemes for choosing nonoverlapping subsets were considered; scatter angle-based subsets, detector position-based subsets, and both scatter angle- and detector position-based subsets. EM and OSEM with 16 subsets were performed with 64 and 4 iterations, respectively. The performance of each algorithm was evaluated in terms of computation time and normalized mean-squared error. **Results:** Both EM and OSEM clearly outperformed SBP in all aspects of accuracy. The OSEM with 16 subsets and 4 iterations, which is equivalent to the standard EM with 64 iterations, was approximately 14 times faster in computation time than the standard EM. In OSEM, all of the three schemes for choosing subsets yielded similar results in computation time as well as normalized mean-squared error. **Conclusion:** Our results show that the OSEM algorithm, which have proven useful in emission tomography, can also be applied to the problem of image reconstruction for Compton camera. With properly chosen subset construction methods and moderate numbers of subsets, our OSEM algorithm significantly improves the computational efficiency while keeping the original quality of the standard EM reconstruction. The OSEM algorithm with scatter angle- and detector position-based subsets is most available. (Nucl Med Mol Imaging 2007;41(3):234-240)

**Key Words:** compton camera, image reconstruction, ordered subset expectation maximization

• Received: 2007. 1. 25. • Accepted: 2007. 4. 21.

• Address for reprints: Jae Sung Lee, Ph.D., Department of Nuclear Medicine, Seoul National University College of Medicine, 28 Yungun-dong, Chongno-gu, Seoul 110-799, Korea  
TEL: 82-2-2072-2938, FAX: 82-2-745-2938,  
E-mail: jaes@snu.ac.kr

※ 본 연구는 과학기술부 및 과학재단의 지원을 받아 2006년도 원자력 기초공동연구소 (해상도 5mm급 콤프턴 카메라의 실증과 응용)와 2006년도 원자력연구개발 중장기계획사업(의료영상물리 및 표준화 기술: 물리적 왜곡 보정을 통한 정량적 PET, SPECT 영상분석기술 연구)을 통해 수행되었음.

## 서 론

컴프턴 산란원리를 이용하여 방사선원의 3차원 분포를 영상화하는 콤프턴 카메라는 산란부(scatterer)와 흡수부(absorber)의 두 검출기로 이루어지며 두 검출기로부터 측정된 에너지와 검출 위치 정보를 이용하여 입사된 광자의 방향 정보를 얻는다. 즉, 콤프턴 카메라는 산란부와 흡수부의 검출위치 및 산란부에 흡수된 에너지 값으로부터 계산된 산란

각 정보를 이용하여 정의된 타원추 표면으로부터 광자가 방출된 원위치인 방사선원의 분포를 유추하는 영상장치이다.<sup>1)</sup>

컴프턴 카메라 영상재구성을 위한 방법 중 가장 단순한 방법은 역투사(backprojection)를 통해 각 검출위치 및 산란각으로부터 정의되는 모든 타원추 표면을 중첩시켜 방사선원의 분포를 유추하는 재구성 방법이다. 그러나 이러한 단순 역투사(simple backprojection, SBP) 방법은 방사선원의 위치에 대한 정보만 제공할 뿐 방사선원의 정확한 세기는 알 수 없으며 방사선원의 분포가 복잡할수록 배경잡음이 증가되어 재구성된 영상의 대조도가 낮아지므로 방사선원의 위치에 대한 정확한 정보를 얻기 어렵다. 반면에 방출단층영상에 적용되어 그 성능이 입증된 기댓값 최대화(expectation maximization, EM) 알고리즘은 광자의 투사과정을 통계적으로 표현하여 정확한 영상을 재구성할 수 있으므로<sup>2,3)</sup> 이를 컴프턴 카메라의 영상재구성에 적용할 경우 SBP에 비해 월등히 향상된 영상을 기대할 수 있다. 컴프턴 카메라를 위한 EM 영상재구성은 타원추 표면에 대한 투사 및 역투사의 반복연산을 통해 이루어지므로 이를 위한 연산 성능에 따라 재구성 속도 및 영상의 정확성이 결정된다. 이에 우리는 효율적이고 정확한 투사 및 역투사 기법을 개발하여 컴프턴 카메라를 위한 EM 영상재구성기법을 구현하였으며 이를 통한 재구성 영상의 정확도 향상을 확인하였다.<sup>4)</sup> 그러나 EM 알고리즘을 통한 반복적 영상재구성을 위해서는 많은 계산량이 필요하여 느린 수렴속도를 보였으며 따라서 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하고자 EM과 유사한 재구성 결과를 보이면서 빠른 수렴속도를 보이는 것으로 알려진 OSEM (ordered subset EM)<sup>5)</sup> 재구성 기법을 구현하고 최적화하고자 하였다. 특히 OSEM 방법의 성능은 부분집합(subset) 구성법에 따라 영향을 받으므로 본 연구에서는 컴프턴 카메라의 기학적 특성에 따른 부분집합 구성법에 대한 최적화 연구를 수행하였으며, 연산시간 및 재구성 영상의 정확도 측면에서 SBP 및 EM 알고리즘을 이용한 영상 재구성 결과와 비교 평가하였다.

