

SPECT 영상 산란보정 개선: 몬테칼로 시뮬레이션 연구

연세대학교 핵의학과¹, 진단방사선과 방사선의과학 연구소²
 봉정균¹ · 김희중^{1,2} · 손혜경² · 이종두^{1,2} · 정해조²

Improved Scatter Correction for SPECT Images : A Monte Carlo Simulation Study

Jung-Kyun Bong, Ph.D.², Hee-Joung Kim, Ph.D.^{1,2}, Hye-Kyung Son, M.Sc.², Jong Doo Lee, MD & Ph.D.^{1,2}, Hae-Jo Jung, Ph.D.²

Division of Nuclear Medicine,¹ Department of Radiology, Yonsei University College of Medicine, Research Institute of Radiological Science,² Yonsei University

Purpose: Abutted scatter energy windows used for a triple energy window (TEW) method may provide wrong estimation of scatter. This study is to propose an extended TEW (EWE) method, which doesn't require abutted scatter energy windows and overcomes the shortcomings of TEW method. **Materials & Methods:** The EWE is a modification of the TEW which corrects for scatter by using abutted scatter rejection windows, which can overestimate or underestimate scatter. The EWE is compared to the TEW using Monte Carlo simulated data for point sources as well as hot and cold spheres in a cylindrical water phantom. Various main energy window widths (10 %, 15 % and 20 %) were simulated. Both TEW and EWE improved image contrast, % recovery coefficients and normalized standard deviation. **Results:** Both of TEW and EWE improved image contrast and % recovery coefficients. Estimated scatter components by the TEW were not proportional to the true scatter components over the main energy windows when ones of 10 %, 15 %, and 20 % were simulated. The EWE linearly estimated scatter components over the width of the main energy windows. **Conclusion:** We extended the TEW method into the method which could linearly estimate scatter components over the main energy windows. (Korean J Nucl Med 39(3):163-173, 2005)

Key Words: TEW scatter correction, EWE scatter correction, SPECT, energy window

서 론

단일광자방출촬영장치(Single Photon Emission Computed Tomography, SPECT)를 이용하여 획득한 영상을 정성적 그리고 정량적으로 개선시키기 위해 다양한 산란보정방법들이 소개되어왔다. 이 중에는 산란성분에 대한 공간적 분포와 양을 추정하는 convolution 기법,¹⁻⁴⁾ 부가적인 에너지창을 사용하여 산란을 추정하는 에너지 스펙트럼에 바탕을 둔 방법 등과 같이 다양한 산란보정방법들이 알려져 있다.⁵⁻⁷⁾ 에너지 스펙트럼을 이용하는 후자의 방법들은 임상적으로 가능하며

상대적으로 정확하다고 알려져 있다. 특히, 삼중 에너지창 산란보정 방법(triple energy window scatter correction, TEW)은 임상적으로 실행하는데 있어서 상대적으로 정확하고 용이하다.⁸⁾ 이 방법은 부가적인 산란에너지창들에서 획득한 데이터에 선형회귀분석을 실행하여 광봉우리(photo-peak) 에너지창 안에 있는 산란성분을 추정한다. 몇몇 연구자들에 의해 TEW에 대한 평가 및 연구에 대한 보고가 있었으며, 이 중에서 단일 또는 이중 방사성 핵종에 대한 산란보정을 하는데 있어서 TEW의 정확도가 좋았다고 보고가 있었다.¹⁸⁾ 또한 TEW 방법을 I-131에 적용할 경우 정량적으로 정확하다는 보고가 있었으며,¹⁹⁾ TEW을 이용하여 산란을 제거한 영상은 너비가 좁은 에너지창의 사용으로 인하여 통계적으로 잡음이 높을 수 있다고 보고하였다.²⁰⁾ 이에 대해 필터를 적용하여 더 정확한 정량분석을 할 수 있다고 제안하였다.

• Received: 2005. 1. 17. • Accepted: 2005. 5. 2.
 • Address for reprints: Hee-Joung Kim, Ph.D. Dept. of Radiology, Yonsei University College of Medicine, #134 Shinricon-dong Seodaemoon-gu, Seoul 120-752, Korea
 Tel: 82-2-2228-2370, Fax: 82-2-313-1039
 E-mail: hjkim@yumc.yonsei.ac.kr

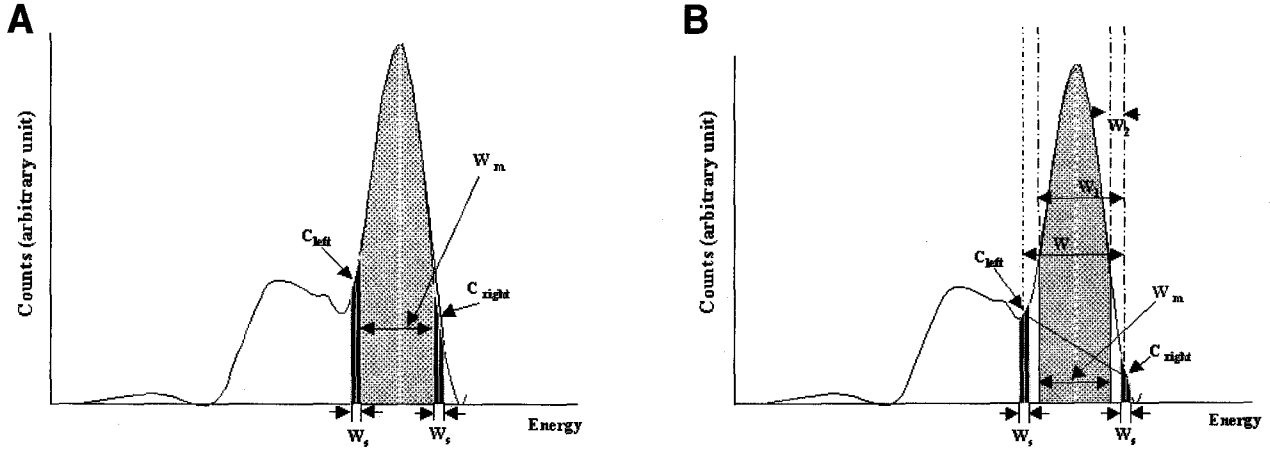


Fig. 1. Schematic diagrams of triple energy window setting. (A) TEW method requires abutted scatter energy window settings at both sides of the main energy window, and, (B) ETEW method does not necessarily require abutted window settings at both sides of the main energy window.

앞의 좋은 결과들과 연구들에도 불구하고, TEW는 임상 응용에 있어서 두 가지의 단점을 가지고 있다. 첫째, 주에너지창이 산란에너지창의 중심에서 겹쳐져야만 한다. 그러나, 주에너지창과 겹쳐진 산란에너지창과 주에너지창에서 동시에 데이터를 획득하는 것은 임상에서 불가능할 수 있다. 이런 문제를 해결하기 위해서, 산란에너지창을 가능한 한 주에너지창의 끝머리에 가까이 인접하게 위치시켜 데이터를 획득한다.^{8,18)} 둘째, 산란에너지창을 항상 인접하게 놓아야 하기 때문에, 산란계수들은 주에너지창을 경계로 하는 부가적인 산란에너지창들의 위치에 의존하게 된다. 즉, 주에너지창에 인접된 산란에너지창을 사용하는 것은 TEW을 이용하여 추정된 계수들이 주에너지창의 너비에 비례하지 않기 때문에 산란성분들을 과소평가하거나, 과대평가할 수 있다. 앞에서 기술한 TEW의 단점을 보완하기 위해서, 본 연구는 주에너지창 너비의 설정에 따라 위치가 변화된 산란에너지창을 고정하려 하였다. 본 연구의 목적은 기존의 TEW의 단점을 보완한 개선된 TEW (extended triple energy window, ETEW) 방법으로 확장하는 것이다.

