

GATE 시뮬레이션을 이용한 I-131 영상의 산란 및 격벽투과 보정방법 연구

*연세대학교 보건과학대학 방사선학과, 보건과학연구소, †가톨릭대학교 인천성모병원

정지영*[†] · 김희중* · 유아람* · 조효민* · 이창래* · 박혜숙*

I-131은 갑상선에 주로 집적되어 갑상선의 기능을 평가하는데 활용됨은 물론 높은 에너지의 베타선을 방출함으로써 암의 치료에도 널리 사용되고 있는 방사선 핵종이다. 그러나 I-131은 다양한 에너지의 감마선을 방출함으로써 핵의학 영상의 정량화가 어렵다. 특히 고에너지 영역의 감마선에 의한 격벽투과(septal penetration)와 산란선은 핵의학 진단영상에 악영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 격벽투과가 영상에 미치는 영향과 I-131의 산란보정 방법을 몬테카를로 시뮬레이션을 활용하여 알아보고자 하였다. 본 실험을 위하여 임상에서 사용되고 있는 범용성 고에너지 조준기를 장착한 핵의학 영상 기기인 FORTE 시스템(Philips, Netherlands)에 대해 모사하였다. 격벽투과가 영상에 미치는 영향을 알아보기 위하여 고에너지 조준기의 격벽을 두 가지 종류로 모사하여 보았다. 한 종류는 실제로 사용하고 있는 납으로 격벽을 모사하였으며, 다른 한 종류는 높은 에너지의 감마선이 투과할 수 없는 밀도와 원자번호가 아주 높은 임의의 물질로 구성되어 모사하였다. 각 각의 조준기를 통해 물팬텀안의 I-131 선 선원의 영상을 획득한 결과 납 격벽에서 획득한 선 선원의 반치폭(Full Width at Half with Maximum, FWHM)과 십치폭(Full width at Tenth with Maximum, FWTM)은 각각 41.2 mm, 206.5 mm였으며, 높은 에너지의 감마선이 투과할 수 없는 임의의 물질로 만든 격벽의 조준기에서는 반치폭과 십치폭이 각각 27.3 mm, 47.6 mm로 측정되었다. 이는 고에너지의 감마선에 의한 격벽투과가 핵의학 영상의 선예도를 나쁘게 한다는 것을 알 수 있다. 또한 I-131을 이용한 핵의학 영상의 산란보정을 위하여 물 팬텀 속의 점 선원을 모사하고 영상을 획득하였다. 산란보정 방법으로는 삼중광붕우리창(Triple Energy Window method, TEW)을 이용하여 획득 영상 내의 산란선을 유추하는 방법을 사용하였다. 그러나 이러한 방법은 중심에너지 창 범위에 따라 유추된 산란선의 양에 영향이 있으므로 더 정확한 산란선 유추를 위해 확장된 삼중광붕우리창(Extended Triple energy Window method, ETEW)을 적용, 기존의 방법과 비교하였다. 실험 결과 시뮬레이션의 데이터 분류를 통한 산란선으로만 획득된 점 선원 영상과 TEW와 ETEW 방법을 통해 유추된 산란선 영상결과, ETEW 방법으로 산란선을 유추한 방법이 기존의 TEW 방법보다 더 정확함을 알 수가 있었다. 본 연구는 시뮬레이션을 통한 I-131의 특성을 평가함으로써 I-131을 이용한 동위원소 치료 및 GATE 프로그램 연구의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

중심단어: I-131, GATE, 격벽투과, TEW, ETEW

서 론

핵의학 진단 영상은 해부학적 정보를 얻는 X선 진단 영상과는 달리 핵종이 집적된 장기의 기능을 확인할 수 있는 장점이 있다. 특히 I-131은 갑상선의 기능 진단뿐만 아니라

높은 에너지의 베타선을 방출하여 종양조직을 괴사시켜 암 치료의 목적으로 널리 사용되어지고 있는 방사선 핵종이다.^{1,2)} 그러나 I-131은 단일 에너지의 Tc-99m 등의 핵종들과 달리 다양한 에너지를(80 keV: 2.6%, 284 keV: 6.1%, 364 keV: 82%, 623 keV: 7.2%, 723 keV: 1.8%) 방출함으로써 영상의 정량화가 어렵고, 고에너지 영역의 감마선으로 인한 격벽투과(septal penetration)와 산란선이 영상의 선예도 및 대조도를 떨어뜨리는 것으로 알려져 있다.^{3,5)} 격벽투과란 고에너지 영역의 감마선이 조준기의 격벽을 투과하여 영상 정보에 불필요한 감마선이 크리스탈로 입사되는 현상을 말한다.⁶⁾ 본 연구에서는 몬테카를로 기법을 바탕으로 한 시뮬레이션인 Geant4 Application for Tomographic Emission

이 논문연구는 2009학년도 연세대학교 학술연구비의 지원에 의하여 이루어진 것임.