## 대상 및 방법

### 1. 투사 및 역투사 기법

Fig. 1A에 나타난 바와 같이 컴프턴 카메라는 산란부와 흡수부 검출기로 구성되며 두 검출기로부터 얻은 에너지 및 위치의 정보를 통해 정의된 타원추 상에서 방사선원의 3차원 분포를 추정해낸다. 즉, 두 검출위치 ( $m, n$ )와 산란부에 흡수된 에너지 값으로부터 타원추의 정점, 축, 그리고 반각 ( $\omega$ )이 결정되며 식 (1)과 같이 이러한 타원추의 표면을 기반

으로 적분을 취하여 컴프턴 투사데이터를 계산한다.<sup>6)</sup>

$$g_{m\omega} = \sum_i f_i H_{i,m\omega} \quad (1)$$

식 (1)에서  $g_{m\omega}$ 는 컴프턴 투사데이터를,  $f_i$ 는 3차원 영상의 화소를 나타낸다. 확률  $H_{i,m\omega}$ 는 화소  $i$ 에서 방출한 하나의 광자가 컴프턴 카메라의 산란부  $m$  위치에서  $\omega$ 의 각도로 산란한 후 흡수부  $n$  위치에서 검출될 확률을 의미하는 시스템 행렬을 나타낸다. 즉, 시스템 행렬  $H_{i,m\omega}$ 은 식(2)와 같이 두 확률의 곱으로 계산된다.

$$H_{i,m\omega} = P_\omega P_{i,m\omega} \quad (2)$$

$P_\omega$ 는 산란부에 도달한 광자가 산란각  $\omega$ 로 컴프턴 산란을 일으킬 확률을 나타내며 식 (3)과 같은 Klein-Nishina 분포 함수를 적용하여 계산하였다.

$$\frac{d\sigma}{d\omega} = \pi r_0 \sin \omega \left( \frac{E_{\gamma'}}{E_\gamma} \right)^2 \left( \frac{E_{\gamma'}}{E_\gamma} + \frac{E_\gamma}{E_{\gamma'}} - \sin^2 \omega \right) \quad (3)$$

식 (3)에서  $r_0$ 는 고전적 전자 반경(classical electron radius)을,  $E_\gamma$ 은 산란 전 광자의 에너지를,  $E_{\gamma'}$ 은 산란 후 광자의 에너지를 나타낸다. 이 두 에너지의 비는  $\frac{E_{\gamma'}}{E_\gamma} = \frac{m_0 c^2}{m_0 c^2 + E_\gamma(1 - \cos \omega)}$ 와 같이 계산되며, 여기서  $m_0 c^2$ 은 전자의 정지 질량(rest mass energy)으로서 511 keV의 값을 갖는다.

시스템 행렬의 두 번째 확률  $P_{i,m\omega}$ 은 컴프턴 카메라의 검출정보로부터 정의된 타원추 표면에 각 영상 화소들이 위치할 확률을 나타낸다. 본 연구에서는  $P_{i,m\omega}$ 를 계산하기 위해 선추적법(ray-tracing method)을 적용하였다.<sup>7)</sup> 선추적법은 Fig. 1B에 나타난 바와 같이 타원추 표면으로부터 광자의 실제 방출경로를 모델링한 것으로 타원추 표면에 균일하게 분포된 투사선을 따라 선적분을 계산하는 방법이다. 타원추상의 투사선은 산란부에서 임의의 거리에 있는 수직단면에 그려지는 원의 궤적을 균일하게 샘플링하여 각 샘플된 위치와 타원추의 정점을 연결하여 묘사하였다.<sup>8)</sup> 선추적법의 경우  $P_{i,m\omega}$ 는 식 (4)와 같이 타원추 표면상의 각 투사선과 3차원 화소간의 교차길이(chord length)로 표현된다.<sup>9)</sup>