대상 및 방법

1. 산란보정 방법

일차 광자(primary photon)들의 계수들을 광붕우리 에너지가 중심인 주에너지창과 주에너지창의 양끝머리에 있는 두 개의 부에너지창을 이용하여 추정하였다. 주에너지창 내에 있는 총 계수(C_t)는 일차계수(C_p)와 산란계수(C_s)로 구성된다. 일차계수들은 다음과 같이 주어진다.

$$C_p = C_t - C_s \quad (1)$$

C_s 는 주에너지창의 저에너지(lower energy, C_{left})와 고에너지(upper energy, C_{right}) 상에 위치한 부에너지창들로부터 획득된 계수들을 이용하여 추정할 수 있다. 만약 주에너지창의 너비를 W_m , 그리고 부에너지창들의 너비들을 각각 W_s 라고 가정한다면, C_s 는 W_m 을 높이 그리고 부에너지창들에서 측정된 계수들을 윗변과 아랫변으로 하는 사다리꼴의 면적으로부터 추정할 수 있다.

삼중 에너지창 방법(Triple energy window method), 삼중 에너지창(TEW) 방법⁸⁾은 식(2) 사다리꼴 근사식(trapezoidal approximation)을 이용하여 산란계수를 추정할 수 있다. Fig. 1A는 TEW 방법을 적용하기 위해서 산란에너지창들을 주에너지창에 인접하게 설정한 것을 보여준다.

$$C_s \cong \left(\frac{C_{left}}{W_s} + \frac{C_{right}}{W_s} \right) \cdot \frac{W_m}{2} \quad (2)$$

위의 방법은 저에너지쪽의 산란에너지창만을 사용하는 다음의 삼각 근사식(triangular approximation)으로 수정할 수 있다.¹⁸⁾

$$C_s \cong \frac{C_{left}}{W_s} \cdot \frac{W_m}{2} \quad (3)$$

개선된 삼중 에너지창 방법(Extended triple energy window method), Fig. 1A와 유사하게 Fig. 1B는 주에너지창의 경계로부터 떨어져 산란에너지창들을 설정한 것을 보

여준다. TEW와 같이 개선된 삼중 에너지창 방법(ETEW)은 사다리꼴의 근사식을 이용하여 산란성분을 선형적으로 추정하는 방법이다. 즉, 인접된 산란에너지창들로부터 얻어진 산란성분들에 의해 쉽게 추정할 수 있는 식(2)와는 달리, ETEW는 주에너지창의 경계와 산란에너지창들이 떨어진 거리를 고려한다. 즉, 산란에너지창들로부터 획득된 산란계수(C_{left} , C_{right})들을 아랫변과 윗변으로 하고, 좌우 산란에너지창의 중심들간의 차이를 높이로 하는 사다리꼴의 넓이부터 주에너지창에 포함된 산란만을 유추할 수 있다. 다음과 같이 사다리꼴 근사식으로 산란계수를 추정한다.

$$C_s \cong \left(\frac{C_{left}}{W_s} - \frac{C_{right}}{W_s} \right) (W_1 + W_2) \frac{W_m}{2W} + \frac{C_{right}}{W_s} \cdot W_m \quad (4)$$

여기서, W 는 좌우 산란에너지창의 중심들간의 차이이다. W_1 는 주에너지창의 저에너지 경계와 오른쪽 산란에너지창의 중심간의 차이이고, W_2 는 주에너지창의 고에너지 경계와 오른쪽 산란에너지창의 중심간의 차이이다.

식(5)는 식(3)처럼 삼각 근사식으로 수정된 것을 보여준다.

$$C_s \cong \left(\frac{C_{left}}{W_s} \right) (W_1 + W_2) \left(\frac{W_m}{2W} \right) \quad (5)$$

식(4)와 식(5)에서 보여주는 ETEW 방법들은 산란에너지창들을 주에너지창에 인접시키지 않는 경우뿐만 아니라, 주에너지창에 인접시키는 TEW로도 유도할 수 있다. 즉, 주에너지창들을 주에너지창에 인접시키면 식(4)와 식(5)는 각각 식(2)와 식(3)으로 전환된다.

2. SPECT 데이터에 대한 몬테칼로 시뮬레이션

SPECT 카메라에서 획득된 데이터에 대해 조사하기 위해서 몬테칼로 기법을 사용하였다. 컴퓨터 시뮬레이션은 산란 성분과 일차광자들을 정확하게 구분하여 줄 수 있으므로 산란보정의 정확도를 평가하는데 도움을 준다. SPECT에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 위해 SIMIND 코드를 사용하였다.^{21,22)}

1) 데이터 시뮬레이션

360 회전모드로 Elscint VariCam (Elscint Ltd., Haifa, Israel)에서 사용되는 LEGP (low-energy general purpose) 조준기와 128×128 매트릭스를 이용하여 시뮬레이션을 실행하였다. NaI(Tl) 결정은 40×50×0.95 cm으로 하였고, 화소 크기는 0.30 cm이었다. 140 keV (모든 시뮬레이션에 대해 사용된 에너지)에 대한 에너지 분해능과 고유 공간 분해능

은 각각 9.8%와 0.32 cm이었다. 선원으로부터 검출기까지의 거리는 15 cm이었으며, 10%, 15%, 20% 주에너지창들에서 발생하는 계수들에 대해 통계적 잡음을 줄이기 위해서 투사 영상당 10^7 광자로 시뮬레이션을 실행하였다

2) 산란 보정

본 연구에서는 모든 주에너지창들에 대해 산란성분들을 제거하기 위해 삼각 근사법을 이용하였다. ETEW와 TEW에 대한 산란에너지창의 너비(W_s)는 3 keV이었다.

TEW 방법을 적용하기 위해서, 저에너지쪽의 산란창(lower energy scatter window, LESW)만을 고려하였고, 10% 주에너지창에 대해 130.0~133.0 keV, 15% 주에너지창에 대해 126.5~129.5 keV, 20% 주에너지창에 대해 123.0~126.0 keV으로 하여 산란에너지창을 설정하였다.

ETEW 보정 방법을 적용하기 위하여 다음과 같이 산란에너지창을 설정하였으며, 주에너지창 내에서 산란성분이 선형적으로 감소한다고 가정하고 적당한 산란에너지창을 설정하기 위해서 임상적으로 자주 이용되는 15%와 20% 주에너지창에 인접한 산란에너지창들을 각각 이용하였다.