이 논문은 2009년 4월 27일 접수하여 2009년 6월 2일 채택되었음.
책임저자 : 김희중, (220-710) 강원도 원주시 흥업면 매지리 234번지 연세대학교 보건과학대학 방사선학과
Tel: 033)760-2475, Fax: 033)760-2815
E-mail: hjk1@yonsei.ac.kr

(GATE) 프로그램을 이용하여 임상에서 사용 중인 감마카메라 시스템을 구현하여 보고 I-131의 격벽투과의 영향을 확인하였다. 또한 산란보정 방법 연구를 위하여 GATE를 활용하여 물팬텀내 I-131 핵종을 모사하였다. Dewaraja⁴⁾와 Ichihara 등⁷⁾은 산란보정 방법 중 삼중광붕우리창 보정방법 (Triple Energy Window method, TEW)이 I-131과 같이 다양한 에너지 붕우리를 가진 핵종의 산란보정을 위한 산란선 유추에 유용하다고 하였다. 그러나 TEW는 주에너지창의 변화에도 고정된 부가에너지 창을 활용함으로써 산란선이 과대 또는 과소평가 될 수 있다고 알려져 있다.⁸⁾ 본 연구에서는 TEW방법을 개선하여 주에너지 창의 변화에 따라 부가에너지창도 비례하여 변화를 주어 산란보정의 효과를 높였다고 알려진 확장된 삼중광붕우리창보정방법(Extended Triple energy Window method, ETEW)을 이용하여 산란선을 유추한 후 두 방법을 비교하였다.⁸⁾

재료 및 방법

본 연구에서는 임상에서 사용되고 있는 범용성 고에너지 조준기(High Energy General Purpose, HEGP)가 장착된 핵의학 영상 기기인 FORTE 시스템(Philips, Netherlands)에 대해 GATE를 활용해 모사하였다. HEGP의 경우 고에너지 감마선의 투과를 방지하기 위하여 저에너지 조준기에 비해 격벽의 두께가 두껍고 높이가 높은 특징이 있다. Table 1은 본 연구에 사용된 FORTE 시스템의 에너지 별 실제 격벽의

사양과 GATE를 통해 모사한 격벽의 사양을 나타낸 것이고, Fig. 1은 본 연구를 위해 사용된 FORTE 시스템의 감마카메라 모식도와 GATE를 이용해 FORTE 시스템을 모사한 것이다.

1. 격벽투과

I-131의 경우 364 keV의 감마선 뿐만 아니라 전체 방출에너지의 7.2%는 623 keV, 1.8%는 723 keV의 고에너지를 방출하는 핵종이다. 따라서 저, 중 에너지를 방출하는 핵종과는 달리 격벽투과의 영향이 매우 크다고 알려져 있다.³⁾ 본 연구에서는 GATE 프로그램을 활용하여 실제 사용 중인 FORTE 시스템의 감마카메라와 FORTE 시스템과 모든 조건이 같지만, 격벽의 구성 물질을 임의로 원자번호가 밀도가 매우 높은 물질로 구성하여 격벽투과가 없는 경우로 모사하여 실제 I-131을 이용한 영상에서 격벽투과의 영향을

Table 1. Specification of septal of FORTE system and using GATE simulation.

	Collimator	Septa (cm)	Radius (cm)	Length (cm)	#Holes
Reference	HEGP	0.1727	0.1905	6	7,000
	MEGP	0.1143	0.1475	4.8	12,900
	LEGP	0.018	0.07	2.47	86,400
Experiments	HEGP	0.173	0.191	6	6,953
	MEGP	0.114	0.148	4.8	12,719
	LEGP	0.018	0.07	2.47	87,665

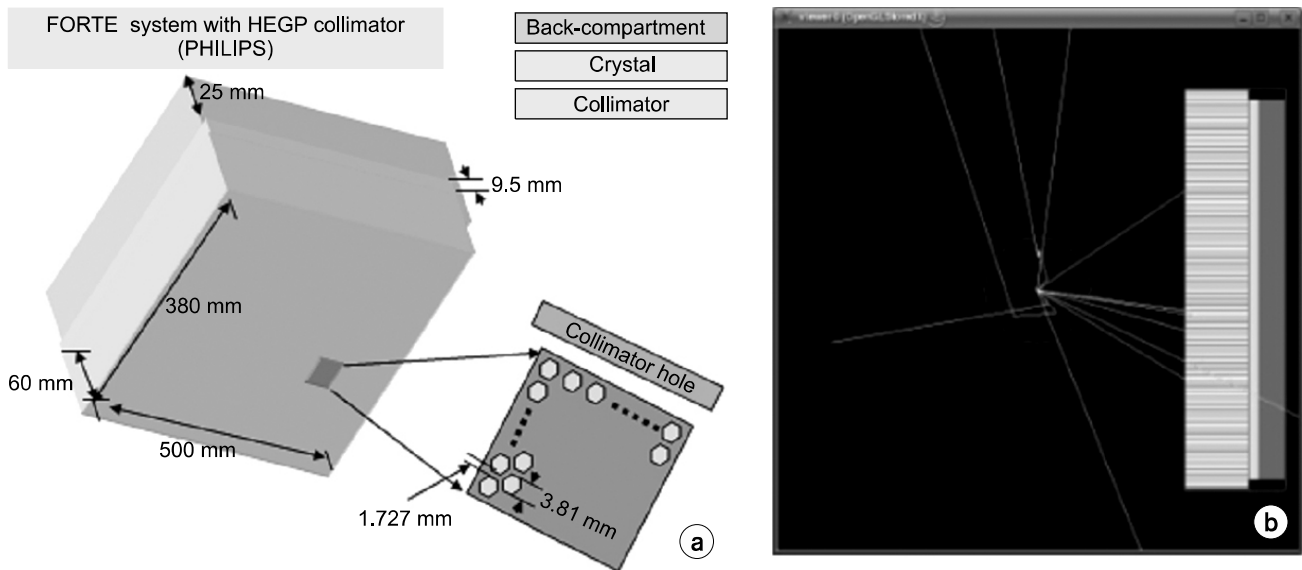


Fig. 1. Illustrated gamma camera head (a) and simulated gamma camera system using GATE (b).

