

감마카메라에서의 팬텀 내 선원 위치 변화에 따른 산란 영향 평가

*연세대학교 보건과학대학 방사선학과, 보건과학연구소, †한국원자력의학원 방사선의학연구소 분자영상연구부

유아람*[†] · 이영섭*[†] · 김진수[†] · 김경민[†] · 천기정[†] · 김희중*

^{99m}Tc은 핵의학 영상 획득 물리적 특성이 우수하지만 유기화 작용이 일어나지 않아 갑상선 호르몬의 합성능력이 없는 결절을 진단하는데 제한을 받는다. 이와는 달리 ¹³¹I은 유기화 작용으로 인하여 갑상선의 기능을 평가하는데 활용됨은 물론 높은 에너지의 베타선과 감마선을 방출함으로써 암의 치료에도 널리 사용되고 있는 방사선 핵종이다. 그러나 ¹³¹I은 단일 에너지의 감마선을 방출하는 ^{99m}Tc 등과는 달리, 다양한 에너지의 감마선을 방출함으로써 핵의학 영상의 정량화가 어려운 단점이 있으며, 특히 고에너지 영역의 감마선에 의한 격벽투과와 산란선은 핵의학 진단영상에 악영향을 미치게 되는 단점이 있다. 본 연구에서는 팬텀 내에서 선원의 위치 변화에 따른 산란의 영향을 알아보기 위해 GATE (Geant4 Application for Tomographic Emission) 시뮬레이션 도구로 dual-head 감마카메라(ECAM), PMMA 팬텀(RADICAL, USA), 점선원 0.1 mCi를 사용하여 모사하였다. 팬텀 내에서 ¹³¹I 점선원을 X축, Y축으로 위치를 변화시키며 영상을 획득하였다. 또 산란 매질의 유무에 따른 영향을 확인하기 위해 같은 위치에서 점선원이 팬텀 안에 있을 때와 공기 중에 있을 때를 비교 하였다. 저에너지 선원과 비교를 위해 같은 방법으로 ^{99m}Tc으로도 시뮬레이션 하였다. 또한 시뮬레이션과 똑같은 환경에서 측정 실험을 통해 시뮬레이션의 타당성을 검증 하였다. 이 연구에서는 한 팬텀 내에서도 위치 변화에 따라 산란의 영향이 달라진다는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 이러한 분포 변화는 시뮬레이션과 측정 실험 모두에서 동일한 경향을 나타내었으므로 시뮬레이션이 타당함을 확인할 수 있었다. 시뮬레이션을 이용하면 X축, Y축 위치 변화만 아닌 다양한 경우에 대해서도 위치 변화에 따른 산란 영향의 예상이 가능할 것이며 나아가 산란 보정 연구의 기초 자료로 사용될 것이라 생각한다.

중심단어: 산란 성분, GATE, 감마카메라, ¹³¹I

서 론

140 keV의 단일 에너지를 방출 하는 ^{99m}Tc은 갑상선 암의 진단에 널리 이용되고 있다. 이와는 달리 높은 에너지의 감마선과 베타선을 방출하는 ¹³¹I은 진단과 치료에 널리 사용 된다.¹⁾

핵의학에서 치료와 진단을 목적으로 하는 선량학적 연구는 섬광 계수 영상으로부터 추정되는 체내 잔존 방사성의 정확한 정량적 정보를 필요로 한다. 하지만 산란과 격벽투과 등의 물리적 현상으로 인해 높은 정확도의 정량적 영상

을 얻는데 오차가 발생하게 된다.²⁾ 이러한 여러 현상은 영상의 질을 저하시키는데, ¹³¹I에서 더욱 두드러지게 나타나게 된다. 이것은 ¹³¹I이 80 keV (2.6%), 284 keV (6.1%), 364 keV (81.7%), 637 keV (7.2%), 그리고 723 keV (1.8%) 등의 고에너지 감마선을 방출하기 때문이다.³⁾ 637, 723 keV의 광자는 전체 에너지 방출의 낮은 비율을 차지함에도 불구하고 대조도의 저하, 공간분해능의 저하 등을 일으킨다. 영상의 질을 저하시키는 여러 가지 요인 중 산란 매질의 유무와 산란 매질 내에서 선원의 위치변화에 따른 산란 정도를 확인 하고자 연구를 진행하였다.

이 연구에서는 몬테카를로 모사법을 바탕으로 한 GATE (Geant4 Application for Tomographic Emission) 프로그램을 사용하여 감마카메라의 모델링과 여러 요인들을 실험에 맞게 설정하였다.⁴⁾ 또한, 시뮬레이션의 정확성을 평가하고 그 타당성을 검증하기 위하여 측정 임상에서 사용되는 감마카메라를 이용하여 측정 실험을 진행하였다.

이 논문연구는 2009학년도 연세대학교 학술연구비 지원 및 교육과학기술부와 한국과학재단의 원자력연구개발사업(M20702010002-08 N0201-00200)의 연구 지원으로 수행하였음.

이 논문은 2009년 8월 25일 접수하여 2009년 11월 20일 채택되었음.

책임저자 : 김희중, (220-710) 강원도 원주시 흥업면 매지리 234

연세대학교 보건과학대학 방사선학과

Tel: 033)760-2963, Fax: 033)760-2562

E-mail: hjk1@yonsei.ac.kr

재료 및 방법

1. 재료

1) 팬텀, 선원 주입용 막대 및 선원: 감약과 산란 특성이 인체조직과 유사하여 조직을 대체할 수 있는 균일 재질의 반지름 8 cm, 높이 15 cm의 원통형 Polymethylmethacrylate (PMMA) 팬텀(Fig. 1)을 사용하였다. 선원 주입용 막대의 한 쪽 끝에는 지름 3 mm, 길이 3 mm의 홈이 있다. ^{131}I 과 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 점선원 각각 0.1 mCi를 사용하였다.

