

몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 산란보정 방법들에 대한 비교

*연세대학교 방사선의과학연구소, †연세대학교 진단방사선과학교실,
‡경기대학교 이과대학 물리학과

봉정균,^{*,†} 김희중,^{*,†} 이종두,^{*,†} 권수일[‡]

단일광자방출촬영(SPECT)에 대한 산란보정은 영상질을 개선하고 영상을 정량분석하는데 중요한 역할을 한다. 본 연구의 목적은 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 에너지 창을 이용한 세 가지 산란보정들에 대해 조사하는 것이었다. 몬테카를로 방법을 이용하여 Tc-99m에서 방출되는 광자의 history를 발생시키는 점선원과 Jaszack 팬텀에 대해 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션을 위한 SPECT 시스템의 섬광체 NaI(Tl)은 두께 0.95 cm, 40 x 45 cm이었고, 조준기는 저에너지용 조준기를 사용하였다. 140 keV에서 SPECT에 대한 에너지 분해능은 9.8 %, 고유공간분해능은 0.32 cm이었고, 화소크기는 0.3 x 0.3 cm²이었다. 산란보정방법에는 컴프턴창을 이용한 방법(CW), 세 개의 에너지창을 이용한 방법(TW), 그리고 이중 광봉우리창을 이용한 방법(DPW)을 사용하였다. DPW의 다항식 계수를 구하기 위해서 직경 20 cm인 팬텀안에서 깊이에 따라 점선원을 위치시켜 평면 영상을 얻었다. 에너지 창은 w1 = 92-125 keV, w2 = 124-126 keV, w3 = 126-140 keV, w4 = 140-154 keV, w5 = 154-156 keV로 설정하였다. SPECT 투사영상은 360° 회전모드로 하여 120개를 얻었다. 회전반경은 15 cm이었다. 산란보정방법들은 삼중 에너지창을 이용한 방법은 cold sphere를 가진 Jaszack phantom에서 참값에 가장 가까운 대조도를 주었고, hot sphere를 가진 Jaszack phantom에서 image recovery에 있어서 좋은 것으로 나타났다. 컴프턴 창을 이용한 방법은 대조도에 있어서 참값보다 과대평가되어 나타났고 이중 광봉우리창을 이용한 방법은 산란보정하기 전에 비해 대조도는 좋아졌지만 참값에 비해 과소평가되어 나타났다. 조사된 세 가지 보정방법들은 개선된 영상 대조도를 보여주었다. 결론적으로, 산란보정에 대한 임상적용을 위해서는 SPECT 시스템에 실행하기 용이한 보정방법을 선택해하며, 정확한 정량분석을 위해서는 산란보정이 수행되어야 할 것이다.

중심단어 : 몬테카를로 시뮬레이션, 컴프턴창을 이용한 방법, 세 개의 에너지창을 이용한 방법, 이중 광봉우리창을 이용한 방법

서 론

단일광자방출전산화단층촬영(Single photon emission computed tomography, SPECT)의 정확한 정량분석

Corresponding Author :

Hee-Joung Kim, Ph.D

Dept. of Diagnostic Radiology

Yonsei University College of Medicine,

134 Shinchon-Dong, Seodaemoon-Gu, Seoul, Korea

120-752

Tel : (02) 361-5753, Fax : (02) 313 - 3039,

E-mail : hjkim@yumc.yonsei.ac.kr

은 SPECT 시스템의 특성(에너지 분해능, 공간분해능, 민감도, 균일도 등), 물리적 현상(산란 감쇠, 벽통과, 부분용적효과), 영상재구성 그리고 환자의 움직임에 의해서 영향을 받는다. 이러한 요소들 중에서, 산란의 문제는 퍼짐효과 때문에 많이 연구되어져 오고 있다. 산란광자들은 산란광자들의 마지막 산란과정의 위치에 대응하는 위치에서 검출되기 때문에, 방출위치에 대한 잘못된 정보를 전달할 것이다. 결과적으로, 영상에서 산란은 대조도, 공간분해능, 그리고 정량분석에 영향을 준다.¹⁻⁴⁾ 산란의 영향은 일반적으로 광자에너지, 카메라 에너지 분해능, 에너지창 설정, 물체의 모양, 그리고 방사선의 분포에 달려있다.