알아보았다. 본 실험을 위하여 지름 10 cm, 높이 10 cm의 물 팬텀안에 반지름 0.0001 cm, 높이 10 cm의 선 선원 3.7 MBq을 모사하여 선원과 감마카메라의 거리를 20 cm로 하여 2분간 영상을 획득하였다.

2. TEW와 ETEW

TEW는 영상획득을 위해 이용하는 중심 에너지창에 포함

된 산란선을 중심에너지창 주변의 부가에너지창을 설정하여 유추해 내는 방법이다. Fig. 2(a)와 식 (1)을 보면 W_m 을 중심에너지창의 너비, 부가에너지창의 넓이를 각각 W_s 라 하여 중심에너지창의 산란선 C_s 를 사다리꼴의 넓이고 추정해 낸 것을 알 수 있다. ETEW는 중심에너지창과 부가에너지창사이의 거리를 계산하여 좀 더 정확한 산란선 추정을 하는 것으로써 식 (1)을 부가에너지창과 중심에너지창의 거

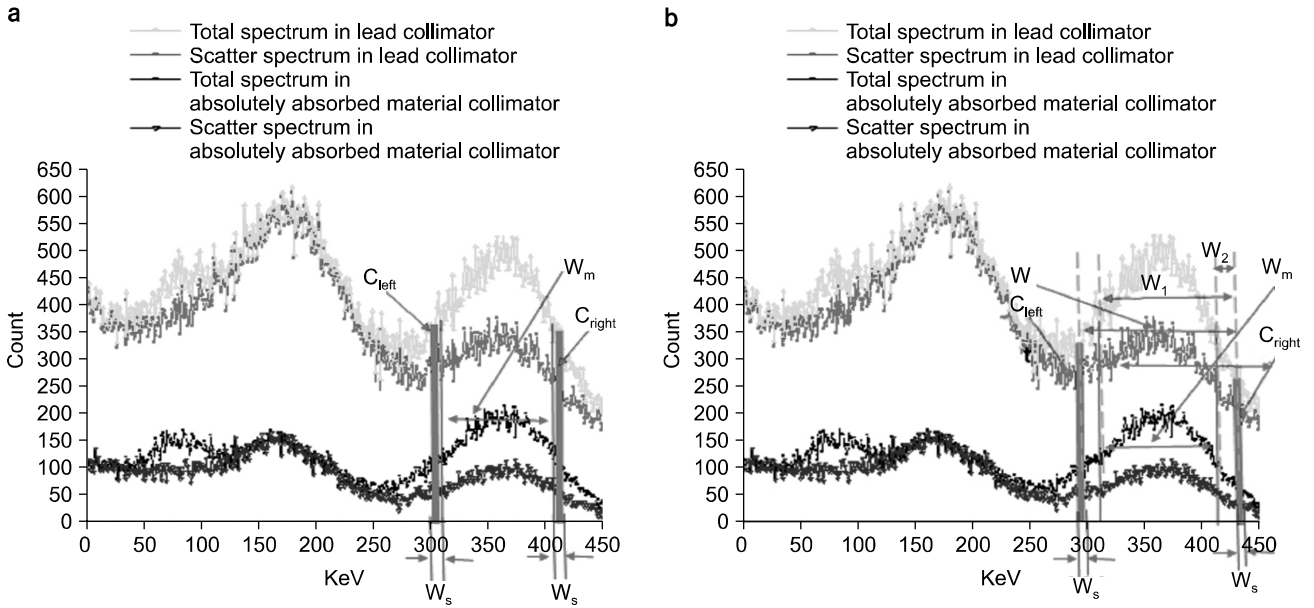


Fig. 2. Schematic diagrams of triple energy window setting. C_{left} and C_{right} are images of sub window. W_s is width of sub window. W_m is distance between C_{left} and C_{right} . W_1 and W_2 are distance between sub windows and main window. TEW method requires abutted scatter energy window settings at both sides of the main energy window (a). ETEW method does not necessarily require abutted window settings at both sides of the main energy window (b).

Table 2. Set-up for main (20%) and sub windows corresponding to correction methods.

	TEW	ETEWS1	ETEWS2
Main window (20%)	327.6 ~ 400.4	327.6 ~ 400.4	327.6 ~ 400.4
Sub (high) window (25 keV)	400.4 ~ 425.4	403.9 ~ 428.9	407.4 ~ 432.4
Sub (low) window (19 keV)	308.6 ~ 327.6	305.1 ~ 324.1	301.6 ~ 320.6
Sub (high) window (10 keV)	400.4 ~ 410.4	403.9 ~ 412.9	407.4 ~ 417.4
Sub (low) window (10 keV)	317.6 ~ 327.6	314.1 ~ 324.1	310.6 ~ 320.6

Table 3. Set-up for main (15%) and sub windows corresponding to correction methods.