ETEW(1)의 경우 10% 와 15% 주에너지창들에 대해 시뮬레이션을 실행하였고, LESW와 고에너지쪽의 산란에너지창(upper energy scatter window, UESW)은 각각 126.5~129.5 keV와 150.5~153.5 keV이었다. ETEW(2)의 경우 10%, 15%, 20% 주에너지창들에 대해 시뮬레이션을 실행하였고, LESW와 UESW는 각각 123.0~126.0 keV와 154.0~157.0 keV이었다. ETEW(1)은 128 keV와 152 keV을 중심으로 하는 산란에너지를 사용하고 또한 이 범위 내에서 산란계수를 선형적으로 추정할 수 있다고 가정하기 때문에, 128~152 keV 범위를 벗어나는 산란성분들은 추정할 수가 없다. 즉, 20% 주에너지창의 설정은 위의 에너지 범위를 벗어나기 때문에 ETEW(1)을 적용하지 않았다.

ETEW(1)과 ETEW(2)를 사용하여 주에너지창 내의 산란성분들을 정확하게 추정하였는가를 알아보기 위해 산란성분의 참값과 비교하여 평가하였다.

점선원 또는 직경 1 cm인 구(cold or hot sphere)들이 포함된 직경이 20 cm이고 길이가 25 cm인 가상의 원통형 물팬텀을 이용하여 시뮬레이션을 실행하였다. Hot sphere들과 배후방사능간의 상대적인 방사능 농도는 3.0:0.2이었다. Fig. 2에서 보여주는 것처럼, 5개의 구를 원통형 팬텀 안에 놓았다. 5개의 구중 하나를 팬텀 중심에 위치시켰고, 나머지 4개의 구를 중심으로부터 방사방향으로 5 cm 떨어진 곳에 위치시켰다. ETEW(1), (2)와 TEW에 의해 추정된 산란성분을 평가하기 위해서 점선원을 사용하였다. 산란이 있을 때와 없

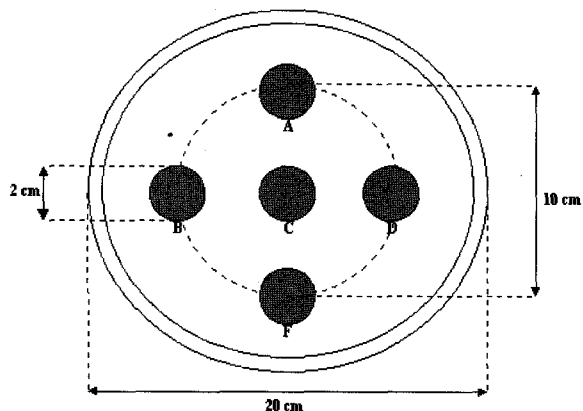


Fig. 2. A cylindrical phantom with cold or hot spheres. Diameters of spheres and cylindrical phantom are 2 and 20 cm, respectively. Four cold or hot spheres were placed at the 5-cm distance from the center of cylindrical phantom and one of them was placed at the center of cylindrical phantom.

을 때로 나누어 점선원 시뮬레이션을 실행하였고, 정량적인 데이터 분석을 위해 산란이 없는 데이터를 이상적인 데이터로써 사용하였다.

3) 영상재구성

0.5 cm⁻¹의 한계진동수와 Hamming 필터를 이용 역과후역투사(filtered back-projection) 방법으로 시뮬레이션이 된 방출 데이터를 재구성하였다. 정량적인 데이터 분석을 위해서 DSI (Digital Scintigraphics Inc, MA, USA)에 의해 제공된 영상처리 소프트웨어를 사용하였다.

3. 데이터 분석

ETEW와 TEW를 다음과 같이 비교 평가하였다. 산란보정에 대한 평가와 비교 목적을 위해 %NMSE (normalized mean square error), 영상 대조도, %회복계수(recovery coefficient), %NSD (normalized standard deviation)을 계산하였다. %NMSE를 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$\%NMSE = \frac{\sum [P_i - P_c]^2}{\sum P_i^2} \cdot 100\% \quad (6)$$

여기에서 P_i는 이상적 데이터이고, P_c는 산란보정이 된 데이터이다. 관심영역(ROI)를 사용하여 다음 식에서 보여주는 것처럼 영상 대조도를 계산하였다.

$$\text{대조도} = \left[\frac{C_{ROI}}{C_{BG}} - 1 \right] \cdot 100\% \quad (7)$$

여기서, C_{ROI}는 재구성된 팬텀 영상 위에 그려진 ROI를 이용하여 측정된 평균 계수이고, C_{BG}는 배후방사능 위에 그려진 ROI를 이용하여 측정된 평균 계수이다. %회복계수를 산란을 보정한 영상 위에 그려진 ROI에서 측정된 평균 계수와 이상적 영상에 그려진 같은 ROI에서 측정된 평균 계수들간의 비율로써 정의하였고, 다음과 같이 계산하였다.

$$\%회복계수 = \frac{C_{ROI}}{C_{ROI}^{ideal}} \cdot 100\% \quad (8)$$

C_{ROI^{ideal}}는 재구성된 이상적 팬텀 영상, 즉 산란이 배제된 팬텀 영상에서 그려진 ROI를 이용하여 측정된 평균 계수이다. 산란보정으로부터 오는 통계적 잡음의 증폭을 평가하기 위해 %NSD를 다음과 같이 계산하였다.

$$\%NSD = \frac{STD}{M} \times 100, \quad STD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (C_i - M)^2}{N}} \quad (9)$$

C_i는 화소 I에서 측정된 계수이고, N은 ROI내에 있는 화소들의 총 수이다. M과 STD는 재구성된 팬텀 영상에서 그려진 ROI내의 평균계수와 표준편차이다.

결 과

산란이 배제된(즉, 이상적 데이터) 영상 데이터를 얻기 위해 몬테칼로 시뮬레이션을 실행하였으며, 이를 이용하여 ETEW와 TEW에 대한 정확도를 평가하였다. 또한 이상적 데이터를 이용하여 광붕우리 에너지창에서 얻어진 영상 데이터로부터 산란성분(즉, 이상적 산란 성분)을 분리하였으며, 이를 이용하여 ETEW와 TEW에 의해서 추정된 산란성분들을 평가하였다. Fig. 3의 에너지 스펙트럼에서 보여주는 것처럼, 140 keV 에너지를 가진 Tc-99m 대해 광붕우리 에너지창 위의 산란성분이 1차 광자에 비해 아주 작은 양이기 때문에 그에 대한 영향을 무시할 수 있다고 가정하였다. Fig. 3B에서 보여주는 것처럼, 9.8% 고유 에너지 분해능을 가진 감마카메라의 광붕우리 에너지창에서 산란성분을 추정하는데 있어서, 선형 회귀 분석에 가장 적합한 ETEW(1)을 선택하였고, ETEW(2)와 비교하였다.