2) 영상 장비: GATE 시뮬레이션으로 dual-head 감마카메라(Siemens: ECAM, Chicago, Illinois)를 모사하였으며, 측정 실험을 통하여 타당성을 확인하였다. ^{131}I 이 방출하는 고에너지 감마선을 고려하여 고에너지 범용성 조준기를 사용하였으며, 조준기의 크기는 $44.5 \times 59.1 \times 5.08 \text{ cm}^3$ 이다. 조준기의

구멍은 육각형으로 그 반경은 0.17 cm, 격벽 두께는 0.2 cm 이다. NaI (TI) 검출기 크리스탈의 크기는 $44.5 \times 59.1 \times 0.95 \text{ cm}^3$ 이다.⁵⁾

2. 실험 방법

1) 시뮬레이션: GATE 프로그램을 이용하여 dual-head 감마카메라(ECAM)와 팬텀을 모사였다. Fig. 2는 각 점선원의 위치를 보여주는데 팬텀의 표면과 조준기 사이의 거리는 2 cm이고 팬텀의 중심에 위치한 B와 조준기의 거리는 10 cm 이다. 조준기에서 가장 가까운 위치가 A이며 조준기에서 X축으로 가장 멀리 떨어져 있는 위치가 C인데 A와 C는 Y 축 좌표는 B와 같고 X축으로는 B를 중심으로 각각 $\pm 7 \text{ cm}$ 떨어져 있다. D와 E의 X축 좌표는 B와 같고, Y축으로 각각 $\pm 7.5 \text{ cm}$ 떨어져 있다. 산란매질의 유무에 따른 차이를 비교하기 위해 팬텀을 사용하지 않고 공기 중에서 B와 동

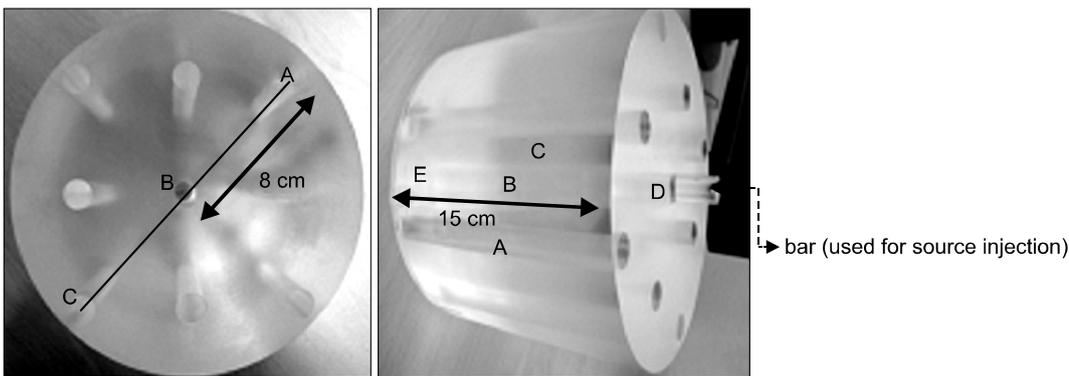


Fig. 1. PMMA Phantom (Radical, USA).

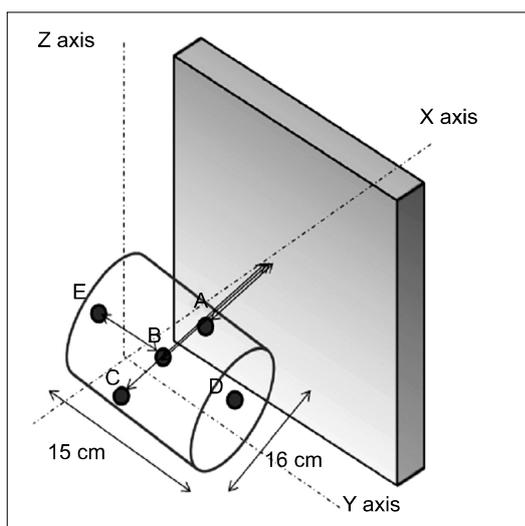


Fig. 2. The 3D coordinates of phantom and collimator.

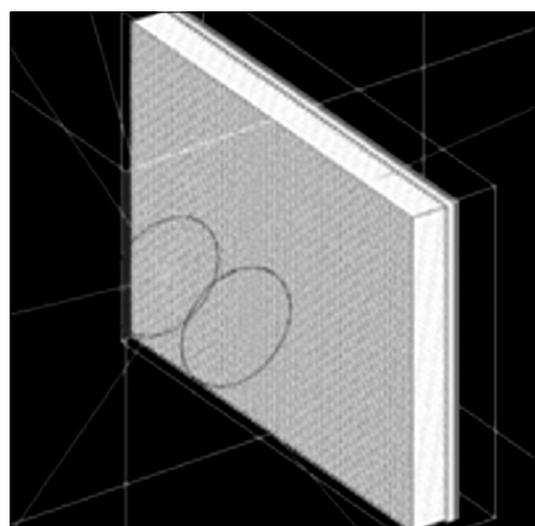


Fig. 3. GATE simulation.



Fig. 4. ECAM gamma camera.

Table 1. Total, primary, scatter counts of the ^{131}I (simulation).