$$P_{i,m\omega} \approx l_{i,m\omega} \quad (4)$$

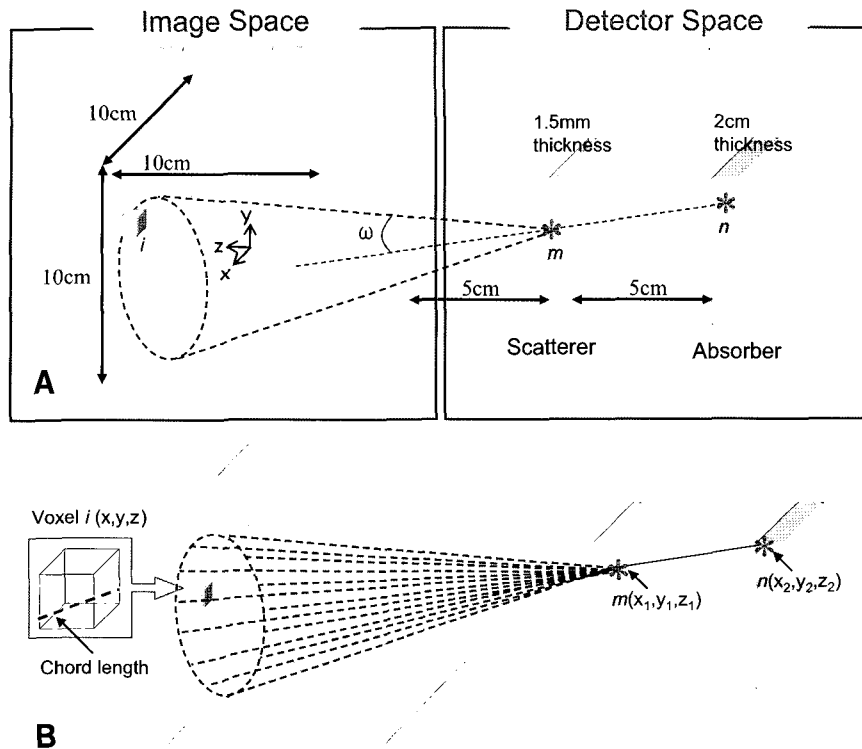


Fig. 1. (A) Compton camera system consists of two detectors, scatter and absorber. (B) The ray-tracing method used for calculating Compton projection data.

2. 컴프턴 카메라 OSEM 재구성기법 최적화

컴프턴 투사데이터는 단순 역투사(simple backprojection, SBP)와 통계적 영상재구성 방법인 기댓값 최대화(expectation maximization, EM) 알고리즘을 통해 단면영상으로 재구성될 수 있다. SBP 방법에 비해 EM 알고리즘은 보다 정확한 영상을 재구성하는 반면 상당한 계산시간이 소요된다. 본 연구는 핵의학 영상재구성방법에서 널리 사용되며 가속화된 수렴속도를 가진 OSEM (ordered subset EM) 방법을 컴프턴 투사데이터에 적용하여 영상을 재구성하였다. EM의 경우, 투사 및 역투사의 반복연산 시 모든 투사데이터가 사용되는 반면 OSEM은 투사데이터를 몇 개의 부분집합(subset)으로 구분한 뒤 부분집합 단위로 투사 및 역투사 연산을 수행한다. 따라서 OSEM은 부분집합의 개수가 증가할수록 알고리즘의 수렴속도가 증가하는 것으로 알려져 있다.<sup>10)</sup>

$$f_i^{k+1} = \frac{f_i^k}{\sum_{(m,n) \in S_i} H_{i,mn\omega}} \sum_{(m,n) \in S_i} \frac{H_{i,mn\omega} g_{mn\omega}}{\sum_t f_t^k H_{t,mn\omega}} \quad (5)$$

식 (5)에서 k는 반복연산의 횟수를, S<sub>i</sub>은 투사데이터의 부분집합을 나타낸다. N개의 부분집합은 S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, ..., S<sub>N</sub>로

나타내며 N=1인 경우는 EM을 수행하는 것과 같다. OSEM에서 보다 참 값에 가까운 영상을 재구성하기 위해서는 하나의 부분집합을 형성하는 투사값의 배열이 한 쪽에 치우치지 않고 가능한 여러 각도의 정보를 독립적으로 포함하도록 부분집합을 구성하여야 한다. 보통 핵의학 영상의 경우 검출각도에 따라 투사데이터의 부분집합을 구분하지만 컴프턴 카메라의 경우, 산란부 및 흡수부의 검출위치 및 산란각에 따라 광자의 검출각도가 달라지므로 부분집합은 산란부와 흡수부의 검출위치 및 산란각에 따라 나뉠 수 있다. 산란부와 흡수부의 검출위치에 따라 타원추의 대칭축이, 산란각에 따라 타원추의 반각이 결정되므로 이들의 변화는 타원추 표면상의 방사선들의 검출각도의 변화를 의미한다. Fig. 2A에 나타난 바와 같이 산란부와 흡수부 검출기의 표면을 일정한 영역으로 구분하는 것은 검출위치에 따라 부분집합을 구분하는 방법이며 이는 일정한 규칙에 따라 구분(OSEM-R, OSEM with regular grouping of detection position pairs)하거나 규칙성을 배제하기 위해 난수 발생기(random number generator)를 이용하여 불규칙적으로 구분할 수 있다(OSEM-IR, OSEM with irregular grouping of detection position pairs).

따라서 이 연구에서는 OSEM-R 및 OSEM-IR 방법으로

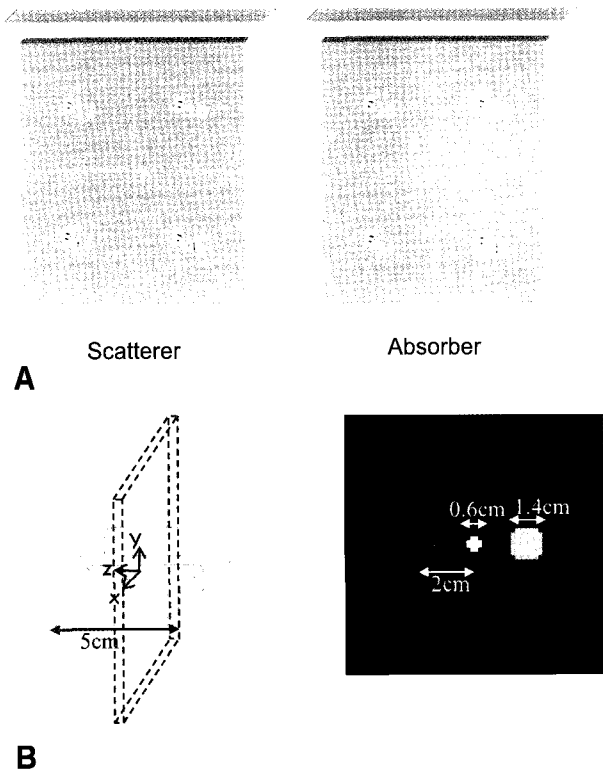


Fig. 2. (A) Grouping projection data formed by the scatterer-absorber pair into subsets. The positions of scatterer and absorber were sorted into  $a \times b$  and  $c \times d$  position subsets, respectively. (B) A 3-cylinder phantom used for simulations.