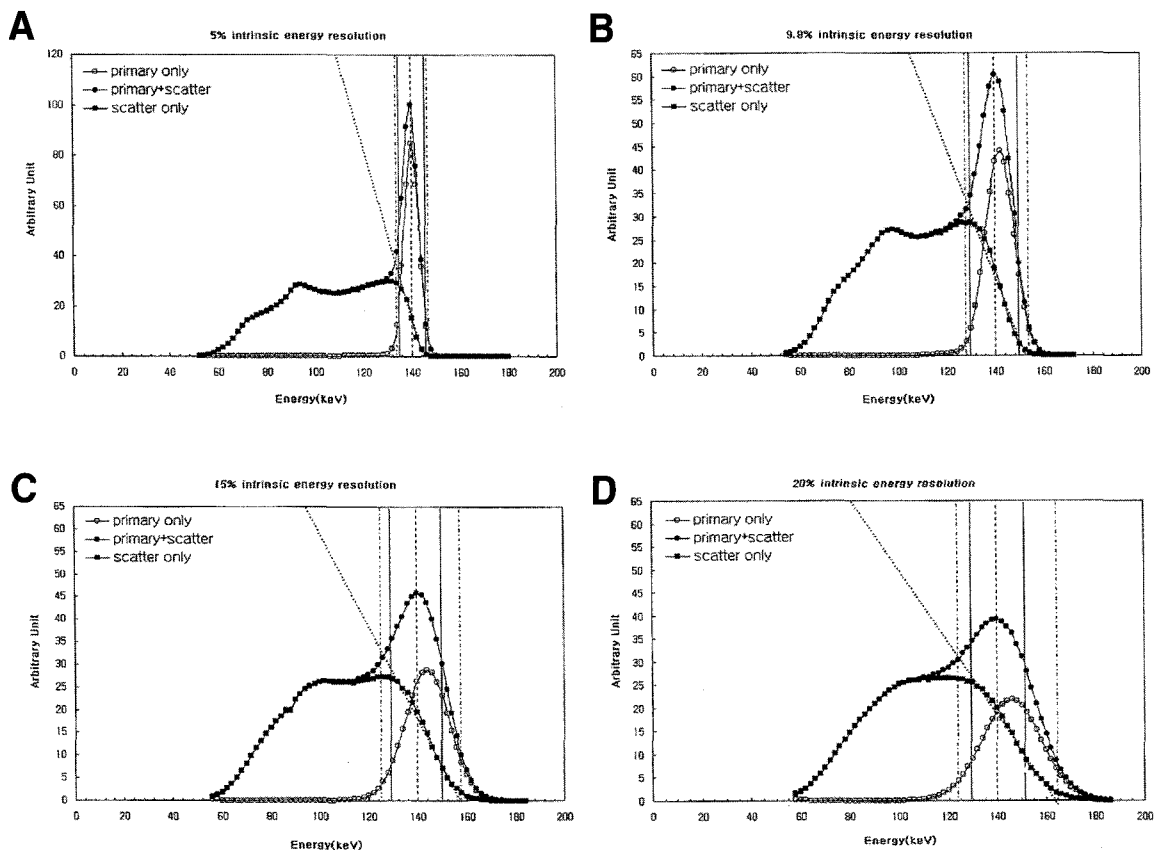


Fig. 3. Energy spectra were acquired by Monte Carlo simulation. (A) Energy spectra acquired with 5 % intrinsic energy resolution. (B) Energy spectra acquired with 9.8 % intrinsic energy resolution. (C) Energy spectra acquired with 15 % intrinsic energy resolution. (D) Energy spectra acquired with 20 % intrinsic energy resolution. Spectra of scatter give an idea for scatter components when the ETEW or TEW method is used for scatter correction. Solid and dot-dashed lines indicate an appropriate main window and scatter windows setting, respectively. A dotted line indicates a scatter fitting line.

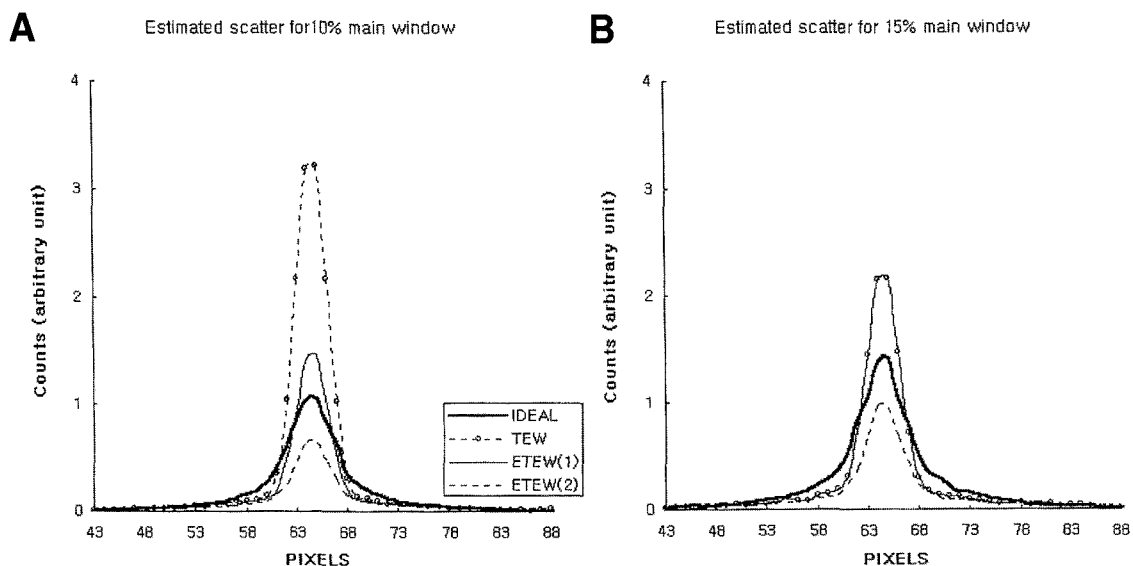


Fig. 4. A point spread function (PSF) of estimated scatter for (A) 10 % and (B) 15 % main energy window. TEW significantly overestimated scatter for 10 % main energy window, and ETEW (1) and TEW for 15% main energy window resulted in the same PSF, because ETEW (1) used the same scatter energy window as that of the TEW method.

Table 1. NMSEs* measured for evaluation of scatter correction methods using point source

Main energy window(%)	Photopeak (%)	TEW [†] (%)	ETEW(1) [‡] (%)	ETEW(2) (%)
10	1.13	1.57	0.13	0.31
15	1.45	0.19	0.19	0.33
20	1.90	0.34	NA	0.34

*NMSE-normalized mean square error, [†]TEW-triple energy window, [‡]ETEW-extended triple energy window