	TEW	ETEWS1	ETEWS2
Main window (15%)	336.7 ~ 391.3	336.7 ~ 391.3	336.7 ~ 391.3
Sub (high) window (25 keV)	391.3 ~ 416.3	403.9 ~ 428.9	407.4 ~ 432.4
Sub (low) Window (19 keV)	317.7 ~ 336.7	305.1 ~ 324.1	301.6 ~ 320.6
Sub (high) window (10 keV)	391.3 ~ 401.3	403.9 ~ 412.9	407.4 ~ 417.4
Sub (low) window (10 keV)	326.7 ~ 336.7	314.1 ~ 324.1	310.6 ~ 320.6

Table 4. Set-up for main (10%) and sub windows corresponding to correction methods.

	TEW	ETEW1	ETEW2
Main window (10%)	345.8~382.2	345.8~382.2	345.8~382.2
Sub (high) window (25 keV)	382.2~407.2	403.9~428.9	407.4~432.4
Sub (low) Window (19 keV)	326.8~345.8	305.1~324.1	301.6~320.6
Sub (high) window (10 keV)	335.8~345.8	403.9~412.9	407.4~417.4
Sub (low) window (10 keV)	382.2~392.2	314.1~324.1	310.6~320.6

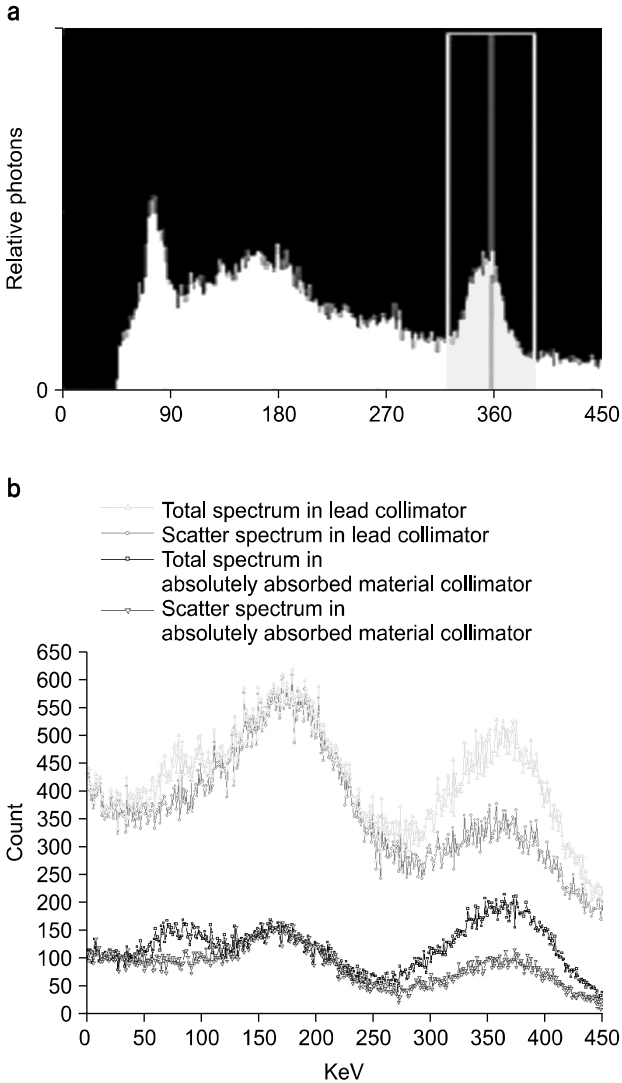


Fig. 3. Energy spectrum were acquired by experiment (a) and Monte Carlo simulation (b).

리까지 고려한 식 (2)로 변형할 수 있다. 본 실험은 일차선(primary gamma ray)과 산란선(scatter gamma ray)을 구분하여 영상을 구성 할 수 있는 시뮬레이션의 장점을 활용하였다. 정해진 에너지창내의 산란선을 TEW와 ETEW 방법으

Table 5. Ratio to total and scatter counter in lead and absolutely absorbed material collimator.

	Lead collimator	Absolutely absorbed material collimator
Total (counter)	231,477	55,648
scatter (counter)	200,932	40,125
Ratio (%) (Scatter/total×100)	86.8	72.1