검출위치에 따른 부분집합을 구성하여 부분집합을 불규칙적으로 하였을 때 재구성 영상의 정확성이 개선되는지 여부를 평가하였다. 또한 산란각에 따라 부분집합을 나눈 OSEM-SA (OSEM with regular grouping of scattering angles)와 검출위치 및 산란각을 부분집합 구분에 모두 이용한 OSEM-ALL (OSEM with regular grouping of detection position pairs and scattering angles) 방법을 적용하여 최적의 부분집합 구성법을 알아보려고 하였다. 검출위치에 대한 규칙적인 구분방법과 불규칙적인 방법사이의 정량적인 차이가 없는 것으로 나타나 OSEM-SA와 OSEM-ALL 방법에서는 검출위치 및 산란각에 대한 부분집합에 대해서 모두 규칙적인 구분방법을 사용하였다.

### 3. 재구성 결과 비교 실험

실험에서 사용된 두 검출기는 모두 5 cm의 너비와 길이를 가지며 측정된 검출 위치는  $16 \times 16$  배열로 샘플링 하였다. 또한 산란부-흡수부 사이의 거리는 5 cm, 산란부-좌표계 중심 간의 거리는 10 cm로 설정하였으며 산란각은  $10^\circ \sim 90^\circ$ 를 32개의 이산각으로 샘플링 하였다. 컴프턴 투사데이터의 생성을 위해 Fig. 2B와 같은 4-cylinder 소프트웨어 모형을 사

용하였다.  $64 \times 64 \times 64$  크기의 3차원 모형이며 화소 크기는 1.56 mm이다. 모형은 반지름이 0.7 cm인 세 원기둥을 2 cm 간격으로 x-축 상에 배열하여 구성하였다. 중앙에 놓인 원기둥에는 반지름이 0.3 cm인 원기둥을 포함하고 있다. 모든 원기둥의 길이는 5 cm 이다. 왼쪽부터 오른쪽 원기둥의 방사능 비율 (left:middle(0.7 cm):middle(0.3 cm):right)은 4:2:10:7 이다. 실험을 위하여 사용된 컴퓨터는 AMD 애슬론 X2 2.2GHz 프로세서를 사용한 리눅스 시스템이다.

선추적법을 적용한 컴프턴 투사기로부터 투사데이터를 얻고 SBP, EM과 OSEM 방법을 각각 적용하여 영상을 재구성하였다. EM은 64번, OSEM은 4번의 반복연산을 수행하였다. OSEM-R과 OSEM-IR의 경우는 산란부와 흡수부의 검출위치를 각각  $2 \times 2$  개의 블록으로 나누어서 총 16개의 부분집합으로 구분하였다. OSEM-SA는 산란각을 16개의 부분집합으로, OSEM-ALL은 두 검출위치를 각각  $1 \times 2$  영역으로 나누고 산란각을 4개로 나누어서 총 16개의 부분집합으로 구분하였다. 각 영상재구성방법 및 구분방법의 성능을 정량적으로 비교하기 위하여 계산시간과 퍼센트 오차를 측정하였다. 퍼센트 오차는 식 (6)과 같이 계산되며  $f_i$ 와  $\hat{f}_i$ 은 각각 원영상과 재구성된 결과영상을 나타낸다

$$PE = \sqrt{\frac{\sum (f_i - \hat{f}_i)^2}{\sum f_i^2}} \times 100 \quad (6)$$

## 결 과

Fig. 3, 4와 5는 4-cylinder 모형에 대한 컴프턴 투사데이터의 재구성된 결과영상을 나타내며 각각 3차원 영상의 z, x, y축에 대한 중심 수직단면을 나타낸다. 일반적으로 알려진 바와 같이 SBP (Fig. 3-5B) 방법에 비해 모든 통계적 영상 재구성 방법의 결과들이 보다 월등히 정확함을 정성적으로 확인할 수 있으며 EM의 64번 반복연산 후 결과(Fig. 3-5C)와 16개의 부분집합을 통해 4회 반복연산을 수행한 OSEM의 모든 결과영상(Fig. 3-5(D-G))이 유사함을 볼 수 있다. 또한 정성적인 측면에서 부분집합 구분방법에 따른 결과영상의 차이는 없는 것으로 간주된다. 또한 Fig 4와 5의 모든 통계적 영상재구성 방법의 결과들(C-G)은 z축을 따라 저하된 해상도를 보인다. 이는 본 연구에서 고려한 컴프턴 카메라 시스템의 산란/흡수 검출기의 크기가 제한적이므로 이로 인해 형성되는 투사각의 범위가 매우 제한적인 것에 기인한 것으로 추정된다.