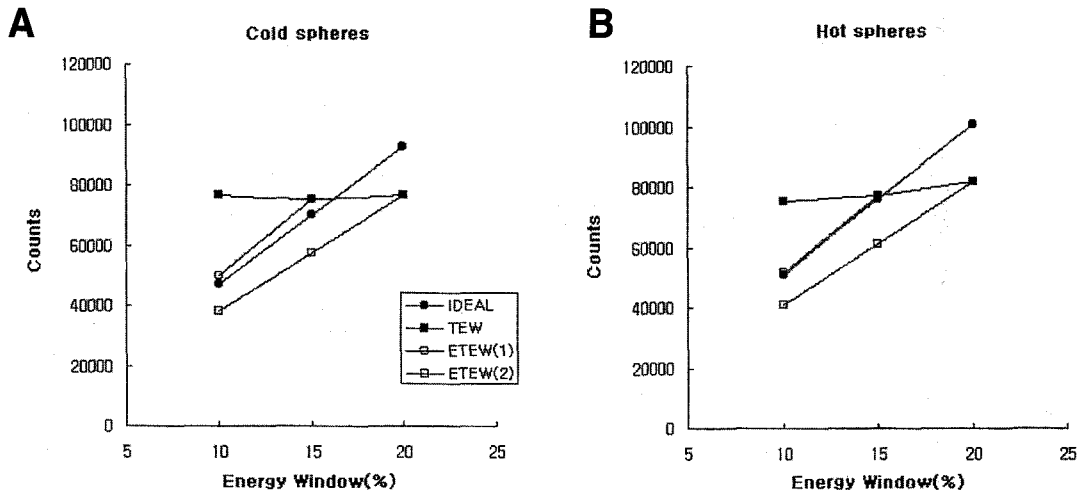


Fig. 5. The total scatter counts of projection images of (A) cold and (B) hot spheres phantom for three main energy windows. Estimated scatter components by TEW were overestimated for 10 % main energy window and underestimated for 20% main energy window.

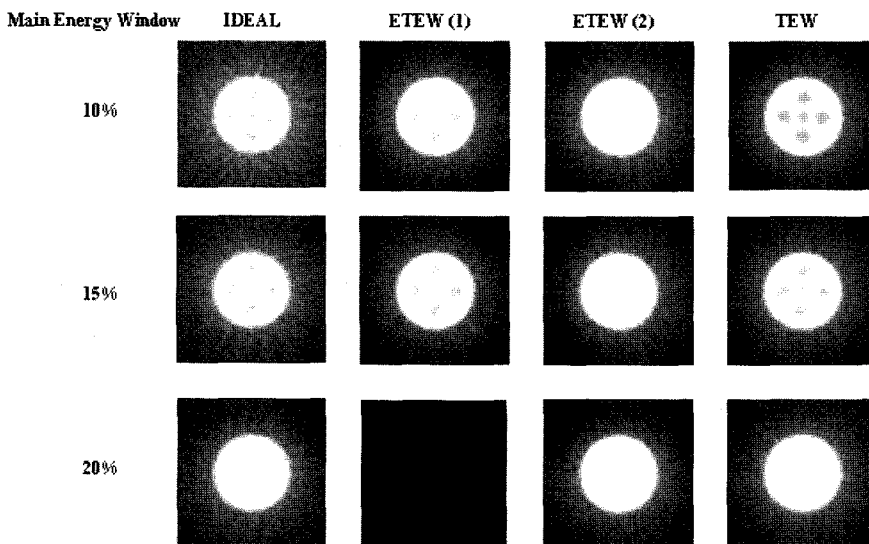


Fig. 6. Reconstructed images of scatter only data for a cold sphere phantom. Scatter for 20 % main energy window by ETEW (1) was not possible since the scatter energy windows would have to be set within the main energy window.

1. 점선원 시뮬레이션

각 산란보정 방법들에 대해서 점퍼짐 함수(point spread function, PSF)와 %NMSE를 비교하였다. 추정된 계수와 PSF의 모양을 이용하여 PSF들을 비교 평가하였다. Fig. 4는 10% (Fig. 4A)와 15% (Fig. 4B) 주에너지창에서 추정된

산란성분의 PSF들을 보여준다. Fig. 4에 의하면, TEW는 10% 주에너지창 내의 산란성분을 ETEW(1)보다 과대평가하였고, ETEW(1) 또한 10% 주에너지창 내에 있는 이상적 산란성분보다 과대평가한 것을 볼 수 있었다. 또한 15% 주에너지창에서 ETEW(1)과 TEW 모두 15% 주에너지창에 인

Table 2. Mean contrasts measured for evaluation of scatter correction methods using cold sphere phantoms

Main energy window (%)	IDEAL (%)	Photopeak (%)	TEW* (%)	ETEW(1) [†] (%)	ETEW(2) (%)
10	38.2±2.9	34.0±2.6	37.1±2.5	38.2±2.8	38.4±2.8
15	38.0±2.8	33.0±2.8	38.0±3.0	38.0±3.0	38.2±3.0
20	38.1±2.9	31.3±2.6	37.2±2.8	NA	37.2±2.8

*TEW-triple energy window, [†]ETEW-extended triple energy window

Table 3. Mean % recovery coefficients measured for evaluation of scatter correction methods using cold sphere phantoms

Main energy window (%)	Photopeak (%)	TEW* (%)	ETEW(1) [†] (%)	ETEW(2) (%)
10	126.9±3.2	89.9±0.9	98.7±0.5	102.5±0.4
15	134.2±3.9	99.12±0.5	99.1±0.5	103.9±0.5
20	143.5±5.7	105.6±0.7	NA	105.6±0.7

*TEW-triple energy window, [†]ETEW-extended triple energy window

Table 4. NMSEs* measured for evaluation of scatter correction methods using cold sphere phantoms

Main energy window(%)	Photopeak (%)	TEW [†] (%)	ETEW(1) [†] (%)	ETEW(2) (%)
10	4.02	2.14	0.85	0.91
15	5.67	0.83	0.83	2.22
20	8.46	1.06	NA	1.06

*NMSE-normalized mean square error, [†]TEW-triple energy window, [†]ETEW-extended triple energy window

Table 5. Mean contrasts measured for evaluation of scatter correction methods using hot sphere phantoms

Main energy window(%)	IDEAL (%)	Photopeak (%)	TEW* (%)	ETEW(1) [†] (%)	ETEW(2) (%)
10	70.9±1.6	68.8±1.6	70.2±1.6	70.5±1.6	70.5±1.6
15	70.8±1.6	68.3±1.5	70.3±1.5	70.3±1.5	70.4±1.5
20	70.9±1.6	67.7±1.5	70.2±1.5	NA	70.2±1.5

*TEW-triple energy window, [†]ETEW-extended triple energy window

접한 같은 산란에너지창을 사용하고 있기 때문에 방법에서 설명한 것처럼 ETEW(1)과 TEW는 같다고 할 수 있다. 그러므로, 두 방법은 산란성분을 유사하게 추정하였다. 반면에, ETEW(2)의 경우 추정된 산란을 10%와 15% 주에너지창 모두에서 과소평가하였다. Table 1은 산란보정 방법들에 대한 PSF들의 %NMSE들을 보여준다. %NMSE들은 ETEW에 대해 가장 좋은 값을 보여주었다. 비록 15%와 20% 주에너지창의 경우 TEW에 의한 데이터의 %NMSE들이 산란이 포함된 광붕우리 데이터보다 낮은 값을 보였으나, 10% 주에너지창의 경우 %NMSE가 광붕우리 데이터의 값과 유사하였다.