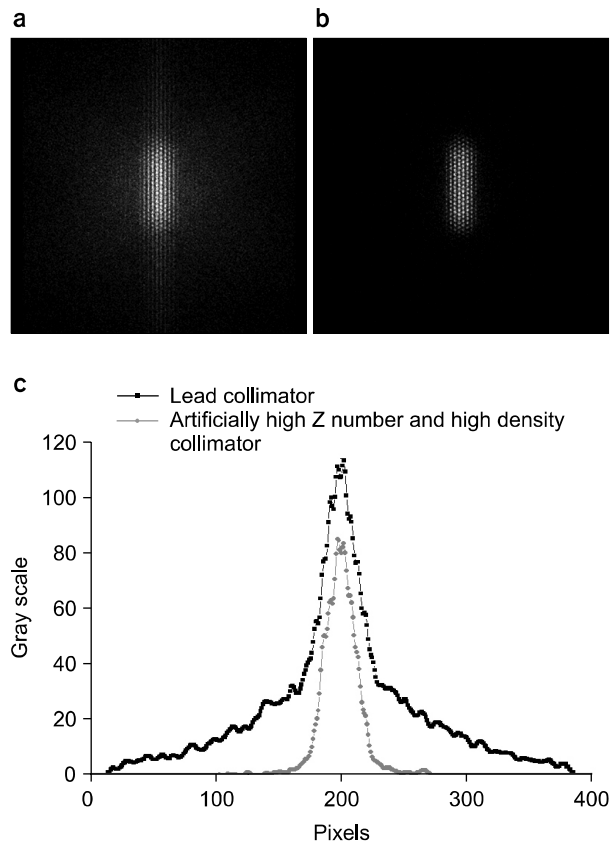


Fig. 4. The line source images in lead collimator (a) and absolutely absorbed collimator (b) and LSF (c).

로 계산하여 획득한 영상과 정해진 에너지창내의 산란선만으로 구성된 영상을 비교하여 어떠한 방법이 산란선 유추

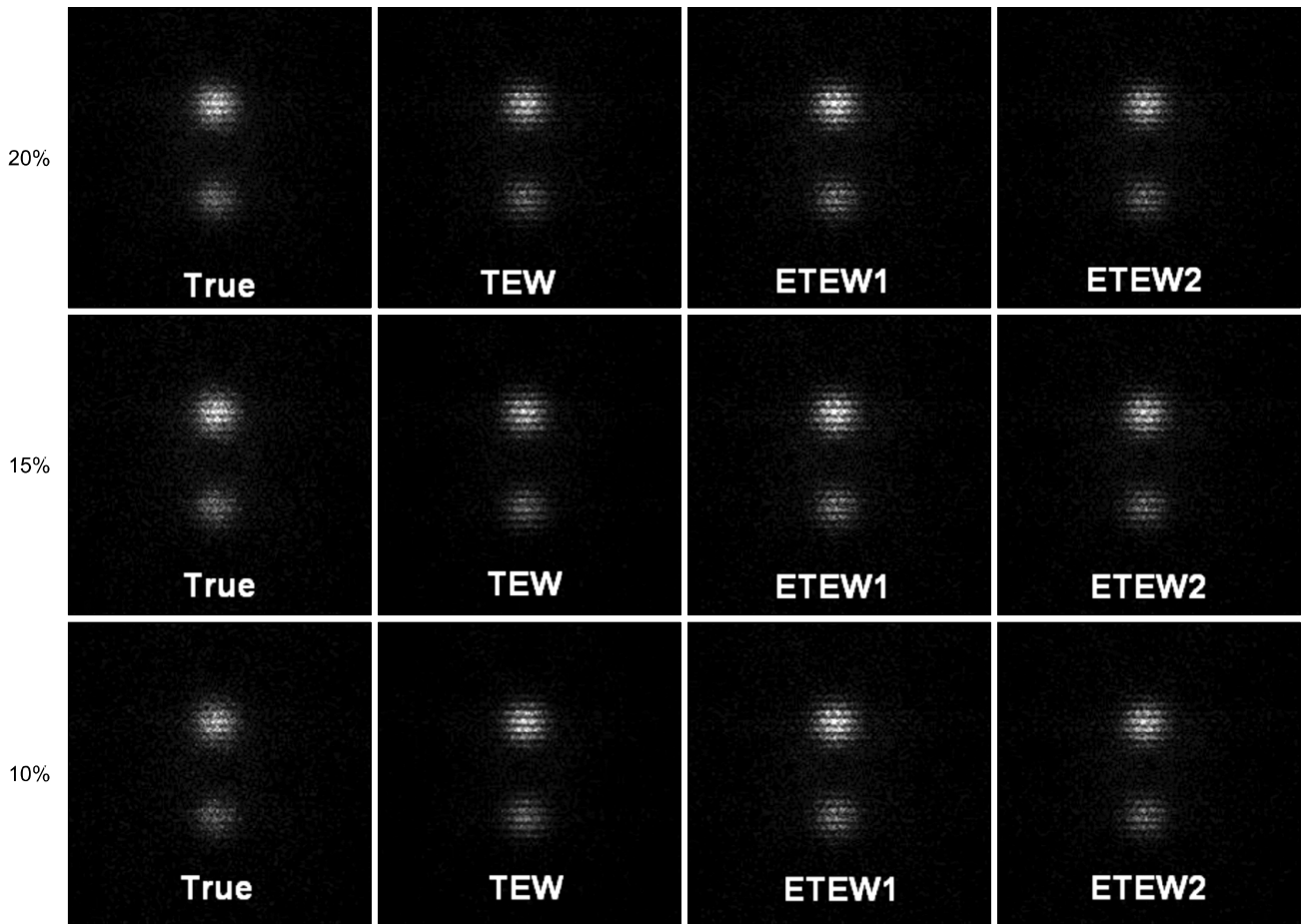


Fig. 5. Calculated scatter image to set-up for main energy windows.