더 정량적인 비교를 위해 Table 1에 나타난 바와 같이 계산시간과 퍼센트 오차를 계산하였다. 연산속도를 비교해보

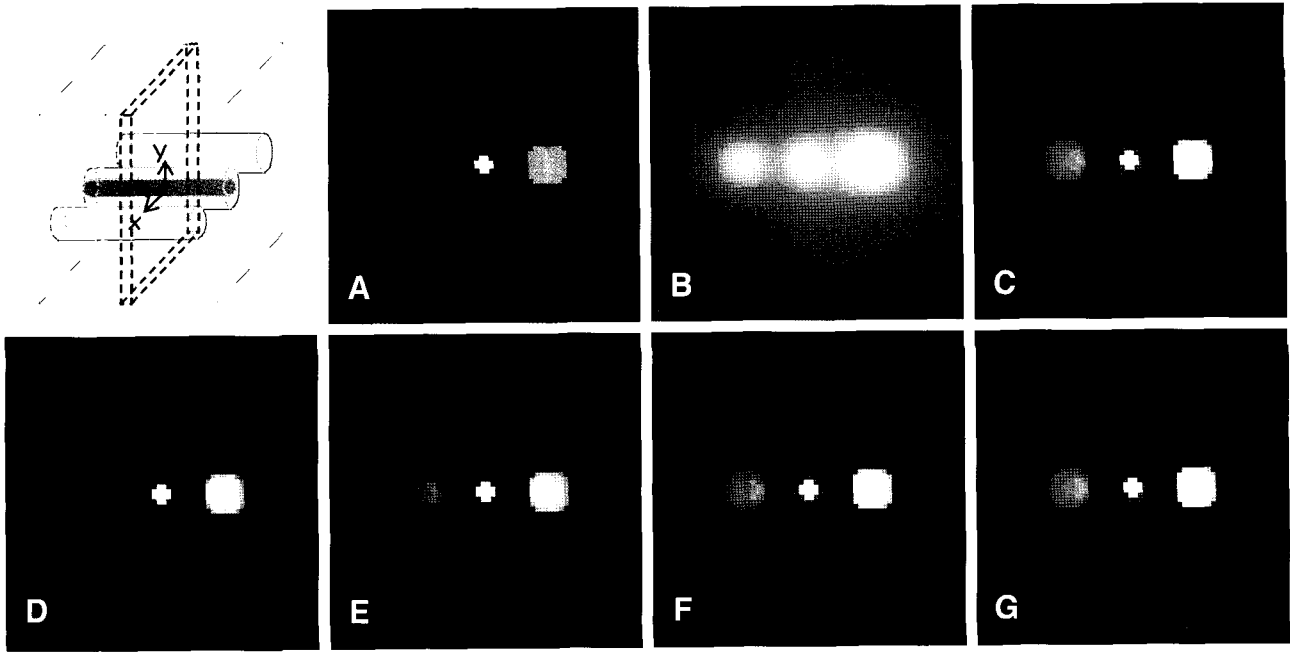


Fig. 3. Central x-y plane of 3D phantom and reconstructed images: (A) 4-cylinder phantom, (B) simple backprojection (SBP), (C) EM (64 iterations) and (D-G) OSEM (4 iterations): (D) OSEM with regular grouping of detection position pairs (OSEM-R), (E) OSEM with irregular grouping of detection position pairs (OSEM-IR), (F) OSEM with grouping of scattering angles (OSEM-SA), (G) OSEM with grouping of detection position pairs and scattering angles (OSEM-ALL).