2. 구(sphere) 시뮬레이션

산란보정 방법들을 비교평가하기 위해서 구들에 대한 영상 대조도, %회복계수, %NMSE, %NSD를 계산하였다. 또한, 10%, 15%, 20% 주에너지창들에서 각각 얻어진 계수들을 비교하였다. Fig. 5는 cold (Fig. 5A)와 hot (Fig. 5B)

sphere들에 대한 산란 계수들을 비교한 것을 보여준다. TEW에 의해서 추정된 산란 계수들은 10%, 15%, 20% 주에너지창에 대해 거의 일정하였다. 즉, 10% 주에너지창의 경우 TEW가 산란성분을 과대평가하고, 20% 주에너지창의 경우 산란성분을 과소평가한다는 것을 의미한다. 반면에, 이상적 산란 계수들은 주에너지창의 너비에 따라 비례한다. ETEW(1)가 cold sphere의 산란성분을 약간 과대하게 추정하였을지라도, 주에너지창의 너비에 따라 비례하였다. 또한 ETEW(2)는 산란성분을 과소하게 평가하였지만 주에너지창의 너비에 따라 비례하였다.

Cold sphere 시뮬레이션. Fig. 6은 cold sphere들의 산란성분들만을 재구성한 영상을 보여준다. Table 2와 3은 cold sphere들 위에 그려진 ROI들을 이용하여 계산한 평균 대조도와 %회복계수를 보여주고, Table 4는 %NMSE들의 결과들을 보여준다. TEW와 ETEW 방법 모두 영상 대조도를 개선시켰다. 20% 주에너지창에 대해 ETEW(1)을 적용하지 못할지라도, ETEW(1)을 적용하여 보정된 영상들의 영상

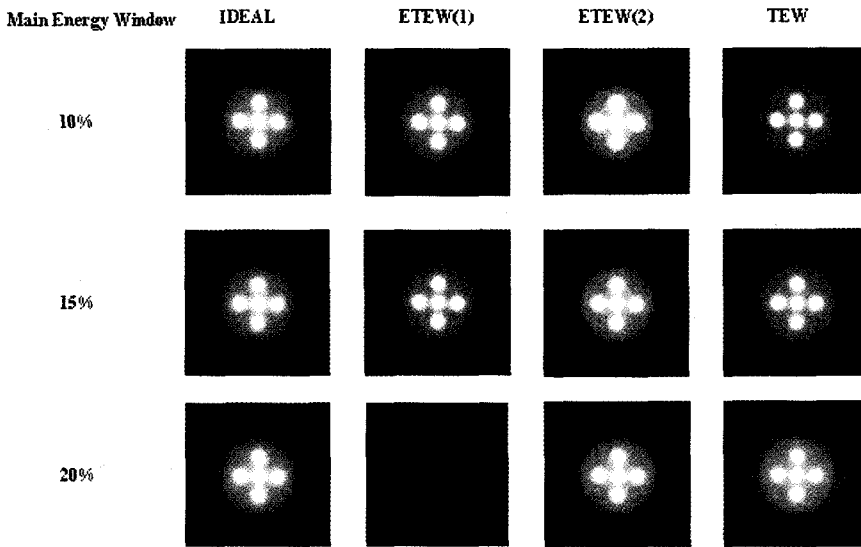


Fig. 7. Reconstructed images of scatter only data for a hot sphere phantom. Scatter data for 20 % main energy window by ETEW (1) was not able to be estimated because of limitations of setting-up scatter energy window for 20% main energy window.

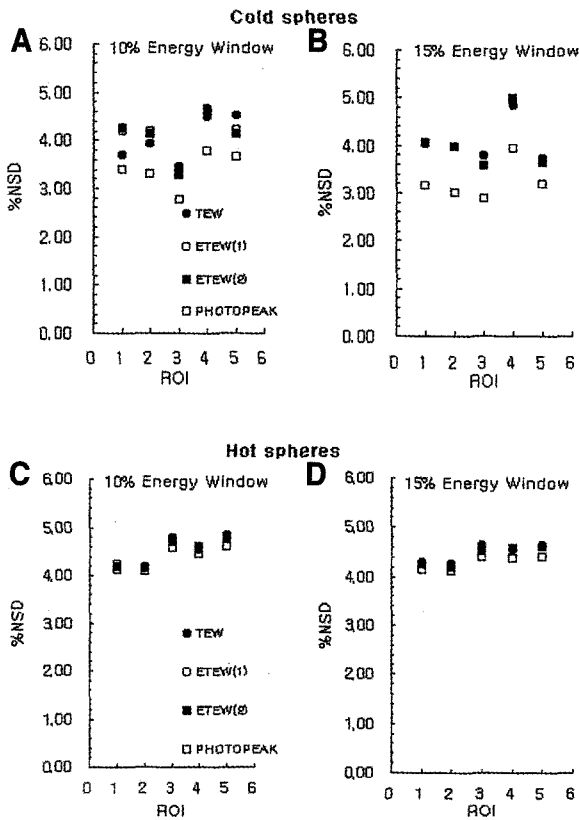


Fig. 8. % normalized standard deviation (NSD) calculated in a cold sphere phantom for (A) 10 % and (B) 15 % main energy window and in a hot sphere phantom for (C) 10 % and (D) 15 % main energy window. The % NSD was nearly equal in all the ROIs for the ETEW and TEW.

대조도는 이상적 영상 대조도와 거의 일치하였다. 또한, %NMSE값들은 ETEW(1)에 의해 보정된 데이터에서 가장

낮았고, 모든 주에너지창들에 대해 거의 일정한 값을 보여주었다. 또한 TEW와 ETEW(2)를 이용하여 보정된 데이터의 %NMSE가 ETEW(1)보다 높았지만 광봉우리 데이터의 %NMSE보다 더 낮은 값을 보여주었다. ETEW와 TEW에 대해 선택된 모든 ROI들에서 %NSD는 유사하게 나타났으나, 광봉우리에서 얻어진 값보다 높게 나타났다(Fig. 8A and 8B).

Hot sphere 시뮬레이션. Fig. 7은 hot sphere들에서 산란 성분만을 이용하여 재구성한 영상들을 보여준다. Hot sphere 들을 이상적 데이터와 비교시 모든 주에너지창들에 대해 명확한 영상을 보여주었다. Table 5와 6은 hot sphere들 위에 그려진 ROI들로 얻어진 평균 영상 대조도와 %회복계수들을 보여준다. Table 7은 ETEW(1)과 ETEW(2) 그리고 TEW 방법들이 광봉우리 데이터보다 %NMSE와 대조도를 개선시킨 것을 보여주었고, 거의 비슷하게 좋은 결과들을 보여주었다. 그러나, ETEW(1)은 ETEW(2)와 TEW보다 더 좋은 %회복계수와 %NMSE를 초래하였다(Table 6, 7). Cold sphere들의 시뮬레이션에서 보여준 것처럼, %NSD는 ETEW와 TEW에 대해 모든 ROI들에 대해 거의 비슷하였다(Fig. 8C와 8D). 산란보정을 적용하였을 경우, cold sphere 들을 가진 팬텀에서 나타난 것처럼 광봉우리창에서 얻은 %NSD가 더 높았지만 유의하게 증가시키지는 않았다.