이러한 산란을 보정하기 위해 많은 산란보정방법들이 보고되고 있다. 이러한 방법에는 convolution-subtraction 방법(spatial domain methods)들과 부가적인 에너지 창에서 event를 획득하는 것에 의해 산란을 추정하는 방법들이 있다.⁵⁻¹²⁾

본 연구는 산란영향을 시뮬레이션할 수 있는 몬테카를로 방법을 이용하여, 앞에서 나열한 산란보정 방법들 중 에너지창을 이용하는 세 개의 산란보정방법에 대해 조사하였다.

대상 및 방법

1. 몬테카를로 코드

본 연구에서 사용한 몬테카를로 코드는 SIMIND로 써,^{12,13)} photon history와 여러 가지 형태들의 상호작용 과정을 선택하여 시뮬레이션하기 위해서 균일하게 분포된 난수(Random number)에 기반을 두고 있다. 방사붕괴는 정의된 방사선원 체적(Radioactive volume)내에서 샘플화되었고, 방사붕괴로부터 방출된 광자들은 팬텀내에서 추적된 후, 광전효과, 콤프턴과 부착(coherent) 산란과 같은 상호작용들이 팬텀 물질내에서 상대적 상호작용 확률에 의해 시뮬레이션하였다. 그리고 팬텀으로부터 나온 광자들은 섬광카메라쪽으로 추적된다. 그러나, 이 코드에서 광증배관(Photomultiplier Tube)의 시뮬레이션은 포함하지 않는 반면에, 에너지 신호에서의 통계적 변화들은 가우시안 함수에 따라 부가된 에너지를 중첩시키는 것에 의해 시뮬레이션하였다.

섬광카메라 조준기의 시뮬레이션은 광자가 조준기 구멍중의 하나를 통과하는지를 검사하는 기하학적 계산에 바탕을 두고 있고, 또한 조준기 구멍벽들의 가장자리를 통과하는 광자의 벽투과 효과에 대한 접근은 물리적 두께로부터 유효 조준기 두께를 계산하는 것에 의해 실행하였다. 마지막으로, 광자가 조준기를 통과한다면, 광자가 NaI(Tl) 결정에 흡수되거나 이탈할 때까지 추적하여 시뮬레이션하였다.

2. 시뮬레이션

Tc-99m(140 keV)이 SPECT 연구를 위해 시뮬레이션되었다. 시뮬레이션은 감쇠와, 산란 영향을 포함

하였다. 또한, 투사영상의 시뮬레이션은 산란 또는 감쇠가 포함되지 않은 이상적인 경우에 대해서도 적용하였다. 이상적 경우의 시뮬레이션은 투사영상들이 조준기에 의한 퍼짐과 영상재구성에 의한 영향만을 포함하기 때문에 기준 영상으로 이용하였다. 이와 같이, 재구성한 영상들은 이상적인 영상으로써 간주하였다. SPECT 투사영상들은 다음의 방사선원 분포로부터 시뮬레이션되었다.

1) SPECT 시스템

시뮬레이션을 위한 SPECT 시스템의 섬광체 NaI(Tl)는 두께 0.95 cm, 40 x 45 cm이었고, 조준기는 저에너지용 조준기(Low energy general purpose)를 사용하였다. 140 keV에서 SPECT에 대한 에너지 분해능은 9.8 %이었고, 고유공간분해능은 0.32 cm이었고, 화소크기는 0.3 x 0.3 cm²이었다. 각 에너지 창에 대해 $W_1 = 92-125$ keV, $W_2 = 124-126$ keV, $W_3 = 126-140$ keV, $W_4 = 140-154$ keV, $W_5 = 154-156$ keV으로 설정하였다. SPECT 투사영상은 360° 회전모드로 하여 120개를 얻었다. 회전반경은 15 cm이었다.

2) 점선원 시뮬레이션

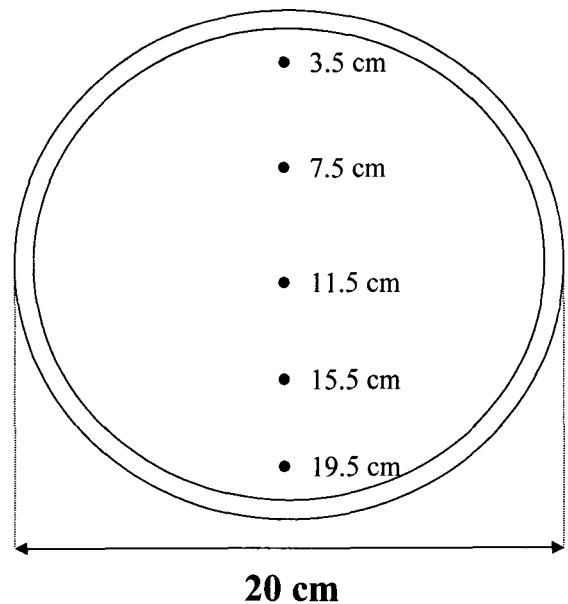


Figure 1. The locations of point sources and dimension of cylindrical phantom.