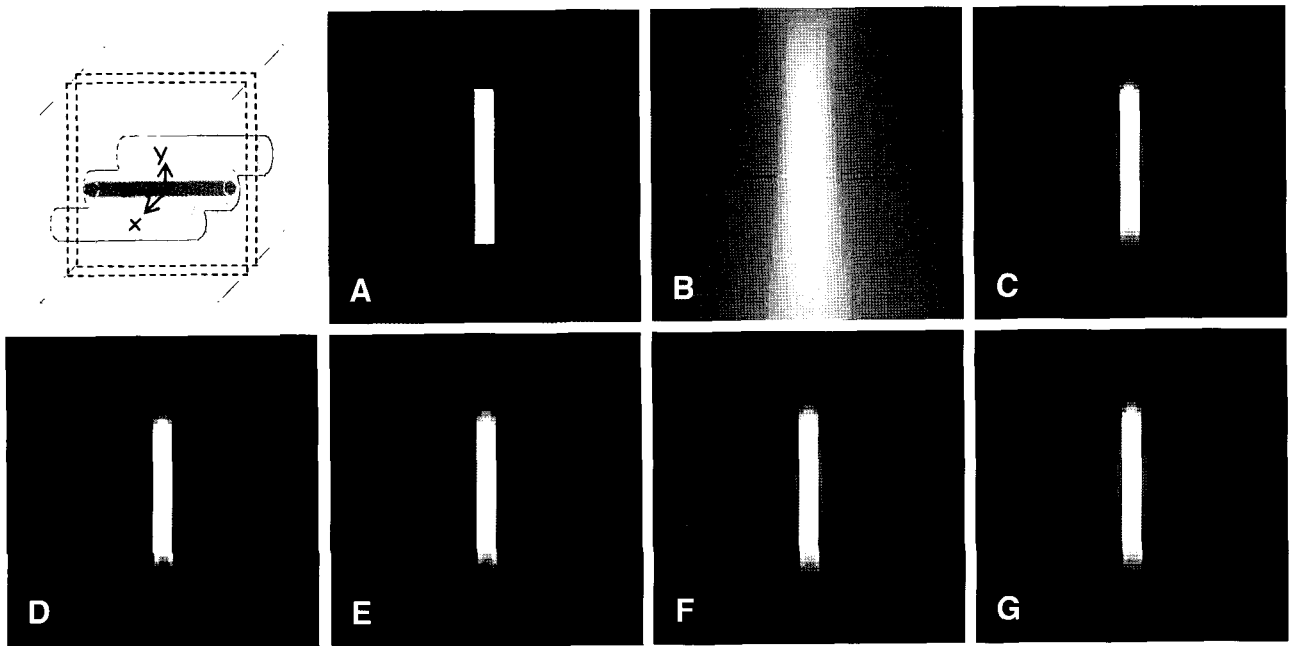


Fig. 4. Central y-z plane of 3D phantom and reconstructed images: (A) 4-cylinder phantom, (B) SBP, (C) EM (64 iterations) and (D-G) OSEM (4 iterations): (D) OSEM-R (E) OSEM-IR, (F) OSEM-SA, (G) OSEM-ALL.

면 SBP 방법이 가장 빠르며 가장 많은 연산시간이 걸리는 EM 방법보다 약 150배 빠르다. 그러나 재구성된 영상의 정확도 면에서 퍼센트 오차가 가장 큰 매우 저조한 결과를 보였다.

EM 알고리즘에 비해 모든 OSEM 알고리즘은 유사한 퍼

센트 오차를 나타내면서 14배 빠른 수렴속도를 보였다. OSEM의 빠른 수렴속도는 반복횟수에 대한 퍼센트 오차를 나타내는 Fig. 6A에서도 확인할 수 있다. OSEM의 경우, Table 1과 Fig. 6B에 나타난 바와 같이 부분집합의 구분방법

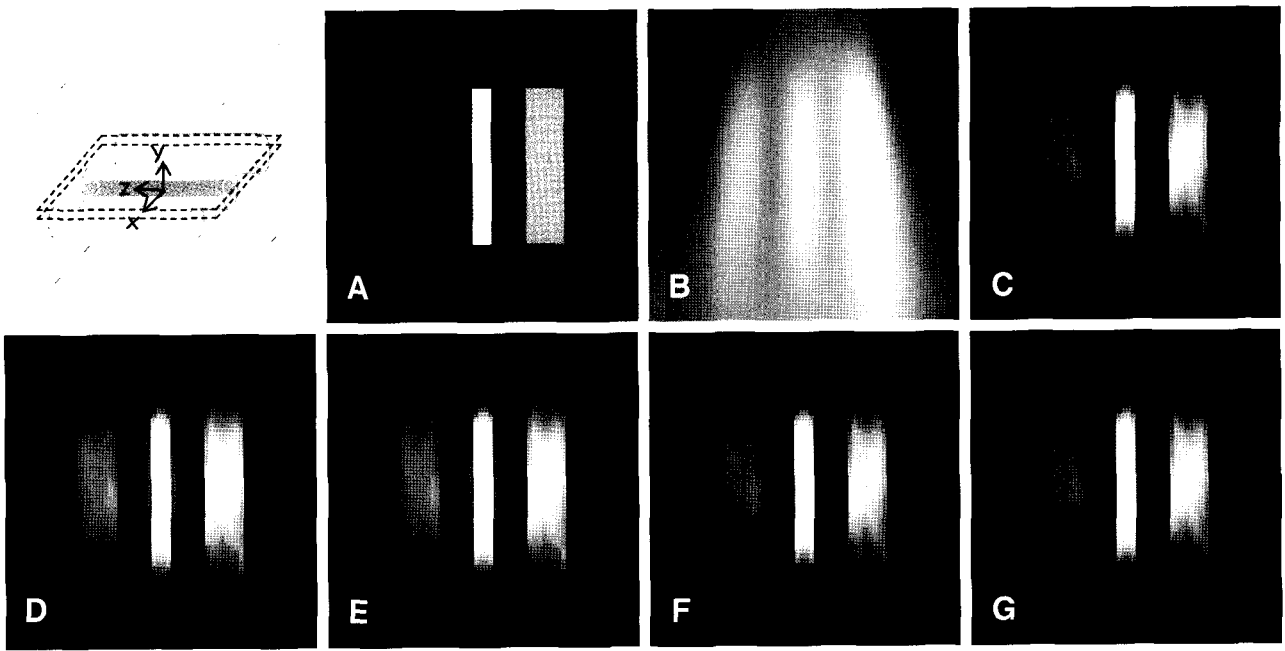


Fig. 5. Central x-z plane of 3D phantom and reconstructed images: (A) 4-cylinder phantom, (B) SBP, (C) EM (64 iterations) and (D-G) OSEM (4 iterations); (D) OSEM-R (E) OSEM-IR, (F) OSEM-SA, (G) OSEM-ALL.