토 론

TEW 방법이 주에너지창의 선택에 따라 산란성분을 과대 평가하거나 과소평가하지만 ETEW와 TEW 방법 모두 영

Table 6. Mean % recovery coefficients for evaluation of scatter correction methods using hot sphere phantoms

Main energy window (%)	Photopeak (%)	TEW* (%)	ETEW(1) [†] (%)	ETEW(2) (%)
10	115.4±3.1	90.0±0.8	101.1±0.6	106.1±0.5
15	118.0±3.9	100.2±0.8	100.2±0.8	106.5±0.7
20	121.2±5.0	106.8±1.0	NA	106.8±1.0

*TEW-triple energy window, [†]ETEWE-extended triple energy window

Table 7. *NMSEs measured for evaluation of scatter correction methods using hot sphere phantoms

Main energy window (%)	Photopeak (%)	TEW [†] (%)	ETEW(1) [‡] (%)	ETEW(2) (%)
10	0.91	1.06	0.53	0.84
15	6.30	0.53	0.53	0.93
20	9.29	1.09	NA	1.09

*NMSE-normalized mean square error, [†]TEW-triple energy window, [‡]ETEWE-extended triple energy window

상 대조도를 개선시켰다. TEW 방법의 경우 주에너지창의 너비에 따라 %회복계수가 달라지는 것을 Table 3에서 보여 주었다. 즉, 주에너지창의 너비에 따라 TEW 방법으로 보정된 데이터에서 얻어진 %회복계수의 변화가 심한 것을 보여 주었는데, 이는 주에너지창에 따라 설정된 산란에너지창이 달라지기 때문에 TEW에 적용하는 높이 즉, C_{left} 가 달라지기 때문이다. ETEW(2)의 경우 Fig. 5에서 보여주는 것처럼, 산란성분들을 과소평가하였기 때문에, 일차계수들을 과대평가하였다. 그러나, ETEW(2)의 경우 산란을 포함한 광봉우리창에서 얻은 데이터를 사용하는 것보다 영상 대조도, %NMSE, %회복계수들을 개선시켰다.

ETEWE(1)의 경우 %회복계수에 대해 가장 좋은 결과를 초래하였다. 즉, cold sphere들을 가진 팬텀에 대해 10% 주에너지창에서 $98.7 \pm 0.5\%$ 와 15% 주에너지창에서 $99.1 \pm 0.5\%$ 이었고, hot sphere들을 가진 팬텀에 대해 10% 주에너지창에서 $101.1 \pm 0.6\%$ 와 15% 주에너지창에서 $100.2 \pm 0.8\%$ 이었다. 즉, ETEWE(2)와 TEW보다 산란성분을 더 잘 평가하였다. TEW에 대한 결과는 주에너지창에 인접된 산란에너지창을 사용하는 경우 정량적으로 정확하지 않은 값을 초래할 수 있다는 것을 지적한다. 또한 본 연구의 결과는 ETEWE(1)과 같이 적당한 산란에너지창을 사용한다면, 산란에너지 창계 내에서 ETEWE가 더 정확한 정량분석을 제공할 수 있다는 것을 의미한다.

앞에서 설명한 결과들은 선형적으로 정확하게 산란계수들을 추정하기 위해서, 128 keV와 150 keV를 중심으로 하는 고정된 부에너지창, 즉, ETEWE(1)의 산란에너지창들이 9.8% 고유에너지 분해능을 가진 감마카메라에서 최적이라는 것을 보여주었다. 그러나, Fig. 3은 최적의 산란에너지창이 감마카메라의 에너지 분해능에 달려있다는 것을 지적한다. 앞에서 설명한 것처럼, ETEWE(2)의 결과들은 주에너지

창들에 대해 개선된 영상 대조도와 선형적으로 산란성분을 잘 추정할 수 있지만, 산란에너지창을 최적화하지 않는다면 산란성분들을 과소평가할 수 있다는 것을 지적한다. 더욱이, Fig. 3은 고유에너지 분해능이 낮은 시스템의 경우 주에너지창에 인접하지 않는 산란에너지창이 산란 성분들을 더 잘 평가할 수 있다는 것을 지적한다. 본 연구에서 10% 주에너지창에서 얻은 데이터에 ETEWE와 TEW를 적용하여 비교한 것을 보여주었지만, 일반적으로, 15%보다 작은 주에너지창은 임상적으로 사용하지 않는다. 그러나, ETEWE 사용시 주에너지창의 너비가 좁을수록 고에너지 또는 저에너지 분해능을 가진 시스템에서 산란성분을 더 정확하게 평가하는데 도움을 줄 수 있다.

최근, 1차 광자들이 산란에너지창에 미치는 영향을 제거하기 위해 산란에너지창을 주에너지창에 인접하지 않고 TEW를 적용한 연구들에 대한 보고가 있었다.^{23,24)} 그러나, 주에너지창에 인접하지 않는 산란에너지창을 TEW에 적용하는 것은 광봉우리 데이터가 포함된 영역에서 산란성분을 과대평가할 수 있다. 즉, TEW는 산란에너지창과 주에너지창 사이에 있는 산란성분을 배제하는 것이 가능하지 않다. 반면에, ETEWE는 산란에너지창과 주에너지창 사이에 있는 산란성분을 배제하면서 주에너지창안의 산란성분만을 평가할 수 있다.

삼각 근사법은 몇몇 연구자들에 의해서 보여준 것처럼,^{4,14)} Tc-99m에 대해 좋은 영상질을 제공한다. 사다리꼴 근사법은 다른 연구자들에 의해서 보고된 것처럼,⁴⁾ 광봉우리위의 에너지창의 사용이 적당하지 않기 때문에, Tc-99m에 대해 산란성분을 과대평가할 수 있다. 즉, Tc-99m에 대해 삼각 근사법은 산란성분을 더 정확하게 평가할 수 있다. 그러나, Tl-201, I-131과 같은 다중에너지 방사성 핵종들^{17,19)}과 이중 방사성 핵종^{18,25)}들의 사용시, 사다리꼴 근사법은 광

붕우리 에너지창위의 산란 때문에 더 좋은 결과를 초래할 수 있다.

임상 감마카메라에 적용하기 위한 최적의 산란조건을 제공하기 위해서, 산란에너지창 설정에 대한 연구가 지속될 필요가 있다. 이러한 최적의 산란조건은 영상질 그리고 정량적으로 영상을 분석하는데 있어서 도움을 줄 것이다

본 연구는 TEW 방법을 인접된 산란에너지창을 요구하지 않고, 주에너지창들에 따라 산란성분들을 선형적으로 평가하는데 요구되는 고정된 산란에너지창을 사용하는 ETEW로 확장하였다. ETEW 방법은 주에너지창에 민감한 TEW 방법보다 주에너지창의 너비의 함수로써 다양한 주에너지창에 대해 선형적으로 더 정확하게 산란 성분들을 평가할 수 있다.

감사의 글

본 논문을 통해, 저자들은 SIMIND 몬테칼로 코드의 사용하게 한 Dr. Michel Ljungberg에게 감사드립니다. 본 연구는 의료영상물리 및 표준화기술 개발 제목으로 대한민국 과학기술부 원자력연구개발 중장기계획사업 연구비를 지원 받아 수행하였습니다.