직경 20 cm 팬텀의 중심선에서 깊이에 따라 Figure 1과 같이 점선원을 놓고 DPW 방법에 대한 계수들을 구하기 위해서 planar 영상에 대한 simulation을 하였다. 이 때, 투사영상당 광자수는 10^7 이었다.

3) Jaszack 팬텀 시뮬레이션

직경 2 cm의 hot spheres와 cold spheres를 cylindrical phantom안에서 시뮬레이션하였다. Sphere들은 Figure 2와 같이 놓여졌다. Hot spheres의 경우, sphere와 배경방사능의 비를 모두 3:0으로 하였고, cold spheres들의 경우, sphere와 배경방사능의 비를 모두 0:3으로 하였다. 이 때, 투사영상당 광자수는 10^6 이었다.

3. 산란보정

산란보정을 위한 방법으로써, 컴프턴창을 이용한 방법(Compton window method, CW), 삼중 에너지창을 이용한 방법(Three window method, TW), 이중 광봉우리창을 이용한 방법(Dual photopeak window method, DPW)을 이용하였다.

1) 컴프턴창을 이용한 방법

Jaszack 등에 의해 제안된 컴프턴창을 이용한 방법은 에너지 파고 분포의 컴프턴 영역에 위치한 Tc-99m 경우 제2의 에너지창(92-125keV)을 이용한 데이터획득에 바탕을 둔다.³⁾ 획득된 산란은 정성적으로 공간분포에 대해 광봉우리창(126-154keV)에서의 산란과 같으나, 정량적으로 인자 k만큼 다르다고 가정된다. k 인자는 광봉우리에서의 산란과 제2의 에너지창에서의 계수사이의 비에 의해서 결정된다. 산란된 광자만을 나타내는 투사영상은 다음 식으로부터 나타낸다.

$$P_{scatt}^I(\theta, r) = k \cdot P_1(\theta, r) \tag{1}$$

P_1 은 제2의 에너지창 W_1 에서 획득된 투사영상을 표시하고, θ 는 투사영상의 각도 그리고 r은 물체의 어떤 슬라이스에 대응하는 투사영상에서의 ray를 표시

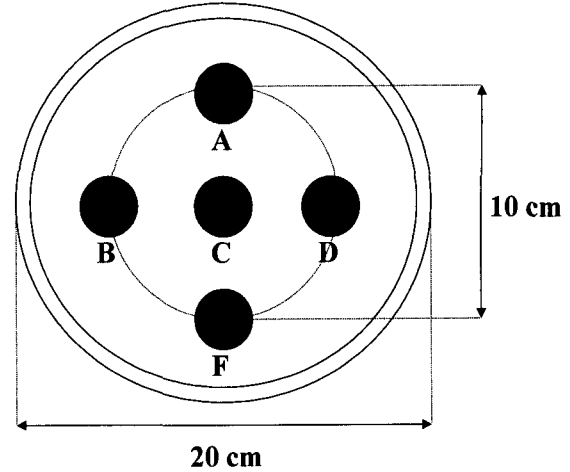


Figure 2. Dimensions of the Jaszack phantom and the size and locations of the simulated spheres. Diameter of spheres is 4 cm.

한다. 본 논문에서는 일반적으로 사용되는 0.5의 k값을 사용하였다.

광봉우리창에서 산란되지 않은 광자의 영상 $P_p(\theta, r)$ 는 다음과 같이 추정된다.

$$P_p(\theta, r) = I(\theta, r) - P_{scatt}^I(\theta, r) \tag{2}$$

$I(\theta, r)$ 은 광봉우리창에서 검출된 광자수이다.