에 유용한지 알아보았다. Fig. 2는 TEW와 ETEW를 활용하기 위한 설정된 에너지창의 모습이다. 식 1, 2는 TEW와 ETEW 각각 산란선 추정을 위한 식을 나타낸다. 또한 Table 2~4는 본 시뮬레이션에서 사용된 TEW와 ETEW의 중심에너지창과 부가에너지창의 범위를 나타낸 것이다. Dewaraja 등(1988)이 TEW방법을 활용하기 위해 선택했던 부가에너지창인 고에너지 영역 19 keV, 저에너지 영역을 25 keV 선택한 것을 ETEW1이라 하였다.³⁾ 또한 부가에너지창 설정 차이에 산란선 추정의 차이를 알아보기 위하여 고에너지영역과 저에너지 영역 부가에너지창 모두 10 keV로 선택한 것을 ETEW2라고 하였다. 추가적으로 중심에너지창 설정의 차이에 따른 산란선추정의 변화를 확인하기 위하여 TEW, ETEW1 및 ETEW2의 방법을 10%, 15%, 20%로 중심에너지창을 설정하여 영상을 획득하였다. 본 실험을 위하여 지름 10 cm, 높이 10 cm의 물 팬텀 안에 총 3.7 Mbq의 반지름 1 cm의 구 선원을 1 : 2의 방사능 농도의 비

로 구성하여 감마카메라와 선원과의 거리를 20 cm으로 조사하였다.

$$C_s \cong \left(\frac{C_{left}}{W_s} + \frac{C_{right}}{W_s} \right) \cdot \frac{W_m}{2} \quad (1)$$

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

결 과

1. Energy spectrum

실험을 통해 획득한 I-131의 에너지 스펙트럼(Fig. 3a)과 GATE 시뮬레이션을 통해 획득한 I-131의 스펙트럼(Fig. 3b) 모두 180 keV와 364 keV 영역 근처에서 에너지 봉우리값을 나타내는 유사함을 확인하였다. 또한 (b)를 보면 검출된 전체 감마선 중에 산란선의 비율이 매우 높음을 확인할 수