	Primary (Counts), [%]	Scatter (Counts), [%]	Total (Counts)
A	29,064 [28.16]	74,148 [71.84]	103,212
B	14,158 [23.73]	45,503 [76.27]	59,661
C	6,061 [23.08]	20,198 [76.92]	26,259
D	16,274 [27.59]	42,711 [72.41]	58,985
E	15,072 [26.32]	42,191 [73.68]	57,263
Air	39,241 [32.77]	80,507 [67.23]	119,748

Table 2. Total, primary, scatter counts of the $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (simulation).

	Primary (Counts), [%]	Scatter (Counts), [%]	Total (Counts)
A	226,078 [78.43]	62,176 [21.57]	288,254
B	64,356 [53.78]	55,309 [46.22]	119,665
C	19,053 [43.18]	25,071 [56.82]	44,124
D	70,827 [64.55]	38,898 [35.45]	109,725
E	70,990 [64.55]	38,986 [35.45]	109,976
Air	257,421 [85.43]	43,903 [14.57]	301,324

일한 위치에서 실험 하였다. 예를 들면 Fig. 3은 선원이 E 위치에 있을 경우 시뮬레이션 하는 모습이다. 위에서 설명한 여러 경우에 대해서 ^{131}I 과 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 두 종류의 점선원으로 10분간 planar 영상을 획득하였다. 에너지 창은 측정 임상에서 사용하는 감마카메라와 동일하게 15% 에너지 창으로 설정하였고, ^{131}I 에서는 327.6~400.4 keV, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 는 126~154 keV의 에너지 창을 사용하였다. $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 을 사용할 시에도 동일한 조건에서 산란의 영향을 비교하였다.

2) 측정 실험: 시뮬레이션과 동일한 조건이며, X축과 Y축의 선원의 위치를 변화시켜 실험하였다. 점선원은 선원 주입용 막대 끝에 3 mm의 작은 구멍을 만들고 선원 1 mCi/100 μl 중 10 μl 를 덜어내어 선원 주입용 막대 구멍에 0.1 mCi를 주입한 뒤 막대 끝의 구멍을 밀봉하였다. 이때 선원은 표면장력에 의하여 물방울과 같은 모양이 된다. 그 후 주입용 막대를 실험 하고자 하는 위치에 맞게 고정시킨 후 조준기와의 거리를 확인 하고 10분 동안 영상을 획득하였다. Fig. 4는 감마카메라에서 팬텀으로 측정 실험하는 모습이다.

결 과

1. 검출된 광자수

Table 1은 ^{131}I 선원 시뮬레이션으로 획득한 총 광자수(일차선수+산란선수), 일차선 수(산란을 하지 않고 검출기에 도달한 광자수), 산란선 수(산란하여 검출기에 도달한 광자수)를 나타낸다. 이때, 위치 변화에 따른 일차선과 산란선 발생 비율의 변화를 좀 더 알기 쉽게 하기 위하여 총 광자수에 대한 백분율로 나타내었다. GATE 시뮬레이션에서는 결과 값을 구할 때 benchmark라는 과정을 통해 총 광자수, 일차선 수, 산란선 수를 쉽게 구분할 수 있지만 측정 실험에서는 일차선과 산란선의 구분이 용이하지 않기 때문에 이 논문에서는 생략하였다. Table 2는 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 선원 시뮬레이션으로 획득한 총 광자수, 일차선 수, 산란선 수와 그 비율을 나타낸다. 6가지 경우에 대하여 평균 일차선과의 산란선의 비율은 ^{131}I 에서 26.94, 73.06%, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 에서 64.99, 35.01%로 고에너지 감마선을 방출하는 ^{131}I 에서 산란선의 비율은 일차선에 비하여 2.7배이었다.

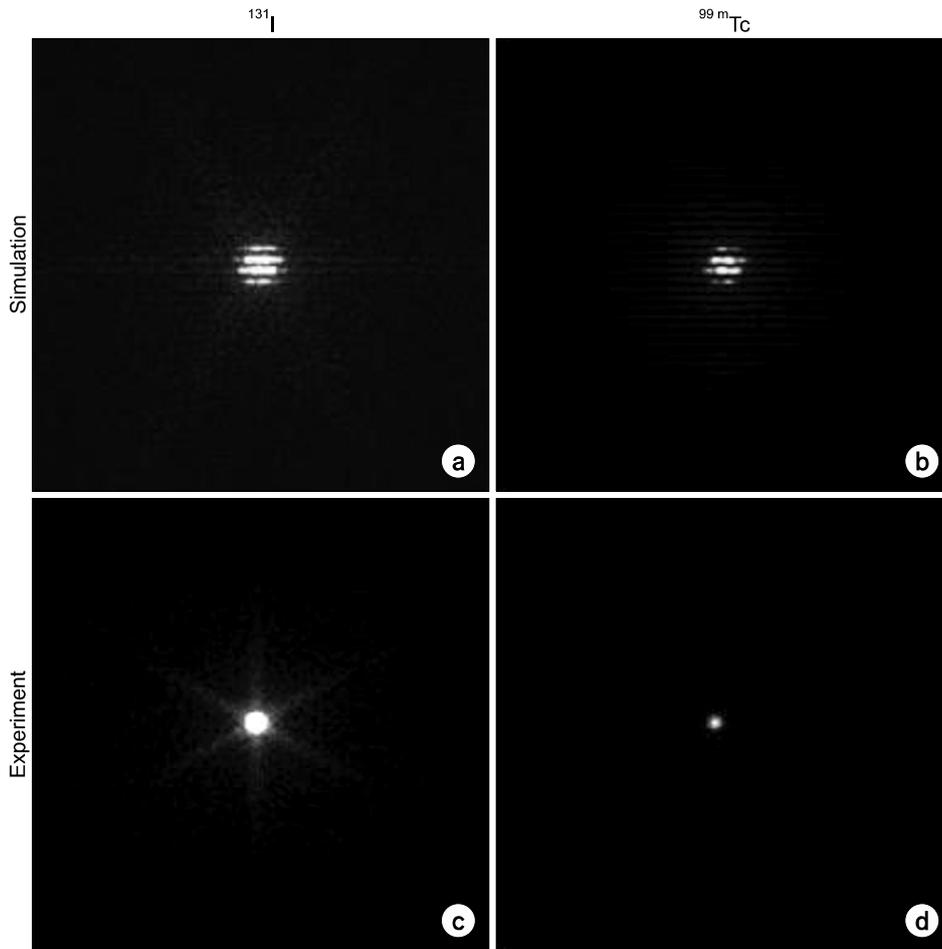


Fig. 5. The Image of point source (located at B). Simulation of ^{131}I (a), $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (b), experiment of ^{131}I (c) and $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (d).