2) 삼중 에너지창을 이용한 방법

Ogawa 등⁸⁾에 의해서 제안된 방법은 세 개의 에너지창을 이용한다. 첫 번째 창은 일반적인 광봉우리창이고, 나머지 둘은 광봉우리창의 양쪽에 위치하는 두 개의 narrow-energy window이다. 광봉우리창에서 산란영상은 광봉우리창의 크기를 고려하면서, 두 개의 부가적인 에너지창으로부터 획득된 투사영상을 평균하는 것에 의해서 얻어진다. 식은 다음과 같다.

$$P_{scatt}^{II}(\theta, r) = \left[\frac{P_2(\theta, r)}{W_2} + \frac{P_5(\theta, r)}{W_5} \right] \cdot \frac{(W_3 + W_4)}{2} \tag{3}$$

광봉우리창에서 산란되지않은 광자의 영상 $P_p(\theta, r)$ 는 다음과 같이 추정된다.

$$P_p(\theta, r) = I(\theta, r) - P_{scatt}^{II}(\theta, r) \quad (4) \quad \text{자의 투사영상은 다음과 같다.}$$

3) 이중 광봉우리 창을 이용한 방법

$$P_p(\theta, r) = I(\theta, r) - P_{scatt}^{III}(\theta, r) \quad (7)$$

이중 광봉우리창을 이용한 산란보정방법은 겹쳐지지 않으면서 인접되어있는 두 개의 에너지창, 즉 광봉우리 주위에서 대칭적으로 위치한 에너지창에서 데이터를 획득하는 것을 바탕으로 한다.⁹⁻¹⁰⁾ Lower energy window 계수들은 산란이 광자에 의해 운반되는 에너지의 감소를 초래하기 때문에, upper energy window 계수보다 더 많이 산란된 광자를 포함한다. 각 화소에서 산란비율(SF, 즉, primary events 수에 대한 산란된 events 수사이의 비율)이 lower and upper window사이의 계수비율의 분석함수(analytical function), $R = I_{lw}(\theta, r)/I_{uw}(\theta, r)$ 로부터 추정될 수 있다고 가정된다. 본 연구에서는 다음과 같은 다항식을 이용하였다.

$I(\theta, r) = I_{lw}(\theta, r) + I_{uw}(\theta, r)$ 는 광봉우리창에서 획득된 광자들의 투사영상이다.

4. 평가

각 산란보정방법들을 비교하기 위하여 영상대조도와 % recovery를 계산하였다. % recovery는 기준영상과 산란보정된 영상의 관심영역에서 얻은 계수의 비율로써 식(8)과 같이 정의하였다.

$$SF(\theta, r) = A + B \cdot R^C \quad (5)$$

$$\% Recovery = \frac{N_{ROI}^{corrected}}{N_{ROI}^{ideal}} \cdot 100\% \quad (8)$$

A, B, C는 상수이다.

$N_{ROI}^{corrected}$ 는 산란보정된 영상의 관심영역에서 얻은 계수이고, N_{ROI}^{ideal} 은 기준영상의 관심영역에서 얻은 계수이다.

광봉우리창에서 산란영상은 다음과 같이 얻어진다.

영상대조도는 sphere 영상의 관심영역으로 계산되었고, 식 (9)와 같다.

$$P_{scatt}^{III}(\theta, r) = I_{lw+uw}(\theta, r) \cdot \left[\frac{SF(\theta, r)}{1 + SF(\theta, r)} \right] \quad (6)$$

$$Contrast = \left[\frac{N_{ROI}}{N_{BG}} - 1 \right] \quad (9)$$

대괄호안에 있는 식은 scatter-to-total ratio, ST를 나타낸다.