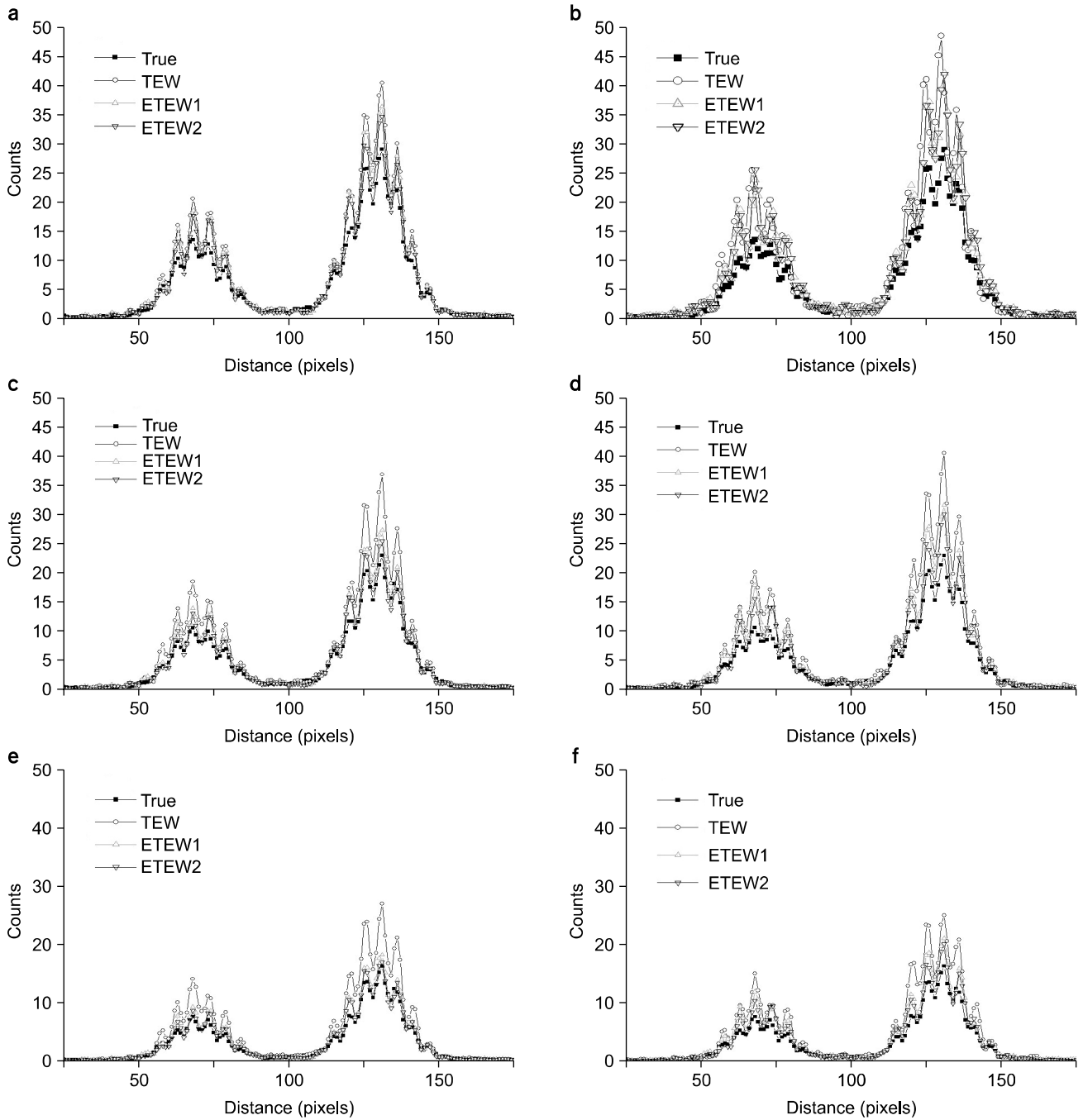


Fig. 6. Estimated profiles of scatter only component for 20% main energy window and low energy sub-window 19 keV, and high energy sud-window 25 keV (a), and both sub high and low energy windows are 10 keV (b), 15% main energy window and low energy sub-window 19 keV, and high energy sud-window 25 keV (c), and both sub high and low energy windows are 10 keV (d), 10% main energy window and low energy sub-window 19 keV, and high energy sud-window 25 keV (e), and both sub high and low energy windows are 10 keV (f).

있었다. 또한 임의의 밀도가 높은 물질로 구성된 격벽에서 획득한 스펙트럼이 산란선의 함유율이 적음을 확인할 수 있었다. Table 5는 납으로 구성된 격벽과 임의의 밀도가 높

은 물질로 구성된 격벽에서의 일차선과 산란선의 비율을 보여준다.

2. 격벽투과

GATE를 통해 모사한 물 팬텀안의 I-131 선 선원의 영상과 그것을 통해 선 퍼짐 영상(Line Spread Function, LSF)을 획득하였다(Fig. 4). (a)는 실제 사용 중인 감마카메라와 같은 납으로 구성된 격벽을 이용해 획득된 영상이고, (b)는 밀도가 매우 높은 임의의 물질을 이용하여 구성된 격벽을 이용하여 획득한 영상이다. (c)는 그 두 영상을 통해 획득한 두 영상의 선 퍼짐 영상이다. (a)의 경우 반치폭(Full Width Half at with Maximum, FWHM)과 십치폭(Full width Tenth at with Maximum, FWTM)은 각각 41.2 mm, 206.5 mm였으며, 높은 에너지의 감마선이 투과할 수 없는 임의의 물질로 만든 격벽의 조건기 (b)에서는 반치폭과 십치폭이 각각 27.3 mm, 47.6 mm가 측정되었다.

3. TEW와 ETEW

GATE를 통해 물 팬텀과 그 중심의 방사능의 농도 1 : 2 인 구 선원을 모사하여 획득한 데이터를 이용하여 중심에너지창의 폭에 따른 TEW와 ETEW의 산란선 추정 영상을 획득하였다(Fig. 5). True는 산란선과 일차선을 구분하여 영상을 구성할 수 있는 시뮬레이션의 특징을 이용하여 정해진 중심창 내의 산란선만을 이용하여 구성된 영상이다. ETEW의 방법이 TEW의 방법을 통해 획득된 영상보다 산란선만으로 이루어진 영상에 더 유사함을 알 수 있었다.

산란선으로 이루어진 영상(Fig. 5)를 통해 프로파일을 획득하였다(Fig. 6). 산란선만으로 만들어진 영상의 프로파일과의 유사성을 보았을 때 ETEW1과 ETEW2의 프로파일이 더 유사하며 봉우리에서도 근접함을 알 수 있다. 그러나 TEW의 경우 ETEW1과 ETEW2의 비해 봉우리 지점 및 전체적으로 더 높은 계수를 보이고 있어 산란선에 대해 과대평가 되었음을 알 수 있다.

결 론

납으로 모사된 격벽을 통해 획득한 스펙트럼보다 임의의 밀도가 높은 물질로 구성된 격벽을 통해 획득한 스펙트럼이 364 keV의 에너지 봉우리가 다른 에너지 봉우리에 비하여 뚜렷하였고 산란선 함유율이 더 적었다(Fig. 3b, Table 5). 이것은 현재 사용되고 있는 납 격벽의 경우 높은 에너지의 감마선이 격벽을 투과하여 크리스탈에 검출되는 격벽 투과가 영상에 악영향을 주는 것을 의미한다. 여기서 높은 에너지의 감마선은 일차선과 높은 에너지의 산란선 모두를