2. 점선원 영상의 프로파일

Fig. 5는 B의 위치에서 시뮬레이션과 측정 실험으로 획득한 ^{131}I 과 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 의 점선원 영상이다. 영상의 픽셀 수는 256×256 , 픽셀 크기는 $0.9 \times 0.9 \text{ mm}^2$ 이다. 시뮬레이션과 측정 실험 모두에서 ^{131}I 의 고에너지 산란선과 격벽 투과(Septal penetration)로 인한 별모양의 인공 부산물을 볼 수 있다. 중요 정보가 없는 가장자리 좌우로 1 cm 정도는 제외하고 영상의 중심에서 프로파일을 그려 각 경우에 대해 비교하였다. Fig. 6에서 선원의 위치에 따른 ^{131}I 과 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 의 프로파일을 보여준다. 시뮬레이션과 측정 실험과의 비교를 쉽게 하기 위해 각 픽셀의 값을 최대값으로 나누어 정규화 하여 한 그래프에 나타내었다.

3. 반치폭(FWHM)과 십치폭(FWTM)

Table 3과 4는 각각 ^{131}I 과 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 점선원의 PSF (Point Spread Function)를 분석하여 얻은 반치폭(FWHM: Full Width at Half

Maximum)과 십치폭(FWTM: Full Width at Tenth Maximum)을 보여준다. 산란선의 비율이 낮고 일차선의 비율이 높은 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 의 반치폭은 ^{131}I 보다 1.7 mm, 십치폭은 4.9 mm 작았다. 산란매질의 영향을 상대적으로 덜 받는 A 위치에서와 공기 중에서는 두 선원간의 값의 차이가 다른 위치에 있을 때에 비해 적었다.

Fig. 6의 (e), (f)를 보면 선원이 산란매질의 중심에 위치한 B에서는 프로파일이 피크 값을 중심으로 거의 좌우 대칭을 보이지만, 선원이 산란매질의 위와 아래에 있는 D와 E에서는 피크 값을 중심으로 좌우 대칭이 아니다. 피크 값을 중심으로 수직선을 내렸을 때 바깥쪽은 프로파일이 급격하게 떨어져 그 폭이 좁고 안쪽은 프로파일이 안으로 퍼지는 경향이 보인다. 따라서 Table 5~8에서 수직선을 중심으로 안쪽(Inside)과 바깥쪽(Outside)의 반치폭과 십치폭을 구해 그 값이 비슷한 B의 위치와 값의 차이가 있는 D, E 위치를 비교하였다. D와 E는 방향만 다를 뿐 거의 같은 조건에 위치하였으므로 값이 거의 비슷하였다. ^{131}I 에서는 FWHM