N_{ROI} 과 N_{BG} 는 각각 방사선이 분포하는 곳의 관심영역과 분포하지 않는 곳의 관심영역에서 얻은 계

이를 이용하여 광봉우리창에서 산란되지 않은 광

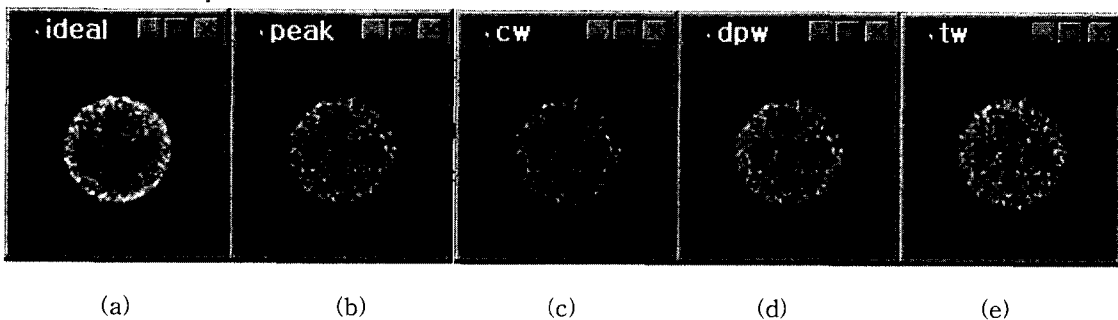


Figure 3. Jaszack phantom images with cold spheres, Ideal : ideal reconstructed image(a), Peak : a reconstructed image before scatter correction(b), CW : compton window method(c), DPW : dual photopeak window method(d), TW : triple window method(e).

Table 1. Contrasts of cold spheres in the Jaszack phantom.

^T ROI	ideal	[‡] BS	[§] CW	[†] DPW	[‡] TW
A	0.55	0.40	0.53	0.47	0.46
B	0.62	0.52	0.90	0.54	0.69
C	0.53	0.40	0.69	0.37	0.53
D	0.61	0.50	0.77	0.45	0.66
F	0.62	0.50	0.79	0.48	0.62
Average	0.59	0.46	0.74	0.46	0.59
[*] STD	0.04 [^]	0.06	0.14	0.06	0.09

^TROI ; region of interest

[‡]BS ; before scatter correction

[§]CW : Compton window method

[†]DPW : dual photopeak window method

[‡]TW : triple window method

^{*}STD : standard deviation

[^] : STD due to noise.

수이다.

결과 및 고찰

DPW 방법에 사용된 다항식의 계수 A, B, C들은 각각 0.902, 0.164, 2.723이었다. Ogawa 등에 의해 제안된 TW 방법을 적용하기 위해 scatter window로써, lower scatter window(W₂)와 upper scatter window(W₅)를 3 keV로 설정하였다. CW 방법을 적용하기 위해서 92-125keV에서 컴프턴 산란영역을 얻어 적용하였다. Figure 3과 Figure 4는 기준영상과 앞에서 나열한 세 가지 방법들을 이용하여 산란보정한 후 재구성된 cold sphere와 hot sphere 영상들을

보여준다. 그리고 Figure 5와 Figure 6은 세 가지 산란보정방법을 이용하여 추정된 산란을 보여주고 있다. Figure 5는 cold sphere 팬텀에 대한 산란을 보여주고 있고, TW에 의해 얻어진 산란이 이상적 산란에 가까웠고, CW와 DPW에 의한 산란은 과대평가되어 나타났다.

Table 1은 산란보정방법들을 cold sphere를 가진 Jaszack 팬텀에 적용하여 대조도를 비교한 것이다. TW를 적용시 cold sphere를 가진 Jaszack 팬텀에서 가장 좋은 대조도를 보였다. 그리고 CW를 적용시 대조도가 과대평가되어 나타났고, DPW를 적용시 대조도는 참값에서 많이 벗어나는 것을 볼 수 있었다.

Table 2는 산란보정방법들을 hot sphere를 가진

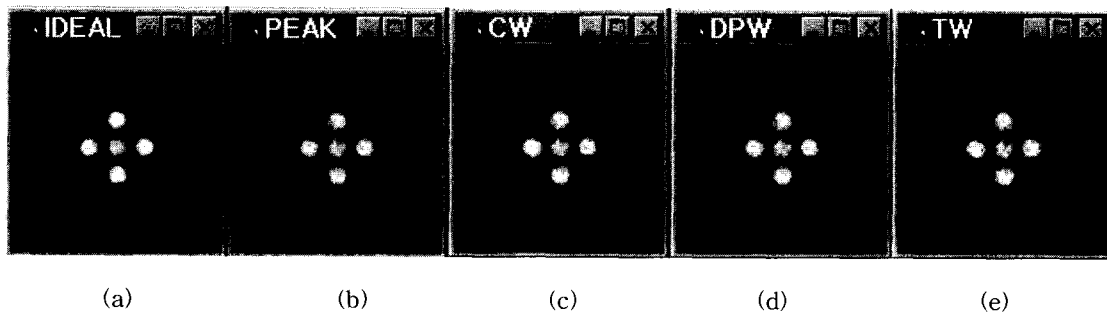


Figure 4. Jaszack phantom images with hot spheres, Ideal : ideal reconstructed image(a), Peak : a reconstructed image before scatter correction(b), CW : compton window method(c), DPW : dual photopeak window method(d), TW : triple window method(e).