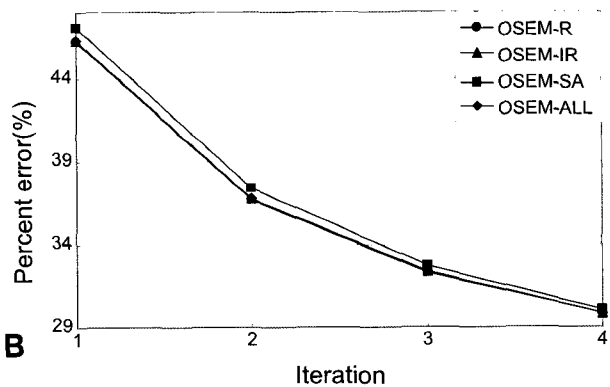
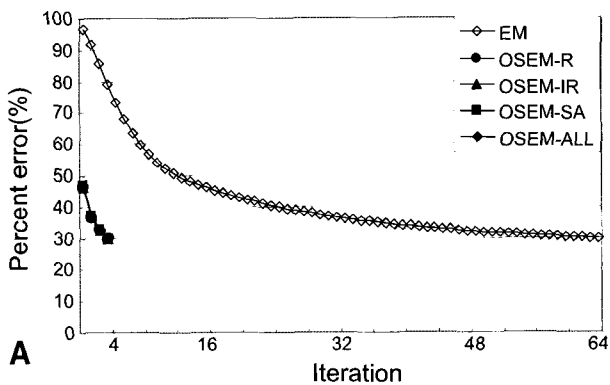


Fig. 6. (A) Convergence behaviors of EM and OSEM in percent error (B) Convergence behaviors of OSEM with four different schemes for choosing subsets - OSEM-R, OSEM-IR, OSEM-SA, and OSEM-ALL.

Table 1. Percent Errors and Computation Times for SBP, EM (64 iterations), and OSEM (4 iterations) Reconstructions using Noiseless Compton Data

Method	Percent error (%)	Computation time (min)
SBP	$22.4 \times 10^2$	6.7
EM	29.8	978 (16.3 hr)
OSEM-R	29.82	72.1 (1.2 hr)
OSEM-IR	29.84	74.8 (1.25 hr)
OSEM-SA	30.02	70.6 (1.18 hr)
OSEM-ALL	29.85	71.9 (1.2 hr)

에 따라 연산속도와 퍼센트 오차 면에서는 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.

## 고 찰

본 연구에서는 컴프턴 카메라의 효율적인 투사기 및 역투사기의 구현을 위하여 선추적법을 적용하였다. 또한 기존의 컴프턴 투사데이터의 재구성 방법인 단순역투사(SBP) 방법의 정확도를 개선하기 위하여 통계학적 영상재구성 방법인 기댓값 최대화(EM) 알고리즘을 통하여 보다 정확한 영상을 재구성하였다. 그러나 SBP와 비교하여 EM 알고리즘은 상당한 반복연산과 느린 수렴속도를 가지므로 이러한 문제를 해결하기 위하여 OSEM 알고리즘을 적용하였다. OSEM 알고리즘을 컴프턴 카메라에 적용할 경우 컴프턴 산란각도 및 검출기의 기하학적 구조를 고려하여 투사데이터를 부분집합으로 구성하는 것

이 중요하다. 본 연구에서는 컴프턴 투사데이터를 산란부 및 흡수부의 검출위치 및 산란각에 따라 부분집합으로 구분하였으며 각 구분방법의 성능에 대한 정량적인 평가를 수행하였다.

본 연구의 실험결과에 나타난 바와 같이 SBP와 비교하여 모든 통계적 영상재구성 방법은 보다 정확한 결과를 보였다. 그러나 실험을 통하여 재구성된 영상의 경우 z축을 향해 놓인 물체의 양 끝 경계면의 정확도가 저하되는 현상이 있는바, 이는 제한된 크기의 검출기로 인한 투사각 범위가 제한되므로 발생하는 현상으로 추정된다. 이를 해결하기 위하여 더 넓은 범위의 각도를 포함하도록 검출기의 크기를 증가시키거나 두 검출기를 여러 각도로 회전하여 여러 방향의 데이터를 검출하는 방법을 고안하여야 할 것이다. 또한 EM과 유사한 결과를 얻도록 부분집합을 나누고 OSEM을 수행하면 14배까지 빠른 수렴속도를 가진 결과영상을 얻었으나 컴프턴 카메라의 실용화를 위해서는 빠른 연산속도를 장점으로 갖는 병렬컴퓨팅 시스템의 도입을 고려해야 할 것이다.