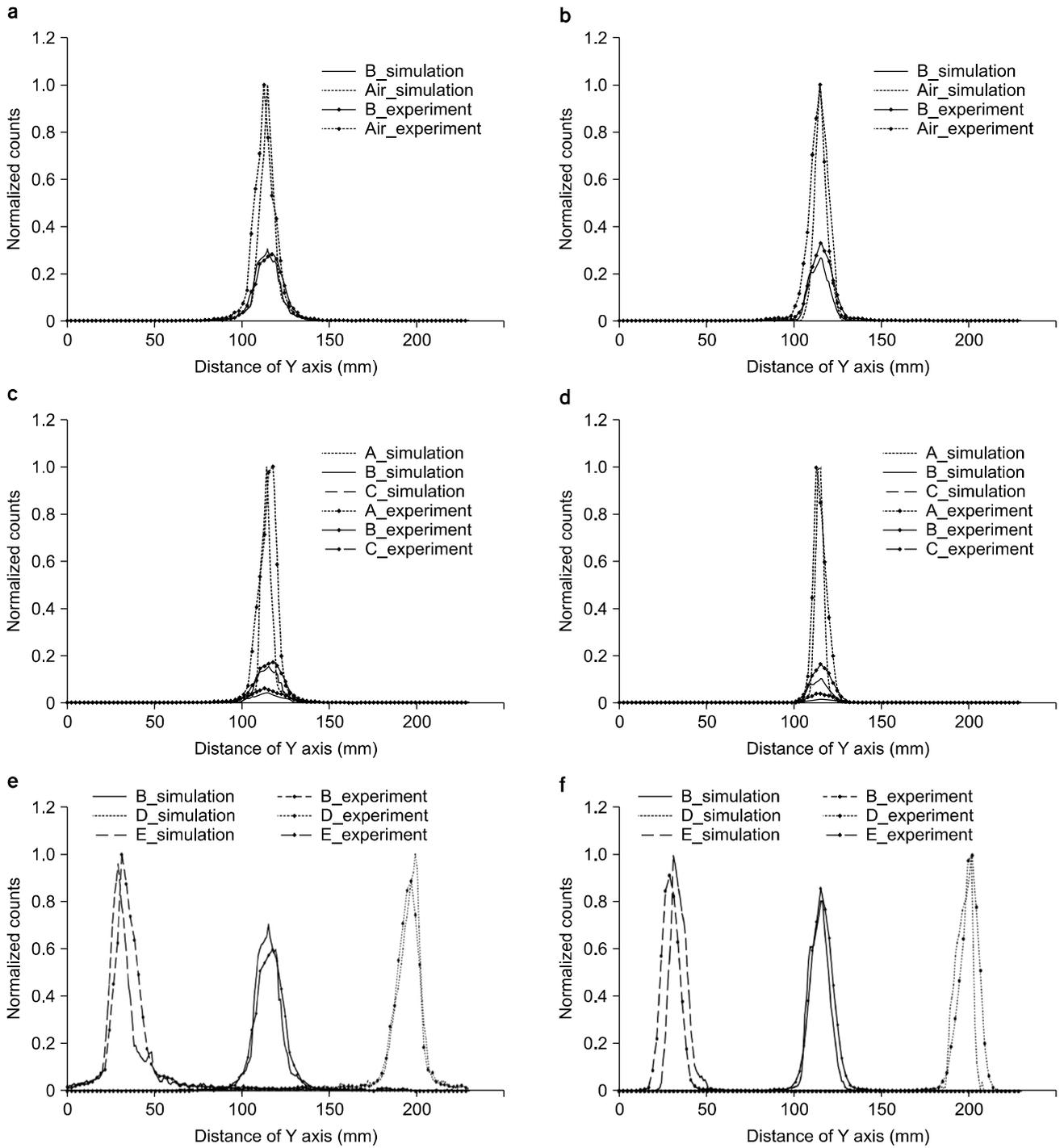


Fig. 6. The profile of point source. ^{131}I profile at B and air (a), $^{99\text{m}}\text{Tc}$ profile at B and air (b), ^{131}I profile at A, B and c (c), $^{99\text{m}}\text{Tc}$ profile at A, B and c (d), ^{131}I profile at B, D and E (e) and $^{99\text{m}}\text{Tc}$ profile at B, D and E (f).

이 안쪽과 바깥쪽에서 약 4 mm 차이가 있었으며 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 에 서는 약 2.5 mm 정도의 차이가 있었다. 이것은 Fig. 6(e), 부분이 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 보다 ^{131}I 에서 넓게 퍼져있는 것에서도 알 수 있다. (f)에서 산란선의 특성을 나타내고 있는 프로파일의 아래

Table 3. FWHM and FWTM of the ¹³¹I.

	Simulation		Experiment	
	FWHM (mm)	FWTM (mm)	FWHM (mm)	FWTM (mm)
A	5.9	12.5	10.9	20.0
B	14.2	26.7	15.0	30.1
C	19.29	33.0	19.6	39.9
D	12.5	25.1	14.2	26.7
E	12.5	25.8	13.9	26.9
Air	7.5	16.7	11.7	22.8

Table 4. FWHM and FWTM of the ^{99m}Tc.

	Simulation		Experiment	
	FWHM (mm)	FWTM (mm)	FWHM (mm)	FWTM (mm)
A	5.6	10.2	7.7	16.0
B	12.8	21.4	13.1	25.4
C	16.6	27.1	16.9	29.9
D	10.8	17.5	11.8	22.9
E	10.9	18.3	12.2	21.3
Air	8.9	16.5	9.8	20.9

Table 5. Scatter evaluation of variation Y-axis in material (¹³¹I simulation).

	B		D		E	
	Outside	Inside	Outside	Inside	Outside	Inside
FWHM (mm)	7.0	7.1	4.5	8.1	4.1	8.5
FWTM (mm)	13.1	13.2	9.2	15.9	9.2	16.6

고 찰

1. 위치 B에서 팬텀 내 선원과 공기 중에서 산란 비교

위치 변화에 따른 영향 평가에 앞서, 산란 매질의 유무에 따른 영향을 알아 보기 위해 B 위치에 선원을 두고 산란 매질이 있을 때와 산란 매질 없이 공기 중에 있을 때를 비교하였다. 시뮬레이션 결과 선원이 산란 매질 없이 공기 중에 있을 때 보다 팬텀 내에 있는 B에서 산란선의 비율이 ¹³¹I에서 67.23%에서 76.27%로 9.04% 증가하였고, ^{99m}Tc에서는 14.57%에서 46.22%, 31.65% 증가하는 것을 Table 1과 2에서 확인할 수 있다. 또한, 팬텀이 있는 B의 경우 공기 중에 있을 때 보다 총 광자수가 ¹³¹I에서 119,748에서 59,661로 50% 감소하고, ^{99m}Tc에서는 301,324에서 119,665로 60% 줄어드는 것을 알 수 있는데 이것은 발생한 산란선은 에너지

Table 6. Scatter evaluation of variation Y-axis in material (¹³¹I experiment).

	B		D		E	
	Outside	Inside	Outside	Inside	Outside	Inside
FWHM (mm)	7.5	7.5	5.2	9.0	5.2	8.7
FWTM (mm)	15.4	14.6	9.4	17.3	10.8	16.1

Table 7. Scatter evaluation of variation Y-axis in material (^{99m}Tc simulation).

	B		D		E	
	Outside	Inside	Outside	Inside	Outside	Inside
FWHM (mm)	6.3	6.5	3.2	7.5	4.0	6.8
FWTM (mm)	10.2	11.2	5.3	12.2	6.2	12.3

Table 8. Scatter evaluation of variation Y-axis in material (^{99m}Tc experiment).