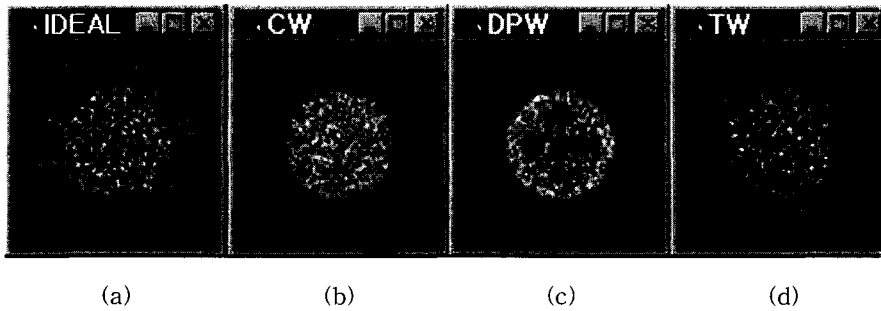


Figure 5. Reconstructed images of only scatter data for Jaszack phantom with cold spheres. Ideal scatter(a), scatter estimated by compton window (CW) method(b), scatter estimated by dual photopeak window (DPW) method(c), scatter estimated by triple window (TW) method(d).

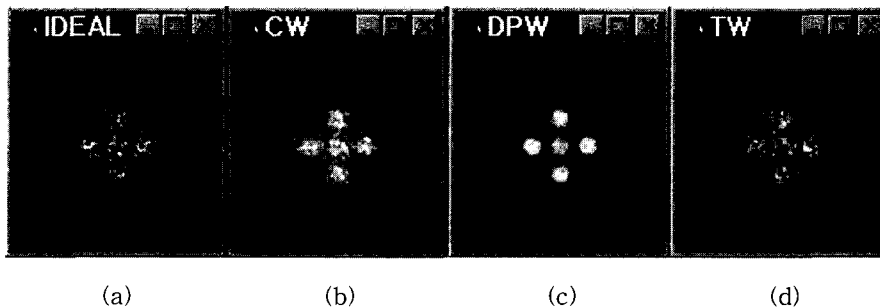


Figure 6. Reconstructed images of only scatter data for Jaszack phantom with hot spheres. Ideal scatter(a), scatter estimated by compton window (CW) method(b), scatter estimated by dual photopeak window (DPW) method(c), scatter estimated by triple window (TW) method(d).

Jaszack phantom에 적용하여 recovery를 비교한 것이다. CW를 적용시 가장 좋은 recovery를 얻었다. 그리고 TW를 적용시 CW를 적용할 때보다 recovery가 높게 나타났다. DPW를 적용시는 recovery가 크게 과소평가되어 나타났다.

Table 3은 hot sphere를 이용하여 산란보정방법들에 대해 대조도를 비교한 것이다. 대조도는 참값에서 19.1 ± 0.13 으로 나타났고, TW를 이용시 대조도는 1.95 ± 0.12 로 이론적인 값과 매우 유사하게 나타났다. 그러나, CW에 의한 대조도는 2.17 ± 0.12 , DPW에 의한 대조도는 1.79 ± 0.09 로 나타났으며, 이것은 산란보정의 데이터에 대한 대조도 1.77 ± 0.09 보다는 높게 나왔지만, CW는 이론적인 값에 비해 과대평가되었고, DPW는 과소평가되어 나타나는 것을 볼 수 있었다.

CW 방법은 두 개의 에너지 창을 이용하여 산란을 보정하는 방법이다. 이것은 k값이 정해졌다면 실

행하는데 가장 쉬운 방법이라고 생각된다. 본 연구

Table 2. Percentage recovery of hot spheres in the Jaszack phantom.