포함한다. 격벽투과에 더 큰 영향을 미치는 것은 높은 에너지의 일차 감마선이다. Fig. 3(b)와 Fig. 4(c)에서 볼 수 있듯이 산란선의 계수도 줄지만 이와 함께 일차선의 계수 또한 감소되었다. 그러나 관심영역(364 keV) 외의 높은 에너지에서의 일차선의 계수가 감소하여 전체적인 영상의 해상도가 향상되는 것으로 나타났다. 또한 Fig. 4(c) 역시 격벽투과가 영상에 악영향을 미치는 것을 보여주는 예로 일반 납 격벽을 이용하여 획득한 선 선원의 FWHM과 FWTM 모두 증가한 것을 볼 수 있다. 이것은 격벽투과가 영상의 선예도에 악영향을 미치는 것을 의미한다. 특히 산란선의 경우 영상의 경계부분에 더 큰 영향을 미치므로 FWTM을 통한 비교가 더욱 뚜렷한 선예도 저하를 보여주었다. 부가에너지창의 선택에 대해 ETEW1과 ETEW2의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다(Fig. 6). 그러나 산란선만으로 이루어진 영상과 TEW 방법으로 산란선을 유추한 프로파일을 보면 ETEW의 방법이 산란선만으로 이루어진 영상의 프로파일과 더 유사한 것을 확인 할 수 있었으며, TEW 방법은 다소 산란선이 과대평가 된 것을 확인할 수 있었다. 이는 TEW 방법은 중심에너지창의 변화에 따라 부가에너지창의 위치가 변화하여 사다리꼴 넓이를 구하는 공식에서 그 높이가 변화하기 때문이다. 그러나 ETEW 방법은 고정된 부가에너지창에 중심에너지창의 변화에 따른 높이 변화를 공식에 적용 시켜 산란선 추정을 더 정확하게 할 수 있었다. 본 논문의 결과는 I-131의 특성평가와 GATE 시뮬레이션을 통한 산란보정연구에 대한 기초자료로서 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Kneth R. Pollard, Thomas K. Lewellen, Mitchell S. Kaplan, et al: Energy-based scatter corrections for scintillation camera image of iodine-131. J Nucl Med 37:2030-2037 (1996)
2. Eugene Mah, Ken M. Spicer: Comparison for medium- and high-energy collimators for 131I-tositumomab dosimetry. J Nucl Med Technol 35:148-153 (2007)
3. Yuni K. Dewara, Michael Ljungberg, Kenneth F. Koral: Characterization of scatter and penetration using monte carlo simulation in 131I imaging. J Nucl Med 37:123-130 (2000)
4. Yuno Dewaraja, Jia Li, Kenneth Koral: Quantitative I-131 SPECT with triple energy window compton scatter correction, IEEE transactions on nuclear science. 45:3109-3114 (1998)
5. Eran Rault, Stefaan Vandenberghe, Roel Van Hoken, et al: Comparison of iamge quality of different iodine isotopes (I-123, I-124, and I-131). Cancer Biotherapy & Radiopharmaceuticals 22:423-430 (2007)

6. Yuni K, Dewaraja, Michael Ljungberg, Kenneth F. Koral: Characterization of scatter and penetration using Monte carlo simulation in ¹³¹I. J Nucl Med 41:123-130 (2000)
7. Ichihara T, Ogawa K, Montomura N, Kudo A, et al: Compton scatter compensation using the triple-energy window method for single- and dual-isotope SPECT, J Nucl Med 34: 2216-2221 (1993)
8. Bong JK, Kim HJ, Son HK, et al: Improve scatter correction for SPECT images: a monte carlo simulation study. Koran J Nucl Med 39:163-173 (2005)
9. Damien Autret, Abdelkader Biter, Ludovic Ferrer, et al: Monte carlo modeling of gamma cameras for I-131 imaging in targeted radiotherapy. Cancer biotherapy and Radiopharmaceuticals 20:77-84 (2005)

Investigation of Scatter and Septal Penetration in I-131 Imaging Using GATE Simulation

Ji-Young Jung*[†], Hee-Joung Kim*, A-Ram Yu*, Hyo-Min Cho*, Chang-Lae Lee*, Hye-Suk Park*

*Department of Radiological Science, College of Health Science and Research Institute of Health Science, Yonsei University, Wonju, [†]The Catholic University of Korea, Incheon St. Mary's Hospital, Incheon, Korea

Scatter correction for I-131 plays a very important role to improve image quality and quantitation. I-131 has multiple and higher energy gamma-ray emissions. Image quality and quantitative accuracy in I-131 imaging are degraded by object scatter as well as scatter and septal penetration in the collimator. The purpose of this study was to estimate scatter and septal penetration and investigate two scatter correction methods using Monte Carlo simulation. The gamma camera system simulated in this study was a FORTE system (Phillips, Nederland) with high energy, general-purpose, parallel hole collimator. We simulated for two types of high energy collimators. One is composed of lead, and the other is composed of artificially high Z number and high density. We simulated energy spectrum using a point source in air. We estimated both full width at half maximum (FWHM) and full width at tenth maximum (FWTM) using line spread function (LSF) in cylindrical water phantom. We applied two scatter correction methods, triple energy window scatter correction (TEW) and extended triple energy window scatter correction (EWEW). The TEW method is a pixel-by pixel based correction which is easy to implement clinically. The EWEW is a modification of the TEW which corrects for scatter by using abutted scatter rejection window, which can overestimate or the underestimate scatter. The both FWHM and FWTM were estimated as 41.2 mm and 206.5 mm for lead collimator, respectively. The FWHM and FWTM were estimated as 27.3 mm and 45.6 mm for artificially high Z and high density collimator, respectively. EWEW showed that the estimation of scatter components was close to the true scatter components. In conclusion, correction for septal penetration and scatter is important to improve image quality and quantitative accuracy in I-131 imaging. The EWEW method in scatter correction appeared to be useful in I-131 imaging.

Key Words: I-131, GATE, Septal penetration, TEW, EWEW