	B		D		E	
	Outside	Inside	Outside	Inside	Outside	Inside
FWHM (mm)	6.6	6.6	5.0	6.9	4.3	7.9
FWTM (mm)	13.3	12.1	9.0	14.0	9.1	12.2

가 작아져 팬텀 내에 흡수되는 비율이 증가하기 때문이다.

Table 3과 4에서 반치폭과 십치폭을 확인할 수 있는데 시뮬레이션과 측정 실험 모두에서 같은 위치에 선원이 있어도 산란 매질이 있을 때 반치폭은 약 4.3 mm, 십치폭은 6.6 mm 증가한 것을 알 수 있었다. Fig. 6(a), (b)의 프로파일에 서도 위의 내용을 확인 할 수 있다는데 선원이 산란매질 안에 있을 때의 피크 값이 산란 매질 없이 공기 중에 있을 때의 30% 정도였고 프로파일의 폭이 넓었다. Fig. 6의 프로파일에서 보면 시뮬레이션보다 측정 실험의 결과가 피크 값을 중심으로 정확한 대칭이 아니라 약간 치우쳐 있는데 이는 측정으로 만든 점선원이 구멍의 중심에 고정되어 있지 않고 중력에 의해 모양이 약간 치우쳤기 때문이라 생각한다. 또 시뮬레이션과 측정 실험에서 피크의 위치가 비슷하긴 하지만 약간 차이가 있는데 시뮬레이션에서는 선원을 원하는 곳에 정확히 위치시키는 것이 가능한데 측정 실험에서는 매우 어려워 이 과정에서 오차가 생겼다. 하지만 이 정도 차이는 이 실험의 목적에 따른 변화 경향을 살펴보는 데 문제가 없다고 생각한다.

2. 팬텀 내 선원과 조준기와의 거리 변화에 따른 산란 비교

팬텀 내 선원의 X축으로의 위치 변화 즉, 선원-조준기 거리에 따른 영향을 알아보기 위해 A, B, C 위치에서 비교하였다. 우선 조준기에서 가장 가까운 곳에 위치한 A에서 가장 멀리 위치한 C까지 변화시켰을 때 검출기에 도달한 총 광자의 양이 ^{131}I 에서는 1/4, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 에서는 1/6.5로 현저하게 줄었다. 또한 선원 조준기 거리가 멀어질수록 광자가 통과해야 하는 산란매질의 양이 많아지기 때문에 일차선의 영향이 줄고 산란선이 증가하는 것을 Table 1과 2에서 확인할 수 있다. Table 3과 4에서 반치폭과 십치폭을 확인할 수 있는데 시뮬레이션과 측정 실험에서 선원 조준기 거리가 멀어질수록 반치폭과 십치폭이 각각 10.6 mm, 17.8 mm 커졌다. 이와 같은 영향은 Fig. 6(c), (d) 그래프로도 살펴 볼 수 있는데 선원이 A에서 B, B에서 C로 이동함에 따라 각각 피크 값이 최대값의 20%, 8%만큼 낮아졌고 그래프의 폭은 넓어지는 것을 확인할 수 있었다.

3. 팬텀 내 선원의 위치 변화에 따른 산란 비교

팬텀 내에서의 Y축으로의 선원 위치 변화의 따른 영향을 알아보기 위하여 B, D, E를 비교하였다. 세 가지의 위치는 조준기에서 팬텀 내 선원까지의 거리는 일정하며 원통형 팬텀의 가운데와 양 밀면으로 움직여 Y축 방향만을 변화시켰다. Table 1, 2에서 B의 위치에 비해 D와 E의 위치일 때 일차선이 ^{131}I 에서 3.2%, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 에서 10.7% 증가하고 그만큼 산란선이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 선원을 둘러싸고 있는 산란매질의 양에 따른 차이로 인함이다. 양 쪽 밀면에서는 등방성으로 방출되는 방사선 중에서 팬텀이 반응하지 않고 밖으로 빠져나가는 비율이 증가하는 반면 선원이 팬텀의 중앙에 있으면 모든 방향으로 방출되는 방사선의 대부분이 산란매질과 반응하기 때문에 B에서 산란선이 증가하는 것이다. 이것은 반치폭과 십치폭에서도 나타나는데 주위에 통과해야 하는 산란매질의 양이 더 많은 B는 분해능이 D와 E보다 1.5 mm 좋지 않았고 방향만 다를 뿐 거의 같은 조건에 위치라고 있는 D와 E는 비슷한 분해능을 보였다. 하지만 Fig. 6의 (e), (f)에서 D와 E는 점선원이 팬텀의 가장자리에 위치하고 있어서 산란성분이 팬텀의 안쪽으로 퍼지는 프로파일을 보였다. 그래서 D와 E의 산란선 분포를 확인할 필요가 있는데 Table 5~8을 통해 변화를 더욱 자세히 알 수 있었다. 프로파일에서 피크 값을 중심으로 수직선을 그렸다고 했을 때 팬텀의 안쪽으로 향하는 쪽을 Inside, 팬텀 바깥쪽으로 향하는 쪽을 Outside로 나누어

서 반치폭과 십치폭을 구하였다. 팬텀의 중앙에 위치한 B에서는 Inside가 Outside의 값이 비슷했으나 D와 E 두 경우 모두 Inside가 Outside보다 FWHM값이 4 mm 컸다. 즉, 산란 매질이 많은 방향으로 산란이 더 많이 일어나는 것을 보여 준다. 이러한 경향은 시뮬레이션과 측정 실험에서 모두 나타나고 있다.