^T ROI	[‡] BS(%)	[§] CW(%)	[†] DPW(%)	[‡] TW(%)
A	120.88	103.60	63.27	106.50
B	122.04	104.87	63.89	106.22
C	125.25	106.39	65.49	107.48
D	121.36	104.23	63.49	106.23
F	120.64	103.71	63.10	105.34
Average	122.03	104.56	63.85	106.35
^{**} STD	1.88	1.14	0.97	0.77

^TROI ; region of interest

[‡]BS ; before scatter correction

[§]CW : compton window method

[†]DPW : dual photopeak window method

[‡]TW : triple window method

^{**}STD : standard deviation

의 CW에 의한 결과에 있어서 대조도와 recovery의 과대평가는 k의 값을 조정하면 참값에 가까워질 것으로 생각된다.

TW은 실행하는데 쉬운 방법이고, cold sphere와 hot sphere에 대해 대조도와 recovery에 있어서 이론치와 거의 유사하게 나타났다. 그리고 이것은 I-131과 같이 여러 개의 광봉우리를 가진 동위원소의 영상에 적용하였을 경우 광봉우리 위의 에너지창이 투과와 산란에 대한 보정을 하는데 CW보다 적용하는데 좋을 것으로 보고가 되고 있다.¹³⁾

DPW 방법은 CW 또는 TW 방법보다 실행하는데 어려움이 따른다. 또한, 본 연구에서 DPW에 대한 결과가 다른 방법들에 비해 좋은 결과를 보여주지 않았다, 이것은 몇몇 논문에서 발표되어져오고 있다. Buvat 등은 다른 크기의 ROI를 적용시 다항식 회귀분석에 의한 곡선 형태가 다르게 나타났다고 보고하였고,¹⁴⁾ Zimmerman 등은 뇌전용 영상카메라, CeraspectTM과 같은 작은 시야의 영상용 시스템에 대해서 이용할 수 없다고 보고하였다.¹⁵⁾ 그러므로, DPW 방법을 임상적용시 시스템에 대한 정확한 calibration을 바탕으로 이루어져야하고, 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

결 론

본 연구는 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 점선원과 Jaszack 팬텀을 이용하여 세 가지 산란보정방법을 비교 연구하였다. 본 연구에서 조사한 세 가지 보정방법들 모두 영상대조도를 개선시켰다. CW 방법은 일단 k가 정해졌다면, 이 방법은 임상적으로 실행하고 사용하는데 가장 쉽다는 장점을 가진다. TW 방법은 복잡한 시스템 calibration 과정을 요구하지 않기 때문에, 실행하는데 가장 쉬운 방법이고, 본 연구에서는 이론적인 값에 가장 가깝게 나타났다. DPW 방법은 복잡한 시스템 calibration 과정을 요구할 뿐만 아니라, 몇몇 연구에서 좋은 결과를 보여준 것과는 달리 본 연구에서는 다른 두 방법에 비해 좋은 결과를 보여주지 않았다.

결론적으로, 정확한 정량분석을 위해서는 산란보정이 수행되어야 한다. 그리고 산란보정에 대한 임상적용을 위해서는 산란보정방법에 대해서 더욱더 많은 연구가 지속되어야하고 SPECT 시스템에 적용하기 위

Table 3. Contrasts of hot spheres in the Jaszack phantom.

[†] ROI	ideal	[‡] BS	[§] CW	[†] DPW	[¶] TW
A	1.98	1.81	2.21	1.83	2.02
B	2.01	1.86	2.28	1.88	2.04
C	1.68	1.62	1.97	1.64	1.75
D	1.95	1.78	2.19	1.80	1.98
F	1.95	1.77	2.18	1.79	1.96
Average	1.91	1.77	2.17	1.79	1.95
**STD	0.13 [△]	0.09	0.12	0.09	0.12

[†]ROI ; region of interest

[‡]BS ; before scatter correction

[§]CW : compton window method

[†]DPW : dual photopeak window method

[¶]TW : triple window method

**STD : standard deviation

[△] : STD due to noise.

해 쉽고 용이한 보정방법을 선택해야할 것이다.