OSEM 적용 시 재구성된 영상의 정확성과 수렴속도를 고려하여 최대 부분집합 구분개수를 결정할 수 있다. 핵의학 영상의 경우는 검출각도에 대해서만 투사데이터의 부분집합을 나눌 수 있지만 타원추 표면을 기반으로 연산을 수행하는 컴프턴 카메라는 검출위치 및 산란각에 따라 부분집합을 구분할 수 있으므로 투사데이터를 보다 많은 부분집합으로 구분하는 것이 가능하며 보다 가속화된 수렴속도를 얻을 수 있다. 각 부분집합의 구성법을 적용한 OSEM 재구성법의 연산 시간 및 결과영상의 퍼센트 오차는 매우 유사하며 부분집합 개수에 비례하여 수렴속도가 가속화되는 OSEM 알고리즘에서 보다 많은 부분집합으로 구분할 수 있는 OSEM-ALL 방법을 사용하는 것이 적절할 것으로 보인다.

또한 향후 연구에서는 잡음 있는 컴프턴 투사데이터에 대한 OSEM의 수렴양상을 연구하고 촬영대상에 대한 사전정보를 이용하여 영상을 재구성하는 Bayesian 영상재구성 방법의 적용에 대한 연구가 필요할 것이다.

## 요 약

**목적:** 본 연구에서는 컴프턴 카메라의 투사데이터를 재구성하기 위하여 부분집합 개수에 비례하여 가속화된 수렴속도를 보이는 통계학적 영상재구성 방법인 OSEM 알고리즘을 적용하였다. 또한 연산시간 및 퍼센트 오차 측면에서 컴프턴 투사데이터의 부분집합 구성 시 여러 구분방법에 대한 비교연구를 수행함으로써 컴프턴 투사데이터의 최적화된 OSEM 알고리즘을 제안하고자 하였다. **대상 및 방법:** 산란부와 흡수부로 구성된 컴프턴 카메라의 투사데이터를 재구

성하기 위하여 단순역투사, 기댓값 최대화 방법과 OSEM 알고리즘을 구현하였다. 그리고 OSEM의 경우 컴프턴 투사데이터는 산란부 및 흡수부의 검출위치 및 산란각에 따라 부분집합으로 구분하였다. EM 알고리즘은 64번의 반복연산을 수행하였으며 OSEM은 16개의 부분집합에 대해 4번의 반복연산을 수행하였다. 각 재구성 방법과 부분집합 구분방법에 대한 정량적 성능평가를 위하여 계산 시간과 퍼센트 오차를 측정하였다. **결과:** SBP 방법에 비해 모든 통계학적 영상재구성 방법의 결과들이 보다 정확하였다. 64번 반복연산을 수행한 EM 알고리즘에 비해 4번의 반복연산과 16개의 부분집합을 가지는 모든 OSEM 알고리즘은 유사한 퍼센트 오차를 나타내면서 14배 빠른 수렴속도를 보였다. OSEM의 경우, 부분집합의 구분방법에 따라 연산속도와 재구성된 영상의 정확도 면에서는 거의 차이가 없었다. **결론:** 본 연구의 실험결과를 통하여 핵의학 영상 분야에서 사용하는 OSEM 알고리즘이 컴프턴 카메라에 대한 재구성 알고리즘으로 유용함을 확인하였으며 OS-EM 방법은 EM에 비해 유사한 결과영상을 재구성하면서 14배 빠른 수렴속도를 보이며 컴프턴 투사데이터를 부분집합으로 구분 시 검출위치와 산란각을 모두 이용하는 것이 가장 효율적인 것으로 간주된다.

## References

1. Singh M. An electronically collimated gamma camera for single photon emission computed tomography: Part1 and 2. *Med Phys* 1983;10:421-7.
2. Shepp L, Vardi Y. Maximum likelihood reconstruction for emission tomography. *IEEE Trans Med Imag* 1982;1:113-22.
3. Lange K, Carson R. EM reconstruction algorithms for emission and transmission tomography. *J Comput Assist Tomogr* 1984;8:306-16.
4. Kim SM, Lee JS, Lee MN, Lee JH, Lee CS, Kim CH, et al. Two Approaches to Implementing Projector-Backprojector Pairs for 3D Reconstruction from Compton Scattered Data. *NIM A*. 2007;571: 255-8.
5. Hudson HM, Larkin RS. Accelerated image reconstruction using ordered subsets of projection data. *IEEE Trans Med Imag* 1994;13:601-9.
6. Hebert T, Leahy R, Singh M. Three-dimensional maximum-likelihood reconstruction for a electronically collimated single-photon-emission imaging system. *J Opt Soc Am A* 1990;7:1305-13.
7. Kim SM, Lee JS, Lee MN, Lee JH, Lee CS, Kim CH, et al. Implementing Projectors for Image Reconstruction in Compton Camera. *33rd KOSOMBE Conference II* 2005;Dec: 486-9.
8. Lee MN, Lee SJ, Kim SM, Lee JS. Reconstruction of 3-D Compton Scattered Data Using Imaginary Planes. *34th KOSOMBE Conference II* 2006;Nov:312-5.
9. Siddon RL. Fast calculation of the exact radiological path for a three-dimensional CT array. *Med Phys* 1985;12:252-5.
10. Kim SM, Lee JS, Lee MN, Lee JH, Kim JH, Kim CH, et al. Optimization Study for OS-EM Image Reconstruction in Compton Camera. *34th KOSOMBE Conference II* 2006;Nov:17-20.