4. 두 핵종(^{131}I , $^{99\text{m}}\text{Tc}$)간의 비교

^{131}I , $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 선원 간의 산란 영향을 비교해 보면 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 를 이용한 결과 역시 선원의 위치변화에 따라 ^{131}I 와 비슷한 경향을 보였다. 전체적으로 ^{131}I 에서 산란선의 비율이 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 보다 38% 높았다. 특히 선원의 위치에 따라 산란선의 비율에 차이가 있었는데 감마선이 통과해야 하는 산란 매질의 양이 적을수록 ^{131}I 과 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 간에 산란선의 비율의 차이가 더 커졌다(C의 위치일 때 20.1% 차이, 공기 중에 있을 때 52.7% 차이). 또한, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 의 반치폭은 ^{131}I 보다 1.7 mm, 십치폭은 약 4.9 mm 작았다. 이는 핵종의 특성뿐 아니라 모든 실험 조건을 동일하게 하기 위하여 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 의 실험에서도 고에너지 범용성 조준기를 사용한 영향도 있을 것이라 생각한다. 또한 이런 경향은 산란성분의 특징을 더 많이 포함하고 있는 십치폭에서 더 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다.

Table 1과 Table 2에서 B 위치와 공기 중에서의 총 광자수가 ^{131}I 에서는 50%, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 에서는 60% 차이가 나는데 이것은 핵종이 방출하는 에너지 차이에 의한 것이라 생각한다. 선원이 산란매질을 통과하면서 광자수가 줄어드는데 ^{131}I 은 방출 감마선의 에너지가 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 보다 크기 때문에 감약되지 않고 투과하여 검출되기까지 양이 많아서 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 보다 감약된 비율이 낮았다. 하지만 산란 매질이 있을 때보다 없을 때 산란선의 비율이 ^{131}I 에서는 9.04%, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 에서는 31.65% 감소하였다.

선원의 위치가 A에서 B, B에서 C로 이동하면서 총 광자수가 ^{131}I 에서는 각각 1.7배, 2.2배 감소하였고 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 에서는 각각 2.4배, 2.7배 감소하였다. 하지만 산란선의 비율이 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 에서 각각 20%, 10% 증가한 반면 ^{131}I 에서는 각각 4%, 0.7%만 증가하였다. 광자수의 감약은 통과하는 산란매질의 양과 선원과 검출기간의 거리에 영향을 받는데 A에서 C까지 이동하면서 고에너지 감마선을 방출하는 ^{131}I 이 총 광자수가 4배, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 이 6.5배 감소하였다. 하지만 A, B, C 위치 변화에 따라 ^{131}I 에서 산란선의 비율이 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 에 비해 차이가 없었다. 따라서 이 실험에 사용한 산란매질에서는 고에너지 감마선이 투과하는데 큰 영향을 주지 않는다고 할 수 있다. 나아가 ^{131}I 영상에서는 선원과 검출기 거리의

조절로 영상의 질을 크게 향상 시킬 수 없음을 알 수 있다.

B와 D, E로의 선원 위치 변화에서는 B가 D, E보다 산란 선이 ^{131}I 에서 4% $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 에서 10% 증가하였고 D와 E는 비슷하였다. 변화율은 ^{131}I 이 작지만 기본적으로 포함하고 있는 산란 성분이 ^{131}I 이 두 배 정도 많으므로 Fig. 6(e), (f)에서 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 보다 ^{131}I 의 프로파일이 산란성분이 많이 포함된 아래 부분이 넓게 퍼져있음을 볼 수 있다.

결 론

임상에서 핵의학 영상은 선원을 인체 내에 주입하여 방출되는 감마선을 인체 외부에서 검출하여 영상을 구성한다. 그리고 표지하는 분자에 따라서 인체 내 특정 부분이 퍼지게 된다.

현재에도 여러 가지 산란보정방법들이 사용되고 있지만⁶⁻⁹⁾ 산란성분이 핵종의 특성과 인체 내에서 선원의 위치에 따라 다르기 때문에 이런 영향까지 고려하는 것이 필요하다. 따라서 이 연구에서는 Fig. 5의 점선원 영상에서 보듯이 고 에너지를 포함한 다 에너지 감마선을 방출하는 ^{131}I 선원으로 위치 변화에 따라 산란의 영향이 달라진다는 것을 확인하였다. 선원의 위치변화에 따른 산란영향의 차이는 ^{131}I 선원에서만 나타나는 현상은 아니다. 하지만 이 연구에서는 동일한 조건에서 저에너지 감마선을 방출하는 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 과 비교하였다. 이를 통해 산란선의 제거를 위해 고에너지 범용성 조준기를 사용하더라도 ^{131}I 선원이 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 보다 산란선이 38%, 반치폭은 1.7 mm 증가함을 확인하였다. Table 3과 4에서 전체적인 값이 시뮬레이션보다 측정 실험에서 더 크게 나왔다. 이는 시뮬레이션 상에서는 측정 실험과 비교하여 장비의 케이스나 테이블의 묘사에 차이가 있고 또 시뮬레이션에서는 점선원의 크기를 0.001 mm로 지정하였으나 측정 실험에서는 그 크기로는 원하는 방사선량을 주입하기가 불가능하여 점선원의 지름이 3 mm이기 때문이다. 하지만 선원의 위치에 따른 값의 변화 경향은 비슷하였다. Fig. 6에서 ^{131}I 과 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 의 프로파일을 비교하여도 ^{131}I 의 산란선 영향을 볼 수 있다. Fig. 6에서는 시뮬레이션과 측정 실험과의 비교를 쉽게 하기 위해 각 픽셀의 값을 최대값으로 나누어 정규화하여 한 그래프에 나타내었다. 하지만 이 과정을 생략한다면 특히 ^{131}I 선원에서 시뮬레이션과 측정 실험 간의 값이 5배 정도 차이를 보인다. 이것은 시뮬레이션 과정에서 선원을 묘사할 때 측정 실험에 사용한 0.1 mCi 중 다양한 에너지 분포를 가지는 ^{131}I 에서 364 keV에 해당되는 에너지 비율만을 묘사했기 때문이다. 140 keV의 단일