참고 문헌

1. Ljungberg M., Strand S.-V.: Attenuation and scatter correction in SPECT for sources in a nonhomogeneous object: A Monte Carlo study, J. Nucl. Med. 32:1278-1284 (1991)
2. Koral K.F., Swailern F.M., Buchibinder S., Clinthorne N.H., Rogers W.L., Tsui B.M.W.: SPECT dual-energy-window Compton correction: scatter multiplier required for quantification. J. Nucl. Med., 31:90-98 (1990)
3. Jaszack R.J., Greer K.L., Floyd C.E., Harris C.C., Coleman R.E.: Improved SPECT quantification using compensation for scattered photons. J. Nucl. Med. 25:893-900 (1984)
4. Hademenos G.J., King M.A., Ljungberg M., Zubal I.G., Harrell C.R.: A scatter correction method for Tl-201 images: A Monte Carlo investigation. IEEE. Trans. Nucl. Sci. 40:1179-1186 (1990)
5. Ljungberg M., Msaki P., Strand S.-E.: Comparison of dual-window and convolution scatter correction techniques using the Monte Carlo method. Phys. Med. Biol. 8:1099-1110

- (1990)
6. Ljungberg M., King M.A., Hademenos G.J., Strand S.E.: Comparison of four scatter correction methods using Monte Carlo simulated source distributions. *J. Nucl. Med.* 35:143-151 (1994)
 7. Ogawa K., Harata H., Ichihara T., Kubo A., Hashimoto S.: A practical method for position dependent Compton-scatter correction in single photon emission CT. *IEEE. Trans. Med. Imag.* 10:408-412 (1991)
 8. King M.A., Hademenos G.J., Glick S.J.: A dual photopeak window method for scatter correction. *J. Nucl. Med.* 33:605-613 (1993)
 9. Hademenos G.J., Ljungberg M., King M.A., Glick S.J.: A Monte Carlo investigation of the dual photopeak window scatter correction method. *IEEE. Trans. Nucl. Sci.* 40:179-185 (1993)
 10. de Vries D.J., King M.A.: Window selection for dual photopeak window scatter correction in Tc-99m imaging. *IEEE. Trans. Nucl. Sci.* 41: 2771-2778 (1994)
 11. Ljungberg M., Strand S.-E.: A Monte Carlo program for the simulation of scintillation camera characteristics. *Comput. Meth. Prog. Biomed.* 29:257-272 (1989)
 12. de Vries D.J., Moore S.C., Zimmerman R.E., Mueller S.P., Friedland B., Lanza R.C.: Development and validation of a Monte Carlo simulation of photon transport in an Anger camera. *IEEE. Trans. Med. Imag.* 9:430-438 (1990)
 13. Dewaraja Y., Li J., Koral K.: Quantitative ¹³¹I SPECT with triple energy window Compton scatter correction. *IEEE. Trans. Nucl. Sci.* 6: 3109-3114 (1998)
 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.* 36:1476-1488 (1995)
 15. Zimmerman R.E., Williams B.B., Chan K.H., Moore S.C., Kijewski M.F.: Limitations of dual-photopeak window scatter correction for brain imaging. *J. Nucl. Med.* 38:1902-1906 (1997)

The comparisons of three scatter correction methods using Monte Carlo simulation

Jung-Kyun Bong, M.S.,^{*,†} Hee-Joung Kim, Ph.D.,^{*,†}
 Jong-Doo Lee, M.D.,^{*,†} Soo-il Kwon, Ph.D.[†]

^{*}*Research Institute of Radiological Science, Yonsei University,*

[†]*Dept. of Radiology, Yonsei University College of Medicine,*

[†]*Dept of Physics, Kyonggi University,*

Seoul, Korea

Scatter correction for single photon emission computed tomography (SPECT) plays an important role to improve image quality and quantitation. The purpose of this study was to investigate three scatter correction methods using Monte Carlo simulation. Point source and Jaszack phantom filled with Tc-99m were simulated by Monte Carlo code, SIMIND. For scatter correction, we applied three methods, Compton window (CW) method, triple window (TW) method, and dual photopeak window (DPW) method. Point sources located at various depths along the center line within a 20-cm phantom were simulated to calculate the window ratios and corresponding scatter fractions by evaluating the polynomial coefficients for DPW method. Energy windows were located in $W_1=92-125$ keV, $W_2=124-126$ keV, $W_3=136-140$ keV, $W_4=140-141$ keV, and $W_5=154-156$ keV. The results showed that in Jaszack phantom with cold sphere and hot sphere, the TW gave the closest contrast and percentage recovery to the ideal image, respectively, while CW overestimated and DPW underestimated the contrast of ideal one. All three scatter correction methods showed an improved image contrast. In conclusion, scatter correction is essential for improving image contrast and accurate quantification. The choice of scatter correction method should be made on the basis of accuracies and ease of implementation.

Keyword : Monte Caro simulation, compton window method, triple window method, dual photopeak method