요 약

목적: 삼중에너지창 산란보정 방법(triple energy window method, TEW)을 위해 사용하는 인접된 산란에너지창은 산란을 부적당하게 평가할 수 있다. 본 연구의 목적은 인접된 산란에너지창을 사용하지 않고, TEW의 단점을 보완하는 개선된 삼중에너지창 방법(extended triple energy window method, ETEW)으로 확장하는 것이다. **대상 및 방법:** TEW에서 사용하는 인접된 산란에너지창은 주에너지창의 설정에 따라 산란성분을 과소평가하거나 과대평가할 수 있다. 이에 비해 ETEW는 주에너지창에 인접되지 않는 산란 에너지창을 사용하여 TEW를 광범위하게 사용할 수 있도록 확장한 방법이다. 본 연구에서는 cold sphere들 또는 hot sphere들을 가진 원통형 물팬텀과 점선원들에 대한 몬테칼로 시뮬레이션을 실행하여 ETEW와 TEW를 비교 평가하였다. 또한 다양한 주에너지창 너비들(10%, 15%, 그리고 20%)을 이용하여 시뮬레이션을 실행하였다. 데이터 분석을 위해서 영상대조도, %회복계수, 정규화된 표준편차를 계산하였다. **결과:** TEW와 ETEW 모두 산란보정전보다 영상대조도와 %회복계수를 개선시켰다. 그러나, TEW에 의해 추정된 산란성분들은 10%, 15%, 그리고 20%의 주에너지창

너비들에 대해 시뮬레이션이 된 산란성분들의 참값에 비해 하지 않았으나, ETEW는 참값에 직접으로 비례하는 산란 성분들을 추정하였다. **결론:** 본 연구는 기존의 TEW 산란 보정 방법이 가지고 있던 단점을 보완하여 ETEW 방법으로 확장하였다.

References

1. Ljungberg M, Msaki P, Strand S-E. Comparison of dual-window and convolution scatter correction techniques using the Monte Carlo method. *Phys Med Biol* 1990;8:1099-110.
2. Floyd CE, Jaszack RJ, Greer KL, Coleman RE. Deconvolution of Compton scatter in SPECT. *J Nucl Med* 1985;26:403-8.
3. Msaki B, Axelsson B, Larsson SA. Some physical factors influencing the accuracy of convolution scatter correction in SPECT. *Phys Med Biol* 1988;34:283-98.
4. Ljungberg M, King MA, Hademenos GJ, Strand S-E Comparison of four scatter correction methods using Monte Carlo simulated source distributions. *J Nucl Med* 1994;35:143-51.
5. Jaszack RJ, Greer KL, Floyd CE, Harris CC, Coleman RE. Improved SPECT quantification using compensation for scattered photons. *J Nucl Med* 1984;25:893-900.
6. King MA, Hademenos GJ, Glick S JA Dual photopeak window method for scatter correction. *J Nucl Med* 1993;33:605-13.
7. Koral KF, Swailen FM, Buchibinder S, Clinthorne NH, Rogers WL, Tsui BMW. SPECT dual-energy-window compton correction: Scatter multiplier required for quantification. *J Nucl Med* 1990;31:90-8.
8. Ogawa K, Harata H, Ichihara T, Kubo A, Hashimoto SA Practical method for position dependent compton-scatter correction in single photon emission CT. *IEEE Trans Med Imag* 1991;10:408-12.
9. Axelsson B, Msaki P, Israelson A. Subtraction of Compton-scattered photons in single-photon emission computerized tomography. *J Nucl Med* 1984;25:290-4.
10. Pretorius PH, Van Rensburg AJ, Van Aswegen A, Lter MG, Serfontein DE, Herbst CP. The channel ratio method of scatter correction for radionuclide image quantitation. *J Nucl Med* 1993;34:330-5.
11. Zimmerman RE, Williams BB, Chan KH, Moore SC, Kijewski MF. Limitations of dual-photopeak window scatter correction for brain imaging. *J Nucl Med* 1997;38:1902-6.
12. Hademenos GJ, King MA, Ljungberg M. Influence of phantom size, shape, and density, and collimator selection on the dual photopeak window scatter correction method. *IEEE Trans Nucl Sci* 1994;41:364-8.
13. De Vries DJ, King MA. Window selection for dual photopeak window scatter correction in Tc-99m Imaging. *IEEE Trans Nucl Sci* 1994;41:2771-8.
14. Buvat I, Rodriguez-Villafuerte M, Todd-Pokropek A, Benali H, Di Paola R. Comparative Assessment of nine scatter correction methods based on spectral analysis using Monte Carlo simulations. *J Nucl Med* 1995;36:1476-88.
15. Hademenos GJ, Ljungberg M, King MA, Glick SJ. A Monte Carlo investigation of the dual photopeak window scatter correction method. *IEEE Trans Nucl Sci* 1993;40:179-85.
16. Luo J-Q, Koral KF, Ljungberg M, Floyd CE, Jaszczak RJ. A Monte Carlo investigation of dual-energy window scatter correction for volume-of-interest quantification in ^{99m}Tc SPECT. *Phys Med*

- Biol* 1995;40:181-99.
17. Pollard KR, Lewellen TK, Kaplan MS, Haynor DR, Miraoka RS, Eary JF, et al. Energy-based scatter corrections for scintillation camera images of Iodine-131. *J Nucl Med* 1996;37:2030-7.
 18. Ichihara T, Ogawa K, Motomura N, Kubo A, Hashimoto S. Compton scatter compensation using the triple-energy window method for single- and dual-isotope SPECT. *J Nucl Med* 1993;34:2216-21.
 19. Dewaraja Y, Li J, Koral K. Quantitative ¹³¹I SPECT with triple energy window Compton scatter correction. *IEEE Trans Nucl Sci* 1998;6:3109-14.
 20. King MA, De Vries DJ, Pan T-S, Pretorius PH, Case JA. An investigation of the filtering of TEW scatter estimates used to compensate for scatter with ordered subset reconstruction. *IEEE Trans Nucl Sci* 1997;44:1140-5.
 21. Ljungberg M, Strand S-E. A Monte Carlo program for the simulation of scintillation camera characteristics. *Comput Meth Prog Biomed* 1989;29:257-72.
 22. De Vries DJ, Moore SC, Zimmerman RE, Mueller SP, Friedland B, Lanza RC. Development and validation of a Monte Carlo simulation of photon transport in an Anger camera. *IEEE Trans Med Imag* 1990;9:430-8.
 23. Yigal SJ, Farncombe TH, Pretorius PH, Gifford HC, Narayanan MV, Frey EC, et al. Comparison of scatter compensating strategies for myocardial perfusion imaging using Tc-99m labeled sestamibi. *IEEE Trans Nucl Sci* 2002;49:2309-14.
 24. Narayanan MV, Pretorius PH, Dahlberg ST, Leppo JA, Botkin N, Krasnow J, et al. Evaluation of scatter compensation strategies and their impact on human detection performance Tc-99m myocardial perfusion imaging. *IEEE Trans Nucl Sci* 2003;50:1522-27.
 25. Ogasawara K, Hashimoto J, Ogawa K, Kubo A, Motomura N, Hasegawa H, et al. Simultaneous acquisition of iodine-123 emission and technetium-99m transmission data for quantitative brain single-photon emission tomographic imaging. *Eur J Nucl Med* 1998;25:1537-44.