에너지의 감마선 방출로 묘사한 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 에서는 시뮬레이션과 측정 실험 간의 값의 차이가 크지 않았다. 같은 스케일로 표현하여 시뮬레이션과 측정 실험을 한 그래프에 나타냄으로써 시뮬레이션의 타당성을 확인할 수 있었다. 따라서 시뮬레이션을 이용하면 이 논문에서 지정된 다섯 가지 위치 뿐 아니라 다른 위치에서의 산란 영향도 예상이 가능할 것이다. 단일 에너지 감마선을 방출하는 핵종보다 에너지가 다른 여러 종류의 감마선 방출하는 핵종에서는 영상 획득 시 에너지 윈도우 설정에 따른 변화가 클 것이다. 이 논문에서는 에너지 창 15%에서 실험 하였지만 이후에 에너지 창을 조절해가며 실험한다면 더 정확한 산란선의 영향을 분석 할 수 있을 것이다. 이 연구의 결과는 ^{131}I 영상의 질 개선을 위한 새로운 산란 보정 연구의 기초 자료로 사용될 것이라 생각한다.

감사의 글

이 연구 수행을 위한 팬텀 제작에 도움을 주신 우광선 선생님, Gamma Camera (ECAM) 사용에 도움을 주신 최보선, 김경호 선생님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Rault E, Vandenberghe S, Holen RV, Beenhouwer JD, Staelens S, Lemahieu I: Comparison of Image Quality of Different Iodine Isotopes (^{123}I , ^{124}I , and ^{131}I). *Cancer Biotherapy & Radiopharmaceuticals* 22:423-430 (2007)
2. Autret D, Bitar A, Ferrer L, Lisbona A, Bardies M: Monte Carlo Modeling of Gamma Cameras for ^{131}I Imaging in Targeted Radiotherapy. *Cancer Biotherapy & Radio Pharmaceuticals* 20:77-84 (2005)
3. Dewaraja YK, Ljungberg M, Koral KF: Characterization of Scatter and Penetration Using Monte Carlo Simulation in ^{131}I Imaging. *JNM* 41:123-130 (2000)
4. Jan S, Santin G, D Strul D, et al: GATE: a simulation toolkit for PET and SPECT. *Phys Med Biol* 49:4543-4561 (2004)
5. Wollenweber SD, Tsui BMW, Lalush DS, et al: Initial Characterization of the Siemens E.CAM+: a Dual-Detector Camera with Coincidence Imaging Capability. *IEEE Nuclear Science Symposium* 3:1470-1476 (1998)
6. Dewaraja YK, Li J, Koral KF: Quantitative ^{131}I SPECT with Triple Energy Window Compton Scatter Correction. *IEEE Transactions on Nuclear Science* 45:3109-3114 (1998)
7. Dewaraja YK, Ljungberg M, Fessler JA: 3-D Monte Carlo-Based Scatter Compensation in Quantitative I-131 SPECT Reconstruction. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 53: 181-188 (2006)
8. Zaidi H, Koral KF: Scatter modeling and compensation in

emission tomography. Eur J Nucl Med Mol Imag 31:761-782 (2004)

9. Moore SC, Kijewski MF, Muller SP, Rybicki F, Zimmer-

man RE: Evaluation of Scatter compensation methods by their effects on parameter estimation from SPECT projections. Med Phys 28:278-287 (2001)

The Evaluation of Scattering Effects for Various Source Locations within a Phantom in Gamma Camera

A-Ram Yu*[†], Young-Sub Lee*[†], Jin Su Kim[†], Kyeong Min Kim[†],
Gi Jeong Cheon[†], Hee-Joung Kim*

*Department of Radiological Science, College of Health Science and Research
Institute of Health Science, Yonsei University, Wonju, [†]Molecular Imaging Research Center,
Korea Institute Radiological and Medical Science, Seoul, Korea

¹³¹I is a radiological isotope being used widely for treatment of cancer as emitting gamma-ray and it is also applied to estimate the function of thyroid for its accumulation in thyroid. However, ¹³¹I is more difficult to quantitate compared to ^{99m}Tc, because ¹³¹I has multiple energy gamma-ray emissions compared to ^{99m}Tc which is a mono energetic gamma-ray source. Especially, scattered ray and septal penetration resulted by high energy gamma ray have a bad influence upon nuclear medicine image. The purpose of this study was to estimate scatter components depending on the different source locations within a phantom using Monte Carlo simulation (GATE). The simulation results were validated by comparing with the results of real experiments. Dual-head gamma camera (ECAM, Chicago, Illinois Siemens) with high energy, general-purpose, and parallel hole collimators (hole radius: 0.17 cm, septal thickness: 0.2 cm, length: 5.08 cm) was used in this experiment. The NaI crystal is 44.5×59.1 cm in height and width and 0.95 cm in thickness. The diameter and height of PMMA phantom were 16 cm and 15 cm, respectively. The images were acquired at 5 different locations of ¹³¹I point source within the phantom and the images of ^{99m}Tc were also acquired for comparison purpose with low energy source. The simulation results indicated that the scattering was influenced by the location of source within a phantom. The scattering effects showed the same tendency in both simulation and actual experiment, and the results showed that the simulation was very adequate for further studies. The results supported that the simulation techniques may be used to generalize the scattering effects as a function of a point source location within a phantom.

Key Words: Scatter components, Monte Carlo simulation, Gamma Camera, ¹³¹I